

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง



กรมทางหลวง



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจร
โดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัย
ในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

รายงานขั้นสุดท้าย

Final Report

จัดทำโดย



บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด

กรกฎาคม 2566

รายละเอียดโครงการ

ผู้ว่าจ้าง	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
ผู้รับจ้าง	บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด
เลขที่สัญญา	สจ.1/2566 ลงวันที่ 31 ตุลาคม 2565
วันเริ่มโครงการ	วันที่ 1 พฤศจิกายน 2565
วันสิ้นสุดโครงการ	วันที่ 28 กรกฎาคม 2566
ระยะเวลาดำเนินงาน	270 วัน

คณะกรรมการ

1.	ดร.พลเทพ เลิศวรรณิช	ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง	ประธานกรรมการ
2.	นายเสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ	กรรมการ
3.	นายพรชัย ศิลารมย์	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ	กรรมการ
4.	ดร.สุกิจ ยินดีสุข	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ	กรรมการ
5.	ดร.พัฒน์พงศ์ ทองสุข	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ	กรรมการ
6.	นายวิศิษฐ์ศักดิ์ หนูสุวรรณ	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	กรรมการ
7.	นายอาร์กซ์ มณฑา	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	กรรมการ
8.	ดร.ราชวัลลภ กัมพูพงศ์	วิศวกรโยธาชำนาญการ	กรรมการและวิศวกรกำกับโครงการ
9.	นายวุฒิชัย อมรประสิทธิ์ผล	วิศวกรโยธาชำนาญการ	กรรมการและผู้ช่วยวิศวกรกำกับโครงการ

ที่ปรึกษา บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด

1.	นายธีระพงษ์ วราชิต	ผู้จัดการโครงการ
2.	รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน	ผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง
3.	ผศ.ภาณุเมศวร์ ศิรินรานันตร์	ผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบโครงสร้าง
4.	นายสันติสุข เชื้อมชัยตระกูล	ผู้เชี่ยวชาญด้านการบำรุงรักษาสะพาน
5.	นายธภัทร เล็กเอกรัตน์	ผู้เชี่ยวชาญด้านการสำรวจ

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาแนวทางการเสริมกำลังคานและพื้นของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ซึ่งเป็นสะพานระบบพื้น-คานประเภทคานคอนกรีตอัดแรง ช่วงแขวน 50 เมตร จำนวน 12 ช่วง อายุการใช้งาน 57 ปี (พ.ศ. 2566) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้พิจารณาการปรับปรุงขยายผิวจราจรบนสะพานตามความประสงค์ของสำนักงานทางหลวงที่ 4 (ตาก) ควบคู่กับการเสริมกำลังไปด้วย การวิเคราะห์ได้พิจารณาการเสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพานภายหลังจากการเสริมกำลังร่วมกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น โดยแนวทางการเสริมกำลังที่ทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าเสริมกำลังและค่าปรับปรุงขยายผิวจราจร ณ ปัจจุบันและค่าก่อสร้างสะพานใหม่ในอนาคตเมื่อคานสะพานเสื่อมสภาพจนสิ้นอายุการใช้งานภายหลังจากการเสริมกำลังเทียบต่ออายุบริการภายหลังจากการเสริมกำลังมีค่าต่ำที่สุด จะถือว่าเป็นแนวทางการเสริมกำลังที่เหมาะสม การเสื่อมสภาพพิจารณาเฉพาะปัจจัยจากการใช้งาน ได้แก่ ความล้าที่เกิดขึ้นกับคานและพื้นสะพานเนื่องจากการจราจรของรถบรรทุก การประเมนการเสื่อมสภาพอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีการเจาะเก็บตัวอย่างวัสดุและการตรวจวัดพฤติกรรม การรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน รวมถึงการคาดการณ์ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกมาประกอบการประเมิน การเสริมกำลังพื้นพิจารณา การเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างโดยใช้ Shotcrete การเพิ่มความหนาพื้นด้านบนโดยใช้ Ultra High Performance Concrete (UHPC) และการเพิ่มคานทางขวางรองรับพื้น รวมถึงการพิจารณาหรือพื้นเดิมทิ้งและก่อสร้างพื้นใหม่ทดแทน การเสริมกำลังคานพิจารณา การเพิ่มการอัดแรงคาน และการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มการอัดแรงคานและปรับปรุงขยายผิวจราจรปีพ.ศ. 2566 การหรือพื้นสะพานเดิมทิ้งและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ปีพ.ศ. 2585 และการก่อสร้างสะพานใหม่ปีพ.ศ. 2614 เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการเสริมกำลังปรับปรุงสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง



Abstract

Strengthening schemes for the northbound approach of Kittikachorn Bridge were investigated. This 57-year-old slab-on-girder bridge comprises 12 spans of 50-m-long pre-stressed concrete girders. Roadway widening was also taken into consideration in the strengthening design. Four strengthening methods were proposed for deck strengthening i.e., shotcrete jacketing, UHPC jacketing, rib strengthening, and deck replacement; and two for girder strengthening i.e., additional pre-stressing and CFRP strengthening. The combination of deck and girder strengthening methods that yield minimum life-cycle cost with respect to extended service life is considered to be the most appropriate strengthening scheme. Life-cycle cost includes initial strengthening and roadway widening costs, and future construction cost of new bridge at the time the girder deteriorates to an unacceptable level of performance. Deterioration process considered was the fatigue damage due to truck traffic. Fatigue curves of RC deck and PC girder presented in the previous studies were utilized to capture the deterioration process. Cored sampling and in-field bridge load tests as well as truck traffic forecast were accomplished to supplement the fatigue analysis. It was found in this study that additional pre-stressing of the girders in 2566 B.E., deck replacement in 2585 B.E., and construction of new bridge in 2614 B.E. yielded the lowest life-cycle cost; and is recommended as the strengthening scheme for the northbound approach of Kittikachorn Bridge.

บทสรุปผู้บริหาร

สะพานกิตติขจรข้ามแม่น้ำปิงที่จังหวัดตากนับว่าเป็นสะพานที่มีความสำคัญต่อการคมนาคมทางถนนของประเทศ สะพานตั้งอยู่บนทางหลวงหมายเลข 1 บริเวณกิโลเมตรที่ 520 ซึ่งเป็นเส้นทางหลักสู่ภาคเหนือตอนบน สะพานแห่งนี้ประกอบด้วยสะพานฝั่งซ้ายทาง (ขาขึ้น) และสะพานฝั่งขวาทาง (ขาล่อง) สะพานฝั่งซ้ายทางหรือสะพานเดิมเปิดให้บริการมาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2509 ส่วนสะพานฝั่งขวาทางได้ถูกก่อสร้างขึ้นเมื่อปีพ.ศ. 2543 เพื่อช่วยแก้ปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณสะพานเดิม สะพานทั้งสองแห่งเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงขนาดใหญ่ของกรมทางหลวง แต่ละสะพานมีความยาว 600 เมตร ประกอบด้วยคานช่วงแฉวน 50 เมตร จำนวน 12 ช่วง

สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางถือได้ว่าเป็นสะพานรุ่นเก่าของกรมทางหลวง สะพานแห่งนี้ได้ถูกออกแบบโดยใช้ชุดน้ำหนักบรรทุก AASHTO H20-44 ซึ่งมีน้ำหนักต่ำกว่าชุดน้ำหนักบรรทุก HL-93 ที่สำนักสำรวจและออกแบบใช้ออกแบบในปัจจุบันค่อนข้างมาก อีกทั้งสะพานยังผ่านการใช้งานมากกว่า 57 ปี (พ.ศ. 2566) จึงมีความจำเป็นที่สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางจะต้องได้รับการตรวจสอบและประเมินความปลอดภัย รวมถึงปรับปรุงเสริมกำลังเพื่อให้สะพานมีความปลอดภัยตามมาตรฐานการออกแบบ ในส่วนสะพานฝั่งขวาทาง สะพานฝั่งขวาทางจัดเป็นสะพานที่ยังมีอายุการใช้งานไม่มาก ประกอบกับสะพานฝั่งขวาทางยังคงมีสภาพที่ดี ดังนั้น ในการศึกษารุ่นนี้ จึงพิจารณาเฉพาะการตรวจสอบประเมินความปลอดภัยและเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเท่านั้น โดยได้พิจารณาการปรับปรุงขยายผิวจราจรบนสะพานฝั่งซ้ายทางตามความประสงค์ของสำนักงานทางหลวงที่ 4 (ตาก) ควบคู่กับการเสริมกำลังไปด้วย โดยก่อนการออกแบบเสริมกำลังได้ทำการตรวจสอบสภาพปัจจุบันของสะพาน ได้แก่ การสำรวจความเสียหายด้วยสายตา การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรงด้วยวิธี Crossbow การเจาะทดสอบวัสดุ และการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน รวมถึงการคาดการณ์การจราจรของรถบรรทุกหนักที่สัญจรผ่านสะพาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประกอบการประเมินกำลังรับน้ำหนักและพิจารณาการเสริมกำลังในลำดับถัดไป

ผลการตรวจสอบสภาพปัจจุบันของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง พบว่า ค่าต่าง ๆ ยังคงอยู่ในเกณฑ์ปกติ ยกเว้น กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพาน ซึ่งมีความแปรปรวนที่ค่อนข้างสูง และมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่าระบุดอกแบบถึงประมาณ 15% และระยะความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นที่เกินกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มในการที่เหล็กเสริมจะเกิดการกัดกร่อนได้โดยง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของพื้นสะพาน ความแปรปรวนของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพานได้ถูกนำมาพิจารณาในการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของคานสะพาน โดยในการศึกษารุ่นนี้ ได้



ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยในช่วง ค่าเฉลี่ย 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการประเมินกำลังรับ
น้ำหนักของคานสะพาน ส่วนในกรณีแนวโน้มที่เหล็กเสริมจะเกิดการกัดกร่อนจากการเกิดคาร์บอนขึ้น
ได้แนะนำให้ทำผิวคอนกรีตด้วยน้ำยาป้องกันการเสื่อมสภาพ

การประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางอาศัการวิเคราะห์แบบจำลองไฟ
ไนต์อีลิเมนต์ของโครงสร้างสะพาน โดยพิจารณาสภาพปัจจุบันและการปรับปรุงขยายผิวจราจรบน
สะพาน ผลการประเมิน พบว่า ส่วนของโครงสร้างที่ต้องได้รับการเสริมกำลัง ได้แก่ พื้นและคานสะพาน
การเสริมกำลังพื้นพิจารณาการเสริมกำลังโดย การเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างด้วย Shotcrete การเพิ่ม
ความหนาพื้นด้านบนด้วย Ultra High Performance Concrete (UHPC) และการเพิ่มคานทางขวาง
รองรับพื้น รวมถึงการพิจารณาเรือพื้นเดิมทิ้งและก่อสร้างพื้นใหม่ทดแทน การเสริมกำลังคานพิจารณา
การเพิ่มการอัดแรงคาน และการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

การวิเคราะห์หาแนวทางการเสริมกำลังคานและพื้นสะพานที่เหมาะสมได้พิจารณาการ
เสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพานภายหลังจากการเสริมกำลังร่วมกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น โดยแนวทางการ
เสริมกำลังที่ทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าเสริมกำลังและค่าปรับปรุง
ขยายผิวจราจร ณ ปัจจุบันและค่าก่อสร้างสะพานใหม่ในอนาคตเมื่อคานสะพานเสื่อมสภาพจนสิ้นอายุ
การใช้งานภายหลังจากการเสริมกำลังเทียบต่ออายุบริการภายหลังจากการเสริมกำลังมีค่าต่ำที่สุด จะถือว่าเป็น
แนวทางการเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด การเสื่อมสภาพพิจารณาเฉพาะปัจจัยจากการใช้งาน ได้แก่
ความล้าที่เกิดขึ้นกับพื้นและคานสะพานเนื่องจากการจราจรของรถบรรทุก การประเมินการเสื่อมสภาพ
อาศัยสมการความล้าของพื้นสะพานคอนกรีตและคานคอนกรีตอัดแรงที่ได้เคยมีการศึกษาไว้แล้ว
ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานได้พิจารณาอัตราคิดลดทั้งระดับต่ำ ปานกลาง และสูง

แนวทางการเสริมกำลังคานและพื้นสะพาน 5 แนวทางได้ถูกนำมาพิจารณา ได้แก่

แนวทางที่ 1: อัดแรงคาน เสริมความหนาพื้นด้วย Shotcrete ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่
ปีพ.ศ. 2615 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

แนวทางที่ 2: อัดแรงคาน เสริมความหนาพื้นด้วย UHPC ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปี
พ.ศ. 2615 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

แนวทางที่ 3: อัดแรงคาน เสริมคานทางขวาง ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615
แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

แนวทางที่ 4: อัดแรงคาน ปีพ.ศ. 2566 / เรือพื้นเดิมทิ้ง ก่อสร้างพื้นใหม่ ปีพ.ศ. 2585 / ก่อสร้าง
สะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2614 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 48 ปี

แนวทางที่ 5: ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2641 แนวทางนี้
สะพานที่ก่อสร้างใหม่ปีพ.ศ. 2566 จะถือให้มีอายุการใช้งาน 75 ปี ตามมาตรฐานอายุออกแบบใช้งาน
ของสะพานที่ก่อสร้างใหม่

ผลการวิเคราะห์ พบว่า แนวทางที่ 4 การเพิ่มการอัดแรงคานปีพ.ศ. 2566 การรื้อพื้นสะพานเดิม
ทิ้งและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ปีพ.ศ. 2585 และการก่อสร้างสะพานใหม่ปีพ.ศ. 2614 มีค่าใช้จ่ายที่
เกิดขึ้นเทียบต่ออายุการใช้งานต่ำที่สุด จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมและแนะนำให้ใช้เป็นแนวทางในการ
เสริมกำลังปรับปรุงสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง โดยได้จัดทำแบบรายละเอียดการเสริมกำลัง รายการ
ประมาณราคา และแผนการตรวจสอบสะพานเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อไป

Executive Summary Report

Kittikachorn Bridge over Ping River in Tak Province is the gateway to the upper north of Thailand. The bridge comprises two separated northbound and southbound approaches. Both approaches are slab-on-girder structures. Each individual has 12 spans of 50-m-long pre-stressed concrete girders. The northbound approach was built first and has been opened to traffic since 2509 B.E. whereas the southbound approach was built 34 years later and opened to traffic in 2543 B.E.

The northbound approach structure was designed using lower AASHTO H20-44 loadings as compared with the present HL-93 loadings. Moreover, the approach has been in service for more than 57 years. Therefore, it is necessary to examine the structural integrity and safety of the northbound approach as well as to strengthen the structure to meet the present-day standard. The southbound approach, however, the structure is still in the early age and no sign of visible damages; and is discarded in this study.

In this study, the roadway widening as requested by Office of Highway 4 (Tak) was also taken into consideration in structural capacity evaluation and strengthening design of the northbound approach structure. The existing condition of the structure was examined to supplement the evaluation and the design. The examinations included visual inspection of damages, residual tension in pre-stressing wires by Crossbow method, cored sampling tests, and in-field bridge load tests. Truck traffic forecast was also carried out.

The examinations of existing condition of the northbound approach structure indicated that most measured values were in acceptable ranges except the concrete compressive strength of girder that varied rather high with low bias and the carbonation depth that penetrated beyond the concrete covering depth of reinforcing bar. The variation in concrete compressive strength of the girder was addressed by considering the values in the range of mean 2 times the standard deviation in the capacity evaluation of the girder. In case of penetration of the carbonation, it is recommended that all concrete surfaces exposed to air should be painted by anti-aging agents.

The capacity evaluation of the northbound approach structure with consideration of existing condition and a proposed roadway widening was carried out by numerical method using finite-element analysis. It was found that only deck slabs and girders required strengthening. Four strengthening methods were proposed for deck strengthening i.e., shotcrete jacketing, UHPC jacketing, rib strengthening, and deck replacement; and two for girder strengthening i.e., additional pre-stressing and CFRP strengthening.

To determine the most appropriate strengthening scheme, the combination of deck and girder strengthening methods that yield minimum life-cycle cost with respect to extended service life is considered to be the most appropriate one. Life-cycle cost includes initial strengthening and roadway widening costs, and future construction cost of new bridge at the time the girder deteriorates to an unacceptable level of performance. Deterioration process considered was the fatigue damage due to truck traffic. Fatigue curves of RC deck and PC girder presented in the previous studies were utilized to capture the deterioration process. Discount factors ranging from low to high levels were considered in the calculation of life-cycle cost.

Five strengthening schemes were proposed as follows:

Scheme 1: Additional pre-stressing of the girders and shotcrete jacketing of the decks in 2566 B.E. / Construction of new bridge in 2615 B.E.; within this scheme, the extended service life is 49 years.

Scheme 2: Additional pre-stressing of the girders and UHPC jacketing of the decks in 2566 B.E. / Construction of new bridge in 2615 B.E.; within this scheme, the extended service life is 49 years.

Scheme 3: Additional pre-stressing of the girders and rib strengthening of the decks in 2566 B.E. / Construction of new bridge in 2615 B.E.; within this scheme, the extended service life is 49 years.

Scheme 4: Additional pre-stressing of the girders in 2566 B.E. / Replacement of the decks in 2585 B.E. / Construction of new bridge in 2614 B.E.; within this scheme, the extended service life is 48 years.



Scheme 5: Construction of new bridge in 2566 B.E. / Construction of new bridge in 2641 B.E.; within this scheme, the service life of the new bridge constructed in 2566 B.E. is assumed to be 75 years in accordance with the code-recommended design life of the general new bridge.

It was found in this study that the strengthening scheme 4: additional pre-stressing of the girders in 2566 B.E., replacement of the decks in 2585 B.E., and construction of new bridge in 2614 B.E. yielded the lowest life-cycle cost with respect to the extended service life; and is recommended as the strengthening scheme for the northbound approach of Kittikachorn Bridge. Detailed drawings, cost estimation, and inspection plan were documented for future reference.

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
บทสรุปผู้บริหาร	III
Executive Summary Report	VI
สารบัญ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-2
1.3 การดำเนินงาน	1-3
บทที่ 2 การสำรวจสภาพโครงสร้างสะพาน	2-1
2.1 ข้อมูลทั่วไปสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง	2-1
2.2 การสำรวจมิติสะพาน	2-2
2.3 วิธีการตรวจสอบความเสียหายของสะพาน	2-4
2.4 การสำรวจความเสียหายสะพาน	2-10
2.5 การประเมินความเสียหายในภาพรวม	2-13
2.6 วิธีการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน	2-19
2.7 ผลการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน	2-25



บทที่ 3	การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง	3-1
3.1	หลักการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง	3-1
3.2	การตรวจวัดหน้างาน	3-6
3.3	ผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง	3-11
3.4	งานเก็บความเรียบร้อยและส่งมอบงาน	3-12
3.5	รายละเอียดผลการทดสอบตรวจวัดแรงดึง	3-14
3.6	สรุปผลการทดสอบ	3-35
บทที่ 4	การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพาน	4-1
4.1	วิธีการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	4-1
4.2	ผลการทดสอบวัสดุ	4-16
4.3	ข้อมูลจากแบบก่อสร้าง	4-29
4.4	สรุปผลทดสอบวัสดุสะพาน	4-31
บทที่ 5	การตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน	5-1
5.1	วิธีการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน	5-1
5.2	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด	5-9
5.3	น้ำหนักบรรทุกทดสอบ	5-15
5.4	การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต	5-16
5.5	การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบพลวัต	5-39
5.6	การทดสอบภายใต้สภาวะใช้งาน	5-108



บทที่ 6	การออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน	6-1
6.1	ระเบียบวิธี Finite Element	6-1
6.2	การประเมินการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานโดยวิธี Finite Element	6-7
6.3	การเสริมกำลังคานสะพาน	6-21
6.4	วิธีการเสริมกำลังคานสะพาน	6-23
6.5	สรุปแนวทางการเลือกวิธีการเสริมกำลังคานสะพาน	6-30
6.6	การเสริมกำลังพื้นสะพาน	6-30
6.7	การปรับปรุงผิวจราจรบนสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง	6-31
6.8	การออกแบบเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง	6-31
6.9	การวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร	6-45
6.10	การวิเคราะห์และประเมินพื้นของสะพานกิตติขจร	6-50
6.11	การวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างส่วนล่างของสะพานกิตติขจร	6-61
6.12	การวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างส่วน Crossbeam ช่วงยกเปลี่ยน Bearing	6-67
บทที่ 7	การประมาณราคาค่าเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน	7-1
7.1	การประมาณราคาการดัดลวดอัดแรงกับการเพิ่มความหนาของพื้น	7-1
7.2	การประมาณราคาการดัดลวดอัดแรงกับการเพิ่มความหนาของพื้นโดย UHPC	7-3
7.3	การประมาณราคาการดัดลวดอัดแรงกับการเพิ่มค้ำยันด้านข้าง	7-5
7.4	การประมาณราคาการใช้คาร์บอนไฟเบอร์กับการเพิ่มความหนาของพื้น	7-7
7.5	การประมาณราคาการใช้คาร์บอนไฟเบอร์การเพิ่มความหนาของพื้นโดย UHPC	7-9
7.6	การประมาณราคาการใช้คาร์บอนไฟเบอร์การเพิ่มค้ำยันด้านข้าง	7-11
7.7	การประมาณราคาค่าการก่อสร้างสะพานใหม่	7-13
7.8	การประมาณราคาเครื่องปั้นสะพานและแบรีเออร์	7-14
7.9	สรุปการเปรียบเทียบราคาค่าการเสริมกำลังและการก่อสร้างสะพานใหม่	7-15

บทที่ 8	การคัดเลือกรูปแบบการเสริมกำลังคานและพื้นสะพาน	8-1
8.1	กำลังต้านทานความล้าของคานและพื้นสะพาน	8-1
8.2	กำลังรับแรงประลัยของคานและพื้นสะพาน	8-2
8.3	การจราจรของรถบรรทุก	8-16
8.4	การกระจายน้ำหนักและแรงกระแทกจากการจราจรของรถบรรทุก	8-18
8.5	ราคาปรับปรุงสะพานและเสริมกำลัง	8-19
8.6	การเสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้า	8-21
8.7	รูปแบบการเสริมกำลังคานและพื้นสะพาน	8-25
8.8	ตารางการคำนวณเส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพาน	8-30
บทที่ 9	การจัดทำแผนการตรวจสอบสะพานภายหลังจากการบูรณะ	9-1
9.1	ความเป็นมาของสะพานกิตติขจร	9-1
9.2	องค์ประกอบของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง	9-2
9.3	ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบสะพาน	9-6
9.4	แผนการการตรวจสอบสะพานภายหลังจากการบูรณะ	9-18
9.5	เอกสารอ้างอิง	9-28
บทที่ 10	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	10-1



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สะพานกิตติขจรข้ามแม่น้ำปิงที่จังหวัดตากนับว่าเป็นสะพานที่มีความสำคัญต่อการคมนาคมทางถนนของประเทศ สะพานตั้งอยู่บนทางหลวงหมายเลข 1 บริเวณกิโลเมตรที่ 520 ซึ่งเป็นเส้นทางหลักสู่ภาคเหนือตอนบน สะพานแห่งนี้ประกอบด้วยสะพานฝั่งซ้ายทาง (ขาขึ้น) และสะพานฝั่งขวาทาง (ขาล่อง) สะพานฝั่งซ้ายทางหรือสะพานเดิมเปิดให้บริการมาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2509 ส่วนสะพานฝั่งขวาทางได้ถูกก่อสร้างขึ้นเมื่อปีพ.ศ. 2543 เพื่อช่วยแก้ปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณสะพานเดิม สะพานทั้งสองแห่งเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงขนาดใหญ่ของกรมทางหลวง แต่ละสะพานมีความยาว 600 เมตร ประกอบด้วยคานช่วงแฉวน 50 เมตร จำนวน 12 ช่วง

สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางถือได้ว่าเป็นสะพานรุ่นเก่าของกรมทางหลวง สะพานแห่งนี้ได้ถูกออกแบบโดยใช้ชุดน้ำหนักบรรทุกทุก AASHTO H20-44 ซึ่งมีน้ำหนักต่ำกว่าชุดน้ำหนักบรรทุกทุก HL-93 ที่สำนักสำรวจและออกแบบใช้ออกแบบในปัจจุบันค่อนข้างมาก อีกทั้งสะพานยังผ่านการใช้งานมากกว่า 57 ปี (พ.ศ. 2566) จึงมีความจำเป็นที่สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางจะต้องได้รับการตรวจสอบและประเมินความปลอดภัย รวมถึงปรับปรุงเสริมกำลังเพื่อให้สะพานมีความปลอดภัยตามมาตรฐานการออกแบบ ในส่วนสะพานฝั่งขวาทาง สะพานฝั่งขวาทางจัดเป็นสะพานที่ยังมีอายุการใช้งานไม่มาก ประกอบกับสะพานฝั่งขวาทางยังคงมีสภาพที่ดี ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จึงพิจารณาเฉพาะการตรวจสอบประเมินความปลอดภัยและเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเท่านั้น โดยจะพิจารณาการปรับปรุงขยายผิวจราจรบนสะพานฝั่งซ้ายทางตามความประสงค์ของสำนักงานทางหลวงที่ 4 (ตาก) ควบคู่กับการเสริมกำลังไปด้วย

อนึ่ง การเสริมกำลังสะพานประเภทคานคอนกรีตอัดแรงมีรูปแบบให้เลือกหลายรูปแบบ เช่น การเสริมกำลังโดยการอัดแรงจากภายนอก หรือ การเสริมกำลังโดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดคาน ดังนั้น เพื่อให้การเสริมกำลังมีความคุ้มค่าตามสภาพการใช้งานจริง โครงการนี้จะทำการวิเคราะห์หารูปแบบการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางที่ทำให้ค่าใช้จ่าย ได้แก่ ค่าเสริมกำลัง ค่าซ่อมแซม และค่าก่อสร้างใหม่รวมตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle Cost) มีราคาต่ำที่สุด โดยสะพานยังคงมีความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การวิเคราะห์จะอาศัยข้อมูลสภาพปัจจุบันของสะพานจากการเจาะทดสอบกำลังวัสดุ การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง และการตรวจวัดพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก มาประกอบกับการคาดการณ์ปริมาณการจราจรที่สัญจรผ่านสะพาน เพื่อนำมาวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของสะพานร่วมกับ

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสะพานให้กลับมา มีสภาพพร้อมใช้งาน จากนั้น จะจัดทำแบบ
รายละเอียดการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง รวมถึง การประมาณราคาค่าเสริมกำลังและ
แผนการบำรุงรักษา เพื่อให้กรมทางหลวงสามารถใช้ประกอบการเสนอของบประมาณในการเสริมกำลัง
สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางได้ทันที

1.2 วัตถุประสงค์

กรมทางหลวงมีความประสงค์จะว่าจ้าง "ที่ปรึกษา" เพื่อ

- 1.2.1. ตรวจสอบสภาพปัจจุบันสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง
- 1.2.2. ออกแบบเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใ้
งาน
- 1.2.3. จัดทำแบบรายละเอียดการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง
- 1.2.4. ประมาณราคาค่าเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง
- 1.2.5. จัดทำแผนการตรวจสอบสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ภายหลังการเสริมกำลัง



1.3 การดำเนินงาน

การดำเนินงาน “โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี” มีระยะเวลาดำเนินการตามสัญญาทั้งสิ้น 270 วัน โดยเนื้อหาของงานมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1. การสำรวจสภาพโครงสร้างสะพาน

ทำการสำรวจสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ทุกช่วงสะพาน เพื่อเก็บรายละเอียดสภาพต่าง ๆ ของพื้นสะพาน คานสะพาน คานขวางแผ่นรองคานสะพาน ตอม่อสะพาน และรอยต่อโครงสร้าง

1.3.2. การคัดเลือกช่วงสะพานตรวจวัดข้อมูล

ทำการคัดเลือกช่วงสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง 4 ช่วงสะพาน เพื่อเป็นตัวแทนในการตรวจวัดข้อมูลสภาพปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วย การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน (งานข้อที่ 1.6) การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง (งานข้อที่ 1.7) การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพาน (งานข้อที่ 1.8) และการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน (งานข้อที่ 1.9)

จากการตรวจสอบ พบว่าสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางมี 12 ช่วงสะพาน แต่ละช่วงเป็นสะพานประเภท I-Girder ยาวช่วงละ 50 เมตร มีคานในแต่ละช่วงสะพานจำนวน 4 ตัว เนื่องจากทุกช่วงสะพานมีลักษณะเหมือนกัน การคัดเลือกช่วงสะพานจะพิจารณาเลือกช่วงสะพานที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ผลการตรวจวัดและการทดสอบต่าง ๆ กระทำได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ได้คัดเลือกช่วงสะพานที่ 1, 10, 11 และ 12 ซึ่งอยู่บริเวณทางขึ้นลงของสะพาน สามารถติดตั้งนั่งร้านทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.3. การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน

ทำการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริม ได้แก่ ตำแหน่ง ทิศทาง ระดับความลึก และขนาดของเหล็กเสริม ในองค์ประกอบต่าง ๆ ของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ทุกช่วงสะพาน ตามที่ได้รับคัดเลือกในข้อที่ 1.5 โดยใช้วิธีการสแกนที่พื้นผิวคอนกรีตด้วย GPR Concrete Scanning ในระบบอย่างน้อย 2 มิติ

1.3.4. การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

ทำการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรงของคานสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ทุกช่วงสะพาน ตามที่ได้รับคัดเลือกในข้อที่ 1.5 โดยใช้วิธี Crossbow จำนวนคานสะพานที่ต้องทำการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง ช่วงสะพานละอย่างน้อย 1 คาน รวม 4 ช่วงสะพาน คิดเป็นจำนวนคานสะพานทั้งหมด 4 คาน

1.3.5. การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพาน

ทำการทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ทุกช่วงสะพาน ตามที่ได้รับคัดเลือกในข้อที่ 1.5 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทำการเจาะคอนกรีตโครงสร้างสะพานเพื่อเก็บก้อนตัวอย่างทรงกระบอกนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด จำนวนก้อนตัวอย่างช่วงสะพานละ 20 ก้อน รวม 4 ช่วงสะพาน คิดเป็นจำนวนก้อนตัวอย่างทั้งหมด 80 ก้อน

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ทำการเจาะคอนกรีตโครงสร้างสะพานเพื่อเก็บก้อนตัวอย่างทรงกระบอก นำไปทดสอบกำลังรับแรงดึง จำนวนก้อนตัวอย่างช่วงสะพานละอย่างน้อย 20 ก้อน รวมอย่างน้อย 4 ช่วงสะพาน คิดเป็นจำนวนก้อนตัวอย่างทั้งหมด 80 ก้อน

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม ทำการตัดเหล็กเสริมโครงสร้าง เพื่อเก็บชิ้นตัวอย่างนำไปทดสอบกำลังรับแรงดึง จำนวนชิ้นตัวอย่าง ช่วงสะพานละ 20 ชิ้น รวม 4 ช่วงสะพาน คิดเป็นจำนวนชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 80 ชิ้น

การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น ทำการเจาะคอนกรีตโครงสร้างสะพาน เพื่อเก็บผงตัวอย่างนำไปทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยเจาะช่วงสะพานละ 20 ตำแหน่ง ในแต่ละตำแหน่ง ให้เจาะเก็บผงคอนกรีตทุก ๆ ความลึก 1 เซนติเมตร จนกระทั่งลึก 5 เซนติเมตร รวม 4 ช่วงสะพาน คิดเป็นจำนวนผงตัวอย่างทั้งหมด 400 ตัวอย่าง

1.3.6. การตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างสะพาน

ทำการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ภายใต้สภาวะควบคุมและภายใต้สภาวะการใช้งาน ดังนี้

การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม ให้ทำการทดสอบทุกช่วงสะพานตามที่ได้รับคัดเลือกในข้อที่ 1.5 การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม ประกอบด้วย

การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต

การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบพลวัต

การทดสอบภายใต้สภาวะใช้งาน เลือกช่วงสะพานที่ได้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมจำนวน 1 ช่วงสะพาน เพื่อมาทดสอบภายใต้สภาวะใช้งานเพิ่มเติม

1.3.7. การออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน

ทำการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามมาตรฐานการออกแบบที่กรมทางหลวงยอมรับ การออกแบบให้ใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่



ได้รับการปรับแก้โดยอาศัยข้อมูลภาคสนามมาวิเคราะห์ร่วมกับการคาดการณ์ปริมาณการจราจรเพื่อหา
รูปแบบวิธีการเสริมกำลังที่ทำให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุด (Life-cycle Cost Analysis) โดย
ให้พิจารณารูปแบบการเสริมกำลัง 3 รูปแบบ

1.3.8. การจัดทำแบบรายละเอียดการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน

จัดทำแบบรายละเอียดการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ตามที่ได้ออกแบบ
ไว้ โดยแบบการเสริมกำลังประกอบด้วยรายละเอียด ดังนี้

แบบงานโครงสร้าง (Structural Works) แสดงรายละเอียดโครงสร้าง หรือส่วนของโครงสร้าง ที่
ได้ทำการเสริมกำลัง รวมถึง รายการข้อกำหนดต่าง ๆ ของมาตรฐานการออกแบบและการทดสอบวัสดุ
ประกอบแบบ

แบบงานก่อสร้าง (Construction Stages) แสดงรายละเอียดขั้นตอนการเสริมกำลังแบบ
รายละเอียดการเสริมกำลังทั้งหมด มีวิศวกรโยธา ผู้มีใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมสาขา
โยธา ระดับวุฒิวิศวกร รับรอง

1.3.9. การประมาณราคาค่าเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน

ทำการประมาณราคาค่าเสริมกำลังโครงสร้างสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ตามที่ได้จัดทำแบบ
รายละเอียดการเสริมกำลังไว้ ซึ่งจะต้องประกอบด้วยรายละเอียดแสดงการคิด ปริมาณงาน ค่าวัสดุ ค่า
ขนส่ง ค่าแรง และค่าเครื่องจักร

1.3.10. การจัดทำแผนการตรวจสอบโครงสร้างสะพานภายหลังการเสริมกำลัง

ทำแผนการตรวจสอบโครงสร้างสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางภายหลังการเสริมกำลัง ซึ่ง
ประกอบด้วย สิ่งที่จะตรวจสอบ วิธีการตรวจสอบ กำหนดระยะเวลาการตรวจสอบ และ แนวทางการ
แก้ไข หากพบความเสียหาย

บทที่ 2 การสำรวจสภาพโครงสร้างสะพาน

2.1 ข้อมูลทั่วไปสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง

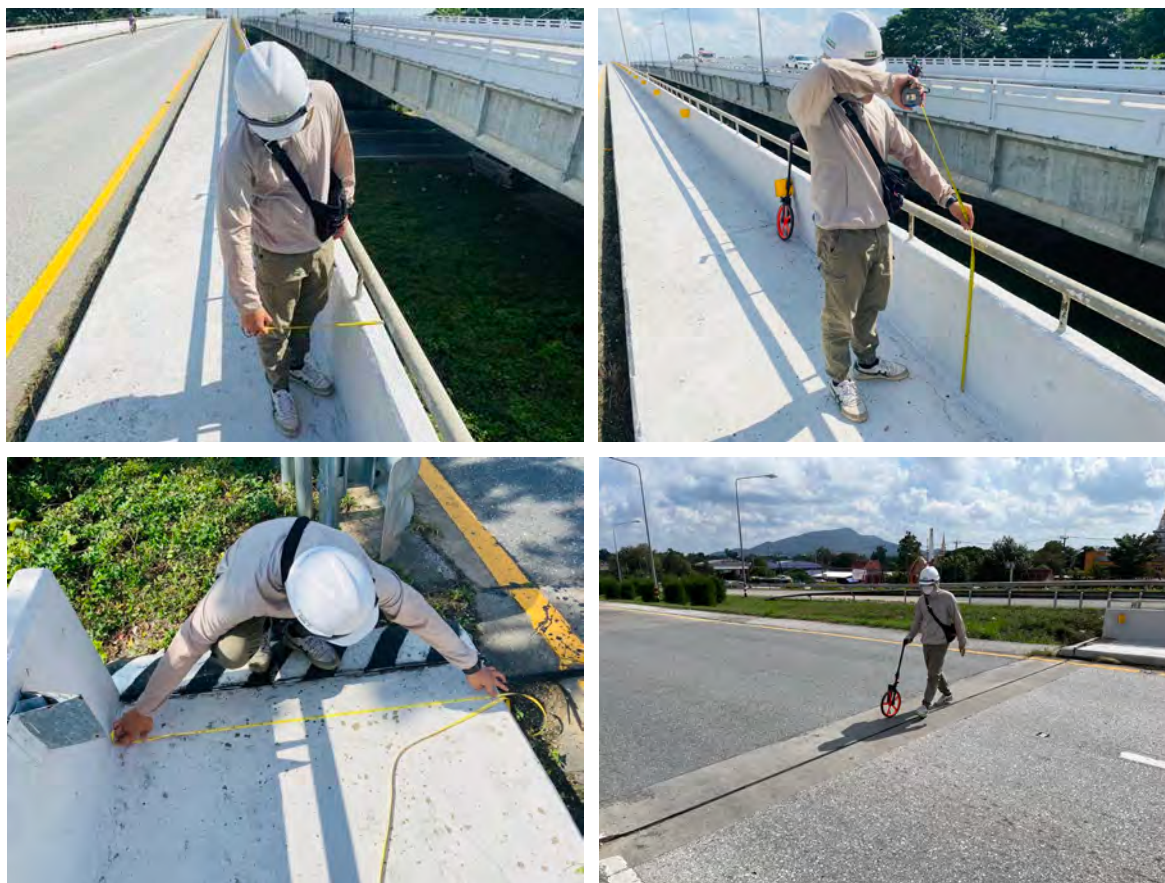
จากรายงานการตรวจสอบหลักตามระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน สำนักสะพาน กรมทางหลวง ระบุว่า สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ตั้งอยู่ที่สำนักทางหลวงที่ 4 ตาก แขวงทางหลวงตากที่ 1 จังหวัด ตาก หมายเลขทางหลวง 1 กม.กลางสะพาน 520+543 ก่อสร้างเสร็จเมื่อปี พ.ศ. 2509 ปริมาณรถบรรทุกหนัก 3906 คัน/วัน ประเภทโครงสร้าง IG(12x50) ความกว้างผิวทาง 8 เมตร



รูปที่ 2-1 ตัวอย่างรูปสะพาน

2.2 การสำรวจมิติสะพาน

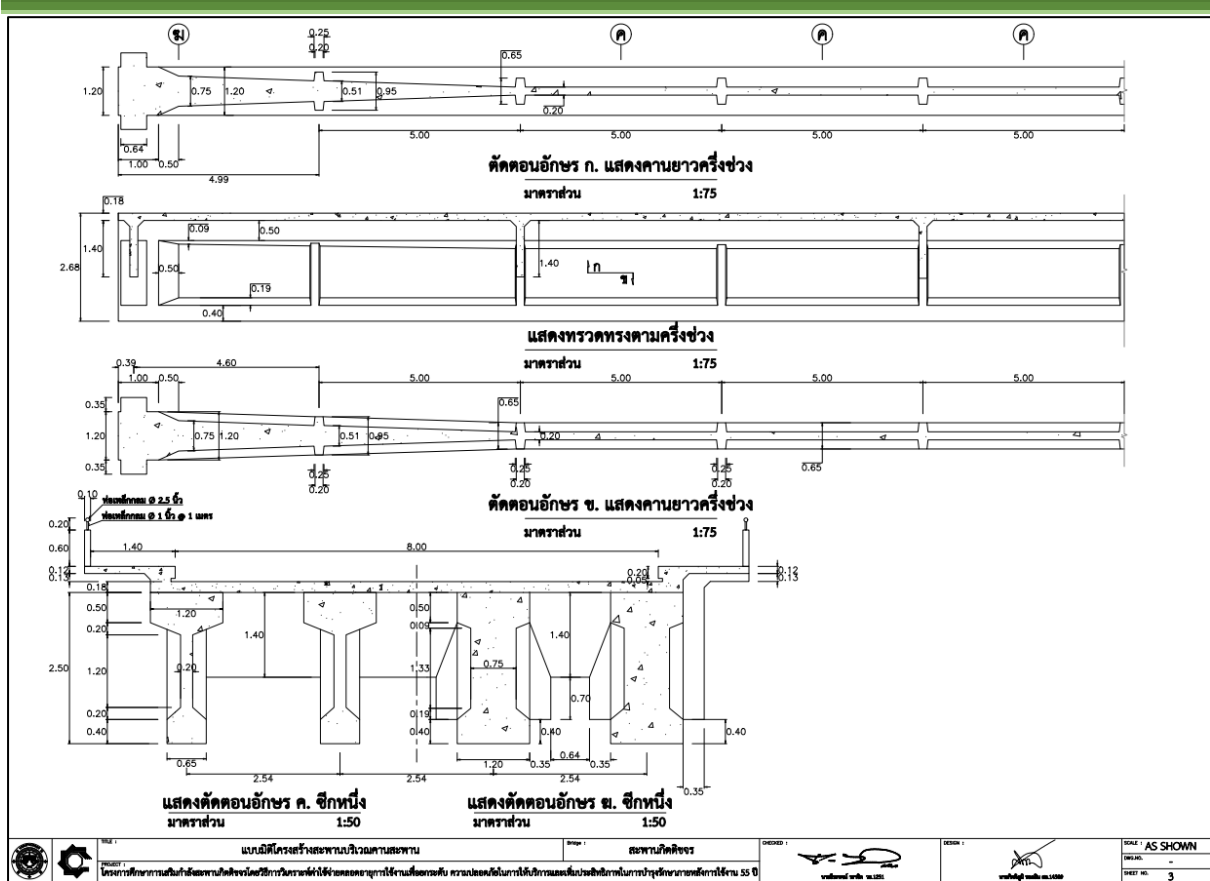
การสำรวจมิติของสะพานกระทำโดยถ่ายภาพสะพานในบริเวณต่าง ๆ ทั้งด้านบนและด้านล่าง และใช้เครื่องมือวัดระยะประเภทต่าง ๆ เช่น ตลับเมตร เทปวัด และเลเซอร์วัดระยะทาง ในการตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนและมิติต่าง ๆ ของสะพาน ดังตัวอย่างการสำรวจมิติสะพานที่แสดงในรูปที่ 2-2 ในกรณีที่ชิ้นส่วนโครงสร้างมีขนาดใหญ่มากหรืออยู่สูงมาก จะใช้นั่งร้านเพื่อช่วยในการเข้าถึงชิ้นส่วนนั้น ๆ ตัวอย่างบางส่วนของแบบการสำรวจมิติของสะพานในบริเวณต่าง ๆ ได้แสดงดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-2 การตรวจวัดมิติของสะพาน (ทั่วไป)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 2-3 ตัวอย่างแบบการสำรวจมิติของสะพานบริเวณคานสะพาน (แบบขนาด A3 แสดงในแบบสำรวจสะพาน)

2.3 วิธีการตรวจสอบความเสียหายของสะพาน

การตรวจสอบสะพาน (Bridge Inspection) ใช้วิธีการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตา (Visual Inspection) ซึ่งเป็นการตรวจสอบและบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างสะพาน ข้อมูลความเสียหายสามารถนำไปใช้วางแผนซ่อมบำรุงสะพาน อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับลดกำลังรับแรงกระทำของชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีความเสียหายในการประเมินความสามารถการรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Load Rating)

การตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตา (Visual Inspection) จะใช้อุปกรณ์พื้นฐานประเภทต่างๆ เช่น ไม้บรรทัด เกจวัดขนาดรอยแตก กล้องถ่ายรูป และแบบฟอร์มบันทึกความเสียหาย เป็นต้น การตรวจสอบสะพานจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานด้านวิศวกรรมโครงสร้างสะพาน พฤติกรรมของคอนกรีต และเทคนิคการก่อสร้าง รวมถึงต้องมีการวางแผนและการเตรียมการที่ดี จึงจะสามารถเก็บข้อมูลต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน ทั้งข้อมูลด้านตำแหน่ง ขนาดของความเสียหาย และลักษณะความเสียหาย สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในภายหลังได้อย่างสะดวก หลักการที่ใช้ในการตรวจสอบสะพานที่สำคัญมี ดังนี้

2.3.1. การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

โดยทั่วไปสะพานจะมีชิ้นส่วนหลายประเภทและมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อให้สามารถตรวจสอบสะพานได้ครบทุกชิ้นส่วน จึงได้แบ่งสะพานออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ ตามระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance and Management System, BMMS) ของสำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง โดยจะแบ่งสะพาน (Bridge) ออกเป็นบริเวณ (Area) ต่าง ๆ และในแต่ละบริเวณจะแบ่งเป็นชิ้นส่วน (Member) ประเภทต่างๆ ดังรูปที่ 2-4 ซึ่งสะพานมี 4 ประเภทบริเวณ ดังนี้

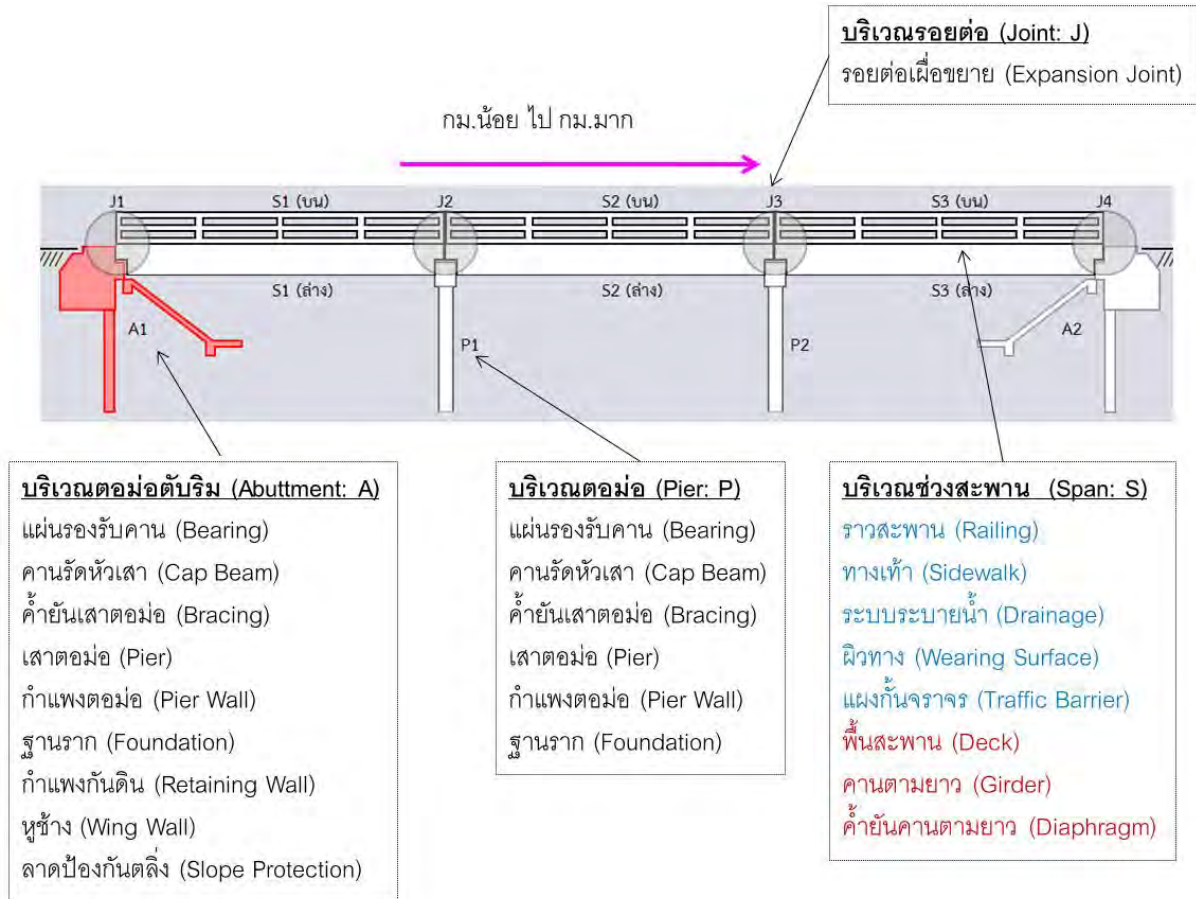
- บริเวณตอม่อตัมบริม (Abutment, A)
- บริเวณตอม่อ (Pier, P)
- บริเวณช่วงสะพาน (Span, S)
- บริเวณรอยต่อ (Joint, J)

ระบบ BMMS แบ่งทิศทางของสะพานออกเป็น 3 ทิศ ได้แก่ ทิศตามยาว ทิศตามขวาง และทิศตามแนวดิ่ง โดยทิศตามยาวจะเริ่มจากฝั่ง กม. น้อย ไปยังฝั่ง กม.มาก ซึ่งจะใช้ในการเรียงเลขรหัสของบริเวณต่างๆ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2-4 {A1, A2}, {P1, P2}, {S1, S2, S3} และ {J1, J2, J3, J4} รูปที่ 2-5 แสดงการเรียงเลขรหัสชิ้นส่วนภายในแต่ละบริเวณของสะพาน โดยทิศตามขวางจะเริ่มจากซ้ายมือไปขวามือ ซึ่งจะใช้เรียงเลขรหัสของชิ้นส่วนที่อยู่ตามแนวขวางของสะพานในแต่ละบริเวณ เช่น ในบริเวณ S1 มีราวสะพาน RL1 และ RL2 ส่วนทิศแนวดิ่งจะเริ่มจากบนลงล่าง เพื่อใช้เรียงเลขรหัสของ

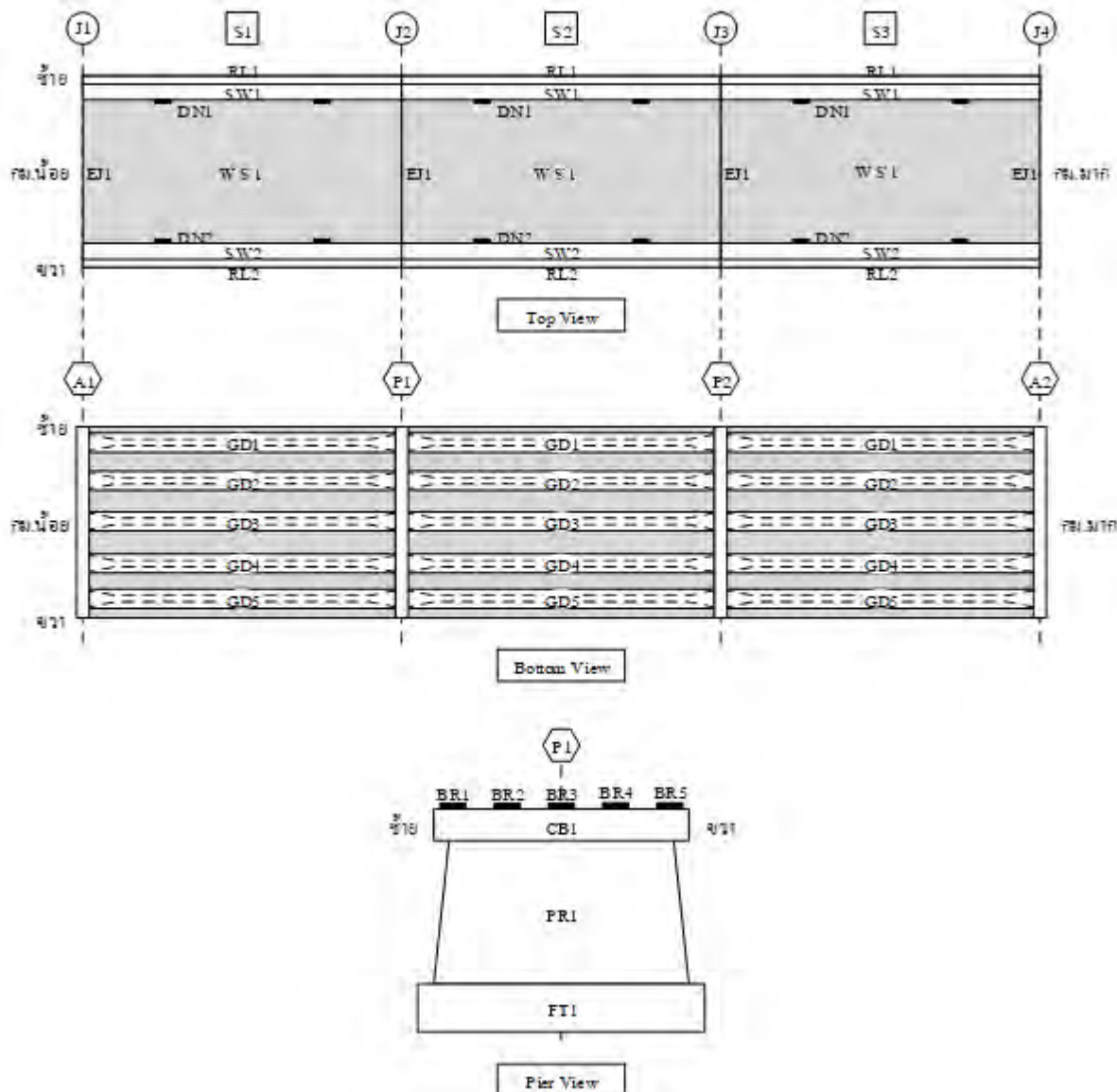


โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ชั้นส่วนที่อยู่ในแนวตั้งของสะพานในแต่ละบริเวณ เช่น ในบริเวณ P1 มี คานรัดหัวเสาเพียงแถวเดียว CB1 การแบ่งสะพานออกเป็นบริเวณและชั้นส่วน ตลอดจนการกำหนดทิศทางเพื่อเรียงลำดับเลขรหัสบริเวณและรหัสชั้นส่วน จะทำให้ผู้ตรวจสอบสามารถตรวจสอบชั้นส่วนที่มีทั้งหมดในสะพานได้อย่างครบถ้วน ไม่ซ้ำซ้อน และไม่สลับทิศทางกัน



รูปที่ 2-4 ทิศทางตามยาวของสะพานและการเรียงเลขรหัสบริเวณตามระบบ BMMS



รูปที่ 2-5 ตัวอย่างการเรียงเลขรหัสชิ้นส่วนภายในแต่ละบริเวณของสะพาน

ในการตรวจสอบสะพาน ระบบ BMMS จะแบ่งชิ้นส่วนสะพานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) และส่วนประกอบรอง (Secondary Member) โดยกลุ่มโครงสร้างส่วนบน คือ ชิ้นส่วนหลัก (Primary Member) ที่อยู่ด้านบนและทำหน้าที่รับแรงโดยตรง กลุ่มโครงสร้างส่วนล่าง คือ ชิ้นส่วนหลักที่อยู่ด้านล่างและทำหน้าที่รับแรงโดยตรง ในขณะที่ส่วนประกอบรอง คือ ชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ช่วยเสริมด้านความมั่นคง (Stability) หรือใช้งานในด้านต่างๆ ของสะพาน (Functional & Utility) ตารางที่ 2-1 สรุปประเภทชิ้นส่วนที่อาจมีอยู่ในบริเวณต่างๆ และกลุ่มโครงสร้างของแต่ละประเภทชิ้นส่วนนั้นๆ ตลอดจนสัญลักษณ์ที่ใช้ในการตั้งรหัสบริเวณและรหัสชิ้นส่วน



ตารางที่ 2-1 การแบ่งบริเวณ ชั้นส่วน และกลุ่มโครงสร้าง

บริเวณ	Area Code	ชั้นส่วนโครงสร้าง (Member)	Member Code	กลุ่มโครงสร้าง
ช่วงสะพาน (Span)	S	ราวสะพาน (Railing)	RL	ส่วนประกอบรอง
		ทางเท้า (Sidewalk)	SW	ส่วนประกอบรอง
		ระบบระบายน้ำ (Drainage)	DN	ส่วนประกอบรอง
		ผิวทาง (Wearing Surface)	WS	ส่วนประกอบรอง
		แผงกั้นจราจร (Traffic Barrier)	TB	ส่วนประกอบรอง
		พื้นสะพาน (Deck)	DK	โครงสร้างส่วนบน
		คานตามยาว (Girder)	GD	โครงสร้างส่วนบน
		ไดอะแฟรม (Diaphragm)	DP	ส่วนประกอบรอง
		คานรองพื้นสะพาน (Floorbeam)	FB	โครงสร้างส่วนบน
		คานชอย (Stringer)	ST	โครงสร้างส่วนบน
		คานโค้ง (Arch Beam)	AB	โครงสร้างส่วนบน
		ลวดขึง (Rod)	RD	โครงสร้างส่วนบน
		ค้ำยันคานแนวนอน (Horizontal Bracing)	HB	ส่วนประกอบรอง
รอยต่อสะพาน (Joint)	J	รอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint)	EJ	ส่วนประกอบรอง
ตอม่อสะพาน (Pier)	P	อุปกรณ์รองรับคาน (Bearing)	BR	ส่วนประกอบรอง
		คานรัดหัวเสา (Cap Beam)	CB	โครงสร้างส่วนล่าง
		เสาตอม่อ (Pier)	PR	โครงสร้างส่วนล่าง
		กำแพงตอม่อ (Pier Wall)	PW	โครงสร้างส่วนล่าง
		ฐานราก (Foundation)	FD	โครงสร้างส่วนล่าง
ตอม่อตบริม (Abutment)	A	อุปกรณ์รองรับคาน (Bearing)	BR	ส่วนประกอบรอง
		คานรัดหัวเสา (Cap Beam)	CB	โครงสร้างส่วนล่าง
		เสาตอม่อ (Pier)	PR	โครงสร้างส่วนล่าง
		กำแพงตอม่อ (Pier Wall)	PW	โครงสร้างส่วนล่าง
		ค้ำยันเสาตอม่อ (Bracing)	BC	ส่วนประกอบรอง
		กำแพงหลัง (Back Wall)	BW	ส่วนประกอบรอง
		หูช้าง (Wing Wall)	WW	ส่วนประกอบรอง
		ลาดป้องกันตลิ่ง (Slope Protection)	SP	ส่วนประกอบรอง
		เชิงลาดสะพาน (Approach)	AP	ส่วนประกอบรอง
		ฐานราก (Foundation)	FD	โครงสร้างส่วนล่าง

2.3.2. แนวทางการตรวจสอบสะพาน

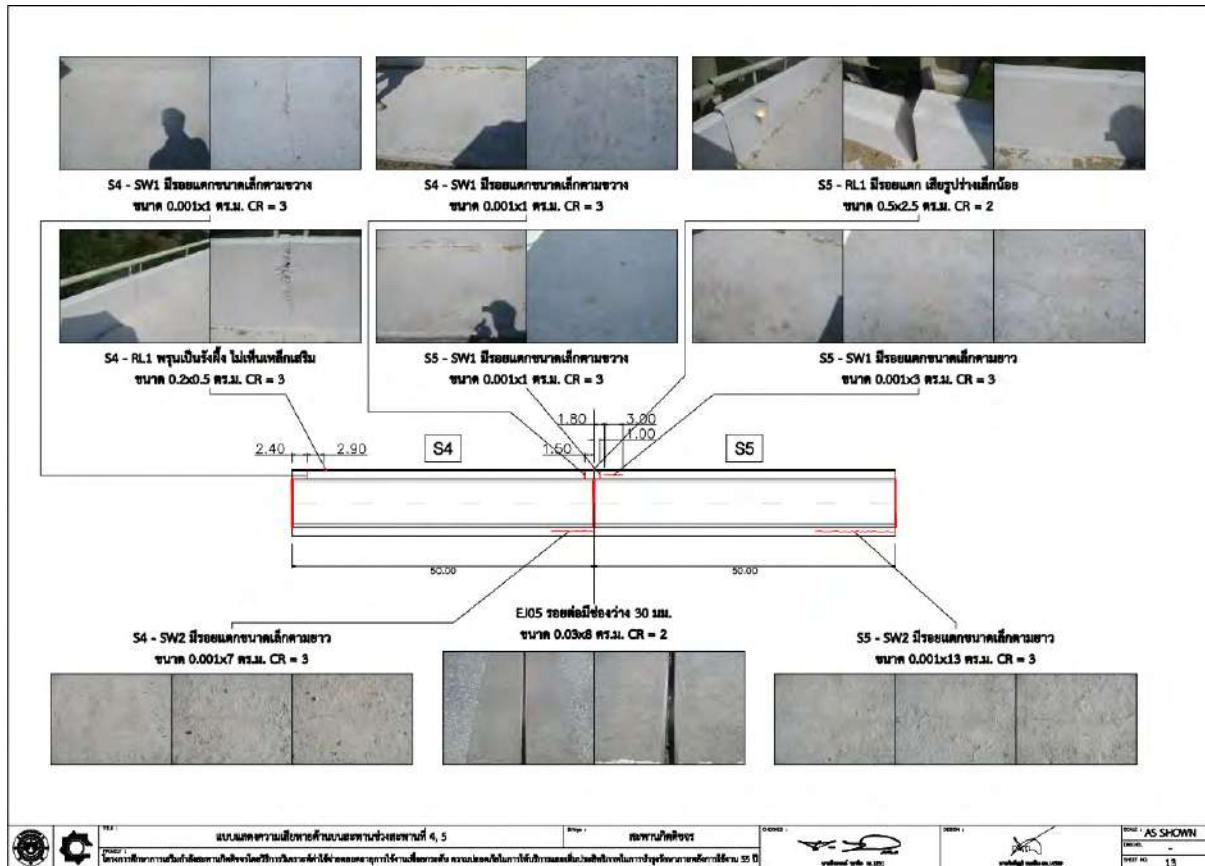
การตรวจสอบสะพานเริ่มต้นจากการศึกษาแบบก่อสร้างและชิ้นส่วนประเภทต่างๆ ที่ใช้บนสะพาน เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของสะพานและตำแหน่งวิกฤติของผลรวมแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นจุดเสี่ยงที่โครงสร้างจะเกิดความเสียหาย รวมถึงผลการตรวจสอบสะพานครั้งล่าสุด (กรณีที่มี)

จากนั้นทำการแบ่งสะพานออกเป็นบริเวณและชิ้นส่วน เพื่อให้สามารถตรวจสอบชิ้นส่วนสะพานได้อย่างครบถ้วน ทำการกำหนดรหัสบริเวณและรหัสชิ้นส่วนตามระบบ BMMS และแบ่งงานให้ทีมผู้ตรวจสอบหลายคนช่วยดำเนินการ ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเพื่อให้การประเมินความเสียหายมีความสม่ำเสมอ ผู้ตรวจสอบแต่ละคนจะจำแนกลักษณะความเสียหายตามระบบ BMMS ที่เหมือนกัน



2.3.3. แบบแสดงความเสียหายสะพาน

โครงการนี้จะบันทึกความเสียหายของสะพาน โดยสังเกตความเสียหายลงในแบบสะพาน พร้อมทั้งระบุลักษณะความเสียหาย ชั้นส่วนที่ได้รับความเสียหาย ขนาดความเสียหาย และรูปถ่ายความเสียหาย รูปที่ 2-6 แสดงตัวอย่างแบบแสดงความเสียหายของสะพาน



รูปที่ 2-6 ตัวอย่างแบบแสดงความเสียหายของสะพาน

2.4 การสำรวจความเสียหายสะพาน

โครงการนี้ใช้วิธีการตรวจสอบความเสียหายด้วยสายตา (Visual Inspection) ในการรวบรวมข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน เพื่อใช้ประกอบการออกแบบงานซ่อมบูรณะและเสริมกำลังสะพานรูปที่ 2-7 แสดงตัวอย่างความเสียหายของสะพาน รายการความเสียหาย แสดงในตารางที่ 2-2 จากนั้นได้นำข้อมูลที่สำรวจได้ไปจัดทำเป็นแบบแสดงความเสียหาย โดยรายละเอียดทั้งหมดได้แสดงในแบบสำรวจสะพาน ที่ได้แนบมากับรายงานฉบับนี้



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างภาพความเสียหายของสะพาน



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ตารางที่ 2-2 รายการความเสียหาย

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ระดับความรุนแรง	ขนาด
1	S1	GD1	รอยถูกรถชน มีการหลุดล่อนเล็กน้อย	CR 4	0.6x0.6
2	S1	GD1	รูพรุนเป็นรังผึ้ง มองเห็นเหล็กเสริมเล็กน้อย	CR 2	0.6x0.6
3	S1	GD2	รอยถูกรถชน มีการหลุดล่อนเล็กน้อย	CR 4	0.6x0.6
4	S1	GD3	รอยถูกรถชน มีการหลุดล่อนเล็กน้อย	CR 4	0.6x0.6
5	S1	GD4	รอยถูกรถชน มีการหลุดล่อนเห็นเหล็กเสริม	CR 2	0.6x0.6
6	S12	GD4	รอยถูกรถชน มีการหลุดล่อนเล็กน้อย	CR 4	0.3x0.3
7	P1	CB	หลุดล่อนเป็นบริเวณเล็กเห็นเหล็กเสริมเล็กน้อย	CR 2	0.4x0.4
8	EJ1	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
9	EJ2	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
10	EJ3	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
11	EJ4	EJ	รอยต่อมีช่องว่าง 30 มม.	CR 2	0.03X8
12	EJ5	EJ	รอยต่อมีช่องว่าง 30 มม.	CR 2	0.03X8
13	EJ6	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
14	EJ7	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
15	EJ8	EJ	รอยต่อมีช่องว่าง 30 มม.	CR 2	0.03X8
16	EJ9	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
17	EJ10	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
18	EJ11	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
19	EJ12	EJ	รอยต่อมีช่องว่าง 30 มม.	CR 2	0.03X8
20	EJ13	EJ	วัสดุอุดรอยต่อชำรุดเสื่อมสภาพ	CR 2	0.03X8
21	S2	SW1	หลุดล่อนเป็นบริเวณกว้างเห็นเหล็กเสริม	CR 2	0.15X2
22	S3	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 4	0.001x20
23	S4	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
24	S4	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
25	S4	RL1	รูพรุนเป็นรังผึ้ง ไม่เห็นเหล็กเสริม	CR 3	0.2X0.5
26	S4	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001X7
27	S5	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
28	S5	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x3
29	S5	RL1	รอยแตก เสียรูปร่างเล็กน้อย	CR 2	0.5x22.5
30	S5	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x13
31	S6	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
32	S6	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x6
33	S6	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x10
34	S6	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x8
35	S6	RL2	ท่อเหล็กราวสะพานเสียรูป	CR 3	2"x5m



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ระดับความรุนแรง	ขนาด
36	S7	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
37	S7	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x8
38	S7	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x8
39	S8	RL1	รอยแตกร้าวเฉียง	CR 2	0.001x0.8
40	S8	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x12
41	S8	RL2	ท่อเหล็กราวสะพานขาดหาย	CR 2	2"x0.4m
42	S8	RL2	ท่อเหล็กราวสะพานขาดหาย	CR 2	2"x0.4m
43	S9	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
44	S9	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
45	S9	WS	ผิวจราจรเสียหาย	CR 2	0.3x0.1
46	S10	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
47	S10	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x10
48	S10	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x5
49	S11	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x10
50	S12	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
51	S12	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
52	S12	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
53	S12	SW1	รอยแตกขนาดเล็กตามยาว	CR 3	0.001x2
54	S12	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
55	S12	SW2	รอยแตกขนาดเล็กตามขวาง	CR 3	0.001x1
56	S12	RL2	ท่อเหล็กราวสะพานขาดหาย	CR 2	2"x0.4m
57	S12	RL2	ท่อเหล็กราวสะพานขาดหาย	CR 2	2"x0.4m



2.5 การประเมินความเสียหายในภาพรวม

จากการประเมินด้วยสภาพการใช้งาน (Condition Rating, CR) สามารถประเมินสภาพการใช้งานแต่ละชิ้นส่วนตามบริเวณได้ดังตารางที่ 2-4 และแต่ละชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งสะพานดังตารางที่ 2-5 จากตารางจะพบว่ารอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint) มีค่าสภาพการใช้งาน ต่ำที่สุดคือระดับชำรุด (CR=2) อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนต่างๆ ในสะพานมีความสำคัญต่างกัน จึงจำแนกชิ้นส่วนต่างๆ ตามกลุ่มโครงสร้างดังนี้ โครงสร้างส่วนบน โครงสร้างส่วนล่าง ส่วนประกอบรอง และสรุปค่า สภาพการใช้งานตามกลุ่มโครงสร้างดังตารางที่ 2-3 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสภาพการใช้งานของโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างของสะพานอยู่ระหว่างระดับดี (CR=4) และระดับดีมาก (CR=5) กล่าวโดยรวมสะพานมีสภาพแข็งแรง แต่ยังคงมีความเสียหายที่ควรได้รับการซ่อมบำรุงและเสริมกำลังตามกำหนดการ

ตารางที่ 2-3 การประเมินระดับสภาพการใช้งาน ตามกลุ่มโครงสร้าง

กลุ่มโครงสร้าง	ค่า CR เฉลี่ย
โครงสร้างส่วนบน	4.906
โครงสร้างส่วนล่าง	4.875
ส่วนประกอบรอง	3.985

ตารางที่ 2-4 การประเมินระดับสภาพการใช้งาน ตามบริเวณ

Area Code	Member Code	กลุ่มโครงสร้าง	ค่า CR แต่ละชิ้นส่วน	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
S1	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	5 5	
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	
	GD	โครงสร้างส่วนบน	2 4 4 2	
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	
S2	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	2 5	
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	
S3	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	4 5	
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	
S4	RL	ส่วนประกอบรอง	3 5	4
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	
S5	RL	ส่วนประกอบรอง	2 5	3.5
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Area Code	Member Code	กลุ่มโครงสร้าง	ค่า CR แต่ละชิ้นส่วน	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S6	RL	ส่วนประกอบรอง	5 3	4
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	3
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	5
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	5
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S7	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	3
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	5
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	5
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S8	RL	ส่วนประกอบรอง	2 2	2
	SW	ส่วนประกอบรอง	5 3	4
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	5
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	5
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S9	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	3
	WS	ส่วนประกอบรอง	2	2
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	5
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S10	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	3
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	5
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	5



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

Area Code	Member Code	กลุ่มโครงสร้าง	ค่า CR แต่ละชิ้นส่วน	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S11	RL	ส่วนประกอบรอง	5 5	5
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 5	4
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	5
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 5	5
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
S12	RL	ส่วนประกอบรอง	5 2	3.5
	SW	ส่วนประกอบรอง	3 3	3
	WS	ส่วนประกอบรอง	5	5
	DK	โครงสร้างส่วนบน	5	5
	GD	โครงสร้างส่วนบน	5 5 5 4	4.75
	DP	ส่วนประกอบรอง	5 5 5 5 5 5	5
J1	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J2	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J3	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J4	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J5	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J6	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J7	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J8	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J9	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J10	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J11	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J12	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
J13	EJ	ส่วนประกอบรอง	2	2
P1	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	2	2
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	5
P2	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	5



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Area Code	Member Code	กลุ่มโครงสร้าง	ค่า CR แต่ละชิ้นส่วน	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
P3	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P4	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P5	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P6	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P7	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P8	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P9	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P10	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
P11	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	PR	โครงสร้างส่วนล่าง	5 5 5 5	
A1	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	BW	ส่วนประกอบรอง	5	
	WW	ส่วนประกอบรอง	5 5	
	SP	ส่วนประกอบรอง	5	
A2	CB	โครงสร้างส่วนล่าง	5	5
	BW	ส่วนประกอบรอง	5	
	WW	ส่วนประกอบรอง	5 5	
	SP	ส่วนประกอบรอง	5	



ตารางที่ 2-5 การประเมินระดับสภาพการใช้งาน ตามกลุ่มชิ้นส่วน

Member Code	ชิ้นส่วนโครงสร้าง (Member)	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
RL	ราวสะพาน (Railing)	4.33
SW	ทางเท้า (Sidewalk)	3.50
WS	ผิวทาง (Wearing Surface)	4.75
DK	พื้นสะพาน (Deck)	5.00
GD	คานตามยาว (Girder)	4.81
DP	ไดอะแฟรม (Diaphragm)	5.00
EJ	รอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint)	2.00
CB	คานรัดหัวเสา (Cap Beam)	4.77
PR	เสาตอม่อ (Pier)	5.00
BW	กำแพงหลัง (Back Wall)	5.00
WW	หูช้าง (Wing Wall)	5.00
SP	ลาดป้องกันตลิ่ง (Slope Protection)	5.00



2.6 วิธีการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน

การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมในโครงการนี้จะสำรวจข้อมูลสำคัญ ได้แก่ ตำแหน่ง ทิศทาง ระดับความลึก และขนาดของเหล็กเสริม ในองค์ประกอบต่างๆ ของสะพาน ตามช่วงที่คัดเลือกไว้ (รวม 4 ช่วงสะพาน) โดยมีพื้นที่สแกน ช่วงสะพานละอย่างน้อย 200 ตารางเมตร รวมพื้นที่สแกนทั้งหมดอย่างน้อย 800 ตารางเมตร

การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริม ใช้เครื่องมือ Ferro Scan ควบคู่กับเครื่องมือ Ground Penetrating Radar (GPR) โดยเครื่องมือ Ferro Scan สามารถให้รายละเอียดด้านตำแหน่งและขนาดของเหล็กเสริมที่อยู่ใต้ผิวคอนกรีตในระยะไม่เกิน 100 มม. ขณะที่เครื่องมือ Ground Penetrating Radar จะให้ข้อมูลตำแหน่งเหล็กเสริมในบริเวณที่ลึกยิ่งขึ้นไปได้ถึง 300 มม. เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานได้ครบถ้วนที่สุด จึงได้คัดเลือกชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้ในการรับแรงของโครงสร้างสะพาน ดังนี้ เสาตอม่อ (Pier) คานหลัก (Girder) คานรองพื้นสะพาน (Floorbeam) และพื้นสะพาน (Deck) โดยแต่ละชิ้นส่วนจะเน้นสำรวจในบริเวณที่มีคาดว่าจะมีแรงกระทำสูง ข้อมูลรายละเอียดเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจจะถูกนำไปใช้ประกอบการออกแบบบูรณะสะพานต่อไป

2.6.1. การสำรวจระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้วยเครื่องมือ Ferro Scan

การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมด้วยเครื่องมือ Ferro Scan เป็นการสำรวจเพื่อหาตำแหน่ง ขนาด และจำนวนเหล็กเสริม เฉพาะเหล็กเสริมชั้นนอกที่มีความลึกไม่เกิน 100 มม. จากผิวสำรวจของโครงสร้าง การสำรวจด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างระหว่างการสำรวจ และสามารถดำเนินการได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 2-8 ตัวอย่างเครื่องมือ Ferro Scan, HILTI PS200

2.6.1.1. ขั้นตอนการสำรวจ

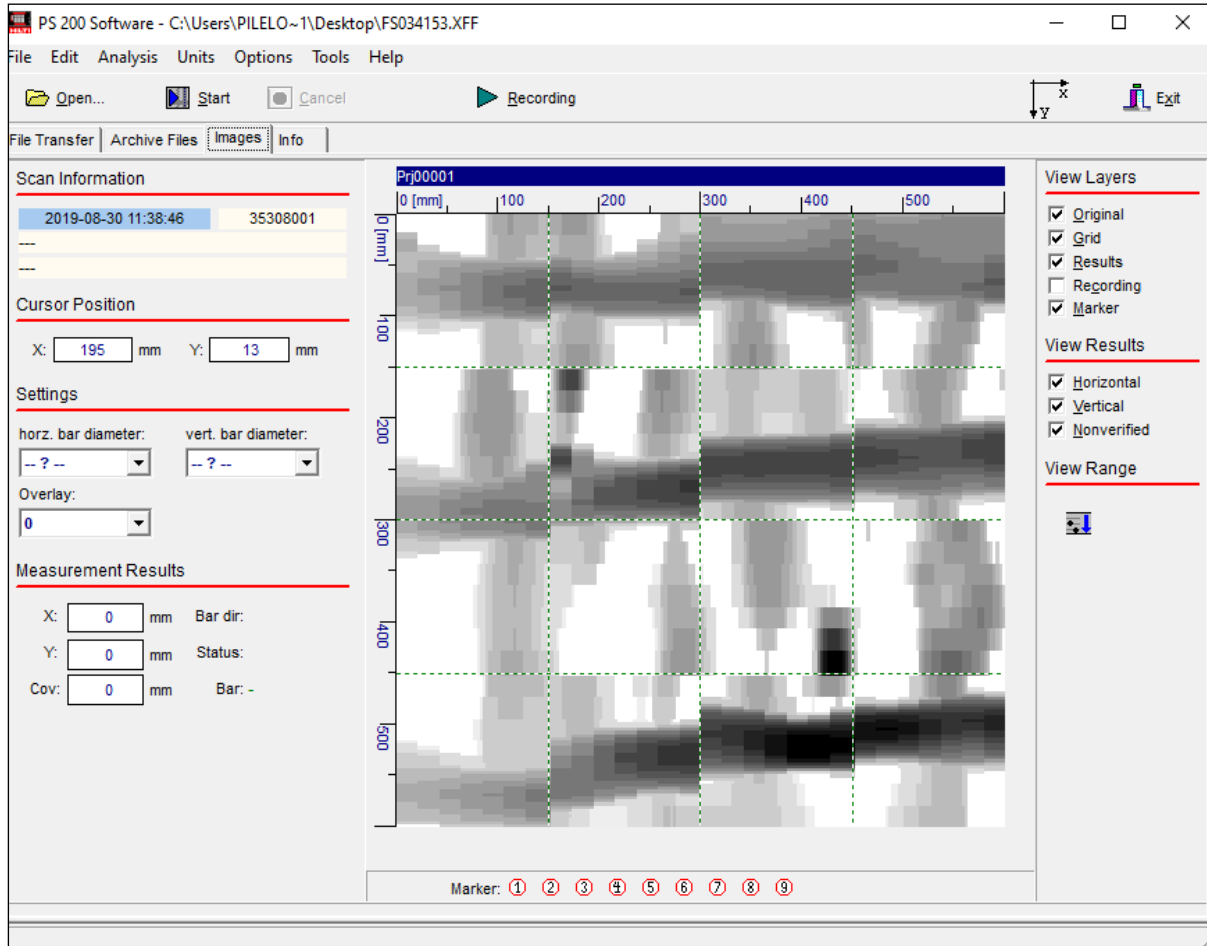
- 1) ตรวจสอบสภาพพื้นผิวของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการสำรวจ โดยพื้นผิวจะต้องค่อนข้างเรียบ เนื่องจากจะมีผลต่อสัญญาณคลื่นที่ใช้สแกน
- 2) ทำการลากเครื่องมือสแกนในลักษณะเป็นตาราง (Grid) ในทิศทางแนวนอนและแนวตั้ง ทุก ๆ ระยะ 0.15 เมตร จนกระทั่งครบตามพื้นที่สำรวจที่กำหนด



รูปที่ 2-9 ตัวอย่างการสแกนโครงสร้างด้วยเครื่องมือ Ferro Scan



3) เมื่อทำการสแกนเรียบร้อยแล้ว เครื่องมือทดสอบจะแสดงผลเป็นภาพกราฟิกทางจอ 모니터 PS 200 Monitor ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่ง การจัดเรียงตัว และจำนวนของเหล็กเสริม (เฉพาะเหล็กเสริมชั้นนอกเพียงชั้นเดียว) รวมถึงขนาดของเหล็กเสริม (ขึ้นอยู่กับระยะหุ้มของคอนกรีต)



รูปที่ 2-10 ตัวอย่างผลการตรวจสอบจากเครื่องมือ Ferro Scan

2.6.2. การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริม ด้วยเครื่องมือ Ground Penetrating Radar

การสำรวจด้วยเครื่องมือ Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นการทดสอบเพื่อหารายละเอียดของวัสดุต่าง ๆ ทั้งที่เป็นโลหะ และวัสดุอื่น ๆ ด้วยวิธีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency) ประมาณ 0.2-4.0 GHz จากหัวส่ง เข้าสู่วัสดุตัวกลางที่ต้องการตรวจสอบ อาทิ คอนกรีต เป็นต้น และทำการรับสัญญาณ (Antenna) โดยเครื่องมือดังกล่าว สามารถใช้หาตำแหน่งเหล็กเสริม ระยะหุ้มของคอนกรีต รวมถึงความต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีต เครื่องมือ GPR ที่ใช้ในโครงการเป็นเครื่องมือสำรวจที่สามารถหาตำแหน่งเหล็กเสริมในองค์อาคารคอนกรีตที่มีความหนาไม่เกิน 300 มม. ได้ เครื่องมือทดสอบนี้ไม่สามารถใช้ในการทดสอบในบริเวณพื้นที่ที่มีความชื้นสูงหรือมีน้ำขังที่ผิวองค์อาคารได้



รูปที่ 2-11 ตัวอย่างเครื่องมือ Ground Penetrating Radar

2.6.2.1. ขั้นตอนการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR

- 1) ตรวจสอบสภาพพื้นผิวขององค์อาคารที่ต้องการสำรวจ โดยพื้นผิวต้องค่อนข้างเรียบ เนื่องจากจะมีผลต่อสัญญาณคลื่นที่ใช้สแกน
- 2) ทำการลากเครื่องมือสแกนในลักษณะเป็นตาราง (Grid) ในทิศทางแนวนอนและแนวตั้ง ทุกระยะ 0.15 เมตร จนกระทั่งครบตามพื้นที่สำรวจที่กำหนด

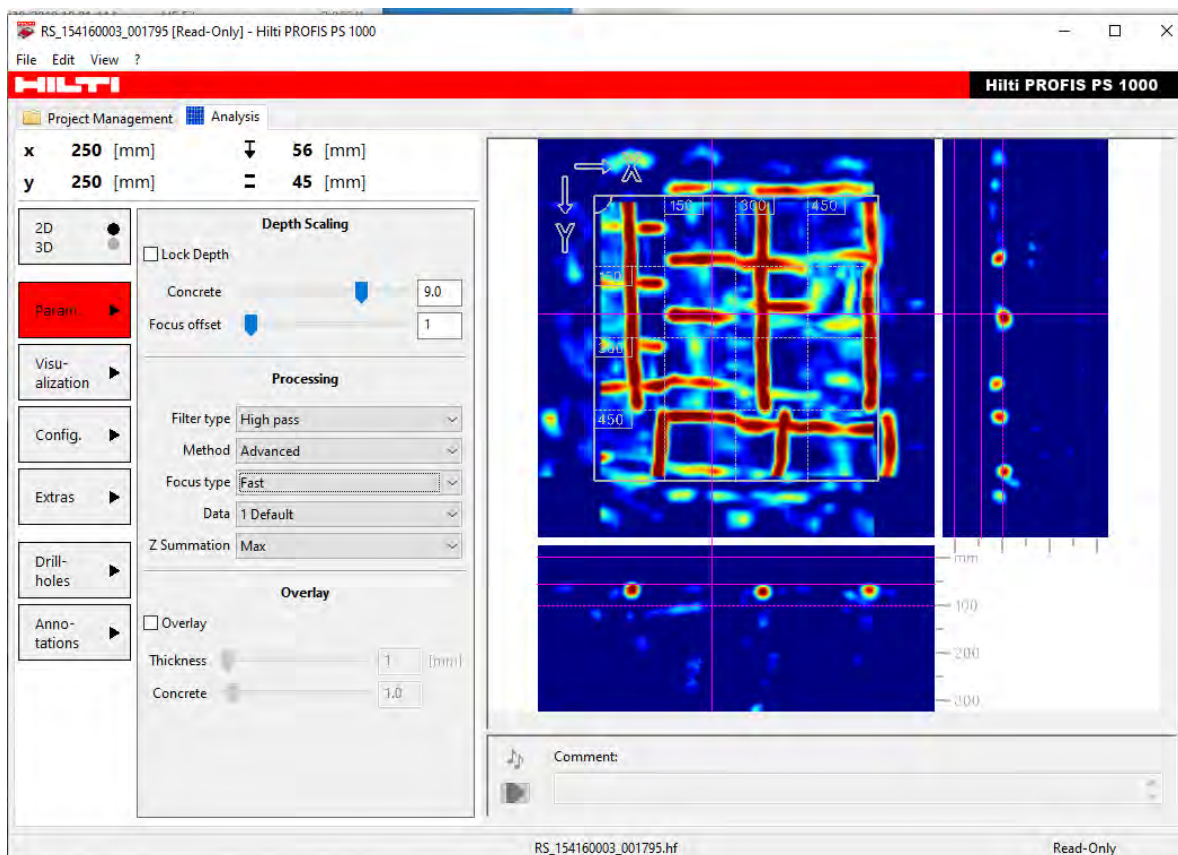


โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 2-12 ตัวอย่างการสแกนโครงสร้างด้วยเครื่องมือ Ground Penetrating Radar

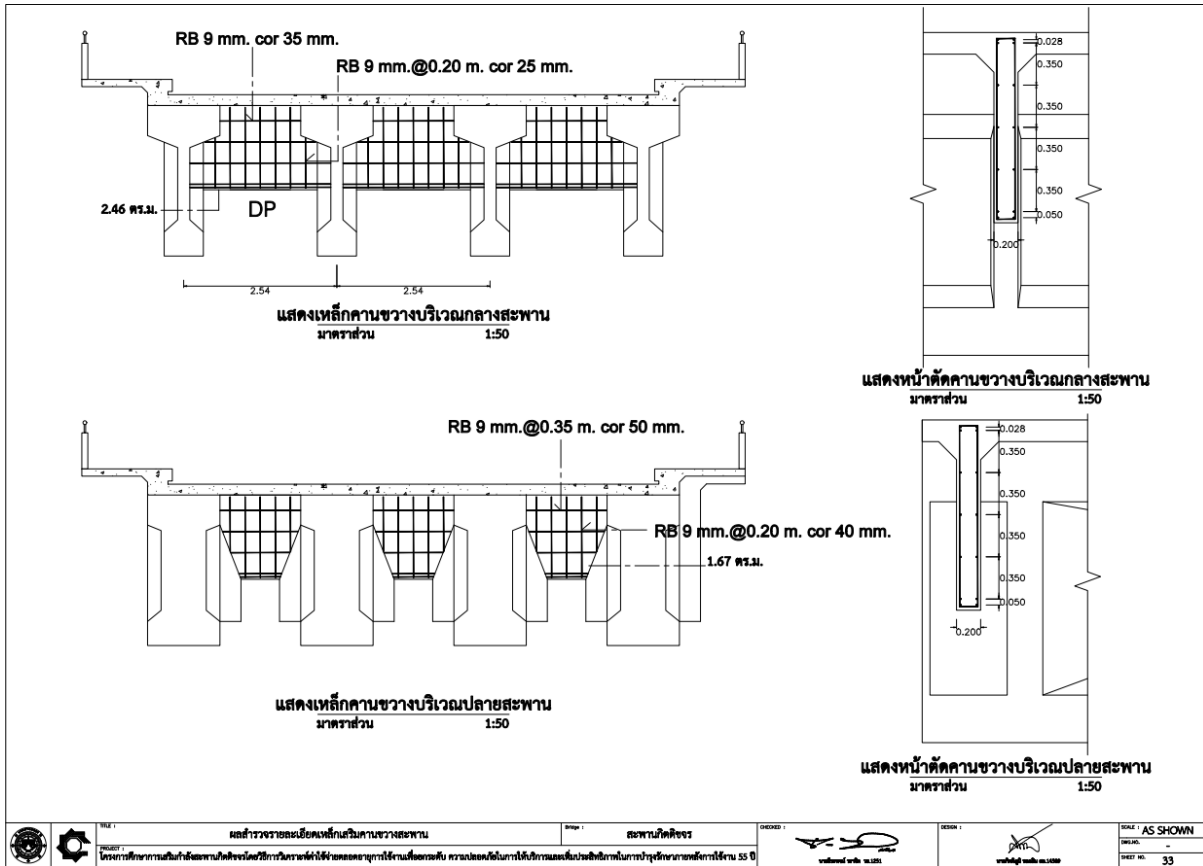
3) เมื่อทำการสแกนเรียบร้อยแล้ว เครื่องมือทดสอบจะแสดงผลเป็นภาพกราฟิกทางจอมอนิเตอร์บนเครื่องมือ ซึ่งจะประกอบด้วยตำแหน่ง การจัดเรียงตัว และจำนวนของเหล็กเสริมเฉพาะที่มีความลึกภายในระยะ 300 มม.



รูปที่ 2-13 ตัวอย่างผลการตรวจสอบที่ได้จากเครื่องมือ Ground Penetrating Radar

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

จากนั้นจะนำข้อมูลผลการสแกนเหล็กเสริมในบริเวณต่าง ๆ ของสะพานมาจัดทำเป็นแบบสะพานที่มีรายละเอียดเหล็กเสริมดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 ตัวอย่างผลการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน



2.7 ผลการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างสะพาน

ผลการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมเฉพาะช่วงความลึกของการตรวจสอบไม่เกิน 300 มม. รวมพื้นที่สำรวจทั้งหมด 946 ตร.ม. รายละเอียดในการสำรวจทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 2-6 ผลการสำรวจได้รวบรวมแสดงไว้ในแบบสำรวจสะพาน ที่ได้แนบมากับรายงานฉบับนี้ พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดเหล็กเสริมโครงสร้างอยู่ในรูปตัด (Typical section) และรูปด้านต่าง ๆ ที่แสดงตำแหน่ง และจำนวนเหล็กเสริมแต่ละช่วงสะพานไว้ในแบบสำรวจสะพาน ที่ได้แนบมากับรายงานฉบับนี้ แสดงตัวอย่างแบบสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริม

ตารางที่ 2-6 พื้นที่สำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมในชั้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพาน

ชั้นส่วนโครงสร้าง	พื้นที่สำรวจรายละเอียดเหล็กเสริม (ตร.ม.)			
	S1	S10	S11	S12
เสาตอม่อ (Pier)	50.72	50.72	50.72	50.72
คานรัดเสาตอม่อ (Cap Beam)	6	6	6	6
คานหลัก (Girder)	58.75	80.25	117.5	37.5
คานขวาง (Diaphragm)	12.39	12.39	12.39	12.39
พื้นสะพาน (Deck)	66	66	66	66
ทางเท้า (Sidewalk) บริเวณทางเท้า	28	28	28	28
รวม	221.86	243.36	280.61	200.61
รวมทั้งสิ้น	946.44			

บทที่ 3 การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

3.1 หลักการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

3.1.1. หลักการตรวจวัดด้วยวิธี Crossbow

การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรงด้วยวิธี Crossbow นี้จะวัดการเสียรูปด้านข้างโดยแรงดึง และนำข้อมูลที่วัดได้ ไปคำนวณด้วยการสมการที่ได้จากจากทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่าแรงดึงที่ในลวดอัดแรง ณ ปัจจุบัน

3.1.2. ขั้นตอนการสอบเทียบ

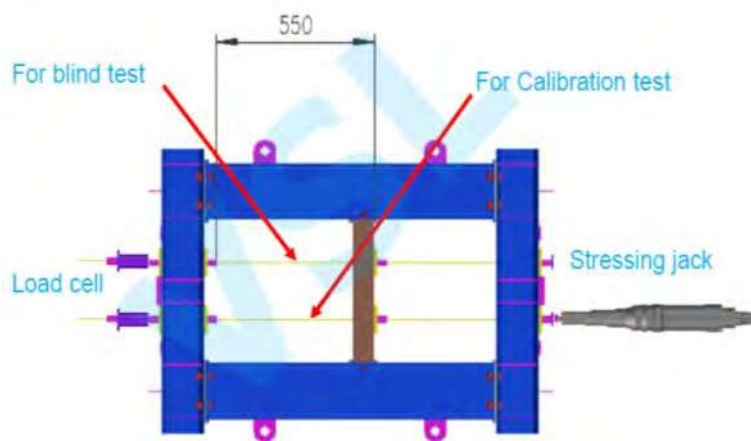
อุปกรณ์และเครื่องมือจะต้องผ่านการทดสอบและสอบเทียบตามมาตรฐานการสอบเทียบ ซึ่งจะแบ่งการทดสอบการสอบเทียบออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1) การสอบเทียบเครื่องมืออุปกรณ์ Crossbow (For calibration test)
- 2) การทดสอบการตรวจสอบอุปกรณ์ Crossbow (For Verification test)

จะอธิบายเป็นลำดับข้างล่างนี้

3.1.3. การเตรียมแบบจำลอง

การเตรียมแบบจำลองแสดงไว้ด้านล่าง



รูปที่ 3-1 Mock-up arrangement

3.1.4. การติดตั้งอุปกรณ์ Crossbow ในแบบจำลอง

หลังจากได้แรงดึงที่ต้องการในลวด PC wire ในแบบจำลองแล้ว ให้ติดตั้งอุปกรณ์ Cross Bow ตรงกลางของลวด PC wire และเชื่อมต่ออุปกรณ์ Cross Bow กับลวด PC wire เมื่อการทดสอบเริ่มขึ้น ค่อย ๆ ออกแรงดึงจนกระทั่งล้อยทั้งสองของ Cross Bow เพื่อสัมผัสกับ PC wire พอดี



รูปที่ 3-2 Crossbow device installations for mockup frame.



3.1.5. การดำเนินการทดสอบการสอบเทียบ

มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ดึงลวด PC wire ตามแรงดึงที่กำหนดไว้
- 2) ติดตั้ง Crossbow device สำหรับการทดสอบ
- 3) ออกแรงต้านข้างจนกว่าการเสียรูปด้านข้างจะมากกว่าหรือเท่ากับ 3 มม. โดยโยกป้อมมือของ Crossbow device ทดสอบ 5 ครั้งในแต่ละแรงดึง
- 4) บันทึกแรง ความดัน และการโก่งตัวของ การทดสอบ
- 5) คลายแรงดึงของ Crossbow
- 6) เพิ่มแรงดึงตามตารางที่ 3-1 และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 5 จนกว่าจะถึงแรงที่ต้องการ
- 7) นำข้อมูลจากการทดสอบมาคำนวณผลเพื่อทำรายงานผลการทดสอบ

ตารางที่ 3-1 แรงดึงลวด PC wire.

ลำดับที่	แรงดึง (kN)	ความดัน แม่แรง (bar)
1	5	9
2	10	20
3	15	30
4	20	40
5	25	51
6	30	61
7	35	71
8	40	82
9	45	92
10	50	102

3.1.6. รายงานการทดสอบการสอบเทียบ

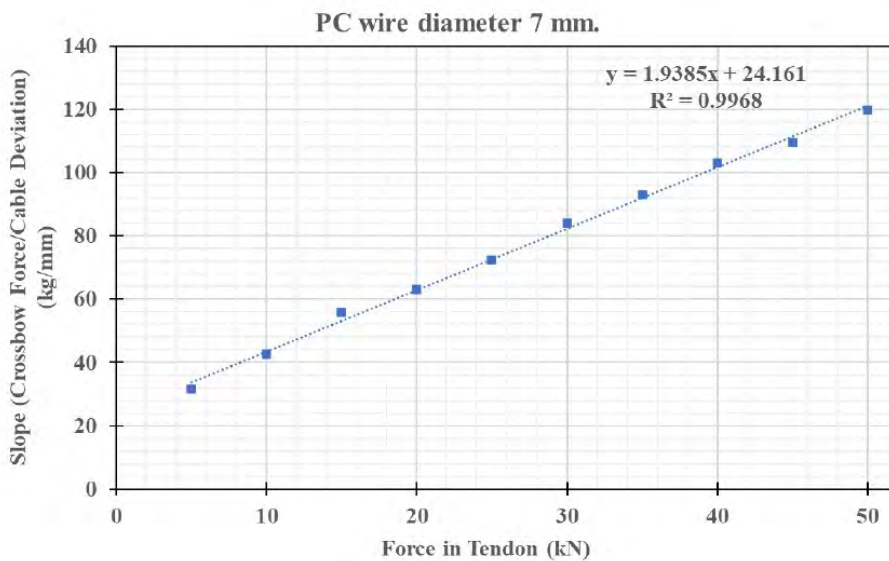
รายงานการทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งแสดงไว้ด้านล่าง:

- 1) รายงานการสอบเทียบอุปกรณ์ Crossbow
- 2) รายงานการทดสอบการตรวจสอบสำหรับอุปกรณ์ Crossbow

ตารางที่ 3-2 ผลการสอบเทียบอุปกรณ์ Cross Bow

แรงดึงในลวด (kN)	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสียรูปด้านข้าง (kg/mm)					เฉลี่ย
	ครั้งที่ทดสอบ					
	1	2	3	4	5	
5	31.052	30.066	32.709	33.814	29.972	31.523
10	40.469	42.995	42.923	43.140	43.315	42.568
15	55.563	56.068	54.923	56.431	55.967	55.790
20	64.839	61.047	61.540	64.807	63.802	63.207
25	72.226	74.459	71.674	70.927	72.200	72.297
30	82.128	84.861	82.917	84.642	85.365	83.983
35	93.182	90.224	94.294	93.460	94.474	93.127
40	103.042	103.660	101.703	103.073	104.176	103.131
45	108.171	109.809	108.142	109.052	111.789	109.393
50	117.544	121.251	118.152	120.467	120.942	119.671





รูปที่ 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบ Crossbow กับแรงดึงในลวดอัดแรง สำหรับ PC wire diameter 7 mm.

3.1.7. ผลการทดสอบการตรวจสอบ Crossbow

- แรงดึงที่ดึงลวด PC wire = 39 kN (จากแม่แรง)
- Crossbow วัดได้คือ = 39.06 kN ความคลาดเคลื่อน 0.154%

ทำการทดสอบยืนยันด้วยอุปกรณ์ Cross Bow จำนวน 1 ตัวอย่าง และทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง การทดสอบยืนยันได้ผลของแรงสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงในลวดอัดแรงและผลการทดสอบอุปกรณ์ หน้าไม่ดังแสดงในสมการที่ 4.1-1

$$\text{ผลการทดสอบ Crossbow} = (1.9385 \times \text{แรงดึงในลวดอัดแรง}) + 24.161 \text{ (สมการที่ 3.1-1)}$$

อ้างอิงจากข้อมูลผลลัพธ์ข้างต้น มีการใช้แรงดึงที่ระบุจากแม่แรงที่ 39.00 kN และวัดจากอุปกรณ์ Crossbow ได้แรงที่ 39.06 kN ที่มีความคลาดเคลื่อน 0.154%

ดังนั้น ข้อสรุปของการทดสอบนี้จึงเป็นที่ยอมรับได้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดสอบน้อยกว่า 1 %

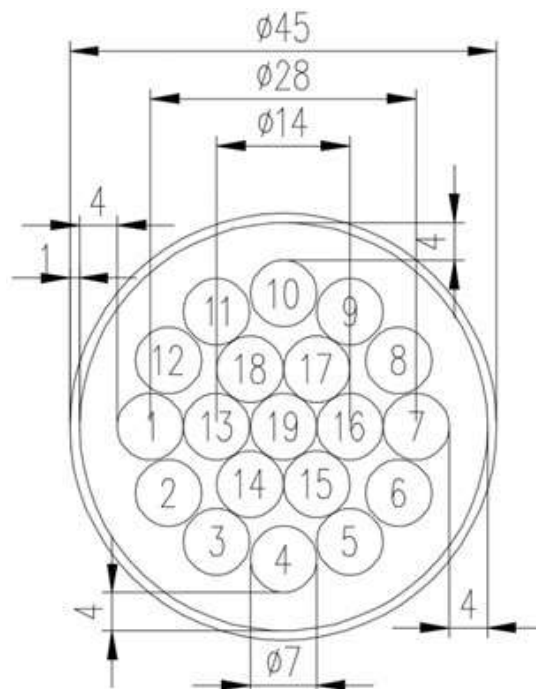
3.2 การตรวจวัดหน้างาน

3.2.1. คำจำกัดความของการสังเกตและการตรวจวัดหน้างาน

การสังเกตและตรวจวัดที่หน้างานเพื่อตรวจสอบชนิดของสาย PC wire จำนวนสาย PC wire ในท่อเป็นไปตามแบบก่อสร้างหรือไม่ เพื่อนำผลการตรวจสอบเข้าสู่กระบวนการทดสอบเทียบมาตรฐาน และทดสอบหน้างาน จากการตรวจวัดพบว่า PC wire มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มม. ท่อหุ้มเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มม. และนับจำนวนลวดอัดแรงด้านนอกได้ 12 เส้น ซึ่งภายหลังพบว่าไม่มีลวดอัดภายใน มีเพียงสปริงเหล็กที่อยู่ด้านใน รูปที่ 3-5 แสดงหน้าตัดลวดอัดแรงจากการตรวจวัดหน้างาน



รูปที่ 3-4 การสำรวจและการตรวจวัดหน้างาน



รูปที่ 3-5 หน้าตัดลวดอัดแรงจากการตรวจวัดหน้างาน



3.2.2. ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

ทดสอบทั้งหมด 4 ช่วงสะพานดังนี้:

- ช่วงสะพานที่ 1 ฝั่งแม่สอด
- ช่วงสะพานที่ 10 11 12 ฝั่งเมืองตาก

3.2.3. ข้อมูลจำเพาะของวัสดุตามแบบก่อสร้างเก่า

- ลวดอัดแรง: ลวดแรงดึงสูง 7 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มม. ความเค้นเริ่มต้น 10,000 กก./ตร.ซม 38 kN/เส้น

3.2.4. ขั้นตอนการเตรียมการ

การเตรียมการในการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง ดำเนินการโดยคำนึงถึงความเหมาะสมกับสภาพภาคสนามและสอดคล้องกับขั้นตอนการทำงานที่ปลอดภัยเป็นหลัก โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

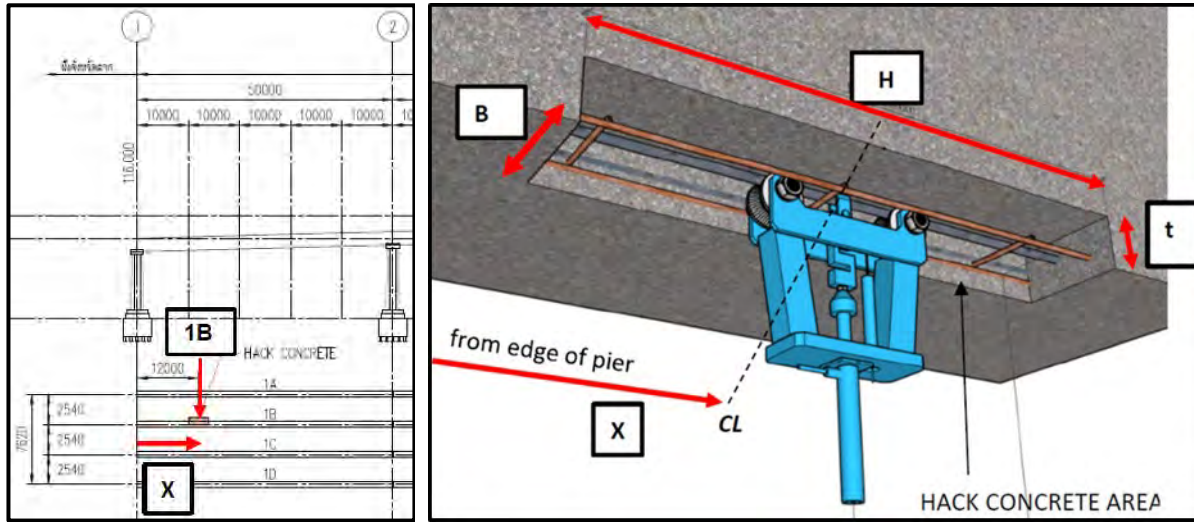
1) การตั้งนั่งร้าน

หลังจากกำหนดจุดที่ทำการทดสอบแล้วทำการตั้งนั่งร้าน เพื่อการเข้าถึงที่พื้นที่การทำงานอย่างปลอดภัย



รูปที่ 3-6 การติดตั้งนั่งร้านสำหรับการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

- 2) กำหนดตำแหน่งและขนาดที่จะทำการสกัดช่องเปิดเพื่อทดสอบและบันทึกข้อมูลตำแหน่ง

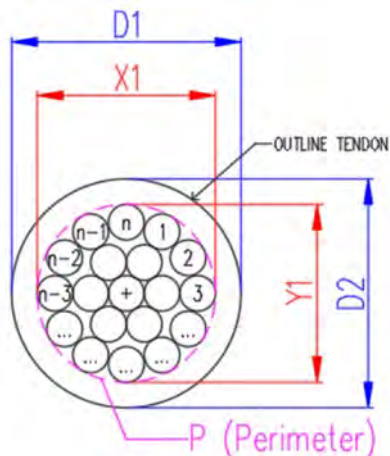


รูปที่ 3-7 การกำหนดตำแหน่งการทดสอบ

- 3) สกัดคอนกรีตตามพื้นที่ที่กำหนดไว้ จะมี พื้นที่เพียงพอสำหรับการทดสอบ และเปิดวัสดุหุ้มลวดอัดแรงและปูนเกร้าท์ออกเพื่อให้ Crossbow จากรูปที่ 3-7 กำหนดให้

- H (ความยาว ขนานกับสาย) อย่างน้อย 700 มม.
- B (ความกว้าง) ประมาณ 200 มม.
- T (ความสูง) ประมาณ 100 มม.

- 4) เปิดท่อและตรวจสอบลวดภายในท่อและบันทึกข้อมูลดังรูปที่ 3-8

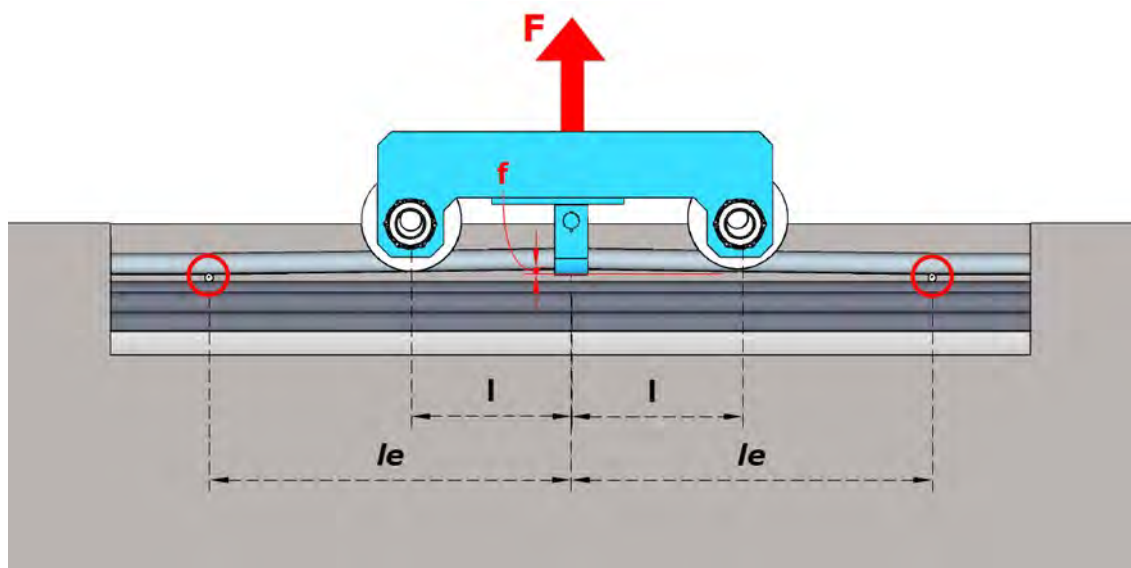


- D1** : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ
- D2** : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ
- X1** : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกลุ่มลวด/เส้นลวดในระนาบแนวนอน
- Y1** : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกลุ่มลวด/เส้นลวดในระนาบแนวตั้ง
- P** : เส้นรอบวงของกลุ่มลวด

รูปที่ 3-8 การตรวจสอบรายละเอียดท่อ



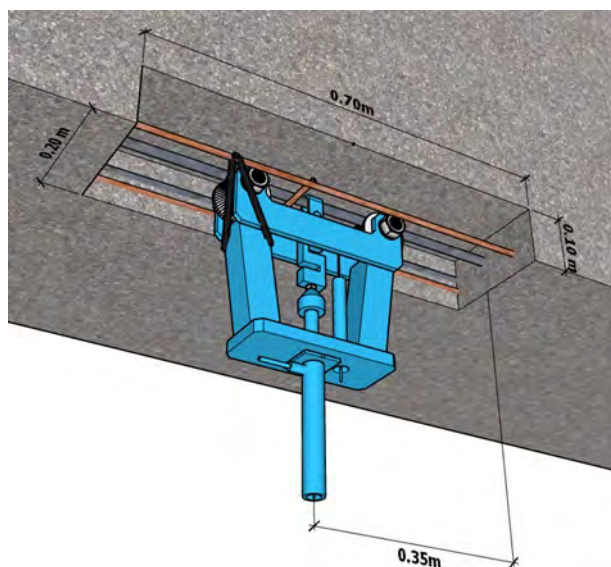
- 5) ทำความสะอาดเศษผง คอนกรีต วัสดุยาแนว ฯลฯ จากเกลียว
- 6) ติดตั้งแผ่นซิมเพื่อให้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับติดตั้งหัวดึง



รูปที่ 3-9 ตำแหน่งติดตั้งแผ่นซิม

- 7) ดำเนินการทดสอบตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

3.2.5. การดำเนินการทดสอบตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง



รูปที่ 3-10 การติดตั้งอุปกรณ์ Crossbow

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์ Crossbow สำหรับการทดสอบ
- 2) ออกแรงต้านล่างจนกว่าการเสียรูปด้านล่างจะมากกว่าหรือเท่ากับ 3 มม.
- 3) บันทึกแรง ความดัน และการโก่งตัวของ การทดสอบ
- 4) คลายแรงดึงของ Crossbow
- 5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 4 สำหรับการทดสอบและดำเนินการทดสอบ 5 ครั้งต่อเส้น

หมายเหตุ: ในแต่ละตำแหน่งหรือแต่ละเส้นทดสอบ จะต้องทำการทดสอบแรงดึงสำหรับเส้นลวดอย่างน้อย 2 เส้น

- 6) นำข้อมูลจากการทดสอบมาคำนวณผลจัดทำรายงานผลการทดสอบ
- 7) ซ่อมคือสภาพด้วย non-shrink





รูปที่ 3-11 ทำการตรวจวัดหน้างานจริงในวันที่ 10 มกราคม 2023

3.3 ผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

ตารางที่ 3-3 สรุปผลการทดสอบ Crossbow

Span No.	Girder No	Tendon No.	PC wire number	Average force (kN)
1	GD3	1	1	33.0464
			2	34.9142
10	GD1	1	1	32.2897
			2	30.5001
11	GD2	1	1	31.8470
			2	31.9746
12	GD3	6	1	33.8175
			2	30.6617
			3	36.5302

*ข้อมูลเพิ่มเติม โปรดดูข้อ 3.5

3.4 งานเก็บความเรียบร้อยและส่งมอบงาน

หลังจากการตรวจวัดเสร็จสิ้น งานเก็บรายละเอียดได้ดำเนินการตามที่อธิบายไว้ด้านล่างงานเก็บความเรียบร้อยและซ่อมแซมพื้นผิว

- 1) การเอาเศษวัสดุที่ร้อนหลุด เศษเล็กเศษน้อย ฝุ่นออก ฯลฯ...
- 2) เคลือบอีพ็อกซี่ (Epicon Zinc HB-2) ที่ลวดอัดแรง หรือ PC wire



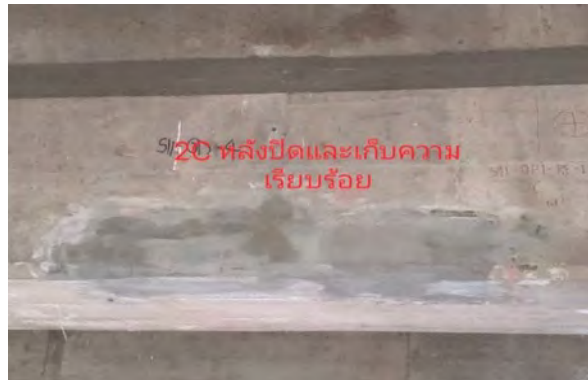
- 3) ทาหน้ายาประสานคอนกรีต



4) การผสม Non-shrink และการเท



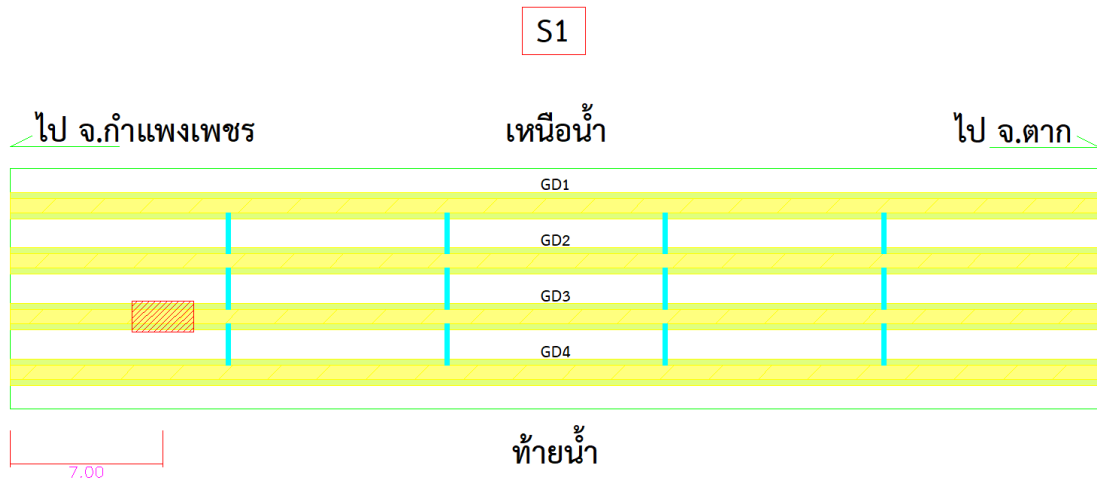
5) การบ่มและการซ่อมพื้นผิวให้เหมือนเดิม



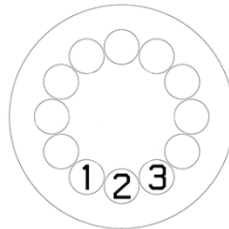
3.5 รายละเอียดผลการทดสอบตรวจวัดแรงดึง

3.5.1. คาบ GD3 บริเวณช่วงสะพานที่ 1

ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงแสดงดังรูปที่ 3-12 Tendon ที่ทำตรวจวัดคือ Tendon No.1 ดังรูปที่ 3-14 รายละเอียดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และการสกัดเปิดคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3-5 รายละเอียดผลตรวจวัดแสดงในตารางที่ 3-4 กราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 3-15 ถึงรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-12 ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงช่วงสะพานที่ 1

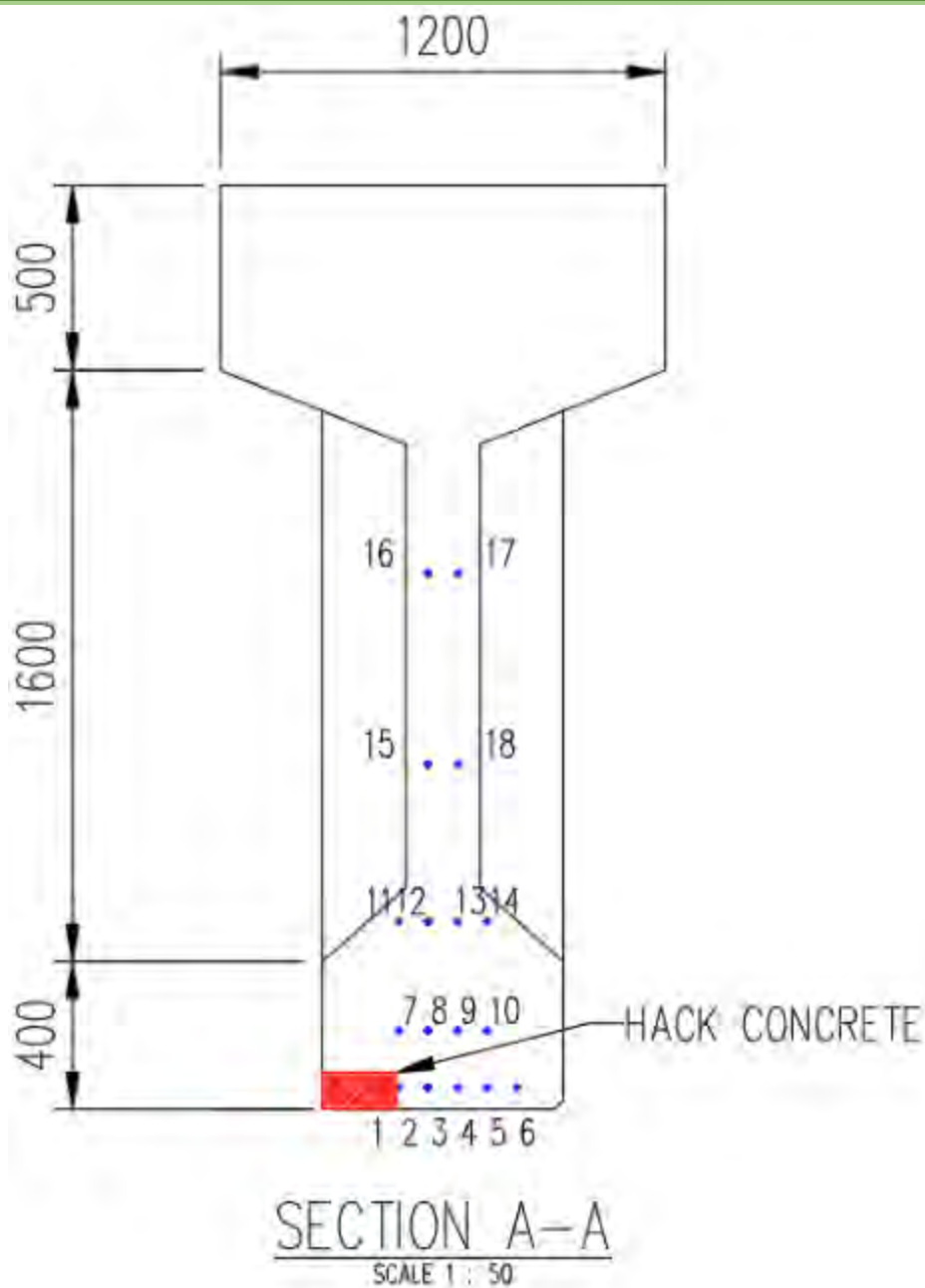


รูปที่ 3-13 ลำดับของ PC wire ในการตรวจวัดแรงดึง

ตารางที่ 3-4 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

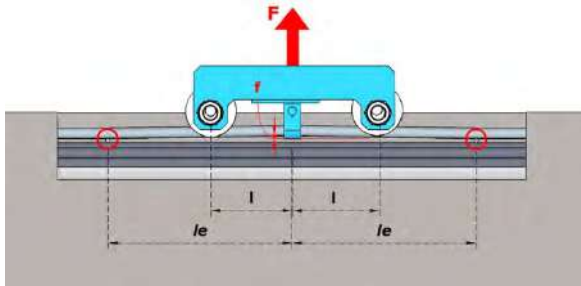
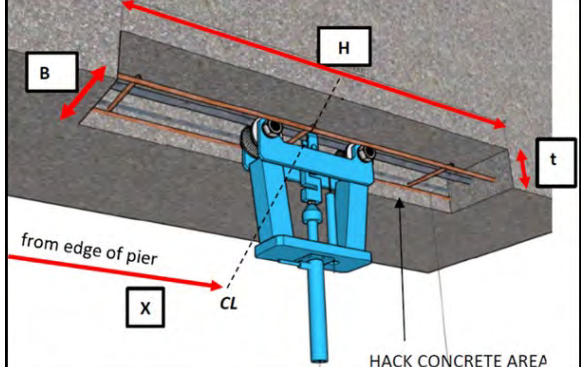
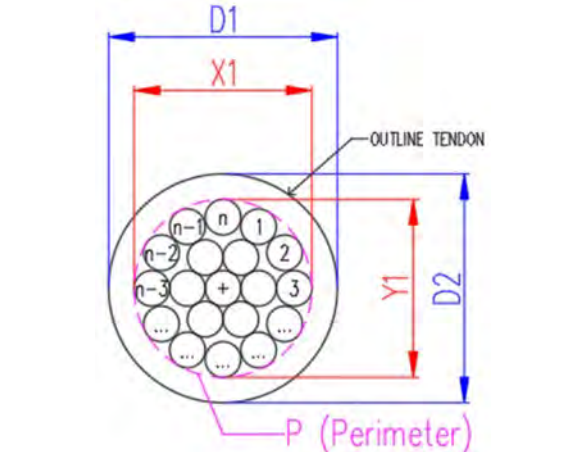
NO. PC WIRE	แรงดึงในลวดอัดแรงที่วัดได้ (KN)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	30.4879	31.6293	35.8012	35.2166	32.0968	33.0464
2	30.1486	34.0527	36.7356	36.8088	36.8255	34.9142



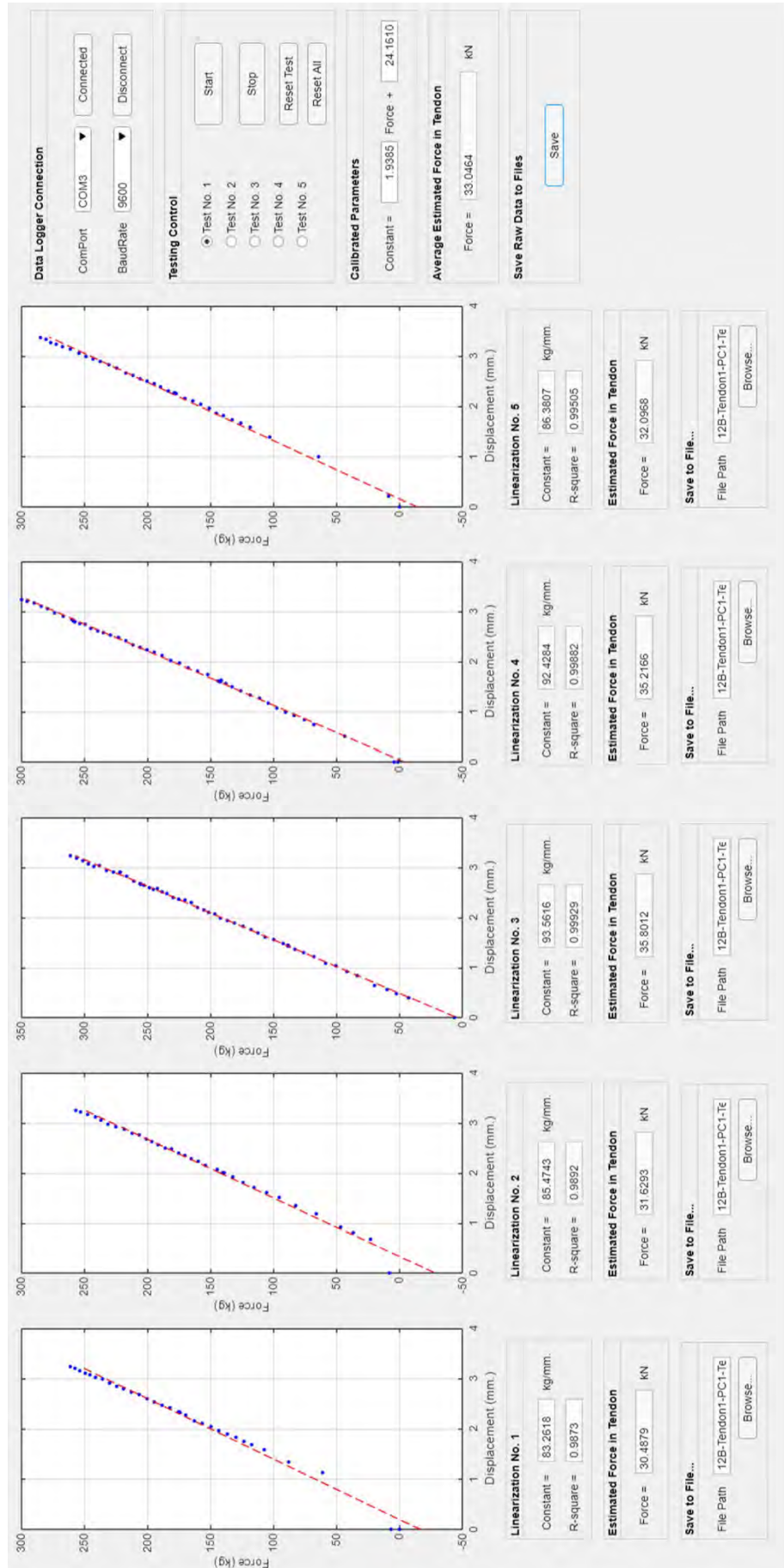


รูปที่ 3-14 Tendon ที่ทำตรวจวัด (Tendon No.1)

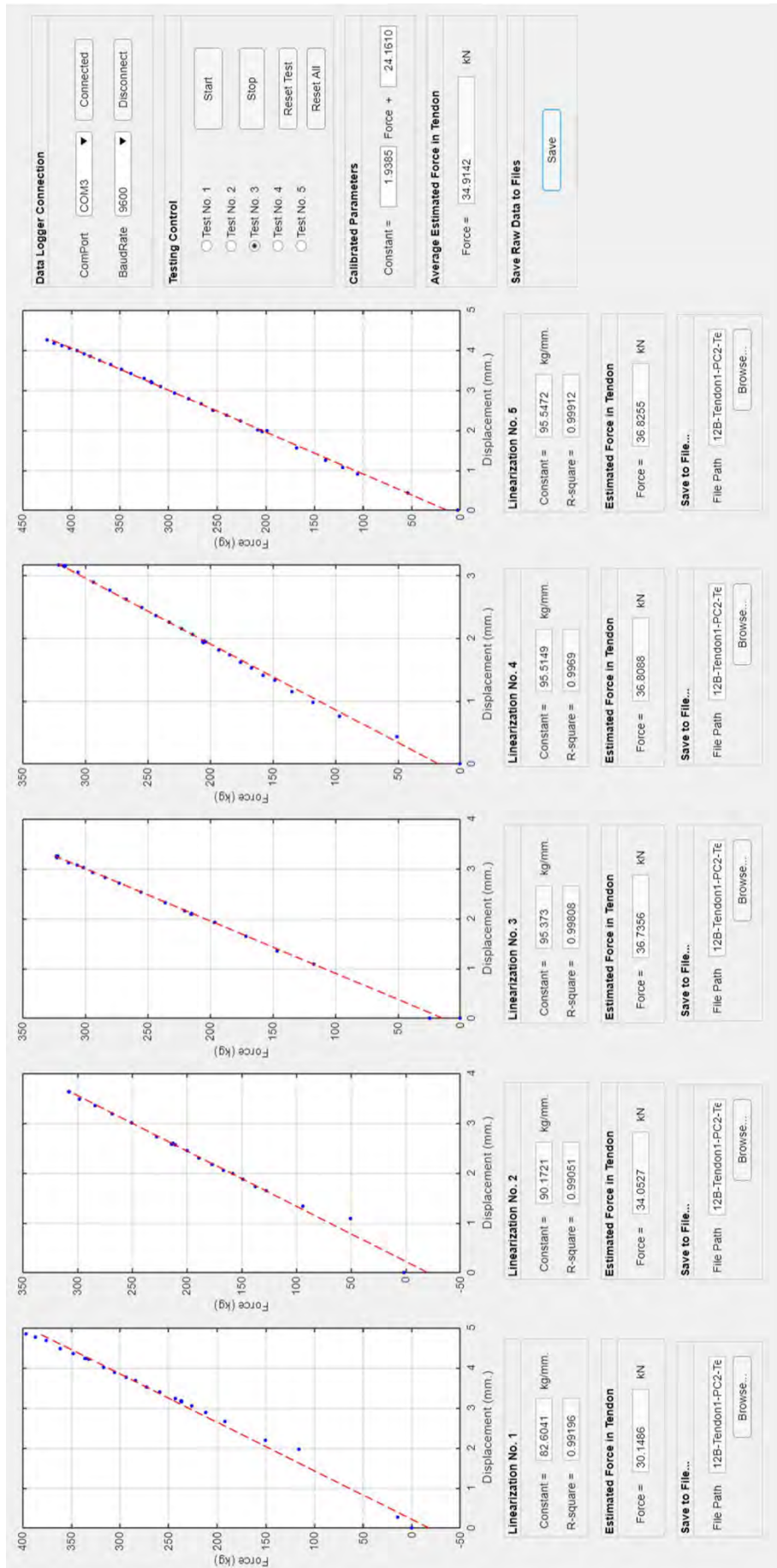
ตารางที่ 3-5 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์

	<p>$l = 125 \text{ mm}$ $le = 275 \text{ mm}$</p>
	<p>$X = 7.0 \text{ m}$ $B = 0.21 \text{ m}$ $H = 0.7 \text{ m}$ $T = 0.11 \text{ m}$</p>
	<p>$X1 = 39 \text{ mm}$ $Y1 = 39 \text{ mm}$ $P(\text{Perimeter}) = 122$ $D1 = 45 \text{ mm}$ $D2 = 45 \text{ mm}$ $PC \text{ wire } N. = 12$</p>





รูปที่ 3-15 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD3 ช่วงสะพานที่ 1 เส้นที่ 1

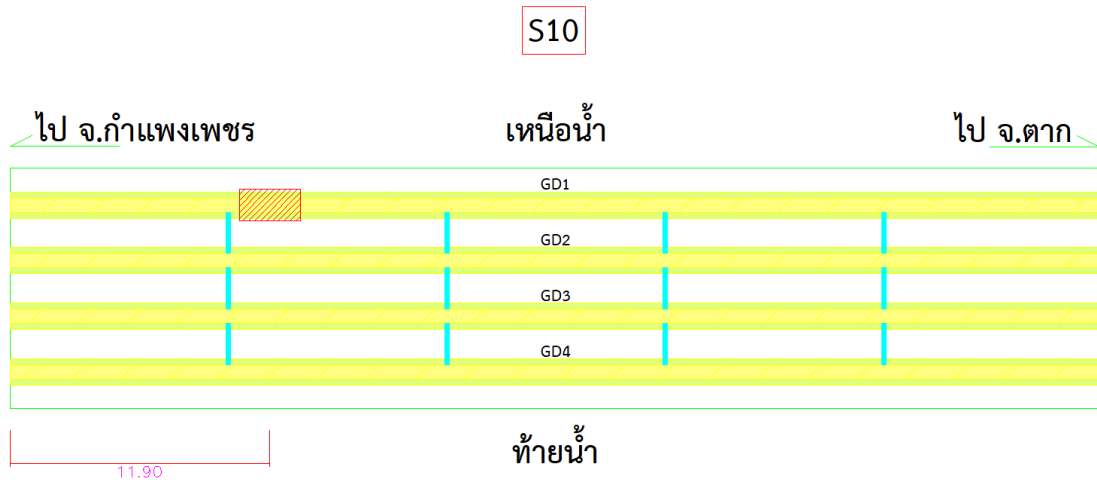


รูปที่ 3-16 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD3 ช่วงสะพานที่ 1 เส้นที่ 2

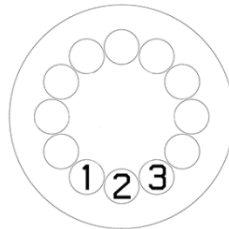


3.5.1. คาบ GD1บริเวณช่วงสะพานที่ 10

ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงแสดงดังรูปที่ 3-17 Tendon ที่ทำตรวจวัดคือ Tendon No.1 ดังรูปที่ 3-19 รายละเอียดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และการสกัดเปิดคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3-7 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ รายละเอียดผลการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 3-6 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง กราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 3-20 ถึง รูปที่ 3-21



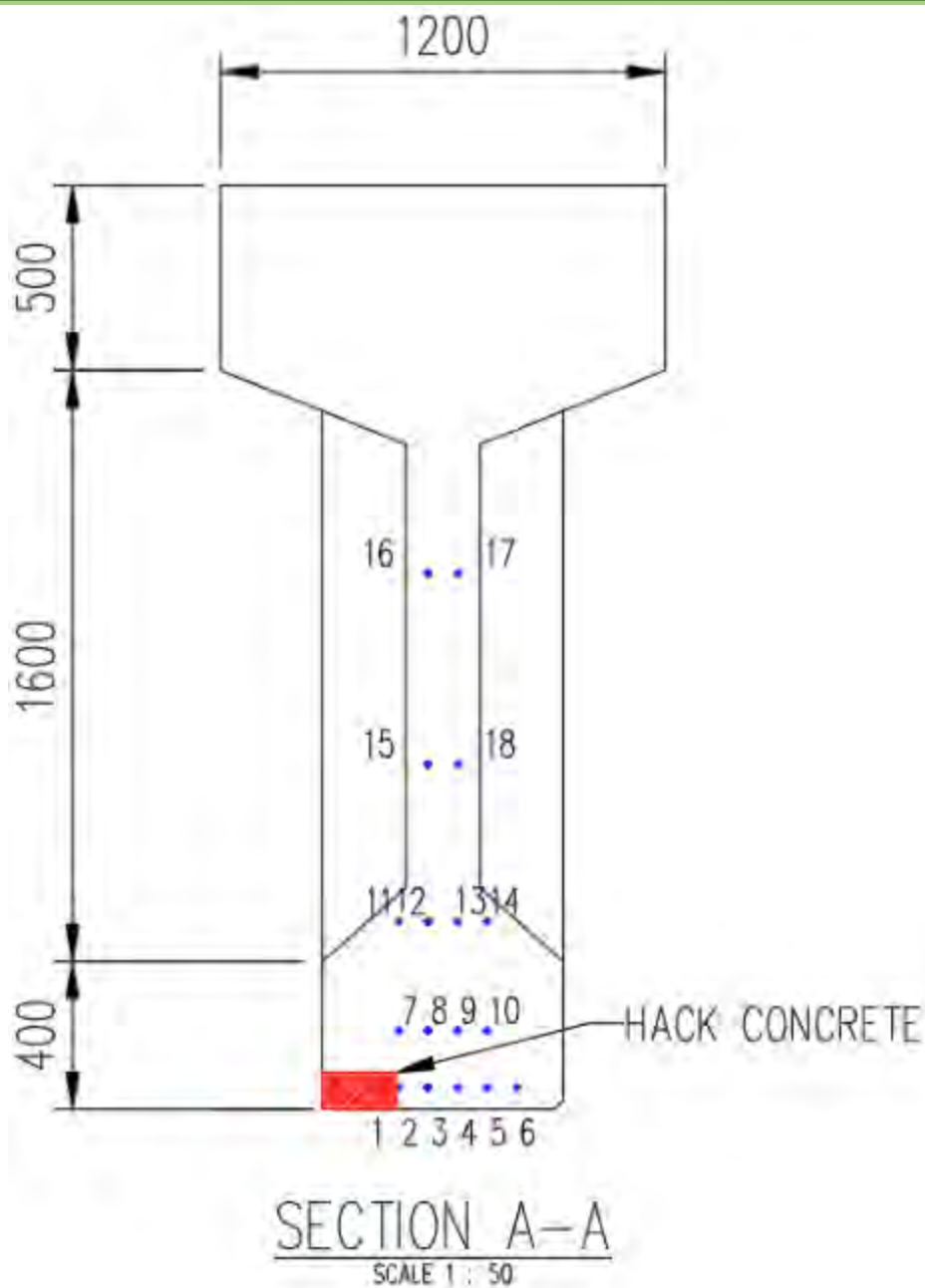
รูปที่ 3-17 ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงช่วงสะพานที่ 10



รูปที่ 3-18 ลำดับของ PC wire ในการตรวจวัดแรงดึง

ตารางที่ 3-6 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

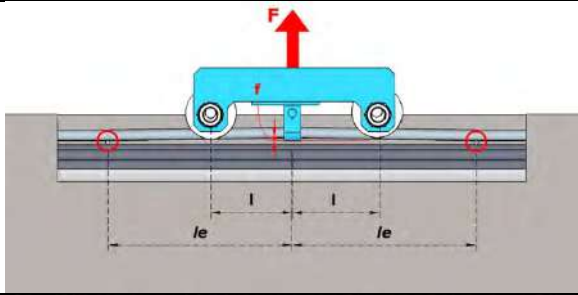
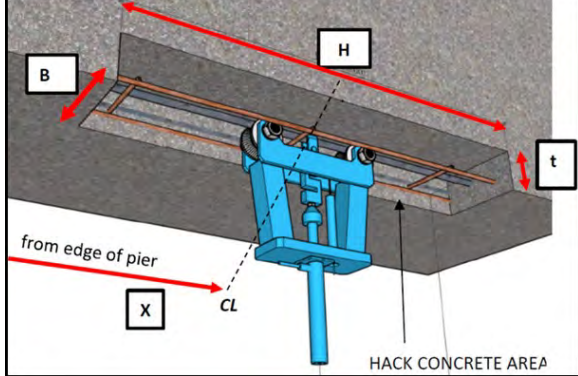
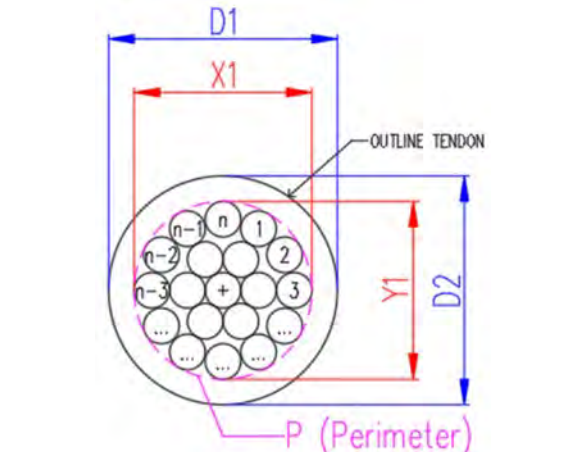
NO. PC WIRE	แรงดึงในลวดอัดแรงที่วัดได้ (KN)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	30.9637	33.6350	33.3298	28.9704	34.5498	32.2897
2	27.4777	33.3233	28.3531	29.8194	33.5271	30.5001

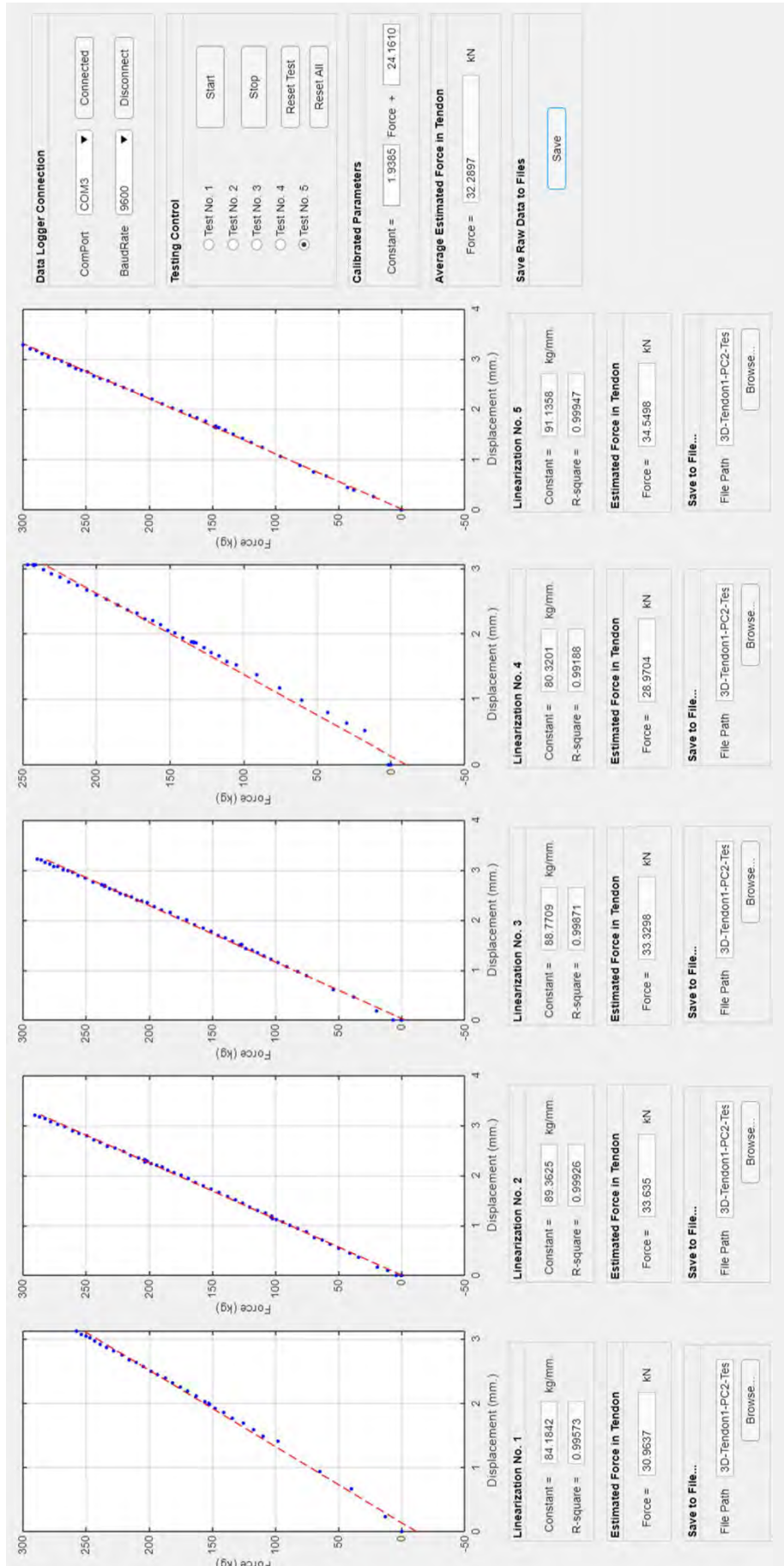


รูปที่ 3-19 Tendon ที่ทำตรวจวัด (Tendon No.1)



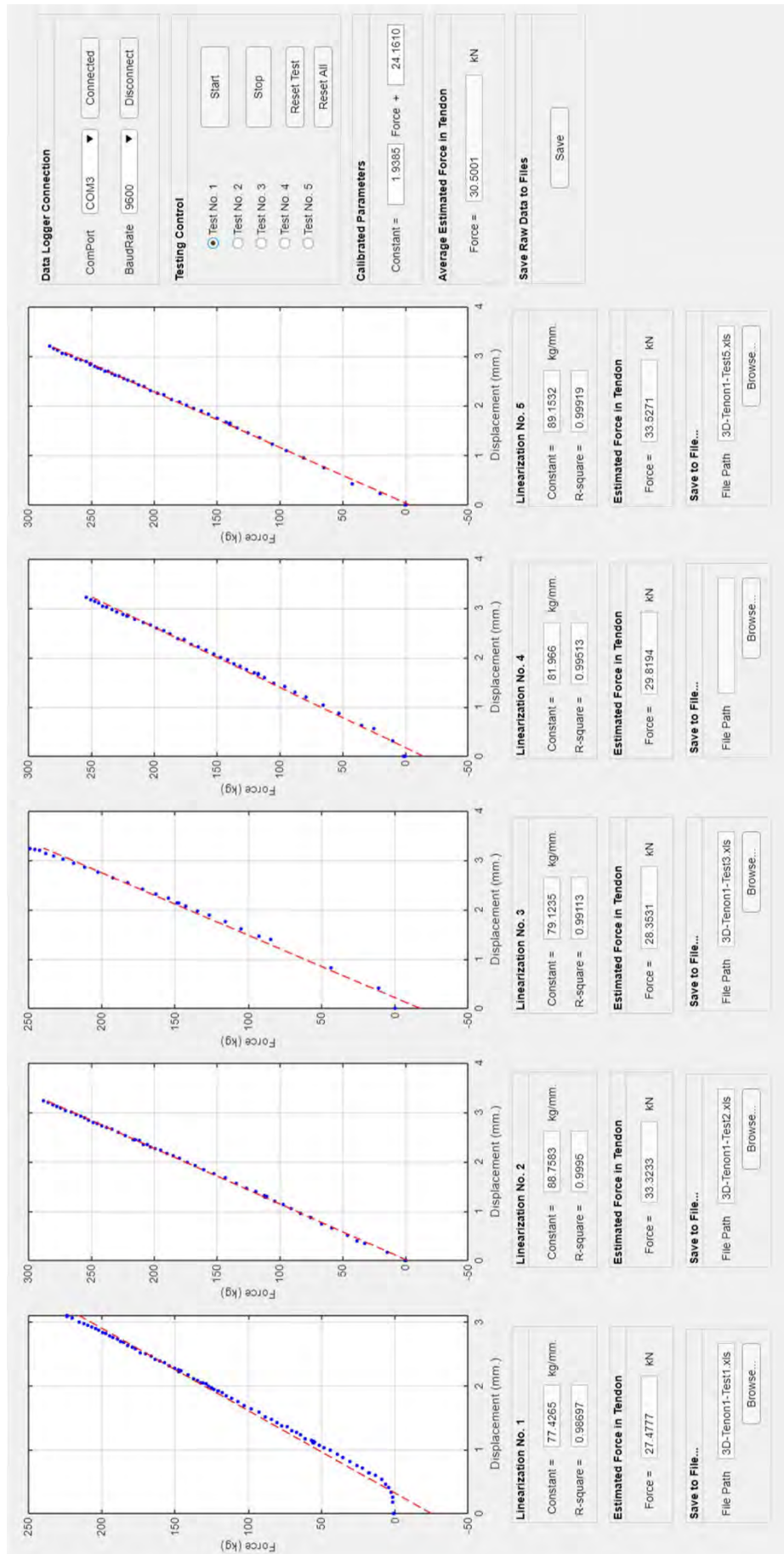
ตารางที่ 3-7 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์

	<p>$l = 125 \text{ mm}$ $le = 275 \text{ mm}$</p>
	<p>$X = 11.9 \text{ m}$ $B = 0.2 \text{ m}$ $H = 0.7 \text{ m}$ $T = 0.12 \text{ m}$</p>
	<p>$X1 = 39 \text{ mm}$ $Y1 = 39 \text{ mm}$ $P(\text{Perimeter}) = 122$ $D1 = 40 \text{ mm}$ $D2 = 40 \text{ mm}$ $\text{PC wire } N. = 12$</p>



รูปที่ 3-20 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD1 ช่วงสะพานที่ 10 เส้นที่ 1

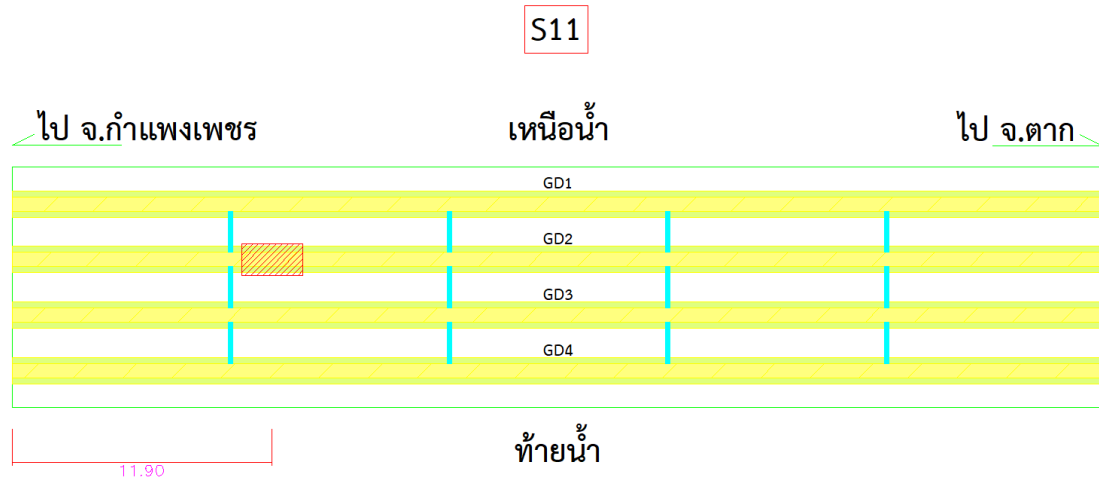




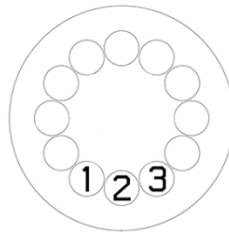
รูปที่ 3-21 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD1 ช่วงสะพานที่ 10 เส้นที่ 2

3.5.2. คาบ GD2 บริเวณช่วงสะพานที่ 11

ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงแสดงดังรูปที่ 3-22 Tendon ที่ทำตรวจวัดคือ Tendon No.1 ดังรูปที่ 3-24 รายละเอียดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และการสกัดเปิดคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3-9 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ รายละเอียดผลการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 3-8 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง กราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 3-25 ถึงรูปที่ 3-26



รูปที่ 3-22 ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงช่วงสะพานที่ 11

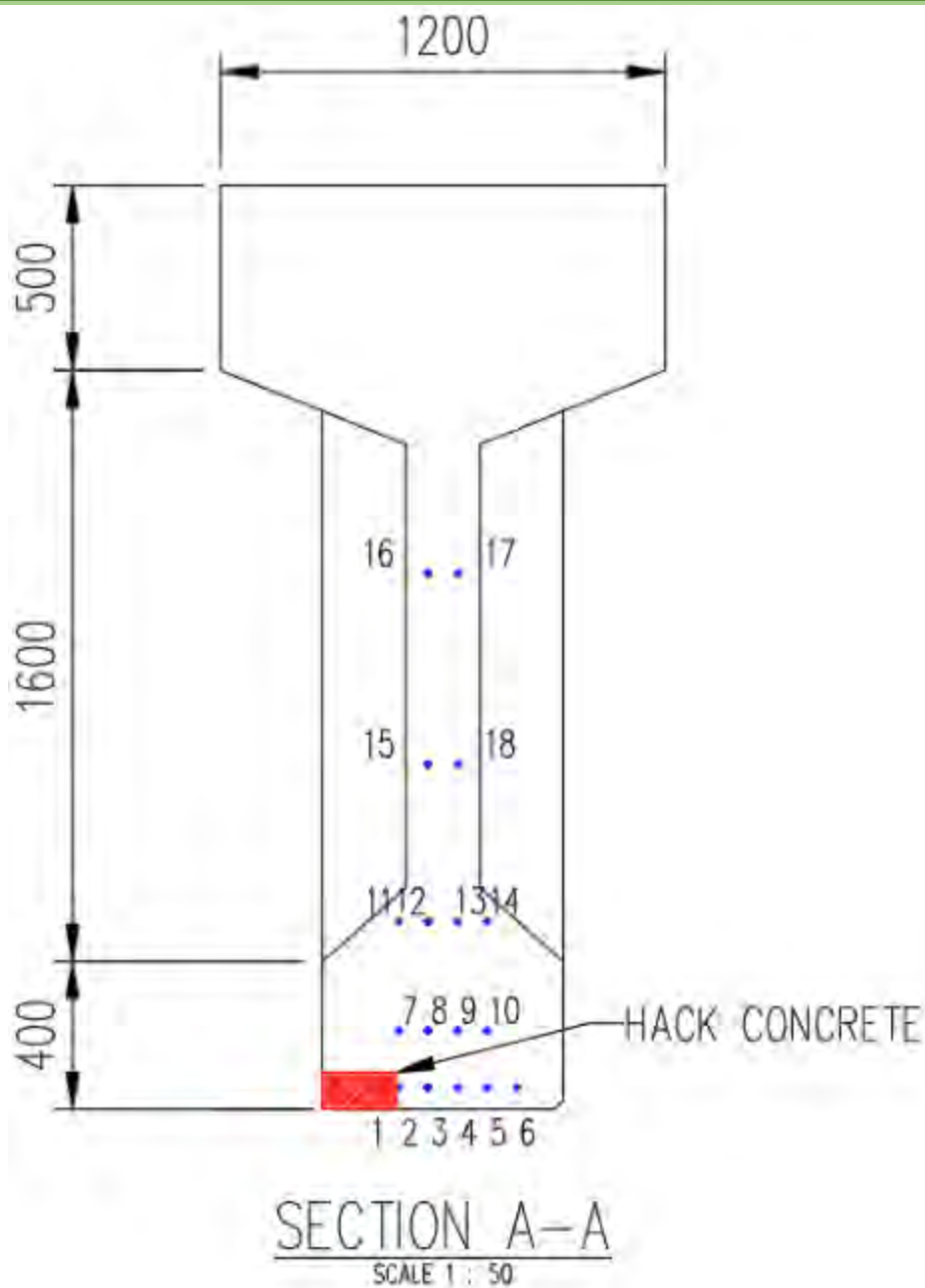


รูปที่ 3-23 ลำดับของ PC wire ในการตรวจวัดแรงดึง

ตารางที่ 3-8 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

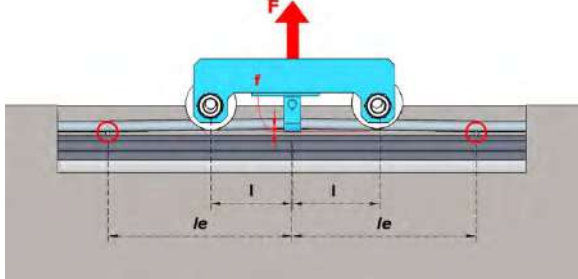
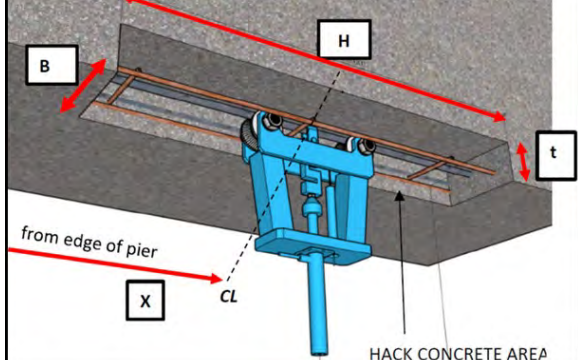
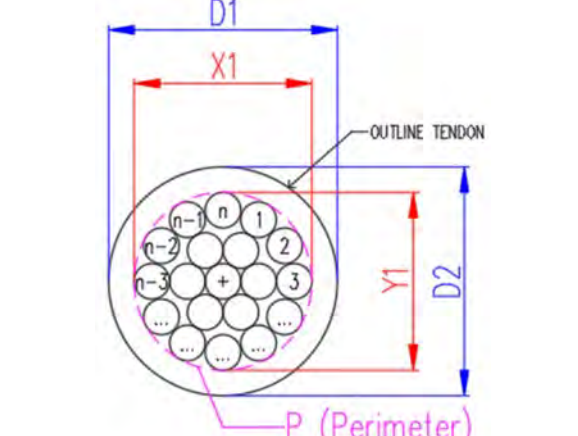
NO. PC WIRE	แรงดึงในลวดอัดแรงที่วัดได้ (KN)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	33.5902	29.5462	33.5132	29.9051	32.6805	31.8470
2	32.8683	31.7515	29.1222	32.5528	33.5784	31.9746



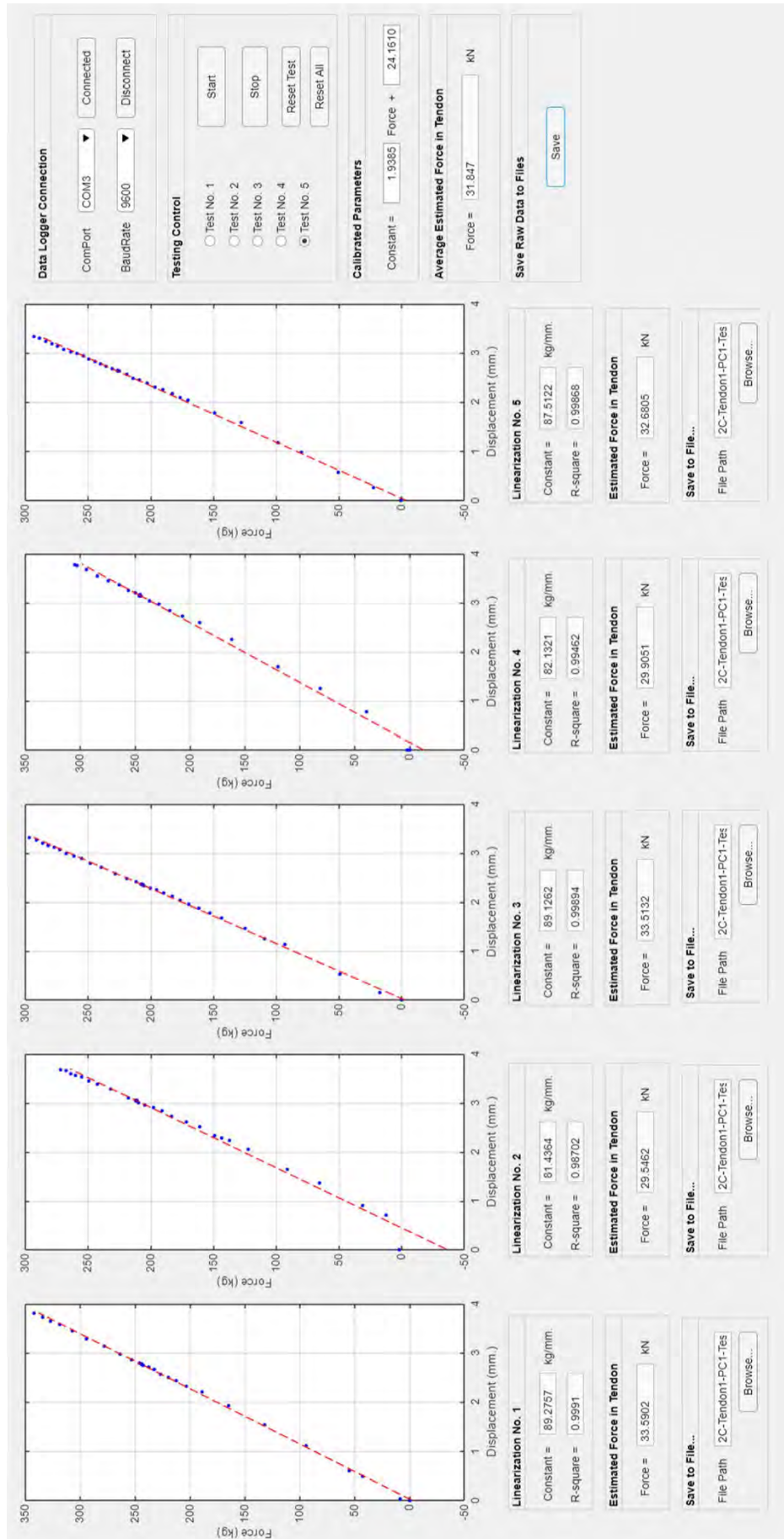


รูปที่ 3-24 Tendon ที่ทำตรวจวัด (Tendon No.1)

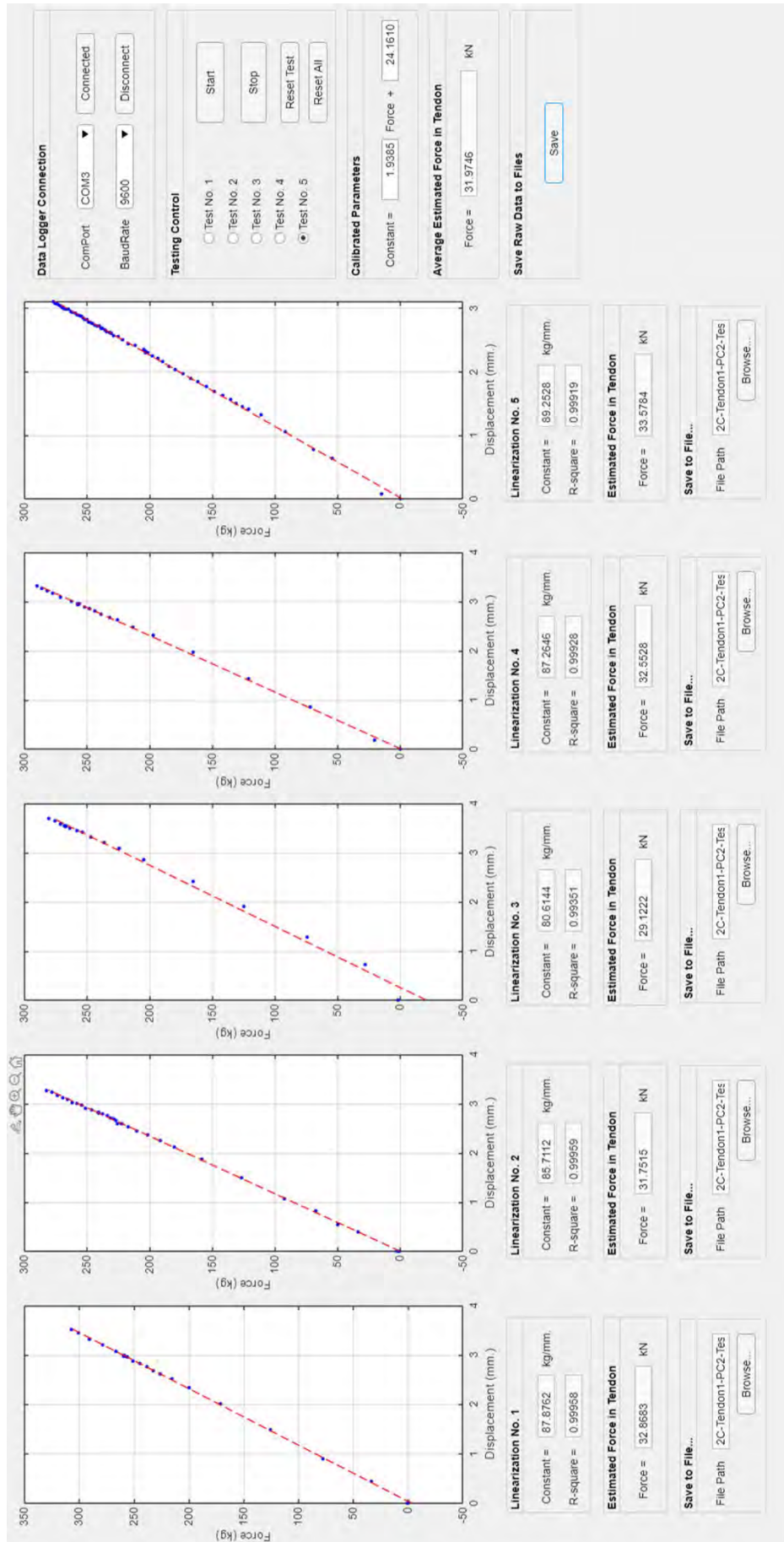
ตารางที่ 3-9 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์

	<p>$l = 125 \text{ mm}$ $le = 275 \text{ mm}$</p>
	<p>$X = 11.9 \text{ m}$ $B = 0.2 \text{ m}$ $H = 0.7 \text{ m}$ $T = 0.12 \text{ m}$</p>
	<p>$X1 = 39 \text{ mm}$ $Y1 = 39 \text{ mm}$ $P(\text{Perimeter}) = 122$ $D1 = 40 \text{ mm}$ $D2 = 40 \text{ mm}$ $\text{PC wire } N. = 12$</p>





รูปที่ 3-25 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD2 ช่วงสะพานที่ 11 เส้นที่ 1

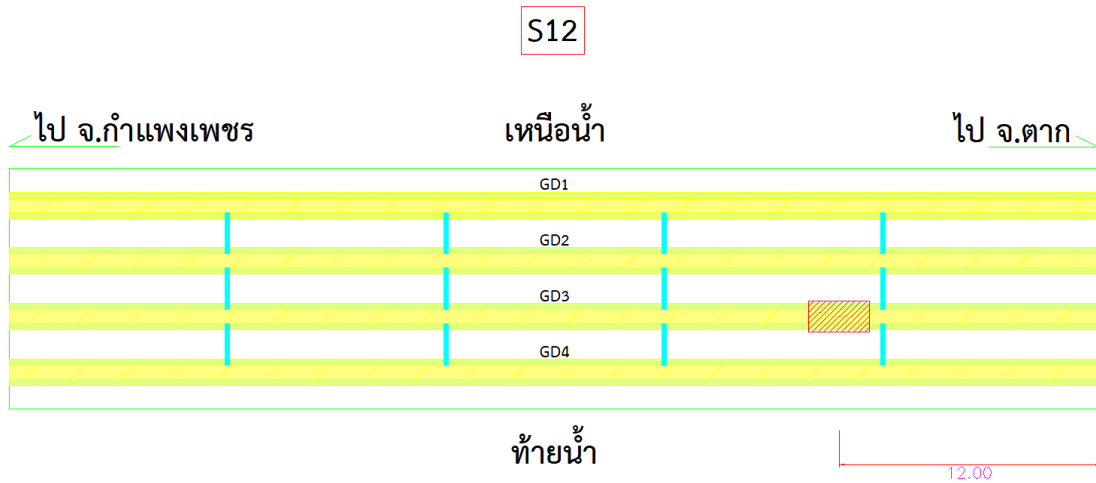


รูปที่ 3-26 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD2 ช่วงสะพานที่ 11 เส้นที่ 2

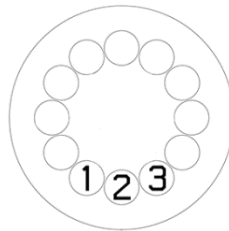


3.5.3. คาบ GD3 บริเวณช่วงสะพานที่ 12

ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงแสดงดังรูปที่ 3-27 Tendon ที่ทำตรวจวัดคือ Tendon No.6 ดังรูปที่ 3-29 รายละเอียดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และการสกัดเปิดคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3-11 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ รายละเอียดผลตรวจวัดแสดงในตารางที่ 3-9 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ กราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 3-30 ถึงรูปที่ 3-32



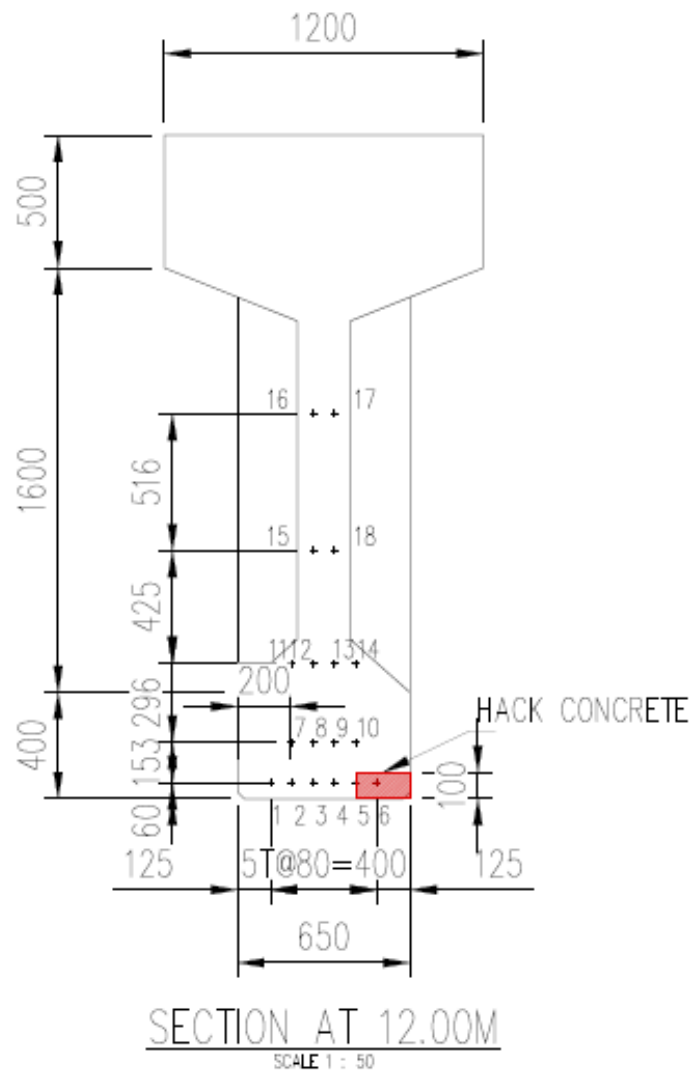
รูปที่ 3-27 ตำแหน่งทดสอบแรงดึงในลวดอัดแรงช่วงสะพานที่ 12



รูปที่ 3-28 ลำดับของ PC wire ในการตรวจวัดแรงดึง

ตารางที่ 3-10 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง

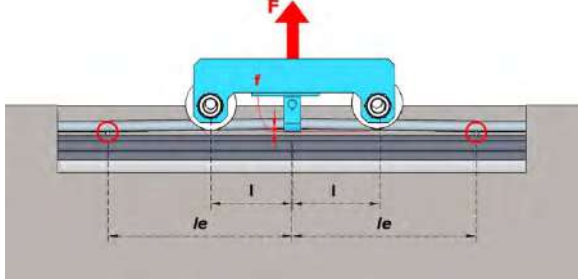
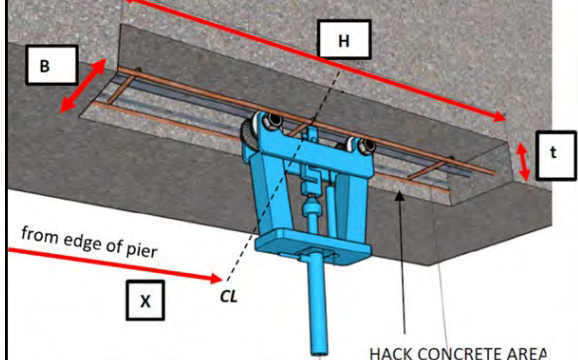
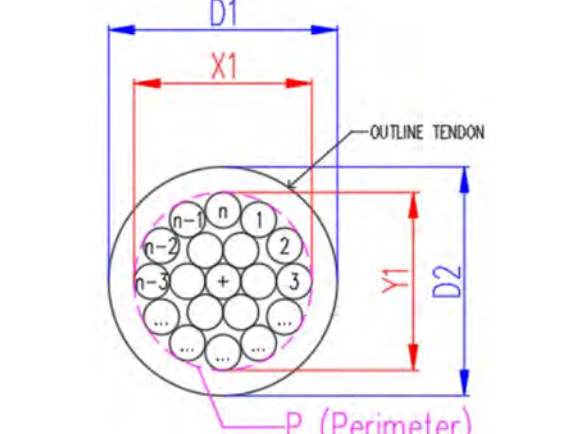
NO. PC WIRE	แรงดึงในลวดอัดแรงที่วัดได้ (KN)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	32.2708	32.6589	34.2544	33.9097	35.9939	33.8175
2	32.2912	31.2556	32.5021	28.6271	28.6327	30.6617
3	35.4558	35.3601	37.9551	35.2513	38.6285	36.5302

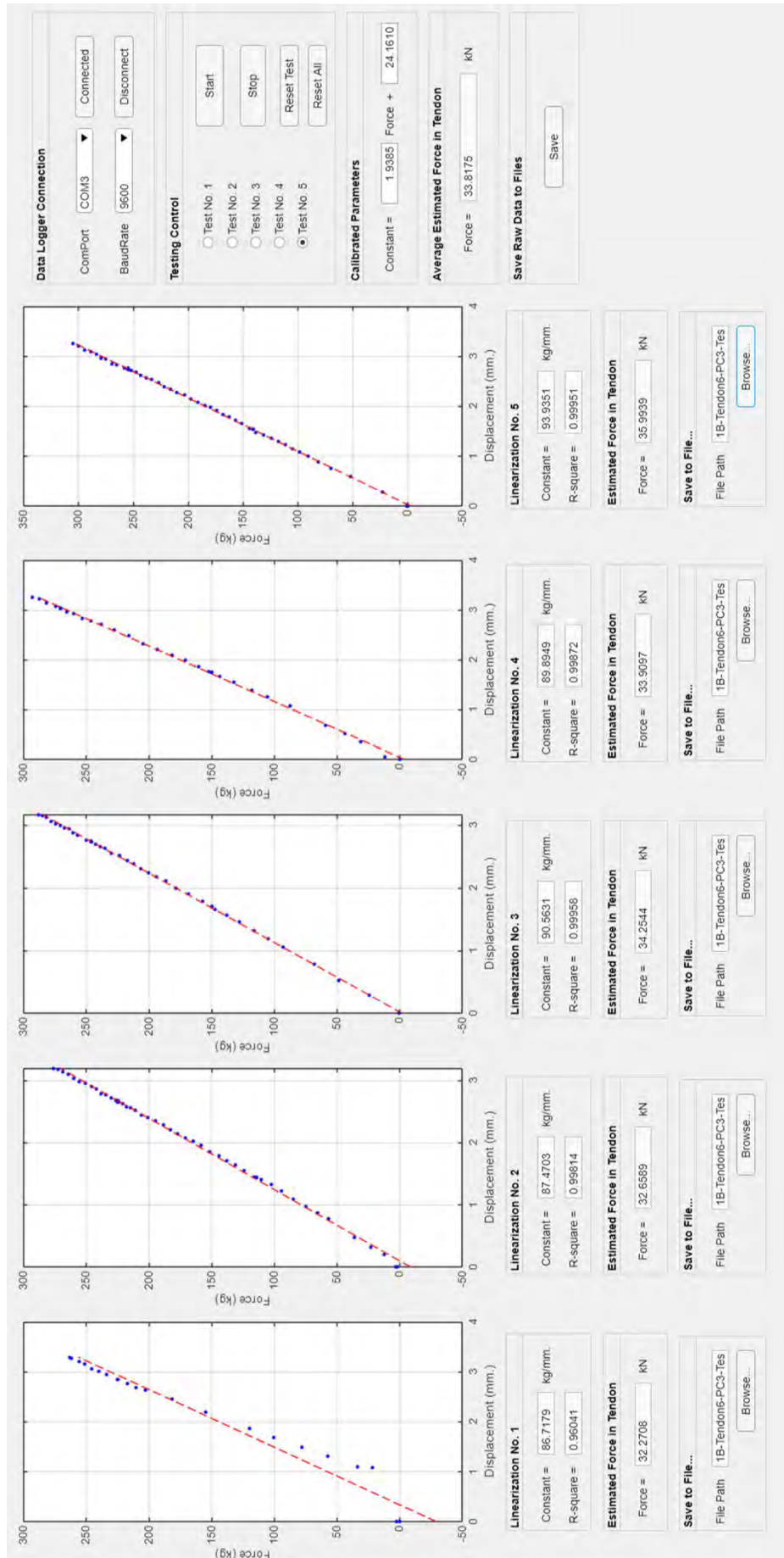


รูปที่ 3-29 Tendon ที่ทำตรวจวัด (Tendon No.6)



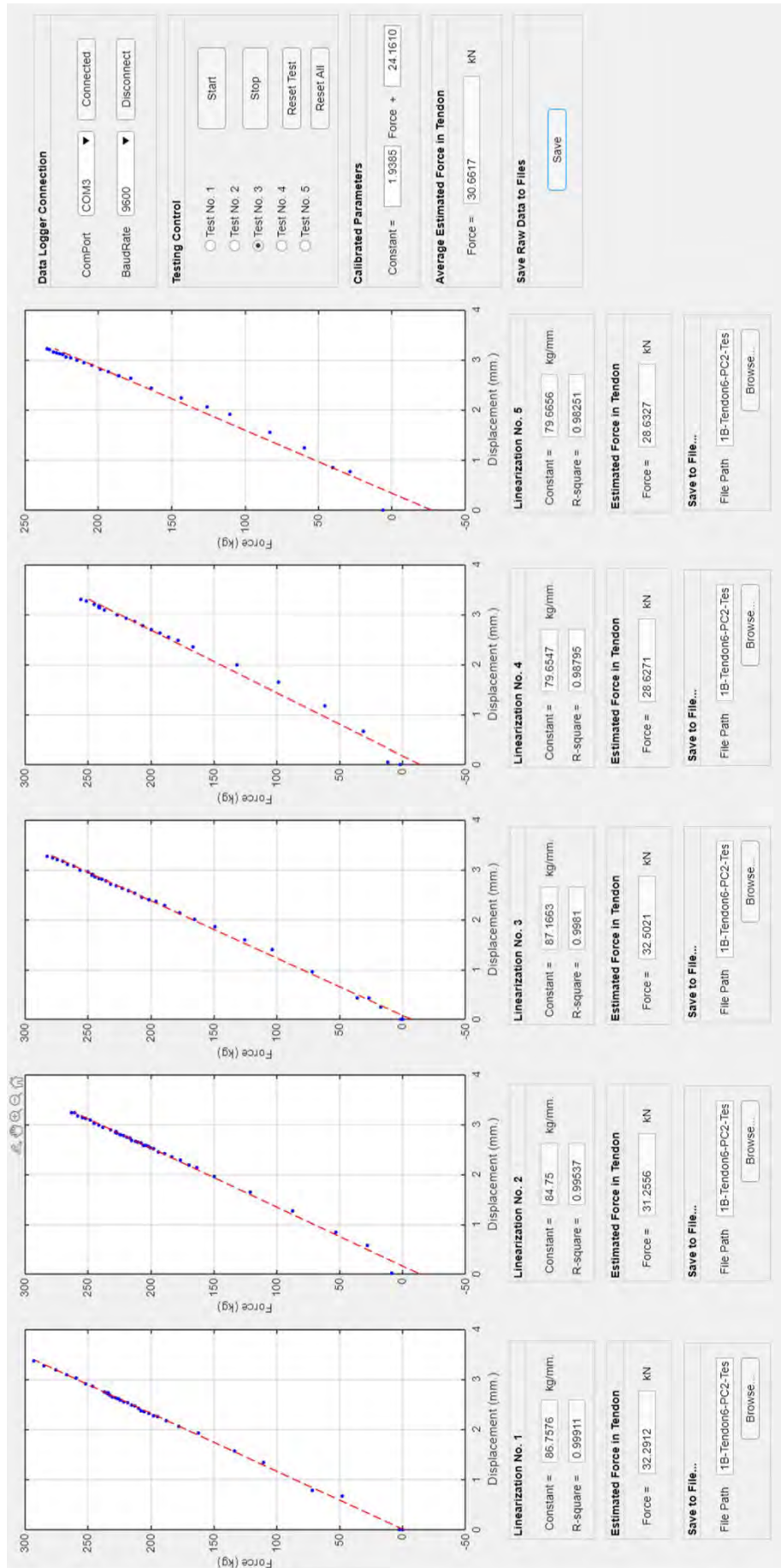
ตารางที่ 3-11 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์

	<p>$l = 125 \text{ mm}$ $le = 275 \text{ mm}$</p>
	<p>$X = 12 \text{ m}$ $B = 0.2 \text{ m}$ $H = 0.7 \text{ m}$ $T = 0.11 \text{ m}$</p>
	<p>$X1 = 39 \text{ mm}$ $Y1 = 39 \text{ mm}$ $P(\text{Perimeter}) = 122$ $D1 = 40 \text{ mm}$ $D2 = 40 \text{ mm}$ $\text{PC wire } N. = 12$</p>

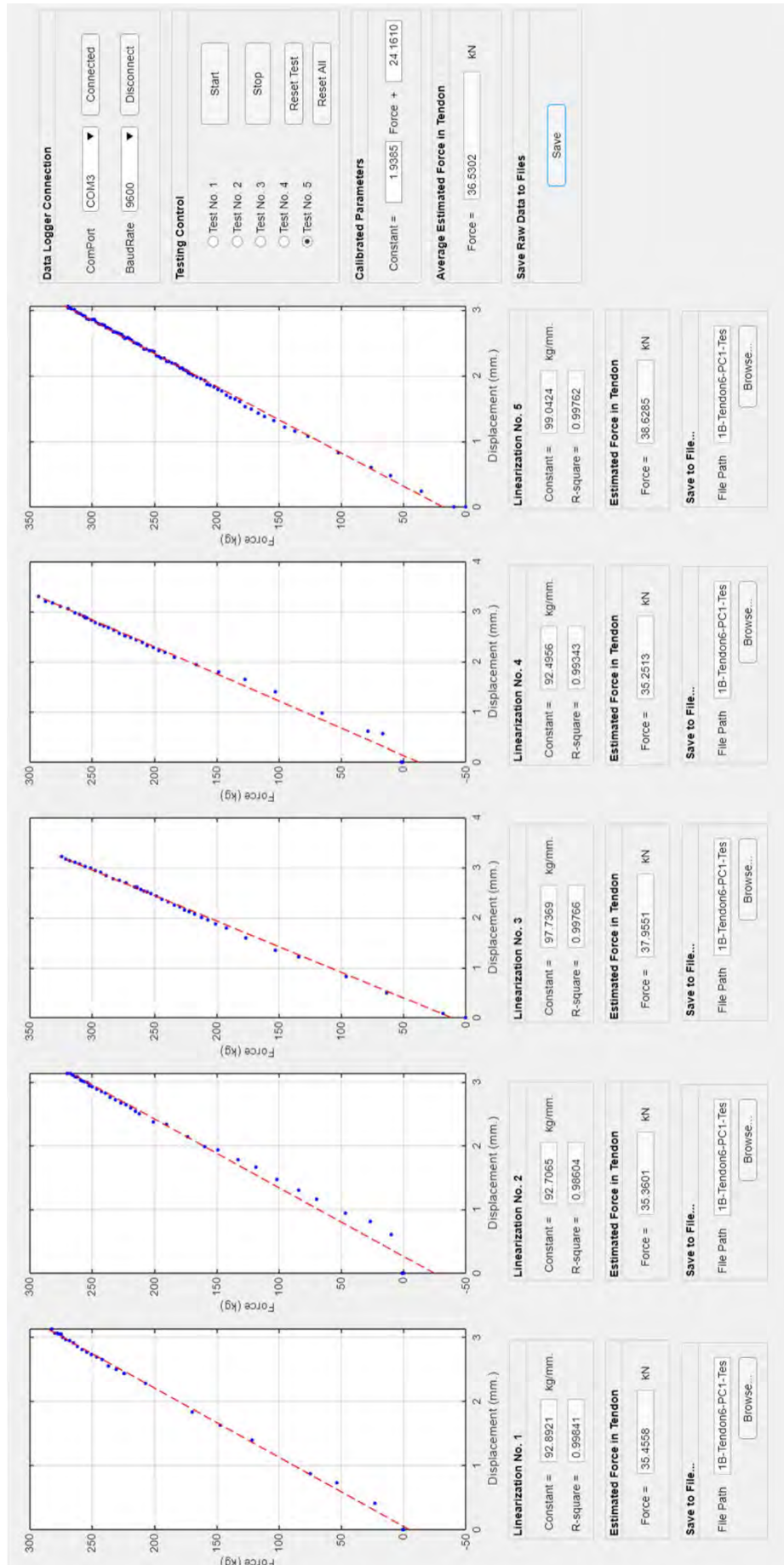


รูปที่ 3-30 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง CD3 ช่วงสะพานที่ 12 เส้นที่ 1





รูปที่ 3-31 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD3 ช่วงสะพานที่ 12 เส้นที่ 2



รูปที่ 3-32 รายละเอียดผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรง GD3 ช่วงสะพานที่ 12 เส้นที่ 3

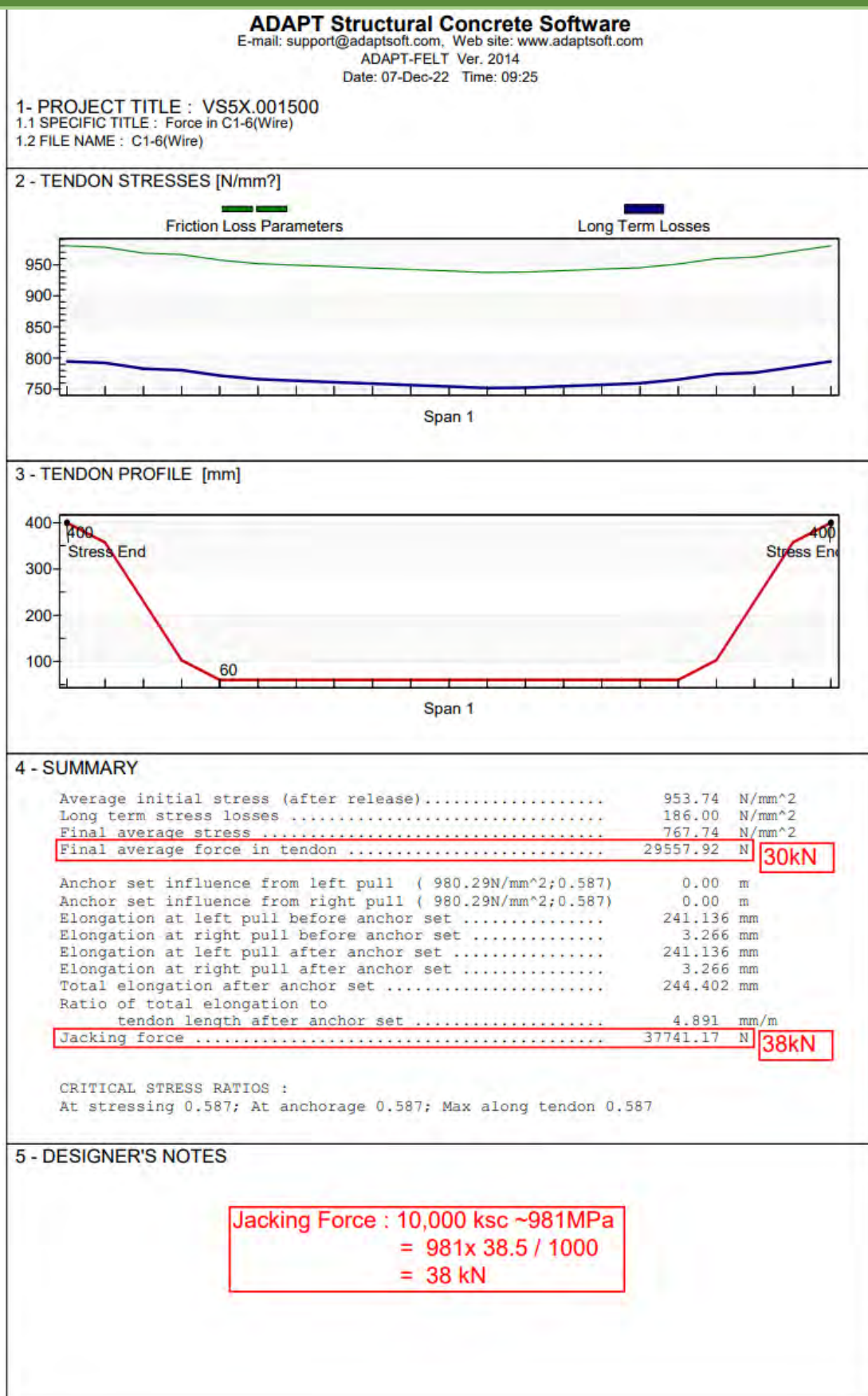


3.6 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการตรวจสอบแรงดึงในลวดอัดแรงพบว่ามีค่าเฉลี่ยของแรงดึงในลวดทั้ง 9 เส้นที่ทำการทดสอบอยู่ที่ 32.84 kN และมีค่าต่ำสุดที่ 30.50 kN ที่ช่วงสะพานที่ 11 เส้นที่ 2 สำหรับการประเมินว่าลวดอัดแรงยังอยู่ในสภาพดีหรือไม่ ใช้วิธีเทียบกับข้อมูลจากแบบก่อสร้างซึ่งระบุว่า Initial Stress ของลวดอัดแรงเท่ากับ 10,000 ksc ดังรูปที่ 3-33 เมื่อนำไปคำนวณหาแรงดึงเริ่มต้น (ลวดอัดแรงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มม.) จะทราบได้ว่าแรงดึงเริ่มต้นเท่ากับ 37.74 kN ต่อเส้น เมื่อวิเคราะห์แรงเสีอมลดทั้งหมดด้วยโปรแกรม ADAPT Structural Concrete Software ดังรูปที่ 3-34 แรงดึงในลวดจะเหลืออยู่ 29.56 kN ซึ่งต่ำกว่าแรงดึงต่ำสุดที่ตรวจวัดมา จึงสรุปได้ว่าลวดอัดแรงยังมีแรงดึงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุก HS20-S16-44 ที่ระบุในแบบก่อสร้าง อย่างไรก็ตามมาตรฐานในปัจจุบันเพิ่มมากขึ้นสะพานกิตติขจรยังจำเป็นต้องได้รับการวิเคราะห์กำลังในภาพรวมเพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่อไป

<u>น้ำหนักบรรทุก H20-S16-44</u>	
<u>เหล็กที่ใช้ในการคำนวณ</u>	
ค่าแรงดึงที่วัดได้	: High tensile strength wire ($\phi 7$ mm) Initial stress 10,000 kg/cm ²
คอนกรีต	120 kg/cm ²
คอนกรีต, พื้น, ทางเท้าเหล็ก	Intermediate grade ทั้ง $\phi 2$ ขึ้นไป 1,400 kg/cm ²
เหล็ก	Structural grade ขนาด $\phi 3/8$ และ $\phi 1/2$ 1,200 kg/cm ²
คอนกรีต	70 kg/cm ²
<u>เหล็กการดำหรืองานผสมคอนกรีตคอนกรีตอัดแรง</u>	
ส่วนผสมน้ำ Design mix	และใช้ Plastiment 0.25% ของน้ำหนักแห้ง
ความยวบย (Slump)	ไม่เกิน 10 เซนติเมตร
แรงอัดสูงสุดต้องไม่ต่ำกว่า	300 kg/cm ²
<u>เหล็กการดำหรืองานผสมคอนกรีตคอนกรีตธรรมดา</u>	
ส่วนผสมน้ำ Design mix	
ความยวบย (Slump)	ไม่เกิน 8 เซนติเมตร
แรงอัดสูงสุดต้องไม่ต่ำกว่า	210 kg/cm ²
<u>หินยวบ</u>	
Grade ของเหล็กให้เป็นไปตาม	AASHTO Specification
ค่าของเหล็ก	Structural grade แทน Intermediate grade ให้ถึงหน้าหรือหน้าตัดของเหล็ก
เป็น 1/7 เท่าของกำลังรับแรง	รับแรง

รูปที่ 3-33 ข้อมูลจากแบบก่อสร้าง



รูปที่ 3-34 ผลการวิเคราะห์แรงเสื่อมลดด้วย ADAPT Structural Concrete Software



บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ โครงสร้างสะพาน

4.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพานในโครงการนี้ประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน ซึ่งการทดสอบ 3 รายการแรกเป็นวิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test) ซึ่งจะมีการเจาะคอนกรีตออกจากชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการ หรือสกัดผิวคอนกรีตออกและตัดเหล็กเสริมเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการ ส่วนการทดสอบสุดท้ายก็มีลักษณะทำลายอยู่บ้างแต่ไม่รุนแรงเท่ากับ 3 วิธีการแรก เป็นเพียงการเจาะคอนกรีตให้เป็นรูเล็ก ๆ เพื่อนำผงคอนกรีตไปตรวจสอบความลึกการเกิดปฏิกิริยาเคบอเนชัน เนื่องจากการทดสอบ 4 รายการนี้มีจำนวนมาก จึงอาจก่อความเสียหายให้กับโครงสร้างได้ ดังนั้นการวางแผนทดสอบจึงได้พยายามกระจายตำแหน่งทดสอบไปให้ชิ้นส่วนในบริเวณต่าง ๆ ไม่หนาแน่นที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งมากเกินไป และคัดเลือกตำแหน่งที่คาดว่าจะมีผลกระทบน้อยต่อโครงสร้าง โดยภาพรวมการคัดเลือกและการกระจายตำแหน่งทดสอบทั้ง 4 รายการแสดงดังตารางที่ 4-1 ทั้ง 4 ช่วงสะพาน

ตารางที่ 4-1 ภาพรวมการกระจายตำแหน่งทดสอบ 4 รายการ

Test	Member	S1	S10	S11	S12	P1	P9	P10	P11	A1	A2	SUM	
Concrete Compression Test	Sidewalk	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	8	80
	Deck	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	16	
	Diaphragm	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	12	
	Girder	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	12	
	Cap Beam	-	-	-	-	3	3	3	3	2	2	16	
	Pier	-	-	-	-	4	4	4	4	-	-	16	
Concrete Tension Test	Sidewalk	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	8	80
	Deck	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	16	
	Diaphragm	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	12	
	Girder	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	12	
	Cap Beam	-	-	-	-	3	3	3	3	2	2	16	
	Pier	-	-	-	-	4	4	4	4	-	-	16	
Steel Tension test	Sidewalk	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	8	80
	Deck	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	16	
	Diaphragm	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	8	
	Girder	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	16	
	Cap Beam	-	-	-	-	3	3	3	3	2	2	16	
	Pier	-	-	-	-	4	4	4	4	-	-	16	
Carbonation Test	Sidewalk	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	8	80*
	Deck	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	16	
	Diaphragm	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	8	
	Girder	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	16	
	Cap Beam	-	-	-	-	4	4	4	4	-	-	16	
	Pier	-	-	-	-	4	4	4	4	-	-	16	

*หมายเหตุ การทดสอบ Carbonation test 1 ตำแหน่ง เจาะเก็บผงคอนกรีตลึก 5 ซม เก็บผง
ตัวอย่างทุก ๆ 1 ซม รวม 5 ตัวอย่าง คิดเป็นจำนวนผงตัวอย่างทั้งหมด 80x5 = 400 ตัวอย่าง



4.1.1. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

การทดสอบนี้จะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 42 โดยจะเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีตออกมาจากชิ้นส่วนโครงสร้างตามสภาพการใช้งานจริง เพื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Concrete Compressive Strength) โดยใช้เครื่องกดแท่งตัวอย่างคอนกรีตจนถึงจุดพังทลาย ค่าที่ได้จะเป็นกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ที่แท้จริงของโครงสร้าง ณ ปัจจุบัน การทดสอบด้วยวิธีนี้ควรใช้ควบคู่กับเครื่องมือสแกนหาตำแหน่งของเหล็กเสริม (Rebar Locator) เพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะถูกเหล็กเสริมขาด นอกจากนี้การเลือกตำแหน่งในการเจาะนั้นๆ จะต้องส่งผลกระทบต่อตัวโครงสร้างน้อยที่สุด

การเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C42 มีข้อกำหนด คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากที่สุดของวัสดุมวลคละ และระยะความลึกของแท่งตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยโครงการนี้จะใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. และมีความลึกของแท่งตัวอย่าง 10 ซม. ตามข้อกำหนด (TOR)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย

- 1) เครื่องเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต (Core Drilling Machine) เป็นเครื่องเจาะแบบ Rotary Drilling พร้อมด้วยกระบอกเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต เป็นกระบอกเจาะหัวเพชร (Diamond Barrel) แบบ Single Core โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-1 (ก)
- 2) เครื่องมือสำหรับหาตำแหน่งของเหล็กเสริม (Rebar Locator) ดังรูปที่ 4-2 (ข)



(ก) เครื่องเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต



(ข) การเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4-1 เครื่องมือที่ใช้ในการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตแบบ Core Drilling



(ก) เครื่องมือสำหรับหาตำแหน่งของเหล็กเสริม



(ข) การหาตำแหน่งของเหล็กเสริม

รูปที่ 4-2 เครื่องมือที่ใช้ในการหาตำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้าง

วิธีการทดสอบ

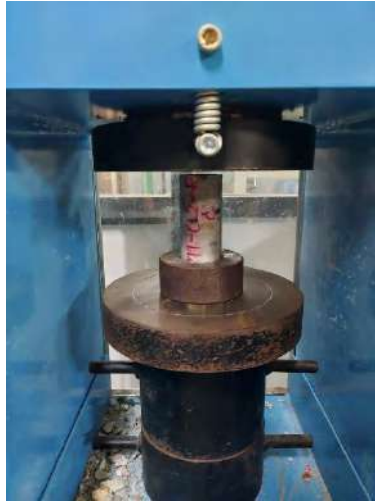
- 1) กำหนดตำแหน่งการเจาะ โดยตำแหน่งนั้นๆ จะต้องส่งผลกระทบต่อตัวโครงสร้างน้อยที่สุด จากนั้นทำการตรวจสอบเหล็กเสริมให้ทราบตำแหน่งที่ชัดเจนด้วยเครื่องมือ Rebar Locator
- 2) ติดตั้งเครื่องเจาะคอนกรีต (Concrete Drilling Machine) แบบ Rotary Drilling ด้วย Anchor Bolt บริเวณจุดที่ต้องการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นติดตั้งกระบอกเจาะแบบ Single Core
- 3) ต่อสายยางจากถังน้ำเข้ากับเครื่องเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต
- 4) เมื่อได้ตรวจสอบความเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำการเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีต โดยในขณะที่ทำการเจาะ ต้องเปิดน้ำหล่อเลี้ยงเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่าง Diamond barrel กับคอนกรีต
- 5) เมื่อได้แท่งตัวอย่างคอนกรีตแล้ว (รูปที่ 4-3) ให้ทำความสะอาดแล้วห่อด้วยพลาสติกเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป



รูปที่ 4-3 แท่งตัวอย่างคอนกรีตหลังจากการ Core Drilling



- 6) แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการ Core Drilling ที่ภาคสนามจะถูกนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 4-4 ด้วยอัตราการกดระหว่าง 12 ถึง 24 N/ (mm².min)



รูปที่ 4-4 ตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตแบบทำลาย

4.1.2. การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรง (Direct Tension Test) เป็นสิ่งที่กระทำได้ยากและเสียเวลามาก ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ในภาคปฏิบัติ ทางเลือกอื่นที่สามารถให้ค่ากำลังรับแรงดึงได้ คือวิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile test) ซึ่งทดสอบได้ง่ายกว่า อีกทั้งผลการทดสอบค่าแปรปรวนต่ำ จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ยิยมมากในการหาลำดับรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นโครงการนี้จะเลือกใช้วิธีนี้

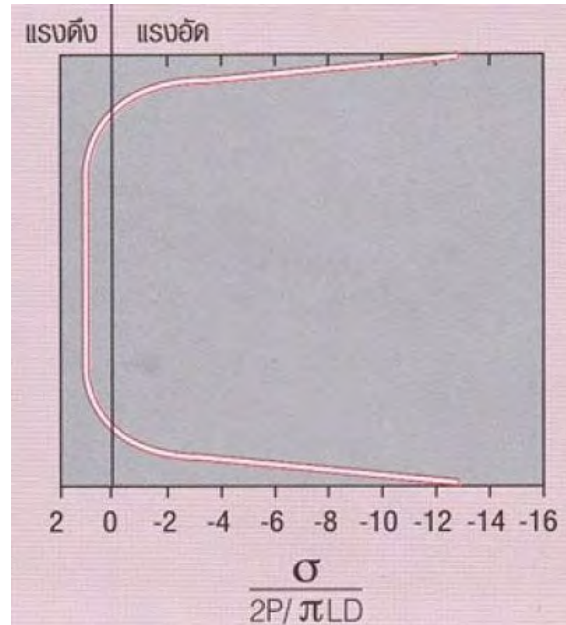
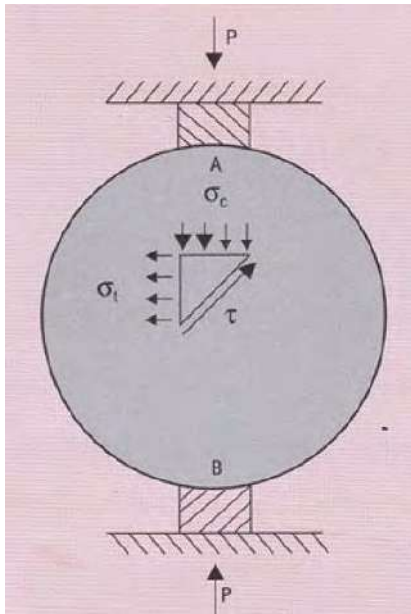
การทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ได้จากการหล่อคอนกรีตทั้งจากในสนามหรือจากห้องปฏิบัติการ หรือเป็นคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาจากโครงสร้าง (Drilled Core) เพื่อทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตก็ได้

การทดสอบแรงดึงโดยวิธีการผ่าซีก (Splitting Tensile Test) พัฒนาขึ้นในประเทศบราซิล และมีวิธีการทดสอบตาม ASTM C 496 การทดสอบโดยย่อคือ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวางนอนเพื่อรับแรงกดตามแกนที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มม. กว้าง 25 มม. แรงอัดที่ส่งผ่านไม้อัดจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นซึ่งเกือบคงที่ตลอดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 4-5 โดยแรงอัดที่ผิวสัมผัสด้านบนของตัวอย่างไม่ทำให้คอนกรีตวิบัติ แต่แรงดึงบริเวณกลางตัวอย่างซึ่งจะเกิดขึ้นสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่จะรับได้ ทำให้คอนกรีตแตกออกเป็น 2 ซีกดังแสดงในรูปที่ 4-6

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธีผ่าซีกมีค่าสูงกว่ากำลังดึงที่ทดสอบโดยการดึงโดยตรง (Direct Tension Test) ประมาณร้อยละ 15 ขณะที่กำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีกมี

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ค่าประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ของกำลังดึงที่ทดสอบโดยวิธีตัด (Modulus of Rupture, โมดูลัสแตกร้า) สำหรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตกำลังธรรมดาที่มีค่าประมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ของกำลังรับแรงอัด แต่ในกรณีของคอนกรีตกำลังสูง (มากกว่า 800 กก./ซม² ขึ้นไป) จะมีค่าประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 ของกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4-5 การทดสอบแรงดึงโดยวิธีการผ่าซีก (Splitting tensile test)

ขั้นตอนการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต (เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. ความลึก 10 ซม.) ดำเนินการด้วยวิธีการเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.1



รูปที่ 4-6 การทดสอบแรงดึงโดยวิธีการผ่าซีก (Splitting tensile test)



4.1.3. การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

คุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนับว่าเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่จะทำหน้าที่รับแรงดึง ถึงแม้ว่าบางครั้งอาจจะใช้ช่วยรับแรงอัด แต่กำลังรับแรงดึงและแรงอัดของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากัน หากไม่เกิดการโก่งเดาะขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเหล็กเสริมตามยาวจะถูกยึดด้วยเหล็กเสริมตามขวางและหุ้มด้วยคอนกรีต ทำให้มีโอกาสโก่งเดาะน้อยมาก ดังนั้นการทดสอบเหล็กเสริมจึงทดสอบเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงดึงเท่านั้น

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กกลม (Round Bar) และเหล็กข้ออ้อย (Deform Bar) ดังรูปที่ 4-7 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าลุ่มน คุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กเสริมถูกนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น พื้น คาน เสา เพื่อให้ได้คุณสมบัติต้านทานการรับแรงดึงของเหล็กเสริมตามที่ออกแบบในการก่อสร้าง ต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของเหล็กเสริมที่จะนำมาใช้งาน



(ก) เหล็กกลม



(ข) เหล็กข้ออ้อย

รูปที่ 4-7 เหล็กเสริม

- 1) มาตรฐานการทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กเส้น
 - มอก 20-2543 มาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (เหล็กกลม)
 - มอก 24-2536 มาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (เหล็กข้ออ้อย)
 - มาตรฐานงานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (มยช.103-2533)
 - ASTM A615 M-79 Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement (Metric)
 - BS 4449: 1969 Hot Rolled steel bars for the reinforcement of concrete
 - JIS G3112-1975 Steel bars for concrete reinforcement
 - AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials)

- 2) ข้อกำหนดคุณสมบัติของเหล็กเส้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ของเหล็กเส้นแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้น

ชนิดเหล็ก	สัญลักษณ์	ความต้านแรงดึงที่ จุดคราก	ความต้านแรงดึงที่ จุดประลัย	ความยืดในช่วงความยาว 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
เหล็กกลม (round bar)	SR24	≥ 2,400 ksc ≥ 235 MPa	≥ 3,900 ksc ≥ 385 MPa	≥ 21 %
เหล็กข้ออ้อย (deformed bar)	SD30	≥ 3,000 ksc ≥ 295 MPa	≥ 4,900 ksc ≥ 480 MPa	≥ 17 %
	SD40	≥ 4,000 ksc ≥ 390 MPa	≥ 5,700 ksc ≥ 560 MPa	≥ 15 %
	SD50	≥ 5,000 ksc ≥ 490 MPa	≥ 6,300 ksc ≥ 620 MPa	≥ 13 %



ตารางที่ 4-3 ค่าความคลาดเคลื่อนของมวลเหล็กที่ยอมให้

สัญลักษณ์	มวลต่อเมตร (kg/m)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับมวลต่อเมตร	
		เฉลี่ย ร้อยละ	แต่ละเส้น ร้อยละ
RB6	0.222	± 5	± 10.0
RB9	0.499	± 3.5	± 6.0
RB12	0.888	± 3.5	± 6.0
DB12	0.888	± 5	± 6.0
DB16	1.578	± 5	± 6.0
DB20	2.466	± 4	± 5
DB22	2.984	± 4	± 5
DB25	3.853	± 4	± 5
DB28	4.834	± 4	± 5
DB32	6.313	± 3.5	± 4

3) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) พร้อมอุปกรณ์
- เครื่องวัดการยืดตัว (Extensometer)
- เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน +0.05 mm มีความละเอียดในการวัด 0.1 mm
- ตลับเมตรที่มีความยาวเพียงพอที่จะวัดความยาวโดยตลอดของเหล็ก
- ตาชั่งที่มีความละเอียด 0.1 กรัม
- เหล็กสกัด
- ค้อน

4) จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติในการรับแรงดึงของเหล็กเส้นกำลัง (Strength)

- หน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น (Proportional limit)
- หน่วยแรงที่จุดคราก (Yield strength)
- หน่วยแรงประลัย (Ultimate strength)
- ความเหนียว (Ductility)
- ร้อยละการยืดในช่วง 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Elongation)
- โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

5) วิธีการทดสอบ

- วัดความยาวของเหล็กเสริมด้วยตลับเมตรให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร
- ชั่งน้ำหนักเหล็กเสริมให้ละเอียดถึง 1 กรัม
- กำหนดความยาวพิกัดของเหล็กเสริม เท่ากับ 5D โดยใช้เหล็กสกัดตอกแสดงจุดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4-8 จากนั้นกำหนดระยะหัวจับ อย่างน้อย 5.5D
- นำเหล็กทดสอบใส่ในเครื่องทดสอบ แล้วยึดเหล็กเสริมด้วยอุปกรณ์สำหรับจับขึ้นให้แน่น โดยให้ตำแหน่งของความยาวพิกัดอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างอุปกรณ์ดังรูปที่ 4-9 ติดตั้ง Extensometer เพื่อวัดการยืดตัวของเหล็กเสริม
- ควบคุมอัตราการเพิ่มของแรงดึงประมาณ 300 ksc/วินาที พร้อมทั้งบันทึกการยืดตัวของเหล็กเสริมทุกๆ แรงดึง 250 กิโลกรัม หรืออาจใช้การแบ่งค่าเองให้ได้ประมาณ 15-20 ค่าในช่วงพิกัดยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
- ดำเนินการทดสอบจนกระทั่งเหล็กเสริมขาด
- ถอดชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบแล้วสังเกตรูปลักษณะความเสียหายของชิ้นทดสอบ
- นำชิ้นทดสอบที่ขาด 2 ท่อนมาต่อกันให้เหมือนเดิม วัดระยะความยาวพิกัดด้วยเวอร์เนียร์ เพื่อคำนวณค่ายืดตัวทั้งหมดดังรูปที่ 4-10 สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะการยืดตัว
- สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-8 การกำหนดความยาวพิกัด (Gauge Length)

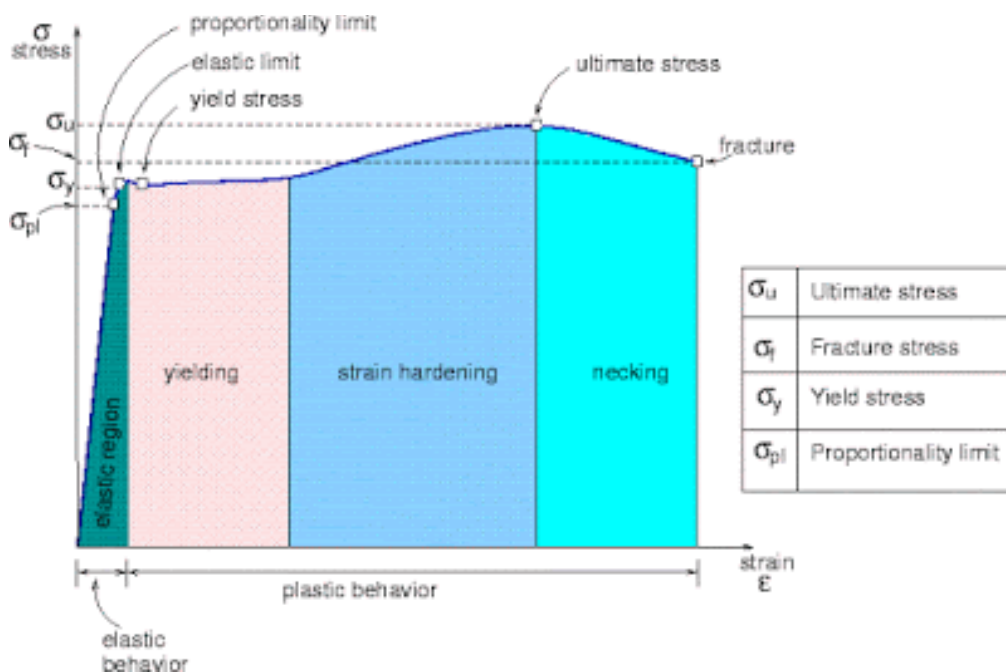




รูปที่ 4-9 การจัดตำแหน่งความยาวพิกัดของเหล็กเสริมกึ่งกลางอุปกรณ์ยึดจับ



รูปที่ 4-10 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความยาวของเหล็กเส้นทดสอบ



รูปที่ 4-11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม

(ที่มา : www.learneasy.info)

6) การคำนวณผลการทดสอบ

หลังจากได้ทำการทดสอบเรียบร้อยแล้ว คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของเหล็กเสริมประเภทต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

- มวลระบุ (w) คำนวณได้จาก

$$w = \frac{0.00785\pi d^2}{4} \quad (4-1)$$

เมื่อ

w คือ มวลระบุ (kg/m)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ (mm)

(เหล็กเสริมมีความหนาแน่น 7,850 kg/m³)

- ร้อยละความคลาดเคลื่อนของมวลต่อเมตร

$$M = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (4-2)$$

เมื่อ

M คือ ร้อยละของความคลาดเคลื่อนของมวลต่อเมตร

w_1 คือ มวลระบุ (kg/m)

w_2 คือ มวลต่อเมตร (kg/m)

- หน่วยแรงดึงที่จุดพิสัยยืดหยุ่น (Tensile Strength at Proportional Limit) เป็นตำแหน่งสุดท้ายที่แรงดึงยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ซึ่งตรงกับความสัมพันธ์ตามกฎของฮุก
- หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) เป็นตำแหน่งที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร เหล็กเส้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยหน่วยแรงดึงมีค่าค่อนข้างคงที่

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A} \quad (4-3)$$

เมื่อ

σ_y คือ หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (ksc)

P_y คือ แรงดึงที่จุดคราก (kg)

A คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ (cm²)



- หน่วยแรงประลัย (Ultimate Tensile Strength) เป็นจุดรับแรงดึงสูงสุด (Maximum Point) โดยเป็นจุดที่วัสดุรับแรงดึงได้สูงสุดก่อนวัสดุจะเกิดคอคอดขึ้นที่พื้นที่หน้าตัด

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A} \quad (4-4)$$

เมื่อ

σ_u คือ หน่วยแรงดึงที่จุดสูงสุด (ksc)

P_u คือ แรงดึงที่จุดสูงสุด (kg)

A คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ (cm^2)

- ร้อยละของการยืดตัว (Percent of Elongation)

$$PE = ((L_f - L_o)/L_o) \times 100 \quad (4-5)$$

เมื่อ

PE คือ ร้อยละของการยืดตัว

L_o คือ ความยาวเดิมมีค่าเท่ากับ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (5D)

L_f คือ ความยาวในช่วง L_o หลังจากเหล็กขาดแล้ว

- โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (4-6)$$

เมื่อ

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น

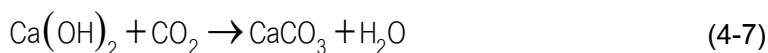
$\Delta\sigma$ คือ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงดึงในช่วงพิกัดยืดหยุ่น (kg)

$\Delta\varepsilon$ คือ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยความเครียดในช่วงไม่เกินพิกัดยืดหยุ่น

4.1.4. การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน

การทดสอบหาความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation Depth) ในคอนกรีต เป็นการตรวจสอบระดับการเสื่อมสภาพของผิวคอนกรีตที่ใช้ป้องกันสนิมให้กับเหล็กเสริม โดยการเกิดคาร์บอนเนชันในเนื้อคอนกรีตเป็นกระบวนการเปลี่ยนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนต โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คอนกรีตในสภาวะเริ่มต้นจะเป็นสารประกอบของซีเมนต์ไฮเดรต จำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีสภาวะเป็นด่าง มีค่า pH ประมาณ 12 ซึ่งเหล็กเสริมในสภาวะที่เป็นด่างสูงจะไม่เกิดสนิม แต่เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ผิวคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอนเนต (CaCO_3) ขึ้น ดังสมการ



กระบวนการทางเคมีดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศและความชื้นโดยตรง และจะค่อย ๆ เกิดลึกลงไปเรื่อย ๆ ตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นที่ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ผลของคาร์บอนเนชันจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในคอนกรีตถูกใช้ไปในปฏิกิริยาดังกล่าว หากความลึกของคาร์บอนเนชันเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จะทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลง ส่งผลให้เหล็กเสริมสามารถเกิดสนิมขึ้นได้

1) สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) 1% ในแอลกอฮอล์



รูปที่ 4-12 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

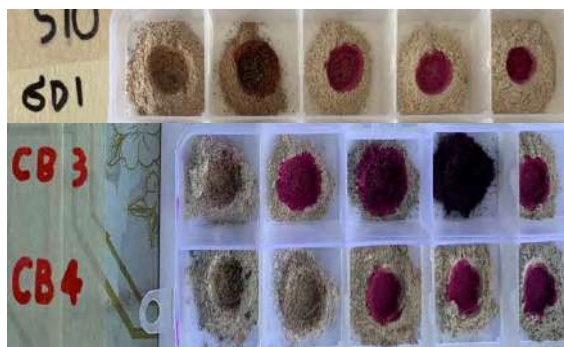
2) วิธีการทดสอบ

ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตดังรูปที่ 4-13 (ก) ที่ระดับความลึกทุก ๆ 1 ซม.จนถึง 5 ซม. จากผิวคอนกรีต โดยหลีกเลี่ยงการเจาะถูกเหล็กเสริม นำตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ มาทดสอบด้วยสารละลาย Phenolphthalein 1% ในแอลกอฮอล์ ที่ห้องปฏิบัติการ หากผงคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง แสดงว่าคอนกรีตยังคงสภาพความเป็นต่างอยู่ แต่หากไม่เปลี่ยนสีหรือเปลี่ยนเป็นสีจาง ๆ แสดงว่า คอนกรีตมีค่าความเป็นต่างลดลง หรือเกิดคาร์บอนเนชันขึ้นในระดับความลึกนี้ดังรูปที่ 4-13 (ข)





(ก) การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความ
ลึกต่างๆ



(ข) การตรวจคาร์บอนเนชั่น

รูปที่ 4-13 การทดสอบความลึกของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น

4.2 ผลการทดสอบวัสดุ

การดำเนินการเก็บวัสดุตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติ จะทำการบันทึกภาพในขั้นตอนการดำเนินการของแต่ละตัวอย่าง จัดทำเป็นรายงานการเก็บตัวอย่าง แสดงในภาคผนวก หลังจากเก็บตัวอย่างและจัดบันทึกรหัสตัวอย่าง จะส่งตัวอย่างไปทดสอบที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือต่อไป โดยผลการทดสอบจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2.1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

โครงการนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงสะพาน (Span) S1 S10 S11 S12 ตอม่อสะพาน (Pier) P1 P9 P10 P11 และ ตอม่อตัมบริม A1 A2 รวมทั้งสิ้น 80 ตำแหน่ง โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานขวาง (Diaphragm, DP) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) เสาตอม่อ (Pier, CL) แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในตารางถัดไป

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

No	SpecimenNo.	Area	Member	Compressive Strength (kgf/cm ²)
1	P1-CL4-L	P1	CL	299
2	P1-CL3-L	P1	CL	170
3	P1-CL2-L	P1	CL	338
4	P1-CL1-L	P1	CL	273
5	P1-CB-F-5	P1	CB	354
6	P1-CB-RE6	P1	CB	149
7	P1-CB-RE7	P1	CB	144
8	P9-CL4-F	P9	CL	175
9	P9-CL3-F	P9	CL	179
10	P9-CL2-F	P9	CL	245
11	P9-CL1-F	P9	CL	221
12	P9-CB-1-RE	P9	CB	225
13	P9-CB-2-RE	P9	CB	283
14	P9-CB-3-RE	P9	CB	186
15	P10-CL4-F	P10	CL	336
16	P10-CL3-R	P10	CL	214
17	P10-CL2-F	P10	CL	221
18	P10-CL1-F	P10	CL	254
19	P10-CB-1-F	P10	CB	195
20	P10-CB-2-F	P10	CB	241



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

No	SpecimenNo.	Area	Member	Compressive Strength (kgf/cm ²)
21	P10-CB-3-F	P10	CB	360
22	P11-CL4-R	P11	CL	194
23	P11-CL3-L	P11	CL	323
24	P11-CL2-F	P11	CL	254
25	P11-CL1-L	P11	CL	250
26	P11-CB-1-RE	P11	CB	265
27	P11-CB-2-RE	P11	CB	297
28	P11-CB-3-RE	P11	CB	173
29	A1-CB-1	A1	CB	316
30	A1-CB-2	A1	CB	211
31	A2-CB-1	A2	CB	286
32	A2-CB-2	A2	CB	235
33	S1-SW1-1	S1	SW	154
34	S1-SW2-2	S1	SW	223
35	S1-GD1-L-L/2	S1	GD	345
36	S1-GD3-R-4L/4	S1	GD	318
37	S1-GD4-L-L/4	S1	GD	195
38	S1-DP2-1	S1	DP	158
39	S1-DP2-2	S1	DP	139
40	S1-DP2-3	S1	DP	199
41	S1-DK-1	S1	DK	296
42	S1-DK-2	S1	DK	236
43	S1-DK-3	S1	DK	234
44	S1-DK-4	S1	DK	226
45	S10-SW-1-1	S10	SW	156
46	S10-SW-1-2	S10	SW	217
47	S10-GD4-1-L	S10	GD	282
48	S10-GD4-2-L	S10	GD	243
49	S10-GD4-3-L	S10	GD	233
50	S10-DP3-1	S10	DP	173
51	S10-DP3-2	S10	DP	164
52	S10-DP3-3	S10	DP	165
53	S10-DK-1	S10	DK	218
54	S10-DK-2	S10	DK	322
55	S10-DK-3	S10	DK	254
56	S10-DK-4	S10	DK	206



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

No	SpecimenNo.	Area	Member	Compressive Strength (kgf/cm ²)
57	S11-SW1-1	S11	SW	228
58	S11-SW1-2	S11	SW	249
59	S11-GD2-1-L	S11	GD	346
60	S11-GD4-2-L	S11	GD	423
61	S11-GD4-3-L	S11	GD	407
62	S11-DP1-RE1	S11	DP	256
63	S11-DP3-RE1	S11	DP	200
64	S11-DP3-RE2	S11	DP	186
65	S11-DK-1	S11	DK	208
66	S11-DK-2	S11	DK	340
67	S11-DK-3	S11	DK	299
68	S11-DK-4	S11	DK	254
69	S12-SW1-1	S12	SW	148
70	S12-SW1-2	S12	SW	83
71	S12-GD1-L-R	S12	GD	323
72	S12-GD2-L-L/2	S12	GD	275
73	S12-GD3-R-L/2	S12	GD	284
74	S12-DB3-RE-2	S12	DP	141
75	S12-DB3-RE-1	S12	DP	137
76	S12-DP2-RE-1	S12	DP	130
77	S12-DK-1	S12	DK	239
78	S12-DK-2	S12	DK	171
79	S12-DK-3	S12	DK	180
80	S12-DK-4	S12	DK	181



4.2.2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

โครงการนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในช่วงสะพาน (Span) S1 S10 S11 S12 ตอม่อสะพาน (Pier) P1 P9 P10 P11 และ ตอม่อตัวริม A1 A2 รวมทั้งสิ้น 80 ตำแหน่ง โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานขวาง (Diaphragm, DP) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) เสาตอม่อ (Pier, CL) แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในตารางถัดไป

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

No	SpecimenNo.	Area	Member	Tensile Strength (kgf/cm ²)
1	P1-CL4-R	P1	CL	22
2	P1-CL3-F	P1	CL	29
3	P1-CL2-F	P1	CL	12
4	P1-CL1-R	P1	CL	19
5	P1-CB-F-1	P1	CB	18
6	P1-CB-F-2	P1	CB	20
7	P1-CB-F-3	P1	CB	17
8	P9-CL4-R	P9	CL	17
9	P9-CL3-R	P9	CL	19
10	P9-CL2-R	P9	CL	24
11	P9-CL1-L	P9	CL	33
12	P9-CB-5-RE	P9	CB	32
13	P9-CB-6-RE	P9	CB	18
14	P9-CB-7-RE	P9	CB	31
15	P10-CL4-R	P10	CL	10
16	P10-CL3-F	P10	CL	28
17	P10-PL2-L	P10	CL	17
18	P10-CL1-L	P10	CL	34
19	P10-CB-5-F	P10	CB	32
20	P10-CB-6-F	P10	CB	30
21	P10-CB-7-F	P10	CB	33
22	P11-CL4-F	P11	CL	33
23	P11-CL3-F	P11	CL	31
24	P11-CL2-R	P11	CL	23
25	P11-CL1-F	P11	CL	21
26	P11-CB-5-RE	P11	CB	19
27	P11-CB-6-RE	P11	CB	30

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

No	SpecimenNo.	Area	Member	Tensile Strength (kgf/cm ²)
28	P11-CB-7-RE	P11	CB	21
29	A1-CB-1	A1	CB	16
30	A1-CB-2	A1	CB	27
31	A2-CB-1	A2	CB	14
32	A2-CB-2	A2	CB	30
33	S1-SW1-1	S1	SW	32
34	S1-SW2-2	S1	SW	27
35	S1-GD1-L-3L/4	S1	GD	22
36	S1-GD2-L-3L/4	S1	GD	27
37	S1-GD2-L-L/2	S1	GD	18
38	S1-DP3-1	S1	DP	24
39	S1-DP3-2	S1	DP	21
40	S1-DP3-3	S1	DP	15
41	S1-DK-5	S1	DK	30
42	S1-DK-6	S1	DK	23
43	S1-DK-7	S1	DK	31
44	S1-DK-8	S1	DK	27
45	S10-SW2-1	S10	SW	24
46	S10-SW2-2	S10	SW	33
47	S10-GD3-1-R	S10	GD	30
48	S10-GD3-2-R	S10	GD	39
49	S10-GD3-3-R	S10	GD	24
50	S10-DP1-1	S10	DP	38
51	S10-DP1-2	S10	DP	40
52	S10-DP1-3	S10	DP	29
53	S10-DK-5	S10	DK	28
54	S10-DK-6	S10	DK	26
55	S10-DK-7	S10	DK	32
56	S10-DK-8	S10	DK	26
57	S11-SW2-1	S11	SW	28
58	S11-SW2-2	S11	SW	25
59	S11-GD1-1-R	S11	GD	20
60	S11-GD3-2R	S11	GD	21
61	S11-GD3-3-R	S11	GD	27
62	S11-DP1-RE2	S11	DP	24
63	S11-DP1-RE3	S11	DP	16



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

No	SpecimenNo.	Area	Member	Tensile Strength (kgf/cm ²)
64	S11-DP2-RE3	S11	DP	25
65	S11-DK-5	S11	DK	31
66	S11-DK-6	S11	DK	31
67	S11-DK-7	S11	DK	20
68	S11-DK-8	S11	DK	30
69	S12-SW1-1	S12	SW	22
70	S12-SW1-2	S12	SW	19
71	S12-GD1-L-3L/4	S12	GD	16
72	S12-GD4-L-L/2	S12	GD	16
73	S12-GD4-R-3L/4	S12	GD	17
74	S12-DB3-RE-3	S12	DP	28
75	S12-DB2-RE-3	S12	DP	17
76	S12-DP2-RE-2	S12	DP	17
77	S12-DK-5	S12	DK	23
78	S12-DK-6	S12	DK	16
79	S12-DK-7	S12	DK	30
80	S12-DK-8	S12	DK	32



4.2.3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

โครงการนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมในช่วงสะพาน (Span) S1 S10 S11 S12 ตอม่อสะพาน (Pier) P1 P9 P10 P11 และ ตอม่อตบริม A1 A2 รวมทั้งสิ้น 80 ตำแหน่ง โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานขวาง (Diaphragm, DP) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) เสาตอม่อ (Pier, CL) แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมในตารางถัดไป

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ลำดับ	รหัสทดสอบ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	Tested Diameter (mm)	Yield Stress (ksc)	Ultimate Stress (ksc)
1	P1-CL-1-R	P1	CL	9	3656	5575
2	P1-CL-2-L	P1	CL	25	3796	5112
3	P1-CL-3-L	P1	CL	25	3808	5589
4	P1-CL-4-L	P1	CL	9	3501	6373
5	P1-CB-F-1	P1	CB	12	4172	5779
6	P1-CB-F-2	P1	CB	25	3688	5847
7	P1-CB-F-3	P1	CB	12	4326	6098
8	P9-CL1-F	P9	CL	25	3753	5794
9	P9-CL2-F	P9	CL	9	4205	5695
10	P9-CL3-F	P9	CL	9	4205	5876
11	P9-CL4-F	P9	CL	25	4111	6348
12	P9-CB1-RE	P9	CB	25	2797	4172
13	P9-CB2-RE	P9	CB	12	3862	5975
14	P9-CB3-RE	P9	CB	12	4538	6123
15	P10-CL1-F	P10	CL	25	3886	5874
16	P10-CL2-R	P10	CL	9	3753	6931
17	P10-CL3-R	P10	CL	9	4885	6846
18	P10-CL4-F	P10	CL	25	3854	5824
19	P10-CB-1-F	P10	CB	25	3133	6030
20	P10-CB-2-F	P10	CB	12	4089	5824
21	P10-CB-3-F	P10	CB	25	3117	6049



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ลำดับ	รหัสทดสอบ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	Tested Diameter (mm)	Yield Stress (ksc)	Ultimate Stress (ksc)
22	P11-CL1-F	P11	CL	25	3820	5556
23	P11-CL2-R	P11	CL	9	3671	5449
24	P11-CL3-L	P11	CL	9	3929	5339
25	P11-CL4-F	P11	CL	25	3933	6091
26	P11-CB-1-RE	P11	CB	25	3072	6199
27	P11-CB-2-RE	P11	CB	16	3859	5501
28	P11-CB-3-RE	P11	CB	25	3799	5740
29	A1-CB-1	A1	CB	25	2793	4199
30	A1-CB-2	A1	CB	25	3649	5469
31	A2-CB-1	A2	CB	16	3583	4808
32	A2-CB-2	A2	CB	12	4203	5879
33	S1-SW1-1	S1	SW	9	3613	5138
34	S1-SW1-2	S1	SW	9	4922	6258
35	S1-GD1-L-L/2	S1	GD	9	3259	4821
36	S1-GD2-L-L/2	S1	GD	9	4962	6481
37	S1-GD3-R-L/2	S1	GD	9	4821	6944
38	S1-GD4-R-L/2	S1	GD	9	4274	5623
39	S1-DP3-1-END	S1	DP	9	4009	4864
40	S1-DP3-2-END	S1	DP	9	3985	4763
41	S1-DK-1	S1	DK	16	3822	4971
42	S1-DK-2	S1	DK	16	3225	4642
43	S1-DK-3	S1	DK	16	3408	4621
44	S1-DK-4	S1	DK	16	3384	4746
45	S10-SW1-1	S10	SW	9	4593	7042
46	S10-SW1-2	S10	SW	9	3777	4992
47	S10-GD1-R-3L/4	S10	GD	9	5454	6570
48	S10-GD2-L-3L/5	S10	GD	9	5472	6907
49	S10-GD3-R-3L/6	S10	GD	9	4385	6721



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ลำดับ	รหัสทดสอบ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	Tested Diameter (mm)	Yield Stress (ksc)	Ultimate Stress (ksc)
50	S10-GD4-L-3L/7	S10	GD	9	5477	6583
51	S10-DP1-1-END	S10	DP	9	4513	5350
52	S10-DP3-1-END	S10	DP	9	3862	5218
53	S10-DK-1	S10	DK	16	3033	4733
54	S10-DK-2	S10	DK	16	3712	4945
55	S10-DK-3	S10	DK	16	3683	4507
56	S10-DK-4	S10	DK	16	3194	4245
57	S11-SW2-1	S11	SW	9	4295	6315
58	S11-SW2-2	S11	SW	9	4383	6277
59	S11-GD1-3-R-3L/4	S11	GD	9	3988	6115
60	S11-GD2-3-L-3L/5	S11	GD	9	5882	6639
61	S11-GD3-1-R-	S11	GD	9	4442	5465
62	S11-GD4-1-L-3L/4	S11	GD	9	4131	5576
63	S11-DP1-RE-END	S11	DP	9	4218	4996
64	S11-DP2-RE-END	S11	DP	9	3235	5594
65	S11-DK-1	S11	DK	16	2986	4692
66	S11-DK-2	S11	DK	16	3147	4080
67	S11-DK-3	S11	DK	16	3413	4906
68	S11-DK-4	S11	DK	16	3437	3560
69	S12-SW1-1	S12	SW	9	3552	4943
70	S12-SW1-2	S12	SW	9	3695	4861
71	S12-GD1-L-3L/4	S12	GD	9	3735	5510
72	S12-GD2-R-3L/4	S12	GD	9	4211	6126
73	S12-GD3-L-3L/4	S12	GD	9	4611	6663
74	S12-GD4-L-L/4R	S12	GD	9	4351	6761
75	S12-DP2-RE-END	S12	DP	9	3366	4733
76	S12-DP3-RE-END	S12	DP	9	3945	5193
77	S12-DK-1	S12	DK	16	4659	6225



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ลำดับ	รหัสทดสอบ	บริเวณ	ชั้นส่วน	Tested Diameter (mm)	Yield Stress (ksc)	Ultimate Stress (ksc)
78	S12-DK-2	S12	DK	16	4090	5396
79	S12-DK-3	S12	DK	16	3586	5196
80	S12-DK-4	S12	DK	16	3702	5254



4.2.4. ผลการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

โครงการนี้ได้ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น 80 ตำแหน่ง ๆ ละ 5 ระดับความลึก (รวมทั้งสิ้น 400 ตัวอย่าง) โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานขวาง (Diaphragm, DP) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) เสาตอม่อ (Pier, CL) ตารางที่ 4-7 แสดงผลการเกิดคาร์บอนเนชั่น (รูปการทดสอบแสดงในภาคผนวก ง) ซึ่งจะระบุสีของผงคอนกรีตหลังการทดสอบ การสรุปผลการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นจากสีผงคอนกรีตดังนี้

- 1) ถ้าสีของผงคอนกรีตไม่เปลี่ยนสีและยังเป็นเทา คือเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ระยะลึกนั้น ๆ
- 2) ถ้าสีของผงคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีม่วงอ่อน คือเกิดคาร์บอนเนชั่นบางส่วนที่ระยะลึกนั้น ๆ และพิจารณาว่าเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ระยะลึกนั้น ๆ
- 3) ถ้าสีของผงคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีม่วงหรือม่วงเข้ม คือไม่ได้เกิดคาร์บอนเนชั่นที่ระยะลึกนั้น ๆ

โดยส่วนใหญ่การเกิดคาร์บอนเนชั่นจะเริ่มตั้งแต่ผิวคอนกรีต ลึกเข้าไปในคอนกรีต ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะสรุปความลึกการพบคาร์บอนเนชั่นตามความลึกสูงสุดที่พบการเกิดคาร์บอนเนชั่น แม้ว่าบางครั้งการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะไม่พบในระดับความลึกก่อนหน้าก็ตาม และถ้าไม่พบการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะกำหนดให้ความลึกการพบคาร์บอนเนชั่นเท่ากับ 0

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

Specimen No.	Area	Member	ผลทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ความลึก 1-5 cm					ความลึกการพบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น (cm)
			1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
P1-CL1-F	P1	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
P1-CL2-L	P1	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
P1-CL3-L	P1	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
P1-CL4-L	P1	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
P1-CB1-F	P1	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	0
P1-CB2-F	P1	CB	เทา	เทา	เทา	เทา	เทา	5
P1-CB3-F	P1	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	0
P1-CB4-F	P1	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
P9-CL1-F	P9	CL	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P9-CL2-L	P9	CL	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P9-CL3-L	P9	CL	ม่วง	เทา	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	2
P9-CL4-L	P9	CL	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P9-CB1-RE	P9	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
P9-CB2-RE	P9	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	0
P9-CB3-RE	P9	CB	เทา	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	1



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Specimen No.	Area	Member	ผลทดสอบการเกิดคาร์บอนที่ความลึก 1-5 cm					ความลึกการพบปฏิกิริยา คาร์บอน (cm)
			1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
P9-CB4-F	P9	CB	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	2
P10-CL1-F	P10	CL	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P10-CL2-L	P10	CL	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	2
P10-CL3-R	P10	CL	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	1
P10-CL4-F	P10	CL	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	1
P10-CB1-F	P10	CB	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วง	2
P10-CB2-F	P10	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P10-CB3-F	P10	CB	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	1
P10-CB4-F	P10	CB	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P11-CL1-F	P11	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วงเข้ม	3
P11-CL2	P11	CL	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
P11-CL3	P11	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
P11-CL4-F	P11	CL	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วงเข้ม	3
P11-CB1-RE	P11	CB	เทา	เทา	ม่วงอ่อน	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
P11-CB2-RE	P11	CB	เทา	เทา	เทา	เทา	เทา	5
P11-CB3-RE	P11	CB	เทา	เทา	เทา	ม่วงอ่อน	ม่วงเข้ม	4
P11-CB4-RE	P11	CB	เทา	เทา	ม่วงอ่อน	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
S1-SW1	S1	SW	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
S1-SW2	S1	SW	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	1
S1-GD1	S1	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S1-GD2	S1	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S1-GD3	S1	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S1-GD4	S1	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S1-DP2	S1	DP	ม่วง	เทา	ม่วงอ่อน	ม่วงอ่อน	ม่วงเข้ม	4
S1-DP3	S1	DP	ม่วง	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
S1-DK1	S1	DK	เทา	เทา	เทา	เทา	เทา	5
S1-DK2	S1	DK	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
S1-DK3	S1	DK	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
S1-DK4	S1	DK	เทา	เทา	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	4
S10-SW1	S10	SW	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
S10-SW2	S10	SW	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	1
S10-GD1	S10	GD	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	2
S10-GD2	S10	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S10-GD3	S10	GD	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	1
S10-GD4	S10	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Specimen No.	Area	Member	ผลทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันที่ความลึก 1-5 cm					ความลึกการพบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชัน (cm)
			1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
S10-DP2	S10	DP	ม่วงอ่อน	ม่วงอ่อน	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	2
S10-DP3	S10	DP	เทา	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
S10-DK1	S10	DK	เทา	เทา	เทา	เทา	เทา	5
S10-DK2	S10	DK	เทา	เทา	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	4
S10-DK3	S10	DK	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
S10-DK4	S10	DK	เทา	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	3
S11-SW1	S11	SW	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
S11-SW2	S11	SW	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
S11-GD1	S11	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S11-GD2	S11	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S11-GD3	S11	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S11-GD4	S11	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S11-DP2	S11	DP	ม่วงอ่อน	ม่วงอ่อน	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	2
S11-DP3	S11	DP	ม่วงอ่อน	ม่วงอ่อน	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	2
S11-DK1	S11	DK	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	2
S11-DK2	S11	DK	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วง	2
S11-DK3	S11	DK	เทา	ม่วงอ่อน	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	2
S11-DK4	S11	DK	เทา	เทา	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	2
S12-SW1	S12	SW	เทา	เทา	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	2
S12-SW2	S12	SW	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	2
S12-GD1	S12	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S12-GD2	S12	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S12-GD3	S12	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S12-GD4	S12	GD	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S12-DP2	S12	DP	เทา	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	เทา	5
S12-DP3	S12	DP	เทา	เทา	เทา	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
S12-DK1	S12	DK	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	0
S12-DK2	S12	DK	ม่วงอ่อน	ม่วงอ่อน	ม่วงอ่อน	ม่วงเข้ม	ม่วงเข้ม	3
S12-DK3	S12	DK	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วง	ม่วงเข้ม	0
S12-DK4	S12	DK	ม่วง	ม่วง	เทา	ม่วง	ม่วงเข้ม	3



4.3 ข้อมูลจากแบบก่อสร้าง

น้ำหนักบรรทุก H20 - S16-44
แรงที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าแรงดึงของเหล็กเส้น : High tensile strength wire ($\phi 7\text{mm}$) Initial stress $10,000\text{ kg/cm}^2$

คอนกรีต	25 kg/cm^2
คานขวาง, พื้น, ทางเท้า: เหล็ก Intermediate grade ทั้ง $\phi 1/2$ ขึ้นไป	$1,400\text{ kg/cm}^2$
เหล็ก Structural grade ขนาด $\phi 3/8$ และ $\phi 1/4$	$1,200\text{ kg/cm}^2$
คอนกรีต	70 kg/cm^2

หลักการสำหรับงานผสมคอนกรีตคานคอนกรีตอัดแรง
 จำนวนส่วนผสม Design mix และใช้ Plastiment ผสม 0.25% ของน้ำหนักปูน
 ความยวบย (Slump) เพิ่มขึ้น 10 เซนติเมตร
 แรงอัดสูงสุดต้องไม่ต่ำกว่า 960 kg/cm^2

หลักการสำหรับงานผสมคอนกรีตคานขวาง, พื้น, ทางเท้า
 จำนวนส่วนผสม Design mix
 ความยวบย (Slump) เพิ่มขึ้น 8 เซนติเมตร
 แรงอัดสูงสุดต้องไม่ต่ำกว่า 210 kg/cm^2

หมายเหตุ
 Grade ของเหล็กใช้เป็นไปตาม AASHO Specification
 การใช้เหล็ก Structural grade แทน Intermediate grade ให้เพิ่มเนื้อเหล็กหน้าตัดของเหล็ก
 เป็น 1/7 เท่าของที่เหล็กใช้แบบ

รูปที่ 4-14 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุจากแบบก่อสร้างโครงสร้างส่วนบน

รายการก่อสร้างทั่วไปสำหรับตอม่อ

เสาเข็ม

- ใต้ทอกเสาเข็มจมลงอยู่ในชั้นดินแข็ง ตามที่ปรากฏในรายการสำรวจเจาะดิน
- ใต้พยายามตอกเสาเข็มให้จมลึกมากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ ทั้งนี้ให้กระทำการโดยวิธีรมั้วรมั้วเป็นพิเศษ
- *Design capacity* ของเสาเข็มกำหนด 35 ตัน

คอนกรีต

- ส่วนผสมของคอนกรีตให้เป็นไปตาม *Design mix* ซึ่งกำหนดแรงอัดสูงสุดไว้ไม่ต่ำกว่า ~ 210 กก./ซม.²
- ส่วนยุบตัว (*Slump*) ไม่มากกว่า 8 เซนติเมตร

เหล็กเสริม

- เหล็กเสริมทุกขนาดใช้ *structural grade*.

การก่อสร้าง

- ห้ามถือปูนหรือตาดปูน
- ห้ามทาน้ำปูน

รูปที่ 4-15 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุจากแบบก่อสร้างสำหรับตอม่อ



4.4 สรุปผลทดสอบวัสดุสะพาน

4.4.1. สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแยกตามประเภทชิ้นส่วน ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดในส่วนนี้ จะนำไปใช้ในประเมินและออกแบบเสริมกำลังสะพานในลำดับต่อไป โดยจะใช้ค่ากำลังอัดที่ 5 เพอร์เซ็นต์ไทล์ ซึ่งจะมีโอกาสที่กำลังอัดจะต่ำกว่านี้ 5%

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

Member	N	Avg (ksc)	SD (ksc)	5 th PERCENTILE (ksc)
Side Walk (SW)	8	182.37	55.98	90
Deck (DK)	16	241.49	50.73	158
Girder (GD)	12	306.12	68.07	194
Diaphragm (DP)	12	170.71	35.84	112
Cap beam (CB)	16	246.71	45.61	172
Pier column (CL)	16	245.14	74.78	122

4.4.2. สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตแยกตามประเภทชิ้นส่วน ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงในส่วนนี้ จะนำไปใช้ในประเมินและออกแบบเสริมกำลังสะพานในลำดับต่อไป โดยจะใช้ค่ากำลังดึงที่ 5 เพอร์เซ็นต์ไทล์ ซึ่งจะมีโอกาสที่กำลังดึงจะต่ำกว่านี้ 5%

ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

Member	N	Avg (ksc)	SD (ksc)	5th PERCENTILE (ksc)
Side Walk (SW)	8	26.31	4.67	19
Deck (DK)	16	27.18	4.77	19
Girder (GD)	12	23.12	6.91	12
Diaphragm (DP)	12	24.37	8.17	11
Cap beam (CB)	16	24.29	6.88	13
Pier column (CL)	16	23.32	7.51	11



4.4.3. สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ตารางที่ 4-10 แสดงผลการทดสอบเหล็กข้ออ้อย (DB) ของสะพาน เมื่อนำข้อมูลจำนวน 40 ตัวอย่างมาวิเคราะห์ พบว่ามีค่าเฉลี่ยความเค้นดึงที่จุดครากเท่ากับ 3653 ksc ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 450 ksc และ ผลการทดสอบเหล็กกลม (RB) ของสะพาน เมื่อนำข้อมูลจำนวน 40 ตัวอย่างมาวิเคราะห์ พบว่ามีค่าเฉลี่ยความเค้นดึงที่จุดครากเท่ากับ 4231 ksc ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 635 ksc ผลทดสอบความเค้นดึงที่จุดครากในส่วนนี้ จะนำไปใช้ในประเมินและออกแบบเสริมกำลังสะพานในลำดับต่อไป โดยจะใช้ความเค้นดึงที่จุดครากที่ 5 เปอร์เซ็นไทล์ ซึ่งจะมีโอกาสที่ความเค้นดึงที่จุดครากจะต่ำกว่านี้ 5%

ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

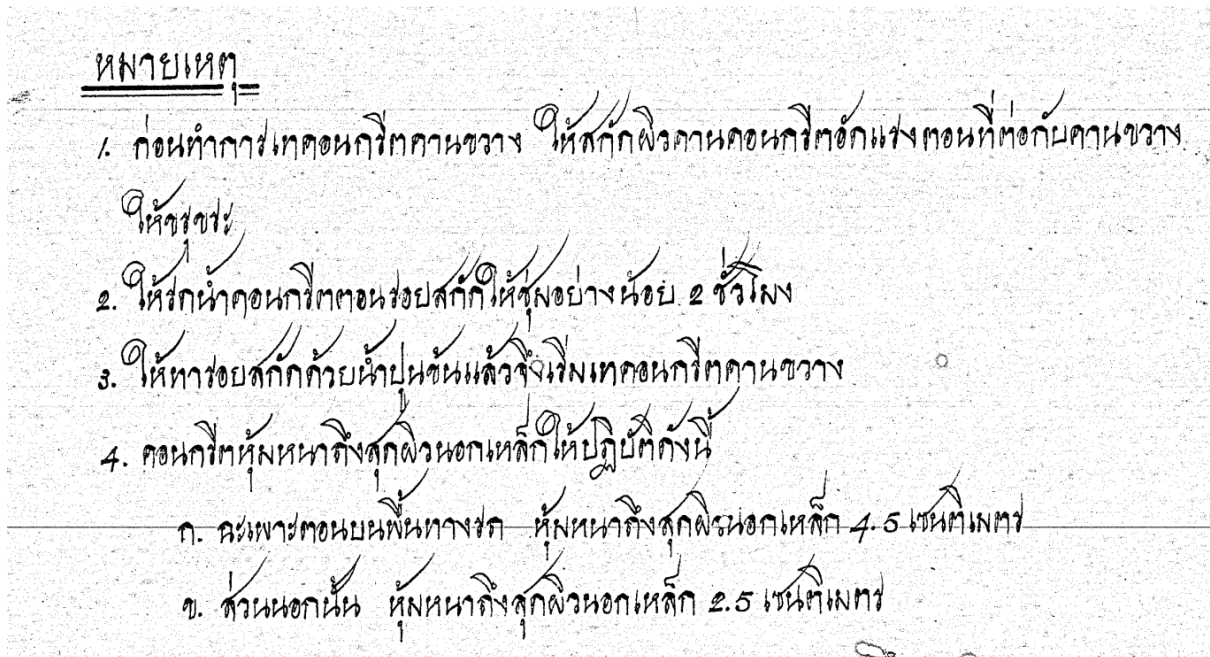
DB/RB บริเวณ	Yield Stress (ksc)				Ultimate Stress (ksc)		
	N (จำนวน ตัวอย่าง)	AVG (ค่าเฉลี่ย)	SD (ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ)	5th PERCENTILE	N (จำนวน ตัวอย่าง)	AVG (ค่าเฉลี่ย)	SD (ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ)
DB	40	3653	450	2913	40	5315	716
CB	16	3668	546	2770	16	5606	648
CL	8	3870	112	3686	8	5773	371
DK	16	3530	426	2829	16	4795	597
RB	40	4231	635	3186	40	5853	743
CL	8	3976	448	3239	8	6011	627
DP	8	3892	419	3203	8	5089	303
GD	16	4591	712	3420	16	6219	635
SW	8	4104	513	3260	8	5728	838
ผลรวมทั้งหมด	80						

4.4.4. สรุปผลการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน

ตารางที่ 4-11 แสดงผลการทดสอบค่าความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันแยกตามประเภทชั้นส่วน ถ้าคาร์บอนเนชันเกิดลึกถึงชั้นเหล็กเสริม เหล็กเสริมอาจเกิดสนิมได้ จากแบบก่อสร้างได้ระบุว่าคอนกรีตหุ้มหนาเท่ากับ 2.5 ซม (รูปที่ 4-16) และเมื่อพิจารณาความแปรปรวนของค่าที่ตรวจวัดได้ โครงสร้างส่วนใหญ่มีโอกาสเกิดสนิมได้มาก ควรหาน้ำยาป้องกันการเสื่อมสภาพคอนกรีตเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบค่าความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

Member	N	AVG (cm)	Std (cm)	Covering (cm)	Prob (depth > covering) (%)
CB	16	2.89	1.54	2.5	59.82%
CL	16	2.45	0.82	2.5	47.83%
DK	16	3.14	1.03	2.5	72.96%
DP	8	3.00	1.07	2.5	67.29%
GD	16	1.50	0.71	2.5	8.89%
SW	8	1.50	0.58	2.5	6.34%



รูปที่ 4-16 ระยะหุ้มคอนกรีตที่ระบุในแบบก่อสร้าง



บทที่ 5 การตรวจวัดพฤติกรรมการรับ น้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง สะพาน

5.1 วิธีการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน

การทดสอบและการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก (Bridge Load Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาดต่าง ๆ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน ตลอดจนนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ที่สนใจต่อไป

หลักการโดยทั่วไปของการทดสอบสะพานประเภทนี้ คือ การนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมาประเมินผลเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี โดยจะต้องควบคุมน้ำหนักบรรทุกที่จะนำมาทดสอบให้ผลการตอบสนองของสะพานอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) และสามารถประเมินกำลังรับน้ำหนักสูงสุดได้โดยใช้วิธีการ Extrapolate ค่าที่ได้จากการทดสอบเป็นระดับของน้ำหนักบรรทุกที่ปลอดภัย (Safe Load Level)

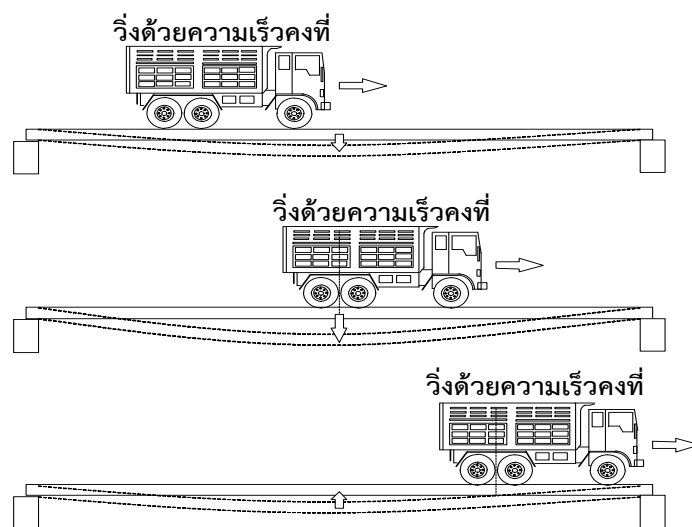
การทดสอบสะพานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกจริงเพื่อให้ทราบถึงผลการตอบสนองที่แท้จริงของโครงสร้างสะพาน นอกจากนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการวิเคราะห์และประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน และใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและปรับแก้แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง รวมถึงเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบอ้างอิง (Benchmark/Reference) และติดตามการเสื่อมสภาพของสะพานในอนาคต

5.1.1. การทดสอบสะพานแบบสถิต (Static Load Test)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและตำแหน่งของรถบรรทุกที่กระทำต่อสะพานแบบสถิต ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาจอดนิ่งอยู่กับที่ โดยให้ระยะกึ่งกลางของชุดเพลาลังตรงกับตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต้องการจะทดสอบ ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการหยุดรถจะบันทึกผลการตอบสนองของโครงสร้าง เช่น ค่าความเครียด (Strain) ค่าการแอ่นตัว (Deflection) โดยจะนำข้อมูลจากการตรวจวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ นี้มาวิเคราะห์และแสดงให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับตำแหน่งของรถบรรทุก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวแนวดิ่งกับตำแหน่งของรถบรรทุก เป็นต้น นอกจากนี้ผลการตอบสนองที่ได้จากตำแหน่งที่น้ำหนักรถบรรทุกกระทำกับสะพาน สามารถนำไปใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพานให้มีพฤติกรรมเหมือนกับโครงสร้างจริงมากที่สุดได้

5.1.2. การทดสอบสะพานแบบพลวัต (Dynamic Load Test)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งบนสะพาน ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาวิ่งผ่านบนสะพานด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน ในแต่ละความเร็วที่วิ่งบนสะพาน จะทำการตรวจวัดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของสะพานด้านต่าง ๆ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) รูปร่างการสั่นไหวในโหมดต่าง ๆ (Mode Shape) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratios) และตัวคูณเพิ่มค่าแรงกระแทก (Impact Factor) รวมถึงตรวจวัดระดับการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานและผลกระทบที่มีต่อการใช้งาน (Serviceability) ของสะพาน



รูปที่ 5-1 การทดสอบแบบพลวัตโดยให้รถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วคงที่บนสะพาน



5.1.2.1. ตัวคูณเพิ่มค่าแรงกระแทก (Impact Factor)

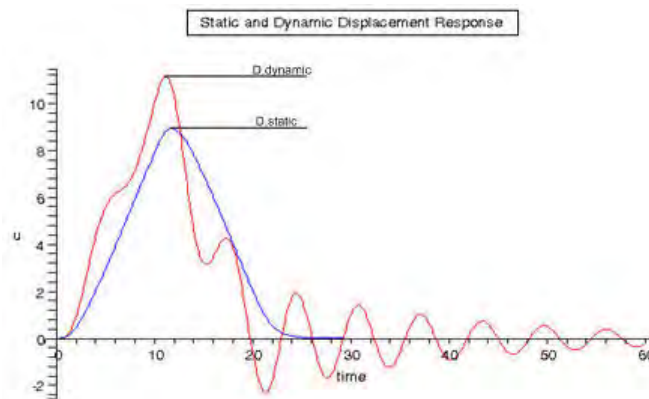
เป็นค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับแรงกระทำของรถบรรทุกในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแบบสถิต เพื่อพิจารณาผลกระทบจากแรงกระแทกและการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งผ่าน ตัวคูณเพิ่มค่าแรงกระแทกสามารถคำนวณได้โดยสมการ (5-1)

$$I = \frac{R_{\text{Dyn}}}{R_{\text{Sta}}} \quad (5-1)$$

โดยที่ R_{Dyn} = ค่าสูงสุดของผลการตอบสนองแบบพลวัต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

R_{Sta} = ค่าสูงสุดของผลการตอบสนองแบบสถิต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจวัดแบบสถิตได้ จะทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Dynamic Load Test มาผ่านกระบวนการกรองความถี่แบบ Low Pass Filter เพื่อแยกส่วน Pseudo-Static ออกมาจาก Dynamic Response โดยส่วนที่เป็น Pseudo-Static นี้จะเปรียบเสมือนผลการตอบสนองของโครงสร้างแบบสถิต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ซึ่งไม่รวมผลกระทบจากการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยจะใช้ค่าสูงสุดของ Pseudo-Static สำหรับค่า R_{Sta} เพื่อใช้คำนวณในสมการ



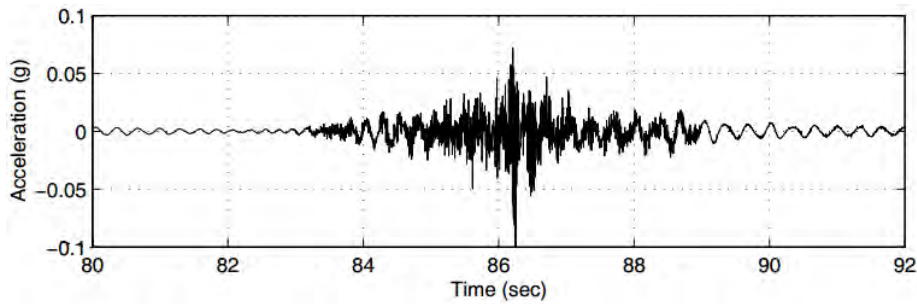
รูปที่ 5-2 ค่าการตอบสนองของโครงสร้างแบบ Pseudo Static และแบบ Dynamic

5.1.2.2. ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

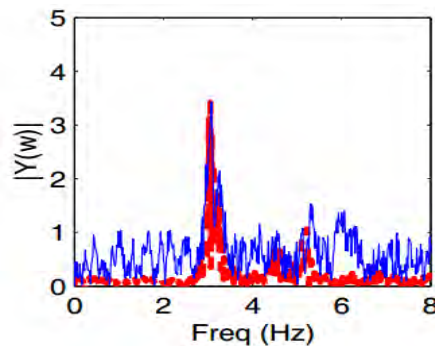
ค่าความถี่ธรรมชาติเป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน สามารถตรวจวัดได้จากการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free Vibration) ถ้าสะพานได้รับแรงกระทำจากภายนอกที่มีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ สะพานจะมีการตอบสนองแบบสั่นพ้อง (Resonance) โดยระดับการตอบสนองจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งวิบัติ

การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ สามารถทำได้โดยนำข้อมูลการสั่นไหวที่บันทึกในรูปแบบ Time-History (เช่น ประวัติข้อมูลความเร่ง) มาพิจารณาดังตัวอย่างในรูปที่ 5-3 จากนั้นทำการแปลงข้อมูลด้วยวิธี Fourier Transform ให้อยู่ในรูปของ Frequency Domain สุดท้ายจะพิจารณาค่าความถี่ที่มี

ขนาดค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุดเป็นค่าความถี่หลักหรือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานดังรูปที่
5-4



รูปที่ 5-3 ตัวอย่างข้อมูลการสั่นไหวในแนวตั้งแบบ Time History



รูปที่ 5-4 ตัวอย่าง Frequency Domain ของการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน

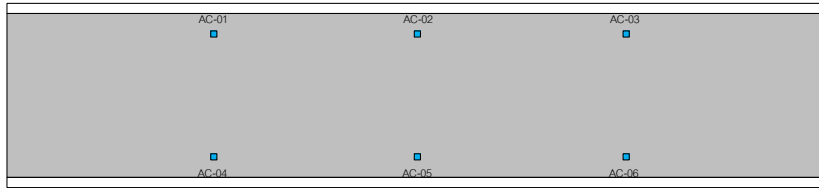
5.1.2.3. รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shapes)

รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shapes) เป็นลักษณะจำเพาะของการเสียรูปแบบพลวัตของแต่ละสะพาน โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นได้หลายโหมด แต่โหมดที่สำคัญจะเป็นโหมดแรกๆ (มีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ) ส่วนโหมดท้ายๆ (ซึ่งมีค่าความถี่สูง) จะเป็นการสั่นสะเทือน หรือ Noise และจะมีความสำคัญน้อยกว่าโหมดแรกๆ

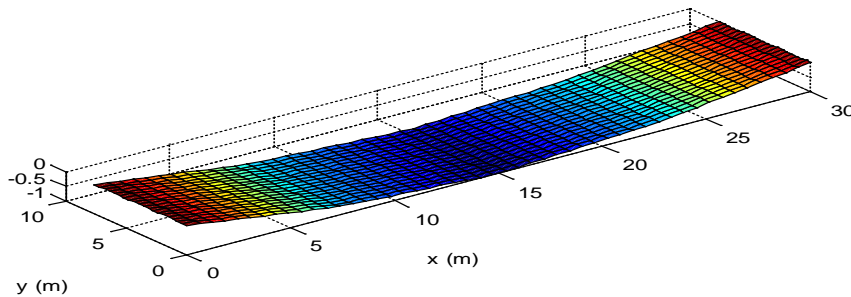
การหารูปร่างการสั่นไหวจำเป็นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ให้กระจายและครอบคลุมช่วงสะพานที่พิจารณา โดยตำแหน่งที่ติดตั้งต้องเป็นตำแหน่งที่อ่อนไหว (Sensitive) ต่อค่าความถี่ธรรมชาติ และควรสามารถสั่นไหวได้หลายโหมด การสร้าง Mode Shape จะสร้างตามค่าความถี่ธรรมชาติที่เลือก โดยใช้ค่า Amplitude ของแต่ละตำแหน่งอุปกรณ์เป็นตัวแทนการพล็อตค่าการแอ่นตัว และใช้ Phase ของ Accelerometer ในการกำหนดทิศทางของการแอ่นตัวว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม โดยตัวอย่างการติดตั้ง Accelerometer และ Mode Shape ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5-5 หากมีตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer น้อยเกินไป จะไม่สามารถตรวจสอบรูปร่างการสั่นไหวที่เกิดขึ้นได้ แต่การติดตั้ง Accelerometer จำนวนมากเกินไปจะมีค่าใช้จ่ายงาน



ทดสอบที่สูง ดังนั้นโครงการนี้จะใช้ Accelerometer จำนวน 6 ตัว ซึ่งเพียงพอต่อการหา Mode Shape
แรก ๆ ของสะพาน เช่น Bending Mode 1 ซึ่งเป็นโหมดที่มีความสำคัญมากของสะพาน



(ก) ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ Accelerometer

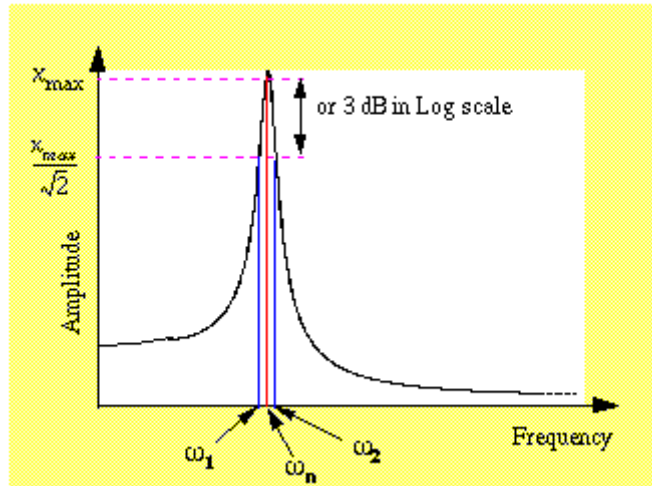


(ข) Mode Shape ของสะพาน

รูปที่ 5-5 ตัวอย่าง Mode Shape ของการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน

5.1.2.4. ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio)

ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพาน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการลดลงของพลังงานการสั่นไหวของโครงสร้างให้กลับมาอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ถ้าสะพานมีอัตราส่วนความหน่วงสูง เมื่อรถวิ่งออกจากสะพานแล้ว สะพานจะสั่นไหวแบบอิสระเพียงไม่กี่รอบก็จะกลับมาอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ในทางกลับกัน ถ้าสะพานที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่ำ การสั่นไหวจนกระทั่งหยุดนิ่งจะใช้เวลาาน การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงกระทำได้โดย นำข้อมูลการสั่นไหวแบบอิสระ (Free Vibration) มาแปลงให้อยู่ในรูปความถี่ (Frequency Domain) ทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความหน่วงด้วยวิธี Half Power Bandwidth ดังรูปที่ 5-6 และสมการที่ (5-2)



รูปที่ 5-6 ตัวอย่าง Mode Shape ของการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน

$$\zeta_n = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (5-2)$$

โดยที่

ζ_n = ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโหมดการสั่นไหว n ที่พิจารณา

ω_n = ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมด n

ω_2 = ค่า Upper frequency ที่ระดับ Amplitude = Half power ($2^{-0.5} = 0.707$) ของค่า Amplitude ที่ความถี่ธรรมชาติที่พิจารณา ω_n

ω_1 = ค่า Lower frequency ที่ระดับ Amplitude = Half power ($2^{-0.5} = 0.707$) ของค่า Amplitude ที่ความถี่ธรรมชาติที่พิจารณา ω_n

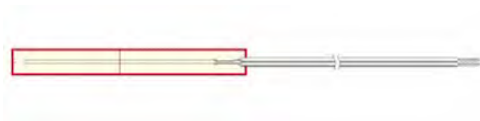
5.1.3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต (Strain Gauge for Concrete) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวคอนกรีตเนื่องจากการยึดหรือหดตัวของโครงสร้างสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่งที่กำหนด
- 2) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกหรือผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยจะใช้ในการวัดค่าการแอ่นตัวของคานพื้นและคานหลักของสะพาน
- 3) อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเร่งเนื่องจากการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน เพื่อใช้วิเคราะห์หา



ค่าความถี่ธรรมชาติ รูปแบบโหมดการสั่นไหว อัตราส่วนความหน่วง และค่าตัวคูณแรงกระแทก

- 4) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Data Acquisition) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้รวบรวมสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์
- 5) อุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop Computer) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณและบันทึกผล



(ก) อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต
(Strain Gauge for Concrete)



(ข) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่
(Displacement Transducer)



(ค) อุปกรณ์วัดความเร่งจากการสั่นไหว
(Accelerometer)



(ง) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ
(Data Acquisition)



(จ) อุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบพกพา
(Computer Notebook)

รูปที่ 5-7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสะพาน

5.1.4. การทดสอบภายใต้สภาวะใช้งาน (Normal Traffic)

ที่ปรึกษาจะทำการทดสอบภายใต้สภาวะใช้งาน 1 ช่วงสะพาน ขณะที่มีการจราจรผ่านสะพานปกติ โดยจะทำการตรวจวัดความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างสะพานเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน โดยจะนำข้อมูลที่ได้ไปศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานอันเนื่องจากการใช้งานตามสภาพการจราจรปกติ



5.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่าง ๆ จะติดตั้งกับชิ้นส่วนที่สำคัญที่สุดได้แก่ คานหลัก (Girder) เพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมการถ่ายแรงภายในโครงสร้างที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร สะพานกิตติขจรเปิดให้บริการตั้งแต่ปี 2509 ปัจจุบัน (2566) มีอายุมากถึง 57 ปี และผลการตรวจสอบสะพานพบว่าชิ้นส่วนโครงสร้างส่วนใหญ่ยังอยู่ในสภาพดี ดังนั้นการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานจึงใช้รถบรรทุกสิบล้อจำนวน 2 คัน น้ำหนักคันละ 25 ตัน ซึ่งจะให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดใกล้เคียงกับ รถบรรทุกมาตรฐาน HL-93 การใช้น้ำหนักบรรทุกที่เหมาะสมกับโครงสร้างขนาดใหญ่ทำให้ผลตอบสนองของโครงสร้าง (Structural Response) มีค่าสูงพอที่จะให้ผลการตรวจวัดไม่โดยรบกวนจากค่าสัญญาณรบกวน (Noise)

การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานนิยมใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ในการตรวจวัดความเร่งการสั่นไหวของสะพานที่ตำแหน่งสำคัญที่จะทำให้ทราบรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ในโหมดแรก ๆ ซึ่งมีความสำคัญสูงต่อพฤติกรรมโดยรวมของสะพาน สะพานโดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมคล้ายกับคาน คือมีการแอ่นตัวหรือดัดงอ การตรวจวัดจึงนิยมติดตั้ง Accelerometer ที่ตำแหน่งควบคุม (Control Points) การแอ่นตัวอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง คือ $L/4$, $L/2$, $3L/4$ จะแบ่งการติดตั้งเป็น 2 แนว คือ แนวตามยาวด้านซ้าย และแนวตามยาวด้านขวา หากการแอ่นตัวของ 2 แนวเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน อาจทำให้ได้ค่าโหมดการบิดของสะพานด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติที่ตรวจวัดได้มีความหมายทางกายภาพ คือ ถ้าสะพานได้รับแรงกระทำเป็นจังหวะเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ สะพานจะเกิดการสั่นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Resonance) จนกระทั่งวิบัติ โดยค่าความถี่ธรรมชาติหาได้จากการวิเคราะห์ Eigen Value ของ Global Stiffness Matrix และ Global Mass Matrix ดังนั้น ค่าความถี่ธรรมชาติ จึงเป็นค่าที่บ่งบอกถึง Global Stiffness Matrix และ Global Mass Matrix ของสะพาน ที่อยู่ในรูปของ Scalar ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมทริกซ์ที่มีตัวเลขเป็นจำนวนมาก มวลของสะพานไม่มีการเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจึงบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสติฟเนสของสะพาน หากสะพานมีสภาพชำรุด สติฟเนสมีแนวโน้มที่จะอ่อนลง หากสะพานได้รับการเสริมกำลัง สติฟเนสมีแนวโน้มที่จะแข็งขึ้น ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นไหวจึงนิยมใช้เป็นพารามิเตอร์หลักในการคาร์ิเบตแบบจำลองสะพานให้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของสะพานในแต่ละช่วงอายุการใช้งาน

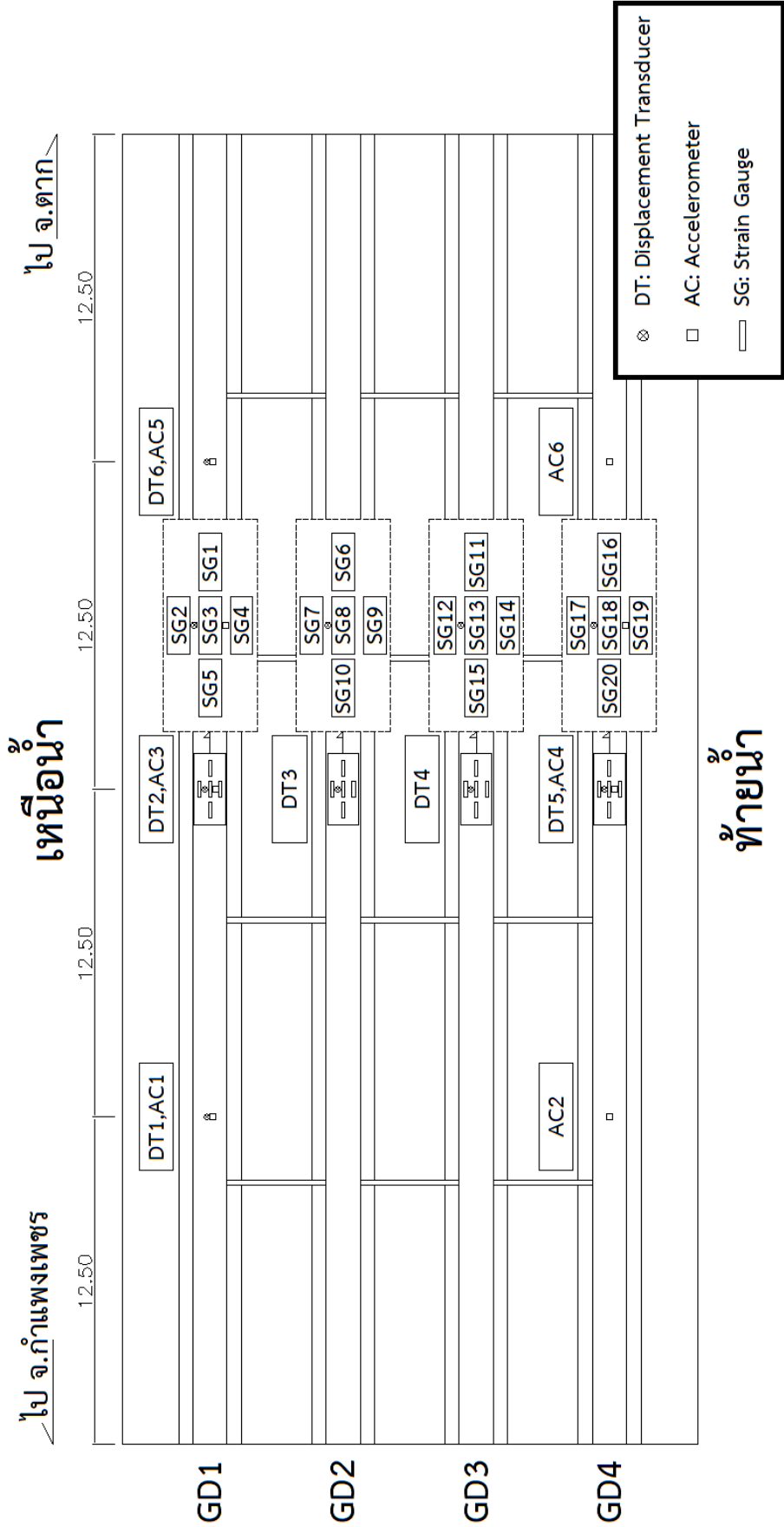
ในโครงการนี้สามารถตั้งนั่งร้านจากพื้นดินได้ การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานนิยมใช้อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ในการตรวจวัดพฤติกรรมการแอ่นตัวของสะพานด้วย เพื่อให้ทราบพฤติกรรมการกระจายแรงจากน้ำหนักบรรทุกเข้าสู่คานตัวนอก (Exterior Girder) และคานตัวใน (Interior Girder) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญในการรับน้ำหนักของสะพาน โดยทั่วไปสะพานช่วงเดี่ยว (Simple

Span) จะวัดการแอ่นตัวตามแนวยาวสะพานที่ระยะประมาณ $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ที่ห้องคาน GD1 และที่ $L/2$ ห้องคาน GD2 GD3 และ GD4

การติดตั้ง Strain Gauge ที่ด้านล่างของชิ้นส่วนที่มีการแอ่นตัว โดยจะติดตั้งที่ตำแหน่งการแอ่นตัวที่สำคัญ ที่ระยะประมาณ $L/2$ อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจวัดด้วย Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตอาจได้ค่าที่ค่อนข้างแปรปรวน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่างในแต่ละตำแหน่ง (Local Effect) เช่น การยึดหดตัวของผิวคอนกรีตที่มีรอยร้าวจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ การติด Strain Gauge คร่อมรอยร้าวจะได้ค่าที่สูงมาก ขณะที่การติด Strain Gauge บนผิวที่อยู่ระหว่างรอยร้าวจะได้ค่าที่ต่ำมาก นอกจากนี้คอนกรีตเสริมเหล็กไม่ได้เป็นวัสดุเนื้อเดียวกันและมีพฤติกรรมทุกทิศทางเหมือนกัน (Isotropic Elastic Material) ตำแหน่งที่มีก้อนหินอยู่ใกล้ผิวคอนกรีตอาจให้ค่าต่างจากตำแหน่งที่มีมอร์ตาร์อยู่ใกล้ผิวคอนกรีต หรือบริเวณที่มีการเสริมเหล็กหนาแน่นอาจให้ค่าแตกต่างจากบริเวณที่มีปริมาณเหล็กเบาบาง อีกทั้งการยึดหดของวัสดุได้รับอิทธิพลจากอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) และการยึดรั้งในทิศทางต่าง ๆ ดังนั้นค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บนผิวคอนกรีตจึงมีลักษณะผสมกันหลายอย่าง เพื่อลดความแปรปรวน จึงทำการติดตั้ง Strain Gauge 5 ตัวต่อคานหลักที่กึ่งกลางคาน

ที่ปรึกษาได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพาน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

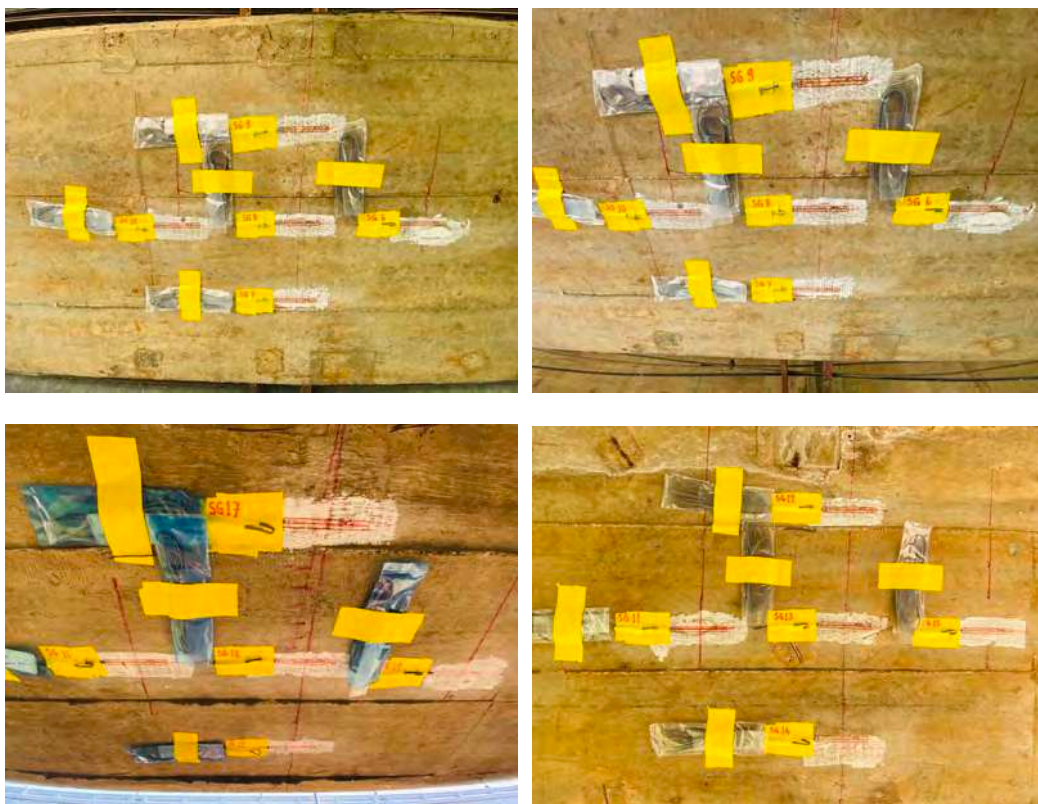




รูปที่ 5-8 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด



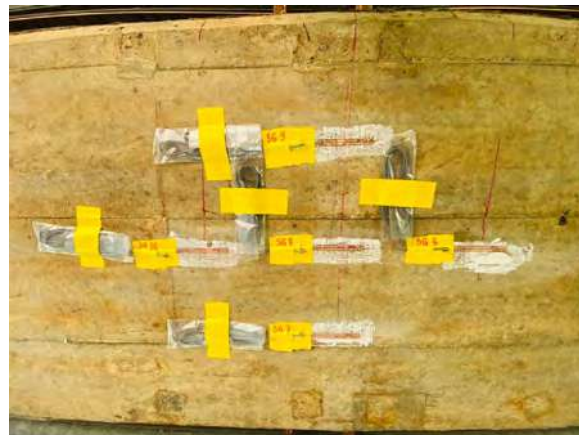
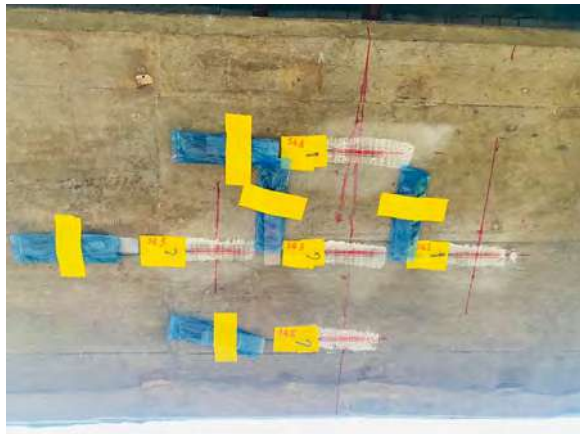
รูปที่ 5-9 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน Span 1



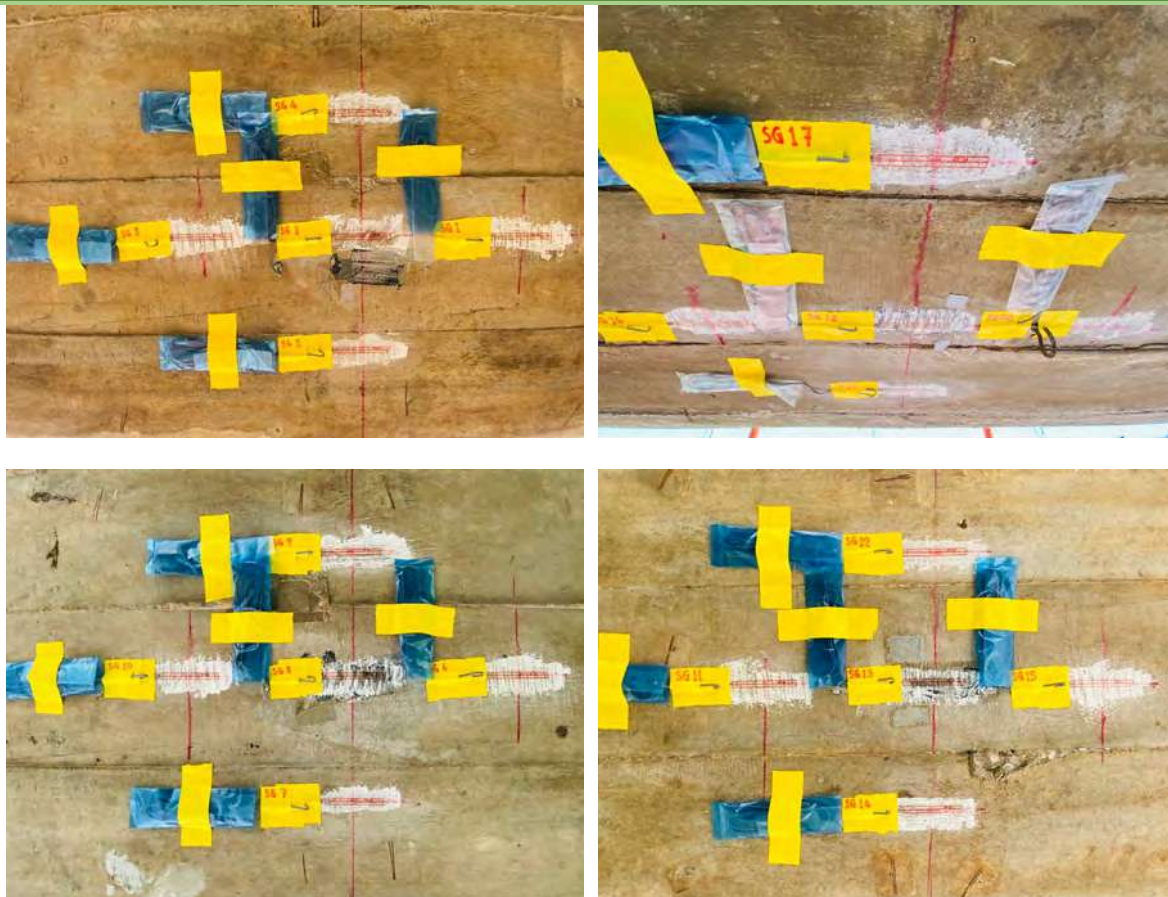
รูปที่ 5-10 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน Span 10



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 5-11 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน Span 11



รูปที่ 5-12 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน Span 12

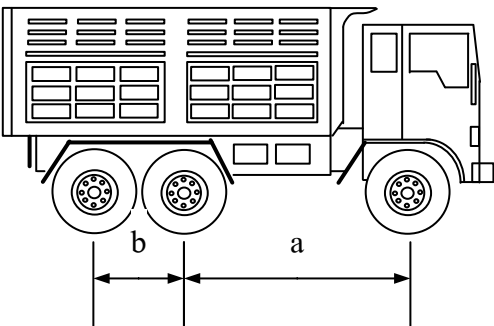
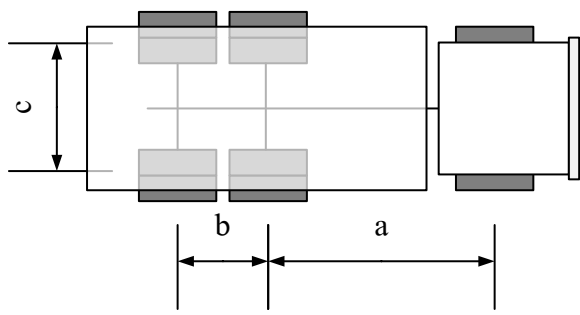


5.3 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ที่ปรึกษาได้ทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยใช้รถบรรทุก 10 ล้อ จำนวน 2 คัน โดยมีรายละเอียดระยะเพลาและน้ำหนักบรรทุกดังนี้

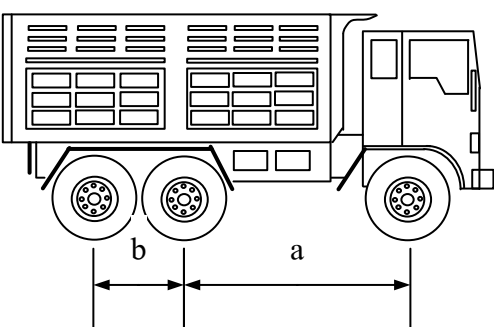
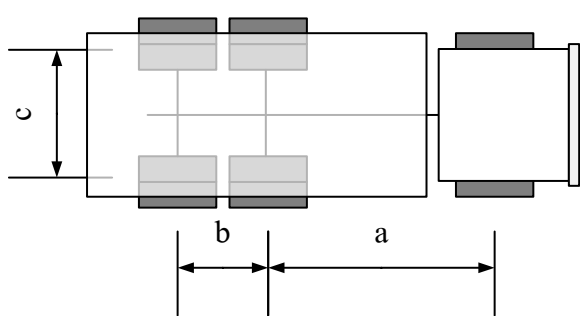
ตารางที่ 5-1 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ Span 1 และ Span 10

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (81-0998 ตาก)	รถบรรทุก (80-7172 ตาก)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	25.21	25.12
ระยะเพลาที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.05
ระยะเพลาที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.85	1.82

ตารางที่ 5-2 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ Span 11 และ Span 12

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (81-0998 ตาก)	รถบรรทุก (80-7172 ตาก)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	25.12	25.10
ระยะเพลาที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.05
ระยะเพลาที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.85	1.82

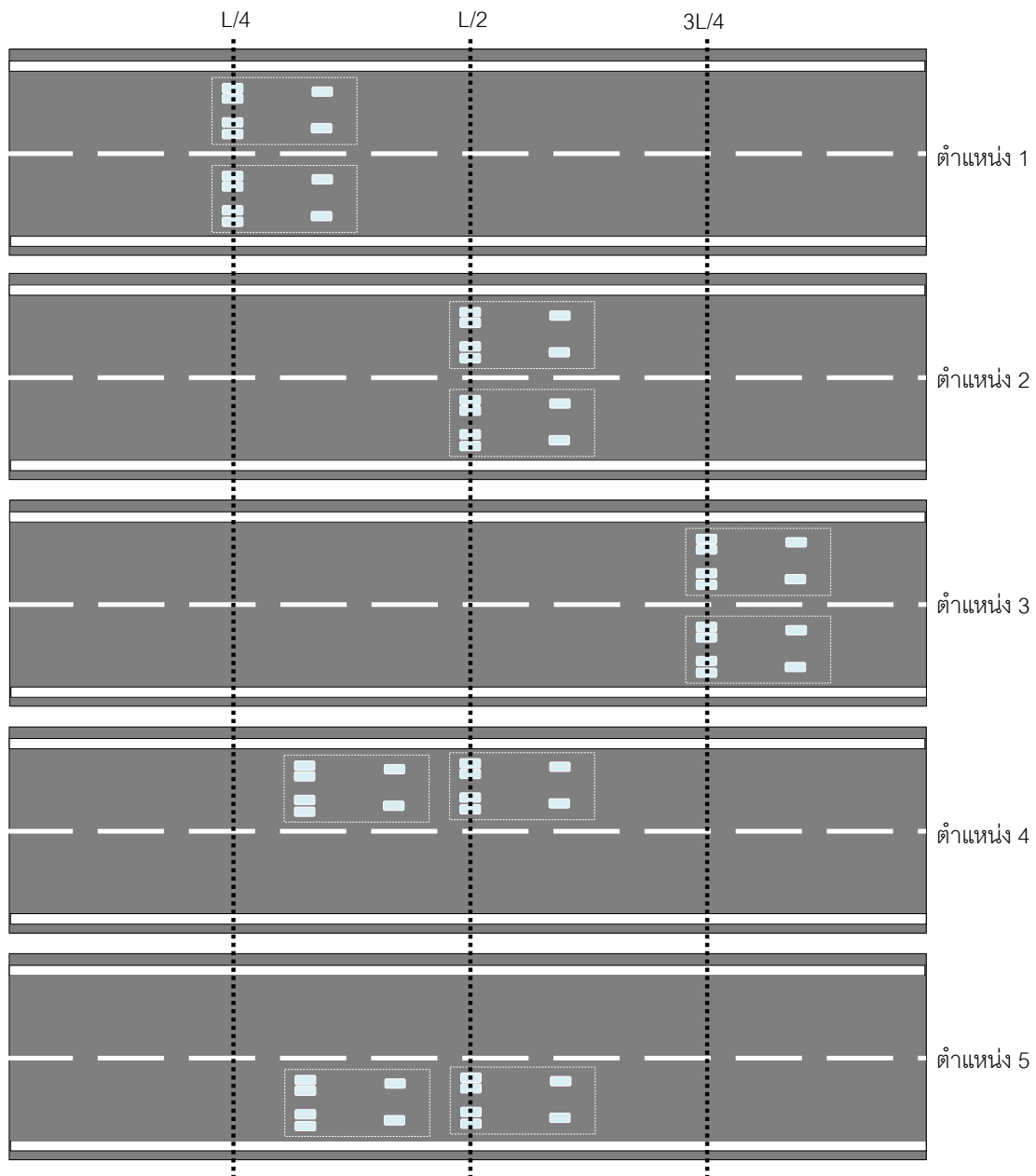
5.4 การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนด 5 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- Static 1: ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดหน้าเสมอที่ตำแหน่ง L/4 ของความยาวช่วง ทั้งสองช่องจราจร
- Static 2: ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดหน้าเสมอที่ตำแหน่ง L/2 ของความยาวช่วง ทั้งสองช่องจราจร
- Static 3: ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดหน้าเสมอที่ตำแหน่ง 3L/4 ของความยาวช่วง ทั้งสองช่องจราจร
- Static 4: ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดต่อท้ายที่ตำแหน่ง L/2 ของความยาวช่วง ช่องจราจรฝั่งซ้าย
- Static 5: ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดเรียงกันที่ตำแหน่ง L/2 ของความยาวช่วง ช่องจราจรฝั่งขวา



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 5-13 ตำแหน่งการทดสอบแบบสถิต

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 5-14 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบสถิต Span 1

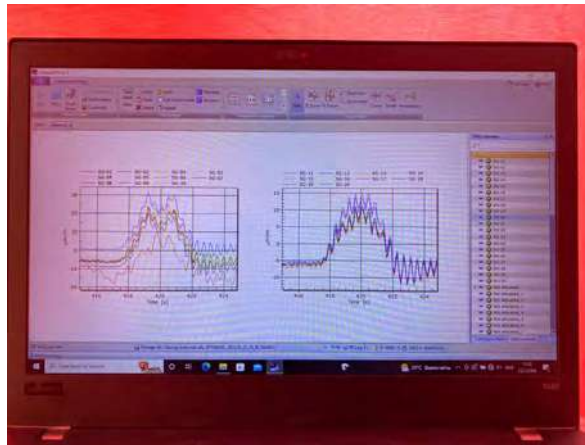


โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 5-15 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบสถิต Span 10

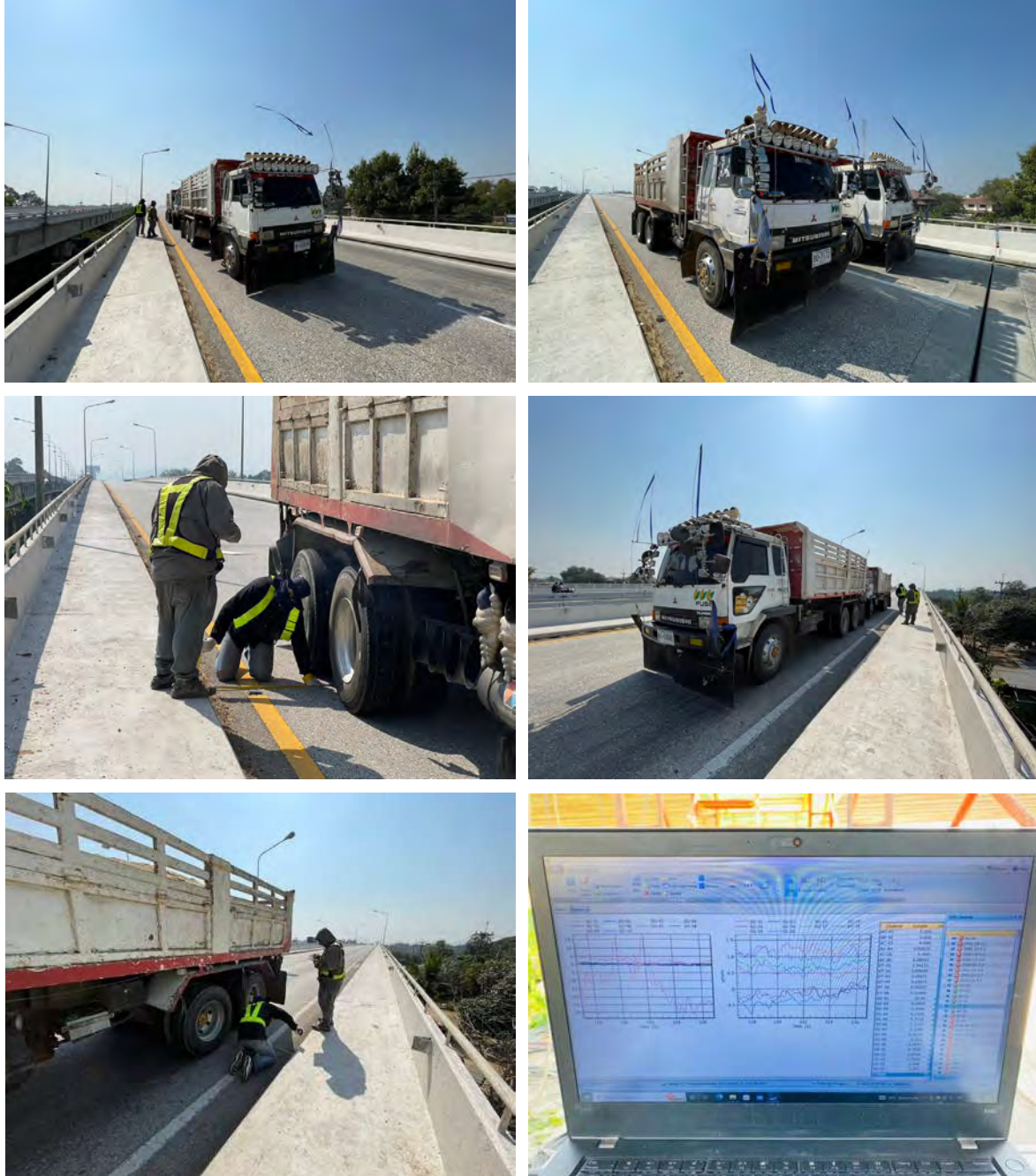
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



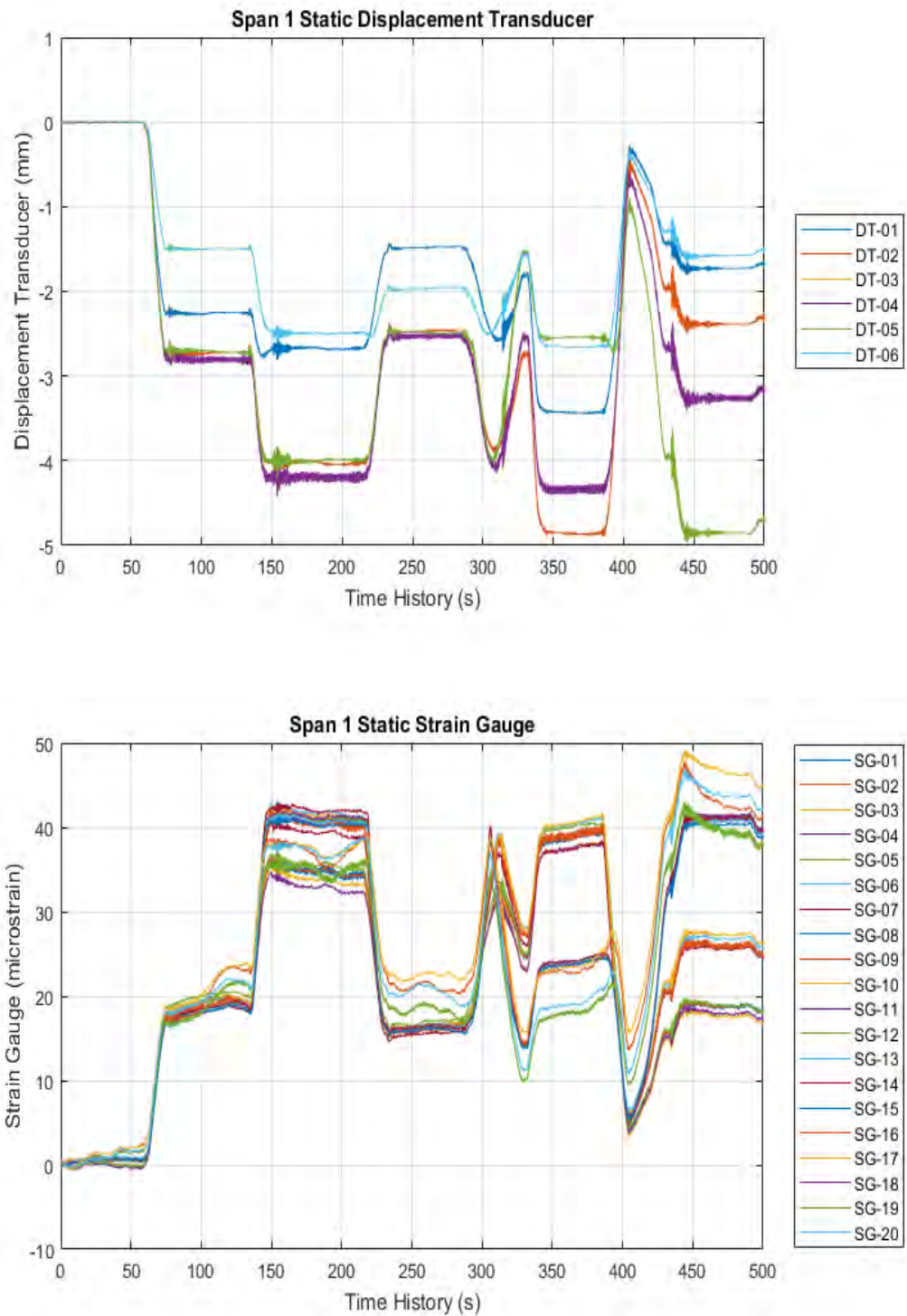
รูปที่ 5-16 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบสถิต Span 11



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

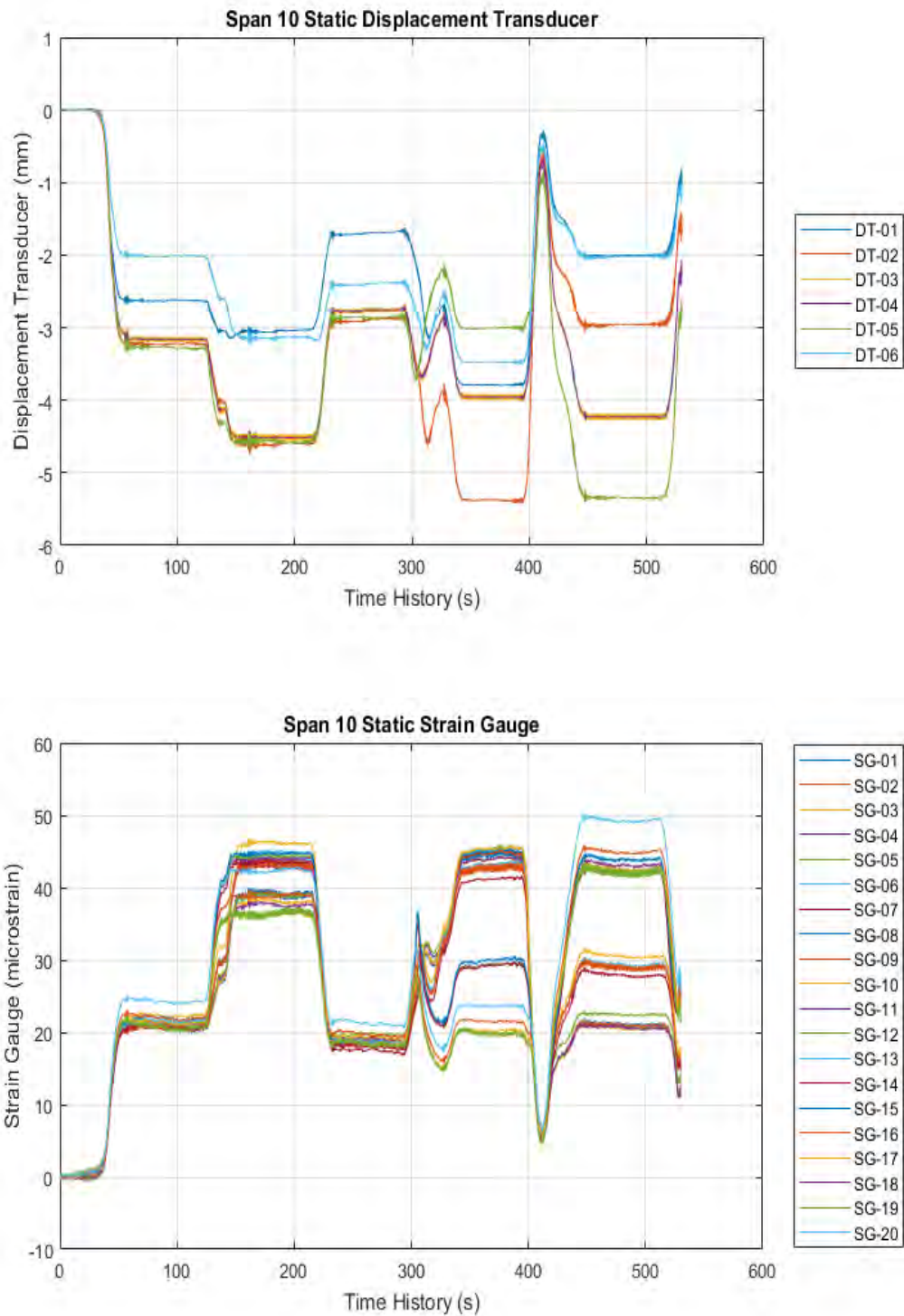


รูปที่ 5-17 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบสถิต Span 12

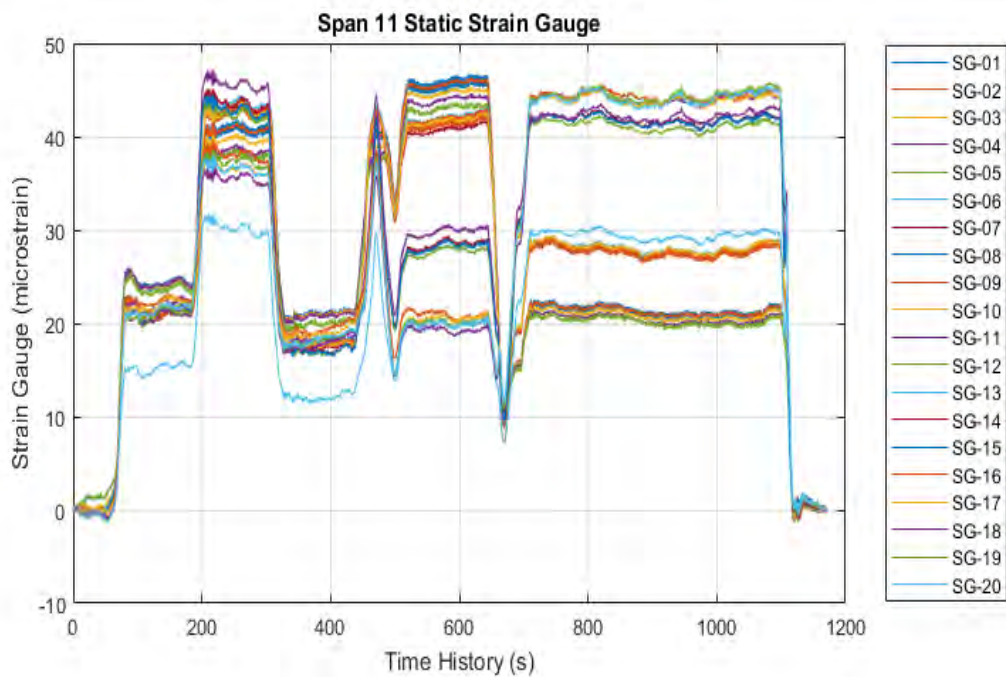
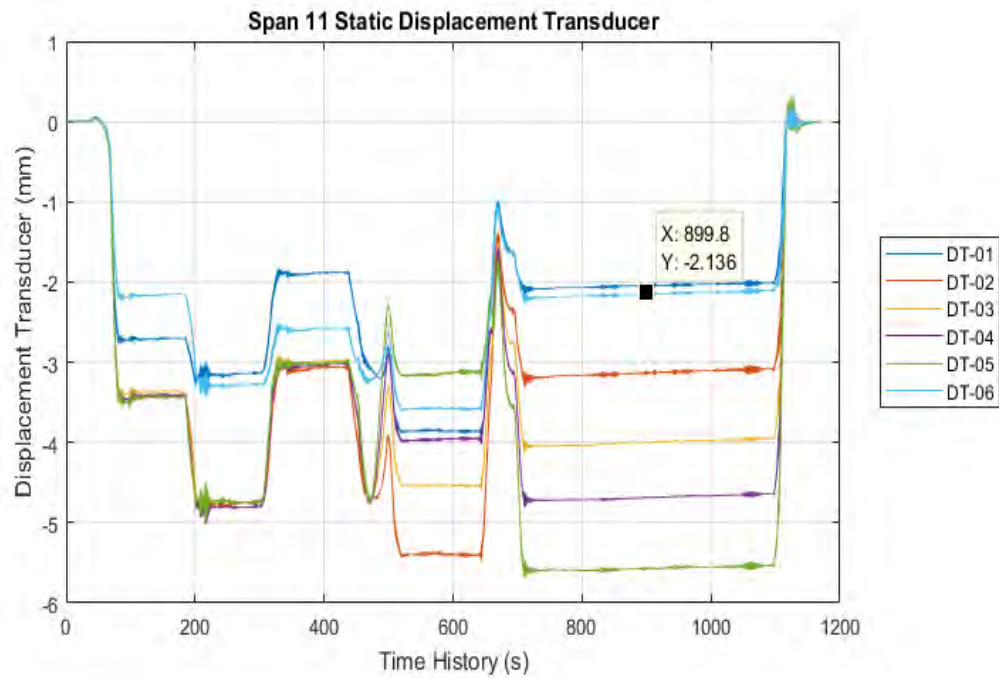


รูปที่ 5-18 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)



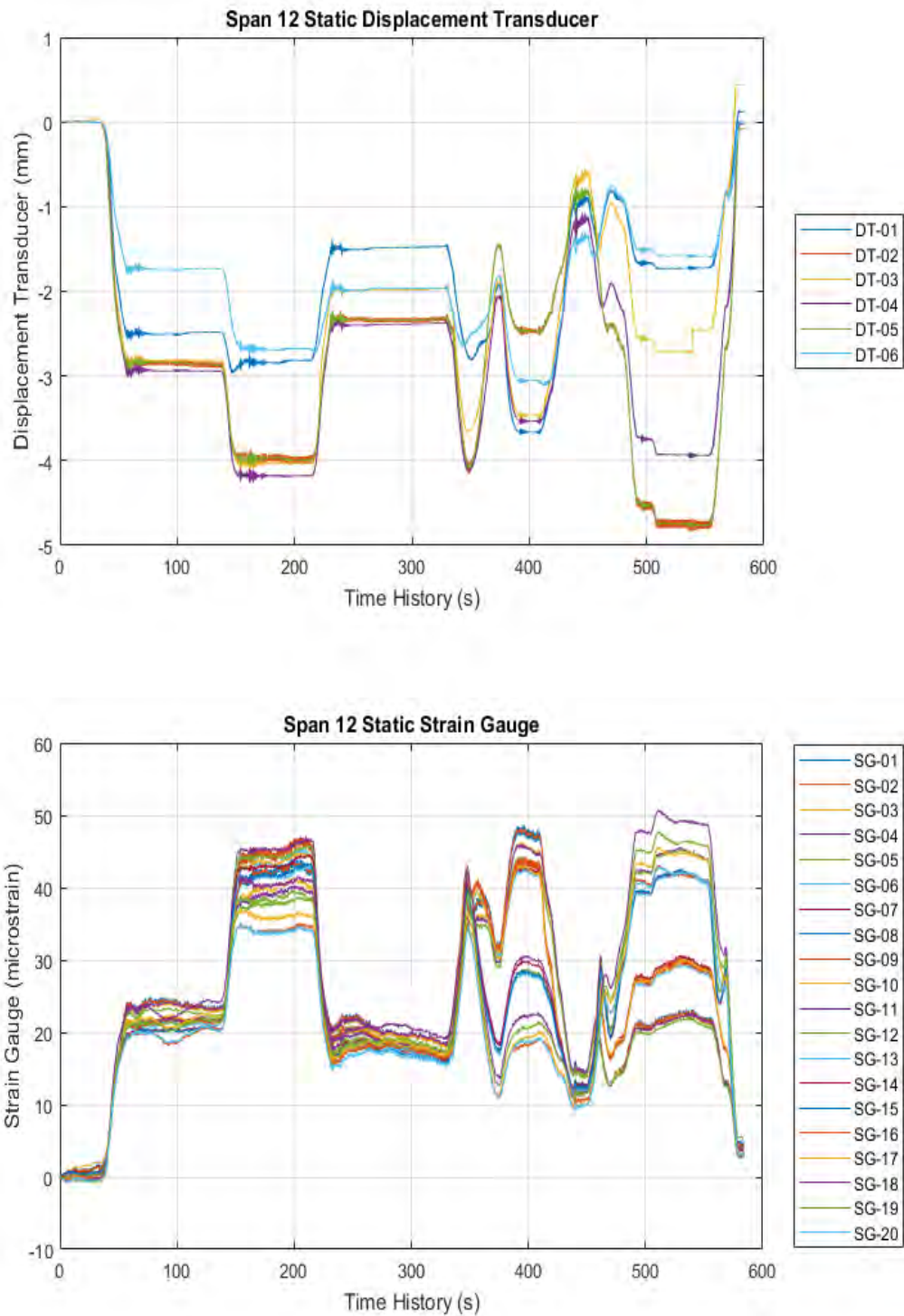


รูปที่ 5-19 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)



รูปที่ 5-20 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)





รูปที่ 5-21 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)

5.4.1. ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 5-3 ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิตช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)

Sensor	Static 1	Static 2	Static 3	Static 4	Static 5
DT-01	-2.257	-2.684	-1.481	-3.428	-1.717
DT-02	-2.724	-4.045	-2.471	-4.858	-2.371
DT-03	-2.795	-4.205	-2.525	-4.340	-3.246
DT-04	-2.822	-4.163	-2.525	-4.340	-3.278
DT-05	-2.682	-3.990	-2.465	-2.541	-4.838
DT-06	-1.497	-2.499	-1.973	-2.662	-1.573
SG-01	19.274	34.264	15.514	38.584	18.508
SG-02	19.274	34.264	15.514	38.584	18.684
SG-03	19.226	33.286	15.346	37.356	17.516
SG-04	19.276	32.266	15.666	37.366	17.826
SG-05	20.050	35.150	16.500	39.920	18.860
SG-06	19.350	41.670	16.500	40.190	26.780
SG-07	18.123	39.113	15.313	37.323	25.593
SG-08	18.660	40.320	16.080	38.950	25.890
SG-09	18.673	40.723	15.944	39.340	25.656
SG-10	19.435	41.165	16.595	40.375	27.245
SG-11	18.389	40.618	16.491	24.018	41.559
SG-12	18.228	41.028	16.348	24.028	41.168
SG-13	18.330	40.720	16.360	24.030	40.770
SG-14	18.486	41.926	16.336	24.076	41.156
SG-15	18.112	40.312	15.942	23.502	40.392
SG-16	18.845	36.315	21.225	23.035	42.955
SG-17	20.167	37.087	22.107	23.477	46.787
SG-18	18.034	34.644	18.284	18.034	39.664
SG-19	18.159	34.298	18.257	18.159	40.006
SG-20	19.387	36.857	20.857	18.857	43.787



ตารางที่ 5-4 ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิตช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)

Sensor	Static 1	Static 2	Static 3	Static 4	Static 5
DT-01	-2.620	-3.030	-1.697	-3.789	-2.005
DT-02	-3.214	-4.586	-2.891	-5.382	-2.956
DT-03	-3.160	-4.470	-2.787	-3.917	-4.271
DT-04	-3.160	-4.515	-2.759	-3.957	-4.229
DT-05	-3.276	-4.571	-2.853	-3.011	-5.346
DT-06	-2.011	-3.126	-2.394	-3.477	-2.018
SG-01	20.655	38.498	19.039	45.158	20.638
SG-02	20.450	38.890	18.850	44.710	20.850
SG-03	20.491	37.971	18.661	43.811	20.581
SG-04	20.969	37.509	19.269	43.819	20.549
SG-05	21.284	38.774	19.874	45.464	22.414
SG-06	20.971	43.901	18.681	43.221	29.121
SG-07	20.300	42.660	17.340	41.060	27.820
SG-08	20.569	43.279	18.279	42.519	28.649
SG-09	20.567	42.842	18.092	42.090	28.358
SG-10	22.165	46.145	19.215	45.225	30.265
SG-11	21.113	44.103	18.303	29.323	42.683
SG-12	21.459	44.329	18.379	29.249	43.629
SG-13	21.609	44.869	18.669	29.799	43.689
SG-14	20.725	43.425	17.975	29.065	41.535
SG-15	21.764	44.784	18.584	29.914	43.604
SG-16	21.798	39.058	19.618	21.338	44.638
SG-17	21.211	36.381	18.461	20.091	42.201
SG-18	20.493	36.703	18.333	19.613	41.633
SG-19	20.288	36.703	18.517	19.613	41.633
SG-20	24.142	42.592	21.232	23.442	48.902

ตารางที่ 5-5 ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิตช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)

Sensor	Static 1	Static 2	Static 3	Static 4	Static 5
DT-01	-2.722	-3.150	-1.880	-3.865	-2.045
DT-02	-3.449	-4.771	-3.059	-5.401	-3.133
DT-03	-3.364	-4.744	-2.985	-4.535	-3.997
DT-04	-3.404	-4.814	-3.041	-3.958	-4.680
DT-05	-3.424	-4.759	-3.014	-3.133	-5.563
DT-06	-2.170	-3.288	-2.570	-3.581	-2.150
SG-01	24.121	40.689	20.954	46.418	20.842
SG-02	24.121	41.085	20.954	45.959	20.842
SG-03	24.050	39.967	20.958	44.982	20.468
SG-04	24.074	38.681	20.831	44.260	19.984
SG-05	23.651	38.223	20.015	43.488	19.842
SG-06	21.517	44.283	18.040	42.200	27.555
SG-07	20.847	43.141	17.421	40.679	27.035
SG-08	21.135	43.588	17.647	41.672	27.274
SG-09	21.130	43.584	17.827	41.669	26.977
SG-10	21.584	43.596	17.624	41.734	27.418
SG-11	22.338	46.110	18.312	29.879	43.761
SG-12	21.242	42.867	16.827	27.849	40.712
SG-13	15.600	30.612	11.995	20.123	28.971
SG-14	21.501	44.185	16.957	28.467	41.541
SG-15	21.583	43.408	16.633	28.395	41.474
SG-16	22.716	38.515	19.682	20.374	44.067
SG-17	22.502	37.092	19.138	20.385	43.735
SG-18	21.427	36.040	18.325	18.937	41.850
SG-19	21.749	37.836	18.604	19.824	43.911
SG-20	21.987	37.029	18.723	19.634	43.494

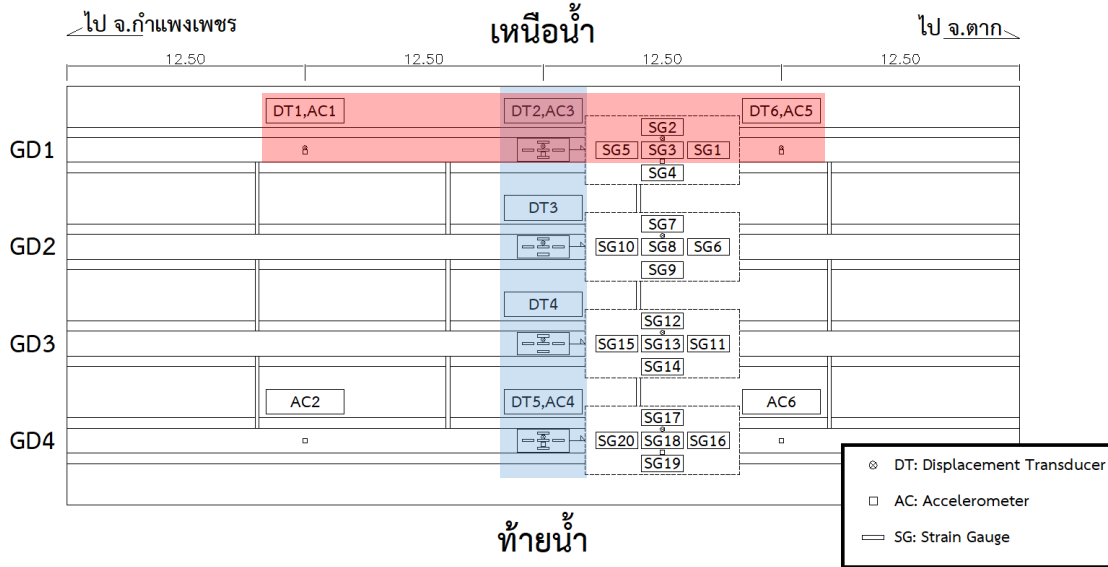


ตารางที่ 5-6 ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิตช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)

Sensor	Static 1	Static 2	Static 3	Static 4	Static 5
DT-01	-2.513	-2.813	-1.477	-3.661	-1.726
DT-02	-2.875	-3.995	-2.340	-4.698	-2.490
DT-03	-2.820	-4.024	-1.978	-3.469	-2.716
DT-04	-2.943	-4.179	-2.387	-3.533	-3.930
DT-05	-2.847	-3.995	-2.340	-2.466	-4.746
DT-06	-1.747	-2.674	-1.964	-3.056	-1.582
SG-01	24.371	42.801	19.856	47.167	22.456
SG-02	24.133	43.233	19.663	47.643	22.683
SG-03	23.712	41.142	19.432	45.702	22.302
SG-04	23.813	40.163	19.743	45.513	22.213
SG-05	22.969	39.309	18.549	43.939	21.919
SG-06	21.141	44.741	17.711	42.381	29.201
SG-07	21.562	46.442	17.712	42.812	30.622
SG-08	21.601	45.871	17.691	43.621	30.001
SG-09	21.601	45.871	17.510	43.621	30.305
SG-10	22.065	44.595	17.935	42.695	29.925
SG-11	21.707	45.927	18.407	30.307	45.437
SG-12	21.060	44.920	17.700	28.500	45.170
SG-13	20.293	42.143	16.533	27.803	42.053
SG-14	20.279	43.799	17.359	29.559	42.239
SG-15	20.178	42.658	16.908	28.158	42.388
SG-16	18.509	34.389	17.639	18.039	41.789
SG-17	20.825	36.045	18.445	19.235	44.625
SG-18	22.247	40.757	20.537	22.077	49.167
SG-19	20.341	38.211	18.841	20.541	46.191
SG-20	18.750	34.000	17.380	18.590	41.900

5.4.2. สรุปการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต

แนวการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิตจะมี 2 แนวได้แก่แนวขวางสะพาน (Transverse) และแนวยาว (Longitudinal) ดังรูปที่ 5-22

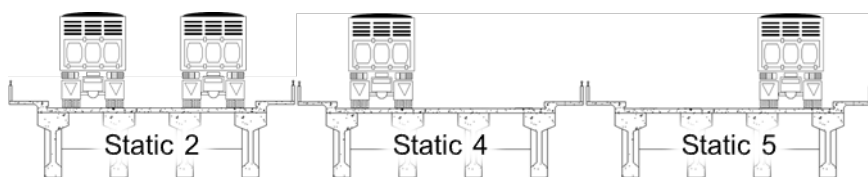
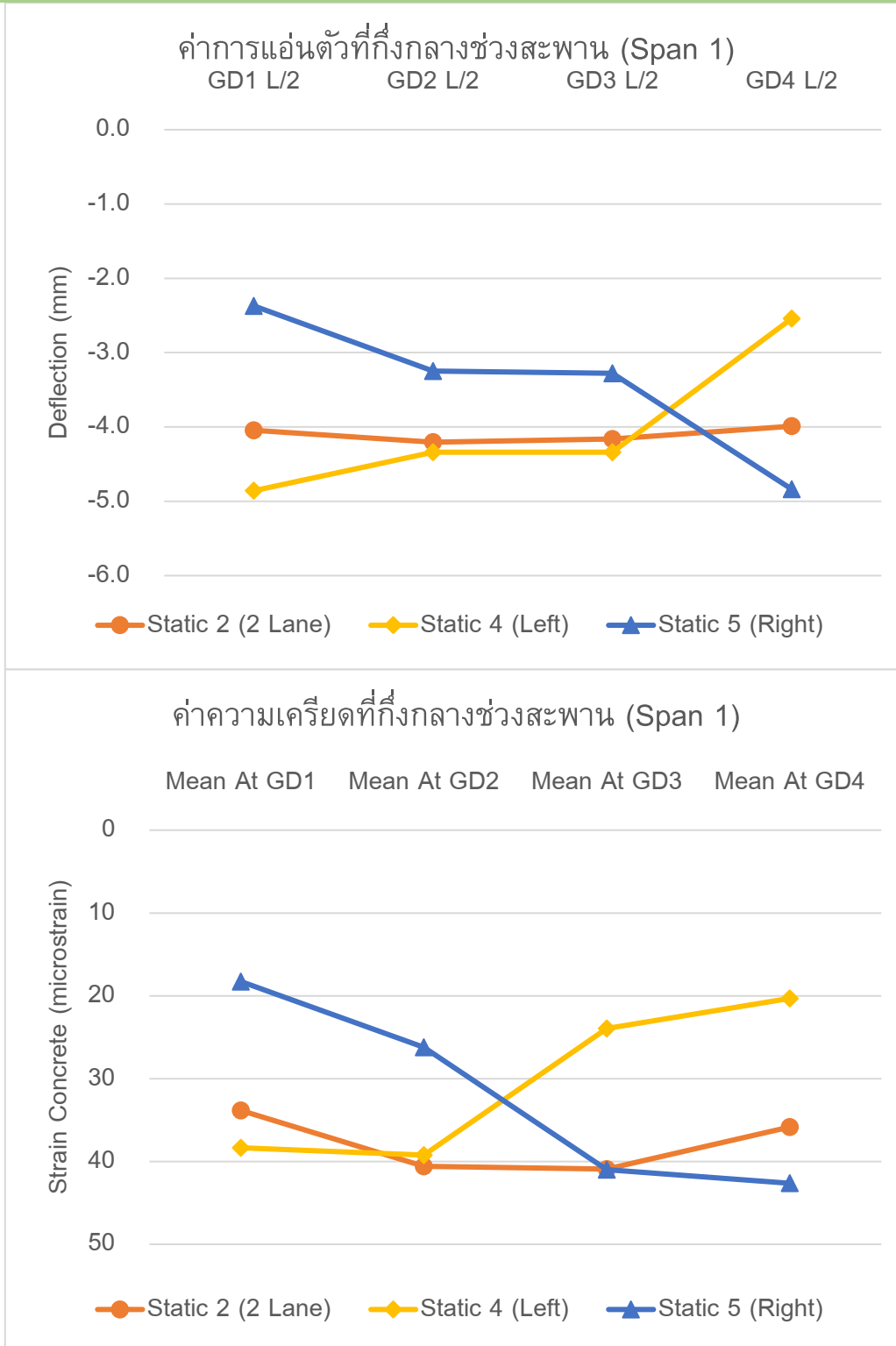


รูปที่ 5-22 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

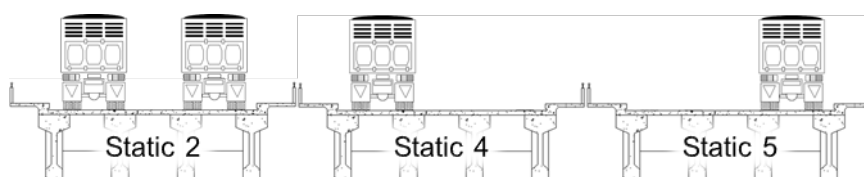
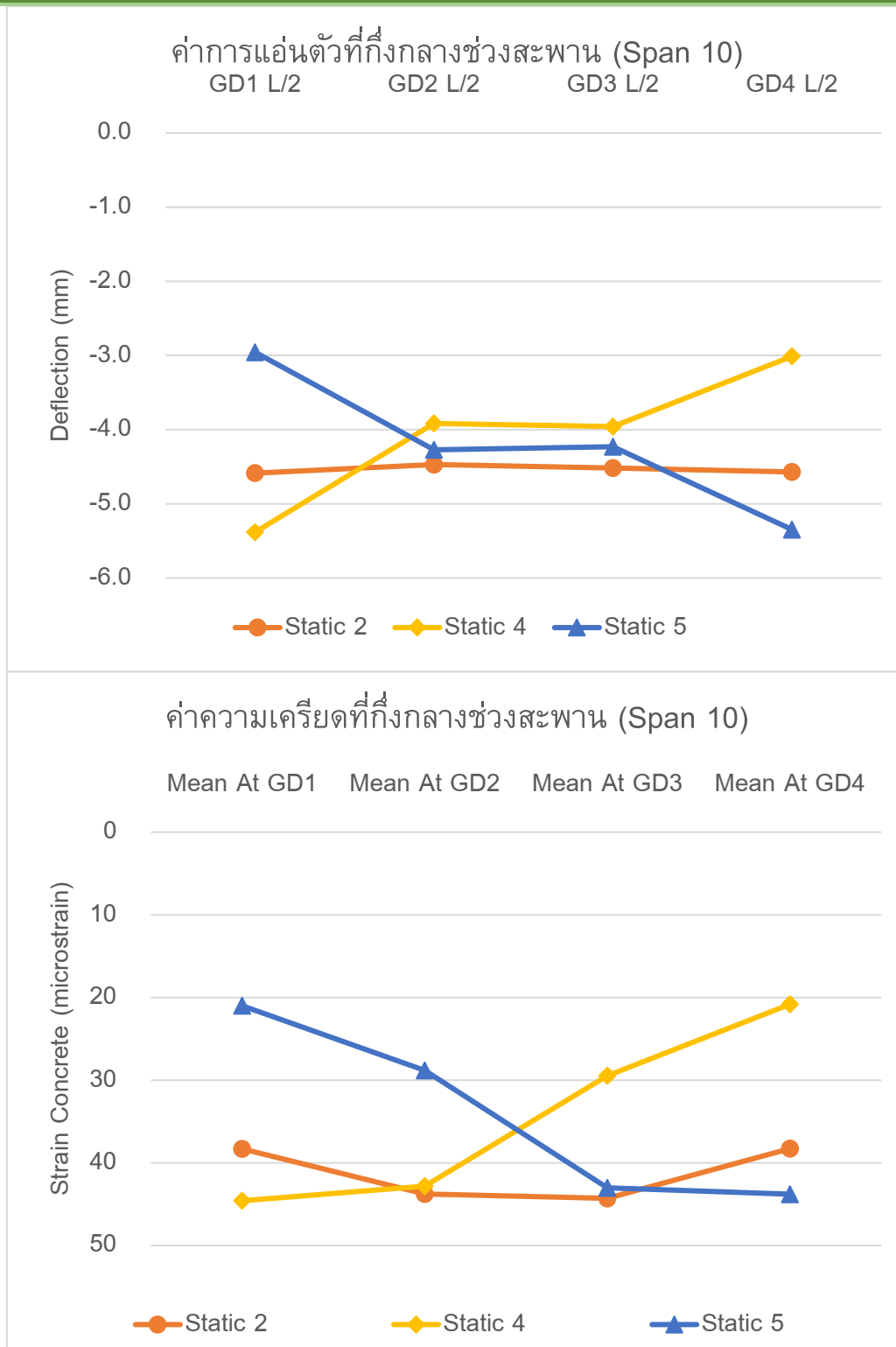
แนวการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแนวขวางสะพาน แสดงให้เห็นการกระจายแรงน้ำหนักบรรทุกที่เข้าคานหลักแต่ละคาน โดยอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งบริเวณกึ่งกลางคานหลัก ที่ซึ่งมีการแอ่นตัวมากที่สุด โดยใช้รูปแบบทดสอบที่จอตระกึ่งกลางสะพานได้แก่ **Static 2** (จอต 2 คันทั้ง 2 ช่องการจราจร) **Static 4** (จอต 2 คันทั้งซ้ายการจราจร) และ **Static 5** (จอต 2 คันทั้งขวาการจราจร) ในการประเมินได้ผลดังกราฟในรูปที่ 5-23 ถึงรูปที่ 5-26 จากกราฟผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวสอดคล้องกับตำแหน่งรถบรรทุกที่กระทำ หากรถบรรทุกจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านขวา หากรถบรรทุกจอดด้านขวา คานด้านขวาจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านซ้าย

แนวการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแนวตามยาวสะพานจะแสดงให้เห็นพฤติกรรมของคานตามยาวของคาน โดยใช้การทดสอบ **Static 1** (จอต 2 คันทั้ง 2 ช่องการจราจรที่ L/4) **Static 2** (จอต 2 คันทั้ง 2 ช่องการจราจรที่ L/2) และ **Static 3** (จอต 2 คันทั้ง 2 ช่องการจราจรที่ L3/4) ในการประเมินดังกราฟในรูปที่ 5-27 ถึงรูปที่ 5-30 จากกราฟผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวสอดคล้องกับตำแหน่งรถบรรทุกที่กระทำ หากรถบรรทุกจอดกึ่งกลาง (**Static 2**) จะเกิดการแอ่นตัวมากที่สุด หากรถบรรทุกจอดที่ L/4 (**Static 1**) คานจะแอ่นตัวน้อยกว่าจอตกึ่งกลาง (**Static 2**) และแอ่นมากกว่ากรณีรถบรรทุกจอดที่ L3/4 เนื่องจากตำแหน่งล้อหน้าของรถบรรทุกจะใกล้กึ่งกลางสะพานมากกว่า



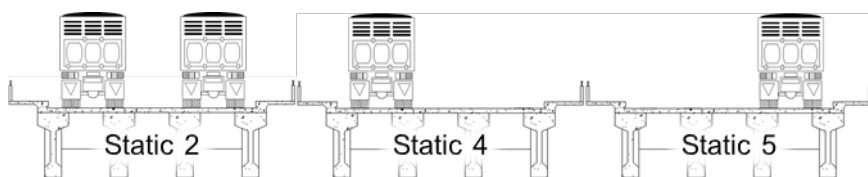
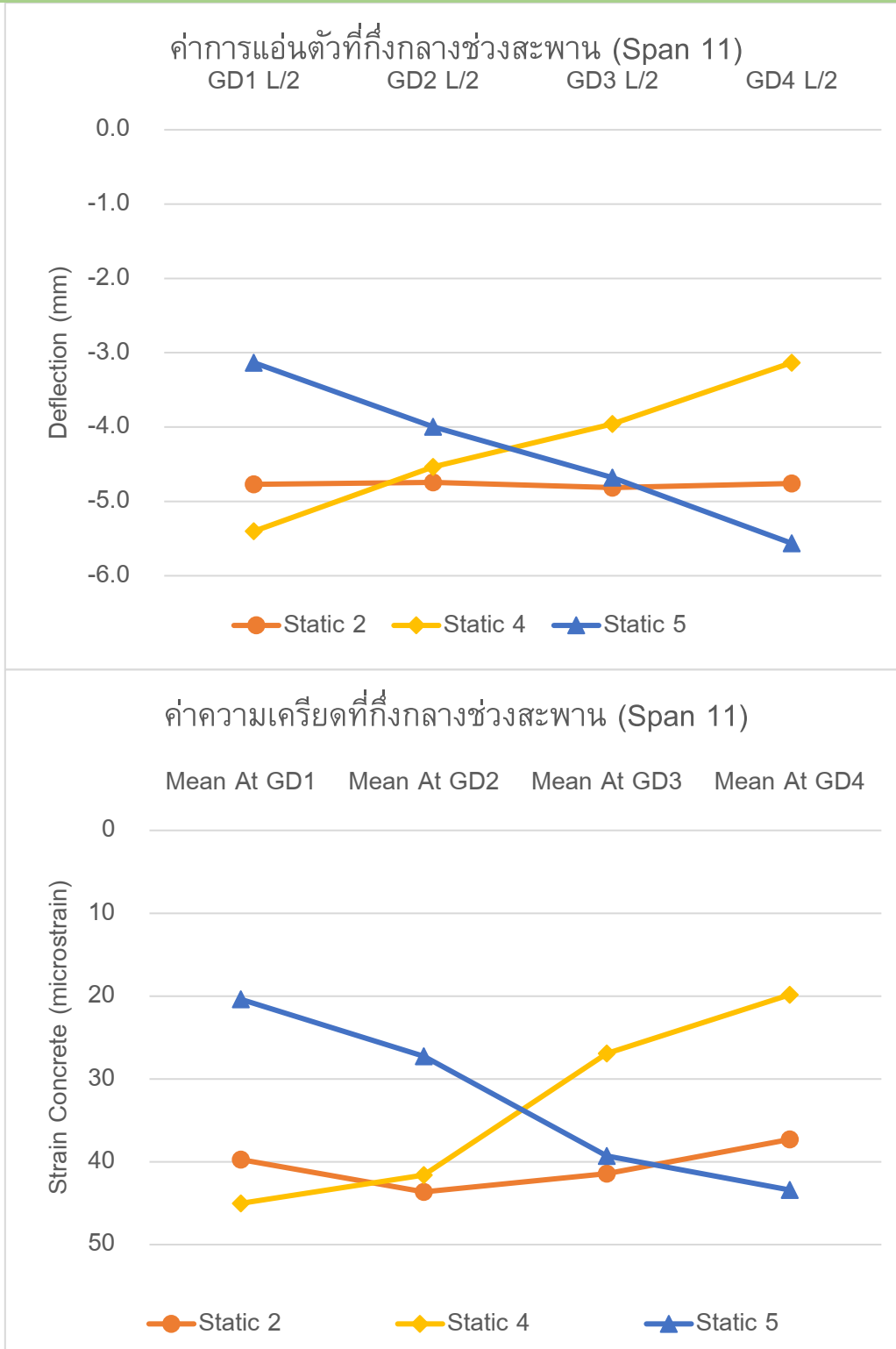


รูปที่ 5-23 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบริเวณคานหลักกึ่งกลาง GD1 (Span 1)

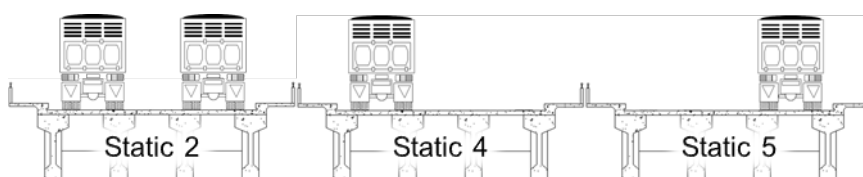
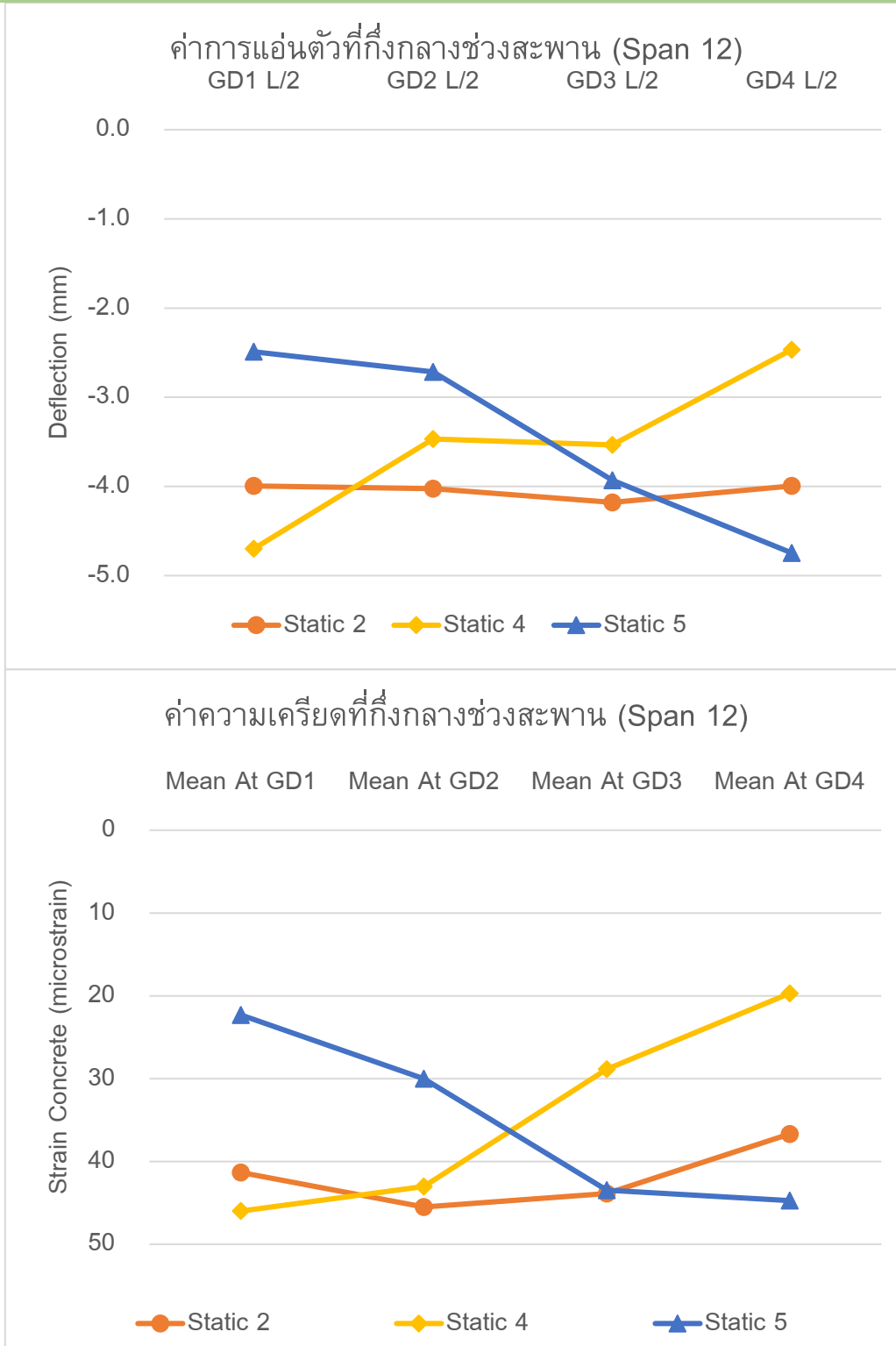


รูปที่ 5-24 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบริเวณคานหลักกึ่งกลาง GD1 (Span 10)



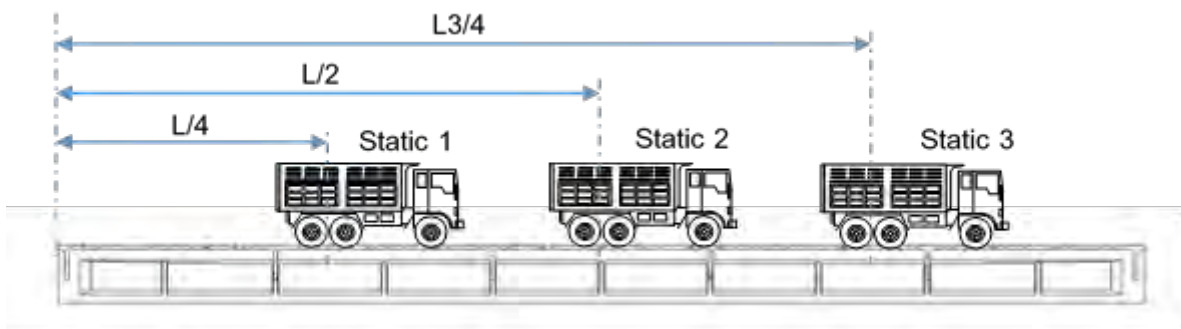
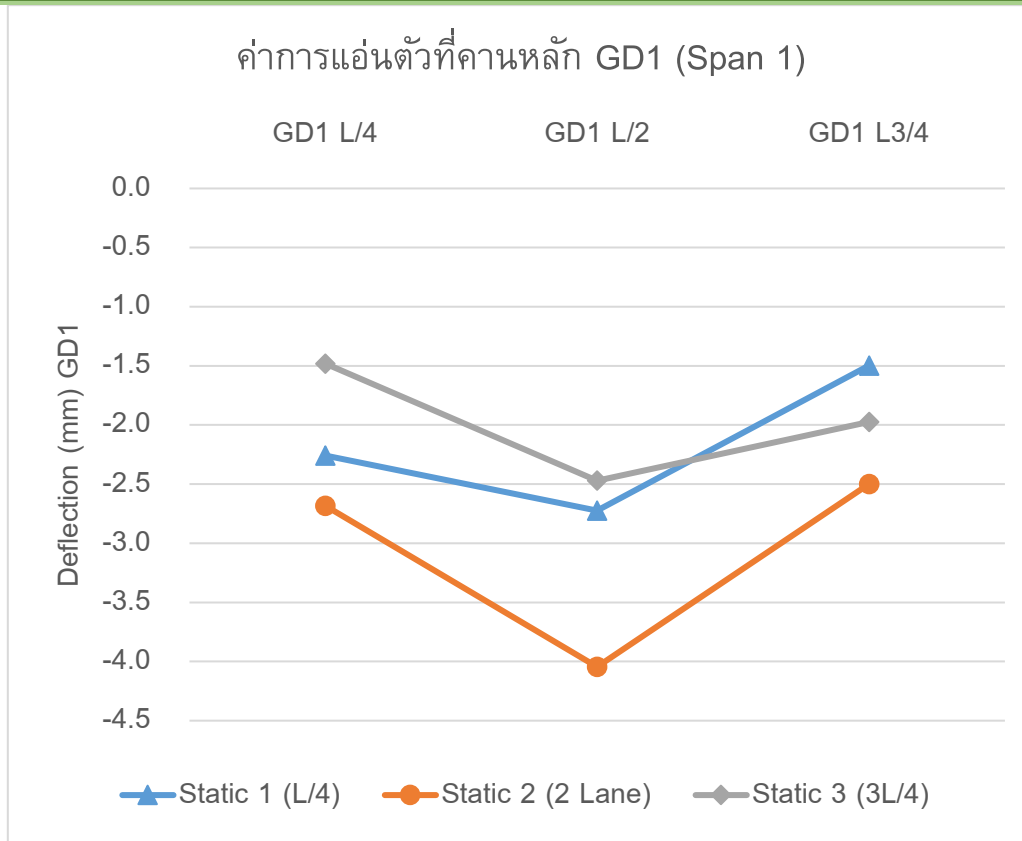


รูปที่ 5-25 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบริเวณคานหลักกึ่งกลาง GD1 (Span 11)

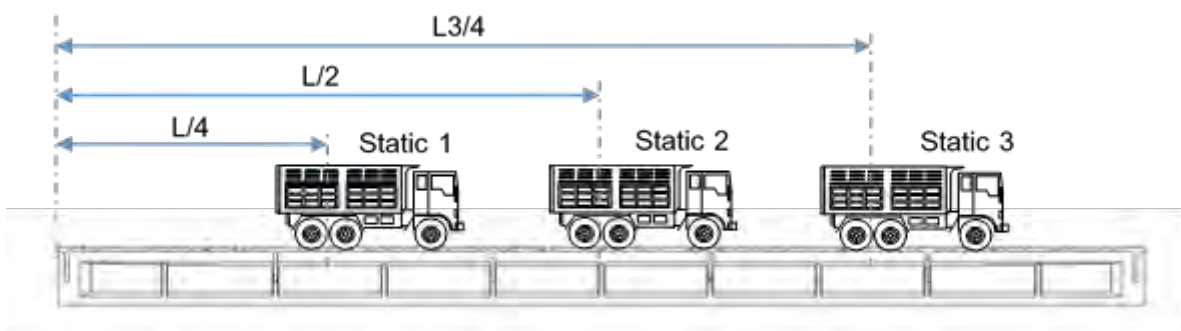
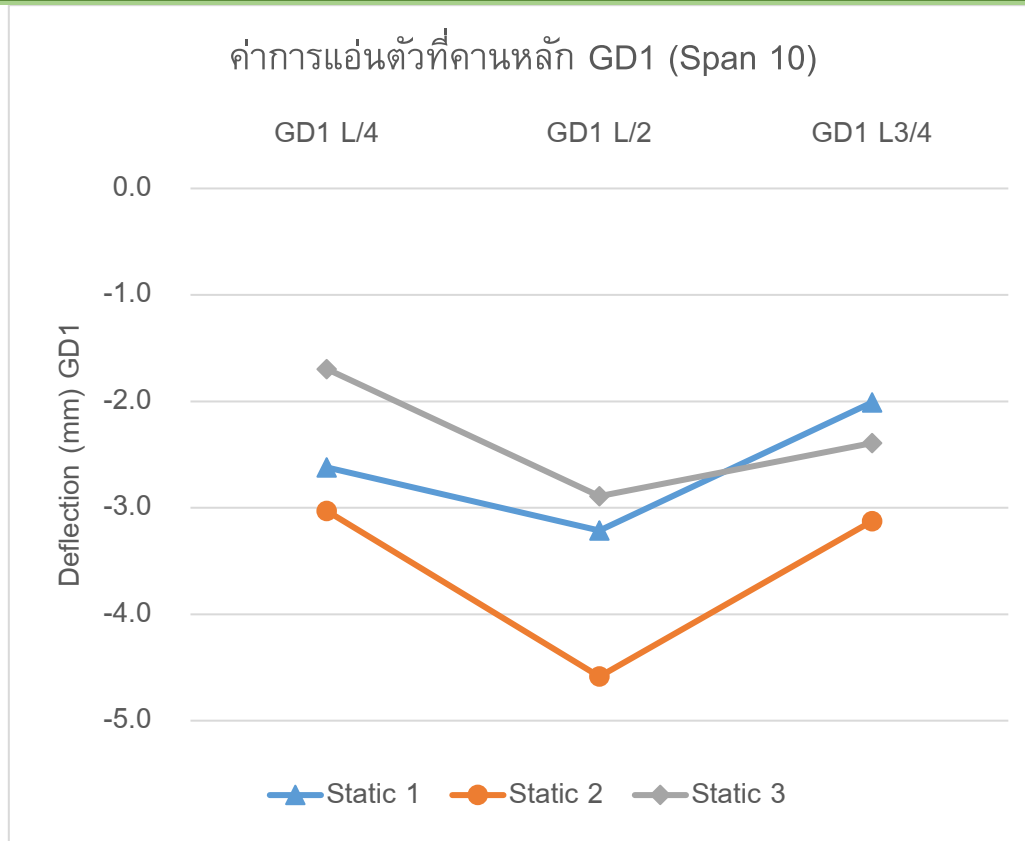


รูปที่ 5-26 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบริเวณคานหลักกึ่งกลาง GD1 (Span 12)



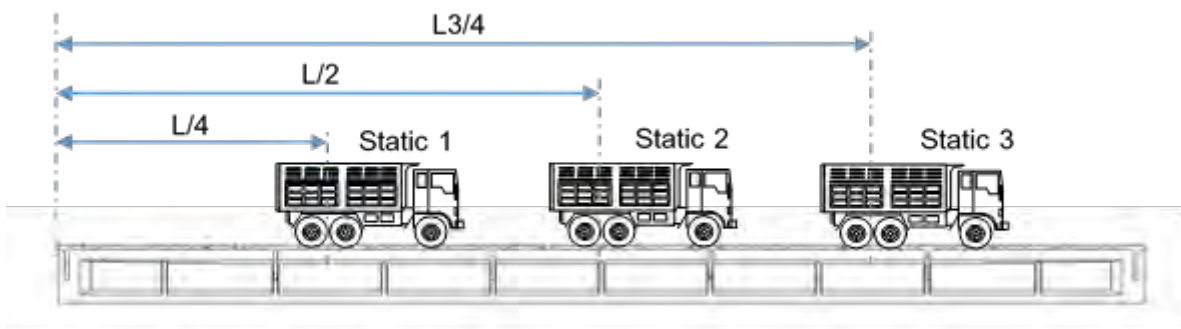
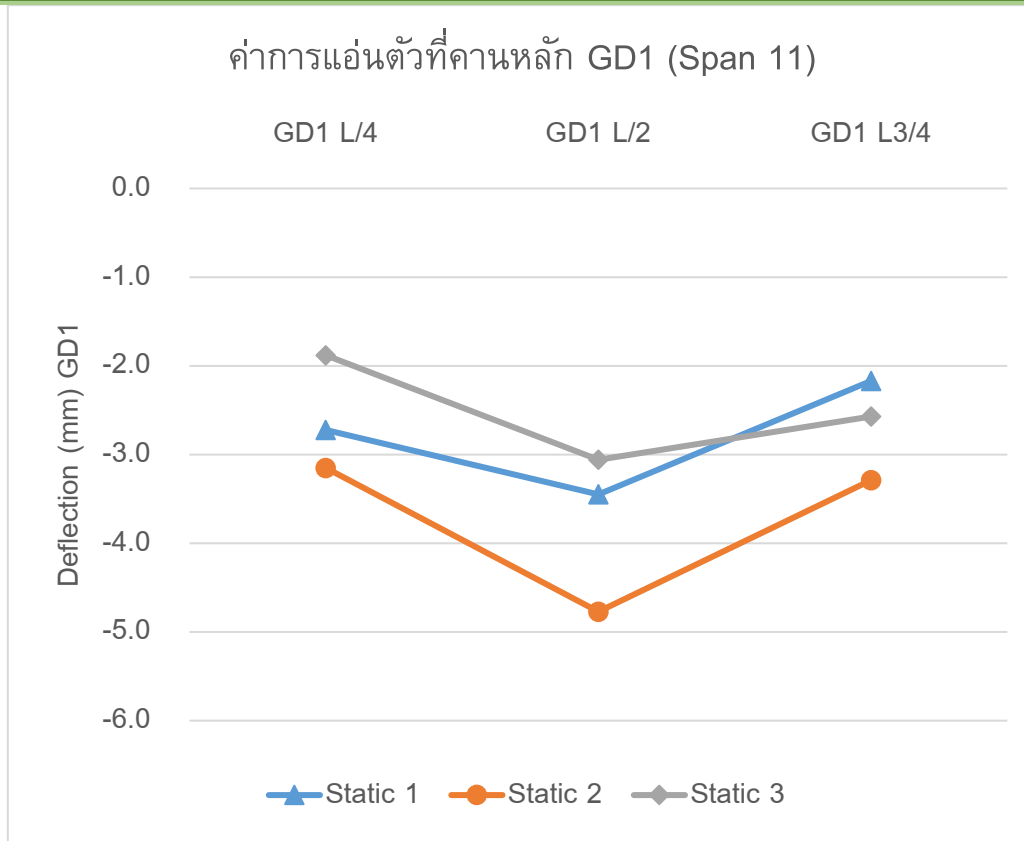


รูปที่ 5-27 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบรรทุกของบริเวณคานหลัก GD1 สะพาน (Span 1)

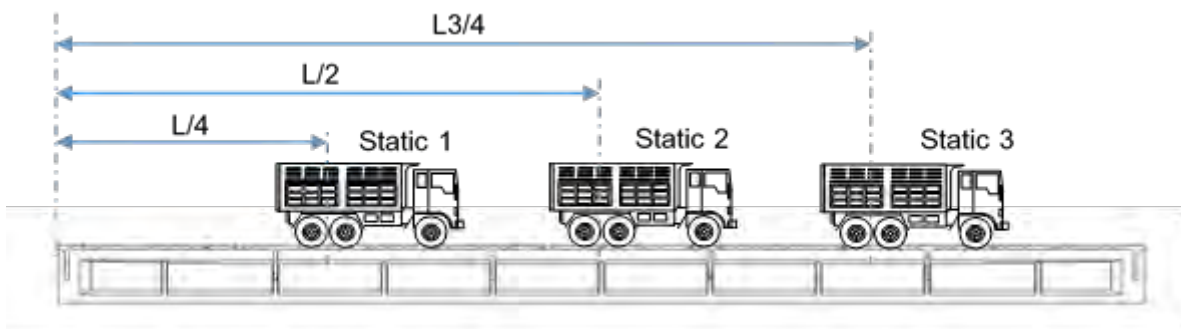
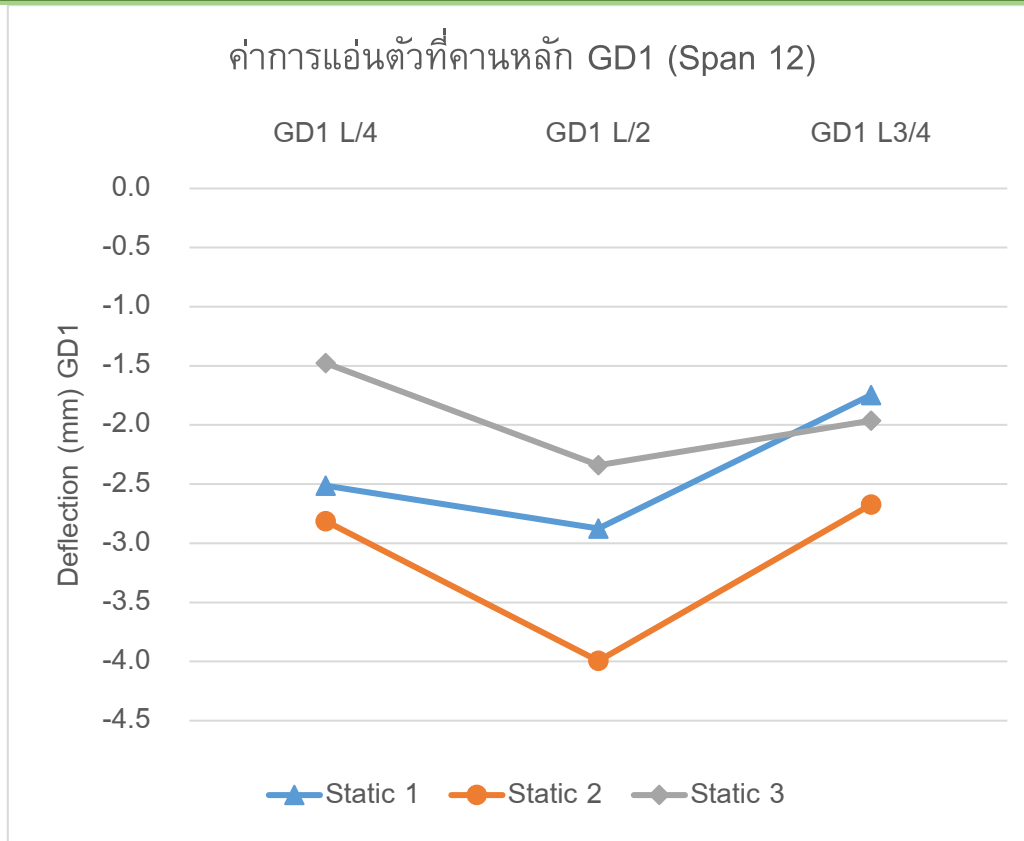


รูปที่ 5-28 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบรรทุกของบริเวณคานหลัก GD1 สะพาน (Span 10)





รูปที่ 5-29 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบรรทุกของบริเวณคานหลัก GD1 สะพาน (Span 11)



รูปที่ 5-30 พฤติกรรมสะพานรับน้ำหนักบรรทุกของบริเวณคานหลัก GD1 สะพาน (Span 12)



5.5 การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบพลวัต

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- Dynamic 1: ทดสอบด้วยรถบรรทุกทุกจำนวน 2 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. เท่ากัน ทั้ง 2 ช่องการจราจรหน้ารถเสมอกัน
- Dynamic 2: ทดสอบด้วยรถบรรทุกทุกจำนวน 2 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย
- Dynamic 3: ทดสอบด้วยรถบรรทุกทุกจำนวน 2 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา
- Dynamic 4: ทดสอบด้วยรถบรรทุกทุกจำนวน 2 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



รูปที่ 5-31 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต Span 1

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 5-32 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต Span 10



รูปที่ 5-33 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต Span 11

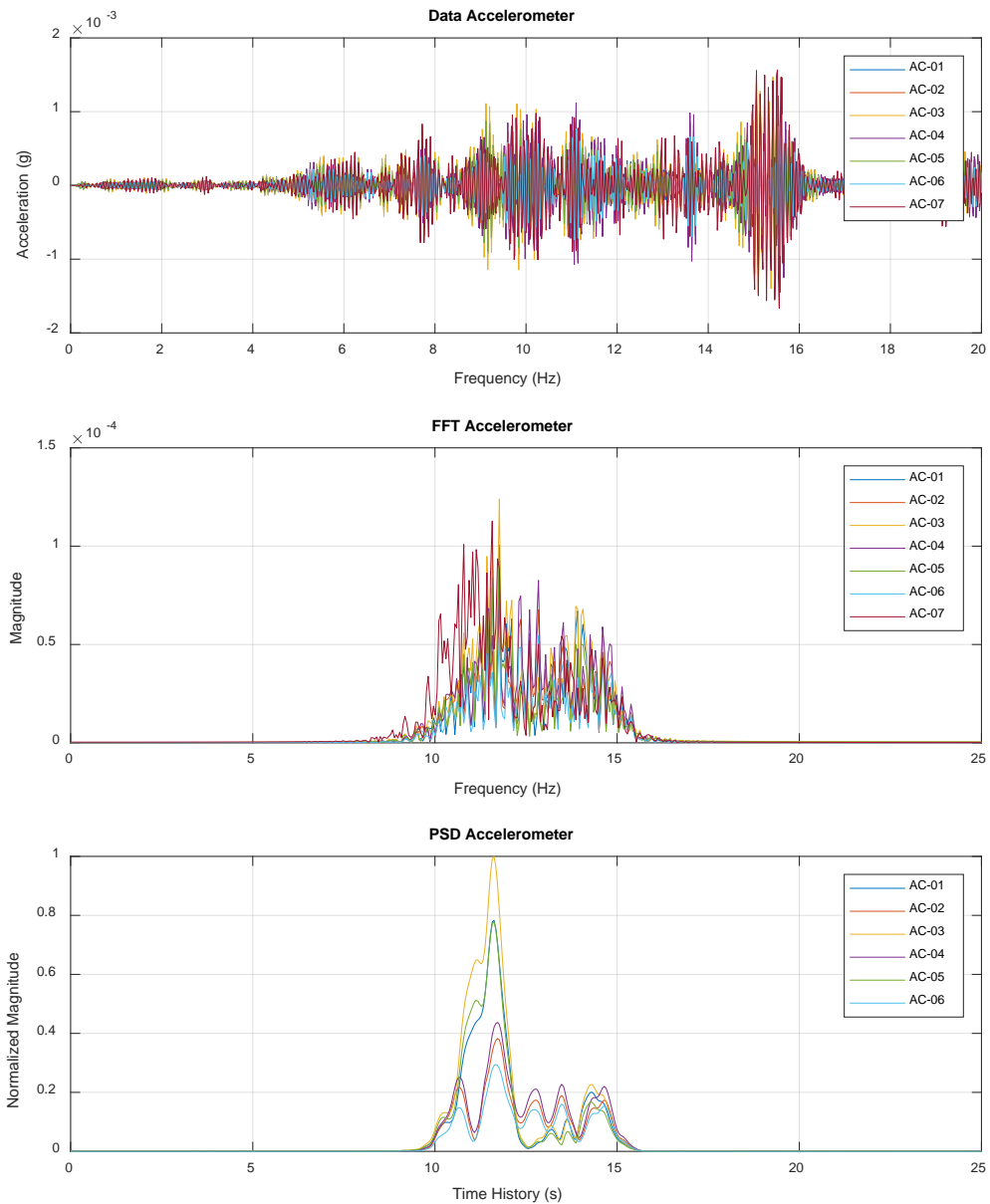




รูปที่ 5-34 การปฏิบัติงานตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต Span 12

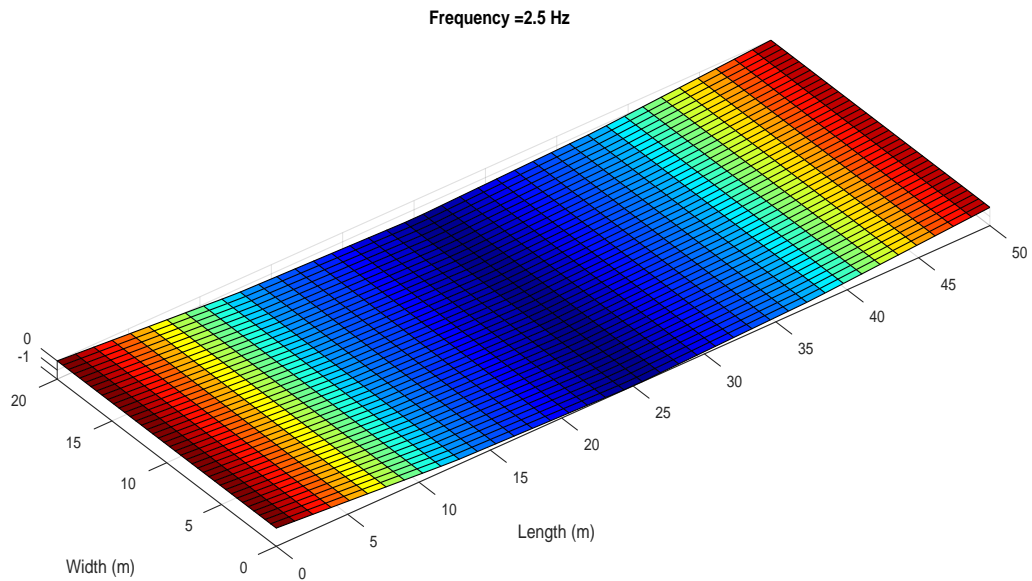
5.5.1. ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบพลวัต

สำหรับการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัตเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ประกอบด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ค่าความหน่วง (Damping Ratio) และค่าตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

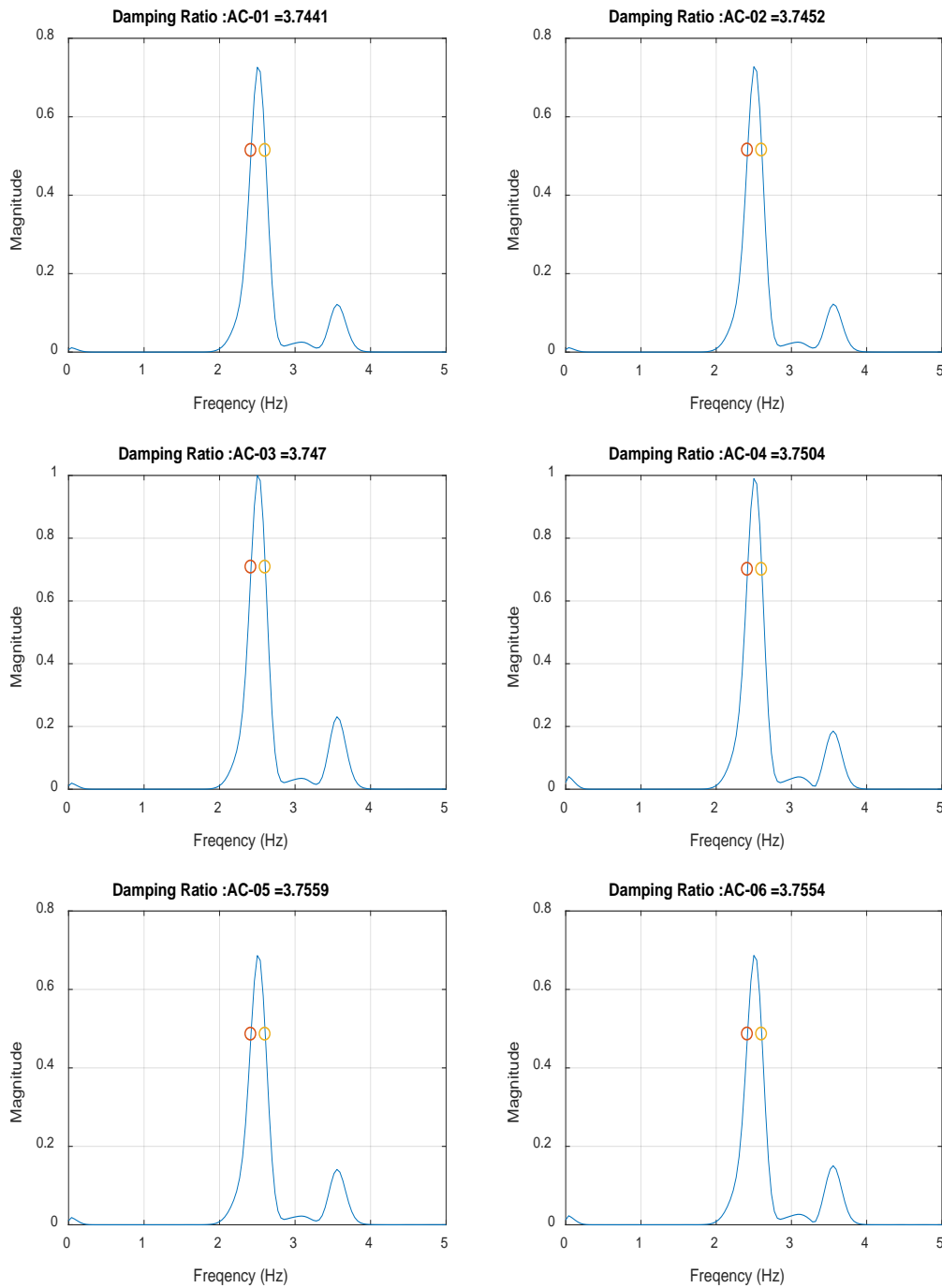


รูปที่ 5-35 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



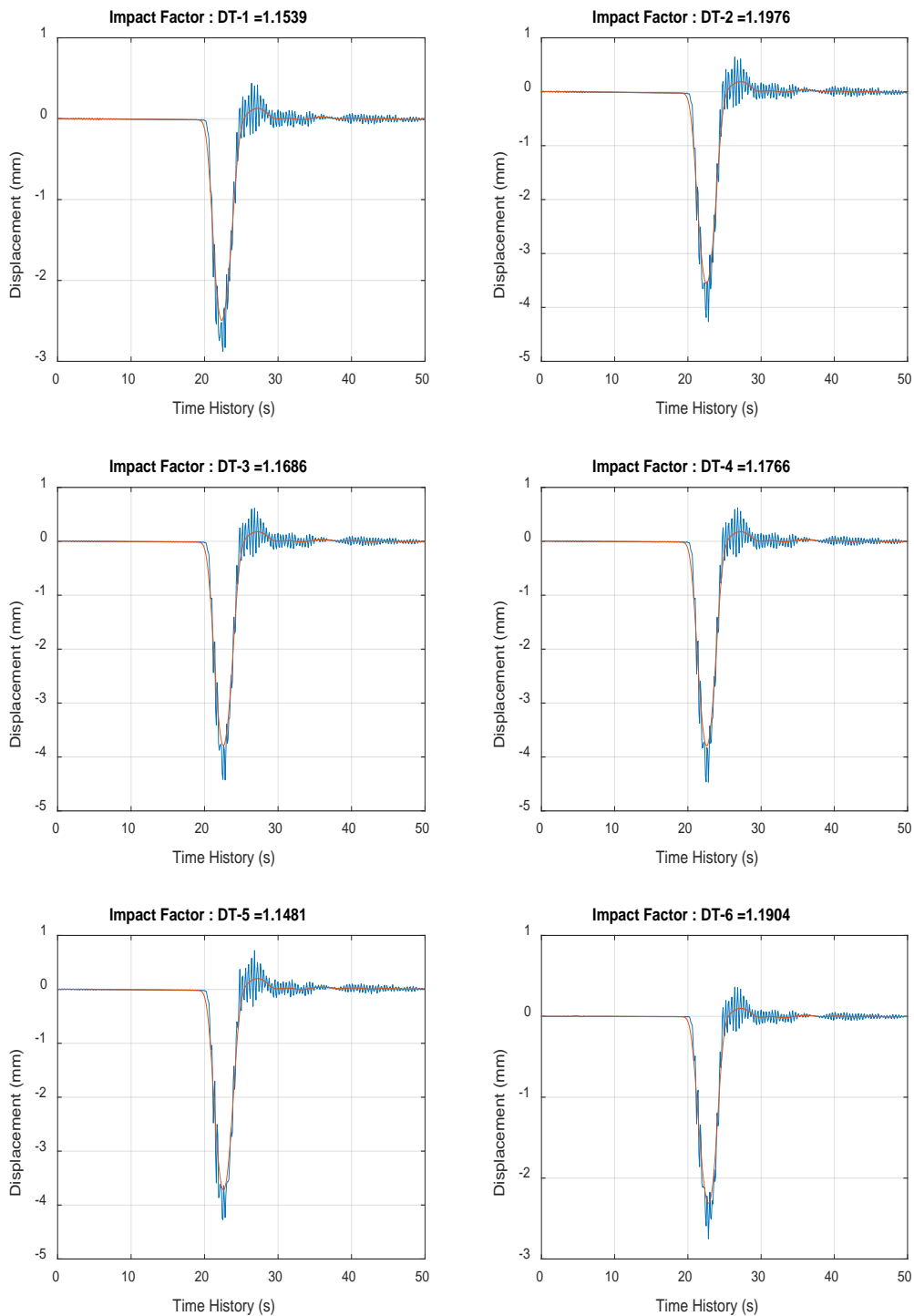


รูปที่ 5-36 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน

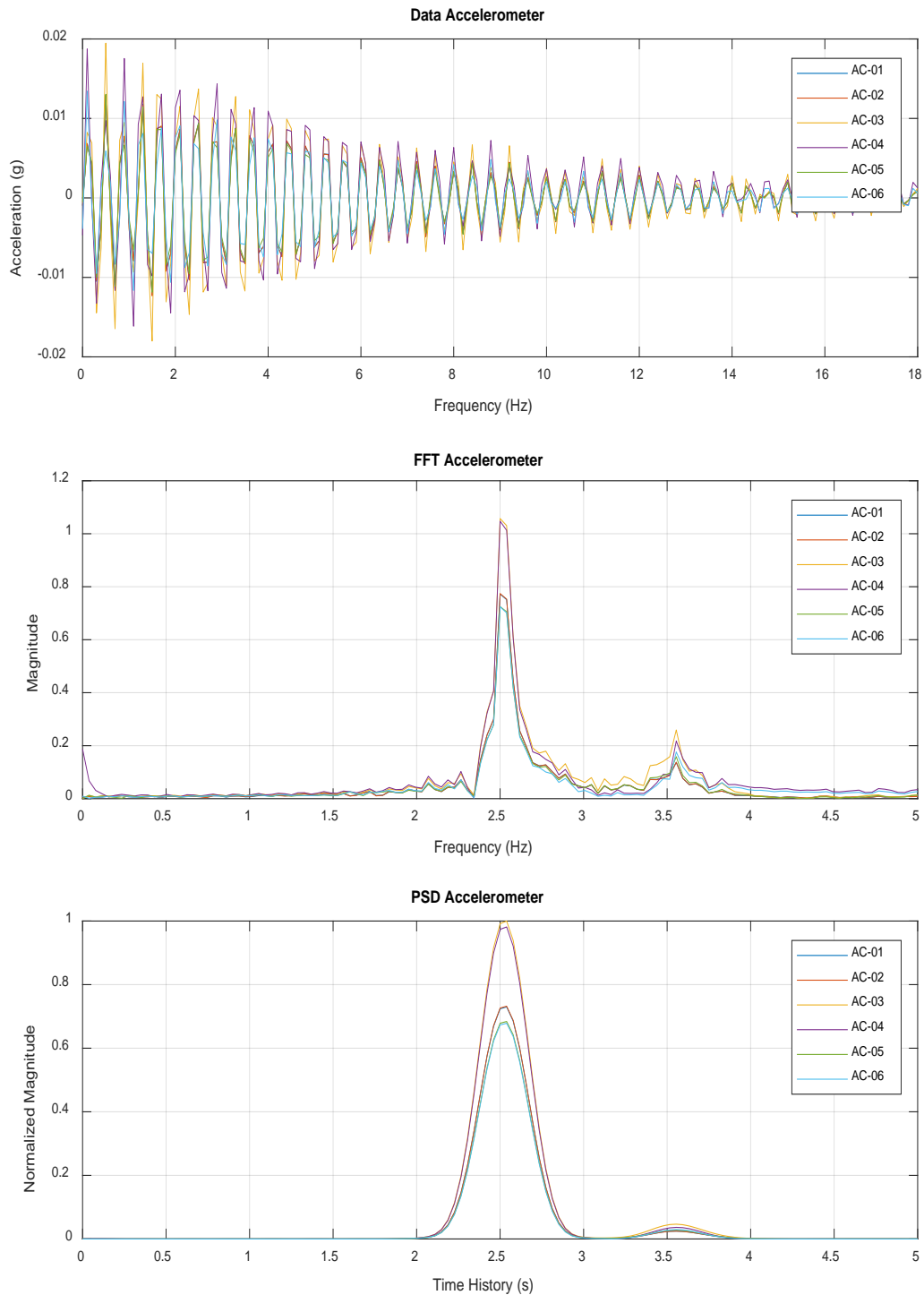


รูปที่ 5-37 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



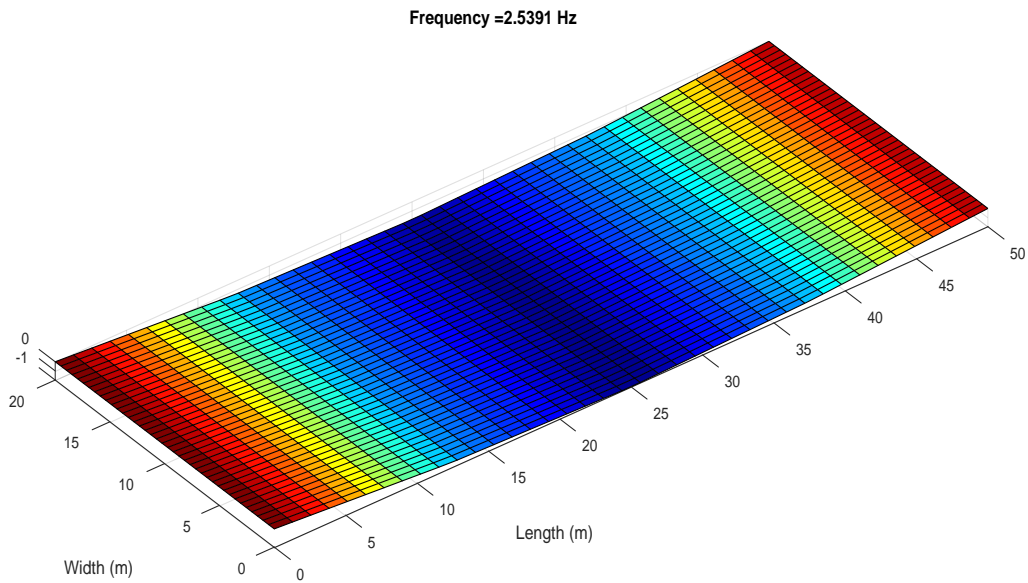


รูปที่ 5-38 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน

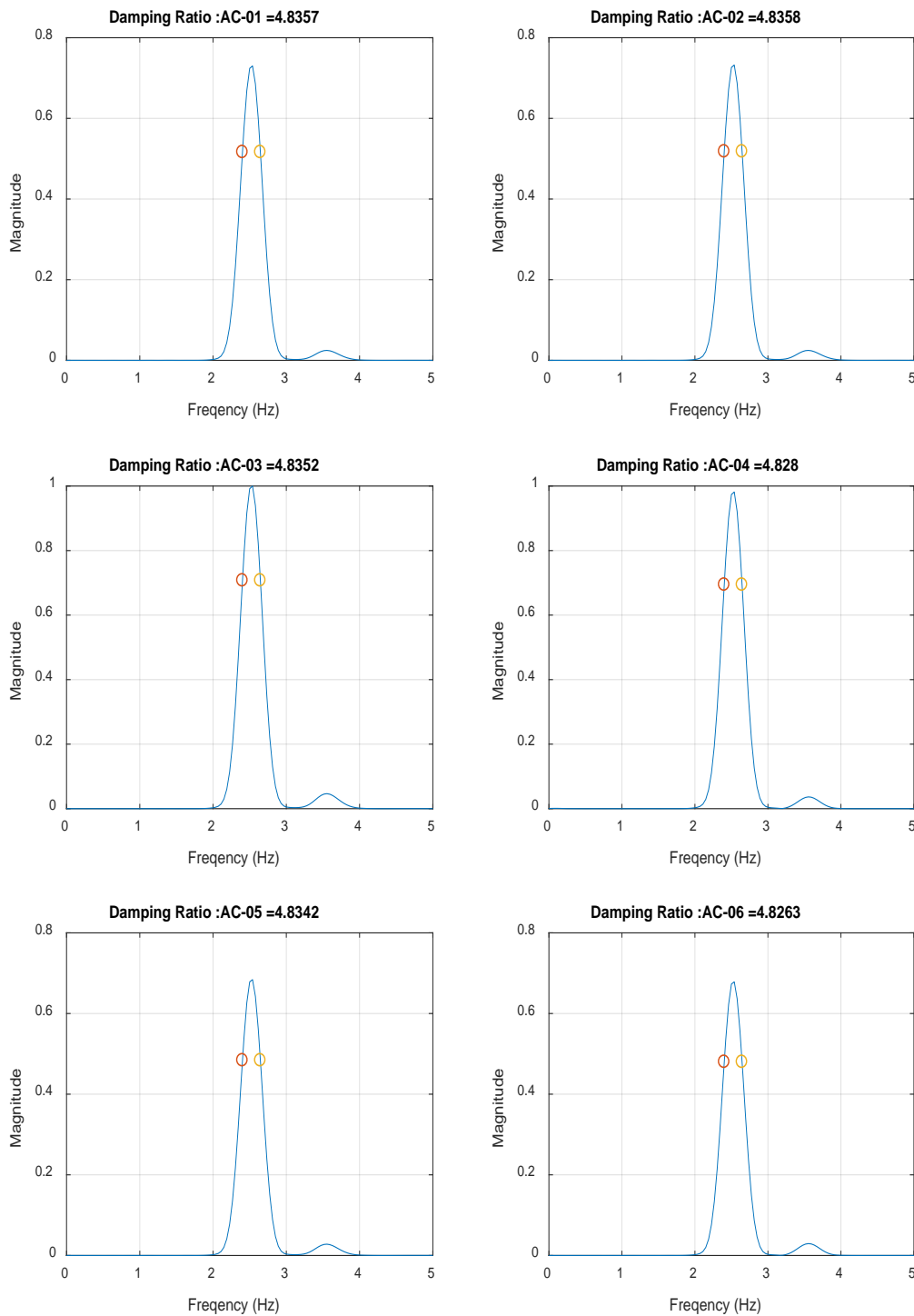


รูปที่ 5-39 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



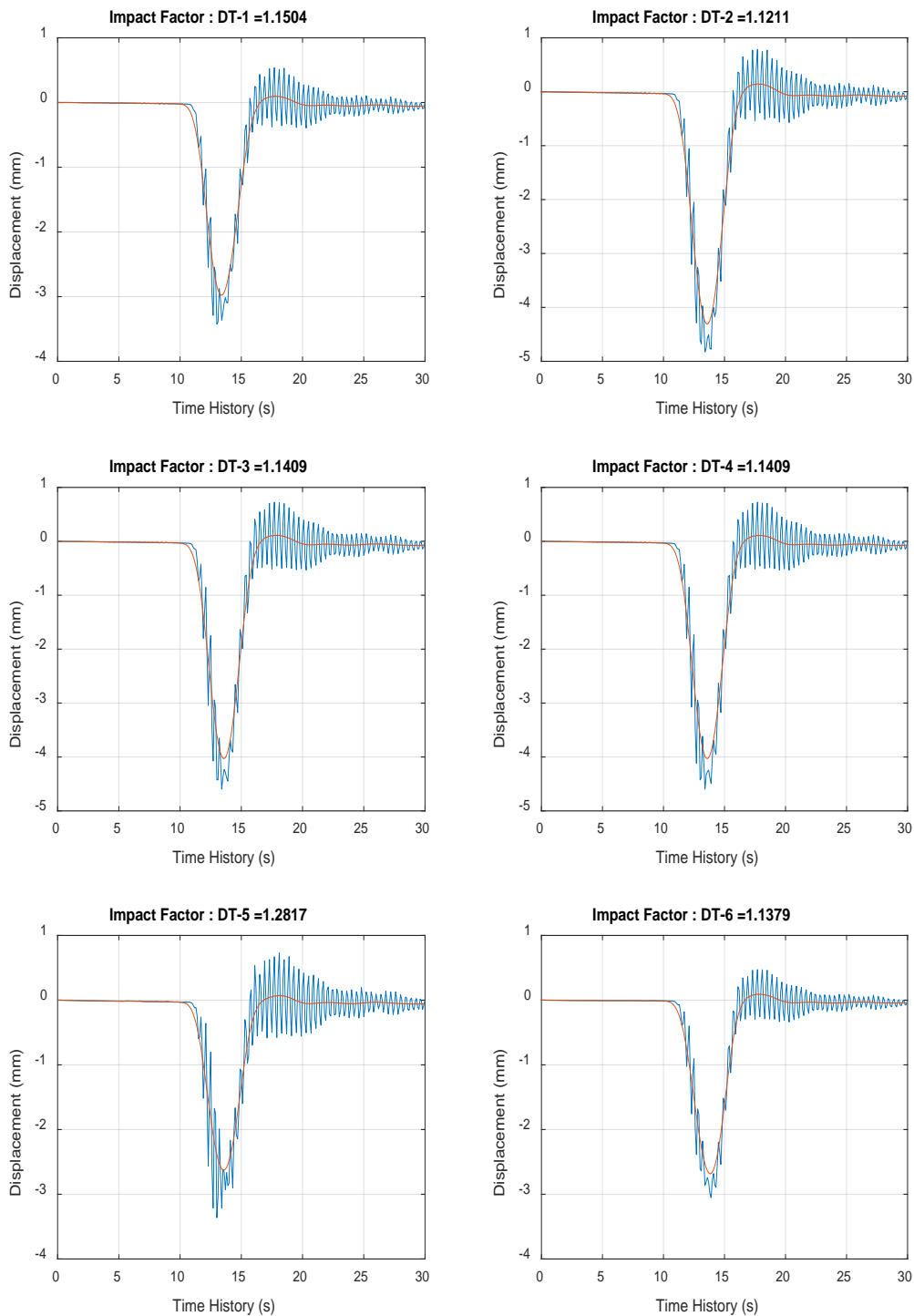


รูปที่ 5-40 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

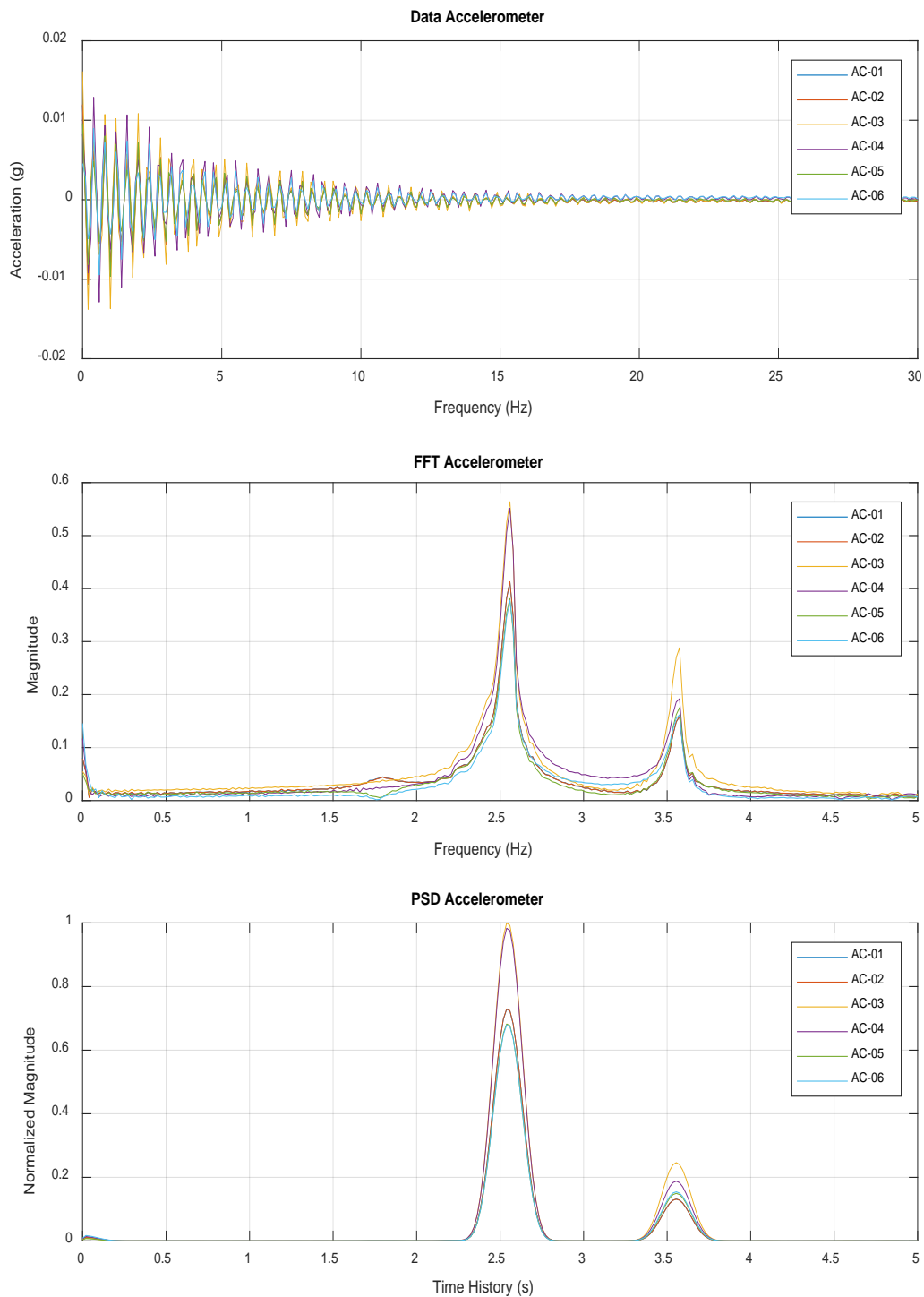


รูปที่ 5-41 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



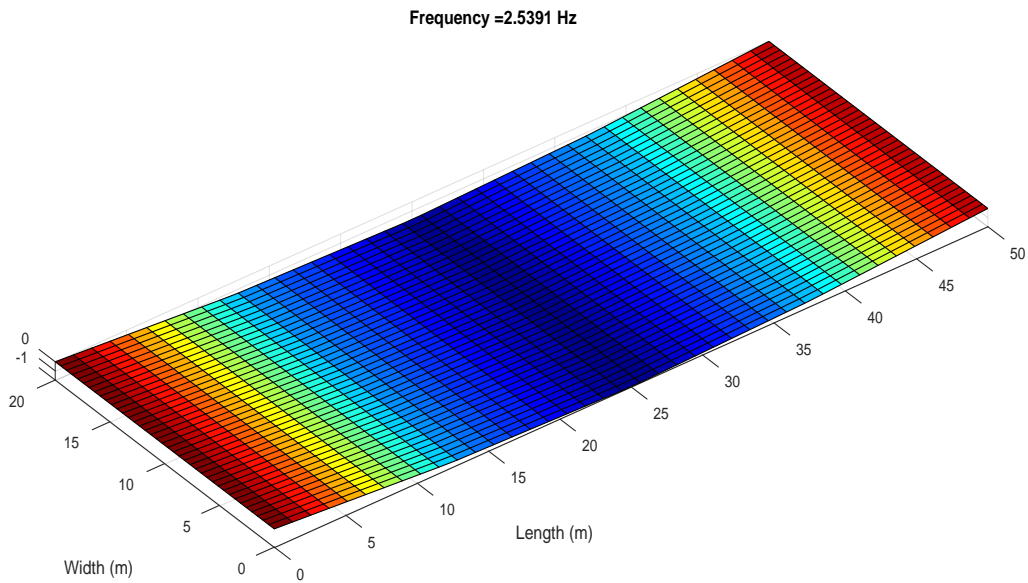


รูปที่ 5-42 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

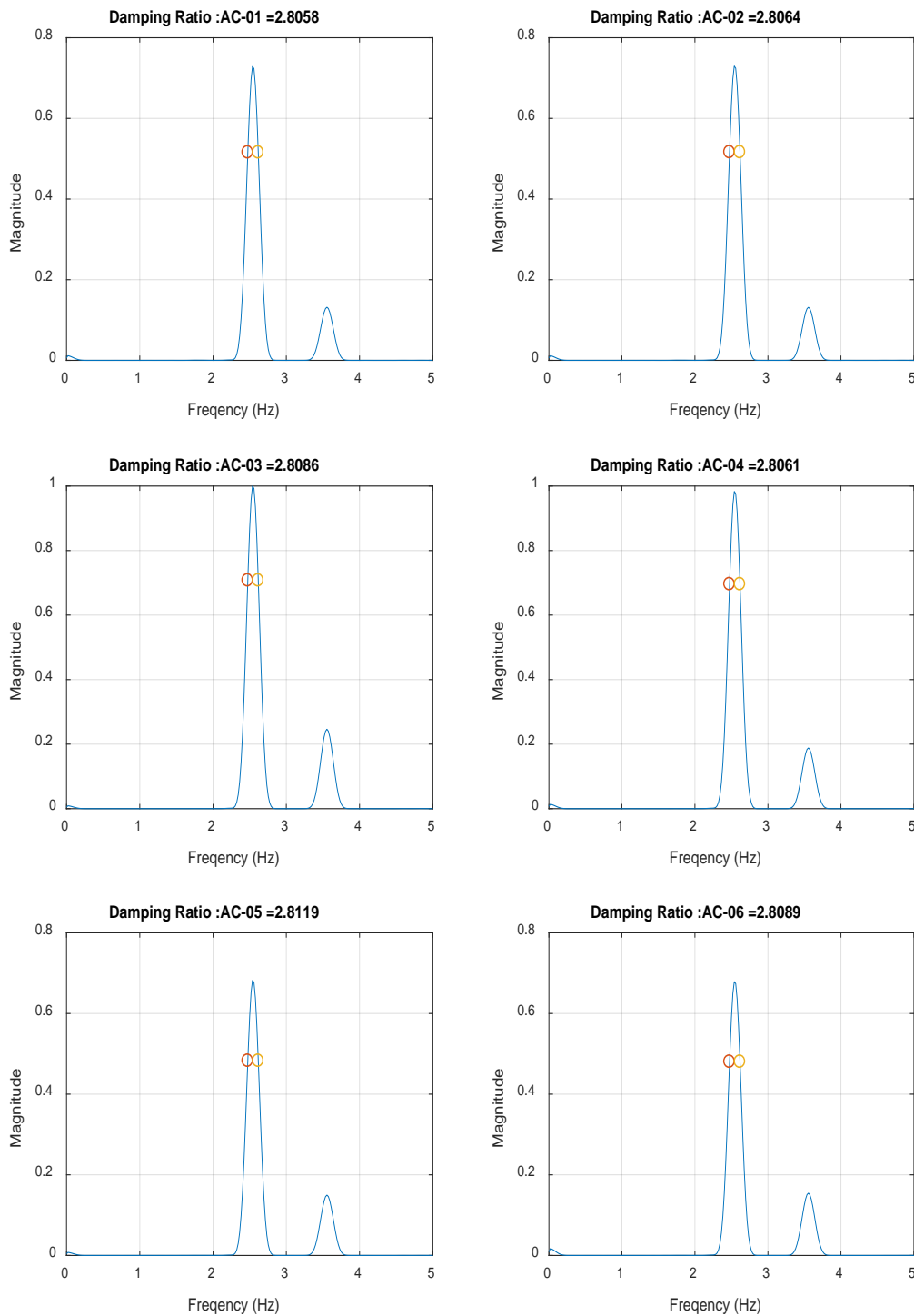


รูปที่ 5-43 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



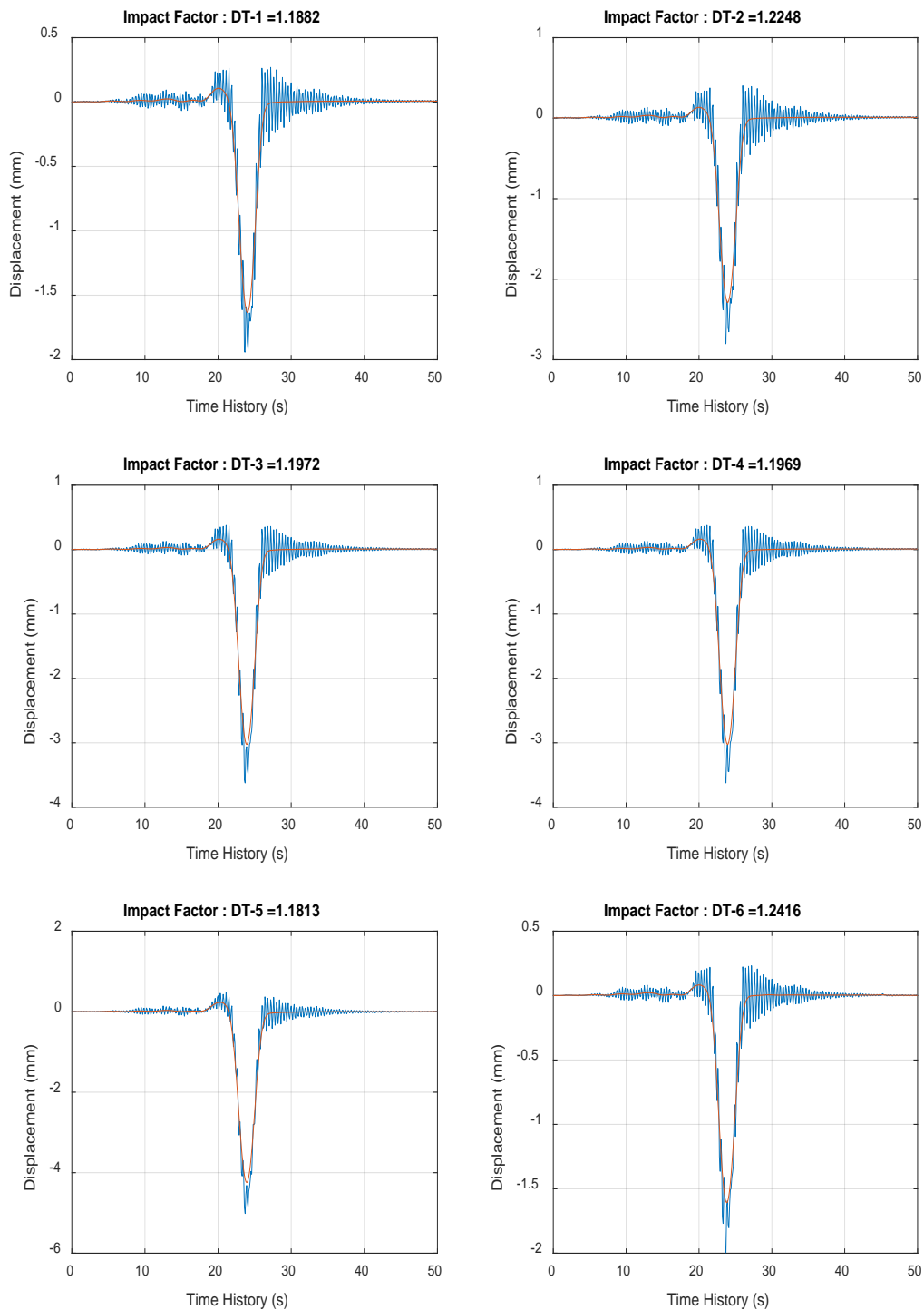


รูปที่ 5-44 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

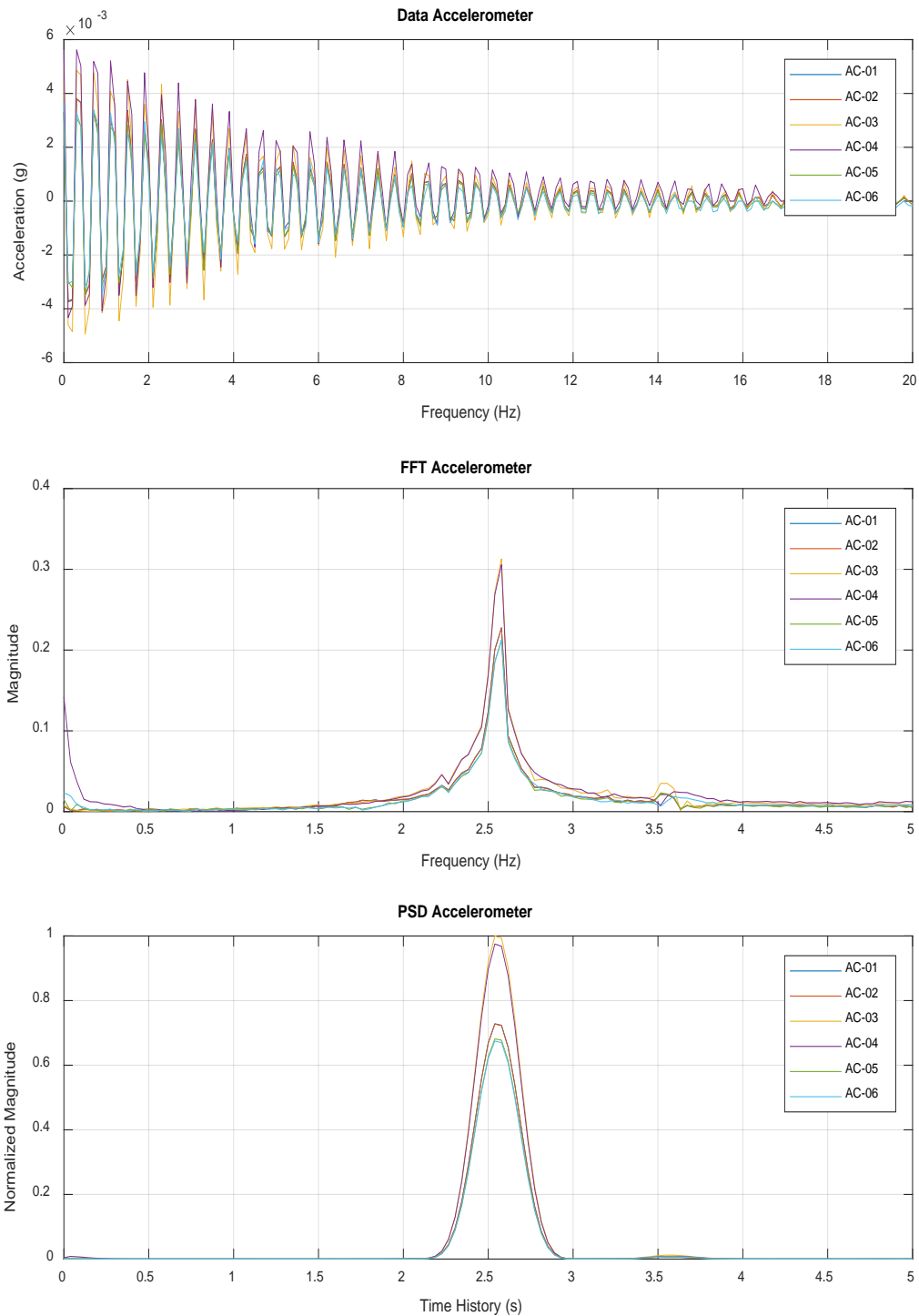


รูปที่ 5-45 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



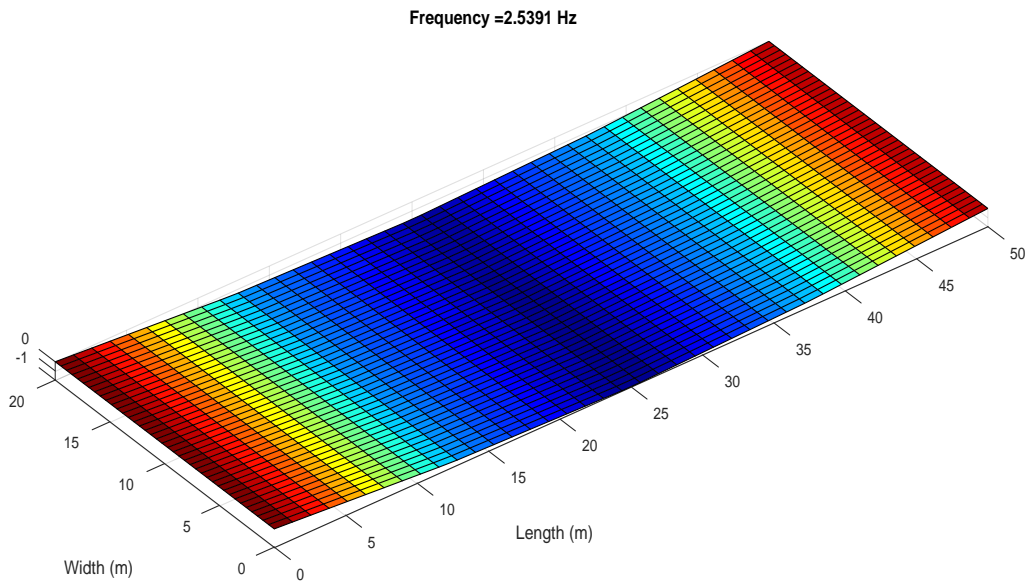


รูปที่ 5-46 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

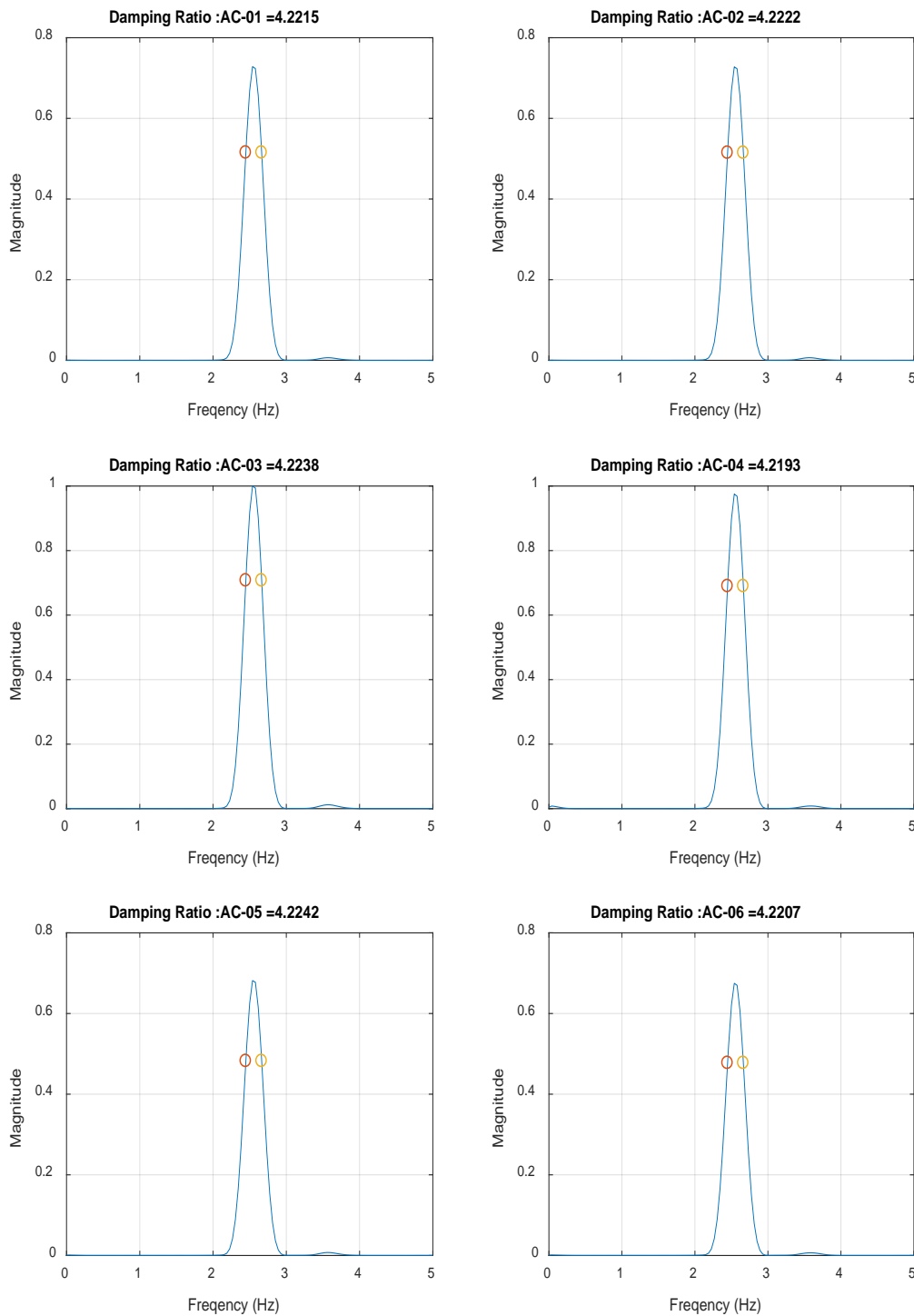


รูปที่ 5-47 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



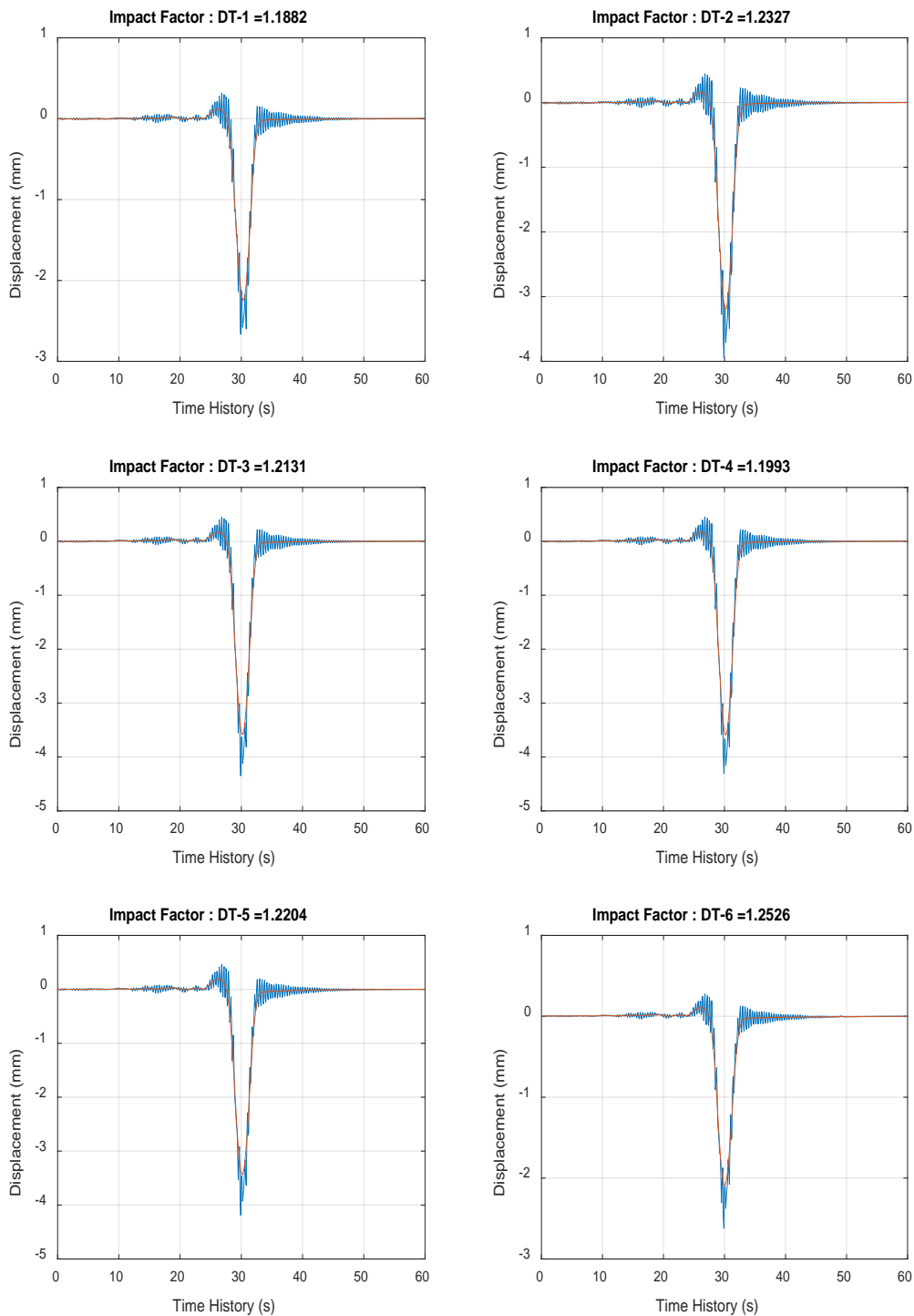


รูปที่ 5-48 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

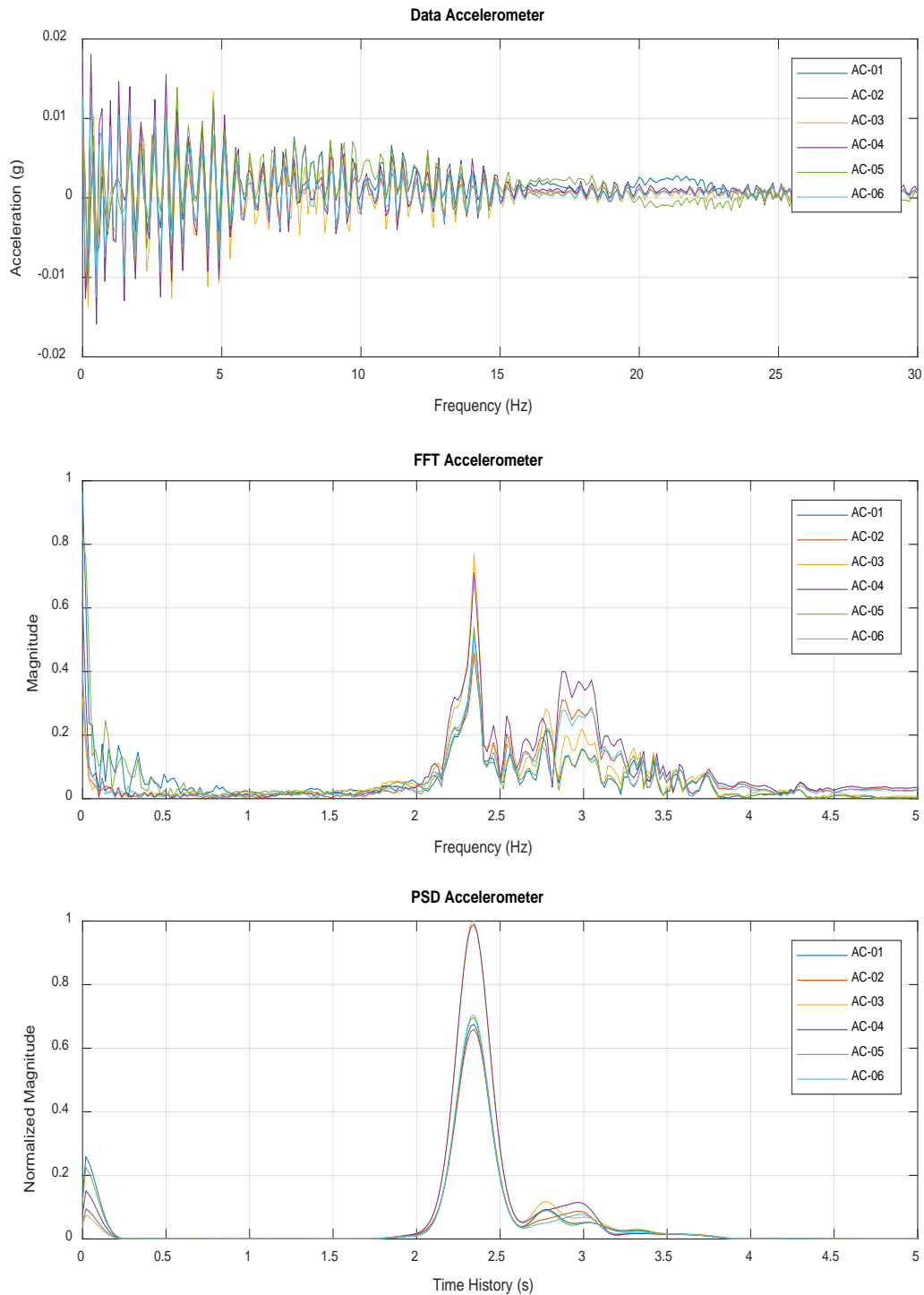


รูปที่ 5-49 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



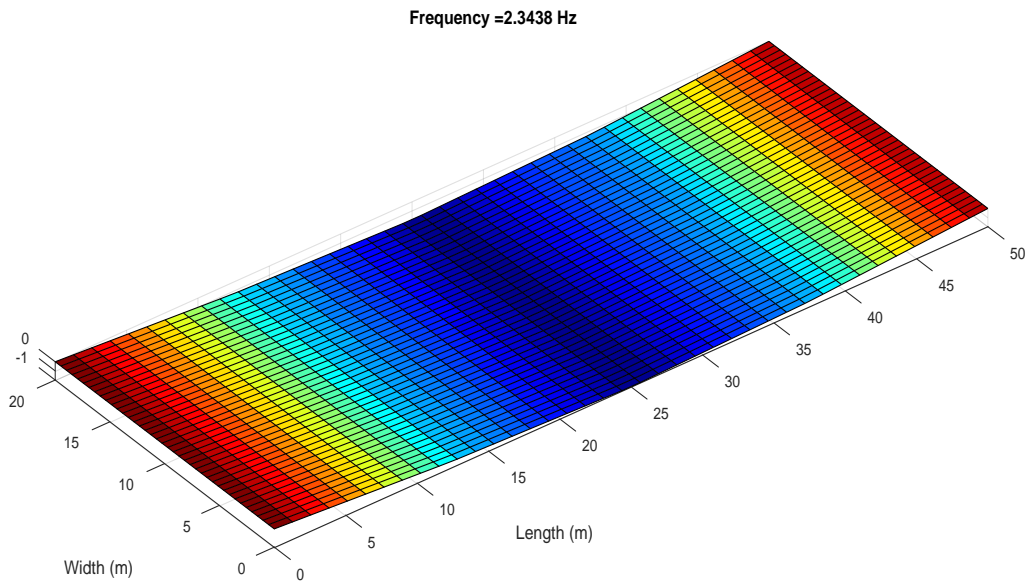


รูปที่ 5-50 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 1 (Span 1)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

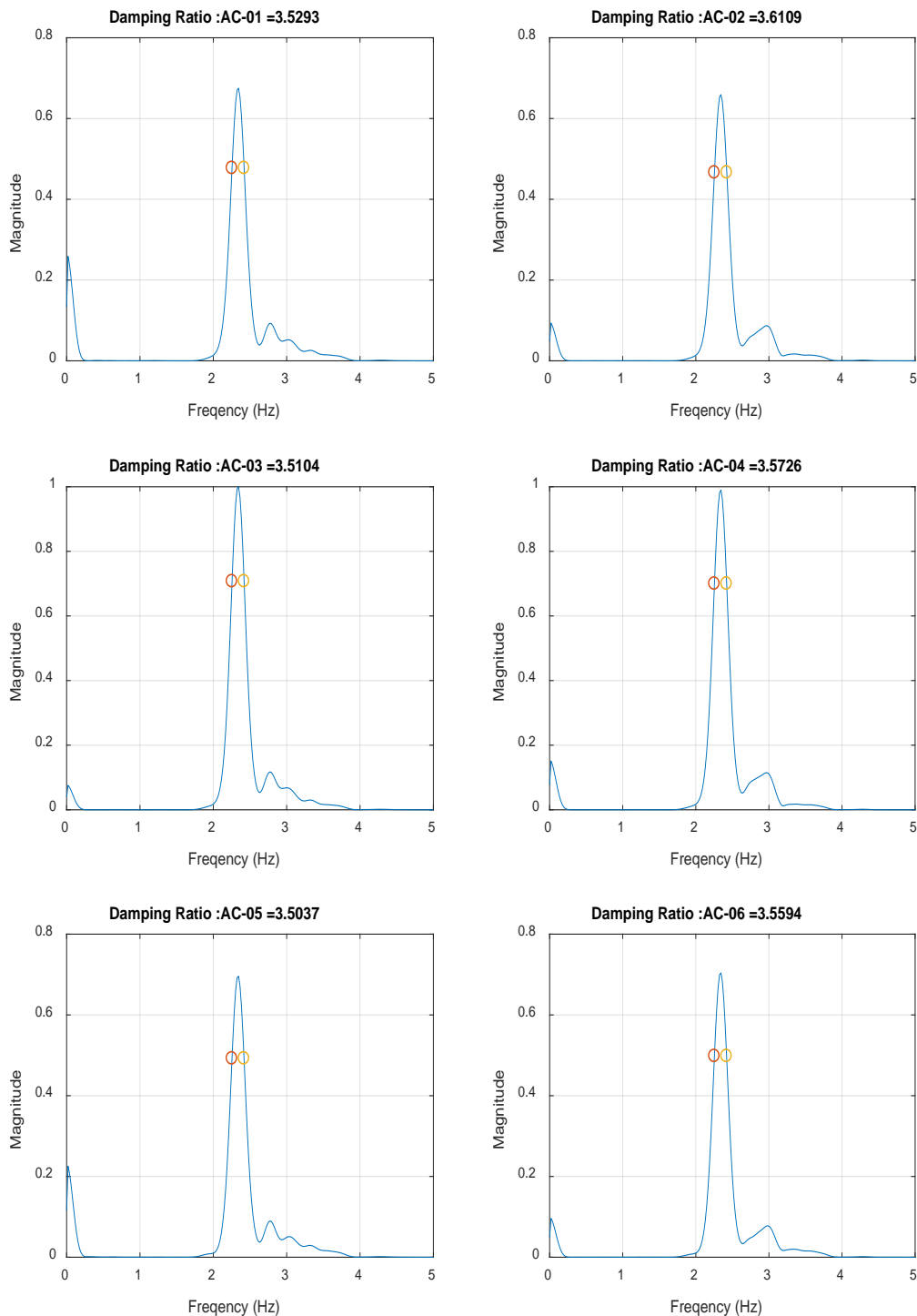


รูปที่ 5-51 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



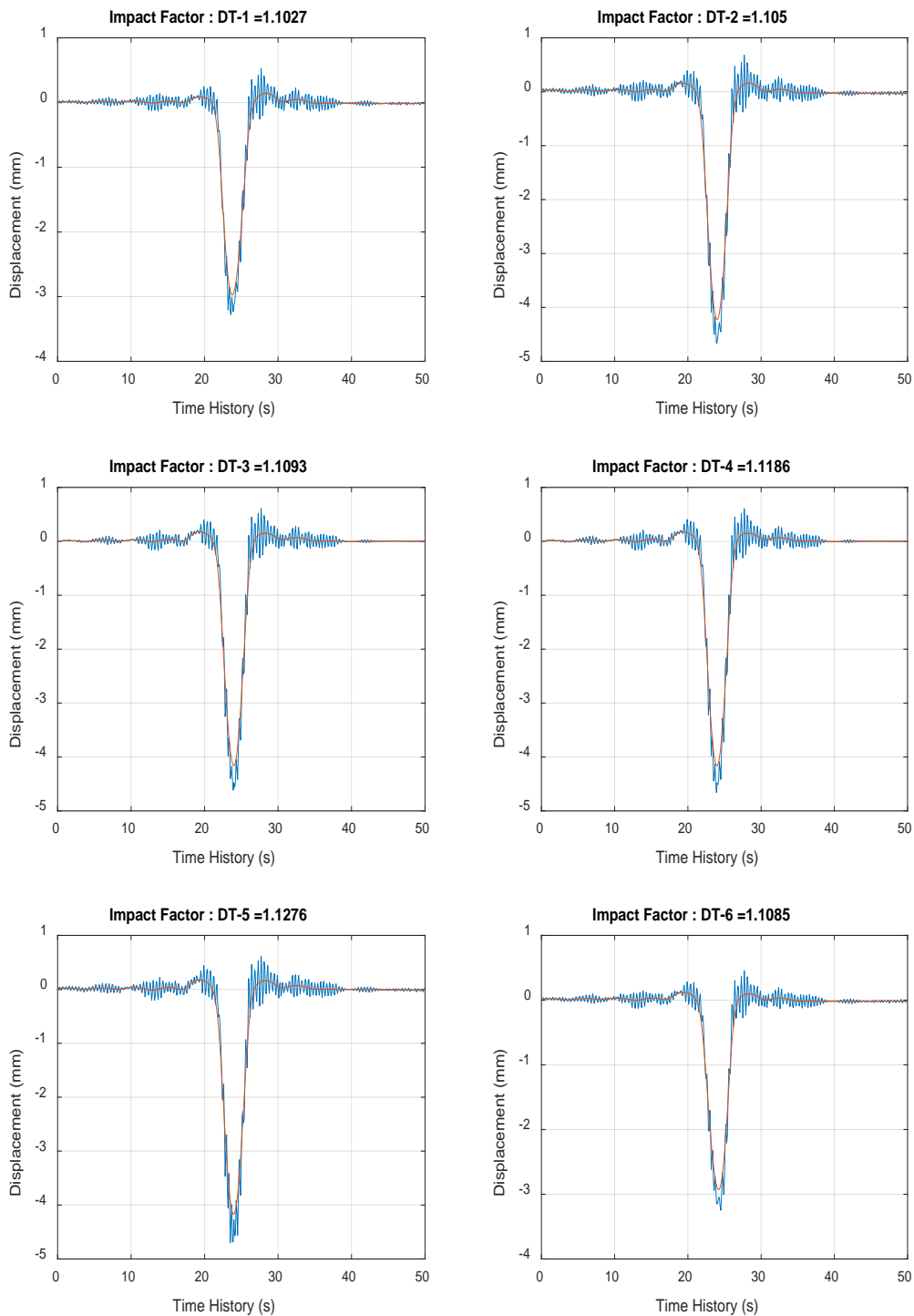


รูปที่ 5-52 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน

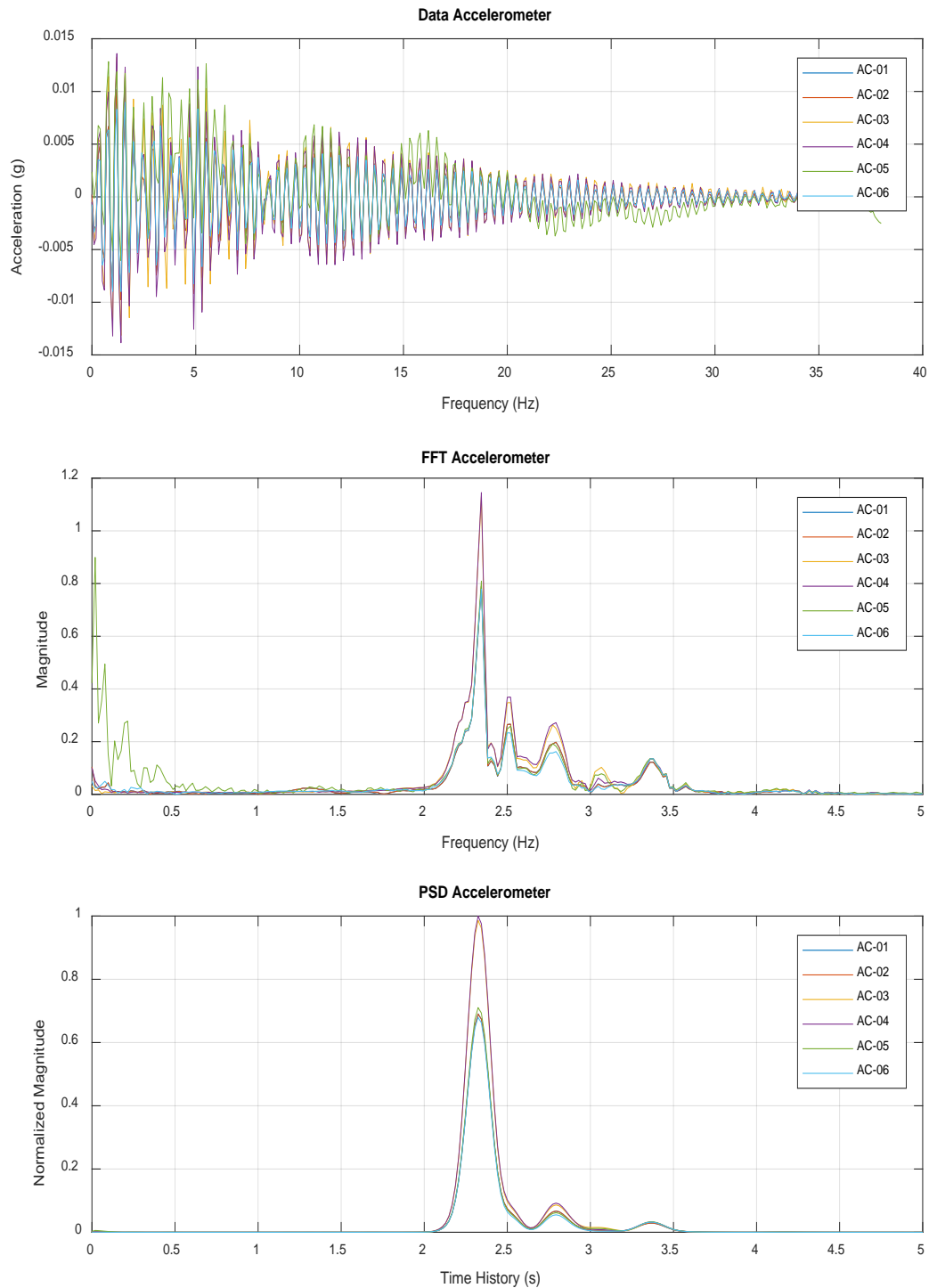


รูปที่ 5-53 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน





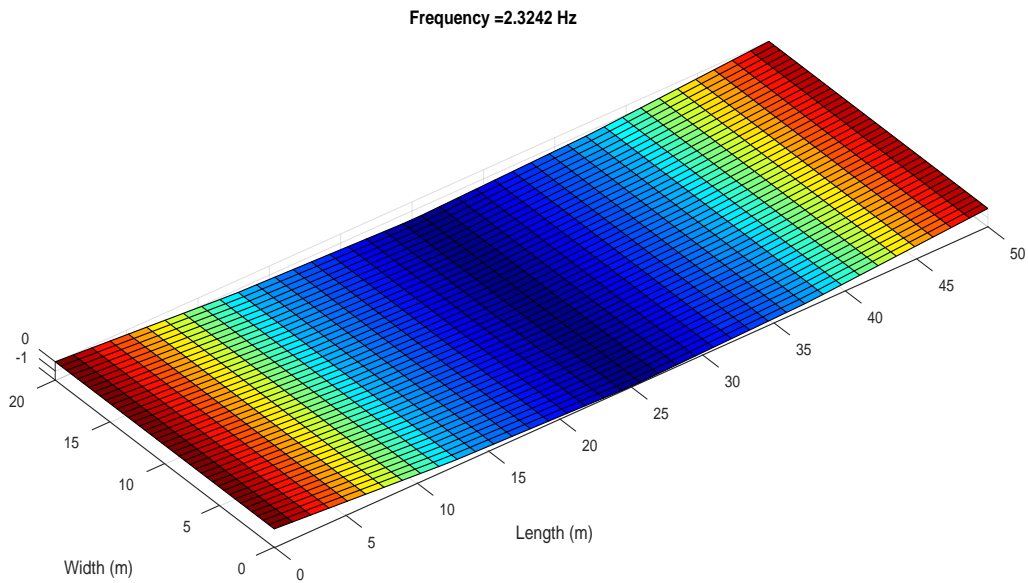
รูปที่ 5-54 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



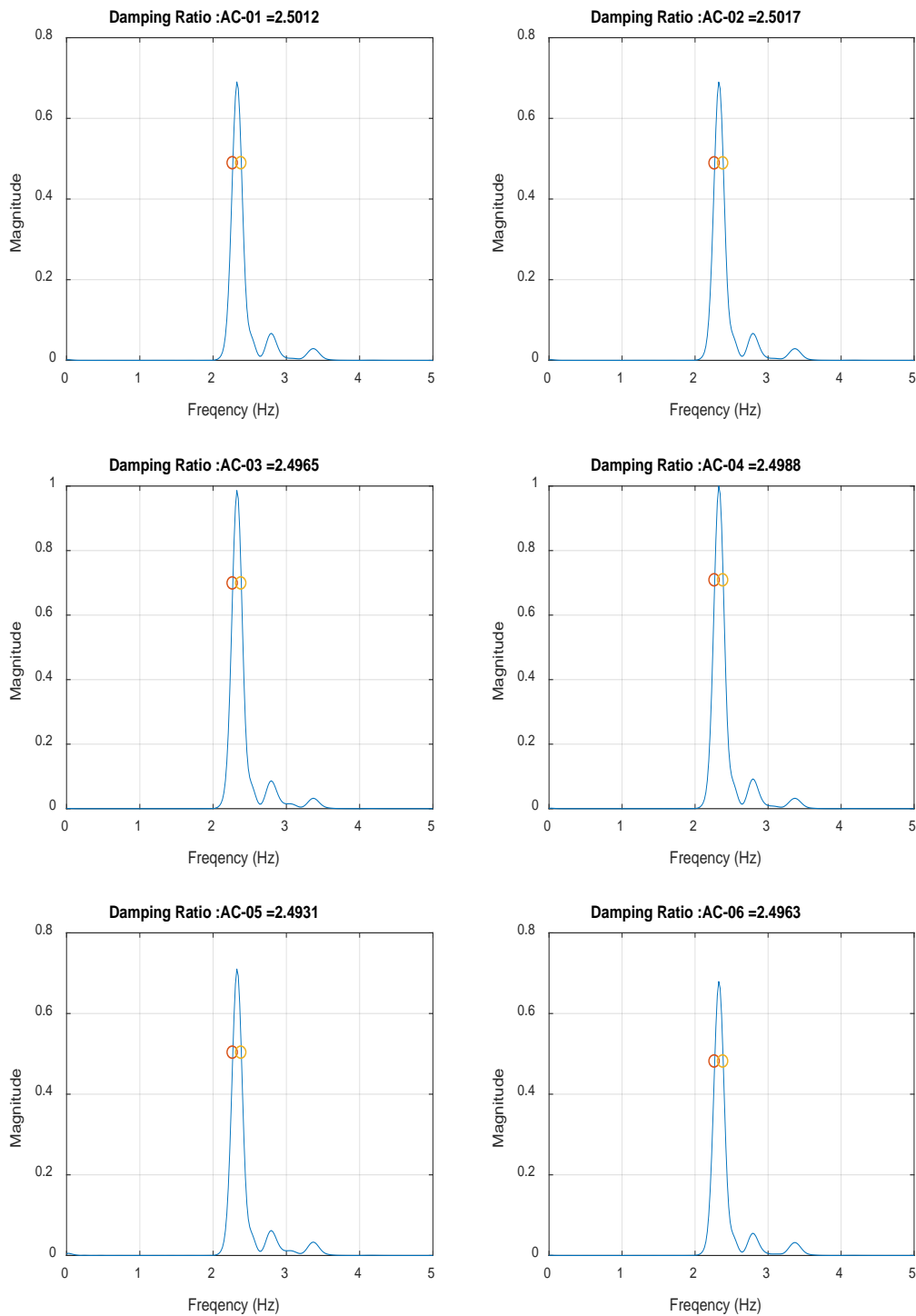
รูปที่ 5-55 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)

Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย





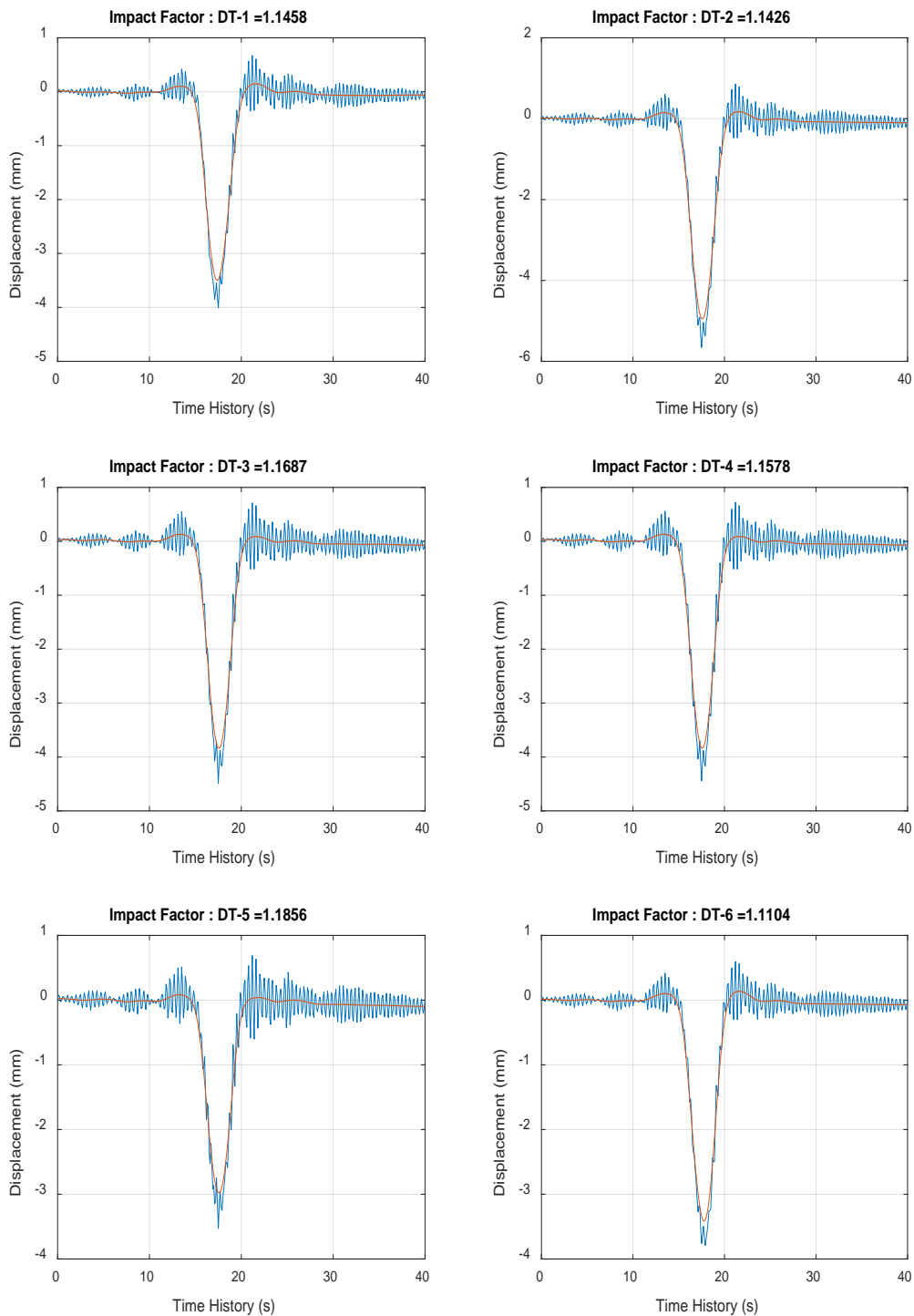
รูปที่ 5-56 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



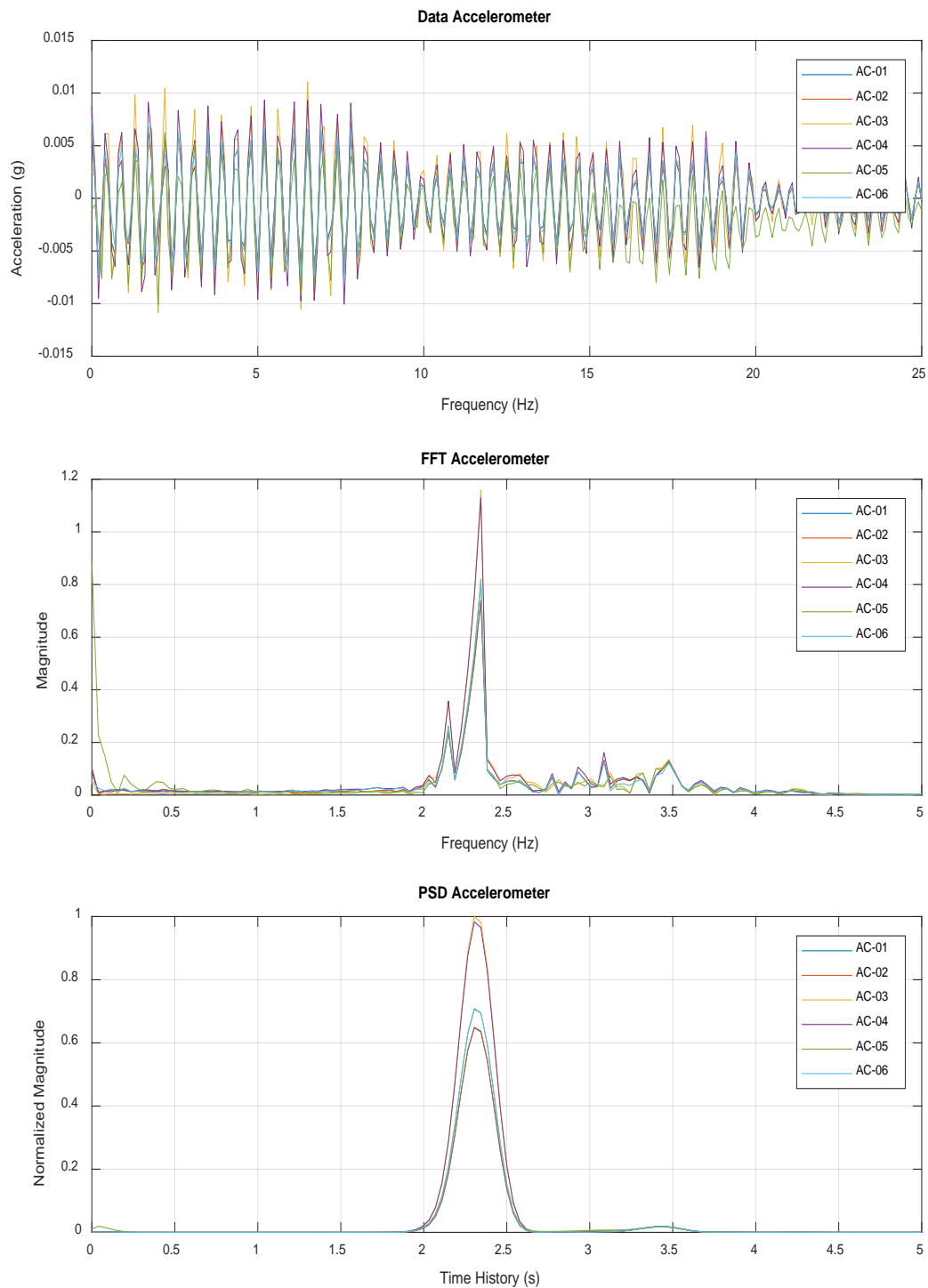
รูปที่ 5-57 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)

Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย





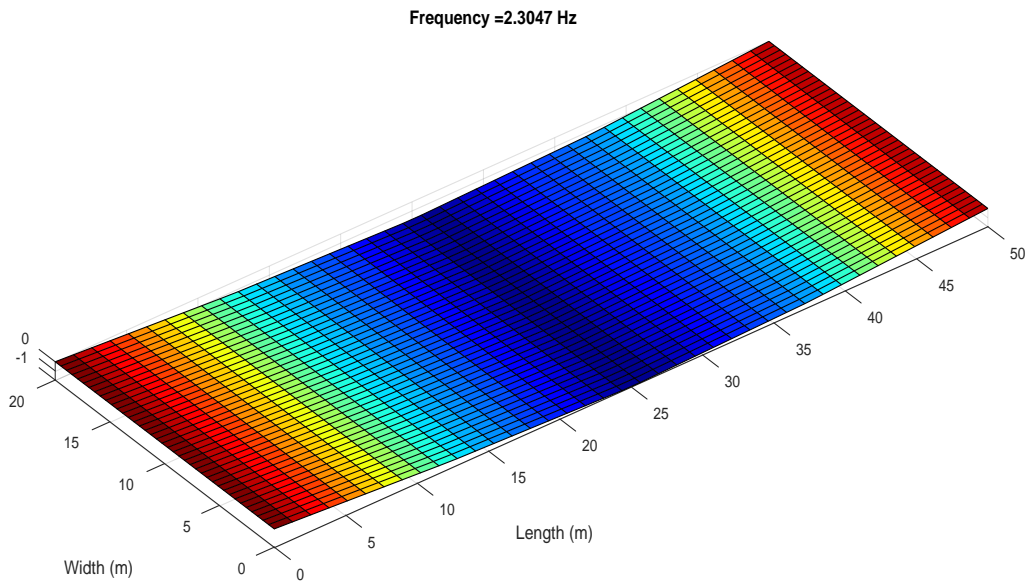
รูปที่ 5-58 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



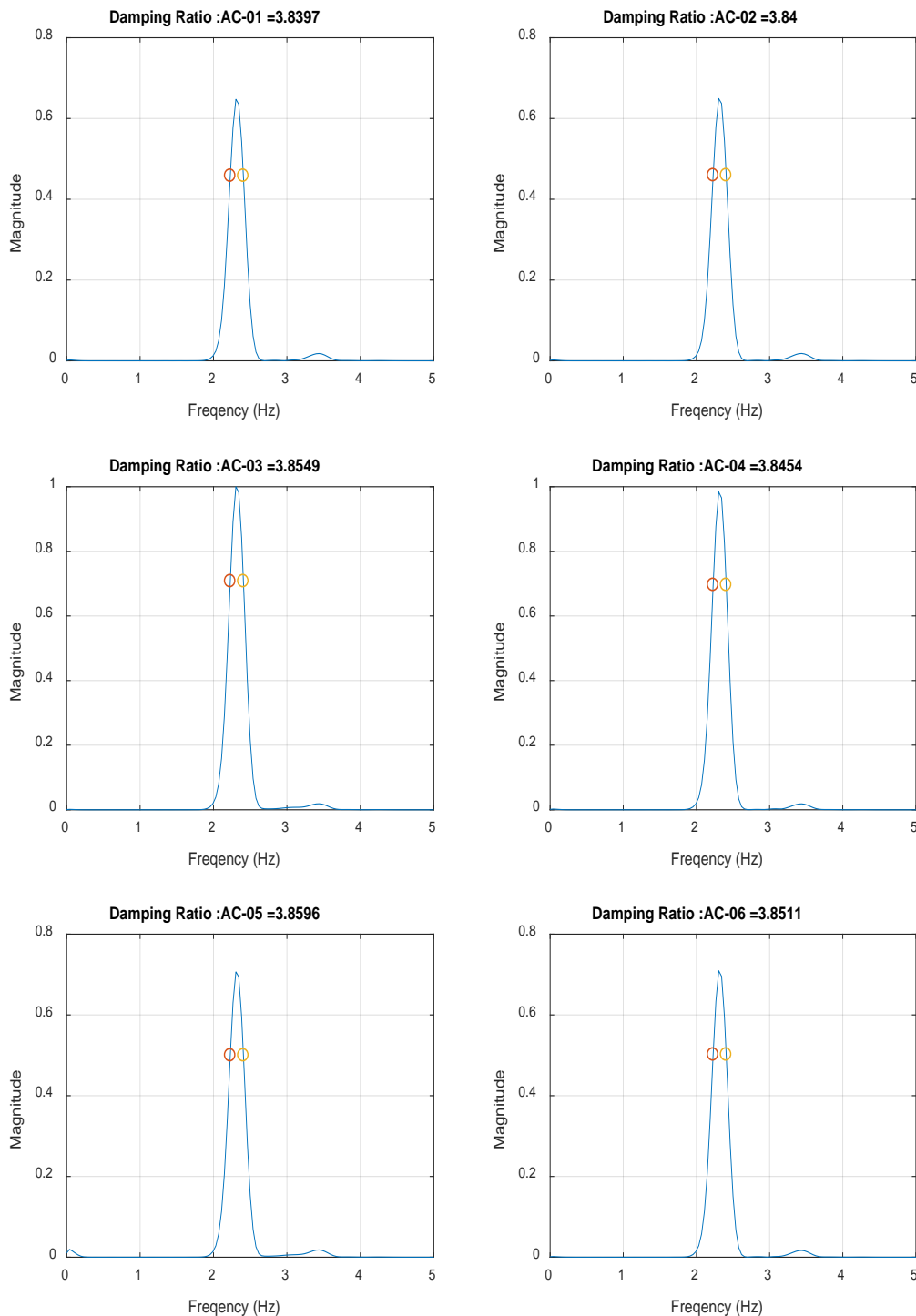
รูปที่ 5-59 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)

Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



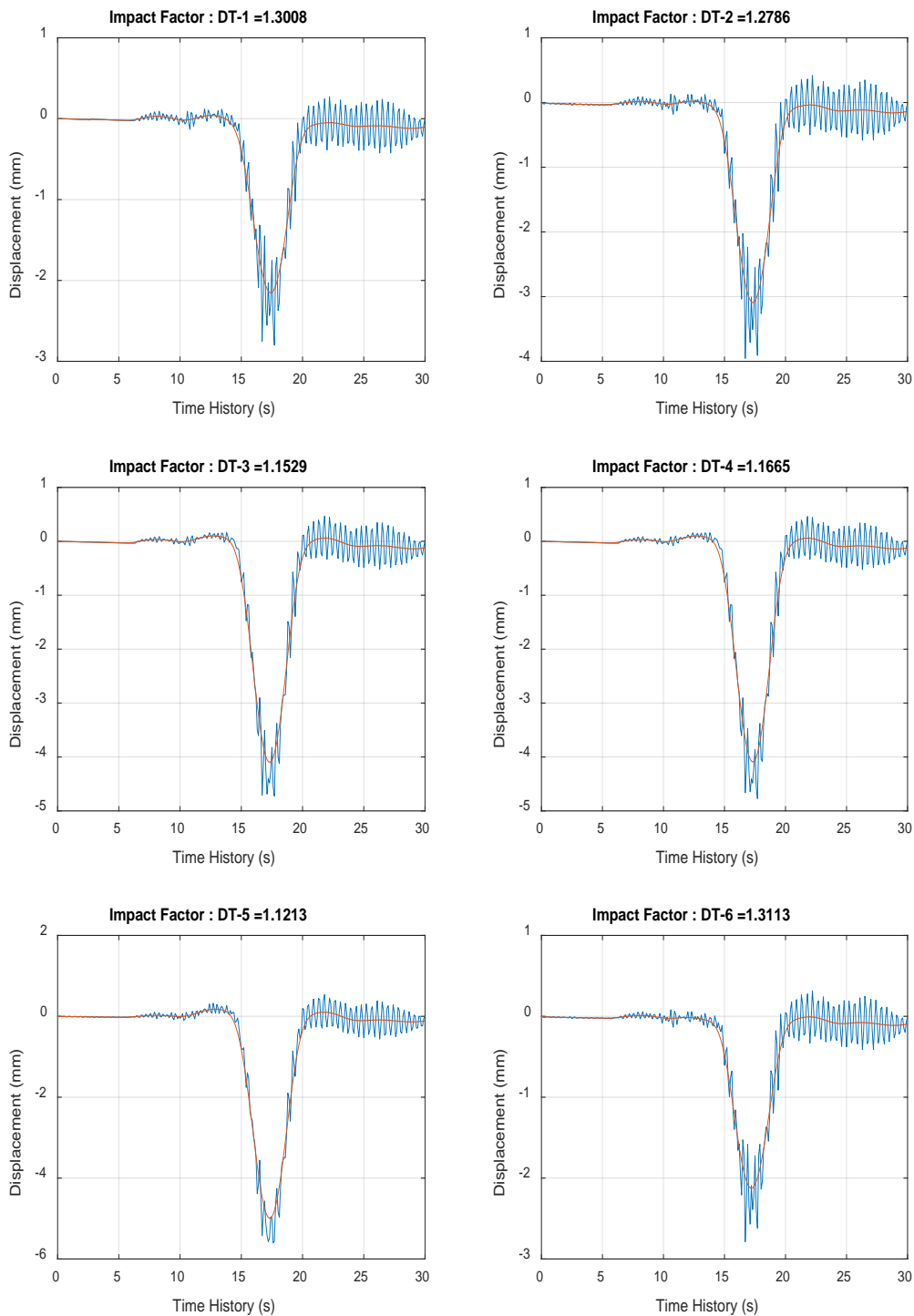


รูปที่ 5-60 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

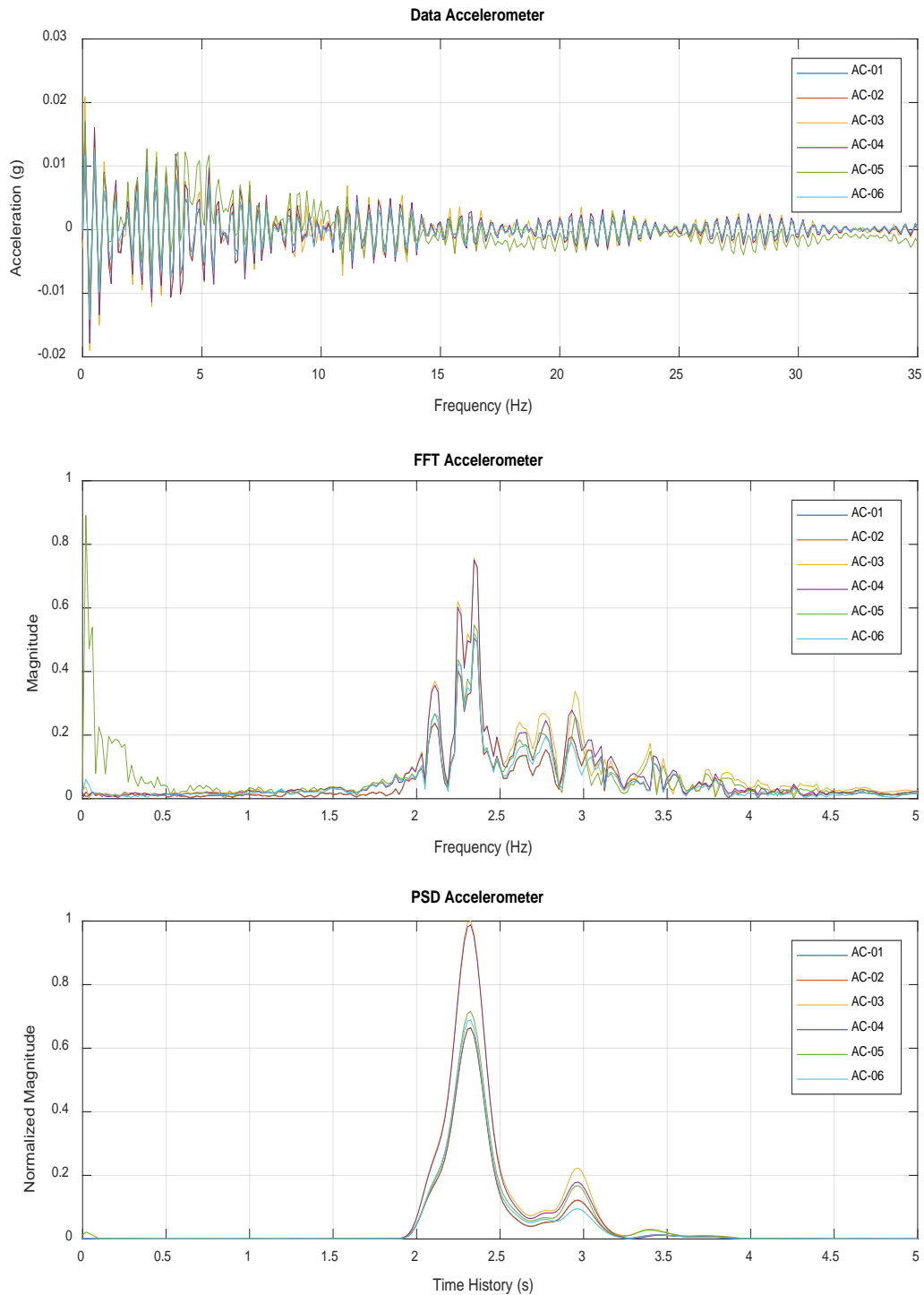


รูปที่ 5-61 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



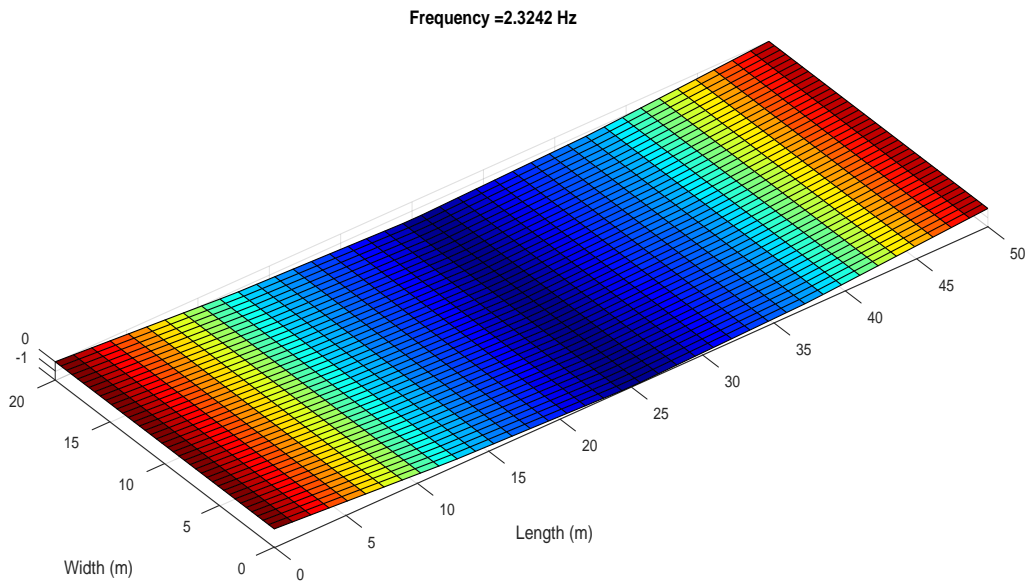


รูปที่ 5-62 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

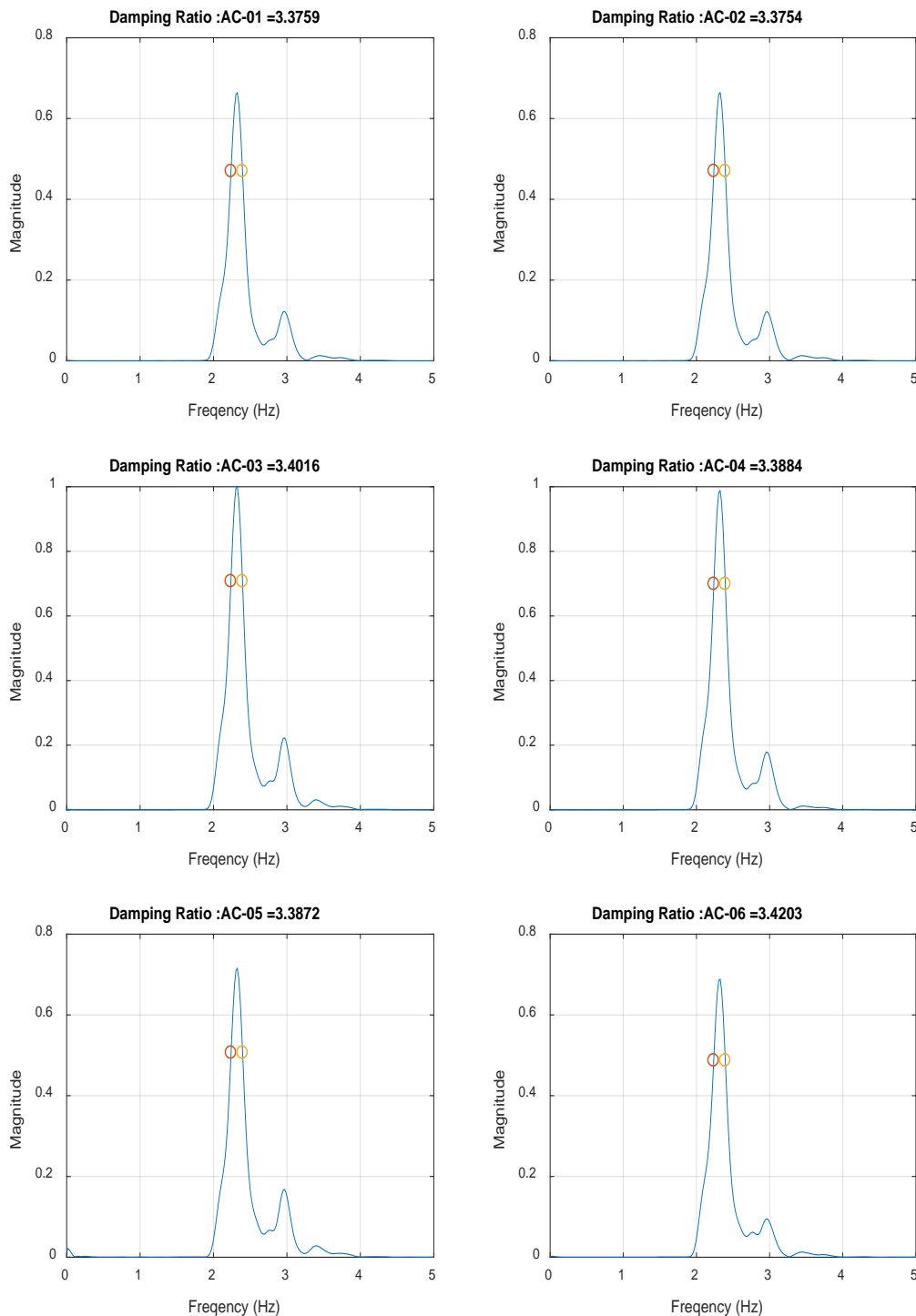


รูปที่ 5-63 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



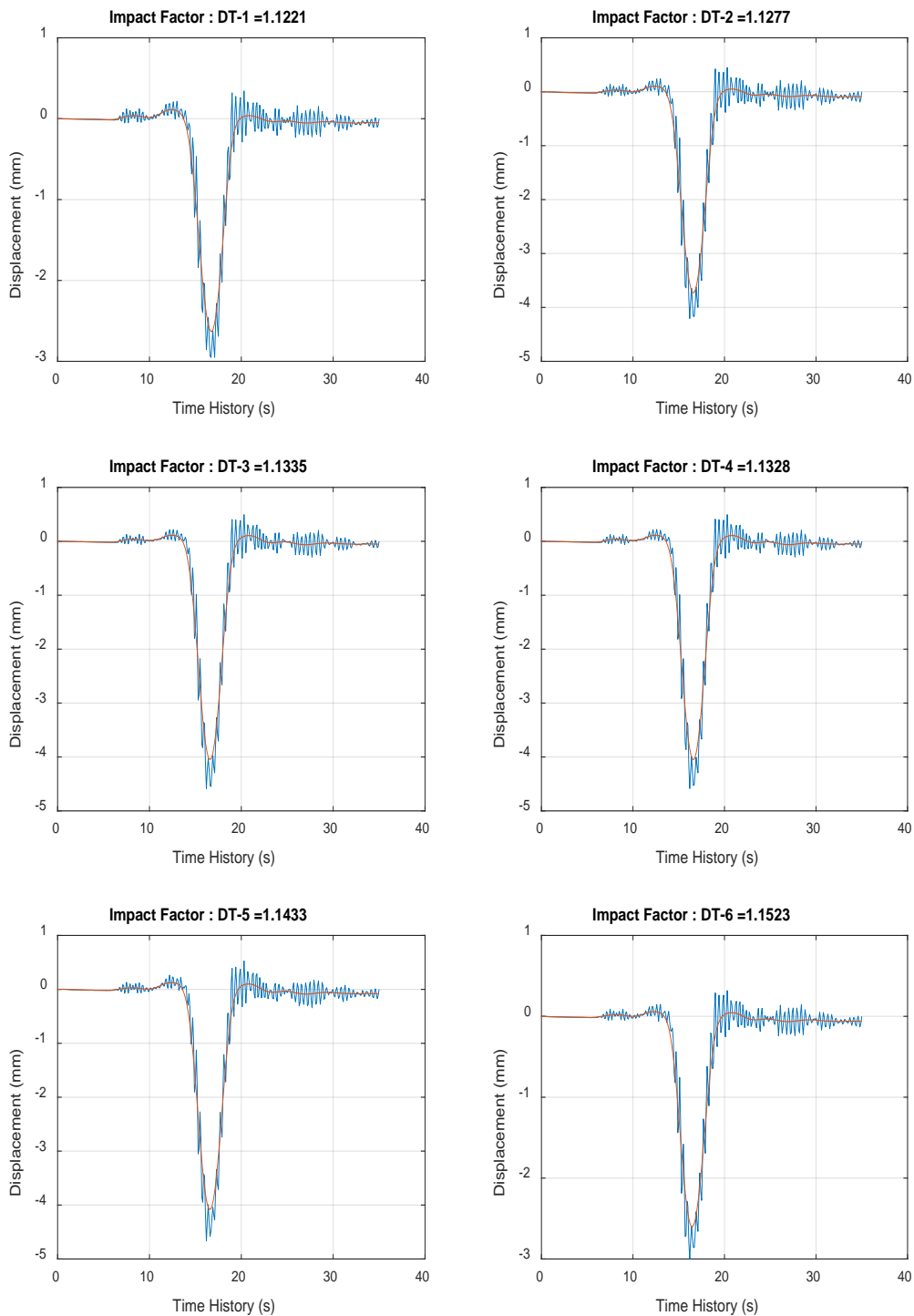


รูปที่ 5-64 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

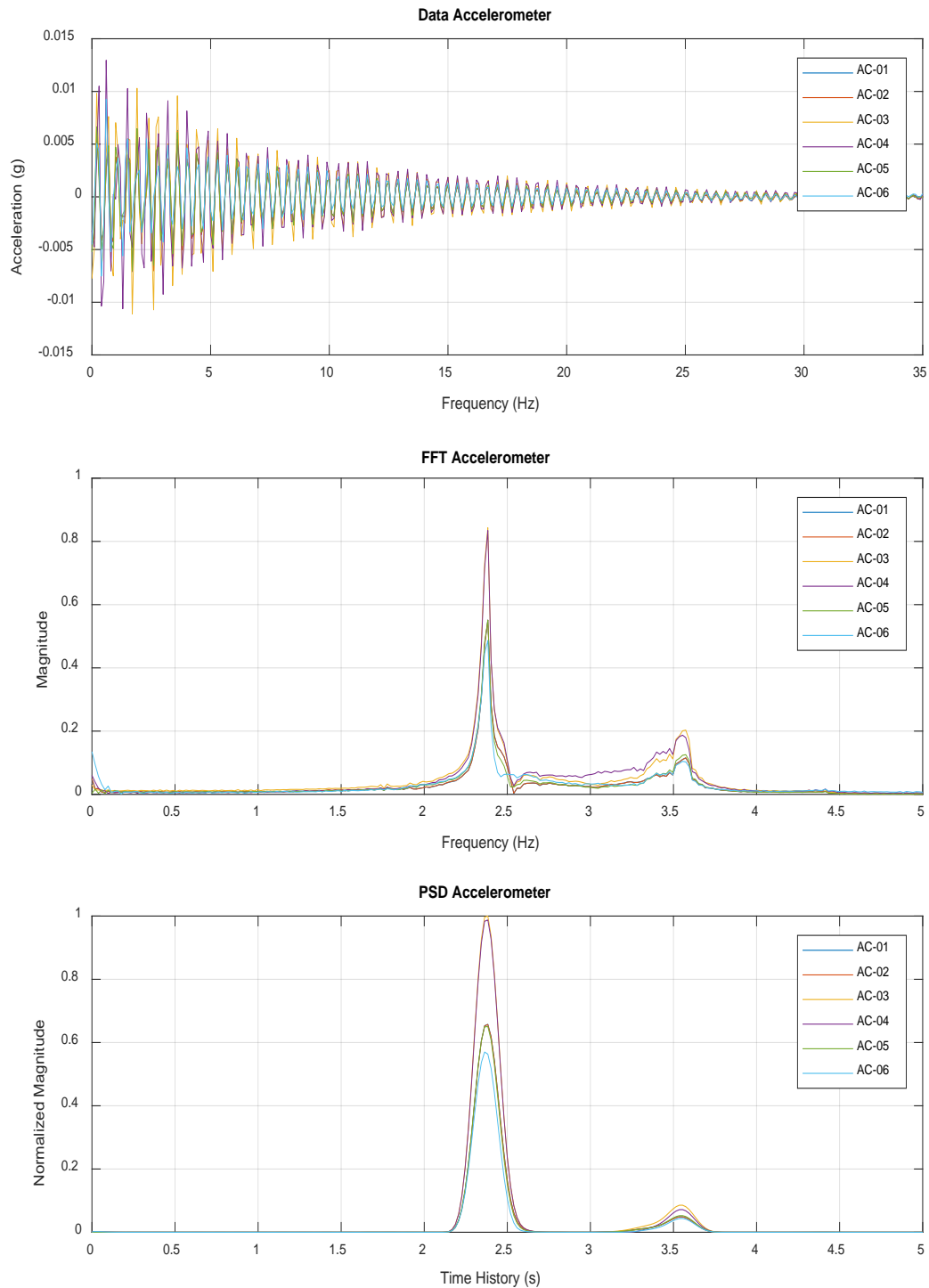


รูปที่ 5-65 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



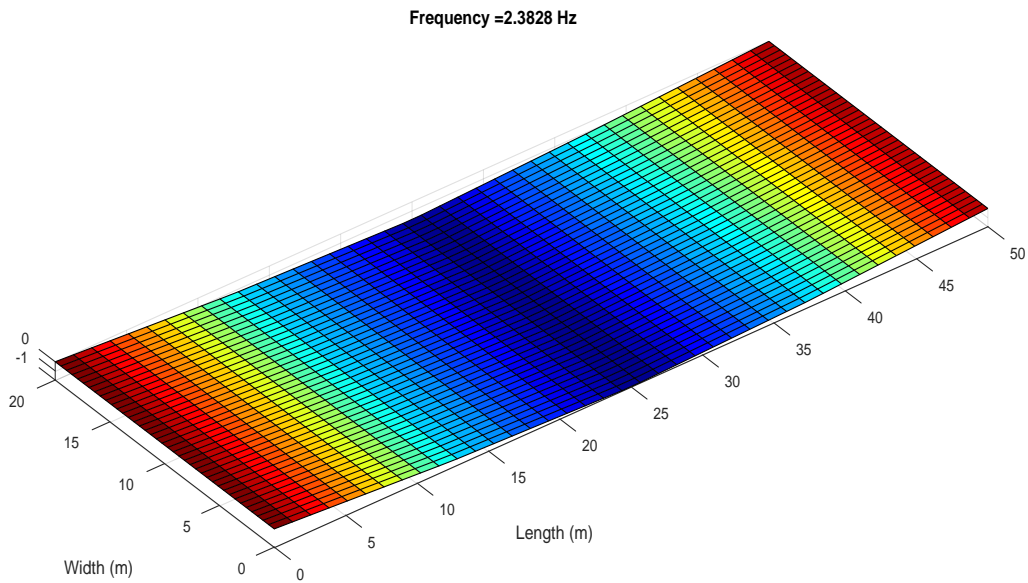


รูปที่ 5-66 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 10 (Span 10)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

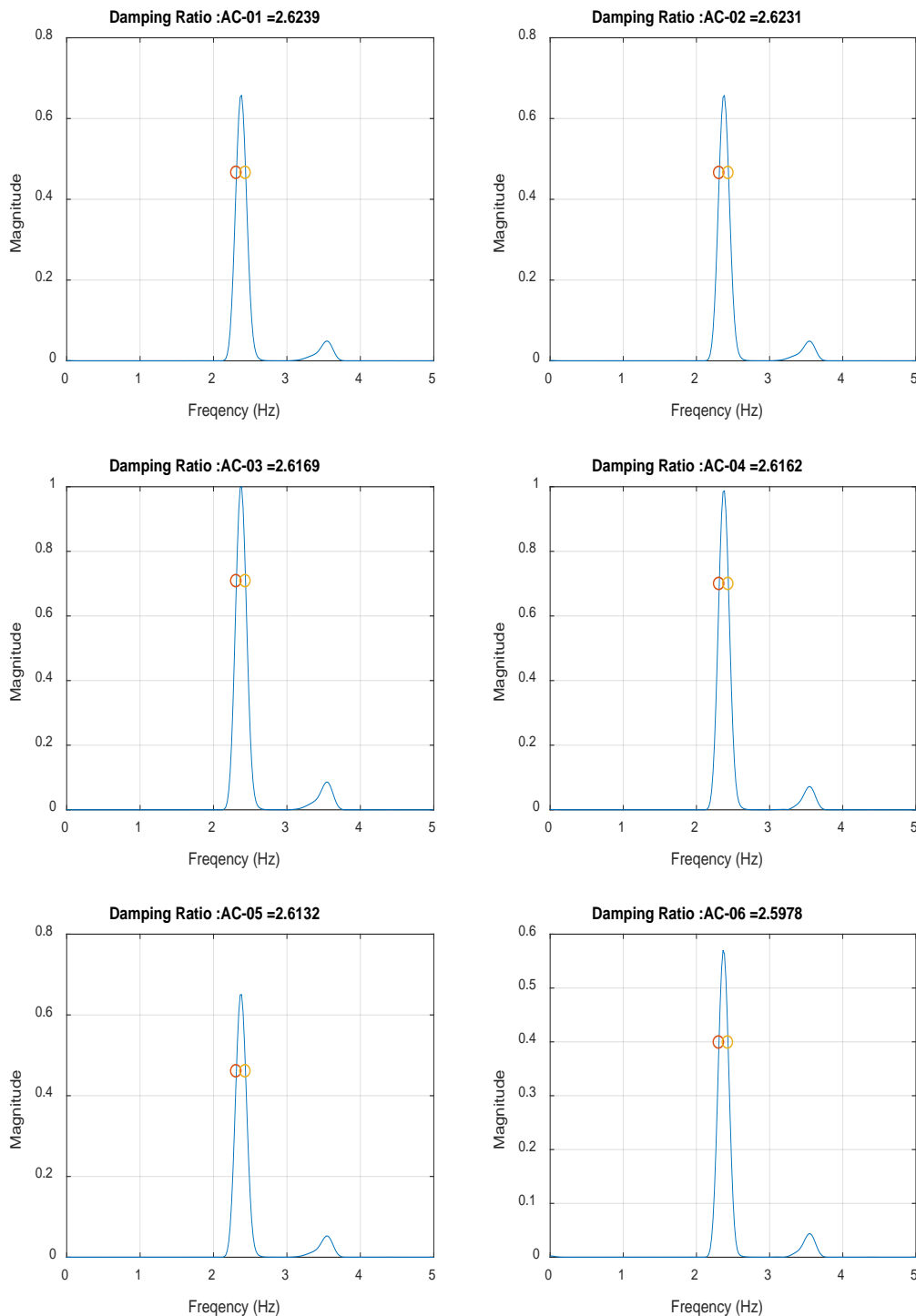


รูปที่ 5-67 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



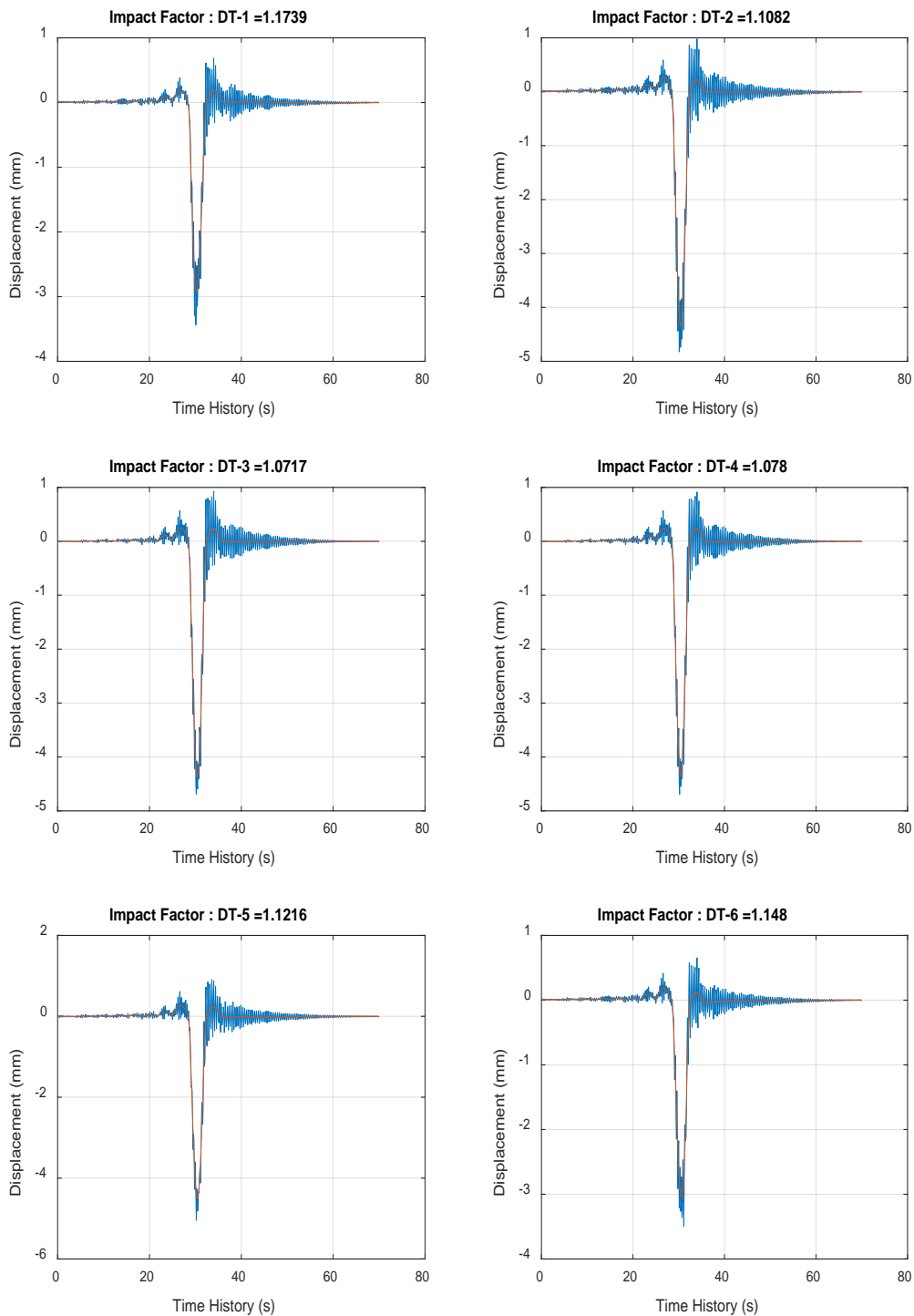


รูปที่ 5-68 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 1 วิ่งหารถเสมอกัน

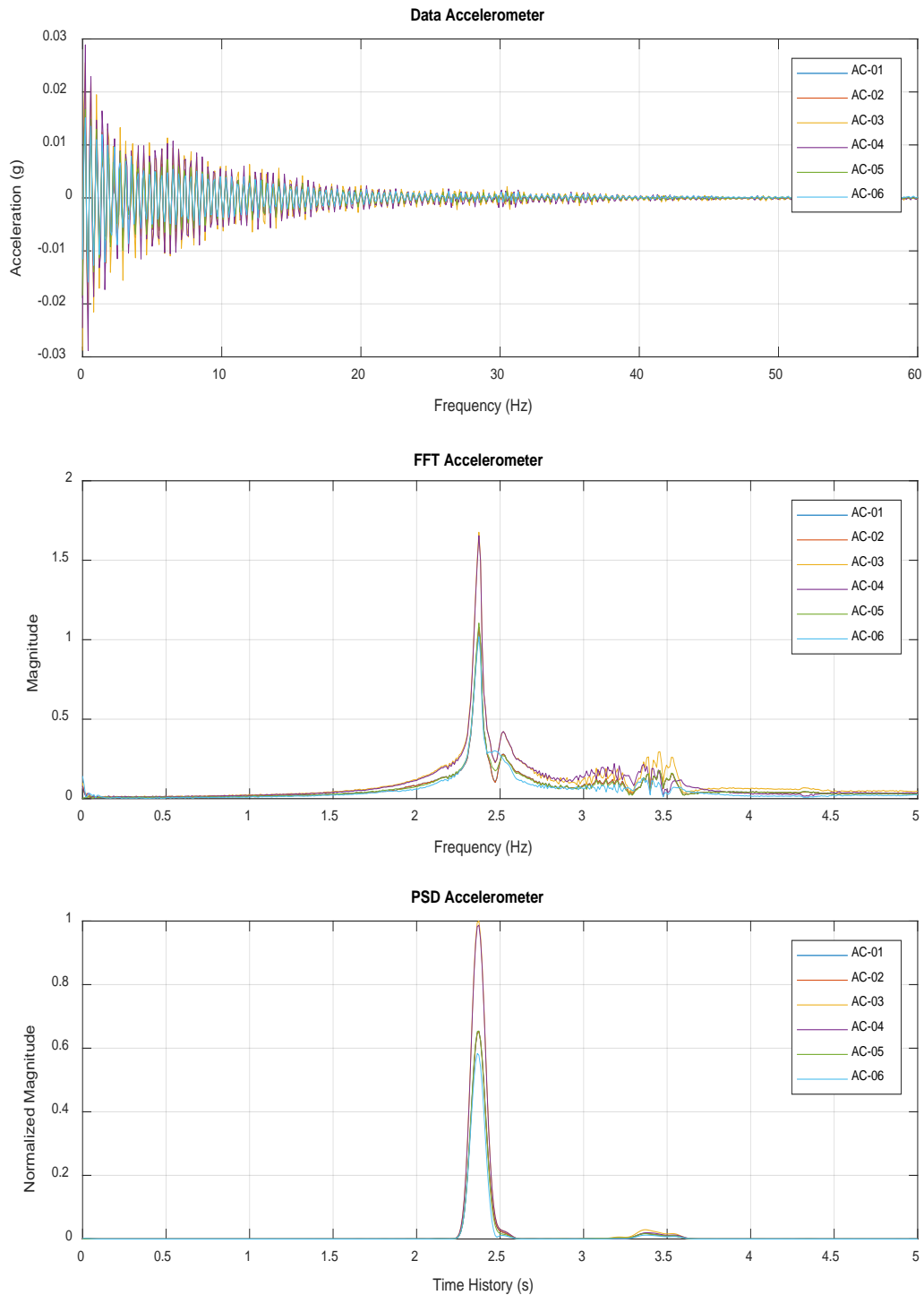


รูปที่ 5-69 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 1 ฝั่งหน้ารถเสมอกัน



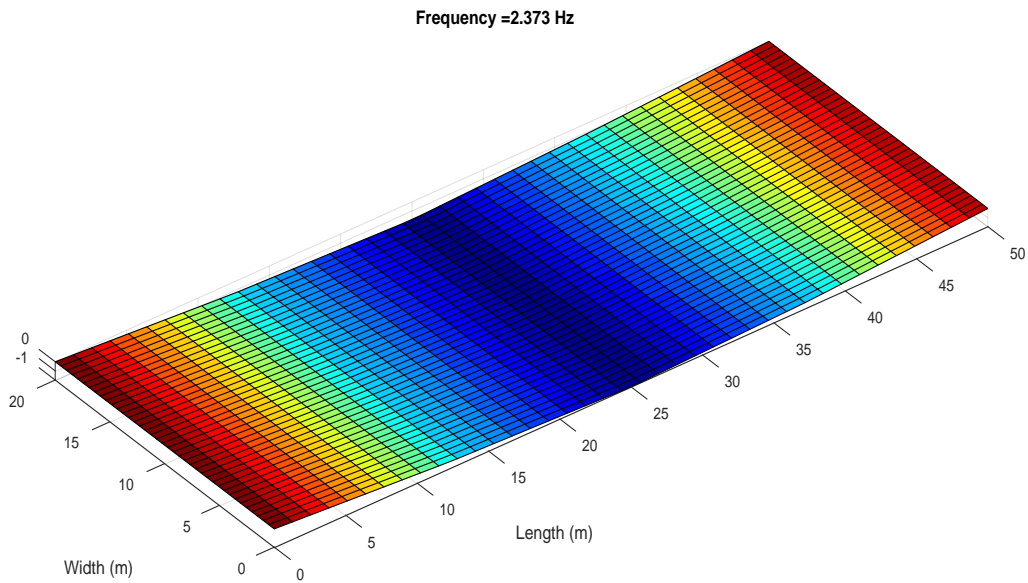


รูปที่ 5-70 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน

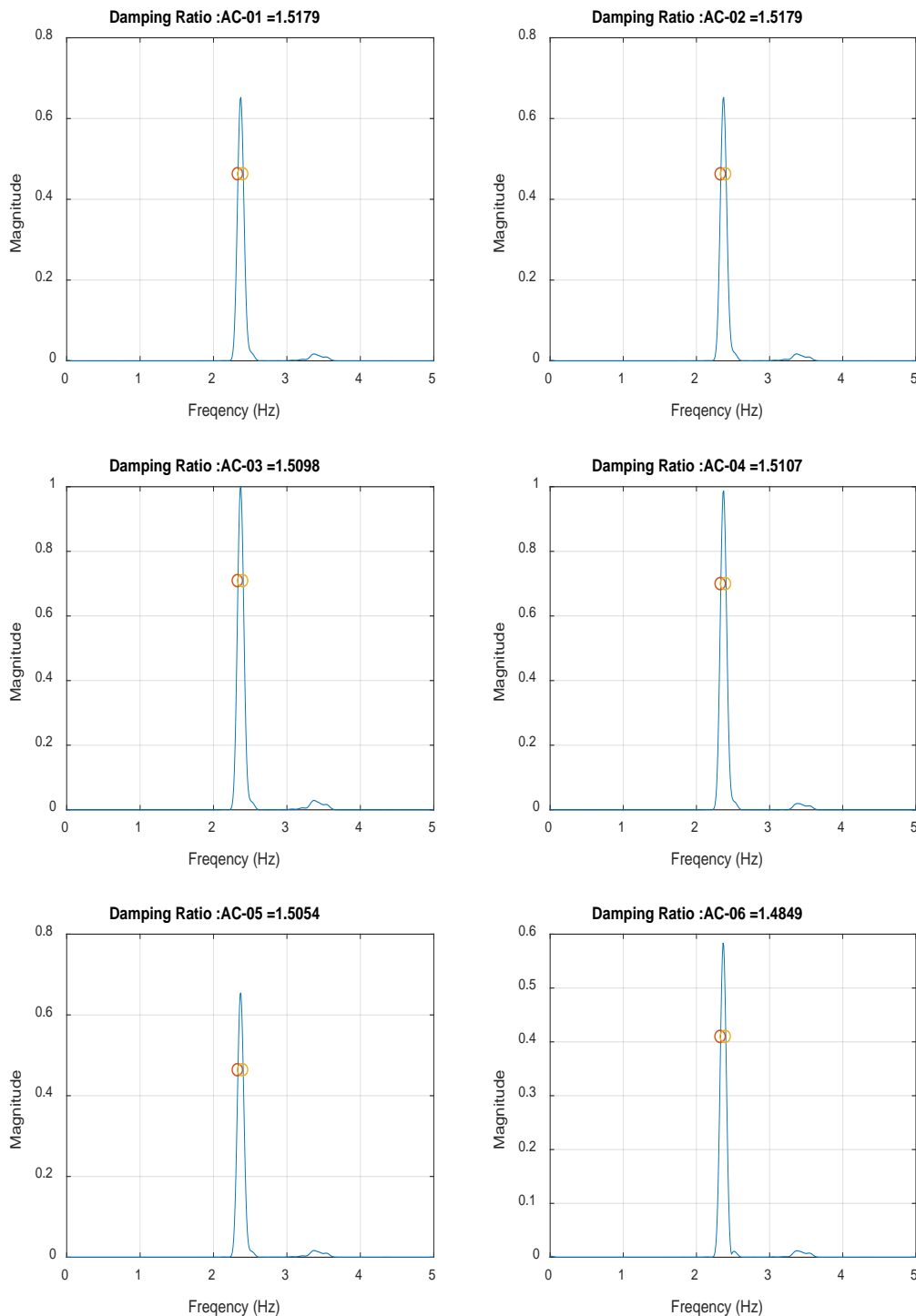


รูปที่ 5-71 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



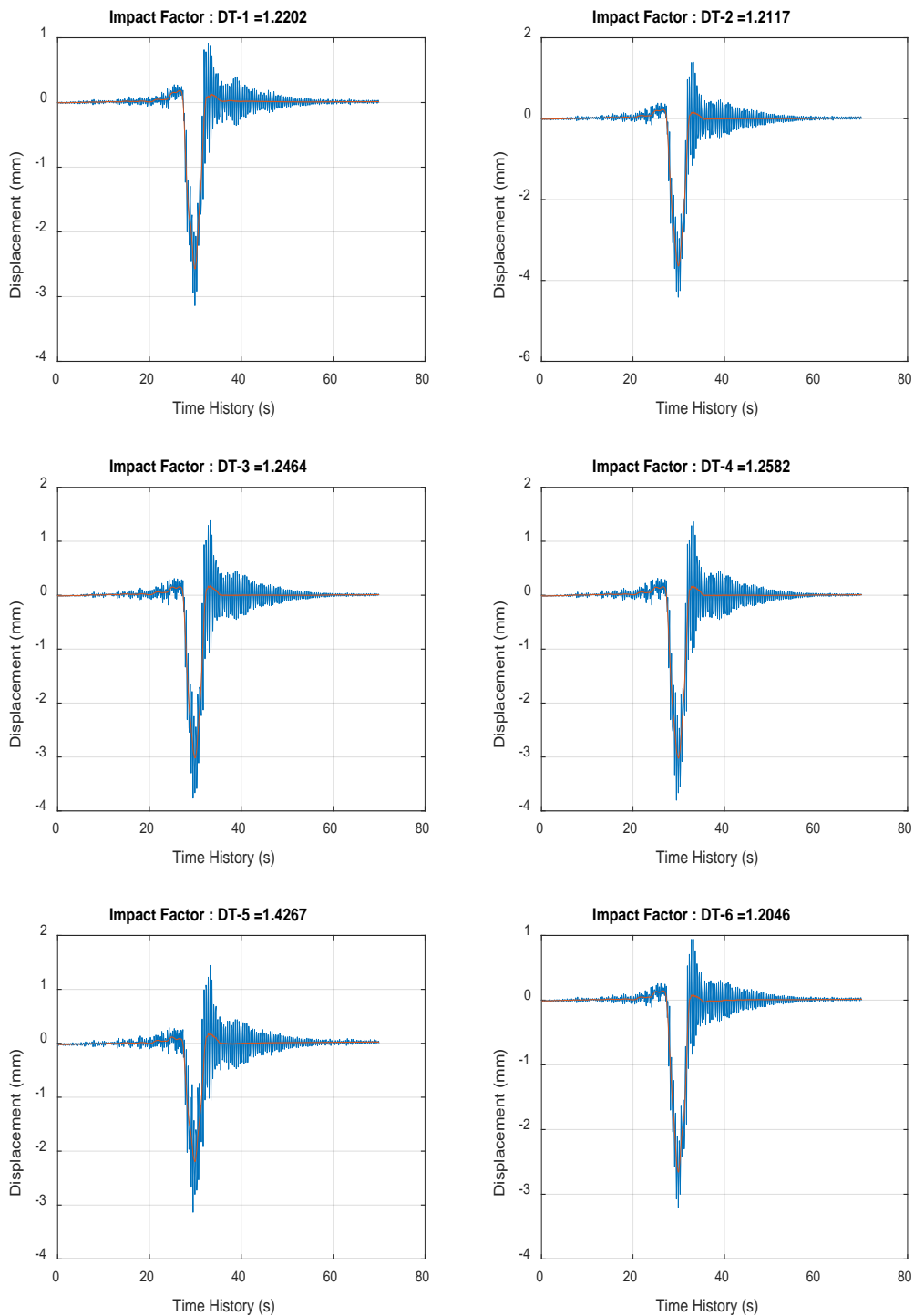


รูปที่ 5-72 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

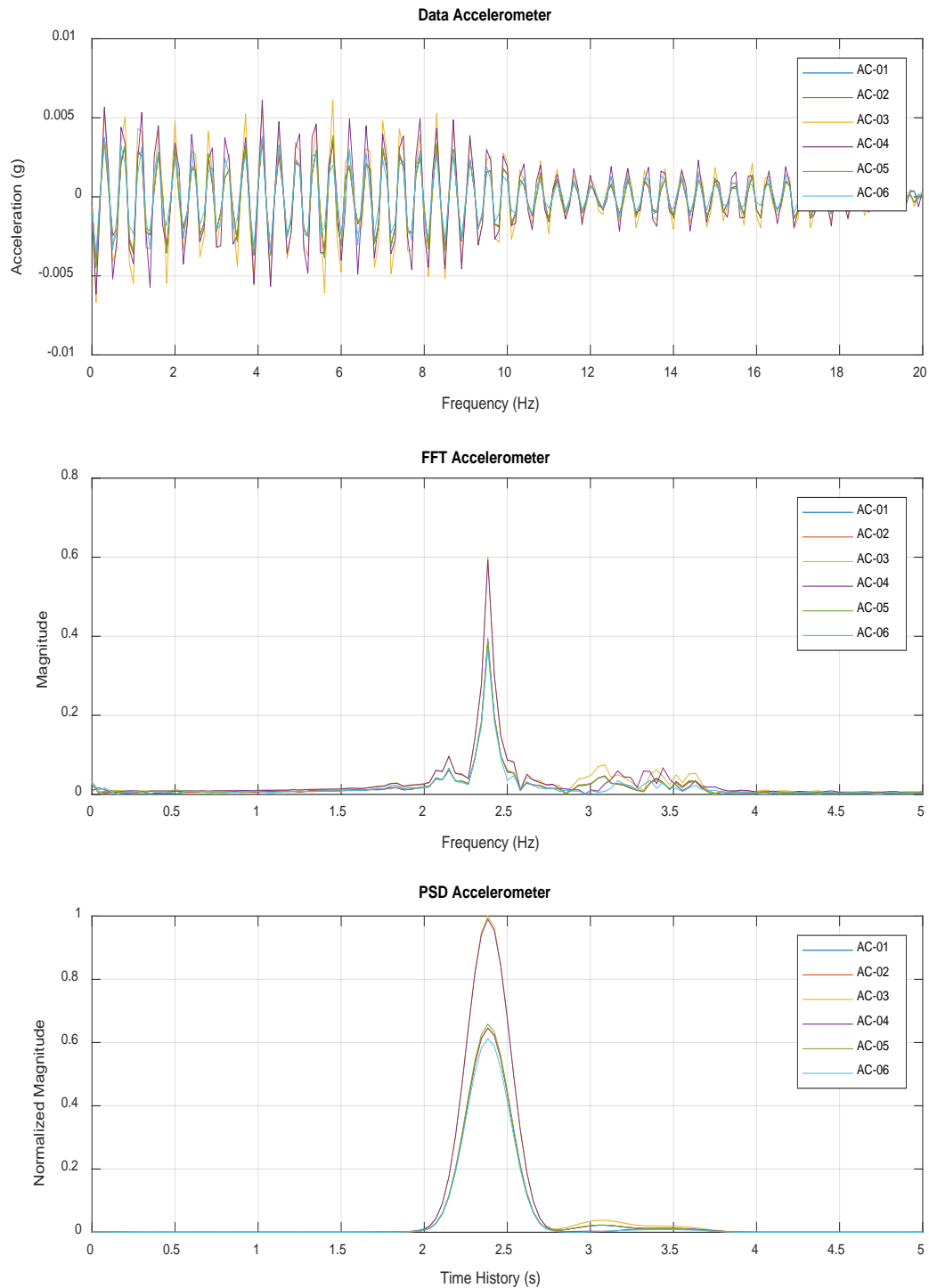


รูปที่ 5-73 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



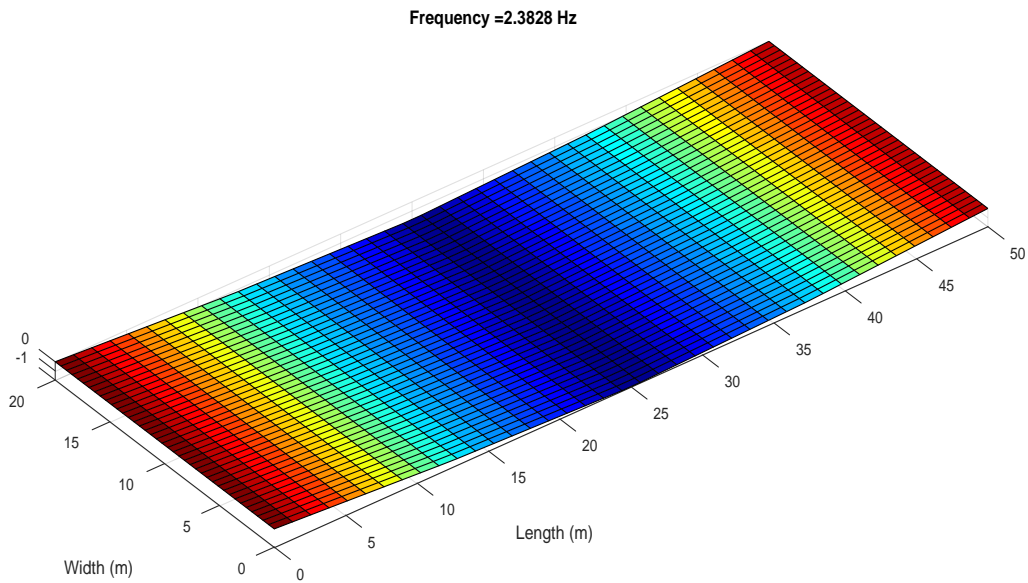


รูปที่ 5-74 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

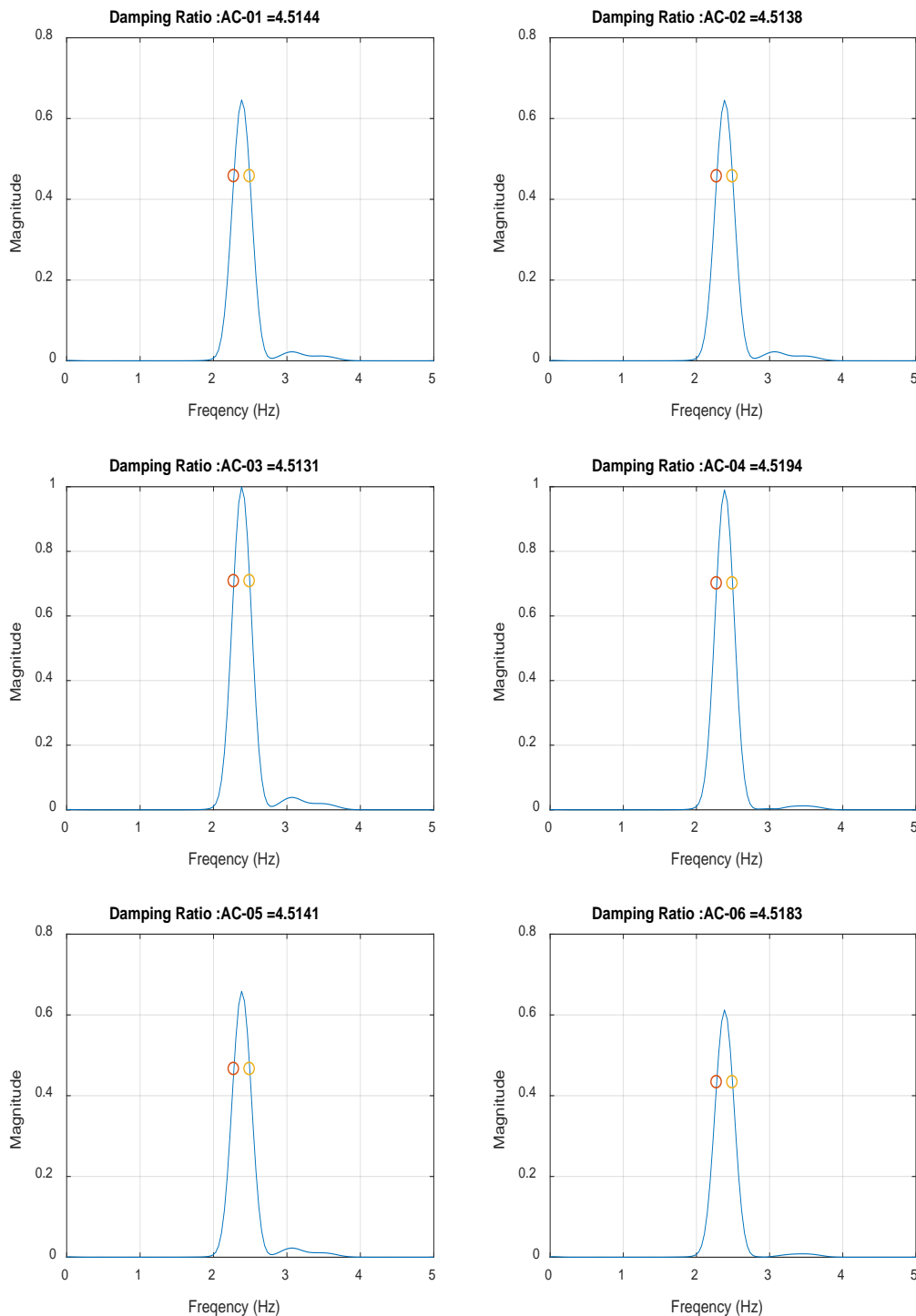


รูปที่ 5-75 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



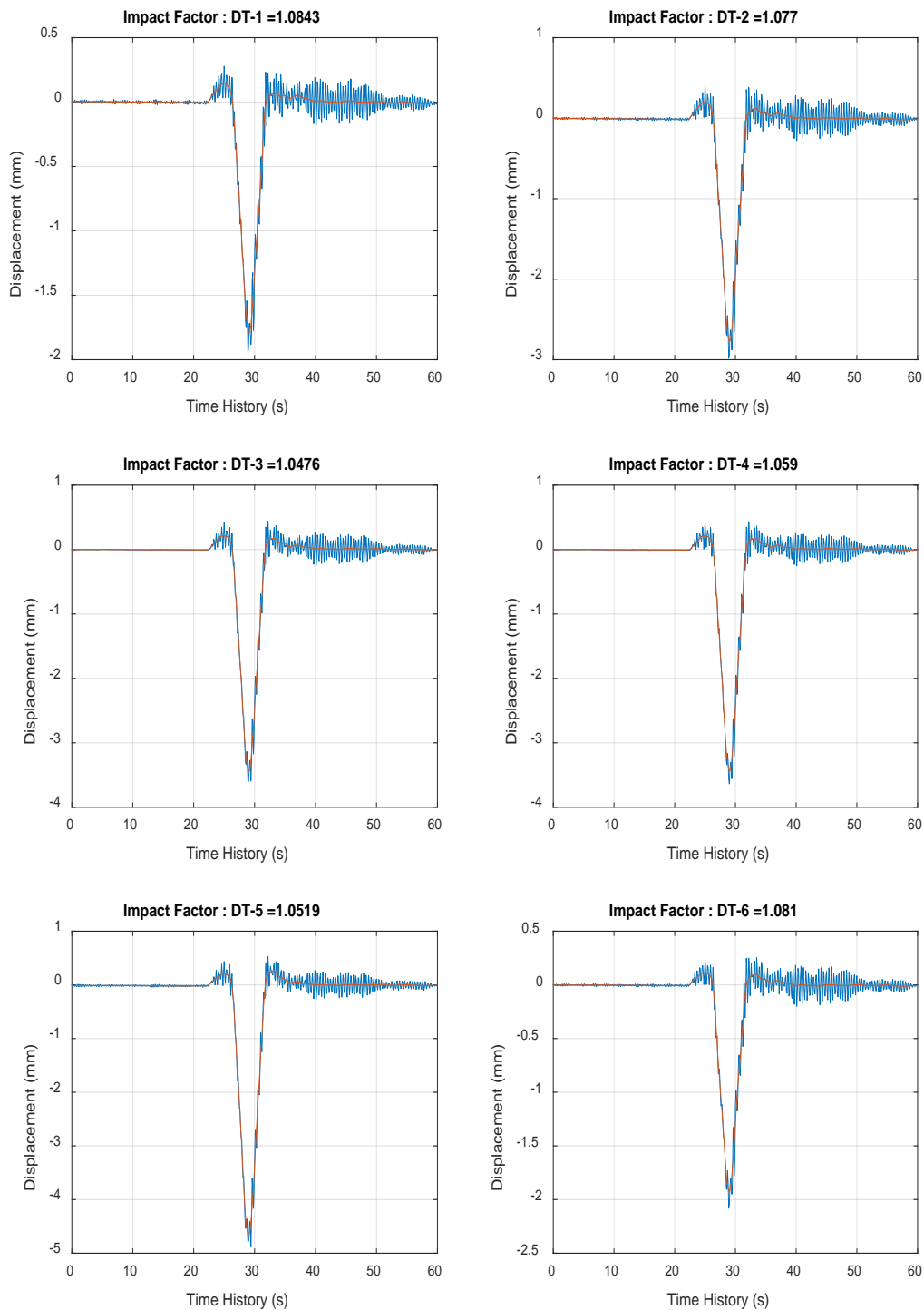


รูปที่ 5-76 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

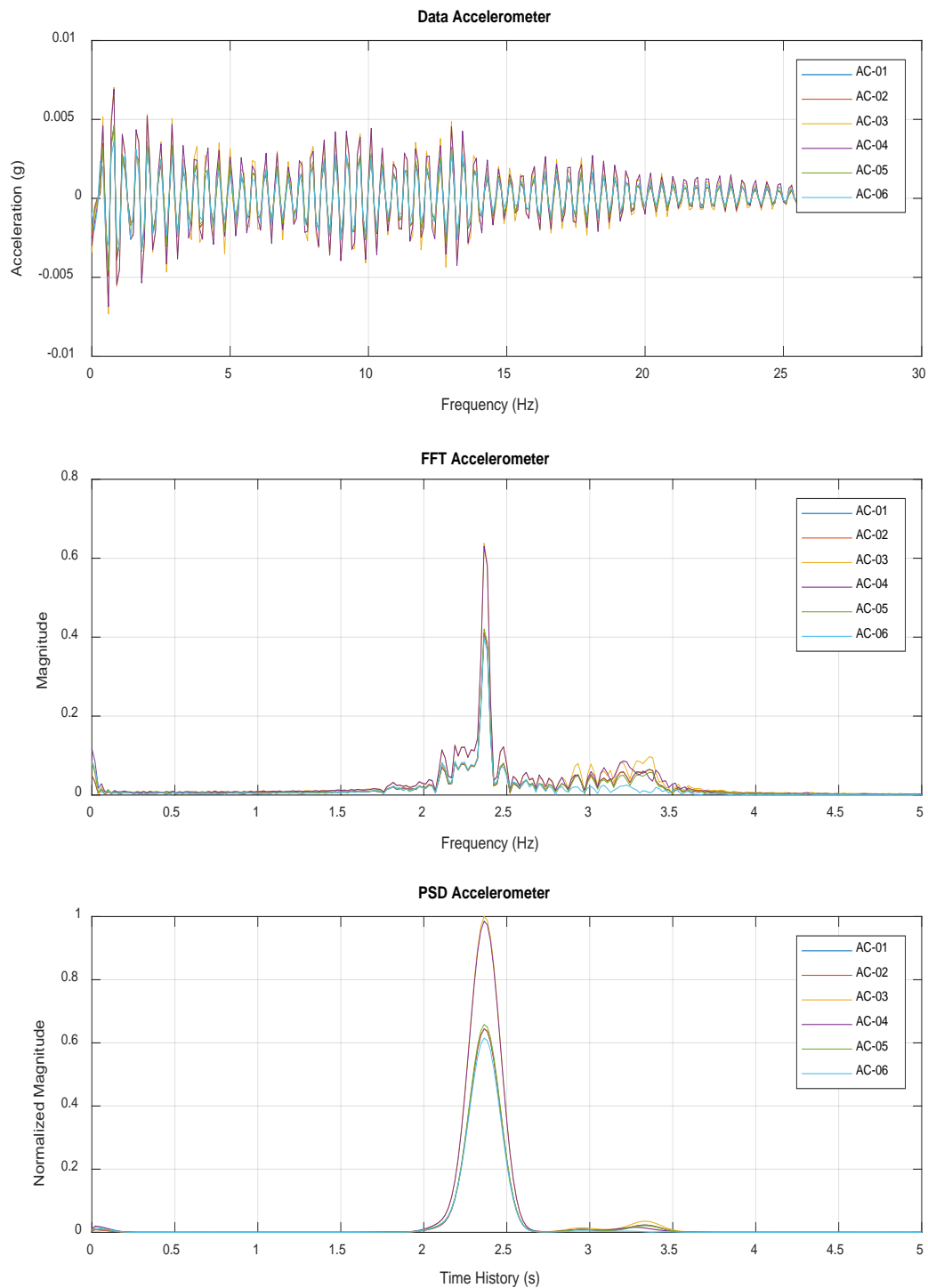


รูปที่ 5-77 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



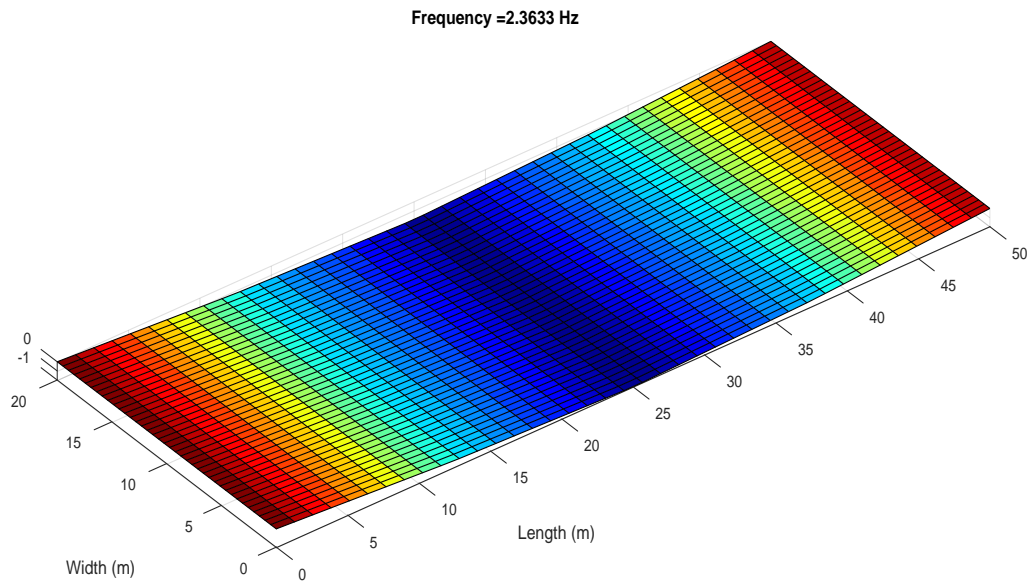


รูปที่ 5-78 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

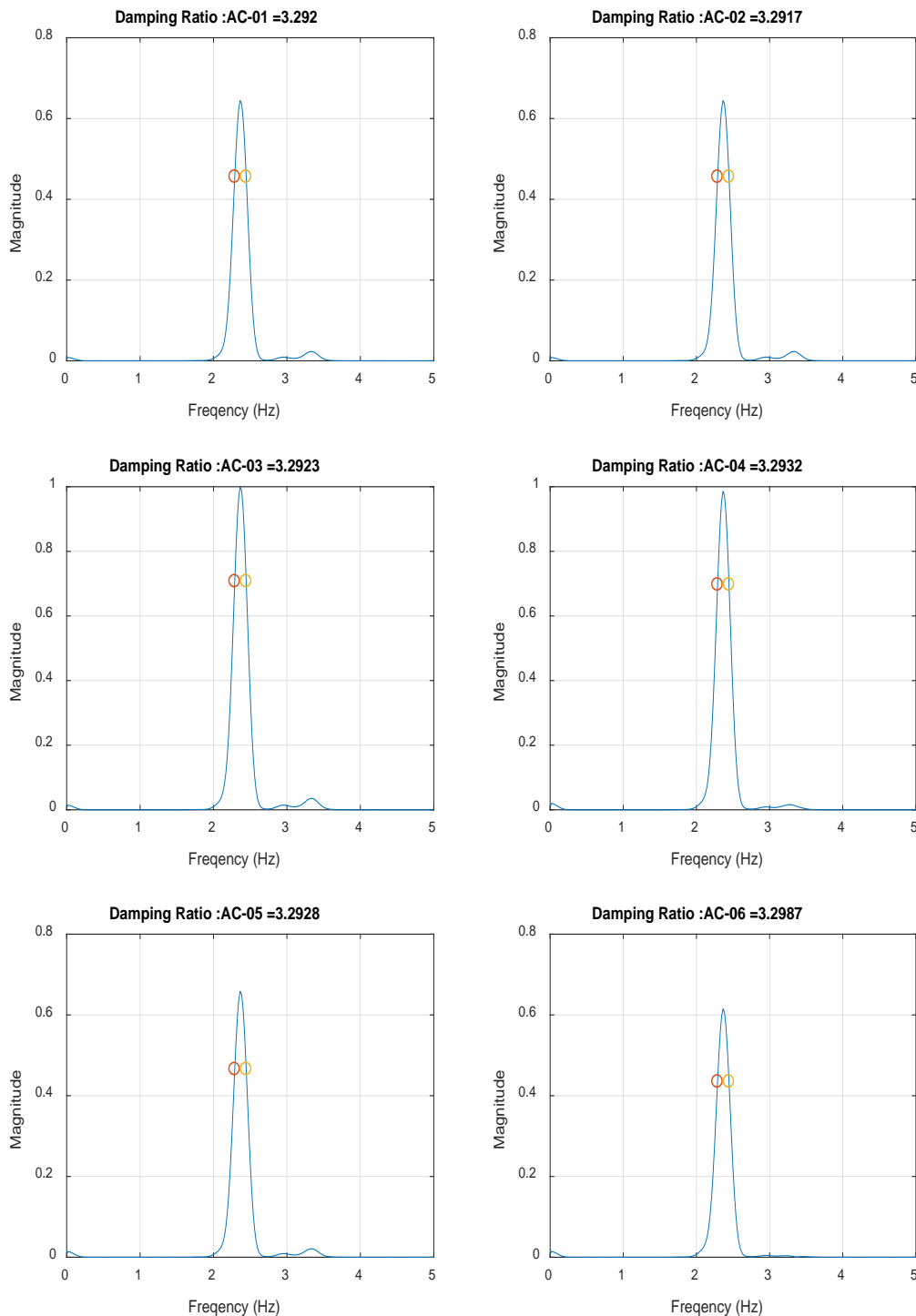


รูปที่ 5-79 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



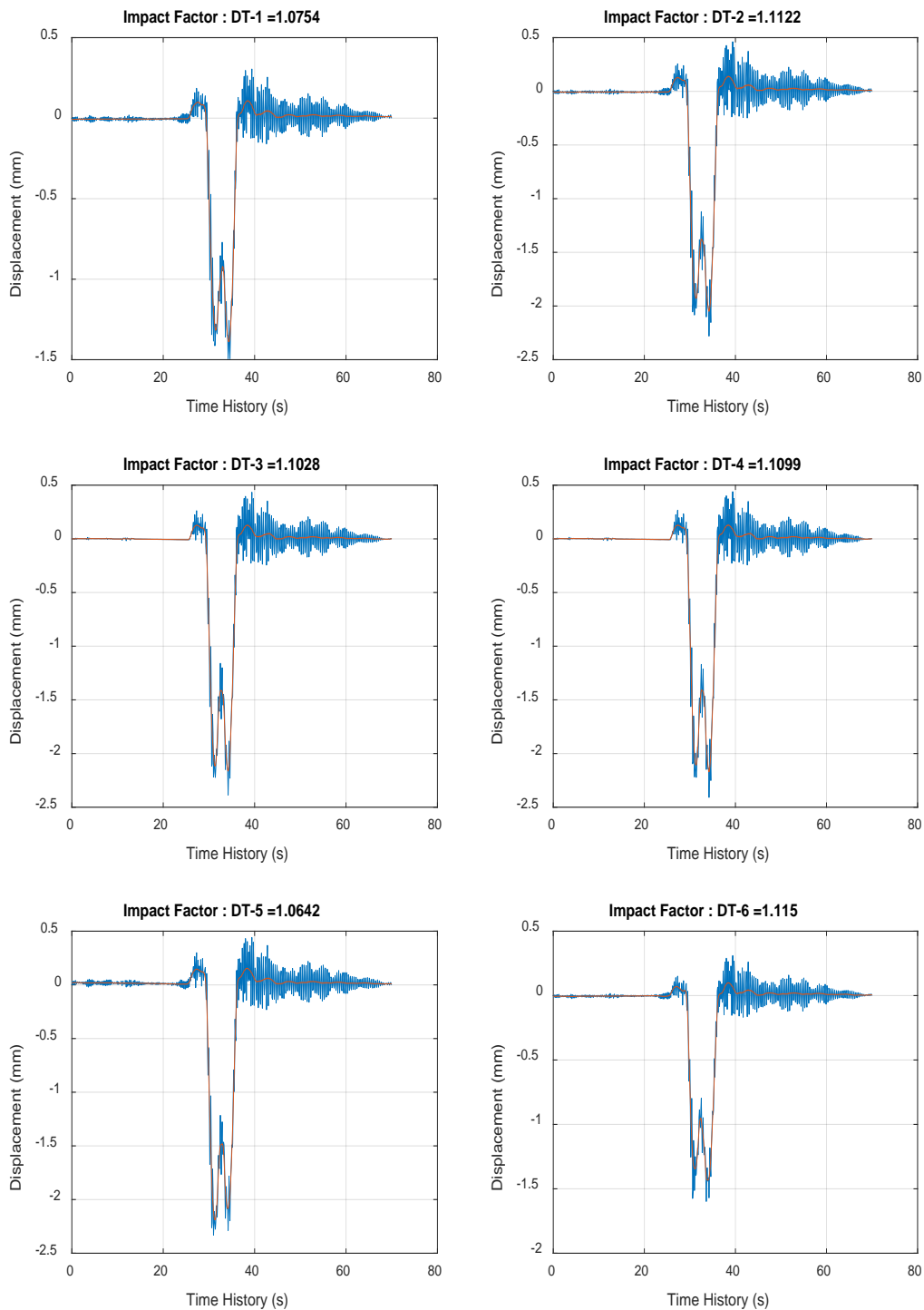


รูปที่ 5-80 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

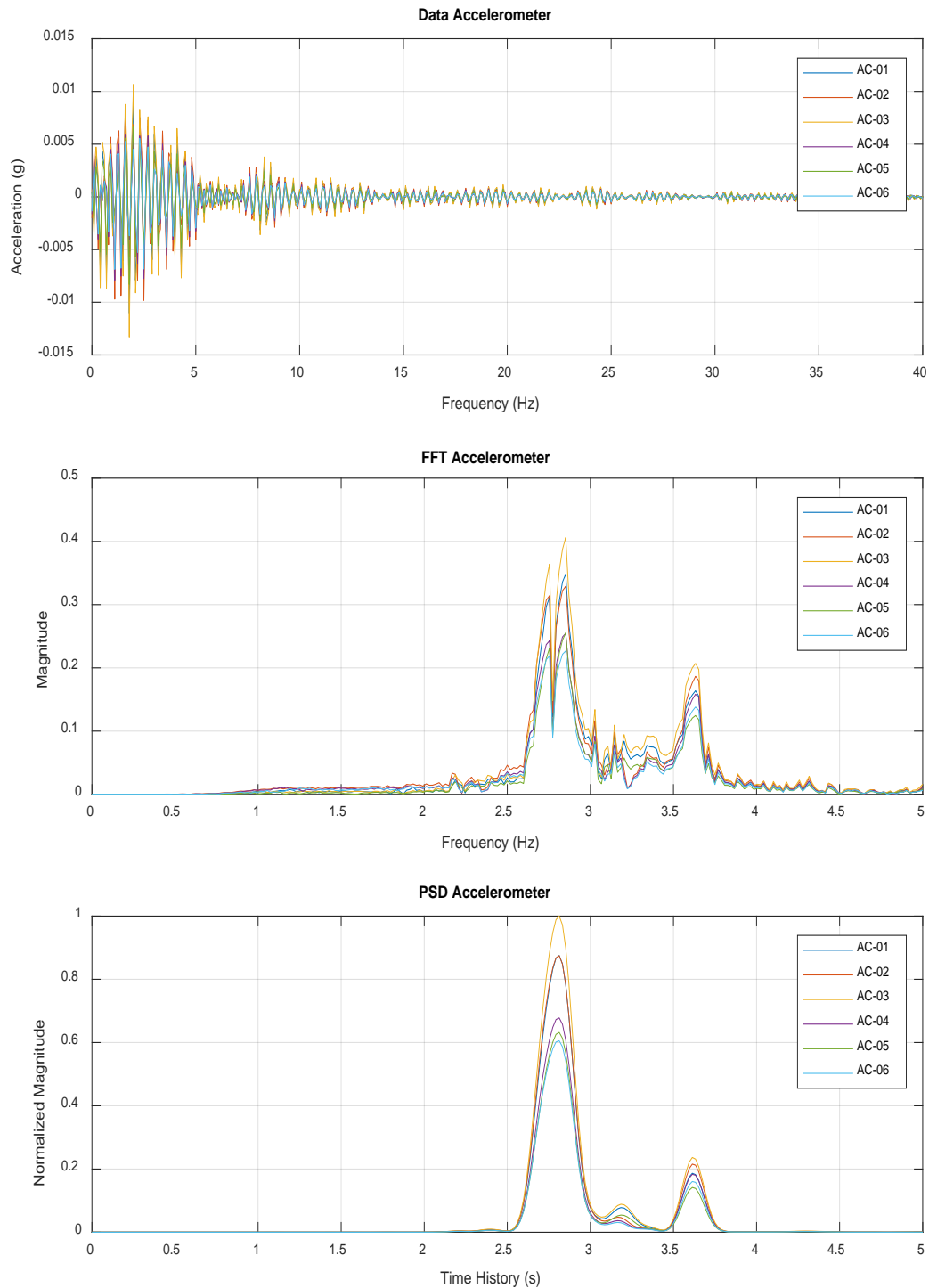


รูปที่ 5-81 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



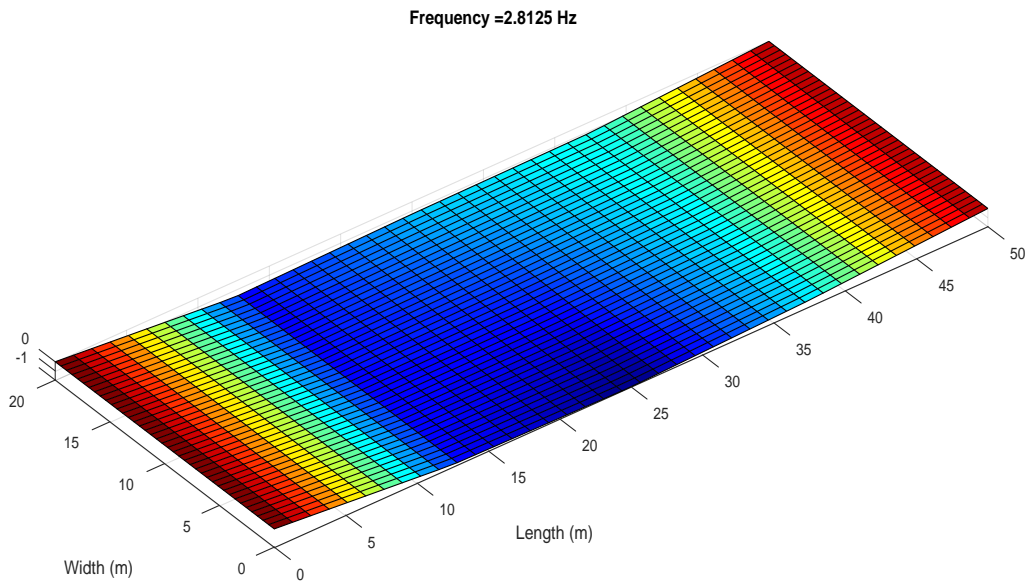


รูปที่ 5-82 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 11 (Span 11)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

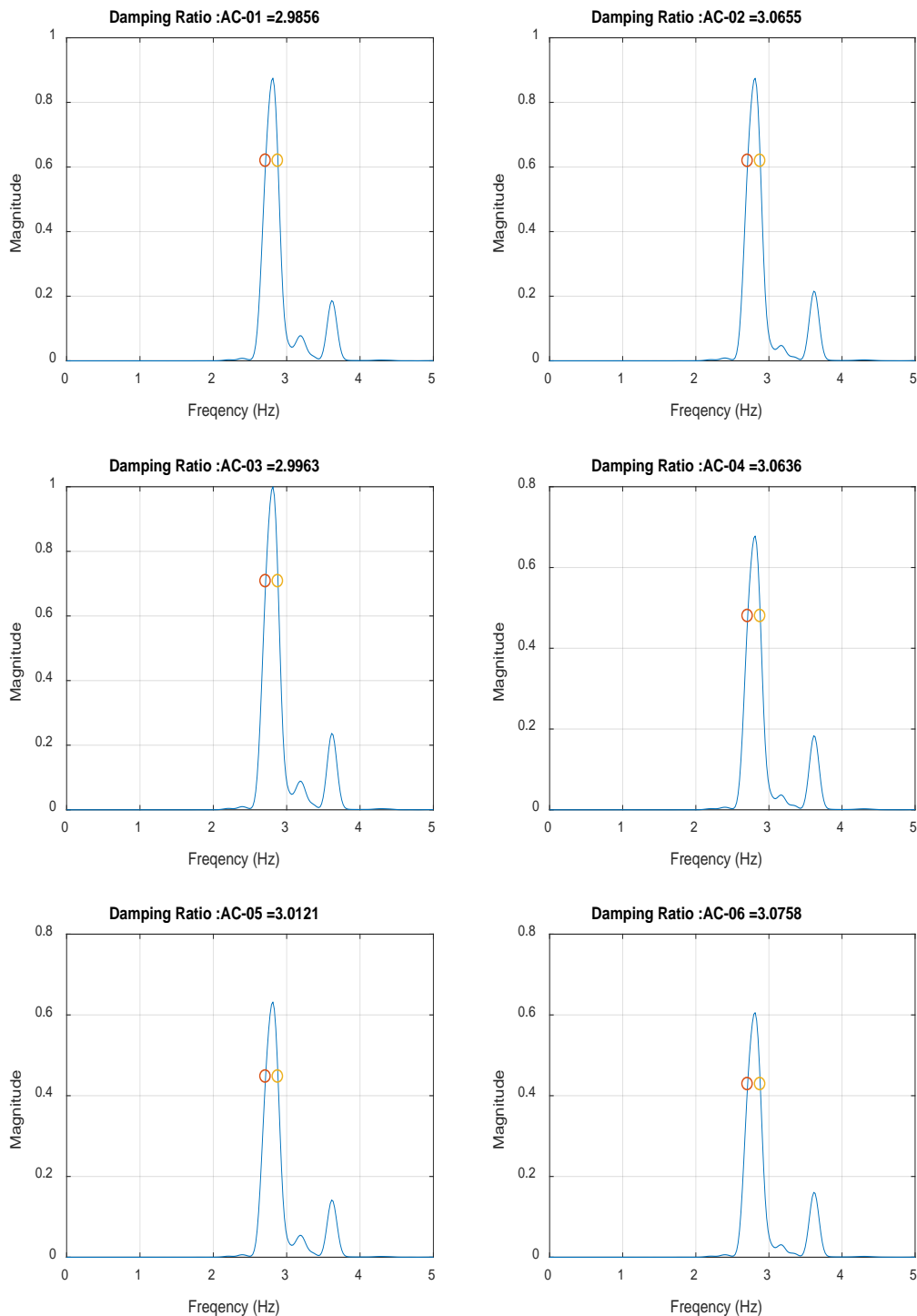


รูปที่ 5-83 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



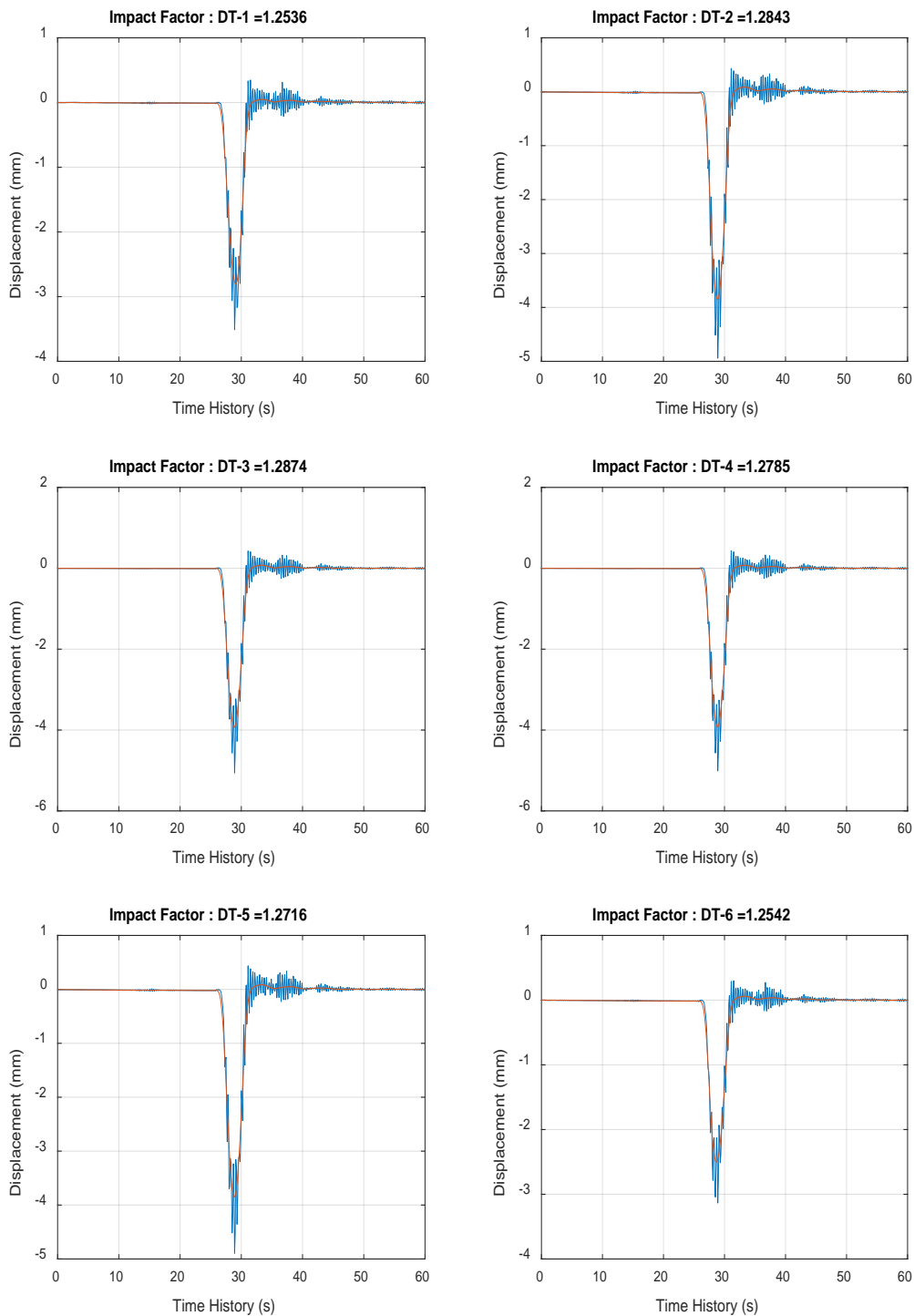


รูปที่ 5-84 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน

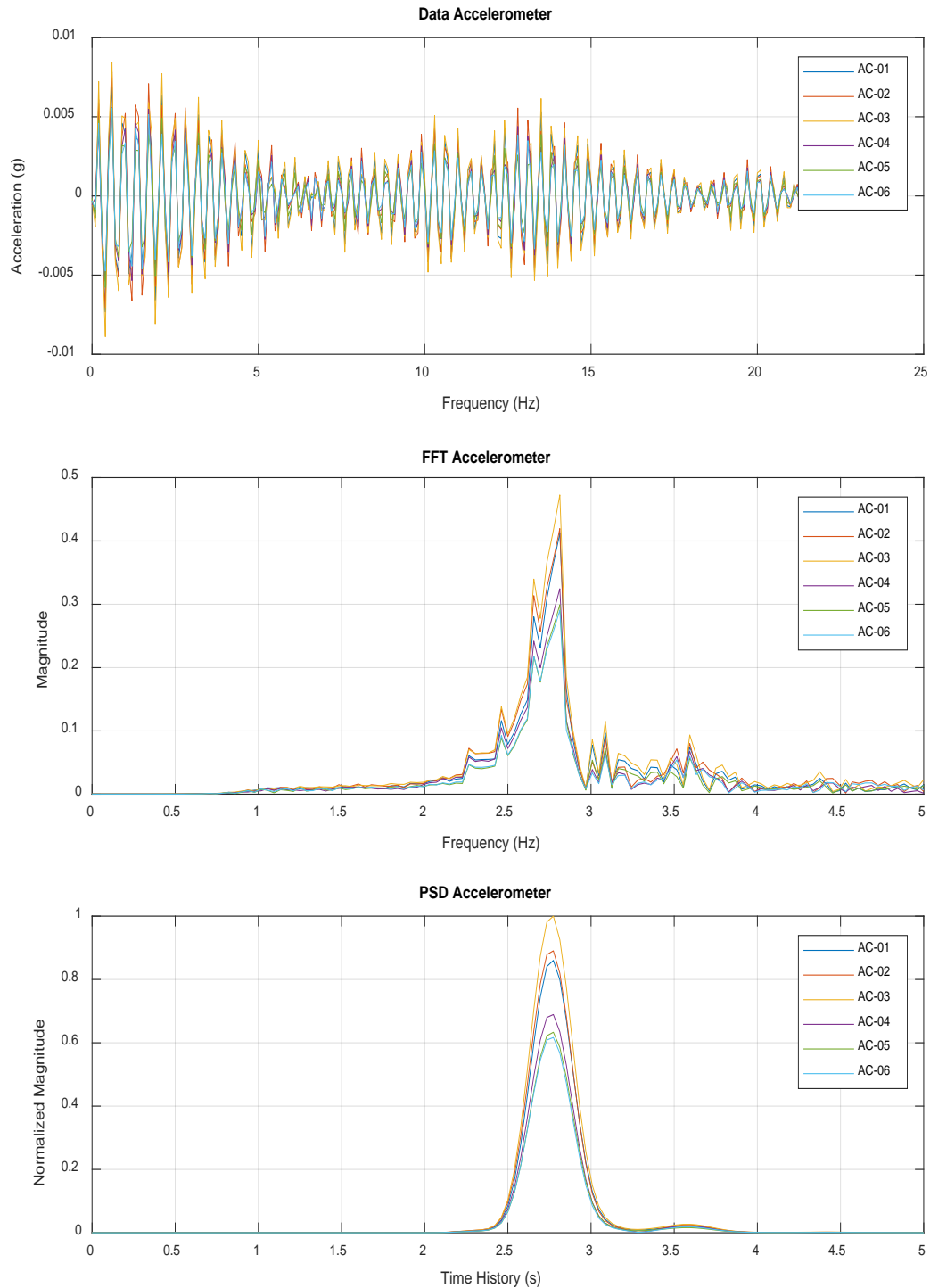


รูปที่ 5-85 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน

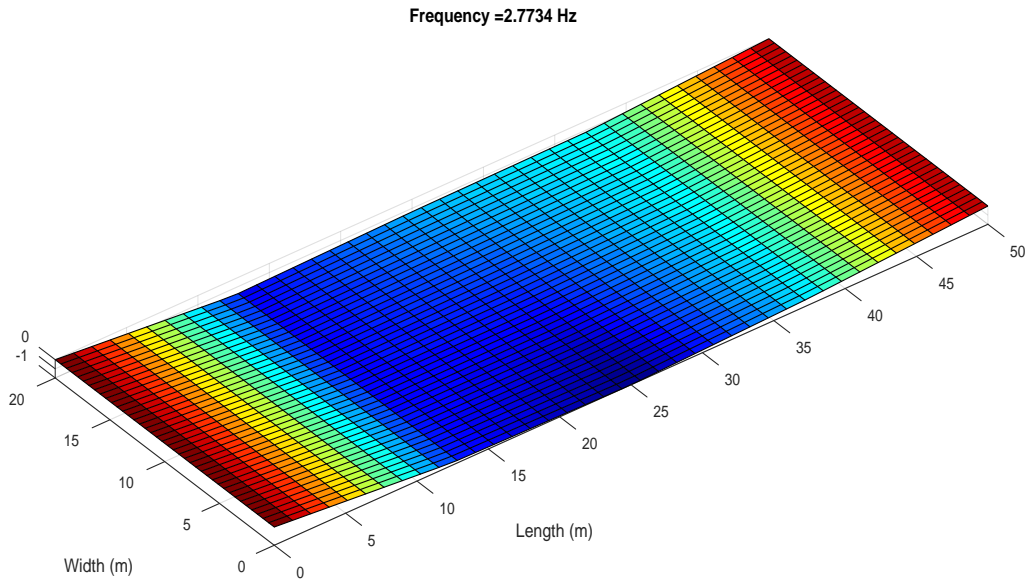




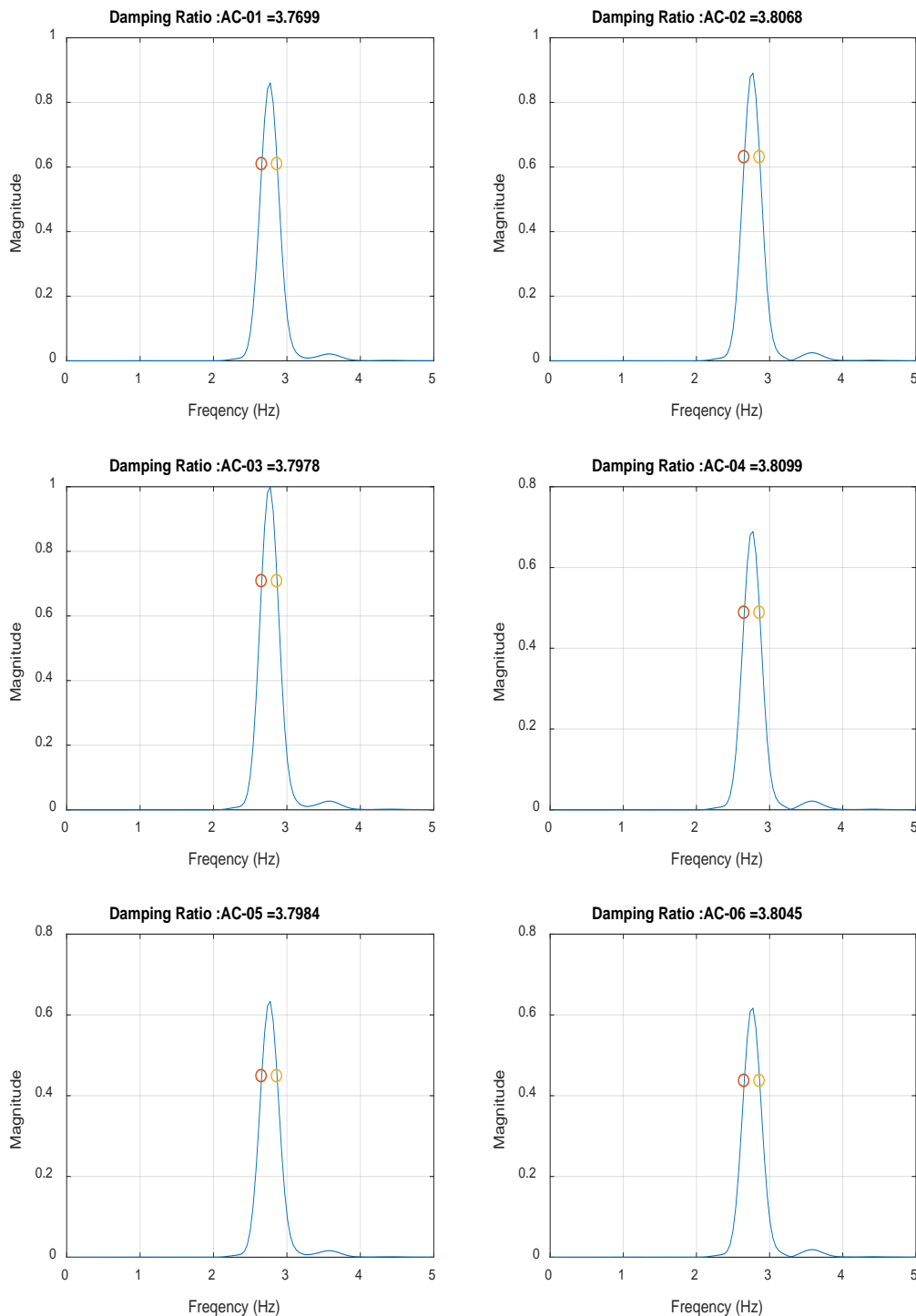
รูปที่ 5-86 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 1 วิ่งหน้ารถเสมอกัน



รูปที่ 5-87 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

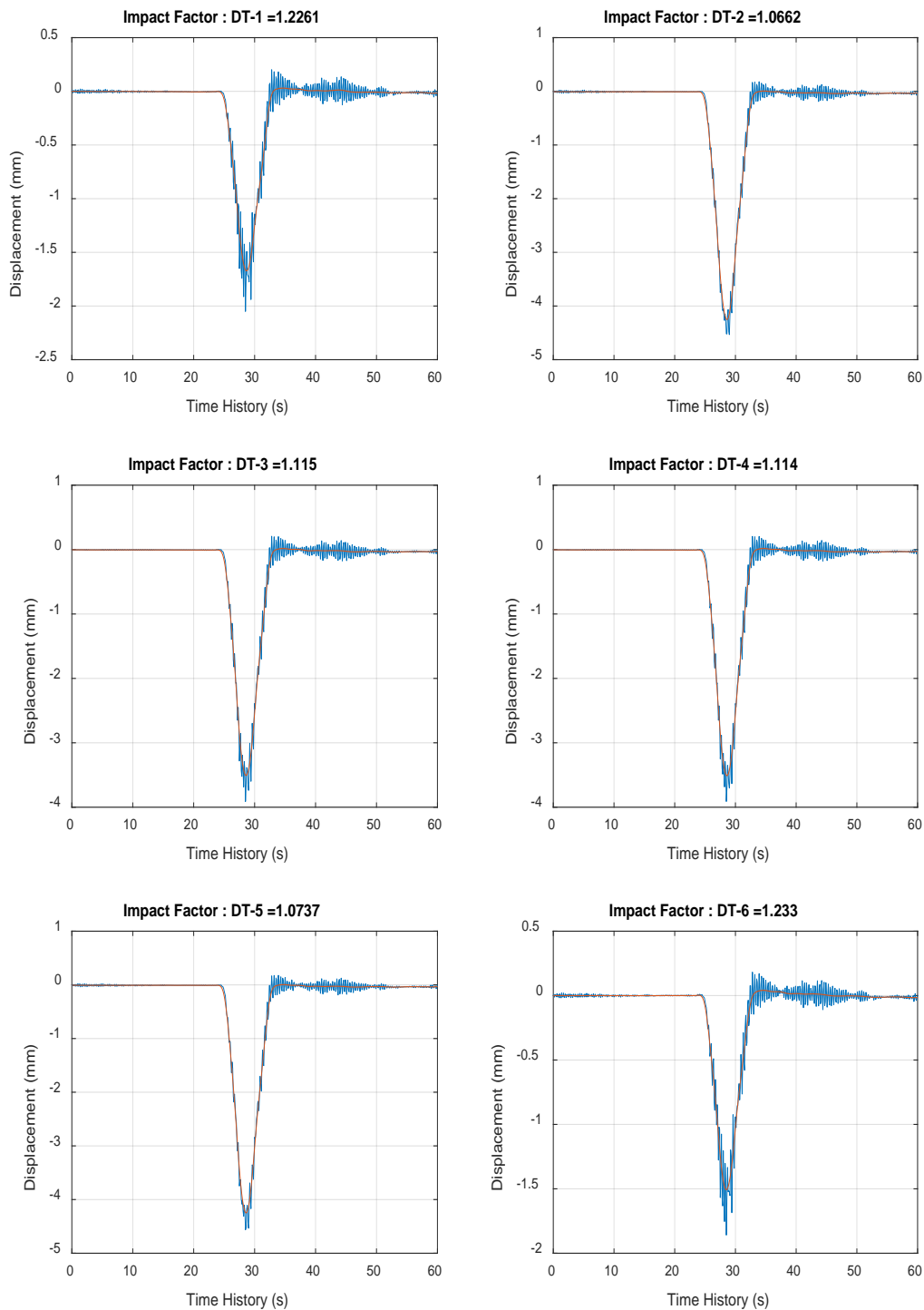


รูปที่ 5-88 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

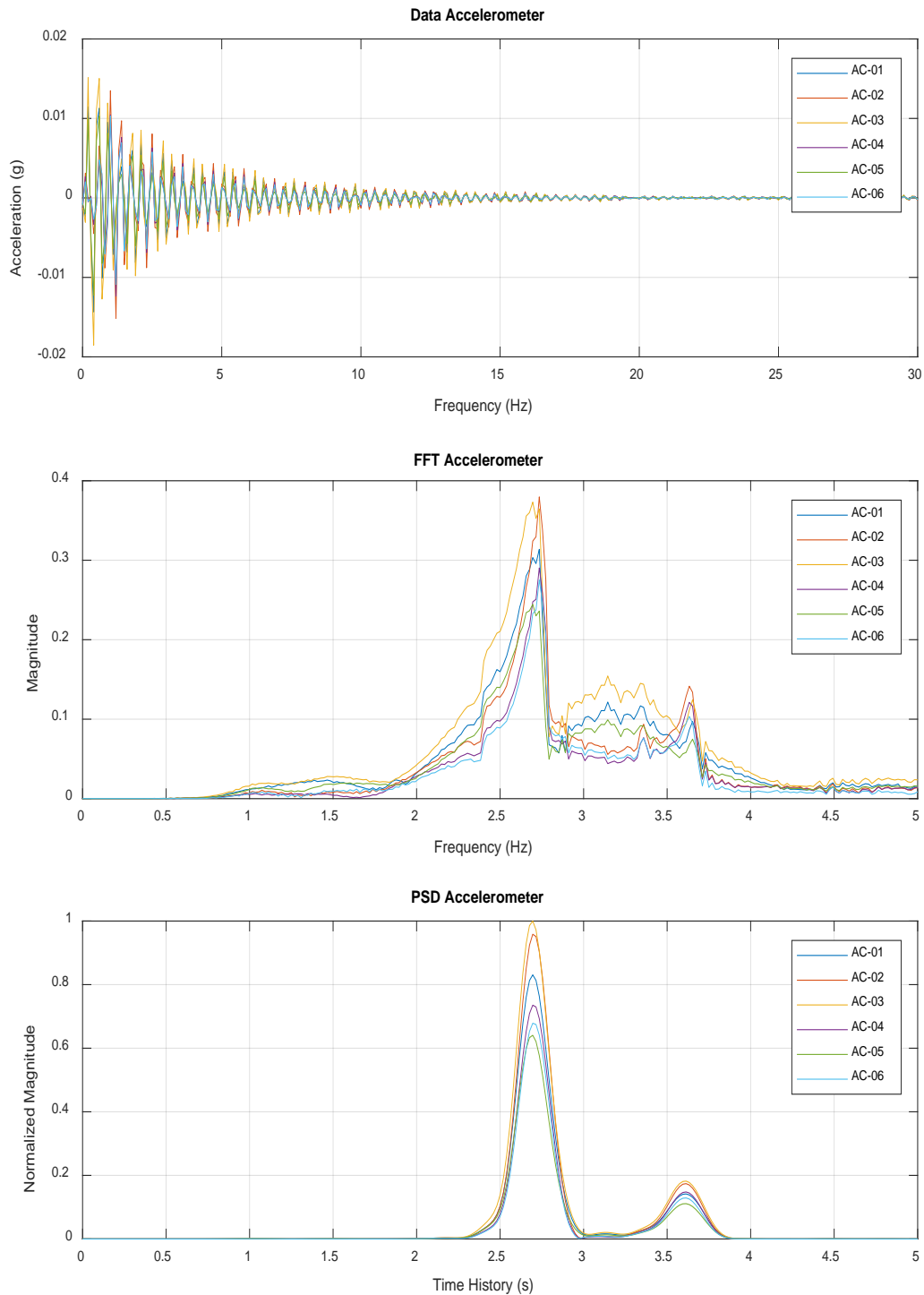


รูปที่ 5-89 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย



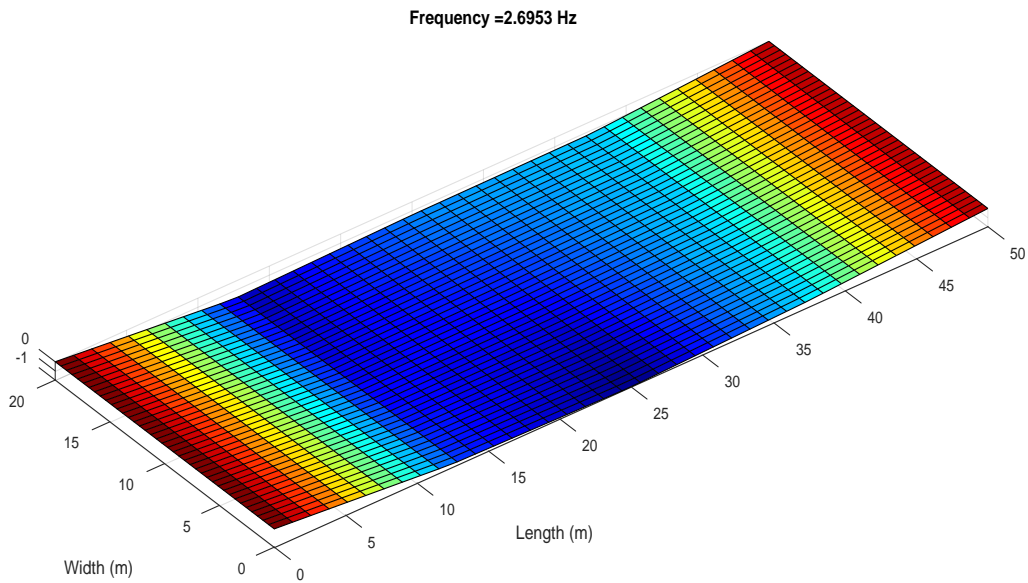


รูปที่ 5-90 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 2 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งซ้าย

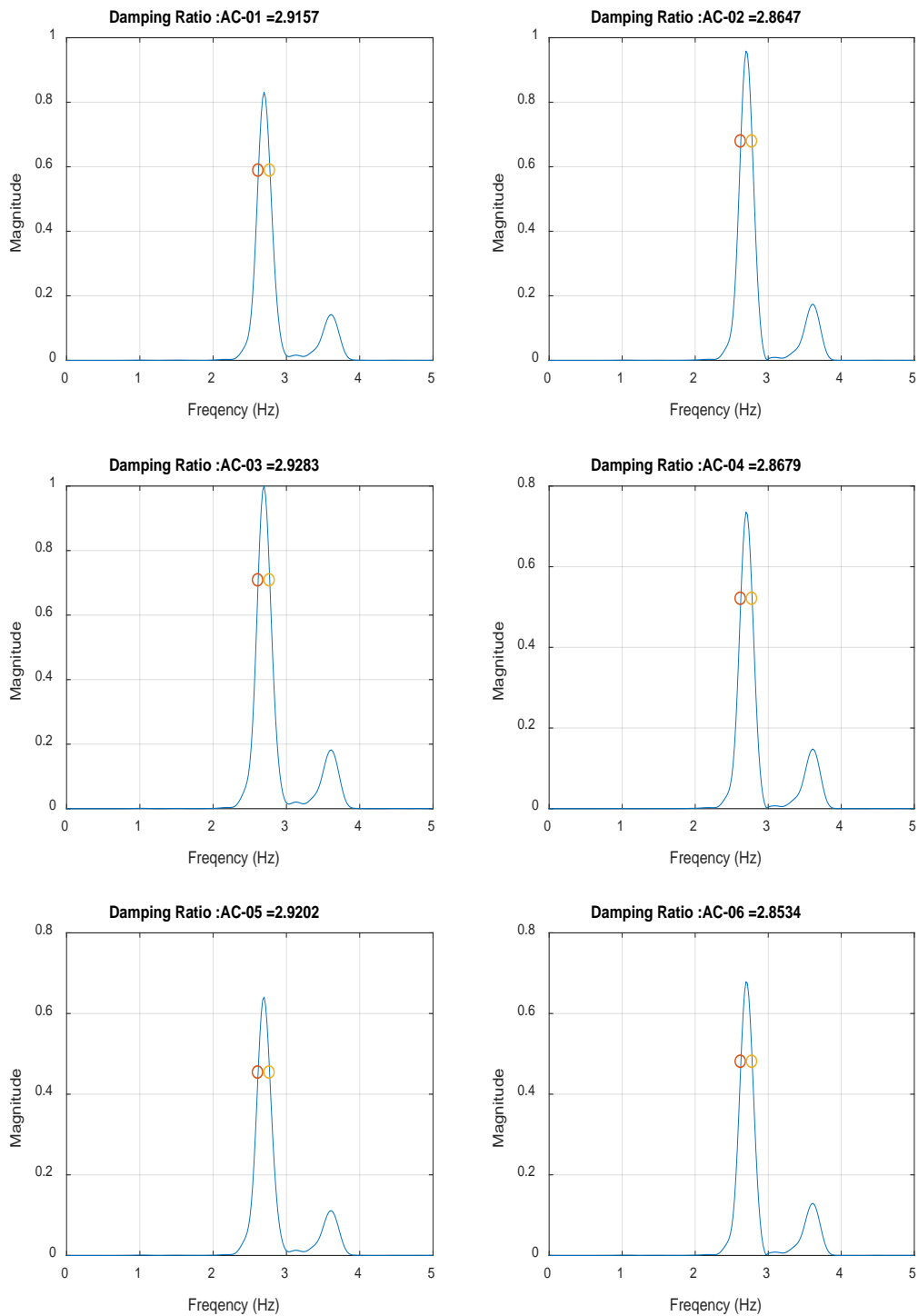


รูปที่ 5-91 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



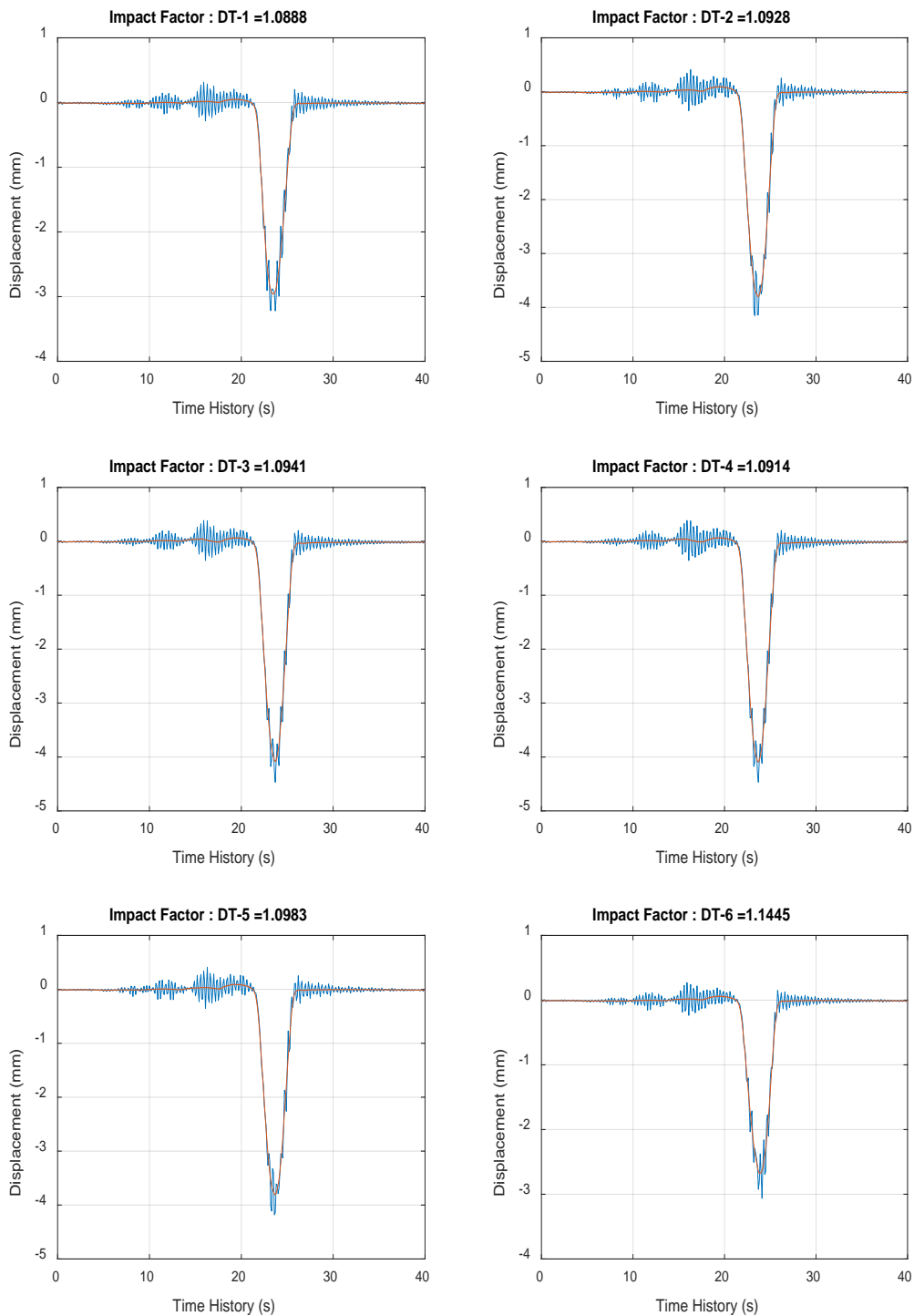


รูปที่ 5-92 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

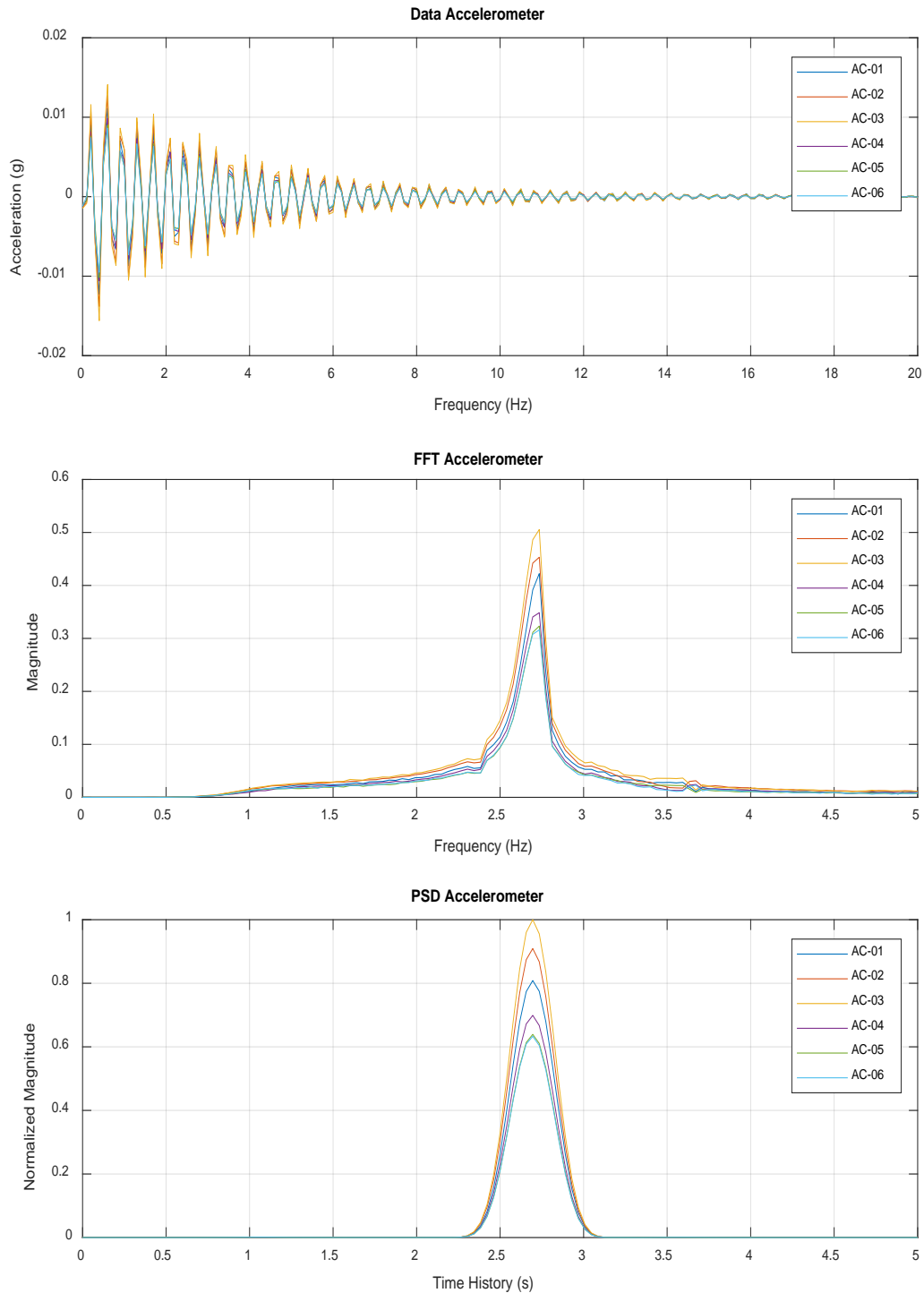


รูปที่ 5-93 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา

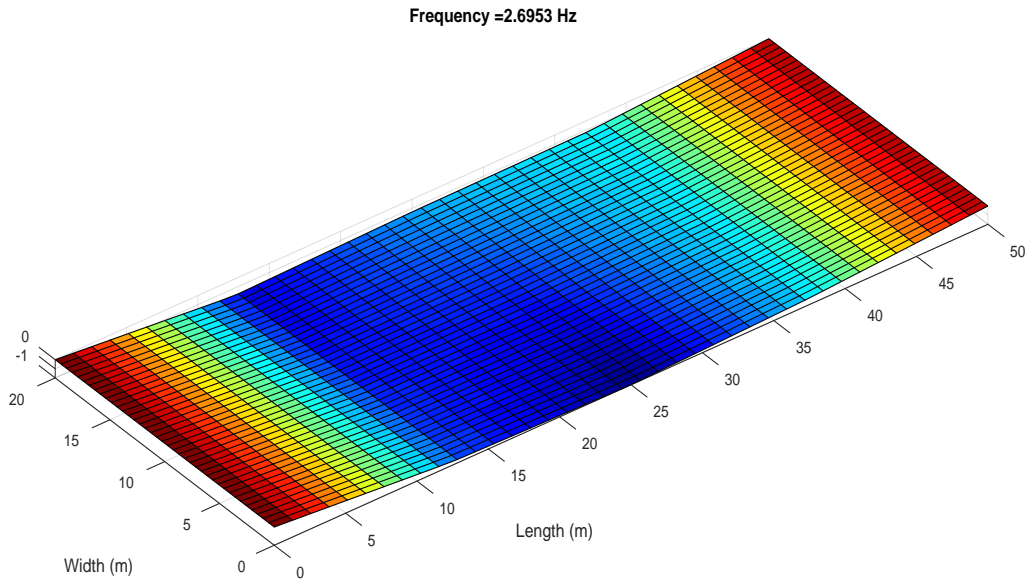




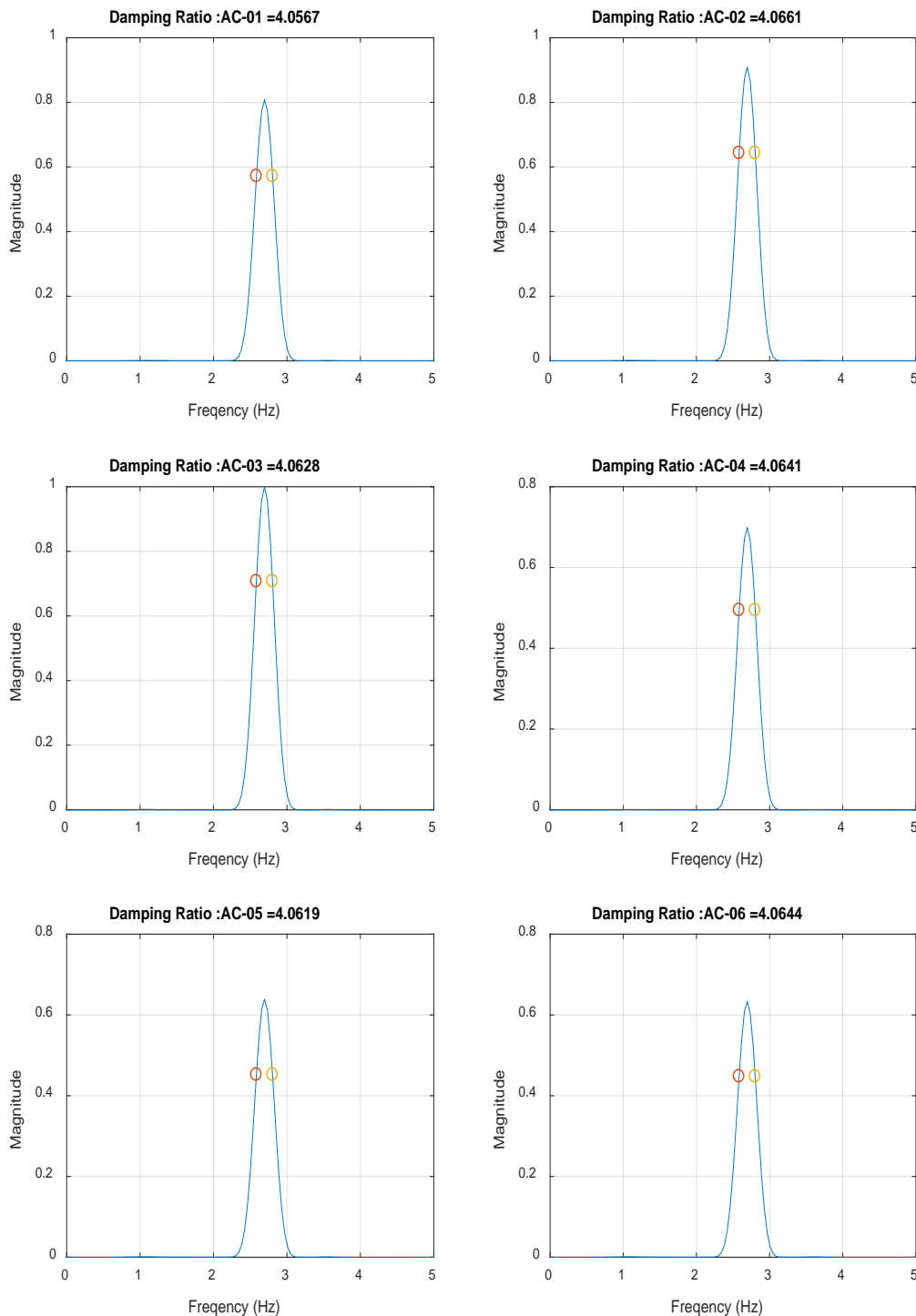
รูปที่ 5-94 วิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 3 เรียงแถว ช่องการจราจรฝั่งขวา



รูปที่ 5-95 สัญญาณการตรวจวัดพฤติกรรมช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

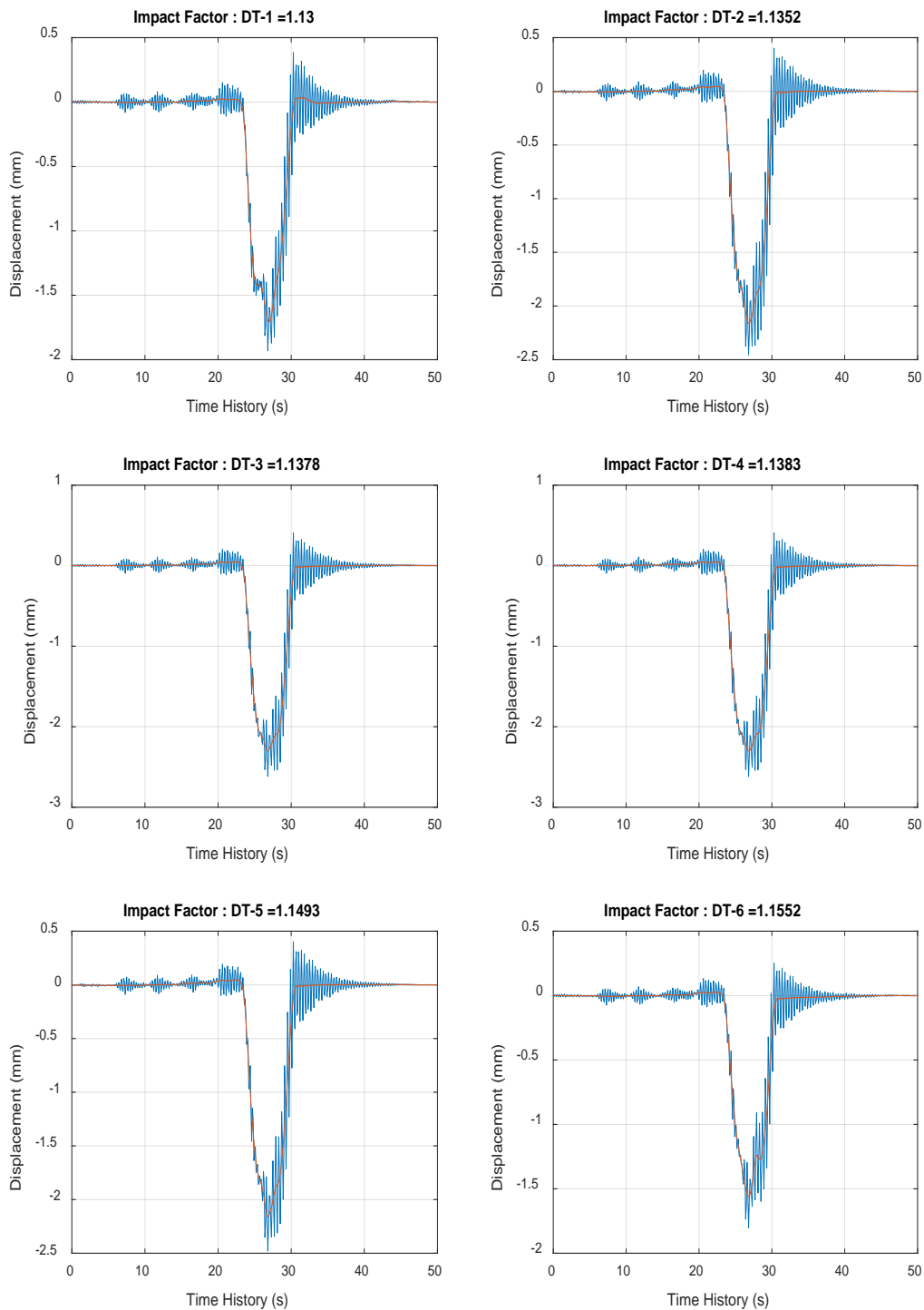


รูปที่ 5-96 วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)



รูปที่ 5-97 วิเคราะห์ค่าความหน่วง (Damping Ratio) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)





รูปที่ 5-98 วิเคราะห์ที่ตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) ช่วงสะพานที่ 12 (Span 12)
Dynamic 4 เรียงแถว กึ่งกลางสะพาน (คร่อมเลน)

5.5.2. สรุปการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมแบบพลวัต

ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) เป็นค่าจำเพาะของสะพานแต่ละตัว (Unique Characteristic) สะพานอาจถูกก่อสร้างด้วยมาตรฐานเดียวกัน แต่ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานก็อาจแตกต่างกันได้ ค่าความถี่ธรรมชาติอาจถูกนำมาใช้เป็นค่าที่บ่งบอกสติฟเนสในภาพรวม (Global Stiffness) ถ้าโครงสร้างมีสติฟเนสสูง ค่าความถี่ธรรมชาติจะสูงตามไปด้วย สะพานตัวเดียวกันหากสติฟเนสลดลงจากการเสื่อมสภาพ ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลงตามไปด้วย หรือถ้ามีการปรับปรุงให้โครงสร้างแข็งขึ้น (สติฟเนสสูงขึ้น) ค่าความถี่ธรรมชาติก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในแต่ละช่วงอายุสะพาน อาจมีการตรวจสอบค่าความถี่ธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการปรับแก้แบบจำลองสะพานให้มีสติฟเนสในภาพรวมใกล้เคียงกับสะพานจริง ณ ช่วงเวลานั้น เพื่อใช้แบบจำลองที่ปรับแก้แล้วประเมินการกระจายแรงภายในโครงสร้าง นอกจากนี้สติฟเนสของสะพานมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวช่วงสะพานเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานช่วงที่ยาวกว่ามีแนวโน้มต่ำลง ผลการวิเคราะห์ 4 ช่วงสะพานแสดงในตารางตารางที่ 5-7

ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) เป็นคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการสลายพลังงานการสั่นไหว ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง โดยทั่วไปหากโครงสร้างมีชิ้นส่วนที่สามารถขยับตัวได้มาก หรือมีส่วนประกอบของวัสดุที่ช่วยสลายพลังงาน หรือมีรอยแตกร้าว ค่าอัตราส่วนความหน่วงก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยทั่วไปเป็นค่าที่ความแปรปรวนค่อนข้างสูง ผลการวิเคราะห์ 4 ช่วงสะพานแสดงในตารางที่ 5-7

ค่าตัวคูณเพิ่มแรงกระแทก (Impact Factor) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับแรงกระทำไดนามิกที่เพิ่มขึ้นจากระดับแรงกระทำแบบสถิต โดยมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO LRFD กำหนดค่าตัวคูณเพิ่มแรงกระแทกไว้ 1.33 ดังนั้นหากผลทดสอบพฤติกรรมสะพานมีค่าต่ำกว่า 1.33 แสดงว่าแรงกระแทกยังอยู่ในสมมุติฐานการออกแบบ ผลการวิเคราะห์ 4 ช่วงสะพานแสดงในตารางที่ 5-8



ตารางที่ 5-7 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency และ Damping Ratio

Span	case	Frequency (Hz)	Damping Ratio					
			AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06
Span1	DY1	2.500	3.744	3.745	3.747	3.750	3.756	3.755
	DY2	2.539	4.836	4.836	4.835	4.828	4.834	4.826
	DY3	2.539	2.806	2.806	2.809	2.806	2.812	2.809
	DY4	2.539	4.222	4.222	4.224	4.219	4.224	4.221
	MEAN	2.529	3.902	3.902	3.904	3.901	3.907	3.903
Span10	DY1	2.344	3.529	3.611	3.510	3.573	3.504	3.559
	DY2	2.324	2.501	2.502	2.497	2.499	2.493	2.496
	DY3	2.305	3.840	3.840	3.855	3.845	3.860	3.851
	DY4	2.324	3.376	3.375	3.402	3.388	3.387	3.420
	MEAN	2.324	3.312	3.332	3.316	3.326	3.311	3.332
Span11	DY1	2.383	2.624	2.623	2.617	2.616	2.613	2.598
	DY2	2.373	1.518	1.518	1.510	1.511	1.505	1.485
	DY3	2.383	4.514	4.514	4.513	4.519	4.514	4.518
	DY4	2.363	3.292	3.292	3.292	3.293	3.293	3.299
	MEAN	2.375	2.987	2.987	2.983	2.985	2.981	2.975
Span12	DY1	2.813	2.986	3.066	2.996	3.064	3.012	3.076
	DY2	2.773	3.770	3.807	3.798	3.810	3.798	3.805
	DY3	2.695	2.916	2.865	2.928	2.868	2.920	2.853
	DY4	2.695	4.057	4.066	4.063	4.064	4.062	4.064
	MEAN	2.744	3.432	3.451	3.446	3.451	3.448	3.450

ตารางที่ 5-8 ผลการวิเคราะห์ Impact Factor

Span	case	Impact Factor					
		DT-01	DT-02	DT-03	DT-04	DT-05	DT-06
Span1	DY1	1.154	1.198	1.169	1.177	1.148	1.190
	DY2	1.150	1.121	1.141	1.141	1.282	1.138
	DY3	1.188	1.225	1.197	1.197	1.181	1.242
	DY4	1.188	1.233	1.213	1.199	1.220	1.253
	MEAN	1.170	1.194	1.180	1.178	1.208	1.206
Span10	DY1	1.103	1.105	1.109	1.119	1.128	1.109
	DY2	1.146	1.143	1.169	1.158	1.186	1.110
	DY3	1.301	1.279	1.153	1.167	1.121	1.311
	DY4	1.122	1.128	1.134	1.133	1.143	1.152
	MEAN	1.168	1.163	1.141	1.144	1.144	1.171
Span11	DY1	1.174	1.108	1.072	1.078	1.122	1.148
	DY2	1.220	1.212	1.246	1.258	1.427	1.205
	DY3	1.084	1.077	1.048	1.059	1.052	1.081
	DY4	1.075	1.112	1.103	1.110	1.064	1.115
	MEAN	1.138	1.127	1.117	1.126	1.166	1.137
Span12	DY1	1.254	1.284	1.287	1.279	1.272	1.254
	DY2	1.226	1.066	1.115	1.114	1.074	1.233
	DY3	1.089	1.093	1.094	1.091	1.098	1.145
	DY4	1.130	1.135	1.138	1.138	1.149	1.155
	MEAN	1.175	1.145	1.159	1.156	1.148	1.197

5.6 การทดสอบภายใต้สภาวะใช้งาน

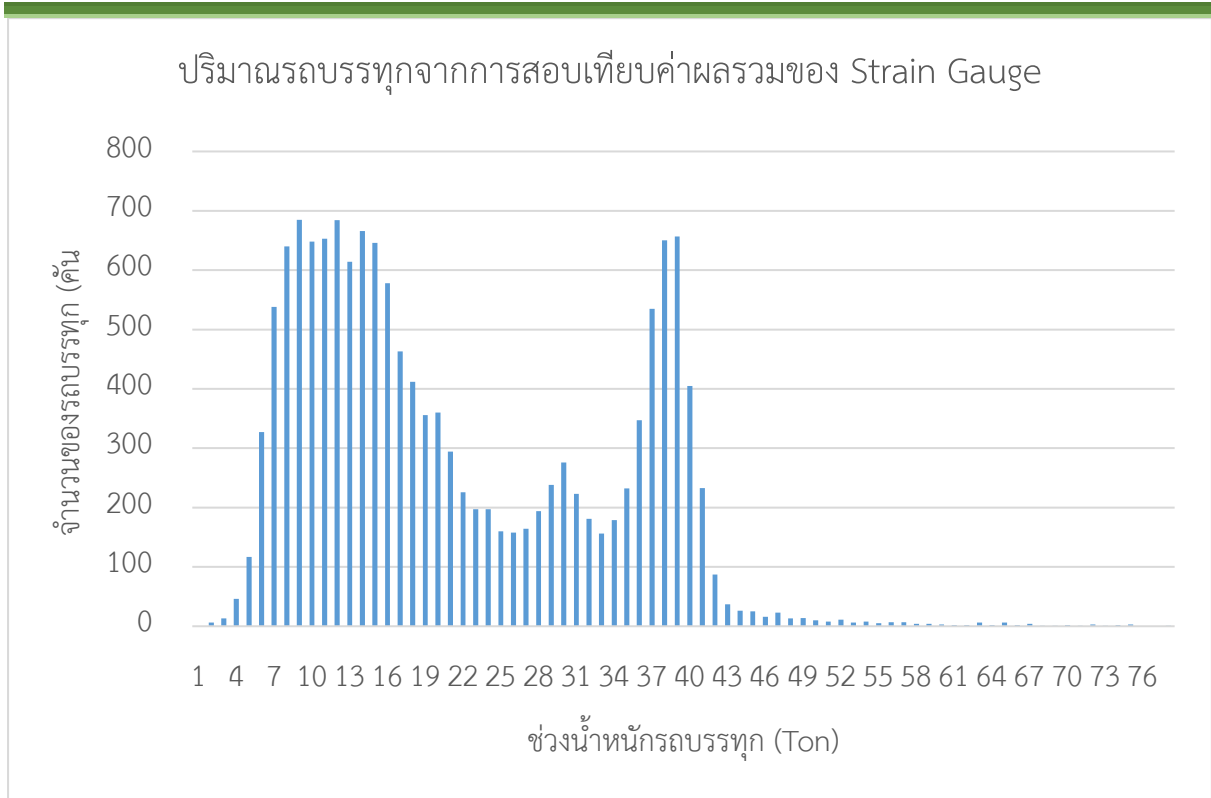
ที่ปรึกษาได้ทำการสอบเทียบค่าผลรวมของ Strain Gauge ทั้ง 20 ตำแหน่ง กับน้ำหนัก
รถบรรทุกจากการทดสอบแบบ Static 2 (ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดหน้าเสมอที่ตำแหน่ง
L/2 ของความยาวช่วง ทั้งสองช่องจราจร โดยทดสอบทั้งหมด 1 ช่วงสะพานได้แก่ ช่วงสะพานที่ 11



ตารางที่ 5-5 แสดงค่า Strain ที่ได้จากทดสอบแบบสถิตช่วงสะพานที่ 11 โดยจะใช้ผลรวมของ Strain ใน Static 2 ได้เท่ากับ 810.529 macrostrains และในการจราจรปกติ จะเกิดแรงกระแทกจากการเคลื่อนตัวของรถ จึงต้องคำนวณ Impact Factor ด้วย จะได้เป็น 810.529 คูณกับ 1.135 (ค่า Impact Factor เฉลี่ยของ Span 11) เท่ากับ 919.950 จากนั้น ทำการสอบเทียบค่าผลรวมของ Strain Gauge จากผลการตรวจวัดภายใต้การจราจรปกติเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งได้ผลแสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5-9 ปริมาณรถบรรทุกจากการสอบเทียบค่าผลรวมของ Strain Gauge

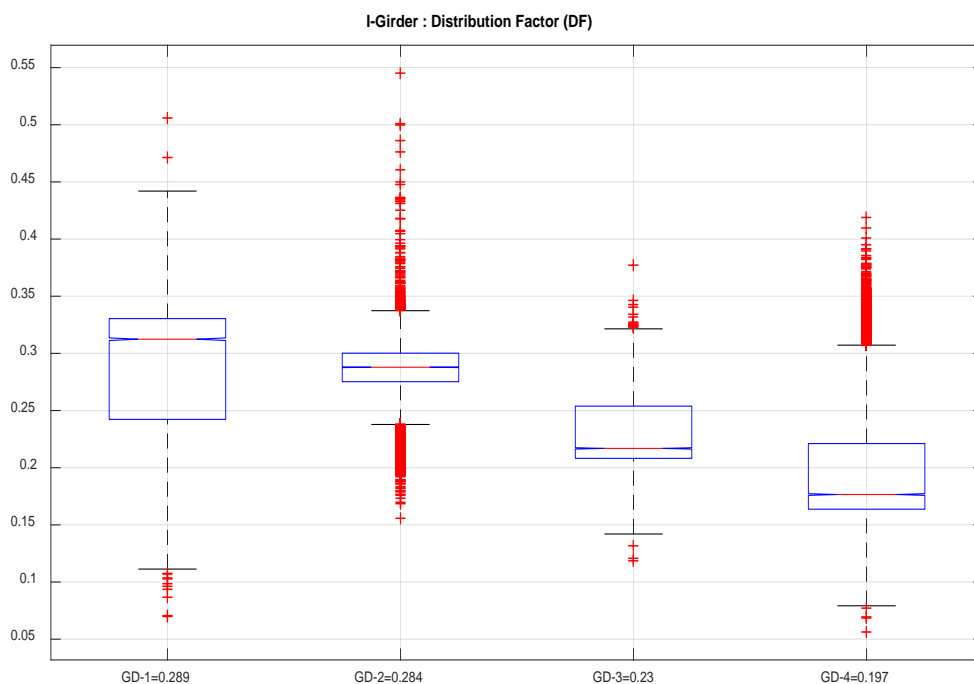
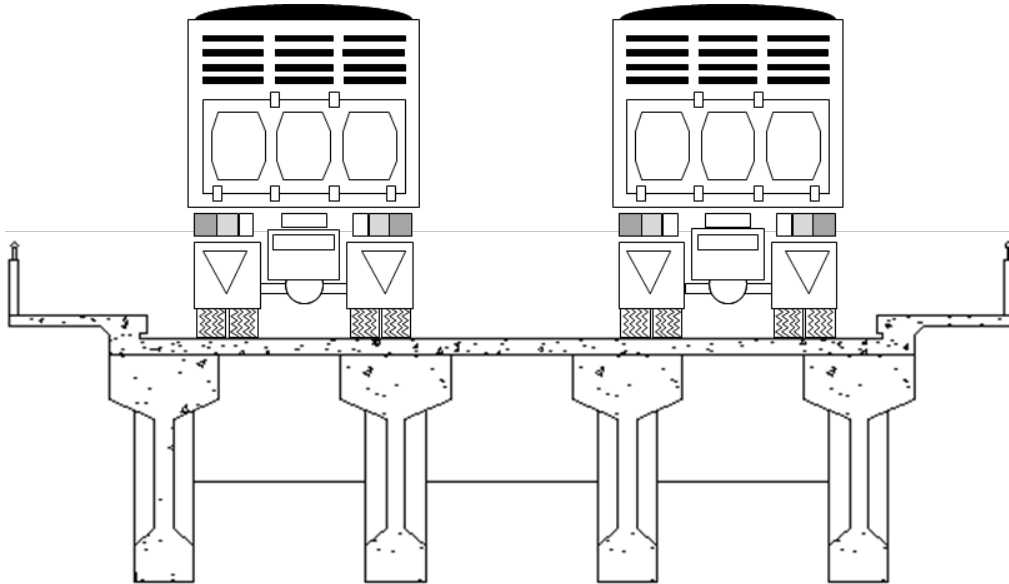
ช่วงน้ำหนัก รถบรรทุก (Ton)	จำนวนของ รถบรรทุก (คัน)	ช่วงน้ำหนัก รถบรรทุก (Ton)	จำนวนของ รถบรรทุก (คัน)	ช่วงน้ำหนัก รถบรรทุก (Ton)	จำนวนของ รถบรรทุก (คัน)
1.5-2.5	6	26.5-27.5	164	51.5-52.5	11
2.5-3.5	13	27.5-28.5	194	52.5-53.5	6
3.5-4.5	46	28.5-29.5	238	53.5-54.5	8
4.5-5.5	117	29.5-30.5	276	54.5-55.5	5
5.5-6.5	327	30.5-31.5	223	55.5-56.5	7
6.5-7.5	538	31.5-32.5	181	56.5-57.5	7
7.5-8.5	640	32.5-33.5	156	57.5-58.5	4
8.5-9.5	685	33.5-34.5	179	58.5-59.5	4
9.5-10.5	648	34.5-35.5	232	59.5-60.5	3
10.5-11.5	653	35.5-36.5	347	60.5-61.5	2
11.5-12.5	684	36.5-37.5	535	61.5-62.5	2
12.5-13.5	614	37.5-38.5	650	62.5-63.5	6
13.5-14.5	666	38.5-39.5	657	63.5-64.5	2
14.5-15.5	646	39.5-40.5	405	64.5-65.5	6
15.5-16.5	578	40.5-41.5	233	65.5-66.5	2
16.5-17.5	463	41.5-42.5	87	66.5-67.5	4
17.5-18.5	412	42.5-43.5	37	67.5-68.5	1
18.5-19.5	356	43.5-44.5	26	68.5-69.5	1
19.5-20.5	360	44.5-45.5	25	69.5-70.5	2
20.5-21.5	294	45.5-46.5	16	70.5-71.5	1
21.5-22.5	226	46.5-47.5	23	71.5-72.5	3
22.5-23.5	197	47.5-48.5	13	72.5-73.5	1
23.5-24.5	197	48.5-49.5	14	74.5-75.5	2
24.5-25.5	160	49.5-50.5	10	75.5-76.5	3
25.5-26.5	158	50.5-51.5	8	77.5-78.5	1



รูปที่ 5-99 กราฟการกระจายน้ำหนักรถบรรทุกจากการสอบเทียบค่าผลรวมของ Strain Gauge



และเมื่อนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มาทำการหาค่าการกระจายน้ำหนักในโครงสร้างคานตามแนวขวางจะได้ผลดังแสดงในกราฟ Box Plot รูปที่ 5-101 จากรูปจะเห็นว่าคาน GD1 และ GD2 ซึ่งเป็นคานฝั่งซ้ายที่เป็นช่องการจราจรที่รถบรรทุกวิ่ง มีแนวโน้มว่ารับแรงมากกว่าฝั่งขวาและทำให้เกิดความเสียหายได้มากกว่า



รูปที่ 5-100 การกระจายน้ำหนักในโครงสร้างคาน

บทที่ 6 การออกแบบการเสริมกำลัง โครงสร้างสะพาน

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย ระเบียบวิธี Finite Element การประเมินการรับน้ำหนักสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางโดยวิธี Finite Element เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างใดบ้างมีความจำเป็นต้องทำการเสริมกำลัง จากนั้น จะนำเสนอรูปแบบการเสริมกำลังต่าง ๆ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาคัดเลือก เป็นรูปแบบการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน และการนำเสนอการปรับปรุงผิวจราจรบนสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบันตามคำแนะนำของสำนักงานทางหลวงที่ 4 และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการออกแบบเสริมกำลังจากแนวทางข้างต้นรวมไปถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเสริมกำลังในแต่ละวิธี

6.1 ระเบียบวิธี Finite Element

การสร้างแบบจำลองโครงสร้างของสะพานสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานที่ปรึกษาเลือกใช้แบบจำลอง Finite Element Analysis (FEA) โดยระเบียบวิธี Finite Element Analysis เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี Numerical Method และเป็นวิธีเชิงการประมาณ (Approximate Method)

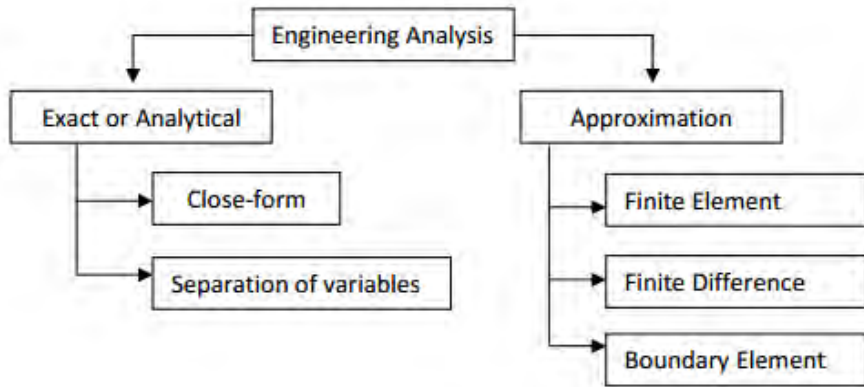
การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ จะต้องจำลองโครงสร้างในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีรูปร่างคุณลักษณะต่าง ๆ ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด วิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method & Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองและพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน (Bridge Response) ดังนี้

1. การแอ่นตัว (Deflection)
2. การบิด (Torsion)
3. ความเค้น (Stress)
4. การเคลื่อนตัวตามยาวของสะพาน
5. ความเร่งที่เกิดจากการสั่นไหว
6. ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของโครงสร้างสะพาน
7. ลักษณะการสั่นไหวอิสระ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพาน ซึ่งทำการศึกษาในครั้งนี้ เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบสากล อันได้แก่ มาตรฐานของ American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 2007) มาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) และมาตรฐานสากลอื่น ๆ อันเป็นที่ยอมรับ โดยกำหนดให้ Design Criteria เป็นไปตามมาตรฐานตามที่กล่าวถึงในข้างต้น

ในการศึกษาจะจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับว่ามีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด โดยใช้โปรแกรม อาทิเช่น FEA หรือโปรแกรมอื่นที่มีความเหมาะสม มีความน่าเชื่อถือ และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า FEM คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อม ๆ กับสมการปริพันธ์ โดยนิยมใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนทางด้านรูปร่าง (Geometry) และปัญหาของ Boundary



รูปที่ 6-1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เป็นการจำลองโครงสร้างที่มีความซับซ้อนด้วยชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่มีความซับซ้อนทางเรขาคณิตน้อยกว่า ประกอบเข้าด้วยกันภายใต้เงื่อนไขความสมดุลทาง Dynamics และความต่อเนื่องของโครงสร้าง โดยแต่ละ Element จะประกอบไปด้วยโหนด (Nodes) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดพฤติกรรมของ Element นั้น ๆ กล่าวคือการเคลื่อนที่ของจุดต่าง ๆ ใน Element รวมถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสามารถประมาณได้จากค่าการเคลื่อนที่ของ Nodes ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Finite Element จึงเป็นการคำนวณหาค่าการเคลื่อนที่ของ Nodes ของแต่ละ Elements

สมการความสมดุลทาง Dynamics ของ Nodes ต่าง ๆ เป็นสมการพีชคณิตซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\}$$

สมการ 6-1

- โดยที่ K = Stiffness Matrix
 C = Damping Matrix
 M = Mass Matrix
 P(t) = เวกเตอร์ของแรงกระทำภายนอกที่ขึ้นกับเวลา (Vector of Applied Loads)
 U = เวกเตอร์ของการขจัดของ Node (Nodal Displacement) ตามเวลา (t)
 \dot{U} = เวกเตอร์ของการความเร็ว (Velocity) ตามเวลา (t)
 \ddot{U} = เวกเตอร์ของการความเร่ง (Acceleration) ตามเวลา (t)

ซึ่งการแก้สมการหาค่า U สามารถทำได้โดยสะดวกด้วยวิธีการทางเมทริกซ์

ในกรณีที่แรงกระทำ $P(t)$ ทำให้โครงสร้างเคลื่อนตัวอย่างช้า ๆ ($\ddot{U} = 0$ และ $\dot{U} = 0$) สมการ

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad \text{สมการ 6-1}$$

สามารถเขียนได้เป็น

$$[K]\{U\} = \{P(t)\} \quad \text{สมการ 6-2}$$

ซึ่งเป็นกรณีวิเคราะห์แบบ Statics

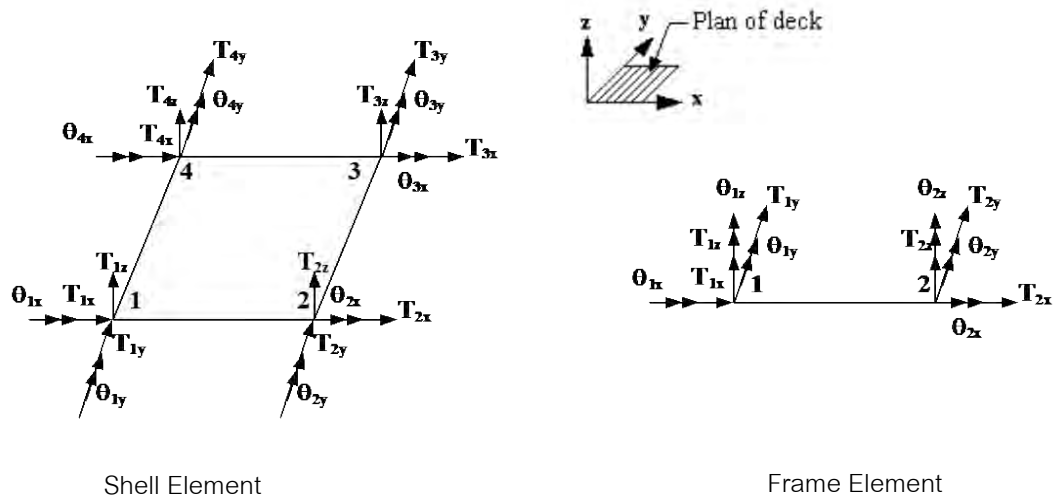
หลังจากที่ได้ค่าการเคลื่อนที่ (U) ของ Nodes แล้ว การเคลื่อนที่ของจุดต่าง ๆ ภายใน Element สามารถคำนวณหาได้จาก Shape Function ของ Element นั้น ๆ ความเครียด (Strain) สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเคลื่อนที่ (Strain-Displacement Relationship) และสุดท้ายคำนวณหาความเค้น (Stress) ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทของวัสดุในแต่ละ Element

การวิเคราะห์ Finite Element ในโครงการนี้ใช้โปรแกรม FEA ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ Finite Element ได้ทั้งทางด้าน Statics และ Dynamics มี Element ให้เลือกใช้ได้หลายประเภท และได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานขนาดใหญ่โดยสามารถพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างในการสร้างแบบจำลองได้อีกด้วย

แบบจำลองโครงสร้างเบื้องต้นของสะพาน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม FEA จะประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

6.1.1. การกำหนดชนิดของ Element ให้เหมาะสมกับสะพานที่ทำการวิเคราะห์

การเลือกชนิดของชิ้นส่วนนั้นอาจจะเลือกใช้ Element ในสองมิติ หรือสามมิติ และเลือกชนิดของชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างจริงที่จะทำการวิเคราะห์ โดยที่ชนิดของชิ้นส่วนจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ตัวอย่างเช่น ใช้ Frame Element สำหรับ Girder ของสะพาน ใช้ Shell Element สำหรับพื้นสะพาน (Deck) และใช้ Frame Element สำหรับ Rigid Link / Bracing Beam ในการวิเคราะห์จะต้องคำนึงถึงการกระทำของน้ำหนักและการถ่ายเทของแรงตามความละเอียดของ Element ที่ผู้วิเคราะห์เลือก โดยต้องพิจารณาเป็นแต่ละกรณีไป ซึ่งกลุ่มบริษัทที่ปรึกษา คาดว่าชนิดของ Element ที่จะทำการเลือกใช้ คือ Frame Element และ Shell Element และได้กำหนดให้ x เป็นแกนในแนวตามขวางของสะพาน y เป็นแกนในแนวตามยาวของสะพานและ z เป็นแกนตามความสูงของสะพาน (ความสูงของเสาสะพาน)



รูปที่ 6-2 ตัวอย่างชนิดของ Element

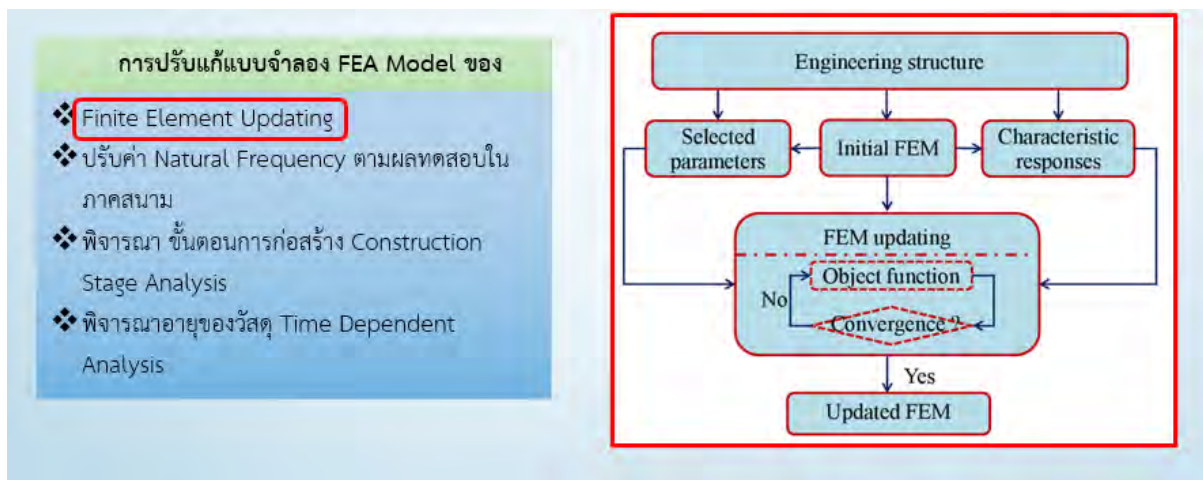
6.1.2. การแบ่งโครงสร้างสะพานเป็น Element ย่อย ๆ (Discretization)

การแบ่งส่วนประกอบของแบบจำลองโครงสร้างสะพานจริงออกให้เป็นชิ้นส่วนย่อย หลายๆ ชิ้นส่วน โดยแต่ละชิ้นส่วนจะต้องต่อเนื่องกับชิ้นส่วนข้างเคียงตรงโหนด (Node) หรือตามขอบของชิ้นส่วน (Element Edge) ซึ่งเรียกว่าจุดต่อเนื่อง และจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด กล่าวคือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมมากที่สุด ตัวอย่างเช่น ในการจำลองส่วนที่รองรับน้ำหนักบรรทุกโดยตรง เช่น แผ่นพื้นต้องจำลองโดยพิจารณาอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นส่วนที่เหมาะสม และจำลองขนาดชิ้นส่วน (Meshing) ที่เล็กเพียงพอที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์นั้นถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าแบบจำลองมีจำนวนชิ้นส่วนมากเกินไปจะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง และอาจไม่สามารถทำงานได้ถ้าคอมพิวเตอร์มีข้อจำกัดในเรื่องหน่วยความจำ และการนำเสนอข้อมูล

6.1.3. การปรับแก้แบบจำลองของสะพาน

หลังจากการสร้างแบบจำลองของสะพานโดยวิธี FEA แล้ว เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับ สภาพของสะพานจริงในภาคสนาม ที่ปรึกษาได้ดำเนินการ ปรับแก้แบบจำลองของสะพาน ในส่วนของ Boundary Condition รวมทั้งค่าเชิงวิศวกรรมอื่น ๆ ที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ และนำผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพาน มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของสะพาน ในภาคสนาม เช่น ค่า Natural Frequency ของสะพาน ค่าการแอ่นตัวของสะพาน เป็นต้น

โดยขั้นตอนการปรับค่าแบบจำลอง มีชื่อเรียกว่า Finite Element Updating แสดงในตัวอย่างดังนี้



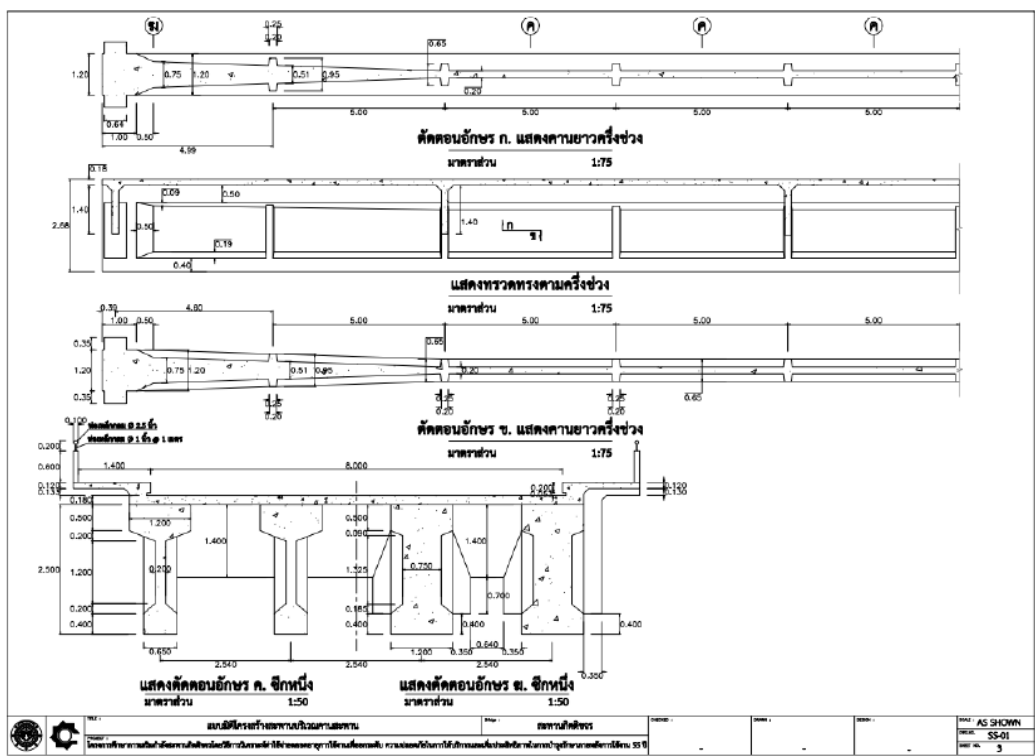
รูปที่ 6-3 ขั้นตอนการปรับค่าแบบจำลอง Finite Element Updating



หลังจากการปรับแก้แบบจำลองจนมีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในภาคสนามแล้ว แบบจำลองที่ได้ปรับค่าแล้ว (Calibrated Model) จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมสะพาน เช่น แรงภายในต่าง ๆ และค่าความเค้นต่าง ๆ เพื่อใช้ในการออกแบบเสริมกำลังต่อไป

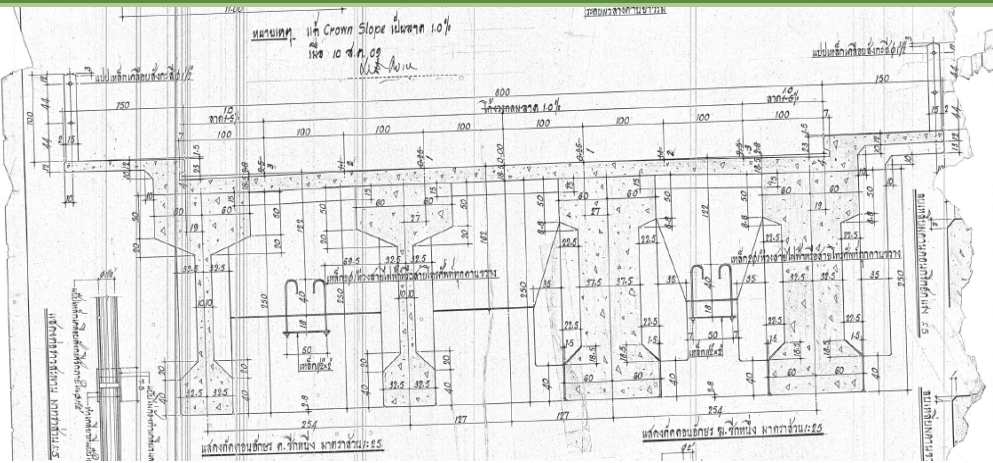
6.2 การประเมินการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานโดยวิธี Finite Element

สำหรับการประเมินการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน โดยวิธี Finite Element แสดงดังนี้ โดยจากรูปแบบของสะพานที่เป็นระบบ คานหน้าตัดรูปตัวไอและมีระบบพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยความยาวช่วงสะพาน ช่วงละ 50 เมตร ความยาวสะพานรวม 600 เมตร และมีความกว้างของผิวทาง 8 เมตร สำหรับ ขนาดของคานสะพานที่ได้จากการสำรวจแสดงในรูปที่ 6.2-1 ในส่วนของพื้นสะพานและความกว้างโดยรวม ได้พิจารณาจากแบบ As built ของสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 6.2-2 สำหรับในส่วนของรายละเอียดของจำนวนและ Profile ของลวดอัดแรงของคานสะพาน ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแสดงในรูปที่ 6.2-3 ในการจำลองแบบจำลองของสะพาน ได้พิจารณาการถ่ายแรงและปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่าง โดยได้จำลองส่วนของโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน โดยใช้แบบ As built ของตอม่อสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 6.2-4

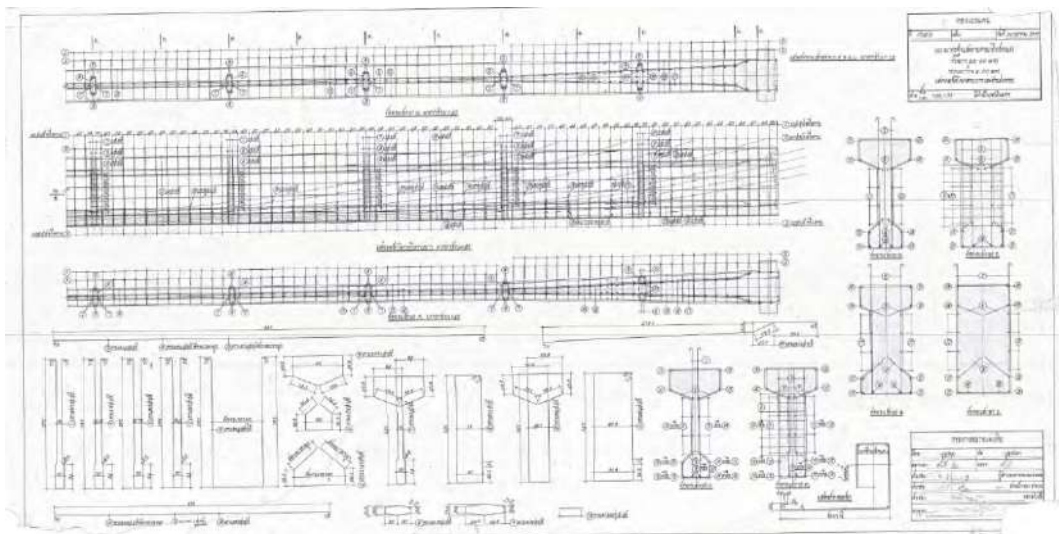


รูปที่ 6.2-1 ขนาดของคานสะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

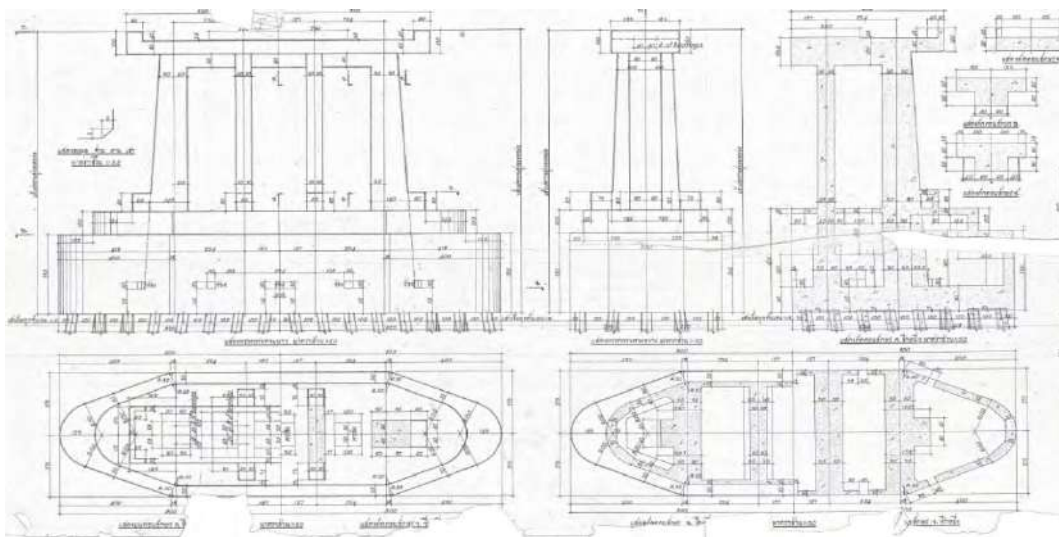
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 6.2-2 ขนาดของพื้นที่สะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง



รูปที่ 6.2-3 จำนวนและแนว Profile ของลวดอัดแรงของสะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

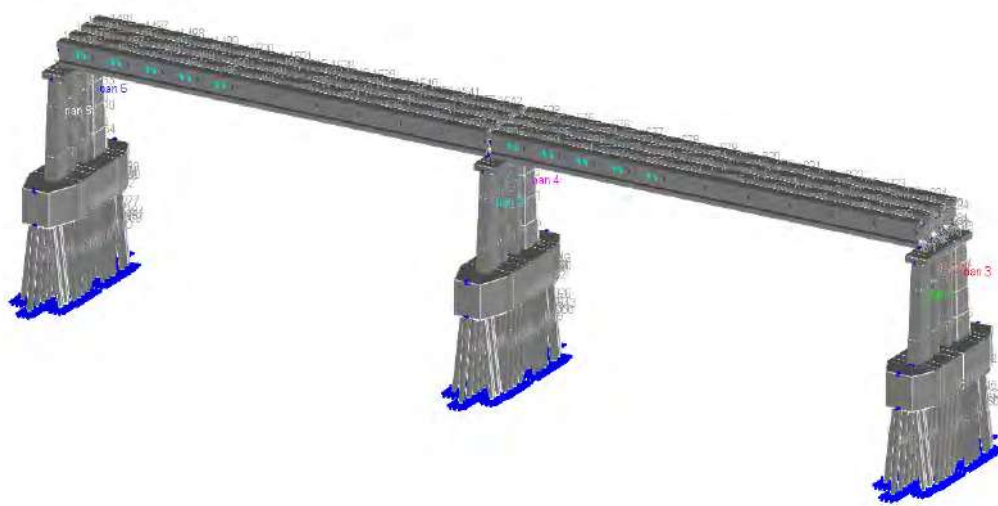


รูปที่ 6.2-4 ขนาดและรูปแบบ ของตอม่อของสะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

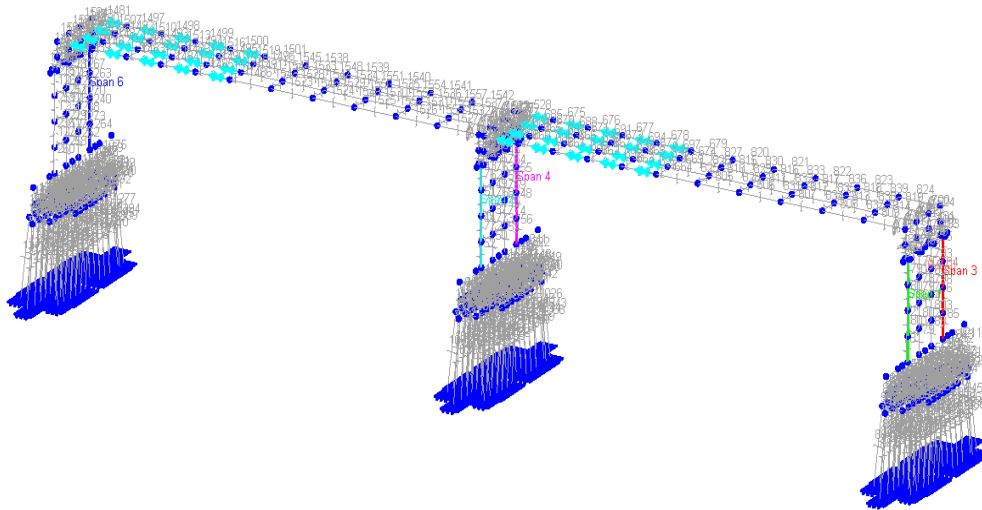
ในการสร้างแบบจำลองของสะพานได้ใช้หลักการดังนี้



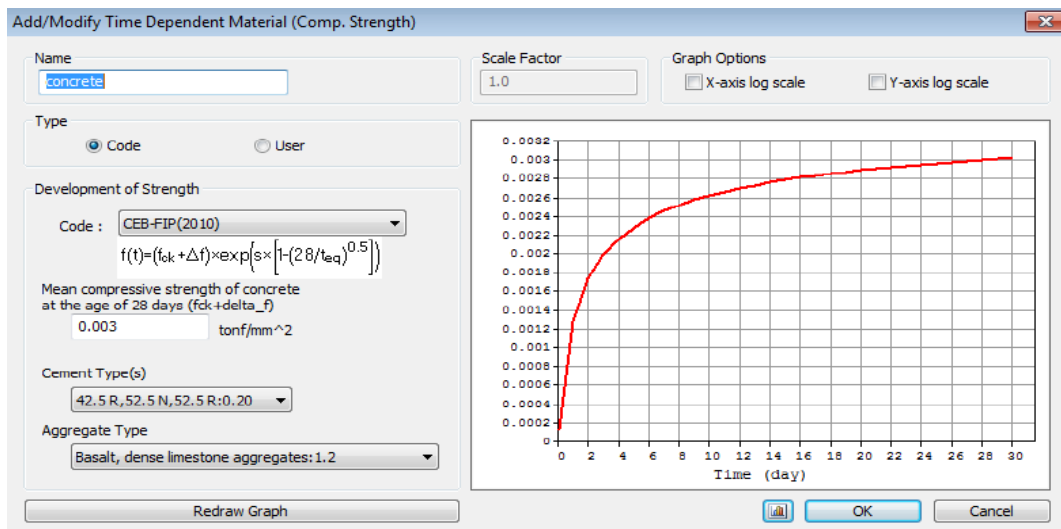
- แบบจำลองจำลองส่วนของโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างโดยใช้ concept ของ Spine Model โดยที่ Frame Element ใช้สำหรับจำลองคานรูปดั่งไอ (I-Girder) ซึ่งอีลิเมนต์ประเภทนี้เป็นคาน ความลึกน้อยจำลองในการรับแรงตามขวาง แรงตามแกน และโมเมนต์ ดังนั้นคุณสมบัติของอีลิเมนต์ประเภทนี้จะรวมทั้งจากอีลิเมนต์ประเภท Truss และ Beam เข้าด้วยกัน ในกรณีที่ Frame อีลิเมนต์ใช้ในการจำลองผลในระบบ 3 มิติ จะสามารถพิจารณาผลจากโมเมนต์ดัดสองแกน โมเมนต์บิด แรงในแนวแกน และแรงเฉือนสองแกนของคานได้
- การจำลองรอยต่อสะพาน Bearing ใช้เป็นอีลิเมนต์ที่จำลองเป็นลักษณะ one-joint grounded spring หรือ two-joint link ได้ โดยค่าของสติฟเนสของอีลิเมนต์สามารถสร้างโดยใช้ spring จำนวน 6 ชุดแยกอิสระต่อกันที่รองรับการเคลื่อนตัวได้ 3 ทิศทางและการหมุนใน 3 ทิศทาง
- ในการจำลองรอยต่อระหว่างคาน (diaphragm) ใช้อีลิเมนต์ที่เป็น Two-Joint Link ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมถ่ายแรงระหว่างคานข้างเคียงผ่าน ในลักษณะการเคลื่อนตัวได้ 3 ทิศทางและการหมุนใน 3 ทิศทาง
- แบบจำลองของสะพานให้พิจารณาผลของขั้นตอนการก่อสร้าง ระยะเวลาการก่อสร้าง และผลของ Long Term Effect ที่เกิดขึ้นในวัสดุต่าง ๆ เช่น Aging ของ Concrete, Shrinkage และ Creep ในคอนกรีต, Relaxation ในลวดอัดแรง เป็นต้น



รูปที่ 6.2-5 แบบจำลองของ I-Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Model) 3D View (Extrude)



รูปที่ 6.2-6 แบบจำลองของ I-Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model)
Spline Model View



รูปที่ 6.2-7 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลของ Strength Development ของคอนกรีต I-Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model)



การวิเคราะห์แบบจำลองโดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้าง

ภายหลังจากการสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ในขั้นตอนต่อไปที่ปรึกษาได้
ดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพานดังกล่าวโดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างที่ได้ดำเนินการใน
ภาคสนาม เพื่อให้ผลของอายุของคอนกรีต ขั้นตอนการดึงลวดอัดแรงใน I-Girder รวมทั้งลำดับการ
ติดตั้งส่วนของ I-Girder และการหล่อ Diaphragm และ พื้น RC Deck และการเชื่อม Joint จนสมบูรณ์
เป็นคานสะพาน ได้นำมารวมในแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ในขั้นตอนของการปรับค่าของแบบจำลอง
ดำเนินการได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น

สำหรับวิธีการในการพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างในแบบจำลองนี้ ที่ปรึกษาเลือกใช้ Nonlinear
Construction Stage Analysis ซึ่งลำดับการก่อสร้างที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังนี้

- ก่อสร้างโครงสร้างส่วนล่าง
- หล่อคานคอนกรีต I Girder ทีละคาน
- ทำการดึงลวดอัดแรงแบบ Posttension ในคาน I-Girder
- ดำเนินการติดตั้ง I-Girder จนครบจำนวนใน Span 1 และ 2
- เชื่อม Diaphragm ของ I-Girder ในแต่ละ Span
- ดำเนินการหล่อพื้น RC Deck บนคานสะพาน โดยเว้นช่วง EJ ไว้
- ดำเนินการ ติดตั้ง EJ
- ติดตั้ง Barrier และ Wearing
- ทำการพิจารณา Time Dependent Analysis ถึงปีที่ 56 ภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ
- ทำการวิเคราะห์ Eigen Value Analysis เพื่อประเมินหา Mode Shape และ Natural Frequency
เพื่อใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพาน กับ ผลการทดสอบ
- วิเคราะห์สะพานภายหลังจากการก่อสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ได้ใช้ทดสอบใน
โครงการนี้

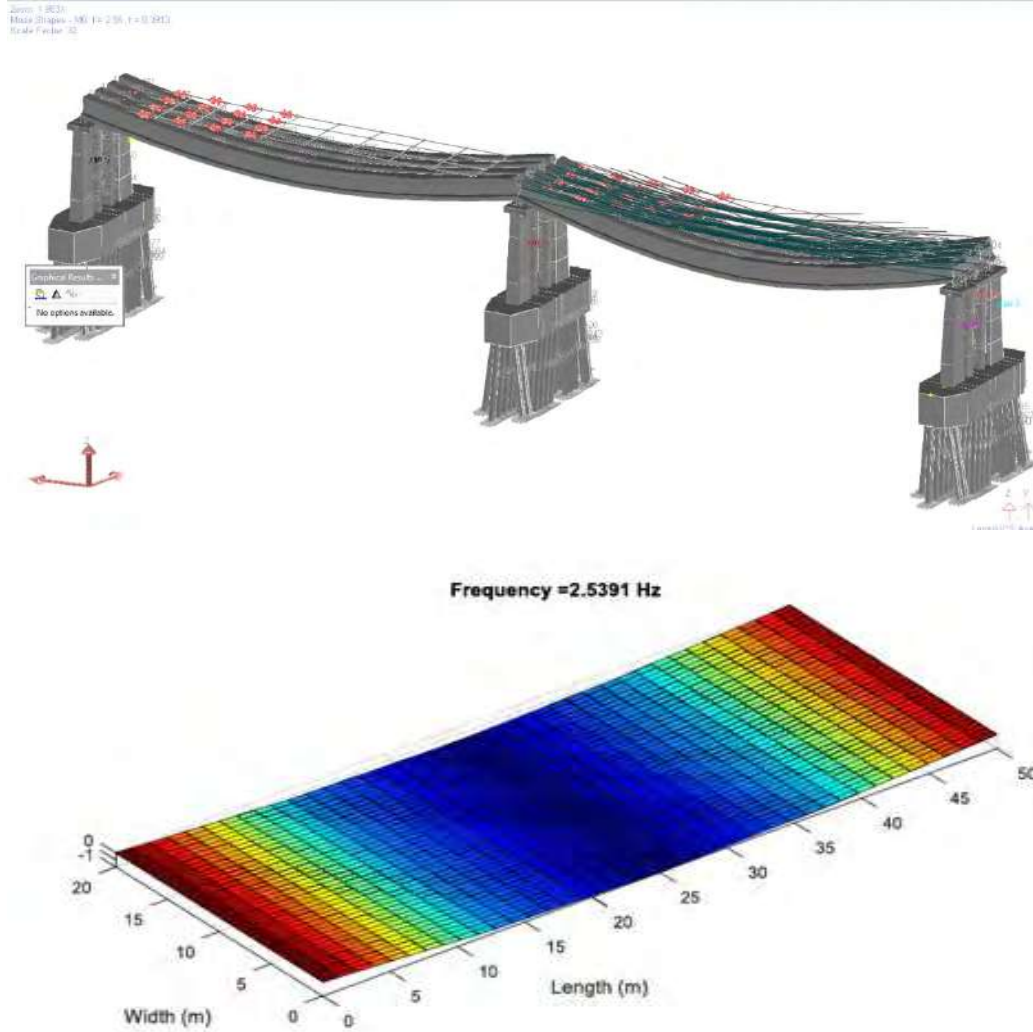
จากขั้นตอนข้างต้น ผลการวิเคราะห์ สะพานและการปรับแก้แบบจำลองของสะพานแสดงดังนี้

ตารางแสดงค่าการปรับแก้แบบจำลองของสะพาน กับ ผลการทดสอบในภาคสนาม โดยการปรับค่า ที่
ปรึกษาได้ พิจารณา แนวทางของการปรับ Global Stiffness ของแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลของ 1st
Natural Frequency Mode สอดคล้องกับผลการทดสอบแสดงดังนี้

No. FE Updating	fn (Test)	2.5391	Hz	fn(test/FEA)
N1	fn (FEA)	1.91	Hz	1.329
N2	fn (FEA)	2.2	Hz	1.154
N3	fn (FEA)	2.41	Hz	1.054
N4	fn (FEA)	2.45	Hz	1.036
N5	fn (FEA)	2.48	Hz	1.024
N6	fn (FEA)	2.51	Hz	1.012
N7	fn (FEA)	2.52	Hz	1.008
N8	fn (FEA)	2.53	Hz	1.004
N9	fn (FEA)	2.54	Hz	1.000

หลังจากค่าของ Natural Frequency ของแบบจำลอง ใกล้เคียงหรือ เท่ากับ ผลการทดสอบในภาคสนาม
แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินโครงสร้าง แสดงดังนี้



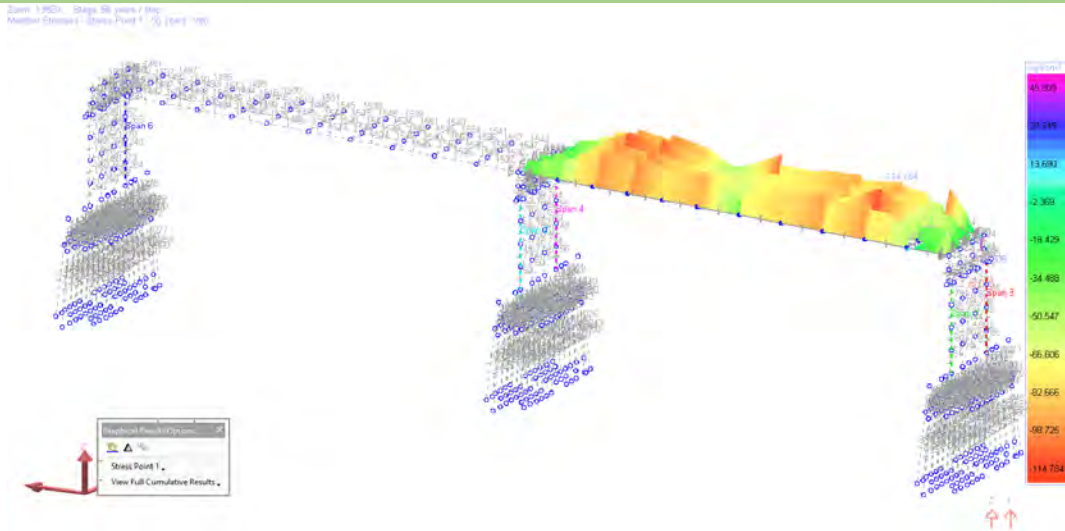


รูปที่ 6.2-8 ตัวอย่างการปรับค่าแบบจำลองของสะพาน ภายหลังจากการวิเคราะห์ Construction Stage Analysis และ Time Dependent Analysis

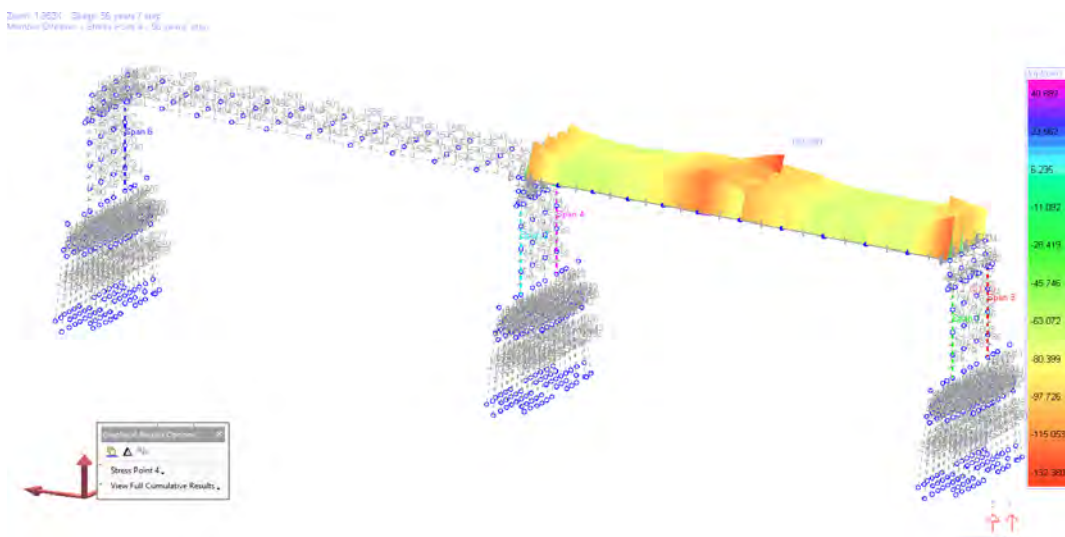
$$(f_n \text{ (FEA)} = 2.54 \text{ Hz, } f_n \text{ (Test)} = 2.5391 \text{ Hz, } \text{Test/FEA} = 1.000)$$

จากการปรับแก้แบบจำลองข้างต้น ตัวอย่างของผลการวิเคราะห์แรงภายในและค่าความเค้นของสะพาน แสดงดังนี้

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี



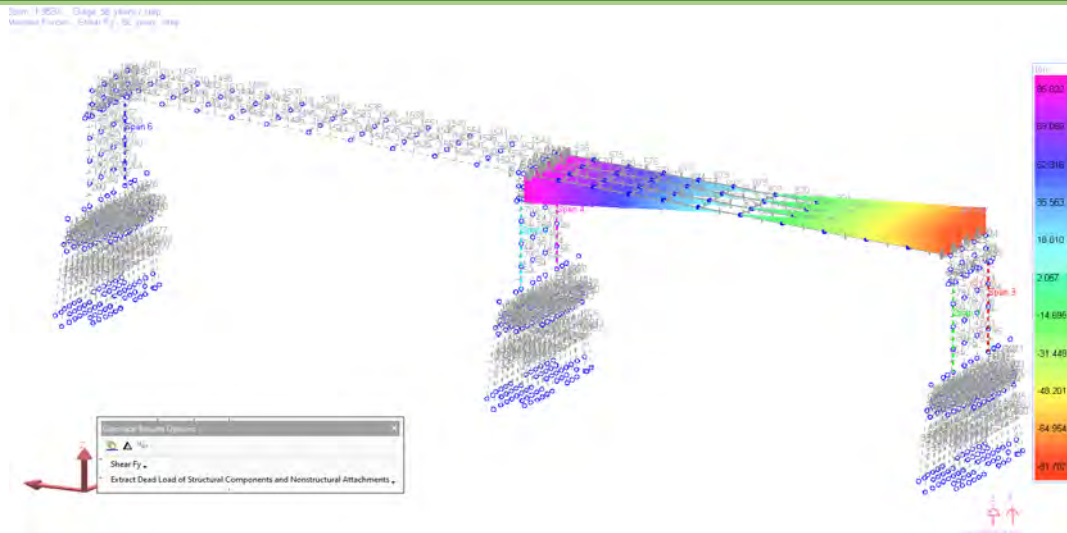
รูปที่ 6.2-9 ตัวอย่างค่าความเค้นของสะพานด้านบน(S11) ksc ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี)



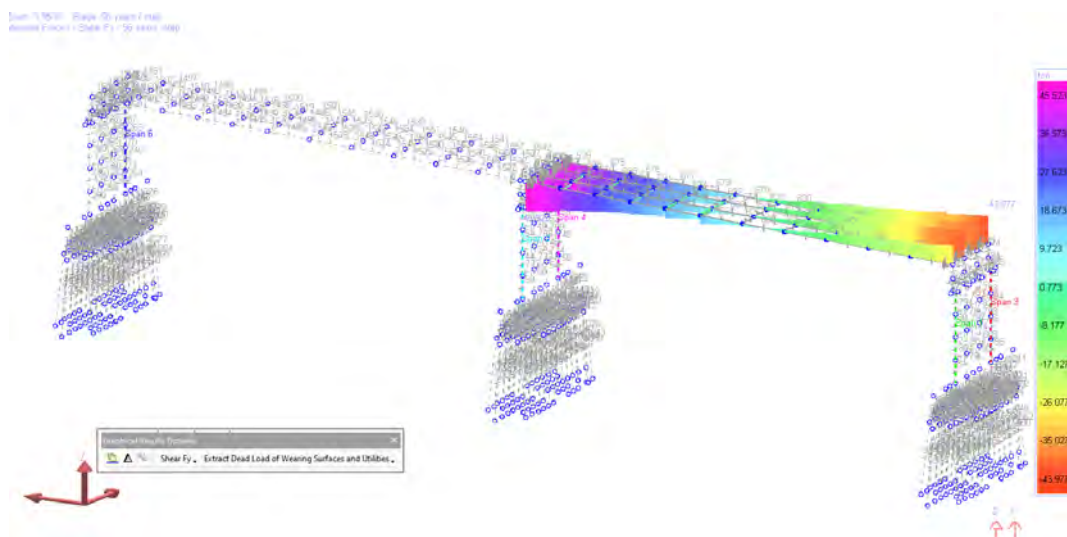
รูปที่ 6.2-10 ตัวอย่างค่าความเค้นของสะพานด้านล่าง(S44) ksc ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี)



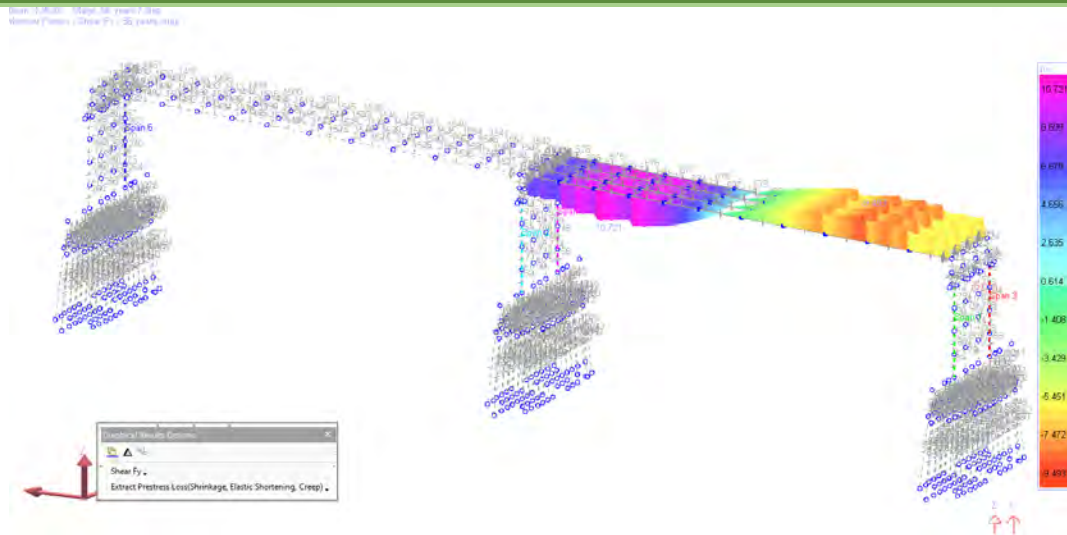
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี



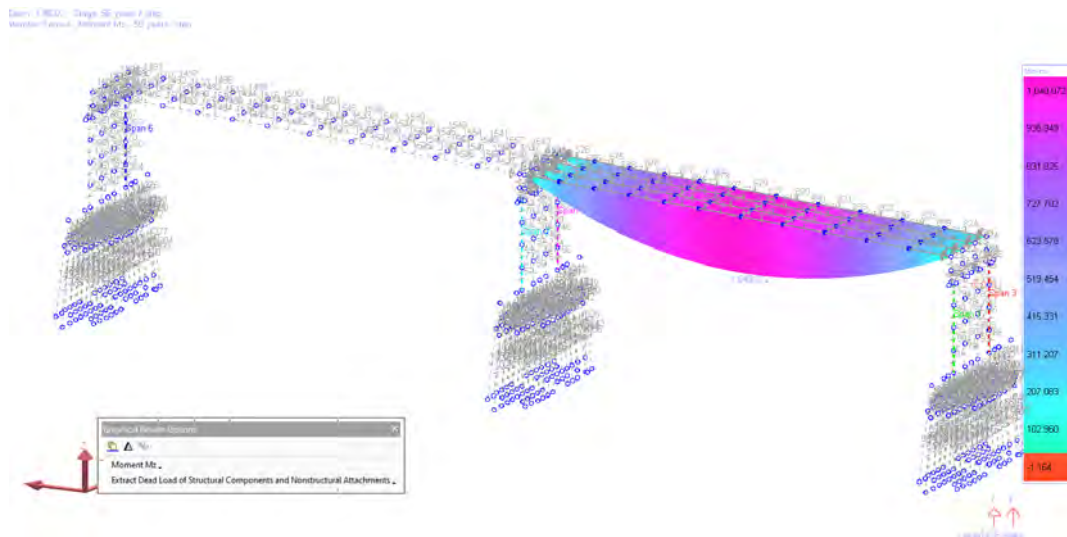
รูปที่ 6.2-11 ตัวอย่างค่าแรงเฉือน (Fy):DL ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี)



รูปที่ 6.2-12 ตัวอย่างค่าแรงเฉือน (Fy):SDL ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี)



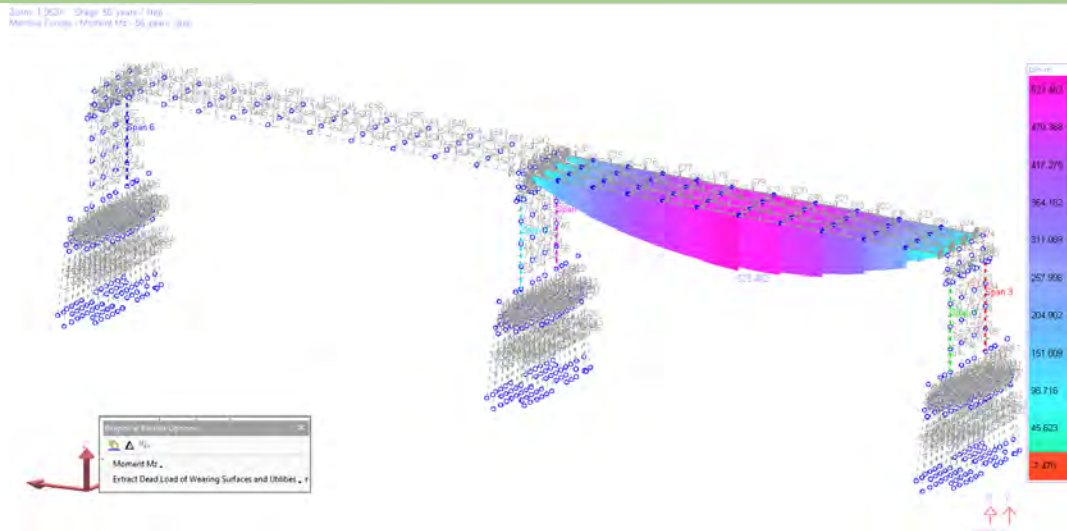
รูปที่ 6.2-13 ตัวอย่างค่าแรงเฉือน (F_y): Long Term Loss (PS+CR) ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา 56 ปี)



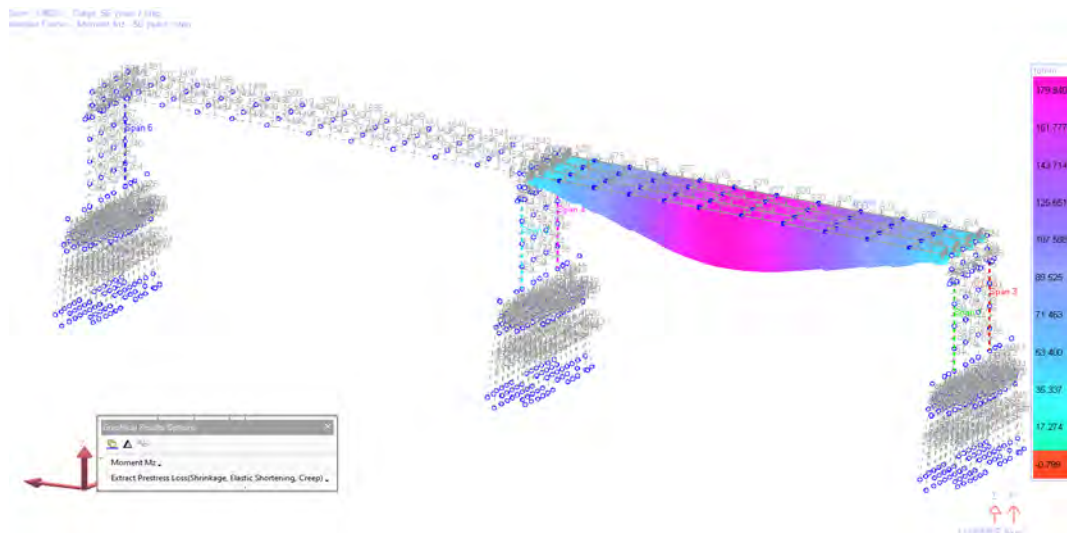
รูปที่ 6.2-14 ตัวอย่างค่าโมเมนต์ดัด (M_z): DL ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา 56 ปี)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

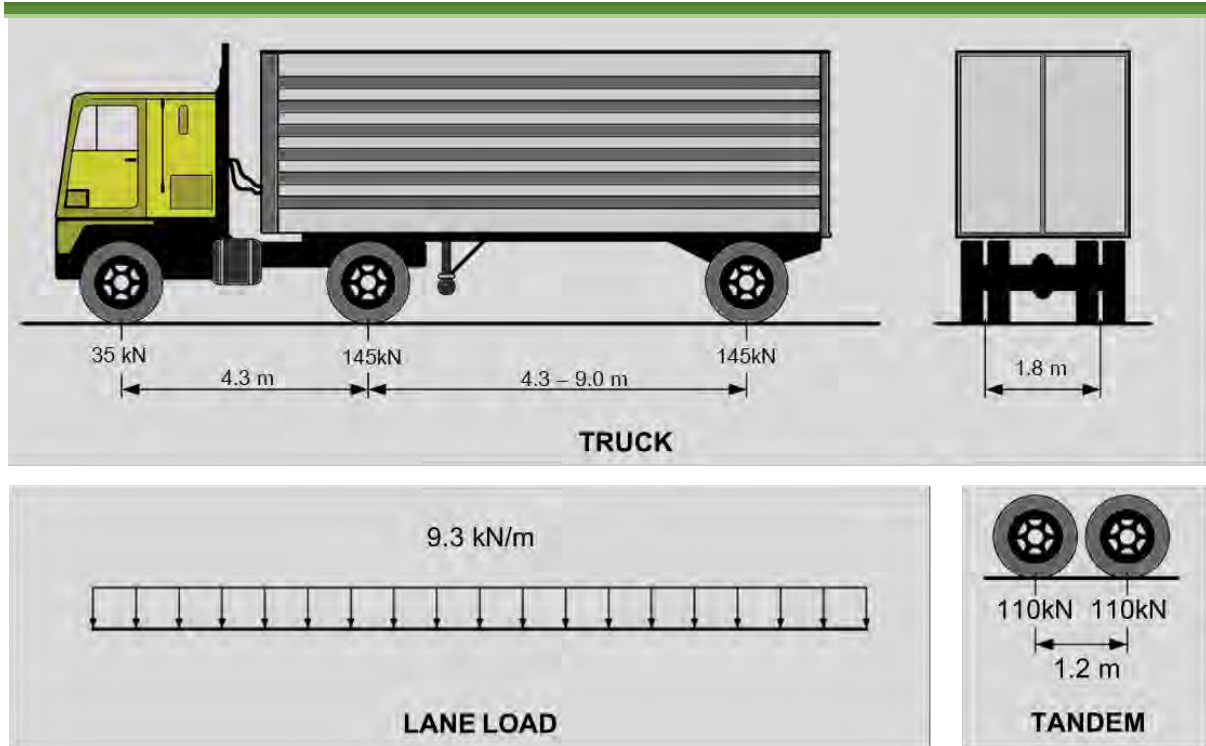


รูปที่ 6.2-15 ตัวอย่างค่าโมเมนต์ดัด (Mz):SDL ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี)



รูปที่ 6.2-16 ตัวอย่างค่าโมเมนต์ดัด (Mz):Long Term Loss (PS+CR) ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี)

ในการประเมินหาแนวทางการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้ดำเนินการวิเคราะห์หาแรงภายในของสะพาน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร ตามมาตรฐานAASHTO ได้แก่ Live Load Model: HL-93 แสดงดังรูปที่ 5-17



HL-93 TRUCK and LANE LOAD

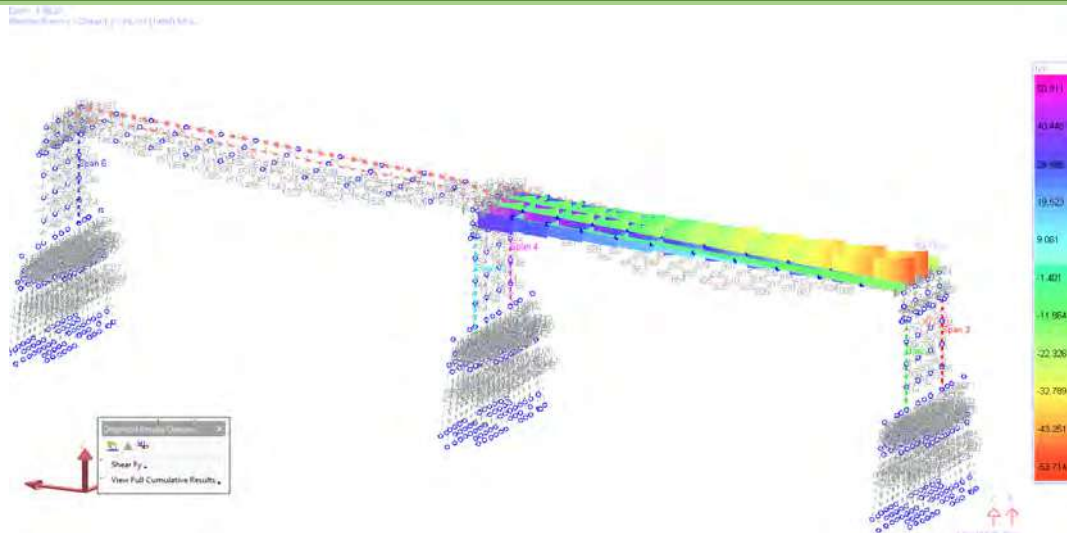
TANDEM and LANE LOAD

90 % of 2 TRUCKS and LANE LOAD

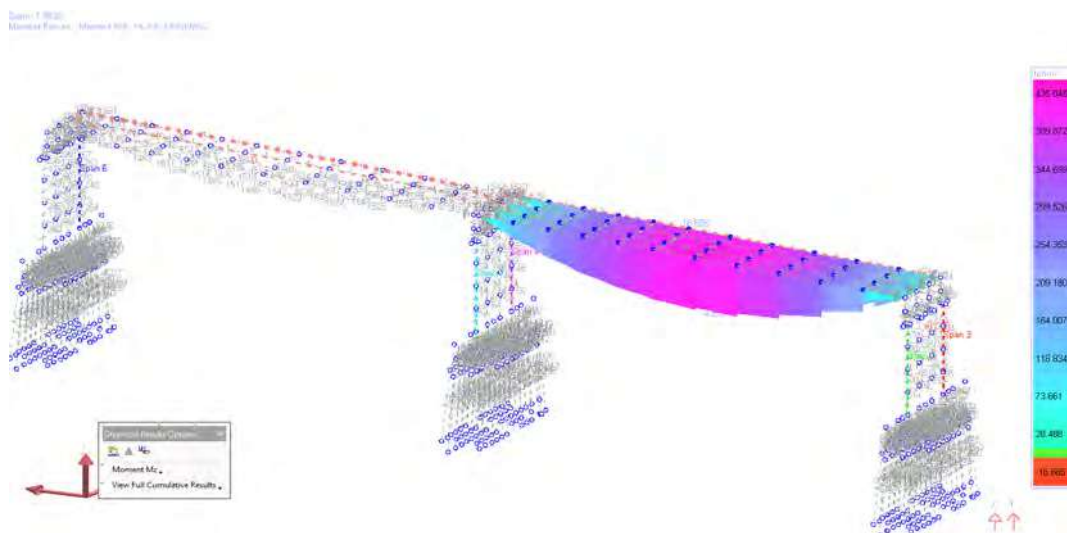
รูปที่ 6.2-17 Live Load Model: HL-93 สำหรับใช้ในการประเมินกำลังของสะพาน

จาก Live Load Model ข้างต้น ที่ปรึกษาได้ ใช้ในการวิเคราะห์ ผลของความเค้นและแรงภายในของสะพาน แสดงดังนี้





รูปที่ 6.2-18 ตัวอย่างค่าแรงเฉือน (F_y):LL+IM ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี) กรณี จำนวน 2 ช่องจราจร



รูปที่ 6.2-19 ตัวอย่างค่าโมเมนต์ (M_z):LL+IM ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี) กรณี จำนวน 2 ช่องจราจร

จากผลของแรงภายในเนื่องจาก DL, SDL, TIME, PS, และ น้ำหนักบรรทุกจร (HL-93) ที่ปรึกษาพิจารณาประเมินกำลังของคานสะพาน ณ สภาพและเวลาปัจจุบัน แสดงในรูปที่ 6.2-20

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

การประเมินกำลังสะพานกิตติขจร (สภาพ ณ ปัจจุบัน)
กรณี 2 ช่องจราจร

	Fy (T)	Mz (T-m)
DL	86	1050
SDL	46	525
LL+IM	55	436
PS Loss CR	11	180

SER1	198	2191
STR1	278.25	2953

Condition Factor	0.9	0.9
0.9Capacity*condition	309.42	3522.69

Capacity/Demand	1.112022	1.193
-----------------	----------	-------

Member Code	ชิ้นส่วนโครงสร้าง (Member)	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
RL	ราวสะพาน (Railing)	4.33
SW	ทางเท้า (Sidewalk)	3.50
WS	ผิวทาง (Wearing Surface)	4.75
DK	พื้นสะพาน (Deck)	5.00
GD	คานตามยาว (Girder)	4.81
DP	โพลีเฟรม (Diaphragm)	5.00
EJ	รอยต่อเนื้อขยาย (Expansion Joint)	2.00
CB	คานหัวคานเสา (Cap Beam)	4.77
PR	เสาตอม่อ (Pier)	5.00
BW	กำแพงหลัง (Back Wall)	5.00
WW	คูข้าง (Wing Wall)	5.00
SP	ลาดป้องกันเอียง (Slope Protection)	5.00

รูปที่ 6.2-20 สรุปค่าสัดส่วนของกำลังต่อแรงภายใน ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี) กรณี จำนวน 2 ช่องจราจร

จากการประเมินแสดงให้เห็น กำลังของคานสะพาน มีความเสื่อมสภาพระดับน้อย โดยยังมีกำลังของหน้าตัดสูงกว่า แรงภายในจากกรณีต่าง ๆ รวมทั้ง น้ำหนักบรรทุกจร (HL-93) ประมาณ 11% สำหรับแรงเฉือน และ 19% สำหรับโมเมนต์ดัด กรณีจำนวนช่องจราจร เท่ากับ 2 ช่องจราจร

การประเมินกำลังสะพานกิตติขจร (สภาพ ณ ปัจจุบัน)
กรณี 3 ช่องจราจร

	Fy (T)	Mz (T-m)
DL	86	1050
SDL	46	525
LL+IM	70	580
PS Loss CR	11	180

SER1	213	2335
STR1	304.5	3205

Condition Factor	0.9	0.9
0.9Capacity*condition	309.42	3522.69

Capacity/Demand	1.016158	1.099
-----------------	----------	-------

Member Code	ชิ้นส่วนโครงสร้าง (Member)	ค่า CR เฉลี่ยตามประเภทชิ้นส่วน
RL	ราวสะพาน (Railing)	4.33
SW	ทางเท้า (Sidewalk)	3.50
WS	ผิวทาง (Wearing Surface)	4.75
DK	พื้นสะพาน (Deck)	5.00
GD	คานตามยาว (Girder)	4.81
DP	โพลีเฟรม (Diaphragm)	5.00
EJ	รอยต่อเนื้อขยาย (Expansion Joint)	2.00
CB	คานหัวคานเสา (Cap Beam)	4.77
PR	เสาตอม่อ (Pier)	5.00
BW	กำแพงหลัง (Back Wall)	5.00
WW	คูข้าง (Wing Wall)	5.00
SP	ลาดป้องกันเอียง (Slope Protection)	5.00

รูปที่ 6.2-21 สรุปค่าสัดส่วนของกำลังต่อแรงภายใน ของสะพาน ภายหลังจากการปรับแบบจำลอง (After Construction Stage เป็นเวลา56 ปี) กรณี จำนวน 3 ช่องจราจร

จากการประเมินแสดงให้เห็น กำลังของคานสะพาน มีความเสื่อมสภาพระดับน้อย โดยยังมีกำลังของหน้าตัดสูงกว่า แรงภายในจากกรณีต่าง ๆ รวมทั้ง น้ำหนักบรรทุกจร (HL-93) ประมาณ 1.6% สำหรับแรงเฉือน และ 9% สำหรับโมเมนต์ดัด กรณีในอนาคตเปิดใช้จำนวนช่องจราจร เท่ากับ 3 ช่องจราจร



สำหรับการประเมินในส่วนโครงสร้างส่วนล่างของสะพานแสดงดังนี้

การประเมินกำลังสะพานกิตติขจร (สภาพ ณ ปัจจุบัน)

กรณี 3 ช่องจราจร		(Pier Column)		
	Fz (T)	My (T-m)	Mz (T-m)	
DL	-461	175	75	
SDL	-52	20	2	
LL+IM	-105	11	5	
SER1	-618	206	82	
STR1	-838	268	105.5	
Condition Factor	0.85	0.85	0.85	
0.9Capacity*condition	1835.235	1000	503	
Capacity/Demand	2.190	3.731	4.768	
Required increase Strengthening (%)	N/A	N/A	N/A	
Adopted For Strengthening (%)	N/A	N/A	N/A	

จากการประเมินแสดงให้เห็น กำลังของเสาสะพาน มีความเสื่อมสภาพระดับน้อย โดยยังมีกำลังของหน้าตัดสูงกว่า แรงภายในจากกรณีต่าง ๆ รวมทั้ง น้ำหนักบรรทุกจร (HL-93) อย่างมากโดยสามารถรองรับกรณีในอนาคตเปิดใช้จำนวนช่องจราจร เท่ากับ 3 ช่องจราจรได้

โดยการบำรุงรักษาเบื้องต้น เช่น การทำ concrete patching หรือ crack repair ตามบริเวณที่อาจมีความชำรุด สามารถดำเนินการได้ เพื่อลดโอกาสการเสื่อมสภาพในอนาคต

6.3 การเสริมกำลังคานสะพาน

การเสริมกำลังคานสะพาน เป็นกระบวนการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความมั่นคงแข็งแรงหรือความสามารถในการรับน้ำหนักให้กับคานสะพาน โดยใช้เทคนิคและวิธีการต่าง ๆ ซึ่งการพิจารณาเทคนิควิธีในการเสริมกำลังนั้นจะต้องคำนึงถึงสภาพ พฤติกรรม และคุณสมบัติของโครงสร้างคานอย่างรอบคอบ ในบางครั้งการปรับปรุงคุณสมบัติอย่างหนึ่ง อาจเป็นการสร้างภาระอย่างอื่นให้กับโครงสร้าง เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เพิ่มขึ้นหรือการเปลี่ยนแปลงการกระจายของแรงทำให้ชิ้นส่วนอื่นของโครงสร้างเกิดการวิกฤต เป็นต้น ส่งผลให้โครงสร้างมีความปลอดภัยหรือมีความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการเสริมกำลังคานสะพานสามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะใหญ่ตามกลไกของการต้านทานแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง ได้แก่

1) การเสริมกำลังแบบเชิงรุก (Active Structural Strengthening)

เป็นการเสริมกำลังคานโดยการใส่แรงเข้าไปในคานเพื่อต้านทานแรงที่กระทำกับคาน เช่น การอัดแรง (Prestressing) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเสริมกำลังแบบนี้จะทำให้คานมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทันทีถึงแม้ว่าจะยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) กระทำต่อคาน

2) การเสริมกำลังแบบเชิงรับ (Passive Structural Strengthening)

เป็นการเสริมกำลังที่ไม่ทำให้คานรับแรงทันที แต่จะช่วยกระจายแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้นมาหลังจากการเสริมกำลังแล้ว เช่น การเพิ่มความหนาของหน้าตัดคานหรือเพิ่มคานถ่ายแรงด้านข้าง (Diaphragm) การเสริมกำลังประเภทนี้ไม่ได้ทำให้หน่วยแรงภายในหรือการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ของคานลดลง แต่การเสริมกำลังประเภทนี้มีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่าการเสริมกำลังแบบเชิงรุก



6.4 วิธีการเสริมกำลังคานสะพาน

ในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายวิธีการเสริมกำลังคานสะพานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลัง (External Post-tensioning) การเสริมกำลังคานด้วยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) การเสริมกำลังคานโดยใช้เสาเหล็กหลักสำหรับเป็นค้ำยัน (King Posts) และการเสริมกำลังโดยการเพิ่มคานค้ำยันด้านข้าง (Diaphragm)

6.4.1. การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลัง (External Post-tensioning)

การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลังเป็นวิธีที่เหมาะสมมากสำหรับการเสริมกำลังคาน สามารถใช้อุปกรณ์ได้หลากหลายชนิด ซึ่งก็จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักและมีระบบการป้องกันสนิมที่แตกต่างไปด้วยเช่นกัน โดยปกติแล้วจะใช้เหล็กเส้นกำลังสูง (High Strength Thread Bar) ในชิ้นส่วนที่ตรงและใช้ลวดเกลียว (Strand) ในกรณีที่ต้องมีการดัดแปลงรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 6.4-1 วิธีการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลังเป็นวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างแบบเชิงรุก (Active Strengthening) ซึ่งจะช่วยให้มีการกระจายน้ำหนักบรรทุกได้ในทันทีเมื่อทำการติดตั้งแล้วเสร็จ ก่อนที่จะปฏิบัติการโดยใช้เทคนิคนี้ควรจะต้องมีการซ่อมรอยแตกจากการดัด (Flexural Cracks) ด้วยวิธีการอุดด้วยอีพ็อกซี (Epoxy) โดยใช้แรงดันอัดเข้าไปบริเวณรอยแตกเพื่อที่จะทำให้เกิดการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด

การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการดึงลวดอัดแรงเข้ากับโครงสร้างเดิมนี้จำเป็นต้องใช้กลไกถ่ายเทแรงเฉือน (Shear Transverse Mechanism) กลไกถ่ายเทแรงเฉือนถูกติดตั้งเข้าที่ด้านข้างหรือที่บริเวณด้านล่างขององค์อาคารที่รับแรงดัดเพื่อให้มีการถ่ายเทแรงเฉือนอย่างพอเพียง ในบางครั้งแท่งเหล็กหรือเส้นลวดเกลียวอาจถูกทำให้งอที่บริเวณจุดกึ่งกลางช่วงความยาวโดยใช้สมอปเปลี่ยนทิศทาง (Deviator) เพื่อปรับโมเมนต์ต้านที่ได้จากการอัดแรงภายนอกให้ได้ตามที่ต้องการตามแนวแกนของโครงสร้างที่พิจารณา ดังแสดงรูปที่ 6.4-1

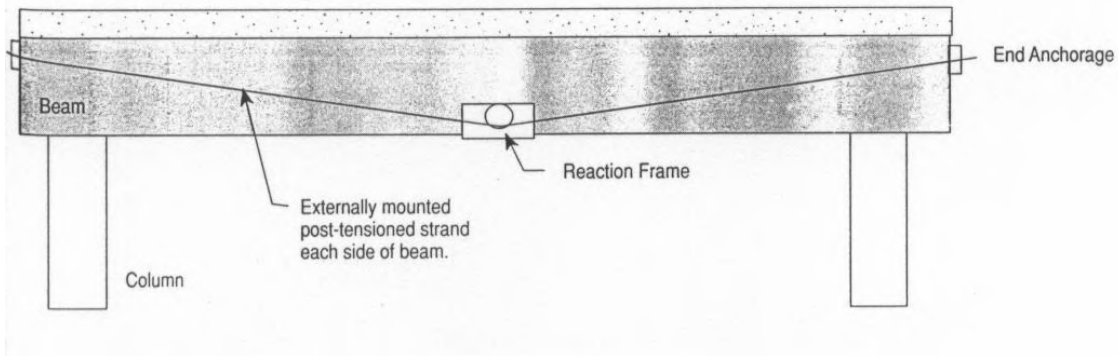
ประโยชน์ของระบบเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายนอก คือ สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและความสามารถในการใช้งานขององค์อาคารที่ได้รับการเสริมกำลัง การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเกิดจากผลของการอัดแรงภายหลังที่ทำหน้าที่ชดเชยหน่วยแรงดึงจากน้ำหนักบรรทุก หรือแรงกระทำอื่น ๆ และชดเชยการแอ่นตัวขององค์อาคาร โดยการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถยกระดับการรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคารที่ได้รับการเสริมกำลังให้สูงกว่าที่ออกแบบตามเดิม การเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายหลังยังสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ เนื่องจากการอัดแรงจะช่วยปิดหรือลดความกว้างของรอยร้าวเดิมที่เคยมีอยู่ก่อนการอัดแรงได้ นอกจากนี้วิธีนี้ยังมีข้อได้เปรียบวิธีการเสริมกำลังโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาในเรื่องปริมาณการใช้วัสดุ แรงงาน และเวลาที่น้อยกว่า

วิธีการเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลังจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่จะต้องพิจารณา ดังนี้

1. ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุก แรงกระทำ รูปร่างขององค์อาคาร จุดเชื่อมต่อ ข้อมูลเหล็กเสริมคอนกรีต และคุณสมบัติของวัสดุอื่น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบอัดแรงภายหลัง
2. ข้อมูลด้านวิศวกรรม เช่น กำลัง (Strength) และความสามารถในการใช้งาน (Serviceability) ข้อควรระวังในการวิเคราะห์หรือออกแบบ ได้แก่ ไม่ให้ค่าการอัดแรงที่ได้จากการคำนวณน้ำหนักบรรทุกที่รวมกับอัตราส่วนความปลอดภัย (Factored Load Combination) มีค่าสูงเกินไปจนทำให้เกิดหน่วยแรงจากการอัดแรงสูงเกินไปด้วย
3. การออกแบบระบบอัดแรงต้องคำนึงถึงการถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างและระบบอัดแรงให้สามารถถ่ายแรงจากระบบอัดแรงไปยังองค์อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. บริเวณแม่แรงที่ใช้อัดแรงจะมีค่าแรงอัดสูงมาก หากไม่ได้ทำการออกแบบเป็นอย่างดี อาจทำให้คอนกรีตบริเวณจุดรองรับการถ่ายแรง (Local Zone) และบริเวณใกล้เคียง (General Zone) ได้รับความเสียหาย เกิดการกะเทาะ หรือวิบัติได้ ดังนั้น ต้องทำการออกแบบเสริมเหล็กเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้
5. การอัดแรงในองค์อาคารที่มีความบาง เช่น คานรูปตัวที ปีกของคาน หรือโครงสร้างรูปกล่องควรคำนึงถึงหน่วยแรงอัดเฉพาะจุดที่อาจทำให้เกิดการแตกร้าวผ่าซีก (Splitting) หรือการระเบิด (Bursting) บริเวณสมอยึด สำหรับองค์อาคารที่มีความหนาที่เพียงพอจะต้องทำการเสริมเหล็กเพิ่มเติมบริเวณบล็อคสมอยึดด้วย
6. การพิจารณาความสามารถในการใช้งานควรตรวจสอบการแอ่นตัว การควบคุมรอยร้าว และหน่วยแรงในเหล็กเสริมที่เกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานขององค์อาคารผ่านการเสริมกำลังด้วยการอัดแรงโดยทั่วไปองค์อาคารคอนกรีตที่ได้รับการอัดแรงจะมีมิติสั้นลงทำให้เกิดการล้า (Creep) อาจส่งผลต่อองค์อาคารรอบ ๆ ได้ หากเป็นอาคารที่มีสติฟเนสสูงควรพิจารณาความไม่ต่อเนื่องและการยึดรั้งโดยองค์อาคารที่มีสติฟเนสสูงกว่า และอาจต้องทำการเสริมเหล็กเพิ่มเติมในบริเวณดังกล่าว
7. ก่อนทำการติดตั้งระบบอัดแรงภายหลังกับโครงสร้างเดิมต้องทำการประเมินกำลังที่เหลืออยู่และความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้าง เนื่องจากการอัดแรงอาจทำให้โครงสร้างเดิมที่มีความเสียหายอยู่ก่อนแล้ว เกิดความเสียหายมากยิ่งขึ้น และควรพิจารณาระยะหุ้มคอนกรีตที่ทำหน้าที่ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมธรรมดา และสมอยึด



8. การสูญเสียกำลังจากการอัดแรง (Post-tensioning Losses) ต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบอัดแรงเพื่อประเมินการสูญเสียกำลังจากการอัดแรงซึ่งเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การหดตัวและเปลี่ยนรูป การหดตัวแห้งการล้า การคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรง (Relaxation) การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีตการเปลี่ยนรูปของสมอยึดเนื่องจากแรงอัด เป็นต้น



รูปที่ 6.4-1 การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลัง

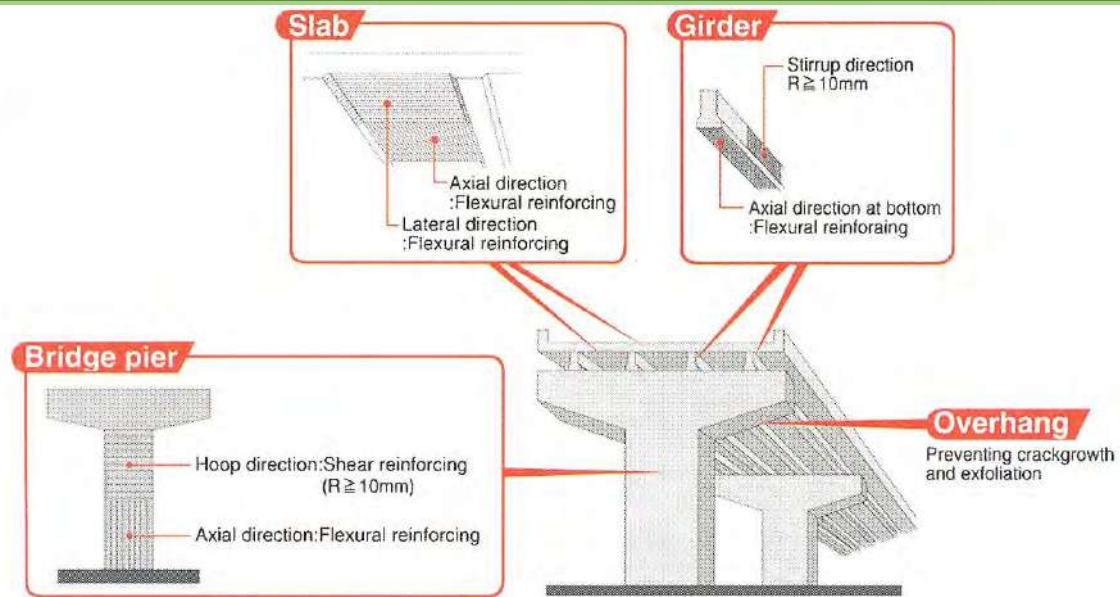
วิธีการเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลังมีข้อจำกัดเรื่องความสะดวกในการทำงาน ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องเป็นผู้ที่มีความชำนาญ และได้รับการฝึกอบรมเป็นอย่างดี จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และคำนึงถึงการรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคารที่ถูกเจาะตำแหน่งของสมอยึด ซึ่งไม่สามารถติดตั้งได้ที่ปลายองค์อาคารเสมอไป การวางทิศทางและตำแหน่งของระบบอัดแรงภายหลังซึ่งรวมถึงลวดอัดแรง สมอยึด และสมอปรับทิศทางต่าง ๆ ควรคำนึงถึงการปรับเปลี่ยนการใช้งานองค์อาคารในอนาคตด้วย

การเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายหลังต้องคำนึงถึงข้อจำกัดที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงเกินไปจากการอัดแรงภายหลังที่เพิ่มแรงเข้าไปในระบบแรงภายในขององค์อาคารเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งลวดอัดแรงในกรณีที่องค์อาคารมีส่วนของน้ำหนักบรรทุกจรสูง การอัดแรงภายหลังอาจทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่สูงเกินไปในช่วงที่องค์อาคารนั้นไม่มีน้ำหนักบรรทุกจรอยู่ เช่น ในช่วงเวลาที่ไม่มีจราจรในกรณีของสะพานในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคารโดยเพิ่มทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจำเป็นต้องออกแบบให้การอัดแรงภายหลังกระทำเป็นหลายขั้นตอนไม่ใช่เพียงครั้งเดียว

6.4.2. การเสริมกำลังคานด้วยการใช้เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)

เส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุเสริมกำลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนอยู่ในเกณฑ์ดีและมีน้ำหนักเบา วิธีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP นี้เป็นวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างแบบเชิงรับ (Passive Strengthening) โดยทั่วไปวิศวกรผู้ออกแบบจะพิจารณาให้ CFRP ทำหน้าที่ต้านทานหน่วยแรงดึง และใช้ข้อสมมติฐาน ความสอดคล้องของความเครียด (strain compatibility) บนหน้าตัดของคานภายหลังการเสริมกำลังให้ความเครียดมีการกระจายตัวแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นไปตามหลักปฏิบัติและหลักการทางวิศวกรรม วิธีการเสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.4-2

การติดตั้งแผ่น CFRP บริเวณผิวล่างของชิ้นส่วนคานหรือพื้น ซึ่งเป็นบริเวณที่รับแรงดึง แผ่น CFRP มีกำลังดึงสูงจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดัดของหน้าตัดที่เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การติดตั้งแผ่น CFRP บริเวณด้านบนรอบ ๆ จุดรองรับขององค์อาคารที่เป็นโครงสร้างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึงเป็นหลักเนื่องจากแรงดัดลบ เช่น การติดตั้งแผ่น CFRP บริเวณผิวบนของคานหรือพื้นบริเวณเสาจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดัดลบมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการติดตั้งแผ่น CFRP บริเวณด้านบนหรือด้านล่างขององค์อาคารที่รับแรงดัดเป็นหลักนั้น สามารถเพิ่มกำลังต้านทานได้เฉพาะแรงดัดเท่านั้น ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบต้องตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างเดิมมีเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมความมั่นคงแข็งแรงได้หรือไม่ รวมถึงต้องตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการวิบัติที่จุดประลัย และความเหนียวขององค์อาคารที่เปลี่ยนไปจากการเสริมกำลังด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่น CFRP ยังสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างคานได้ สามารถทำได้โดยการติดแผ่น CFRP บริเวณด้านข้างของคานหรือสามารถติดตั้งในการลักษณะการพันรอบด้านข้างคานเป็นรูปแบบตัวอย่างดังรูปที่ 6.4-2



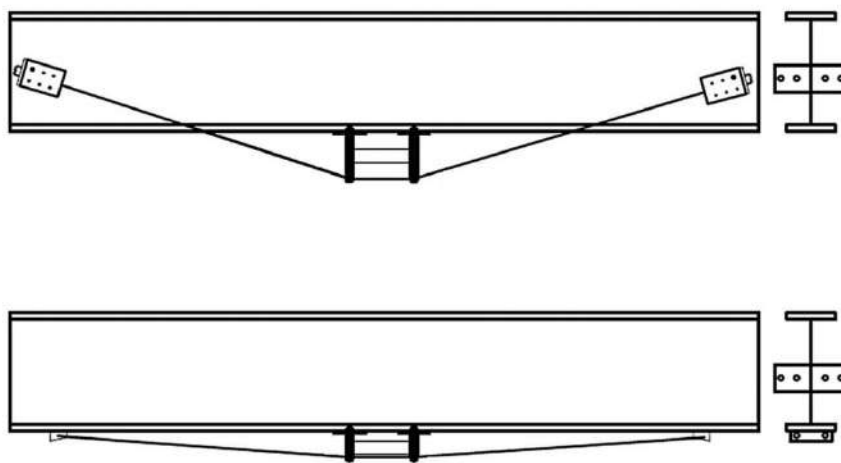
รูปที่ 6.4-2 การเสริมกำลังคานโดยใช้เส้นใยคาร์บอน

การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบ CFRP มีความสะดวกต่อการปฏิบัติ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาสามารถลดปัญหาการขนส่งวัสดุ หรืออุปกรณ์บริเวณสถานที่ก่อสร้างสามารถติดตั้งได้อย่างเหมาะสมกับโครงสร้างที่มีรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย แม้กระทั่งการติดตั้งในพื้นที่เหนือศีรษะ และด้วยคุณสมบัติที่สามารถรับแรงดึงได้สูง มีกำลังต้านทานของโครงสร้างภายหลังจากการเสริมกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญประกอบกับมีความหนาไม่มาก ทำให้สามารถตกแต่งผิว CFRP ได้ง่าย จึงสามารถคงรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและการใช้งานโครงสร้างไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้

อย่างไรก็ตาม การเสริมกำลังด้วย CFRP มีข้อเสียที่ไม่สามารถพิจารณาใช้เป็นแนวทางการเสริมกำลังขั้นพื้นฐานได้ เนื่องจากระบบ CFRP มีการเชื่อมต่อกับองค์อาคารด้วยวัสดุประสานซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญมีส่งผลต่อการเสื่อมสภาพในระยะยาว รวมถึงการเตรียมวัสดุประสานและการติดตั้งที่ต้องดำเนินการโดยผู้ที่มีความชำนาญ โดยทั่วไปแล้วผู้ที่ทำการติดตั้งระบบ CFRP จะต้องควบคุมไม่ให้ความหนาของวัสดุประสานเกิน 3 มม. เพื่อจะลดผลจากการคืบและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion coefficient) ไม่ให้แตกต่างจากคอนกรีตเกินไป รวมทั้งระบบ CFRP ไม่ควรใช้เสริมกำลังในบริเวณที่ต้องรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ หรือบริเวณที่มีการขัดสีโดยตรง เพื่อป้องกันความเสียหายก่อนสภาวะที่ออกแบบไว้ หรือป้องกันการเกิดการวิบัติแบบฉับพลัน นอกจากนี้วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบว่าการเสริมกำลังด้วยระบบ CFRP จะไม่ทำให้อัตราส่วนการเสริมวัสดุรับแรงดึงมากจนเกินไป (Over-reinforced) ซึ่งจะทำให้ห้องค้ำอาคารที่ได้รับการเสริมกำลังเกิดการวิบัติจากหน่วยแรงอัดเร็วเกินไป

6.4.3. การเสริมกำลังคานโดยการใส่เสาเหล็กหลักสำหรับเป็นค้ำยัน (King Post)

วิธีการเสริมกำลังคานโดยการใส่เสาเหล็กหลักสำหรับเป็นค้ำยันเป็นวิธีการเสริมกำลังแบบเชิงรับ (Passive Strengthening) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มมากขึ้น โดยวิธีการเสริมกำลังนี้จะใช้เสาเหล็กเป็นค้ำยันเพื่อเพิ่มแรงดัดที่เป็นลบ (Negative Moment) บริเวณกลางช่วงคาน ซึ่งจะทำให้บริเวณกลางคานมีแรงดัดลดลง วิธีการเสริมกำลังคานโดยการใส่เสาเหล็กหลักสำหรับเป็นค้ำยันแสดงดังรูปที่ 6.4-3 อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะเป็นวิธีที่มีการติดตั้งค่อนข้างง่ายและราคาประหยัดแต่วิธีนี้จะใช้พื้นที่ค่อนข้างมากในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังคาน



รูปที่ 6.4-3 การเสริมกำลังคานโดยการใส่เสาเหล็กหลักสำหรับเป็นค้ำยัน



6.4.4. การเสริมกำลังโดยการเพิ่มคานค้ำยันด้านข้าง (Diaphragm)



รูปที่ 6.4-4 การเสริมกำลังคานโดยการเพิ่มคานค้ำยันด้านข้าง

วิธีการเสริมกำลังคานโดยการเพิ่มจำนวนคานค้ำยันด้านข้างหรือคานชอยเป็นวิธีการเสริมกำลังแบบเชิงรับ (Passive Strengthening) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มมากขึ้น โดยวิธีการเสริมกำลังนี้จะใช้ทำการสร้างส่วนของคานด้านข้างหรือคานชอยเพิ่มเติมได้พื้น เพื่อช่วยในการเพิ่ม Transverse Stiffness ของหน้าตัดสะพาน ทำให้ ช่วยในการกระจายผลของแรงภายในเนื่องจากแรงกระทำภายนอกต่าง ๆ ให้คานตามยาวช่วยกันรับแรงได้ดีขึ้น จึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงโดยรวมของหน้าตัดสะพานได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.4-4 อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะเป็นวิธีที่มีการติดตั้งค่อนข้างง่ายและราคาประหยัดแต่วิธีนี้จะใช้เวลาในการเสริมกำลังอย่างมาก โดยเฉพาะกรณีใช้คานค้ำยันด้านข้างเป็นคอนกรีต ทั้งยังต้องใช้ Formwork ค่อนข้างมาก รวมทั้งต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมากในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังคาน ทำให้ อาจไม่เหมาะสมกับสะพานที่มีความยาวช่วงมาก รวมทั้งสะพานที่ข้ามแม่น้ำขนาดใหญ่ หรือ สะพานที่ไม่สามารถปิดจราจรระหว่างการก่อสร้างได้ เป็นระยะเวลานาน

6.5 สรุปแนวทางการเลือกวิธีการเสริมกำลังคานสะพาน

จากรูปแบบการเสริมกำลังสะพานที่ได้กล่าวมา ที่ปรึกษาเลือกวิธีการเสริมกำลัง 2 รูปแบบ ได้แก่ การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลัง (External Post-tensioning) และการเสริมกำลังด้วยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) โครงการนี้จะไม่นำวิธีการเสริมกำลังคานโดยใช้เสาเหล็กสำหรับเป็นค้ำยัน (King Posts) มาเป็นทางเลือกในการเสริมกำลังเนื่องจากวิธีนี้จะไปลดพื้นที่ช่องว่างในแนวตั้ง (Vertical Clearance) ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาอื่นขึ้น ภายหลัง สำหรับการเสริมกำลังโดยการเพิ่มค้ำยันด้านข้าง (Diaphragm) จะเป็นทางเลือกในการเสริมกำลังพื้นสะพาน เนื่องจากการเสริมกำลังโดยวิธีนี้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของพื้นสะพานในการถ่ายแรง จึงจะนำมาใช้เปรียบเทียบกับวิธีการเสริมพื้นสะพานในหัวข้อถัดไป

การคัดเลือกรูปแบบการเสริมกำลังจะพิจารณารูปแบบการเสริมกำลังที่ทำให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle Cost) ซึ่งประกอบด้วย ค่าเสริมกำลัง ณ ปัจจุบันและค่าก่อสร้างสะพานใหม่ในอนาคตเมื่อคานสะพานเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้าจากการจราจรของรถบรรทุกจนถึงอายุการใช้งาน ภายหลังการเสริมกำลัง เทียบต่ออายุบริการภายหลังจากการเสริมกำลัง มีค่าต่ำที่สุด โดยในกรณีทางเลือกที่ไม่ทำการเสริมกำลังแต่ทำการก่อสร้างสะพานใหม่ ณ ปัจจุบัน อายุบริการของสะพานก่อสร้างใหม่จะพิจารณาให้มีอายุเท่ากับอายุสะพาน ณ ปัจจุบัน

6.6 การเสริมกำลังพื้นสะพาน

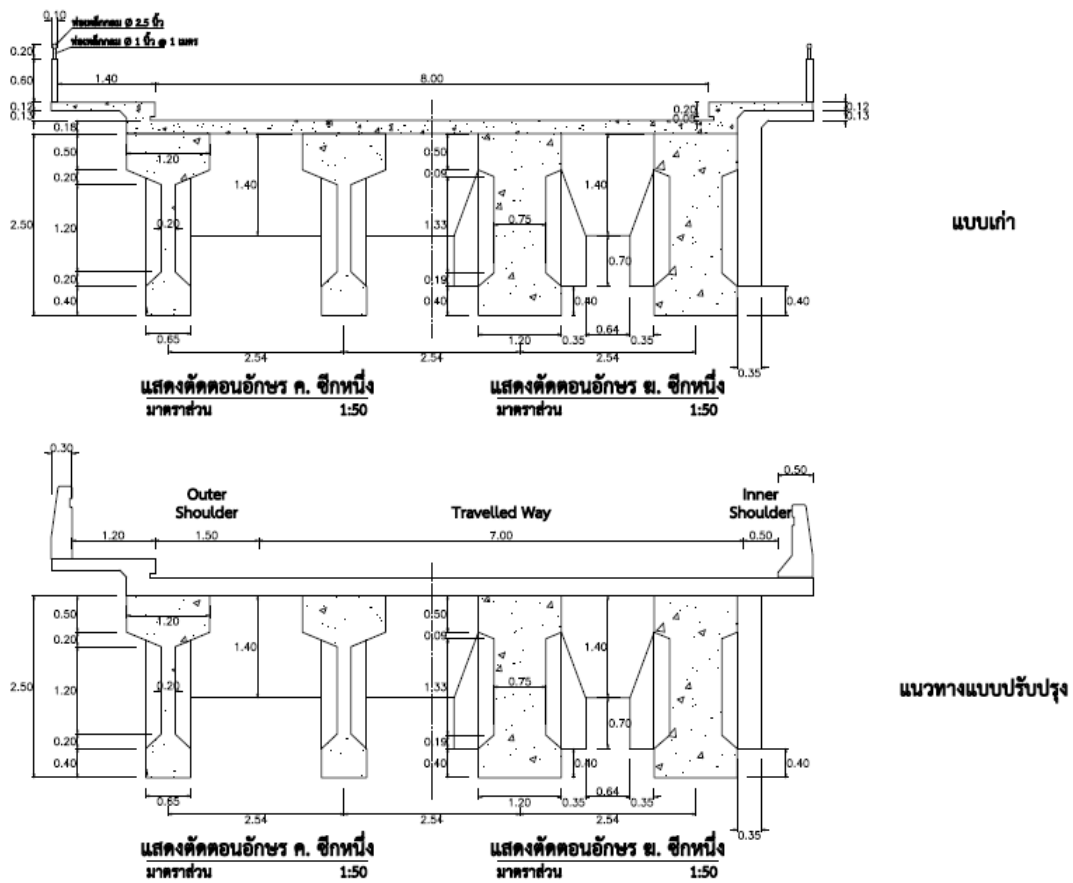
เนื่องจาก พื้นสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ค่อนข้างบาง การเสริมกำลังแบบเชิงรุกอาจทำให้พื้นสะพานเกิดความเสียหาย ที่ปรึกษาจึงพิจารณาวิธีการเสริมกำลังพื้นสะพาน 2 รูปแบบ โดยรูปแบบแรก คือ การเพิ่มความหนาของพื้นสะพานโดยวิธีนี้ เป็นวิธีที่ใช้วัสดุพื้นฐานเช่น คอนกรีต เสริมเหล็ก และสามารถดำเนินการ ที่ละครั้งหรือที่ละช่วงระยะห่างระหว่างคานได้ โดยจะต้องมีการออกแบบติดตั้งระบบคานขวางชั่วคราวเพื่อช่วยยึดรั้งคานให้อยู่ในสถานะสมดุล โดยวิธีการนี้สามารถ รื้อพื้นสะพานบางส่วนที่เสียหาย หรือสามารถรื้อพื้นสะพานแบบ Full Depth และทำการติดตั้ง formwork และดำเนินการเสริมเหล็กเสริมและเทคอนกรีตเพื่อเพิ่มความหนาของพื้นสะพานได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนานเช่น ไม่น้อยกว่า 7 วัน ในกรณีที่ไม่สามารถปิดจราจรทั้งสะพานได้ การวางแผนจัดทำทางเบี่ยงและแบ่งพื้นที่บนสะพานเพื่อดำเนินการเสริมกำลังจะลดผลกระทบต่อการจราจรได้อย่างมาก

รูปแบบที่ 2 คือการเสริมกำลังโดยการเพิ่มคานค้ำยันด้านข้าง (Diaphragm) วิธีนี้อาจไม่จำเป็นต้องมีการรื้อสะพาน แต่ในส่วนข้อดีข้อเสียอื่น ๆ ก็จะมีผลคล้ายคลึงกับการเสริมความหนาพื้นสะพาน ทั้งการใช้ระยะเวลานาน ไม่น้อยกว่า 7 วัน และการติดตั้ง formwork



6.7 การปรับปรุงผิวจราจรบนสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง

นอกจากการเสริมกำลังคานและพื้นสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางแล้ว ที่ปรึกษาจะทำการปรับปรุงผิวจราจรบนพื้นสะพานเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานปัจจุบันตามข้อแนะนำของสำนักงานทางหลวงที่ 4 ซึ่งได้มีการประชุมเมื่อวันที่ 8 มีนาคม พ.ศ.2566 กล่าวโดยสรุปคือ ให้ทำการรื้อทางเท้าด้านขวาออกและปรับเพิ่มช่องจราจรสำหรับรถมอเตอร์ไซด์ตามรูปที่ 6.7-1



รูปที่ 6.7-1 การปรับปรุงผิวจราจรบนสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

6.8 การออกแบบเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง

3.8.1 การออกแบบเสริมกำลังของสะพานโดยวิธีลวดอัดแรง (Prestressing System)

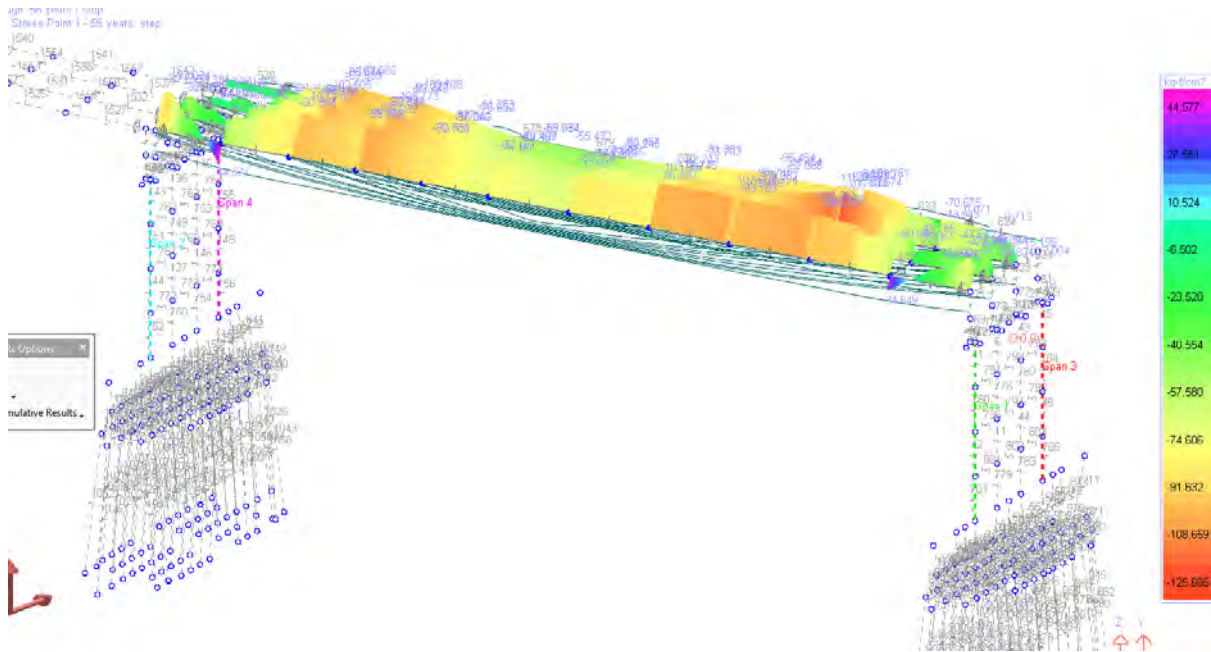
ในหัวข้อนี้ ที่ปรึกษาจะนำแนวทางเสริมกำลังของสะพาน โดยวิธีลวดอัดแรง (Prestressing System) มาใช้ในการออกแบบเสริมกำลังสะพาน เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักของบรรทุกทุก(HL-93) และจำนวนช่องจราจรที่ใช้ในอนาคตได้

โดยในการออกแบบ ที่ปรึกษาจะพิจารณา ในช่วง Service Stage และ ช่วง Ultimate Stage โดยในช่วง Service Stage จะทำการวิเคราะห์ ผลของขั้นตอนการก่อสร้างของสะพาน จนถึงสภาพของ

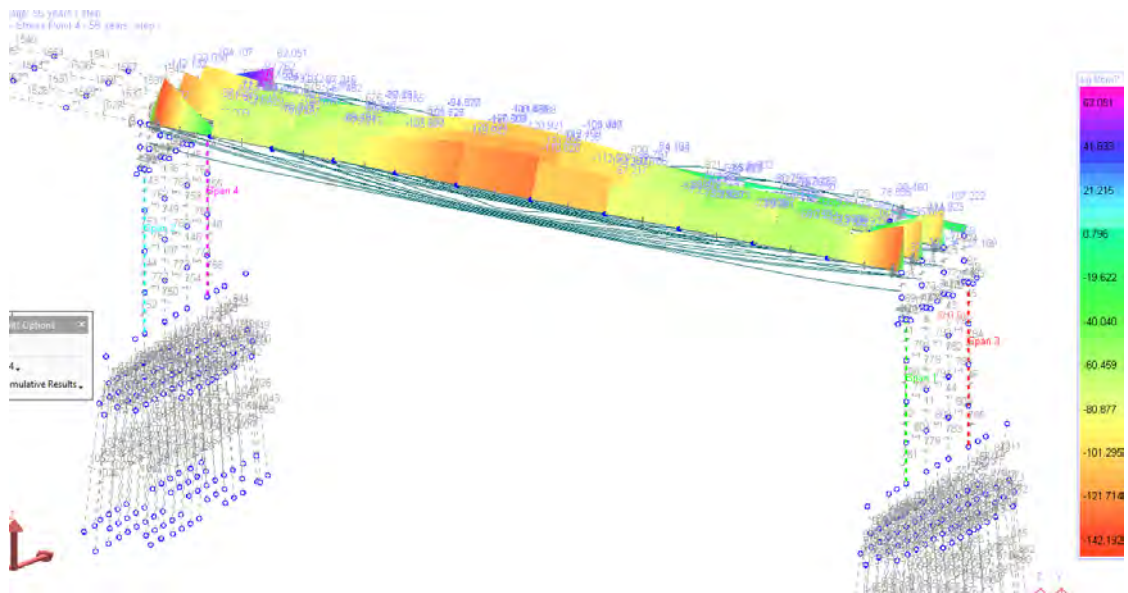
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

สะพาน ในปัจจุบัน แล้วจึงทำการ เสริมส่วนของลวดอัดแรง และ การพอกคอนกรีต ปิด แล้วจึงวิเคราะห์ สะพานที่เสริมกำลังแล้ว ภายใต้ผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจร แสดงดังนี้

ผลของการวิเคราะห์ความเค้นของสะพาน ก่อนการเสริมกำลัง เนื่องจาก DL+SDL+TIME EFFECT



รูปที่ 6-4 ผลความเค้นด้านบน (Top Fiber Stress) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME

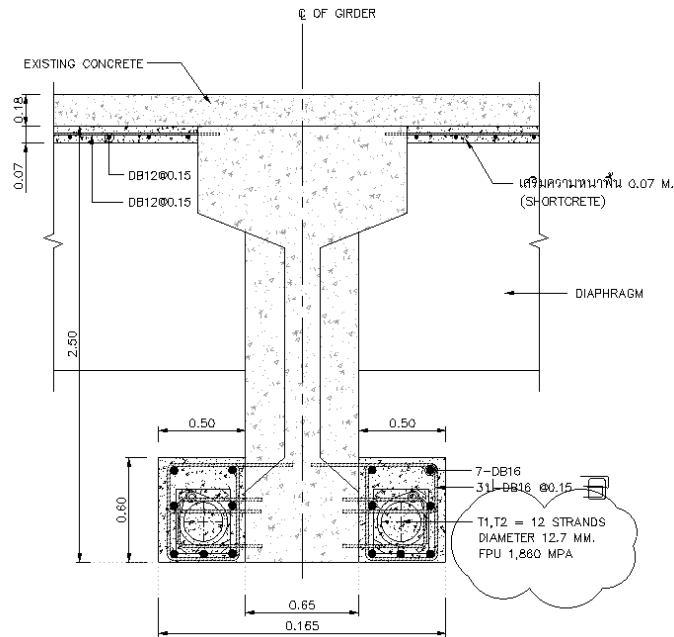


รูปที่ 6-5 ผลความเค้นด้านล่าง (Bottom Fiber Stress) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME

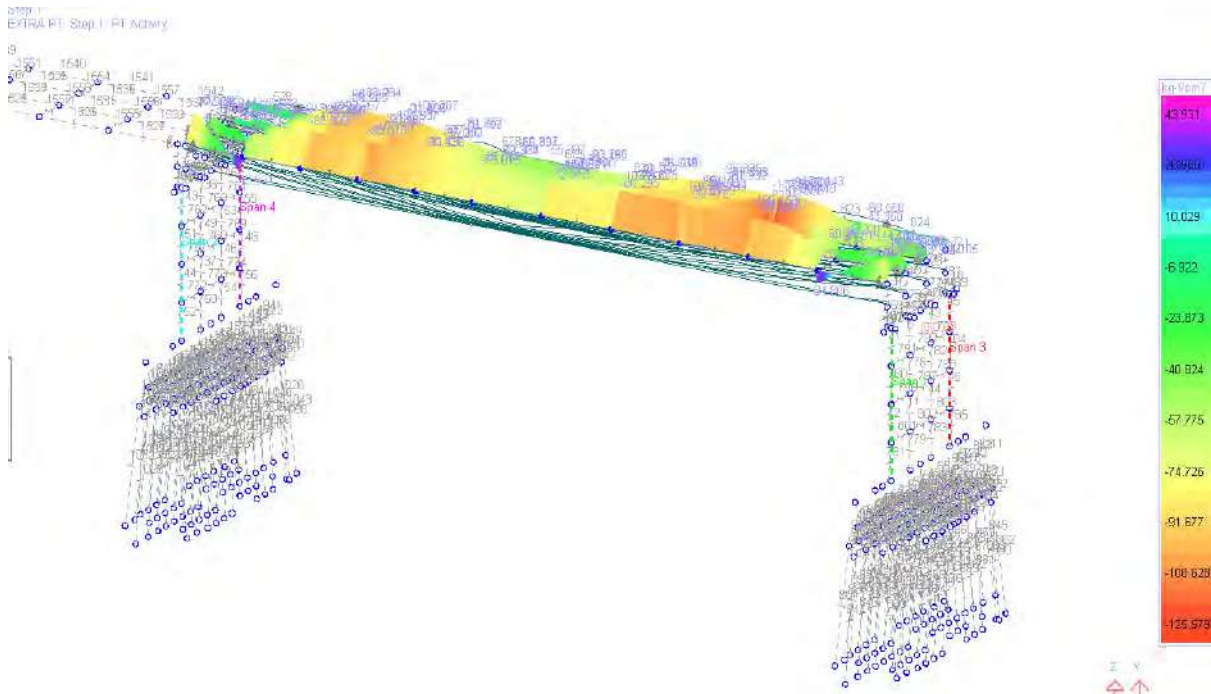


โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ผลของการวิเคราะห์ความเค้นของสะพาน ภายหลังจากการเสริมกำลังด้วย ลวดอัดแรง T1 = 12-S12.7mm Grade 1860 MPa และ T2=12-S12.7mm Grade 1860 MPa

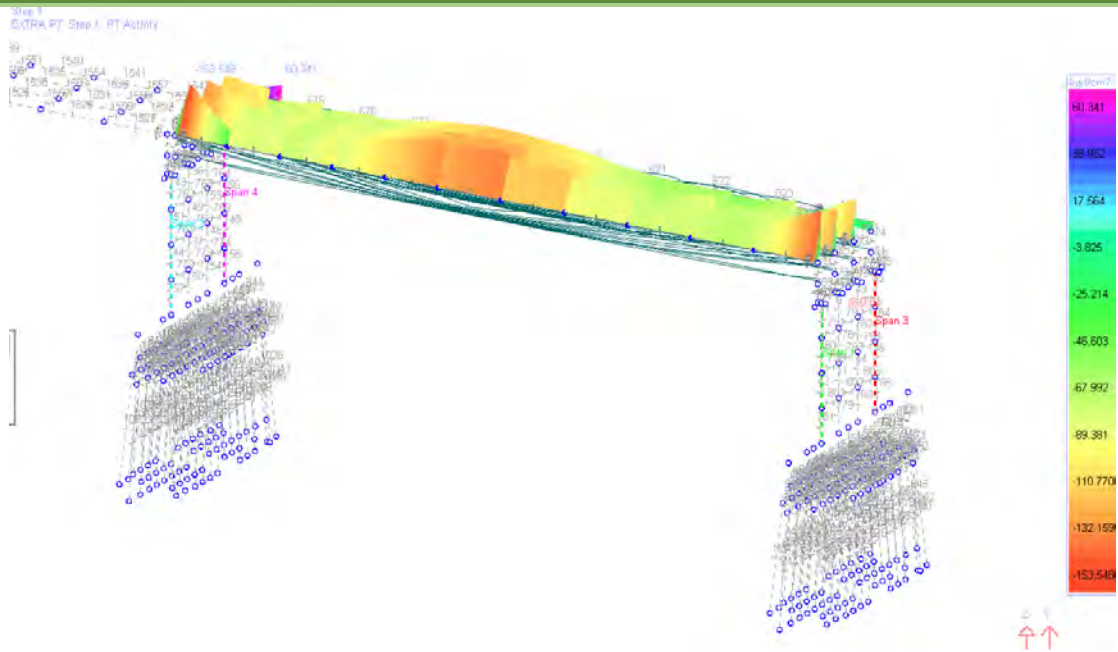


ผลของการวิเคราะห์ความเค้นของสะพาน ภายหลังจากการเสริมกำลัง เนื่องจาก DL+SDL+TIME EFFECT



รูปที่ 6-6 ผลความเค้นด้านบน (Top Fiber Stress) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME





รูปที่ 6-7 ผลความเค้นด้านบ้น (Bottom Fiber Stress) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME

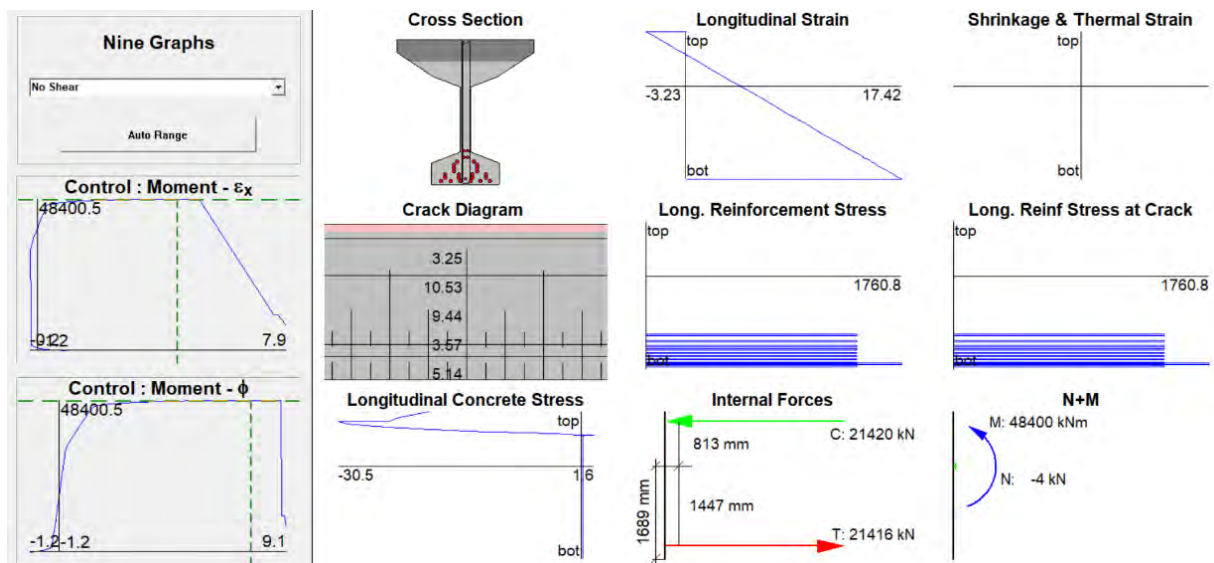
โดยเมื่อดำเนินการนำผลของค่าความเค้นของสะพาน ภายหลังจากการเสริมกำลัง มาเปรียบเทียบกับ ค่าความเค้นของสะพานเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกจร (HL-93) พบว่า สามารถรองรับความเค้นที่เกิดขึ้นได้ ตามมาตรฐาน

จากนั้น ที่ปรึกษาเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน ที่ Strength Limit State เพื่อยืนยันความสามารถในการรับน้ำหนัก ภายหลังจากการเสริมกำลังด้วย Prestressing System แสดงดังนี้



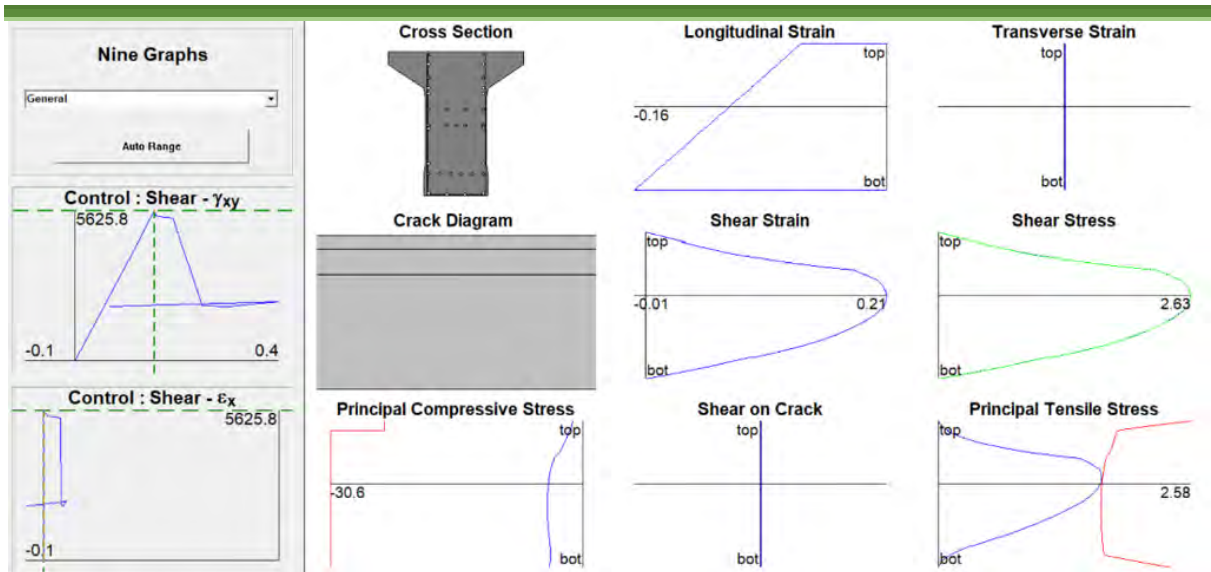
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

การประเมินกำลังสะพานกิตติขจร (สภาพ ณ ปัจจุบัน)		
กรณี 3 ช่องจราจร (ภายหลังจากเสริมกำลังด้วยPrestressing Method)		
	Fy (T)	Mz (T-m)
DL	111	1362.5
SDL	46	525
LL+IM	70	580
PS Loss CR	11	180
SER1	238	2647.5
STR1	335.75	3595.625
Condition Factor	0.85	0.85
0.9Capacity*condition	292.23	3326.985
Capacity/Demand	0.870379747	0.925
Required increase Strengthening (%)	12.96	7.47
Adopted For Strengthening (%)	15	10
0.9CapacityStrengthening	505.8	4356
Solution	2x12S12.7mm	2x12S12.7mm
CapacityNew/Demand	1.5065	1.21



รูปที่ 6-8 พฤติกรรมด้านโมเมนต์ดัดของสะพานเสริมกำลังด้วย Prestressing System

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกึ่งตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 6-9 พฤติกรรมด้านแรงเฉือนของสะพานเสริมกำลังด้วย Prestressing System

การตรวจสอบ Force Transfer ของระบบ Prestressing System

ในขั้นตอนต่อไป จะดำเนินการตรวจสอบความสามารถในการถ่ายแรง (Force Transfer) ของระบบ Prestressing System ไปยังคานเดิมเพื่อเสริมกำลัง โดยพิจารณา 2 ส่วน

- 1) การตรวจสอบการถ่ายแรงของสมอยึด (Bursting Reinforcement)
- 2) การตรวจสอบการถ่ายแรงในแนวนอน (Horizontal Force Transfer Reinforcement)

การตรวจสอบการถ่ายแรงจากสมอยึด (Bursting Reinforcement)

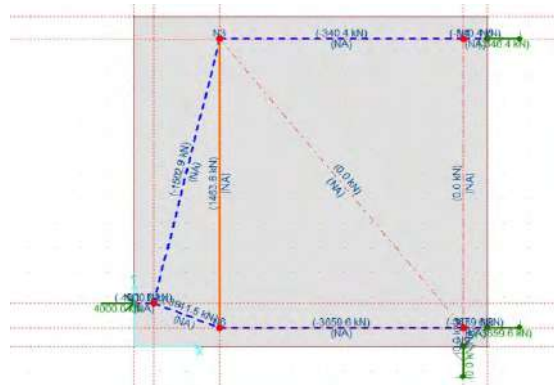
สำหรับการตรวจสอบการถ่ายแรงจากระบบสมอยึดขณะการดึงลวดอัดแรงดำเนินการใช้ Strut and Tie Model (STM) ตามข้อกำหนดของ AASHTO LRFD โดยรูปร่างของ STM แสดงดังนี้



รูปที่ 6-10 การถ่ายแรงอัดและดึงจากผลการดึงลวดอัดแรง

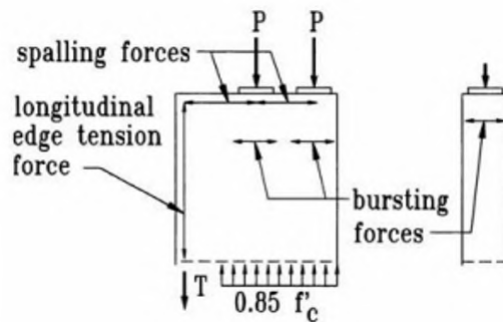


โดยแรงภายในขณะการดึงลวดอัดแรง สามารถวิเคราะห์จาก STM หรือแบบจำลองโครงข้อหมุน
แสดงในรูปที่ 6-11

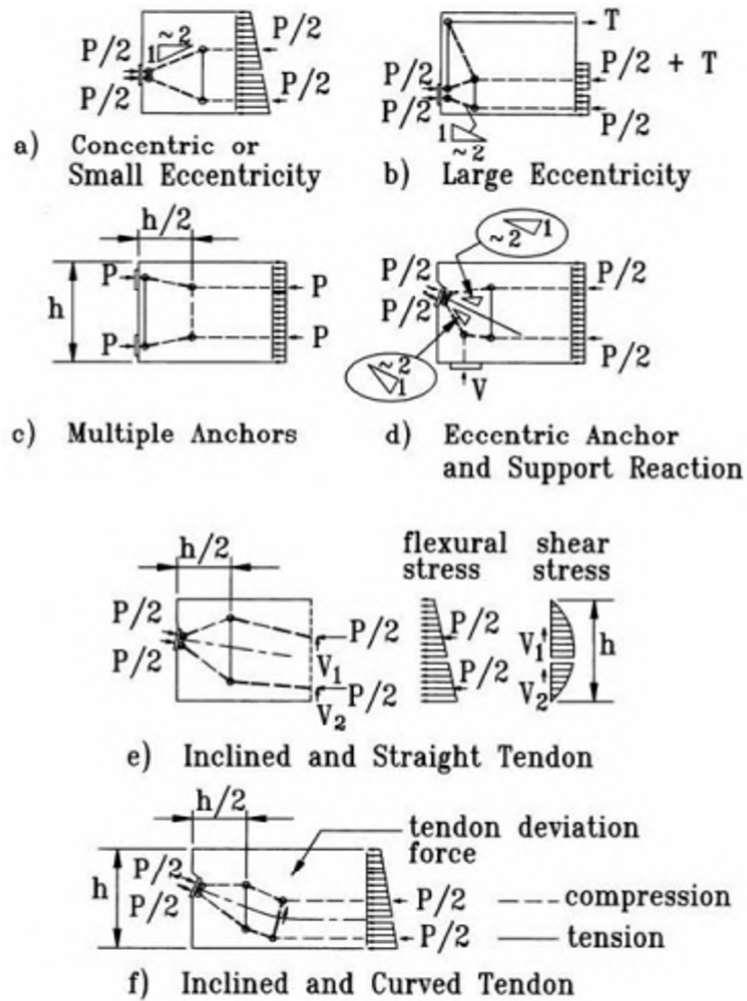


รูปที่ 6-11 การคำนวณแรงที่ถ่ายไปยังคอนกรีตโดยหลักการ **Strut and Tie Model**

ตัวอย่างของการถ่ายแรงขณะดึงลวดอัดแรงตามข้อกำหนด AASHTO แสดงในรูปที่ 6-12 และ
รูปที่ 6-13



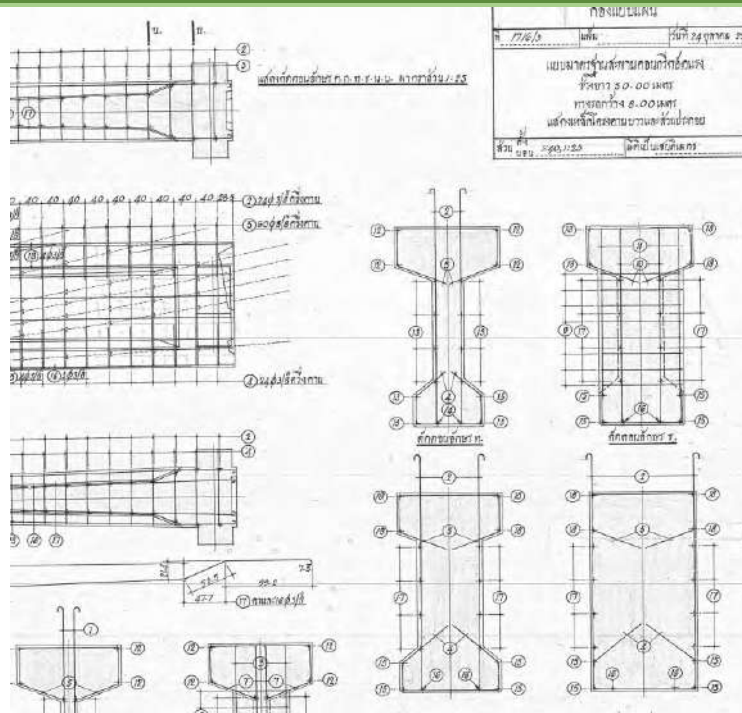
รูปที่ 6-12 ตำแหน่งของแรงดึงที่ปลายคาน



รูปที่ 6-13 การเลือกรูปแบบ **Strut and Tie Model** ที่เหมาะสมสำหรับจุดตั้งลวดอัดแรง
(Anchorage Zone)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 6-14 รูปแบบการดึงลวดอัดแรงที่ปลายคานคองกรีตอัดแรงและ Existing Rebar in Web Girder

โดยจากการวิเคราะห์ STM สามารถประเมินหาค่าของ แรง Bursting ที่เกิดขึ้นขณะการดึงลวดได้ ดังนี้

Pj =	397.7424 T	Pj =	397.7424 T
Tu =	146 T	Tu =	146 T

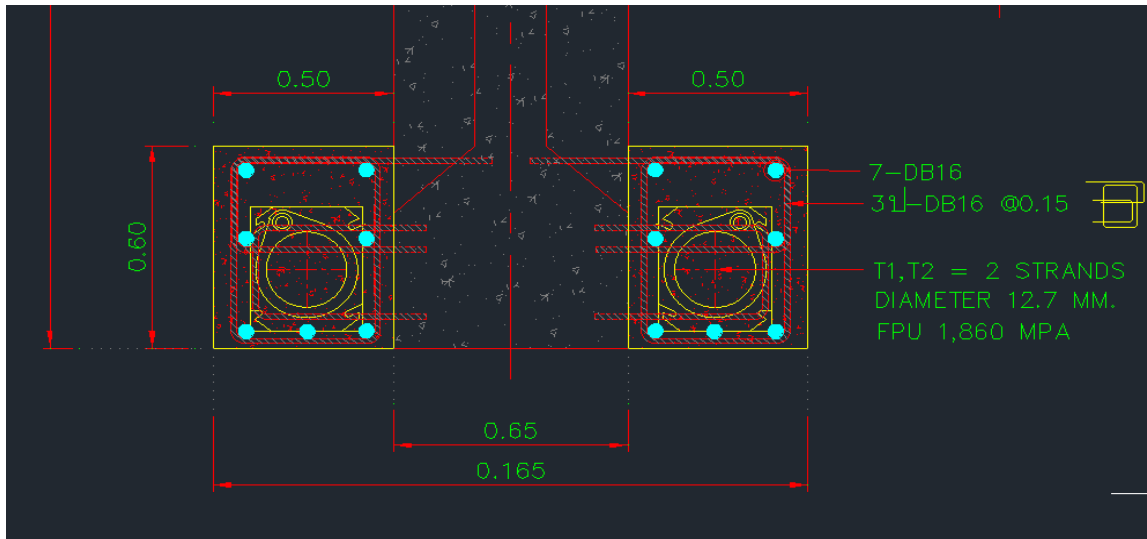
โดยที่ แรงดึงลวด Pj เท่ากับ 397.724 ตัน คือแรงดึงลวดที่ใช้ในการออกแบบตามข้อกำหนด AASHTO คือ 120% ของแรงดึงลวดสูงสุด และ จาก STM สามารถคำนวณหาค่า แรงดึง Tu เท่ากับ 146 ตัน ดังนั้น เหล็กเสริมที่ใช้ เป็นเหล็ก ปลูก จำนวน 4 เส้น โดยเหล็กดังกว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8# การคำนวณแรงทำได้ดังนี้

0.9Tn=	15.39124 T		
Require Increase tension capacity to		130.6088 T	
Providing Extra Rebars		(Effective Width = 1.00 M)	
0.9Tn2 =	150.72 T	OK	(DB20@0.15 Extra Stirrups)

ใช้ เหล็ก DB20 เสริมที่ระยะ 0.15 เมตร เป็นเหล็กปลูกเพิ่มเติมเพื่อรับแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการดึงลวด โดยเหล็กเสริมนี้ เสริมบริเวณด้านข้างของคาน พอกออกมาเป็นระยะความยาว 1.00 M ที่ปลายทั้งสองด้านของคานเพื่อช่วยในการลดโอกาสการแตกร้าวเนื่องจาก Bursting Force ขณะทำการดึงลวดอัดแรง

การตรวจสอบการถ่ายแรงเฉือนจากลวดอัดแรงไปยังคานเดิมด้วยเหล็กรับแรงเฉือน (Transverse Reinforcement Check for Shear Transfer)

จากนั้น ดำเนินการตรวจสอบเหล็กเสริมที่ใช้ในการถ่ายแรงดึงลวดอัดแรงไปยังคานเดิม ในแนวราบ โดยใช้หลักการของ Shear Transfer ตามข้อกำหนดของ AAHSTO โดยบริเวณของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ยึดและวางแนวท่อลวดอัดแรงแสดงในรูปที่ 6-15



รูปที่ 6-15 รูปที่ การเสริมเหล็กเสริมเพื่อถ่ายแรงเฉือนไปยังคานเดิม

จากสมการ Shear Transfer ตาม AASHTO แสดงในรูปที่ 3.8.13 และ สภาพพื้นผิวของคานคอนกรีตเดิมก่อนทำการพอกคอนกรีตและเจาะฝังเหล็กเสริม ได้พิจารณาใช้ค่าของ Friction Parameters ที่เหมาะสมดังนี้



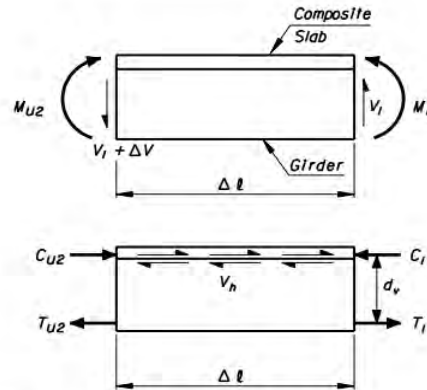


Figure C5.8.4.2-1 Free Body Diagrams.

$$V_n = C_{u2} - C_1 \quad (C5.8.4.2-5)$$

$$V_n = V_1 \Delta l \div d_v \quad (C5.8.4.2-6)$$

Such that for a unit length segment:

$$V_{ni} = V_1 \div d_v \quad (C5.8.4.2-7)$$

where:

V_{ni} = factored interface shear force per unit length (N/length)

รูปที่ 6-16 สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณการถ่ายแรงเฉือนจากเหล็กเสริม

SECTION 5 (SI): CONCRETE STRUCTURES

5-91

- For concrete placed against a clean concrete surface, free of laitance, but not intentionally roughened:

$$\begin{aligned} c &= 0.52 \text{ MPa} \\ \mu &= 0.6 \\ K_1 &= 0.2 \\ K_2 &= 5.5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

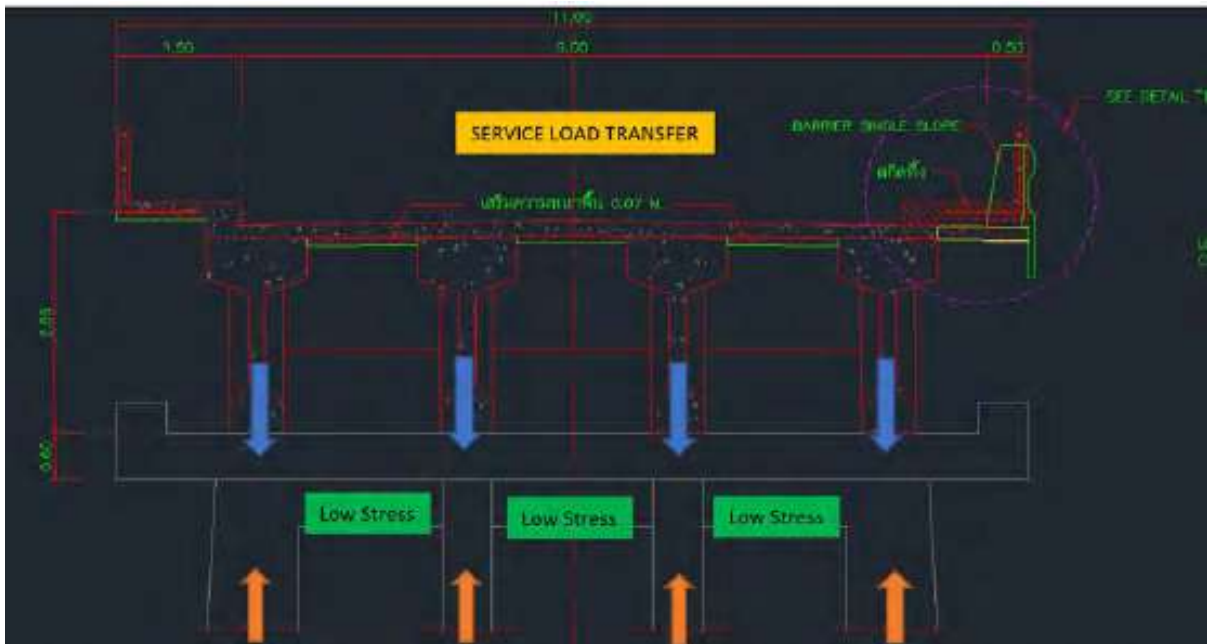
The nominal shear resistance of the interface plane shall be taken as:

$$V_{ni} = cA_{cv} + \mu (A_{vf} f_y + P_c) \quad (5.8.4.1-3)$$

ที่เหมาะสมโดยได้ดำเนินการคำนวณ แรงตามแนวราบเนื่องจากการดึงลวดอัดแรงที่สภาวะ
 ประลัย เท่ากับ 220.968 T ต่อด้านของคาน โดยจากการใช้เหล็กเสริม ขนาด 2 (DB16@0.15 U Hook) (Half
 Length of Girder) for Bottom Side of Girder ทำให้มีค่าของกำลังรับแรงในแนวราบ $0.9V_n = 3596.4 \text{ T}$ ซึ่งมากกว่า
 220.968 T ดังนั้น ปลอดภัย



การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของคานขวาง



รูปที่ 6-17 การถ่ายน้ำหนักจากคานหลักไปยังคานขวางและเสาตอม่อ

จากรูปที่ 6-17 พบว่า การถ่ายแรงจากคานหลักไปยังคานขวางที่บริเวณหัวเสาตอม่อและถ่ายลงโดยตรงไปยังเสาและฐานรากตามลำดับ ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนน้อยมากที่เพิ่มขึ้นต่อคานขวางเดิมเล็กน้อยหรือมีเฉพาะน้ำหนัก DL เท่านั้น ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องเสริมกำลังคานทางขวาง

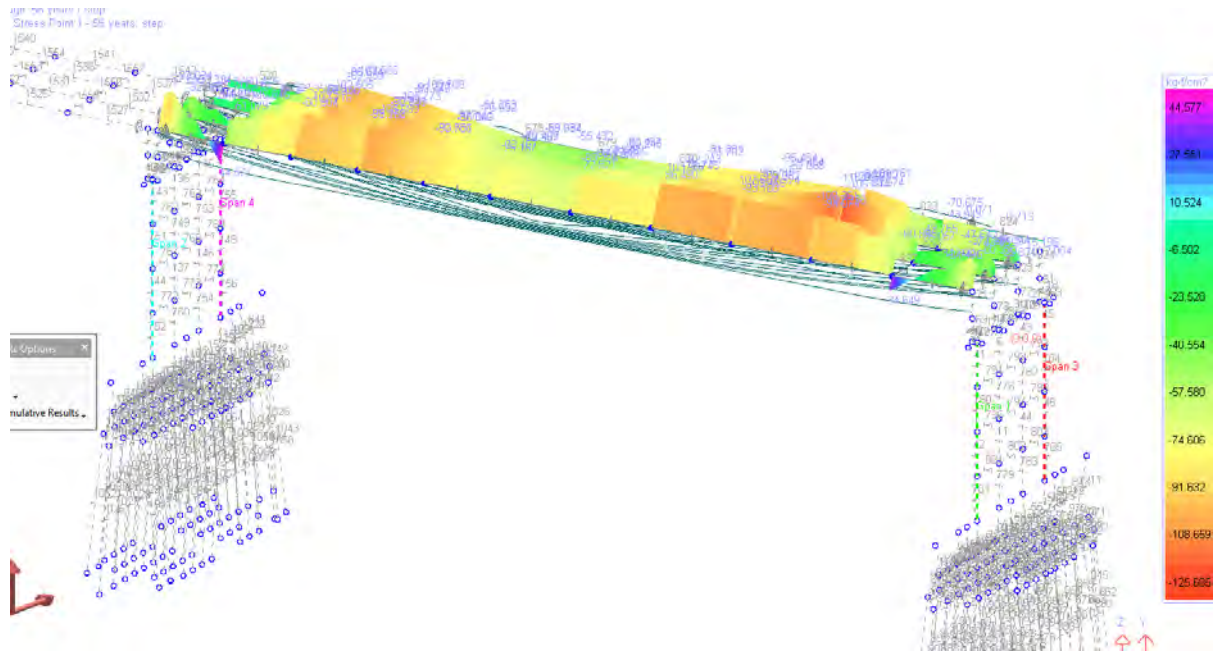
3.8.2 การออกแบบเสริมกำลังของสะพานโดยวิธีเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)

ในหัวข้อนี้ ที่ปรึกษาจะนำแนวทางเสริมกำลังของสะพาน โดยวิธีเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) มาใช้ในการออกแบบเสริมกำลังสะพาน เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักของบรรทุก (HL-93) และ จำนวนช่องจราจรที่ใช้ในอนาคตได้

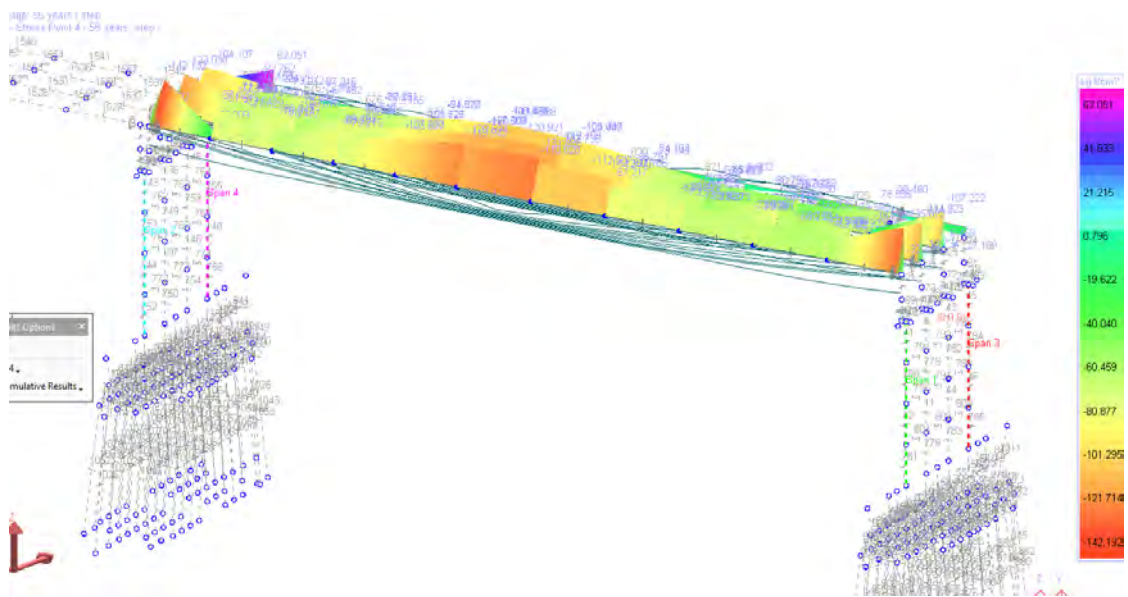
โดยในการออกแบบ ที่ปรึกษาจะพิจารณา ในช่วง Service Stage และ ช่วง Ultimate Stage โดยในช่วง Service Stage จะทำการวิเคราะห์ ผลของขั้นตอนการก่อสร้างของสะพาน จนถึง สภาพของสะพาน ในปัจจุบัน แล้วจึงทำการ เสริม Carbon Fiber และ Coating ปิด แล้วจึงวิเคราะห์ สะพานที่เสริมกำลังแล้ว ภายใต้ผลของ น้ำหนักบรรทุกจร ดังแสดงดังนี้



ผลของการวิเคราะห์ความเค้นของสะพาน ก่อนการเสริมกำลัง เนื่องจาก DL+SDL+TIME EFFECT



รูปที่ 6-18 ผลความเค้นด้านบน (Top Fiber Stress) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME



รูปที่ 6-19 ผลความเค้นด้านล่าง (Bottom Fiber Stress) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME

ผลของการวิเคราะห์ความเค้นของสะพาน และกำลังที่เหลืออยู่ที่จำเป็นต้องเสริมกำลัง ที่ปรึกษาออกแบบเสริมกำลังแรงเฉือนโดยเพิ่ม การเสริม CFRP แบบผืน (WRAP) ด้านข้างของคานในช่วงรับแรงเฉือน โดยวัสดุ CFRP WRAP หนา 0.167 MM หุ้มจำนวน 1 ชั้น และออกแบบเสริมแผ่น CFRP แบบ strip บริเวณใต้ท้องของคาน

จากนั้น ที่ปรึกษาเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน ที่ Strength Limit State เพื่อยืนยัน
ความสามารถในการรับน้ำหนัก ภายหลังจากเสริมกำลังด้วย Carbon Fiber แสดงดังนี้

การประเมินกำลังสะพานกิตติขจร (สภาพ ณ ปัจจุบัน)

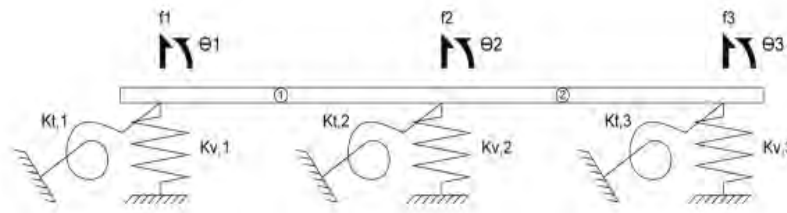
กรณี 3 ช่องจราจร (ภายหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP Method)

	Fy (T)	Mz (T-m)
DL	111	1362.5
SDL	46	525
LL+IM	70	580
PS Loss CR	11	180
SER1	238	2647.5
STR1	335.75	3595.625
Condition Factor	0.85	0.85
0.9Capacity*condition	292.23	3326.985
Capacity/Demand	0.870379747	0.925
Required increase Strengthening (%)	12.96	7.47
Adopted For Strengthening (%)	15	10
0.9CapacityStrengthening	382.5	4011.3
Solution	2layer ofCFRPwrap	1layer10CFRP
CapacityNew/Demand	1.1392	1.12



6.9 การวิเคราะห์พฤติกรรมและการกระจายของน้ำหนักบรรทุกจรตามวิธีการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาแสดงผลของการวิเคราะห์พฤติกรรมและการกระจายของน้ำหนักบรรทุกจรตามวิธีการเสริมกำลังต่าง ๆ แสดงดังนี้



รูปที่ 6-20 Stiffness of Deck and Girder System

ในการศึกษาพฤติกรรมและการกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร ก่อนและหลังการบูรณะสะพาน ที่ปรึกษาเลือกใช้ 3D FE Model ที่ได้ปรับค่าแบบจำลองกับผลทดสอบในภาคสนาม โดยในการศึกษาพฤติกรรม สามารถอธิบายการกระจายน้ำหนักบรรทุกจรอย่างง่ายจาก Stiffness System ของพื้นและคานสะพาน ตามรูปที่ 6-20 โดยการกระจายน้ำหนักบรรทุกจร เข้าสู่คานในแต่ละตัวจะขึ้นกับ Vertical และ Rotational Stiffness ของพื้นและคาน โดยแนวทางการบูรณะสะพานที่ทำให้ Vertical และ Rotational Stiffness ของพื้นและคาน ตัวใดสูงขึ้นเป็นนัยยะสำคัญ มีแนวโน้มที่การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร จะเข้าสู่พื้นและคานส่วนนั้นมากกว่า บริเวณอื่น ดังนั้น แนวทางการบูรณะสะพาน เพื่อให้เกิดการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอ อาจมีความจำเป็นต้องพิจารณา สัดส่วนของ Vertical และ Rotational Stiffness ของพื้นและคานแต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน เพื่อให้เห็นภาพในพฤติกรรมข้างต้น ที่ปรึกษา แสดงการวิเคราะห์ การกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร ในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

6.9.1. กรณีการเสริมความหนาพื้น โดยไม่มีการขยายความกว้างสะพาน

กรณี เสริมความหนาพื้น โดย ไม่มีการขยายความกว้างสะพาน

Bridge Strengthening with Shotcrete to Deck 25 cm

Case: 2 Trucks

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
CalibratedFEA	0.254	0.249	0.248	0.248

Case: 1 Left Truck

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
CalibratedFEA	0.263	0.253	0.242	0.242

รูปที่ 6-21 Distribution Factor ของพื้นเสริมกำลังโดย Shotcrete (ไม่มีการขยายความกว้าง)

สำหรับรูปแบบการเสริมความหนาพื้นของสะพานเดิม โดยใช้วิธี Shotcrete ปรับความหนาพื้นเป็น 25 cm. การวิเคราะห์หา Distribution Factor หรือ การกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร แสดงใน รูปที่ 6-21 โดยจากการวิเคราะห์ การเพิ่มความหนาที่เพิ่มขึ้นเท่ากันตลอดความกว้างของสะพาน จะทำให้การกระจายน้ำหนักบรรทุกจรยังค่อนข้างสม่ำเสมอ หรือ แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกจร กระจายไปยังคานแต่ละตัวเท่าๆ กัน



6.9.2. กรณีไม่มีการเสริมความหนาพื้น โดยมีการขยายความกว้างสะพาน (พื้นและ Concrete Barrier) ด้านนอกของสะพาน เท่านั้น

Existing Bridge Condition with Bridge Widening

Case: 2 Trucks

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
CalibratedFEA	0.211	0.197	0.190	0.403

Case: 1 Left Truck

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
CalibratedFEA	0.220	0.193	0.178	0.409

รูปที่ 6-22 Distribution Factor ของพื้น (มีการขยายความกว้างด้านนอก)

สำหรับรูปแบบการปรับปรุงสะพานเดิม โดยใช้ไม่มีการปรับความหนาพื้น และมีการขยายความกว้างพื้นด้านนอก และ ปรับพื้นและราวสะพานแบบเหล็ก เป็น Concrete Barrier การวิเคราะห์หา Distribution Factor หรือ การกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร แสดงในรูปที่ 6-22 โดยจากการวิเคราะห์ การ ความหนาพื้นด้านนอกที่ขยายและการเปลี่ยน ราวสะพานเหล็ก เป็น Concrete Barrier เฉพาะ ด้านนอก จะทำให้ การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร ไม่สม่ำเสมอ หรือ แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกจร กระจายไปยังคานด้านนอก ที่มี Rotational และ Vertical Stiffness สูงกว่า คานด้านใน และ ราวสะพาน เหล็กเดิม

6.9.3. กรณีที่มีการเสริมความหนาพื้น โดยมีการขยายความกว้างสะพาน (พื้นและ Concrete Barrier) ด้านนอกของสะพาน เท่านั้น

Case: 2 Trucks

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
CalibratedFEA	0.204	0.198	0.197	0.401

Case: 1 Left Truck

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
CalibratedFEA	0.209	0.200	0.189	0.402

รูปที่ 6-23 Distribution Factor ของพื้น (มีการขยายความกว้างด้านนอก)

สำหรับรูปแบบการปรับปรุงสะพานเดิม โดยใช้มีการปรับความหนาพื้น และมีการขยายความกว้างพื้นด้านนอก และ ปรับพื้นและราวสะพานแบบเหล็ก เป็น Concrete Barrier การวิเคราะห์หา Distribution Factor หรือ การกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร แสดงในรูปที่ 6-23 โดยจากการวิเคราะห์ การ ความหนาพื้นด้านนอกที่ขยายและการเปลี่ยน ราวสะพานเหล็ก เป็น Concrete Barrier เฉพาะด้านนอก จะทำให้ การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร ไม่สม่ำเสมอ หรือ แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกจร กระจายไปยังคานด้านนอก ที่มี Rotational และ Vertical Stiffness สูงกว่า คานด้านใน และ ราวสะพานเหล็กเดิม

6.9.4. กรณีไม่มีการเสริมความหนาพื้น แต่มีการเสริม Diaphragm โดยมีการขยายความกว้างสะพาน (พื้นและ Concrete Barrier) ด้านนอกของสะพาน เท่านั้น

Case: 2 Trucks

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
Without Rib	0.211	0.197	0.19	0.403
With Rib@1.00m	0.218	0.203	0.190	0.389

Case: 1 Left Truck

	Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4
Without Rib	0.22	0.193	0.178	0.409
With Rib@1.00m	0.238	0.209	0.179	0.374

รูปที่ 6-24 Distribution Factor ของพื้น เสริม Diaphragm (มีการขยายความกว้างด้านนอก)

สำหรับรูปแบบการปรับปรุงสะพานเดิม โดยใช้ไม่มีการปรับความหนาพื้น และมีการขยายความกว้างพื้นด้านนอก พร้อมการเสริม Diaphragm ย่อย และ ปรับพื้นและราวสะพานแบบเหล็ก เป็น Concrete Barrier การวิเคราะห์หา Distribution Factor หรือ การกระจายของน้ำหนักบรรทุกจร แสดงใน รูปที่ 6-24 โดยจากการวิเคราะห์ การ ความหนาพื้นด้านนอกที่ขยายและการเปลี่ยน ราวสะพานเหล็ก เป็น Concrete Barrier เฉพาะด้านนอก แม้จะมีการ เพิ่ม Diaphragm ย่อย ใต้พื้นเดิม จะช่วยเพื่อปรับ การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร จากด้านนอกเข้ามา ให้ดีขึ้น แต่ก็ยังไม่สม่ำเสมอ หรือ แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกจร กระจายไปยังคานด้านนอก ที่มี Rotational และ Vertical Stiffness ยังสูงกว่า คาน ด้านใน และ ราวสะพานเหล็กเดิม

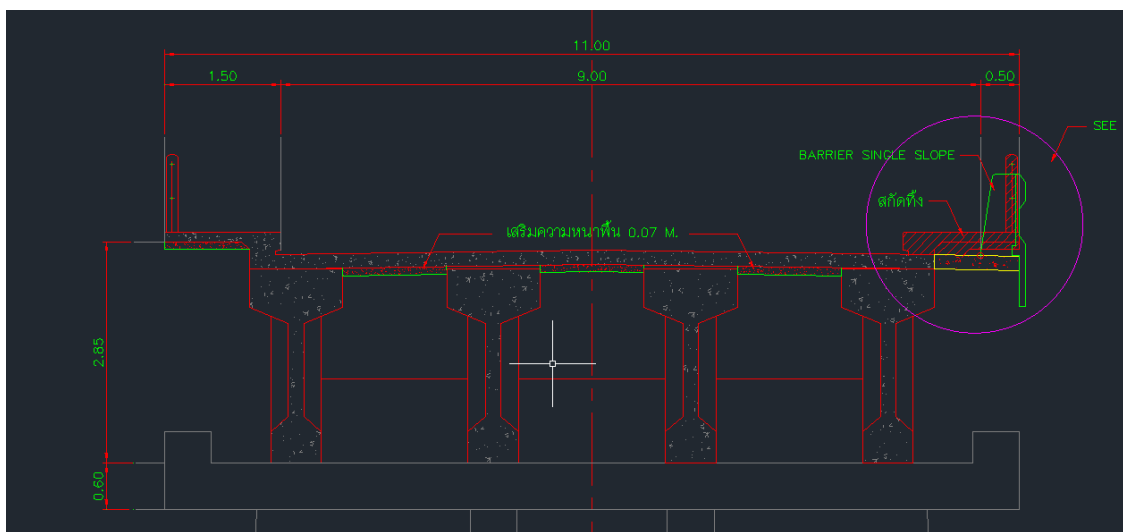
6.9.5. สรุปแนวทางการปรับปรุงระบบพื้นและคานที่เหมาะสม

จากการศึกษาพฤติกรรม การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร ในคานและพื้น จากแนวทางการเสริมกำลังสะพานต่าง ๆ ผลของ Rotational และ Vertical Stiffness ของคานและพื้น มีผลอย่างมาก ต่อการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจร โดยเฉพาะ ผลของ Rotational Stiffness ของ พื้นยื่นและ Concrete Barrier ด้านนอก เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้ระบบราวสะพานแบบเหล็ก รุ่นเก่า โดยการเสริมความหนาพื้นหรือเพิ่ม Diaphragm ยังไม่สามารถ ช่วยการกระจายแรงให้สม่ำเสมอได้

ดังนั้น เพื่อให้ การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร สม่ำเสมอ ทั้งคานและพื้นด้านนอกที่ขยาย ด้านในและ ด้านริมใน ที่ปรึกษา เสนอให้ ปรับพื้นยื่นทั้งด้านริมในและริมนอกที่ขยาย โดยจำเป็นต้องทุบหรือราวเหล็กเดิม ทั้งหมด และเปลี่ยนเป็น Concrete Barrier ทั้งหมด

6.10 การวิเคราะห์และประเมินพื้นของสะพานกิตติขจร

ในหัวข้อนี้ ที่ปรึกษา ดำเนินการนำการวิเคราะห์และออกแบบพื้นของสะพานตามข้อกำหนดของ AASHTO LRFD มาใช้ในการประเมินความแข็งแรงด้านโครงสร้างพื้นของสะพาน โดยตัวอย่างของรูปแบบของโครงสร้างพื้นของสะพาน แสดงดังนี้



รูปที่ 6-25 รูปแบบและขนาดของพื้นของสะพาน

ตาม AASHTO LRFD การวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นสะพาน สามารถดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบตามขวาง หรือ Transverse Analysis and Design โดย Effective Width ตาม AASHTO ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของพื้นสะพาน ที่มีตำแหน่งรองรับคือตำแหน่งของคานสะพาน แสดงดังนี้

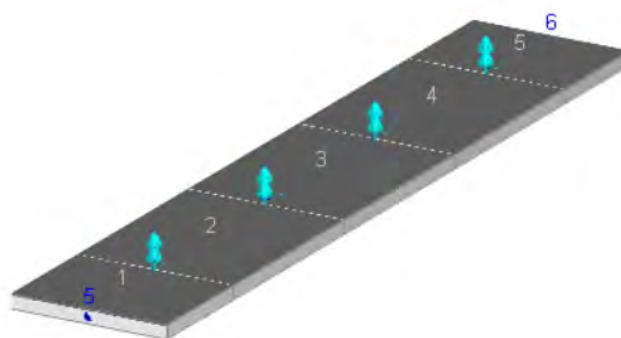


Table 4.6.2.1.3-1 Equivalent Strips.

Type Of Deck	Direction of Primary Strip Relative to Traffic	Width of Primary Strip (mm)
Concrete:		
<ul style="list-style-type: none"> Cast-in-place 	Overhang	$1140 + 0.833X$
	Either Parallel or Perpendicular	+M: $660 + 0.55S$ -M: $1220 + 0.25S$
<ul style="list-style-type: none"> Cast-in-place with stay-in-place concrete formwork 	Either Parallel or Perpendicular	+M: $660 + 0.55S$ -M: $1220 + 0.25S$
	<ul style="list-style-type: none"> Precast, post-tensioned 	Either Parallel or Perpendicular
Steel:		
<ul style="list-style-type: none"> Open grid Filled or partially filled grid Unfilled, composite grids 	Main Bars	$0.007P + 4.0S_s$
	Main Bars	Article 4.6.2.1.8 applies
	Main Bars	Article 4.6.2.1.8 applies
Wood:		
<ul style="list-style-type: none"> Prefabricated glulam <ul style="list-style-type: none"> Noninterconnected 	Parallel	$2.0h + 760$
	Perpendicular	$2.0h + 1020$
<ul style="list-style-type: none"> Interconnected 	Parallel	$2280 + 0.07L$
	Perpendicular	$4.0h + 760$
<ul style="list-style-type: none"> Stress-laminated 	Parallel	$0.066S + 2740$
	Perpendicular	$0.84S + 610$
<ul style="list-style-type: none"> Spike-laminated <ul style="list-style-type: none"> Continuous decks or interconnected panels Noninterconnected panels 	Parallel	$2.0h + 760$
	Perpendicular	$4.0h + 1020$
	Parallel	$2.0h + 760$
Perpendicular	$2.0h + 1020$	

รูปที่ 6-26 ตารางค่าความกว้างประสิทธิผล (Effective Strip) พื้นของสะพาน

จากความกว้างประสิทธิผล แบบจำลองตามขวางของพื้นสะพานแสดงดังนี้

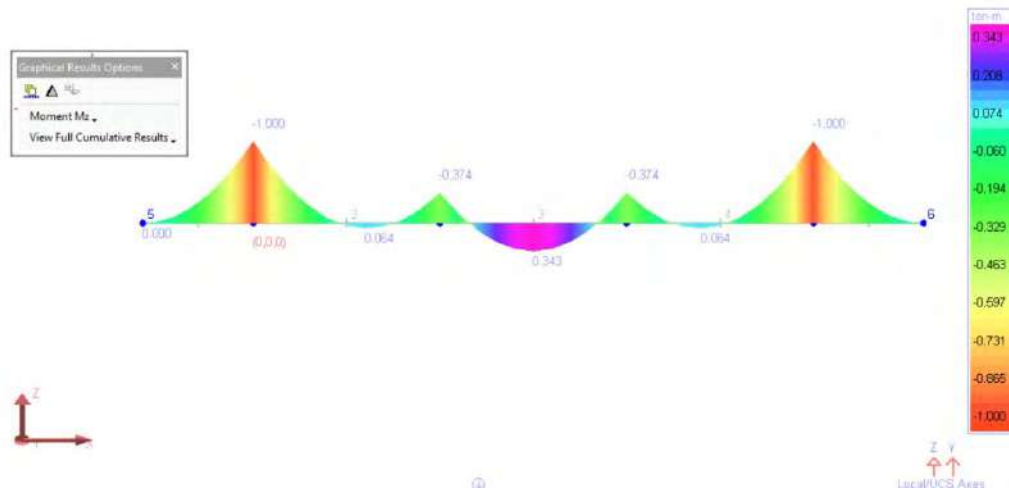


รูปที่ 6-27 แบบจำลองพื้นของสะพานตามขวาง

แบบจำลองของพื้นสะพาน ได้นำมาวิเคราะห์ construction stage analysis และ ทำการวิเคราะห์ Moving Load Analysis เนื่องจาก รถบรรทุก HL-93 รวมทั้งพิจารณาผลของ Impact Factor = 33% โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้

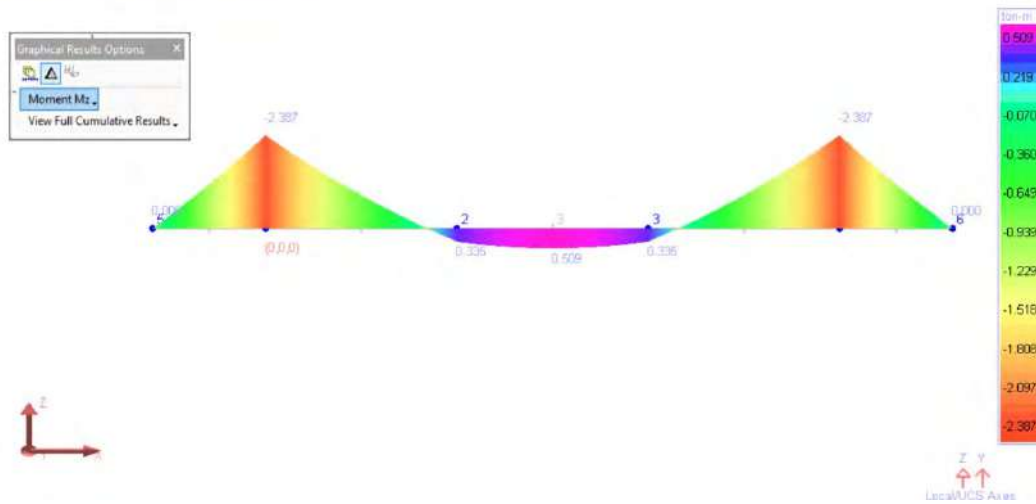
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Zoom: 1.250X Stage: Deck Construction / Deck Construction
Member Forces - Moment Mz - Deck Construction / Deck Construction



รูปที่ 6-28 Transverse Analysis (DL) Moment T-m

Zoom: 1.250X Stage: Bridge Haling and Wearing / Wearing
Member Forces - Moment Mz - Bridge Haling and Wearing / Wearing

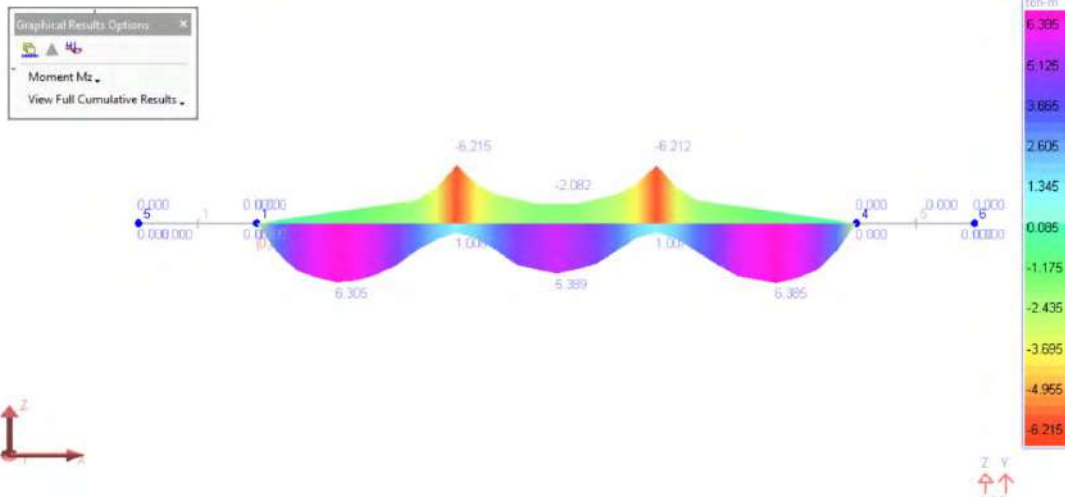


รูปที่ 6-29 Transverse Analysis (SDL) Moment T-m



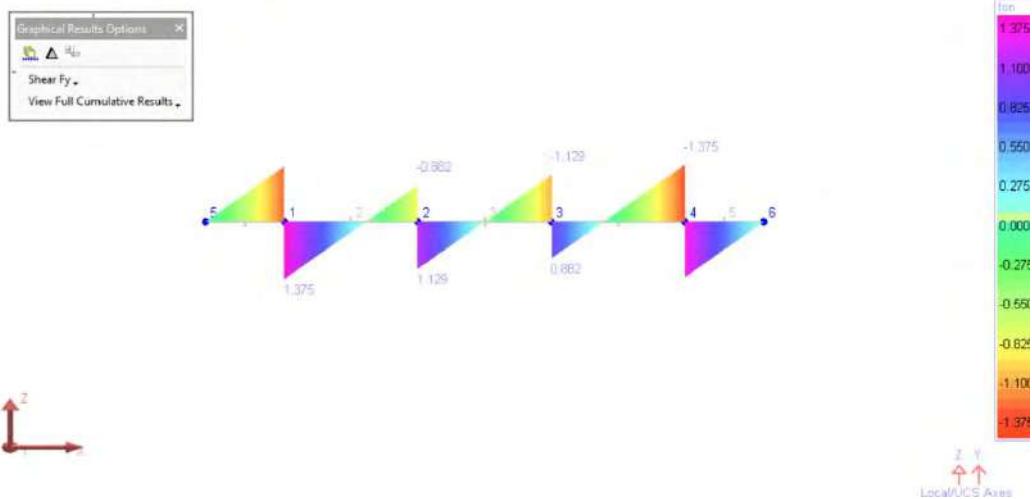
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

1-250k Stage: Deck Construction / Deck Construction
 Member Forces - Moment Mz - HL-93(1+IM)MUL



รูปที่ 6-30 Transverse Analysis (LL+IM) T-m

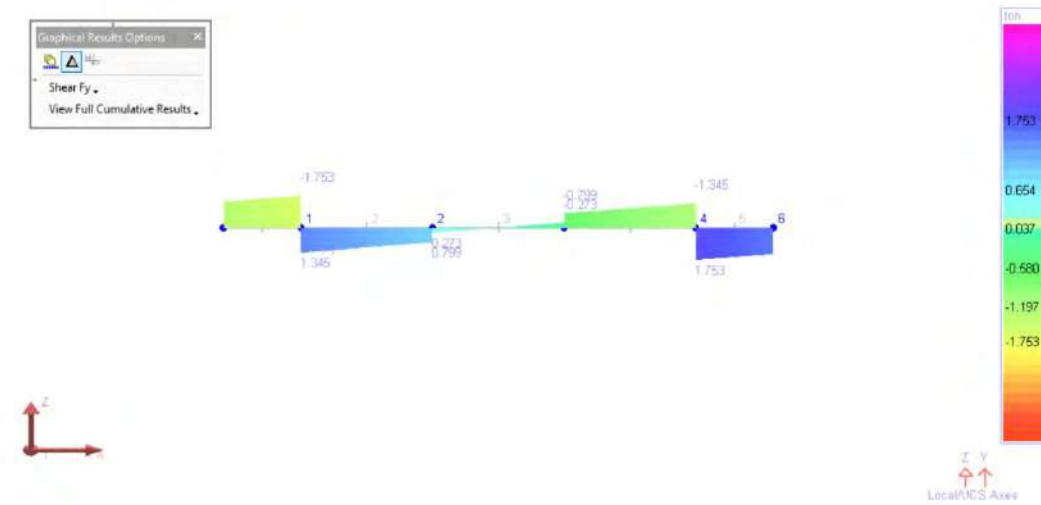
com: 1.000k Stage: Deck Construction / Deck Construction
 Member Forces - Shear Fy - Deck Construction: Deck Construction



รูปที่ 6-31 Transverse Analysis (DL) Shear T

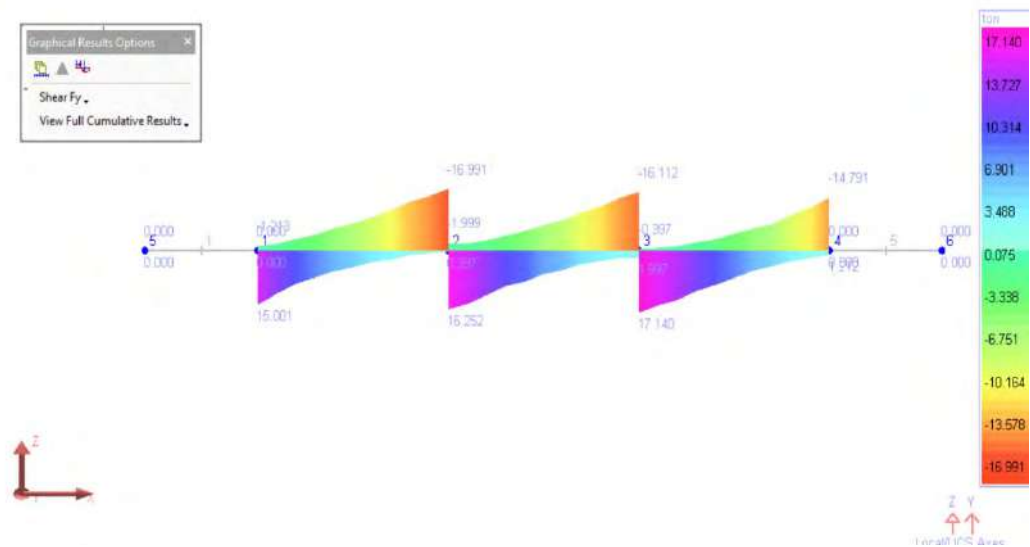
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Zoom: 1.000X Stage: Bridge Railing and Wearing / Wearing
Member Forces - Shear Fy - Bridge Railing and Wearing / Wearing



รูปที่ 6-32 Transverse Analysis (SDL) Shear T

Zoom: 1.250X Stage: Deck Construction / Deck Construction
Member Forces - Shear Fy - HL93(1) + IM) MUL



รูปที่ 6-33 Transverse Analysis (LL+IM) Shear T

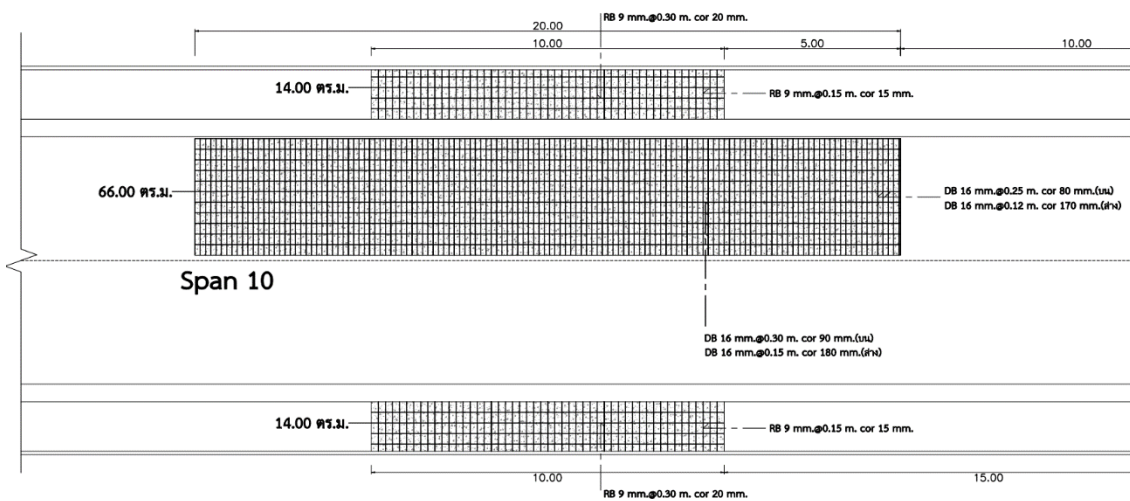


จากผลของการวิเคราะห์ ได้พิจารณาผลรวมของค่าแรงตาม Load Combination (Strength Limit State I) แสดงดังนี้

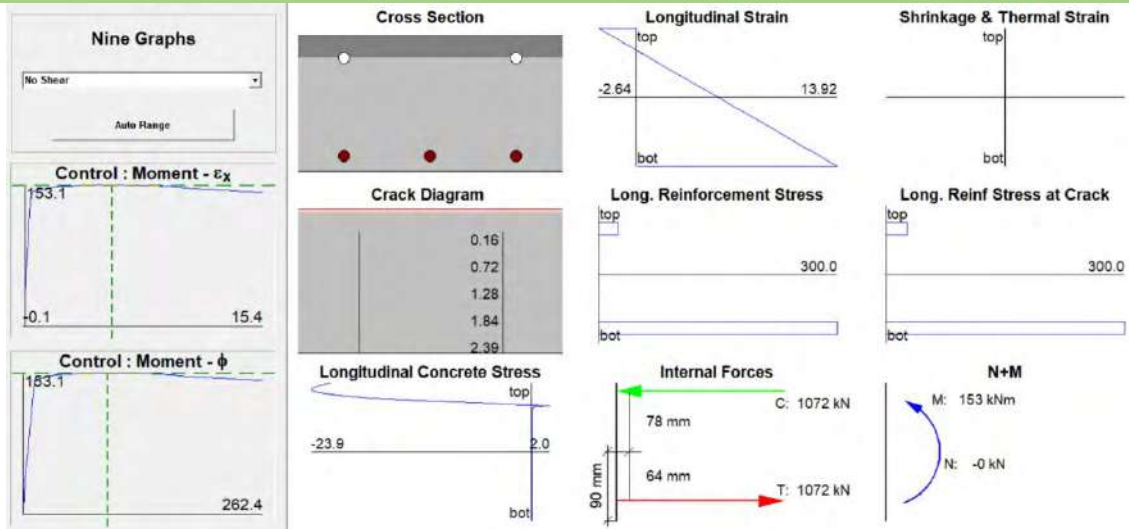
Demand				Capacity			
STR1							
Mu+ =	10.6	T-m	(Point C)	0.80*0.9Mn=	11.02	T-m	Almost ok
Mu- =	-4.8	T-m	(Point A)	0.80*0.9Mn=	5.11	T-m	Not OK (Required Deck Flexure Strengthening)
	-11.6	T-m	(Point B)		16.11	T-m	OK (After Strengthening to 25cm thickness)
Vu =	30.0	T	(Point A)	0.80*0.9Vn	35.14	T	OK
	31.1	T	(Point B)				

รูปที่ 6-34 Load Combination Results

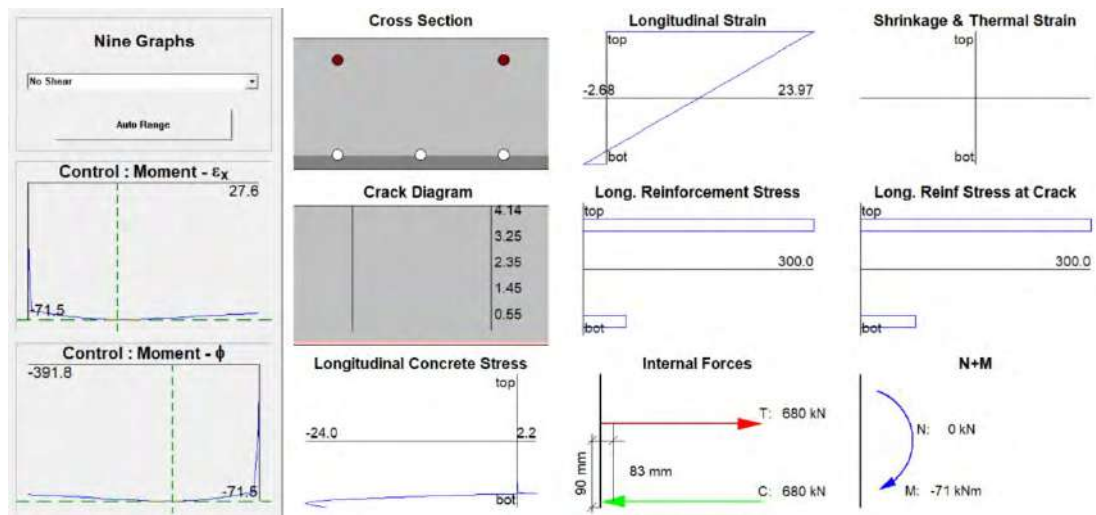
จากผลของการวิเคราะห์หาค่ากำลังของหน้าตัดต้านแรงเฉือนและโมเมนต์ด้วยวิธี Strain Compatibility Analysis และ MCFT ได้ค่า กำลังของหน้าตัดของพื้นสะพานก่อนเสริมกำลัง ดังแสดงดังนี้



รูปที่ 6-35 แบบสำรวจขนาดเหล็กเสริมพื้นสะพานเดิม ประกอบการวิเคราะห์

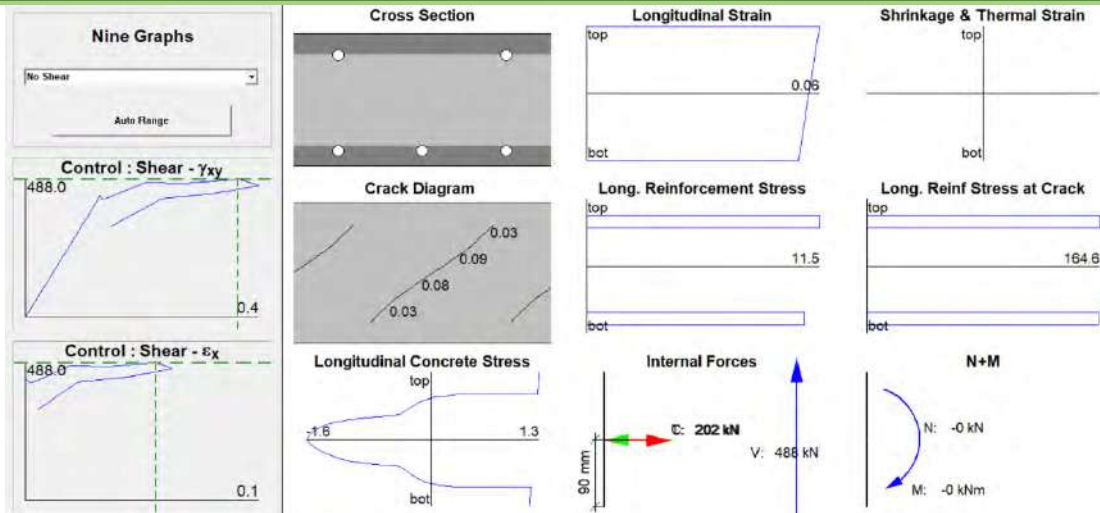


รูปที่ 6-36 Mn ทิศทาง + ของพื้นสะพานเดิม



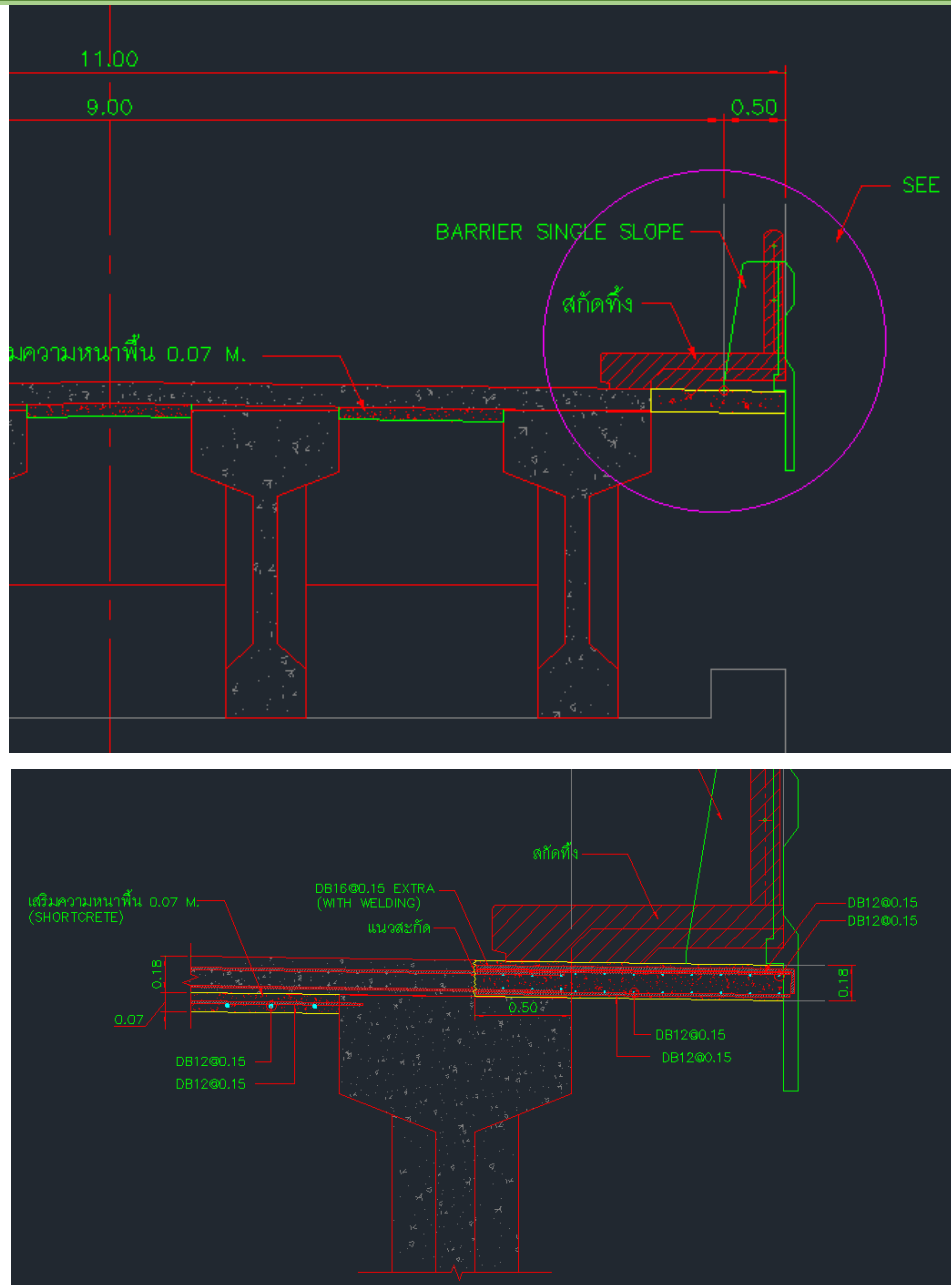
รูปที่ 6-37 Mn ทิศทาง - ของพื้นสะพานเดิม





รูปที่ 6-38 Vn ของพื้นสะพานเดิม

จากผลของการวิเคราะห์ค่าแรงและเปรียบเทียบกับกำลังหน้าตัดที่พิจารณา Reduction Factor และ สภาพของวัสดุ แสดงให้เห็นว่า กำลังของพื้นรับโมเมนต์ดัด จำเป็นต้องทำการเสริมกำลัง โดยพิจารณาการเสริมกำลังโดยทำการ Shotcrete ที่ด้านท้องของพื้นสะพาน และ ทำการเสริมเหล็กยึดเข้ากับด้านบนของคานเดิม เพื่อให้ กำลังหน้าตัดเพิ่มขึ้น แสดงดังนี้

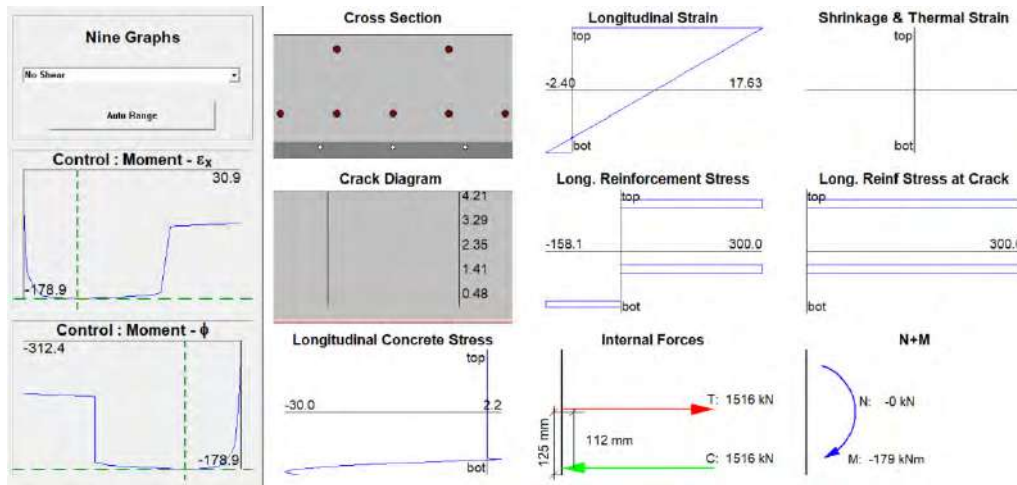
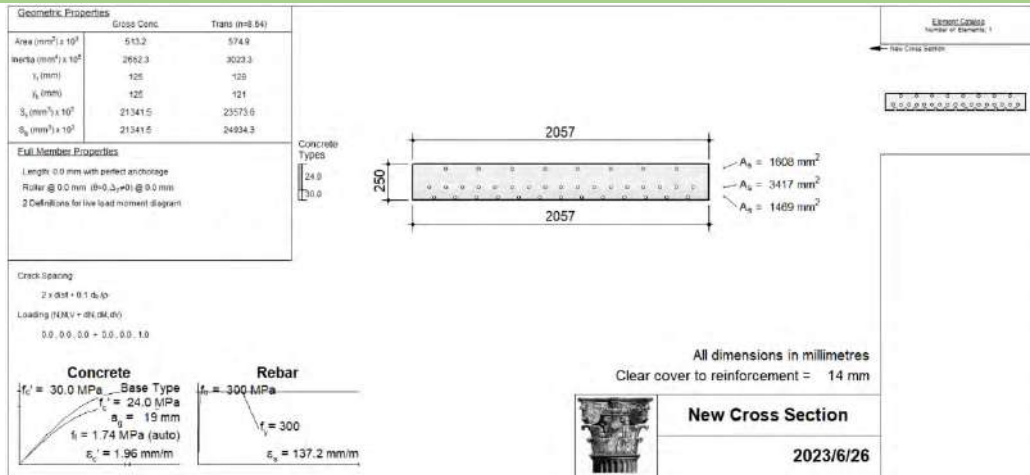


รูปที่ 6-39 การเสริมกำลังของพื้นสะพานเดิม

จากการเสริมกำลังพื้นข้างต้น ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าของกำลัง Flexural Capacity ของพื้นดังนี้ โดยกำลังที่เพิ่มขึ้น สามารถรองรับ Load Combination ตาม AASHTO ได้ รูปที่ 6-40



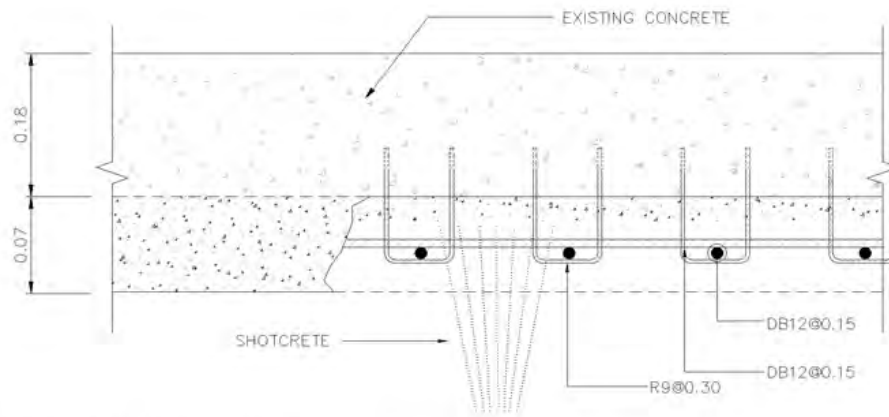
โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 6-40 Flexure Capacity การเสริมกำลังของพื้นสะพานเดิม



นอกจากนั้นได้ดำเนินการตรวจสอบความสามารถในการถ่ายแรงผ่านรอยต่อระหว่าง Shotcrete และ ผิวคอนกรีตหลังทำการสกัด ด้วยสมการของ Interface Shear Transfer แสดงดังนี้



Considering as per 1 m strip of Slab
 Maximum Tension Force Due to rebars at yielding Strength = 30.13 T per 1 m strip

The nominal shear resistance of the interface plane shall be taken as:

$$V_n = cA_{cv} + \mu (A_v f_y + P_c) \quad (5.8.4.1-3)$$

Providing 1 (R9@0.30 U Hook)

$$0.9V_n = 37.224 \text{ T} \quad (1 \text{ m strip}) \text{ for Bottom of Slab}$$

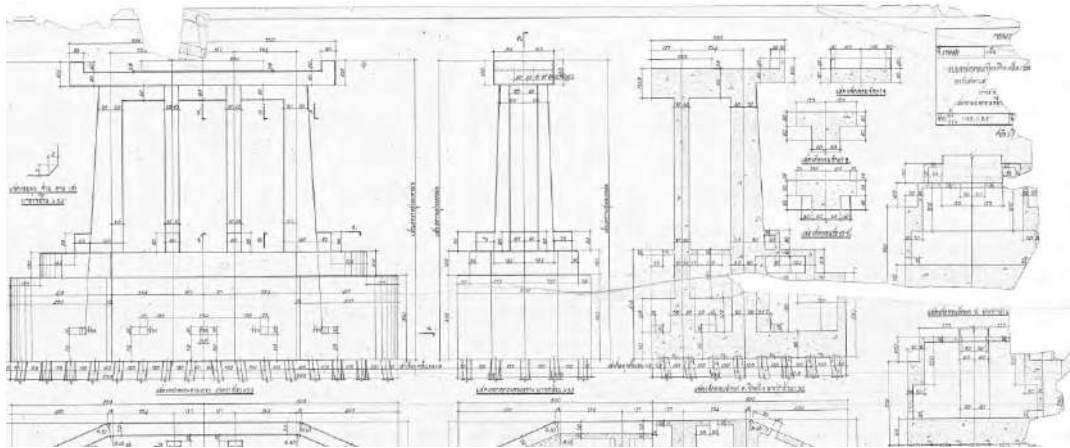
OK

โดยจากสมการ Interface Shear Transfer และมีการเพิ่มเหล็กขนาด R9 @ 0.30 M เจาะฝังเพื่อช่วยยึดและถ่ายแรงระหว่างผิวคอนกรีตหลังสกัดกับส่วนของ Shotcrete ทำให้สามารถเกิดแรงต้านทานมากกว่าแรงที่จุดคลากของเหล็กเสริมที่ท้องพื้น ดังนั้นจึงปลอดภัย

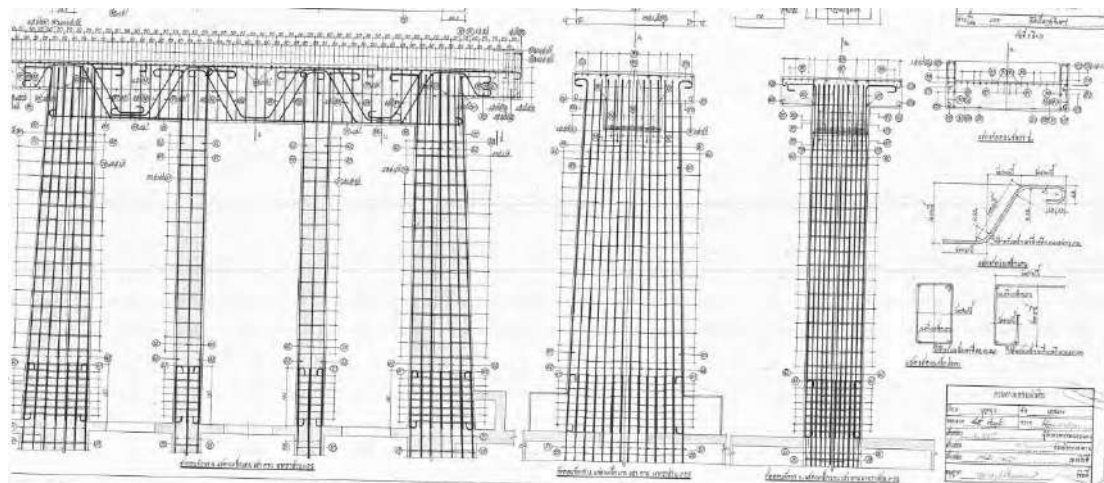


6.11 การวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างส่วนล่างของสะพานกิตติขจร

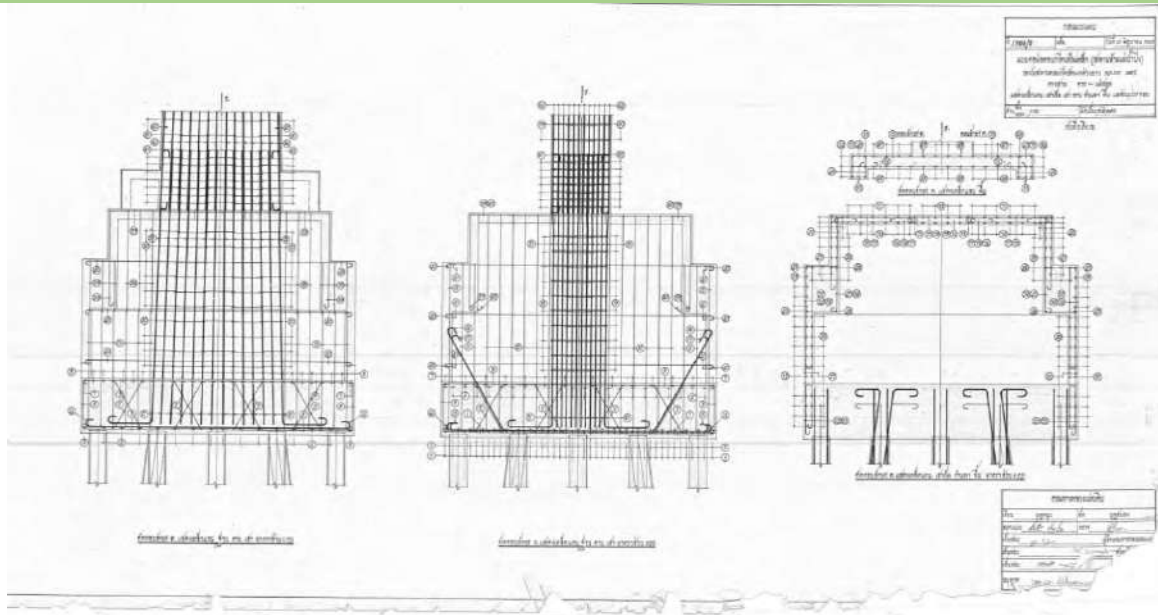
ในหัวข้อนี้ ที่ปรึกษา ดำเนินการนำแบบจำลองที่ได้ปรับค่าให้สอดคล้องกับผลการทดสอบในสนามมาใช้ในการประเมินความแข็งแรงด้านโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน โดยตัวอย่างของรูปแบบของโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน แสดงดังนี้



รูปที่ 6-41 ตัวอย่างแบบแสดงมิติของตอม่อกลางหน้าของสะพาน

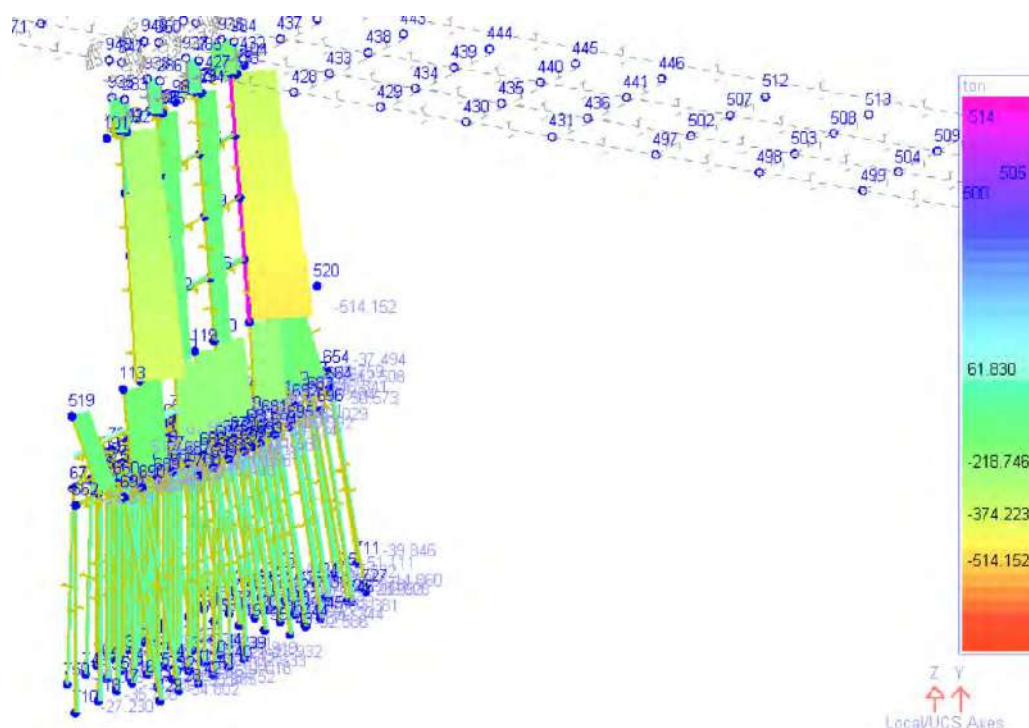


รูปที่ 6-42 ตัวอย่างแบบแสดงเหล็กเสริมของตอม่อกลางหน้าของสะพาน



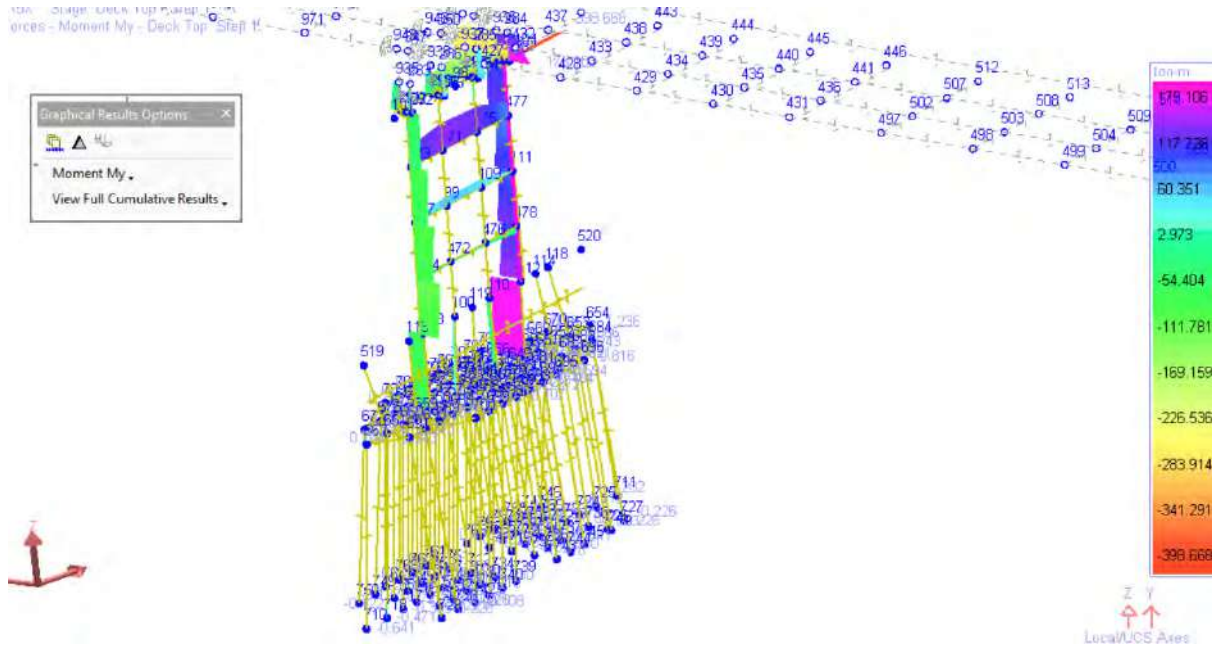
รูปที่ 6-43 ตัวอย่างแบบแสดงเหล็กเสริมของฐานรากตอม่อกลางหน้าของสะพาน

จากผลการวิเคราะห์ของสะพานที่ได้ปรับค่าแบบจำลอง ตัวอย่างของแรงภายในตอม่อสะพานแสดงดังนี้

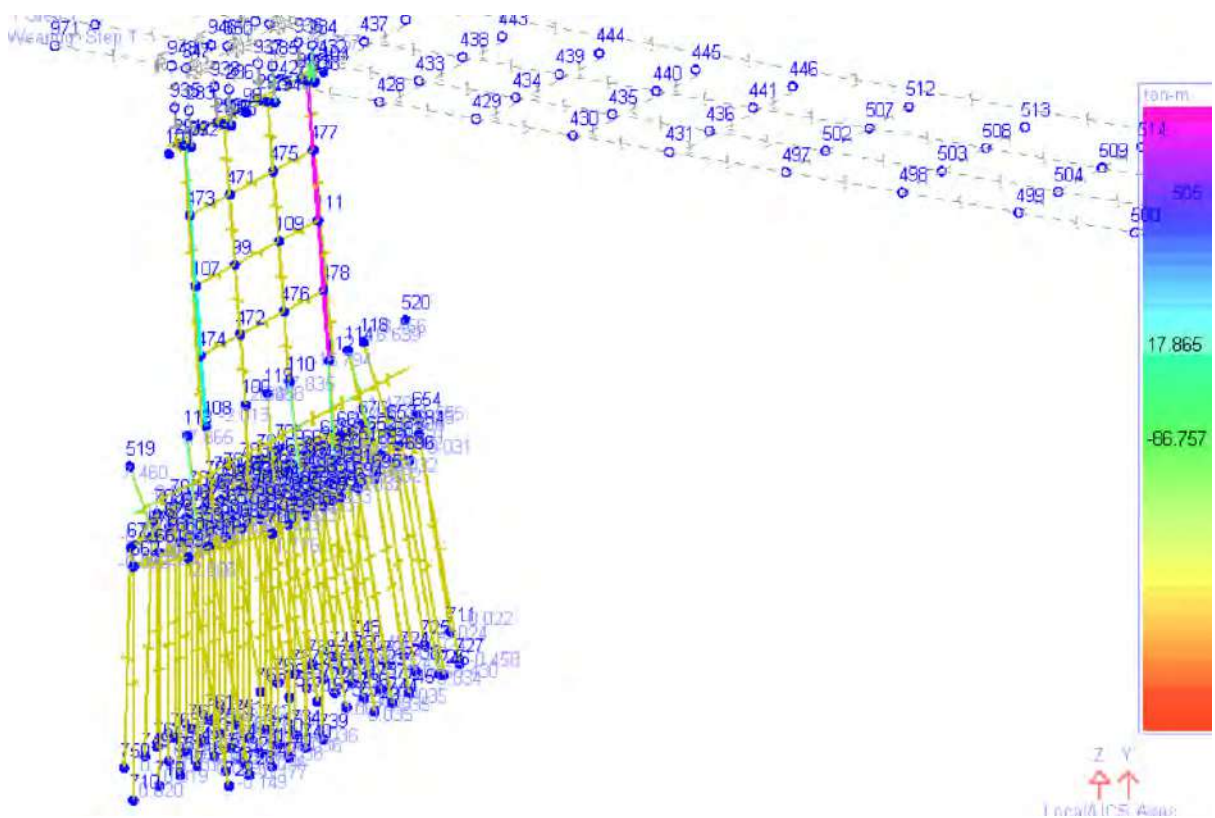


รูปที่ 6-44 แรงภายใน (Fx) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME



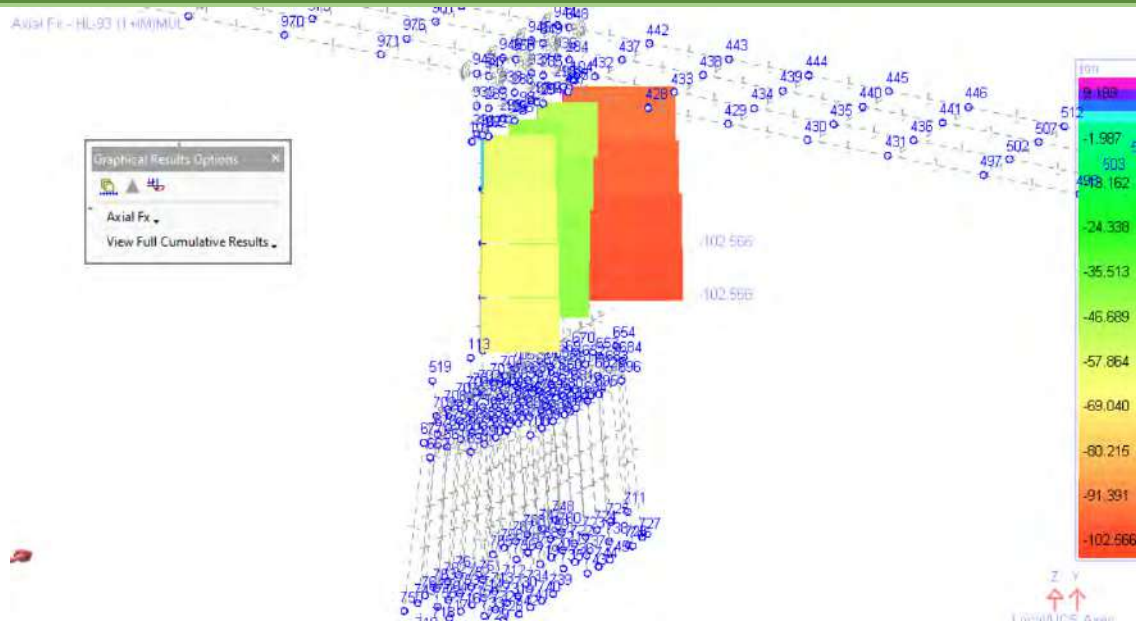


รูปที่ 6-45 แรงภายใน (My) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME

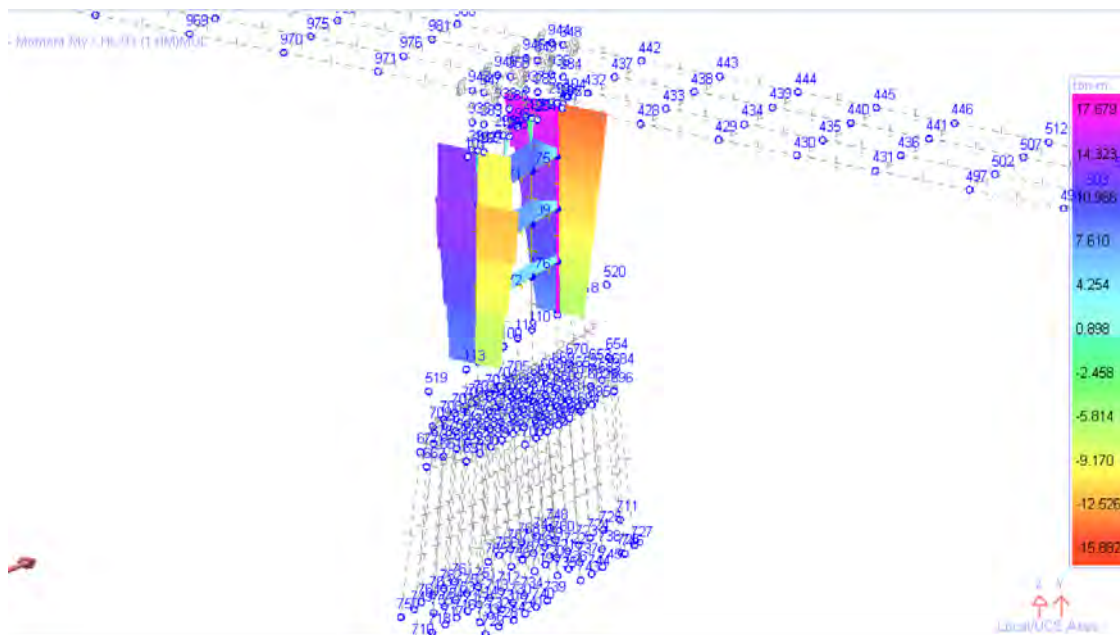


รูปที่ 6-46 แรงภายใน (Mz) ของสะพานเดิม DL+SDL+TIME

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

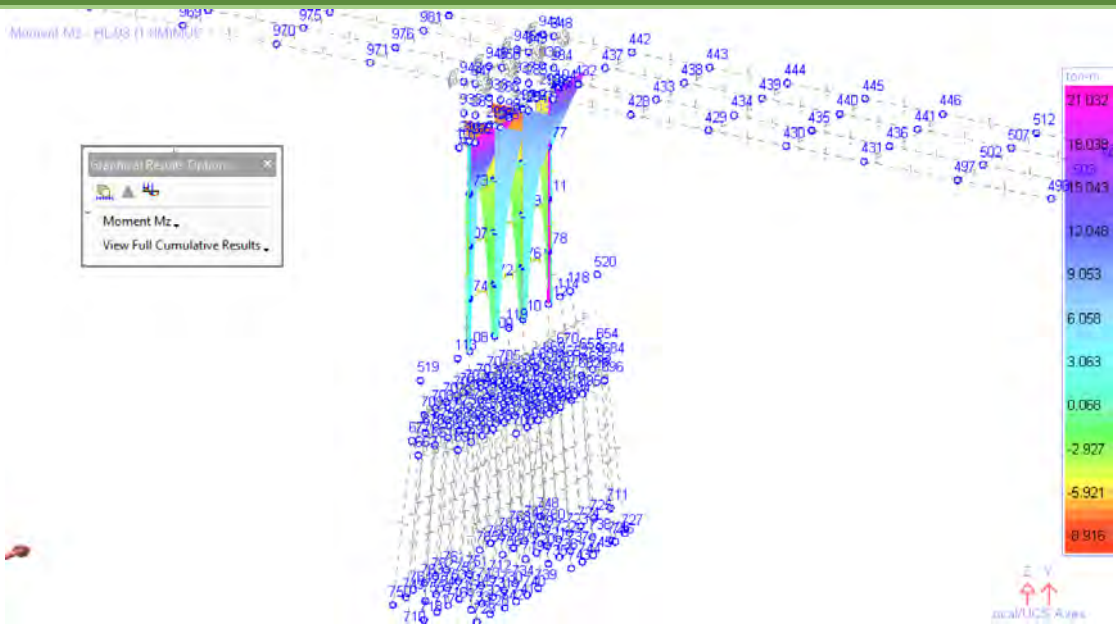


รูปที่ 6-47 แรงภายใน (Fx) ของสะพานเดิม LL+IM



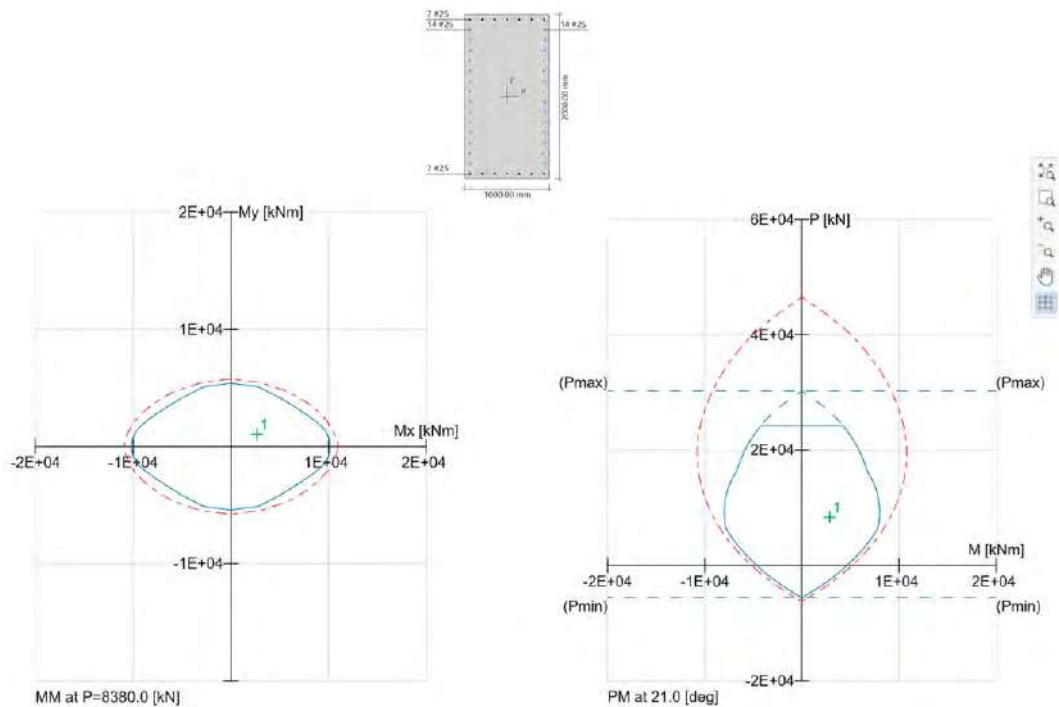
รูปที่ 6-48 แรงภายใน (My) ของสะพานเดิม LL+IM





รูปที่ 6-49 แรงภายใน (Mz) ของสะพานเดิม LL+IM

จากผลการวิเคราะห์แรงภายในของสะพานโครงสร้างส่วนล่าง การประเมินกำลังของตอม่อสะพานและสัดส่วนความปลอดภัยแสดงดังนี้



รูปที่ 6-50 Interaction Diagram ของตอม่อสะพานเดิม

การประเมินกำลังสะพานกิตติขจร (สภาพ ณ ปัจจุบัน)

กรณี 3 ช่องจราจร

(Pier Column)

	Fz (T)	My (T-m)	Mz (T-m)
DL	-461	175	75
SDL	-52	20	2
LL+IM	-105	11	5

SER1	-618	206	82
STR1	-838	268	105.5

Condition Factor	0.85	0.85	0.85
0.9Capacity*condition	1835.235	1000	503

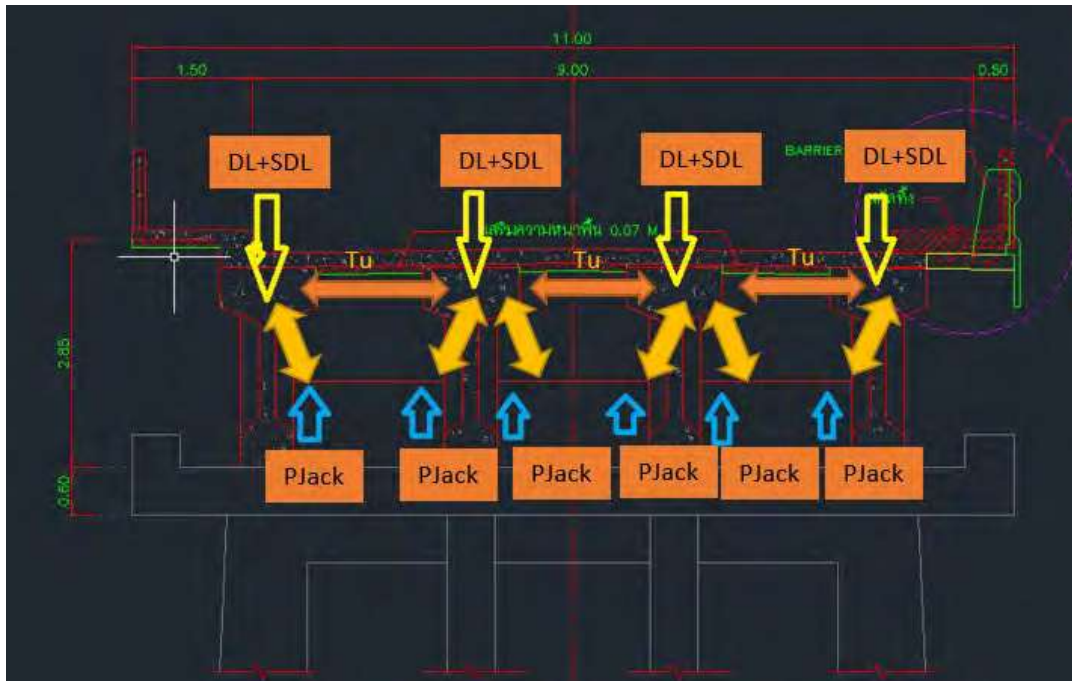
Capacity/Demand	2.190	3.731	4.768
Required increase Strengthening (%)	N/A	N/A	N/A
Adopted For Strengthening (%)	N/A	N/A	N/A

รูปที่ 6-51 Capacity/Demand ของตอม่อสะพานเดิม

จากการประเมินสัดส่วน Capacity/Demand ของเสาตอม่อสะพาน แสดงให้เห็นว่า ตอม่อสะพานเดิม ภายหลังจากขยายช่องจราจรและเพิ่ม concrete barrier ทั้ง 2 ด้านของสะพาน น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังต้านทานของตอม่อ ยังมี Safety Margin ที่เพียงพอ ดังนั้นการบูรณะตอม่อสะพานและโครงสร้างส่วนล่าง ดำเนินการเพียงการบูรณะแบบเบื้องต้น เช่น การทำ crack sealing หรือการติดตั้ง concrete anode เพื่อเพิ่มความคงทนให้อายุยืนยาว ไม่น้อยกว่า โครงสร้างส่วนบนที่ได้ดำเนินการเสริมกำลัง

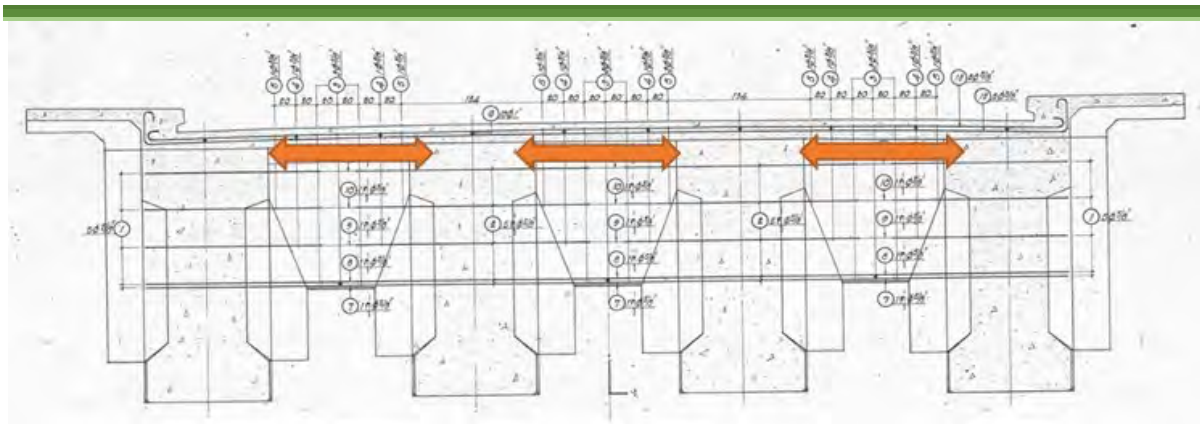


6.12 การวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างส่วน Crossbeam ช่วงยกเปลี่ยน Bearing



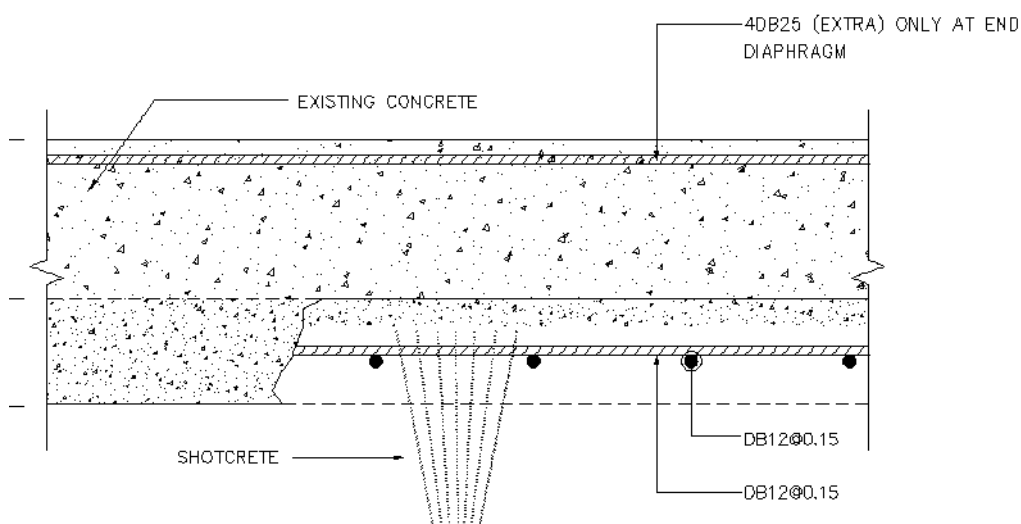
รูปที่ 6-52 STM ของการถ่ายแรงระหว่างการยกเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน

ในการยกเปลี่ยนแผ่นยางรองคานสะพาน พิจารณากรณี ปิดการจราจรระหว่างการยก โดยแรงที่ถ่ายลงแผ่นยางของคานเดิม มีเฉพาะน้ำหนักคงที่ DL+SDL จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข้อหมุนจำลองหรือ Strut and Tie Model (STM) แสดงดังรูปที่ 6-52 โดย Pjack ได้แก่แรงยกสูงสุดของ Hydraulic Jack = $1.5 \times (DL+SDL)$ หรือ เท่ากับ 235 T ต่อ จุด โดยจากการวิเคราะห์แรงภายใน STM ได้ค่าของ $T_u = 100$ T ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการยก โดยพิจารณาให้เหล็กเสริมบริเวณ Diaphragm เดิมต้านบนรับ โดยการตรวจสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กด้านบนของ Diaphragm แสดงดังนี้



รูปที่ 6-53 ตำแหน่งของเหล็กเสริมบริเวณ Diaphragm เพื่อการถ่ายแรงระหว่างการยกเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน

โดยจากการตรวจสอบพบว่า เหล็กบริเวณด้านบนของ Diaphragm จากแบบเดิม ได้มีการใส่เหล็กตามยาวไว้บริเวณใต้พื้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8" จำนวน 2 เส้น ต่อชั้น โดยมีทั้งหมด 2 ชั้น เมื่อพิจารณารวมกับเหล็ก Diaphragm ชั้นรองลงมา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" จำนวน 2 เส้น เสนอเพิ่มเหล็กเสริมด้านบนพื้นโดยการ กรัดและฝังเหล็กเสริม DB25mm จำนวน 4 เส้น ตามแนว Diaphragm เพื่อช่วยรองรับแรงระหว่างการยกเปลี่ยน Bearing ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 6-54



รูปที่ 6-54 ตำแหน่งของเหล็กเสริมบริเวณ Diaphragm พิเศษเพื่อการถ่ายแรงระหว่างการยกเปลี่ยนแผ่นยางรองคาน



บทที่ 7 การประมาณราคาค่าเสริมกำลัง โครงสร้างสะพาน

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการประมาณราคาค่าการเสริมกำลังตามที่ได้วิเคราะห์ห้ออกแบบเสริมกำลัง

7.1 การประมาณราคาค่าการเสริมกำลังคานสะพาน โดยการดึงลวดอัดแรงภายหลัง (External Post Tensioning) กับการเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการเพิ่มความหนาของพื้น (Shotcrete)

การคิดราคาค่าต้นทุนการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้พิจารณางานต้นทุนประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- 1) หมวดที่ 1 ค่าเตรียมพื้นที่ ในการดำเนินการบูรณะ เช่น งานนั่งร้าน และ งาน Clearing พื้นที่ใต้สะพาน
- 2) หมวดที่ 2 ค่าดำเนินการเสริมความแข็งแรงพื้นด้วย Diaphragm
- 3) หมวดที่ 3 ค่าดำเนินการเสริมท้องของสะพาน
- 4) หมวดที่ 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน
- 5) หมวดที่ 5 ค่าลวดอัดแรง
- 6) หมวดที่ 6 ค่า CFRP
- 7) หมวดที่ 7 ค่า ซ่อมประสานรอยร้าว ด้วย Epoxy Injection
- 8) หมวดที่ 8 ค่ารื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน
- 9) หมวดที่ 9 ค่างานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal
- 10) หมวดที่ 10 ค่างานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ประมาณราคาต้นทุน การบูรณะ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน)				ปริมาณผลสำรวจในภาคสนาม	
วิธีที่ เสริมกำลังด้วย Post Tensioning และ Shortcrete ความหนาพื้นสะพาน รวมส่วนขยายพื้นสะพาน					
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่					
1.1) ค่าจ้างรถ			100,000.00	บาท	
1.2) ค่า Clearing			20,000.00	บาท	
1.3) ค่ารั้วย้ายสาธารณูปโภค			200,000.00	บาท	
			320,000.00		
2) หมวด 2 ค่าเสริมความหนาพื้นสะพาน 0.07 m (วิธีการ Shortcrete)					
			201	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
2.1) งานพ่นคอนกรีต หนา 7 cm	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	12,250.00 บาท รวม	12,250.00 บาท
2.2) เหล็กเสริม DB16	31.56	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	722.41 บาท
	10.656	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	243.92 บาท
2.3) งานสกัดคอนกรีตเดิมและเตรียมผิว	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	175.00 บาท รวม	175.00 บาท
				รวมราคา	13,391.32 บาท ต่อ ตอม
				รวม	2,691,656.17 บาทต่อช่วงสะพาน
3) หมวด 3 ค่าเสริมท้องของสะพาน					
			120	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
3.1) คอนกรีต	0.3	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	810.00 บาท
3.2) เหล็กเสริม DB25	15.412	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	352.78 บาท
			ราคาต่อหน่วย	บาท รวม	- บาท
3.3) ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
				รวมราคา	1,602.78 บาท ต่อ ตอม
				รวม	192,333.68 บาทต่อช่วงสะพาน
4) หมวด 4 ค่าเสริมแฉกของสะพาน					
			0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
4.1) คอนกรีต	0.1	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	270.00 บาท
4.2) เหล็กเสริม DB25	38.53	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	881.95 บาท
	8.88		ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	203.26 บาท
4.3) ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
				รวมราคา	1,795.21 บาท ต่อ ตอม
				รวม	- บาทต่อช่วงสะพาน
5) หมวด 5 ค่าลวดยึดแรง					
			4	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
5.1) งาน PC Strand Diameter 12.7mm	0.1556	Tต่อชุด	ราคาต่อหน่วย	82,000.00 บาทต่อตันรวม	12,759.20 บาท ต่อชุด
รวมระบบและหัวตั้ง					
				รวม	51,036.80 บาทต่อช่วงสะพาน
6) หมวด 6 ค่า CFRP					
			0	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาว	
6.1) งาน CFRP Strip	0	m	ราคาต่อหน่วย	6,000.00 บาทต่อเมตรรวม	- บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating		(Strip width 0.10m)			
6.2) งาน CFRP Wrap	0	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	5,500.00 บาทต่อ ตรม รวม	- บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating					
				รวม	- บาท
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection					
7.1) งาน Epoxy Injection	20	m	ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อเมตรรวม	60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
(รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)					
8) หมวด 8 รื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน					
8.1) ค่ารั้ว Barrier และ พื้นเดิม	12.925	CU.M	ราคาต่อหน่วย	1,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	12,925.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2) ค่าคอนกรีตพื้นส่วนขยายรวมBarrier	57.5	CU.M	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	155,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3) ค่า เหล็กเสริม DB16	526	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	12,040.14 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4) ค่า เหล็กเสริม DB12	444	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	10,163.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5) ค่าไม้แบบ	95	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	41,800.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
				รวม	232,178.30 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal					
9.1) ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อCompression Seal	8	M.	ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing					
10.1) ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1	ช่วงสะพาน	ราคาต่อหน่วย	1,650,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
11) รวมราคา ทุกหมวด					
				รวม	5,221,204.95 บาท ต่อช่วงสะพาน (ไม่รวม Factor F)
				รวมสะพาน	62,654,459.45 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะตอม่อและฐานรากสะพาน งานเสริมผิวถนนและสะพาน อุปกรณ์ งานทางอื่นฯ
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคา ไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้าง

รูปที่ 7-1 ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง



7.2 การประมาณราคาค่าการเสริมกำลังคานสะพาน โดยการดึงลวดอัดแรงภายหลัง (External Post Tensioning) กับการเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการเพิ่มความหนาของพื้นโดยวัสดุคอนกรีตสมรรถนะสูง (Ultra High Performance Concrete, UHPC)

การคิดราคาต้นทุนการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้พิจารณางานต้นทุนประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- 1) หมวดที่ 1 ค่าเตรียมพื้นที่ ในการดำเนินการบูรณะ เช่น งานนั่งร้าน และ งาน Clearing พื้นที่ใต้สะพาน
- 2) หมวดที่ 2 ค่าดำเนินการเสริมความแข็งแรงพื้นด้วย Diaphragm
- 3) หมวดที่ 3 ค่าดำเนินการเสริมท้องของสะพาน
- 4) หมวดที่ 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน
- 5) หมวดที่ 5 ค่าลวดอัดแรง
- 6) หมวดที่ 6 ค่า CFRP
- 7) หมวดที่ 7 ค่า ซ่อมประสานรอยร้าว ด้วย Epoxy Injection
- 8) หมวดที่ 8 ค่ารื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน
- 9) หมวดที่ 9 ค่างานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal
- 10) หมวดที่ 10 ค่างานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ประมาณราคาต้นทุน การบูรณะ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน)				ปริมาณผลสำรวจในภาคสนาม	
วิธีที่เสริมกำลังด้วย Post Tensioning และ UHPC ความหนาพื้นสะพาน รวมส่วนขยายพื้นสะพาน					
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่					
1.1) ค่าจ้างรถ			100,000.00	บาท	
1.2) ค่า Clearing			20,000.00	บาท	
1.3) ค่ารั้วย้ายสาธารณูปโภค			200,000.00	บาท	
			320,000.00		
2) หมวด 2 ค่าเสริมความหนาพื้นสะพาน 0.03 m (วิธีการ UHPC)					
			201	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
2.1) งานเสริมพื้น หนา 3 cm	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	18,000.00 บาท รวม	18,000.00 บาท
2.2) เหล็กเสริม DB16	0	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	- บาท
	0	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	- บาท
					- บาท
2.3) งานสกัดคอนกรีตเดิมและเตรียมผิว	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	175.00 บาท รวม	175.00 บาท
			รวมราคา		18,175.00 บาท ต่อ ตอม
			รวม		3,653,175.00 บาทต่อช่วงสะพาน
3) หมวด 3 ค่าเสริมท้องของสะพาน					
			120	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
3.1) คอนกรีต	0.3	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	810.00 บาท
3.2) เหล็กเสริม DB25	15.412	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	352.78 บาท
			ราคาต่อหน่วย	บาท รวม	- บาท
					- บาท
3.3) ไบแมม	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,602.78 บาท ต่อ ตอม
			รวม		192,333.68 บาทต่อช่วงสะพาน
4) หมวด 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน					
			0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
4.1) คอนกรีต	0.1	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	270.00 บาท
4.2) เหล็กเสริม DB25	38.53	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	881.95 บาท
	8.88		ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	203.26 บาท
					- บาท
4.3) ไบแมม	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,795.21 บาท ต่อ ตอม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
5) หมวด 5 ค่าลวดยึดแรง					
			4	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
5.1) งาน PC Strand Diameter 12.7mm	0.1556	Tต่อชุด	ราคาต่อหน่วย	82,000.00 บาทต่อตันรวม	12,759.20 บาท ต่อชุด
รวมระบบและหัวตั้ง					
			รวม		51,036.80 บาทต่อช่วงสะพาน
6) หมวด 6 ค่า CFRP					
			0	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาว	
6.1) งาน CFRP Strip	0	m	ราคาต่อหน่วย	6,000.00 บาทต่อเมตรรวม	- บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating		(Strip width 0.10m)			
6.2) งาน CFRP Wrap	0	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	5,500.00 บาทต่อ ตรม รวม	- บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating					
			รวม		- บาท
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection					
7.1) งาน Epoxy Injection	20	m	ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อเมตรรวม	60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
(รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)					
8) หมวด 8 รื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน					
8.1) ค่ารื้อ Barrier และ พื้นเดิม	12.925	CU.M	ราคาต่อหน่วย	1,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	12,925.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2) ค่าคอนกรีตพื้นส่วนขยายรวมBarrier	57.5	CU.M	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	155,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3) ค่า เหล็กเสริม DB16	526	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	12,040.14 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4) ค่า เหล็กเสริม DB12	444	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	10,163.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5) ค่าไบแมม	95	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	41,800.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
			รวม		232,178.30 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal					
9.1) ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อCompression Seal	8	M.	ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing					
10.1) ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1	ช่วงสะพาน	ราคาต่อหน่วย	1,650,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
11) รวมราคา ทุกหมวด					
			รวม		6,182,723.78 บาท ต่อช่วงสะพาน (ไม่รวม Factor F)
			รวมสะพาน		74,192,685.38 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะตอม่อและฐานรากสะพาน งานเสริมผิวถนนและสะพาน อุปกรณ์ งานทางอื่นฯ
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคา ไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้าง

รูปที่ 7-2 ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง



7.3 การประมาณราคาค่าการเสริมกำลังคานสะพาน โดยการดึงลวดอัดแรงภายหลัง (External Post Tensioning) กับการเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการเพิ่มค้ำยัน ด้านข้าง (Diaphragm)

การคิดราคาต้นทุนการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้พิจารณางานต้นทุนประกอบด้วย กิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- 1) หมวดที่ 1 ค่าเตรียมพื้นที่ ในการดำเนินการบูรณะ เช่น งานนั่งร้าน และ งาน Clearing พื้นที่ใต้สะพาน
- 2) หมวดที่ 2 ค่าดำเนินการเสริมความแข็งแรงพื้นด้วย Diaphragm
- 3) หมวดที่ 3 ค่าดำเนินการเสริมท้องของสะพาน
- 4) หมวดที่ 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน
- 5) หมวดที่ 5 ค่าลวดอัดแรง
- 6) หมวดที่ 6 ค่า CFRP
- 7) หมวดที่ 7 ค่า ซ่อมประสานรอยร้าว ด้วย Epoxy Injection
- 8) หมวดที่ 8 ค่ารื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน
- 9) หมวดที่ 9 ค่างานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal
- 10) หมวดที่ 10 ค่างานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ปริมาณ ราคาต้นทุน การระบุ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน)				ปรับตามผลสำรวจในภาคสนาม			
วิธีที่เสริมกำลังด้วย Post Tensioning และ Diaphragm รวมส่วนขยายพื้นสะพาน							
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่							
1.1)	ค่านั่งร้าน		100,000.00	บาท			
1.2)	ค่า Clearing		20,000.00	บาท			
1.3)	ค่ารั้วยี่สิบเสาตามรูปโคง		200,000.00	บาท			
2) หมวด 2 ค่าเสริม Diaphragm			283.5	เมตร	ต่อ	ช่วงสะพาน	
คิดความยาว Diaphragm 1 เมตร							
2.1)	คอนกรีต	0.375	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	12,250.00	บาท รวม	4,593.75 บาท
2.2)	เหล็กเสริม DB16	284.04	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	6,501.68 บาท
	DB12	53.28	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	1,219.58 บาท
							-
2.3)	ไม้แบบ	4.25	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00	บาท รวม	1,870.00 บาท
				รวมราคา			14,185.00 บาท ต่อ เมตร ของ Diaphragm
				รวม			4,021,448.86 บาทต่อช่วงสะพาน
3) หมวด 3 ค่าเสริมท้องของสะพาน							
			120	SQ.M	ต่อ	1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม							
3.1)	คอนกรีต	0.3	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00	บาท รวม	810.00 บาท
3.2)	เหล็กเสริม DB25	15.412	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	352.78 บาท
				ราคาต่อหน่วย		บาท รวม	- บาท
							-
3.3)	ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00	บาท รวม	440.00 บาท
				รวมราคา			1,602.78 บาท ต่อ ตอม
				รวม			192,333.68 บาทต่อช่วงสะพาน
4) หมวด 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน							
			0	SQ.M	ต่อ	1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม							
4.1)	คอนกรีต	0.1	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00	บาท รวม	270.00 บาท
4.2)	เหล็กเสริม DB25	38.53	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	881.95 บาท
	เหล็กเสริม DB12	8.88	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	203.26 บาท
							-
4.3)	ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00	บาท รวม	440.00 บาท
				รวมราคา			1,795.21 บาท ต่อ ตอม
				รวม			- บาทต่อช่วงสะพาน
5) หมวด 5 ค่าลาดยึดแรง							
			4	ชุด	ต่อ	1 ช่วงความยาวสะพาน	
5.1)	งาน PC Strand Diameter 12.7mm รวมระบบและหัวตั้ง	0.1556	Tต่อชุด	ราคาต่อหน่วย	82,000.00	บาทต่อต้นรวม	12,759.20 บาท ต่อชุด
				รวม			51,036.80 บาทต่อช่วงสะพาน
6) หมวด 6 ค่า CFRP							
			0	ชุด	ต่อ	1 ช่วงความยาว	
6.1)	งาน CFRP Strip รวมระบบ Epoxy และ Coating	0	m	ราคาต่อหน่วย	6,000.00	บาทต่อเมตร รวม	- บาท ต่อชุด
				(Strip width 0.10m)			
6.2)	งาน CFRP Wrap รวมระบบ Epoxy และ Coating	0	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	5,500.00	บาทต่อ ตรม รวม	- บาท ต่อชุด
				รวม			- บาท
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection							
7.1)	งาน Epoxy Injection (รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)	20	m	ราคาต่อหน่วย	3,000.00	บาทต่อเมตร รวม	60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8) หมวด 8 รื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน							
8.1)	ค่ารื้อ Barrier และ พื้นเดิม	12.925	CU.M	ราคาต่อหน่วย	1,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	12,925.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2)	ค่าคอนกรีตพื้นส่วนขยายรวม Barrier	57.5	CU.M	ราคาต่อหน่วย	2,700.00	บาท รวม	155,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3)	ค่า เหล็กเสริม DB16	526	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	12,040.14 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4)	ค่า เหล็กเสริม DB12	444	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	10,163.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5)	ค่าไม้แบบ	95	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00	บาท รวม	41,800.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
				รวม			232,178.30 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal							
9.1)	ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal	8	M.	ราคาต่อหน่วย	3,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing							
10.1)	ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1	ช่วงสะพาน	ราคาต่อหน่วย	1,650,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
11) รวมราคา ทุกหมวด				รวม			6,550,997.64 บาท ต่อช่วงสะพาน (ไม่รวม Factor F)
				รวมสะพาน			78,611,971.71 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะซ่อมและฐานรากสะพานงานเสริมผิวถนนและสะพาน, อุปกรณ์ งานทางอื่นฯ
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคา ไม่รวม งานจัดจราจรทางน้ำ และการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างก่อสร้าง

รูปที่ 7-3 ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง



7.4 การประมาณราคาค่าการเสริมกำลังคานสะพาน โดยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) กับการเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการเพิ่มความหนาของพื้น (Shotcrete)

การคิดราคาค่าต้นทุนการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้พิจารณางานต้นทุนประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- 1) หมวดที่ 1 ค่าเตรียมพื้นที่ ในการดำเนินการบูรณะ เช่น งานนั่งร้าน และ งาน Clearing พื้นที่ใต้สะพาน
- 2) หมวดที่ 2 ค่าดำเนินการเสริมความแข็งแรงพื้นด้วย Diaphragm
- 3) หมวดที่ 3 ค่าดำเนินการเสริมท้องของสะพาน
- 4) หมวดที่ 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน
- 5) หมวดที่ 5 ค่าลวดอัดแรง
- 6) หมวดที่ 6 ค่า CFRP
- 7) หมวดที่ 7 ค่า ซ่อมประสานรอยร้าว ด้วย Epoxy Injection
- 8) หมวดที่ 8 ค่ารื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน
- 9) หมวดที่ 9 ค่างานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal
- 10) หมวดที่ 10 ค่างานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ประมาณ ราคาค่าต้นทุน การบูรณะ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน)				ปริมาณผลสำรวจในภาคสนาม	
วิธีที่ เสริมกำลังด้วย CFRP และ Shortcrete ความหนาพื้นสะพาน รวมส่วนขยายพื้นสะพาน					
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่					
1.1) ค่านั่งร้าน		100,000.00	บาท		
1.2) ค่า Clearing		20,000.00	บาท		
1.3) ค่ารั้วยี่สิบเสาแถวปลูกโคก		200,000.00	บาท		
2) หมวด 2 ค่าเสริมความหนาพื้นสะพาน 0.07 m (วิธีการ Shortcrete)					
		201	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน		
คิดต่อ 1 ตอม					
2.1) งานพ่นคอนกรีตหนา 7 cm	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	12,250.00 บาท รวม	12,250.00 บาท
2.2) เหล็กเสริม DB16	31.56	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	722.41 บาท
	10.656	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	243.92 บาท
					- บาท
2.3) งานสกัดคอนกรีตเดิมและเตรียมผิว	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	175.00 บาท รวม	175.00 บาท
			รวมราคา		13,391.32 บาท ต่อ ตอม
			รวม		2,691,656.17 บาทต่อช่วงสะพาน
3) หมวด 3 ค่าเสริมท้องของสะพาน					
		0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน		
คิดต่อ 1 ตอม					
3.1) คอนกรีต	0.3	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	810.00 บาท
3.2) เหล็กเสริม DB25	15.412	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	352.78 บาท
			ราคาต่อหน่วย	บาท รวม	- บาท
					- บาท
3.3) ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,602.78 บาท ต่อ ตอม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
4) หมวด 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน					
		0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน		
คิดต่อ 1 ตอม					
4.1) คอนกรีต	0.1	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	270.00 บาท
4.2) เหล็กเสริม DB25	38.53	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	881.95 บาท
	8.88		ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	203.26 บาท
					- บาท
4.3) ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,795.21 บาท ต่อ ตอม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
5) หมวด 5 ค่าลวดยึดแรง					
		0	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน		
5.1) งาน PC Strand Diameter 12.7mm	0.1556	Tต่อชุด	ราคาต่อหน่วย	82,000.00 บาทต่อต้นรวม	12,759.20 บาท ต่อชุด
รวมระบบและหัวตั้ง					
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
6) หมวด 6 ค่า CFRP					
		4	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาว		
6.1) งาน CFRP Strip	9.9	m	ราคาต่อหน่วย	6,000.00 บาทต่อเมตรรวม	59,400.00 บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating		(Strip width 0.10m)			
6.2) งาน CFRP Wrap	68	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	5,500.00 บาทต่อ ตรม รวม	374,000.00 บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating					
			รวม		1,733,600.00 บาท
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection					
7.1) งาน Epoxy Injection	20 m		ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อเมตรรวม	60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
(รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)					
8) หมวด 8 รื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน					
8.1) ค่ารื้อ Barrier และ พื้นเดิม	12.925	CU.M	ราคาต่อหน่วย	1,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	12,925.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2) ค่าคอนกรีตพื้นส่วนขยายรวม Barrier	57.5	CU.M	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	155,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3) ค่า เหล็กเสริม DB16	526	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	12,040.14 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4) ค่า เหล็กเสริม DB12	444	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	10,163.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5) ค่าไม้แบบ	95	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	41,800.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
			รวม		232,178.30 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal					
9.1) ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal	8 M.		ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing					
10.1) ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1 ช่วงสะพาน		ราคาต่อหน่วย	1,650,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) รวมราคา ทุกหมวด					
			รวม		6,711,434.47 บาท ต่อช่วงสะพาน (ไม่รวม Factor F)
			รวมสะพาน		80,537,213.67 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะต่อม่อและฐานรากสะพานงานเสริมผิวถนนและสะพาน อุปกรณ์ งานทางอื่น
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคาไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้าง

รูปที่ 7.4-1 ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง



7.5 การประมาณราคาค่าการเสริมกำลังคานสะพาน โดยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) กับการเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการเพิ่มความหนาของพื้นโดยวัสดุคอนกรีตสมรรถนะสูง (Ultra High Performance Concrete, UHPC)

การคิดราคาต้นทุนการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้พิจารณางานต้นทุนประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- 1) หมวดที่ 1 ค่าเตรียมพื้นที่ ในการดำเนินการบูรณะ เช่น งานนั่งร้าน และ งาน Clearing พื้นที่ใต้สะพาน
- 2) หมวดที่ 2 ค่าดำเนินการเสริมความแข็งแรงพื้นด้วย Diaphragm
- 3) หมวดที่ 3 ค่าดำเนินการเสริมท้องของสะพาน
- 4) หมวดที่ 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน
- 5) หมวดที่ 5 ค่าลวดอัดแรง
- 6) หมวดที่ 6 ค่า CFRP
- 7) หมวดที่ 7 ค่า ซ่อมประสานรอยร้าว ด้วย Epoxy Injection
- 8) หมวดที่ 8 ค่ารื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน
- 9) หมวดที่ 9 ค่างานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal
- 10) หมวดที่ 10 ค่างานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ประมาณราคาค่าต้นทุน การบูรณะ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน)				ปริมาณผลสำรวจในภาคสนาม	
วิธีที่ เสริมกำลังด้วย Post Tensioning และ UHPC ความหนาพื้นสะพาน รวมส่วนขยายพื้นสะพาน					
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่					
1.1) ค่าจ้างรถ			100,000.00	บาท	
1.2) ค่า Clearing			20,000.00	บาท	
1.3) ค่ารั้วย้ายสาธารณูปโภค			200,000.00	บาท	
			320,000.00		
2) หมวด 2 ค่าเสริมความหนาพื้นสะพาน 0.03 m (วิธีการ UHPC)					
			201	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตรม					
2.1) งานเสริมพื้น หนา 3 cm	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	18,000.00 บาท รวม	18,000.00 บาท
2.2) เหล็กเสริม DB16	0	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	- บาท
	0	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	- บาท
					- บาท
2.3) งานสกัดคอนกรีตเดิมและเตรียมผิว	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	175.00 บาท รวม	175.00 บาท
			รวมราคา		18,175.00 บาท ต่อ ตรม
			รวม		3,653,175.00 บาทต่อช่วงสะพาน
3) หมวด 3 ค่าเสริมท้องของสะพาน					
			0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตรม					
3.1) คอนกรีต	0.3	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	810.00 บาท
3.2) เหล็กเสริม DB25	15.412	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	352.78 บาท
			ราคาต่อหน่วย	บาท รวม	- บาท
					- บาท
3.3) ไบแมม	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,602.78 บาท ต่อ ตรม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
4) หมวด 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน					
			0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตรม					
4.1) คอนกรีต	0.1	CU.M.	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	270.00 บาท
4.2) เหล็กเสริม DB25	38.53	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	881.95 บาท
	8.88		ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	203.26 บาท
					- บาท
4.3) ไบแมม	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,795.21 บาท ต่อ ตรม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
5) หมวด 5 ค่าลวดยึดแรง					
			0	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
5.1) งาน PC Strand Diameter 12.7mm	0.1556	Tต่อชุด	ราคาต่อหน่วย	82,000.00 บาทต่อตันรวม	12,759.20 บาท ต่อชุด
รวมระบบและหัวตั้ง					
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
6) หมวด 6 ค่า CFRP					
			4	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาว	
6.1) งาน CFRP Strip	9.9	m	ราคาต่อหน่วย	6,000.00 บาทต่อเมตรรวม	59,400.00 บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating		(Strip width 0.10m)			
6.2) งาน CFRP Wrap	68	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	5,500.00 บาทต่อ ตรม รวม	374,000.00 บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating					
			รวม		1,733,600.00 บาท
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection					
7.1) งาน Epoxy Injection	20 m		ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อเมตรรวม	60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
(รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)					
8) หมวด 8 รื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน					
8.1) ค่ารื้อ Barrier และ พื้นเดิม	12.925	CU.M	ราคาต่อหน่วย	1,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	12,925.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2) ค่าคอนกรีตพื้นส่วนขยายรวมBarrier	57.5	CU.M	ราคาต่อหน่วย	2,700.00 บาท รวม	155,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3) ค่า เหล็กเสริม DB16	526	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	12,040.14 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4) ค่า เหล็กเสริม DB12	444	kg	ราคาต่อหน่วย	22.89 บาท รวม	10,163.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5) ค่าไบแมม	95	SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00 บาท รวม	41,800.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
			รวม		232,178.30 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal					
9.1) ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อCompression Seal	8 M.		ราคาต่อหน่วย	3,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing					
10.1) ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1 ช่วงสะพาน		ราคาต่อหน่วย	1,650,000.00 บาทต่อ ลบ.ม.	1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
11) รวมราคา ทุกหมวด					
			รวม		7,672,953.30 บาท ต่อช่วงสะพาน (ไม่รวม Factor F)
			รวมสะพาน		92,075,439.60 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะต่อม่อและฐานรากสะพาน งานเสริมผิวถนนและสะพาน อุปกรณ์ งานทางอื่นฯ
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคา ไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้าง

รูปที่ 7-4 ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง



7.6 การประมาณราคาค่าการเสริมกำลังคานสะพาน โดยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) กับการเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการเพิ่มค้ำยันด้านข้าง (Diaphragm)

การคิดราคาค่าต้นทุนการเสริมกำลังของสะพาน ที่ปรึกษาได้พิจารณางานต้นทุนประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

- 1) หมวดที่ 1 ค่าเตรียมพื้นที่ ในการดำเนินการบูรณะ เช่น งานนั่งร้าน และ งาน Clearing พื้นที่ใต้สะพาน
- 2) หมวดที่ 2 ค่าดำเนินการเสริมความแข็งแรงพื้นด้วย Diaphragm
- 3) หมวดที่ 3 ค่าดำเนินการเสริมท้องของสะพาน
- 4) หมวดที่ 4 ค่าเสริมเอวของสะพาน
- 5) หมวดที่ 5 ค่าลวดอัดแรง
- 6) หมวดที่ 6 ค่า CFRP
- 7) หมวดที่ 7 ค่า ซ่อมประสานรอยร้าว ด้วย Epoxy Injection
- 8) หมวดที่ 8 ค่ารื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน
- 9) หมวดที่ 9 ค่างานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal
- 10) หมวดที่ 10 ค่างานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ปริมาณ ราคาต้นทุน การระบุ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างสะพาน)			ปริมาณผลสำรวจในภาคสนาม		
วิธีที่ เสริมกำลังด้วย CFRP และ Diaphragm รวมส่วนขยายพื้นสะพาน					
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่					
1.1) ค่าจ้างรถ			100,000.00	บาท	
1.2) ค่า Clearing			20,000.00	บาท	
1.3) ค่ารั้วย้ายสาธารณูปโภค			200,000.00	บาท	
2) หมวด 2 ค่าเสริม Diaphragm					
			283.5	เมตร ต่อ ช่วงสะพาน	
คิดความยาว Diaphragm 1 เมตร					
2.1) คอนกรีต	0.375	CU.M.	ราคาต่อหน่วย 12,250.00	บาท รวม	4,593.75 บาท
2.2) เหล็กเสริม DB16	284.04	kg	ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	6,501.68 บาท
	53.28	kg	ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	1,219.58 บาท
2.3) ไม้แบบ	4.25	SQ.M	ราคาต่อหน่วย 440.00	บาท รวม	1,870.00 บาท
			รวมราคา		14,185.00 บาท ต่อ เมตร ของ Diaphragm
			รวม		4,021,448.86 บาทต่อช่วงสะพาน
3) หมวด 3 ค่าเสริมท้องของสะพาน					
			0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
3.1) คอนกรีต	0.3	CU.M.	ราคาต่อหน่วย 2,700.00	บาท รวม	810.00 บาท
3.2) เหล็กเสริม DB25	15.412	kg	ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	352.78 บาท
			ราคาต่อหน่วย		- บาท
3.3) ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย 440.00	บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,602.78 บาท ต่อ ตอม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
4) หมวด 4 ค่าเสริมเว้าของสะพาน					
			0	SQ.M ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
คิดต่อ 1 ตอม					
4.1) คอนกรีต	0.1	CU.M.	ราคาต่อหน่วย 2,700.00	บาท รวม	270.00 บาท
4.2) เหล็กเสริม DB25	38.53	kg	ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	881.95 บาท
	8.88		ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	203.26 บาท
4.3) ไม้แบบ	1	SQ.M	ราคาต่อหน่วย 440.00	บาท รวม	440.00 บาท
			รวมราคา		1,795.21 บาท ต่อ ตอม
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
5) หมวด 5 ค่าลวดยึดแรง					
			0	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาวสะพาน	
5.1) งาน PC Strand Diameter 12.7mm	0.1556	Tต่อชุด	ราคาต่อหน่วย 82,000.00	บาทต่อต้นรวม	12,759.20 บาท ต่อชุด
รวมระบบและหัวดึง					
			รวม		- บาทต่อช่วงสะพาน
6) หมวด 6 ค่า CFRP					
			4	ชุด ต่อ 1 ช่วงความยาว	
6.1) งาน CFRP Strip	9.9	m	ราคาต่อหน่วย 6,000.00	บาทต่อเมตรรวม	59,400.00 บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating					
6.2) งาน CFRP Wrap	68	SQ.M	ราคาต่อหน่วย 5,500.00	บาทต่อ ตรม รวม	374,000.00 บาท ต่อชุด
รวมระบบ Epoxy และ Coating					
			รวม		1,733,600.00 บาท
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection					
7.1) งาน Epoxy Injection	20	m	ราคาต่อหน่วย 3,000.00	บาทต่อเมตรรวม	60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
(รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)					
8) หมวด 8 รื้อและขยายความกว้างพื้นสะพาน					
8.1) ค่ารื้อ Barrier และ พื้นเดิม	12.925	CU.M	ราคาต่อหน่วย 1,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	12,925.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2) ค่าคอนกรีตพื้นส่วนขยายรวม Barrier	57.5	CU.M	ราคาต่อหน่วย 2,700.00	บาท รวม	155,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3) ค่า เหล็กเสริม DB16	526	kg	ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	12,040.14 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4) ค่า เหล็กเสริม DB12	444	kg	ราคาต่อหน่วย 22.89	บาท รวม	10,163.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5) ค่าไม้แบบ	95	SQ.M	ราคาต่อหน่วย 440.00	บาท รวม	41,800.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
			รวม		232,178.30 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal					
9.1) ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal	8	M.	ราคาต่อหน่วย 3,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing					
10.1) ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1	ช่วงสะพาน	ราคาต่อหน่วย #####	บาทต่อ ลบ.ม.	1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
11) รวมราคา ทุกหมวด					
			รวม		8,041,227.16 บาท ต่อช่วงสะพาน (*ไม่รวม Factor F)
			รวมสะพาน		96,494,725.93 บาท ต่อ สะพาน (*ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะต่อม่อและฐานรากสะพานงานเสริมผิวถนนและสะพาน อุปกรณ์ งานทางอื่นฯ
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคาไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างก่อสร้าง

รูปที่ 7.6-1 ค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลัง



7.7 การประมาณราคาค่าการก่อสร้างสะพานใหม่

การประมาณราคาค่าการก่อสร้างสะพานใหม่ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังสะพาน ทดแทนการก่อสร้างสะพานใหม่ อย่างไรก็ตาม สะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง เป็นสะพานที่มีอายุมากและมีความสำคัญต่อการคมนาคมทางถนนของประเทศ การพิจารณาการก่อสร้างสะพานใหม่จึงอาจจำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมในหลายด้าน การประมาณราคาสำหรับกรณีการก่อสร้างสะพานใหม่จึงเป็นเพียงการประมาณราคาในเบื้องต้นโดยพิจารณาเพียงค่าก่อสร้างของชิ้นส่วนสะพานในแต่ละชิ้นส่วน ดังรูปที่ 7-5

ประมาณ ราคาค่าต้นทุน การบูรณะ สะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน) วิธีการก่อสร้างสะพานใหม่		ปรับตามผลสำรวจในภาคสนาม	
11) หมวด 11 ก่อสร้างสะพานใหม่			
11.1) New Concrete Bridge, road width 9 m to 11 m Span 50.00x12 = 600 M.	600 M.	ราคาต่อหน่วย 200,000.00 บาทต่อ ม.	120,000,000.00 บาท
11.2) Bridge Approach Slab	440 SQ.M.	ราคาต่อหน่วย 3,000.00 บาทต่อ ตร.ม.	1,320,000.00 บาท
11.3) Driven Piles PC Pile Square 0.65x0.65 M.	28,800 M.	ราคาต่อหน่วย 5,000.00 บาทต่อ ม.	144,000,000.00 บาท (คิดความยาวเข็ม 30 ม.)
11.4) Miscellaneous	1 L.S.	ราคาต่อหน่วย 1,000,000.00 บาท	1,000,000.00 บาท
12) รวมราคาทุกหมวด		รวมสะพาน	266,320,000.00 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

หมายเหตุ

- 1) ราคา ไม่รวม งานทาง, งานระบบระบายน้ำอุปกรณอำนวยความสะดวกและไฟฟ้าส่องสว่าง เป็นต้น
- 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
- 3) ราคาไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้าง
- 4) ราคาไม่รวมค่าเรือสะพานเดิมและเรือย้ายเสาฐานปูนโคค

รูปที่ 7-5 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสะพานใหม่

7.8 การประมาณราคาค่ารื้อพื้นสะพานและแบรริเออร์ หลังโครงสร้างพื้นหมดอายุค่าการก่อสร้างใหม่ทดแทนของเดิม

โดยทั่วไป อายุของสะพานจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างหลัก เช่น คานสะพาน ตอม่อสะพาน ฐานรากสะพาน เป็นต้น โครงสร้างบางส่วนของสะพานสามารถปรับปรุงใหม่ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอื่น รวมถึงไม่จำเป็นต้องทำการรื้อถอนสะพานเดิมออกทั้งหมด เช่น โครงสร้างพื้นสะพาน ซึ่งหากโครงสร้างพื้นหมดอายุก่อนโครงสร้างคานสะพานหรือโครงสร้างตอม่อสะพาน ก็สามารถทำการรื้อพื้นสะพานเก่าออกแล้วทำใหม่ได้เพื่อต่ออายุพื้นสะพานให้เท่ากับอายุคงเหลือของโครงสร้างสะพานส่วนอื่นๆได้

อย่างไรก็ตามทางเลือกการรื้อพื้นสะพานเพื่อก่อสร้างใหม่นี้ จะเกิดขึ้นภายหลังจากการเสริมกำลังคานสะพาน เพราะเมื่อมีการเสริมกำลังคานสะพานแล้ว จะทำให้อายุการใช้งานของคานสะพานมากขึ้น และโครงสร้างพื้นสะพานมักจะมีการชำรุดเกิดขึ้นได้ง่าย ส่งผลให้อายุของโครงสร้างพื้นสะพานจะน้อยกว่าโครงสร้างคานสะพาน การคิดราคาต้นทุนของการรื้อสะพานและทำการก่อสร้างใหม่จะใช้หลักการเทียบกับการประมาณต้นทุนของการเสริมกำลังคานสะพาน ดังรูปที่ 7-6

ประมาณ ราคาค่าต้นทุน การรื้อสะพาน กิตติขจร (เฉพาะ ส่วน โครงสร้างส่วนบน) วิธีการรื้อพื้นและแบรริเออร์เดิมและก่อสร้างใหม่ทดแทน		ปรับตามผลสำรวจในภาคสนาม			
1) หมวด 1 ค่าเตรียมพื้นที่					
1.1) ค่าจ้าง		100,000.00	บาท		
1.2) ค่า Clearing		20,000.00	บาท		
1.3) ค่ารื้อย้ายสาธารณูปโภค		200,000.00	บาท		
7) หมวด 7 ค่า ซอยรอยร้าว Epoxy Injection					
7.1) งาน Epoxy Injection (รอยร้าวลึก ไม่เกิน 0.50 m)	20 m	ราคาต่อหน่วย	3,000.00	บาทต่อเมตร	รวม 60,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8) หมวด 8 รื้อพื้นสะพานและสร้างใหม่					
8.1) ค่ารื้อ Barrier และ พื้นเดิม	187.5 CU.M	ราคาต่อหน่วย	1,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	รวม 187,500.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.2) ค่าคอนกรีตพื้นรวม Barrier	187.5 CU.M	ราคาต่อหน่วย	2,700.00	บาท รวม	รวม 506,250.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.3) ค่า เหล็กเสริม DB16	19383.1 kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	รวม 443,679.16 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.4) ค่า เหล็กเสริม DB12	1657.6 kg	ราคาต่อหน่วย	22.89	บาท รวม	รวม 37,942.46 บาท ต่อช่วงสะพาน
8.5) ค่าไม้แบบ	777 SQ.M	ราคาต่อหน่วย	440.00	บาท รวม	รวม 341,880.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
9) หมวด 9 งานเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal					
9.1) ค่าปรับปรุงเปลี่ยนรอยต่อ Compression Seal	8 M.	ราคาต่อหน่วย	3,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	รวม 24,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
10) งานยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing					
10.1) ยกโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยน Bearing	1 ช่วงสะพาน	ราคาต่อหน่วย	1,650,000.00	บาทต่อ ลบ.ม.	รวม 1,650,000.00 บาท ต่อช่วงสะพาน
11) รวมราคาทุกหมวด					
				รวม	3,571,251.62 บาท ต่อช่วงสะพาน (ไม่รวม Factor F)
				รวมสะพาน	42,855,019.48 บาท ต่อ สะพาน (ไม่รวม Factor F)

- หมายเหตุ
- 1) ราคา ไม่รวม งานบูรณะตอม่อและฐานรากสะพานงานเสริมผิวถนนและสะพาน อุปกรณ์ งานทางอื่นๆ
 - 2) ราคา ไม่รวม ค่า Workzone และ Traffic Administration ระหว่างการก่อสร้าง
 - 3) ราคาไม่รวมงานจัดจราจรทางน้ำและการจัดการสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้าง

รูปที่ 7-6 ค่าใช้จ่ายในการรื้อพื้นสะพานและก่อสร้างใหม่



7.9 สรุปการเปรียบเทียบราคาค่าการเสริมกำลังและการก่อสร้างสะพานใหม่

จากการประมาณราคาเบื้องต้นในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถแยกการเสริมกำลังคานสะพานออกมาเพื่อนำมาเปรียบเทียบหากไม่มีการเสริมพื้น รวมถึงการก่อสร้างพื้นใหม่ภายหลัง ดังตารางที่ 7-1

ตารางที่ 7-1 การประมาณราคาค่าเสริมกำลังในรูปแบบต่าง ๆ และการก่อสร้างสะพานใหม่

กิจกรรม			ราคา (บาท)
การปรับปรุงช่องจราจรบนสะพาน	การบำรุงรักษา	การเสริมกำลัง	
1. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น ไม่เสริมกำลัง	30,354,585
2. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น เสริม Shotcrete	62,654,459
3. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น เสริม UHPC	74,192,685
4. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น เสริมคานทางขวาง	78,611,972
5. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น ไม่เสริมกำลัง	48,237,399
6. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น เสริม Shotcrete	80,537,213
7. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น เสริม UHPC	92,075,440
8. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น เสริมคานทางขวาง	96,494,725
9. รื้อทางเท้าซ้าย/รื้อพื้นสะพาน/รื้อกำแพงกันตกขวา ก่อสร้างทางเท้าซ้าย/พื้นสะพาน/กำแพงกันตกขวาใหม่			42,855,019
10. ก่อสร้างสะพานใหม่			266,320,000

บทที่ 8 การคัดเลือกรูปแบบการเสริมกำลัง คานและพื้นสะพาน

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการคัดเลือกรูปแบบการเสริมกำลังคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางตามที่ได้ออกแบบเสริมกำลังในบทที่ผ่านมา ได้แก่ การเสริมกำลังคานสะพานด้วยการอัดแรง (Pre-stressing) และการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) การเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างโดยใช้ Shotcrete การเสริมความหนาพื้นด้านบนโดยใช้ Ultra High Performance Concrete (UHPC) และการเพิ่มคานทางขวางรองรับพื้น (Rib) โดยแนวทางการคัดเลือกได้พิจารณารูปแบบการเสริมกำลังที่ทำให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle Cost) ซึ่งประกอบด้วย ค่าเสริมกำลังคานสะพานและพื้นสะพาน ณ ปัจจุบัน และค่าก่อสร้างสะพานใหม่ในอนาคตเมื่อคานสะพานเสื่อมสภาพจนสิ้นอายุการใช้งานภายหลังจากการเสริมกำลัง เทียบต่ออายุบริการภายหลังจากการเสริมกำลัง มีค่าต่ำที่สุด โดยในกรณีทางเลือกที่ไม่ได้ทำการเสริมกำลังแต่ทำการก่อสร้างสะพานใหม่ ณ ปัจจุบัน อายุบริการของสะพานก่อสร้างใหม่จะถือให้มีอายุการใช้งาน 75 ปีตามมาตรฐานอายุออกแบบใช้งานของสะพานที่ก่อสร้างใหม่ ในการศึกษา การเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานพิจารณาเฉพาะความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจราจรของรถบรรทุกหนัก

8.1 กำลังต้านทานความล้าของคานและพื้นสะพาน

โครงสร้างเมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำๆ จะเกิดการเสื่อมสภาพในรูปของความล้า (Fatigue) จำนวนรอบของแรงกระทำที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้โครงสร้างเกิดความล้าสะสมหรือเสื่อมสภาพมากขึ้น โดยเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำมีจำนวนมากพอ โครงสร้างจะเกิดการวิบัติได้ถึงแม้ว่าขนาดของแรงกระทำจะมีค่าต่ำกว่าแรงกระทำประลัยของโครงสร้างก็ตาม

กำลังต้านทานความล้าของโครงสร้างขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนรอบของแรงกระทำ โดยมักแสดงกำลังต้านทานความล้าของโครงสร้างด้วยเส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve or S-N Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงกระทำหนึ่งๆ กับจำนวนรอบของแรงกระทำนั้นๆ ที่ทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ ในการศึกษาครั้งนี้ กำลังต้านทานความล้าของคานสะพานซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรง อ้างอิงเส้นโค้งความล้าจากงานวิจัยของ Du et al. (2020) ดังแสดงในสมการที่ 8-1

$$\ln N = 13.3391 - 21.4362P_n + 7.7509PD \quad (8-1)$$

โดยที่ P_n คืออัตราส่วนระหว่างแรงกระทำเสมือนเป็นจุด P ที่ถ่ายลงคานสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุก W กับกำลังรับแรงประลัยแบบจุด P_n ของคานสะพาน และ PD คือระดับการอัดแรง เช่น ระดับการอัดแรงสูง $PD=0.75$ ระดับการอัดแรงปานกลาง $PD=0.70$ และระดับการอัดแรงต่ำ $PD=0.60$ และ N คือจำนวนรอบของแรงกระทำ P ที่ทำให้คานสะพานเกิดการวิบัติ

ในส่วนกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงเส้นโค้งความล้าจากงานวิจัยของ Kumppong (2010) ดังแสดงในสมการที่ 8-2

$$\log P_n = -0.5258 - 0.0646 \log N \quad (8-2)$$

โดยที่ P_n คืออัตราส่วนระหว่างแรงกระทำเสมือนเป็นจุด P ที่ถ่ายลงพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุก W กับกำลังรับแรงประลัยแบบจุด P_n ของพื้นสะพาน และ N คือจำนวนรอบของแรงกระทำ P ที่ทำให้พื้นสะพานเกิดการวิบัติ

โดยอาศัยหลักเกณฑ์การสะสมความล้าเชิงเส้น (Palmgren-Miner Linear Criterion of Cumulative Damage) P_i ใดๆ 1 รอบทำให้โครงสร้างเกิดความล้าหรือเสื่อมสภาพไปเท่ากับ $1/N_i$ และโครงสร้างจะวิบัติหรือหมดกำลังต้านทานความล้าเมื่อความล้าสะสมเท่ากับ 1 หรือ $\sum n_i/N_i = 1$ โดยที่ n_i คือจำนวนรอบการกระทำซ้ำของ P_i

การทำนายการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้าอาศัยสมการที่ 5-1 และ 5-2 ตามลำดับเพื่อคำนวณหาความล้า $1/N_i$ ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก P_i กระทำ 1 รอบ จากนั้นคำนวณความล้าหรือการเสื่อมสภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากจำนวนรอบ (จำนวนบรรทุกทุก) n_i ที่สอดคล้องกับ P_i ตามหลักเกณฑ์การสะสมความล้าเชิงเส้นตามที่ได้กล่าวข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อเป็นการเผื่อความปลอดภัย ได้กำหนดให้ค่าความล้าหรือการเสื่อมสภาพสะสมที่ยอมรับได้ไว้ที่ 0.8 หรือ $\sum n_i/N_i = 0.8$

8.2 กำลังรับแรงประลัยของคานและพื้นสะพาน

กำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพานมีผลต่อกำลังต้านทานความล้าของคานสะพานและพื้นสะพานดังที่ได้แสดงไว้ในสมการ 8-1 และ 8-2 ตามลำดับ ดังนั้น กำลังรับแรงประลัยจึงมีผลต่อการการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้า เนื่องจากกำลังรับแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งเป็นวัสดุโครงสร้างคานสะพานและพื้นสะพานมีความแปรปรวน จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาความแปรปรวนของกำลังรับแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริมในการวิเคราะห์หาลำกำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพาน

กำลังรับแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาลำกำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพาน ได้แก่ กำลังรับแรงอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีต และกำลัง

รับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) ของเหล็กเสริม จากผลการเจาะทดสอบก่อนตัวอย่างคอนกรีตและเหล็กเสริมของคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง พบว่า กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพานมีค่าเฉลี่ยต่อค่าระบุดอกแบบ (Bias Factor, λ) เท่ากับ 0.85 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อค่าเฉลี่ย (Coefficient of Variation, COV) เท่ากับ 0.22 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตพื้นสะพานมีค่า $\lambda = 1.14$ และ $COV = 0.21$ ในส่วนของเหล็กเสริมของทั้งคานสะพานและพื้นสะพาน กำลังรับแรงดึงที่จุดครากมีค่า $\lambda = 1.41$ และ $COV = 0.15$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพานและพื้นสะพานมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าระบุดอกแบบแต่มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ในขณะที่กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าระบุดอกแบบมากและมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพาน จึงพิจารณาเฉพาะความแปรปรวนของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพานและพื้นสะพาน โดยสมมุติให้กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีการกระจายตัวแบบโค้งปกติและพิจารณาค่าในช่วง ค่าเฉลี่ย ± 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมให้เป็นค่าคงที่โดยใช้ค่าระบุดอกแบบ สำหรับ Ultra High Performance Concrete (UHPC) เนื่องจาก UHPC เป็นวัสดุที่ยังไม่มีการนำมาใช้ในงานของกรมทางหลวง จึงยังไม่มีค่าทางสถิติของกำลังรับแรงอัดประลัย ในการศึกษานี้ จึงสมมุติให้กำลังรับแรงอัดประลัยของ UHPC มีค่าคงที่โดยใช้ค่าระบุดอกแบบ 170 MPa ซึ่งเป็นค่าระบุดอกแบบทั่วไปของคอนกรีตประเภทนี้

กำลังรับแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพาน สรุปได้ดังนี้

กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพานมีค่าเฉลี่ย 30.6 MPa ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6.8 MPa
พิจารณาค่าตั้งแต่ 17 ถึง 44.2 MPa

กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตพื้นสะพานมีค่าเฉลี่ย 24.1 MPa ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.1 MPa
พิจารณาค่าตั้งแต่ 13.9 ถึง 34.3 MPa

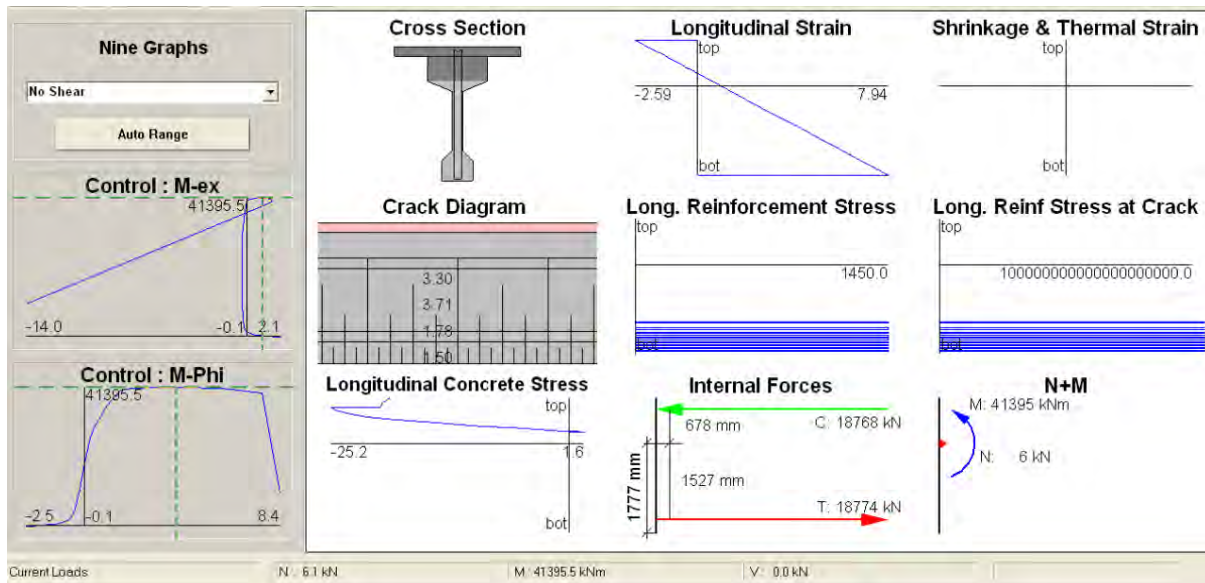
กำลังรับแรงอัดประลัยของ UHPC มีค่า 170 MPa

กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมมีค่า 300 MPa

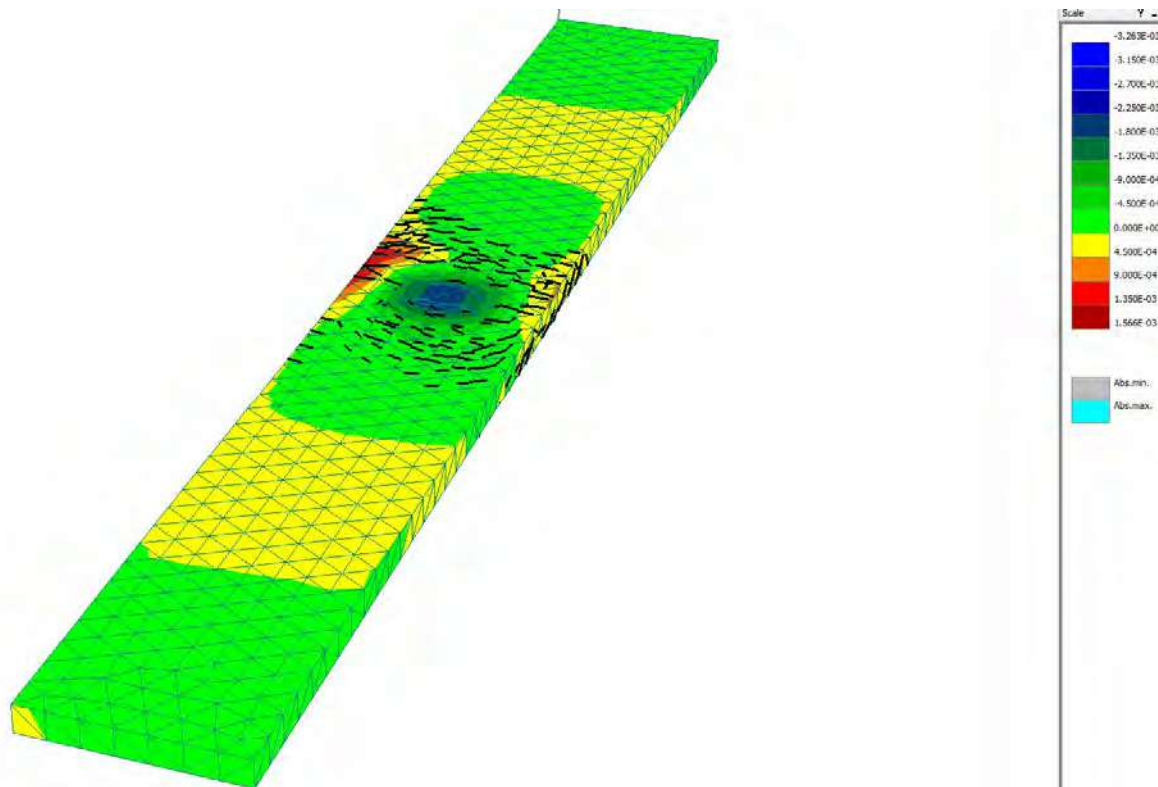
กำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กอัดแรงมีค่า 1470 MPa

การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของคานสะพานใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Response 2000 ส่วนการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพานใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ATENA รูปที่ 8-1 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของคานสะพานกรณีกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต

คานสะพานและพื้นสะพานมีค่าเท่ากับ 25.16 และ 20.02 MPa ตามลำดับ รูปที่ 8-2 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพานกรณีกำลังรับแรงอัดประลัยมีค่าเท่ากับ 20.02 MPa



รูปที่ 8-1 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (กำลังรับแรงอัดประลัยของคานกริตคานสะพาน 25.16 MPa กำลังรับแรงอัดประลัยของคานกริตพื้นสะพาน 20.02 MPa)



รูปที่ 8-2 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพาน (กำลังรับแรงอัดประลัยของคานกริต 20.02 MPa)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ผลการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพานกรณีต่างๆ ก่อนและหลังการเสริมกำลังแสดงไว้ในรูปที่ 8-3 ถึง 8-15

CASE	พื้นเดิม		คาน			L=	50	m	P ² _u (ton ²)	Pfc ₁ *Pfc ₂ *P ² _u
	f _{c1} (MPa)	f _{c2} (MPa)	Pfc ₁	Pfc ₂	Pfc ₁ *Pfc ₂					
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	39983.0650	319.9	2.9923	102313.31	957.12
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	40527.5070	324.2	7.5402	105118.64	2444.67
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	40896.5500	327.2	10.3053	107041.78	3371.61
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	41145.1120	329.2	7.6551	108346.90	2519.75
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	41335.4290	330.7	3.0935	109351.53	1022.96
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	41010.7890	328.1	7.6301	107640.63	2503.32
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	41395.4660	331.2	19.1465	109669.41	6340.62
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	41632.5000	333.1	26.0802	110928.96	8686.28
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	41800.3980	334.4	19.3338	111825.49	6465.28
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	41915.8330	335.3	7.7985	112443.97	2615.03
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	41897.5020	335.2	10.5575	112345.64	3538.67
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	42137.7360	337.1	26.3967	113637.68	8898.39
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	42274.6070	338.2	35.8675	114377.11	12130.29
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	42375.6230	339.0	26.5458	114924.38	8999.14
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	42437.0800	339.5	10.6935	115257.97	3630.40
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	42639.0980	341.1	7.9330	116357.93	2706.06
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	42744.4190	342.0	19.7704	116933.46	6760.60
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	42822.0680	342.6	26.8254	117358.69	9189.76
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	42882.0090	343.1	19.8340	117687.47	6804.19
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	42914.3060	343.3	7.9842	117864.81	2741.10
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	43181.7550	345.5	3.2317	119338.49	1116.39
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	43237.0220	345.9	8.0443	119644.16	2782.48
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	43254.1860	346.0	10.8994	119739.17	3771.55
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	43276.3600	346.2	8.0516	119861.97	2787.55
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	43292.6310	346.3	3.2400	119952.12	1122.13
							mean Pu	337.5	std Pu (ton)	5.7
							mean-2std	326.0		
							mean+2std	348.9		

รูปที่ 8-3 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (สภาพเดิม ไม่เสริมกำลัง)

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

CASE	เสริม	คาน				L=	50	m			
	พื้นเดิม		$f'c_1$ (MPa)	$f'c_2$ (MPa)	$Pf'c_1$	$Pf'c_2$	$Pf'c_1 * Pf'c_2$	Mu (KN-m)	Pu (ton)	$Pf'c_1 * Pf'c_2 * Pu$	P^2_u (ton ²)
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	45691.8802	365.5	3.4195	133615.87	1249.95	
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	46335.7839	370.7	8.6208	137408.31	3195.61	
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	46804.2362	374.4	11.7939	140200.74	4416.05	
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	47117.2267	376.9	8.7662	142082.12	3304.31	
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	47370.1833	379.0	3.5451	143611.79	1343.46	
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	46850.5129	374.8	8.7166	140478.12	3267.00	
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	47343.3080	378.7	21.8975	143448.88	8293.61	
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	47640.9436	381.1	29.8442	145258.21	11374.43	
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	47870.6101	383.0	22.1414	146662.10	8479.38	
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	48039.2751	384.3	8.9377	147697.41	3434.90	
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	47886.6349	383.1	12.0667	146760.31	4622.66	
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	48215.5607	385.7	30.2041	148783.38	11650.47	
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	48400.0000	387.2	41.0646	149923.84	15900.20	
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	48534.4250	388.3	30.4039	150757.79	11805.08	
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	48610.3766	388.9	12.2491	151230.00	4763.45	
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	48765.8395	390.1	9.0729	152198.85	3539.58	
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	48941.7334	391.5	22.6368	153298.77	8863.09	
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	49082.3678	392.7	30.7471	154181.04	12073.14	
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	49125.2590	393.0	22.7217	154450.63	8929.68	
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	49174.1234	393.4	9.1489	154758.04	3599.10	
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	49427.6869	395.4	3.6991	156358.16	1462.70	
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	49541.1083	396.3	9.2171	157076.57	3653.02	
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	49572.7286	396.6	12.4916	157277.15	4953.92	
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	49588.5591	396.7	9.2260	157377.61	3660.02	
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	49633.8129	397.1	3.7145	157664.98	1474.93	
							mean Pu	386.3	std Pu (ton)	6.8	
							mean-2std	372.8			
							mean+2std	399.9			

รูปที่ 8-4 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยการอัดแรง แต่ไม่เสริมกำลังพื้นสะพาน)

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นเดิม		คาน			L=	50	m	P ² _u (ton ²)	Pfc ₁ *Pfc ₂ *P ² _u
	fc ₁ (MPa)	fc ₂ (MPa)	Pfc ₁	Pfc ₂	Pfc ₁ *Pfc ₂					
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	47441.3292	379.5	3.5504	144043.50	1347.50
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	47825.6708	382.6	8.8980	146386.87	3404.42
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	48064.4709	384.5	12.1115	147852.38	4657.06
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	48223.3061	385.8	8.9720	148831.18	3461.27
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	48306.1191	386.4	3.6152	149342.79	1397.08
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	48137.9242	385.1	8.9561	148304.62	3449.02
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	48403.5874	387.2	22.3879	149946.07	8669.25
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	48534.2220	388.3	30.4037	150756.53	11804.98
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	48645.8734	389.2	22.5000	151450.94	8756.25
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	48709.7209	389.7	9.0625	151848.76	3531.44
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	48726.8303	389.8	12.2784	151955.46	4786.30
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	48881.5628	391.1	30.6213	152922.06	11974.55
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	48968.5668	391.7	41.5470	153466.91	16275.96
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	49042.0013	392.3	30.7218	153927.54	12053.29
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	49102.4412	392.8	12.3731	154307.18	4860.38
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	49221.5433	393.8	9.1577	155056.66	3606.05
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	49326.1368	394.6	22.8146	155716.34	9002.86
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	49383.5444	395.1	30.9358	156079.00	12221.75
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	49424.6766	395.4	22.8602	156339.11	9038.87
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	49457.4136	395.7	9.2016	156546.29	3640.69
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	49658.7891	397.3	3.7164	157823.70	1476.41
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	49691.3242	397.5	9.2451	158030.57	3675.21
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	49715.5478	397.7	12.5275	158184.68	4982.51
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	49746.2732	398.0	9.2553	158380.27	3683.34
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	49757.9303	398.1	3.7238	158454.50	1482.31
							mean Pu	391.4	std Pu (ton)	4.0
							mean-2std	383.5		
							mean+2std	399.4		

รูปที่ 8-5 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยการอัดแรง และเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างโดยใช้ Shotcrete)

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

CASE	f'_{c1} (MPa)	f'_{c2} (MPa)	Pf'_{c1}	Pf'_{c2}	$Pf'_{c1} * Pf'_{c2}$	Mu (kN-m)	Pu (ton)	$Pf'_{c1} * Pf'_{c2} * Pu$	P^2_u (ton ²)	$Pf'_{c1} * Pf'_{c2} * P^2_u$
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	47589.6935	380.7	3.5615	144945.85	1355.94
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	48066.5753	384.5	8.9428	147865.32	3438.80
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	48366.4961	386.9	12.1876	149716.35	4715.77
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	48586.0007	388.7	9.0395	151078.37	3513.53
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	48739.6065	389.9	3.6476	152035.15	1422.26
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	48442.6032	387.5	9.0128	150187.89	3492.82
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	48787.6223	390.3	22.5655	152334.85	8807.36
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	48978.4650	391.8	30.6820	153528.96	12022.07
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	49132.5067	393.1	22.7251	154496.21	8932.32
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	49203.7817	393.6	9.1544	154944.78	3603.44
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	49151.8794	393.2	12.3855	154618.06	4870.17
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	49336.9013	394.7	30.9066	155784.31	12198.68
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	49464.7849	395.7	41.9680	156592.96	16607.50
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	49547.1819	396.4	31.0383	157115.09	12302.89
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	49608.3081	396.9	12.5005	157502.99	4961.04
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	49787.0876	398.3	9.2629	158640.26	3689.39
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	49894.7632	399.2	23.0776	159327.19	9211.62
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	49941.3047	399.5	31.2852	159624.57	12499.39
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	49978.6068	399.8	23.1164	159863.11	9242.61
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	50016.4872	400.1	9.3056	160105.54	3723.47
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	50284.9742	402.3	3.7633	161829.03	1513.88
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	50311.5880	402.5	9.3605	162000.38	3767.53
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	50312.7610	402.5	12.6780	162007.93	5102.94
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	50333.8463	402.7	9.3646	162143.75	3770.87
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	50341.4515	402.7	3.7675	162192.75	1517.28
							mean Pu	395.3	std Pu (ton)	4.7
							mean-2std	385.9		
							mean+2std	404.7		

รูปที่ 8-6 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยการอัดแรง และเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านบนโดยใช้ UHPC)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

CASE	เพิ่ม	คาน	$f'c_1$ (MPa)	$f'c_2$ (MPa)	$Pf'c_1$	$Pf'c_2$	$Pf'c_1 * Pf'c_2$	L=	50	m	$Pf'c_1 * Pf'c_2 * Pu$	P^2_u (ton ²)	$Pf'c_1 * Pf'c_2 * P^2_u$
	พื้นที่												
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	45691.8802	365.5	3.4195	133615.87	1249.95			
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	46335.7839	370.7	8.6208	137408.31	3195.61			
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	46804.2362	374.4	11.7939	140200.74	4416.05			
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	47117.2267	376.9	8.7662	142082.12	3304.31			
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	47370.1833	379.0	3.5451	143611.79	1343.46			
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	46850.5129	374.8	8.7166	140478.12	3267.00			
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	47343.3080	378.7	21.8975	143448.88	8293.61			
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	47640.9436	381.1	29.8442	145258.21	11374.43			
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	47870.6101	383.0	22.1414	146662.10	8479.38			
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	48039.2751	384.3	8.9377	147697.41	3434.90			
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	47886.6349	383.1	12.0667	146760.31	4622.66			
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	48215.5607	385.7	30.2041	148783.38	11650.47			
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	48400.0000	387.2	41.0646	149923.84	15900.20			
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	48534.4250	388.3	30.4039	150757.79	11805.08			
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	48610.3766	388.9	12.2491	151230.00	4763.45			
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	48765.8395	390.1	9.0729	152198.85	3539.58			
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	48941.7334	391.5	22.6368	153298.77	8863.09			
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	49082.3678	392.7	30.7471	154181.04	12073.14			
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	49125.2590	393.0	22.7217	154450.63	8929.68			
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	49174.1234	393.4	9.1489	154758.04	3599.10			
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	49427.6869	395.4	3.6991	156358.16	1462.70			
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	49541.1083	396.3	9.2171	157076.57	3653.02			
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	49572.7286	396.6	12.4916	157277.15	4953.92			
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	49588.5591	396.7	9.2260	157377.61	3660.02			
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	49633.8129	397.1	3.7145	157664.98	1474.93			
							mean Pu	386.3	std Pu (ton)	6.8			
							mean-2std	372.8					
							mean+2std	399.9					

รูปที่ 8-7 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยการอัดแรง และเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มคานทางขวาง)

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นที่เสริม f'_{c1} (MPa)	คาน f'_{c2} (MPa)	Pf'_{c1}	Pf'_{c2}	$Pf'_{c1} * Pf'_{c2}$	M_u (kN-m)	P_u (ton)	$Pf'_{c1} * Pf'_{c2} * P_u$	P^2_u (ton ²)	$Pf'_{c1} * Pf'_{c2} * P^2_u$
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	40899.6260	327.2	3.0609	107057.88	1001.51
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	41468.8670	331.8	7.7153	110058.68	2559.56
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	41869.8830	335.0	10.5506	112197.57	3534.01
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	42139.8090	337.1	7.8401	113648.86	2643.05
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	42334.0020	338.7	3.1682	114698.73	1072.99
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	41939.0840	335.5	7.8028	112568.75	2617.93
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	42364.1220	338.9	19.5945	114862.01	6640.83
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	42634.3740	341.1	26.7079	116332.15	9109.38
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	42810.3990	342.5	19.8009	117294.74	6781.48
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	42926.5520	343.4	7.9865	117932.09	2742.67
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	42860.8340	342.9	10.8003	117571.27	3703.27
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	43123.8080	345.0	27.0145	119018.42	9319.73
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	43287.0450	346.3	36.7265	119921.17	12718.26
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	43386.4270	347.1	27.1790	120472.45	9433.59
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	43477.3860	347.8	10.9556	120978.12	3810.58
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	43639.8580	349.1	8.1192	121883.98	2834.57
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	43784.1930	350.3	20.2513	122691.56	7093.51
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	43856.2830	350.9	27.4733	123095.91	9639.02
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	43924.3630	351.4	20.3162	123478.38	7139.00
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	43968.5280	351.7	8.1804	123726.81	2877.43
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	44221.9810	353.8	3.3095	125157.35	1170.82
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	44289.9720	354.3	8.2402	125542.50	2919.66
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	44337.1560	354.7	11.1723	125810.14	3962.77
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	44364.5520	354.9	8.2540	125965.66	2929.50
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	44376.3480	355.0	3.3211	126032.66	1179.01
							mean P_u	345.5	std P_u (ton)	6.0
							mean-2std	333.6		
							mean+2std	357.5		

รูปที่ 8-8 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ แต่ไม่เสริมกำลังพื้นสะพาน)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นเดิม	ความหนาเสริม	L= 50 m							
	f'_{c1} (MPa)	f'_{c2} (MPa)	$\beta f'_{c1}$	$\beta f'_{c2}$	$\beta f'_{c1} * \beta f'_{c2}$	Mu (kN-m)	Pu (ton)	$\beta f'_{c1} * \beta f'_{c2} * Pu$	P^2_u (ton ²)	$\beta f'_{c1} * \beta f'_{c2} * P^2_u$
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	42435.7900	339.5	3.1758	115250.96	1078.15
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	42763.2200	342.1	7.9561	117036.35	2721.83
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	42958.8770	343.7	10.8250	118109.77	3720.23
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	43105.6420	344.8	8.0198	118918.17	2765.60
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	43176.6950	345.4	3.2313	119310.53	1116.13
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	43042.0820	344.3	8.0080	118567.73	2757.45
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	43261.2190	346.1	20.0094	119778.12	6925.06
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	43401.7690	347.2	27.1886	120557.67	9440.26
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	43477.1670	347.8	20.1093	120976.90	6994.37
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	43532.7690	348.3	8.0993	121286.53	2820.68
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	43571.0120	348.6	10.9792	121499.72	3827.01
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	43717.8590	349.7	27.3866	122320.08	9578.26
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	43785.6460	350.3	37.1496	122699.70	13012.94
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	43830.7100	350.6	27.4573	122952.39	9627.78
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	43873.1920	351.0	11.0554	123190.85	3880.27
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	44036.3900	352.3	8.1930	124109.03	2886.32
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	44099.5000	352.8	20.3972	124465.02	7196.04
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	44144.0780	353.2	27.6536	124716.78	9765.94
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	44164.3300	353.3	20.4272	124831.23	7217.21
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	44180.2490	353.4	8.2198	124921.24	2905.21
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	44400.0540	355.2	3.3228	126167.35	1180.27
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	44430.1070	355.4	8.2662	126338.20	2938.16
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	44452.5030	355.6	11.2013	126465.60	3983.42
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	44457.3880	355.7	8.2713	126493.40	2941.77
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	44475.6250	355.8	3.3285	126597.20	1184.29
							mean Pu	349.9	std Pu (ton)	3.5
							mean-2std	342.8		
							mean+2std	357.0		

รูปที่ 8-9 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงปฏิกิริยาของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างโดยใช้ Shotcrete)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นเดิม	ความหนาเสริม	L= 50 m							
	f'_{c1} (MPa)	f'_{c2} (MPa)	Pf'_{c1}	Pf'_{c2}	$Pf'_{c1}*Pf'_{c2}$	Mu (KN-m)	Pu (ton)	$Pf'_{c1}*Pf'_{c2}*Pu$	P^2_u (ton ²)	$Pf'_{c1}*Pf'_{c2}*P^2_u$
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	41568.8470	332.6	3.1110	110590.02	1034.55
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	42109.3170	336.9	7.8345	113484.45	2639.23
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	42463.1020	339.7	10.7000	115399.36	3634.86
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	42708.2890	341.7	7.9459	116735.87	2714.85
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	42867.1690	342.9	3.2081	117606.03	1100.18
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	42515.7820	340.1	7.9101	115685.87	2690.43
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	42892.3980	343.1	19.8389	117744.50	6807.49
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	43124.4990	345.0	27.0149	119022.23	9320.03
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	43268.2150	346.1	20.0127	119816.86	6927.30
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	43385.1330	347.1	8.0718	120465.26	2801.58
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	43329.4540	346.6	10.9183	120156.26	3784.69
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	43554.6710	348.4	27.2844	121408.60	9506.89
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	43681.5900	349.5	37.0613	122117.20	12951.16
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	43785.7730	350.3	27.4291	122700.41	9608.05
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	43834.4610	350.7	11.0456	122973.44	3873.42
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	44025.6010	352.2	8.1910	124048.23	2884.90
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	44144.4270	353.2	20.4179	124718.75	7210.71
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	44206.6430	353.7	27.6928	125070.55	9793.64
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	44248.4000	354.0	20.4660	125306.94	7244.72
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	44279.2440	354.2	8.2382	125481.69	2918.24
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	44563.8900	356.5	3.3351	127100.18	1189.00
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	44603.7540	356.8	8.2986	127327.67	2961.17
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	44612.5960	356.9	11.2417	127378.16	4012.16
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	44643.5840	357.1	8.3060	127555.17	2966.46
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	44650.0410	357.2	3.3415	127592.07	1193.60
							mean Pu	348.9	std Pu (ton)	5.2
							mean-2std	338.4		
							mean+2std	359.4		

รูปที่ 8-10 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านบนโดยใช้ UHPC)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นเดิม		คาน			L=	50	m	P ² u (ton ²)	Pfc ₁ *Pfc ₂ *P ² u
	fc ₁ (MPa)	fc ₂ (MPa)	Pfc ₁	Pfc ₂	Pfc ₁ *Pfc ₂					
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	40899.6260	327.2	3.0609	107057.88	1001.51
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	41468.8670	331.8	7.7153	110058.68	2559.56
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	41869.8830	335.0	10.5506	112197.57	3534.01
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	42139.8090	337.1	7.8401	113648.86	2643.05
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	42334.0020	338.7	3.1682	114698.73	1072.99
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	41939.0840	335.5	7.8028	112568.75	2617.93
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	42364.1220	338.9	19.5945	114862.01	6640.83
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	42634.3740	341.1	26.7079	116332.15	9109.38
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	42810.3990	342.5	19.8009	117294.74	6781.48
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	42926.5520	343.4	7.9865	117932.09	2742.67
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	42860.8340	342.9	10.8003	117571.27	3703.27
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	43123.8080	345.0	27.0145	119018.42	9319.73
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	43287.0450	346.3	36.7265	119921.17	12718.26
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	43386.4270	347.1	27.1790	120472.45	9433.59
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	43477.3860	347.8	10.9556	120978.12	3810.58
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	43639.8580	349.1	8.1192	121883.98	2834.57
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	43784.1930	350.3	20.2513	122691.56	7093.51
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	43856.2830	350.9	27.4733	123095.91	9639.02
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	43924.3630	351.4	20.3162	123478.38	7139.00
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	43968.5280	351.7	8.1804	123726.81	2877.43
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	44221.9810	353.8	3.3095	125157.35	1170.82
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	44289.9720	354.3	8.2402	125542.50	2919.66
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	44337.1560	354.7	11.1723	125810.14	3962.77
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	44364.5520	354.9	8.2540	125965.66	2929.50
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	44376.3480	355.0	3.3211	126032.66	1179.01
							mean Pu	345.5	std Pu (ton)	6.0
							mean-2std	333.6		
							mean+2std	357.5		

รูปที่ 8-11 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของคานสะพาน (เสริมกำลังคานสะพานด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และเสริมกำลังพื้นสะพานด้วยการเพิ่มคานทางขวาง)

CASE	พื้นเดิม		Pu (kN)	Pu (ton)	Pfc ₁ *Pu	P ² u (ton ²)	Pfc ₁ *P ² u
	fc ₁ (MPa)	Pfc ₁					
1	15.94	0.0967	1526.0000	152.6	14.7595	23286.76	2252.30
2	20.02	0.2404	1733.0000	173.3	41.6698	30032.89	7221.38
3	24.10	0.3257	1916.0000	191.6	62.3967	36710.56	11955.20
4	28.18	0.2404	2032.0000	203.2	48.8593	41290.24	9928.20
5	32.26	0.0967	2166.0000	216.6	20.9496	46915.56	4537.69
				mean Pu	188.6	std Pu (ton)	17.7
				mean-2std	153.3		
				mean+2std	223.9		

รูปที่ 8-12 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพาน (สภาพเดิม ไม่เสริมกำลัง)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นเดิม		$Pf'c_1$	$Pf'c_2$	$Pf'c_1 * Pf'c_2$	Pu (kN)	Pu (ton)	$Pf'c_1 * Pf'c_2 * Pu$	P^2_u (ton ²)	$Pf'c_1 * Pf'c_2 * P^2_u$
	$f'c_1$ (MPa)	$f'c_2$ (MPa)								
1	15.94	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	2151.0000	215.1	2.0122	46268.01	432.83
2	15.94	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	2248.0000	224.8	5.2280	50535.04	1175.26
3	15.94	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	2287.0000	228.7	7.2036	52303.69	1647.46
4	15.94	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	2330.0000	233.0	5.4187	54289.00	1262.56
5	15.94	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	2345.0000	234.5	2.1937	54990.25	514.42
6	20.02	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	2304.0000	230.4	5.3583	53084.16	1234.54
7	20.02	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	2482.0000	248.2	14.3499	61603.24	3561.64
8	20.02	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	2522.0000	252.2	19.7485	63604.84	4980.57
9	20.02	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	2553.0000	255.3	14.7604	65178.09	3768.32
10	20.02	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	2583.0000	258.3	6.0071	66718.89	1551.64
11	24.10	19.72	0.3257	0.0967	0.0315	2416.0000	241.6	7.6099	58370.56	1838.56
12	24.10	25.16	0.3257	0.2404	0.0783	2607.0000	260.7	20.4141	67964.49	5321.95
13	24.10	30.60	0.3257	0.3257	0.1061	2708.0000	270.8	28.7197	73332.64	7777.31
14	24.10	36.04	0.3257	0.2404	0.0783	2774.0000	277.4	21.7218	76950.76	6025.62
15	24.10	41.48	0.3257	0.0967	0.0315	2791.0000	279.1	8.7911	77896.81	2453.60
16	28.18	19.72	0.2404	0.0967	0.0233	2509.0000	250.9	5.8350	62950.81	1464.00
17	28.18	25.16	0.2404	0.2404	0.0578	2714.0000	271.4	15.6912	73657.96	4258.59
18	28.18	30.60	0.2404	0.3257	0.0783	2835.0000	283.5	22.1994	80372.25	6293.54
19	28.18	36.04	0.2404	0.2404	0.0578	2887.0000	288.7	16.6914	83347.69	4818.81
20	28.18	41.48	0.2404	0.0967	0.0233	2967.0000	296.7	6.9001	88030.89	2047.27
21	32.26	19.72	0.0967	0.0967	0.0094	2564.0000	256.4	2.3986	65740.96	615.00
22	32.26	25.16	0.0967	0.2404	0.0233	2804.0000	280.4	6.5211	78624.16	1828.51
23	32.26	30.60	0.0967	0.3257	0.0315	2942.0000	294.2	9.2667	86553.64	2726.27
24	32.26	36.04	0.0967	0.2404	0.0233	3045.0000	304.5	7.0815	92720.25	2156.33
25	32.26	41.48	0.0967	0.0967	0.0094	3089.0000	308.9	2.8897	95419.21	892.63
							mean Pu	265.0	std Pu (ton)	20.4
							mean-2std	224.2		
							mean+2std	305.8		

รูปที่ 8-13 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพาน (เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างโดยใช้ Shotcrete)

CASE	พื้นเดิม		$Pf'c_1$	Pu (kN)	Pu (ton)	$Pf'c_1 * Pu$	P^2_u (ton ²)	$Pf'c_1 * P^2_u$
	$f'c_1$ (MPa)	$f'c_2$ (MPa)						
1	15.94	19.72	0.0967	1978.0000	197.8	19.1313	39124.84	3784.17
2	20.02	25.16	0.2404	2188.0000	218.8	52.6103	47873.44	11511.12
3	24.10	30.60	0.3257	2381.0000	238.1	77.5399	56691.61	18462.25
4	28.18	36.04	0.2404	2546.0000	254.6	61.2183	64821.16	15586.19
5	32.26	41.48	0.0967	2683.0000	268.3	25.9501	71984.89	6962.40
				mean Pu	236.4	std Pu (ton)	19.9	
				mean-2std	196.6			
				mean+2std	276.3			

รูปที่ 8-14 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพาน (เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความหนาพื้นด้านบนโดยใช้ UHPC)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

CASE	พื้นเดิม			Pu (ton)	Pfc ₁ *Pu	P ² _u (ton ²)	Pfc ₁ *P ² _u
	fc _t (MPa)	Pfc ₁	Pu (kN)				
1	15.94	0.0967	1549.0000	154.9	14.9820	23994.01	2320.71
2	20.02	0.2404	1762.0000	176.2	42.3671	31046.44	7465.09
3	24.10	0.3257	1914.0000	191.4	62.3315	36633.96	11930.26
4	28.18	0.2404	1997.0000	199.7	48.0177	39880.09	9589.13
5	32.26	0.0967	2133.0000	213.3	20.6304	45496.89	4400.47
				mean Pu	188.3	std Pu (ton)	15.4
				mean-2std	157.5		
				mean+2std	219.2		

รูปที่ 8-15 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงประลัยของพื้นสะพาน (เสริมกำลังด้วยการเพิ่มคานทางขวาง)

ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพานสรุปไว้ในตารางที่ 8-1 โดยค่ากำลังรับแรงอัดประลัยเฉลี่ย - 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่ากำลังรับแรงประลัยที่นำไปใช้ในการคำนวณการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้า

ตารางที่ 8-1 กำลังรับแรงประลัยของคานสะพานและพื้นสะพาน

โครงสร้าง	การเสริมกำลัง	กำลังรับแรงประลัย (ตัน)		
		ค่าเฉลี่ย (m)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s.d.)	ค่า m-2s.d.
คาน สะพาน	ไม่เสริมกำลัง	337.5	5.7	326.0
	คาน เสริมการอัดแรง/พื้น ไม่เสริมกำลัง	386.3	6.8	372.8
	คาน เสริมการอัดแรง/พื้น เสริม Shotcrete	391.4	4.0	383.5
	คาน เสริมการอัดแรง/พื้น เสริม UHPC	395.3	4.7	385.9
	คาน เสริมการอัดแรง/พื้น เสริมคานทางขวาง	386.3	6.8	372.8
	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์/พื้น ไม่เสริมกำลัง	345.5	6.0	333.6
	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์/พื้น เสริม Shotcrete	349.9	3.5	342.8
	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์/พื้น เสริม UHPC	348.9	5.2	338.4
	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์/พื้น เสริมคานทางขวาง	345.5	6.0	333.6
พื้น สะพาน	ไม่เสริมกำลัง	188.6	17.7	153.3
	เสริม Shotcrete	265.0	20.4	224.2
	เสริม UHPC	236.4	19.9	196.6
	เสริมคานทางขวาง	188.3	15.4	157.5



8.3 การจราจรของรถบรรทุก

การจราจรของรถบรรทุกเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักนอกเหนือจากกำลังรับแรงประลัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้า การจราจรของรถบรรทุกที่ใช้ในการคำนวณการเสื่อมสภาพประกอบด้วยปริมาณและน้ำหนักของรถบรรทุก ดังนี้

ปริมาณรถบรรทุก พิจารณาเฉพาะปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักที่วิ่งผ่านสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ได้แก่ รถบรรทุก 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถสิบล้อ) รถบรรทุก 1 ตอน 5 เพลา 10 ล้อ ยาง 18 เส้น (รถกึ่งพ่วง) รถบรรทุก 2 ตอน 5 เพลา 10 ล้อ ยาง 18 เส้น (รถพ่วง) โดยอาศัยข้อมูลการจราจรจากระบบสารสนเทศปริมาณจราจรบนทางหลวง (Traffic Information Management System, TIMS) ของสำนักอำนวยความปลอดภัย ณ จุดสำรวจทางหลวงหมายเลข 1 ตอนควบคุม 1001 วังเจ้า-ตาก กิโลเมตรที่ 511+796 ซึ่งใกล้เคียงกับสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง ดังสรุปในตารางที่ 8-2

ตารางที่ 8-2 ปริมาณจราจรรถบรรทุกหนัก จุดสำรวจทางหลวงหมายเลข 1 ตอนควบคุม 1001 วังเจ้า-ตาก กิโลเมตรที่ 511+796

พ.ศ.	ปริมาณรถบรรทุกหนัก (คันต่อวัน)			
	รถสิบล้อ	รถพ่วง	รถกึ่งพ่วง	รวม
2556	487	483	707	1,677
2557	376	355	628	1,359
2558	444	446	687	1,577
2559	499	468	744	1,711
2560	543	447	781	1,771
2561	538	550	919	2,007
2562	455	428	829	1,712
2563	640	480	776	1,896
2564	667	503	1056	2,226
2565	368	414	658	1,440

เนื่องจากข้อมูลปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักในตารางที่ 8-2 มีอยู่เพียงช่วงปีพ.ศ. 2556 ถึง 2565 แต่อย่างไรก็ตาม การคำนวณการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเนื่องจากความล้าจำเป็นที่จะต้องทราบปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักตั้งแต่ปีพ.ศ. 2509 ซึ่งเป็นปีที่สะพานเปิดให้บริการ ดังนั้น จึงต้องทำการประมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักที่เวลาต่างๆ โดยสมมุติให้อัตราการเพิ่มของปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักต่อปีมีค่าคงที่ ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักที่อายุสะพานต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8-3

$$N = k \cdot a^T \quad (8-3)$$



โดยที่ N คือปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนัก (คันต่อวัน) ที่อายุสะพาน T ปี k และ a เป็นค่าคงที่ โดย k แสดงถึงปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนัก ณ ปีที่ศูนย์ และ a คืออัตราการเพิ่มของปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักต่อปี ค่าคงที่ k และ a สามารถหาได้จากสมการถดถอยโดยอาศัยข้อมูลในตารางที่ 8-2 ซึ่งจะได้ $k = 648$ คันต่อวัน และ $a = 1.02$ (อัตราการเพิ่มของปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนัก 2% ต่อปี)

ในส่วนของสัดส่วนของรถบรรทุกหนักแต่ละประเภท จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 8-2 พบว่า สัดส่วนของรถบรรทุกหนักแต่ละประเภทในแต่ละปีค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ รถสิบล้อ 29% รถพ่วง 26% และรถกึ่งพ่วง 45% สัดส่วนดังกล่าวและสมการที่ 8-3 ได้นำไปใช้ในการคำนวณการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเนื่องจากความล่าช้าในการศึกษาครั้งนี้

น้ำหนักบรรทุก รถบรรทุกหนักทั้งสามประเภทมีพิกัดน้ำหนักตามกฎหมายดังสรุปในตารางที่ 8-3

ตารางที่ 8-3 พิกัดน้ำหนักตามกฎหมายของรถสิบล้อ รถพ่วง และรถกึ่งพ่วง

ปีพ.ศ.	พิกัดน้ำหนักกฎหมาย (ตัน)		
	รถสิบล้อ	รถพ่วง	รถกึ่งพ่วง
พ.ศ. 2500 ถึง 2519	18	34	32.4
พ.ศ. 2520 ถึง 2548	21	39.2	37.4
พ.ศ. 2549 ถึง ปัจจุบัน	25	47	45

แต่อย่างไรก็ตาม รถบรรทุกหนักส่วนใหญ่ในประเทศไทยมักบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดกฎหมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งรถสิบล้อและรถพ่วง และจากการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการสอบเทียบน้ำหนักรถสิบล้อที่วิ่งผ่านสะพาน ซึ่งพบว่า รถสิบล้อมีการบรรทุกเกินพิกัดกฎหมายอยู่จริง นอกจากนี้ ยังพบว่า รถบรรทุกหนักที่วิ่งผ่านสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายไม่ใช่รถเปล่า แต่เป็นรถที่มีการบรรทุกสินค้าเกือบทุกคัน ดังนั้น เพื่อให้สะท้อนสภาพความเป็นจริง น้ำหนักบรรทุกที่ใช้เป็นตัวแทนในการนำไปคำนวณการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเนื่องจากความล่าช้าจึงควรเป็นน้ำหนักเฉลี่ยของรถที่บรรทุกสินค้า

ในการศึกษาครั้งนี้ การหาน้ำหนักเฉลี่ยของรถที่บรรทุกสินค้าได้อ้างอิงงานวิจัยของ Kumpoopong (2010) ซึ่งพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของรถที่บรรทุกสินค้าต่อน้ำหนักตามพิกัดกฎหมายของรถประเภทนั้นๆ มีค่าคงที่ (Bias Factor, λ) โดยรถสิบล้อ $\lambda = 1.16$ รถพ่วง $\lambda = 1.11$ และรถกึ่งพ่วง $\lambda = 0.96$ ดังนั้น น้ำหนักเฉลี่ยของรถสิบล้อ รถพ่วง และรถกึ่งพ่วงที่บรรทุกสินค้า ที่พิกัดน้ำหนักต่างๆ ซึ่งนำไปใช้

ในการคำนวณการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเนื่องจากความล้า สามารถคำนวณได้จาก พิกัดน้ำหนักคูณกับ λ ของรถประเภทนั้นๆ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 8-4

ตารางที่ 8-4 น้ำหนักรวมน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ยของรถสิบล้อ รถพ่วง และรถกึ่งพ่วง

ปีพ.ศ.	น้ำหนักรวมเฉลี่ย (ตัน)		
	รถสิบล้อ	รถพ่วง	รถกึ่งพ่วง
พ.ศ. 2500 ถึง 2519	20.9	37.7	31.1
พ.ศ. 2520 ถึง 2548	24.4	43.5	35.9
พ.ศ. 2549 ถึง ปัจจุบัน	29.0	52.2	43.2

8.4 การกระจายน้ำหนักและแรงกระแทกจากการจราจรของรถบรรทุก

เมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน น้ำหนักรถบรรทุกจะกระจายไปยังส่วนต่างๆ ของโครงสร้างสะพาน รวมถึงเกิดแรงกระแทกขึ้นด้วย การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกและแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างสะพาน สำหรับสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางซึ่งเป็นสะพานระบบพื้น-คาน การกระจายน้ำหนักรถบรรทุกลงพื้นและคานสะพานและแรงกระแทกที่เกิดขึ้น สรุปได้ดังนี้

พื้นสะพาน พิจารณาส่วนของพื้นสะพานที่อยู่ระหว่างคานสะพาน เนื่องจากพื้นสะพานซึ่งอยู่ด้านบนของคานสะพานมีความหนาเท่ากันและคานสะพานมีระยะห่างระหว่างคานเท่ากัน จึงสมมติให้พื้นสะพานที่อยู่ระหว่างคานสะพานรับน้ำหนักล้อของรถบรรทุก หรือรับน้ำหนักรถบรรทุกครั้งคัน หรือมีสัมประสิทธิ์การกระจายน้ำหนักรถบรรทุก (Distribution Factor) เท่ากับ 0.5

ในส่วนของแรงกระแทกที่เกิดขึ้น เนื่องจากระยะห่างสุทธิ (Clear Spacing) ระหว่างคานสะพานค่อนข้างแคบ โดยมีระยะเพียง 1.34 เมตร ทำให้พื้นสะพานค่อนข้างมีความแข็งเกร็งสูง ดังนั้น แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจึงใช้ตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) สูงสุด 1.33 ตามที่มาตรฐานการออกแบบและประเมินสะพาน AASHTO แนะนำไว้

คานสะพาน สะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางหนึ่งช่วงสะพานประกอบด้วยคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอจำนวน 4 คาน การกระจายน้ำหนักรถบรรทุกลงคานสะพานแต่ละคานจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรถบรรทุกบนสะพานและความแข็งเกร็งของคานสะพาน เนื่องจากการเสริมกำลังคานสะพานในการศึกษานี้ได้ทำการรื้อทางเดินเท้าด้านขวาเดิมออกและก่อสร้างกำแพงคอนกรีตกันตกโดยมีพื้นยื่นรองรับ เพื่อรับช่องจราจรบนสะพาน รวมถึงรื้อราวกันตกด้านซ้ายเดิมออกและก่อสร้างกำแพงกันตกใหม่ทดแทนควบคู่ไปด้วย ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความแข็งเกร็งของคานสะพานเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อการกระจายน้ำหนักรถบรรทุกลงคานสะพาน จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายน้ำหนักรถบรรทุกลงคานสะพานทั้งกรณีสะพานเดิมและกรณีสะพานภายหลังจากการเสริมกำลังปรับปรุงช่องจราจรบนสะพานด้วย



การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกกรณีสะพานเดิมอาศัยผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ส่วนในกรณีสะพานภายหลังจากการเสริมกำลังปรับปรุงช่องจราจรบนสะพาน สัมประสิทธิ์การกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกกรณีหาโดยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังแสดงสรุปในตารางที่ 8-5

ตารางที่ 8-5 สัมประสิทธิ์การกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกกรณีสะพานกรณีต่าง ๆ

กรณี	สัมประสิทธิ์การกระจายน้ำหนักบรรทุก			
	คันตัวที่ 1 (ซ้ายสุด)	คันตัวที่ 2 (กลางซ้าย)	คันตัวที่ 3 (กลางขวา)	คันตัวที่ 4 (ขวาสุด)
1. สะพานเดิม	0.271	0.256	0.244	0.229
2. ขยายผิวจราจร/กำแพงกันตก/ไม่เสริมกำลังพื้น	0.267	0.238	0.232	0.263
3. ขยายผิวจราจร/กำแพงกันตก/เสริม Shotcrete	0.257	0.245	0.243	0.255
4. ขยายผิวจราจร/กำแพงกันตก/เสริม UHPC	0.267	0.238	0.232	0.263
5. ขยายผิวจราจร/กำแพงกันตก/เสริมคานทางขวาง	0.252	0.249	0.248	0.251

จากตารางที่ 8-5 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงสะพาน (กรณีที่ 1 สะพานเดิม) คันตัวซ้ายสุดรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด แต่เมื่อทำการปรับปรุงสะพาน (กรณีที่ 2 กรณีที่ 3 กรณีที่ 4 หรือ กรณีที่ 5) คันตัวขวาสุดจะรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการคำนวณการเสื่อมสภาพของคานสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางเนื่องจากความล้า เพื่อหาอายุบริการของสะพาน ต้องพิจารณาการเสื่อมสภาพของทั้งคันตัวซ้ายสุดและตัวขวาสุด

ในส่วนของแรงกระแทกที่เกิดขึ้น ใช้ตัวคูณแรงกระแทก 1.16 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยตามที่วิเคราะห์ได้จากการตรวจวัดสะพานในภาคสนาม

8.5 ราคาปรับปรุงสะพานและเสริมกำลัง

รายละเอียดราคาค่าปรับปรุงช่องจราจรบนสะพานและค่าเสริมกำลังพื้นสะพานและคานสะพาน ซึ่งได้แสดงไว้แล้วในบทก่อนหน้า ได้นำมาสรุปไว้ในตารางที่ 8-6

ตารางที่ 8-6 สรุปราคาค่าปรับปรุงสะพานและเสริมกำลังกรณีต่าง ๆ

กิจกรรม			ราคา (บาท)
การปรับปรุงช่องจราจรบนสะพาน	การบำรุงรักษา	การเสริมกำลัง	
1. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น ไม่เสริมกำลัง	30,354,585
2. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น เสริม Shotcrete	62,654,459
3. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น เสริม UHPC	74,192,685
4. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมการอัดแรง พื้น เสริมคานทางขวาง	78,611,972
5. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น ไม่เสริมกำลัง	48,237,399
6. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น เสริม Shotcrete	80,537,213
7. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น เสริม UHPC	92,075,440
8. รื้อราวกันตกซ้าย/รื้อทางเท้าขวา/ ขยายผิวจราจร/ก่อสร้างกำแพงกันตก	เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น	คาน เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ พื้น เสริมคานทางขวาง	96,494,725
9. รื้อทางเท้าซ้าย/รื้อพื้นสะพาน/รื้อกำแพงกันตกขวา ก่อสร้างทางเท้าซ้าย/พื้นสะพาน/กำแพงกันตกขวาใหม่			42,855,019
10. ก่อสร้างสะพานใหม่			266,320,000

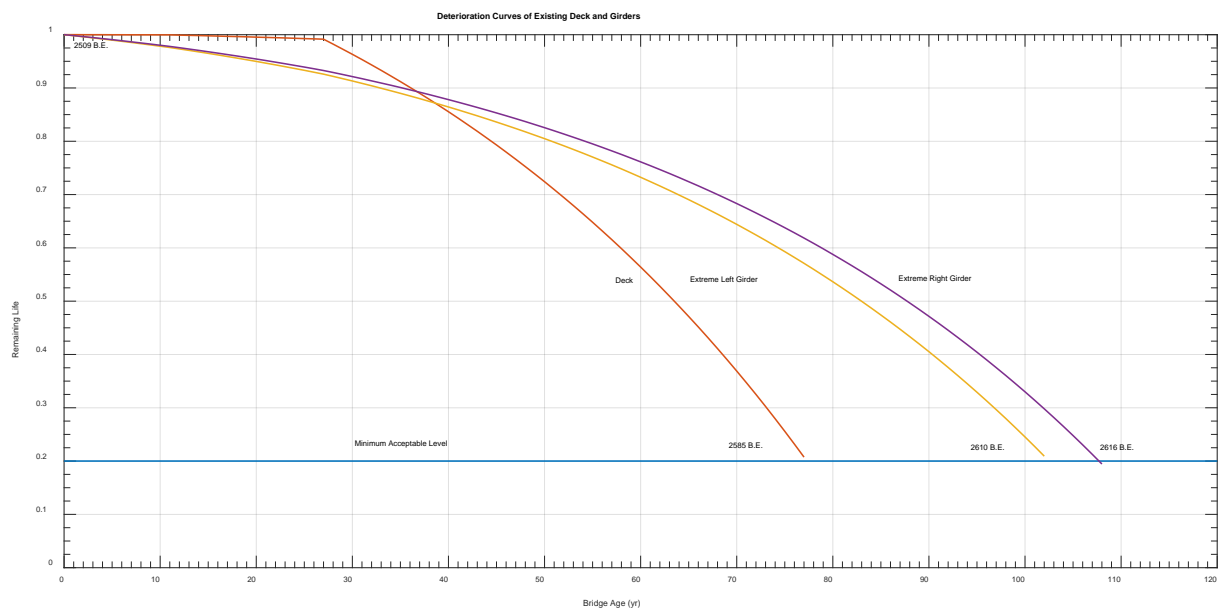
ราคาปรับปรุงสะพานและเสริมกำลังกรณีต่าง ๆ รวมถึงการรื้อพื้นและก่อสร้างพื้นใหม่ (กรณี 9) และการก่อสร้างสะพานใหม่ทดแทนสะพานเดิม (กรณี 10) จะนำไปพิจารณาร่วมกับการเสื่อมสภาพของพื้นสะพานและคานสะพานเพื่อวิเคราะห์หารูปแบบการเสริมกำลังพื้นสะพานและคานสะพานที่เหมาะสมต่อไป แต่อย่างไรก็ตาม ในเบื้องต้น จากตารางที่ 8-6 จะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังคานสะพานด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีราคาสูงกว่าการเสริมกำลังด้วยการอัดแรงอย่างชัดเจน ในขณะที่กำลังรับแรงประลัยของคานสะพานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และเสริมกำลังด้วยการอัดแรงมีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 8-1) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า คานสะพานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และเสริมกำลังด้วยการอัดแรงจะเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้าจากการจราจรของรถบรรทุกใกล้เคียงกัน ดังนั้น ในการเสริมกำลังคานสะพานจะพิจารณาเฉพาะการเสริมกำลังด้วยการอัดแรง

8.6 การเสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้า

การจำลองการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้าจากการจราจรของรถบรรทุก กรณีต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลังสะพานเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้กำหนดรูปแบบทางเลือกการเสริมกำลังเพื่อนำไปพิจารณาร่วมกับราคาค่าเสริมกำลังในการวิเคราะห์หารูปแบบการดำเนินการปรับปรุงเสริมกำลังคานสะพานที่เหมาะสมต่อไป

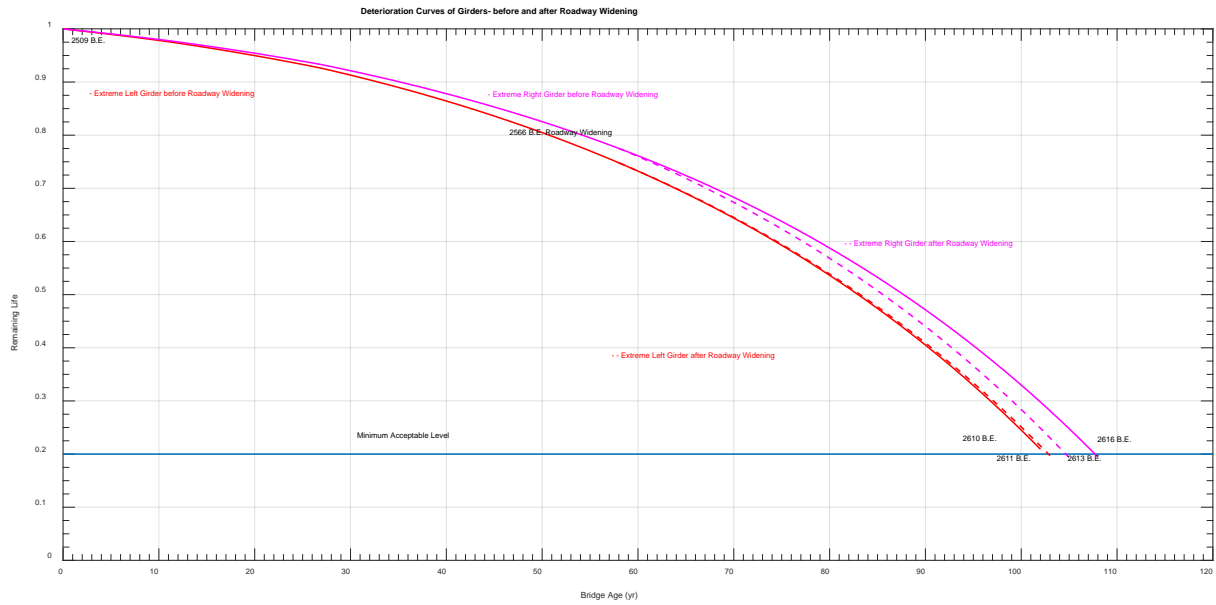
การจำลองการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานเนื่องจากความล้าจากการจราจรของรถบรรทุกแสดงด้วยเส้นโค้งการเสื่อมสภาพ ซึ่งแสดงถึงกำลังต้านทานความล้าที่เหลืออยู่เทียบกับอายุสะพาน เส้นโค้งการเสื่อมสภาพคำนวณได้จากสมการกำลังต้านทานความล้าของคานสะพานและพื้นสะพาน ข้อมูลการจราจรของรถบรรทุกหนัก และพฤติกรรมกระจายน้ำหนักและแรงกระทำของโครงสร้างสะพาน ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 8.1 ถึง 8.4

เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานกรณีต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 8-16 ถึง 8-21 ส่วนตารางการคำนวณเส้นโค้งการเสื่อมสภาพแสดงไว้ในหัวข้อที่ 8.8 รูปที่ 8-22 ถึง 8-25

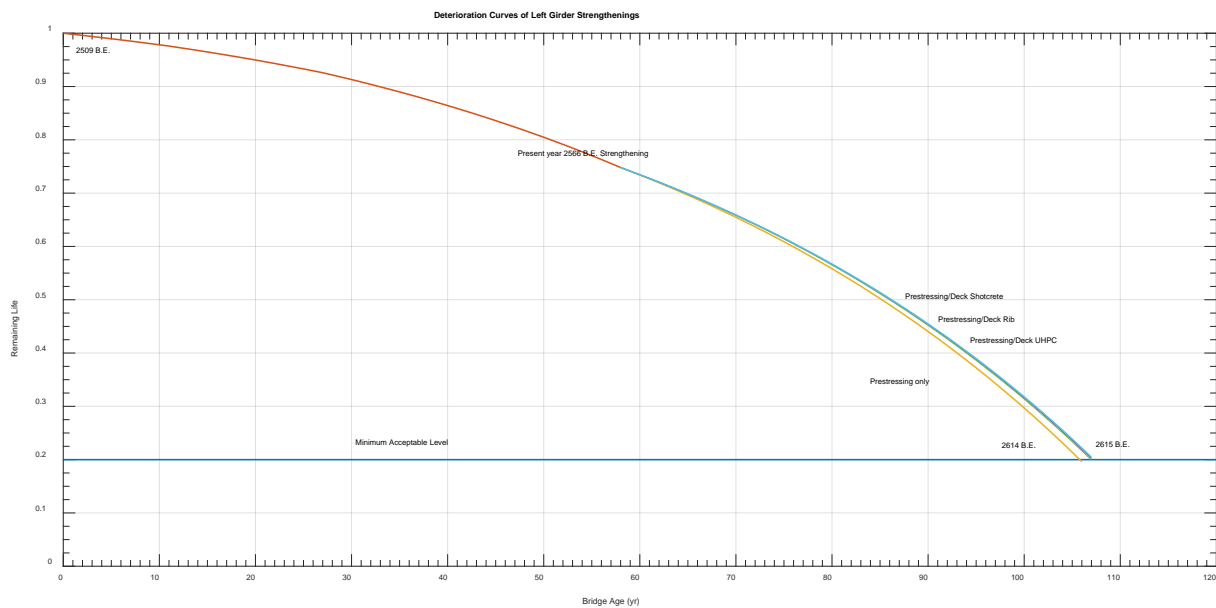


รูปที่ 8-16 เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของพื้นสะพานและคานสะพาน กรณีไม่ได้ดำเนินการใดๆ

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี



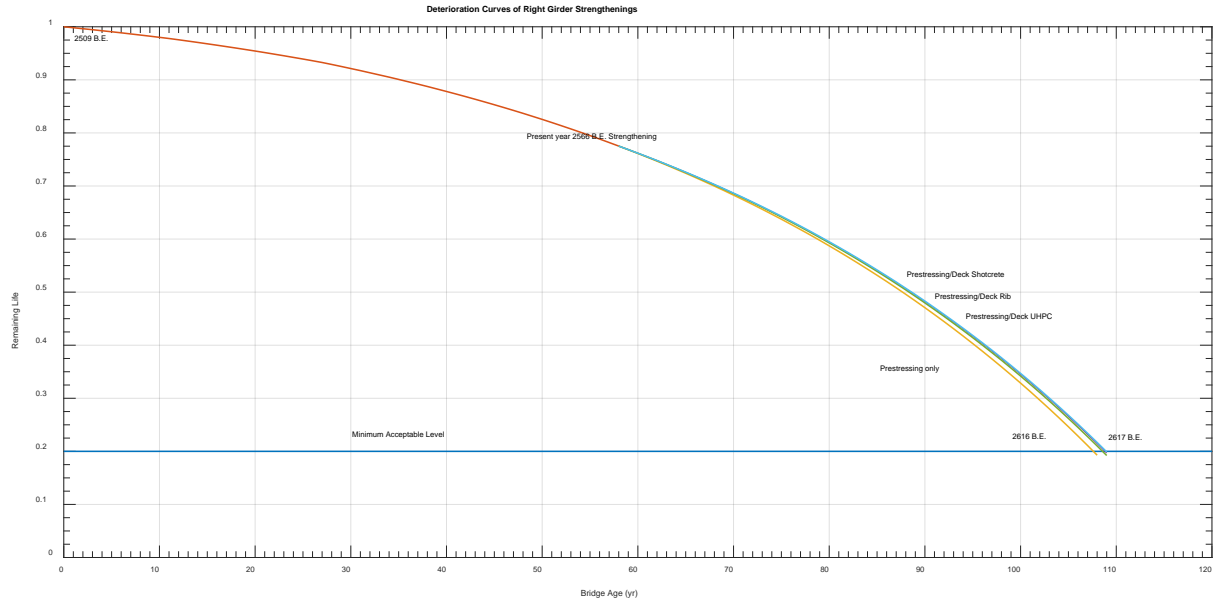
รูปที่ 8-17 เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานสะพาน กรณีปรับช่องจราจรบนสะพาน พื้นสะพานและคานสะพานไม่ได้เสริมกำลัง



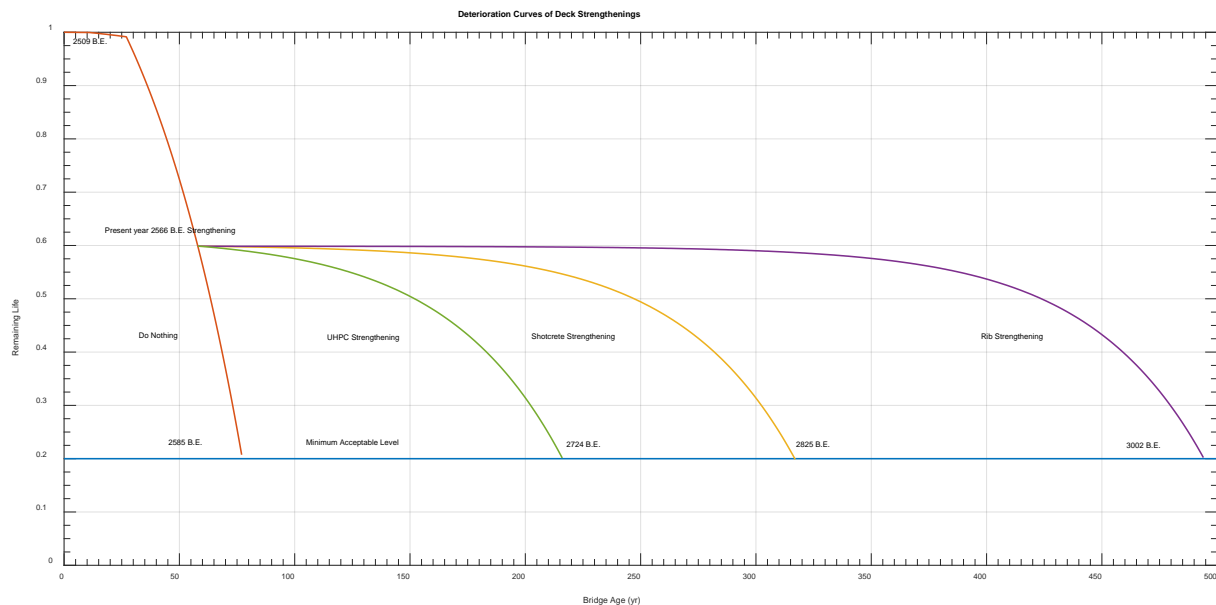
รูปที่ 8-18 เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานสะพานตัวซ้ายสุด กรณีอัดแรงคานอย่างเดียว กรณีอัดแรงคานและเสริมความหนาพื้น และ กรณีอัดแรงคานและเสริมคานทางขวาง



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

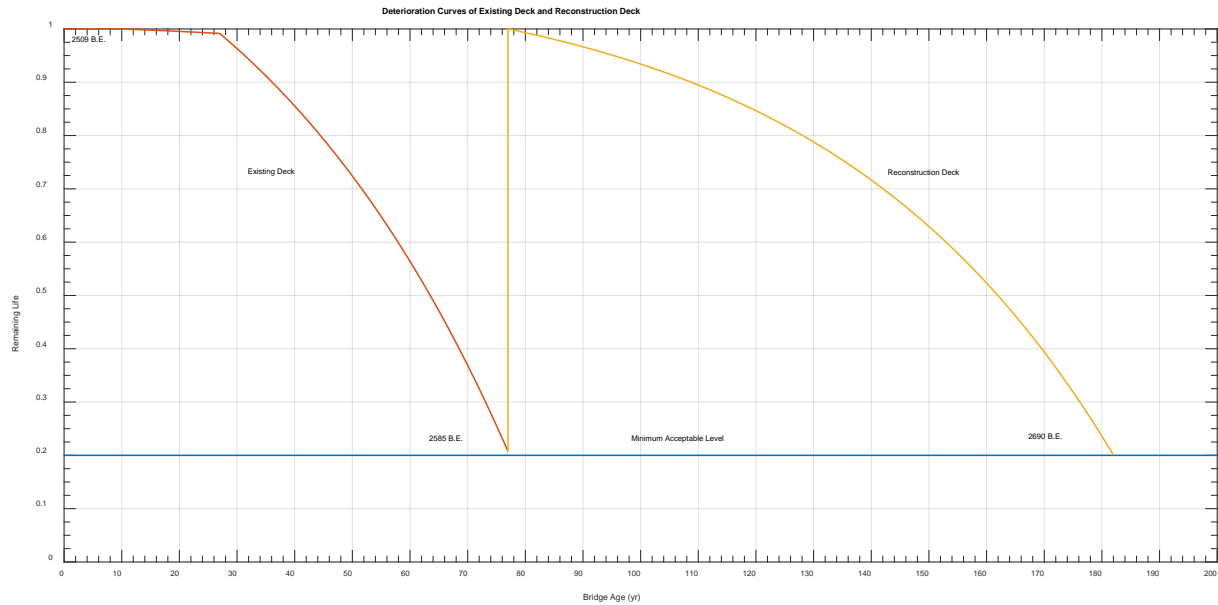


รูปที่ 8-19 เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานสะพานตัวขวาสุด กรณีอัดแรงคานอย่างเดียว กรณีอัดแรงคานและเสริมความหนาพื้น และ กรณีอัดแรงคานและเสริมคานทางขวาง



รูปที่ 8-20 เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน กรณีเสริม Shotcrete เสริม UHPC และกรณีเสริมคานทางขวาง

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี



รูปที่ 8-21 เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน กรณีรื้อพื้นเดิมและก่อสร้างพื้นใหม่ภายหลังจากพื้นเดิมสิ้นอายุบริการ

เส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานสะพานและพื้นสะพานในรูปที่ 8-16 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ ไม่ได้ดำเนินการปรับปรุงช่องจราจรบนสะพานหรือเสริมกำลังใดๆ พื้นสะพานจะเสื่อมสภาพและสิ้นอายุการใช้งานก่อนคานสะพาน โดยพื้นสะพานจะสิ้นอายุการใช้งานที่ปีพ.ศ. 2585 หรือมีอายุการใช้งานเหลืออีก 19 ปี นับจากปีปัจจุบัน พ.ศ. 2566 ในขณะที่อายุการใช้งานของคานสะพานจะเหลืออีก 44 ปี ซึ่งถูกกำหนดโดยการสิ้นอายุการใช้งานของคานสะพานตัวซ้ายสุดที่ปีพ.ศ. 2610 การสิ้นอายุการใช้งานของคานสะพานถือว่าการสิ้นอายุการใช้งานของสะพานด้วย รูปที่ 8-17 แสดงผลของการปรับปรุงช่องจราจรบนสะพานที่มีต่อการเสื่อมสภาพของคานสะพาน การปรับปรุงช่องจราจรบนสะพานช่วยกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกไปยังคานตัวขวาสุดเพิ่มขึ้น อันเป็นการลดภาระของคานตัวซ้ายสุดลง ซึ่งถึงแม้ว่าโดยรวมแล้วคานสะพานจะเสื่อมสภาพช้าลง แต่อย่างไรก็ตาม คานสะพานควรได้รับการเสริมกำลังให้มีกำลังรับน้ำหนักเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบปัจจุบันดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 และเป็น การช่วยยืดอายุการใช้งานสะพานให้นานขึ้นด้วย

การเสริมกำลังคานสะพานใช้วิธีการอัดแรงเพิ่มเข้าไปในคาน โดยพิจารณา 4 กรณีได้แก่ 1) อัดแรงคานเพียงอย่างเดียว พื้นไม่ได้เสริมกำลัง 2) อัดแรงคานและพื้นเสริม Shotcrete หนา 7 เซนติเมตร 3) อัดแรงคานและพื้นเสริม UHPC หนา 3 เซนติเมตร และ 4) อัดแรงคานและพื้นเสริมคานทางขวาง ทุกๆ ระยะ 1 เมตร ซึ่งจากเส้นโค้งการเสื่อมสภาพของทั้ง 4 กรณีในรูปที่ 8-18 และ 8-19 จะเห็นได้ว่า คานสะพานภายหลังจากการเสริมกำลังจะสิ้นอายุการใช้งานที่ปีพ.ศ. 2614 กรณีอัดแรงคานเพียงอย่างเดียว



ปีพ.ศ. 2615 ทั้งกรณีอัดแรงคานและพื้นเสริม Shotcrete กรณีอัดแรงคานและพื้นเสริม UHPC และกรณี
อัดแรงคานและพื้นเสริมคานทางขวาง

รูปที่ 8-20 แสดงเส้นโค้งการเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน กรณีที่เสริมกำลังพื้นด้วยการเพิ่มความ
หนาพื้นอีก 7 เซนติเมตร ใต้ท้องพื้นเดิมด้วย Shotcrete กรณีที่เสริมกำลังพื้นด้วยการเพิ่มความหนาพื้น
อีก 3 เซนติเมตร ด้านบนพื้นเดิมด้วย UHPC โดยระยะ 7 เซนติเมตร และ 3 เซนติเมตร เป็นความหนา
ต่ำสุดที่สามารถก่อสร้างได้ของวิธี Shotcrete และของ UHPC ตามลำดับ และกรณีเสริมกำลังพื้นด้วย
การเพิ่มจำนวนคานทางขวาง (Rib) ทุกๆ 1 เมตร การเพิ่มความหนาพื้นทำให้กำลังรับแรงประลัยของ
พื้นสะพานสูงขึ้นเป็นอย่างมาก (ตารางที่ 8-1) ส่งผลให้กำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานสูงขึ้นตาม
โดยภายหลังจากเพิ่มความหนาพื้นสะพานด้วย Shotcrete พื้นสะพานจะสิ้นอายุบริการที่ปีพ.ศ. 2825
หรือมีอายุการใช้งานเหลืออีก 259 ปี ด้วย UHPC พื้นสะพานจะสิ้นอายุบริการที่ปีพ.ศ. 2724 หรือมีอายุ
การใช้งานเหลืออีก 158 ปี ในขณะที่การเพิ่มจำนวนคานทางขวาง ถึงแม้จะเพิ่มกำลังรับแรงประลัยให้กับ
พื้นสะพานเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 8-1) แต่การเพิ่มจำนวนคานทางขวางทำให้ขอบเขตของพื้นสะพาน
สั้นลง จากเดิมยาว 10 เมตรเหลือ 1 เมตร ซึ่งสามารถช่วยกระจายน้ำหนักเพลาคู่ที่เคยกระทำพร้อมกัน
บนพื้นสะพานเดิมออกไปได้ อันเป็นการลดน้ำหนักกระทำลงครึ่งหนึ่ง ส่งผลให้สามารถชะลอการ
เสื่อมสภาพของพื้นสะพานเนื่องจากความล้าลงได้อย่างมาก โดยภายหลังจากเพิ่มจำนวนคานทางขวาง
พื้นสะพานจะสิ้นอายุบริการที่ปีพ.ศ. 3002 หรือมีอายุการใช้งานเหลืออีก 436 ปี ส่วนในกรณีที่ปล่อยให้
พื้นสะพานสิ้นอายุการใช้งานที่ปีพ.ศ. 2585 แล้วค่อยรื้อพื้นสะพานทิ้งและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ที่มี
ความหนา 20 เซนติเมตร เส้นโค้งการเสื่อมสภาพแสดงไว้ในรูปที่ 8-21 โดยพื้นสะพานที่ก่อสร้างใหม่จะ
สิ้นอายุการใช้งานที่ปีพ.ศ. 2690

8.7 รูปแบบการเสริมกำลังคานและพื้นสะพาน

การจำลองการเสื่อมสภาพคานสะพานและพื้นสะพานเสริมกำลังกรณีต่างๆ ในหัวข้อที่ผ่านมา
ทำให้สามารถจัดทำทางเลือกในการเสริมกำลังคานสะพานและพื้นสะพานได้ 5 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบทางเลือกที่ 1: อัดแรงคาน เสริมความหนาพื้นด้วย Shotcrete เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยน
รอยต่อพื้นสะพาน ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615 รูปแบบทางเลือกนี้ สะพานมีอายุการ
ใช้งาน 49 ปี

รูปแบบทางเลือกที่ 2: อัดแรงคาน เสริมความหนาพื้นด้วย UHPC เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยน
รอยต่อพื้นสะพาน ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615 รูปแบบทางเลือกนี้ สะพานมีอายุการ
ใช้งาน 49 ปี

รูปแบบทางเลือกที่ 3: อัดแรงคาน เสริมคานทางขวาง เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้นสะพาน
ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615 รูปแบบทางเลือกนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

รูปแบบทางเลือกที่ 4: อัดแรงคาน เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้นสะพาน ปีพ.ศ. 2566 / รื้อ
พื้นเดิมทิ้ง ก่อสร้างพื้นใหม่ ปีพ.ศ. 2585 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2614 รูปแบบทางเลือกนี้ สะพาน
มีอายุการใช้งาน 48 ปี

รูปแบบทางเลือกที่ 5: ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2641

รูปแบบทางเลือกนี้ สะพานที่ก่อสร้างใหม่ปีพ.ศ. 2566 จะถือว่ามีอายุการใช้งาน 75 ปี ตามมาตรฐานอายุ
ออกแบบใช้งานของสะพานที่ก่อสร้างใหม่

ราคาค่ารื้อ ค่าก่อสร้าง ค่าเสริมกำลัง ของรูปแบบทางเลือกทั้ง 5 อ้างอิงราคาจากตารางที่ 8-6 ได้นำมา
คำนวณหาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน โดยรูปแบบทางเลือกใดที่ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเทียบ
ต่ออายุการใช้งานภายหลังการดำเนินการ มีค่าต่ำที่สุด รูปแบบทางเลือกนั้นจะได้รับการคัดเลือกเป็น
รูปแบบในการเสริมกำลัง

เนื่องจากค่ารื้อ ค่าก่อสร้าง ค่าเสริมกำลังต่าง ๆ เป็นการจ่ายเงินต่างเวลา ทำให้ต้องคิดมูลค่าของเงินตาม
เวลาด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานคิดที่มูลค่าเงินปีพ.ศ. 2566 โดยพิจารณา
อัตราคิดลดที่ 2% 5% และ 8% ต่อปี ซึ่งแสดงถึงอัตราคิดลด ระดับต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ ผล
การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของทั้ง 5 รูปแบบทางเลือก โดยใช้อัตราคิดลด 2% 5% และ
8% ต่อปี แสดงไว้ในตารางที่ 8-7 8-8 และ 8-9 ตามลำดับ

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ตารางที่ 8-7 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของรูปแบบทางเลือกต่าง ๆ (อัตราคิดลด 2%)

ปี พ.ศ.	ปี ที่	รูปแบบทางเลือกที่ 1 คาน: อัดแรง พื้น: Shotcrete เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 2 คาน: อัดแรง พื้น: UHPC เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 3 คาน: อัดแรง พื้น: Rib เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 4 คาน: อัดแรง เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น ก่อสร้างพื้นใหม่ (2585)		รูปแบบทางเลือกที่ 5 ก่อสร้างสะพานใหม่	
		ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)
2566	0	62.654	62.654	74.193	74.193	78.612	78.612	30.355	30.355	266.320	266.320
2585	19	-	-	-	-	-	-	42.855*	29.417	-	-
2614	48	-	-	-	-	-	-	266.320*	102.943	-	-
2615	49	266.320*	100.924	266.320*	100.924	266.320*	100.924	-	-	-	-
2641	75	-	-	-	-	-	-	-	-	266.320*	60.310
รวมราคาปี 66		163.578		175.117		179.536		162.715		326.63	
รวมราคาปี 66 อายุการใช้งาน		3.338 ล้านบาท/ปี		3.574 ล้านบาท/ปี		3.664 ล้านบาท/ปี		3.389 ล้านบาท/ปี		4.355 ล้านบาท/ปี	

*ราคาประเมินปีพ.ศ. 2566 ไม่คิดอัตราเงินเฟ้อ

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ตารางที่ 8-8 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของรูปแบบทางเลือกต่าง ๆ (อัตราคิดลด 5%)

ปี พ.ศ.	ปี ที่	รูปแบบทางเลือกที่ 1 คาน: อัดแรง พื้น: Shotcrete เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 2 คาน: อัดแรง พื้น: UHPC เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 3 คาน: อัดแรง พื้น: Rib เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 4 คาน: อัดแรง เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น ก่อสร้างพื้นใหม่ (2585)		รูปแบบทางเลือกที่ 5 ก่อสร้างสะพานใหม่	
		ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)
2566	0	62.654	62.654	74.193	74.193	78.612	78.612	30.355	30.355	266.320	266.320
2585	19	-	-	-	-	-	-	42.855*	16.959	-	-
2614	48	-	-	-	-	-	-	266.320*	25.604	-	-
2615	49	266.320*	24.385	266.320*	24.385	266.320*	24.385	-	-	-	-
2641	75	-	-	-	-	-	-	-	-	266.320*	6.858
รวมราคาปี 66		87.039		98.578		102.997		72.918		273.178	
รวมราคาปี 66 อายุการใช้งาน		1.776 ล้านบาท/ปี		2.011 ล้านบาท/ปี		2.102 ล้านบาท/ปี		1.519 ล้านบาท/ปี		3.642 ล้านบาท/ปี	

*ราคาประเมินปีพ.ศ. 2566 ไม่คิดอัตราเงินเฟ้อ



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

ตารางที่ 8-9 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของรูปแบบทางเลือกต่าง ๆ (อัตราคิดลด 8%)

ปี พ.ศ.	ปี ที่	รูปแบบทางเลือกที่ 1 คาน: อัดแรง พื้น: Shotcrete เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 2 คาน: อัดแรง พื้น: UHPC เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 3 คาน: อัดแรง พื้น: Rib เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น		รูปแบบทางเลือกที่ 4 คาน: อัดแรง เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้น ก่อสร้างพื้นใหม่ (2585)		รูปแบบทางเลือกที่ 5 ก่อสร้างสะพานใหม่	
		ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)	ราคา (ล้านบาท)	ราคาปี 66 (ล้านบาท)
2566	0	62.654	62.654	74.193	74.193	78.612	78.612	30.355	30.355	266.320	266.320
2585	19	-	-	-	-	-	-	42.855*	9.930	-	-
2614	48	-	-	-	-	-	-	266.320*	6.623	-	-
2615	49	266.320*	6.132	266.320*	6.132	266.320*	6.132	-	-	-	-
2641	75	-	-	-	-	-	-	-	-	266.320*	0.829
รวมราคาปี 66		68.786		80.325		84.744		46.908		267.149	
รวมราคาปี 66 อายุการใช้งาน		1.404 ล้านบาท/ปี		1.639 ล้านบาท/ปี		1.729 ล้านบาท/ปี		0.977 ล้านบาท/ปี		3.562 ล้านบาท/ปี	

*ราคาประเมินปีพ.ศ. 2566 ไม่คิดอัตราเงินเฟ้อ

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

ตารางที่ 8-7 ถึง 8-9 แสดงให้เห็นว่า รูปแบบทางเลือกที่ 4 มีแนวโน้มที่ทำให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเทียบต่ออายุการใช้งานภายหลังจากดำเนินการต่ำที่สุด ดังนั้น ในการศึกษารั้งนี้ ที่ปรึกษาแนะนำ
ให้ใช้รูปแบบทางเลือกที่ 4: อัดแรงคาน เปลี่ยนแผ่นยางรองคาน เปลี่ยนรอยต่อพื้นสะพาน ปีพ.ศ. 2566 /
รี้อพื้นเดิมทิ้ง ก่อสร้างพื้นใหม่ ปีพ.ศ. 2585 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2614 เป็นรูปแบบการเสริม
กำลังคานสะพานและพื้นสะพานของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง

8.8 ตารางการคำนวณเส้นโค้งการเสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพานเนื่องจาก ความล้า

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับ
ความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

Truck Ten-wheel 0.29	Impact Fraction 0.26	1.33			0.02			Deck			GDF Cum. 0.5	Reconstruction 178.9 ton Damage	GDF Cum. 0.5				
		Semi 0.45	Ten-wheel 1.16	Full 1.11	Semi 0.96	Full 1.11	Semi 0.96	Existing									
								P _e 153.3 Damage per year						GDF Cum. 0.5	Damage Remain		
Year	ADTT	Per Year	Ten-wheel	Full	Semi	Ten-wheel	Full	Semi	Ten-wheel	Full	Semi	Ten-wheel	Full			Semi	Ten-wheel
2509	648	236520	18	34	32.4	2.14E-05	5.52E-06	4.30E-06	0.0000	0.0000	1.0000						
2510	661	241265	18	34	32.4	2.18E-05	5.69E-06	4.38E-06	0.0000	0.0001	0.9999						
2511	675	246375	18	34	32.4	2.23E-05	5.87E-06	4.48E-06	0.0000	0.0001	0.9999						
2512	688	251120	18	34	32.4	2.27E-05	6.04E-06	4.56E-06	0.0000	0.0001	0.9999						
2513	702	256230	18	34	32.4	2.32E-05	6.23E-06	4.66E-06	0.0000	0.0002	0.9998						
2514	716	261340	18	34	32.4	2.36E-05	6.41E-06	4.75E-06	0.0000	0.0002	0.9996						
2515	730	266450	18	34	32.4	2.41E-05	6.60E-06	4.84E-06	0.0000	0.0003	0.9997						
2516	745	271925	18	34	32.4	2.46E-05	6.79E-06	4.94E-06	0.0000	0.0003	0.9997						
2517	760	277400	18	34	32.4	2.51E-05	6.99E-06	5.04E-06	0.0000	0.0003	0.9997						
2518	775	282875	18	34	32.4	2.56E-05	7.19E-06	5.14E-06	0.0000	0.0004	0.9996						
2519	790	288350	18	34	32.4	2.61E-05	7.39E-06	5.24E-06	0.0000	0.0004	0.9996						
2520	806	294190	21	39.2	37.4	2.89E-04	9.59E-05	4.93E-05	0.0004	0.0009	0.9991						
2521	822	300030	21	39.2	37.4	2.95E-04	9.78E-05	5.03E-05	0.0004	0.0013	0.9987						
2522	839	306235	21	39.2	37.4	3.01E-04	9.98E-05	5.13E-05	0.0005	0.0017	0.9983						
2523	856	312440	21	39.2	37.4	3.07E-04	1.02E-04	5.23E-05	0.0005	0.0022	0.9978						
2524	873	318645	21	39.2	37.4	3.13E-04	1.04E-04	5.34E-05	0.0005	0.0027	0.9973						
2525	890	324850	21	39.2	37.4	3.19E-04	1.06E-04	5.44E-05	0.0005	0.0032	0.9968						
2526	908	331420	21	39.2	37.4	3.26E-04	1.08E-04	5.55E-05	0.0005	0.0036	0.9964						
2527	926	337990	21	39.2	37.4	3.32E-04	1.10E-04	5.66E-05	0.0005	0.0041	0.9959						
2528	945	344925	21	39.2	37.4	3.39E-04	1.12E-04	5.78E-05	0.0005	0.0047	0.9953						
2529	963	351495	21	39.2	37.4	3.46E-04	1.15E-04	5.89E-05	0.0005	0.0052	0.9948						
2530	983	358795	21	39.2	37.4	3.53E-04	1.17E-04	6.01E-05	0.0005	0.0057	0.9943						
2531	1002	365730	21	39.2	37.4	3.59E-04	1.19E-04	6.13E-05	0.0005	0.0062	0.9938						
2532	1022	373030	21	39.2	37.4	3.67E-04	1.22E-04	6.25E-05	0.0006	0.0068	0.9932						
2533	1043	380695	21	39.2	37.4	3.74E-04	1.24E-04	6.38E-05	0.0006	0.0074	0.9926						
2534	1064	388360	21	39.2	37.4	3.82E-04	1.27E-04	6.51E-05	0.0006	0.0079	0.9921						
2535	1085	396025	21	39.2	37.4	3.89E-04	1.29E-04	6.64E-05	0.0006	0.0085	0.9915						
2536	1107	404055	25	47	45	5.90E-03	2.19E-03	1.19E-03	0.0093	0.0178	0.9822						
2537	1129	412085	25	47	45	6.02E-03	2.23E-03	1.21E-03	0.0095	0.0273	0.9727						
2538	1151	420115	25	47	45	6.14E-03	2.27E-03	1.23E-03	0.0096	0.0369	0.9631						
2539	1174	428510	25	47	45	6.26E-03	2.32E-03	1.26E-03	0.0098	0.0467	0.9533						
2540	1198	437270	25	47	45	6.39E-03	2.37E-03	1.28E-03	0.0100	0.0566	0.9432						
2541	1222	446030	25	47	45	6.52E-03	2.41E-03	1.31E-03	0.0102	0.0670	0.9330						
2542	1246	454790	25	47	45	6.64E-03	2.46E-03	1.34E-03	0.0104	0.0775	0.9225						
2543	1271	463915	25	47	45	6.78E-03	2.51E-03	1.36E-03	0.0107	0.0881	0.9119						
2544	1296	473040	25	47	45	6.91E-03	2.56E-03	1.39E-03	0.0109	0.0990	0.9010						
2545	1322	482530	25	47	45	7.05E-03	2.61E-03	1.42E-03	0.0111	0.1100	0.8900						
2546	1349	492385	25	47	45	7.19E-03	2.66E-03	1.45E-03	0.0113	0.1213	0.8787						
2547	1376	502240	25	47	45	7.34E-03	2.72E-03	1.47E-03	0.0115	0.1329	0.8671						
2548	1403	512095	25	47	45	7.48E-03	2.77E-03	1.50E-03	0.0118	0.1446	0.8554						
2549	1431	522315	25	47	45	7.63E-03	2.83E-03	1.53E-03	0.0120	0.1566	0.8434						
2550	1460	532900	25	47	45	7.79E-03	2.88E-03	1.56E-03	0.0122	0.1689	0.8311						
2551	1489	543485	25	47	45	7.94E-03	2.94E-03	1.60E-03	0.0125	0.1813	0.8187						
2552	1519	554435	25	47	45	8.10E-03	3.00E-03	1.63E-03	0.0127	0.1941	0.8059						
2553	1549	565385	25	47	45	8.26E-03	3.06E-03	1.66E-03	0.0130	0.2070	0.7930						
2554	1580	576700	25	47	45	8.43E-03	3.12E-03	1.69E-03	0.0132	0.2203	0.7797						
2555	1612	588380	25	47	45	8.60E-03	3.18E-03	1.73E-03	0.0135	0.2338	0.7662						
2556	1644	600060	25	47	45	8.77E-03	3.25E-03	1.76E-03	0.0138	0.2476	0.7524						
2557	1677	612105	25	47	45	8.94E-03	3.31E-03	1.80E-03	0.0141	0.2616	0.7384						
2558	1710	624150	25	47	45	9.12E-03	3.38E-03	1.83E-03	0.0143	0.2759	0.7241						
2559	1745	636925	25	47	45	9.31E-03	3.45E-03	1.87E-03	0.0146	0.2906	0.7094						
2560	1780	649700	25	47	45	9.49E-03	3.52E-03	1.91E-03	0.0149	0.3055	0.6945						
2561	1815	662475	25	47	45	9.68E-03	3.58E-03	1.95E-03	0.0152	0.3207	0.6793						
2562	1851	675615	25	47	45	9.87E-03	3.66E-03	1.98E-03	0.0155	0.3362	0.6638						
2563	1888	689120	25	47	45	1.01E-02	3.73E-03	2.02E-03	0.0158	0.3520	0.6480						
2564	1926	702990	25	47	45	1.03E-02	3.80E-03	2.06E-03	0.0161	0.3682	0.6318						
2565	1965	717225	25	47	45	1.05E-02	3.88E-03	2.11E-03	0.0165	0.3846	0.6154						
2566	2004	731480	25	47	45	1.07E-02	3.96E-03	2.15E-03	0.0168	0.4014	0.5986						
2567	2044	746060	25	47	45	1.09E-02	4.04E-03	2.19E-03	0.0171	0.4186	0.5814						
2568	2085	761025	25	47	45	1.11E-02	4.12E-03	2.23E-03	0.0175	0.4360	0.5640						
2569	2127	776355	25	47	45	1.13E-02	4.20E-03	2.28E-03	0.0178	0.4538	0.5462						
2570	2169	791685	25	47	45	1.16E-02	4.28E-03	2.32E-03	0.0182	0.4720	0.5280						
2571	2213	807745	25	47	45	1.18E-02	4.37E-03	2.37E-03	0.0185	0.4906	0.5094						
2572	2257	823805	25	47	45	1.20E-02	4.46E-03	2.42E-03	0.0189	0.5095	0.4905						
2573	2302	840230	25	47	45	1.23E-02	4.55E-03	2.47E-03	0.0193	0.5288	0.4712						
2574	2348	857020	25	47	45	1.25E-02	4.64E-03	2.52E-03	0.0197	0.5484	0.4516						
2575	2395	874175	25	47	45	1.28E-02	4.73E-03	2.57E-03	0.0201	0.5685	0.4315						
2576	2443	891695	25	47	45	1.30E-02	4.82E-03	2.62E-03	0.0205	0.5890	0.4110						

รูปที่ 8-24 การเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน กรณีหรือพื้นเดิมและก่อสร้างพื้นใหม่ภายหลังพื้นเดิม
สิ้นอายุบริการ

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

Truck	Impact Fraction	1.33	Truck	Growth GW Bias	0.02	Deck	Existing					Reconstruction							
Ten-wheel	Full	Semi	Ten-wheel	Full	Semi		P _e 153.3 ton		GDF	0.5	P _u 178.9 ton		GDF	0.5					
Year	ADTT	Per Year	Ten-wheel	Full	Semi		Damage per year		Damage	Remain	Damage per year		Damage	Cum.	Remain				
							Ten-wheel	Full	Semi	Total	Damage	Remain	Ten-wheel	Full	Semi	Total	Damage	Cum.	Remain
2577	2492	909580	25	47	45		1.33E-02	4.92E-03	2.67E-03	0.0209	0.6099	0.3901							
2578	2541	927465	25	47	45		1.36E-02	5.02E-03	2.72E-03	0.0213	0.6312	0.3688							
2579	2592	946080	25	47	45		1.38E-02	5.12E-03	2.78E-03	0.0217	0.6529	0.3471							
2580	2644	965060	25	47	45		1.41E-02	5.22E-03	2.83E-03	0.0222	0.6750	0.3250							
2581	2697	984405	25	47	45		1.44E-02	5.33E-03	2.89E-03	0.0226	0.6976	0.3024							
2582	2751	1004115	25	47	45		1.47E-02	5.43E-03	2.95E-03	0.0231	0.7207	0.2793							
2583	2806	1024190	25	47	45		1.50E-02	5.54E-03	3.01E-03	0.0235	0.7442	0.2558							
2584	2862	1044630	25	47	45		1.53E-02	5.65E-03	3.07E-03	0.0240	0.7682	0.2318							
2585	2919	1065435	25	47	45		1.56E-02	5.76E-03	3.13E-03	0.0245	0.7926	0.2074							
2586	2978	1086970	25	47	45								1.45E-03	5.39E-04	2.92E-04	0.0023	0.0023	0.0023	1
2587	3037	1108505	25	47	45								1.48E-03	5.49E-04	2.98E-04	0.0023	0.0046	0.0046	0.9977
2588	3098	1130770	25	47	45								1.51E-03	5.60E-04	3.04E-04	0.0024	0.0070	0.0070	0.9954
2589	3160	1153400	25	47	45								1.54E-03	5.71E-04	3.10E-04	0.0024	0.0094	0.0094	0.9930
2590	3223	1176395	25	47	45								1.57E-03	5.83E-04	3.16E-04	0.0025	0.0119	0.0119	0.9906
2591	3287	1199755	25	47	45								1.61E-03	5.94E-04	3.23E-04	0.0025	0.0144	0.0144	0.9881
2592	3353	1223845	25	47	45								1.64E-03	6.06E-04	3.29E-04	0.0026	0.0170	0.0170	0.9856
2593	3420	1248300	25	47	45								1.67E-03	6.19E-04	3.36E-04	0.0026	0.0196	0.0196	0.9830
2594	3489	1273485	25	47	45								1.70E-03	6.31E-04	3.42E-04	0.0027	0.0223	0.0223	0.9804
2595	3558	1298670	25	47	45								1.74E-03	6.43E-04	3.49E-04	0.0027	0.0250	0.0250	0.9777
2596	3630	1324950	25	47	45								1.77E-03	6.56E-04	3.56E-04	0.0028	0.0278	0.0278	0.9750
2597	3702	1351230	25	47	45								1.81E-03	6.70E-04	3.63E-04	0.0028	0.0306	0.0306	0.9722
2598	3776	1378240	25	47	45								1.84E-03	6.83E-04	3.71E-04	0.0029	0.0335	0.0335	0.9694
2599	3852	1405980	25	47	45								1.88E-03	6.97E-04	3.78E-04	0.0030	0.0365	0.0365	0.9665
2600	3929	1434085	25	47	45								1.92E-03	7.11E-04	3.86E-04	0.0030	0.0395	0.0395	0.9635
2601	4007	1462555	25	47	45								1.96E-03	7.25E-04	3.93E-04	0.0031	0.0426	0.0426	0.9605
2602	4087	1491755	25	47	45								2.00E-03	7.39E-04	4.01E-04	0.0031	0.0457	0.0457	0.9574
2603	4169	1521685	25	47	45								2.04E-03	7.54E-04	4.09E-04	0.0032	0.0489	0.0489	0.9543
2604	4252	1551980	25	47	45								2.08E-03	7.69E-04	4.17E-04	0.0033	0.0522	0.0522	0.9511
2605	4338	1583370	25	47	45								2.12E-03	7.85E-04	4.26E-04	0.0033	0.0555	0.0555	0.9476
2606	4424	1614760	25	47	45								2.16E-03	8.00E-04	4.34E-04	0.0034	0.0589	0.0589	0.9445
2607	4513	1647245	25	47	45								2.20E-03	8.16E-04	4.43E-04	0.0035	0.0624	0.0624	0.9411
2608	4603	1680985	25	47	45								2.25E-03	8.32E-04	4.52E-04	0.0035	0.0659	0.0659	0.9376
2609	4695	1713675	25	47	45								2.29E-03	8.49E-04	4.61E-04	0.0036	0.0695	0.0695	0.9341
2610	4789	1747985	25	47	45								2.34E-03	8.66E-04	4.70E-04	0.0037	0.0732	0.0732	0.9305
2611	4885	1783025	25	47	45								2.39E-03	8.83E-04	4.79E-04	0.0037	0.0770	0.0770	0.9268
2612	4982	1818430	25	47	45								2.43E-03	9.01E-04	4.89E-04	0.0038	0.0808	0.0808	0.9231
2613	5082	1854990	25	47	45								2.48E-03	9.19E-04	4.99E-04	0.0039	0.0847	0.0847	0.9192
2614	5184	1892160	25	47	45								2.53E-03	9.38E-04	5.09E-04	0.0040	0.0886	0.0886	0.9153
2615	5287	1929755	25	47	45								2.58E-03	9.56E-04	5.19E-04	0.0041	0.0927	0.0927	0.9114
2616	5393	1968445	25	47	45								2.63E-03	9.75E-04	5.29E-04	0.0041	0.0968	0.0968	0.9073
2617	5501	2007385	25	47	45								2.69E-03	9.95E-04	5.40E-04	0.0042	0.1011	0.1011	0.9032
2618	5611	2048015	25	47	45								2.74E-03	1.01E-03	5.51E-04	0.0043	0.1054	0.1054	0.8994
2619	5723	2088895	25	47	45								2.80E-03	1.03E-03	5.62E-04	0.0044	0.1097	0.1097	0.8956
2620	5838	2130870	25	47	45								2.85E-03	1.06E-03	5.73E-04	0.0045	0.1142	0.1142	0.8918
2621	5954	2173210	25	47	45								2.91E-03	1.08E-03	5.84E-04	0.0046	0.1188	0.1188	0.8881
2622	6073	2216645	25	47	45								2.97E-03	1.10E-03	5.96E-04	0.0047	0.1235	0.1235	0.8845
2623	6195	2261175	25	47	45								3.03E-03	1.12E-03	6.08E-04	0.0048	0.1282	0.1282	0.8808
2624	6319	2306435	25	47	45								3.09E-03	1.14E-03	6.20E-04	0.0048	0.1331	0.1331	0.8772
2625	6445	2352425	25	47	45								3.15E-03	1.17E-03	6.33E-04	0.0049	0.1380	0.1380	0.8735
2626	6574	2399190	25	47	45								3.21E-03	1.19E-03	6.45E-04	0.0050	0.1431	0.1431	0.8699
2627	6705	2447325	25	47	45								3.27E-03	1.21E-03	6.58E-04	0.0051	0.1482	0.1482	0.8663
2628	6840	2496800	25	47	45								3.34E-03	1.24E-03	6.71E-04	0.0052	0.1534	0.1534	0.8628
2629	6976	2546240	25	47	45								3.41E-03	1.26E-03	6.85E-04	0.0054	0.1588	0.1588	0.8594
2630	7116	2597340	25	47	45								3.48E-03	1.29E-03	6.99E-04	0.0055	0.1643	0.1643	0.8560
2631	7258	2649170	25	47	45								3.54E-03	1.31E-03	7.12E-04	0.0056	0.1698	0.1698	0.8526
2632	7403	2702095	25	47	45								3.62E-03	1.34E-03	7.27E-04	0.0057	0.1755	0.1755	0.8492
2633	7551	2756115	25	47	45								3.69E-03	1.37E-03	7.41E-04	0.0058	0.1813	0.1813	0.8458
2634	7702	2811230	25	47	45								3.76E-03	1.39E-03	7.56E-04	0.0059	0.1872	0.1872	0.8425
2635	7856	2867440	25	47	45								3.84E-03	1.42E-03	7.71E-04	0.0060	0.1932	0.1932	0.8392
2636	8014	2925110	25	47	45								3.91E-03	1.45E-03	7.87E-04	0.0061	0.1994	0.1994	0.8360
2637	8174	2983390	25	47	45								3.99E-03	1.48E-03	8.02E-04	0.0063	0.2057	0.2057	0.8328
2638	8337	3043005	25	47	45								4.07E-03	1.51E-03	8.18E-04	0.0064	0.2121	0.2121	0.8296
2639	8504	3103960	25	47	45								4.15E-03	1.54E-03	8.35E-04	0.0065	0.2186	0.2186	0.8265
2640	8674	3166010	25	47	45								4.24E-03	1.57E-03	8.51E-04	0.0067	0.2252	0.2252	0.8234
2641	8848	3229520	25	47	45								4.32E-03	1.60E-03	8.68E-04	0.0068	0.2320	0.2320	0.8203
2642	9024	3293760	25	47	45								4.41E-03	1.63E-03	8.86E-04	0.0069	0.2390	0.2390	0.8172
2643	9205	3359825	25	47	45								4.50E-03	1.66E-03	9.03E-04	0.0071	0.2460	0.2460	0.8141
2644	9389	3426985	25	47	45								4.59E-03	1.70E-03	9.22E-04	0.0072	0.2532	0.2532	0.8110

รูปที่ 8-24 การเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน กรณีรื้อพื้นเดิมและก่อสร้างพื้นใหม่ภายหลังพื้นเดิมสิ้นอายุบริการ (ต่อ)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Truck	Impact Fraction	1.33	Truck	Growth GW Bias	0.02	Deck	Existing					Reconstruction						
Ten-wheel	Full	Semi	Ten-wheel	Full	Semi		P _i			Pu		178.9			0.5			
0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96		153.3 ton					178.9 ton						
							GDF					GDF						
							0.5					0.5						
							Damage per year					Damage per year						
Year	ADTT	Per Year	Ten-wheel	Full	Semi		Ten-wheel	Full	Semi	Damage	Damage	Remain	Ten-wheel	Full	Semi	Damage	Damage	Remain
2645	9577	3495605	25	47	45		4.68E-03	1.73E-03	9.40E-04	0.0073	0.2606	0.7394	4.68E-03	1.73E-03	9.40E-04	0.0073	0.2606	0.7394
2646	9768	3565320	25	47	45		4.77E-03	1.77E-03	9.59E-04	0.0075	0.2681	0.7319	4.77E-03	1.77E-03	9.59E-04	0.0075	0.2681	0.7319
2647	9964	3636860	25	47	45		4.87E-03	1.80E-03	9.79E-04	0.0076	0.2757	0.7243	4.87E-03	1.80E-03	9.79E-04	0.0076	0.2757	0.7243
2648	10163	3709495	25	47	45		4.96E-03	1.84E-03	9.97E-04	0.0078	0.2835	0.7165	4.96E-03	1.84E-03	9.97E-04	0.0078	0.2835	0.7165
2649	10366	3783590	25	47	45		5.06E-03	1.87E-03	1.02E-03	0.0080	0.2915	0.7085	5.06E-03	1.87E-03	1.02E-03	0.0080	0.2915	0.7085
2650	10574	3859510	25	47	45		5.16E-03	1.91E-03	1.04E-03	0.0081	0.2996	0.7004	5.16E-03	1.91E-03	1.04E-03	0.0081	0.2996	0.7004
2651	10785	3936525	25	47	45		5.27E-03	1.95E-03	1.06E-03	0.0083	0.3079	0.6921	5.27E-03	1.95E-03	1.06E-03	0.0083	0.3079	0.6921
2652	11001	4015365	25	47	45		5.37E-03	1.99E-03	1.08E-03	0.0084	0.3163	0.6837	5.37E-03	1.99E-03	1.08E-03	0.0084	0.3163	0.6837
2653	11221	4095665	25	47	45		5.48E-03	2.03E-03	1.10E-03	0.0086	0.3249	0.6751	5.48E-03	2.03E-03	1.10E-03	0.0086	0.3249	0.6751
2654	11445	4177425	25	47	45		5.59E-03	2.07E-03	1.12E-03	0.0088	0.3337	0.6663	5.59E-03	2.07E-03	1.12E-03	0.0088	0.3337	0.6663
2655	11674	4261010	25	47	45		5.70E-03	2.11E-03	1.15E-03	0.0090	0.3427	0.6573	5.70E-03	2.11E-03	1.15E-03	0.0090	0.3427	0.6573
2656	11907	4346055	25	47	45		5.82E-03	2.15E-03	1.17E-03	0.0091	0.3518	0.6482	5.82E-03	2.15E-03	1.17E-03	0.0091	0.3518	0.6482
2657	12146	4433290	25	47	45		5.93E-03	2.20E-03	1.19E-03	0.0093	0.3611	0.6389	5.93E-03	2.20E-03	1.19E-03	0.0093	0.3611	0.6389
2658	12388	4521620	25	47	45		6.05E-03	2.24E-03	1.22E-03	0.0095	0.3706	0.6294	6.05E-03	2.24E-03	1.22E-03	0.0095	0.3706	0.6294
2659	12636	4612140	25	47	45		6.17E-03	2.29E-03	1.24E-03	0.0097	0.3803	0.6197	6.17E-03	2.29E-03	1.24E-03	0.0097	0.3803	0.6197
2660	12889	4704485	25	47	45		6.29E-03	2.33E-03	1.27E-03	0.0099	0.3902	0.6096	6.29E-03	2.33E-03	1.27E-03	0.0099	0.3902	0.6096
2661	13147	4798655	25	47	45		6.42E-03	2.38E-03	1.29E-03	0.0101	0.4003	0.5997	6.42E-03	2.38E-03	1.29E-03	0.0101	0.4003	0.5997
2662	13410	4894650	25	47	45		6.55E-03	2.43E-03	1.32E-03	0.0103	0.4106	0.5894	6.55E-03	2.43E-03	1.32E-03	0.0103	0.4106	0.5894
2663	13670	4992470	25	47	45		6.68E-03	2.47E-03	1.34E-03	0.0105	0.4211	0.5789	6.68E-03	2.47E-03	1.34E-03	0.0105	0.4211	0.5789
2664	13951	5092115	25	47	45		6.81E-03	2.52E-03	1.37E-03	0.0107	0.4318	0.5682	6.81E-03	2.52E-03	1.37E-03	0.0107	0.4318	0.5682
2665	14230	5193950	25	47	45		6.95E-03	2.57E-03	1.40E-03	0.0109	0.4427	0.5573	6.95E-03	2.57E-03	1.40E-03	0.0109	0.4427	0.5573
2666	14515	5297975	25	47	45		7.09E-03	2.63E-03	1.42E-03	0.0111	0.4539	0.5461	7.09E-03	2.63E-03	1.42E-03	0.0111	0.4539	0.5461
2667	14805	5403825	25	47	45		7.23E-03	2.68E-03	1.45E-03	0.0114	0.4652	0.5348	7.23E-03	2.68E-03	1.45E-03	0.0114	0.4652	0.5348
2668	15101	5511865	25	47	45		7.38E-03	2.73E-03	1.48E-03	0.0116	0.4760	0.5232	7.38E-03	2.73E-03	1.48E-03	0.0116	0.4760	0.5232
2669	15403	5622095	25	47	45		7.52E-03	2.79E-03	1.51E-03	0.0118	0.4886	0.5114	7.52E-03	2.79E-03	1.51E-03	0.0118	0.4886	0.5114
2670	15711	5734515	25	47	45		7.67E-03	2.84E-03	1.54E-03	0.0121	0.5007	0.4993	7.67E-03	2.84E-03	1.54E-03	0.0121	0.5007	0.4993
2671	16026	5849490	25	47	45		7.83E-03	2.90E-03	1.57E-03	0.0123	0.5130	0.4870	7.83E-03	2.90E-03	1.57E-03	0.0123	0.5130	0.4870
2672	16346	5966290	25	47	45		7.98E-03	2.96E-03	1.60E-03	0.0125	0.5255	0.4745	7.98E-03	2.96E-03	1.60E-03	0.0125	0.5255	0.4745
2673	16673	6085645	25	47	45		8.14E-03	3.02E-03	1.64E-03	0.0128	0.5383	0.4617	8.14E-03	3.02E-03	1.64E-03	0.0128	0.5383	0.4617
2674	17007	6207555	25	47	45		8.31E-03	3.08E-03	1.67E-03	0.0131	0.5514	0.4486	8.31E-03	3.08E-03	1.67E-03	0.0131	0.5514	0.4486
2675	17347	6331655	25	47	45		8.47E-03	3.14E-03	1.70E-03	0.0133	0.5647	0.4353	8.47E-03	3.14E-03	1.70E-03	0.0133	0.5647	0.4353
2676	17694	6458310	25	47	45		8.64E-03	3.20E-03	1.74E-03	0.0136	0.5783	0.4217	8.64E-03	3.20E-03	1.74E-03	0.0136	0.5783	0.4217
2677	18047	6587155	25	47	45		8.81E-03	3.26E-03	1.77E-03	0.0138	0.5921	0.4079	8.81E-03	3.26E-03	1.77E-03	0.0138	0.5921	0.4079
2678	18408	6718920	25	47	45		8.99E-03	3.33E-03	1.81E-03	0.0141	0.6062	0.3938	8.99E-03	3.33E-03	1.81E-03	0.0141	0.6062	0.3938
2679	18777	6853605	25	47	45		9.17E-03	3.40E-03	1.84E-03	0.0144	0.6206	0.3794	9.17E-03	3.40E-03	1.84E-03	0.0144	0.6206	0.3794
2680	19152	6990480	25	47	45		9.35E-03	3.46E-03	1.88E-03	0.0147	0.6353	0.3647	9.35E-03	3.46E-03	1.88E-03	0.0147	0.6353	0.3647
2681	19535	7130275	25	47	45		9.54E-03	3.53E-03	1.92E-03	0.0150	0.6503	0.3497	9.54E-03	3.53E-03	1.92E-03	0.0150	0.6503	0.3497
2682	19926	7272990	25	47	45		9.73E-03	3.60E-03	1.96E-03	0.0153	0.6656	0.3344	9.73E-03	3.60E-03	1.96E-03	0.0153	0.6656	0.3344
2683	20324	7418260	25	47	45		9.93E-03	3.68E-03	1.99E-03	0.0156	0.6812	0.3188	9.93E-03	3.68E-03	1.99E-03	0.0156	0.6812	0.3188
2684	20731	7566615	25	47	45		1.01E-02	3.75E-03	2.03E-03	0.0159	0.6971	0.3029	1.01E-02	3.75E-03	2.03E-03	0.0159	0.6971	0.3029
2685	21145	7717925	25	47	45		1.03E-02	3.82E-03	2.08E-03	0.0162	0.7134	0.2866	1.03E-02	3.82E-03	2.08E-03	0.0162	0.7134	0.2866
2686	21568	7872320	25	47	45		1.05E-02	3.90E-03	2.12E-03	0.0166	0.7299	0.2701	1.05E-02	3.90E-03	2.12E-03	0.0166	0.7299	0.2701
2687	22000	8030000	25	47	45		1.07E-02	3.98E-03	2.16E-03	0.0169	0.7468	0.2532	1.07E-02	3.98E-03	2.16E-03	0.0169	0.7468	0.2532
2688	22440	8190600	25	47	45		1.10E-02	4.06E-03	2.20E-03	0.0172	0.7640	0.2360	1.10E-02	4.06E-03	2.20E-03	0.0172	0.7640	0.2360
2689	22888	8354120	25	47	45		1.12E-02	4.14E-03	2.25E-03	0.0176	0.7816	0.2184	1.12E-02	4.14E-03	2.25E-03	0.0176	0.7816	0.2184
2690	23346	8521290	25	47	45		1.14E-02	4.22E-03	2.29E-03	0.0179	0.7995	0.2005	1.14E-02	4.22E-03	2.29E-03	0.0179	0.7995	0.2005

รูปที่ 8-24 การเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน กรณีรื้อพื้นเดิมและก่อสร้างพื้นใหม่ภายหลังพื้นเดิมสิ้นอายุบริการ (ต่อ)

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังจากการใช้งาน 55 ปี

Deck	Impact Fraction		Truck		Growth		Existing		Shotcrete		UHPC	
	Year	ADTT	Per-Year	GW (ton)	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi
0.29	2509	648	239520	18	34	3.24	2.14E-05	8.52E-06	4.30E-06	0.0000	0.0000	0.0000
0.31	2510	661	241265	18	34	3.24	2.18E-05	8.69E-06	4.38E-06	0.0001	0.0001	0.0001
0.33	2511	675	246375	18	34	3.24	2.23E-05	8.87E-06	4.48E-06	0.0001	0.0001	0.0001
0.35	2512	688	251120	18	34	3.24	2.27E-05	9.04E-06	4.58E-06	0.0001	0.0001	0.0001
0.37	2513	702	256130	18	34	3.24	2.32E-05	9.23E-06	4.68E-06	0.0002	0.0002	0.0002
0.39	2514	716	261340	18	34	3.24	2.38E-05	9.41E-06	4.79E-06	0.0002	0.0002	0.0002
0.41	2515	730	266850	18	34	3.24	2.41E-05	9.60E-06	4.84E-06	0.0003	0.0003	0.0003
0.43	2516	745	271925	18	34	3.24	2.46E-05	9.79E-06	4.94E-06	0.0003	0.0003	0.0003
0.45	2518	775	282875	18	34	3.24	2.51E-05	9.99E-06	5.04E-06	0.0004	0.0004	0.0004
0.47	2520	806	294190	21	39.2	3.74	2.56E-05	1.02E-05	5.14E-06	0.0004	0.0004	0.0004
0.49	2521	822	300030	21	39.2	3.74	2.59E-05	1.04E-05	5.24E-06	0.0004	0.0004	0.0004
0.51	2522	839	306235	21	39.2	3.74	3.01E-05	9.98E-05	5.13E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.53	2523	856	312440	21	39.2	3.74	3.07E-05	1.02E-04	5.23E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.55	2524	873	318645	21	39.2	3.74	3.13E-05	1.04E-04	5.34E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.57	2525	890	324850	21	39.2	3.74	3.19E-05	1.06E-04	5.44E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.59	2526	908	331420	21	39.2	3.74	3.26E-05	1.08E-04	5.55E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.61	2528	945	344925	21	39.2	3.74	3.39E-05	1.12E-04	5.78E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.63	2530	983	358795	21	39.2	3.74	3.46E-05	1.15E-04	5.89E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.65	2531	1002	365730	21	39.2	3.74	3.53E-05	1.17E-04	6.01E-05	0.0005	0.0005	0.0005
0.67	2532	1022	373030	21	39.2	3.74	3.67E-05	1.22E-04	6.25E-05	0.0006	0.0006	0.0006
0.69	2534	1064	383360	21	39.2	3.74	3.82E-05	1.27E-04	6.51E-05	0.0006	0.0006	0.0006
0.71	2535	1085	390625	21	39.2	3.74	3.89E-05	1.29E-04	6.64E-05	0.0006	0.0006	0.0006
0.73	2536	1107	400055	25	47.45	4.5	5.90E-05	2.19E-03	1.19E-03	0.0093	0.0178	0.0322
0.75	2537	1129	412085	25	47.45	4.5	6.02E-05	2.23E-03	1.21E-03	0.0095	0.0273	0.0525
0.77	2538	1151	420515	25	47.45	4.5	6.14E-05	2.27E-03	1.23E-03	0.0096	0.0369	0.0683
0.79	2539	1174	428510	25	47.45	4.5	6.26E-05	2.32E-03	1.26E-03	0.0098	0.0467	0.0933
0.81	2540	1198	437270	25	47.45	4.5	6.39E-05	2.37E-03	1.28E-03	0.0100	0.0566	0.1183
0.83	2541	1222	446030	25	47.45	4.5	6.52E-05	2.41E-03	1.31E-03	0.0102	0.0670	0.1446
0.85	2542	1246	454790	25	47.45	4.5	6.64E-05	2.46E-03	1.34E-03	0.0104	0.0775	0.1725
0.87	2543	1271	463915	25	47.45	4.5	6.76E-05	2.51E-03	1.36E-03	0.0107	0.0881	0.2020
0.89	2544	1296	473040	25	47.45	4.5	6.91E-05	2.56E-03	1.39E-03	0.0109	0.0990	0.2338
0.91	2545	1322	482530	25	47.45	4.5	7.05E-05	2.61E-03	1.42E-03	0.0111	0.1100	0.2677
0.93	2546	1349	492385	25	47.45	4.5	7.19E-05	2.66E-03	1.45E-03	0.0113	0.1213	0.3038
0.95	2547	1376	502240	25	47.45	4.5	7.34E-05	2.72E-03	1.47E-03	0.0115	0.1339	0.3429
0.97	2548	1403	512095	25	47.45	4.5	7.49E-05	2.77E-03	1.50E-03	0.0118	0.1466	0.3854
0.99	2549	1431	522315	25	47.45	4.5	7.63E-05	2.83E-03	1.53E-03	0.0120	0.1596	0.4324
1.01	2550	1460	532900	25	47.45	4.5	7.79E-05	2.89E-03	1.56E-03	0.0122	0.1689	0.4845
1.03	2551	1489	543465	25	47.45	4.5	7.94E-05	2.94E-03	1.59E-03	0.0125	0.1813	0.5417
1.05	2552	1519	554435	25	47.45	4.5	8.10E-05	3.00E-03	1.63E-03	0.0127	0.1941	0.6059
1.07	2553	1549	565385	25	47.45	4.5	8.26E-05	3.06E-03	1.66E-03	0.0130	0.2070	0.6779
1.09	2554	1580	576700	25	47.45	4.5	8.43E-05	3.12E-03	1.69E-03	0.0132	0.2203	0.7587
1.11	2555	1612	588380	25	47.45	4.5	8.60E-05	3.18E-03	1.73E-03	0.0135	0.2338	0.8494
1.13	2556	1644	600600	25	47.45	4.5	8.77E-05	3.25E-03	1.76E-03	0.0138	0.2476	0.9519
1.15	2557	1677	613105	25	47.45	4.5	8.94E-05	3.31E-03	1.80E-03	0.0141	0.2616	1.0674
1.17	2558	1710	626150	25	47.45	4.5	9.12E-05	3.38E-03	1.83E-03	0.0143	0.2759	1.1969
1.19	2559	1745	639625	25	47.45	4.5	9.31E-05	3.45E-03	1.87E-03	0.0146	0.2906	1.3414
1.21	2560	1780	653470	25	47.45	4.5	9.49E-05	3.52E-03	1.91E-03	0.0149	0.3055	1.5030
1.23	2561	1815	667475	25	47.45	4.5	9.68E-05	3.59E-03	1.95E-03	0.0152	0.3207	1.6845
1.25	2562	1851	679615	25	47.45	4.5	9.87E-05	3.66E-03	1.98E-03	0.0155	0.3362	1.8880
1.27	2563	1888	691910	25	47.45	4.5	1.01E-04	3.73E-03	2.02E-03	0.0158	0.3520	2.1164
1.29	2564	1926	703990	25	47.45	4.5	1.03E-04	3.80E-03	2.06E-03	0.0161	0.3682	2.3719
1.31	2565	1965	717225	25	47.45	4.5	1.05E-04	3.86E-03	2.11E-03	0.0165	0.3846	2.6584
1.33	2566	2004	731460	25	47.45	4.5	1.07E-04	3.94E-03	2.15E-03	0.0171	0.4014	2.9800
1.35	2567	2044	746660	25	47.45	4.5	1.09E-04	4.04E-03	2.19E-03	0.0177	0.4186	3.3407
1.37	2568	2085	762835	25	47.45	4.5	1.11E-04	4.12E-03	2.23E-03	0.0183	0.4360	3.7454
1.39	2569	2127	779355	25	47.45	4.5	1.13E-04	4.20E-03	2.28E-03	0.0190	0.4538	4.2089
1.41	2570	2169	796165	25	47.45	4.5	1.16E-04	4.28E-03	2.32E-03	0.0197	0.4720	4.7364
1.43	2571	2213	807745	25	47.45	4.5	1.18E-04	4.37E-03	2.37E-03	0.0205	0.4906	5.3259
1.45	2572	2259	820020	25	47.45	4.5	1.20E-04	4.46E-03	2.42E-03	0.0213	0.5095	5.9845
1.47	2573	2302	834305	25	47.45	4.5	1.23E-04	4.55E-03	2.47E-03	0.0221	0.5288	6.7270
1.49	2574	2348	857020	25	47.45	4.5	1.25E-04	4.64E-03	2.52E-03	0.0229	0.5484	7.5604
1.51	2575	2395	874175	25	47.45	4.5	1.28E-04	4.73E-03	2.57E-03	0.0237	0.5685	8.4919
1.53	2576	2443	891695	25	47.45	4.5	1.30E-04	4.82E-03	2.62E-03	0.0245	0.5890	9.5284

รูปที่ 8-25 การเสื่อมสภาพของพื้นสะพานกิตติขจร การเสริมสภาพของพื้นสะพานกิตติขจร การเสริมสภาพของพื้นสะพาน UHPC และการเสริมความหนาแน่น UHPC และกรณีเสริมความหนาแน่น UHPC และการเสริมความหนาแน่น Shotcrete



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

Truck	Truck Fraction	133	Existing		0.5		Shotcrete		0.5		Duplex		0.5		UHPc		0.5						
			P _a	153.3	ton	GDF	Remain	0.5	P _a	234.2	ton	GDF	Remain	0.5	P _a	196.6		ton	GDF	Remain			
Year	ADTT	Per Year	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi					
2713	36114	13471310	25	47	5	45	5.46E-04	2.02E-04	1.10E-04	0.0008	0.0428	0.5372	3.65E-06	1.84E-05	1.14E-06	0.0000	0.4027	4.17E-03	1.54E-03	0.39E-04	0.0066	0.7173	0.2827
2714	37551	13706133	25	47	5	45	5.57E-04	2.06E-04	1.12E-04	0.0009	0.4437	0.5383	3.77E-06	1.90E-05	1.16E-06	0.0000	0.4027	4.26E-03	1.58E-03	0.39E-04	0.0067	0.7200	0.2780
2715	38302	13860230	25	47	5	45	5.68E-04	2.10E-04	1.14E-04	0.0009	0.4446	0.5384	3.88E-06	1.94E-05	1.18E-06	0.0000	0.4027	4.34E-03	1.61E-03	0.39E-04	0.0068	0.7209	0.2811
2716	39069	14024835	25	47	5	45	5.80E-04	2.15E-04	1.16E-04	0.0009	0.4455	0.5385	4.00E-06	1.98E-05	1.20E-06	0.0000	0.4027	4.43E-03	1.64E-03	0.39E-04	0.0070	0.7218	0.2822
2717	39859	14194885	25	47	5	45	5.91E-04	2.19E-04	1.18E-04	0.0009	0.4464	0.5386	4.12E-06	2.02E-05	1.22E-06	0.0000	0.4027	4.52E-03	1.67E-03	0.39E-04	0.0071	0.7229	0.2831
2718	40666	14370390	25	47	5	45	6.03E-04	2.24E-04	1.21E-04	0.0009	0.4474	0.5387	4.24E-06	2.06E-05	1.24E-06	0.0000	0.4028	4.61E-03	1.71E-03	0.39E-04	0.0072	0.7232	0.2838
2719	41499	14552355	25	47	5	45	6.15E-04	2.28E-04	1.24E-04	0.0010	0.4483	0.5387	4.36E-06	2.10E-05	1.26E-06	0.0000	0.4028	4.70E-03	1.74E-03	0.39E-04	0.0073	0.7239	0.2846
2720	42334	14741310	25	47	5	45	6.27E-04	2.32E-04	1.26E-04	0.0010	0.4493	0.5387	4.48E-06	2.14E-05	1.28E-06	0.0000	0.4028	4.79E-03	1.77E-03	0.39E-04	0.0074	0.7249	0.2855
2721	43183	14937390	25	47	5	45	6.40E-04	2.37E-04	1.28E-04	0.0010	0.4503	0.5387	4.60E-06	2.18E-05	1.30E-06	0.0000	0.4029	4.89E-03	1.81E-03	0.39E-04	0.0075	0.7259	0.2865
2722	44046	15141910	25	47	5	45	6.53E-04	2.42E-04	1.31E-04	0.0010	0.4514	0.5388	4.72E-06	2.23E-05	1.32E-06	0.0000	0.4029	4.98E-03	1.84E-03	0.39E-04	0.0076	0.7269	0.2875
2723	44924	15354310	25	47	5	45	6.66E-04	2.47E-04	1.34E-04	0.0010	0.4524	0.5388	4.84E-06	2.28E-05	1.34E-06	0.0000	0.4030	5.08E-03	1.88E-03	0.39E-04	0.0077	0.7279	0.2885
2724	45817	15574710	25	47	5	45	6.79E-04	2.51E-04	1.36E-04	0.0011	0.4535	0.5388	5.00E-06	2.32E-05	1.36E-06	0.0000	0.4030	5.19E-03	1.92E-03	0.39E-04	0.0078	0.7289	0.2895
2725	46829	15803485	25	47	5	45	6.93E-04	2.57E-04	1.38E-04	0.0011	0.4546	0.5388	5.16E-06	2.36E-05	1.38E-06	0.0000	0.4030	5.25E-03	1.95E-03	0.39E-04	0.0079	0.7299	0.2905
2726	47863	16041390	25	47	5	45	7.07E-04	2.62E-04	1.42E-04	0.0011	0.4557	0.5388	5.32E-06	2.41E-05	1.40E-06	0.0000	0.4031	5.36E-03	1.99E-03	0.39E-04	0.0080	0.7309	0.2915
2727	48927	16289895	25	47	5	45	7.21E-04	2.67E-04	1.45E-04	0.0011	0.4568	0.5388	5.48E-06	2.46E-05	1.42E-06	0.0000	0.4031	5.47E-03	2.03E-03	0.39E-04	0.0081	0.7319	0.2925
2728	49547	16448655	25	47	5	45	7.36E-04	2.72E-04	1.48E-04	0.0011	0.4580	0.5389	5.64E-06	2.50E-05	1.44E-06	0.0000	0.4031	5.58E-03	2.07E-03	0.39E-04	0.0082	0.7329	0.2935
2729	50538	16618395	25	47	5	45	7.50E-04	2.78E-04	1.51E-04	0.0012	0.4591	0.5389	5.80E-06	2.54E-05	1.46E-06	0.0000	0.4032	5.69E-03	2.11E-03	0.39E-04	0.0083	0.7339	0.2945
2730	51549	16799690	25	47	5	45	7.65E-04	2.84E-04	1.54E-04	0.0012	0.4603	0.5390	6.00E-06	2.58E-05	1.48E-06	0.0000	0.4032	5.80E-03	2.15E-03	0.39E-04	0.0084	0.7349	0.2955
2731	52580	16993100	25	47	5	45	7.80E-04	2.89E-04	1.57E-04	0.0012	0.4616	0.5390	6.20E-06	2.62E-05	1.50E-06	0.0000	0.4032	5.91E-03	2.19E-03	0.39E-04	0.0085	0.7359	0.2965
2732	53631	17199315	25	47	5	45	7.96E-04	2.95E-04	1.60E-04	0.0013	0.4628	0.5390	6.40E-06	2.66E-05	1.52E-06	0.0000	0.4033	6.02E-03	2.23E-03	0.39E-04	0.0086	0.7369	0.2975
2733	54704	17418090	25	47	5	45	8.12E-04	3.01E-04	1.63E-04	0.0013	0.4641	0.5391	6.60E-06	2.71E-05	1.54E-06	0.0000	0.4033	6.13E-03	2.27E-03	0.39E-04	0.0087	0.7379	0.2985
2734	55798	17649870	25	47	5	45	8.28E-04	3.07E-04	1.66E-04	0.0013	0.4654	0.5391	6.80E-06	2.76E-05	1.56E-06	0.0000	0.4034	6.24E-03	2.31E-03	0.39E-04	0.0088	0.7389	0.2995
2735	56914	17894895	25	47	5	45	8.44E-04	3.13E-04	1.70E-04	0.0013	0.4667	0.5391	7.00E-06	2.81E-05	1.58E-06	0.0000	0.4034	6.35E-03	2.35E-03	0.39E-04	0.0089	0.7399	0.3005
2736	58062	18153390	25	47	5	45	8.60E-04	3.19E-04	1.74E-04	0.0014	0.4681	0.5392	7.20E-06	2.86E-05	1.60E-06	0.0000	0.4034	6.46E-03	2.39E-03	0.39E-04	0.0090	0.7409	0.3015
2737	59233	18425825	25	47	5	45	8.76E-04	3.25E-04	1.77E-04	0.0014	0.4694	0.5392	7.40E-06	2.91E-05	1.62E-06	0.0000	0.4034	6.57E-03	2.43E-03	0.39E-04	0.0091	0.7419	0.3025
2738	60537	18712745	25	47	5	45	8.92E-04	3.32E-04	1.80E-04	0.0014	0.4709	0.5392	7.60E-06	2.96E-05	1.64E-06	0.0000	0.4035	6.68E-03	2.47E-03	0.39E-04	0.0092	0.7429	0.3035
2739	61865	19015395	25	47	5	45	9.09E-04	3.39E-04	1.84E-04	0.0014	0.4723	0.5392	7.80E-06	3.01E-05	1.66E-06	0.0000	0.4035	6.80E-03	2.51E-03	0.39E-04	0.0093	0.7439	0.3045
2740	63327	19335595	25	47	5	45	9.26E-04	3.45E-04	1.87E-04	0.0015	0.4738	0.5392	8.00E-06	3.06E-05	1.68E-06	0.0000	0.4036	6.92E-03	2.55E-03	0.39E-04	0.0094	0.7449	0.3055
2741	64924	19673910	25	47	5	45	9.43E-04	3.52E-04	1.91E-04	0.0015	0.4752	0.5393	8.20E-06	3.11E-05	1.70E-06	0.0000	0.4036	7.04E-03	2.59E-03	0.39E-04	0.0095	0.7459	0.3065
2742	65716	19827240	25	47	5	45	9.70E-04	3.59E-04	1.95E-04	0.0015	0.4768	0.5393	8.40E-06	3.16E-05	1.72E-06	0.0000	0.4037	7.16E-03	2.63E-03	0.39E-04	0.0096	0.7469	0.3075
2743	66684	20093660	25	47	5	45	9.88E-04	3.66E-04	1.99E-04	0.0015	0.4783	0.5393	8.60E-06	3.21E-05	1.74E-06	0.0000	0.4037	7.28E-03	2.67E-03	0.39E-04	0.0097	0.7479	0.3085
2744	68017	20482605	25	47	5	45	1.01E-03	3.74E-04	2.03E-04	0.0016	0.4799	0.5393	8.80E-06	3.26E-05	1.76E-06	0.0000	0.4038	7.40E-03	2.71E-03	0.39E-04	0.0098	0.7489	0.3095
2745	69378	20929270	25	47	5	45	1.03E-03	3.81E-04	2.07E-04	0.0016	0.4815	0.5393	9.00E-06	3.31E-05	1.78E-06	0.0000	0.4038	7.52E-03	2.75E-03	0.39E-04	0.0099	0.7499	0.3105
2746	70765	21439215	25	47	5	45	1.05E-03	3.88E-04	2.11E-04	0.0016	0.4832	0.5393	9.20E-06	3.36E-05	1.80E-06	0.0000	0.4039	7.64E-03	2.79E-03	0.39E-04	0.0100	0.7509	0.3115
2747	72180	22014700	25	47	5	45	1.08E-03	3.96E-04	2.16E-04	0.0017	0.4866	0.5393	9.40E-06	3.41E-05	1.82E-06	0.0000	0.4040	7.76E-03	2.83E-03	0.39E-04	0.0101	0.7519	0.3125
2748	73624	22657290	25	47	5	45	1.11E-03	4.04E-04	2.20E-04	0.0017	0.4883	0.5393	9.60E-06	3.46E-05	1.84E-06	0.0000	0.4041	7.88E-03	2.87E-03	0.39E-04	0.0102	0.7529	0.3135
2749	75096	23370000	25	47	5	45	1.14E-03	4.13E-04	2.24E-04	0.0018	0.4901	0.5393	9.80E-06	3.51E-05	1.86E-06	0.0000	0.4041	8.00E-03	2.91E-03	0.39E-04	0.0103	0.7539	0.3145
2750	76598	24155270	25	47	5	45	1.18E-03	4.21E-04	2.28E-04	0.0018	0.4919	0.5393	1.00E-05	3.56E-05	1.88E-06	0.0000	0.4042	8.12E-03	2.95E-03	0.39E-04	0.0104	0.7549	0.3155
2751	78130	25017490	25	47	5	45	1.22E-03	4.29E-04	2.32E-04	0.0019	0.4938	0.5393	1.02E-05	3.61E-05	1.90E-06	0.0000	0.4042	8.24E-03	2.99E-03	0.39E-04	0.0105	0.7559	0.3165
2752	79693	25967945	25	47	5	45	1.26E-03	4.38E-04	2.36E-04	0.0019	0.4957	0.5393	1.04E-05	3.66E-05	1.92E-06	0.0000	0.4042	8.36E-03	3.03E-03	0.39E-04	0.0106	0.7569	0.3175
2753	81287	26996955																					

โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

Year	Truck		Impact Fraction		Truck		Growth GW/Bias		Existing		Shotcrete		Deck		UHPc	
	Year	ADTT	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi
2017	2091439	763E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2018	2133266	7.9E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2019	2175093	7.9E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2020	2216920	8.1E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2021	2258747	8.2E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2022	2300574	8.3E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2023	2342401	8.4E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2024	2384228	8.5E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2025	2426055	8.6E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2026	2467882	8.7E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2027	2509709	8.8E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2028	2551536	8.9E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2029	2593363	9.0E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2030	2635190	9.1E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2031	2677017	9.2E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2032	2718844	9.3E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2033	2760671	9.4E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2034	2802498	9.5E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2035	2844325	9.6E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2036	2886152	9.7E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2037	2927979	9.8E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2038	2969806	9.9E+00	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2039	3011633	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2040	3053460	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2041	3095287	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2042	3137114	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2043	3178941	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2044	3220768	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2045	3262595	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2046	3304422	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2047	3346249	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2048	3388076	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2049	3429903	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2050	3471730	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2051	3513557	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2052	3555384	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2053	3597211	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2054	3639038	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2055	3680865	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2056	3722692	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2057	3764519	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2058	3806346	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2059	3848173	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2060	3890000	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2061	3931827	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2062	3973654	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2063	4015481	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2064	4057308	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2065	4099135	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2066	4140962	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2067	4182789	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2068	4224616	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2069	4266443	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2070	4308270	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2071	4350097	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2072	4391924	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2073	4433751	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2074	4475578	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2075	4517405	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2076	4559232	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2077	4601059	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2078	4642886	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2079	4684713	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2080	4726540	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2081	4768367	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2082	4810194	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2083	4852021	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5
2084	4893848	1.0E+01	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.3	0.5	196.6	0.5

รูปที่ 8-25 การเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน การเสริมความหนาพื้น Shotcrete การเสริมความหนาพื้น UHPc และกรมที่เสริมความหนาของ (ต่อ)



โครงการศึกษาการเสริมกำลังสะพานกิตติขจรโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการให้บริการและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งาน 55 ปี

Year	Truck Impact Fraction		Truck		Growth		Existing		Shotcrete		Deck		UHPC	
	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi	Full	Semi
2985	0.29	0.26	0.45	1.16	1.11	0.96	153.3	0.5	224.2	0.5	157.5	0.5	196.6	0.5
2986	8200814	2.93E+09	25	47	45		1.23E-03	4.07E-03	2.48E-04	0.0056	0.6845	0.3155	0.1966	0.0078
2987	8364830	3.05E+09	25	47	45		1.26E-03	4.15E-03	2.53E-04	0.0057	0.6902	0.3069	0.1966	0.0078
2988	8532127	3.11E+09	25	47	45		1.28E-03	4.23E-03	2.58E-04	0.0058	0.6960	0.3040	0.1966	0.0078
2989	8702769	3.18E+09	25	47	45		1.31E-03	4.31E-03	2.63E-04	0.0059	0.7019	0.3011	0.1966	0.0078
2990	8876825	3.24E+09	25	47	45		1.34E-03	4.40E-03	2.68E-04	0.0060	0.7079	0.2981	0.1966	0.0078
2991	9054361	3.3E+09	25	47	45		1.36E-03	4.48E-03	2.74E-04	0.0061	0.7140	0.2952	0.1966	0.0078
2992	9235448	3.37E+09	25	47	45		1.39E-03	4.58E-03	2.79E-04	0.0062	0.7202	0.2923	0.1966	0.0078
2993	9420157	3.44E+09	25	47	45		1.42E-03	4.67E-03	2.85E-04	0.0063	0.7266	0.2894	0.1966	0.0078
2994	9608561	3.51E+09	25	47	45		1.45E-03	4.77E-03	2.91E-04	0.0064	0.7331	0.2865	0.1966	0.0078
2995	9800732	3.58E+09	25	47	45		1.48E-03	4.86E-03	2.97E-04	0.0065	0.7398	0.2836	0.1966	0.0078
2996	9996746	3.65E+09	25	47	45		1.51E-03	4.96E-03	3.03E-04	0.0066	0.7465	0.2807	0.1966	0.0078
2997	10196681	3.72E+09	25	47	45		1.54E-03	5.06E-03	3.09E-04	0.0067	0.7534	0.2778	0.1966	0.0078
2998	10400615	3.8E+09	25	47	45		1.57E-03	5.16E-03	3.15E-04	0.0068	0.7605	0.2749	0.1966	0.0078
2999	10600647	3.87E+09	25	47	45		1.60E-03	5.26E-03	3.21E-04	0.0069	0.7677	0.2720	0.1966	0.0078
3000	10820000	3.95E+09	25	47	45		1.63E-03	5.37E-03	3.27E-04	0.0070	0.7750	0.2691	0.1966	0.0078
3001	11037216	4.03E+09	25	47	45		1.66E-03	5.48E-03	3.34E-04	0.0071	0.7825	0.2662	0.1966	0.0078
3002	11257960	4.11E+09	25	47	45		1.70E-03	5.59E-03	3.41E-04	0.0072	0.7901	0.2633	0.1966	0.0078
							1.73E-03	5.70E-03	3.48E-04	0.0073	0.7979	0.2604	0.1966	0.0078

รูปที่ 8-25 การเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน การเสริมความหนาแน่น Shotcrete การเสริมความหนาแน่น UHPC และกรณีเสริมความหนาแน่นทางขวาง (ต่อ)



บทที่ 9 การจัดทำแผนการตรวจสอบ สะพานภายหลังการบูรณะ

การตรวจสอบสะพานเป็นภารกิจที่ต้องกระทำอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปสู่การบำรุงรักษาที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้สะพานสามารถให้บริการได้อย่างปลอดภัยตามที่ออกแบบ สะพานแต่ละประเภทต้องการการตรวจสอบและบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน เนื้อหาในบทนี้นำเสนอแผนการตรวจสอบสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง ซึ่งเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงขนาดใหญ่และพื้นสะพานเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กรองรับและคานสะพานทั้งหมด

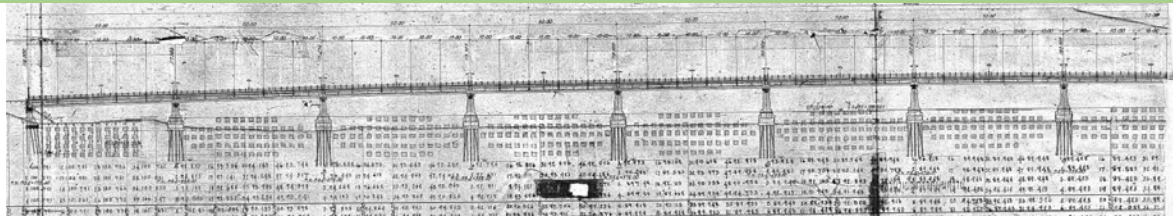
9.1 ความเป็นมาของสะพานกิตติขจร

สะพานกิตติขจรข้ามแม่น้ำปิงที่จังหวัดตาก เป็นสะพานที่มีความสำคัญต่อการคมนาคมทางถนนของประเทศ สะพานตั้งอยู่บนทางหลวงหมายเลข 1 บริเวณกิโลเมตรที่ 520 ซึ่งเป็นเส้นทางหลักสู่ภาคเหนือตอนบน สะพานแห่งนี้ประกอบด้วยสะพานฝั่งซ้ายทาง (ขาขึ้น) และสะพานฝั่งขวาทาง (ขาล่อง) โดยสะพานฝั่งซ้ายทางเปิดให้บริการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2509 ส่วนสะพานฝั่งขวาทางได้ถูกสร้างขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2543 เพื่อช่วยแก้ปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณสะพานเดิม ปัจจุบันสะพานฝั่งขวาทางยังคงมีสภาพที่ดี ในขณะที่สะพานฝั่งซ้ายทางมีสภาพทรุดโทรมเนื่องจากการใช้งานมากกว่า 55 ปี

สะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง เป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงขนาดใหญ่ของกรมทางหลวงมีความยาว 600 เมตร ประกอบด้วยคานช่วงแฉวน 50 เมตร จำนวน 12 ช่วง รูปที่ 9-1 แสดงภาพตัดตามยาวของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

เนื่องจากสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง ถูกเปิดใช้งานมานานมากกว่า 55 ปี และการที่มีปริมาณจราจรที่มากขึ้น ทำให้โครงสร้างสะพานได้รับความเสียหายทั้งโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) สำนักวิจัยและพัฒนาทางร่วมกับสำนักสำรวจและออกแบบ จึงได้ทำการตรวจสอบ ทดสอบและวิเคราะห์ผลเชิงสถิติควบคู่กับการจัดทำแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

ผลการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างคานสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง ด้านกำลังรับน้ำหนักสูงสุดปลอดภัย แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างคานสะพานมีความเสื่อมสภาพระดับน้อย โดยยังมีกำลังของหน้าตัดสูงกว่าแรงภายในจากกรณีต่างๆ รวมทั้ง น้ำหนักบรรทุกจร (HL-93) ซึ่งเป็นน้ำหนักตาม



รูปที่ 9-1 ภาพตัดตามยาวของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

มาตรฐาน ASSHTO LRFD 2010 อย่างไรก็ตาม ในอนาคต หากมีการเปิดใช้ช่องจราจรจำนวน 3 ช่องจราจร จะส่งผลให้สะพานมีการเสื่อมสภาพมากยิ่งขึ้น อาจทำให้กำลังรับน้ำหนักของสะพานไม่เพียงพอ ดังนั้นการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับการใช้งานในอนาคต

การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง เพื่อรองรับรูปแบบการจราจรในอนาคต จะเน้นไปที่การเสริมกำลังโครงสร้างคานสะพานและโครงสร้างพื้นสะพาน ในกรณีนี้ ที่ปรึกษาได้แนะนำวิธีการเสริมกำลังคานสะพานที่เหมาะสม 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลัง (External Post tensioning) และการเสริมกำลังด้วยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) และการเสริมกำลังพื้นสะพาน 2 รูปแบบ คือ การเสริมความหนาพื้นสะพานโดยวิธี Shotcrete และการเพิ่มคานค้ำยันด้านข้าง (Diaphragm)

การตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง เป็นภารกิจที่ต้องทำอย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าสะพานจะได้รับการปรับปรุงให้เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบเพื่อรองรับการจราจรในอนาคต เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานสะพานให้ยาวนานที่สุดและเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ทาง เนื้อหาในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอแนวทางและแผนในการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

9.2 องค์ประกอบของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบและบำรุงรักษา สะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทางได้ถูกแบ่งออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ 3 องค์ประกอบ ได้แก่ โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) และส่วนประกอบอื่นๆ (Miscellaneous Elements) รายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบมีดังนี้

9.2.1. โครงสร้างส่วนบน (Superstructure)

โครงสร้างส่วนบน หมายถึง ส่วนของโครงสร้างที่อยู่เหนือแผ่นรองคานสะพาน (Bearing Pad) ขึ้นไป ทำหน้าที่หลักในการรับแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร องค์ประกอบของโครงสร้างสะพาน ได้แก่ พื้นสะพาน (Deck Slab) คานสะพาน (Main Beams) และคานค้ำยัน (Bracing)



9.2.1.1. พื้นสะพาน (Deck Slab)

พื้นสะพานของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทางเป็นพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Cast – in – place) หนา 18 เซนติเมตร เททับด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) หนา 5 เซนติเมตร พื้นสะพานเป็นโครงสร้างส่วนแรกที่รองรับแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร และถ่ายแรงลงองค์ประกอบอื่นๆของโครงสร้างต่อไป รูปที่ 9-2 แสดงพื้นสะพานคอนกรีตของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง

9.2.1.2. คานสะพาน และค้ำยัน (Main Beams and Bracing)

คานสะพานของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทางจะมีทั้งหมด 2 รูปแบบตามโครงสร้างสะพาน ได้แก่ คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I - Girder) และค้ำยัน (Bracing) โดยคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอจะมีขนาดความลึก 2.50 เมตร ปีกคาน (Flange) ด้านบนกว้าง 1.20 เมตร บริเวณกลางคาน ปีกคานด้านล่างกว้าง 0.65 เมตร เหวคาน (Web) กว้าง 0.20 เมตร บริเวณปลายคาน ปีกคานด้านล่างกว้าง 1.20 เมตร เหวคานกว้าง 0.75 เมตร และมีความยาว 50.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9-3 รูปแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอจะเป็นรูปแบบคานอย่างง่าย (Simple Beam)

คานค้ำยันสะพานเป็นโครงสร้างในทิศทางขวางกับแนวคานสะพาน คานค้ำยันของสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง ทำหน้าที่หลักในการเสริมสร้างเสถียรภาพให้กับคานสะพานในแต่ละช่วงสะพานโดยยึดคานสะพานเข้าด้วยกัน และทำหน้าที่กระจายแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรลงคานสะพานเพื่อให้คานสะพานแต่ละตัวช่วยกันรับแรง ดังแสดงในรูปที่ 9-2 และ รูปที่ 9-3



รูปที่ 9-2 พื้นสะพานคอนกรีตหล่อในที่ คานสะพานและคานค้ำยัน



รูปที่ 9-3 คานคองกรีตอัดแรงรูปตัวไอ

9.2.2. โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure)

โครงสร้างส่วนล่าง หมายถึง ส่วนของโครงสร้างที่อยู่ใต้แผ่นรองคานสะพาน (Bearing Pads) ลงมาจนถึงระดับผิวดิน ซึ่งได้แก่ คานรัดเสาตอม่อ (Cap Beams) และเสาตอม่อสะพาน (Piers) โดยตอม่อสะพานสำหรับสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง จะมีลักษณะเป็นเสาคองกรีตเสริมเหล็กและมีฐานรากเป็นแบบฐานรากเสาเข็ม (Pile Footing) รวมกับแท่นปิดเสาเข็ม (Pile Cap) จะเห็นได้ชัดบริเวณตอม่อสะพานที่ขวางลำน้ำ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 9-4 แผ่นรองคานสะพานจะถูกวางอยู่บนคานรัดเสาตอม่อซึ่งจะทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างส่วนบนลงมายังตอม่อสะพานต่อไป

9.2.3. ส่วนประกอบอื่นๆ (Miscellaneous Elements)

องค์ประกอบอื่นๆ ของสะพาน หมายถึง องค์ประกอบที่เมื่อเกิดการชำรุดจะไม่ส่งผลกระทบต่อหรืออาจจะส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยต่อความมั่นคงแข็งแรงและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน แต่จะส่งผลกระทบต่อความราบรื่นและความปลอดภัยในการขับขี่ของผู้ใช้ทาง สำหรับสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง องค์ประกอบเหล่านี้ได้แก่ แผ่นรองคานสะพาน (Bearing Pad) และรอยต่อพื้นสะพาน (Compression Seal Joint) ดังแสดงในรูปที่ 9-5 และ รูปที่ 9-6 ตามลำดับ





รูปที่ 9-4 เสาคอนกรีตและตอม่อสะพาน



รูปที่ 9-5 แผ่นรองคานสะพาน



รูปที่ 9-6 รอยต่อพื้นสะพาน

9.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบสะพาน

ความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับองค์ประกอบสะพานเป็นข้อมูลสำคัญในการนำไปพิจารณาแนวทางการตรวจสอบสะพานให้ถูกต้องและเป็นระบบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป เนื้อหาในข้อหัวนี้นำเสนอความเสียหายสำคัญที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ของสะพานและแนวทางดำเนินการหากเกิดความเสียหายขึ้น

9.3.1. ความเสียหายของพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

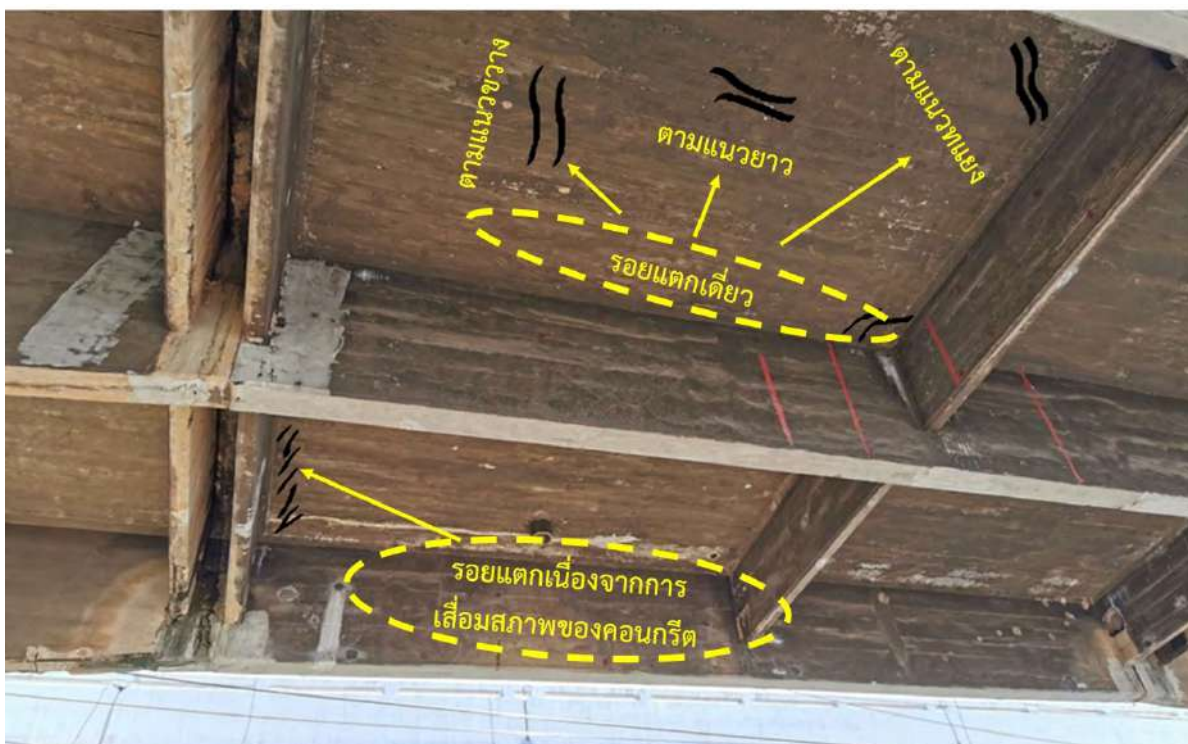
รอยแตก (Crack) เป็นความเสียหายสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานพื้นสะพานคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ รอยแตกเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต (Durability Cracks of D-cracks) และรอยแตกเดี่ยว (Individual Cracks)

รอยแตกเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต (D-cracks) เป็นรอยแตกที่มักเกิดขึ้นบริเวณท้องพื้นคอนกรีตใกล้กับรอยต่อพื้นสะพาน สาเหตุเนื่องจากความชื้นสะสมบริเวณรอยต่อพื้นสะพานหรือการรั่วซึมของน้ำจากรอยต่อพื้นสะพานทำให้คอนกรีตพื้นสะพานเสื่อมสภาพและเกิดรอยแตกจากแรงดันน้ำ

รอยแตกเดี่ยว (Individual Cracks) เป็นรอยแตกที่มีทิศทางแน่นอน อาจจะเป็นรอยแตกรอยเดี่ยวหรือรอยแตกขนานกันหลายรอยก็ได้ รอยแตกเดี่ยวเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีแรงดึงเกิดขึ้นทิศทางตั้งฉากกับรอยแตก สาเหตุเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่สูงเกินหรือแรงกระแทกจากน้ำหนักบรรทุกจร ทำให้คอนกรีตแตกร้าว



รูปที่ 9-7 เป็นภาพจำลองรอยแตกที่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและรอยแตกเดี่ยว



รูปที่ 9-7 ภาพจำลองรอยแตกเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและรอยแตกเดี่ยว

9.3.1.1. แนวทางการดำเนินการหากเกิดรอยแตกเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต

- 1) ตรวจสอบและแก้ไขการรั่วซึมของน้ำหรือการสะสมความชื้นบริเวณที่คอนกรีตเสื่อมสภาพ
- 2) ซ่อมผิวหน้าคอนกรีตส่วนที่เสื่อมสภาพด้วยวิธีสกัดฉาบด้วยมอร์ต้ากำลังอัดสูงชนิดไม่หดตัว (Non-shrinkage Rapid Strength Mortar) โดยในระหว่างการซ่อมให้ปิดการจราจรบนสะพานเพื่อไม่ให้เกิดแรงกระแทก

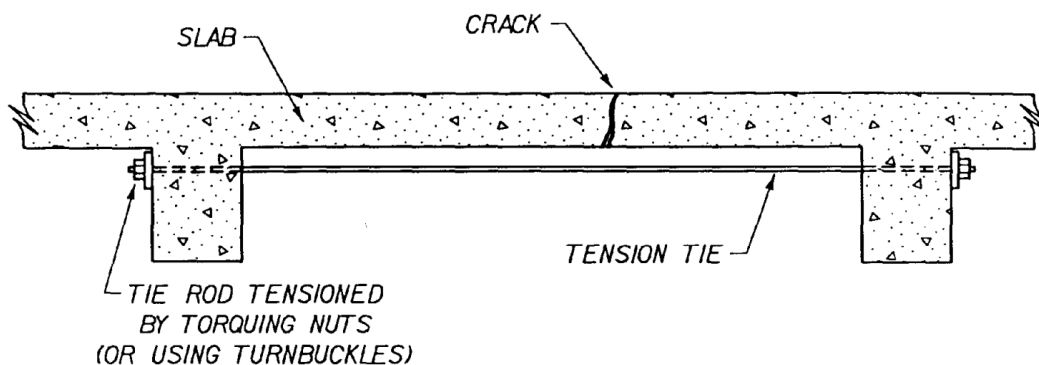
9.3.1.2. แนวทางการดำเนินการหากเกิดรอยแตกเดี่ยว

- 1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อมรอยแตก

ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

แนะนำให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) เนื่องจากรอยแตกอาจจะยังไม่หยุดขยายตัว (Active Cracks) นอกจากนี้ยังแนะนำให้ปิดรอยแตกด้วยการอัดแรงจากภายนอก (External Pre – stressing) โดยออกแบบการอัดแรงให้มั่นใจว่าพื้นสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวได้ตามเดิม การอัดแรงจากภายนอกสามารถทำได้โดยใช้เหล็กยึด (Tie Rod) ระหว่างคาน 2 คาน บริเวณที่มีรอยแตกเดี่ยว ทำการดึงเพื่อให้เกิดการอัดตัวของพื้นคอนกรีตซึ่งทำให้อรอยแตกชิดเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 9-8

- 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน



รูปที่ 9-8 การปิดรอยแตกของพื้นคอนกรีตโดยใช้เหล็กเส้นอัดแรงจากภายนอก

9.3.2. ความเสียหายของคานสะพาน

คานสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง เป็นโครงสร้างประเภทคอนกรีตอัดแรง ซึ่งการประเมินสภาพความเสียหายจะแตกต่างจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป รวมไปถึงการซ่อมแซมและการเสริมกำลัง เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงมีการออกแบบมาอย่างซับซ้อน โดยความเสียหายสำคัญของระบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะแบ่งเป็น ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอนกรีต ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลวดอัดแรงและความเสียหายบริเวณเอวคาน (Web)

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอนกรีต คือ การหลุดร่อน (Spalling) และการแตกร้าว (Cracking) ซึ่งการหลุดร่อนของคอนกรีต ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะต้องมีการตรวจสอบให้แน่ชัด เนื่องจากถ้าการหลุดร่อนเกิดบริเวณใต้ท้องคานใกล้กับแนวของลวดอัดแรง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการกักกรองสูงจะทำให้เกิดการกักกรองเข้าไปถึงลวดอัดแรงได้และการหลุดร่อนอาจขยายแนวรอยแตกได้จากการจราจร



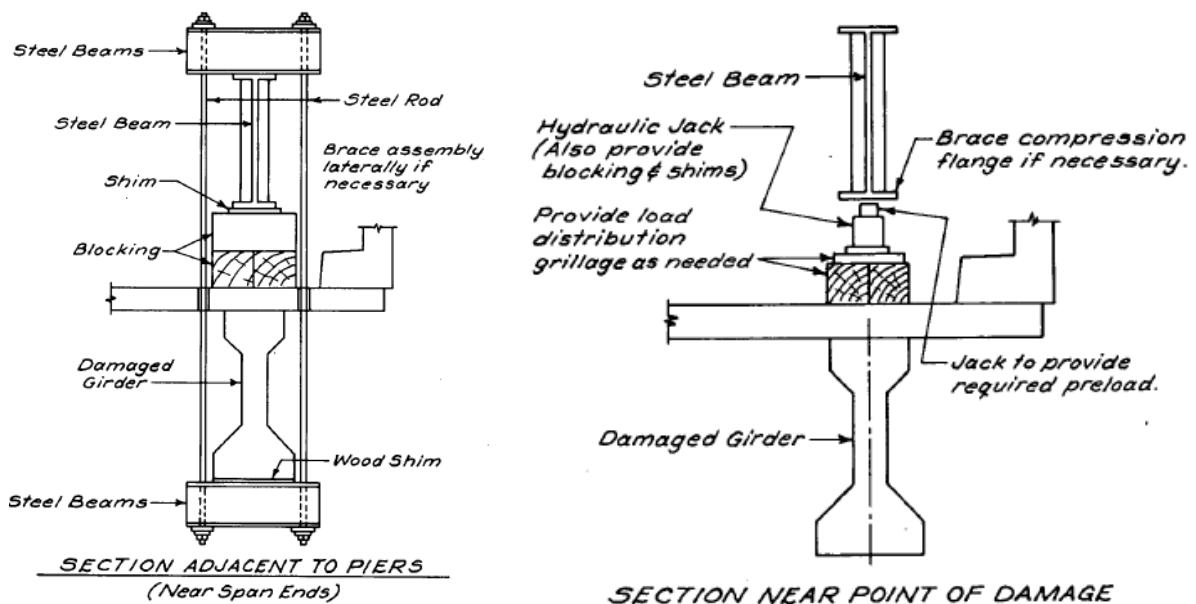
แนวทางการดำเนินการหากเกิดการหลุดร่อน (Spalling) หรือการแตกร้าว (Cracking) ในคอนกรีต

- 1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม

ข้อแนะนำสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

แนวทางแก้ไขเมื่อตรวจพบการหลุดร่อนเล็กน้อย คือการใช้วัสดุอุดรอยที่มี การหลุดร่อน เช่น อีพอกซี เป็นตัวเคลือบผิวก่อนจะอุดด้วยวัสดุอีพอกซีเพิ่มเติมหรือคอนกรีต มอตาร์ ทั้งนี้ก่อนเริ่มการจะปะวัสดุประเภทนี้ในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงต้องมีการวาง น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง (Preload) ดังรูปที่ 9-9 ก่อนปะวัสดุ และรอให้วัสดุมีกำลังที่ เพียงพอก่อนจะนำน้ำหนักบรรทุกออก ซึ่งการคำนวณน้ำหนักบรรทุกควรเป็นหน้าที่ของ วิศวกรโครงสร้าง

แนวทางการซ่อมรอยร้าวคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ต้องมีการทำ Preload เช่นเดียวกันแล้วจึงทำการฉีดวัสดุอุดรอยร้าวเข้าไปอุดรายนั้น



รูปที่ 9-9 การวางน้ำหนักบรรทุกลงบนคานสะพานที่เสียหาย (Preload) ก่อนการปะซ่อมคอนกรีต (Patching)

- 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน

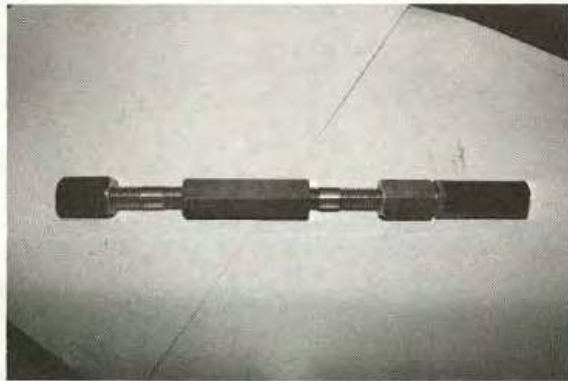
9.3.3. ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ลวดอัดแรง

ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ลวดอัดแรง ในคานสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง ในท่อของลวดอัดแรง จะมีลวดทั้งหมด 12 เส้น แต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลวดอัดแรงในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง จะมี 3 ลักษณะความเสียหายหลัก เริ่มตั้งแต่เมื่อคอนกรีตที่หุ้มลวดอัดแรงเกิดการกะเทาะออกจนหลุดออกมาเห็นเนื้อเหล็กโผล่ออกมา (Exposed) การสูญเสียเนื้อเหล็กหรือมีรอยร้าวในลวดอัดแรง (Damaged) จนถึงการสูญเสียลวดอัดแรงไป (Severed) ทุกรูปแบบ ในทุกความเสียหายจำเป็นต้องมีการปิดสะพานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างโดยทันที

ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

แนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับลวดอัดแรง เมื่อวิศวกรโครงสร้างประเมินแล้วพบว่าลวดอัดแรงมีการโผล่ออกมาเนื่องจากคอนกรีตที่หุ้มเกิดการกะเทาะหรือหลุดร่อนออกไป (Exposed) โดยส่วนใหญ่จะยังไม่พบความเสียหายในลวดอัดแรง เมื่อตรวจจากสายตา ซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการทดสอบหาแรงดึงที่เหลืออยู่ภายในเส้นลวดเพื่อตรวจสอบว่าแรงดึงในเส้นลวดมีค่าเพียงพอกับโครงสร้างที่ออกแบบไว้ ก่อนที่จะทำการปะซ่อมคอนกรีตให้กลับมาในสภาพเดิม โดยการปะซ่อมคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงต้องมีการทำ Preload ในระหว่างการปะซ่อม และต้องอยู่ในการควบคุมของวิศวกรโครงสร้าง แต่หากลวดอัดแรงภายในเกิดความเสียหาย (Damaged) หรือมีบางเส้นถูกตัดขาดไป (Severed) ควรมีการพิจารณาการเสริมกำลังแบบเสริมข้อต่อเหล็ก (Internal splicing) ดังรูปที่ 9-10 รูปที่ 3-4 หรือการอัดแรงภายนอก (External Post Tensioning) ดังรูปที่ 9-11 รูปที่ 3-5 หรือแม้แต่การใช้ประกบเหล็กข้อต่อเพิ่มเติม (Metal Sleeve Splicing) ดังรูปที่ 9-12 รูปที่ 3-6 ทุกรูปแบบหากมีความเสียหายที่มากเกินไป อาจพิจารณาสร้างคานคอนกรีตอัดแรงขึ้นมาใหม่แล้วนำมาแทนที่คานสะพานที่เสียหาย แต่วิธีนี้มักจะเป็นวิธีที่ต้องใช้งบประมาณสูงกว่าวิธีอื่นเนื่องจากต้องมีการรื้อส่วนของโครงสร้างเดิมออกก่อน



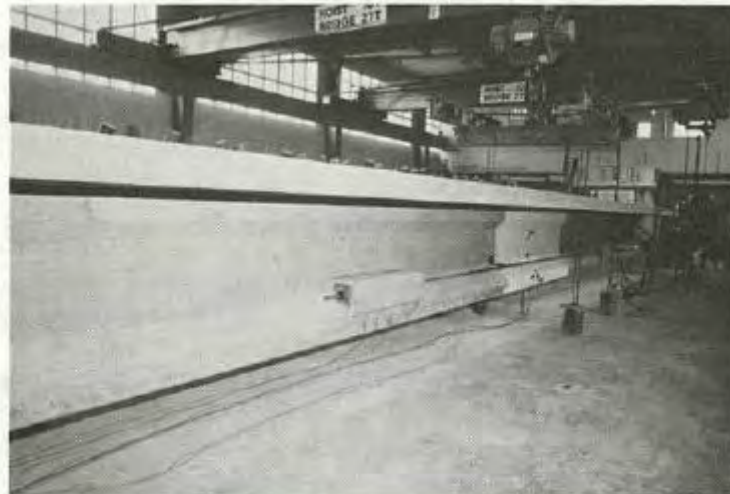


a. Single-Strand Splice



b. Single-Strand Splice Installed

รูปที่ 9-10 รูปที่ 3-4 การซ่อมลวดอัดแรงในคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบ Internal splicing



a. Post-Tensioned Rod and Corbel



b. U-Bolts and Support Bracket

รูปที่ 9-11 รูปที่ 3-5 การซ่อมคานคอนกรีตอัดแรงแบบ External Post Tension

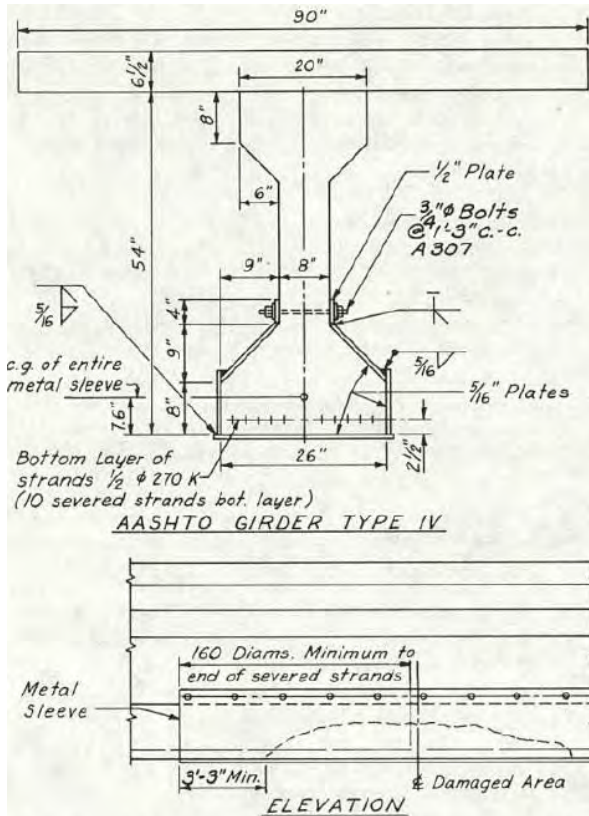
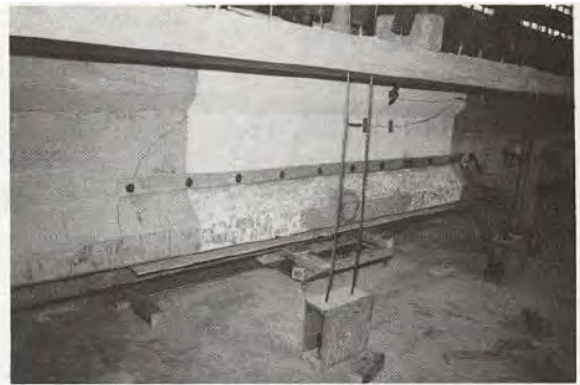
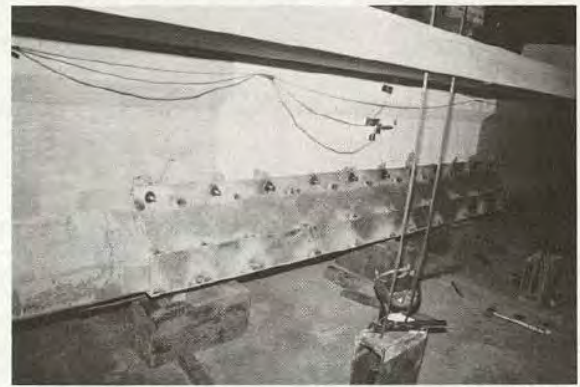


Figure 15. Metal sleeve splice.



a. Top Plate Bolted and Bottom Plate Jacked into Position



b. Sleeve Splice Tack Welded

Figure 16. Metal sleeve splice construction.

รูปที่ 9-12 รูปที่ 3-5 การซ่อมคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Metal Sleeve Splicing

สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณเวคาน (Web) เนื่องจากโครงสร้างบริเวณเวคานจะคล้ายคลึงกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและมีบริเวณที่เชื่อมอยู่กับค้ำยันคานสะพาน จึงจะใช้หลักการเดียวกับค้ำยันคานสะพานในหัวข้อต่อไป แต่มีข้อควรระวังคือการซ่อมคอนกรีตหรือเหล็กเสริมในบริเวณนี้ควรใช้ความระมัดระวังไม่ให้ผลกระทบต่อลวดอัดแรงภายในคาน

9.3.4. ความเสียหายของค้ำยันคานสะพาน

ค้ำยันคานสะพานของสะพานกิตติขจร ผังซ้ายทาง เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบดังกล่าวจะเป็นความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยความเสียหายสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต (Rust) และการเกิดรอยแตก (Crack)

สนิม (Rust) คือ การผุกร่อน (Corrosion) ของเหล็กที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของเหล็กกับน้ำและอากาศกลายเป็นสนิมของเหล็ก สีของสนิมเหล็กมีตั้งแต่สีแดงเข้มไปจนถึงสีน้ำตาลเข้ม สนิมที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมคอนกรีตจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ซึ่งทำให้เหล็กเสริมรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยลงไปด้วย นอกเหนือจากนี้ สนิมเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนที่มีปริมาณสูงซึ่ง



ก่อให้เกิดแรงดันในเนื้อคอนกรีต ด้วยเหตุนี้จึงก่อให้เกิดการกะเทาะของคอนกรีตซึ่งทำให้น้ำตัดของ
คานคอนกรีตลดลง รูปที่ 9-13 รูปที่ 3-6 แสดงสนิมที่เกิดขึ้นที่เหล็กเสริมและทำให้คอนกรีตกะเทาะ



รูปที่ 9-13 รูปที่ 3-6 สนิมที่เกิดขึ้นที่เหล็กเสริมและทำให้คอนกรีตกะเทาะ

9.3.4.1. แนวทางการดำเนินการหากเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต

- 1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม

ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

แนะนำให้ตรวจสอบและแก้ไขการรั่วซึมของน้ำและการสะสมความชื้นบริเวณที่เกิดสนิม จากนั้นให้เคาะคอนกรีตบริเวณจุดที่เกิดสนิมออก ขัดสนิมจากผิวเหล็กแล้วให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) หรือมอร์ต้า

- 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน

9.3.4.2. รอยแตก (Cracks)

รอยแตก (Cracks) เป็นความเสียหายที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นความเสียหายที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่สูงเกินหรือแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกจรทำให้คอนกรีตแตกร้าว รูปที่ 9-14 แสดงภาพจำลองรอยแตกที่สามารถเกิดขึ้นได้ทีบริเวณต่างๆ ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

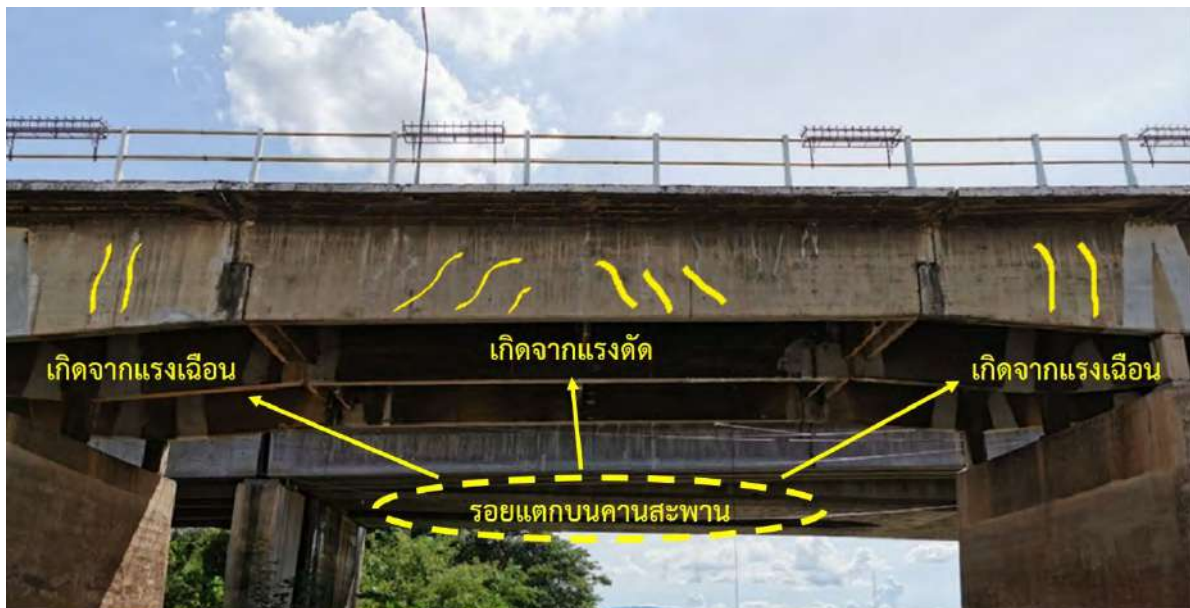
แนวทางการดำเนินการหากเกิดรอยแตกขึ้น

- 1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม

ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

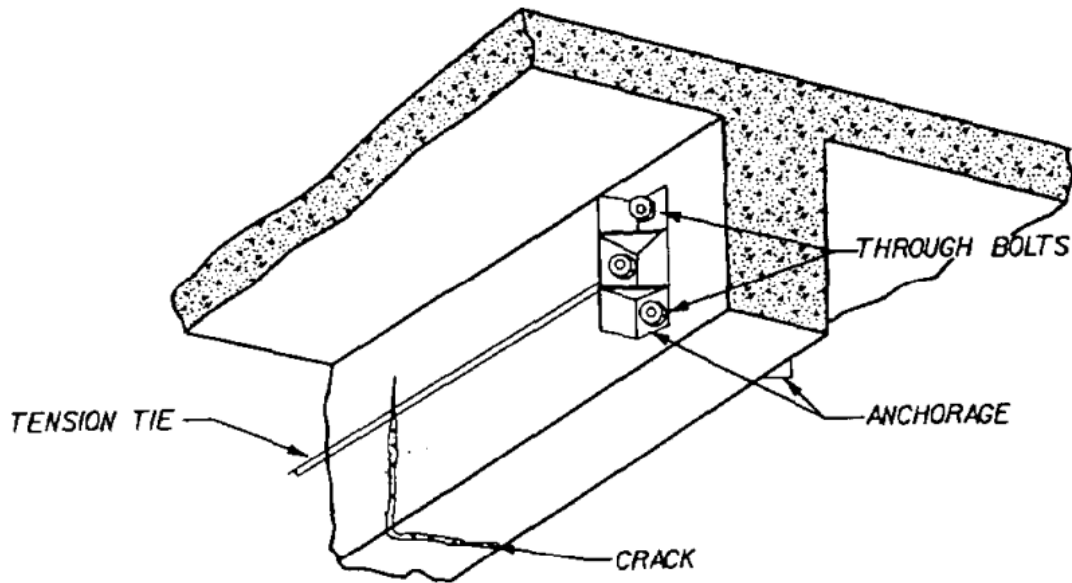
แนะนำให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) เนื่องจากรอยแตกอาจจะยังไม่หยุดขยายตัว (Active Cracks) นอกจากนี้ยังแนะนำให้ปิดรอยแตกด้วยการอัดแรงจากภายนอก (External Pre – stressing) โดยออกแบบการอัดแรงให้มั่นใจว่าพื้นสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวได้ตามเดิม ทำการเจาะรูทะลุคานทั้ง 2 ฝั่งแล้วยึด จากนั้นตรึงเหล็กเส้นเพื่อให้เกิดการอัดตัวของพื้นคอนกรีตซึ่งทำให้รอยแตกชิดเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 9-15

- 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน



รูปที่ 9-14 ภาพจำลองรอยแตกบริเวณต่าง ๆ ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก





รูปที่ 9-15 การปิดรอยแตกคานคอนกรีตโดยใช้เหล็กเส้นอัดแรงจากภายนอก

9.3.5. ความเสียหายของคานรัดเสาตอม่อและเสาตอม่อคอนกรีตได้แผ่นยางรองสะพาน

ความเสียหายที่มักพบเห็น คือ เกิดรอยแตกบริเวณคานรัดเสาตอม่อจุดที่รับคานสะพาน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรของสะพาน

แนวทางการดำเนินการหากเกิดความเสียหายกับคานรัดเสาตอม่อ

- 1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม

ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

แนะนำให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) เนื่องจากรอยแตกอาจจะยังไม่หยุดขยายตัว (Active Cracks) แนะนำให้ปิดรอยแตกด้วยการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์อัดแรง (Pre-stressed Carbon Fiber) หรือวิธีอื่น ๆ ที่เหมาะสม

- 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน

9.3.6. ความเสียหายของตอม่อและฐานรากสะพาน

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างตอม่อและฐานรากสะพานจะเป็นความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยความเสียหายสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ การเกิดการกระแทะของคอนกรีตเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่อยู่ผิวน้ำซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาซัลเฟตในคอนกรีต (Sulfate Attack) ได้ง่าย และการหลุมกัดเซาะ (Scour) รอบ ๆ ตอม่อและฐานรากสะพานจากวัสดุท้องน้ำและการไหลของกระแสน้ำ

9.3.6.1. แนวทางการดำเนินการหากเกิดความเสียหายเนื่องจากการปฏิกิริยาซัลเฟต

- 1) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม
- 2) แนะนำให้เคาะคอนกรีตบริเวณจุดที่เกิดการกระแทะออก ขัดสนิมจากผิวเหล็กแล้วให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) หรือมอร์ต้า

9.3.6.2. แนวทางการดำเนินการหากเกิดความเสียหายเนื่องจากหลุมกัดเซาะ

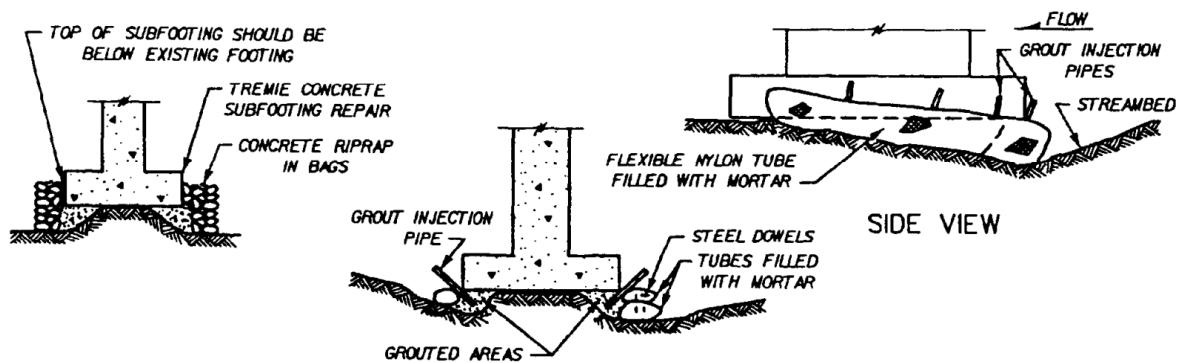
- 1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม

ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา

แนะนำให้ใช้วิธีการอัดฉีดคอนกรีต (Concrete Grout) ดังแสดงในรูปที่ 9-16 เพื่อให้คอนกรีตไปปิดหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้น ทำให้หน่วยแรงแบกทานบริเวณตอม่อและฐานรากสะพานเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอ้างอิงได้จาก Bridge Inspection, Maintenance, and repair (TM 5-600/AFJPM 32-1088) หรือวิธีอื่น ๆ ที่เหมาะสม



3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน



รูปที่ 9-16 การอัดฉีดคอนกรีตเพื่อปิดหลุมกัดเซาะบริเวณใต้ตอม่อและฐานรากสะพาน

9.3.7. ความเสียหายของแผ่นรองคานสะพานประเภทยางเสริมแผ่นเหล็ก

ความเสียหายที่มักพบเห็น คือ การเสื่อมสภาพของแผ่นยาง เช่น การบวมปลิ้น การยุบตัว การแข็งแตกกลายา

แนวทางการดำเนินการหากเกิดความเสียหาย

- 1) ตัดป้ายเตือนชะลอความเร็วก่อนขึ้นสะพาน
- 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการยกเปลี่ยนแผ่นรองคานสะพาน

9.3.8. ความเสียหายของรอยต่อพื้นสะพาน

การรั่วซึมและการสะสมของตะกอนดินและฝุ่นเป็นความเสียหายที่พบบ่อยที่สุดของรอยต่อพื้นสะพาน

แนวทางการดำเนินการหากเกิดความเสียหาย

- 1) ให้ทำความสะอาดรอยต่อโดยฉีดล้างรอยต่อด้วยน้ำแรงดันสูง
- 2) หากพบการรั่วซึมให้เปลี่ยนยางกันซึม (Elastomeric Compression Set)

9.3.9. ความเสียหายของผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต

ความเสียหายที่มักเกิดขึ้นกับผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ การเกิดร่องล้อ (Rutting) และผิวลื่น (Polishing)

แนวทางการดำเนินการหากเกิดความเสียหาย

- 1) ติดป้ายเตือนชะลอความเร็วก่อนขึ้นสะพาน
- 2) ปลูกฝังจราจรใหม่

9.4 แผนการการตรวจสอบสะพานภายหลังจากการบูรณะ

การตรวจสอบสะพานเป็นการตรวจสอบหาความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่าง
ของสะพานตามที่กล่าวในหัวข้อที่ 3

เพื่อความสะดวกและความเป็นระบบในการตรวจสอบสะพาน การตรวจสอบสะพานจะแบ่ง
ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection) การตรวจสอบใหญ่ (Principal
Inspection) และการตรวจสอบเชิงป้องกัน (Preventive Inspection) รายละเอียดของการตรวจสอบแต่ละ
ประเภทมีดังนี้

9.4.1. การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection)

9.4.1.1. หลักการ

การตรวจสอบปกติจัดทำขึ้นเพื่อให้มั่นใจว่าสะพานอยู่ในสภาพที่เหมาะสมกับผู้ใช้ทางมีความ
ราบรื่นและปลอดภัยในการขับขี่ (Good Housekeeping)

9.4.1.2. รอบการตรวจสอบ

1 ปี หรือน้อยกว่า ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่จะทำการตรวจสอบ

9.4.1.3. องค์ประกอบที่ทำการตรวจสอบ

องค์ประกอบอื่นๆ (Miscellaneous Elements) ทั้งหมดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 (3) ได้แก่

- 1) แผ่นรองคานสะพานประเภทยางเสริมแผ่นเหล็ก (Steel Reinforced Elastomeric Bearing Pad)
- 2) รอยต่อพื้นสะพาน (Compression Seal Joint)
- 3) ผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต (AC Overlay)

9.4.1.4. แนวทางการตรวจสอบ

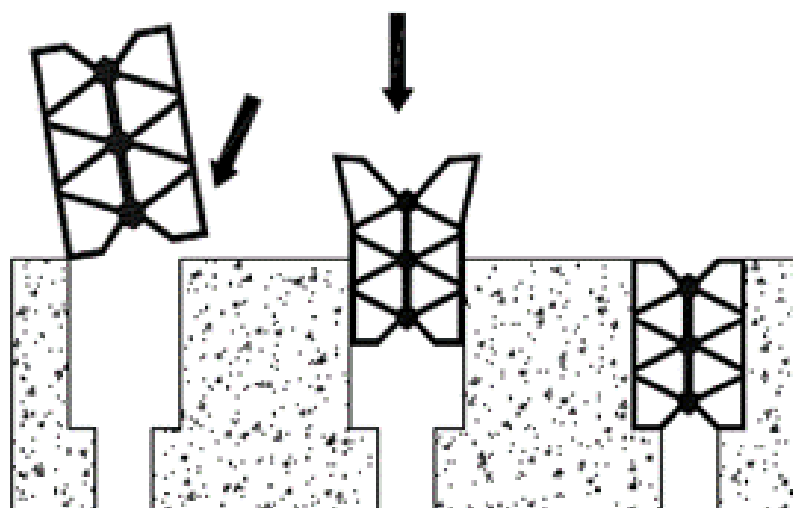
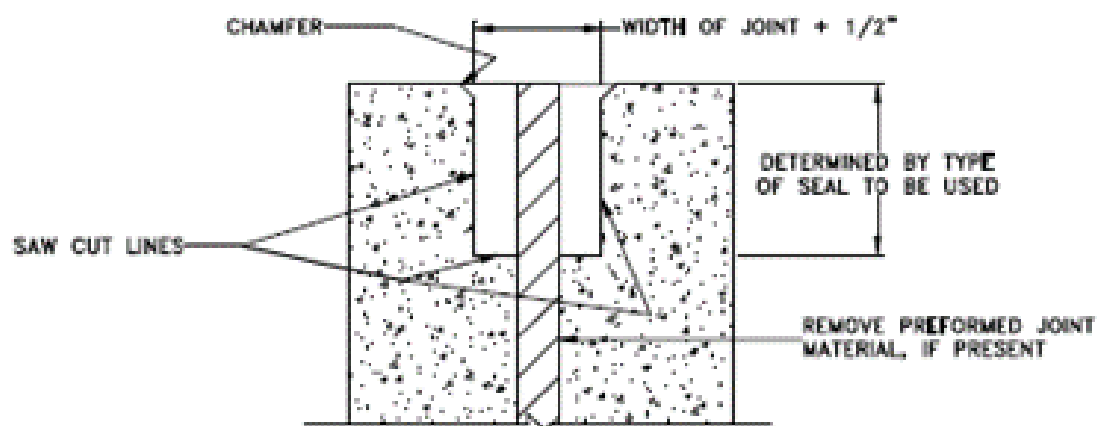
แนวทางการตรวจสอบองค์ประกอบต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 9-1



ตารางที่ 9-1 แนวทางการตรวจสอบปกติ (Routine Inspection)

องค์ประกอบ	ความเสียหายที่ตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	รอบการตรวจสอบ	แนวทางการแก้ไขหากพบความเสียหาย
1) แผ่นรองคานสะพานประเภทยางเสริมแผ่นเหล็ก (Steel Reinforced Elastomeric Bearing Pad)	การเสื่อมสภาพของแผ่นยาง เช่น การบวมปลิ้น การยุบตัว การแข็งแตกกระจาย	สายตา (Visual Inspection)	1 ปี	1) ตัดป้ายเตือนชะลอความเร็วก่อนขึ้นสะพาน 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการยกเปลี่ยนแผ่นรองคานสะพาน
2) รอยต่อพื้นสะพาน (Compression Seal Joint)	การรั่วซึมและการสะสมของตะกอนดินและฝุ่น	สายตา (Visual Inspection)	1 ปี	1) ทำความสะอาดรอยต่อโดยฉีดล้างรอยต่อด้วยน้ำแรงดันสูง 2) หากพบการรั่วซึมให้เปลี่ยนยางกันซึม (Elastomeric Compression Set)*
3) ผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต (AC Overlay)	การเกิดร่องล้อ (Rutting) และผิวสีน้ (Polishing)	สายตา (Visual Inspection)	1 ปี	1) ตัดป้ายเตือนชะลอความเร็วก่อนขึ้นสะพาน 2) ปูผิวจราจรใหม่

*รอยต่อพื้นสะพานกิตติขจร ฝั่งซ้ายทาง เป็นแบบ compression seal โดยมีบารองรับรอยต่อเป็นคอนกรีต non shrink และมีแผ่นเหล็กกั้นระหว่างรอยต่อและพื้นถนนแบบ Asphalt ดังรูปที่ 9-6 การเปลี่ยนยางกันซึม จึงจำเป็นต้องมีการสกัดคอนกรีตบารองรับรอยต่อและนำเหล็กกั้นออกก่อนนำยางกันซึมเก่าออกแล้วทำความสะอาดบริเวณรอยต่อ และทำบารองคอนกรีตใหม่ แล้วจึงทำการเคลือบน้ำยาก่อนการใส่ยางกันซึมใหม่ลงไป ดังตัวอย่างรูปด้านล่าง โดยการเปลี่ยนยางกันซึม จำเป็นต้องมีการปิดการจราจร เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของแผ่นพื้นสะพาน



Exist. Joint Width	Width of Saw Cut	Size of Joint Seal
1/2 in.	1 in.	1 9/16 in.
1 in.	1 1/2 in.	2 1/4 in.
2 in.	2 5/8 in.	3 5/8 in.
2 5/8 in.	3 in.	4 in.
3 in.	3 5/8 in.	5 in.

รูปที่ 9-17 การเปลี่ยนยางกันซึมสำหรับ compression seal และตารางขนาดรอยต่อพื้นสะพาน สำหรับการเลือกขนาดยาง



9.4.2. การตรวจสอบใหญ่ (Principal Inspection)

9.4.2.1. หลักการ

การตรวจสอบใหญ่จัดทำขึ้นเพื่อตรวจหาความเสียหายที่คาดว่าจะกระทบต่อความมั่นคงแข็งแรง
ของโครงสร้างสะพาน (Damage Detection)

9.4.2.2. รอบการตรวจสอบ

2 ปี หรือน้อยกว่า

9.4.2.3. องค์ประกอบที่ทำการตรวจสอบ

โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ทั้งหมดตามที่ได้
กล่าวในหัวข้อ 2 (1) และ 2 (2) ได้แก่

- 1) พื้นสะพานคอนกรีต (Concrete Deck Slab)
- 2) คานสะพาน (Main Beams)
- 3) คานค้ำยัน (Bracing)
- 4) คานรัดเสาตอม่อ (Cap Beams)
- 5) ตอม่อและฐานราก (Pier and Foundation)

9.4.2.4. แนวทางการตรวจสอบ

แนวทางการตรวจสอบองค์ประกอบต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 9-2 ถึง ตารางที่ 9-6

ตารางที่ 9-2 แนวทางการตรวจสอบใหญ่ (Principal Inspection)

วัสดุ: คอนกรีต (Concrete) องค์ประกอบ: พื้นสะพาน (Deck Slab)

ความเสียหายที่ ตรวจสอบ	บริเวณที่ ตรวจสอบ	วิธีการ ตรวจสอบ	แนวทางการแก้ไขหากพบความเสียหาย
รอยแตกเนื่องจากการเสื่อมสภาพของ คอนกรีต (Durability Cracks or D-cracks)	ท้องพื้นใกล้กับ รอยต่อพื้น สะพาน	สายตา (Visual Inspection)	1) ตรวจสอบและแก้ไขการรั่วซึมของน้ำหรือการสะสม ความชื้นบริเวณที่คอนกรีตเสื่อมสภาพ 2) ซ่อมผิวหน้าคอนกรีตส่วนที่เสื่อมสภาพด้วยวิธีสกัด ฉาบด้วยมอร์ต้ากำลังอัดสูงชนิดไม่หดตัว (Non-shrink Rapid Strength Mortar) โดยในระหว่างการซ่อมให้ปิด จราจรบนสะพานเพื่อไม่ให้เกิดแรงกระแทก
รอยแตกเดี่ยว (Individual Cracks)	ท้องพื้น		1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา สะพานเพื่อออกแบบซ่อมรอยแตก ขอแนะนำสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา ให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) เนื่องจากรอยแตกอาจจะยังไม่ หยุดขยายตัว (Active Cracks) นอกจากนี้ยังแนะนำให้ปิดรอยแตก ด้วยการอัดแรงจากภายนอก (External Pre – stressing) โดย ออกแบบการอัดแรงให้มั่นใจว่าพื้นสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุก ตายตัวได้ตามเดิม การอัดแรงจากภายนอกสามารถทำได้โดยการใช้ เหล็กยึด (Tie Rod) ระหว่างคาน 2 คาน บริเวณที่มีรอยแตกเดี่ยว ทำ การดึงเพื่อให้เกิดการอัดตัวของพื้นคอนกรีตซึ่งทำให้รอยแตกชิดเข้า หากัน 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมภายใต้การควบคุมของ วิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน

ตารางที่ 9-3 แนวทางการตรวจสอบใหญ่ (Principal Inspection)

วัสดุ: คอนกรีต (Concrete) องค์ประกอบ: คานสะพาน (Main Beams)

ความเสียหายที่ตรวจสอบ	บริเวณที่ตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	แนวทางการแก้ไขหากพบความเสียหาย
รอยหลุดร่อน (Spalling) และรอยแตก (Cracking) ที่คอนกรีต	บริเวณปีกคานด้านล่างและท้องคาน	สายตา (Visual Inspection)	<p>1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม</p> <p>2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม</p> <p><u>ข้อแนะนำสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา</u></p> <p>ต้องมีการตรวจสอบว่าความเสียหายจากการหลุดร่อนหรือการแตกร้าวเข้าไปถึงบริเวณลวดอัดแรงหรือไม่ และการซ่อมปะคอนกรีตต้องมีการทำ Preload เพื่อเป็นการจำลองการอัดแรงแล้วค่อยอุดรอยหลุดร่อนหรือรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) หรือมอร์ต้า (Non-shrink Rapid Strength Mortar)</p>
ลวดอัดแรงเกิดความเสียหาย	บริเวณปีกคานด้านล่างและท้องคาน		<p>1) ห้ามรถทุกประเภทใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม</p> <p>2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม</p> <p><u>ข้อแนะนำสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา</u></p> <p>มักจะเกิดจากคอนกรีตหลุดร่อนหรือแตกร้าวมาก่อน หากมีความเสียหายเกิดขึ้นกับลวดอัดแรงต้องมีการตรวจสอบถึงประสิทธิภาพของลวดที่เหลืออยู่ ก่อนที่จะออกแบบการซ่อมได้</p>

ตารางที่ 9-4 แนวทางการตรวจสอบใหญ่ (Principal Inspection)

วัสดุ: คอนกรีต (Concrete) องค์ประกอบ: คานค้ำยัน (Bracing)

ความเสียหายที่ตรวจสอบ	บริเวณที่ตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	แนวทางการแก้ไขหากพบความเสียหาย
สนิมที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมคอนกรีต (Rust)	บริเวณที่มีความชื้นสะสม ไกล่ผิวดิน หรือ รอยต่อพื้นสะพาน	สายตา (Visual Inspection)	1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม <u>ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา</u> แนะนำให้ตรวจสอบและแก้ไขการรั่วซึมของน้ำและการสะสมความชื้นบริเวณที่เกิดสนิม จากนั้นให้เคลือบบริเวณจุดที่เกิดสนิมออก ชัดสนิมจากผิวเหล็กแล้วให้อูครอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) หรือมอร์ต้า (Non-shrink Rapid Strength Mortar)
รอยแตก (Cracks)	บริเวณใกล้จุดรองรับและกึ่งกลางคาน	สายตา (Visual Inspection)	1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพานเพื่อออกแบบซ่อม <u>ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา</u> แนะนำให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) เนื่องจากรอยแตกอาจจะยังไม่หยุดขยายตัว (Active Cracks) นอกจากนี้ยังแนะนำให้ปิดรอยแตกด้วยการอัดแรงจากภายนอก (External Pre – stressing) โดยออกแบบการอัดแรงให้มั่นใจว่าพื้นสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวได้ตามเดิม ทำการเจาะรูทะลุคานทั้ง 2 ฟังแล้วยึด จากนั้นตรึงเหล็กเส้นเพื่อให้เกิดการอัดตัวของพื้นคอนกรีตซึ่งทำให้รอยแตกชิดเข้าหากัน 3) ดำเนินการซ่อมตามแบบซ่อมโดยช่างเทคนิคที่มีความเชี่ยวชาญ ภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน



ตารางที่ 9-5 แนวทางการตรวจสอบใหญ่ (Principal Inspection)

วัสดุ: คอนกรีต (Concrete) องค์ประกอบ: คานรัดเสาตอม่อ (Cap Beam)

ความเสียหายที่ ตรวจสอบ	บริเวณที่ ตรวจสอบ	วิธีการ ตรวจสอบ	แนวทางการแก้ไขหากพบความเสียหาย
รอยแตก	บริเวณจุด รองรับคาน สะพานและเสา ตอม่อ	สายตา (Visual Inspection)	1) ห้ามรถทุกประเภทใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน เพื่อออกแบบซ่อม <u>ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา</u> แนะนำให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) เนื่องจากรอยแตกอาจจะยัง ไม่หยุดขยายตัว (Active Cracks) แนะนำให้ปิดรอยแตกด้วยการใช้ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์อัดแรง (Pre-stressed Carbon Fiber) หรือวิธี อื่นๆที่เหมาะสม 3) ดำเนินการซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกรโครงสร้าง หรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน

ตารางที่ 9-6 แนวทางการตรวจสอบใหญ่ (Principal Inspection)

วัสดุ: คอนกรีต (Concrete) องค์ประกอบ: ตอม่อและฐานราก (Pier and Foundation)

ความเสียหาย ที่ตรวจสอบ	บริเวณที่ ตรวจสอบ	วิธีการ ตรวจสอบ	แนวทางการแก้ไขหากพบความเสียหาย
รอยแตก (Crack)	หัวตอม่อ สะพาน และ บริเวณ รอบๆ	สายตา (Visual Inspection)	1) ห้ามรถบรรทุกตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถบรรทุก 10 ล้อ) ขึ้นไปใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา สะพานเพื่อออกแบบซ่อม <u>ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่าย บำรุงรักษา</u> แนะนำให้ตรวจสอบและแก้ไขการรั่วซึมของน้ำและการ สะสมความชื้นบริเวณที่เกิดรอยแตก จากนั้นให้เคาะ คอนกรีตบริเวณจุดที่เกิดสนิมออก ขัดสนิมจากผิวเหล็ก และแนะนำให้อุดรอยแตกด้วยอีพอกซี (Epoxy) หรือมอร์ตาร์ ตัว (Non-shrink Rapid Strength Mortar)
การกัดเซาะ รอบตอม่อ สะพาน (Scour)	รอบๆ ตอม่อและ ฐานราก สะพาน	สายตา (Visual Inspection) และ การ สำรวจ โครงสร้างใต้ น้ำด้วย วิธีการสแกน ด้วยโซนาร์ (SONAR)	1) ห้ามรถทุกประเภทใช้สะพานระหว่างรอการซ่อม 2) แจ้งวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา สะพานเพื่อออกแบบซ่อม <u>ข้อเสนอแนะสำหรับวิศวกรโครงสร้างหรือวิศวกรฝ่าย บำรุงรักษา</u> แนะนำให้ใช้วิธีการอัดฉีดคอนกรีต (Concrete Grout) เพื่อให้คอนกรีตไปปิดหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้น ทำให้หน่วย แรงแบกทานบริเวณตอม่อและฐานรากสะพานเพิ่มขึ้นซึ่ง สามารถอ้างอิงได้จาก Bridge Inspection, Maintenance, and repair (TM 5-600/AFJPAM 32-1088) หรือวิธีอื่นๆ ที่เหมาะสม 3) ดำเนินการซ่อมภายใต้การควบคุมของวิศวกร โครงสร้างหรือวิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาสะพาน



9.4.3. การตรวจเชิงป้องกัน (Preventive Inspection)

9.4.3.1. หลักการ

การตรวจสอบเชิงป้องกันจัดทำขึ้นเพื่อตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน เพื่อให้แน่ใจว่าสะพานยังคงสามารถรองรับการจราจรที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างปลอดภัย เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ

9.4.3.2. รอบการตรวจสอบ

6 ปี หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานการออกแบบ

9.4.3.3. องค์ประกอบที่ทำการตรวจสอบ

โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure)

9.4.3.4. แนวทางการตรวจสอบ

อาศัยข้อมูลตรวจวัดสะพาน (ความเครียดและความเร่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างสะพาน) ภายใต้การจราจรปกติที่จากระบบ Long-term Health Monitoring ซึ่งคาดว่าจะได้ทำการติดตั้งไว้ในกรณีที่ไม่สามารถใช้ข้อมูลจาก Long-term Health Monitoring ได้ ให้ทำการเก็บข้อมูลแบบ Short-term เป็นเวลาอย่างน้อย 3 เดือนก่อนครบกำหนดรอบการตรวจสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลตรวจวัดเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักให้ใช้แนวทางที่ได้จัดทำไว้แล้วในรายงานฉบับสุดท้าย (Final Report) โครงการศึกษาจัดทำแนวทางบูรณะสะพานประวัติศาสตร์ของกรมทางหลวงที่ก่อสร้างก่อนปี พ.ศ. 2500 ปี พ.ศ. 2563 โดยสำนักวิจัยและพัฒนาทาง หรืออาจใช้แนวทางอื่น ๆ ที่เหมาะสมตามดุลยพินิจของวิศวกรผู้ประเมิน

9.5 เอกสารอ้างอิง

- 1) NCHRP 226. Damage Evaluation and Repair Methods for Prestressed Concrete Bridge Members, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1980).
- 2) NCHRP 280. Guidelines for Evaluation and Repair of Prestressed Concrete Bridge Members, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1985).
- 3) TM 5-600/AFJPAM 32-1088. Bridge Inspection, Maintenance, and repair, Departments of the Army and the Air Force, Washington, D.C. (1994).
- 4) Bridge Maintenance & Repair Handbook, Office of Maintenance, Florida Department of Transportation, Florida (2019).



บทที่ 10 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ การเสริมกำลังสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางใต้พิจารณาการปรับปรุงขยายผิวจราจรบนสะพานตามความประสงค์ของสำนักงานทางหลวงที่ 4 (ตาก) ควบคู่ไปกับการเสริมกำลังด้วย โดยก่อนการออกแบบเสริมกำลังได้ทำการตรวจสอบสภาพปัจจุบันของสะพาน ได้แก่ การสำรวจความเสียหายด้วยสายตา การตรวจวัดแรงดึงในลวดอัดแรงด้วยวิธี Crossbow การเจาะทดสอบวัสดุ และการตรวจวัดพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน รวมถึงการคาดการณ์การจราจรของรถบรรทุกหนักที่สัญจรผ่านสะพาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประกอบการประเมินกำลังรับน้ำหนักและพิจารณาการเสริมกำลังในลำดับถัดไป

ผลการตรวจสอบสภาพปัจจุบันของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง พบว่า ค่าต่างๆ ยังคงอยู่ในเกณฑ์ปกติ ยกเว้น กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพาน ซึ่งมีความแปรปรวนที่ค่อนข้างสูง และมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่าระบุออกแบบถึงประมาณ 15% และระยะความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่เกินกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มในการที่เหล็กเสริมจะเกิดการกัดกร่อนได้โดยง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของพื้นสะพาน ความแปรปรวนของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตคานสะพานได้ถูกนำมาพิจารณาในการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของคานสะพาน โดยในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยในช่วง ค่าเฉลี่ย ± 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของคานสะพาน ส่วนในกรณีแนวโน้มที่เหล็กเสริมจะเกิดการกัดกร่อนจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้แนะนำให้ทำผิวคอนกรีตด้วยน้ำยาป้องกันเกลือผสมสภาพ

การประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทางอาศัยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพาน โดยพิจารณาสภาพปัจจุบันและการปรับปรุงขยายผิวจราจรบนสะพาน ผลการประเมิน พบว่า ส่วนของโครงสร้างที่ต้องได้รับการเสริมกำลัง ได้แก่ พื้นและคานสะพาน การเสริมกำลังพื้นพิจารณาการเสริมกำลังโดย การเพิ่มความหนาพื้นด้านล่างด้วย Shotcrete การเพิ่มความหนาพื้นด้านบนด้วย Ultra High Performance Concrete (UHPC) และการเพิ่มคานทางขวางรองรับพื้น รวมถึงการพิจารณาหรือพื้นเดิมทิ้งและก่อสร้างพื้นใหม่ทดแทน การเสริมกำลังคานพิจารณา การเพิ่มการอัดแรงคาน และการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

การวิเคราะห์หาแนวทางการเสริมกำลังคานและพื้นสะพานที่เหมาะสมได้พิจารณาการเสื่อมสภาพของคานและพื้นสะพานภายหลังจากเสริมกำลังร่วมกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น โดยแนวทางการเสริมกำลังที่ทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าเสริมกำลังและค่าปรับปรุงขยายผิว

จรรยา ญ ปีปัจจุบันและค่าก่อสร้างสะพานใหม่ในอนาคตเมื่อคำนวณสภาพเสื่อมสภาพจนสิ้นอายุการใช้งานภายหลังจากการเสริมกำลังเทียบต่ออายุบริการภายหลังจากการเสริมกำลังมีค่าต่ำที่สุด จะถือว่าเป็นแนวทางการเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด การเสื่อมสภาพพิจารณาเฉพาะปัจจัยจากการใช้งาน ได้แก่ ความล้าที่เกิดขึ้นกับพื้นและคานสะพานเนื่องจากการจราจรของรถบรรทุก การประเมินการเสื่อมสภาพอาศัยสมการความล้าของพื้นสะพานคอนกรีตและคานคอนกรีตอัดแรงที่ได้เคยมีการศึกษาไว้แล้ว ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานได้พิจารณาอัตราคิดลดทั้งระดับต่ำ ปานกลาง และสูง

แนวทางการเสริมกำลังคานและพื้นสะพาน 5 แนวทางได้ถูกนำมาพิจารณา ได้แก่

แนวทางที่ 1: อัดแรงคาน เสริมความหนาพื้นด้วย Shotcrete ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

แนวทางที่ 2: อัดแรงคาน เสริมความหนาพื้นด้วย UHPC ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

แนวทางที่ 3: อัดแรงคาน เสริมคานทางขวาง ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2615 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 49 ปี

แนวทางที่ 4: อัดแรงคาน ปีพ.ศ. 2566 / รื้อพื้นเดิมทิ้ง ก่อสร้างพื้นใหม่ ปีพ.ศ. 2585 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2614 แนวทางนี้ สะพานมีอายุการใช้งาน 48 ปี

แนวทางที่ 5: ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2566 / ก่อสร้างสะพานใหม่ ปีพ.ศ. 2641 แนวทางนี้ สะพานที่ก่อสร้างใหม่ปีพ.ศ. 2566 จะถือให้มีอายุการใช้งาน 75 ปี ตามมาตรฐานอายุออกแบบใช้งานของสะพานที่ก่อสร้างใหม่

ผลการวิเคราะห์ พบว่า แนวทางที่ 4 การเพิ่มการอัดแรงคานปีพ.ศ. 2566 การรื้อพื้นสะพานเดิมทิ้งและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ปีพ.ศ. 2585 และการก่อสร้างสะพานใหม่ปีพ.ศ. 2614 มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเทียบต่ออายุการใช้งานต่ำที่สุด จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมและแนะนำให้ใช้เป็นแนวทางในการเสริมกำลังปรับปรุงสะพานกิตติขจรฝั่งซ้ายทาง โดยได้จัดทำแบบรายละเอียดการเสริมกำลัง รายการประมาณราคา และแผนการตรวจสอบสะพานเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อไป

จัดทำโดย ภูวิศร อ้อแสงชัย

บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด

เลขที่ 1558/46 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนาใต้

เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260