

รายละเอียดของโครงการ

ผู้ว่าจ้าง	สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
ผู้รับจ้าง	บริษัท ไอเอ็มเอ็มเอส จำกัด และ บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด
เลขที่สัญญา	สจ.1/2558 ลงวันที่ 25 ธันวาคม 2557
วันเริ่มโครงการ	วันที่ 26 ธันวาคม 2557
วันสิ้นสุดโครงการ	วันที่ 20 พฤศจิกายน 2558
ระยะเวลาดำเนินงาน	330 วัน
มูลค่าโครงการ	11,876,000 บาท

คณะกรรมการกำกับโครงการ

1. นายวิเชียร	มหาอำรชัย	ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและ พัฒนางานทาง	ประธานกรรมการ
2. นายปกรณ์	มิลินทะเลข	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ	กรรมการ
3. นายกมล	ท่าเรือรักษ์	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	กรรมการ
4. นายพรชัย	ศิลาธรรมย์	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	กรรมการ
5. ดร.สุกิจ	ยินดีสุข	วิศวกรโยธาชำนาญการ	กรรมการ
6. ดร.อภิชัย	อิสริยานุกูล	วิศวกรโยธาชำนาญการ	กรรมการ
7. ดร.ไชยวัฒน์	ณ เชียงใหม่	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	กรรมการ
8. นางสาวชุติมา	โพธิอยู่	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	กรรมการ
9. ดร.ราชวัลลภ	กัมพูพงศ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	กรรมการและวิศวกรกำกับโครงการ

บุคลากรบริหารโครงการ

1. นายจิตรพงศ์	กฤตยเรืองโรจน์	ผู้จัดการโครงการ
2. ดร.วิมล	ลาวัณยวิสุทธิ	วิศวกรผู้เชี่ยวชาญด้านการตรวจสอบและบำรุงสะพาน
3. ผศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	วิศวกรผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบสะพาน
4. ดร.สุภสิทธิ์	ศิริศักดิ์	วิศวกรผู้เชี่ยวชาญด้านกลศาสตร์และวิเคราะห์โครงสร้าง
5. ดร.โชติ	สรณาคมน์	วิศวกรผู้ช่วยด้านการตรวจสอบและบำรุงสะพาน
6. นายสุภชัย	อิสรางกูร ณ อยุธยา	วิศวกรผู้ช่วยด้านการทดสอบสะพาน
5. นายปรเมศวร์	ภูประเสริฐ	วิศวกรผู้ช่วยด้านกลศาสตร์และวิเคราะห์โครงสร้าง
8. นางสาววโรทัย	ศุนาลัย	เลขานุการโครงการ

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการประเมินศักยภาพในการให้บริการของโครงสร้างส่วนบนของสะพานดินสุลันนาห์ส่วนเหนือช่วงเกาะยอ-สิงหนคร ทั้งสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ซึ่งผ่านการใช้งานมา 29 ปี นับถึงปี 2558 และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ซึ่งผ่านการใช้งานมา 10 ปี สะพานทั้งสองฝั่งมีโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตรูปกล่อง ซึ่งเป็นรูปแบบโครงสร้างที่เสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกจร การประเมินศักยภาพในการให้บริการครอบคลุมการประเมินความล้าที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน และการประเมินกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตและรอยต่อระหว่างคานคอนกรีต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกจร โดยการประเมินต่างๆ อาศัยผลการตอบสนองของโครงสร้างที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากการตรวจวัด ประกอบกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ผลการประเมินสรุปว่า สะพานดินสุลันนาห์ส่วนเหนือทั้งสองฝั่งยังคงมีศักยภาพในการให้บริการได้ตามปกติ แต่ควรริบทำการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิมตามที่ได้ตรวจพบ และควรริบทำการเสริมกำลังพื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) เพื่อเป็นการเพิ่ม membrane action ให้กับพื้นสะพาน ลดค่าความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกจรให้มีระดับต่ำลง กรมทางหลวงควรกำหนดให้มีการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานทั้งสองฝั่งอีกครั้งในอีก 10 ปีข้างหน้า นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแผนกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิบนหน้าตัดคานคอนกรีตรูปกล่อง ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน เพื่อนำมาใช้ประกอบการออกแบบโครงสร้างสะพานคานคอนกรีตรูปกล่องในประเทศไทย

Abstract

Performance evaluation of the superstructure of Northern Tinsulanonda Bridges was conducted in this research. The evaluated bridges were the out-bound bridge or the old bridge, 29 years old of age, and the in-bound bridge or the new bridge, 10 years old of age. Both of them are segmentally constructed concrete box girder type bridges, which are considered to be sensitive to daily temperature variation and truck traffic excitation. The performance evaluation covered the fatigue evaluation of concrete box girder and bridge's expansion joint, and the capacity evaluation of concrete box girder and its segmental joint subjected to daily temperature variation and truck traffic excitation. The evaluations were conducted based on field measurement supplemented with Finite Element analyses. The result of evaluations reveals that both bridges are still capable of performing their functions. However, immediate strengthening of the soffit of the deck slab at and around the mid-span segments of the old bridge should be undertaken. This is to increase membrane action to the deck slab which helps lessen the incremental strains induced by daily temperature variation and truck traffic excitation. All detected distresses should also be repaired to prolong the service life of both bridges. Department of Highways should set up the evaluation programs of these two bridges in the next 10 years to validate their performances. This research also proposes the temperature gradient for the analysis of thermal stress in the concrete box girder section as the supplementary to the design of concrete box girder type bridge in Thailand.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
Abstract	
สารบัญ	ก
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-4
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	1-5
บทที่ 2 การตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน	
2.1 การตรวจสอบสภาพความเสียหายของสะพาน	2-1
2.2 การตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน	2-12
2.3 รายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)	2-16
2.4 รายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)	2-20
2.5 สรุปผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน	2-23
บทที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	3-1
3.2 วิธีการทดสอบ	3-2
3.3 ตำแหน่งการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	3-4
3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	3-6
3.5 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	3-23
บทที่ 4 การตรวจวัดสะพาน	
4.1 อุปกรณ์การตรวจวัด	4-1
4.2 การจัดทำแบบติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด	4-3
4.3 การเตรียมพื้นที่และติดตั้งอุปกรณ์	4-6
4.4 การตรวจวัดสะพานภายใต้การจราจรปกติ	4-10
4.5 การตรวจวัดสะพานภายใต้การควบคุมน้ำหนักบรรทุกจร	4-28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ข้อมูลสภาพอากาศ	
5.1 ข้อมูลอุณหภูมิ	5-1
5.2 ข้อมูลความเร็วลม	5-4
5.3 ค่ารังสีแสงอาทิตย์	5-6
บทที่ 6 การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของคานและรอยต่อระหว่างคาน	
6.1 รายละเอียดของมาตรฐานการออกแบบและวิเคราะห์สะพานประเภท Segmental Box Girder ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD	6-2
6.2 ขั้นตอนการประเมินโครงสร้างสะพานประเภท Segmental Box Girder รวมกับผลของอุณหภูมิ	6-15
6.3 รายละเอียดของแบบก่อสร้างและรูปแบบของโครงสร้างสะพานที่จะดำเนินการวิเคราะห์	6-17
6.4 รายละเอียดของแบบจำลองของสะพานที่ได้ปรับแก้กับข้อมูลตรวจวัด	6-27
6.5 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์อุณหภูมิของหน้าตัดสะพาน	6-33
6.6 การวิเคราะห์แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในหน้าตัดสะพานเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient	6-44
6.7 การวิเคราะห์แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในหน้าตัดสะพานเนื่องจาก Construction Stage Analysis	6-79
6.8 การรวมผลของขั้นตอนการก่อสร้างและผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	6-82
6.9 การประเมินความแข็งแรงของสะพานโดยพิจารณาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น	6-83
6.10 การประเมินความแข็งแรงของรอยต่อ Shear Key ของสะพาน	6-84
6.11 สรุปผลการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของคานและรอยต่อระหว่างคาน	6-90
บทที่ 7 การประเมินศักยภาพในการให้บริการของโครงสร้างสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจร	
7.1 ความล้มของวัสดุ	7-1
7.2 แนวทางการประเมินความล้มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกจรในโครงสร้างสะพาน	7-2

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.3 การประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกจรใน คานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน	7-3
7.4 สรุปผลการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพาน	7-12
บทที่ 8 การจัดทำคู่มือสำหรับโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องและการถ่ายทอดความรู้	
8.1 การจัดทำคู่มือสำหรับคานคอนกรีตรูปกล่อง	8-1
8.2 การถ่ายทอดความรู้	8-2
บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	9-1
ภาคผนวก ก รายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)	
ภาคผนวก ข รายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)	
ภาคผนวก ค ข้อมูลสัญญาการตรวจวัด	
ภาคผนวก ง ข้อมูลสภาพอากาศ	

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สะพานติณสูลานนท์เป็นสะพานคู่ขนานบนทางหลวงหมายเลข 408 ก่อสร้างข้ามทะเลสาบสงขลาจากฝั่งบ้านน้ำกระจาย อำเภอเมืองสงขลา ผ่านเกาะยอไปยังฝั่งบ้านเขาเขียว อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา สะพานข้ามทางเป็นสะพานเดิมเปิดให้บริการมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2529 ส่วนสะพานขวาทางเป็นสะพานที่ก่อสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการจราจรติดขัดบนสะพานเดิม เปิดให้บริการเมื่อปี พ.ศ.2548 สะพานติณสูลานนท์นอกจากจะอำนวยความสะดวกแก่ประชาชนในท้องถิ่นแล้ว ยังอำนวยความสะดวกต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศอย่างมากทั้งในด้านการขนส่งผลผลิตทางการเกษตร อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวและการขนส่งสินค้าจากท่าเรือน้ำลึกสงขลา ปัจจุบันมีปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันสูงถึงกว่า 15,000 คัน



รูปที่ 1-1 ตำแหน่งที่ตั้งสะพานติณสูลานนท์ด้านเหนือและด้านใต้ บริเวณเกาะยอ จังหวัดสงขลา
ที่มา: Google Earth

ในเชิงวิศวกรรม สะพานดินสุลาลัยเป็นสะพานคอนกรีตช่วงต่อเนื่องที่ยาวที่สุดในประเทศไทย โดยสะพานด้านเหนือ (เชื่อมด้านเหนือของเกาะยกกับฝั่งบ้านเขาเขียว) มีช่วงต่อเนื่องยาวถึง 1,700 เมตร ประกอบด้วยสะพานช่วงริมความยาวช่วง 30 เมตร 2 ช่วง และสะพานช่วงกลางความยาวช่วง 40 เมตร 41 ช่วง ส่วนสะพานด้านใต้ (เชื่อมฝั่งบ้านน้ำกระจายกับด้านใต้ของเกาะยก) มีช่วงต่อเนื่องยาว 940 เมตร ประกอบด้วย สะพานช่วงริมความยาวช่วง 30 เมตร 2 ช่วง และสะพานช่วงกลางความยาวช่วง 40 เมตร 22 ช่วง สะพานดินสุลาลัยทั้งสะพานเดิม (สะพานซ้ายทาง) และสะพานใหม่ (สะพานขวาทาง) มีลักษณะโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตรูปกล่องหล่อสำเร็จเป็นท่อน สะพานเดิมยาวท่อนละ 2.50 เมตร และสะพานใหม่ยาวท่อนละ 3.00 เมตร นำมาวางเรียงกันแล้วดัดลวดอัดแรงให้ประกบเข้าด้วยกันตลอดความยาวของสะพาน ด้านบนของคานคอนกรีตทำหน้าที่เป็นพื้นสะพานรองรับน้ำหนักจราจรโดยตรง โดยพื้นบนยื่นออกไปเป็นปีกเพื่อให้คานคอนกรีตสามารถรองรับทางรถ 2 ช่องจราจร กว้าง 8 เมตร และทางเท้า 2 ข้าง กว้างข้างละ 1.30 เมตร แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างสะพานเดิมและโครงสร้างสะพานใหม่มีข้อแตกต่างที่สำคัญ 3 ประการคือ รูปร่างหน้าตัดคานคอนกรีตระบบการดัดลวดและรอยต่อระหว่างท่อนคานคอนกรีต โดยโครงสร้างสะพานเดิมหน้าตัดคานเป็นกล่องเดี่ยวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระบบการดัดลวดเป็นการดัดภายในเนื้อคานคอนกรีต และรอยต่อระหว่างท่อนคานคอนกรีตประสานด้วยอิพ็อกซี ในขณะที่โครงสร้างสะพานใหม่หน้าตัดคานเป็นกล่องเดี่ยวรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ระบบการดัดลวดเป็นการดัดภายนอกเนื้อคานคอนกรีต และรอยต่อระหว่างท่อนคานคอนกรีตเป็นแบบแห้ง ไม่ได้มีการประสานด้วยอิพ็อกซี



รูปที่ 1-2 ลักษณะสะพานดินสุลาลัยด้านเหนือ ฝั่งซ้ายทาง (รูปด้านซ้าย) และฝั่งขวาทาง (รูปด้านขวา)

จากการที่หน้าตัดของสะพานดินสุลาลัยเป็นคานคอนกรีตรูปกล่องขนาดใหญ่ ประกอบกับการที่คอนกรีตนำความร้อนไม่ดี เมื่อสะพานได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้านใดด้านหนึ่งจะทำให้การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดคานมีลักษณะไม่เชิงเส้น ผลของการกระจายอุณหภูมิแบบไม่เชิงเส้นจะทำให้เกิดหน่วยแรงในหน้าตัดเพิ่มเติมขึ้นจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการน้ำหนักบรรทุก และยังสะพานดินสุลาลัยที่มีช่วงสะพานและช่วงต่อเนื่องที่ยาวมาก ผลของการยึดรั้งไม่ให้โครงสร้างโก่งตัวได้อย่างอิสระจะทำให้หน่วยแรงในหน้าตัดเพิ่มขึ้นอีก การกระจายอุณหภูมิแบบไม่เชิงเส้นซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงในหน้าตัดคานคอนกรีต นอกจากจะมีรูปร่างหน้าตัดคานเป็นตัวแปรแล้ว ยังมีปัจจัยภายนอกอีก 3 ประการ

ได้แก่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ และความเร็วลมบริเวณสะพานเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกด้วย ซึ่งปัจจัยภายนอกทั้ง 3 ประการนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่างวัน ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดและกลับมายังค่าต่ำสุดในแต่ละวัน ลักษณะเช่นนี้จะทำให้คอนกรีตเกิดการล้าและจะแตกร้าวเมื่อรอบการกระทำซ้ำมีจำนวนมากพอ งานวิจัยในต่างประเทศพบว่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสะพานคอนกรีตบางแห่งมีค่าสูงถึง 60% ของกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งชี้ให้เห็นได้ว่าคอนกรีตสามารถแตกร้าวเนื่องจากการล้าได้ในจำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ต่ำ การออกแบบสะพานติณสูลานนท์ทั้งสะพานเดิมและสะพานใหม่ตามมาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศสหรัฐอเมริกาไม่ได้พิจารณาความล้าของคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ประกอบกับสะพานติณสูลานนท์โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานเดิมเปิดให้บริการมาถึง 27 ปี (นับถึงปีที่เริ่มตั้งโครงการวิจัยฯ พ.ศ.2556) จึงมีความเป็นไปได้ที่คานคอนกรีตของสะพานติณสูลานนท์จะเกิดแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในส่วนของน้ำหนักบรรทุกจรซึ่งหมายถึงการจราจรของรถบรรทุกบนสะพาน โดยทั่วไปน้ำหนักบรรทุกจรจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างสะพานใน 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 น้ำหนักบรรทุกจรจะทำให้เกิดหน่วยแรงในโครงสร้างสะพานสูงเกินกว่ากำลังของวัสดุ เช่น โมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีตจะรับได้ โดยมักจะเกิดขึ้นกับสะพานเก่าเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการออกแบบมีค่าต่ำกว่าน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบันมาก หรืออาจจะเกิดขึ้นกับสะพานใหม่ที่มีรถบรรทุกหนักเป็นพิเศษวิ่งผ่าน บริเวณที่พบความเสียหายมักจะเป็นส่วนของโครงสร้างหลัก เช่น คาน สะพาน เป็นต้น รูปแบบที่ 2 น้ำหนักบรรทุกจรทำให้โครงสร้างสะพานเกิดการล้าในลักษณะเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่ากำลังของวัสดุแต่โครงสร้างสามารถแตกร้าวได้ถ้าจำนวนรอบการกระทำซ้ำหรือปริมาณการจราจรของรถบรรทุกผ่านสะพานมีมากพอ บริเวณที่พบความเสียหายมักจะเป็นส่วนโครงสร้างที่สัมผัสกับล้อรถโดยตรง เช่น พื้นสะพาน เป็นต้น โครงสร้างสะพานติณสูลานนท์มีความเสี่ยงต่อความเสียหายจากน้ำหนักบรรทุกจรทั้งสองรูปแบบทั้งนี้เนื่องจากสะพานติณสูลานนท์ผ่านการใช้งานมานาน ประกอบกับทั้งจำนวนและน้ำหนักของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานติณสูลานนท์ต่างเพิ่มขึ้นจากแต่เดิมมากอันเป็นผลเนื่องมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการปรับเปลี่ยนวิถีการจราจร

นอกจากนี้เนื่องจากสะพานติณสูลานนท์มีช่วงต่อเนื่องที่ยาวมากทำให้รอยต่อเพื่อการยึดหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งเป็นรอยต่อแบบโมดูลา ติดตั้งอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านของช่วงต่อเนื่องจากมีความกว้างในแต่ละด้านถึง 1 เมตร ซึ่งการที่รอยต่อมีความกว้างมากเช่นนี้จะทำให้รอยต่อได้รับผลกระทบโดยตรงจากน้ำหนักล้อรถบรรทุก ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นการที่เหล็กรอยต่อแตกร้าวเนื่องจากการล้า ถึงแม้ว่าในการออกแบบรอยต่อนี้จะได้พิจารณาการล้าของเหล็กรอยต่อตามมาตรฐานการออกแบบ แต่งานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับรอยต่อแบบโมดูลาที่มีความกว้างรอยต่อใกล้เคียงกับรอยต่อของสะพานติณสูลานนท์พบว่าเหล็กรอยต่อมักจะแตกร้าวเนื่องจากการล้าที่อายุน้อยกว่าที่ได้ออกแบบไว้เนื่องจากการล้าของเหล็กรอยต่อจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมจราจรของรถบรรทุก เช่น ความเร็ว การกระแทก การเร่ง การหน่วง เนื่องจากห้ามล้อ และตำแหน่งล้อเป็นอย่างมาก ซึ่งมาตรฐานการออกแบบไม่ได้ครอบคลุมไว้ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เหล็กรอยต่อของสะพานติณสูลานนท์จะแตกร้าวเนื่องจากการล้าที่อายุน้อยกว่าอายุออกแบบใช้งาน

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นความล้าเป็นสาเหตุหลักของการแตกร้าว ซึ่งการแตกร้าวเนื่องจากการล้าต้องอาศัยเวลาในการเกิด สะพานติณสูลานนท์ผ่านการใช้งานมาถึง 27 ปี จึงอาจจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการล้าได้อีกไม่ช้า ซึ่งหากเกิดการแตกร้าวขึ้นไม่ว่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือจากน้ำหนักบรรทุกจรใดระเหยจากน้ำทะเลและความขึ้นจะเข้าไปตามรอยแตกร้าวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ลวดอัดแรงและเหล็กเสริมต่างๆ เสี่ยงต่อการเกิดสนิมและถูกกัดกร่อนได้

โดยง่าย ผลของการเกิดสนิมจะทำให้รอยแตกกว้างขยายใหญ่ขึ้นอันจะทำให้ความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานลดลงอย่างมาก

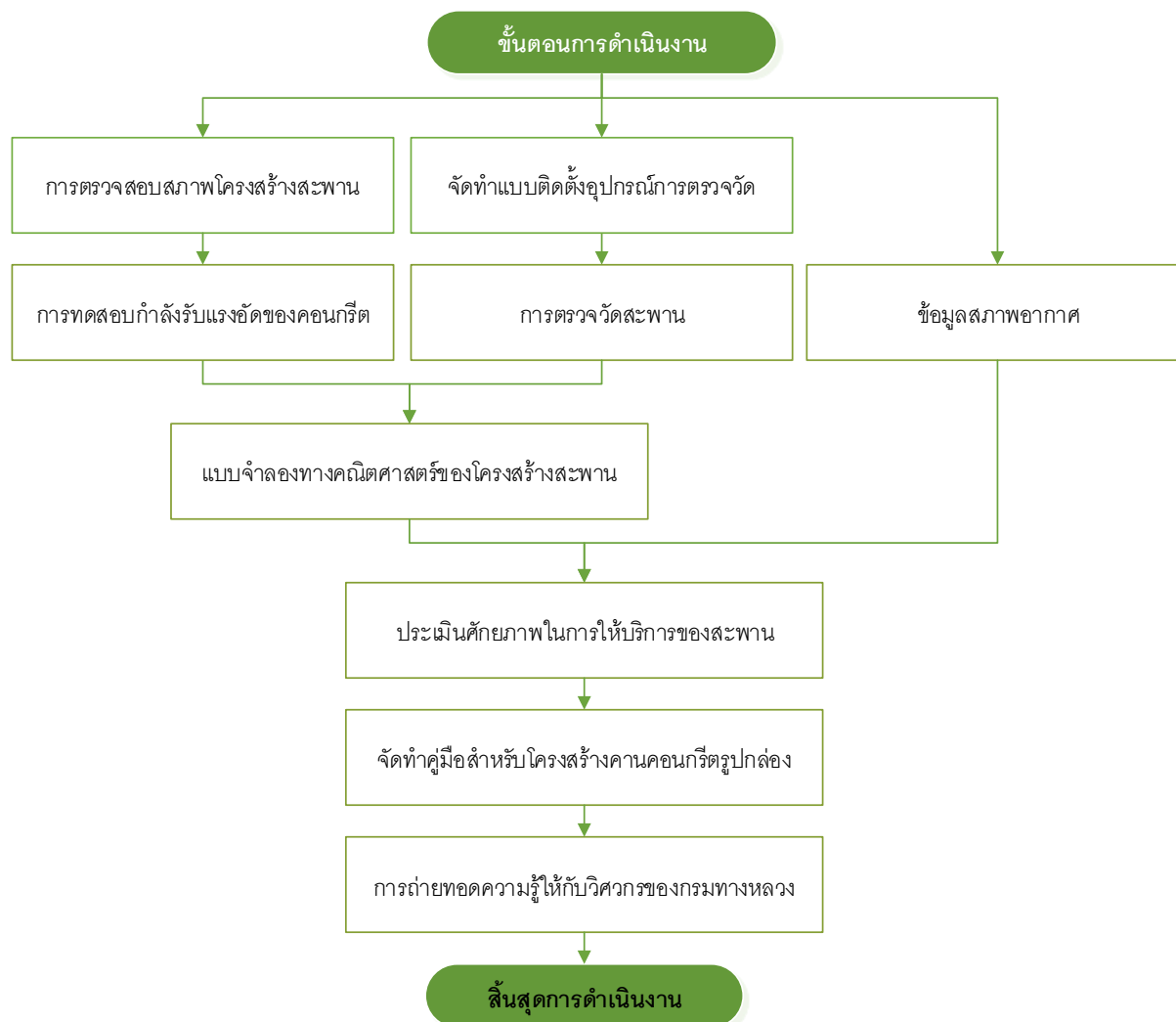
ดังนั้นเพื่อให้การทำนายระยะเวลาในการเกิดการแตกร้าวซึ่งหมายถึงศักยภาพในการให้บริการของสะพานติณสูลานนท์ น่าเชื่อถือสอดคล้องกับสภาพอากาศและการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะคำนวณหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานติณสูลานนท์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกโดยอาศัยการแปลงข้อมูลความเครียดจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้ตามตำแหน่งต่างๆ ของคานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อและน้ำหนักบรรทุกที่ได้ไปวิเคราะห์หาการแตกร้าวเนื่องจากความล้าต่อไป นอกจากนี้ยังจะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิและอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวไว้อีกด้วย เพื่อเก็บเป็นข้อมูลประกอบการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตตามการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ โดยอาศัยข้อมูลสภาพอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาและสถานีตรวจอากาศหอดใหญ่ งานวิจัยนี้ยังครอบคลุมถึงการประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกของทั้งตัวคานและรอยต่อระหว่างคานโดยการทดสอบสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกจริงในสนามทั้งภายใต้สภาวะควบคุมและภายใต้การจราจรปกติ เพื่อให้มั่นใจว่าสะพานติณสูลานนท์สามารถให้บริการได้ด้วยความปลอดภัย นอกจากนี้ เพื่อให้งานวิจัยเกิดผลในเชิงการออกแบบและการบำรุงรักษา โครงการนี้จึงกำหนดให้จัดทำแนวทางการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน และแนวทางการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกในโครงสร้างสะพานติณสูลานนท์
- 2) ประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานติณสูลานนท์
- 3) จัดทำแนวทางการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน
- 4) จัดทำแนวทางการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เพื่อให้การดำเนินงาน “โครงการตรวจวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจรในโครงสร้างสะพานดินสุลาลัยเพื่อประเมินศักยภาพในการบริการหลังการใช้งาน 27 ปี” นั้น มีประสิทธิภาพและบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ ที่ปรึกษาจึงได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 1-3



รูปที่ 1-3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานดินสุลาลัยที่ด้านเหนือ (ส่วนที่เชื่อมด้านเหนือของเกาะยอกับฝั่งบ้านเขาเขียว) ทั้งฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) และฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) โดยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) ขององค์ประกอบสะพาน เช่น คานคอนกรีตรูปกล่อง รอยต่อคาน รอยต่อผิวขยายฐานรองรับคาน และตอม่อสะพาน เป็นต้น และรายงานลักษณะการชำรุดเชิงวิศวกรรมที่ตรวจพบพร้อมภาพถ่ายประกอบคำอธิบาย จากนั้น ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย ด้วยเครื่อง Rebound Hammer โดยทดสอบช่วงสะพานละ 80 ตำแหน่ง และทดสอบตอม่อละ 30 ตำแหน่ง

ที่ปรึกษาได้จัดทำแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดของแต่ละสะพาน ได้แก่ อุปกรณ์การตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 จำนวน 40 ตำแหน่ง อุปกรณ์การตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีต จำนวน 80 ตำแหน่ง อุปกรณ์การตรวจวัดความเครียดบนผิว

เหลือรอยต่อพื้นสะพาน จำนวน 10 ตำแหน่ง อุปกรณ์การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างขนาด 500 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตำแหน่ง อุปกรณ์การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตำแหน่ง จากนั้น ทำการตรวจวัดแต่ละสะพานโดยการเก็บข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเนื่องเป็นเวลา 45 วัน พร้อมทั้งบันทึกการจราจรบนสะพานด้วยเครื่องบันทึกภาพระบบดิจิทัล (Digital Video Recorder) นอกจากนี้ ทำการทดสอบสะพานภายใต้รถบรรทุกที่ทราบน้ำหนัก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจรของทั้งตัวคานและรอยต่อระหว่างคาน

ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องปิดการจราจรทั้งหมดหรือบางส่วนบนสะพาน ที่ปรึกษาได้ทำการประสานงานกับหน่วยงานในพื้นที่หรือตำรวจทางหลวงในพื้นที่เพื่อทำการปิดการจราจร

ที่ปรึกษาได้รวบรวมข้อมูลสภาพอากาศที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานติณสูลานนท์ เช่น ค่ารังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ และความเร็วลม บริเวณสะพานติณสูลานนท์ ย้อนหลังอย่างน้อย 1 ปี จากกรมอุตุนิยมวิทยา และสถานีตรวจอากาศขนาดใหญ่ รวมถึงจากเอกสารอ้างอิงทางวิชาการอื่นๆ

ขณะเดียวกัน ที่ปรึกษาได้จัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิ วิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้งจากการกระจายอุณหภูมิและจากน้ำหนักบรรทุกจร โดยให้ทำการปรับแก้แบบจำลองของสะพานกับข้อมูลการตรวจวัด

ต่อจากนั้น ที่ปรึกษาได้ทำการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานติณสูลานนท์ โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การประเมินความล้าที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยอาศัยข้อมูลสภาพอากาศ และการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การประเมินความล้าที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร โดยอาศัยผลการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัด การประเมินความล้าที่เกิดขึ้นในเหล็กรอยต่อเพื่อการยึดหดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรโดยอาศัยผลการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัด และการประเมินความสามารถของคานคอนกรีตและรอยต่อระหว่างคานในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจรโดยอาศัยผลการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัด

ที่ปรึกษาได้จัดทำ “คู่มือประกอบการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน” และ “คู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง” อีกทั้งที่ปรึกษายังได้มีการถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับการตรวจวัดสะพานติณสูลานนท์และการวิเคราะห์ต่างๆ ให้กับวิศวกรของกรมทางหลวงจำนวน 33 คน

บทที่ 2 การตรวจสอบสภาพโครงสร้าง สะพาน

การตรวจสอบสภาพโครงสร้างของสะพานในโครงการนี้ได้กระทำกับสะพานฝั่งซ้ายทางและสะพานฝั่งขวาทางของสะพานติณสูลานนท์ด้านทิศเหนือ โดยได้ตรวจสอบสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่างๆของสะพาน เพื่อรวบรวมข้อมูลความเสียหายสำหรับใช้วางแผนซ่อมบำรุงสะพาน นอกจากนี้ยังได้สำรวจลักษณะทางกายภาพของสะพาน เพื่อตรวจสอบขนาดชิ้นส่วนในปัจจุบันกับขนาดชิ้นส่วนที่ระบุไว้ในแบบก่อสร้าง สำหรับใช้จัดทำแบบจำลองสะพานให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง

2.1 การตรวจสอบสภาพความเสียหายของสะพาน

การตรวจสอบสะพานในโครงการนี้เป็นการตรวจสอบสภาพความเสียหายด้วยสายตา (Visual Inspection) โดยอาศัยการสังเกตลักษณะความเสียหายและใช้บุคลากรในการประเมินระดับความรุนแรงเป็นหลัก มีการใช้เครื่องมือตรวจสอบพื้นฐาน เช่น กล้องถ่ายรูป เกจวัดขนาดรอยแตก แบบฟอร์มบันทึกความเสียหาย เรือ เป็นต้น หลักการที่ใช้ในการตรวจสอบสะพานที่สำคัญมี ดังนี้

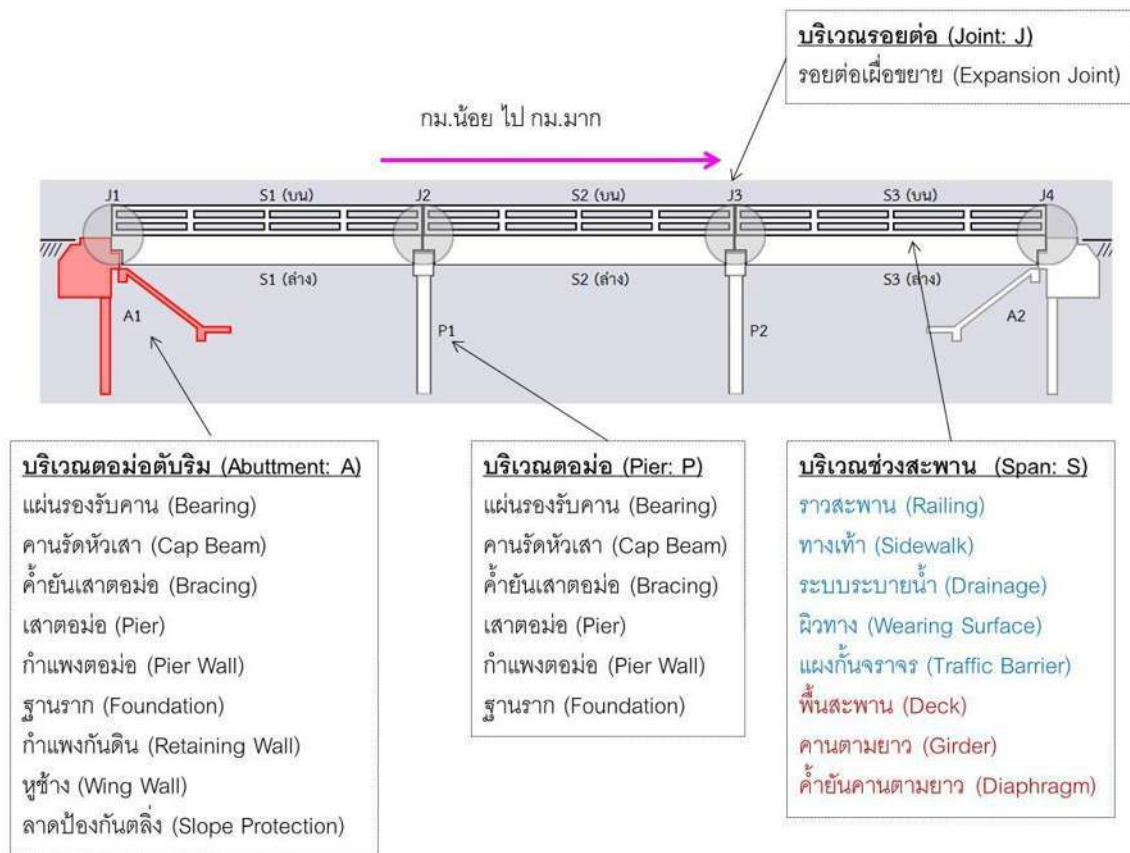
- การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน
- การประเมินสภาพการใช้งาน
- แนวทางการตรวจสอบชิ้นส่วนต่างๆ
- แบบฟอร์มการตรวจสอบสะพานภาคสนาม

2.1.1. การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

สะพานติณสูลานนท์เป็นสะพานชนิดคานคอนกรีตรูปกล่องขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหลายช่วงสะพานและหลายตอม่อสะพาน มีชิ้นส่วนหลายประเภทและมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อให้สามารถตรวจสอบสะพานได้ครบทุกชิ้นส่วน จึงได้แบ่งสะพานออกเป็นองค์ประกอบต่างๆตามระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance and Management System, BMMS) ของสำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง โดยจะแบ่งสะพาน (Bridge) ออกเป็นบริเวณ (Area) และในแต่ละบริเวณจะแบ่งเป็นชิ้นส่วน (Member) ประเภทต่างๆ ดังรูปที่ 2-1 ซึ่งสะพานมี 4 ประเภทบริเวณ ดังนี้

- บริเวณตอม่อตบริม (Abutment, A)
- บริเวณตอม่อ (Pier, P)

- บริเวณช่วงสะพาน (Span, S)
- บริเวณรอยต่อ (Joint, J)



รูปที่ 2-1 ทิศทางของสะพานและการเรียงเลขรหัสบริเวณ

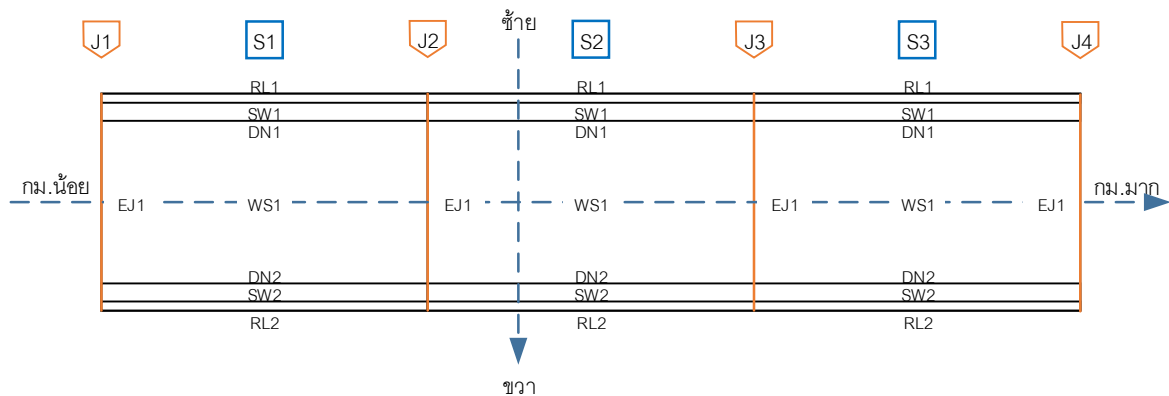
สะพานที่ใช้งานบนทางหลวงมีหลายประเภทโครงสร้าง ซึ่งแต่ละประเภทโครงสร้างของสะพานอาจมีประเภทชิ้นส่วนและจำนวนในแต่ละบริเวณไม่เหมือนกัน เช่น สะพานประเภทคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องโดยทั่วไปจะมีชิ้นส่วนที่สามารถเข้าถึงและตรวจสอบได้ ดังนี้

- ช่วงสะพาน (Span, S) : ราวสะพาน ทางเท้า ระบบระบายน้ำ ผิวทาง พื้นสะพาน คานตามยาว (คานหลัก หรือ Girder) และ ค้ำยันคานตามยาว (ไดอะแฟรม)
- รอยต่อสะพาน (Joint, J): รอยต่อเพื่อขยาย
- ตอม่อ (Pier, P): อุปกรณ์รองรับคาน คานรัดหัวเสา กำแพงตอม่อ และ ฐานราก
- ตอม่อตัวริม (Abutment, A): อุปกรณ์รองรับคาน คานรัดหัวเสา ลาดป้องกันตลิ่ง และ เชิงลาดสะพาน

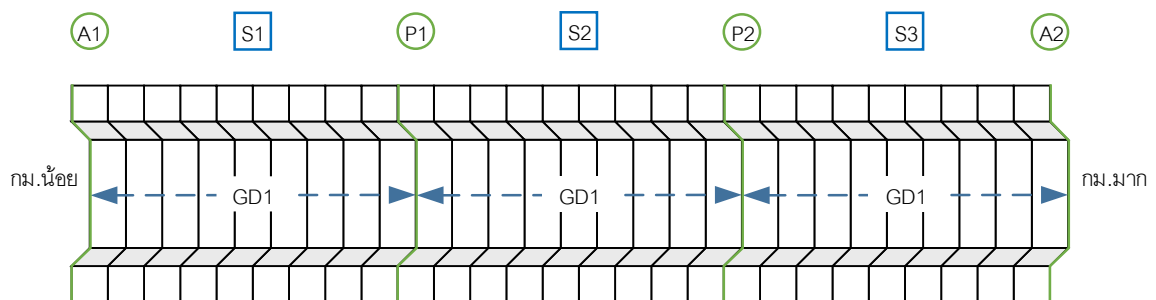
ระบบ BMS แบ่งทิศทางของสะพานออกเป็น 3 ทิศ ได้แก่ ทิศตามยาว ทิศตามขวาง และ ทิศตามแนวดิ่ง โดยทิศตามยาวจะเริ่มจากฝั่ง กม. น้อย ไปยังฝั่ง กม.มาก ซึ่งจะใช้ในการเรียงเลขรหัสของบริเวณต่างๆ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2-1 {A1, A2}, {P1, P2}, {S1, S2, S3} และ {J1, J2, J3, J4} ส่วนทิศตามขวางจะเริ่มจากซ้ายมือไปขวามือ ซึ่งจะใช้เรียงเลขรหัสของชิ้นส่วนที่อยู่ตามแนวนอนของสะพานในแต่ละบริเวณ เช่น ในบริเวณ S1 มีราวสะพาน RL1 และ RL2 ดังรูปที่ 2-2

ส่วนทิศแนวดิ่งจะเริ่มจากบนลงล่าง เพื่อให้เรียงเลขรหัสของชั้นส่วนที่อยู่ในแนวดิ่งของสะพานในแต่ละบริเวณ เช่น ในบริเวณ P1 มี ค้ำยันเสาต่อม่อ BC1 เพียงแถวเดียว ดังรูปที่ 2-3 (หากมี 2 แถว จะเป็น BC1 และ BC2)

การแบ่งสะพานออกเป็นบริเวณและชั้นส่วน ตลอดจนการกำหนดทิศทางเพื่อเรียงลำดับเลขรหัสบริเวณและรหัสชั้นส่วน ทำให้ผู้ตรวจสอบสามารถตรวจสอบชั้นส่วนที่มีทั้งหมดในสะพานได้อย่างครบถ้วน ไม่ซ้ำซ้อน และไม่สลับทิศทางกัน

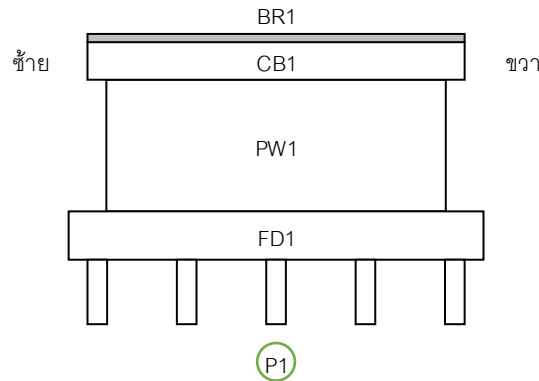


(ก) ช่วงสะพานด้านบน

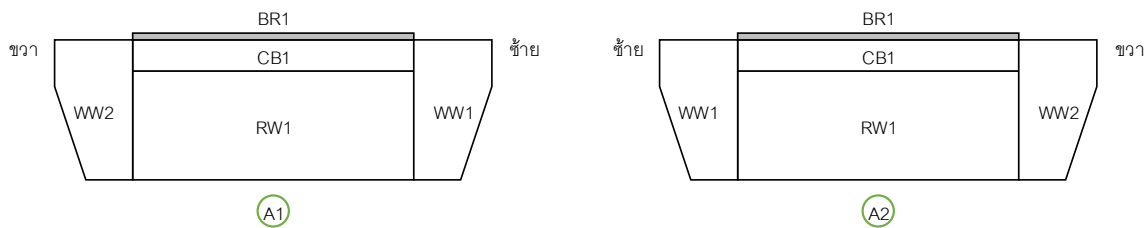


(ข) ช่วงสะพานด้านล่าง

รูปที่ 2-2 การเรียงเลขรหัสชั้นส่วนที่ช่วงสะพานด้านบนและช่วงสะพานด้านล่าง



(ก) ตอม่อ (Pier, P)



(ข) ตอม่อตับริม (Abutment, A)

รูปที่ 2-3 การเรียงเลขรหัสชิ้นส่วนที่ตอม่อตกลางและตอม่อตับริม

ในการประเมินสภาพการใช้งานของชิ้นส่วนระบบ BMMS จะแบ่งชิ้นส่วนสะพานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ โครงสร้างส่วนบน โครงสร้างส่วนล่าง และส่วนประกอบรอง เพื่อใช้ประเมินผลกระทบของความเสียหายที่มีต่อความเสี่ยงในการวิบัติของสะพาน โดยกลุ่มโครงสร้างส่วนบน คือ ชิ้นส่วนหลัก (Primary Member) ที่อยู่ด้านบน ซึ่งทำหน้าที่รับแรงโดยตรง กลุ่มโครงสร้างส่วนล่าง คือ ชิ้นส่วนหลักที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งทำหน้าที่รับแรงโดยตรง และส่วนประกอบรอง คือ ชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ช่วยเสริมด้านความมั่นคง (Stability) หรือ ใช้งานในด้านต่างๆ ของสะพาน (Functional & Utility) ตารางที่ 2-1 สรุปประเภทชิ้นส่วนที่อาจมีอยู่ในบริเวณต่างๆ และกลุ่มโครงสร้างของแต่ละประเภทชิ้นส่วนนั้นๆ ตลอดจนสัญลักษณ์ที่ใช้ในการตั้งรหัสบริเวณและรหัสชิ้นส่วน

ตารางที่ 2-1 การแบ่งบริเวณ ชิ้นส่วน และกลุ่มโครงสร้าง

บริเวณ	Area Code	ชิ้นส่วนโครงสร้าง (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
		ค้ำยันคานตามยาว (Diaphragm)	DP	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
		ค้ำยันเสาตอม่อ (Bracing)	BC	ส่วนประกอบรอง
		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
		กำแพงกันดิน (Retaining Wall)	RW	ส่วนประกอบรอง
		หูช้าง (Wing Wall)	WW	ส่วนประกอบรอง
		ลาดป้องกันตลิ่ง (Slope Protection)	SP	ส่วนประกอบรอง
		เชิงลาดสะพาน (Approach)	AP	ส่วนประกอบรอง
		ฐานราก (Foundation)	FD	โครงสร้างส่วนล่าง

2.1.2. การประเมินสภาพการใช้งาน (Condition Rating, CR)

การประเมินสภาพการใช้งาน (Condition Rating) ของชิ้นส่วนสะพานจะแบ่งเป็น 6 ระดับ เรียงจากระดับ 5-ดีมาก, 4-ดีพอใช้, 3-พอใช้, 2-ชำรุด, 1-วิกฤติ และ 0-วิบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2-2 โดยลักษณะความเสียหายและระดับสภาพการใช้งานของประเภทชิ้นส่วนตามระบบ BMMS ของกรมทางหลวง ได้แสดงไว้ใน **ภาคผนวก ข** ของคู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง

ตารางที่ 2-2 ระดับสภาพการใช้งานของชิ้นส่วนโครงสร้าง

ระดับสภาพการใช้งาน		คำอธิบาย
5	ดีมาก	สภาพโครงสร้างดี หรือเหมือนใหม่
4	ดีพอใช้	- สภาพพอใช้ในเกณฑ์ดี พิจารณามารุงปกติ - โครงสร้างส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญมีสภาพอยู่ในเกณฑ์ดี พิจารณามารุงปกติ - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรง หรือส่วนที่ไม่สำคัญ มีสภาพอยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณามารุงปกติ
3	พอใช้	- สภาพพอใช้ ต้องพิจารณามารุงตามกำหนดเวลา - โครงสร้างส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญมีสภาพอยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณาซ่อมมารุงตามกำหนดเวลา - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรง หรือส่วนที่ไม่สำคัญ มีสภาพอยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณาซ่อมมารุงตามกำหนดเวลา
2	ชำรุด	- สภาพชำรุดที่ต้องพิจารณาซ่อมแซม หรือมารุงพิเศษ - โครงสร้างส่วนที่รับแรง หรือส่วนที่สำคัญมีสภาพชำรุดที่ต้องดำเนินการซ่อมแซม หรือต้องทำการมารุงพิเศษ - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรง หรือส่วนที่ไม่สำคัญ ต้องดำเนินการซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพเดิม
1	วิกฤติ	- สภาพชำรุดที่ต้องพิจารณาซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน หรือต้องทำการบูรณะพิเศษอย่างเร่งด่วน - โครงสร้างส่วนที่รับแรง หรือส่วนที่สำคัญมีสภาพชำรุดเสียหายมาก ที่ต้องดำเนินการซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน หรือต้องทำการบูรณะ - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรง หรือส่วนที่ไม่สำคัญ ต้องดำเนินการซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพเดิม
0	วิบัติ	- สภาพชำรุดเสียหายมาก ควรพิจารณาทุบทิ้งและก่อสร้างใหม่ทั้งสะพาน

2.1.3. แนวทางการตรวจสอบสะพาน

การตรวจสอบสะพานประเภทคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง เริ่มต้นจากการศึกษาแบบก่อสร้างสะพาน ขั้นตอนการก่อสร้าง ระบบการติดตั้งอัดแรง และอุปกรณ์ประเภทต่างๆ ที่ใช้บนสะพาน เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของสะพานและตำแหน่งวิกฤติของผลรวมแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นจุดเสี่ยงที่โครงสร้างจะเกิดความเสียหายได้ รวมถึงลักษณะเด่นของโครงสร้างบางประการที่ควรพิจารณาเป็นพิเศษ เช่น สะพานต่อเนื่องที่มีความยาวมากจะมีการยืดหดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้มาก หากรอยต่อเพื่อขยายหรืออุปกรณ์รองรับคานทำงานผิดปกติ อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างบริเวณนั้นๆ ได้

ทำการแบ่งโครงสร้างสะพานออกเป็นบริเวณและชิ้นส่วน เพื่อให้สามารถตรวจสอบชิ้นส่วนสะพานได้อย่างครบถ้วน กำหนดรหัสบริเวณและรหัสชิ้นส่วนตามระบบ BMMS และแบ่งงานให้ทีมผู้ตรวจสอบหลายคนดำเนินการ ซึ่งจะสามารถทำงานได้เร็วกว่าการใช้แท็บเล็ต iBridge เพียงเครื่องเดียว อย่างไรก็ตามเพื่อให้การประเมินความเสียหายมีความสม่ำเสมอ ผู้ตรวจสอบแต่ละคนจะจำแนกลักษณะความเสียหายตามระบบ BMMS เหมือนกัน ดังที่ได้ระบุไว้ใน **ภาคผนวก ข** ของคู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง แนวทางการตรวจสอบชิ้นส่วนสะพานประเภทต่างๆ สามารถสรุปโดยย่อได้ ดังนี้

ราวสะพาน (Railing): ตรวจสอบการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติ เช่น สีสผิวคอนกรีตซีด รอยร้าวจากแดดและฝน และการเกิดสนิมของราวเหล็ก เป็นต้น และตรวจสอบความเสียหายประเภทต่างๆ เช่น รอยแตก การหลุดล่อน (เห็น/ไม่เห็นเหล็กเสริม) และร่องรอยการถูกชน รวมถึงความมั่นคงของโครงสร้างราวสะพาน

ทางเท้า (Side Walk): ตรวจสอบการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติ เช่น รอยร้าว การสึกหรอเล็กน้อย และสีขอบทางซีด เป็นต้น และตรวจสอบความเสียหายประเภทต่างๆ เช่น รอยแตก การหลุดล่อน (เห็น/ไม่เห็นเหล็กเสริม) รวมถึงสภาพความเสียหายที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ทางเท้า เป็นต้น

ระบบระบายน้ำ (Drainage System): ตรวจสอบความสามารถด้านการระบายน้ำออกจากผิวทาง โดยทั่วไปรูระบายน้ำมักจะมีฝาตะแกรงปิดอยู่ด้านนอก เพื่อป้องกันมิให้มีเศษวัสดุลงไปอุดตันในระบบท่อระบายน้ำ สำหรับคานรูปกล่องจะมีรูระบายน้ำที่อยู่ภายในกล่องด้วย ทั้งนี้เพื่อใช้ระบายน้ำที่อาจไหลเข้ามาภายใน มิให้ท่วมขังและก่อให้เกิดสนิมในกล่องคานได้ ควรตรวจสอบรูระบายน้ำทุกตำแหน่งทั้งภายในและภายนอก ว่ามีการอุดตันของฝาตะแกรง หรือมีเศษวัสดุอุดตันหรือไม่ นอกจากนี้ควรตรวจสอบตัวท่อที่ใช้ระบายน้ำ ว่ามีรอยรั่วซึม รอยแตกชำรุด หรือหลุดออกจากที่ยึด ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ทางหรือโครงสร้าง

ผิวทาง (Wearing Surface): ตรวจสอบการเสื่อมสภาพและความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางประเภทต่างๆ เช่น รอยแตกตามยาว รอยแตกตามขวาง รอยแตกรูปตาข่าย การหลุดล่อน หลุมบ่อ และความผิดปกติอื่นๆ

คานคอนกรีตรูปกล่อง (Box Girder): การตรวจสอบคานคอนกรีตรูปกล่องมีรายละเอียดค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำหลายประเภท และมีการออกแบบโดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ประเภทต่างๆ ในการต้านทานแรงกระทำเหล่านั้น นอกจากนี้ชิ้นส่วนยังอาจเกิดความเสียหายจากการเสื่อมสภาพทางธรรมชาติและจากน้ำหนักบรรทุกจร ดังนั้น การตรวจสอบคานคอนกรีตรูปกล่องจะแบ่งออกเป็น 7 บริเวณย่อยๆ

- บริเวณผิวคอนกรีตทั่วไป (Surface)
- บริเวณรับแรงเฉือน (Shear Zone)

- บริเวณรับแรงดึง (Tension Zone)
- บริเวณสมอยึด (Anchor Block or Blister)
- แท่นเบี่ยงลวดอัดแรง (Deviation Blocks)
- รอยต่อของชิ้นส่วนประกอบ (Joint between Each Segment)
- บริเวณอื่นๆ (Miscellaneous Areas)

โดยรายละเอียดการตรวจสอบในแต่ละบริเวณ ได้อธิบายไว้ในคู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง

ค้ำยันคาน (Diaphragms): ไดอะแฟรมด้านใน (Internal Diaphragm) จะอยู่บริเวณตำแหน่งตอม่อต่อบกกลางและตอม่อต่อบริม เพื่อเสริมความมั่นคงให้กับหน้าตัดของคาน อีกทั้งยังช่วยการกระจายแรงปฏิกิริยาจากอุปกรณ์รองรับคานที่มีแรงสูงมากให้ส่วนอื่นๆ ช่วยรับไป การฝังสมอยึดบริเวณปลายคานจะทำให้เกิดแรงกระทำในไดอะแฟรมเพิ่มเติมไปจากแรงดึงจากลวดอัดแรง ดังนั้นโครงสร้างบริเวณนี้จะเกิดความเค้นสูงมากและมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยแตกได้ การตรวจสอบบริเวณไดอะแฟรมด้านในนี้จะต้องกระทำอย่างละเอียดรอบคอบ

ในกรณีที่มีไดอะแฟรมด้านนอก (External Diaphragm) ระหว่างคานรูปกล่องสองตัวที่วางติดกัน ให้ตรวจสอบ รอยแตก การแยกตัวออกเป็นแผ่นๆ และการหลุดล่อน โดยความเสียหายที่ไดอะแฟรมที่อยู่ด้านหัวและท้ายของคาน (End Diaphragm) อาจบ่งบอกถึงการหลุดตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้างส่วนล่าง ส่วนความเสียหายของไดอะแฟรมที่อยู่ภายในช่วงคานหลัก (Intermediate Diaphragm) อาจบ่งบอกถึงการแอ่นตัวของคานหลักที่แตกต่างกันมากเกินไป

รอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint): ตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์รอยต่อเพื่อขยาย เช่น การขยับตัวระหว่างช่องว่างของรอยต่อ การเสื่อมสภาพของวัสดุอุดรอยต่อ การหลุดล่อนของวัสดุ รอยแตก การหัก หรือ ชำรุด นอกจากนี้ให้ตรวจสอบความเสียหายตามขอบคอนกรีตที่อยู่ติดกับรอยต่อเพื่อขยายนั่น เช่น รอยแตก การกะเทาะ หรือ หลุดล่อน ความต่างระดับ รวมถึงสิ่งต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง หรือ เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

อุปกรณ์รองรับคาน (Bearing): จากพฤติกรรมที่ซับซ้อนของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง อันเนื่องมาจาก อุณหภูมิ การคืบตัวของคอนกรีต (Creep) และการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) ผลรวมของแรงกระทำจากปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ อาจทำให้อุปกรณ์รองรับคานเสื่อมสภาพ หรือ ทำงานผิดปกติได้ เช่น การบิดเบี้ยวของแผ่นยางรองคาน (กรณีเป็นแบบ Elastomeric) การฝืดหรือไม่เคลื่อนไหวของอุปกรณ์รองรับคาน (กรณีเป็นแบบ Mechanical Device) นอกจากนี้ ควรตรวจสอบร่องรอยความเสียหายประเภทต่างๆ ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นรองคานด้านบนกับผิวปีกคานด้านล่าง ซึ่งบริเวณนี้จะมีแรงกระทำในแนวตั้งสูงจากน้ำหนักของโครงสร้างส่วนบนที่กดอุปกรณ์รองรับคานด้านล่าง

คานรัดหัวเสา (Cap Beam): ตรวจสอบความเสียหายทั่วไปที่มักเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น คราบเกลือ คราบสนิม การเกิดรูพูนเป็นรังผึ้ง การสึกกร่อน รอยแตกรูปแบบต่างๆ การแยกตัวเป็นแผ่นๆ การหลุดล่อน(เห็น/ไม่เห็นเหล็กเสริม) เป็นต้น

กำแพงตอม่อ (Pier Wall): ตรวจสอบความเสียหายทั่วไปที่มักเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น คราบเกลือ คราบสนิม การเกิดรูพูนเป็นรังผึ้ง การสึกกร่อน รอยแตกรูปแบบต่างๆ การแยกตัวเป็นแผ่นๆ การหลุดล่อน(เห็น/ไม่เห็นเหล็กเสริม) รวมถึงการหลุดตัวและเอียงตัวของโครงสร้าง

ฐานราก (Foundation): ตรวจสอบความเสียหายทั่วไปที่มักเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น คราบเกลือ คราบสนิม การเกิดรูพรุนเป็นรังผึ้ง รอยแตกรูปแบบต่างๆ การแยกตัวเป็นแผ่นๆ การหลุดล่อน(เห็น/ไม่เห็นเหล็กเสริม) นอกจากนี้ควรตรวจสอบสภาพดินถมบริเวณใต้พื้นเชิงลาดสะพาน การสูญเสียดินถมปริมาณมากอาจทำให้โครงสร้างตอม่อตบริม (Abutment) ขาดเสถียรภาพ และเกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนโครงสร้างบริเวณนี้ได้

กำแพงกันดิน (Retaining Wall): ตรวจสอบการสูญเสียดินถมบริเวณใต้เชิงลาดสะพาน ซึ่งทำให้สูญเสียเสถียรภาพระหว่างเชิงลาดกับโครงสร้างสะพานจนอาจทำให้โครงสร้างบริเวณตอม่อตบริมเกิดความเสียหายได้

ลาดป้องกันตลิ่ง (Slope Protection): ตรวจสอบความเสียหายทั่วไป เช่น รอยร้าว รอยแตก และการหลุดล่อนของผิวลาดป้องกันตลิ่ง รวมถึงตรวจสอบการกัดเซาะดินบริเวณตลิ่ง ซึ่งอาจทำให้เกิดโพรงด้านล่างจนทำให้โครงสร้างขาดเสถียรภาพและพังทลายได้

เชิงลาดสะพาน (Approach): ตรวจสอบความเสียหายต่างๆ เช่น รอยแตก การหลุดล่อน การสึกกร่อน ดินถมใต้เชิงลาดหายไป หรือมีการยุบตัวของผิวทาง เป็นต้น

2.1.4. แบบฟอร์มการตรวจสอบสะพานภาคสนาม

โดยทั่วไปการตรวจสอบสะพานตามระบบ BMMS จะใช้แอปพลิเคชัน iBridge บนแท็บเล็ต ช่วยในการเก็บข้อมูลความเสียหายประเภทต่าง ๆ เช่น ภาพถ่าย ตัวเลข และข้อความ อีกทั้งระบบยังมีตัวเลือกลักษณะความเสียหายเพื่อช่วยในการประเมินสภาพการใช้งานของชิ้นส่วน และลดความแตกต่างระหว่างดุลพินิจของผู้ประเมินแต่ละคน

แต่เนื่องจากสะพานติณสูลานนท์เป็นสะพานขนาดใหญ่ มีองค์ประกอบจำนวนมาก การใช้แท็บเล็ตเพียงเครื่องเดียวจะทำงานได้ช้า อีกทั้งหากมีภาพถ่ายความเสียหายจำนวนมาก จะทำให้หน่วยความจำของเครื่องไม่เพียงพอ ดังนั้นโครงการนี้จึงได้จัดทำแบบฟอร์มภาคสนามสำหรับรวบรวมข้อมูลความเสียหายดังรูปที่ 2-4 (หน้าแรก) และ รูปที่ 2-5 (หน้าบันทึกความเสียหาย) โดยแบบฟอร์มบันทึกความเสียหายแต่ละใบจะรวบรวมข้อมูลความเสียหายที่ละบริเวณ (Area) คล้ายกับการทำงานของหน้าจอ iBridge จากนั้นจึงนำข้อมูลที่รวบรวมได้ไปบันทึกผ่านทางเว็บไซต์ของระบบ BMMS อีกครั้งหนึ่ง

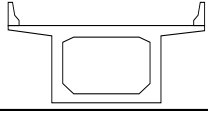
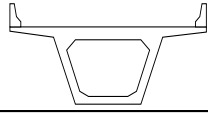
	แบบบันทึกการตรวจสอบสะพานประเภทคานคอนกรีตรูปกล่อง
---	---

ผู้ตรวจสอบ			
ชื่อผู้ตรวจสอบ		วันที่ตรวจสอบ	

ข้อมูลทั่วไปของสะพาน			
ชื่อสะพาน		รหัสสะพาน	
สิ่งที่ข้าม		จำนวนช่องสะพาน	
ขนาดสะพาน (ม.)			
ความกว้างสะพาน (ม.)		ชนิดผิวจราจร	
ความกว้างทางเท้า/ราวสะพาน ซ้าย (ม.)		จำนวนช่องจราจร	
ความกว้างทางเท้า/ราวสะพาน ขวา (ม.)		ทิศทางการจราจร	
ปีที่สร้าง (พ.ศ.)		อายุสะพาน (ปี)	

พื้นที่ตั้งสะพาน					
สำนักงานทางหลวง		แขวงทางหลวง			
ชื่อตอน					
หมายเลขทางหลวง		หลักกิโลเมตร		ตำแหน่งคันทาง	
พิกัดสะพาน (N, E)					

ภาพสเก็ตโครงสร้างโดยรวม

รูปแบบหน้าตัดคาน		
ทำเครื่องหมาย ✓	ลักษณะ	ภาพสเก็ต
☐	หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	
☐	หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	
☐	อื่นๆ ระบุ	

รูปที่ 2-4 แบบฟอร์มบันทึกความเสียหายของสะพาน (หน้าแรก)

[illegible]

2.2 การตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานติณสูลานนท์ด้านเหนือ ทั้งฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) และ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ตามหลักเกณฑ์ของระบบ BMMS กรมทางหลวง ระหว่างวันที่ 1 – 10 มีนาคม 2558 นอกจากนี้ ยังได้จัดทำแบบแสดงความเสียหายของสะพานเพิ่มเติม เพื่อให้เห็นภาพรวมของความเสียหายในแต่ละสะพาน จากนั้นได้นำข้อมูลความเสียหายจากแบบฟอร์มภาคสนามและแบบแสดงความเสียหายเข้าสู่ระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (BMMS) (<http://bridge.doh.go.th/bmms/>) และใช้ระบบ BMMS จัดพิมพ์รายงานผลการตรวจสอบสะพาน โดยผลการดำเนินงานมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1. การสำรวจลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างสะพาน

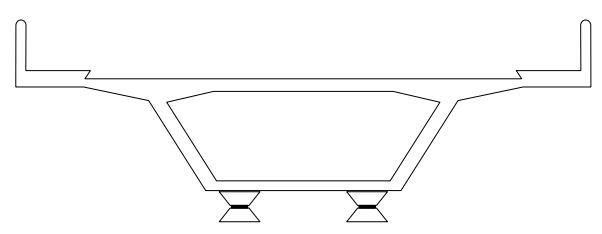
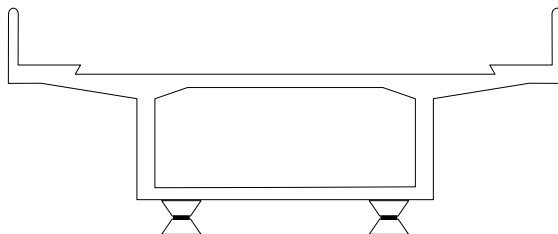
การสำรวจลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างสะพาน พบว่า สะพานติณสูลานนท์ด้านเหนือมีความยาวรวมทั้งสิ้น 1,700 เมตร ช่วงสะพานแรกและช่วงสะพานสุดท้าย (1 และ 43) มีความยาวช่วงละ 30 เมตร ส่วนช่วงสะพานที่อยู่ภายในมี 41 ช่วงๆ ละ 40 เมตร

สะพานติณสูลานนท์ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ดังรูปที่ 2-6 (ซ้าย) มีลักษณะโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าหล่อสำเร็จเป็นท่อน ยาวท่อนละ 2.50 เมตร นำมาวางเรียงกันแล้วดัดลวดอัดแรงภายในเนื้อคานคอนกรีตประกบเข้าด้วยกันตลอดความยาวของสะพาน และรอยต่อระหว่างท่อนคานคอนกรีตประสานด้วยอีพ็อกซี่ โดยขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ สอดคล้องกับขนาดที่ระบุในแบบก่อสร้าง ส่วนสะพานติณสูลานนท์ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ดังรูปที่ 2-6 (ขวา) มีลักษณะโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมคางหมูหล่อสำเร็จเป็นท่อน ยาวท่อนละ 3.00 เมตร นำมาวางเรียงกันแล้วดัดลวดอัดแรงภายนอกเนื้อคานคอนกรีตประกบเข้าด้วยกันตลอดความยาวของสะพาน และรอยต่อระหว่างท่อนคานคอนกรีตเป็นแบบแห้ง ไม่ได้มีการประสานด้วยอีพ็อกซี่ โดยขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ สอดคล้องกับขนาดที่ระบุในแบบก่อสร้าง ตัวอย่างการสำรวจลักษณะโครงสร้างของสะพานได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-7

สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)



สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)



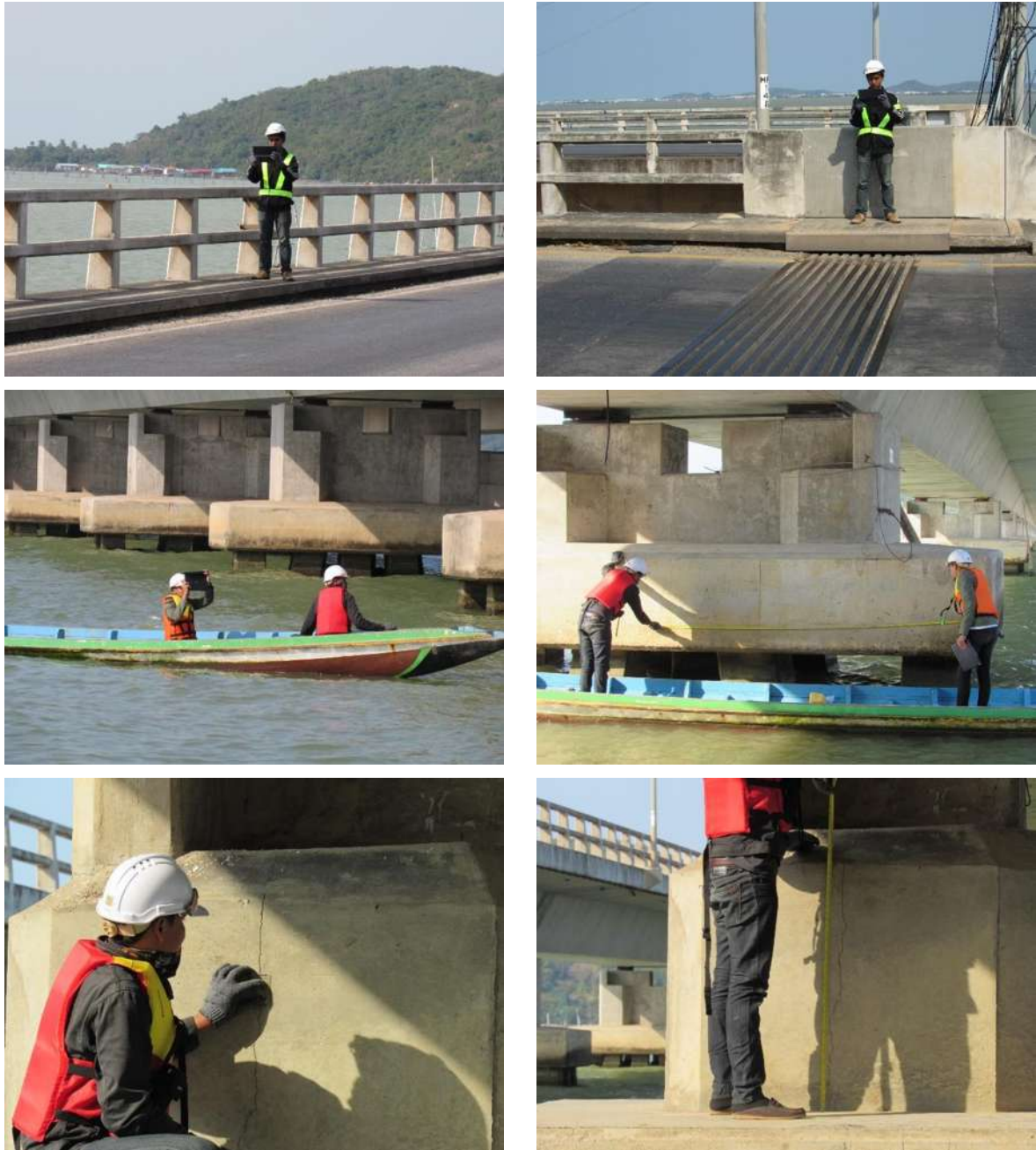
รูปที่ 2-6 ลักษณะโครงสร้างสะพานดินสุลานนท์



รูปที่ 2-7 การสำรวจลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างสะพาน (ระหว่างวันที่ 1 – 5 มีนาคม 2558)

2.2.2. การตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน

สะพานติณสูลานนท์ ทั้งฝั่งซ้ายทางและฝั่งขวาทาง สามารถแบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ สำหรับการตรวจสอบได้ ดังนี้
บริเวณช่วงสะพาน (Span) จำนวน 43 ช่วง บริเวณตอม่อสะพาน (Pier) จำนวน 42 ตอม่อ และบริเวณตอม่อตัดบริม
(Abutment) จำนวน 2 ตอม่อ รูปที่ 2-8 แสดงการดำเนินงานตรวจสอบความเสียหายของสะพานที่ภาคสนาม



รูปที่ 2-8 การดำเนินงานตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน (ระหว่างวันที่ 6 – 10 มีนาคม 2558)

2.3 รายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)

ตารางที่ 2-3 ข้อมูลทั่วไปของสะพานฝั่งซ้ายทาง

ข้อมูลทั่วไปของสะพานฝั่งซ้ายทาง		
ที่ตั้ง	สำนักงานทางหลวง	สำนักงานทางหลวงที่ 18 (สงขลา)
	แขวงทางหลวง	แขวงทางหลวงสงขลาที่ 1
	ตอน (ชื่อสายทาง)	สทิงพระ – เกาะยอ
	หมายเลขทางหลวง	408
	หมายเลขตอนควบคุม	202
	หมายเลขกิโลเมตร	160+000.000 LT
ลักษณะทั่วไป	ชื่อสะพาน/สิ่งที่สะพานข้าม	ทะเลสาบสงขลา
	รหัสสะพาน	153110069
	ชนิดของสะพาน	Box Girder
	ขนาดสะพาน	BG(1x30)+ BG(41x40)+ BG(1x30)
	ความยาวสะพาน (เมตร)	1,700.00
	ความกว้างสะพาน (เมตร)	10.50
	ชนิดของผิวสะพาน	แอสฟัลต์
	จำนวนช่องจราจร	2
	Skew (องศา)	0
	ชนิดของราวสะพาน	ราว คสล. Type 3
	ปี พ.ศ. ที่สร้าง	2529

การตรวจสอบสภาพความเสียหายของโครงสร้างสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) พบว่า ลักษณะความเสียหายส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น ได้แก่ คอนกรีตมีรอยแตกร้าวทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยพบทั่วไปทั้งบริเวณโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน คอนกรีตสึกกร่อนหรือหลุดล่อน ซึ่งมีทั้งที่เห็นเหล็กเสริมและไม่เห็นเหล็กเสริม สำหรับรายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานและแบบแสดงความเสียหายของสะพานได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก ของรายงานฉบับนี้ โดยสามารถสรุปผลการตรวจสอบและประเมินสภาพการใช้งานของสะพานได้ดังตารางที่ 2-4 และรูปที่ 2-9

ตารางที่ 2-4 สรุปผลการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานฝั่งซ้ายทาง

ลำดับ	โครงสร้าง	ลักษณะความเสียหาย	การใช้งาน		รูปที่ 2.1-4
			สภาพ	ระดับ	
1	ผิวทาง	สีกร่อน หรือหลุดล่อนเป็นบริเวณกว้างแต่ไม่เห็นเหล็กเสริม	พอใช้	3	(ก)
2	ทางเท้า/ ราวสะพาน	สีกร่อน หรือหลุดล่อนเล็กน้อย โฟรงขนาดเล็ก	ดีพอใช้	4	(ข)
		รอยแตกขนาดเล็ก	ดีพอใช้	4	(ค)
		รอยแตกขนาดกลาง	พอใช้	3	(ง)
		สีกร่อน หรือหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมเป็นบริเวณกว้าง	ชำรุด	2	(จ)
		มีการพังทลาย หรือไม่สามารถใช้งานได้	วิบัติ	0	(ฉ)
3	รอยต่อสะพาน	Modular Joint ชำรุดบางส่วน	ชำรุด	2	(ช)
4	คานสะพาน	หลุดล่อนเป็นบริเวณแคบ	ดีพอใช้	4	(ซ)
5	ฐานรองรับคาน	ไม่พบความเสียหาย	-	-	-
6	เสาตอม่อ	พบรอยแตกขนาดเล็ก	ดีพอใช้	4	(ณ)
7	ฐานราก	พบรอยแตกขนาดเล็ก	ดีพอใช้	4	(ญ)
		คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริม	ชำรุด	2	(ฎ)
8	เสาเข็ม	สีกร่อน หลุดล่อนเป็นบริเวณแคบ	ดีพอใช้	4	(ฏ)
9	กำแพงกันดิน	ไม่พบความเสียหาย	-	-	-



(ก) ผิวทาง สึกกร่อนบริเวณกว้าง



(ข) ร้าวสะพาน หลุดล่อนเล็กน้อย



(ค) ร้าวสะพาน เกิดรอยแตกขนาดเล็ก



(ง) ร้าวสะพาน เกิดรอยแตกขนาดกลาง



(จ) ทางเท้า หลุดล่อนเห็นเหล็กเสริมบริเวณกว้าง



(ฉ) ร้าวสะพานไม่สามารถใช้งานได้ปกติ

รูปที่ 2-9 ลักษณะความเสียหายโครงสร้างสะพาน ฝั่งซ้ายทาง



(ข) Modular Joint ชำรุดเสียหายบางส่วน



(ค) คานสะพาน หลุดล่อนบริเวณแคบ



(ง) เสาคอม่อ พบรอยแตกขนาดเล็ก



(จ) ฐานราก พบรอยแตกขนาดเล็ก



(ฉ) ฐานราก กะเทาะหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริม



(ช) เสาค้ำยัน ดึงกร่อนบริเวณแคบ

รูปที่ 2-10 ลักษณะความเสียหายโครงสร้างสะพาน ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

2.4 รายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)

ตารางที่ 2-5 ข้อมูลทั่วไปของสะพานฝั่งขวาทาง

ข้อมูลทั่วไปของสะพานฝั่งขวาทาง		
ที่ตั้ง	สำนักงานทางหลวง	สำนักงานทางหลวงที่ 18 (สงขลา)
	แขวงทางหลวง	แขวงทางหลวงสงขลาที่ 1
	ตอน (ชื่อสายทาง)	สทิงพระ – เกาะยอ
	หมายเลขทางหลวง	408
	หมายเลขตอนควบคุม	202
	หมายเลขกิโลเมตร	160+000.000 RT
ลักษณะทั่วไป	ชื่อสะพาน/สิ่งที่สะพานข้าม	ทะเลสาบสงขลา
	รหัสสะพาน	153110070
	ชนิดของสะพาน	Box Girder
	ขนาดสะพาน	BG(1x30)+ BG(41x40)+ BG(1x30)
	ความยาวสะพาน (เมตร)	1,700.00
	ความกว้างสะพาน (เมตร)	10.50
	ชนิดของผิวสะพาน	แอสฟัลต์
	จำนวนช่องจราจร	2
	Skew (องศา)	0
	ชนิดของราวสะพาน	ราว คสล. Type 3
	ปี พ.ศ. ที่สร้าง	2548

การตรวจสอบสภาพความเสียหายของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) พบว่า ลักษณะความเสียหายส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น ได้แก่ คอนกรีตมีรอยแตกร้าวทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ คอนกรีตสึกกร่อนหรือหลุดล่อน ทั้งที่เห็นเหล็กเสริมและไม่เห็นเหล็กเสริม สำหรับรายงานผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานและแบบแสดงความเสียหายของสะพานได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ข ของรายงานฉบับนี้ โดยสามารถสรุปผลการตรวจสอบและประเมินสภาพการใช้งานของสะพานได้ดังตารางที่ 2-6 และ รูปที่ 2-11

ตารางที่ 2-6 สรุปผลการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานฝั่งขวาทาง

ลำดับ	โครงสร้าง	ลักษณะความเสียหาย	การใช้งาน		รูปที่ 2.1-6
			สภาพ	ระดับ	
1	ผิวจราจร	พบรอยแตกขนาดเล็ก	ดีพอใช้	4	(ก)
2	ทางเท้า/ราวสะพาน	รอยแตกขนาดเล็ก	ดีพอใช้	4	(ข)
3	รอยต่อสะพาน	พบรอยแตกตามแนวรอยต่อ (สำหรับผิวจราจรแบบ Asphaltic Concrete)	ดีพอใช้	4	(ค)
4	คานสะพาน	หลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมเป็นบริเวณกว้าง หรือเห็นลวดอัดแรง	วิกฤติ	1	(ง)
5	แผ่นยางรองคาน	ไม่พบความเสียหาย	-	-	-
6	เสาตอม่อ	ไม่พบความเสียหาย	-	-	-
7	ฐานราก	พบรอยแตกขนาดเล็กกระจายเป็นบริเวณกว้าง	พอใช้	3	(จ)
		คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริม	ชำรุด	2	(ฉ)
8	เสาเข็ม	สึกกร่อน หลุดล่อนเป็นบริเวณกว้าง แต่ไม่เห็นเหล็กเสริม	พอใช้	3	(ช)
9	กำแพงกันดิน	ไม่พบความเสียหาย	-	-	-



(ก) ผิวจราจร พบรอยแตกขนาดเล็ก



(ข) ทางเท้า พบรอยแตกขนาดเล็ก

รูปที่ 2-11 ลักษณะความเสียหายโครงสร้างสะพาน ฝั่งขวาทาง



(ค) รอยต่อสะพาน พบรอยแตกตามแนวรอยต่อ



(ง) คานสะพาน หลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมบริเวณกว้าง



(จ) ฐานราก พบรอยแตกขนาดเล็กบริเวณกว้าง



(ฉ) ฐานราก กะเทาะหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริม



(ช) เสาค้ำ สังกะสีบริเวณแคบ

รูปที่ 2-11 ลักษณะความเสียหายโครงสร้างสะพาน ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

2.5 สรุปผลการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน

ผลการตรวจสอบสะพานฝั่งซ้ายทาง พบว่า ความเสียหายส่วนใหญ่เกิดจากการเสื่อมสภาพ ยังไม่มีความเสียหายเชิงโครงสร้างที่มีนัยสำคัญ ปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้นยังค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับพื้นที่โครงสร้างทั้งหมดของสะพาน อย่างไรก็ตาม ควรดำเนินการซ่อมแซมความเสียหายที่ตรวจพบทั้งหมด เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานสะพาน โดยความเสียหายที่สำคัญ ได้แก่ รวสะพานมีการชำรุดมากจนไม่สามารถใช้งานได้ และมีสภาพเป็นอันตรายต่อผู้สัญจร ควรสร้างราวสะพานขึ้นมาใหม่ ทดแทนราวสะพานเดิม แผ่นเหล็กบางส่วนที่รอยต่อเพื่อขยายหักชำรุด อาจทำให้รอยต่อมีสภาพไม่มั่นคง หรือการยึดหดตัวของสะพานอาจไม่เป็นไปตามปกติ ควรซ่อมแซมขึ้นส่วนที่ชำรุดหรือเปลี่ยน Modular Expansion Joint ใหม่ทั้งหมด บริเวณที่มีการหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมหรือยังไม่เห็นเหล็กเสริม ควรสกัดคอนกรีตและปะซ่อมบริเวณดังกล่าวให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันมิให้มีการสูญเสียหน้าตัดเหล็กมากไปกว่านี้

ผลการตรวจสอบสภาพการใช้งานของสะพานฝั่งขวาทาง พบว่า ขึ้นส่วนโครงสร้างส่วนใหญ่ยังมีสภาพสมบูรณ์ แต่พบความเสียหายบางตำแหน่งที่ควรซ่อมแซมเร่งด่วน คือ บริเวณด้านล่างของคาน Box Girder ช่วงสะพานที่ 14 – 18 ซึ่งพบการหลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมหลายตำแหน่ง ควรสกัดคอนกรีตและปะซ่อมบริเวณดังกล่าวให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันมิให้มีการสูญเสียหน้าตัดเหล็กมากไปกว่านี้

โดยการซ่อมขึ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหาย ควรเลือกใช้คอนกรีตสำหรับสภาพแวดล้อมทะเล (Marine Concrete) ซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานคลอไรด์และซัลเฟตในน้ำทะเลได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป (ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) หรือคอนกรีตต้านทานซัลเฟตสูง (ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) ทั้งนี้เพื่อให้ขึ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการซ่อมมีความคงทนต่อการใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมแบบชายฝั่งทะเล

บทที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด คอนกรีต

ทีมงานภาคสนามได้ดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่สะพานดินสุลาลัย ทั้งฝั่งซ้ายทางและฝั่งขวาทาง ในช่วงระหว่างวันที่ 1 – 10 มีนาคม 2558 โดยการทดสอบได้เลือกใช้วิธี Rebound Hammer ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) การทดสอบอาศัยหลักการกระแทกและการสะท้อนกลับของมวลสปริง (Spring Mass) โดยผิวคอนกรีตที่จะทดสอบจะต้องมีสภาพเรียบ และมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร ปัจจุบันวิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกระทำได้สะดวก รวดเร็ว และสามารถนำผลการทดสอบมาประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในเบื้องต้นได้ทันที

วิธีการทดสอบ Rebound Hammer นี้จะปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C 805 โดยกำหนดให้นำหัว Plunger ของ Rebound Hammer มากดตั้งฉากกับผิวคอนกรีตจนสุดปลายของ Plunger เกิดเสียงกระแทกภายใน และแสดงค่า Rebound Number ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปเทียบเป็นค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกได้ (Cylinder Concrete Compressive Strength)

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

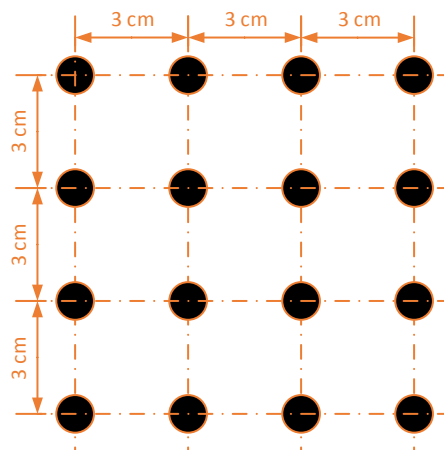
ในการทดสอบจะใช้เครื่องมือ Rebound Hammer ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งสามารถใช้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงค่าระหว่าง 100 ถึง 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ได้



รูปที่ 3-1 เครื่องมือ Rebound Hammer

3.2 วิธีการทดสอบ

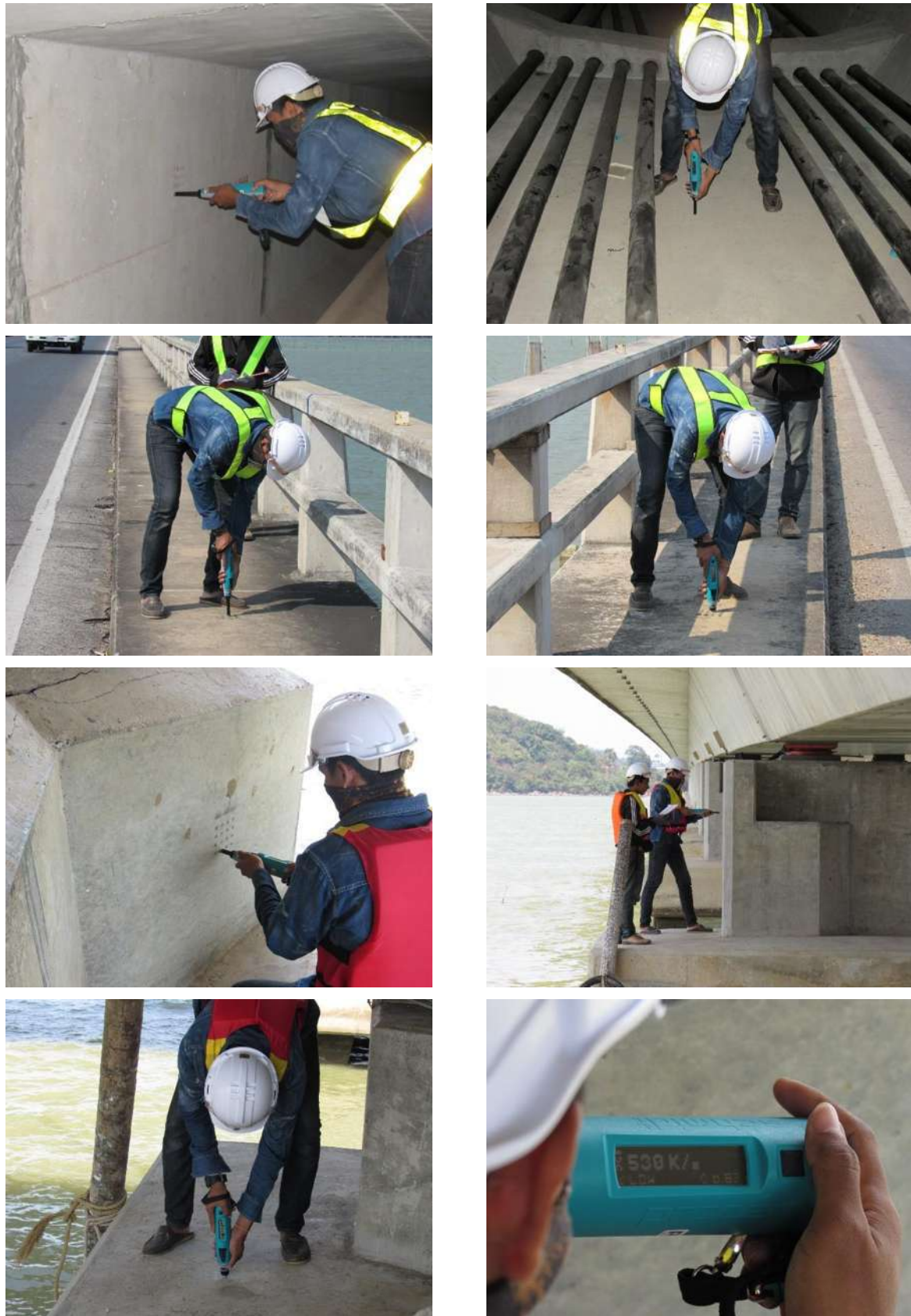
1. กำหนดตำแหน่งๆที่ต้องการจะทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างสะพาน
2. ตั้งค่าเครื่อง Rebound Hammer ให้แสดงผลกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเป็นหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) โดยเครื่องจะปรับแก้ผลการทดสอบตามทิศทางการทดสอบให้อัตโนมัติ
3. ตรวจสอบสภาพผิวที่จะทดสอบ ซึ่งจะต้องมีสภาพราบเรียบ เนื่องจากผิวที่โค้งนูนจะให้ค่าต่ำลง ส่วนผิวที่เว้าจะให้ค่าที่สูงขึ้น
4. กำหนดตำแหน่งการทดสอบจำนวน 16 จุด โดยแต่ละจุดจะต้องห่างกันอย่างน้อย 3 ซม. ดังรูปที่ 3-2
5. กดเครื่อง Rebound Hammer ในทิศทางตั้งฉากกับผิวที่จะทดสอบ โดยกดหัว Plunger บนผิวคอนกรีตจนกระทั่งสุดปลาย Plunger เกิดเสียงกระทบภายใน Rebound Hammer และปรากฏค่ากำลังรับแรงอัดขึ้น ดังรูปที่ 3-3
6. เครื่อง Rebound Hammer จะตัด 3 ค่า ที่สูงสุดและ 3 ค่า ที่ต่ำสุดออกไป แล้วเฉลี่ยค่าที่เหลือจำนวน 10 ค่า เป็นตัวแทนผลการทดสอบที่ตำแหน่งนั้นๆ



รูปที่ 3-2 การกำหนดจุดทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วย Rebound Hammer



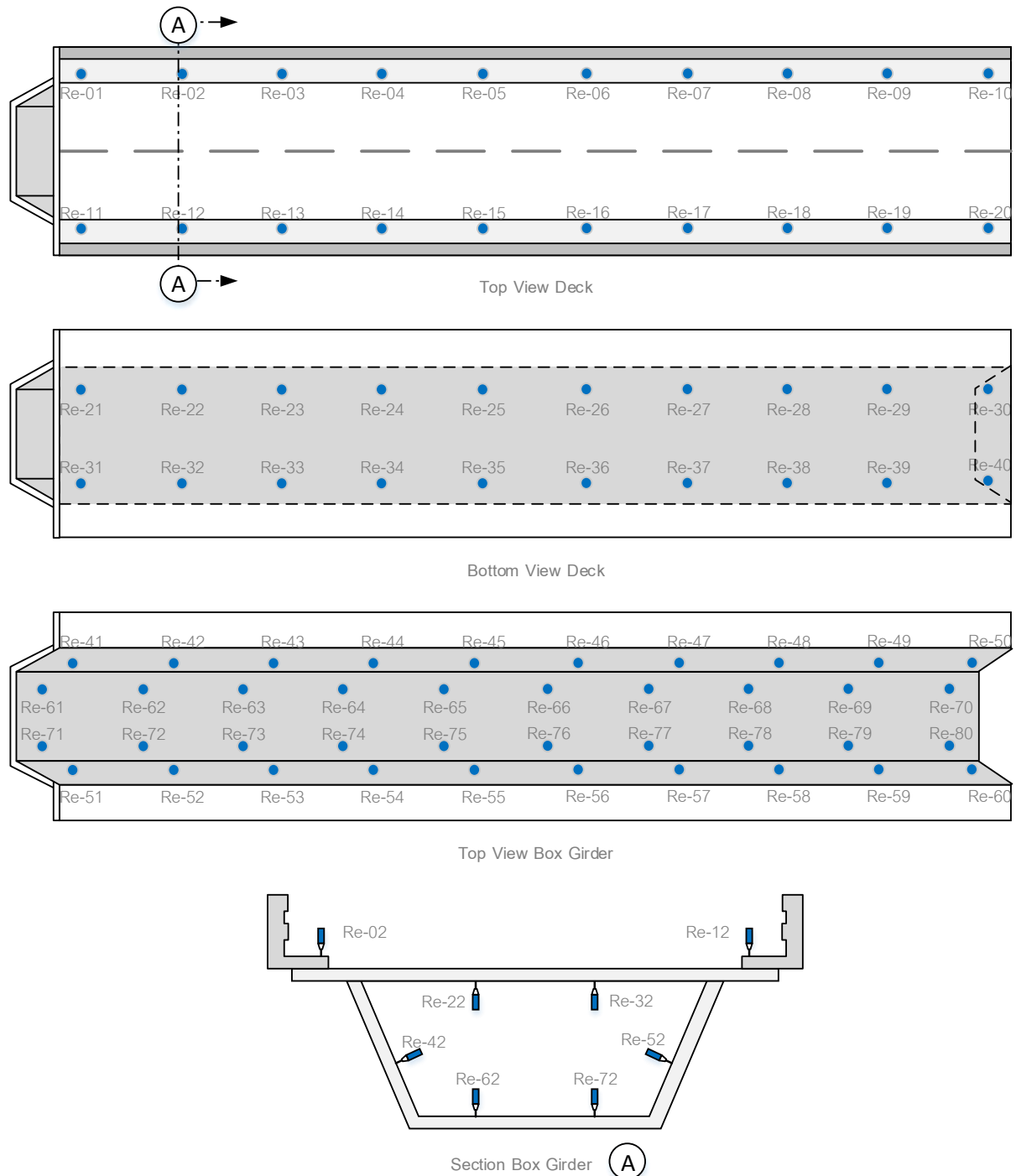
รูปที่ 3-3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วย Rebound Hammer
(ระหว่างวันที่ 1 – 10 มีนาคม 2558)



รูปที่ 3-3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วย Rebound Hammer
(ระหว่างวันที่ 1 – 10 มีนาคม 2558) (ต่อ)

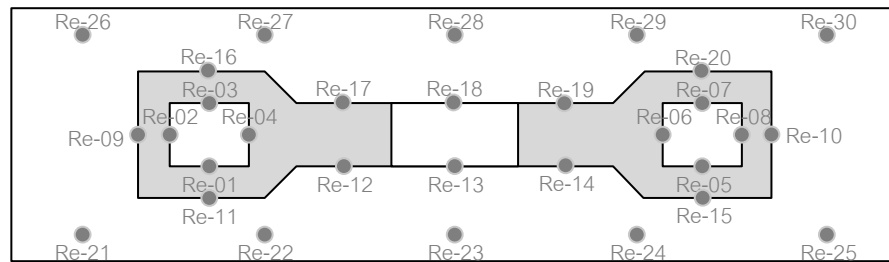
3.3 ตำแหน่งการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

ทีมงานได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ขึ้นส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Rebound Hammer จำนวนช่วงสะพานละ 80 ตำแหน่ง และต่อม่อสะพานละ 30 ตำแหน่ง ทั้งสะพานฝั่งซ้ายทางและฝั่งขวาทาง ดังแสดงในรูปที่ 3-4 ถึง รูปที่ 3-5

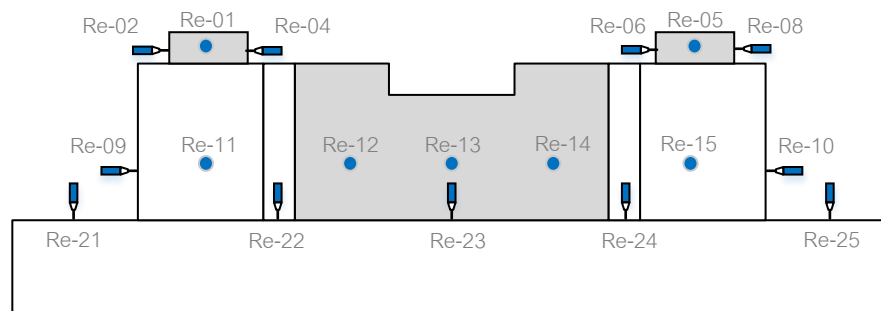


หมายเหตุ : Re หมายถึง ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ Rebound Hammer

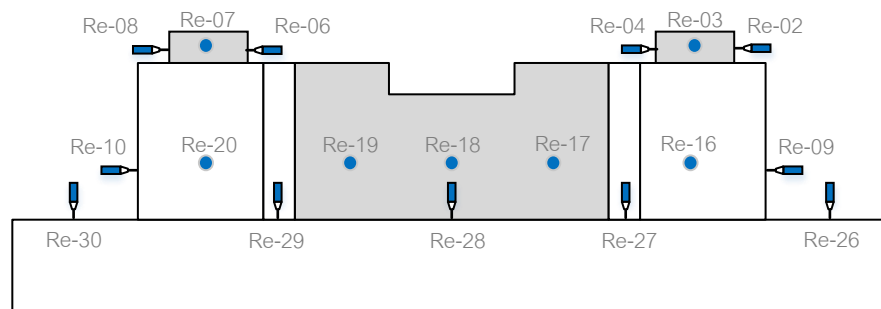
รูปที่ 3-4 ตำแหน่งทดสอบ Rebound Hammer จำนวนช่วงสะพานละ 80 ตำแหน่ง



Top View Pier



Front View Pier



Back View Pier

หมายเหตุ : Re หมายถึง ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ Rebound Hammer

รูปที่ 3-5 ตำแหน่งทดสอบ Rebound Hammer จำนวนต่อม่อสะพานละ 30 ตำแหน่ง

3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

จากการดำเนินงานภาคสนาม สามารถแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตของสะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทางและฝั่งขวาทางได้ดังตารางที่ 3-1 และตารางที่ 3-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)													
SPAN 1													
1	435	11	280	21	685	31	620	41	520	51	575	61	635
2	430	12	280	22	620	32	590	42	420	52	565	62	500
3	485	13	280	23	605	33	575	43	200	53	335	63	590
4	440	14	260	24	770	34	590	44	160	54	335	64	475
5	385	15	315	25	490	35	370	45	170	55	490	65	375
6	440	16	290	26	605	36	500	46	135	56	475	66	520
7	350	17	240	27	555	37	545	47	110	57	185	67	520
8	350	18	300	28	790	38	565	48	115	58	210	68	490
9	385	19	240	29	390	39	520	49	120	59	330	69	490
10	410	20	300	30	500	40	635	50	315	60	385	70	475

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 1					
1	565	11	435	21	380
2	500	12	490	22	450
3	570	13	310	23	325
4	550	14	280	24	425
5	570	15	545	25	385
6	565	16	440	26	530
7	615	17	235	27	410
8	485	18	315	28	420
9	340	19	380	29	395
10	390	20	460	30	435

SPAN 2													
1	435	11	315	21	545	31	465	41	365	51	345	61	410
2	410	12	300	22	540	32	590	42	350	52	250	62	530
3	386	13	345	23	620	33	565	43	220	53	165	63	590
4	390	14	280	24	520	34	560	44	310	54	260	64	500
5	485	15	360	25	300	35	530	45	385	55	315	65	715
6	400	16	280	26	500	36	590	46	390	56	250	66	490
7	385	17	230	27	620	37	635	47	445	57	180	67	435
8	350	18	350	28	500	38	540	48	390	58	290	68	500
9	350	19	245	29	555	39	615	49	265	59	385	69	410
10	380	20	300	30	540	40	510	50	390	60	250	70	520

PIER 2					
1	480	11	450	21	400
2	510	12	510	22	450
3	495	13	500	23	420
4	520	14	530	24	470
5	500	15	470	25	450
6	510	16	450	26	500
7	530	17	515	27	470
8	520	18	510	28	495
9	425	19	455	29	450
10	470	20	520	30	510

SPAN 3													
1	365	11	315	21	465	31	465	41	230	51	320	61	665
2	450	12	350	22	510	32	560	42	250	52	270	62	520
3	360	13	360	23	545	33	520	43	215	53	335	63	530
4	390	14	260	24	600	34	560	44	230	54	340	64	460
5	490	15	235	25	590	35	530	45	385	55	335	65	435
6	380	16	330	26	580	36	500	46	280	56	250	66	460
7	360	17	275	27	545	37	620	47	335	57	300	67	420
8	370	18	350	28	540	38	510	48	290	58	330	68	490
9	385	19	345	29	590	39	475	49	175	59	185	69	500
10	430	20	330	30	590	40	540	50	250	60	300	70	470

PIER 3					
1	520	11	515	21	470
2	500	12	480	22	490
3	510	13	530	23	465
4	535	14	475	24	435
5	525	15	510	25	480
6	525	16	450	26	440
7	510	17	500	27	450
8	495	18	470	28	450
9	520	19	530	29	475
10	530	20	490	30	440

SPAN 4													
1	370	11	475	21	635	31	590	41	230	51	205	61	565
2	310	12	340	22	530	32	540	42	270	52	280	62	510
3	285	13	445	23	575	33	490	43	315	53	280	63	375
4	310	14	330	24	540	34	580	44	230	54	270	64	470
5	175	15	265	25	530	35	545	45	260	55	205	65	545
6	320	16	320	26	570	36	530	46	280	56	240	66	480
7	335	17	245	27	420	37	520	47	165	57	285	67	620
8	300	18	330	28	550	38	570	48	260	58	270	68	550
9	320	19	215	29	605	39	565	49	270	59	305	69	420
10	300	20	330	30	530	40	540	50	260	60	250	70	450

PIER 4					
1	530	11	510	21	500
2	540	12	510	22	370
3	520	13	500	23	495
4	525	14	515	24	415
5	525	15	495	25	450
6	515	16	520	26	395
7	520	17	530	27	455
8	540	18	520	28	370
9	500	19	520	29	450
10	520	20	510	30	400

SPAN 5													
1	390	11	280	21	620	31	475	41	390	51	280	61	445
2	340	12	300	22	620	32	560	42	290	52	340	62	500
3	235	13	235	23	556	33	500	43	210	53	220	63	360
4	360	14	280	24	630	34	520	44	320	54	330	64	480
5	540	15	350	25	685	35	530	45	420	55	280	65	565
6	340	16	260	26	670	36	540	46	300	56	350	66	490
7	275	17	285	27	665	37	545	47	290	57	485	67	435
8	360	18	290	28	620	38	560	48	320	58	330	68	510
9	240	19	240	29	685	39	620	49	230	59	330	69	685
10	370	20	290	30	640	40	540	50	330	60	330	70	510

PIER 5					
1	565	11	520	21	395
2	500	12	520	22	315
3	570	13	555	23	400
4	550	14	535	24	350
5	570	15	540	25	425
6	565	16	570	26	360
7	615	17	535	27	390
8	485	18	585	28	375
9	530	19	525	29	350
10	515	20	515	30	380

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)													
SPAN 6													
1	420	11	325	21	620	31	530	41	410	51	375	61	520
2	335	12	370	22	620	32	580	42	410	52	280	62	470
3	485	13	375	23	685	33	620	43	355	53	240	63	590
4	335	14	340	24	620	34	590	44	390	54	270	64	480
5	355	15	305	25	620	35	565	45	445	55	195	65	445
6	410	16	370	26	620	36	560	46	410	56	260	66	500
7	435	17	315	27	665	37	545	47	475	57	365	67	360
8	345	18	360	28	630	38	590	48	410	58	280	68	500
9	420	19	420	29	530	39	605	49	360	59	200	69	479
10	290	20	350	30	630	40	580	50	420	60	290	70	460

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 6					
1	610	11	515	21	310
2	615	12	530	22	300
3	620	13	535	23	315
4	585	14	500	24	305
5	620	15	530	25	305
6	590	16	520	26	310
7	580	17	515	27	320
8	595	18	515	28	315
9	520	19	535	29	330
10	535	20	520	30	305

SPAN 7													
1	335	11	355	21	650	31	565	41	530	51	210	61	420
2	215	12	265	22	640	32	600	42	330	52	250	62	520
3	300	13	260	23	605	33	665	43	475	53	195	63	435
4	220	14	220	24	650	34	620	44	300	54	250	64	510
5	365	15	250	25	685	35	725	45	210	55	355	65	445
6	540	16	365	26	630	36	600	46	380	56	250	66	530
7	310	17	310	27	685	37	590	47	185	57	360	67	715
8	200	18	285	28	640	38	620	48	350	58	220	68	510
9	420	19	290	29	620	39	565	49	305	59	175	69	620
10	305	20	235	30	660	40	600	50	350	60	220	70	510

PIER 7					
1	625	11	510	21	385
2	590	12	525	22	350
3	620	13	515	23	390
4	585	14	535	24	385
5	600	15	520	25	350
6	620	16	515	26	360
7	635	17	500	27	395
8	615	18	520	28	375
9	515	19	535	29	380
10	510	20	530	30	365

SPAN 8													
1	285	11	330	21	735	31	590	41	365	51	335	61	390
2	320	12	320	22	580	32	580	42	230	52	340	62	470
3	420	13	310	23	620	33	530	43	155	53	355	63	650
4	410	14	310	24	600	34	560	44	230	54	290	64	450
5	490	15	260	25	590	35	635	45	265	55	300	65	420
6	470	16	320	26	580	36	590	46	210	56	280	66	480
7	310	17	175	27	465	37	565	47	180	57	230	67	500
8	195	18	300	28	580	38	550	48	230	58	290	68	480
9	345	19	460	29	565	39	545	49	195	59	355	69	445
10	315	20	290	30	600	40	600	50	240	60	300	70	460

PIER 8					
1	585	11	515	21	305
2	590	12	520	22	295
3	580	13	515	23	300
4	615	14	520	24	300
5	610	15	520	25	315
6	595	16	525	26	315
7	620	17	530	27	320
8	615	18	520	28	335
9	520	19	500	29	300
10	500	20	535	30	320

SPAN 9													
1	310	11	320	21	650	31	665	41	235	51	185	61	420
2	360	12	330	22	650	32	570	42	300	52	370	62	520
3	440	13	230	23	715	33	605	43	365	53	305	63	590
4	435	14	350	24	610	34	570	44	310	54	350	64	490
5	380	15	375	25	715	35	750	45	280	55	330	65	650
6	475	16	320	26	620	36	610	46	290	56	330	66	530
7	330	17	475	27	635	37	530	47	320	57	420	67	530
8	320	18	310	28	630	38	590	48	290	58	330	68	490
9	385	19	270	29	555	39	520	49	280	59	545	69	435
10	370	20	310	30	620	40	630	50	280	60	340	70	530

PIER 9					
1	490	11	555	21	465
2	485	12	565	22	430
3	450	13	530	23	450
4	475	14	530	24	425
5	535	15	525	25	455
6	500	16	555	26	435
7	520	17	570	27	445
8	545	18	500	28	425
9	530	19	530	29	450
10	515	20	570	30	455

SPAN 10													
1	575	11	410	21	685	31	520	41	315	51	330	61	410
2	515	12	320	22	620	32	580	42	310	52	320	62	380
3	615	13	310	23	565	33	545	43	355	53	270	63	410
4	585	14	245	24	640	34	590	44	340	54	340	64	360
5	410	15	300	25	605	35	565	45	315	55	305	65	370
6	440	16	310	26	600	36	570	46	330	56	310	66	380
7	500	17	300	27	650	37	685	47	335	57	555	67	315
8	435	18	255	28	610	38	570	48	350	58	320	68	380
9	530	19	300	29	545	39	650	49	375	59	165	69	335
10	495	20	330	30	600	40	620	50	330	60	340	70	350

PIER 10					
1	620	11	520	21	395
2	600	12	555	22	380
3	615	13	535	23	380
4	635	14	550	24	395
5	585	15	510	25	350
6	615	16	525	26	390
7	595	17	515	27	365
8	590	18	535	28	350
9	510	19	520	29	375
10	530	20	540	30	355

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)															
SPAN 11															
1	370	11	345	21	685	31	590	41	190	51	255	61	385	71	360
2	340	12	330	22	570	32	590	42	250	52	310	62	450	72	440
3	465	13	335	23	530	33	620	43	185	53	280	63	385	73	435
4	445	14	310	24	540	34	560	44	250	54	320	64	430	74	460
5	565	15	330	25	565	35	520	45	320	55	360	65	345	75	555
6	390	16	350	26	540	36	590	46	260	56	320	66	460	76	470
7	485	17	310	27	445	37	550	47	330	57	285	67	475	77	360
8	390	18	360	28	570	38	570	48	250	58	320	68	420	78	450
9	390	19	375	29	545	39	565	49	145	59	335	69	620	79	545
10	470	20	360	30	580	40	590	50	220	60	300	70	450	80	460

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 11					
1	615	11	535	21	350
2	605	12	520	22	330
3	645	13	520	23	320
4	620	14	515	24	315
5	615	15	530	25	335
6	605	16	525	26	345
7	620	17	535	27	340
8	610	18	535	28	350
9	550	19	510	29	325
10	500	20	525	30	330

SPAN 12															
1	385	11	565	21	590	31	410	41	315	51	205	61	330	71	465
2	430	12	420	22	580	32	420	42	270	52	280	62	500	72	460
3	435	13	280	23	575	33	590	43	330	53	305	63	590	73	330
4	360	14	400	24	570	34	440	44	260	54	250	64	480	74	490
5	270	15	445	25	490	35	365	45	165	55	180	65	345	75	565
6	285	16	410	26	590	36	460	46	290	56	320	66	490	76	520
7	340	17	430	27	620	37	375	47	375	57	355	67	565	77	605
8	235	18	400	28	590	38	430	48	260	58	300	68	470	78	540
9	465	19	355	29	620	39	520	49	155	59	410	69	555	79	565
10	345	20	430	30	600	40	480	50	240	60	270	70	500	80	490

PIER 12					
1	545	11	580	21	400
2	570	12	540	22	450
3	585	13	575	23	415
4	565	14	545	24	415
5	580	15	580	25	430
6	545	16	535	26	430
7	450	17	585	27	420
8	495	18	560	28	440
9	570	19	605	29	440
10	595	20	550	30	420

SPAN 13															
1	365	11	470	21	475	31	500	41	185	51	310	61	715	71	565
2	380	12	360	22	540	32	550	42	310	52	330	62	530	72	450
3	305	13	495	23	620	33	555	43	280	53	490	63	575	73	465
4	470	14	360	24	550	34	500	44	250	54	270	64	480	74	440
5	375	15	310	25	445	35	520	45	180	55	235	65	520	75	410
6	315	16	390	26	540	36	510	46	260	56	290	66	490	76	490
7	440	17	315	27	530	37	465	47	375	57	240	67	445	77	435
8	385	18	400	28	530	38	490	48	240	58	270	68	550	78	440
9	380	19	290	29	620	39	520	49	320	59	290	69	365	79	445
10	410	20	360	30	570	40	520	50	290	60	330	70	530	80	480

PIER 13					
1	625	11	500	21	420
2	600	12	520	22	400
3	615	13	515	23	430
4	585	14	515	24	430
5	590	15	535	25	425
6	610	16	530	26	425
7	585	17	505	27	415
8	595	18	520	28	400
9	520	19	555	29	410
10	530	20	540	30	405

SPAN 14															
1	565	11	340	21	590	31	470	41	375	51	320	61	410	71	365
2	440	12	370	22	480	32	450	42	260	52	270	62	490	72	400
3	550	13	375	23	410	33	410	43	155	53	215	63	390	73	420
4	520	14	310	24	490	34	480	44	270	54	290	64	460	74	410
5	430	15	375	25	490	35	430	45	390	55	420	65	315	75	445
6	465	16	370	26	520	36	480	46	300	56	310	66	460	76	410
7	430	17	330	27	530	37	500	47	200	57	345	67	650	77	460
8	390	18	380	28	510	38	450	48	270	58	290	68	420	78	410
9	515	19	270	29	465	39	420	49	335	59	195	69	530	79	360
10	605	20	340	30	500	40	410	50	300	60	310	70	440	80	390

PIER 14					
1	620	11	570	21	450
2	585	12	550	22	430
3	615	13	565	23	450
4	595	14	555	24	455
5	595	15	575	25	455
6	600	16	570	26	450
7	620	17	565	27	445
8	620	18	580	28	445
9	560	19	575	29	435
10	505	20	585	30	400

SPAN 15															
1	360	11	440	21	465	31	490	41	315	51	330	61	445	71	435
2	440	12	390	22	440	32	470	42	310	52	350	62	420	72	400
3	360	13	290	23	475	33	545	43	260	53	290	63	445	73	355
4	385	14	340	24	440	34	460	44	380	54	350	64	410	74	390
5	350	15	360	25	355	35	620	45	475	55	365	65	500	75	385
6	460	16	350	26	430	36	490	46	320	56	380	66	430	76	350
7	420	17	360	27	500	37	390	47	215	57	365	67	445	77	350
8	515	18	330	28	450	38	510	48	340	58	320	68	400	78	340
9	490	19	370	29	355	39	390	49	465	59	410	69	290	79	325
10	465	20	360	30	440	40	490	50	320	60	370	70	410	80	350

PIER 15					
1	595	11	515	21	350
2	595	12	535	22	305
3	590	13	520	23	450
4	610	14	520	24	375
5	620	15	535	25	305
6	615	16	535	26	400
7	610	17	520	27	370
8	630	18	550	28	415
9	500	19	555	29	385
10	515	20	555	30	400

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)													
SPAN 16													
1	410	11	360	21	475	31	525	41	280	51	155	61	375
2	435	12	410	22	520	32	510	42	370	52	290	62	490
3	565	13	225	23	520	33	380	43	355	53	180	63	390
4	440	14	410	24	550	34	510	44	320	54	320	64	460
5	500	15	460	25	435	35	465	45	245	55	360	65	390
6	345	16	340	26	510	36	510	46	360	56	280	66	470
7	570	17	350	27	545	37	605	47	360	57	370	67	575
8	470	18	390	28	550	38	480	48	350	58	320	68	460
9	485	19	465	29	685	39	590	49	530	59	420	69	620
10	525	20	360	30	510	40	530	50	350	60	320	70	450

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 16					
1	600	11	550	21	400
2	605	12	570	22	415
3	620	13	555	23	415
4	615	14	575	24	380
5	590	15	535	25	420
6	620	16	560	26	385
7	585	17	520	27	405
8	615	18	565	28	370
9	570	19	555	29	390
10	565	20	580	30	365

SPAN 17													
1	565	11	390	21	410	31	380	41	390	51	375	61	635
2	585	12	420	22	550	32	520	42	300	52	450	62	460
3	565	13	420	23	555	33	540	43	230	53	500	63	370
4	440	14	380	24	560	34	480	44	270	54	420	64	480
5	525	15	490	25	650	35	590	45	330	55	575	65	410
6	355	16	440	26	540	36	520	46	270	56	420	66	450
7	315	17	390	27	475	37	555	47	230	57	335	67	475
8	490	18	400	28	510	38	510	48	310	58	430	68	460
9	335	19	360	29	605	39	445	49	285	59	380	69	490
10	615	20	410	30	520	40	530	50	280	60	440	70	470

PIER 17					
1	620	11	550	21	450
2	630	12	515	22	450
3	615	13	555	23	460
4	625	14	520	24	450
5	585	15	530	25	455
6	595	16	535	26	455
7	580	17	515	27	465
8	590	18	520	28	465
9	530	19	525	29	455
10	530	20	525	30	465

SPAN 18													
1	420	11	575	21	335	31	465	41	195	51	320	61	555
2	475	12	370	22	440	32	510	42	260	52	430	62	450
3	370	13	260	23	545	33	555	43	285	53	495	63	355
4	495	14	370	24	470	34	540	44	310	54	430	64	500
5	355	15	380	25	445	35	565	45	185	55	545	65	590
6	325	16	380	26	480	36	490	46	270	56	420	66	480
7	410	17	325	27	500	37	485	47	300	57	340	67	410
8	565	18	380	28	470	38	540	48	270	58	430	68	460
9	445	19	330	29	555	39	525	49	475	59	465	69	490
10	315	20	390	30	490	40	540	50	270	60	440	70	470

PIER 18					
1	615	11	520	21	460
2	620	12	530	22	450
3	600	13	525	23	450
4	620	14	550	24	445
5	590	15	530	25	465
6	625	16	555	26	465
7	600	17	555	27	470
8	600	18	570	28	450
9	535	19	540	29	450
10	555	20	580	30	470

SPAN 19													
1	495	11	475	21	500	31	370	41	160	51	435	61	280
2	375	12	340	22	340	32	450	42	310	52	370	62	430
3	390	13	335	23	500	33	565	43	265	53	360	63	445
4	620	14	320	24	300	34	490	44	290	54	310	64	450
5	390	15	210	25	435	35	530	45	420	55	230	65	490
6	565	16	310	26	300	36	480	46	290	56	330	66	460
7	420	17	315	27	355	37	420	47	375	57	280	67	420
8	500	18	340	28	350	38	470	48	250	58	370	68	460
9	570	19	340	29	620	39	470	49	215	59	390	69	465
10	540	20	360	30	350	40	480	50	250	60	330	70	410

PIER 19					
1	560	11	560	21	400
2	600	12	615	22	425
3	555	13	565	23	450
4	585	14	620	24	450
5	605	15	550	25	425
6	585	16	580	26	455
7	590	17	570	27	450
8	590	18	550	28	430
9	500	19	555	29	435
10	580	20	570	30	450

SPAN 20													
1	495	11	475	21	500	31	370	41	160	51	435	61	280
2	375	12	310	22	320	32	460	42	250	52	370	62	410
3	390	13	335	23	500	33	565	43	265	53	360	63	445
4	620	14	330	24	310	34	460	44	280	54	370	64	430
5	390	15	210	25	435	35	530	45	420	55	230	65	490
6	565	16	340	26	320	36	450	46	320	56	380	66	400
7	420	17	315	27	355	37	420	47	375	57	280	67	420
8	500	18	330	28	310	38	490	48	260	58	320	68	440
9	570	19	340	29	620	39	470	49	215	59	390	69	465
10	540	20	300	30	310	40	450	50	240	60	330	70	410

PIER 20					
1	625	11	620	21	405
2	610	12	620	22	450
3	630	13	570	23	395
4	605	14	530	24	380
5	625	15	615	25	440
6	595	16	565	26	365
7	600	17	630	27	430
8	630	18	580	28	415
9	610	19	545	29	450
10	550	20	610	30	420

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานตลเสลลนท ฝั่งซ้ายทง (สะพานเดิม)															
SPAN 21															
1	345	11	290	21	555	31	490	41	300	51	315	61	370	71	350
2	330	12	350	22	580	32	500	42	290	52	260	62	530	72	460
3	490	13	360	23	605	33	550	43	390	53	265	63	465	73	565
4	360	14	540	24	520	34	510	44	260	54	280	64	500	74	490
5	340	15	360	25	605	35	555	45	200	55	320	65	650	75	520
6	495	16	350	26	530	36	540	46	260	56	250	66	510	76	450
7	325	17	360	27	565	37	360	47	270	57	270	67	410	77	365
8	470	18	330	28	550	38	510	48	300	58	260	68	520	78	470
9	420	19	380	29	435	39	665	49	245	59	230	69	620	79	490
10	455	20	350	30	570	40	510	50	280	60	280	70	520	80	480

สะพานตลเสลลนท ฝั่งซ้ายทง (สะพานเดิม)					
PIER 21					
1	605	11	625	21	545
2	605	12	625	22	520
3	585	13	650	23	520
4	615	14	600	24	530
5	630	15	600	25	510
6	600	16	615	26	550
7	635	17	615	27	535
8	630	18	620	28	550
9	610	19	620	29	540
10	630	20	610	30	555

SPAN 22															
1	495	11	520	21	520	31	435	41	305	51	230	61	590	71	465
2	385	12	360	22	490	32	540	42	280	52	260	62	520	72	420
3	495	13	335	23	420	33	575	43	345	53	280	63	545	73	395
4	475	14	380	24	480	34	570	44	240	54	270	64	510	74	410
5	390	15	360	25	650	35	545	45	315	55	370	65	520	75	390
6	575	16	380	26	490	36	540	46	300	56	300	66	530	76	430
7	520	17	335	27	445	37	565	47	215	57	175	67	445	77	460
8	360	18	390	28	490	38	560	48	270	58	250	68	510	78	390
9	385	19	280	29	445	39	620	49	185	59	290	69	420	79	375
10	320	20	370	30	500	40	560	50	300	60	270	70	500	80	400

PIER 22					
1	580	11	550	21	450
2	605	12	505	22	460
3	595	13	570	23	450
4	595	14	510	24	390
5	600	15	565	25	450
6	620	16	520	26	410
7	605	17	560	27	455
8	610	18	555	28	430
9	500	19	580	29	500
10	590	20	570	30	440

SPAN 23															
1	315	11	360	21	685	31	590	41	500	51	315	61	445	71	485
2	375	12	340	22	540	32	540	42	340	52	300	62	510	72	460
3	490	13	360	23	565	33	665	43	305	53	410	63	520	73	490
4	465	14	330	24	530	34	560	44	320	54	360	64	470	74	500
5	540	15	330	25	435	35	435	45	270	55	420	65	420	75	465
6	475	16	310	26	550	36	550	46	310	56	340	66	490	76	490
7	420	17	285	27	465	37	555	47	315	57	265	67	410	77	470
8	435	18	370	28	550	38	570	48	320	58	330	68	500	78	490
9	520	19	360	29	555	39	540	49	205	59	225	69	590	79	545
10	430	20	360	30	570	40	560	50	310	60	320	70	500	80	500

PIER 23					
1	595	11	550	21	405
2	605	12	570	22	455
3	600	13	545	23	450
4	615	14	580	24	465
5	590	15	530	25	430
6	605	16	565	26	455
7	585	17	540	27	425
8	580	18	580	28	470
9	540	19	555	29	430
10	560	20	590	30	475

SPAN 24															
1	435	11	530	21	545	31	605	41	210	51	270	61	355	71	475
2	475	12	490	22	600	32	590	42	330	52	370	62	440	72	490
3	435	13	380	23	475	33	565	43	420	53	525	63	435	73	500
4	310	14	490	24	580	34	550	44	350	54	400	64	440	74	490
5	360	15	435	25	555	35	575	45	300	55	260	65	490	75	565
6	320	16	450	26	590	36	540	46	340	56	360	66	440	76	530
7	460	17	525	27	735	37	605	47	370	57	445	67	475	77	515
8	320	18	470	28	600	38	540	48	310	58	400	68	440	78	500
9	440	19	530	29	620	39	485	49	345	59	355	69	475	79	500
10	520	20	490	30	600	40	600	50	330	60	380	70	420	80	490

PIER 24					
1	560	11	580	21	450
2	565	12	550	22	410
3	505	13	585	23	430
4	600	14	590	24	420
5	570	15	565	25	420
6	575	16	580	26	430
7	555	17	585	27	430
8	575	18	540	28	440
9	570	19	565	29	450
10	580	20	545	30	425

SPAN 25															
1	565	11	380	21	565	31	490	41	370	51	460	61	465	71	515
2	500	12	460	22	540	32	470	42	350	52	360	62	450	72	390
3	360	13	340	23	620	33	515	43	335	53	265	63	345	73	410
4	410	14	410	24	530	34	470	44	330	54	370	64	430	74	430
5	420	15	490	25	620	35	530	45	355	55	410	65	555	75	380
6	445	16	440	26	540	36	470	46	340	56	390	66	440	76	410
7	520	17	569	27	495	37	470	47	265	57	410	67	385	77	420
8	410	18	440	28	560	38	470	48	320	58	370	68	400	78	400
9	365	19	380	29	385	39	375	49	370	59	360	69	350	79	320
10	520	20	420	30	550	40	480	50	320	60	400	70	430	80	440

PIER 25					
1	650	11	590	21	470
2	615	12	560	22	465
3	630	13	585	23	450
4	550	14	565	24	450
5	600	15	570	25	465
6	605	16	580	26	455
7	580	17	580	27	475
8	595	18	575	28	450
9	580	19	575	29	455
10	565	20	565	30	470

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)													
SPAN 26													
1	490	11	495	21	590	31	485	41	375	51	385	61	475
2	370	12	490	22	520	32	510	42	320	52	350	62	430
3	440	13	525	23	530	33	620	43	545	53	310	63	435
4	390	14	520	24	510	34	560	44	360	54	370	64	450
5	370	15	410	25	520	35	500	45	265	55	360	65	445
6	375	16	530	26	530	36	510	46	330	56	330	66	460
7	525	17	600	27	555	37	635	47	285	57	280	67	445
8	495	18	510	28	550	38	530	48	330	58	370	68	430
9	390	19	465	29	500	39	435	49	270	59	360	69	390
10	500	20	480	30	560	40	550	50	350	60	340	70	410

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 26					
1	620	11	570	21	450
2	615	12	500	22	425
3	595	13	560	23	450
4	585	14	545	24	400
5	605	15	550	25	400
6	550	16	525	26	455
7	595	17	530	27	430
8	590	18	530	28	435
9	570	19	575	29	425
10	585	20	540	30	420

SPAN 27													
1	485	11	485	21	420	31	365	41	290	51	475	61	425
2	485	12	460	22	530	32	450	42	320	52	370	62	460
3	575	13	475	23	490	33	430	43	280	53	350	63	520
4	440	14	440	24	540	34	470	44	320	54	350	64	460
5	445	15	360	25	530	35	530	45	445	55	305	65	420
6	445	16	450	26	540	36	420	46	330	56	400	66	450
7	435	17	485	27	590	37	520	47	370	57	495	67	355
8	570	18	430	28	530	38	450	48	340	58	390	68	460
9	490	19	375	29	665	39	350	49	270	59	270	69	545
10	545	20	410	30	550	40	450	50	350	60	410	70	470

PIER 27					
1	630	11	565	21	420
2	580	12	505	22	400
3	620	13	575	23	435
4	620	14	525	24	425
5	615	15	580	25	440
6	590	16	535	26	430
7	570	17	575	27	425
8	600	18	540	28	430
9	560	19	580	29	445
10	565	20	555	30	440

SPAN 28													
1	500	11	530	21	605	31	635	41	320	51	319	61	320
2	525	12	450	22	510	32	530	42	340	52	300	62	390
3	540	13	365	23	475	33	445	43	390	53	305	63	500
4	525	14	420	24	520	34	540	44	320	54	310	64	410
5	365	15	410	25	465	35	525	45	280	55	440	65	320
6	410	16	470	26	500	36	560	46	330	56	340	66	370
7	515	17	410	27	520	37	660	47	225	57	215	67	465
8	460	18	420	28	540	38	550	48	320	58	310	68	390
9	390	19	515	29	565	39	460	49	375	59	315	69	330
10	325	20	450	30	540	40	540	50	300	60	330	70	400

PIER 28					
1	600	11	550	21	400
2	605	12	570	22	430
3	650	13	545	23	425
4	580	14	575	24	420
5	650	15	600	25	430
6	590	16	565	26	45
7	610	17	610	27	410
8	650	18	570	28	430
9	585	19	555	29	415
10	590	20	580	30	450

SPAN 29													
1	375	11	485	21	520	31	540	41	235	51	225	61	445
2	500	12	520	22	570	32	530	42	350	52	370	62	460
3	525	13	495	23	590	33	420	43	370	53	550	63	465
4	565	14	510	24	560	34	530	44	310	54	410	64	460
5	355	15	430	25	565	35	620	45	345	55	440	65	370
6	490	16	520	26	520	36	560	46	350	56	390	66	440
7	555	17	565	27	575	37	665	47	210	57	330	67	490
8	550	18	510	28	580	38	550	48	300	58	400	68	480
9	620	19	525	29	500	39	420	49	465	59	355	69	575
10	585	20	470	30	540	40	530	50	330	60	390	70	460

PIER 29					
1	605	11	615	21	500
2	585	12	520	22	450
3	600	13	620	23	500
4	610	14	530	24	445
5	615	15	600	25	495
6	615	16	550	26	430
7	65	17	545	27	525
8	585	18	520	28	500
9	590	19	550	29	510
10	545	20	565	30	465

SPAN 30													
1	470	11	540	21	330	31	445	41	355	51	300	61	475
2	390	12	510	22	555	32	605	42	320	52	465	62	385
3	540	13	365	23	475	33	475	43	290	53	505	63	605
4	530	14	480	24	565	34	454	44	345	54	320	64	500
5	445	15	570	25	530	35	520	45	300	55	245	65	475
6	500	16	500	26	715	36	565	46	340	56	365	66	380
7	525	17	575	27	620	37	475	47	454	57	290	67	500
8	430	18	520	28	555	38	435	48	365	58	345	68	520
9	385	19	435	29	605	39	605	49	390	59	205	69	454
10	440	20	500	30	500	40	500	50	210	60	454	70	555

PIER 30					
1	615	11	615	21	455
2	630	12	540	22	490
3	620	13	620	23	435
4	625	14	535	24	475
5	550	15	650	25	425
6	610	16	520	26	480
7	595	17	615	27	450
8	650	18	610	28	485
9	600	19	510	29	485
10	535	20	600	30	425

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)															
SPAN 31															
1	485	11	475	21	605	31	545	41	205	51	390	61	545	71	390
2	330	12	460	22	505	32	435	42	280	52	365	62	420	72	520
3	420	13	445	23	555	33	500	43	345	53	335	63	445	73	345
4	385	14	460	24	605	34	445	44	205	54	235	64	390	74	420
5	470	15	470	25	475	35	385	45	385	55	315	65	605	75	475
6	325	16	490	26	530	36	420	46	365	56	265	66	420	76	445
7	420	17	485	27	365	37	565	47	265	57	320	67	555	77	420
8	345	18	450	28	410	38	355	48	345	58	345	68	235	78	555
9	500	19	470	29	520	39	620	49	420	59	420	69	365	79	530
10	500	20	450	30	705	40	420	50	315	60	345	70	500	80	390

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 31					
1	610	11	620	21	500
2	655	12	600	22	515
3	650	13	635	23	515
4	660	14	535	24	450
5	595	15	640	25	500
6	615	16	600	26	435
7	600	17	650	27	465
8	620	18	545	28	500
9	615	19	625	29	500
10	600	20	600	30	485

SPAN 32															
1	430	11	540	21	410	31	345	41	235	51	445	61	520	71	456
2	310	12	460	22	390	32	605	42	320	52	345	62	490	72	305
3	410	13	465	23	505	33	475	43	195	53	490	63	555	73	345
4	475	14	460	24	490	34	635	44	505	54	235	64	305	74	475
5	500	15	440	25	305	35	555	45	345	55	375	65	520	75	315
6	520	16	470	26	605	36	565	46	340	56	395	66	475	76	490
7	345	17	470	27	575	37	715	47	454	57	365	67	445	77	520
8	435	18	460	28	475	38	490	48	205	58	345	68	635	78	345
9	390	19	410	29	605	39	435	49	305	59	290	69	565	79	575
10	430	20	490	30	380	40	445	50	415	60	205	70	555	80	605

SPAN 32					
PIER 32					
1	650	11	595	21	450
2	590	12	575	22	450
3	585	13	610	23	430
4	620	14	560	24	455
5	590	15	615	25	420
6	600	16	580	26	435
7	620	17	620	27	455
8	585	18	570	28	460
9	645	19	595	29	495
10	580	20	565	30	430

SPAN 33															
1	430	11	390	21	505	31	575	41	210	51	210	61	605	71	465
2	565	12	520	22	705	32	320	42	225	52	385	62	520	72	500
3	370	13	550	23	420	33	500	43	355	53	290	63	375	73	385
4	365	14	500	24	575	34	650	44	290	54	465	64	385	74	465
5	495	15	495	25	465	35	530	45	375	55	225	65	500	75	520
6	545	16	500	26	590	36	390	46	435	56	320	66	420	76	375
7	540	17	575	27	385	37	520	47	320	57	225	67	530	77	565
8	380	18	470	28	565	38	575	48	345	58	210	68	500	78	620
9	525	19	435	29	500	39	390	49	320	59	205	69	320	79	465
10	475	20	480	30	420	40	620	50	205	60	320	70	475	80	520

SPAN 33					
PIER 33					
1	620	11	560	21	545
2	620	12	580	22	515
3	610	13	610	23	530
4	600	14	575	24	520
5	595	15	610	25	535
6	590	16	570	26	535
7	615	17	535	27	520
8	615	18	610	28	520
9	595	19	555	29	530
10	570	20	635	30	515

SPAN 34															
1	515	11	555	21	545	31	575	41	210	51	345	61	490	71	565
2	390	12	480	22	500	32	465	42	375	52	465	62	390	72	355
3	325	13	550	23	385	33	565	43	530	53	205	63	385	73	375
4	420	14	460	24	475	34	555	44	465	54	465	64	555	74	355
5	460	15	410	25	545	35	475	45	290	55	375	65	500	75	385
6	475	16	470	26	715	36	500	46	355	56	290	66	545	76	500
7	500	17	440	27	565	37	635	47	345	57	385	67	390	77	420
8	495	18	490	28	635	38	520	48	520	58	230	68	465	78	465
9	390	19	390	29	475	39	545	49	490	59	345	69	420	79	565
10	430	20	470	30	575	40	605	50	260	60	390	70	355	80	420

SPAN 34					
PIER 34					
1	610	11	635	21	430
2	595	12	580	22	420
3	620	13	650	23	420
4	580	14	610	24	425
5	615	15	545	25	415
6	600	16	615	26	435
7	630	17	560	27	420
8	610	18	545	28	445
9	620	19	610	29	430
10	545	20	585	30	450

SPAN 35															
1	520	11	390	21	435	31	620	41	300	51	475	61	465	71	385
2	355	12	430	22	385	32	490	42	215	52	410	62	375	72	420
3	515	13	360	23	555	33	465	43	220	53	370	63	435	73	435
4	460	14	450	24	490	34	410	44	320	54	210	64	575	74	665
5	495	15	500	25	520	35	520	45	305	55	490	65	490	75	420
6	520	16	420	26	465	36	465	46	355	56	285	66	520	76	545
7	460	17	590	27	545	37	490	47	345	57	370	67	420	77	545
8	565	18	430	28	420	38	620	48	290	58	265	68	360	78	385
9	570	19	355	29	410	39	465	49	410	59	355	69	385	79	435
10	550	20	440	30	465	40	545	50	385	60	435	70	465	80	300

SPAN 35					
PIER 35					
1	550	11	635	21	500
2	590	12	635	22	450
3	630	13	615	23	515
4	605	14	650	24	435
5	615	15	645	25	420
6	620	16	615	26	445
7	610	17	630	27	515
8	585	18	530	28	450
9	620	19	625	29	435
10	650	20	600	30	515

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)															
SPAN 36															
1	550	11	420	21	590	31	520	41	290	51	300	61	475	71	445
2	565	12	460	22	555	32	500	42	365	52	290	62	500	72	500
3	545	13	530	23	715	33	605	43	375	53	315	63	565	73	490
4	490	14	480	24	530	34	520	44	355	54	420	64	345	74	565
5	475	15	440	25	490	35	545	45	385	55	335	65	620	75	420
6	500	16	430	26	575	36	490	46	375	56	345	66	490	76	565
7	520	17	445	27	555	37	555	47	370	57	300	67	520	77	530
8	550	18	440	28	635	38	520	48	285	58	465	68	410	78	370
9	600	19	440	29	435	39	565	49	375	59	300	69	370	79	435
10	565	20	470	30	620	40	465	50	215	60	200	70	316	80	445

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 36					
1	615	11	525	21	420
2	560	12	560	22	325
3	620	13	625	23	430
4	625	14	610	24	350
5	610	15	600	25	425
6	585	16	595	26	450
7	630	17	530	27	445
8	615	18	590	28	430
9	545	19	545	29	415
10	550	20	610	30	445

SPAN 37															
1	475	11	370	21	475	31	420	41	220	51	330	61	390	71	465
2	515	12	370	22	445	32	500	42	515	52	315	62	385	72	290
3	620	13	370	23	565	33	620	43	355	53	370	63	410	73	315
4	530	14	380	24	590	34	520	44	305	54	235	64	305	74	335
5	460	15	320	25	555	35	490	45	265	55	270	65	410	75	490
6	490	16	380	26	445	36	555	46	300	56	365	66	545	76	500
7	440	17	430	27	500	37	530	47	555	57	315	67	385	77	420
8	585	18	380	28	490	38	565	48	285	58	435	68	545	78	335
9	575	19	420	29	375	39	605	49	375	59	335	69	410	79	490
10	385	20	410	30	465	40	620	50	456	60	205	70	375	80	355

PIER 37					
1	570	11	610	21	545
2	580	12	630	22	555
3	585	13	620	23	530
4	600	14	625	24	530
5	600	15	585	25	515
6	605	16	630	26	540
7	605	17	610	27	545
8	595	18	545	28	565
9	595	19	620	29	520
10	595	20	610	30	570

SPAN 38															
1	575	11	410	21	454	31	565	41	320	51	335	61	380	71	380
2	545	12	500	22	530	32	665	42	505	52	454	62	420	72	565
3	615	13	515	23	605	33	500	43	225	53	205	63	555	73	280
4	570	14	530	24	465	34	490	44	345	54	225	64	220	74	420
5	490	15	555	25	620	35	590	45	565	55	265	65	410	75	375
6	545	16	530	26	475	36	465	46	320	56	200	66	445	76	530
7	495	17	550	27	530	37	605	47	285	57	315	67	445	77	490
8	460	18	490	28	605	38	575	48	370	58	335	68	220	78	415
9	495	19	470	29	555	39	445	49	225	59	520	69	305	79	285
10	485	20	510	30	490	40	605	50	420	60	200	70	410	80	330

PIER 38					
1	605	11	635	21	545
2	595	12	640	22	420
3	595	13	615	23	535
4	585	14	645	24	435
5	550	15	600	25	545
6	575	16	655	26	425
7	580	17	615	27	450
8	600	18	650	28	500
9	620	19	620	29	350
10	635	20	620	30	475

SPAN 39															
1	555	11	500	21	505	31	520	41	265	51	420	61	520	71	305
2	550	12	480	22	535	32	555	42	320	52	375	62	490	72	375
3	465	13	600	23	475	33	635	43	490	53	490	63	565	73	305
4	515	14	480	24	500	34	490	44	285	54	315	64	605	74	575
5	420	15	445	25	490	35	510	45	305	55	205	65	496	75	420
6	420	16	480	26	555	36	565	46	454	56	445	66	555	76	345
7	530	17	410	27	454	37	410	47	300	57	395	67	454	77	475
8	530	18	470	28	605	38	500	48	335	58	420	68	380	78	390
9	465	19	565	29	520	39	605	49	205	59	365	69	555	79	500
10	555	20	500	30	475	40	445	50	345	60	520	70	420	80	445

PIER 39					
1	510	11	630	21	450
2	590	12	615	22	380
3	650	13	650	23	430
4	600	14	630	24	415
5	600	15	615	25	420
6	615	16	545	26	425
7	660	17	625	27	400
8	620	18	600	28	400
9	620	19	630	29	500
10	615	20	605	30	350

SPAN 40															
1	545	11	570	21	475	31	715	41	343	51	285	61	410	71	575
2	520	12	460	22	420	32	530	42	205	52	410	62	520	72	520
3	470	13	530	23	575	33	605	43	380	53	500	63	305	73	490
4	550	14	450	24	665	34	565	44	265	54	445	64	520	74	465
5	545	15	345	25	565	35	605	45	420	55	380	65	605	75	565
6	475	16	450	26	510	36	490	46	320	56	200	66	456	76	335
7	475	17	465	27	620	37	555	47	565	57	335	67	380	77	420
8	490	18	500	28	575	38	500	48	225	58	520	68	335	78	520
9	565	19	445	29	490	39	605	49	445	59	380	69	410	79	445
10	515	20	450	30	555	40	520	50	456	60	205	70	445	80	380

PIER 40					
1	550	11	570	21	380
2	595	12	600	22	420
3	620	13	525	23	450
4	600	14	535	24	415
5	505	15	580	25	370
6	590	16	540	26	400
7	585	17	525	27	500
8	525	18	540	28	350
9	545	19	545	29	415
10	515	20	595	30	330

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)															
SPAN 41															
1	520	11	435	21	545	31	585	41	365	51	490	61	445	71	555
2	485	12	520	22	500	32	555	42	420	52	200	62	380	72	454
3	345	13	410	23	715	33	490	43	345	53	385	63	520	73	280
4	385	14	520	24	590	34	620	44	355	54	205	64	454	74	490
5	445	15	600	25	605	35	680	45	205	55	454	65	375	75	380
6	300	16	500	26	565	36	565	46	445	56	335	66	565	76	375
7	360	17	570	27	605	37	420	47	375	57	390	67	490	77	500
8	365	18	540	28	656	38	475	48	280	58	520	68	520	78	385
9	365	19	575	29	475	39	545	49	465	59	335	69	420	79	420
10	420	20	530	30	650	40	520	50	315	60	465	70	335	80	565

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)					
PIER 41					
1	580	11	600	21	455
2	600	12	580	22	415
3	615	13	535	23	425
4	595	14	565	24	430
5	615	15	525	25	435
6	580	16	515	26	425
7	620	17	515	27	425
8	585	18	520	28	450
9	545	19	550	29	400
10	565	20	535	30	450

SPAN 42															
1	352	11	495	21	445	31	665	41	245	51	205	61	465	71	465
2	315	12	430	22	520	32	565	42	185	52	305	62	500	72	475
3	365	13	420	23	490	33	475	43	280	53	260	63	490	73	375
4	350	14	450	24	575	34	420	44	315	54	220	64	465	74	565
5	410	15	445	25	490	35	530	45	145	55	375	65	475	75	435
6	565	16	440	26	620	36	620	46	315	56	410	66	270	76	360
7	320	17	370	27	500	37	545	47	285	57	170	67	435	77	445
8	320	18	440	28	650	38	575	48	270	58	290	68	465	78	565
9	310	19	495	29	555	39	555	49	215	59	365	69	565	79	545
10	280	20	440	30	545	40	520	50	220	60	160	70	420	80	410

PIER 42					
1	585	11	535	21	430
2	585	12	545	22	450
3	610	13	545	23	450
4	620	14	565	24	425
5	650	15	540	25	440
6	585	16	570	26	430
7	620	17	535	27	450
8	545	18	575	28	425
9	555	19	560	29	435
10	550	20	545	30	440

SPAN 43															
1	310	11	470	21	565	31	585	41	420	51	245	61	390	71	350
2	360	12	365	22	445	32	490	42	365	52	315	62	390	72	475
3	300	13	360	23	465	33	445	43	295	53	240	63	390	73	440
4	335	14	425	24	495	34	475	44	340	54	415	64	410	74	445
5	370	15	470	25	390	35	465	45	295	55	325	65	365	75	415
6	340	16	470	26	370	36	435	46	305	56	240	66	345	76	370
7	340	17	465	27	395	37	535	47	315	57	375	67	480	77	485
8	325	18	435	28	475	38	565	48	290	58	320	68	500	78	530
9	345	19	385	29	580	39	500	49	315	59	420	69	490	79	395
10	365	20	430	30	645	40	570	50	240	60	225	70	665	80	640

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานดินสุสานนท์ ฝั่งขวาทาง

สะพานดินสุสานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 1															
1	380	11	350	21	635	31	695	41	495	51	275	61	665	71	720
2	410	12	365	22	660	32	670	42	360	52	280	62	690	72	690
3	330	13	340	23	645	33	715	43	390	53	315	63	705	73	725
4	310	14	370	24	610	34	680	44	380	54	270	64	680	74	670
5	360	15	370	25	690	35	610	45	290	55	280	65	660	75	680
6	220	16	355	26	650	36	680	46	380	56	310	66	680	76	710
7	380	17	370	27	560	37	625	47	360	57	305	67	635	77	630
8	375	18	315	28	670	38	660	48	410	58	290	68	660	78	690
9	340	19	360	29	655	39	665	49	385	59	310	69	630	79	645
10	475	20	335	30	650	40	640	50	390	60	300	70	660	80	700

สะพานดินสุสานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 1					
1	360	11	360	21	340
2	310	12	375	22	300
3	350	13	380	23	380
4	430	14	415	24	315
5	340	15	360	25	380
6	420	16	370	26	500
7	360	17	410	27	330
8	315	18	380	28	350
9	320	19	400	29	370
10	250	20	385	30	350

SPAN 2															
1	300	11	320	21	620	31	590	41	385	51	345	61	630	71	685
2	370	12	235	22	590	32	630	42	340	52	350	62	670	72	660
3	320	13	350	23	565	33	610	43	360	53	310	63	615	73	720
4	315	14	445	24	610	34	660	44	380	54	340	64	700	74	640
5	330	15	330	25	585	35	655	45	390	55	315	65	665	75	615
6	320	16	360	26	620	36	620	46	390	56	350	66	680	76	670
7	330	17	320	27	665	37	695	47	315	57	370	67	710	77	630
8	280	18	260	28	600	38	650	48	380	58	330	68	690	78	640
9	350	19	310	29	605	39	710	49	360	59	425	69	715	79	675
10	355	20	330	30	600	40	630	50	390	60	360	70	670	80	660

PIER 2					
1	320	11	320	21	330
2	400	12	410	22	410
3	310	13	320	23	320
4	315	14	350	24	425
5	330	15	330	25	390
6	270	16	355	26	30
7	300	17	360	27	290
8	330	18	290	28	315
9	320	19	340	29	310
10	320	20	310	30	330

SPAN 3															
1	380	11	310	21	630	31	620	41	210	51	230	61	790	71	710
2	370	12	345	22	610	32	660	42	260	52	260	62	700	72	730
3	370	13	360	23	530	33	760	43	235	53	250	63	695	73	745
4	375	14	360	24	620	34	660	44	260	54	280	64	730	74	710
5	370	15	300	25	575	35	660	45	195	55	225	65	780	75	665
6	425	16	305	26	590	36	670	46	240	56	230	66	750	76	700
7	370	17	360	27	615	37	625	47	300	57	285	67	715	77	680
8	410	18	325	28	590	38	690	48	210	58	240	68	730	78	710
9	370	19	340	29	590	39	710	49	255	59	260	69	680	79	715
10	375	20	300	30	580	40	670	50	250	60	230	70	760	80	700

PIER 3					
1	310	11	290	21	280
2	225	12	225	22	250
3	260	13	310	23	290
4	290	14	295	24	280
5	270	15	320	25	270
6	250	16	330	26	275
7	260	17	310	27	285
8	325	18	325	28	285
9	310	19	320	29	290
10	310	20	290	30	315

SPAN 4															
1	370	11	380	21	600	31	590	41	295	51	305	61	675	71	615
2	415	12	330	22	570	32	650	42	260	52	310	62	640	72	610
3	350	13	350	23	560	33	690	43	250	53	285	63	655	73	630
4	340	14	345	24	560	34	640	44	280	54	260	64	660	74	620
5	400	15	370	25	615	35	650	45	245	55	255	65	645	75	590
6	360	16	375	26	600	36	630	46	300	56	270	66	650	76	640
7	410	17	350	27	595	37	610	47	285	57	300	67	600	77	640
8	410	18	345	28	560	38	650	48	250	58	300	68	630	78	640
9	360	19	380	29	580	39	600	49	310	59	290	69	620	79	665
10	365	20	370	30	600	40	640	50	280	60	280	70	640	80	650

PIER 4					
1	280	11	340	21	400
2	275	12	325	22	395
3	280	13	330	23	390
4	280	14	390	24	375
5	280	15	350	25	400
6	285	16	375	26	410
7	290	17	330	27	400
8	290	18	345	28	395
9	290	19	380	29	400
10	315	20	320	30	410

SPAN 5															
1	440	11	350	21	600	31	590	41	295	51	305	61	675	71	615
2	435	12	360	22	600	32	660	42	310	52	270	62	620	72	610
3	430	13	350	23	560	33	690	43	250	53	285	63	655	73	630
4	450	14	380	24	580	34	660	44	290	54	280	64	630	74	650
5	440	15	360	25	615	35	650	45	245	55	255	65	645	75	590
6	425	16	395	26	570	36	660	46	270	56	290	66	650	76	630
7	450	17	370	27	595	37	610	47	285	57	300	67	600	77	640
8	435	18	340	28	570	38	600	48	290	58	280	68	670	78	650
9	430	19	360	29	580	39	600	49	310	59	290	69	620	79	665
10	410	20	305	30	560	40	650	50	270	60	260	70	660	80	630

PIER 5					
1	290	11	310	21	280
2	270	12	370	22	310
3	310	13	280	23	230
4	300	14	230	24	275
5	250	15	260	25	270
6	305	16	235	26	190
7	250	17	260	27	250
8	270	18	330	28	180
9	270	19	310	29	240
10	255	20	245	30	310

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 6															
1	350	11	390	21	635	31	675	41	285	51	330	61	620	71	665
2	395	12	375	22	600	32	630	42	230	52	310	62	700	72	630
3	340	13	430	23	590	33	615	43	240	53	260	63	670	73	605
4	360	14	475	24	620	34	630	44	240	54	300	64	680	74	640
5	350	15	380	25	500	35	685	45	235	55	305	65	685	75	680
6	390	16	460	26	640	36	660	46	220	56	260	66	680	76	650
7	340	17	420	27	680	37	590	47	270	57	295	67	710	77	550
8	320	18	345	28	630	38	640	48	230	58	270	68	700	78	600
9	340	19	420	29	690	39	600	49	210	59	260	69	695	79	625
10	345	20	325	30	620	40	610	50	260	60	270	70	700	80	610

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)													
PIER 6													
1	330	11	290	21	310								
2	290	12	335	22	290								
3	330	13	310	23	280								
4	275	14	285	24	285								
5	330	15	280	25	280								
6	320	16	350	26	370								
7	310	17	340	27	280								
8	315	18	295	28	285								
9	290	19	320	29	300								
10	340	20	275	30	315								

SPAN 7															
1	340	11	390	21	680	31	590	41	210	51	285	61	660	71	605
2	320	12	330	22	620	32	650	42	260	52	310	62	620	72	610
3	330	13	380	23	630	33	620	43	235	53	300	63	695	73	625
4	360	14	315	24	640	34	630	44	240	54	310	64	650	74	630
5	340	15	390	25	615	35	600	45	260	55	250	65	635	75	640
6	410	16	420	26	630	36	660	46	260	56	310	66	670	76	650
7	350	17	410	27	590	37	715	47	245	57	295	67	645	77	665
8	310	18	445	28	630	38	620	48	260	58	310	68	640	78	670
9	360	19	360	29	600	39	625	49	280	59	305	69	620	79	685
10	290	20	400	30	610	40	610	50	260	60	260	70	660	80	640

SPAN 7													
1	480	11	420	21	340								
2	550	12	415	22	345								
3	460	13	430	23	360								
4	410	14	375	24	350								
5	440	15	410	25	340								
6	350	16	540	26	325								
7	480	17	430	27	360								
8	545	18	390	28	360								
9	480	19	420	29	340								
10	410	20	400	30	390								

SPAN 8															
1	400	11	440	21	530	31	690	41	275	51	305	61	620	71	585
2	430	12	320	22	550	32	610	42	260	52	290	62	640	72	600
3	420	13	400	23	575	33	665	43	215	53	310	63	635	73	555
4	415	14	525	24	590	34	620	44	250	54	280	64	660	74	600
5	390	15	430	25	610	35	625	45	260	55	295	65	665	75	550
6	420	16	315	26	600	36	620	46	220	56	290	66	620	76	560
7	430	17	420	27	580	37	590	47	230	57	335	67	690	77	605
8	410	18	410	28	570	38	650	48	230	58	300	68	660	78	600
9	430	19	420	29	565	39	600	49	225	59	280	69	625	79	620
10	360	20	540	30	600	40	640	50	260	60	290	70	640	80	560

SPAN 8													
1	310	11	400	21	360								
2	285	12	400	22	375								
3	310	13	370	23	330								
4	290	14	380	24	350								
5	310	15	420	25	350								
6	290	16	375	26	350								
7	310	17	430	27	370								
8	320	18	425	28	320								
9	330	19	390	29	340								
10	390	20	410	30	410								

SPAN 9															
1	390	11	450	21	635	31	675	41	285	51	240	61	695	71	710
2	450	12	360	22	630	32	620	42	270	52	250	62	670	72	650
3	430	13	450	23	500	33	525	43	265	53	270	63	725	73	705
4	435	14	390	24	570	34	590	44	240	54	240	64	650	74	670
5	400	15	410	25	590	35	615	45	245	55	225	65	665	75	685
6	355	16	440	26	620	36	600	46	230	56	240	66	660	76	690
7	400	17	430	27	615	37	600	47	215	57	235	67	630	77	645
8	380	18	525	28	620	38	630	48	270	58	260	68	670	78	650
9	390	19	430	29	645	39	680	49	270	59	245	69	620	79	605
10	420	20	470	30	620	40	620	50	250	60	220	70	690	80	690

SPAN 9													
1	320	11	340	21	310								
2	315	12	395	22	380								
3	330	13	340	23	340								
4	290	14	320	24	370								
5	300	15	360	25	360								
6	295	16	375	26	320								
7	340	17	370	27	350								
8	350	18	250	28	315								
9	310	19	360	29	340								
10	325	20	335	30	305								

SPAN 10															
1	370	11	430	21	645	31	635	41	285	51	240	61	695	71	710
2	350	12	390	22	670	32	670	42	280	52	270	62	690	72	680
3	380	13	420	23	735	33	695	43	265	53	270	63	725	73	705
4	345	14	360	24	680	34	670	44	260	54	260	64	670	74	660
5	410	15	380	25	655	35	690	45	245	55	225	65	665	75	685
6	435	16	520	26	680	36	680	46	280	56	240	66	680	76	670
7	390	17	400	27	665	37	685	47	215	57	235	67	630	77	645
8	420	18	360	28	650	38	630	48	270	58	220	68	680	78	650
9	430	19	380	29	610	39	590	49	270	59	245	69	620	79	605
10	445	20	415	30	660	40	670	50	280	60	230	70	650	80	650

SPAN 10													
1	330	11	380	21	330								
2	325	12	420	22	305								
3	300	13	380	23	340								
4	325	14	410	24	395								
5	300	15	410	25	330								
6	250	16	430	26	315								
7	340	17	390	27	380								
8	275	18	350	28	375								
9	340	19	410	29	380								
10	385	20	380	30	375								

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 11															
1	490	11	500	21	620	31	635	41	200	51	360	61	680	71	715
2	540	12	590	22	640	32	620	42	280	52	300	62	670	72	670
3	500	13	470	23	590	33	595	43	265	53	295	63	675	73	665
4	555	14	570	24	630	34	640	44	250	54	300	64	650	74	650
5	470	15	460	25	705	35	665	45	310	55	335	65	605	75	620
6	385	16	410	26	650	36	630	46	280	56	290	66	650	76	630
7	480	17	450	27	680	37	560	47	295	57	275	67	650	77	625
8	520	18	475	28	660	38	620	48	270	58	280	68	630	78	670
9	510	19	450	29	660	39	680	49	300	59	240	69	615	79	645
10	430	20	310	30	670	40	630	50	260	60	280	70	640	80	640

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 11					
1	330	11	410	21	350
2	330	12	395	22	345
3	330	13	410	23	320
4	325	14	350	24	325
5	370	15	370	25	310
6	340	16	425	26	355
7	380	17	410	27	330
8	330	18	400	28	315
9	330	19	420	29	340
10	415	20	430	30	335

SPAN 12															
1	530	11	530	21	685	31	645	41	360	51	410	61	630	71	715
2	535	12	570	22	680	32	630	42	330	52	370	62	670	72	670
3	500	13	510	23	705	33	620	43	410	53	315	63	690	73	665
4	540	14	520	24	690	34	640	44	310	54	370	64	680	74	670
5	480	15	530	25	645	35	600	45	290	55	370	65	685	75	620
6	530	16	530	26	660	36	620	46	320	56	400	66	630	76	630
7	510	17	530	27	690	37	665	47	265	57	405	67	670	77	625
8	420	18	515	28	650	38	640	48	340	58	360	68	670	78	660
9	510	19	510	29	660	39	645	49	335	59	390	69	625	79	645
10	495	20	490	30	650	40	640	50	360	60	370	70	680	80	670

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 12					
1	320	11	500	21	380
2	285	12	500	22	380
3	320	13	500	23	410
4	300	14	495	24	415
5	330	15	490	25	380
6	300	16	520	26	400
7	350	17	530	27	410
8	295	18	525	28	325
9	340	19	530	29	390
10	480	20	530	30	420

SPAN 13															
1	310	11	440	21	655	31	695	41	320	51	280	61	630	71	715
2	330	12	555	22	720	32	680	42	280	52	230	62	650	72	670
3	330	13	480	23	685	33	700	43	235	53	205	63	690	73	665
4	380	14	385	24	690	34	730	44	300	54	240	64	650	74	670
5	350	15	480	25	665	35	725	45	310	55	295	65	685	75	620
6	290	16	520	26	680	36	700	46	310	56	220	66	670	76	680
7	360	17	490	27	760	37	695	47	300	57	240	67	690	77	625
8	310	18	390	28	670	38	710	48	300	58	250	68	650	78	640
9	330	19	460	29	715	39	720	49	295	59	225	69	625	79	645
10	345	20	470	30	700	40	690	50	310	60	270	70	680	80	660

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 13					
1	330	11	390	21	330
2	315	12	395	22	310
3	370	13	400	23	340
4	325	14	325	24	310
5	350	15	360	25	350
6	320	16	415	26	390
7	330	17	400	27	350
8	315	18	370	28	350
9	340	19	360	29	340
10	430	20	375	30	350

SPAN 14															
1	310	11	290	21	720	31	685	41	240	51	405	61	625	71	650
2	300	12	285	22	700	32	640	42	310	52	270	62	650	72	680
3	290	13	260	23	665	33	615	43	345	53	315	63	640	73	600
4	360	14	300	24	650	34	660	44	320	54	290	64	660	74	650
5	320	15	310	25	705	35	635	45	285	55	270	65	695	75	665
6	230	16	305	26	640	36	670	46	280	56	280	66	700	76	650
7	330	17	260	27	595	37	715	47	265	57	255	67	715	77	705
8	330	18	225	28	680	38	650	48	310	58	310	68	670	78	660
9	330	19	280	29	650	39	620	49	305	59	235	69	685	79	655
10	370	20	315	30	690	40	660	50	270	60	320	70	650	80	660

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 14					
1	320	11	370	21	310
2	350	12	345	22	295
3	310	13	350	23	280
4	300	14	315	24	290
5	330	15	320	25	300
6	315	16	370	26	305
7	320	17	370	27	310
8	315	18	380	28	330
9	300	19	350	29	300
10	280	20	310	30	285

SPAN 15															
1	460	11	380	21	645	31	590	41	210	51	360	61	685	71	660
2	440	12	300	22	650	32	600	42	270	52	280	62	660	72	670
3	470	13	350	23	680	33	615	43	205	53	210	63	605	73	635
4	555	14	370	24	620	34	580	44	220	54	280	64	640	74	680
5	450	15	360	25	630	35	560	45	305	55	265	65	680	75	655
6	345	16	390	26	630	36	610	46	250	56	290	66	690	76	640
7	450	17	340	27	590	37	615	47	265	57	275	67	705	77	700
8	545	18	375	28	660	38	610	48	230	58	280	68	670	78	650
9	460	19	380	29	615	39	525	49	260	59	255	69	650	79	665
10	365	20	360	30	630	40	560	50	230	60	270	70	650	80	640

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 15					
1	360	11	530	21	320
2	350	12	485	22	300
3	390	13	530	23	310
4	335	14	510	24	315
5	380	15	490	25	290
6	330	16	480	26	340
7	390	17	510	27	320
8	325	18	545	28	335
9	350	19	490	29	350
10	475	20	515	30	325

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 16															
1	470	11	440	21	630	31	665	41	270	51	305	61	660	71	660
2	440	12	370	22	670	32	630	42	290	52	320	62	650	72	690
3	470	13	420	23	690	33	675	43	310	53	310	63	685	73	710
4	555	14	445	24	680	34	600	44	280	54	290	64	670	74	670
5	450	15	420	25	655	35	650	45	265	55	315	65	710	75	655
6	475	16	460	26	660	36	600	46	310	56	320	66	690	76	730
7	500	17	460	27	635	37	555	47	280	57	360	67	650	77	730
8	440	18	495	28	690	38	630	48	280	58	300	68	670	78	710
9	450	19	460	29	710	39	530	49	260	59	300	69	625	79	765
10	470	20	435	30	680	40	600	50	270	60	310	70	680	80	700

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)													
PIER 16													
1	320	11	360	21	310								
2	310	12	320	22	330								
3	320	13	360	23	300								
4	275	14	300	24	300								
5	300	15	360	25	310								
6	270	16	415	26	325								
7	280	17	340	27	340								
8	295	18	380	28	330								
9	300	19	330	29	300								
10	325	20	350	30	300								

SPAN 17															
1	400	11	540	21	680	31	695	41	310	51	285	61	660	71	660
2	335	12	445	22	670	32	650	42	290	52	290	62	660	72	730
3	410	13	510	23	635	33	665	43	275	53	305	63	685	73	710
4	350	14	525	24	690	34	650	44	260	54	300	64	670	74	710
5	420	15	510	25	710	35	625	45	255	55	275	65	710	75	655
6	440	16	495	26	670	36	670	46	250	56	270	66	680	76	730
7	380	17	540	27	690	37	715	47	285	57	300	67	650	77	750
8	445	18	585	28	660	38	660	48	300	58	270	68	670	78	730
9	380	19	490	29	665	39	640	49	265	59	260	69	625	79	765
10	360	20	555	30	650	40	680	50	270	60	260	70	700	80	700

SPAN 18															
1	350	11	300	21	675	31	585	41	325	51	305	61	685	71	680
2	435	12	240	22	640	32	650	42	270	52	280	62	660	72	680
3	290	13	350	23	665	33	680	43	285	53	270	63	715	73	720
4	310	14	220	24	690	34	650	44	270	54	280	64	700	74	700
5	330	15	330	25	625	35	675	45	265	55	245	65	665	75	665
6	235	16	335	26	670	36	680	46	290	56	250	66	710	76	710
7	340	17	330	27	720	37	645	47	280	57	275	67	660	77	765
8	305	18	350	28	660	38	640	48	260	58	290	68	690	78	700
9	300	19	290	29	655	39	715	49	215	59	225	69	680	79	715
10	300	20	440	30	640	40	640	50	300	60	280	70	660	80	730

SPAN 19															
1	480	11	480	21	650	31	525	41	360	51	410	61	560	71	675
2	445	12	460	22	630	32	530	42	370	52	320	62	660	72	650
3	520	13	500	23	590	33	420	43	410	53	260	63	645	73	570
4	560	14	430	24	640	34	540	44	350	54	340	64	630	74	650
5	530	15	480	25	660	35	580	45	335	55	315	65	630	75	620
6	565	16	460	26	640	36	500	46	380	56	330	66	640	76	610
7	490	17	510	27	635	37	600	47	410	57	360	67	715	77	635
8	500	18	605	28	640	38	520	48	380	58	350	68	670	78	590
9	500	19	470	29	550	39	530	49	360	59	340	69	680	79	615
10	445	20	435	30	630	40	560	50	370	60	360	70	630	80	610

SPAN 20															
1	470	11	490	21	690	31	500	41	365	51	280	61	665	71	665
2	435	12	485	22	670	32	630	42	310	52	350	62	630	72	630
3	500	13	490	23	625	33	675	43	320	53	490	63	590	73	675
4	540	14	490	24	630	34	610	44	300	54	330	64	600	74	650
5	490	15	490	25	685	35	540	45	235	55	280	65	620	75	585
6	440	16	545	26	640	36	590	46	290	56	320	66	590	76	650
7	460	17	490	27	590	37	615	47	270	57	310	67	645	77	650
8	560	18	435	28	660	38	580	48	330	58	330	68	630	78	670
9	510	19	500	29	640	39	650	49	390	59	305	69	550	79	670
10	465	20	460	30	670	40	610	50	340	60	340	70	610	80	660

SPAN 17													
1	300	11	340	21	370								
2	265	12	345	22	350								
3	280	13	360	23	370								
4	255	14	350	24	325								
5	280	15	370	25	320								
6	250	16	380	26	380								
7	290	17	340	27	350								
8	255	18	325	28	335								
9	300	19	340	29	340								
10	340	20	335	30	310								

SPAN 18													
1	340	11	450	21	290								
2	310	12	390	22	320								
3	340	13	450	23	340								
4	325	14	455	24	345								
5	300	15	410	25	290								
6	300	16	450	26	290								
7	300	17	430	27	350								
8	330	18	425	28	315								
9	310	19	440	29	300								
10	385	20	430	30	330								

SPAN 19													
1	370	11	390	21	340								
2	320	12	340	22	340								
3	360	13	360	23	360								
4	350	14	315	24	335								
5	330	15	340	25	360								
6	300	16	350	26	380								
7	310	17	350	27	380								
8	320	18	395	28	375								
9	310	19	380	29	380								
10	400	20	385	30	385								

SPAN 20													
1	270	11	320	21	290								
2	270	12	335	22	300								
3	270	13	350	23	270								
4	255	14	340	24	275								
5	300	15	300	25	280								
6	305	16	360	26	250								
7	270	17	340	27	280								
8	275	18	270	28	305								
9	310	19	350	29	280								
10	315	20	330	30	265								

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 21															
1	490	11	420	21	630	31	550	41	340	51	315	61	720	71	660
2	515	12	410	22	690	32	620	42	340	52	290	62	710	72	640
3	460	13	420	23	735	33	665	43	365	53	360	63	675	73	615
4	420	14	440	24	690	34	600	44	370	54	320	64	710	74	650
5	500	15	400	25	670	35	615	45	295	55	310	65	665	75	625
6	490	16	375	26	670	36	570	46	340	56	340	66	650	76	660
7	480	17	390	27	590	37	525	47	365	57	295	67	690	77	620
8	515	18	365	28	660	38	580	48	370	58	300	68	690	78	640
9	510	19	410	29	715	39	635	49	370	59	305	69	660	79	650
10	475	20	430	30	680	40	580	50	320	60	350	70	700	80	660

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 21					
1	300	11	310	21	310
2	265	12	320	22	360
3	280	13	350	23	320
4	270	14	350	24	325
5	300	15	310	25	330
6	245	16	310	26	305
7	300	17	340	27	290
8	295	18	315	28	305
9	250	19	350	29	300
10	320	20	330	30	270

SPAN 22															
1	620	11	490	21	620	31	725	41	325	51	225	61	710	71	660
2	590	12	475	22	640	32	580	42	350	52	340	62	680	72	620
3	590	13	500	23	645	33	475	43	305	53	365	63	675	73	615
4	650	14	570	24	660	34	610	44	330	54	320	64	680	74	660
5	570	15	540	25	710	35	615	45	370	55	345	65	665	75	625
6	600	16	560	26	680	36	620	46	330	56	370	66	670	76	660
7	610	17	500	27	690	37	630	47	390	57	260	67	690	77	620
8	555	18	445	28	630	38	630	48	340	58	360	68	690	78	650
9	590	19	530	29	615	39	570	49	365	59	545	69	660	79	650
10	565	20	540	30	640	40	590	50	330	60	340	70	710	80	660

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 22					
1	300	11	390	21	340
2	265	12	335	22	315
3	310	13	305	23	300
4	270	14	285	24	355
5	295	15	350	25	345
6	315	16	390	26	360
7	315	17	350	27	395
8	280	18	365	28	425
9	370	19	380	29	395
10	325	20	385	30	370

SPAN 23															
1	340	11	350	21	615	31	645	41	325	51	260	61	590	71	675
2	475	12	415	22	600	32	610	42	300	52	320	62	650	72	610
3	390	13	370	23	610	33	555	43	335	53	305	63	620	73	600
4	390	14	230	24	610	34	590	44	310	54	310	64	630	74	610
5	330	15	340	25	645	35	625	45	360	55	275	65	625	75	575
6	325	16	300	26	650	36	620	46	340	56	300	66	640	76	630
7	330	17	350	27	605	37	500	47	300	57	270	67	630	77	610
8	295	18	480	28	620	38	600	48	330	58	320	68	620	78	640
9	370	19	350	29	660	39	650	49	310	59	355	69	685	79	605
10	320	20	390	30	640	40	570	50	300	60	300	70	650	80	590

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 23					
1	290	11	300	21	315
2	300	12	340	22	450
3	305	13	315	23	305
4	300	14	310	24	350
5	390	15	305	25	340
6	315	16	325	26	345
7	265	17	275	27	270
8	300	18	360	28	310
9	410	19	315	29	285
10	425	20	320	30	465

SPAN 24															
1	390	11	390	21	645	31	660	41	275	51	250	61	710	71	665
2	320	12	530	22	660	32	630	42	310	52	280	62	650	72	660
3	430	13	400	23	680	33	625	43	360	53	210	63	650	73	645
4	355	14	310	24	640	34	590	44	330	54	290	64	620	74	670
5	430	15	410	25	580	35	560	45	285	55	315	65	615	75	610
6	470	16	410	26	610	36	620	46	300	56	290	66	670	76	630
7	410	17	390	27	665	37	550	47	290	57	275	67	675	77	625
8	380	18	355	28	620	38	640	48	300	58	290	68	650	78	650
9	370	19	400	29	630	39	680	49	310	59	280	69	565	79	650
10	485	20	355	30	640	40	630	50	270	60	240	70	630	80	640

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 24					
1	300	11	390	21	365
2	280	12	360	22	430
3	310	13	385	23	375
4	315	14	390	24	495
5	315	15	460	25	415
6	290	16	495	26	345
7	295	17	355	27	370
8	320	18	380	28	575
9	420	19	340	29	565
10	365	20	365	30	525

SPAN 25															
1	360	11	390	21	655	31	595	41	295	51	360	61	685	71	650
2	340	12	420	22	670	32	610	42	330	52	300	62	640	72	660
3	330	13	400	23	665	33	625	43	290	53	275	63	665	73	625
4	370	14	540	24	680	34	640	44	330	54	290	64	640	74	630
5	350	15	410	25	680	35	635	45	255	55	335	65	605	75	725
6	345	16	360	26	690	36	660	46	310	56	330	66	690	76	670
7	320	17	420	27	735	37	665	47	315	57	290	67	650	77	585
8	430	18	320	28	700	38	640	48	320	58	320	68	640	78	620
9	370	19	410	29	640	39	655	49	390	59	275	69	725	79	660
10	230	20	410	30	680	40	610	50	330	60	300	70	640	80	650

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 25					
1	325	11	390	21	325
2	305	12	385	22	255
3	310	13	415	23	320
4	290	14	365	24	315
5	305	15	410	25	545
6	265	16	345	26	320
7	300	17	395	27	360
8	305	18	370	28	385
9	570	19	460	29	420
10	265	20	390	30	390

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)														สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)			
SPAN 26														PIER 26			
1	340	11	330	21	685	31	635	41	225	51	265	61	725	71	390	21	390
2	315	12	365	22	600	32	590	42	260	52	280	62	670	72	495	22	515
3	360	13	370	23	565	33	575	43	205	53	265	63	685	73	410	23	395
4	350	14	315	24	600	34	590	44	270	54	250	64	680	74	485	24	490
5	360	15	340	25	670	35	615	45	310	55	265	65	615	75	280	25	465
6	340	16	365	26	630	36	630	46	240	56	250	66	660	76	370	26	540
7	330	17	380	27	525	37	675	47	245	57	275	67	620	77	355	27	450
8	425	18	355	28	620	38	600	48	230	58	260	68	650	78	340	28	430
9	330	19	350	29	665	39	550	49	290	59	265	69	615	79	340	29	310
10	310	20	370	30	640	40	630	50	230	60	240	70	680	80	350	30	465

SPAN 27														PIER 27			
1	310	11	400	21	650	31	645	41	210	51	310	61	635	71	340	21	635
2	225	12	385	22	620	32	630	42	360	52	330	62	660	72	540	22	410
3	310	13	370	23	665	33	665	43	290	53	285	63	645	73	350	23	625
4	345	14	460	24	620	34	630	44	310	54	330	64	710	74	460	24	535
5	330	15	350	25	570	35	630	45	360	55	305	65	710	75	340	25	610
6	280	16	345	26	610	36	610	46	320	56	330	66	680	76	410	26	500
7	300	17	410	27	590	37	590	47	415	57	315	67	690	77	345	27	600
8	435	18	315	28	640	38	620	48	320	58	310	68	690	78	515	28	575
9	290	19	370	29	615	39	525	49	360	59	390	69	715	79	320	29	525
10	235	20	390	30	620	40	630	50	330	60	330	70	680	80	560	30	515

SPAN 28														PIER 28			
1	380	11	430	21	615	31	645	41	255	51	295	61	615	71	345	21	390
2	370	12	470	22	700	32	710	42	240	52	230	62	600	72	350	22	395
3	330	13	420	23	630	33	635	43	235	53	240	63	520	73	345	23	460
4	280	14	445	24	680	34	730	44	250	54	260	64	610	74	365	24	335
5	380	15	400	25	715	35	635	45	270	55	250	65	605	75	470	25	475
6	440	16	360	26	660	36	740	46	280	56	260	66	590	76	485	26	255
7	340	17	400	27	725	37	860	47	340	57	210	67	585	77	465	27	450
8	385	18	355	28	670	38	750	48	290	58	260	68	610	78	390	28	335
9	330	19	390	29	715	39	860	49	220	59	290	69	660	79	440	29	470
10	310	20	430	30	690	40	710	50	240	60	230	70	620	80	360	30	380

SPAN 29														PIER 29			
1	310	11	310	21	620	31	645	41	385	51	370	61	620	71	255	21	290
2	370	12	245	22	610	32	590	42	340	52	360	62	630	72	310	22	360
3	360	13	280	23	635	33	525	43	335	53	355	63	685	73	325	23	380
4	290	14	290	24	610	34	590	44	360	54	370	64	590	74	260	24	355
5	330	15	300	25	592	35	650	45	390	55	420	65	645	75	330	25	360
6	355	16	240	26	620	36	600	46	340	56	400	66	630	76	320	26	330
7	360	17	280	27	665	37	615	47	305	57	390	67	550	77	335	27	375
8	420	18	320	28	590	38	630	48	390	58	380	68	630	78	305	28	345
9	350	19	280	29	580	39	590	49	360	59	315	69	590	79	275	29	370
10	265	20	305	30	620	40	610	50	340	60	390	70	640	80	240	30	320

SPAN 30														PIER 30			
1	370	11	400	21	620	31	770	41	245	51	260	61	675	71	310	21	485
2	380	12	325	22	650	32	660	42	290	52	330	62	640	72	325	22	10
3	340	13	400	23	660	33	675	43	235	53	280	63	675	73	335	23	580
4	390	14	345	24	610	34	610	44	290	54	340	64	630	74	200	24	395
5	370	15	380	25	650	35	555	45	325	55	460	65	615	75	295	25	600
6	255	16	460	26	620	36	610	46	260	56	360	66	620	76	305	26	355
7	370	17	390	27	660	37	540	47	270	57	490	67	620	77	310	27	595
8	390	18	460	28	620	38	620	48	230	58	360	68	650	78	275	28	320
9	340	19	370	29	570	39	620	49	240	59	255	69	545	79	295	29	550
10	390	20	420	30	600	40	630	50	240	60	320	70	640	80	235	30	420

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 31															
1	320	11	350	21	690	31	685	41	310	51	335	61	595	71	585
2	360	12	390	22	660	32	670	42	270	52	290	62	650	72	650
3	300	13	400	23	705	33	645	43	300	53	295	63	625	73	685
4	225	14	350	24	680	34	650	44	290	54	290	64	600	74	640
5	300	15	390	25	665	35	675	45	295	55	270	65	665	75	650
6	335	16	525	26	640	36	690	46	310	56	280	66	620	76	670
7	330	17	360	27	605	37	665	47	245	57	305	67	590	77	665
8	320	18	335	28	670	38	670	48	260	58	270	68	630	78	640
9	340	19	370	29	645	39	660	49	255	59	280	69	650	79	595
10	370	20	270	30	690	40	640	50	260	60	280	70	650	80	610

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 31					
1	300	11	350	21	370
2	300	12	270	22	490
3	295	13	315	23	360
4	315	14	260	24	535
5	290	15	295	25	375
6	305	16	240	26	550
7	310	17	320	27	380
8	280	18	265	28	520
9	345	19	310	29	390
10	355	20	295	30	480

SPAN 32															
1	290	11	350	21	725	31	500	41	320	51	290	61	635	71	555
2	290	12	355	22	680	32	640	42	230	52	300	62	560	72	580
3	290	13	340	23	645	33	685	43	230	53	280	63	555	73	585
4	220	14	260	24	710	34	620	44	240	54	280	64	610	74	590
5	310	15	380	25	660	35	765	45	185	55	215	65	590	75	550
6	420	16	270	26	700	36	650	46	200	56	280	66	570	76	610
7	290	17	350	27	685	37	605	47	175	57	270	67	625	77	650
8	270	18	475	28	670	38	640	48	230	58	270	68	570	78	590
9	320	19	390	29	685	39	675	49	205	59	365	69	520	79	685
10	340	20	460	30	700	40	670	50	230	60	300	70	570	80	590

PIER 32					
1	315	11	380	21	385
2	305	12	350	22	520
3	320	13	415	23	400
4	320	14	370	24	480
5	320	15	305	25	460
6	285	16	340	26	545
7	305	17	345	27	445
8	305	18	465	28	435
9	355	19	350	29	320
10	350	20	495	30	460

SPAN 33															
1	370	11	340	21	635	31	685	41	360	51	410	61	660	71	675
2	330	12	360	22	610	32	650	42	350	52	380	62	670	72	660
3	350	13	330	23	550	33	645	43	390	53	315	63	630	73	610
4	380	14	410	24	620	34	650	44	380	54	340	64	630	74	700
5	360	15	370	25	660	35	665	45	335	55	375	65	665	75	690
6	445	16	370	26	630	36	660	46	360	56	380	66	680	76	690
7	370	17	370	27	640	37	525	47	385	57	355	67	630	77	710
8	385	18	315	28	640	38	660	48	370	58	350	68	640	78	710
9	400	19	330	29	590	39	645	49	365	59	335	69	665	79	715
10	340	20	345	30	630	40	600	50	370	60	340	70	660	80	660

PIER 33					
1	285	11	345	21	450
2	310	12	290	22	435
3	310	13	320	23	510
4	305	14	340	24	530
5	310	15	315	25	420
6	305	16	280	26	505
7	320	17	310	27	535
8	290	18	365	28	485
9	370	19	335	29	385
10	365	20	310	30	460

SPAN 34															
1	430	11	350	21	615	31	615	41	410	51	315	61	665	71	685
2	310	12	320	22	650	32	610	42	400	52	310	62	730	72	680
3	390	13	380	23	690	33	645	43	360	53	275	63	665	73	725
4	495	14	335	24	640	34	600	44	390	54	320	64	730	74	700
5	410	15	340	25	635	35	590	45	360	55	305	65	715	75	675
6	360	16	330	26	660	36	630	46	360	56	280	66	710	76	700
7	380	17	340	27	660	37	645	47	495	57	355	67	690	77	690
8	410	18	390	28	630	38	600	48	370	58	290	68	730	78	710
9	430	19	340	29	635	39	665	49	290	59	285	69	765	79	745
10	475	20	360	30	620	40	640	50	410	60	280	70	720	80	710

PIER 34					
1	305	11	320	21	530
2	315	12	255	22	530
3	300	13	315	23	410
4	330	14	250	24	465
5	320	15	340	25	305
6	305	16	365	26	430
7	310	17	275	27	315
8	300	18	300	28	360
9	360	19	355	29	495
10	375	20	320	30	465

SPAN 35															
1	510	11	300	21	650	31	695	41	390	51	425	61	665	71	725
2	440	12	350	22	650	32	610	42	340	52	400	62	670	72	630
3	460	13	330	23	565	33	665	43	265	53	375	63	635	73	665
4	565	14	365	24	610	34	610	44	310	54	340	64	680	74	670
5	490	15	280	25	645	35	525	45	305	55	315	65	620	75	635
6	530	16	290	26	640	36	640	46	330	56	370	66	650	76	660
7	470	17	300	27	590	37	650	47	360	57	420	67	685	77	615
8	375	18	285	28	650	38	630	48	330	58	340	68	670	78	660
9	460	19	280	29	715	39	620	49	285	59	305	69	660	79	630
10	495	20	260	30	630	40	610	50	330	60	370	70	650	80	630

PIER 35					
1	280	11	370	21	360
2	300	12	375	22	315
3	290	13	355	23	385
4	310	14	360	24	360
5	320	15	325	25	370
6	300	16	385	26	490
7	315	17	395	27	375
8	300	18	370	28	410
9	320	19	410	29	315
10	360	20	355	30	515

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)														สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)							
SPAN 36														PIER 36							
1	340	11	340	21	685	31	725	41	495	51	410	61	630	71	630	1	300	11	405	21	625
2	320	12	320	22	620	32	590	42	310	52	310	62	630	72	610	2	280	12	480	22	415
3	340	13	350	23	550	33	420	43	375	53	210	63	690	73	620	3	275	13	415	23	630
4	200	14	350	24	610	34	600	44	330	54	300	64	650	74	630	4	310	14	470	24	540
5	340	15	310	25	665	35	645	45	305	55	260	65	685	75	545	5	315	15	305	25	625
6	335	16	350	26	600	36	640	46	350	56	300	66	640	76	620	6	285	16	385	26	485
7	320	17	330	27	635	37	665	47	335	57	335	67	615	77	715	7	310	17	350	27	605
8	360	18	280	28	640	38	640	48	340	58	290	68	630	78	600	8	290	18	340	28	560
9	340	19	320	29	620	39	600	49	210	59	285	69	620	79	570	9	360	19	335	29	545
10	385	20	315	30	600	40	620	50	320	60	330	70	670	80	600	10	350	20	355	30	520

SPAN 37														PIER 37							
1	360	11	370	21	580	31	485	41	385	51	420	61	630	71	635	1	300	11	405	21	610
2	315	12	240	22	630	32	620	42	330	52	380	62	640	72	640	2	315	12	530	22	465
3	350	13	370	23	635	33	590	43	320	53	340	63	645	73	690	3	305	13	380	23	630
4	335	14	370	24	650	34	600	44	360	54	330	64	620	74	680	4	300	14	485	24	540
5	380	15	330	25	710	35	630	45	315	55	315	65	656	75	675	5	285	15	315	25	605
6	345	16	410	26	650	36	640	46	350	56	330	66	600	76	680	6	300	16	415	26	510
7	360	17	330	27	665	37	645	47	360	57	365	67	560	77	660	7	290	17	360	27	620
8	355	18	420	28	670	38	640	48	350	58	350	68	630	78	670	8	315	18	460	28	580
9	360	19	350	29	640	39	695	49	410	59	360	69	615	79	635	9	465	19	345	29	560
10	485	20	360	30	670	40	630	50	340	60	330	70	610	80	630	10	330	20	510	30	525

SPAN 38														PIER 38							
1	370	11	380	21	665	31	665	41	515	51	475	61	850	71	850	1	285	11	335	21	290
2	375	12	315	22	680	32	680	42	360	52	390	62	710	72	740	2	310	12	375	22	245
3	380	13	410	23	715	33	780	43	435	53	360	63	765	73	635	3	310	13	340	23	405
4	380	14	475	24	700	34	650	44	380	54	400	64	730	74	730	4	350	14	305	24	510
5	420	15	370	25	645	35	685	45	320	55	365	65	645	75	765	5	310	15	275	25	305
6	475	16	420	26	670	36	640	46	400	56	390	66	750	76	700	6	325	16	320	26	520
7	410	17	410	27	858	37	650	47	305	57	420	67	660	77	715	7	300	17	305	27	360
8	370	18	310	28	690	38	650	48	410	58	390	68	720	78	720	8	330	18	330	28	380
9	380	19	410	29	590	39	525	49	390	59	390	69	660	79	665	9	305	19	295	29	200
10	355	20	410	30	700	40	650	50	420	60	390	70	700	80	710	10	290	20	300	30	365

SPAN 39														PIER 39							
1	350	11	330	21	695	31	655	41	385	51	315	61	725	71	615	1	310	11	360	21	390
2	375	12	465	22	700	32	700	42	390	52	360	62	670	72	650	2	235	12	260	22	370
3	320	13	350	23	720	33	665	43	410	53	340	63	635	73	645	3	325	13	350	23	415
4	410	14	365	24	670	34	710	44	360	54	340	64	690	74	660	4	330	14	240	24	430
5	370	15	350	25	645	35	695	45	325	55	370	65	675	75	695	5	320	15	365	25	370
6	290	16	360	26	670	36	710	46	350	56	350	66	690	76	640	6	265	16	235	26	305
7	330	17	360	27	665	37	710	47	365	57	295	67	665	77	660	7	315	17	345	27	435
8	335	18	270	28	670	38	710	48	370	58	320	68	680	78	680	8	340	18	295	28	450
9	380	19	360	29	685	39	705	49	390	59	425	69	615	79	715	9	370	19	310	29	360
10	340	20	255	30	660	40	680	50	350	60	340	70	690	80	640	10	310	20	290	30	410

SPAN 40														PIER 40							
1	430	11	300	21	730	31	690	41	305	51	500	61	605	71	765	1	320	11	350	21	380
2	300	12	290	22	650	32	660	42	330	52	330	62	560	72	650	2	310	12	265	22	365
3	450	13	300	23	675	33	715	43	310	53	420	63	470	73	665	3	330	13	350	23	410
4	335	14	280	24	630	34	680	44	320	54	330	64	570	74	690	4	345	14	245	24	420
5	420	15	310	25	770	35	615	45	310	55	275	65	615	75	665	5	345	15	345	25	360
6	540	16	220	26	660	36	690	46	330	56	340	66	600	76	690	6	295	16	230	26	315
7	390	17	320	27	675	37	645	47	320	57	265	67	615	77	660	7	310	17	350	27	445
8	500	18	470	28	670	38	650	48	330	58	320	68	590	78	660	8	300	18	290	28	460
9	430	19	320	29	385	39	675	49	360	59	290	69	565	79	635	9	375	19	300	29	360
10	430	20	315	30	660	40	690	50	290	60	330	70	580	80	660	10	310	20	280	30	345

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (ต่อ)

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)															
SPAN 41															
1	460	11	280	21	656	31	760	41	325	51	310	61	590	71	630
2	460	12	230	22	640	32	680	42	360	52	320	62	640	72	610
3	430	13	270	23	610	33	590	43	420	53	295	63	630	73	610
4	325	14	290	24	680	34	630	44	360	54	300	64	630	74	630
5	440	15	280	25	650	35	630	45	330	55	345	65	560	75	635
6	390	16	325	26	630	36	640	46	380	56	340	66	660	76	600
7	440	17	310	27	680	37	610	47	315	57	260	67	710	77	645
8	515	18	225	28	650	38	680	48	370	58	300	68	640	78	630
9	470	19	290	29	690	39	680	49	355	59	345	69	670	79	595
10	500	20	330	30	680	40	660	50	350	60	290	70	600	80	630

สะพานติณสูลานนท์ ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)					
PIER 41					
1	300	11	215	21	395
2	320	12	365	22	380
3	310	13	200	23	360
4	325	14	330	24	400
5	330	15	230	25	345
6	380	16	310	26	310
7	315	17	225	27	360
8	315	18	285	28	335
9	320	19	300	29	385
10	335	20	290	30	360

SPAN 42															
1	360	11	350	21	620	31	750	41	305	51	225	61	765	71	590
2	390	12	320	22	620	32	640	42	390	52	370	62	650	72	670
3	350	13	300	23	615	33	675	43	335	53	545	63	675	73	665
4	310	14	365	24	610	34	620	44	370	54	360	64	650	74	670
5	340	15	300	25	685	35	590	45	500	55	365	65	590	75	720
6	440	16	280	26	600	36	620	46	340	56	400	66	640	76	680
7	350	17	330	27	605	37	475	47	335	57	340	67	635	77	725
8	325	18	305	28	600	38	610	48	350	58	390	68	650	78	680
9	380	19	300	29	570	39	615	49	360	59	370	69	635	79	615
10	335	20	315	30	600	40	610	50	340	60	390	70	650	80	660

PIER 42					
1	300	11	385	21	370
2	290	12	340	22	510
3	310	13	400	23	405
4	315	14	380	24	450
5	315	15	310	25	440
6	305	16	345	26	530
7	280	17	330	27	435
8	300	18	470	28	420
9	340	19	360	29	315
10	355	20	450	30	450

SPAN 43															
1	425	11	235	21	615	31	765	41	410	51	390	61	725	71	615
2	365	12	330	22	610	32	640	42	370	52	300	62	710	72	650
3	380	13	280	23	585	33	485	43	370	53	280	63	590	73	645
4	370	14	305	24	610	34	670	44	380	54	300	64	680	74	640
5	410	15	310	25	675	35	725	45	315	55	315	65	860	75	660
6	345	16	305	26	640	36	670	46	380	56	320	66	700	76	640
7	370	17	265	27	690	37	635	47	275	57	280	67	715	77	675
8	390	18	240	28	650	38	680	48	380	58	330	68	730	78	630
9	430	19	205	29	615	39	685	49	275	59	305	69	635	79	635
10	330	20	310	30	620	40	650	50	360	60	310	70	700	80	660

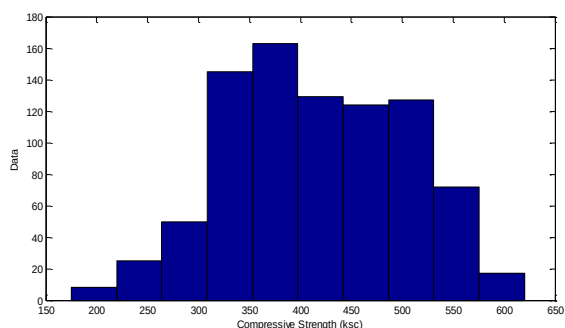
3.5 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตของสะพานติณสูลานนท์ ฝั่งซ้ายทางและขวาทาง สามารถสรุปผลแยกตามประเภทชิ้นส่วนได้ดัง ตารางที่ 3-3 จะเห็นได้ว่า สะพานฝั่งซ้ายทาง มีค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตเฉลี่ยอยู่ในช่วง 403 – 569 ksc สะพานฝั่งขวาทาง มีค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตเฉลี่ยอยู่ในช่วง 339 – 534 ksc เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ระบุในแบบก่อสร้าง พบว่าสะพานฝั่งซ้ายทางและสะพานฝั่งขวาทางในปัจจุบันยังคงมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าค่าที่ระบุไว้ในแบบก่อสร้าง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง โดยการกระจายตัวกำลังรับแรงอัดคอนกรีตในสะพานฝั่งซ้ายทางและฝั่งขวาทางได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-6 และ รูปที่ 3-7 ตามลำดับ

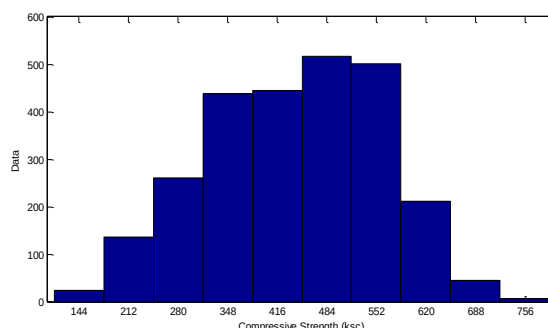
ตารางที่ 3-3 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

สะพาน	ชิ้นส่วน	กำลังรับแรงอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ksc)			
		ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ	ค่าที่ระบุในแบบก่อสร้าง	ค่า Bias	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ฝั่งซ้ายทาง	ทางเท้า (Sidewalk)	417	200	2.09	90
	คานคอนกรีตรูปกล่อง (Box Girder)	439	350	1.25	118
	เสาตอม่อ (Column)	569	250	2.28	49
	ครอบเสาเข็ม (Pile Cap)	403	250	1.61	59
ฝั่งขวาทาง	ทางเท้า (Sidewalk)	387	200	1.94	77
	คานคอนกรีตรูปกล่อง (Box Girder)	534	400	1.34	167
	เสาตอม่อ (Column)	339	250	1.36	61
	ครอบเสาเข็ม (Pile Cap)	377	250	1.51	90

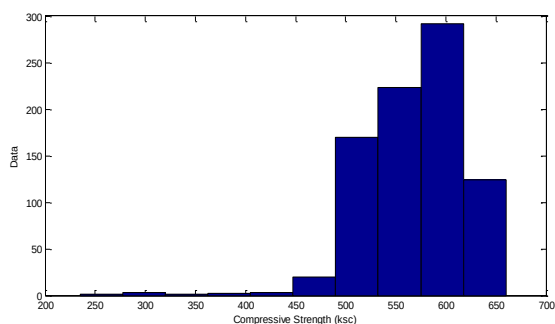
หมายเหตุ : ค่า Bias คือ ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบต่อค่าที่ระบุในแบบก่อสร้าง



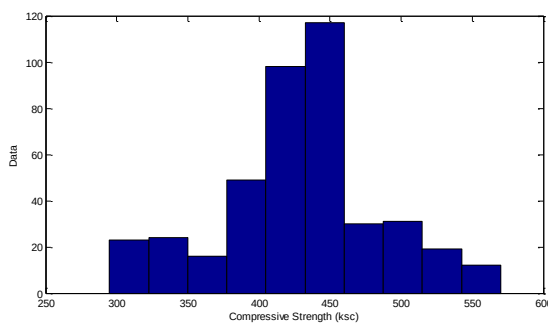
(ก) ทางเท้า



(ข) คานคอนกรีตรูปกล่อง

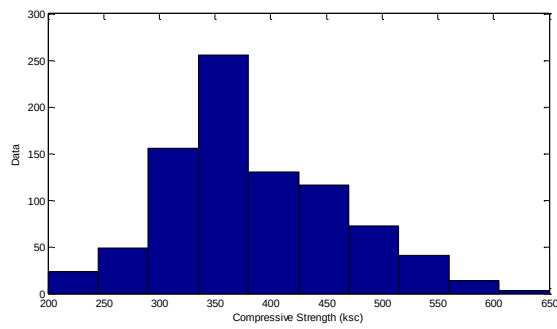


(ค) เสาตอม่อสะพาน

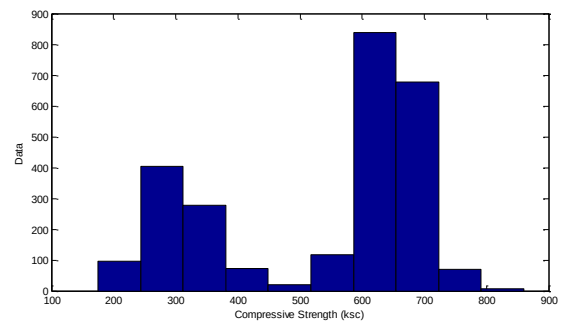


(ง) ครอบเสาเข็ม

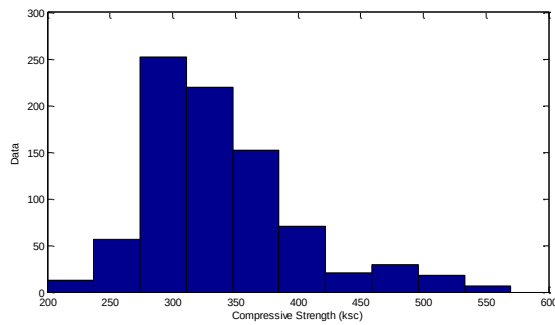
รูปที่ 3-6 การกระจายตัวของค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตแยกตามประเภทชิ้นส่วนในสะพานฝั่งซ้ายทาง



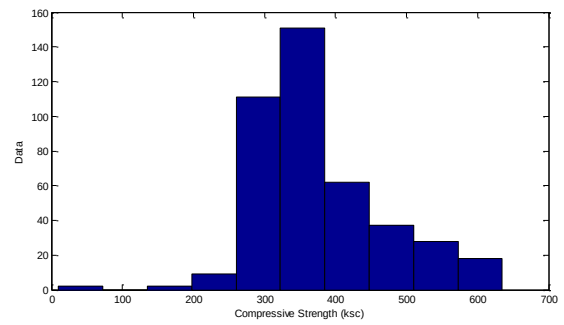
(ก) ทางเท้า



(ข) คานคอนกรีตรูปกล่อง



(ค) เสาคอนกรีตสะพาน



(ง) ครอบเสาเข็ม

รูปที่ 3-7 การกระจายตัวของค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตแยกตามประเภทชิ้นส่วนในสะพานฝั่งขวาทาง

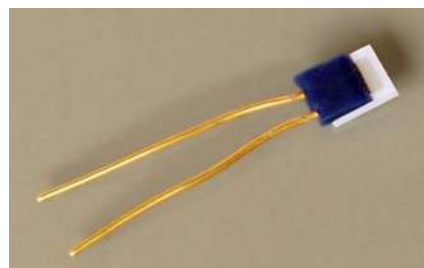
บทที่ 4 การตรวจวัดสะพาน

ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดพฤติกรรมของสะพานดินสุลาลัยด้านเหนือ (ส่วนที่เชื่อมด้านเหนือของเกาะยกกับฝั่งบ้านเขาเขียว) ทั้งฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) และฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) โดยได้จัดทำแบบติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวเหล็ก อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวขนาด 500 มิลลิเมตร และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวขนาด 100 มิลลิเมตร จากนั้น ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดและดำเนินการตรวจวัดสะพาน โดยในแต่ละสะพานได้บันทึกข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ พร้อมทั้งบันทึกพฤติกรรมการจราจรด้วยเครื่องบันทึกภาพระบบดิจิทัล ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 45 วัน ขณะเดียวกันได้ทำการทดสอบสะพานทั้งสองสะพานภายใต้รถบรรทุกที่ทราบน้ำหนัก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจรของทั้งตัวคานและรอยต่อระหว่างคาน สำหรับรายละเอียดของการตรวจวัดสะพาน มีดังนี้

4.1 อุปกรณ์การตรวจวัด

4.1.1. อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 (Temperature Sensor : PT100)

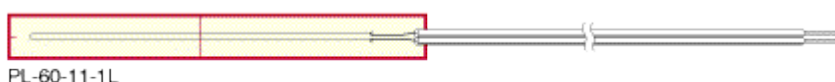
อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 หรือ RTD เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของลวดโลหะไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ลวดโลหะที่นำมาผลิต RTD มีหลายชนิด เช่น ทองแดง ทังสเตน นิเกิล และแพลตินัม เป็นต้น RTD แบบแพลตินัม 100 โอห์ม จะเป็นที่ยอมรับสูงสุดเนื่องจากความเป็นลิเนียร์ที่ดี โดยจะเปลี่ยนค่าความต้านทานเฉลี่ย 0.385 โอห์ม ต่อ 1 องศาเซลเซียส การใช้งานปกติจะมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป 1 องศา แรงดันจะเปลี่ยนไป 0.385 มิลลิโวลต์ เหมาะสำหรับวัดค่าอุณหภูมิที่ต้องการความละเอียดสูงและอุณหภูมิต่ำจนถึงติดลบ สำหรับโครงการนี้ ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 ชนิด flat film class A สำหรับติดตั้งกับโครงสร้างคอนกรีต และ PT100 ชนิด Probe class A สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศ โดยวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -30 ถึง 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-1 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PT100

4.1.2. อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต (Strain Gauge : 60 mm)

อุปกรณ์วัดความเครียด (Stran Gauge) บนผิวคอนกรีต เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าแรงดึงเครียดเนื่องจากการยืดหรือหดตัวของโครงสร้างคอนกรีต เมื่อ Strain Gauge ถูกแรงกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป เช่น ยืด หด บิด และงอ เป็นต้น ทำให้ความต้านทานของวัตถุนั้นเปลี่ยนไปตามแรงที่กระทำ การนำไปใช้จะใช้การต่อวงจร Wheatstone bridge เพื่อหาความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป ส่วนใหญ่ Strain Gauge จะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นรูปร่างต่างๆ อยู่บนแผ่นฉนวน นอกจากนั้นยังมีเซทรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบลวดโลหะ แต่ก็มีราคาแพงกว่าเช่นกัน สำหรับโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีตที่มีขนาดความยาวเกจ 60 มิลลิเมตร เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีลักษณะ non-homogeneous ดังนั้น จึงได้ใช้ Strain Guage ที่มีขนาดครอบคลุมสองเท่าของหินขนาดใหญ่สุด (1 นิ้ว)



รูปที่ 4-2 อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต ขนาด 60 มิลลิเมตร

4.1.3. อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวเหล็ก (Strain Gauge : 5 mm)

อุปกรณ์วัดความเครียด (Stran Gauge) บนผิวเหล็ก เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าแรงดึงเครียดเช่นเดียวกับที่ติดผิวคอนกรีต ต่างกันตรงที่เหล็กเป็นวัสดุที่มีลักษณะ homogeneous ดังนั้น ขนาด Strain Gauge สำหรับติดตั้งบนผิวเหล็กจึงไม่ยาวเหมือนของคอนกรีต ซึ่งโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวเหล็กมีความยาวเกจ 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4-3 อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวเหล็ก ขนาด 5 มิลลิเมตร

4.1.4. อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวขนาด 500 มม. (Displacement Transducer: 500 mm)

อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer) เป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) ประเภทพาสซีฟ (passive transducers) ทำงานโดยอาศัยการแปลงค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ สำหรับโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างขนาด 500 มิลลิเมตร ในการวัดพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของรอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint) อันเนื่องจากผลของอุณหภูมิ



รูปที่ 4-4 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวขนาด 500 มิลลิเมตร

4.1.5. อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวขนาด 100 มม. (Displacement Transducer: 100 mm)

อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer) เป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) ประเภทพาสซีฟ (passive transducers) ทำงานโดยอาศัยการแปลงค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ สำหรับโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างขนาด 100 มิลลิเมตร ในการวัดพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของรอยต่อระหว่างคานคอนกรีต (Box Girder Joint) อันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกจร

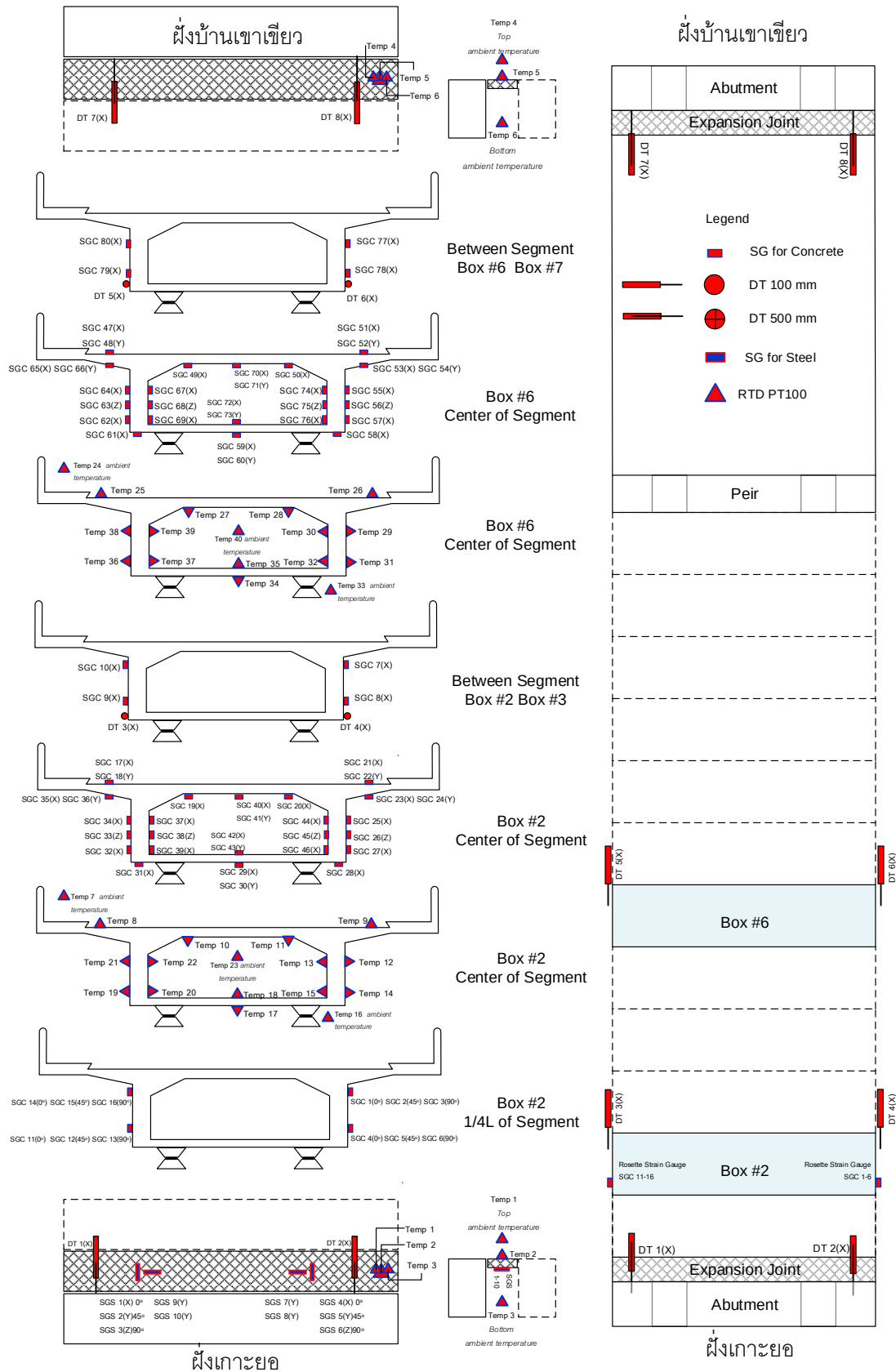


รูปที่ 4-5 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวขนาด 100 มิลลิเมตร

4.2 การจัดทำแบบติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด

ที่ปรึกษาได้ทำการพิจารณาถึงตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดให้สอดคล้องกับข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานดินสุลาลัย โดยแต่ละสะพานได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ประกอบด้วย อุปกรณ์การตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 (Temperature, Temp) จำนวน 40 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเค้นบนผิวคอนกรีต (Strain Gauge for Concrete, SG) จำนวน 80 ตำแหน่ง อุปกรณ์การตรวจวัดความเค้นบนผิวเหล็ก (Strain Gauge for Steel, SGS) จำนวน 10 ตำแหน่ง อุปกรณ์การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Displacement Transducer, DT) ขนาด 500 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตำแหน่ง และขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตำแหน่ง ซึ่งแบบแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7 สำหรับสะพานฝั่งซ้ายทางและขวาทาง ตามลำดับ

สะพานติณสูลานนท์ฝั่งซ้ายทาง (เก่า)



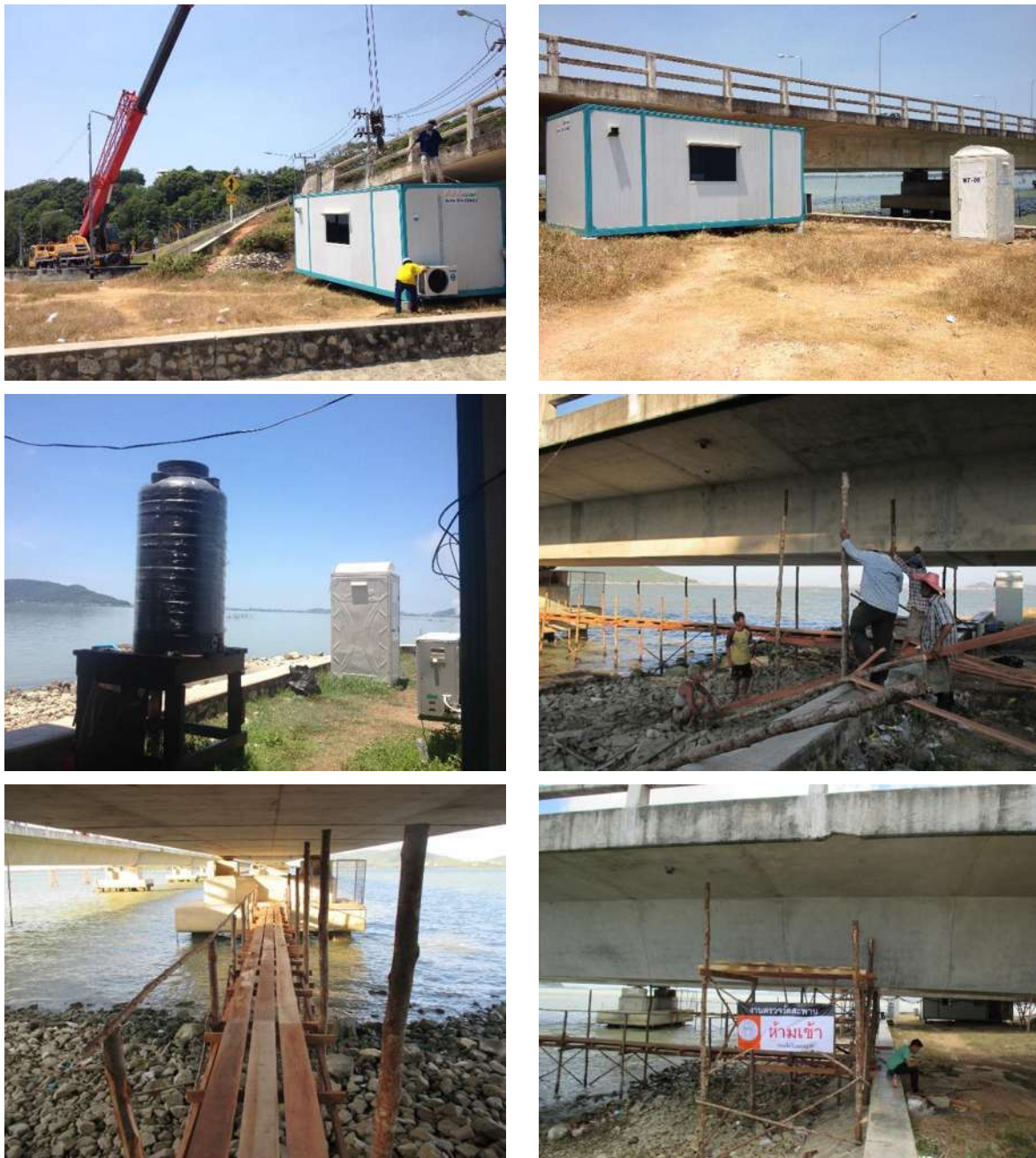
รูปที่ 4-6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด สะพานฝั่งซ้ายทาง

รูปที่ 4-7 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด สะพานฝั่งขวาทาง

4.3 การเตรียมพื้นที่และการติดตั้งอุปกรณ์

4.3.1. การเตรียมพื้นที่บริเวณสะพาน

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการประสานงานกับเจ้าหน้าที่กรมทางหลวงที่รับผิดชอบดูแลสะพาน เพื่อให้ทราบถึงรายละเอียดกระบวนการตรวจวัดสะพานดินสุลล่านนท์ทั้งฝั่งซ้ายทางและขวาทาง โดยได้ขอใช้พื้นที่บริเวณโดยรอบสะพานช่วงที่ทดสอบ คือ บริเวณช่วงสะพานแรกฝั่งเกาะยอ ในการดำเนินงานตั้งตู้สำนักงานชั่วคราว ติดตั้งนั่งร้าน ติดตั้งกล้องวงจรปิด และล้อมรั้วบริเวณรอบพื้นที่ทำการตรวจวัด เพื่อความปลอดภัยด้านต่างๆ เมื่อวันที่ 4 – 8 มีนาคม 2558 โดยภาพการดำเนินงานเตรียมพื้นที่สะพานแสดงได้ดังรูปที่ 4-8



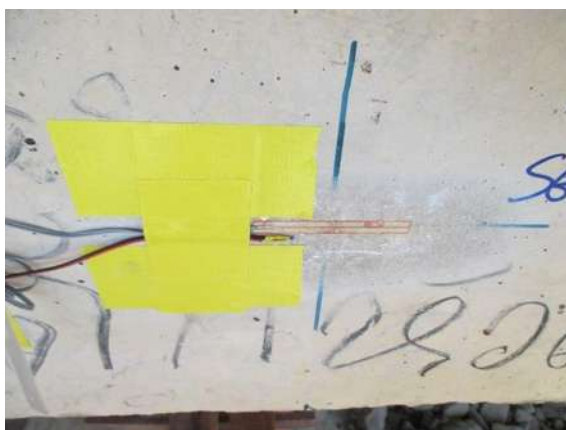
รูปที่ 4-8 การดำเนินงานเตรียมพื้นที่บริเวณสะพาน (เมื่อวันที่ 4 – 8 มีนาคม 2558)



รูปที่ 4.3-1 การดำเนินงานเตรียมพื้นที่บริเวณสะพาน (เมื่อวันที่ 4 – 8 มีนาคม 2558) (ต่อ)

4.3.2. การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ภายหลังจากเตรียมพื้นที่บริเวณสะพานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ที่ปรึกษาได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดตามแบบ
แสดงตำแหน่งอุปกรณ์ที่กำหนด เมื่อวันที่ 6 – 10 มีนาคม 2558 โดยตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4-9
ถึงรูปที่ 4-13 จากนั้น ในวันที่ 11 – 12 มีนาคม 2558 ได้ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ตรวจวัดเข้ากับอุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data
Acquisition) ดังรูปที่ 4-14 และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ในผู้ดำเนินงานชั่วคราวเพื่อทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณที่ได้จาก
อุปกรณ์ตรวจวัด



รูปที่ 4-9 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PT100 (เมื่อวันที่ 6-10 มีนาคม 2558)



รูปที่ 4-10 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวเหล็ก (เมื่อวันที่ 6-10 มีนาคม 2558)



รูปที่ 4-11 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีต (เมื่อวันที่ 6-10 มีนาคม 2558)



รูปที่ 4-12 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ 500 มิลลิเมตร (เมื่อวันที่ 6-10 มีนาคม 2558)



รูปที่ 4-13 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ 100 มิลลิเมตร (เมื่อวันที่ 6-10 มีนาคม 2558)



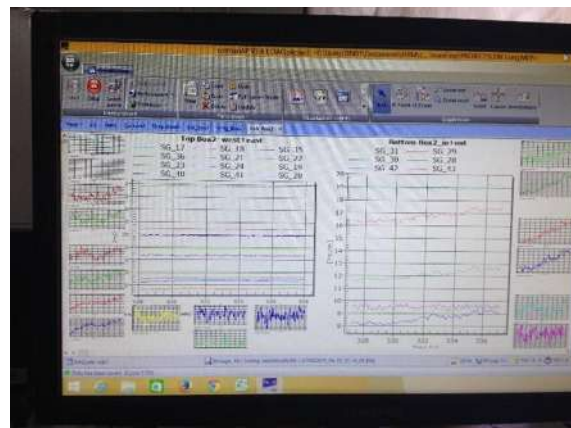
รูปที่ 4-14 การติดตั้งอุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data Acquisition) เมื่อวันที่ 11 – 12 มีนาคม 2558

4.4 การตรวจวัดสะพานภายใต้การจราจรปกติ

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการตรวจวัดสะพานติณสูลานนท์ภายใต้การจราจรปกติโดยทำการตรวจวัดต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 45 วันต่อสะพาน ซึ่งสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ทำการตรวจวัดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม – 25 เมษายน 2558 และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ทำการตรวจวัดเมื่อวันที่ 29 เมษายน – 21 มิถุนายน 2558 สำหรับรายละเอียดการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์มีดังนี้

4.4.1. การทดสอบสะพานภายใต้การจราจรปกติ

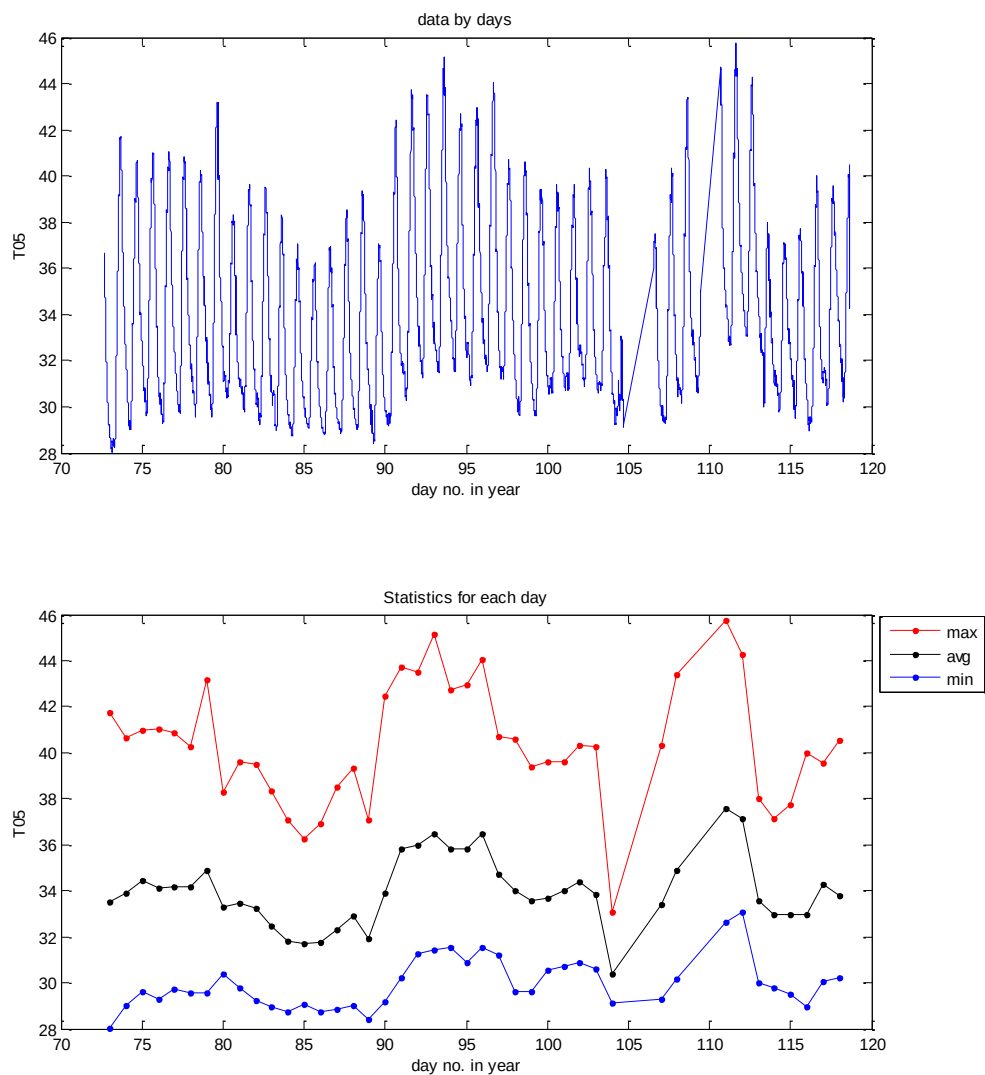
การทดสอบสะพานภายใต้การจราจรแบบปกติมีรูปแบบคล้ายการทดสอบสะพานแบบพลวัต แต่จะไม่ทราบน้ำหนักและความเร็วของรถที่วิ่งผ่าน โดยที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดสะพานทั้งฝั่งซ้ายทางและฝั่งขวาทางภายใต้การจราจรปกติ ซึ่งในระหว่างตรวจวัดได้ทำการบันทึกพฤติกรรมของการจราจรบนสะพานด้วยเครื่องบันทึกภาพระบบดิจิทัล (Digital Video Recorder) เพื่อจำแนกประเภทรถบรรทุกขณะอยู่บนช่วงสะพาน โดยในแต่ละสะพานจะทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 45 วัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน และศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานเนื่องจากการใช้งานตามสภาพการจราจรปกติ ตัวอย่างการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4-15 ถึง Error! Reference source not found.



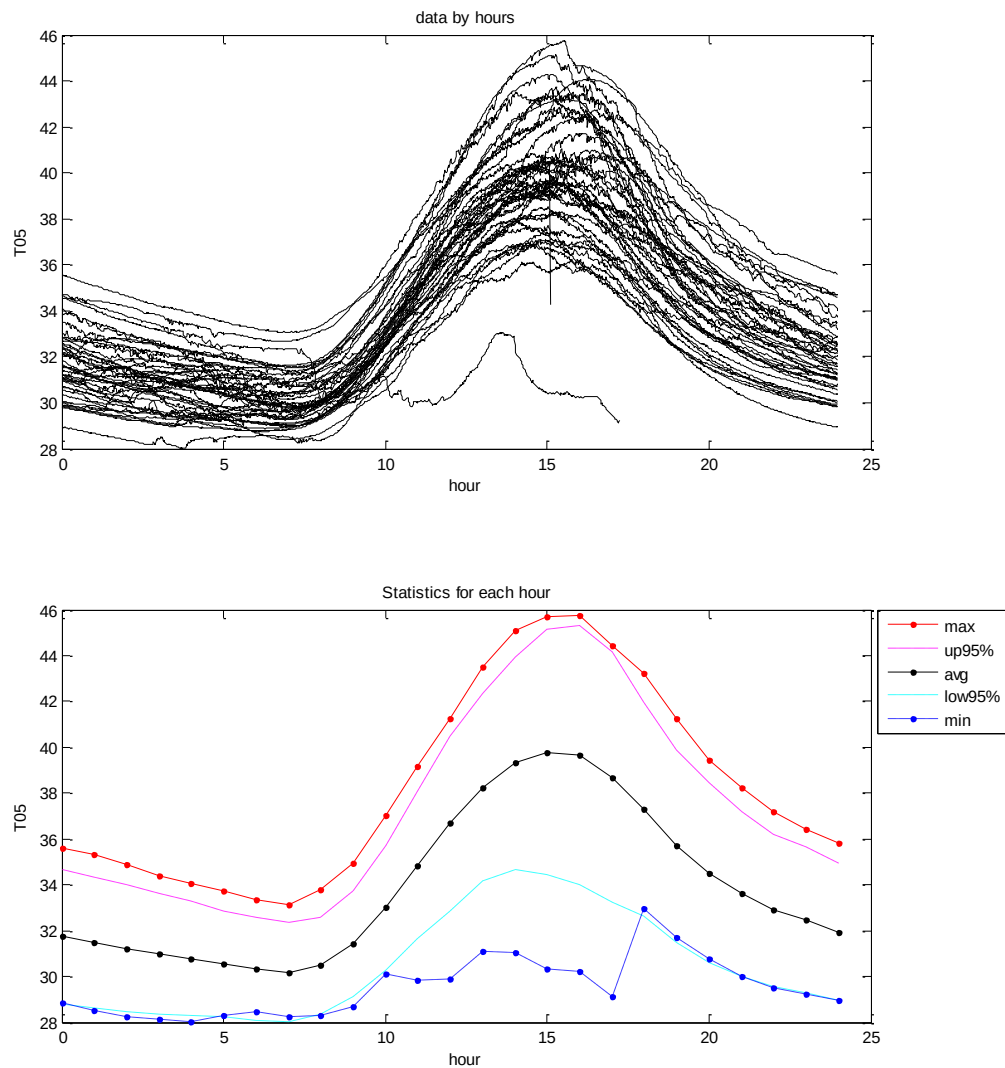
รูปที่ 4-15 การดำเนินงานตรวจวัดสะพานภายใต้การจราจรปกติ ระหว่างวันที่ 12 มีนาคม – 25 เมษายน 2558

4.4.2. ตัวอย่างผลการตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature)

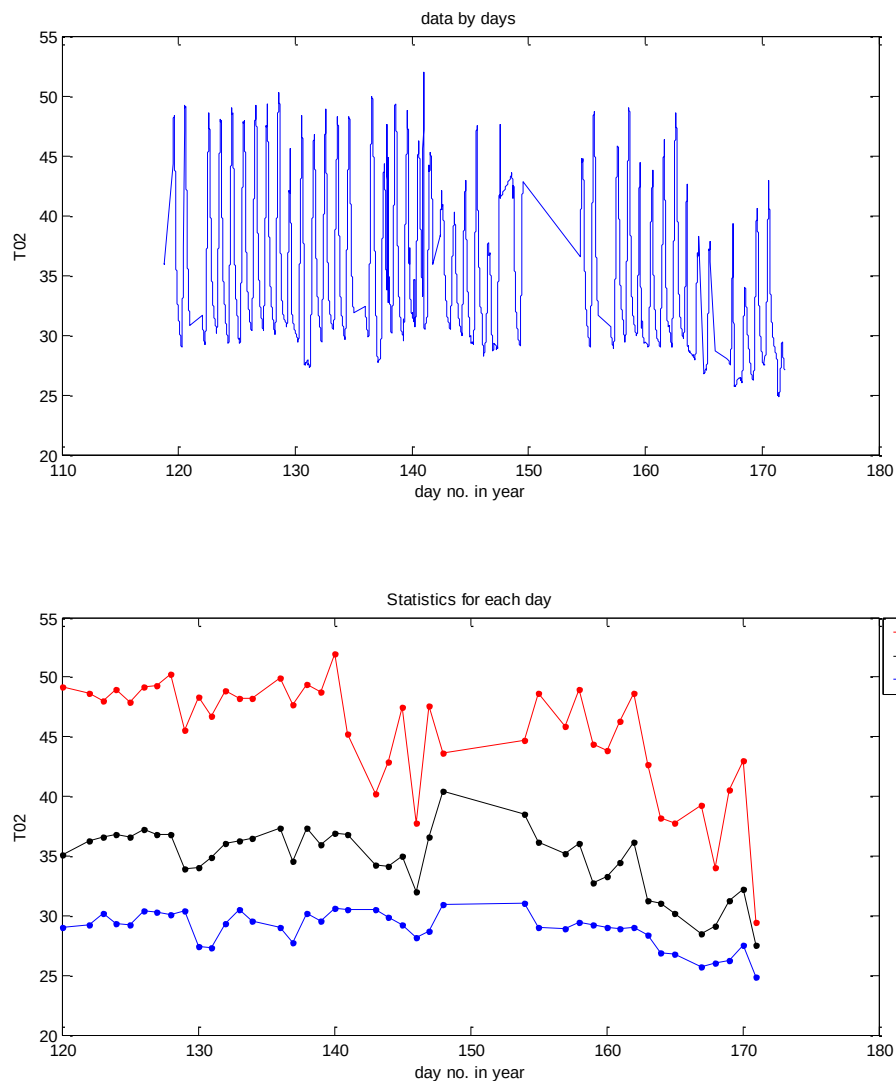
ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิสะพานดินสุสานนท์จำนวนสะพานละ 40 ตำแหน่ง โดยตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิตำแหน่ง Temp 05 ของสะพานฝั่งซ้ายทาง ตลอดระยะเวลา 45 วัน และในรอบวัน แสดงได้ดังรูปที่ 4-16 และรูปที่ 4-17 ตามลำดับ ทำนองเดียวกัน ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิตำแหน่ง Temp 02 ของสะพานฝั่งขวาทาง ตลอดระยะเวลา 45 วัน และในรอบวัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-18 และรูปที่ 4-19 ตามลำดับ สำหรับข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิของสะพานทั้งซ้ายทางและขวาทาง สามารถแสดงได้ในภาคผนวก ค



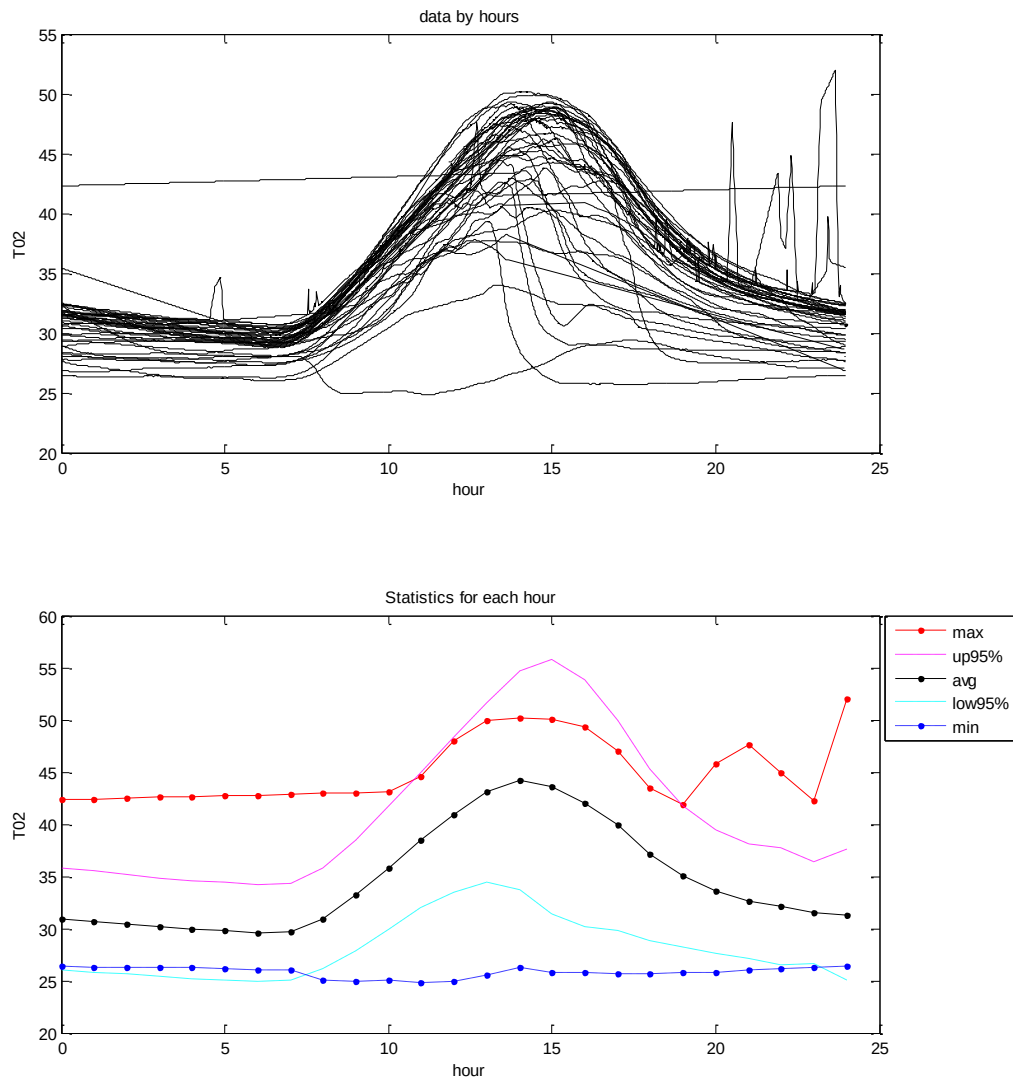
รูปที่ 4-16 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิตำแหน่ง Temp 05 สะพานฝั่งซ้ายทาง ระยะเวลา 45 วัน



รูปที่ 4-17 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิตำแหน่ง Temp 05 สะพานฝั่งซ้ายทาง ในรอบวัน



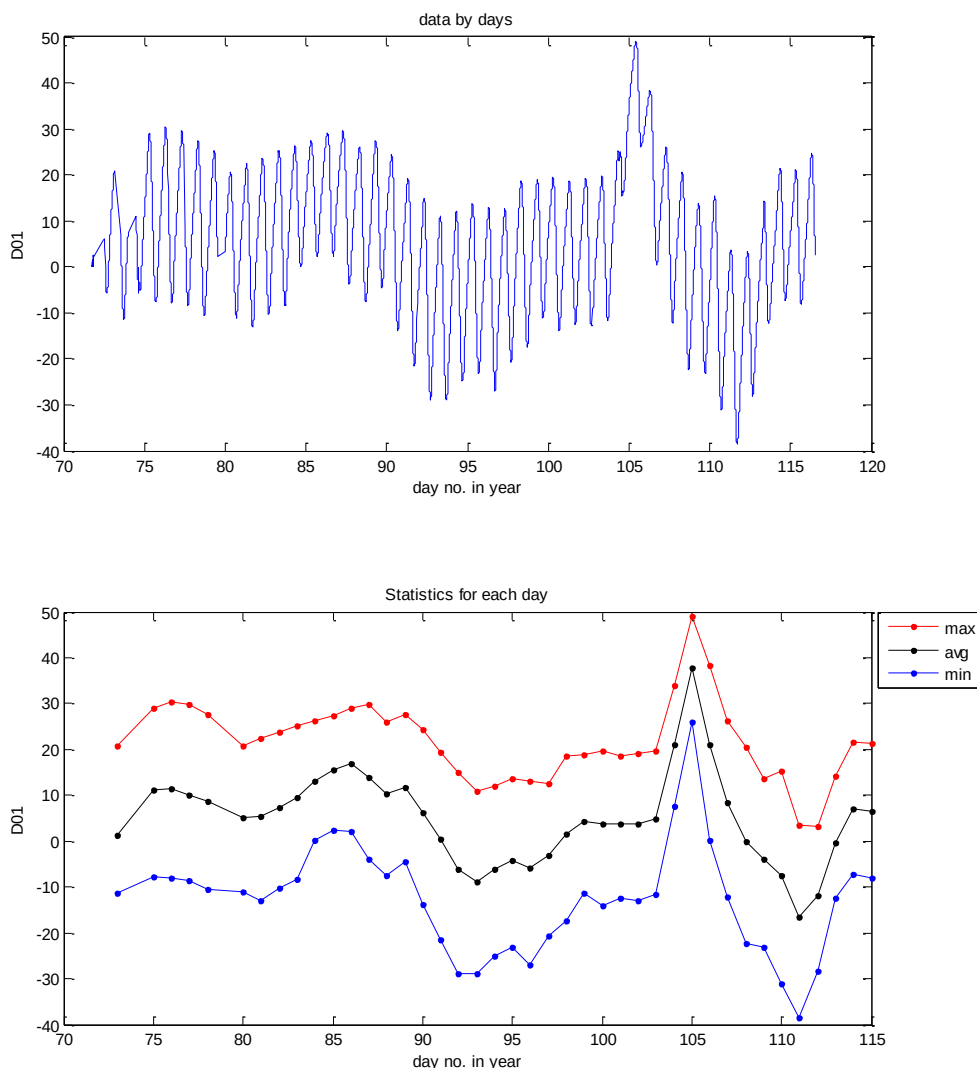
รูปที่ 4-18 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิตำแหน่ง Temp 02 สะพานฝั่งขวาทาง ระยะเวลา 45 วัน



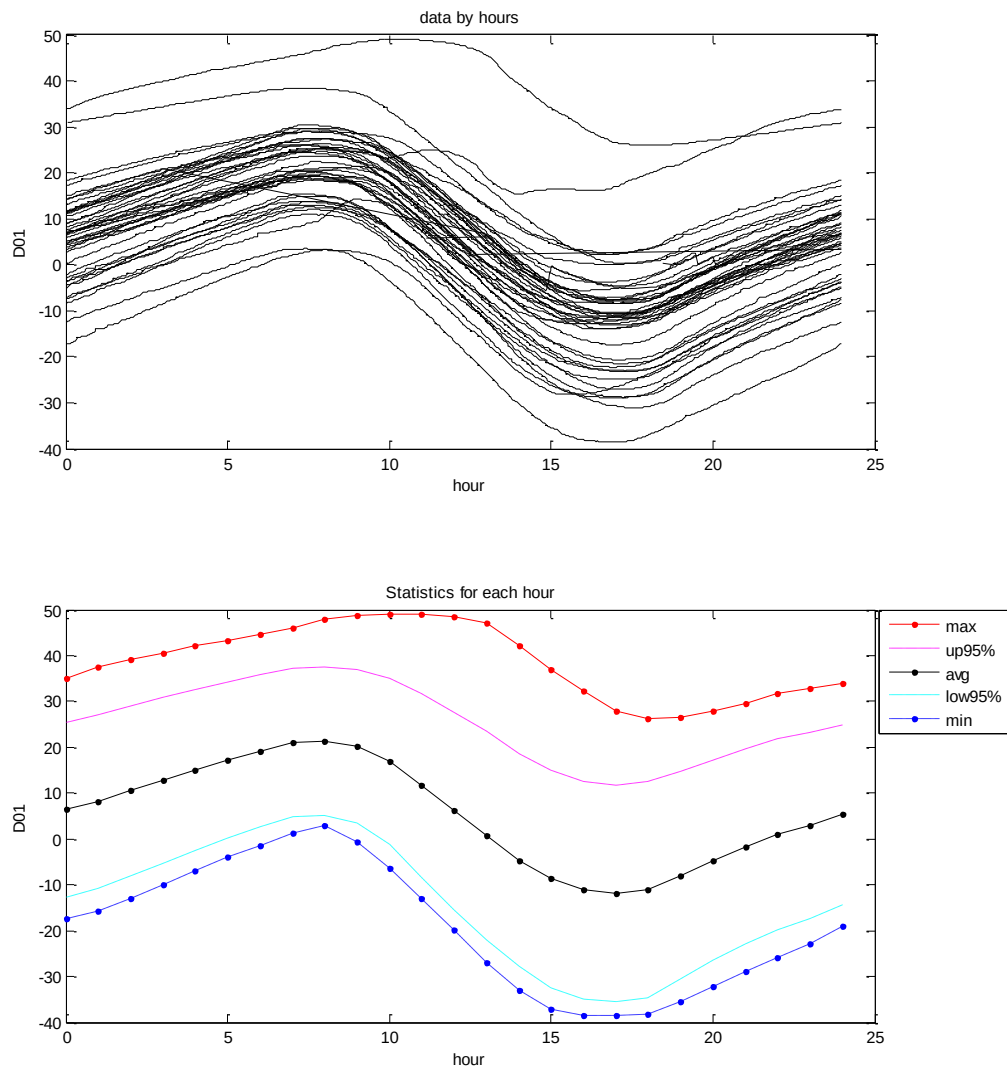
รูปที่ 4-19 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิตำแหน่ง Temp 02 สะพานฝั่งขวาทาง ในรอบวัน

4.4.3. ตัวอย่างผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer)

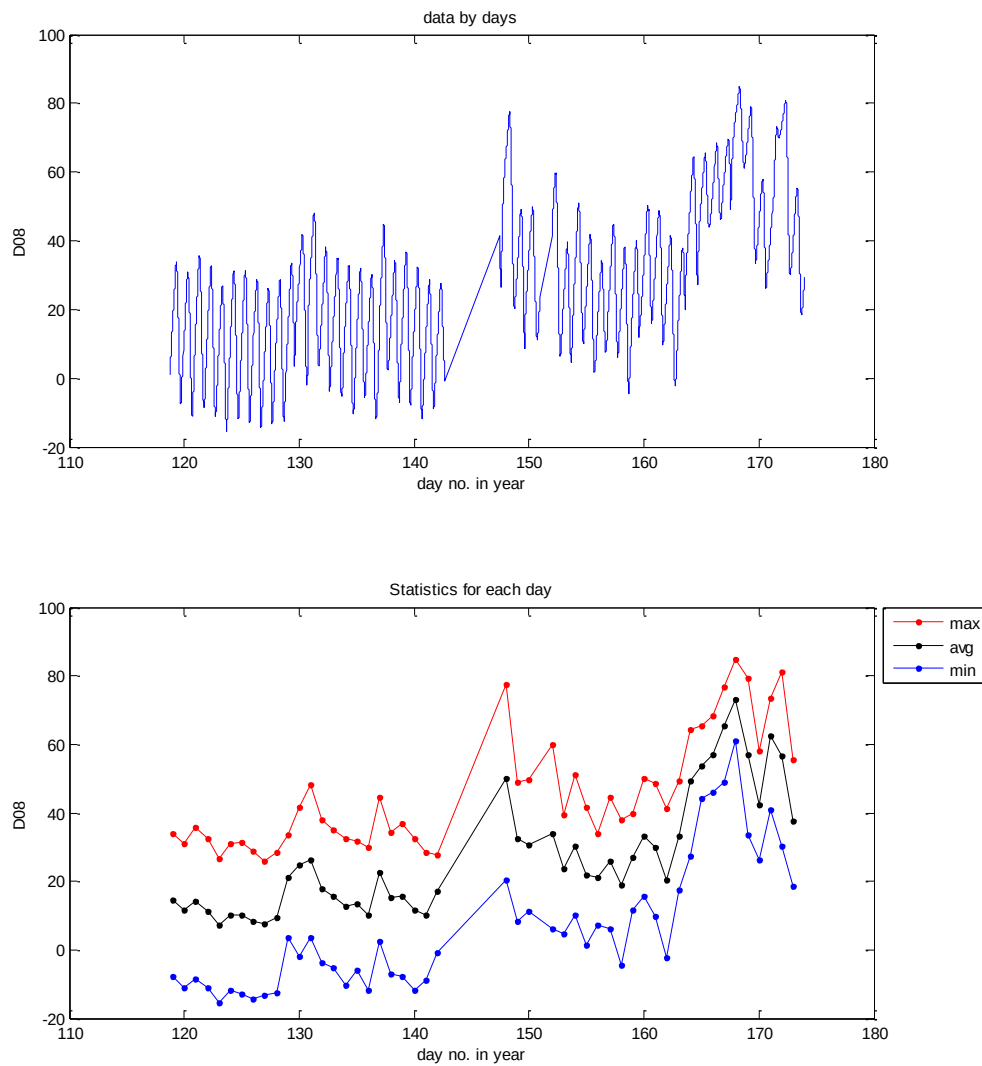
ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานดินสุสานนท์โดยตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยต่อตำแหน่ง DT 01 ของสะพานฝั่งซ้ายทาง ตลอดระยะเวลา 45 วัน และในรอบวัน แสดงได้ดังรูปที่ 4-20 และรูปที่ 4-21 ตามลำดับ ทำนองเดียวกัน ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยต่อตำแหน่ง DT 08 ของสะพานฝั่งขวาทาง ตลอดระยะเวลา 45 วัน และในรอบวัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-22 และรูปที่ 4-23 ตามลำดับ สำหรับผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของสะพานทั้งซ้ายทางและขวาทาง สามารถแสดงได้ในภาคผนวก ค



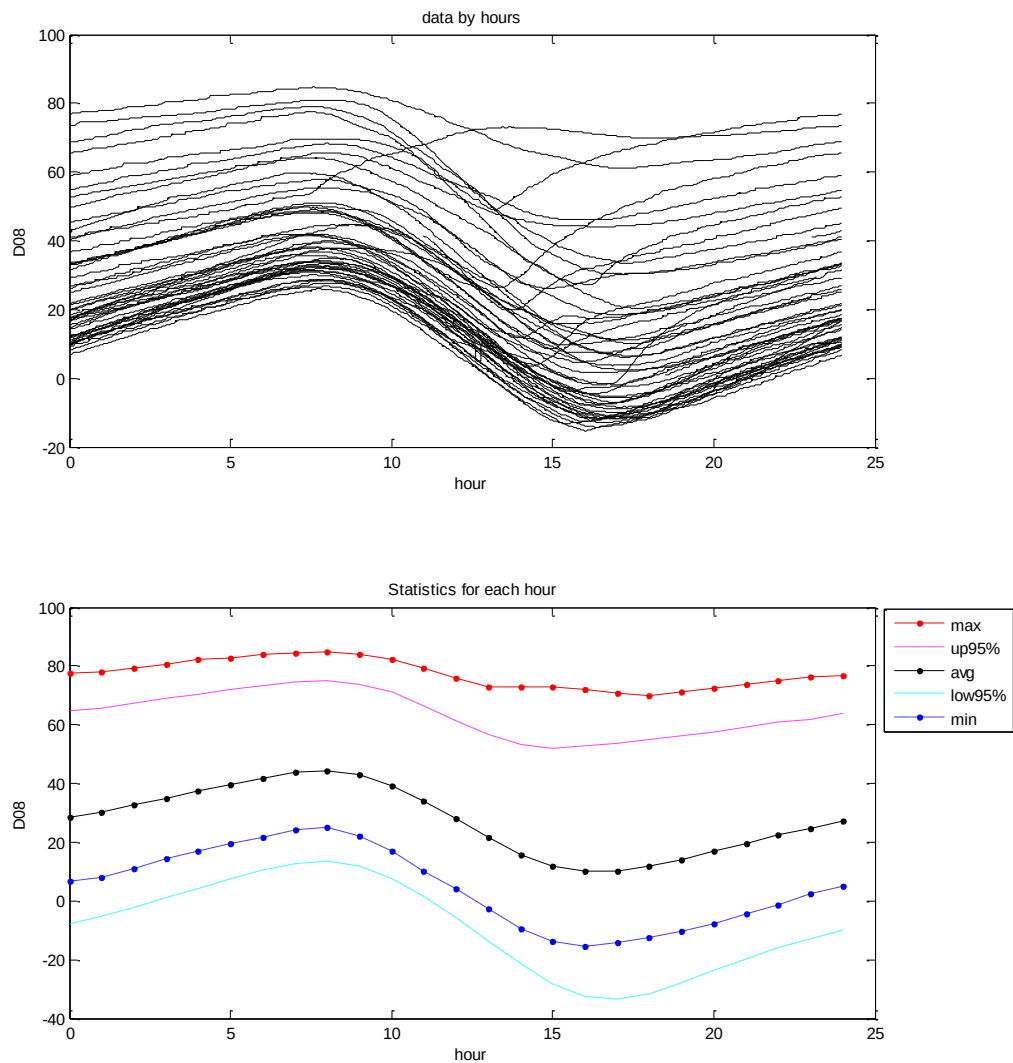
รูปที่ 4-20 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวตำแหน่ง DT 01 สะพานฝั่งซ้ายทาง ระยะเวลา 45 วัน



รูปที่ 4-21 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวตำแหน่ง DT 01 สะพานฝั่งซ้ายทาง ในรอบวัน



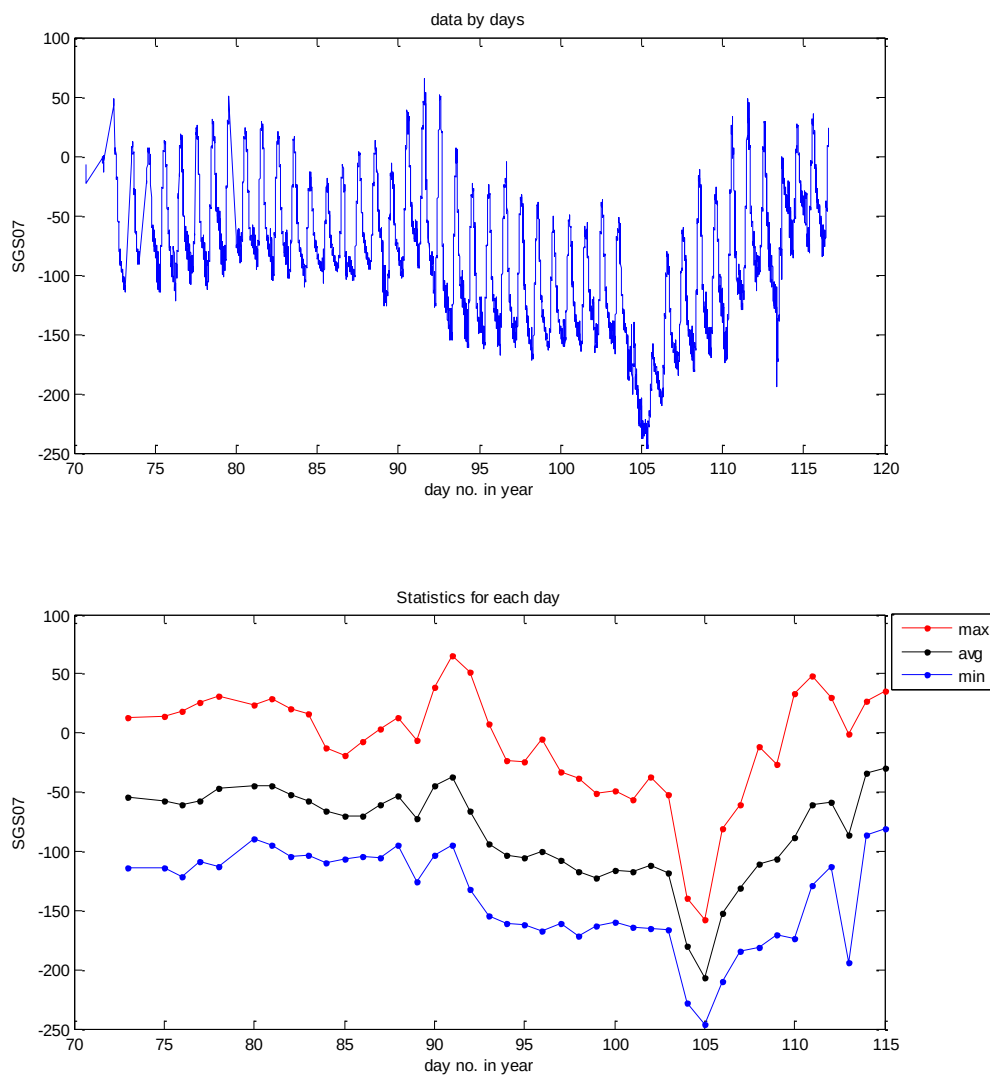
รูปที่ 4-22 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวตำแหน่ง DT 08 สะพานฝั่งขวาทาง ระยะเวลา 45 วัน



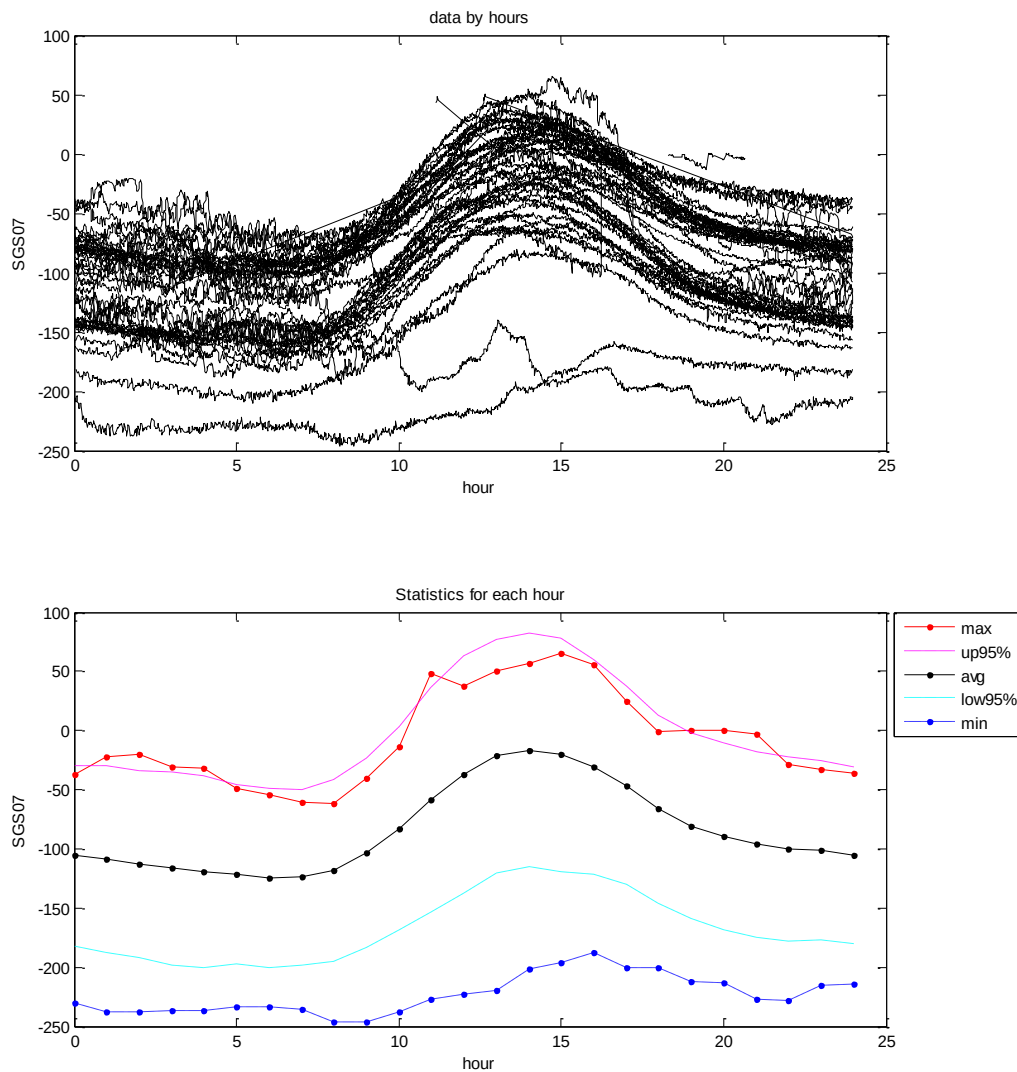
รูปที่ 4-23 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวตำแหน่ง DT 08 สะพานฝั่งขวาทาง ในรอบวัน

4.4.4. ตัวอย่างผลการตรวจวัดการยืดหดตัว (Strain Gauge)

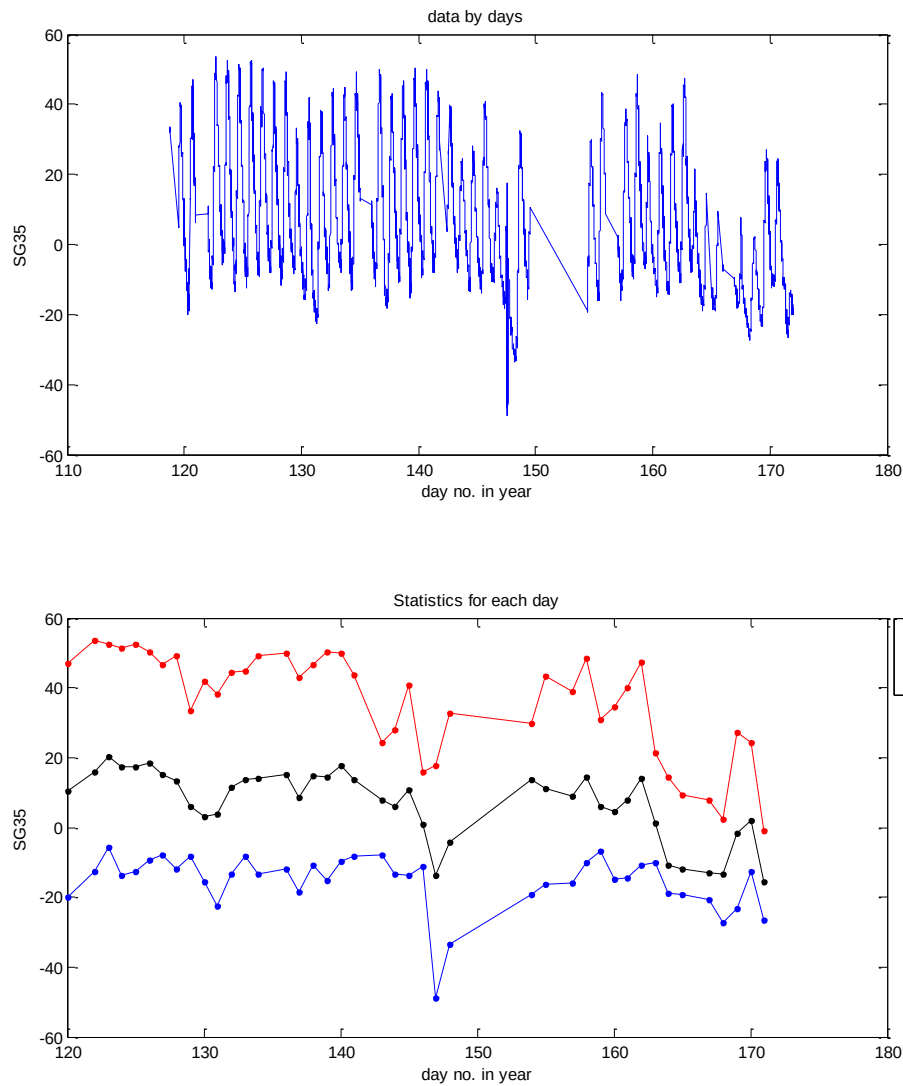
ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดการยืดหดตัวของโครงสร้างสะพานดินสุลาลัย โดยตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการยืดหดตัวที่ผิวเหล็กตำแหน่ง SGS 07 ของสะพานฝั่งซ้ายทาง ตลอดระยะเวลา 45 วัน และในรอบวัน แสดงได้ดังรูปที่ 4-24 และรูปที่ 4-25 ตามลำดับ ทำนองเดียวกัน ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการยืดหดตัวที่ผิวคอนกรีตตำแหน่ง SG 35 ของสะพานฝั่งขวาทาง ตลอดระยะเวลา 45 วัน และในรอบวัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-26 และรูปที่ 4-27 สำหรับผลการตรวจวัดการยืดหดตัวของสะพานทั้งซ้ายทางและขวาทาง แสดงได้ในภาคผนวก ค



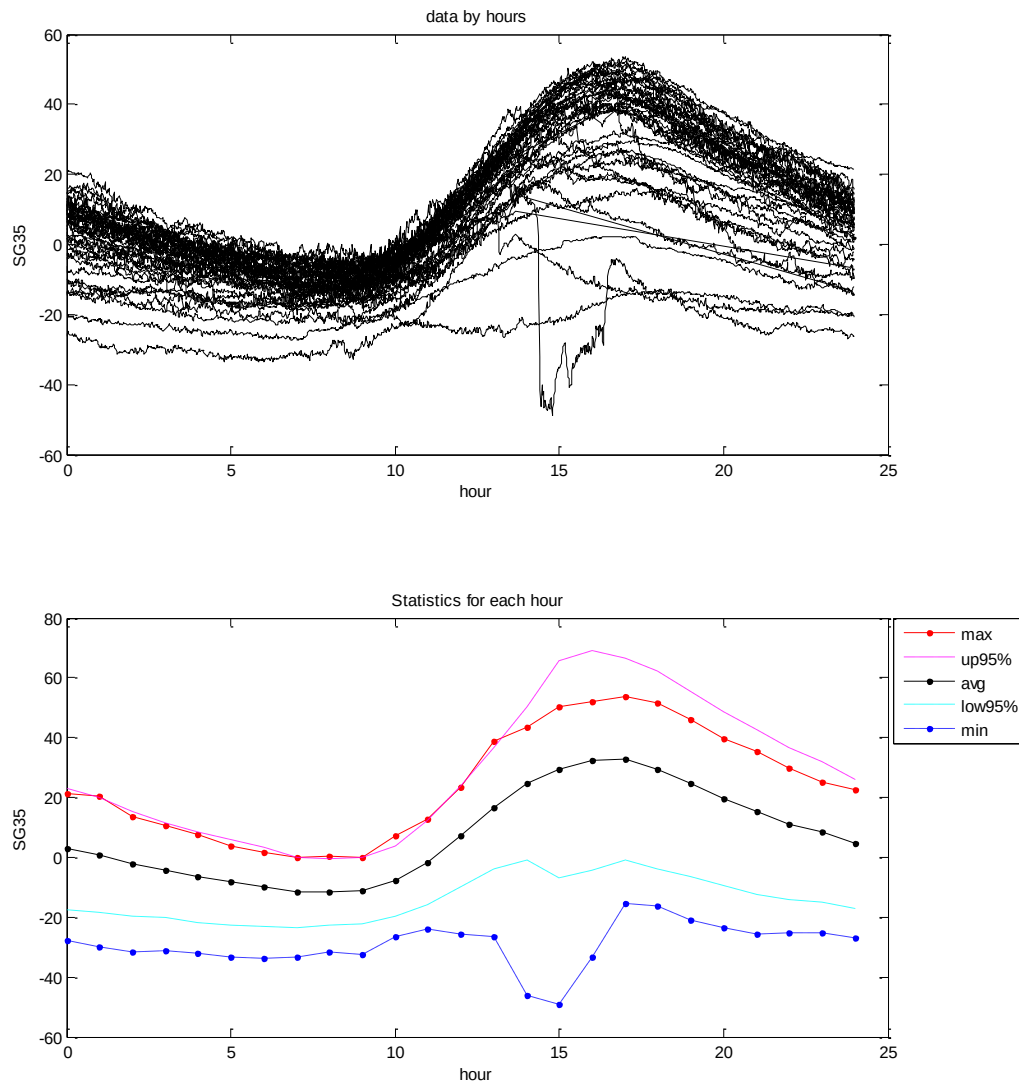
รูปที่ 4-24 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการยืดหดตัวตำแหน่ง SGS 07 สะพานฝั่งซ้ายทาง ระยะเวลา 45 วัน



รูปที่ 4-25 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการยึดหดตัวตำแหน่ง SGS 07 สะพานฝังชำยทาง ในรอบวัน



รูปที่ 4-26 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการยึดหดตัวตำแหน่ง SG 35 สะพานฝั่งขาวทาง ระยะเวลา 45 วัน

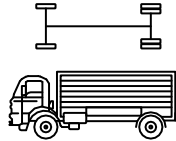
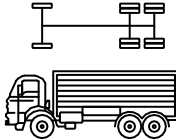
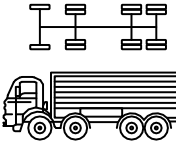
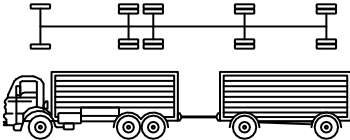
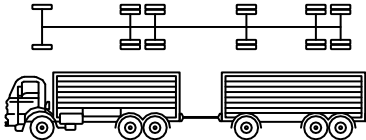
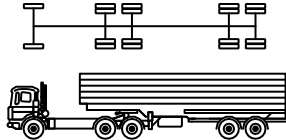
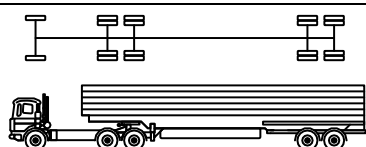


รูปที่ 4-27 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการยึดหดตัวตำแหน่ง SG 35 สะพานฝางขาวทาง ในรอบวัน

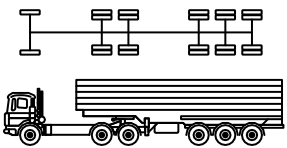
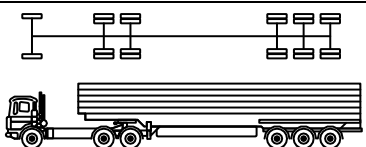
4.4.5. ผลข้อมูลปริมาณการจราจรรถบรรทุก

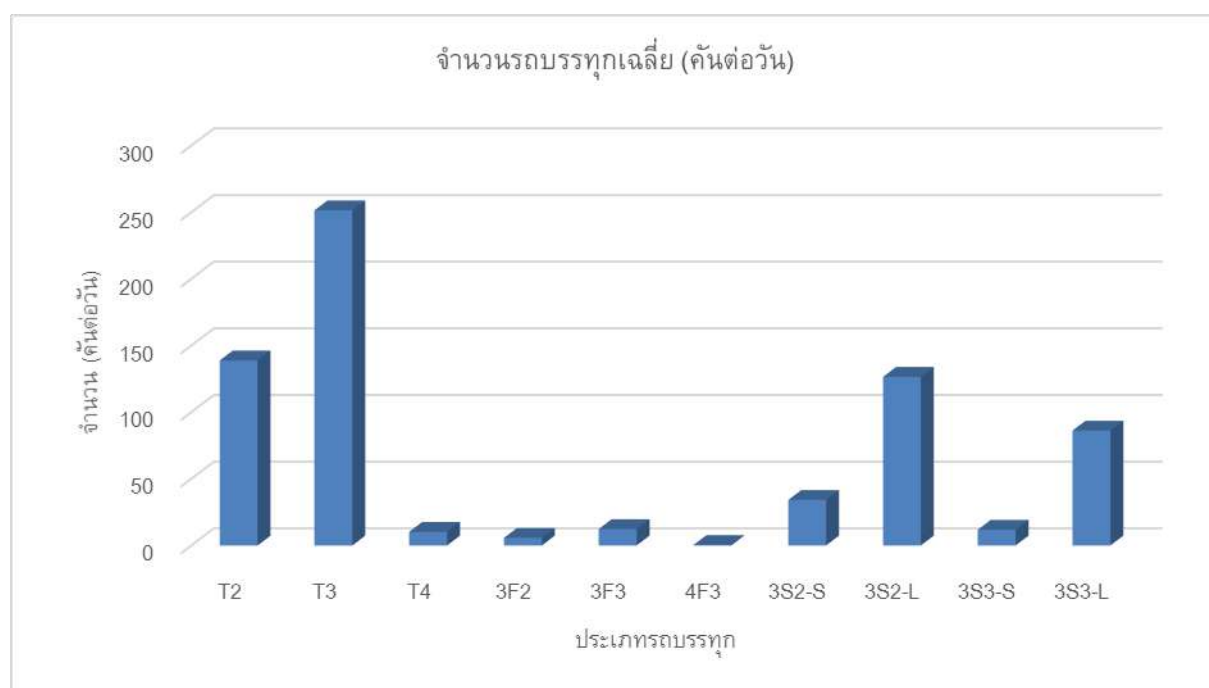
ที่ปรึกษาได้ทำการจำแนกประเภทรถบรรทุก จำนวน 10 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.4-1 เพื่อหาปริมาณการจราจรของรถบรรทุกที่วิ่งบนสะพาน โดยตลอดช่วงที่ทำการตรวจวัดพฤติกรรมของสะพาน สามารถสรุปผลของปริมาณจราจรรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันต่อคืน ได้ดังรูปที่ 4-28 สำหรับสะพานฝั่งซ้ายทาง และรูปที่ 4-29 สำหรับสะพานฝั่งขวาทาง จะเห็นว่า รถบรรทุกส่วนใหญ่เป็นประเภท รถบรรทุก 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถสิบล้อไทย) ซึ่งมีปริมาณสูงเฉลี่ยประมาณ 200 คันต่อวัน

ตารางที่ 4.4-1 การจำแนกประเภทรถบรรทุก จำนวน 10 รูปแบบ

ประเภท	รูปแบบ	รหัส
รถบรรทุก 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 6 เส้น		T2
รถบรรทุก 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น		T3
รถบรรทุกพ่วง 5 เพลา 10 ล้อ ยาง 18 เส้น		T4
รถบรรทุกพ่วง 6 เพลา 12 ล้อ ยาง 22 เส้น		3F2
รถบรรทุกพ่วง 7 เพลา 14 ล้อ ยาง 24 เส้น		3F3
รถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา 10 ล้อ ยาง 18 เส้น (kingpin<7m)		3S2-S
รถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา 10 ล้อ ยาง 18 เส้น (kingpin>7m)		3S2-L

ตารางที่ 4.4-1 การจำแนกประเภทรถบรรทุก จำนวน 10 รูปแบบ (ต่อ)

ประเภท	รูปแบบ	รหัส
รถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา 12 ล้อ ยาง 22 เส้น (kingpin<7m)		3S3-S
รถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา 12 ล้อ ยาง 22 เส้น (kingpin>7m)		3S3-L



รูปที่ 4-28 ปริมาณจราจรรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน ของสะพานฝั่งซ้ายทาง (LT)
ระหว่างวันที่ 12 มีนาคม – 25 เมษายน 2558



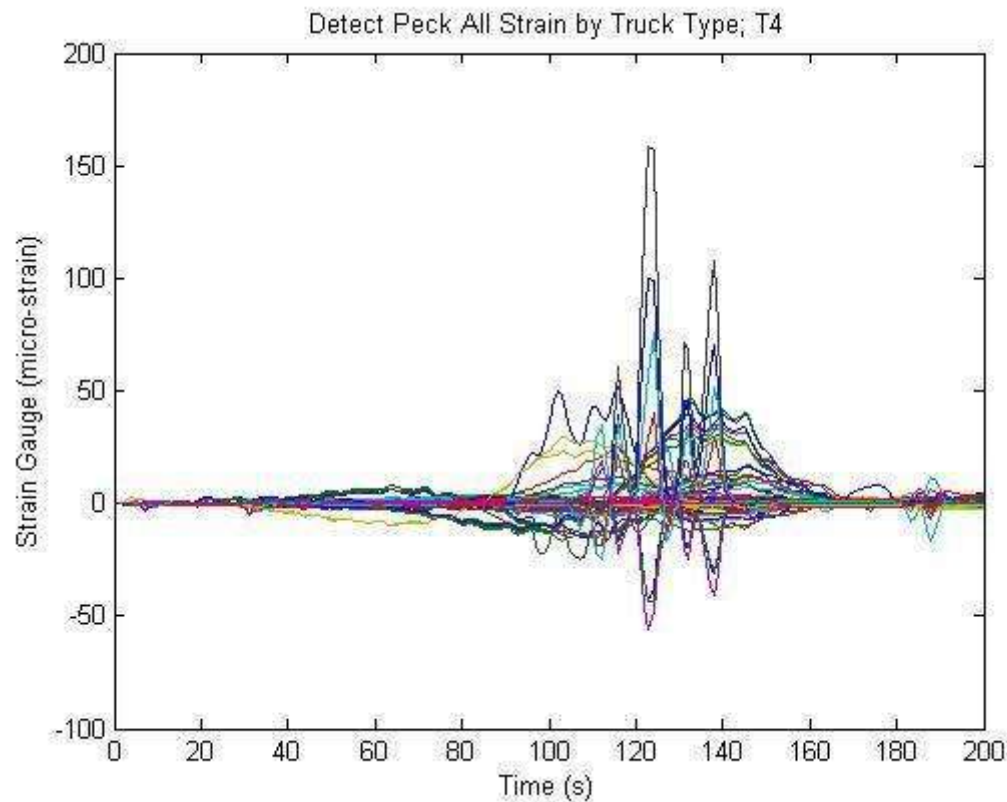
รูปที่ 4-29 ปริมาณจราจรรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน ของสะพานฝั่งขวาทาง (RT)
ระหว่างวันที่ 29 เมษายน – 21 มิถุนายน 2558

4.4.6. ผลการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

ที่ปรึกษาได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณอุปกรณ์วัดความเครียดบนรถบรรทุกแต่ละประเภทวิ่งผ่านสะพานช่วงทดสอบ โดยไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

- (1) ทำการเลือกข้อมูลสัญญาณวัดความเครียดช่วงเวลาตั้งแต่ที่รถบรรทุกวิ่งเข้าสะพานทดสอบจนกระทั่งรถบรรทุกออกจากสะพานทดสอบ
- (2) ทำการตั้งค่าเริ่มต้นทุกช่องสัญญาณวัดความเครียดให้เป็นศูนย์ เนื่องจากต้องการพิจารณาค่าสัญญาณที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกเท่านั้น รูปที่ 4-30
- (3) ทำการวิเคราะห์สัญญาณวัดความเครียดที่เกิดขึ้นสูงสุดหรือต่ำสุดในช่วงขณะที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานทดสอบ โดยค่าบวกจะเป็นการยืดตัวและค่าลบจะเป็นการหดตัว ดังตัวอย่างในตารางที่ 4.4-2 และตารางที่ 4.4-3

สำหรับข้อมูลผลค่าสัญญาณตรวจวัดความเครียดจะบันทึกอยู่ในรูปแบบไฟล์ดิจิทัล (Digital File) เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีปริมาณค่อนข้างมาก อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลในรูปแบบไฟล์ดิจิทัลไปใช้ในการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานดินสุลาลัยได้อย่างสะดวกและรวดเร็วอีกด้วย



รูปที่ 4-30 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดช่วงขณะที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานทดสอบ

ตารางที่ 4.4-2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดของเหล็กรอยต่อสะพาน

No.	TkCode	SGS01	SGS02	SGS03	SGS04	SGS05	SGS06	SGS07	SGS08	SGS09	SGS10
1	T3	17.25417	9.497917	-5.05	123.4792	75.08334	-35.2771	-62.8208	-76.5688	30.2	10.99167
2	T3	-2.10833	-1.60417	-1.82083	96.68542	54.7125	-27.4292	21.61875	23.60625	-36.5417	-28.4333
3	3S3-L	23.6375	12.62708	-5.62292	2.079167	1.570833	1.58125	-16.0938	-19.7792	10.21667	15.14167
4	T3	-2.7875	-1.48542	-1.68542	69.84792	40.8375	-19.3917	-29.8125	-47.4667	-39.45	-27.3083
5	3S2-S	-3.52917	-1.9	-1.0625	59.72292	33.62917	-15.8375	-19.1854	-31.025	-32.475	-21.8917
6	T3	-4.06042	-2.51875	-2.375	144.5063	83.73959	-40.3875	-17.2271	-18.6771	-53.025	-38.0667
7	3S2-L	14.82083	8	-3.48542	-2	-1.30208	1.375	-13.4146	-17.425	12.325	7.408334
8	3S2-L	81.16667	44.75834	-18.7896	153.8188	89.76042	-42.9292	-14.3354	-19.9646	69.89167	67.075
9	T3	-2.1125	-1.80417	2.354167	36.79375	22.35625	-10.5	-24.6688	-34.0063	-29.2917	-21.25
10	T3	6.027084	4.029167	-1.5875	222.9708	125.2854	-59.6021	57.40209	77.40834	-61.575	-49.2583
11	T2	-2.31458	-1.35833	-0.93333	-66.9583	-40.1458	18.05	14.12917	-18.2708	24.86667	18.275
12	T2	-2.31458	-1.35833	-0.93333	-66.9583	-40.1458	18.05	14.12917	-18.2708	24.86667	18.275
13	T3	8.3	5.545834	3.04375	1.997917	1.8875	1.927083	-12.2604	-15.6771	-15.2	8.025
14	3S2-S	8.3	5.545834	3.04375	1.997917	1.8875	1.927083	-12.2604	-15.6771	-15.2	8.025
15	3S2-L	19.0375	11.56458	-5.2875	-1.42083	-0.8	-1.15	-18.8938	-24.3188	19.4	19.35
16	3S3-L	2.454167	1.7875	1.8625	48.12084	29.225	-13.6521	41.74167	41.98125	-28.8833	-21.95
17	3S3-L	2.51875	1.88125	2.16875	64.55834	38.06875	-17.5146	38.225	54.98959	-26.3833	-21.8583
18	3S2-L	17.76875	9.743751	-4.20417	155.4771	96.21042	-41.8979	-66.0417	-82.9292	26.2	14.00833
19	3S2-L	14.61667	7.095834	-5.20208	9.554167	5.989584	-4.17292	6.8125	10.02083	-25.475	-28.625
20	T3	24.72917	13.61458	-6.93958	-1.95625	1.929167	1.7875	-16.0063	-22.7833	10.35	12.6
:											

ตารางที่ 4.4-3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดของคานคอนกรีตรูปกล่อง

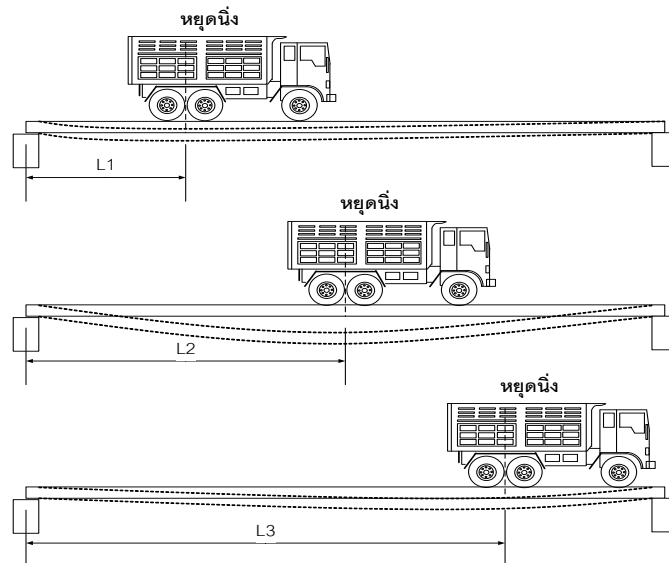
No.	TkCode	SG01	SG02	SG03	SG04	SG05	SG06	SG07	SG08	SG09	...
1	T3	0.6375	-3.82083	10.3375	4.227084	-1.98958	-0.89792	3.51875	10.71042	5.908334	
2	T3	-1.15208	-4.15	-3.68333	4.66875	2.7625	0.991667	2.891667	8.477084	3.752084	
3	3S3-L	-0.88333	-1.575	2.383333	-0.9125	-1.40417	-0.98542	-1.44792	2.852083	3.979167	
4	T3	-0.775	-2.93958	4.3875	3.041667	-1.79583	-0.79583	1.5625	6.11875	2.36875	
5	3S2-S	0.51875	-2.62083	1.504167	2.11875	1.541667	0.397917	1.302083	3.897917	1.989583	
6	T3	0.73125	4.3375	4.416667	6.49375	2.989583	-0.93542	4.03125	12.06458	4.625	
7	3S2-L	0.8875	1.50625	1.425	0.816667	0.9375	0.558333	1.341667	1.635417	2.94375	
8	3S2-L	1.270833	-5.11667	12.25208	5.383334	-2.69792	-1.23333	4.93125	13.75833	10.92917	
9	T3	0.8625	-2.39792	-2.03958	2.175	1.39375	1.133333	2.429167	3.308334	1.616667	
10	T3	-1.26042	-8.48958	-8.44167	10.87083	5.664584	-1.56042	6.6	21.875	9.40625	
11	T2	-0.40833	-0.93125	-1.4875	0.877083	0.766667	0.375	-0.74583	1.802083	0.779167	
12	T2	-0.40833	-0.93125	-1.4875	0.877083	0.766667	0.375	-0.74583	1.802083	0.779167	
13	T3	-0.71458	-1.75208	-2.26042	0.633333	0.839583	0.720833	1.683333	2.714583	4.20625	
14	3S2-S	-0.71458	-1.75208	-2.26042	0.633333	0.839583	0.720833	1.683333	2.714583	4.20625	
15	3S2-L	-0.44167	1.322917	2.683333	-0.91042	-0.94792	-1.07292	-1.87083	2.927083	3.85	
16	3S3-L	-0.55	-3.13542	1.5625	2.464583	1.233333	-0.5375	2.075	4.766667	2.55	
17	3S3-L	-0.47083	-2.925	2.5	2.641667	1.802083	-0.6875	1.7875	5.289584	2.416667	
18	3S2-L	1.260417	-4.72708	12.65625	7.229167	2.835417	-1.19583	5.6375	13.49167	7.120834	
19	3S2-L	-0.8625	-1.875	2.883333	-0.84583	-1.52292	-0.8625	1.354167	2.883333	4.0625	
20	T3	0.5	-0.975	3.214584	0.683333	-1.22083	0.935417	-1.81667	3.535417	3.972917	
⋮											

4.5 การตรวจวัดสะพานภายใต้การควบคุมน้ำหนักบรรทุก

ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบสะพานภายใต้การควบคุมน้ำหนักบรรทุก (Controlled Truck) ซึ่งทำการทดสอบสะพานทั้งแบบสถิต (Static Load Test) และแบบพลวัต (Dynamic Load Test) โดยได้รับความอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่กรมทางหลวงที่รับผิดชอบสะพาน และตำรวจทางหลวง ในการอำนวยความสะดวกด้านจราจรขณะทำการทดสอบ โดยรายละเอียดการทดสอบมีดังนี้

4.5.1. การทดสอบสะพานแบบสถิต (Static Load Test)

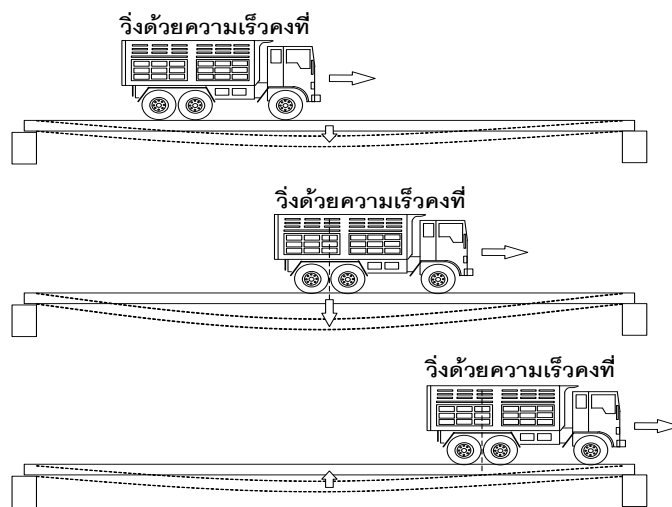
เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและตำแหน่งของรถบรรทุกที่กระทำต่อสะพานแบบสถิต ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาจอดนิ่งอยู่กับที่ โดยให้ระยะกึ่งกลางของชุดเพลาลงตรงกับตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการจะทดสอบ ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการหยุดรถจะบันทึกผลการตอบสนองของโครงสร้าง เช่น ค่าความเครียด (Strain) ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ตลอดจนจุดบันทึกอุณหภูมิ (Temperature) ระหว่างการทดสอบ โดยจะนำข้อมูลจากตรวจวัดที่ตำแหน่งต่างๆ นี้มาวิเคราะห์และแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับตำแหน่งของรถบรรทุก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวแนวดิ่งกับตำแหน่งของรถบรรทุก เป็นต้น นอกจากนี้ ผลการตอบสนองที่ได้จากตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำกับสะพาน สามารถนำไปใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพานให้มีพฤติกรรมเหมือนกับโครงสร้างจริงมากที่สุด



รูปที่ 4-31 ตัวอย่างการทดสอบสะพานแบบสถิต

4.5.2. การทดสอบสะพานแบบพลวัต (Dynamic Load Test)

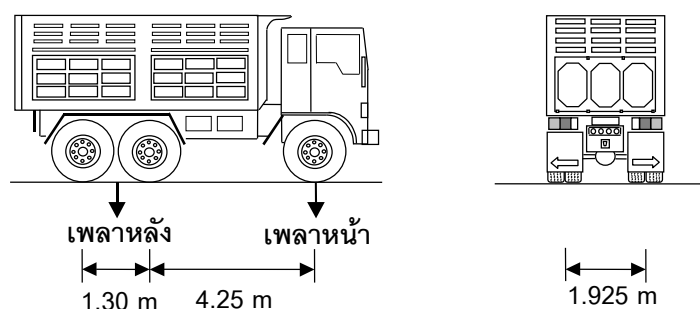
เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกที่แล่นบนสะพาน ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาวิ่งผ่านบนสะพานที่ความเร็วต่างๆ กัน ในแต่ละความเร็วที่วิ่งบนสะพาน จะทำการตรวจวัดและบันทึกค่าการเสียรูปของโครงสร้างสะพาน ซึ่งจากข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของสะพานด้านต่างๆ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) รูปร่างการสั่นไหวในโหมดต่างๆ (Mode Shape) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratios) และตัวคูณเพิ่มค่าแรงกระแทก (Impact Factor) รวมถึงตรวจวัดระดับการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานและผลกระทบที่มีต่อการใช้งาน (Serviceability) ของสะพาน



รูปที่ 4-32 ตัวอย่างการทดสอบสะพานแบบสถิต

4.5.3. ขนาดน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในการศึกษาครั้งนี้ ที่ปรึกษาจะใช้รถบรรทุกรวมน้ำหนักที่บรรทุกประมาณ 25 ตัน จำนวน 2 คัน ซึ่งจากผลงานการทดสอบที่ผ่านมา พบว่าน้ำหนักดังกล่าวสามารถให้ค่าผลตอบสนองที่เพียงพอต่อการศึกษาพฤติกรรมของสะพาน และลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ (Noise) ได้ โดยรูปแบบมาตรฐานของรถบรรทุกไทยมีลักษณะดังรูปที่ 4-33 ซึ่งมีความกว้างระหว่างล้อประมาณ 1.925 เมตร ระยะห่างระหว่างเพลาน้ำถึงกึ่งกลางเพลาลังประมาณ 4.90 เมตร มีการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่เพลาน้ำและสองเพลาลังประมาณ 20% 40% และ 40% ตามลำดับ



รูปที่ 4-33 แสดงลักษณะรถบรรทุกทดสอบ

4.5.4. อุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับทดสอบน้ำหนักบรรทุก

- Displacement Transducer เพื่อวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างสะพานภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกจร จำนวน 3 ตำแหน่ง บริเวณกึ่งกลางช่วงสะพานทดสอบ
- Accelerometer เพื่อวัดความเร่งจากการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกจร จำนวน 6 ตำแหน่ง ที่ระยะ 1/4 1/2 และ 3/4 ของช่วงสะพาน ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของสะพานทดสอบ

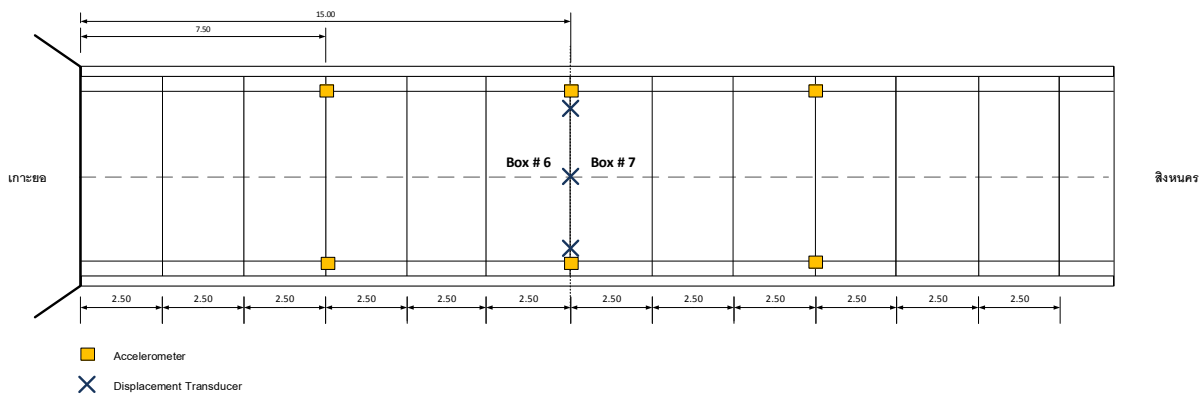


(ก) Displacement Transducer



(ข) Accelerometer

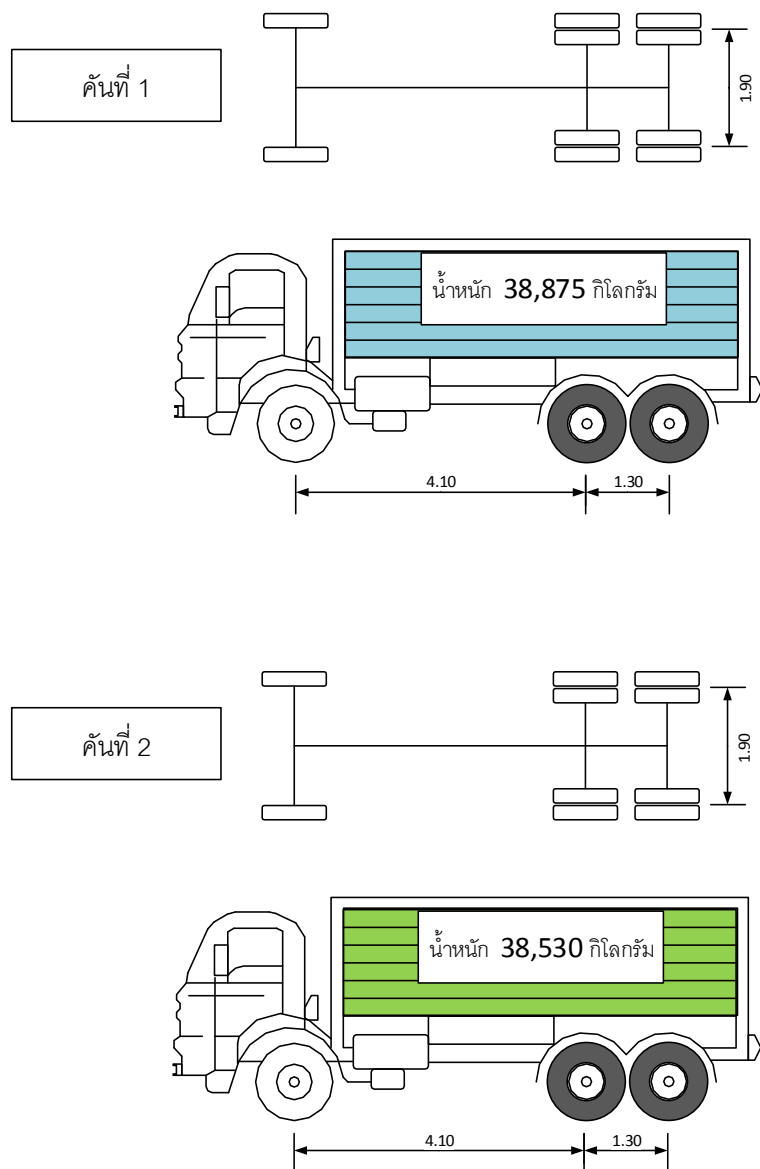
รูปที่ 4-34 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับทดสอบน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 4-35 ตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับทดสอบน้ำหนักบรรทุก

4.5.5. ผลการตรวจวัดสะพานภายใต้การควบคุมน้ำหนักบรรทุก สะพานฝั่งซ้ายทาง

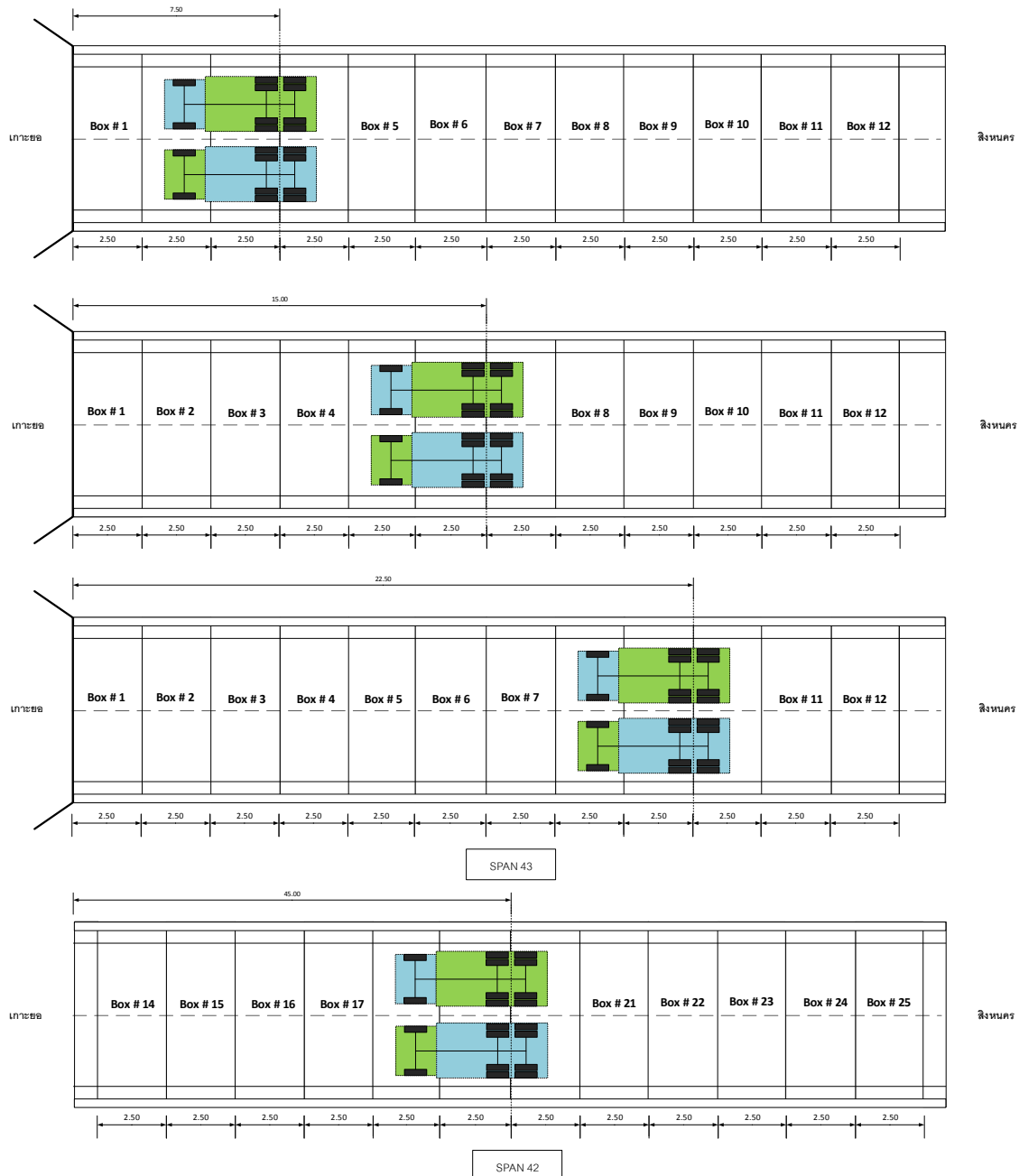
ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดสะพานฝั่งซ้ายทางภายใต้รถบรรทุกที่ทราบน้ำหนัก เมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2558 โดยการทดสอบใช้รถบรรทุก 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถสิบล้อ) จำนวน 2 คัน โดยมีระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 4-36



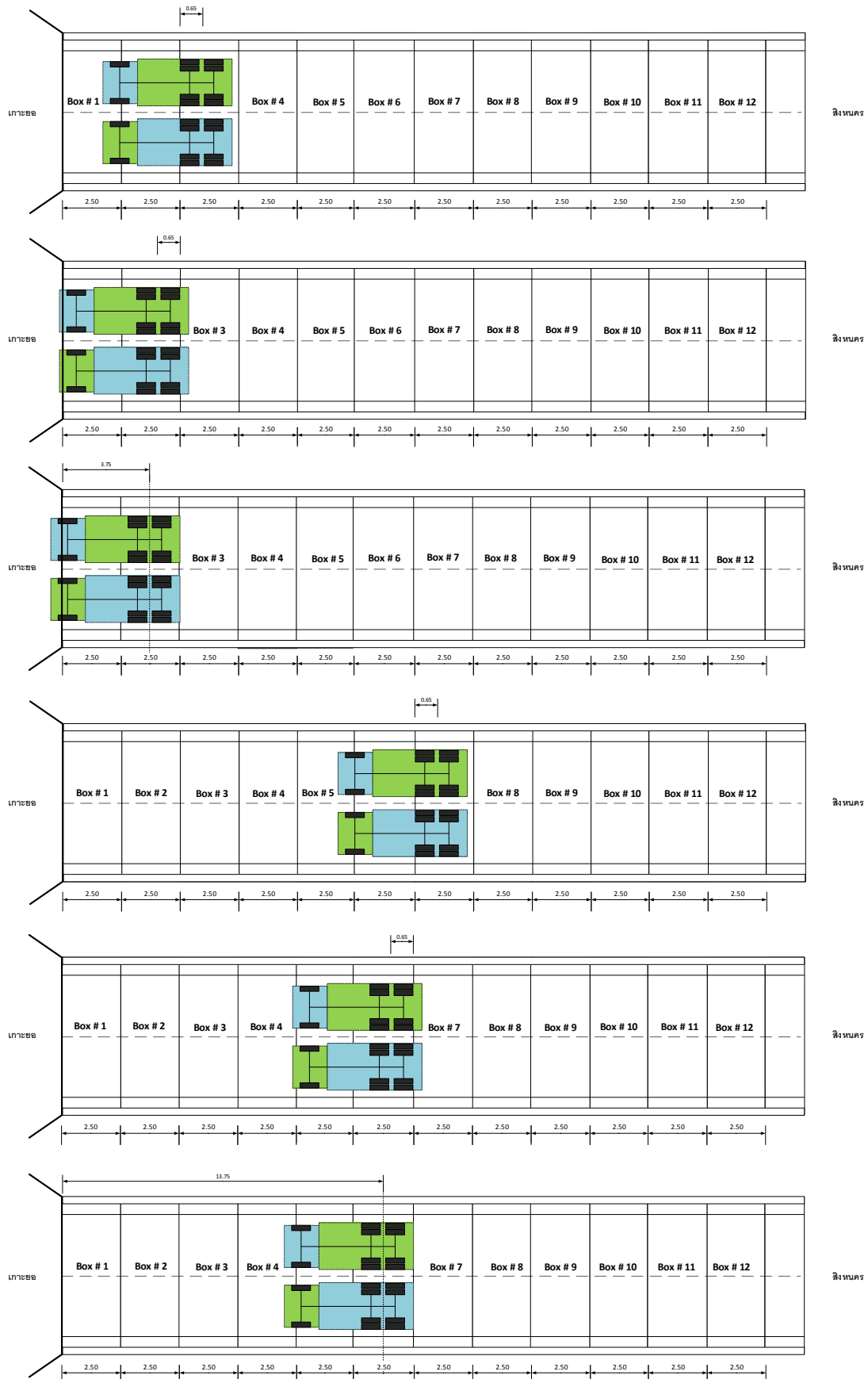
รูปที่ 4-36 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบสะพานฝั่งซ้ายทาง

4.5.5.1. การทดสอบแบบสถิต (Static Test) ของสะพานฝั่งซ้ายทาง

สำหรับการทดสอบแบบสถิต ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบจำนวน 10 รูปแบบ โดยทำการทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานโดยรวมจำนวน 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-37 และทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อคานสะพานจำนวน 6 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-38 และในระหว่างการทดสอบได้ทำการปิดการจราจรชั่วคราวเพื่อความปลอดภัยโดยได้รับความอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่กรมทางหลวง และตำรวจทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 4-39



รูปที่ 4-37 การทดสอบพฤติกรรมโดยรวมของสะพานแบบสถิต จำนวน 4 รูปแบบ



รูปที่ 4-38 การทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อคานสะพานแบบสลิต จำนวน 6 รูปแบบ



รูปที่ 4-39 การดำเนินงานตรวจวัดสะพานแบบสถิติ ของสะพานฝั่งซ้ายทาง เมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2558

ผลการทดสอบสะพานแบบสถิติ ของสะพานฝั่งซ้ายทาง

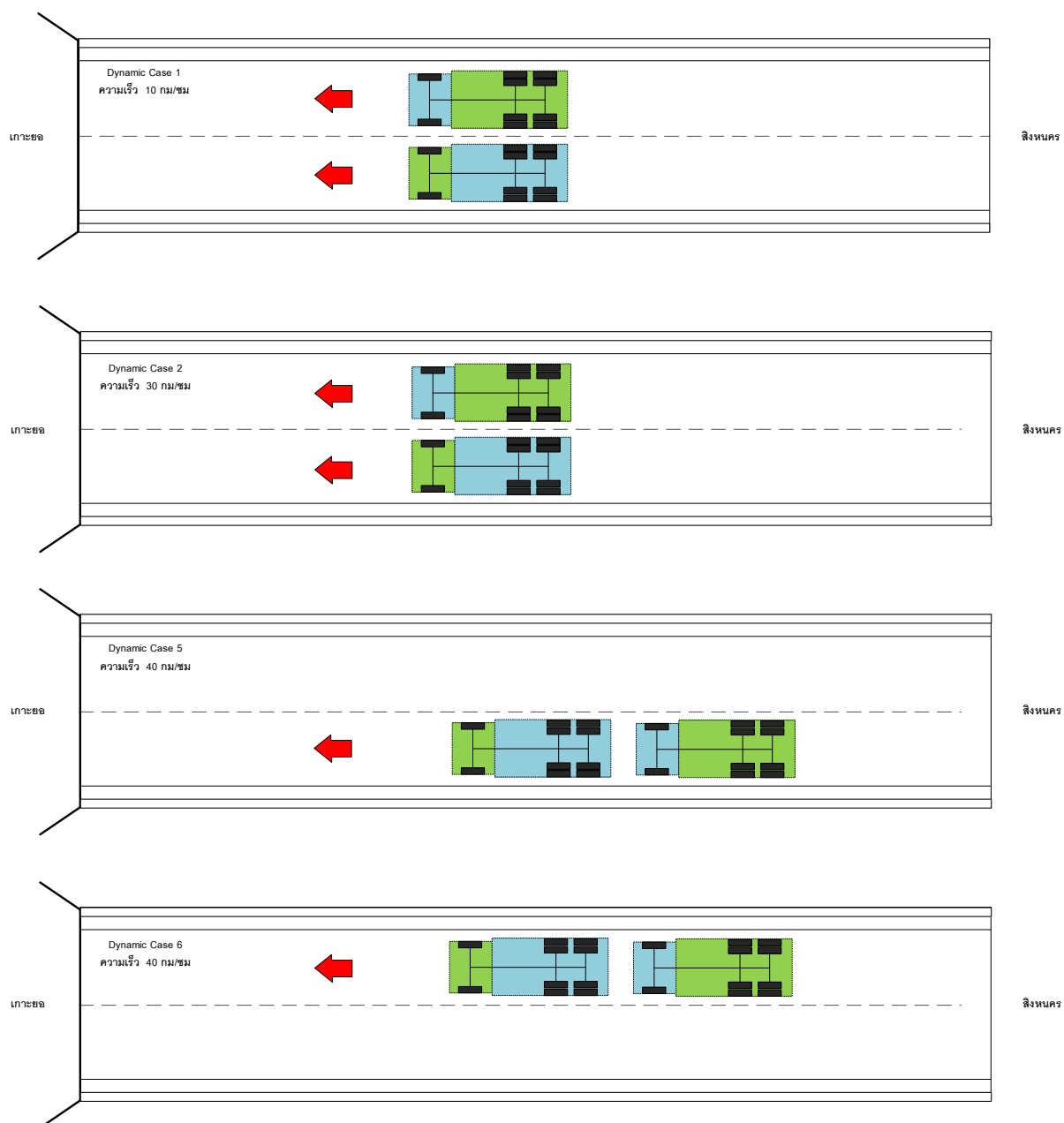
จากการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติ พบว่า เมื่อจอตระกบรรทุกที่ตำแหน่ง L/2 ของ span 42 ค่า Displacement ที่กึ่งกลางของ span 43 จะแอ่นตัวขึ้นสูงสุดเท่ากับ 1.406 มิลลิเมตร และเมื่อจอตระกบรรทุกที่ตำแหน่ง L/2 ของ span 43 ค่า Displacement ที่กึ่งกลางของ span 43 จะแอ่นตัวลงต่ำสุดเท่ากับ 3.058 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5-1 จะเห็นได้ว่า สะพานมีพฤติกรรมเป็นคานต่อเนื่องเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

ตารางที่ 4.5-1 ผลการทดสอบสะพานแบบสถิติ ของสะพานฝั่งซ้ายทาง

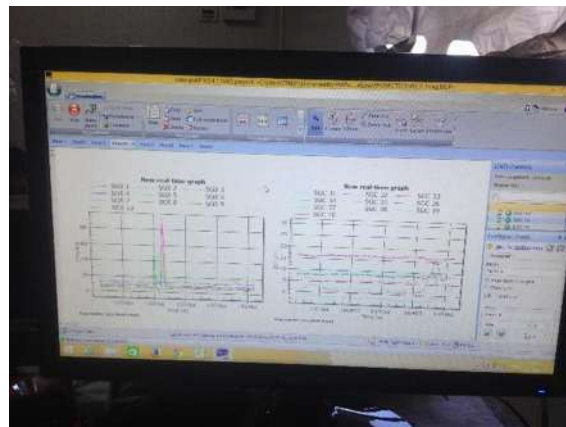
Structure	Global				Local					
Span	42	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Position	L/2	L/4	L/2	3L/4	before Box 6-7	After Box 6-7	Center Box 6	before Box 6-7	After Box 6-7	Center Box 6
DTL 01	1.203	-2.315	-3.058	-1.464	-2.927	-2.546	-2.514	-1.216	-0.645	-0.596
DTL 02	0.897	-1.393	-1.939	0.636	-1.550	-0.870	-0.619	0.903	0.902	0.903
DTL 03	1.406	-1.975	-2.780	-0.704	-2.550	-2.054	-1.940	-0.371	0.240	0.366
ACC L 01	0.000	0.001	0.002	-0.004	0.000	-0.005	0.000	0.001	0.005	-0.001
ACC L 02	-0.002	-0.003	-0.008	-0.002	-0.008	-0.005	-0.002	-0.006	-0.004	-0.005
ACC L 03	0.000	0.000	0.001	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	0.001	-0.001	0.002
ACC L 04	0.003	-0.008	-0.002	-0.004	-0.003	-0.008	-0.004	-0.003	-0.004	-0.001
ACC L 05	-0.019	-0.004	-0.011	-0.007	-0.012	-0.004	-0.009	-0.001	-0.009	0.001
ACC L 06	0.014	0.012	0.018	0.009	0.009	0.015	0.017	0.001	-0.037	0.033

4.5.5.2. การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) ของสะพานฝั่งซ้ายทาง

ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบสะพานแบบพลวัต โดยใช้รถบรรทุกทดสอบจำนวน 2 คัน วิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบ
จำนวน 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-40 เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4-40 รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต จำนวน 4 รูปแบบ



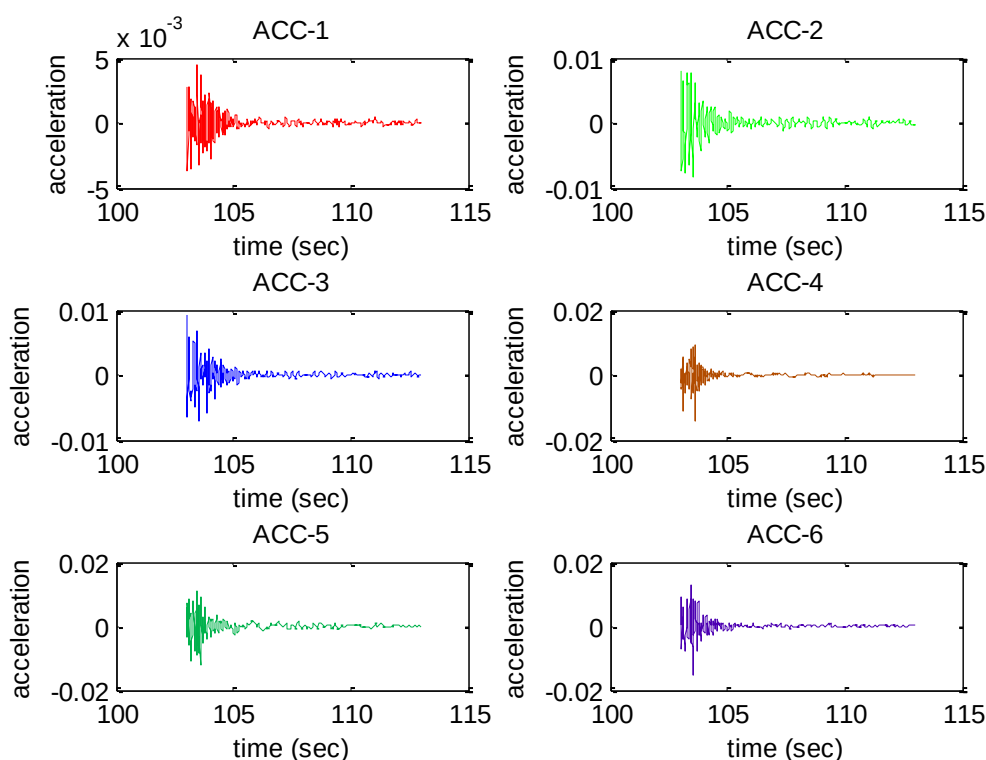
รูปที่ 4-41 การดำเนินงานตรวจวัดสะพานแบบพลวัต ของสะพานฝั่งซ้ายทาง เมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2558

ผลการทดสอบสะพานแบบพลวัต ของสะพานฝั่งซ้ายทาง

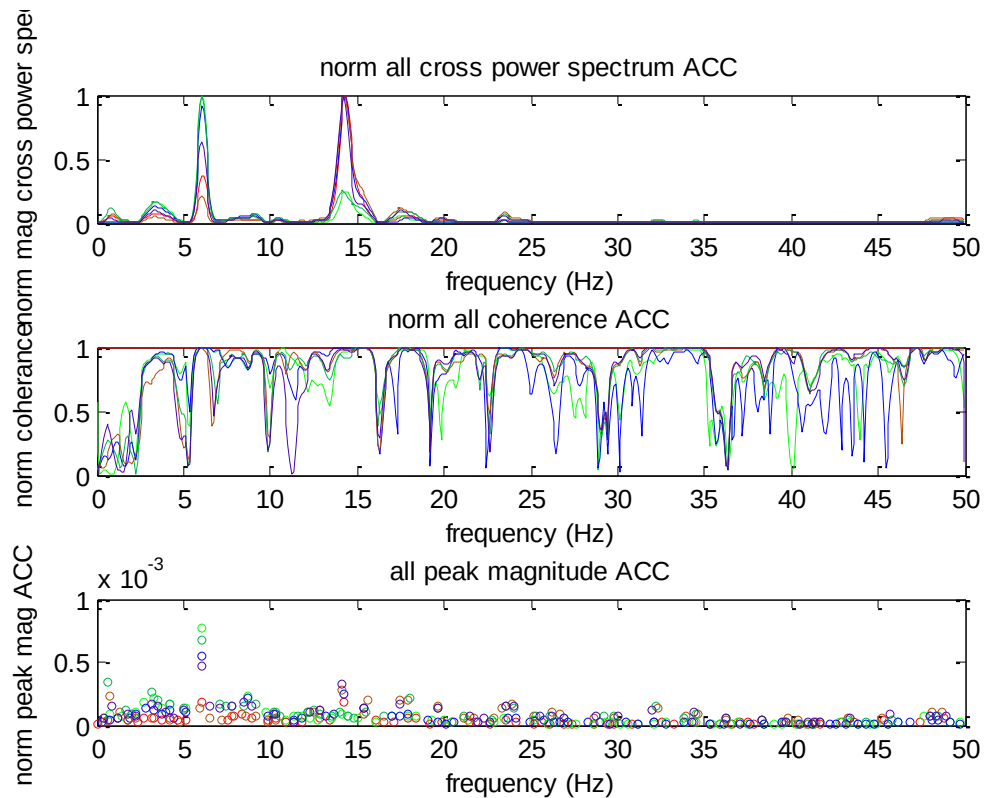
จากการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบพลวัต โดยผ่านกระบวนการ Fast Furier Transform พบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของสะพานจะอยู่ที่ประมาณ 6.055 เฮิรซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5-2 และเมื่อพิจารณาค่า magnitude ประกอบกับตำแหน่งของ Accelerometer จะพบว่า โครงสร้างสะพานมีรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ลักษณะ Vertical Translation ดังแสดงในรูปที่ 4-42 ถึงรูปที่ 4-44

ตารางที่ 4.5-2 ผลการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานฝั่งซ้ายทาง

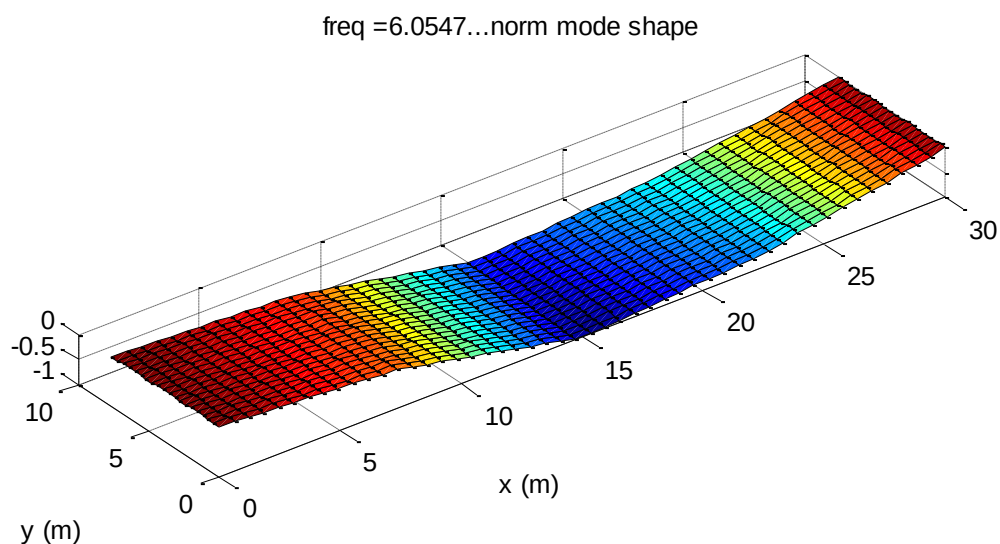
Pattern	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	6.055	6.006	6.055	6.055



รูปที่ 4-42 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวของสะพานฝั่งซ้ายทาง



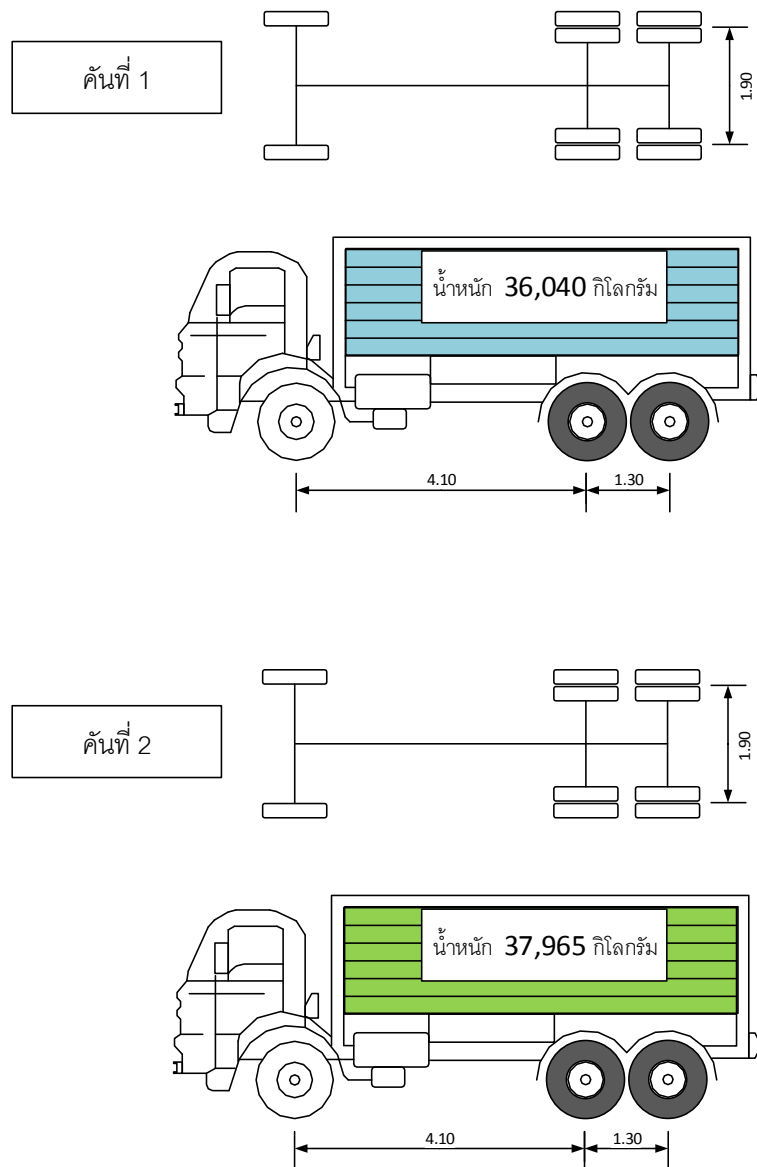
รูปที่ 4-43 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานฝั่งซ้ายทาง



รูปที่ 4-44 ตัวอย่างรูปแบบการสั่นไหวแบบ Vertical Translation ที่ความถี่ธรรมชาติ 6.055 Hz
ของสะพานฝั่งซ้ายทาง

4.5.6. ผลการตรวจวัดสะพานภายใต้การควบคุมน้ำหนักบรรทุกทุก สะพานฝั่งขวาทาง

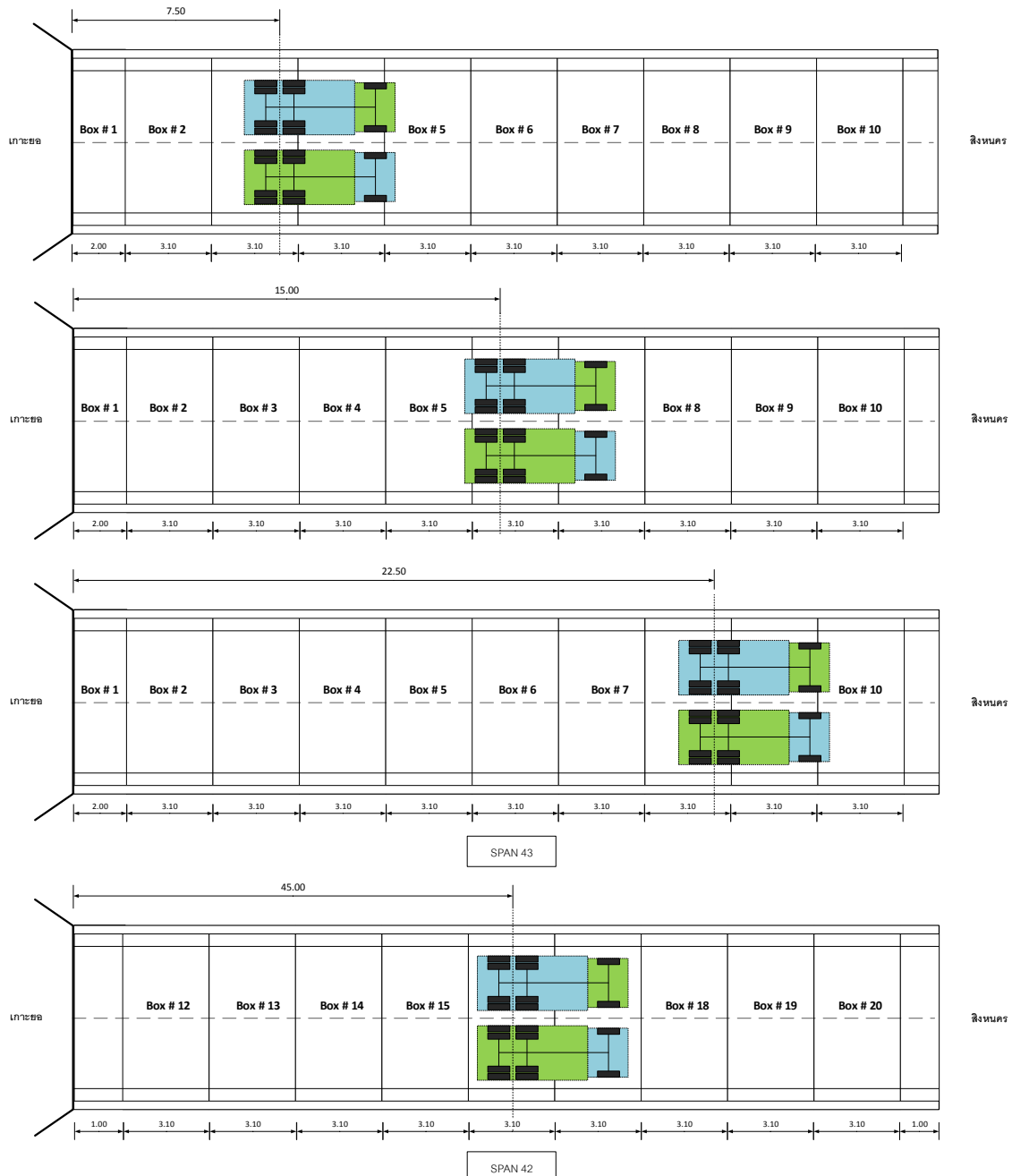
ที่ปรึกษาได้ทำการตรวจวัดสะพานฝั่งซ้ายทางภายใต้รถบรรทุกที่ทราบน้ำหนัก เมื่อวันที่ 30 เมษายน 2558 โดยการทดสอบใช้รถบรรทุก 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (รถสิบล้อ) จำนวน 2 คัน โดยมีระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 4-45



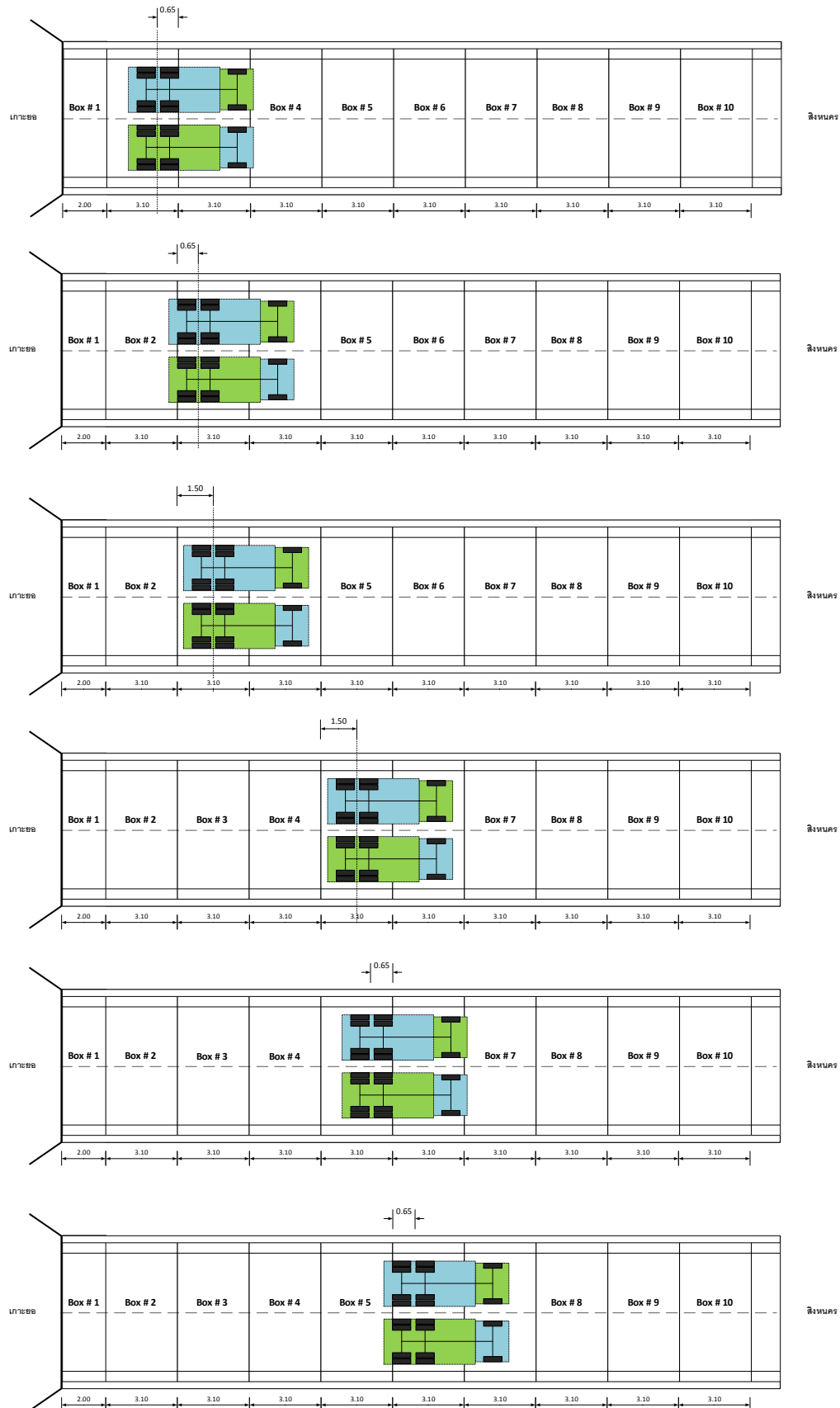
รูปที่ 4-45 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบสะพานฝั่งขวาทาง

4.5.6.1. การทดสอบแบบสถิต (Static Test) สะพานฝั่งขวาทาง

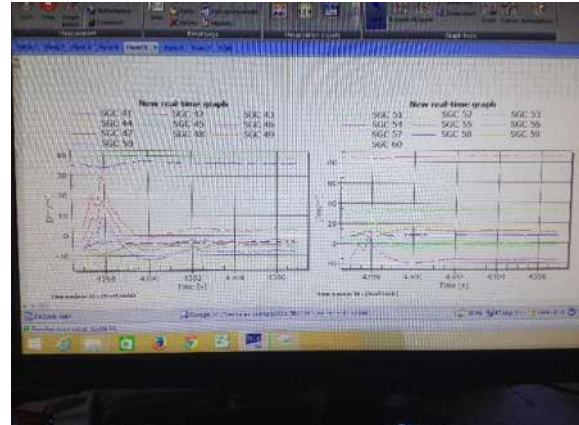
สำหรับการทดสอบแบบสถิต ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบจำนวน 10 รูปแบบ โดยทำการทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานโดยรวมจำนวน 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-46 และทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อคานสะพานจำนวน 6 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-47 และในระหว่างการทดสอบได้ทำการปิดการจราจรชั่วคราวเพื่อความปลอดภัยโดยได้รับความอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่กรมทางหลวง และตำรวจทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 4-48



รูปที่ 4-46 การทดสอบพฤติกรรมโดยรวมของสะพานแบบสถิต จำนวน 4 รูปแบบ



รูปที่ 4-47 การทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อคานสะพานแบบสลิต จำนวน 6 รูปแบบ



รูปที่ 4-48 การดำเนินงานตรวจวัดสะพานภายใต้การควบคุมสะพานฝั่งขวาทาง เมื่อวันที่ 30 เมษายน 2558

ผลการทดสอบสะพานแบบสถิติ ของสะพานฝั่งขวาทาง

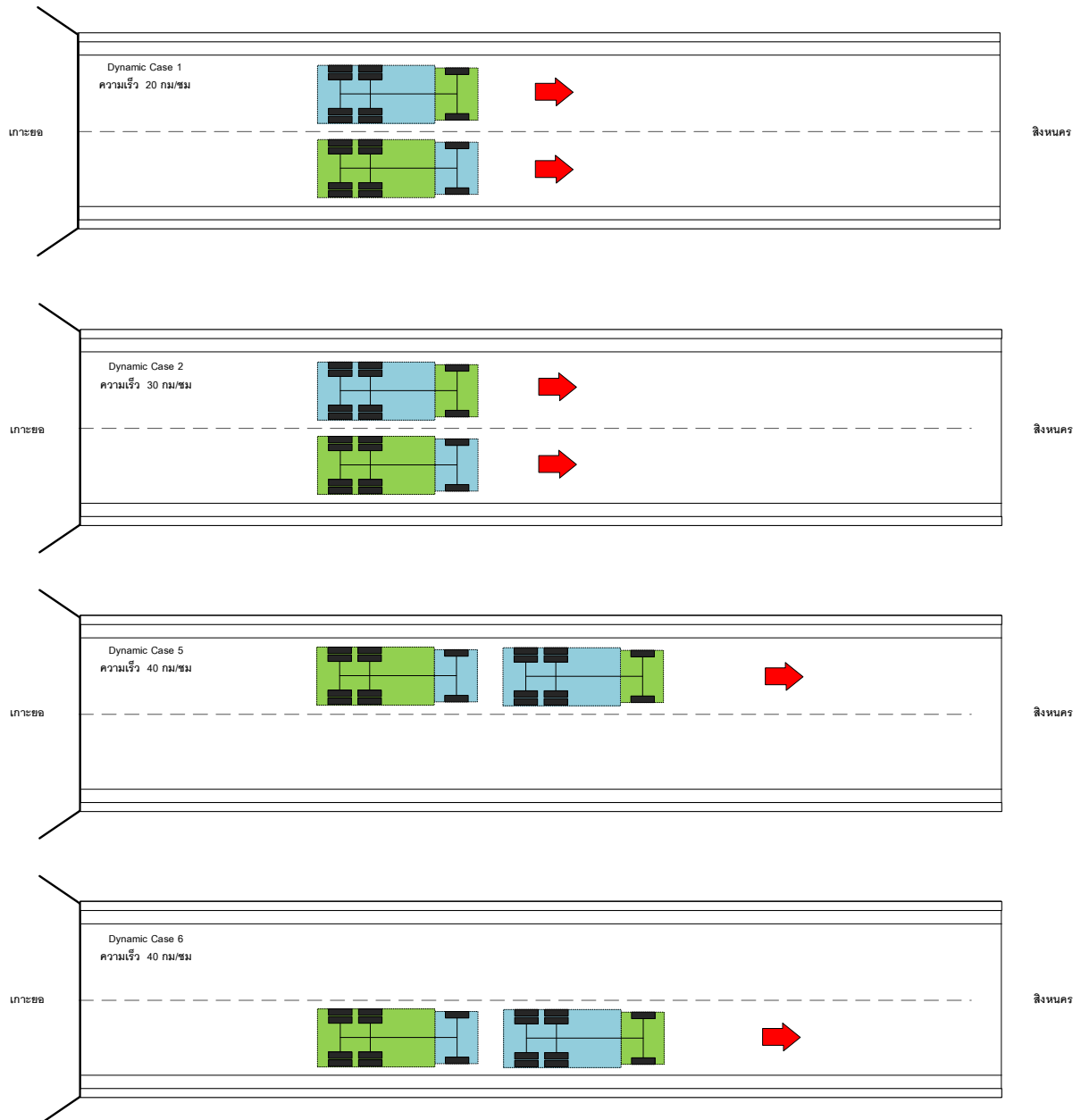
จากการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิติ พบว่า เมื่อจอดรถบรรทุกที่ตำแหน่ง L/2 ของ span 42 ค่า Displacement ที่กึ่งกลางของ span 43 จะแอ่นตัวขึ้นสูงสุดเท่ากับ 1.216 มิลลิเมตร และเมื่อจอดรถบรรทุกที่ตำแหน่ง L/2 ของ span 43 ค่า Displacement ที่กึ่งกลางของ span 43 จะแอ่นตัวลงต่ำสุดเท่ากับ 2.831 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5-3 จะเห็นได้ว่า สะพานมีพฤติกรรมเป็นคานต่อเนื่องเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

ตารางที่ 4.5-3 ผลการทดสอบสะพานแบบสถิติ ของสะพานฝั่งขวาทาง

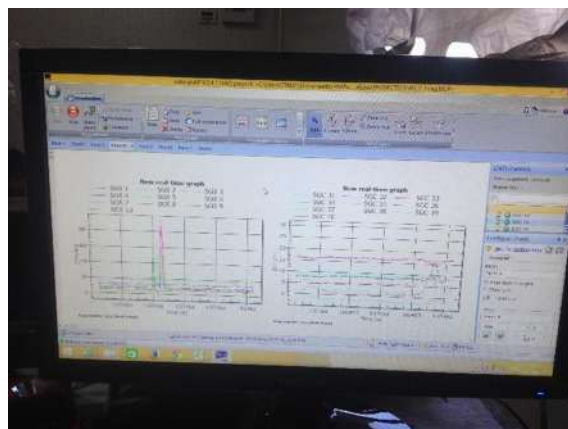
Structure	Global				Local					
Span	43	43	43	42	43	43	43	43	43	43
Position	L/4	L/2	3L/4	L/2	before Box 5-6	After Box 5-6	Center Box 5	before Box 2-3	After Box 2-3	Center Box 3
DTL 01	-2.320	-2.702	-1.645	1.159	-1.268	-1.749	-1.928	-2.703	-2.717	-2.700
DTL 02	-2.346	-2.762	-1.655	1.216	-1.206	-1.698	-1.873	-2.680	-2.691	-2.672
DTL 03	-2.344	-2.831	-1.763	1.095	-1.249	-1.719	-1.953	-2.841	-2.837	-2.854
ACC L 01	0.002	0.006	0.010	-0.005	0.019	0.009	0.005	0.009	0.003	0.006
ACC L 02	0.006	0.011	0.007	0.008	0.003	0.008	0.007	0.010	0.006	0.005
ACC L 03	-0.001	0.004	0.004	0.006	0.004	0.006	0.000	0.003	0.001	0.004
ACC L 04	-0.004	-0.006	-0.007	-0.007	-0.002	-0.009	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004
ACC L 05	-0.003	-0.003	-0.004	-0.003	-0.002	-0.003	0.000	-0.001	-0.005	-0.005
ACC L 06	-0.007	0.000	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.001	-0.005	0.002	-0.005

4.5.6.2. การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) สะพานฝั่งขวาทาง

ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบสะพานแบบพลวัต โดยใช้รถบรรทุกทดสอบจำนวน 2 คัน วิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบ
จำนวน 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-49 เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับใช้ในการปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4-49 รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต จำนวน 4 รูปแบบ



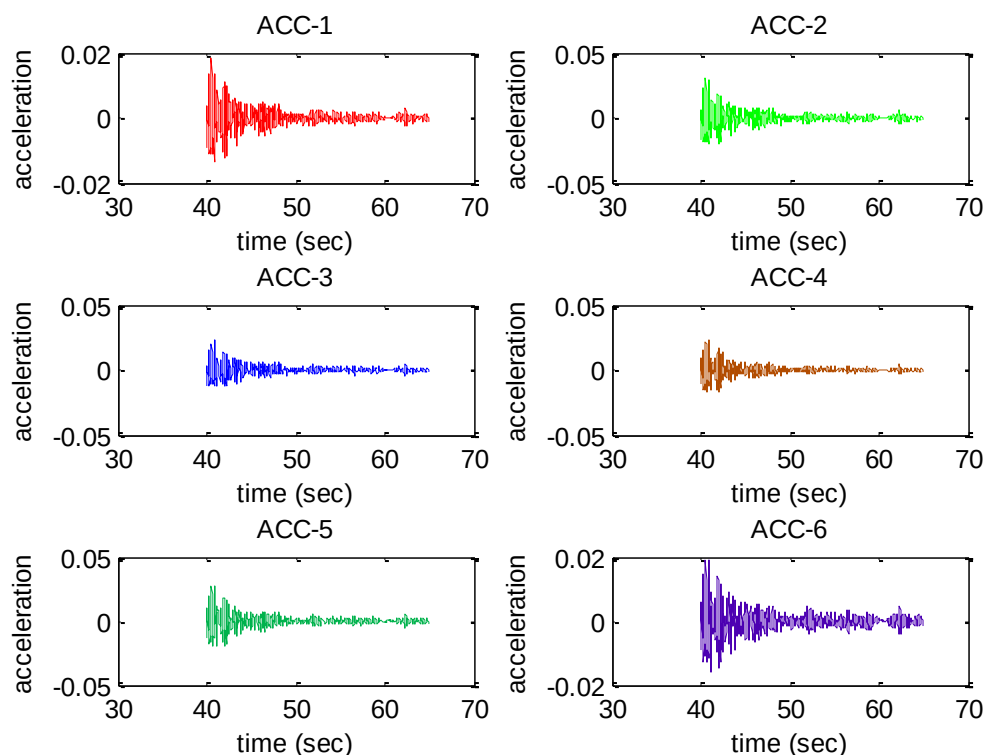
รูปที่ 4-50 การดำเนินงานตรวจวัดสะพานแบบพลวัต ของสะพานฝั่งขวาทาง เมื่อวันที่ 30 เมษายน 2558

ผลการทดสอบสะพานแบบพลวัต ของสะพานฝั่งขวาทาง

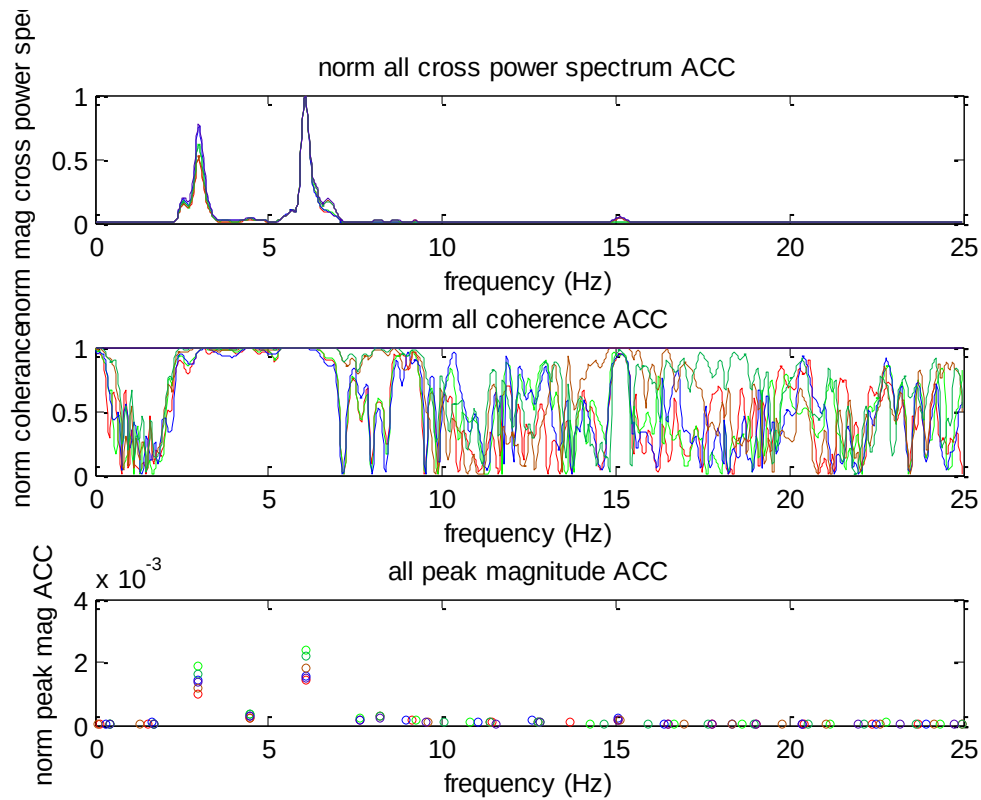
จากการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบพลวัต โดยผ่านกระบวนการ Fast Furier Transform พบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของสะพานจะอยู่ที่ประมาณ 6.000 เฮิรตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4 และเมื่อพิจารณาค่า magnitude ประกอบกับตำแหน่งของ Accerelometer จะพบว่า โครงสร้างสะพานมีรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ลักษณะ Vertical Translation ดังแสดงในรูปที่ 4-51 ถึงรูปที่ 4-53

ตารางที่ 4.5-4 ผลการหาค่าความถี่ธรรมชาติสะพานฝั่งขวาทาง

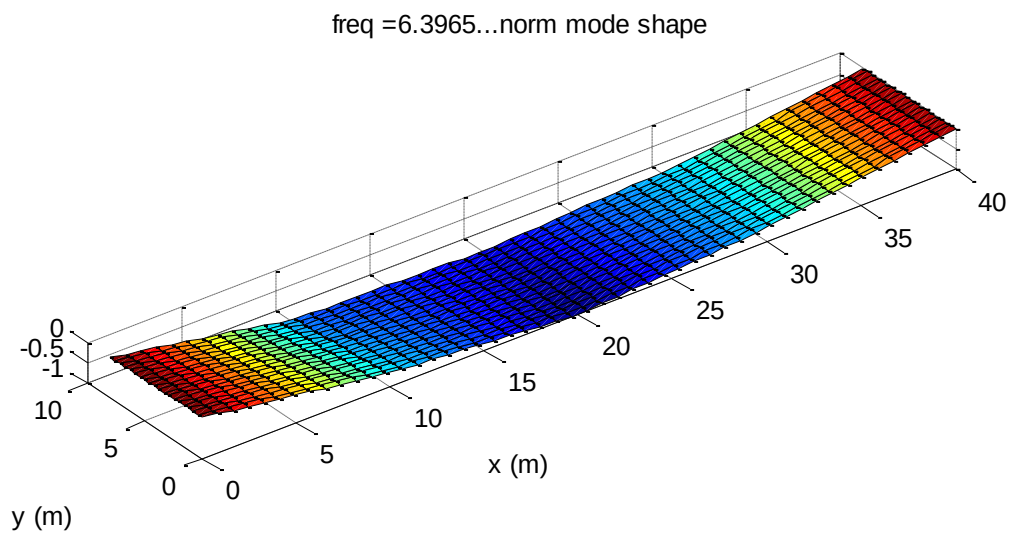
Pattern	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	6.396	6.030	6.055	5.908



รูปที่ 4-51 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวของสะพานฝั่งขวาทาง



รูปที่ 4-52 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานฝั่งขวาทาง



รูปที่ 4-53 ตัวอย่างรูปแบบการสั่นไหวแบบ Vertical Translation ที่ความถี่ธรรมชาติ 6.397 Hz
ของสะพานฝั่งขวาทาง

บทที่ 5 ข้อมูลสภาพอากาศ

จังหวัดสงขลาตั้งอยู่ในเขตอิทธิพลของลมมรสุมเมืองร้อน มีลมมรสุมพัดผ่านประจำปี คือ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงกลางเดือนมกราคม และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม จากอิทธิพลของลมมรสุมดังกล่าว ส่งผลให้จังหวัดสงขลา มีเพียง 2 ฤดูกาล คือ

- ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ว่างจากลมมรสุม เริ่มตั้งแต่หลังจากหมดมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือแล้ว อากาศจะเริ่มร้อนและอากาศจะมีอุณหภูมิสูงสุดในเดือนเมษายน แต่อากาศจะไม่ร้อนมากนักเนื่องจากตั้งอยู่ใกล้ทะเล
- ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนมกราคม จังหวัดสงขลา มีฝนตกทั้งในช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แต่ในช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะมีฝนตกชุกมากกว่า เนื่องจากพัดผ่านอ่าวไทย ส่วนมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะถูกเทือกเขาบรรทัดปิดกั้นทำให้ฝนตกน้อยลง

ทีมงานได้ศึกษาข้อมูลสภาพอากาศที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์และประเมินศักยภาพการให้บริการของสะพานติณสูลานนท์ และได้รวบรวมข้อมูล อุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม และค่ารังสีแสงอาทิตย์ ปีล่าสุด จากสถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ กรมอุตุนิยมวิทยา และจากเอกสารวิชาการอื่นๆ

5.1 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ

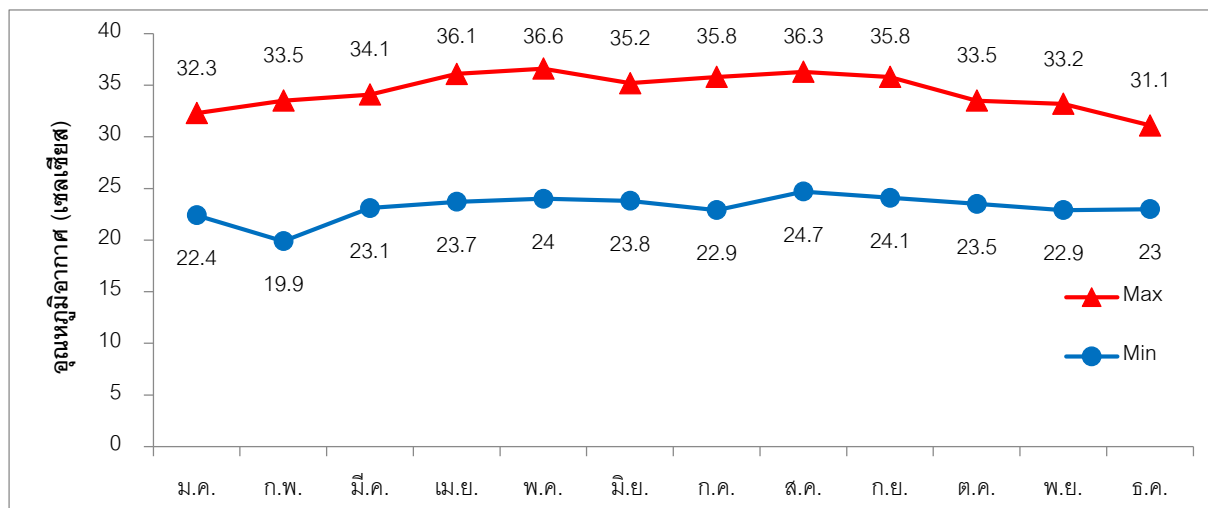
ที่ปรึกษาได้รวบรวมข้อมูลอุณหภูมิอากาศย้อนหลัง 1 ปี (พ.ศ.2556) จากสถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ โดยอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวันได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-1 และตารางที่ 5-2 ตามลำดับ สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์เป็นค่าสูงสุดและต่ำสุดรายเดือนได้ดังแสดงในรูปที่ 5-1 ความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละเดือนโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 5 – 10 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศสูงสุดในแต่ละวันของปี พ.ศ. 2556 ที่สถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ (เซเลเซียส)

วันที่	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1	29.2	30.6	30.7	33.2	33.7	31.3	34.2	32.8	31.4	33.2	31.8	28.4
2	30.3	30.6	31.0	33.1	34.2	33.1	32.8	27.8	31.6	33.5	31.0	29.8
3	29.8	30.6	31.0	32.6	33.8	34.1	33.6	32.4	32.0	33.1	31.0	29.1
4	30.2	30.8	30.6	33.4	32.9	34.8	30.5	31.9	33.2	32.7	31.6	27.8
5	30.3	30.9	31.3	35.3	33.1	32.7	31.7	31.5	34.1	30.9	31.8	27.2
6	30.7	30.6	30.9	36.1	30.1	32.6	32.1	32.5	33.2	31.5	30.2	30.3
7	31.4	31.2	31.1	34.8	31.8	31.7	31.0	33.0	33.2	31.6	31.4	30.1
8	30.6	33.5	31.8	34.3	32.4	35.0	30.6	32.5	33.2	32.2	33.2	29.1
9	29.1	31.7	30.6	33.8	32.3	35.1	32.1	33.6	31.7	33.4	31.2	30.2
10	31.0	31.1	30.6	30.3	32.6	33.8	31.9	32.8	31.3	32.1	31.3	30.0
11	31.6	31.0	30.7	33.0	32.3	33.3	31.1	35.7	31.8	33.3	32.1	31.0
12	30.5	29.1	30.5	31.8	33.1	33.2	33.2	34.0	31.7	32.4	31.8	30.5
13	30.3	30.7	30.7	30.1	34.8	29.0	34.6	32.6	32.3	33.0	31.3	30.1
14	30.3	31.6	31.2	29.9	34.2	32.0	32.7	32.3	33.2	33.2	32.7	30.5
15	30.3	31.4	31.4	31.9	35.2	32.2	30.8	33.4	34.4	33.4	31.7	30.2
16	30.5	31.1	31.8	31.7	34.1	31.9	30.0	34.0	32.3	33.4	30.7	30.3
17	32.3	31.6	31.4	27.5	33.1	34.4	34.8	32.9	34.0	31.7	30.1	31.1
18	29.8	30.7	31.5	32.6	33.7	33.1	34.4	35.3	33.2	31.3	31.7	27.8
19	29.5	31.2	30.8	33.1	32.6	34.5	32.4	35.8	33.2	30.3	30.4	30.5
20	30.1	30.6	30.8	33.2	33.0	33.9	34.1	35.1	34.2	30.1	27.1	30.1
21	32.3	31.2	31.8	33.6	34.9	35.2	34.0	36.3	35.8	31.3	24.8	28.7
22	31.0	31.0	32.2	32.2	36.6	34.8	35.0	35.9	35.5	30.0	27.7	29.8
23	30.4	30.6	31.9	32.5	34.2	35.2	33.6	35.9	34.8	30.2	31.1	29.3
24	30.3	28.0	32.3	32.6	32.5	33.2	33.1	35.4	35.5	30.1	27.3	30.5
25	30.2	29.0	34.1	33.0	34.5	32.5	33.5	35.6	35.0	31.3	30.1	29.9
26	30.0	29.7	33.6	33.0	35.4	35.2	35.4	34.6	35.6	29.4	31.2	29.1
27	31.6	30.1	32.8	34.0	34.6	33.4	34.8	34.8	34.1	28.8	30.3	29.7
28	30.0	30.6	32.6	33.0		34.8	35.3	32.2	33.1	31.1	27.5	29.3
29	30.4		32.9	33.1	34.2	34.1	33.0	33.1	33.0	30.8	29.6	29.2
30	30.6		32.4	32.9	33.4	35.1	35.8	34.3	32.4	31.0	30.7	28.5
31	30.2		32.7		33.5		35.3	32.0		31.1		30.0

ตารางที่ 5-2 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศต่ำสุดในแต่ละวันของปี พ.ศ. 2556 ที่สถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ (เซเลเซียส)

วันที่	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1	26.6	21.0	23.1	25.7	26.9	26.0	25.1	26.5	-	-	24.4	25.7
2	25.7	21.2	23.2	24.2	26.8	26.6	25.8	26.4	-	-	25.7	25.6
3	24.7	19.9	23.6	25.3	25.9	26.5	26.0	26.8	-	-	24.1	25.2
4	24.7	20.0	24.3	25.6	27.4	23.8	24.3	26.2	-	-	24.5	25.4
5	24.7	22.0	24.5	26.0	26.3	25.9	25.8	26.4	-	-	25.3	25.1
6	24.8	22.8	24.3	25.9	26.6	25.7	24.7	-	-	-	25.4	25.7
7	24.3	22.1	24.4	25.4	26.2	27.2	25.7	-	-	-	23.8	25.2
8	24.9	22.3	25.0	26.0	26.8	26.8	24.8	-	-	-	23.7	24.6
9	24.5	23.1	26.4	26.6	27.0	26.3	25.5	-	-	-	24.7	23.6
10	26.6	23.2	25.1	25.2	26.1	27.0	26.4	-	-	-	24.7	24.0
11	26.6	23.7	25.0	25.5	27.1	26.9	25.8	-	-	-	25.4	26.0
12	25.9	24.7	24.9	25.8	26.2	25.8	26.4	-	-	-	24.8	24.1
13	25.3	25.4	25.5	25.6	25.3	26.4	24.5	-	-	-	24.2	23.8
14	24.1	26.0	25.9	25.8	26.3	25.0	24.6	-	-	-	23.8	23.2
15	25.0	25.9	-	23.7	24.1	26.8	22.9	-	-	-	24.1	24.9
16	25.7	26.5	-	26.4	25.6	27.0	24.6	-	-	-	22.9	24.8
17	25.7	25.0	26.8	26.5	25.7	26.6	26.1	24.7	-	-	24.4	23.2
18	24.7	24.3	24.7	26.3	25.6	25.9	25.8	26.3	-	-	23.6	24.6
19	25.2	24.5	24.7	26.8	27.1	25.9	25.6	-	-	-	24.0	26.4
20	23.7	26.6	23.4	25.5	25.9	26.7	26.6	-	-	-	24.0	24.1
21	23.8	26.5	23.9	26.3	25.8	27.0	26.8	-	-	-	25.3	23.0
22	25.0	24.3	26.3	27.1	24.4	24.5	26.8	-	-	-	24.3	23.8
23	24.2	25.3	26.9	26.5	24.0	27.1	27.1	-	-	-	25.0	24.3
24	22.7	23.6	25.1	26.6	26.9	25.8	26.2	-	-	-	25.3	25.7
25	23.1	23.1	25.4	26.4	26.3	26.2	25.8	-	-	-	25.7	24.4
26	24.9	23.9	24.8	27.1	26.9	26.2	25.3	-	-	-	24.8	24.2
27	25.1	25.4	25.5	27.0	26.5	26.5	26.2	-	-	-	25.4	25.5
28	25.0	25.8	26.2	26.7	26.1	27.5	26.4	-	-	-	25.0	23.9
29	24.0		26.3	27.1	27.3	25.6	26.9	-	-	-	25.2	23.0
30	23.7		27.7	26.8	26.4	26.6	26.7	-	-	-	25.1	24.2
31	22.4		25.2		26.7		26.2	-		26.0		24.9



รูปที่ 5-1 ค่าอุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุดรายเดือนของปี พ.ศ. 2556 จากสถานีตรวจอากาศหาดใหญ่

5.2 ข้อมูลความเร็วลม

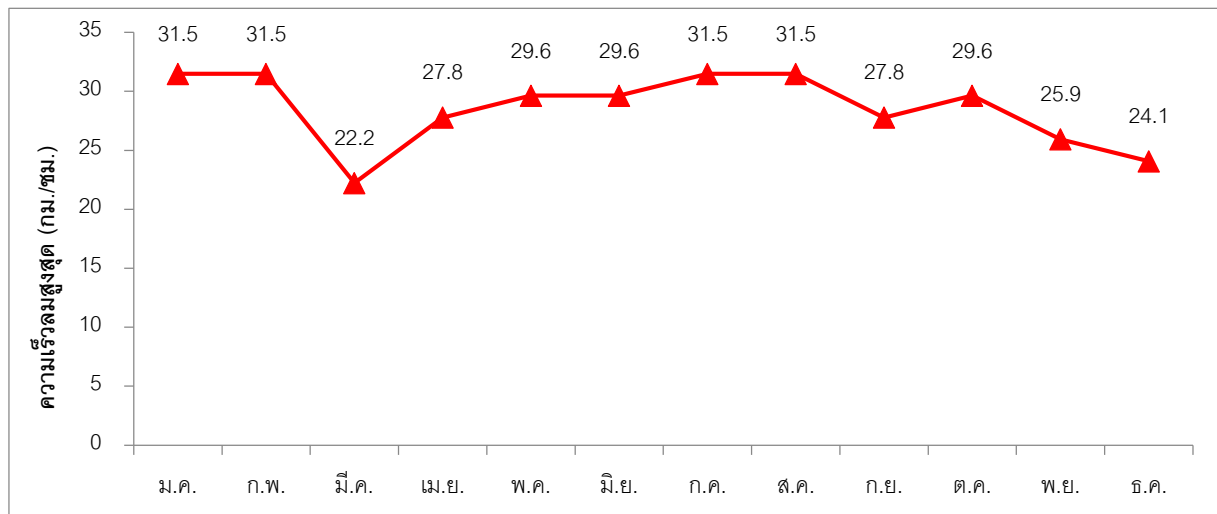
ที่ปรึกษาได้รวบรวมข้อมูลความเร็วลมย้อนหลัง 1 ปี (พ.ศ. 2556) จากสถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ โดยความเร็วลมสูงสุดในแต่ละวันได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-3 จะเห็นได้ว่า ความเร็วลมสูงสุดในแต่ละเดือนจะอยู่ที่ประมาณ 12 – 17 Knots หรือ 11.5 – 34.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งความเร็วลมที่รวบรวมได้นั้นยังอยู่เกณฑ์ปกติ ไม่มีการเกิดพายุหมุนเขตร้อน (ความเร็วลมน้อยกว่า 34 Knots) นอกจากนี้ยังได้แสดงกราฟความเร็วลมสูงสุดรายเดือนไว้ในรูปที่ 5-2

ตารางที่ 5-3 ข้อมูลความเร็วลมสูงสุดในแต่ละวันของปี พ.ศ. 2556 ที่สถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ (Knots)

วันที่	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1	13	12	10	8	16	6	13	14	8	11	9	13
2	11	12	10	8	9	9	13	12	8	8	9	9
3	10	14	12	8	9	10	13	9	8	13	10	11
4	10	13	10	8	10	10	14	13	8	14	8	9
5	7	13	12	10	9	14	9	8	10	14	11	13
6	6	9	10	9	6	9	7	13	10	15	7	10
7	7	9	11	9	7	6	10	13	10	12	8	10
8	8	8	11	8	8	10	9	17	10	16	14	10
9	10	12	8	8	8	10	10	10	10	9	8	10
10	8	14	8	9	11	14	10	9	11	8	7	8
11	8	12	9	7	7	10	9	15	14	9	8	10
12	11	12	8	15	7	11	8	9	9	10	8	10
13	8	12	8	13	10	9	14	12	12	11	8	9
14	10	13	9	8	8	13	10	7	11	11	8	8
15	11	11	12	9	11	13	8	14	9	10	7	7

ตารางที่ 5-3 ข้อมูลความเร็วลมสูงสุดในแต่ละวันของปี พ.ศ. 2556 ที่สถานีตรวจอากาศหาดใหญ่ (Knots) (ต่อ)

วันที่	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
16	11	13	12	8	10	16	15	8	7	13	7	8
17	12	11	9	11	10	14	10	8	11	8	9	9
18	10	12	9	9	10	14	14	9	12	8	12	10
19	10	17	8	7	10	13	9	11	12	8	14	12
20	14	9	9	7	12	11	10	14	12	8	13	9
21	10	11	8	8	11	13	9	14	13	9	10	10
22	12	11	10	8	10	10	11	14	12	8	13	9
23	10	9	8	9	9	9	17	12	13	10	9	8
24	10	12	5	8	15	14	8	12	13	7	6	10
25	10	14	9	8	11	7	10	9	5	9	8	8
26	17	13	9	8	8	10	10	13	12	8	8	8
27	10	9	8	10	9	10	7	9	12	8	6	12
28	12	10	8	8	5	12	11	11	14	8	12	10
29	11		8	9	8	9	12	11	15	8	13	10
30	12		9	8	13	8	13	12	11	7	12	11
31	14		8		9		14	8		11		11



รูปที่ 5-2 ค่าความเร็วลมสูงสุดรายเดือนของปี พ.ศ. 2556 จากสถานีตรวจอากาศหาดใหญ่

5.3 ค่ารังสีแสงอาทิตย์

ที่ปรึกษาได้รวบรวมข้อมูลค่ารังสีแสงอาทิตย์จากหน่วยงานต่างๆ เท่าที่ได้รับการบันทึกสถิติไว้ โดยมีข้อมูล ดังนี้

- งานวิจัยค่ารังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทยของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Exell and Saricali, 1975) สามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 5-4 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง) จะเห็นได้ว่าภาคใต้มีค่ารังสีแสงอาทิตย์สูงกว่าภาคอื่นๆ เล็กน้อย แต่เมื่อมองในภาพรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์ของประเทศไทยมิได้มีความแตกต่างกันมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง $324 - 474 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day})$
- จากข้อมูลดาวเทียม ของกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ค่ารังสีแสงอาทิตย์แสดงเป็นค่ารวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของจังหวัดและอำเภอ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536-2541 ดังแสดงในตารางที่ 5-5
- จากข้อมูลการตรวจวัด ของกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ค่ารังสีแสงอาทิตย์แสดงเป็นค่ารวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของจังหวัดและอำเภอ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2553 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-6 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง) และสามารถพล็อตกราฟ 5 ปีย้อนหลังได้ดังแสดงในรูปที่ 5-3

ตารางที่ 5-4 ข้อมูลค่ารังสีแสงอาทิตย์จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Exell and Saricali, 1975)

Mean daily totals of global solar radiation ($\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$) estimated from mean daily durations of sunshine

	Jan 14 to Feb 26	Feb 27 to Apr 12	Apr 13 to May 28	May 29 to Jul 15	Jul 16 to Aug 31	Sep 1 to Oct 15	Oct 16 to Nov 29	Nov 30 to Jan 13
Chiang Rai	394	430	470	406	385	399	369	324
Chiang Mai	400	460	481	412	376	402	406	372
Loei	383	418	443	399	381	355	354	344
Nakhon Phanom	369	396	426	370	360	374	395	366
Sakhon Nakhon	386	429	442	389	382	405	406	392
Phitsanulok	394	451	483	419	390	375	402	386
Khon Kaen	403	431	463	418	393	381	418	394
Roi Et	376	441	461	433	408	389	403	376
Nakhon Sawan	398	442	456	403	378	369	400	388
Ubon	404	450	447	423	393	379	407	393
Korat	397	435	445	421	402	379	401	388
Surin	405	454	439	415	407	397	409	396
Bangkok	401	465	425	397	370	356	391	398
Chantaburi	406	438	397	360	337	328	396	410
Hua Hin	409	448	415	370	345	349	391	398
Ban Don	417	457	402	384	399	362	341	350
Phuket Airport	440	474	388	378	373	354	380	398
Songkhla	427	462	417	399	406	380	350	354

ตารางที่ 5-5 ข้อมูลค่ารังสีแสงอาทิตย์จากดาวเทียม กระทรวงพลังงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536-2541

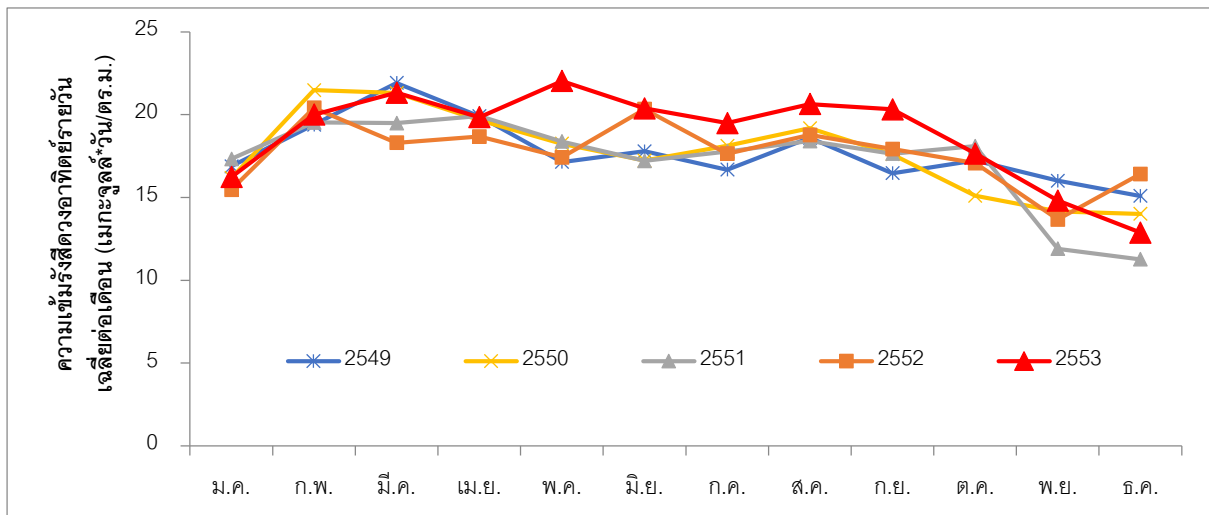
จังหวัด/ อำเภอ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	เฉลี่ย ทั้งปี
สงขลา	19.88	18.04	20.35	21.18	20.63	19.34	18.25	19.34	17.71	15.85	17.18	13.32	18.24
เมือง	19.88	21.15	21.73	21.18	20.63	20.01	17.88	20.01	16.74	15.85	14.86	13.32	18.24
จะนะ	19.81	21.18	23.08	22.69	21.83	19.68	19.67	19.68	18.56	17.34	14.36	13.73	19.25
หาดใหญ่	18.58	21.15	21.27	22.08	20.92	18.56	18.58	18.56	18.04	16.77	15.21	13.42	18.47
บางกล่ำ	18.41	20.58	22.19	22.04	20.86	18.93	18.34	18.93	18.35	16.71	14.22	13.22	18.51
นาหม่อม	19.84	20.36	22.12	21.51	20.45	19.27	18.65	19.27	18.30	16.87	14.39	14.64	18.81
นาทวี	19.45	21.01	22.60	22.84	21.57	18.63	19.48	18.63	18.29	17.23	14.60	13.68	19.14
ระโนด	19.89	20.98	21.59	21.10	20.52	18.37	18.63	18.37	18.22	16.45	15.95	14.83	18.72
กระแสสินธุ์	18.57	20.11	21.61	22.27	21.27	18.82	18.89	18.82	18.86	17.01	13.98	12.83	18.64
รัตภูมิ	17.88	19.58	21.57	22.07	20.99	19.26	19.00	19.26	18.09	16.92	13.99	12.73	18.35
ควนเนียง	19.28	19.99	21.79	21.48	20.34	18.45	18.94	18.45	17.81	15.99	14.18	12.95	18.11
สะบ้าย้อย	18.70	20.37	22.58	23.17	21.35	19.17	19.56	19.17	18.50	17.35	14.61	13.31	19.04
สะเดา	18.93	20.52	21.70	21.69	20.63	19.17	18.70	19.17	18.32	16.89	15.98	13.71	18.50
สติงพระ	19.96	20.97	21.53	21.60	20.29	18.74	18.42	18.74	18.07	16.58	16.32	15.22	18.72
เทพา	19.71	20.77	23.25	23.74	22.20	19.84	19.77	19.84	19.52	18.09	14.64	13.89	19.68
สิงหนคร	19.52	21.65	23.55	23.75	22.24	20.13	19.89	19.80	19.26	17.85	14.83	13.75	19.69
คลองหอย โข่ง	19.47	20.83	21.84	21.62	20.98	19.41	18.98	18.72	17.74	16.60	15.20	14.23	18.79

หมายเหตุ: หน่วยเป็นเมกะจูลต่อตารางเมตร รวบรวมวันเฉลี่ยต่อเดือน

ตารางที่ 5-6 ข้อมูลค่ารังสีแสงอาทิตย์จากการตรวจวัด กระทรวงพลังงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2553

ปี พ.ศ.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2545	14.05	21.61	22.37	20.70	19.32	18.64	17.71	16.22	17.02	17.33	14.07	15.30
2546	17.11	20.18	20.20	21.68	16.46	18.03	17.08	17.65	17.63	11.96		
2547	11.04		17.51			14.60	17.69					
2548			18.65	20.64	17.30		18.10		15.41	15.09	13.03	10.21
2549	16.88		21.91	19.90	17.14	17.79	16.68	18.60	16.46	17.24	16.01	15.09
2550	16.17	21.48	21.31	19.66	18.24	17.23	18.12	19.18	17.60	15.10	14.15	14.01
2551	17.32	19.53	19.49	19.91	18.38	17.21	17.78	18.41	17.64	18.10	11.90	11.26
2552	15.47	20.41	18.30	18.68	17.42	20.33	17.64	18.77		17.07	13.67	16.41
2553	16.23	20.00	21.32	19.85	22.03	20.38	19.49	20.64	20.32	17.65	14.81	12.88

หมายเหตุ: หน่วยเป็นเมกะจูลต่อตารางเมตร รวบรวมวันเฉลี่ยต่อเดือน



รูปที่ 5-3 ข้อมูลค่ารังสีแสงอาทิตย์จากการตรวจวัด กระทรวงพลังงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549-2553

บทที่ 6 การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนัก ของคานและรอยต่อระหว่างคาน

การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานดินสุลาลัยฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ภายใต้ผลของอุณหภูมิที่นำเสนอในรายงานนี้ได้พิจารณาตาม Design Guidelines For Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures ซึ่งเผยแพร่โดย AASHTO ในปี ค.ศ. 2000 ซึ่งได้นำเสนอขั้นตอนการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงที่เป็นโครงสร้างส่วนบนของสะพานภายใต้ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยจุดประสงค์ของการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างวันที่เกิดขึ้นในโครงสร้างส่วนบนของสะพานนั้นนอกจากใช้ในการออกแบบรอยต่อขยายตัวของสะพานแล้ว รอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ไม่เป็นเชิงเส้นยังอาจทำให้เกิดรอยร้าวที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างและลดอายุการใช้งานของสะพานได้อีกด้วย

ในการประเมินนี้จะนำเสนอขั้นตอนและผลการประเมินโครงสร้างสะพานดินตัวเก่าและตัวใหม่ภายใต้ผลของอุณหภูมิที่ได้ทำการตรวจวัดในภาคสนาม โดยอุณหภูมิที่ตรวจวัดนี้จะนำไปใช้ในการประมาณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแนวดิ่งของหน้าตัด (Nonlinear Temperature Gradient) และนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดต่างๆ ของสะพาน เพื่อนำไปใช้ประกอบการประเมินกับความเค้นที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้างต่อไป

เพื่อให้รายงานครอบคลุมครบถ้วนการนำเสนอจะแสดงรายละเอียดดังนี้

- 1) รายละเอียดของมาตรฐานการออกแบบและวิเคราะห์สะพานประเภท Segmental Box Girder ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD
- 2) ขั้นตอนการประเมินโครงสร้างสะพานประเภท Segmental Box Girder รวมกับผลของอุณหภูมิ
- 3) รายละเอียดของแบบก่อสร้างและรูปแบบของโครงสร้างสะพานที่จะดำเนินการวิเคราะห์
- 4) รายละเอียดของแบบจำลองของสะพานที่ได้ปรับแก้กับข้อมูลตรวจวัด
- 5) การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์อุณหภูมิของหน้าตัดสะพาน
- 6) การวิเคราะห์แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในหน้าตัดสะพานเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient
- 7) การวิเคราะห์แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในหน้าตัดสะพานเนื่องจาก Construction Stage Analysis
- 8) การรวมผลของขั้นตอนการก่อสร้างและผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง
- 9) การประเมินความแข็งแรงของสะพานโดยพิจารณาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น
- 10) การประเมินความแข็งแรงของรอยต่อ Shear Key ของสะพาน

6.1 รายละเอียดของมาตรฐานการออกแบบและวิเคราะห์สะพานประเภท Segmental Box Girder ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

ในการออกแบบโครงสร้างสะพานโดยยึดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications เป็นหลักยกเว้นในกรณีที่ต้องการขยายโครงสร้างเดิม โดยวิธีต่อเชื่อมโครงสร้าง ก็จะทำการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐานและขนาดน้ำหนักตามโครงสร้างเดิม ส่วนการออกแบบอาคารจะใช้มาตรฐานการออกแบบของประเทศสหรัฐอเมริกาและไทย โดยมาตรฐานการออกแบบที่ใช้สำหรับโครงการมีดังต่อไปนี้

- มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสะพาน

AASHTO 2010	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 5 th Edition
AASHTO 2003	Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, 2 nd Edition, with 2003 Interim Revisions
ASBI 2005	Construction Practices Handbook for Segmental Concrete Bridges
- มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก

AISC 316-89	Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design, 9 th Edition
AISC 2003	Manual of Steel Construction: Load and Resistant Factor Design, 3rd Edition
AISC 1985	Allowable Stressed Design Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts
AWS D1.1-08	Structural Welding Code – Steel
- มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต

ACI318M-08	Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Appendix C. adopted)
CEB-FIP 90	Model Code 1990, Design Code
ACI SP-66	ACI Detailing Manual 2004
PCI 2004	PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, 6th Edition
- มาตรฐานการออกแบบสำหรับประเทศไทย

วสท.	มาตรฐานต่างๆ ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
มยพ.1302-52	มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย)
มยพ.1311-50	มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย)

ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่องห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนด หรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหาย เกินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน

6.1.1 แรงกระทำต่อโครงสร้าง

โครงสร้างสะพานในโครงการต้องสามารถรับแรงต่างๆ ที่มากระทำตามข้อกำหนดที่ระบุใน AASHTO LRFD Bridge Specifications โดยมีแรงกระทำต่างๆ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ประกอบด้วย น้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง รวมถึงน้ำหนักผิวจราจร ทางเท้า ท่อ หรือท่อร้อยสาย และสาธารณูปโภคอื่นๆ ที่เกาะติดกับโครงสร้างนั้น น้ำหนักต่อหน่วยกำหนดไว้ดังนี้

ตารางที่ 6-1 น้ำหนักต่อหน่วยของน้ำหนักบรรทุกคงที่

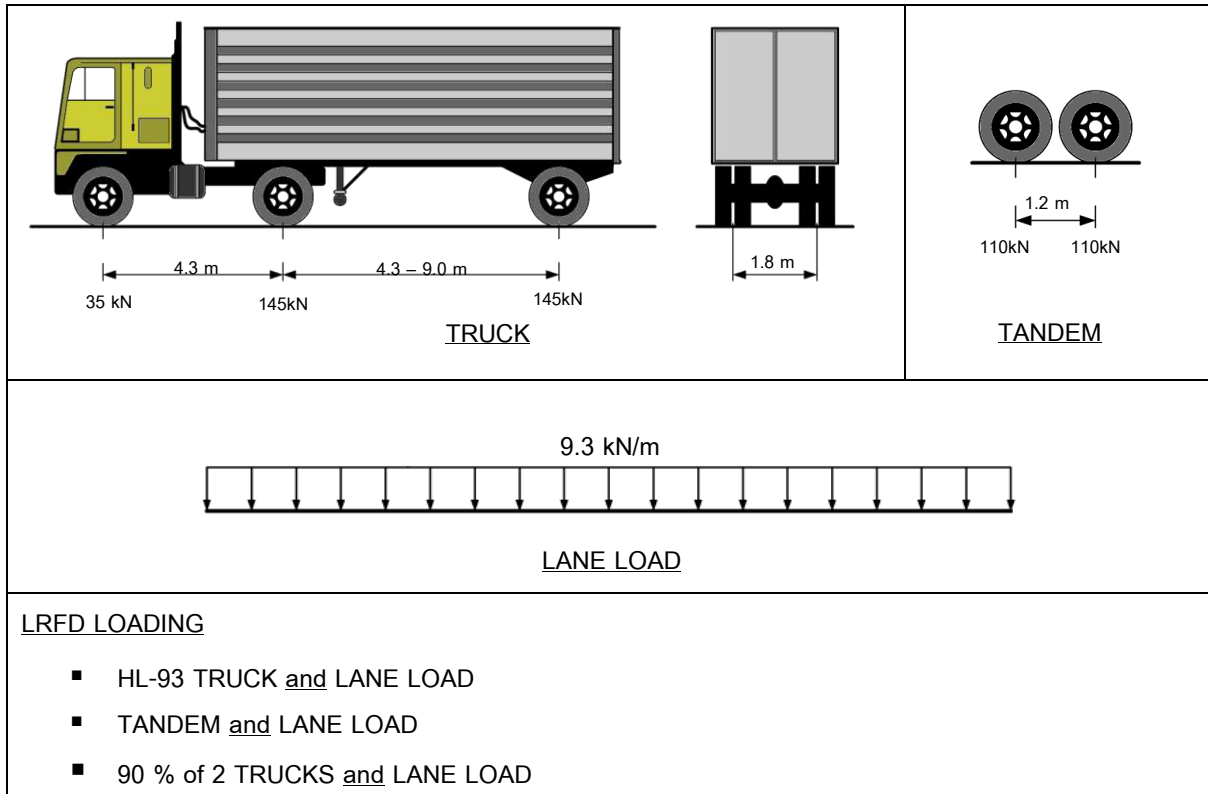
ชนิดน้ำหนัก	น้ำหนักต่อหน่วย (ตัน/ลบ.ม)
คอนกรีตเสริมเหล็ก	2.40
เหล็ก ยกเว้นเหล็กหล่อ	7.85
เหล็กหล่อ	7.20
ดิน ทราย และกรวด บดอัด	2.00
ดิน ทราย และกรวด หลวม	1.60
ผิวแอสฟัลติกคอนกรีตและที่คล้ายคลึงกัน	2.25
ไม้เนื้อแข็ง	0.96
น้ำ	1.00

2) น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

น้ำหนักบรรทุกจรได้แก่ น้ำหนักของยานพาหนะที่สัญจรบนสะพานหรือทางลอด ประกอบไปด้วยรถบรรทุก รถโดยสาร รถยนต์ส่วนบุคคล น้ำหนักสมทบและน้ำหนักอื่นๆ

- น้ำหนักสำหรับรถบรรทุกต่อช่องจราจรใช้น้ำหนัก HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD แสดงในรูปที่ 6-1 ซึ่งเป็นการรวมน้ำหนักรถบรรทุกขนาด 325 kN และ Lane Load 9.3 kN/m เข้าด้วยกันนอกจากนั้นในกรณีช่วงสะพานสั้นๆ จะต้องพิจารณาผลเนื่องจากน้ำหนัก Tandem ซึ่งประกอบด้วยเพลาคู่ขนาด 110 kN ระยะห่าง 1.2 เมตรน้ำหนักรถบรรทุกและน้ำหนัก Tandem มีระยะห่างของล้อในแนวขวางเท่ากับ 1.8 เมตร ส่วน Lane Load นั้นมีความกว้างเท่ากับ 3.0 เมตร
- น้ำหนักจรสำหรับออกแบบทางเดินเท้าบนสะพานหรือสะพานลอยคนเดินข้ามใช้น้ำหนัก 0.5 ตัน/ตรม. ตามกฎกระทรวงของประเทศไทย แทนน้ำหนัก 0.415 ตัน/ตร.ม. ซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน AASHTO LRFD

- น้ำหนักสมทบ (Surcharge Load) ที่กระทำต่อฐานรากเนื่องจากรถบรรทุกหรือรถไฟ จะต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยแรงกระทำบนฐานรากเท่ากับ 1.0 และ 5.0 ตัน/ตร.ม. สำหรับรถบรรทุกและรถไฟตามลำดับ



รูปที่ 6-1 น้ำหนักบรรทุก HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

3) การเพิ่มและลดน้ำหนักบรรทุกจร (Multiple Presence of Live Load)

จากการวิ่งของรถยนต์โอกาสที่รถยนต์จะเต็มทุกช่องจราจร และรับน้ำหนักบรรทุกเต็มที่พร้อมๆ กันนั้นมีน้อยมาก จึงจะต้องมีค่าตัวลดน้ำหนักบรรทุก

ตารางที่ 6-2 การเพิ่มและลดน้ำหนักบรรทุกจร

จำนวนช่องจราจร	การเพิ่มลดค่าน้ำหนักบรรทุกจร (ร้อยละ)
หนึ่งช่องจราจร	120
สองช่องจราจร	100
สามช่องจราจร	85
มากกว่าสามช่องจราจร	65

4) แรงกระแทก (Dynamic Load Allowance)

แรงเค้นอันเกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรคิดเฉพาะผลของรถบรรทุก Truck Load และ Fatigue Truck ไม่รวม Lane Load และน้ำหนักจรจากคนเดิน จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระแทก การสั่นสะเทือน และการเคลื่อนที่ตามโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จาก $1 + IM/100$ สำหรับโครงสร้างเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 6-3 ค่าคูณเพิ่มแรงกระแทก

Components	Impact Factor (IM)
Deck Joint (All Limit State)	75 %
All Other Component	
- Fatigue	15 %
- All Other Cases	33 %

โครงสร้างฐานรากที่อยู่ใต้ดินและกำแพงกันดินที่ไม่ได้รับน้ำหนัก โดยตรงจากพื้นสะพาน ไม่ต้องคิดเนื่องจากแรงกระแทก สำหรับส่วนของโครงสร้างใต้ดิน เช่น Box Culvert ตาม AASHTO LRFD นั้นจะต้องคิดแรงกระแทกเช่นเดียวกันโดยมีปัจจัยสำคัญในการใช้คำนวณได้แก่ความลึกส่วนโครงสร้างดังกล่าวสามารถคำนวณได้จาก

$$IM = 33 (1.0 - 4.1 \times 10^{-4} D_E) \geq 0\%$$

โดย D_E คือ ความสูงของดินถมที่อยู่เหนือโครงสร้างเป็นมิลลิเมตร

5) แรงเนื่องจากการเบรค (Breaking Force)

การออกแบบจะพิจารณาให้ โครงสร้างสามารถรับแรงตามทิศทางการเคลื่อนตัวของน้ำหนักบรรทุกจรโดยไม่รวมแรงกระแทก กระทำที่ความสูง 1.80 เมตร จากพื้นผิวจราจร และให้แรงดังกล่าวสามารถกระทำผ่านจากโครงสร้างส่วนบนไปยังโครงสร้างส่วนล่างคำนวณตามจำนวนช่องจราจรโดยคิดผลของการเพิ่มและลดของน้ำหนักบรรทุกจรด้วย สามารถคำนวณได้จาก

- ร้อยละ 25 ของน้ำหนักเฉพาะรถบรรทุกหรือ Tandem
- ร้อยละ 5 ของน้ำหนักรถบรรทุกและ Lane Load
- ร้อยละ 5 ของ Tandem และ Lane Load

6) แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

โครงสร้างที่อยู่ในทางโค้งจะมีแรงหนีศูนย์กลางเกิดขึ้น โดยจะพิจารณาในอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกจรไม่ต้องพิจารณาแรงกระแทก กระทำในทุกช่องจราจร โดยมีปัจจัยสำคัญในการใช้คำนวณขนาดแรง ได้แก่ความเร็วรถและรัศมีของความโค้งตามแนวราบถึงศูนย์กลางตัวสะพาน กับน้ำหนักบรรทุกจรของแต่ละช่องจราจรรวมกัน

และมุ่งหน้าไปในทิศทางเดียวกัน ระยะศูนย์กลางของแรงที่กระทำให้อยู่ที่ระยะ 1.80 เมตร สูงจากระดับ ผิวจราจร โดยความเร็วของรถที่ใช้จะสอดคล้องกับการออกแบบทางด้านเรขาคณิต (Geometric Design) แรงแหน้ศูนย์กลาง ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD จะคำนวณจากสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุก โดยสัดส่วนของแรงแหน้ศูนย์กลาง สามารถหาได้จากสมการ

$$C = f v^2 / (g R)$$

โดย v = ความเร็วของรถตามที่ยกแบบเป็นเมตรต่อวินาที

F = 4/3 สำหรับการรวมแรงตามกลุ่มต่างๆ ยกเว้นการรวมแรงตามกลุ่ม Fatigue ซึ่งจะใช้ 1.0

g = ความเร่งของโลก = 9.807 m/sec²

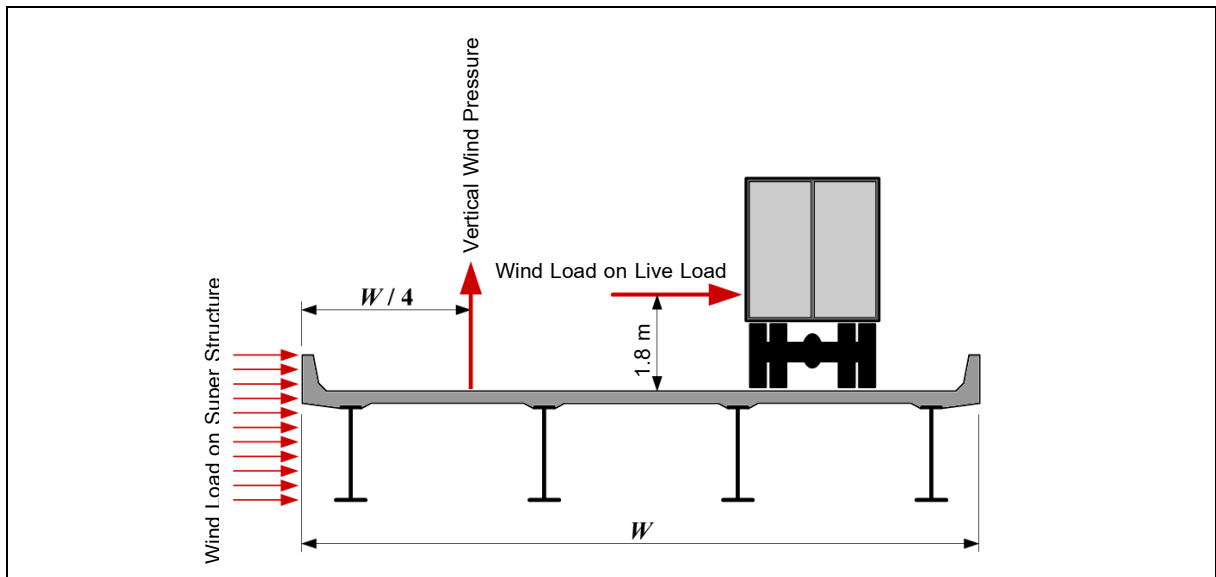
R = รัศมีของโค้งเป็นเมตร

7) แรงแลมที่กระทำบนโครงสร้าง (Wind Load on Structure)

แรงแลมที่กระทำต่อโครงสร้างจะนำมาพิจารณาในการออกแบบ โดยใช้ความเร็วลมที่อยู่ 160 กม./ชั่วโมง สำหรับโครงสร้างสะพานที่มีความสูงน้อยกว่า 10 เมตร (กรณีความสูงมากกว่า 10 เมตร ให้ใช้ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD) ซึ่งแรงแลมที่กระทำต่อโครงสร้างจะกระจายบนพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางลมดังแสดงในรูปที่ 6-2 แรงแลมที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนบน (Wind Load on Superstructure) ใช้ค่าตามตารางที่แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6-4 แรงแลมที่กระทำบนโครงสร้าง

Skew Angle of Wind (องศา)	Transverse Load (กก./ตร.ม.)	Longitudinal Load (กก./ตร.ม.)
0	240	0
15	210	30
30	200	60
45	160	80
60	80	90



รูปที่ 6-2 แรงลมต่างๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างและยานพาหนะ

- สำหรับโครงสร้างส่วนล่าง (Wind Load on Substructure) นั้นให้ใช้แรงลมขนาด 190 กก./ตร.ม. กระทำลงบนพื้นที่ตั้งฉากพร้อมกับแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างส่วนบน
- ในกรณีแรงลมตั้งฉาก (Vertical Wind Pressure) ให้ใช้ขนาดแรงลม 96 กก./ตร.ม. คูณความกว้างของทั้งหมดของสะพานเป็นแรงลัพธ์ในทิศทางยกขึ้นกระทำที่ตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ ของความกว้างสะพาน
- อนึ่งแรงลมที่กล่าวมานั้นมีค่ามากกว่าแรงลมตามกฎกระทรวง จึงสามารถนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างสะพานได้อย่างไม่มีปัญหา

8) แรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะ (Wind Load on Live Load)

แรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะนั้นสามารถถ่ายเทลงบนโครงสร้างสะพานได้ โดยใช้แรงลม 146 กก./เมตร กระทำตั้งฉากกับทิศทางของยานพาหนะที่ระยะ 1.80 เมตร สูงจากผิวจราจร ดังแสดงในรูปที่ 6-2 แรงลมดังกล่าวสามารถใช้ค่าตามตารางที่แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6-5 แรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะ

Skew Angle of Wind (องศา)	Transverse Load (กก./เมตร)	Longitudinal Load (กก./เมตร)
0	146	0
15	128	18
30	120	35
45	96	47
60	50	55

9) แรงเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Force)

แรงที่เกิดจากการขยายตัวและหดตัวของโครงสร้างสะพาน อันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแบบสม่ำเสมอสำหรับโครงสร้างสะพานคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

- อุณหภูมิ สูงขึ้น 15 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ ลดลง 20 องศาเซลเซียส
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวและหดตัว 0.0000108 ต่อองศาเซลเซียส

นอกจากนั้นสำหรับสะพานคานกล่อง (Box Girder) จะต้องออกแบบให้รับแรงที่เกิดจากความผันแปรของอุณหภูมิที่แตกต่างของผิวบน ภายใน และ ผิวล่างของโครงสร้าง

10) แรงเนื่องจากกระแสน้ำ (Stream Current Force)

แรงเนื่องจากกระแสน้ำกระทำต่อฐานรากที่ตั้งขวางทางไหลของน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยทิศทาง ความเร็วของกระแสน้ำและรูปร่างของตอม่อ สำหรับโครงการนี้จะใช้ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย 3 เมตรวินาทีโดยคำนวณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ด้วยสมการต่อไปนี้

$$p = 5.14 \times 10^{-4} C_D V^2 \quad (\text{For Longitudinal})$$

$$p = 5.14 \times 10^{-4} C_L V^2 \quad (\text{For Lateral})$$

โดย p = แรงดันเนื่องจากกระแสน้ำมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล

C_D = สัมประสิทธิ์การลาก (Drag Coefficient) สำหรับตอม่อในตารางที่ 6-6

C_L = สัมประสิทธิ์การลากด้านข้าง (Lateral Drag Coefficient) ตารางที่ 6-7 และ

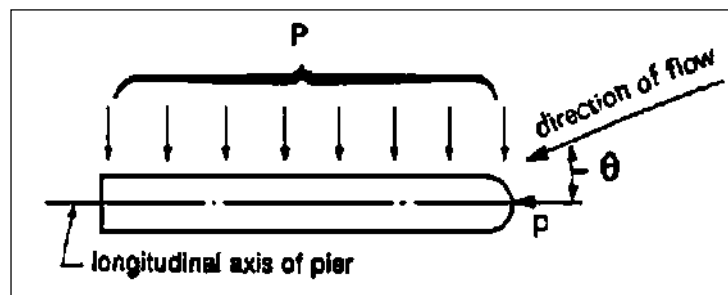
V = ความเร็วของกระแสน้ำมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 6-6 ค่าสัมประสิทธิ์การลาก

Type	C_D
semicircular-nosed pier	0.7
square-ended pier	1.4
debris lodged against the pier	1.4
wedged-nosed pier with nose angle 90 degree or less	0.8

ตารางที่ 6-7 ค่าสัมประสิทธิ์การลากด้านข้าง

Angle, between direction of flow and longitudinal axis of the pier	C_L
0 degree	0.0
5 degree	0.5
10 degree	0.7
20 degree	0.9
≥ 30 degree	1.0



รูปที่ 6-3 รูปแสดงมุมของกระแสน้ำที่กระทำต่อตอม่อ

11) แรงกระแทกเนื่องจากเรือสัญจรตามแม่น้ำ (Collision from Vessel)

สำหรับโครงสร้างฐานรากที่ตั้งขวางลำน้ำขนาดเล็กหรือปานกลาง จะออกแบบสำหรับแรงกระแทกเนื่องจากเรือที่สัญจรหรือท่อนซุงหรือเศษวัสดุที่ลอยมาตามแม่น้ำ โดยแรงชนิดนี้จะกระทำในทิศทางเดียวกับการไหลของกระแสน้ำโดยการคำนวณตามสูตรที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ดังนี้

$$F = WV / (2g\Delta t)$$

โดย F = แรงกระแทกเนื่องจากเรือสัญจรหรือท่อนซุงที่ลอยมาตามแม่น้ำมีหน่วยเป็นนิวตัน

W = น้ำหนักของสิ่งที่มากระแทก มีหน่วยเป็นนิวตัน

V = ความเร็วขณะกระแทก มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

g = อัตราเร่งของโลก = 9.81 เมตรต่อวินาที²

Δt = ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มชนจนกระทั่งสิ่งที่มากระแทกหยุด = 0.03 วินาที

สำหรับโครงการนี้ จะใช้น้ำหนัก 4.5 กิโลนิวตัน ซึ่งเปรียบได้กับท่อนซุงขนาดความยาว 9.1 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร โดยกำหนดให้ความเร็วขณะชนเท่ากับ 3 เมตร/วินาที

สำหรับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในแม่น้ำขนาดใหญ่และมีเรือบรรทุกสินค้าสัญจรในแม่น้ำ แรงกระแทกสำหรับตอม่อที่อยู่ในแม่น้ำจะออกแบบตามแรงกระแทกที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน AASHTO หัวข้อ 3.14 โดยกำหนดให้

ความเร็วของเรือขณะชนเท่ากับ 3 เมตร/วินาทีกระทำที่ต่อม่อในทิศทางเดียวกันกับการไหลของน้ำ การคำนวณหาแรงกระแทกชนิดนี้สามารถหาได้จากสูตรของ Woisin (1979) ดังนี้

$$P_s = 1.2 \times 10^5 V (DWT)^{0.5}$$

โดย P_s = แรงกระแทกเนื่องจากเรือบรรทุกสินค้าสัญจรตามแม่น้ำมีหน่วยเป็นนิวตัน

V = ความเร็วของเรือขณะชน มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

DWT = Deadweight tonnage of vessel มีหน่วยเป็นตัน

12) แรงเนื่องจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีต (Creep and Shrinkage)

ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ พื้นที่ผิวคอนกรีต อายุคอนกรีต และหน่วยแรงที่มากระทำ เป็นต้น คำนวณตามมาตรฐาน CEB/FIP 90

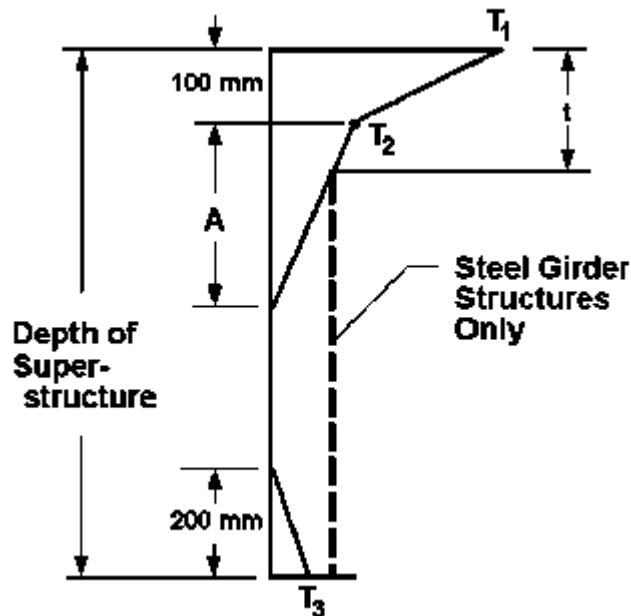
13) แรงจากแผ่นดินไหว (Earthquake Load)

ในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ จะต้องคำนึงถึงการจัดรูปแบบเรขาคณิต ให้มีเสถียรภาพในการต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว การกำหนดรายละเอียดปลักย่อยขึ้นส่วนโครงสร้าง รวมทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างปลายชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ และการจัดให้โครงสร้างทั้งระบบอย่างน้อยให้มีความเหนียวเพียงพอที่สามารถต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1302-52 ในส่วนการประมาณหาความเร่งที่ผิวดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ตำแหน่งที่ตั้งของสะพานและส่วนการออกแบบสะพานนั้นให้เป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ฉบับล่าสุด

14) การทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Settlement)

การทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างจุดรองรับในโครงสร้างสะพานต่อเนื่อง จะนำมาประกอบการพิจารณา ว่าจะใช้เสาเข็มหล่อสำเร็จ หรือเสาเข็มเจาะหล่อในที่ก็ตาม โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางปฐพีกลศาสตร์มาทำการคำนวณหาค่าการทรุดตัว โดยค่าการทรุดตัวที่ยอมให้ในการออกแบบโครงสร้างสะพานทางยกระดับจะไม่เกิน 1/1,000 ของช่วงความยาวสะพาน หรือไม่เกิน 30 มม. ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าการทรุดตัวของจุดรองรับโครงสร้างในระยะยาว

15) แรงเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Temperature Gradient)



รูปที่ 6-4 Positive Vertical Temperature Gradient in Concrete and Steel Superstructures.

แรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้นำมารวมกับแรงภายในหรือความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเนื่องจากแรงกระทำอื่นๆ และนำผลรวมของแรงมาทำการประเมินหรือออกแบบสะพานต่อไป

16) ตัวคูณเพิ่มค่าและการรวมแรงกลุ่มต่างๆ (Load Factor & Load Combination)

สำหรับตัวคูณเพิ่มค่าและการรวมแรงกลุ่มต่างๆ ที่ปรึกษาจะใช้วิธีคำนวณตามมาตรฐานของ AASHTO LRFD Bridge Design Specifications มีกลุ่มแรงหลักๆ ตามนี้

- Strength Limit State I – V

เป็นกลุ่มแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เนื่องจากแรงกระทำที่มีจากการคำนวณทางสถิติ ที่อาจเกิดขึ้นภายในอายุใช้งานของโครงสร้าง

- Extreme Event I – II

เป็นกลุ่มแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เนื่องจากแรงกระทำสุดขีด (Extreme Load) เช่น แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว หรือแรงกระทำเนื่องมาจากการชนของเรือ แรงกระทำเหล่านี้อาจมีคาบการเกิดยาวนานกว่าอายุการใช้งานของโครงสร้างอย่างมาก

- Service Limit State I – IV

เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กลุ่มแรงกระทำที่เกิดมาจากการใช้งานปกติประจำวัน การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กลุ่มแรงชนิดนี้จะเน้นที่ Stress, deformation และ crack width

- Fatigue Limit State

เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อตรวจสอบช่วงของความเครียด (Stress Range) เนื่องมาจาก
รถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งอยู่บนโครงสร้าง โดยมีจำนวนรอบของการวิ่งตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน

6.1.2 วิธีการออกแบบโครงสร้างสะพาน

1) การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ใช้วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load Resistance Factor Design) โดยส่วนประกอบของ
โครงสร้างออกแบบโดยตรวจสอบการรับกำลังใช้ Strength Limit State และตรวจสอบควบคุมรอยร้าวใช้ Service
Limit State ทั้งนี้ โดยให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งนอกเหนือจากตัวคูณความ
ต้านทาน (ϕ , Resistance Factor) และตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load Factor) แล้ว จะต้องคำนึงถึงตัวคูณปรับค่า
น้ำหนักบรรทุก (η , Load Modifier) ได้แก่ Ductility Factor, Redundancy Factor, และ Operational Factor โดย
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะต้องพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของ Fatigue Limit State

2) การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง

ใช้วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load Resistance Factor Design) ด้วยเช่นกัน โดย
ส่วนประกอบของโครงสร้างออกแบบโดยตรวจสอบการรับกำลังใช้ Strength Limit State และพิจารณาพฤติกรรม
หน่วยแรงที่ยอมรับได้ของโครงสร้างในสภาวะการใช้งาน Service Limit State ทุกขั้นตอนของน้ำหนักวิกฤตตลอด
อายุโครงสร้างตั้งแต่เริ่มการอัดแรง โดยให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่ง
นอกเหนือจากตัวคูณความต้านทาน (ϕ , Resistance Factor) จะต้องคำนึงถึง ตัวคูณปรับค่าน้ำหนักบรรทุก (Load
Modifier) ได้แก่ Ductility Factor, Redundancy Factor, และ Operational Factor โดยโครงสร้าง ค อ น ก รี ต อัด
แรงนั้นจะต้องพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของ Fatigue Limit State ด้วย

3) ค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load Factor) ขึ้นอยู่กับความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกแต่ละชนิด ความแม่นยำ
ในการกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุก เป็นต้น ค่าของตัวคูณน้ำหนักบรรทุกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 ค่าตัวคูณ
น้ำหนักบรรทุก γ ตามที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO LRFD เป็นดังแสดงใน ตารางที่ 1-3 และตารางที่ 1-4

ตารางที่ 6-8 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและการรวมแรงมาตรฐาน AASHTO LRFD

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time			
										EQ	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength II	γ_a	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength III	γ_E	—	1.00	1.40	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength IV	γ_a	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—
Strength V	γ_a	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Extreme Event I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—
Extreme Event II	γ_p	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	0.80	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	0.70	—	1.00	1.00/1.20	—	1.0	—	—	—	—
Fatigue I—LL, IM & CE only	—	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue I II— LL, IM & CE only	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ตารางที่ 6-9 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่มาตรฐาน AASHTO LRFD

Type of Load, Foundation Type, and Method Used to Calculate Downdrag	Load Factor	
	Maximum	Minimum
DC: Component and Attachments	1.25	0.90
DC: Strength IV only	1.50	0.90
DD: Downdrag		
Piles, α Tomlinson Method	1.4	0.25
Piles, λ Method	1.05	0.30
Drilled shafts, O'Neill and Reese (1999) Method	1.25	0.35
DW: Wearing Surfaces and Utilities	1.50	0.65
EH: Horizontal Earth Pressure		
• Active	1.50	0.90
• At-Rest	1.35	0.90
• AEP for anchored walls	1.35	N/A
EL: Locked-in Erection Stresses	1.00	1.00
EV: Vertical Earth Pressure		
• Overall Stability	1.00	N/A
• Retaining Walls and Abutments	1.35	1.00
• Rigid Buried Structure	1.30	0.90
• Rigid Frames	1.35	0.90
• Flexible Buried Structures other than Metal Box Culverts	1.95	0.90
• Flexible Metal Box Culverts	1.50	0.90
ES: Earth Surcharge	1.50	0.75

4) ตัวคูณความต้านทาน (ϕ , Resistance Factor)

ค่าตัวคูณความต้านทาน ตามที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO LRFD เป็นดังนี้

หน้าตัดรับแรงดึง (Tension-Controlled Section) ของคอนกรีตเสริมเหล็ก	=	0.90
หน้าตัดรับแรงดึง (Tension-Controlled Section) ของคอนกรีตอัดแรง	=	1.00
หน้าตัดรับแรงอัด (Compression-Controlled Section)	=	0.75
แรงเฉือนและแรงบิด (Shear and Torsion)	=	0.90
แรงกดบนคอนกรีต (Bearing)	=	0.70
แรงอัดใน strut-and-tie models	=	0.70
แรงอัดในพื้นที่สมอยึด (anchorage zones)	=	0.80
แรงดึงในเหล็กในพื้นที่สมอยึด	=	1.00
แรงต้านทานขณะตอกเสาเข็ม	=	1.00

6.1.3 วัสดุก่อสร้างโครงสร้างสะพาน

วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม ลวดอัดแรง หรือวัสดุจำเป็นอย่างอื่น ๆ โดยจะใช้วัสดุภายในประเทศไทยซึ่งวัสดุที่ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานสำคัญๆ เช่น มาตรฐานอุตสาหกรรมไทย ASTM และ JIS เป็นต้น

1) คอนกรีต

กำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม. ที่อายุ 28 วัน ในแต่ละส่วนของโครงสร้าง ดังนี้

ตารางที่ 6-10 กำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีต

ประเภทโครงสร้าง	f_c , MPa	Class
โครงสร้างส่วนบนคานคอนกรีตรูปกล่องชนิดอัดแรง	40	-
โครงสร้างส่วนบนชนิดคอนกรีตอัดแรง	35	A พิเศษ
โครงสร้างส่วนบนชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก	25	A
เสาชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก	25	A
เสาเข็ม Spun คอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ	50	-
เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จทั่วไป	35	A พิเศษ
เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่	30	-
อื่นๆ	ตามระบุในแบบก่อสร้าง	-

2) เหล็กเสริม

- เหล็กเสริมขนาด 28 มม. ขึ้นไป เป็นเหล็กข้ออ้อยชนิด Hot-rolled High Yield ระดับ SD-50 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 24 โดยมีกำลังที่จุดคาน 4,900 กก./ซม.²
- เหล็กเสริมขนาด 10-25 มม. เป็นเหล็กข้ออ้อยชนิด Hot-rolled High Yield ระดับ SD-40 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 24 โดยมีกำลังที่จุดคาน 3,900 กก./ซม.²
- เหล็กเสริม 9 มม. และเล็กกว่า เป็นเหล็กชนิด Hot-rolled Mild Steel ระดับ SR-24 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 20 โดยมีกำลังที่จุดคาน 2,350 กก./ซม.²

3) ลวดอัดแรง (Prestressing Strand)

ลวดอัดแรงเป็นลวดเหล็กกล้าตีเกลียว 7 เส้น (7-wire strand) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 420 โดยมีความทนแรงดึง 1,860 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (18.96 ตัน/ตร.ซม.) หรือเทียบเท่า หรือลวดอัดแรงเป็นลวดเหล็กกล้า (steel wire) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 95 โดยมีความทนแรงดึงอย่างน้อย 1,570 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (16.04 ตัน/ตร.ซม.) หรือเทียบเท่า

4) เหล็กรูปพรรณ (Structural Steel)

- เหล็กรูปพรรณที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปเป็นชนิด Hot-rolled หรือ Cold-rolled Mild Steel ชั้น Fe 24 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 116 โดยมีกำลังที่จุดคาน 2,400 กก./ซม.²
- เหล็กโครงสร้างรูปตัดกลวงเป็นชนิด Hot-rolled หรือ Cold-rolled Mild Steel ชั้น HS 41 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 107 โดยมีกำลังที่จุดคาน 2,400 กก./ซม.²

6.2 ขั้นตอนการประเมินโครงสร้างสะพานประเภท Segmental Box Girder รวมกับผลของอุณหภูมิ

ขั้นตอนการประเมินโครงสร้างสะพานประเภท Segmental Box Girder รวมกับผลของอุณหภูมิตามมาตรฐาน AASHTO LRFD แสดงดังนี้

กรณีสะพานที่สร้างแล้ว (Existing Bridge)

สำหรับสะพานที่ก่อสร้างแล้วเสร็จอยู่ระหว่างการใช้งานสามารถใช้ขั้นตอนการประเมินดังนี้

- สำรวจสะพานเดิมของโครงสร้าง
- รวบรวมแบบก่อสร้างของสะพานเดิม
- ทำการทดสอบในภาคสนามเพื่อหาข้อมูลของวัสดุและค่าของคาบการสั่นของโครงสร้าง
- ทำการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างวันตลอดหน้าตัดของสะพานและจุดสำคัญในช่วงความยาวสะพาน
- สร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ทั้งในระดับ หน้าตัดของสะพาน และความยาวช่วงของสะพาน
- ทำการนำผลการตรวจวัดในภาคสนามและผลการทดสอบวัสดุนำไปปรับค่าของแบบจำลองของสะพาน

- นำแบบจำลองที่ปรับค่าแล้วนำไปใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนการก่อสร้างและพิจารณาอายุของการใช้งานของสะพานจนถึงปัจจุบันเพื่อพิจารณาผลของความเค้น ความเครียด รวมทั้งแรงภายในของสะพาน
- นำผลของการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างวันมาวิเคราะห์การกระจายตัวของหน้าตัดสะพานเพื่อใช้ในการหาเส้นกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สะพาน
- นำเส้นกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวันมาวิเคราะห์หาความเค้นในหน้าตัดของสะพาน
- นำความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมารวมกับผลของความเค้นในโครงสร้างสะพานเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างและผลของระยะเวลาการใช้งานของสะพานและผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่ใช้ปัจจุบัน
- เปรียบเทียบความเค้นรวมกับค่าที่ยอมให้เพื่อพิจารณาผลกระทบที่อาจทำให้เกิดความแตกร้าวในหน้าตัดสะพาน
- หากความเค้นที่เกิดขึ้นเกินค่าที่ยอมให้ควรดำเนินการเสนอแบบปรับปรุงหรือเสริมกำลังโครงสร้างต่อไป

กรณีสะพานที่สร้างใหม่ (New Bridge)

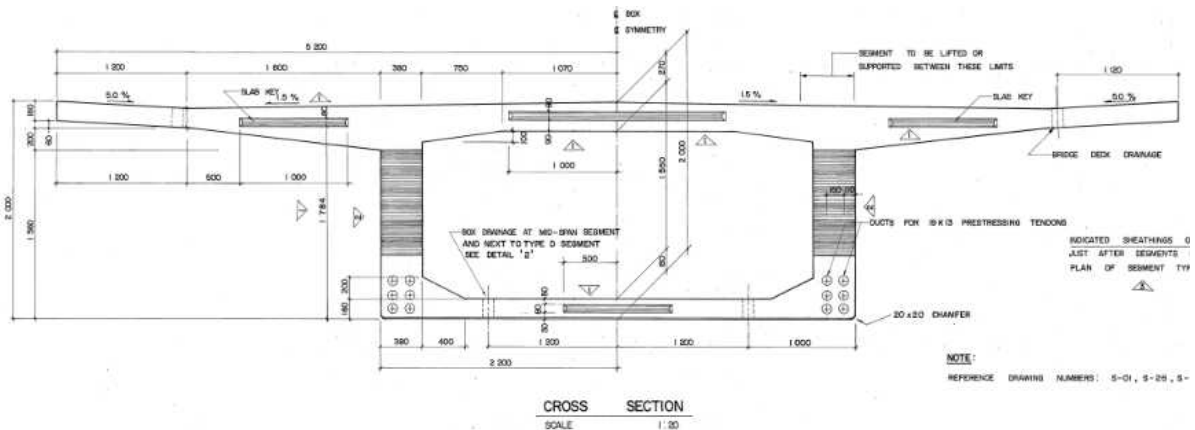
สำหรับสะพานที่อยู่ระหว่างการออกแบบใหม่สามารถใช้ขั้นตอนการประเมินดังนี้

- แบบก่อสร้างของสะพานเดิม
- สร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ทั้งในระดับ ความยาวช่วงของสะพาน
- นำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนการก่อสร้างและพิจารณาอายุของการใช้งานของสะพานจนถึงอายุการใช้งานที่พิจารณาเพื่อพิจารณาผลของความเค้น ความเครียด รวมทั้งแรงภายในของสะพาน
- เลือกเส้นกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สะพาน
- นำเส้นกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวันมาวิเคราะห์หาความเค้นในหน้าตัดของสะพาน
- นำความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมารวมกับผลของความเค้นในโครงสร้างสะพานเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างและผลของระยะเวลาการใช้งานของสะพานและผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่ใช้ปัจจุบัน
- เปรียบเทียบความเค้นรวมกับค่าที่ยอมให้เพื่อพิจารณาผลกระทบที่อาจทำให้เกิดความแตกร้าวในหน้าตัดสะพาน
- หากความเค้นที่เกิดขึ้นเกินค่าที่ยอมให้ควรดำเนินการปรับขนาดหน้าตัดหรือความหนาแน่นทั้งเสริมเหล็กในบริเวณที่จำเป็นเพื่อลดโอกาสการเกิดรอยร้าวในโครงสร้างต่อไป

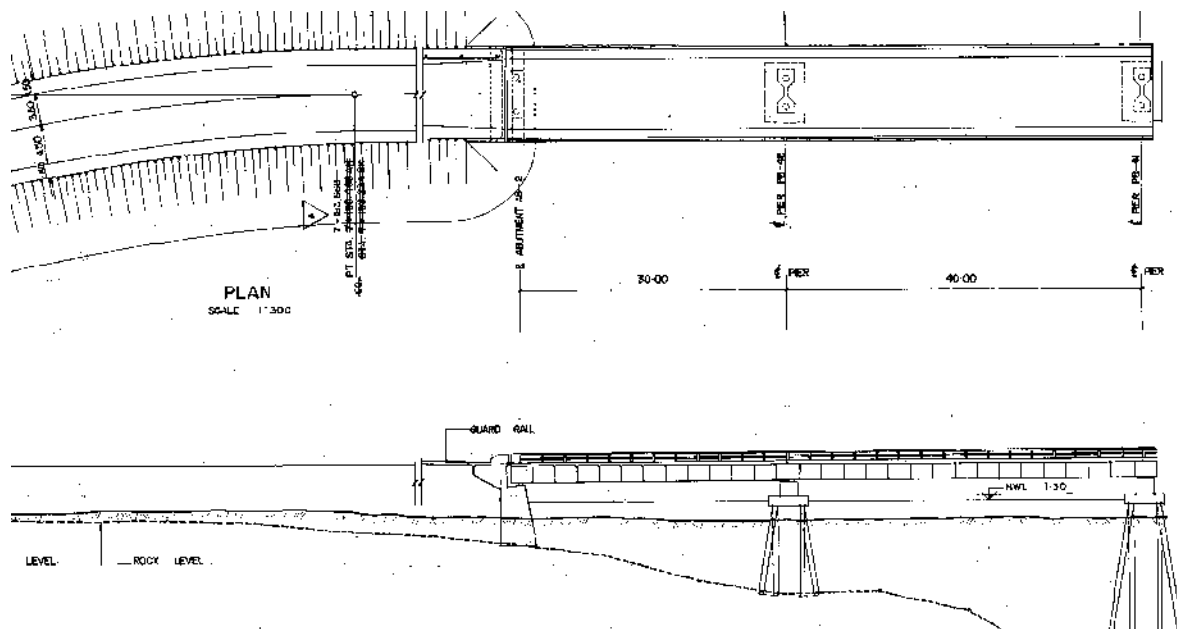
6.3 รายละเอียดของแบบก่อสร้างและรูปแบบของโครงสร้างสะพานที่จะดำเนินการวิเคราะห์

ที่ปรึกษาได้รวบรวมแบบก่อสร้างของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) เพื่อใช้ประกอบในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินความแข็งแรงของสะพานภายใต้ผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างวัน ดังแสดงดังนี้

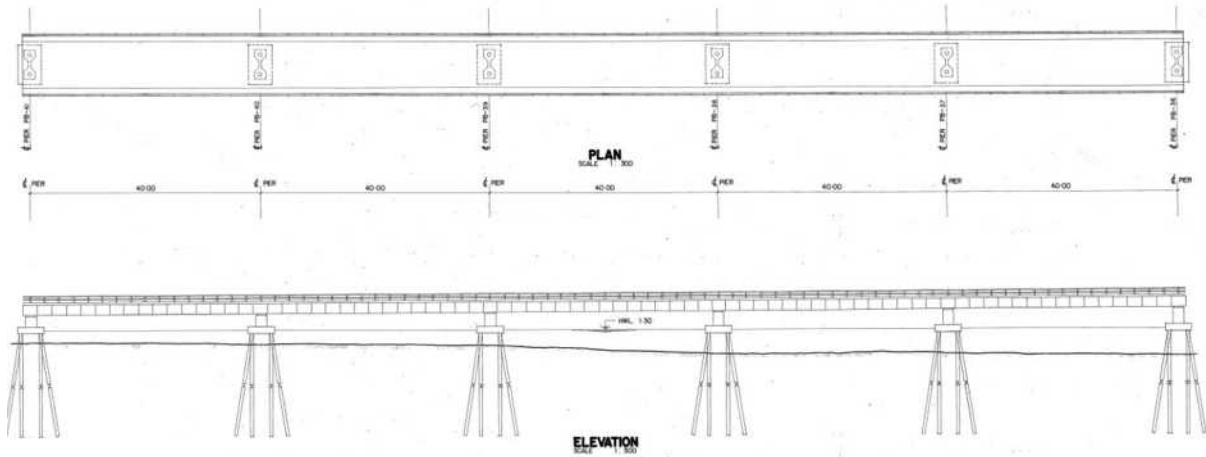
แบบสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ที่ใช้ประกอบกรวิเคราะห์และประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง



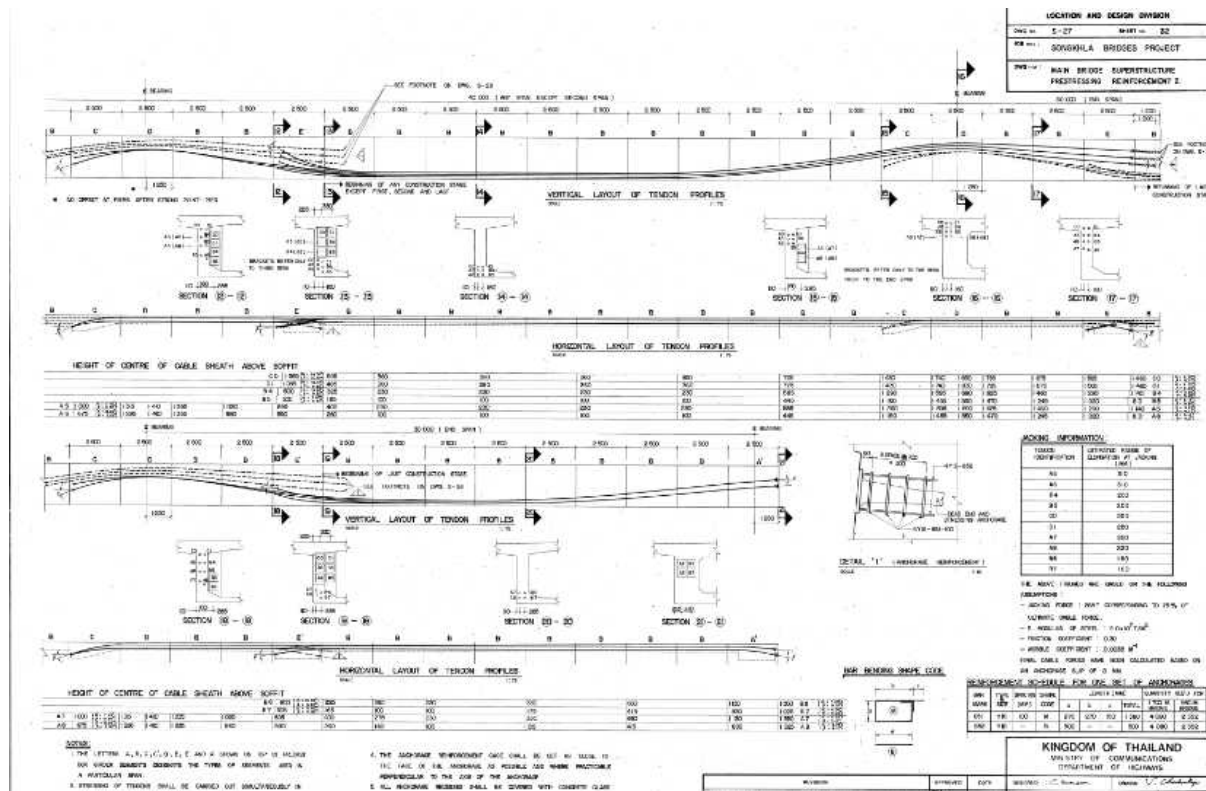
รูปที่ 6-5 หน้าตัดของ Box Girder



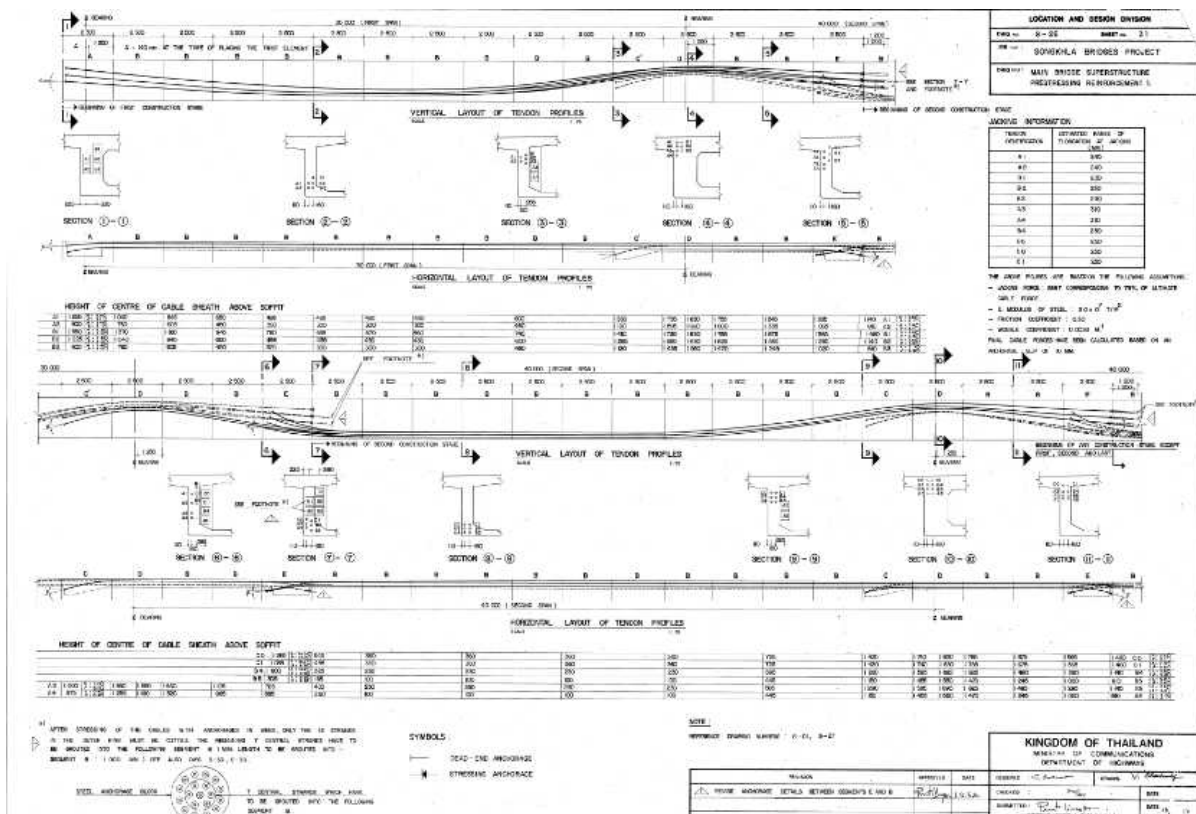
รูปที่ 6-6 Span Configuration ช่วง Approach และ End Span ของ Box Girder



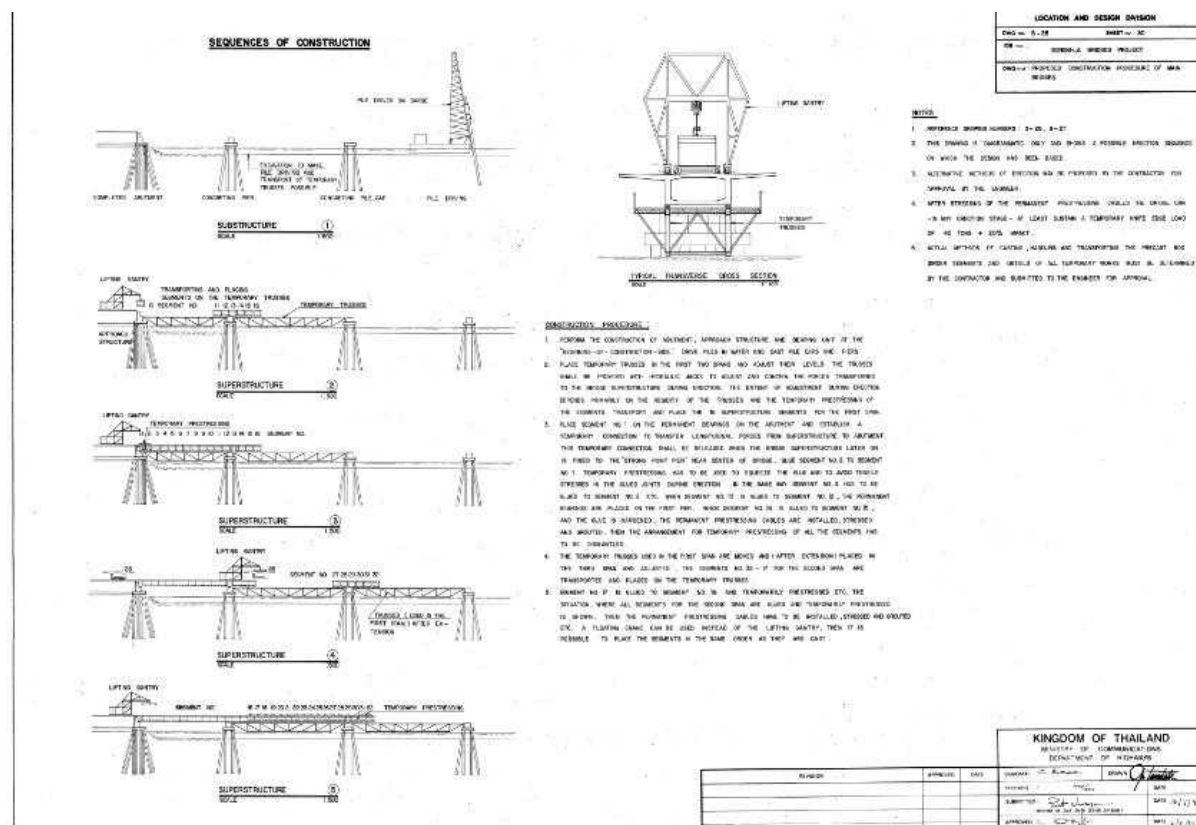
รูปที่ 6-7 Configuration ช่วง Internal Span ของ Box Girder



รูปที่ 6-8 Tendon Layout ของ Box Girder

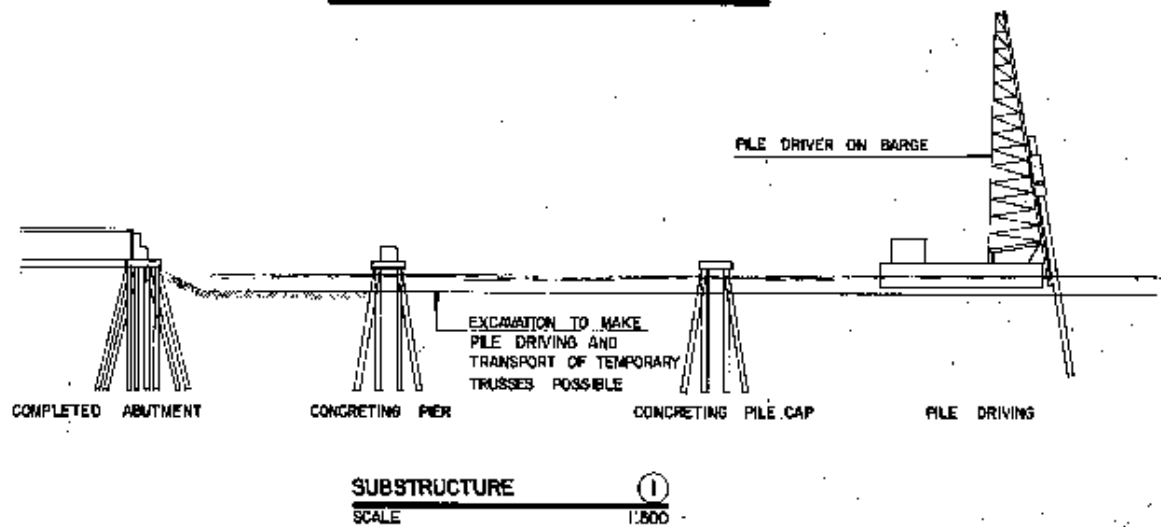


รูปที่ 6-9 Tendon Layout ของ Box Girder (2)

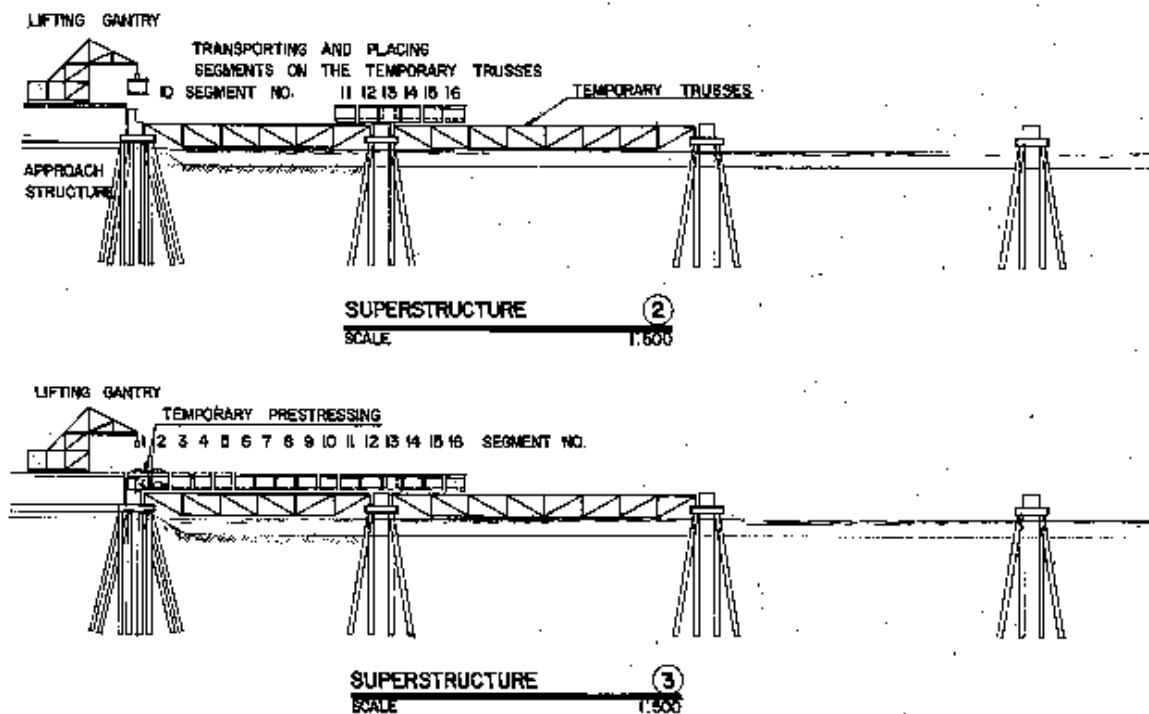


รูปที่ 6-10 Construction Sequence ของ Box Girder

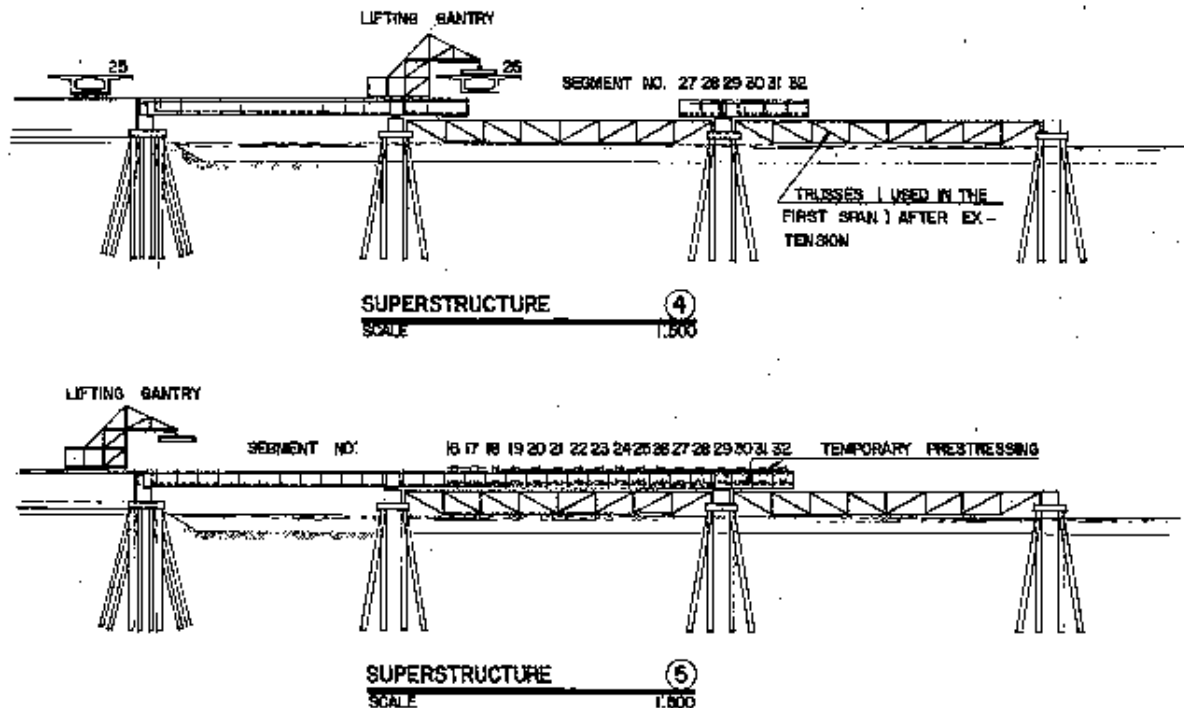
SEQUENCES OF CONSTRUCTION



รูปที่ 6-11 Construction Sequence ของ Box Girder (Step 1)



รูปที่ 6-12 Construction Sequence ของ Box Girder (Step 2)



รูปที่ 6-13 Construction Sequence ของ Box Girder (Step 3)

I. CONCRETE

I.1 THE CLASSES AND THE MINIMUM 28-DAY DESIGN COMPRESSIVE CYLINDER STRENGTHS OF CONCRETE SHALL BE AS SET FORTH IN THE TABLE BELOW :

CONCRETE CLASS	CEMENT TYPE	MAX W/C RATIO	MIN. CEMENT CONTENT KG / M ³	MAX. SIZE OF COARSE AGG. MM.	COMPRESSIVE STRENGTH KG/CM ²
350 A	1	0.45	450	20	350
350 B	5	0.45	450	20	350
350 C	1	0.50	450	12	350
250 A	1	0.45	400	20	250
250 B	5	0.50	400	20	250
250 C	5	0.50	350	38	250
200	1	0.50	350	20	200
150	1	0.50	300	38	150

NOTES : 1. TYPE 3 CEMENT MAY BE SUBSTITUTED FOR TYPE 1 CEMENT ONLY WITH THE APPROVAL OF THE ENGINEER.
2. W/C RATIO (BY WEIGHT) IS BASED ON THE CONDITION OF SATURATED SURFACE DRY AGGREGATE.

รูปที่ 6-14 Concrete Specifications ของ Box Girder

1.2 EXCEPT WHERE NOTED ON THE DRAWINGS CONCRETE FOR VARIOUS PARTS OF THE STRUCTURES SHALL BE OF THE FOLLOWING CLASSES :

PART OF STRUCTURE	CONCRETE CLASS
PRECAST BOX GIRDER AND STRONG-POINT PIERSHAFTS	350 A
PRECAST PRESTRESSED CONCRETE PILE	350 B
IN-SITU FILLED-IN OR COVER CONCRETE	350 C
DECK SLAB OF APPROACH STRUCTURE	250 A
R.C. PILE, SUBSTRUCTURE AND WALL OF APPROACH STRUCTURE, PIER, ABUTMENT WALLS, ABUTMENT PIERS AND FOOTING OF ABUTMENTS, BEARING UNIT WALL AND SLAB, PILECORES	250 B
PILE CAP OF PIER, BASE AND PEDESTAL OF ABUTMENT	250 C
CURB, SIDEWALK, PARAPET, POST AND RAIL	200
BLINDING OR LEAN CONCRETE	150

รูปที่ 6-15 Concrete Specifications ของ Box Girder

4. PRESTRESSING STEEL

4.1 ALL PRESTRESSING STRANDS CONTAINED IN ALL PRESTRESSING TENDONS SHALL BE NORMAL RELAXATION STRESS RELIEVED SEVEN-WIRE STRANDS GRADE 1860 CONFORMING TO THE REQUIREMENTS OF TIS. 420 - 2525 OR APPROVED : EQUAL WITH THE FOLLOWING CHARACTERISTICS :

NOMINAL DIAMETER	12.7	MM. (1/2")
MIN. ULTIMATE TENSILE LOAD	18 740	KG.
MIN. LOAD AT 1% EXTENSION	15 920	KG.

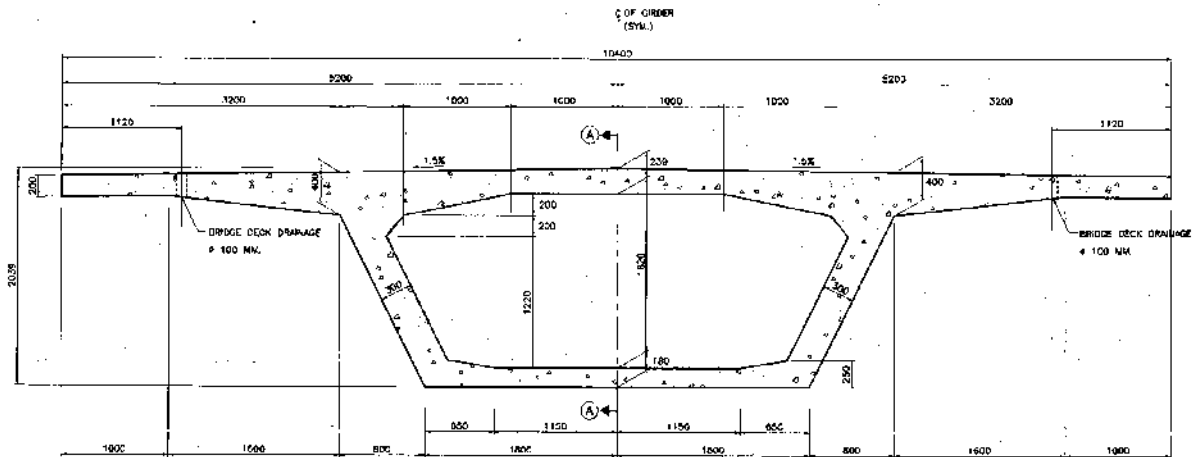
4.2 ALL PRESTRESSING WIRES USED IN PRECAST PRESTRESSED CONCRETE PILES SHALL BE NORMAL RELAXATION, INDENTED, UNCOATED STRESS-RELIEVED HIGH-TENSILE STRENGTH WIRES CONFORMING TO THE REQUIREMENTS OF TIS. 95 - 2525 OR APPROVED : EQUAL WITH THE FOLLOWING CHARACTERISTICS :

NOMINAL DIAMETER	7	MM.
MIN. ULTIMATE TENSILE STRENGTH	16 320	KG./CM. ²
MIN. YIELD STRENGTH AT 1% EXTENSION	13 770	KG./CM. ²

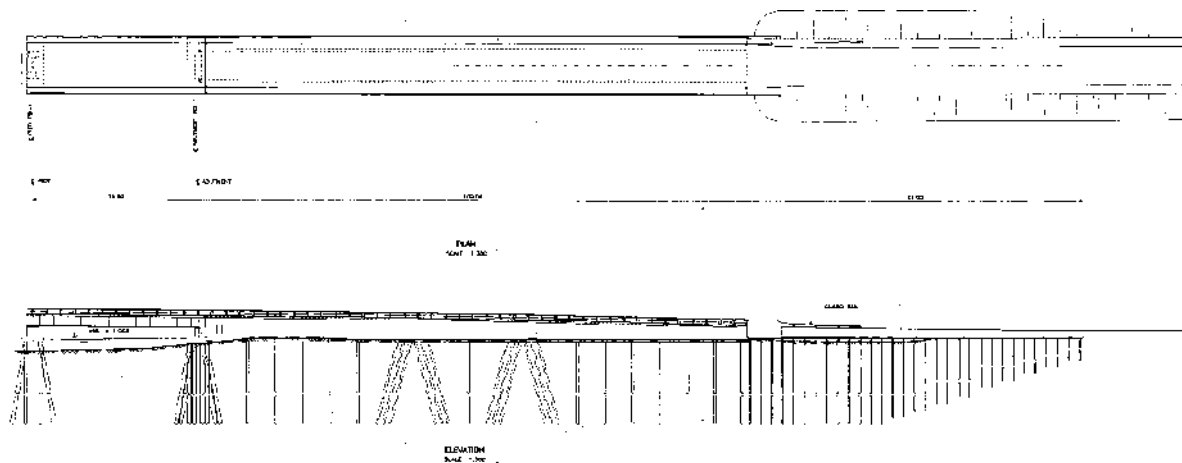
4.3 THE POST-TENSIONING PRESTRESSING SYSTEM FOR THE BRIDGE SUPERSTRUCTURE HAS BEEN DETAILED FOR 19K13 TENDONS ADOPTED FROM THE 'K' RANGE SYSTEM OF POST TENSIONING OF FREYSSINET INTERNATIONAL. ALTERNATIVE PRESTRESSING SYSTEMS MAY BE SUBMITTED FOR CONSIDERATION.

รูปที่ 6-16 Prestressing Strand Specifications ของ Box Girder

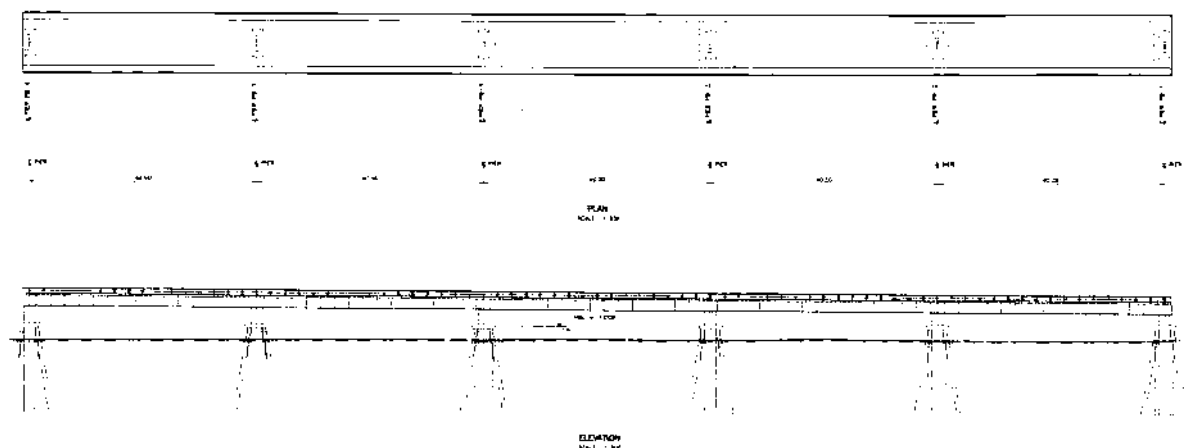
แบบสะพานฝังขาทาง (สะพานใหม่) ที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์และประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง



รูปที่ 6-17 หน้าตัดของ Box Girder



รูปที่ 6-18 Span Configuration ช่วง Approach และ End Span ของ Box Girder



รูปที่ 6-19 Span Configuration ช่วง Internal Span ของ Box Girder

1. CONCRETE

1.1 THE CLASSES AND THE MINIMUM 28-DAY DESIGN COMPRESSIVE CYLINDER STRENGTHS OF CONCRETE SHALL BE AS SET FORTH IN THE TABLE BELOW :

CONCRETE CEMENT CLASS	CEMENT TYPE	MAX W/C RATIO	MIN. CEMENT CONTENT KG/M ³	SILICA FUME KG/M ³	FLY ASH KG / M ³	MAX. SIZE OF COARSE AGG. MM	COMPRESSIVE STRENGTH KG / CM ²	REMARK.
400 A	1	0.45	450	-	-	20	400	 FLY ASH TYPE F ASTM C618-95 -(SiO ₂)+(Al ₂ O ₃)+(Fe ₂ O ₃) min. 70 % -(SiO ₂) max. 4 % -(CaO) max. 10 %
350 A	1	0.45	450	-	-	20	350	
350 B	1	0.50	450	-	-	12	350	
250 A	1	0.40	375	-	-	20	250	
250 B	1	0.40	375	15	55	20	250	
250 C	1	0.40	350	15	55	38	250	
200	1	0.50	350	-	-	20	200	
150	1	0.55	300	-	-	38	150	
NOTES : 1. TYPE 3 - CEMENT MAY BE SUBSTITUTED FOR TYPE 1 CEMENT ONLY WITH THE APPROVAL OF THE ENGINEER. 2. W/C RATIO (BY WEIGHT) IS BASED ON THE CONDITION OF SATURATED SURFACE DRY AGGREGATE.								

1.2 EXCEPT WHERE NOTED ON THE DRAWINGS CONCRETE FOR VARIOUS PARTS OF THE STRUCTURES SHALL BE OF THE FOLLOWING CLASSES :

PART OF STRUCTURE	CONCRETE CLASS
PRECAST BOX GIRDER AND STRONG POINT PIER SHAFTS	400 A
PRECAST PRESTRESSED CONCRETE PILE	350 A
IN-SITU FILLED-IN OR COVER CONCRETE	350 B
DECK SLAB OF APPROACH STRUCTURE	250 A
R.C. PILE, SUBSTRUCTURE AND WALL OF APPROACH STRUCTURE, PIER, ABUTMENT WALL	
BEARING UNIT WALL AND SLAB, PILE CORES, PIER SHAFT	250 B
PILE CAP OF PIER, BASE AND PEDESTAL OF ABUTMENT, ABUTMENT PIERS AND FOOTING OF ABUTMENT	250 C

รูปที่ 6-20 Concrete Specification ของสะพาน Box Girder ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)

4. PRESTRESSING STEEL

4.1 ALL PRESTRESSING STRANDS CONTAINED IN ALL PRESTRESSING TENDONS SHALL BE NORMAL RELAXATION STRESS RELIEVED SEVEN-WIRE STRANDS GRADE 1850 CONFORMING TO THE REQUIREMENTS OF TIS 420-2525 OR APPROVED EQUAL WITH THE FOLLOWING CHARACTERISTICS :

NOMINAL DIAMETER	15.24 12.7	MM (1/2")
MIN. ULTIMATE TENSILE LOAD	28,580	KG.
MIN. LOAD AT 1% EXTENSION	22,580	KG.

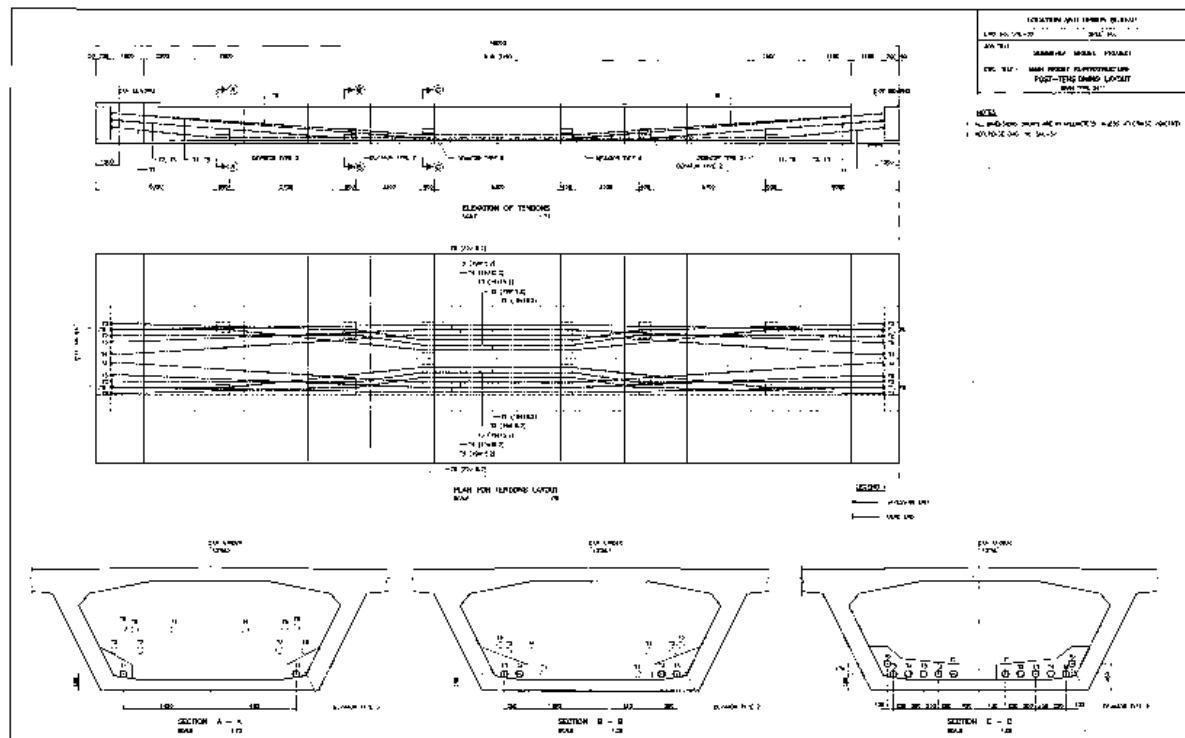
4.2 ALL PRESTRESSING WIRES USED IN PRECAST PRESTRESSED CONCRETE PILES SHALL BE NORMAL RELAXATION, UNCOATED STRESS-RELIEVED HIGH-TENSILE STRENGTH WIRES CONFORMING TO THE REQUIREMENTS OF TIS 95-2525 OR APPROVED EQUAL WITH THE FOLLOWING CHARACTERISTICS :

NOMINAL DIAMETER	7	MM.
MIN. ULTIMATE TENSILE STRENGTH	15,340	KG./CM. ²
MIN. YIELD STRENGTH AT 1% EXTENSION	13,770	KG.-CM. ²

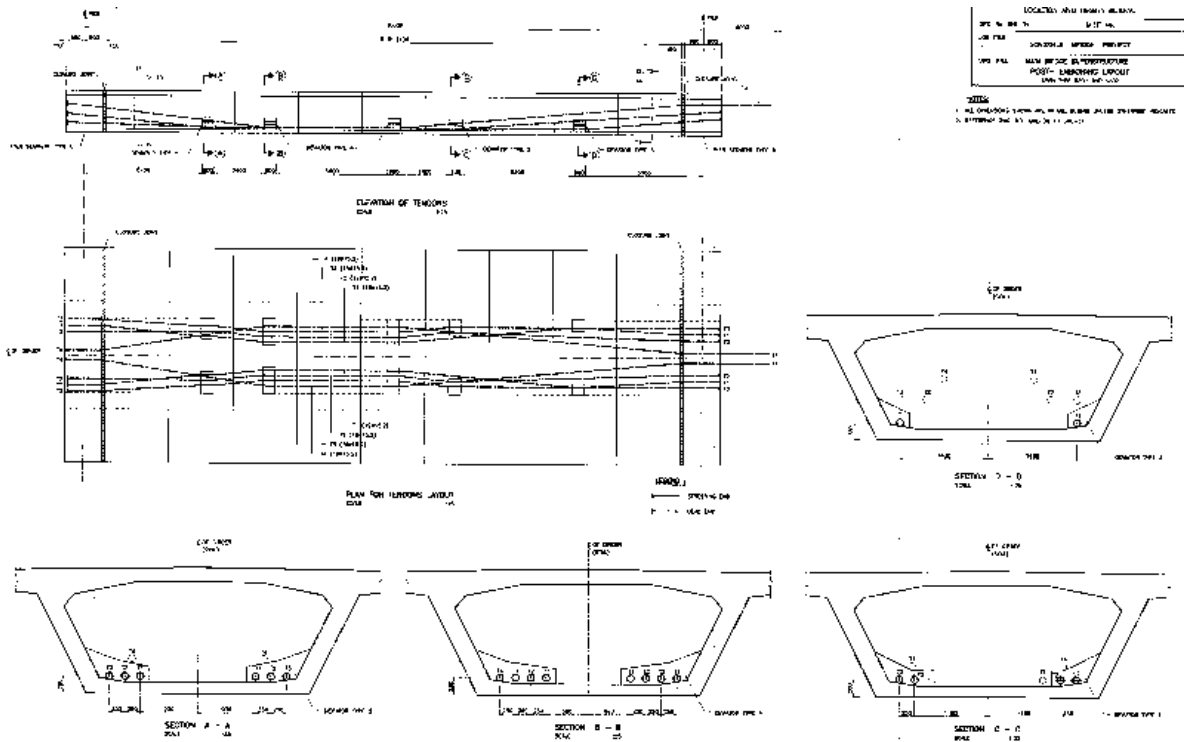
4.3 THE POST-TENSION PRESTRESSING SYSTEM FOR THE BRIDGE SUPERSTRUCTURE HAS BEEN DETAILED FOR 6-7, 6-12, 6-19, 6-22 TENDONS ADOPTED FROM THE VSL STRESSING ANCHORAGE SYSTEM OF POST-TENSIONING OF VSL INTERNATIONAL. ALTERNATIVE PRESTRESSING SYSTEMS MAY BE SUBMITTED FOR CONSIDERATION;

4.4 IF IT IS DEEMED NECESSARY TO ADJUST THE POSITIONS AND/OR THE CONFIGURATIONS OF THE REINFORCING BARS TO AVOID CONFLICTS WITH THE PASSAGE OF A TENDON AND/OR THE POSITION OF A TENDON ANCHORAGE OR BLOCK-OUTS, THE CONTRACTOR SHALL SUBMIT THE SHOP DRAWING ALL THE MODIFICATIONS NECESSARY TO THE ENGINEER FOR APPROVAL.

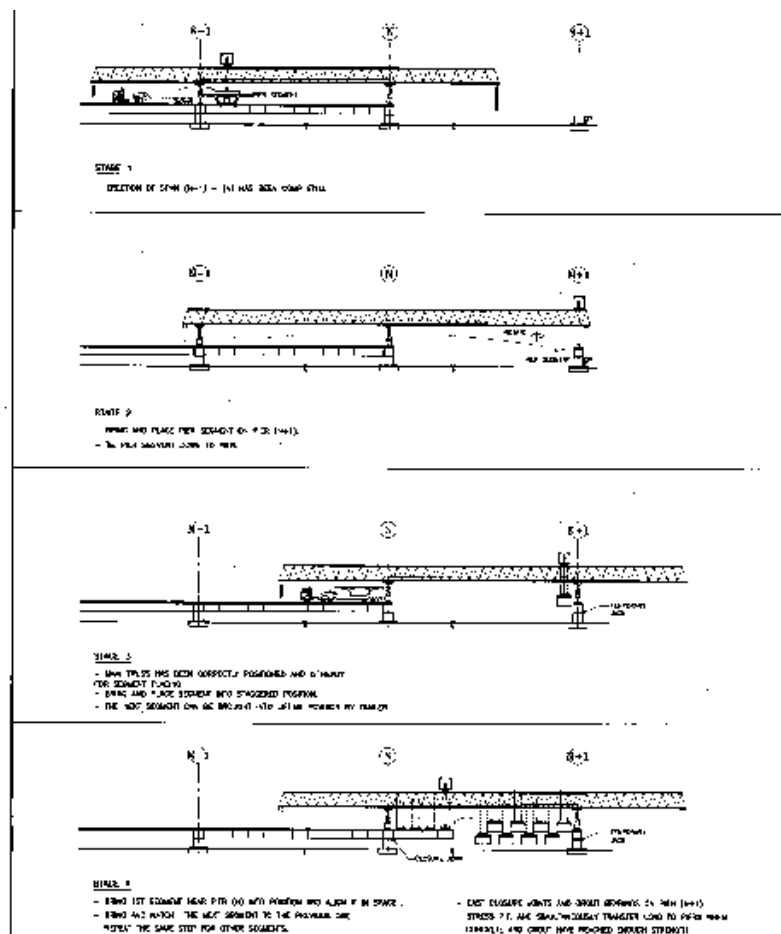
รูปที่ 6-21 Prestressing Strands Specifications ของสะพาน Box Girder ผังขวาทาง (สะพานใหม่)



รูปที่ 6-22 Tendon Layout ของสะพาน Box Girder ผังขวาทาง (สะพานใหม่)



รูปที่ 6-23 Tendon Layout ของสะพาน Box Girder ผังขวาทาง (สะพานใหม่) (2)



รูปที่ 6-24 Construction Sequence ของสะพาน Box Girder ผังขวาทาง (สะพานใหม่)

6.4 รายละเอียดของแบบจำลองของสะพานที่ได้ปรับแก้กับข้อมูลตรวจวัด

ในหัวข้อนี้นำเสนอรายละเอียดของแบบจำลองโครงสร้างสะพานที่ใช้สร้างเพื่อจำลองพฤติกรรมของสะพานประเภท Segmental Box Girder ทั้งสะพานประเภทเดิมและที่ก่อสร้างขึ้นใหม่ โดยการจำลองผลจะพิจารณาจำลองผลของสะพานระหว่างการก่อสร้าง ภายหลังการก่อสร้าง และที่ระยะเวลาต่างๆ ภายหลังการก่อสร้าง นอกจากนั้นแบบจำลองนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวันที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัดสะพานและส่งผลไปยังสะพานตลอดช่วงความยาวสะพานต่อไป

โดยแบบจำลองโครงสร้างสะพานได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์โดยหลักการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของสะพานประเภท Box Girder แสดงดังนี้

- แบบจำลองจำลองส่วนของโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างโดยใช้หลักการของ Spine Model โดยที่ Frame Element ใช้สำหรับจำลองคานรูปแบบกล่อง (Box Girder) และส่วนของตอม่อสะพาน (Pier) ซึ่งอีลิเมนต์ประเภทนี้เป็นคานความลึกน้อยจำลองในการรับแรงตามขวาง แรงตามแกน และโมเมนต์ ดังนั้นคุณสมบัติของอีลิเมนต์ประเภทนี้จะรวมทั้งจากอีลิเมนต์ประเภท Truss และ Beam เข้าด้วยกัน ในกรณีที่ Frame อีลิเมนต์ใช้ในการจำลองผลในระบบ 3 มิติ จะสามารถพิจารณาผลจากโมเมนต์ดัดสองแกน โมเมนต์บิด แรงในแนวแกน และแรงเฉือนสองแกนของคานได้
- การจำลองรอยต่อสะพาน Pot Bearing ใช้เป็นอีลิเมนต์ที่จำลองเป็นลักษณะ one-joint grounded spring หรือ two-joint link ได้ โดยค่าของสติฟเนสของอีลิเมนต์สามารถสร้างโดยใช้ spring จำนวน 6 ชุดแยกอิสระต่อกันที่รองรับการเคลื่อนตัวได้ 3 ทิศทางและการหมุนใน 3 ทิศทาง
- นอกจากประเภทของอีลิเมนต์ข้างต้นแล้วในการจำลองส่วนของฐานรากของสะพานยังมีความจำเป็นต้องใช้อีลิเมนต์ประเภท Boundary Element ที่ใช้เพื่อจำลองผลของฐานรองรับของตอม่อสะพานหรือจำลองผลของแผ่นรองคานสะพานแบบต่างๆ ซึ่งจะต้องจำลองส่วนของสติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวและการหมุน โดยขนาดของ Boundary Element จะขึ้นกับความละเอียดของ Degree of Freedom (DOFs) ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของฐานรากหรือแผ่นรองคานสะพานนั้นๆ โดยทั่วไปการใช้ Boundary Element ที่เป็นสติฟเนสเมทริกซ์ขนาด 6x6 ค่อนข้างจะเพียงพอต่อการวิเคราะห์สะพานโดยทั่วไป
- แบบจำลองของสะพานให้พิจารณาผลของขั้นตอนการก่อสร้าง ระยะเวลาก่อสร้าง และผลของ Long Term Effect ที่เกิดขึ้นในวัสดุต่างๆ เช่น Aging ของ Concrete, Shrinkage และ Creep ในคอนกรีต, Relaxation ในลวดอัดแรง เป็นต้น
- ในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างวันบริเวณหน้าตัดของคานสะพานใช้การวิเคราะห์ที่คำนึงถึงผลของ Self Equilibrating Stress หรือ Forces

การปรับค่าแบบจำลองของสะพาน (FE Calibration with Test Results)

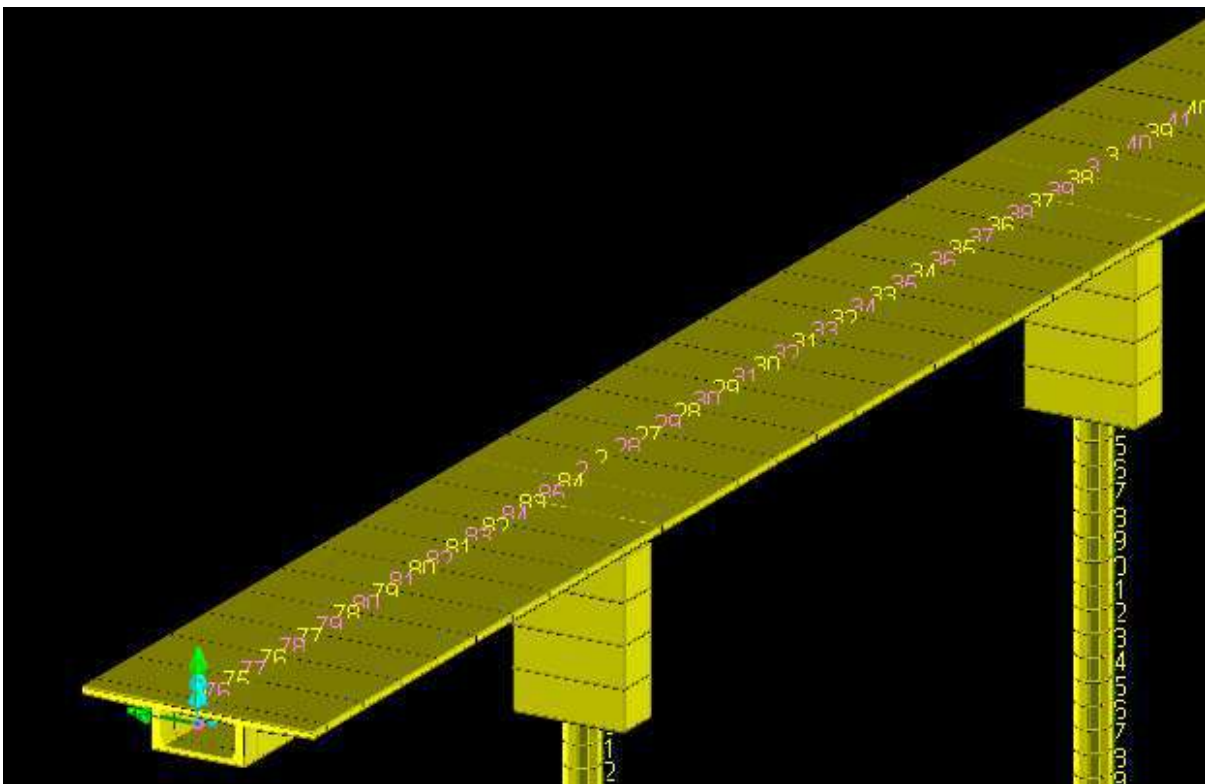
เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเนื่องจากแบบจำลองของสะพานมีความถูกต้อง แบบจำลองตามยาวของสะพานโดยวิธี Finite Element ได้นำมาปรับค่าของ Natural Frequency ให้สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้ในสะพาน โดยในการปรับค่า

ของแบบจำลองได้พิจารณา กำลังของวัสดุ ขั้นตอนการก่อสร้าง แบบจำลองของวัสดุเทียบกับเวลา เงื่อนไขของฐานรองรับของแบบจำลอง เป็นต้น

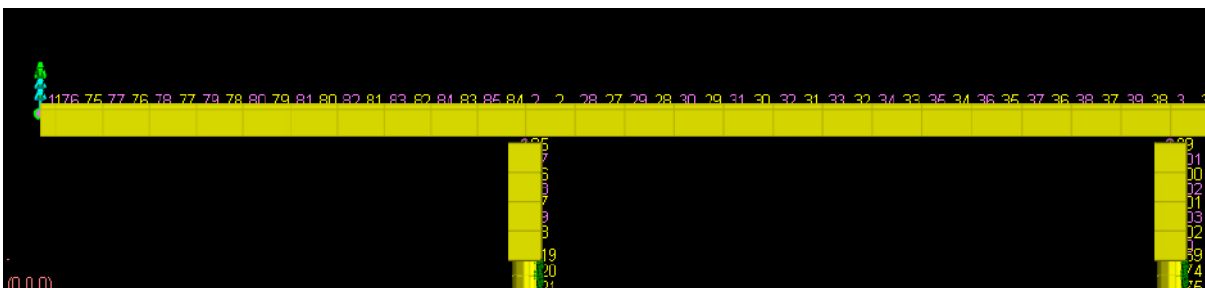
โดยตัวอย่างของแบบจำลองที่ได้ทำการสร้างและทำการวิเคราะห์หาค่าของ Natural Frequency แสดงดังรูปต่างๆดังนี้

ซึ่งหลังจากการปรับค่าของแบบจำลองสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) นั้น แสดงค่าของ Natural Frequency เท่ากับ 5.88 Hz โดยค่าของ Mode Shape เป็นการสั่นไหวในแนวดิ่ง (Vertical Translation in z direction) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ให้ค่าของ Natural Frequency เท่ากับ 6 Hz และมี Mode Shape เป็น Vertical Translation

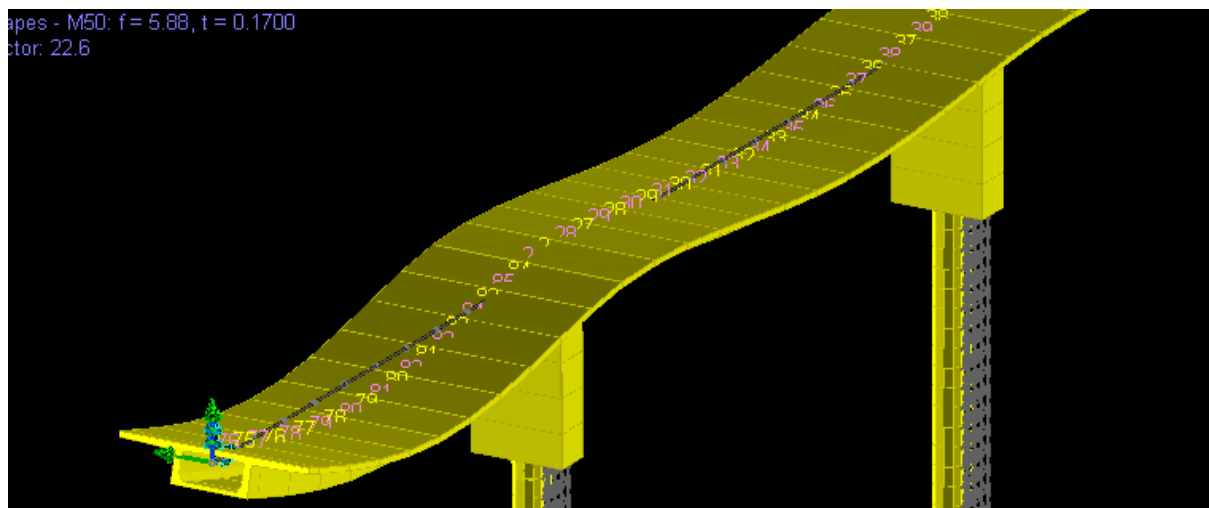
และสำหรับแบบจำลองของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) นั้นนั้น แสดงค่าของ Natural Frequency เท่ากับ 5.91 Hz โดยค่าของ Mode Shape เป็นการสั่นไหวในแนวดิ่ง (Vertical Translation in z direction) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ให้ค่าของ Natural Frequency เท่ากับ 6.003 Hz และมี Mode Shape เป็น Vertical Translation เช่นเดียวกัน



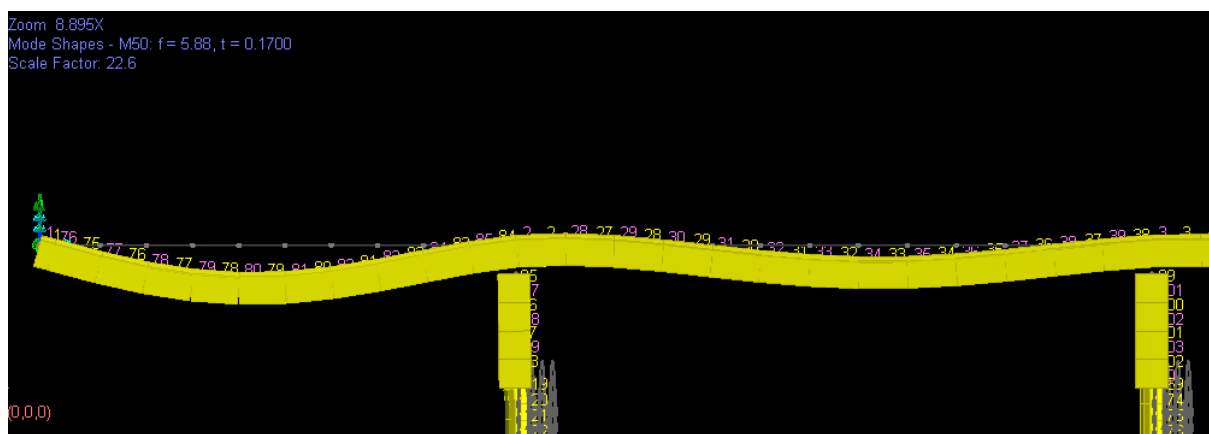
รูปที่ 6-25 แบบจำลองของ Box Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ (Finite Element Model) 3D View



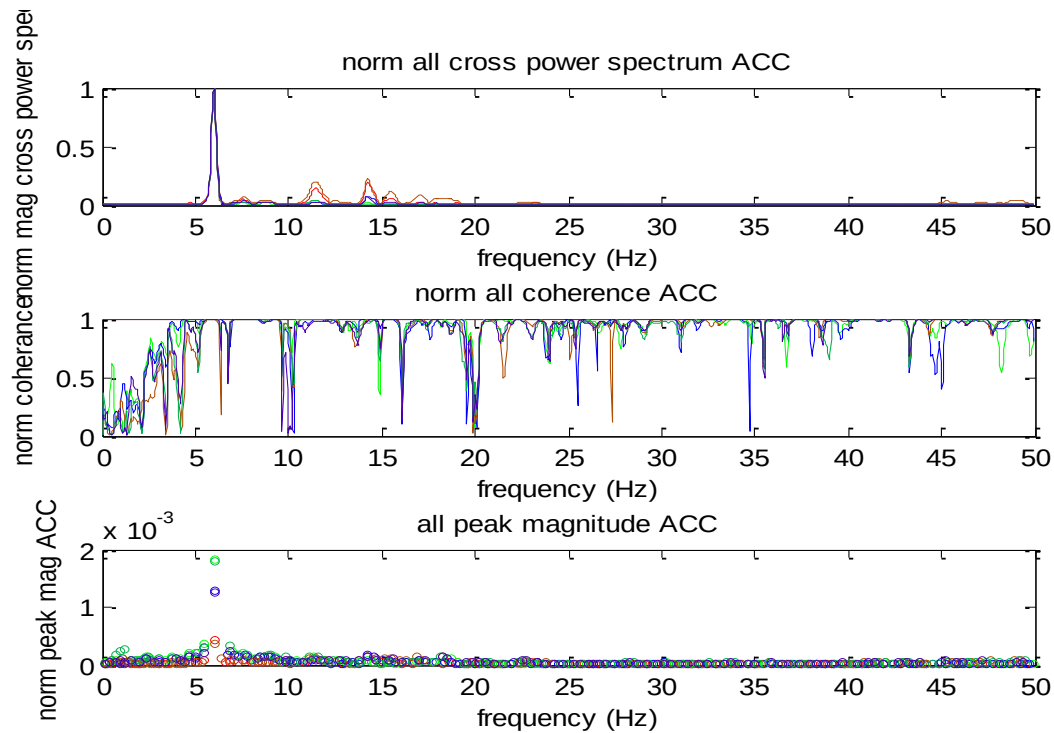
รูปที่ 6-26 แบบจำลองของ Box Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ (Finite Element Model) Elevation View



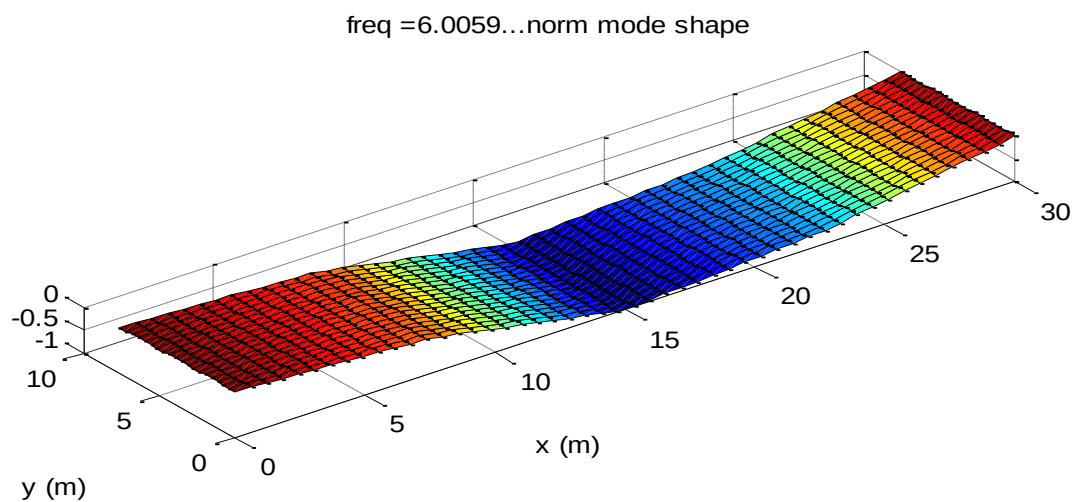
รูปที่ 6-27 Mode Shape ของ แบบจำลองของ Box Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
(Finite Element Model) Natural Frequency = 5.88 Hz (3D View)



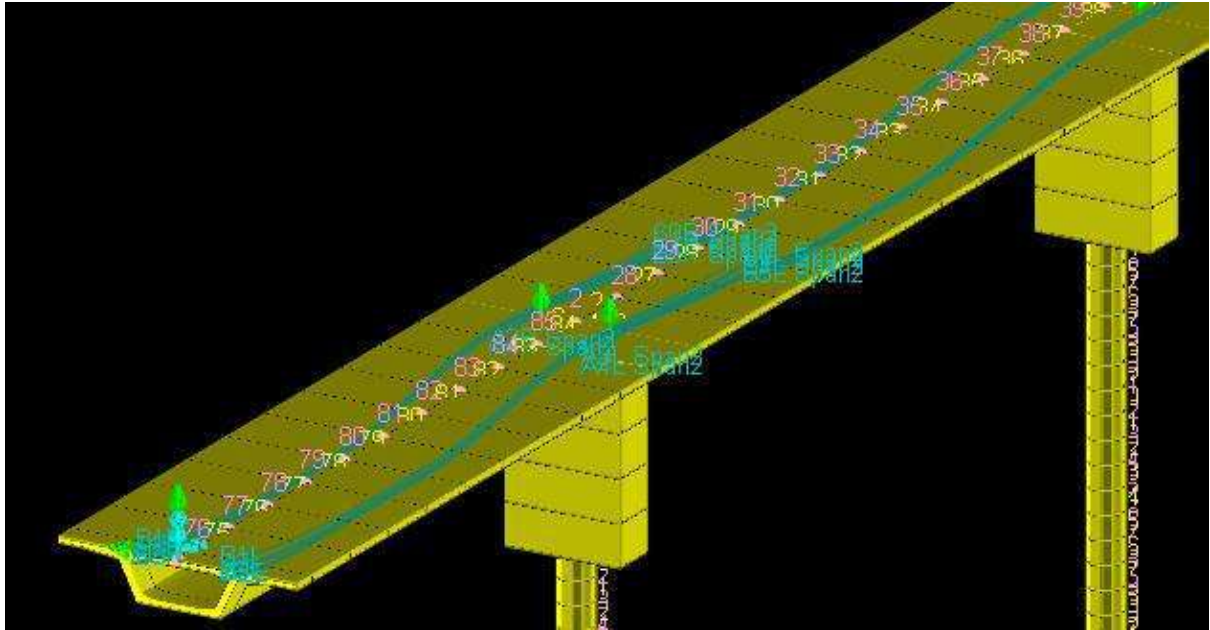
รูปที่ 6-28 Mode Shape ของ แบบจำลองของ Box Girder โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
(Finite Element Model) Natural Frequency = 5.88 Hz (Elevation View)



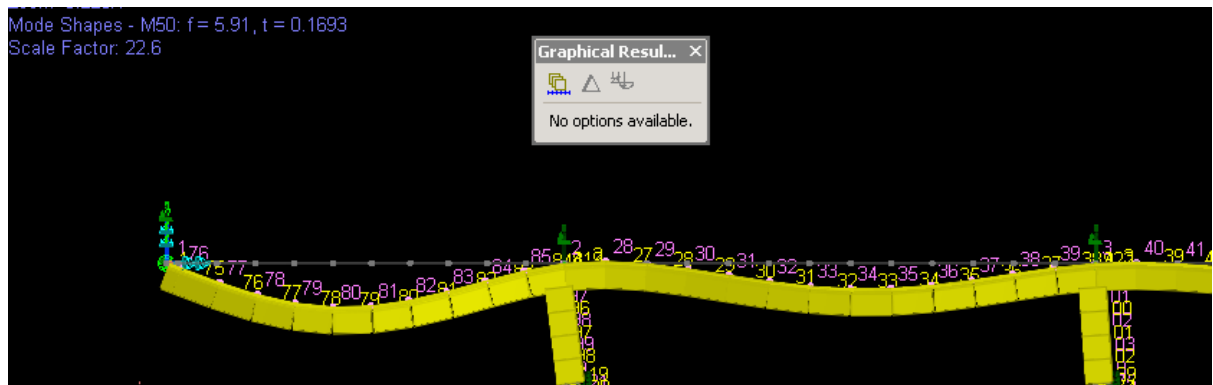
รูปที่ 6-29 ค่าของ Natural Frequency = 6.00 Hz (Field Test)



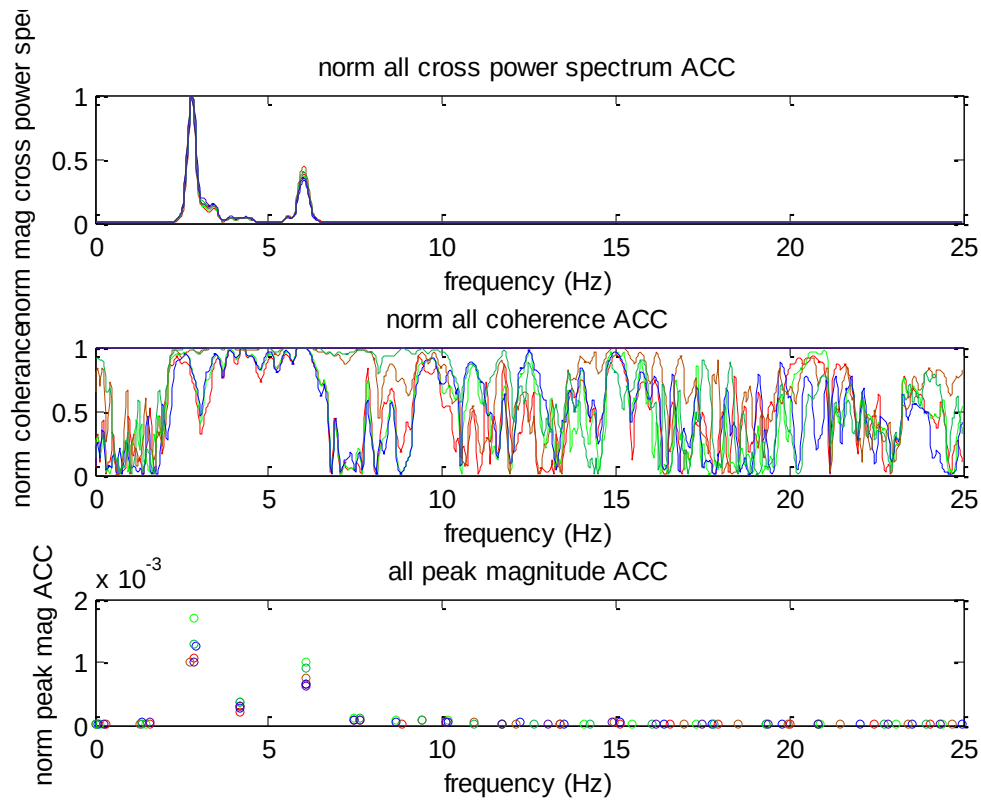
รูปที่ 6-30 ค่าของ Mode Shape ที่มีค่า Natural Frequency = 6.00 Hz (Field Test)



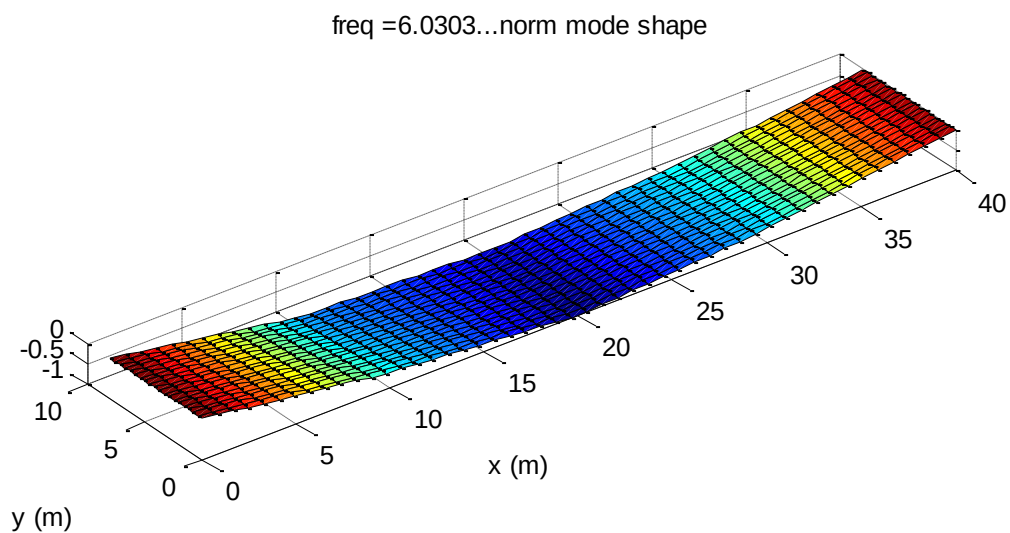
รูปที่ 6-31 แบบจำลองของ Box Girder ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
(Finite Element Model) 3D View



รูปที่ 6-32 Mode Shape ของ แบบจำลองของ Box Girder ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์
อีลิเมนต์ (Finite Element Model) Natural Frequency = 5.91 Hz (Elevation View)



รูปที่ 6-33 ค่าของ Natural Frequency = 6.00 Hz (Field Test)



รูปที่ 6-34 ค่าของ Mode Shape ที่มีค่า Natural Frequency = 6.03 Hz (Field Test)

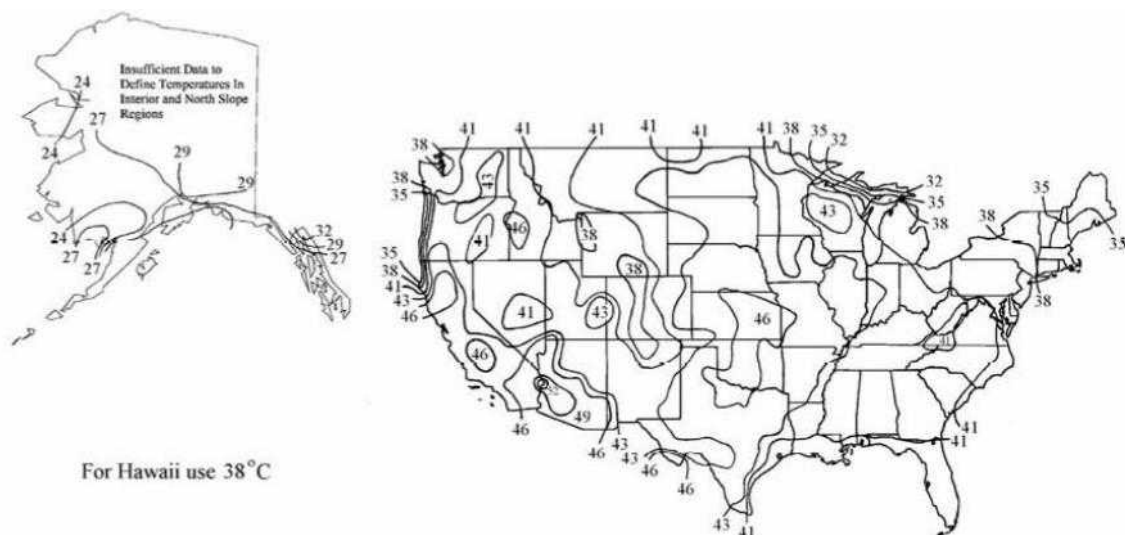
6.5 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์อุณหภูมิของหน้าตัดสะพาน

ในหัวข้อนี้นำเสนอหลักการและขั้นตอนการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวันที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวของ Temperature ที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นตลอดความลึกของคาน โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลให้เกิดความเค้นหรือความเครียดภายในหน้าตัดที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักได้แก่

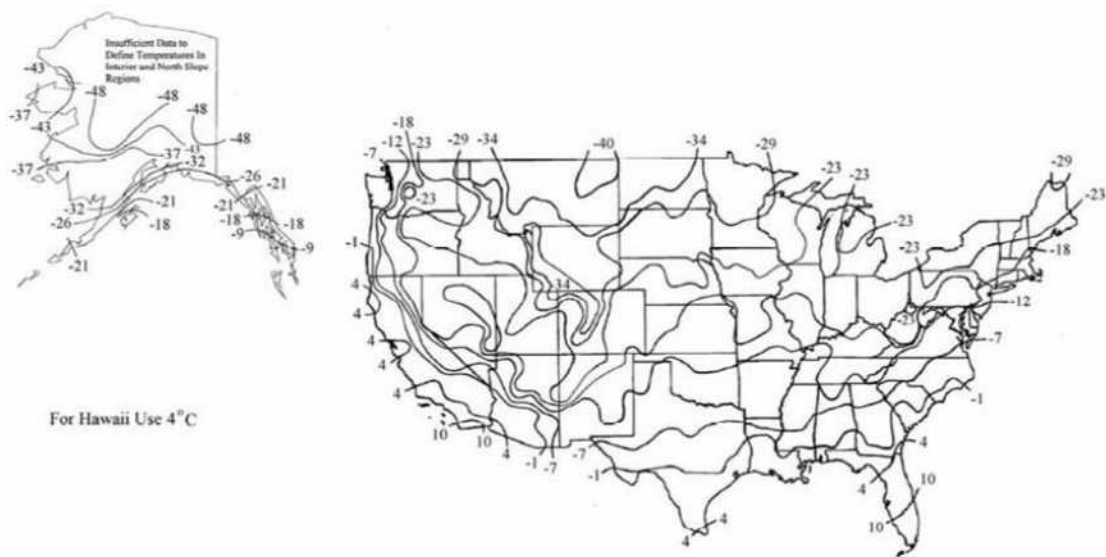
1. การคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวบนและล่างของหน้าตัดสะพาน
2. การคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความลึกของคาน
3. การวิเคราะห์ผลของ Nonlinear Temperature Gradient ต่อโครงสร้างสะพาน

ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวบนและล่างของหน้าตัดสะพาน โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้ 1) ค่าที่แนะนำจากคู่มือหรือมาตรฐานการออกแบบ 2) ค่าที่คำนวณจากพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากสิ่งแวดล้อม เช่น Solar Radiation ความชื้นสัมพัทธ์ กระแสลม และการพาความร้อนบริเวณพื้นผิวสะพาน เป็นต้น 3) ค่าที่ตรวจวัดจากภาคสนาม

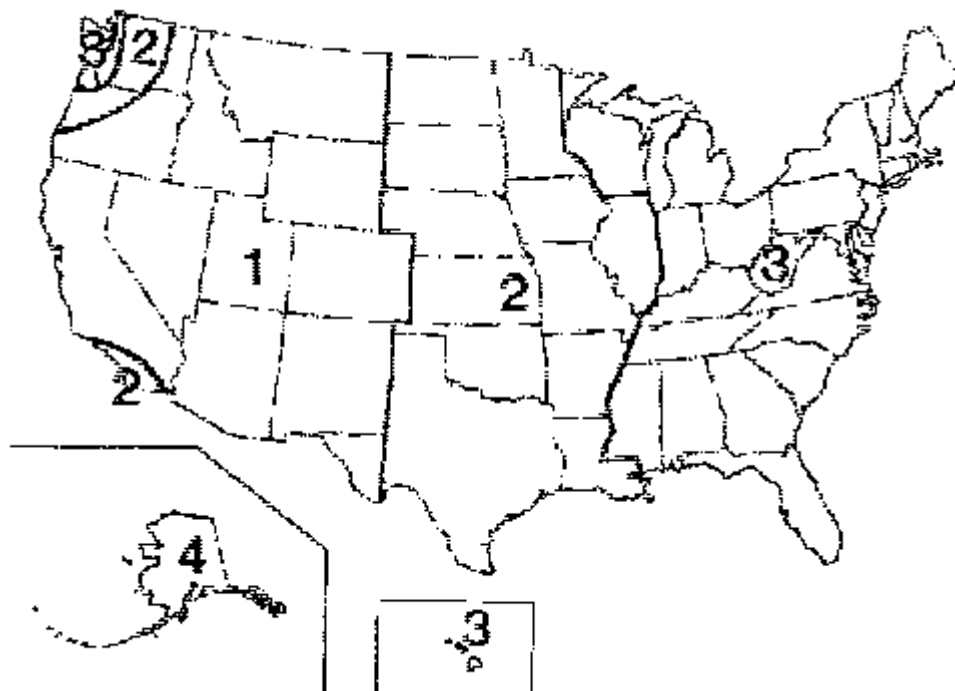
ตัวอย่างของค่าที่แนะนำจากมาตรฐาน AASHTO แสดงในรูปที่ 6-35 ถึงรูปที่ 6-39 โดยผู้ออกแบบจะต้องเลือกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและผิวล่างของสะพาน ซึ่งสะพานแต่ละประเภทจะมีลักษณะของอุณหภูมิที่ต่างกัน นอกจากนั้นที่ตั้งของสะพานจะมีส่วนสำคัญที่จะใช้กำหนดค่าของอุณหภูมิดังนั้นมาตรฐาน AASHTO จึงได้ให้ค่าของอุณหภูมิเป็นลักษณะเส้น Contour ครอบคลุมทั้งประเทศสหรัฐอเมริกา นอกจากนั้นกรณีที่ใช้คำนวณหาค่าของ Nonlinear Temperature Gradient ตลอดหน้าตัดของสะพาน มาตรฐาน AASHTO จะระบุค่าของ Temperature Max และ Min ที่สอดคล้องกับค่าของ Solar Radiation ที่ขึ้นกับพื้นที่ในประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 6-35 Contour Maps for $T_{MaxDesign}$ for Concrete Girder Bridges with Concrete Decks.



รูปที่ 6-36 Contour Maps for $T_{MinDesign}$ for Concrete Girder Bridges with Concrete Decks.

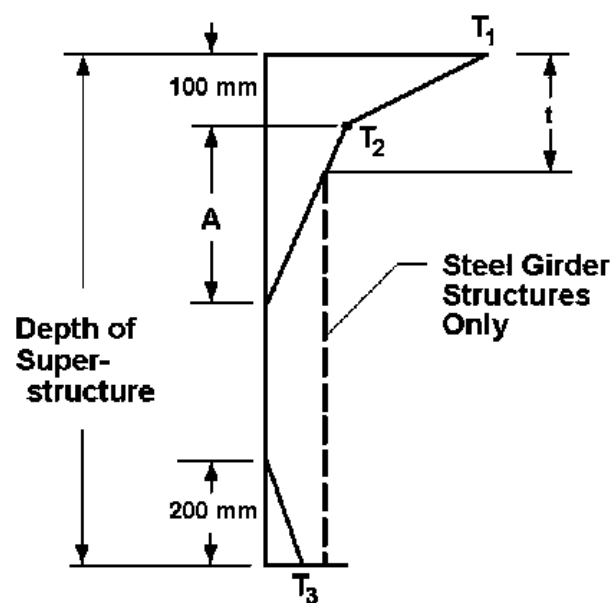


รูปที่ 6-37 Solar Radiation Zones for the United States.

Table: Basis for Temperature Gradients.

Zone	T_1 (°C)	T_2 (°C)
1	30	7.8
2	25	6.7
3	23	6.0
4	21	5.0

รูปที่ 6-38 Basis for Temperature Gradients.



รูปที่ 6-39 Positive Vertical Temperature Gradient in Concrete and Steel Superstructures.

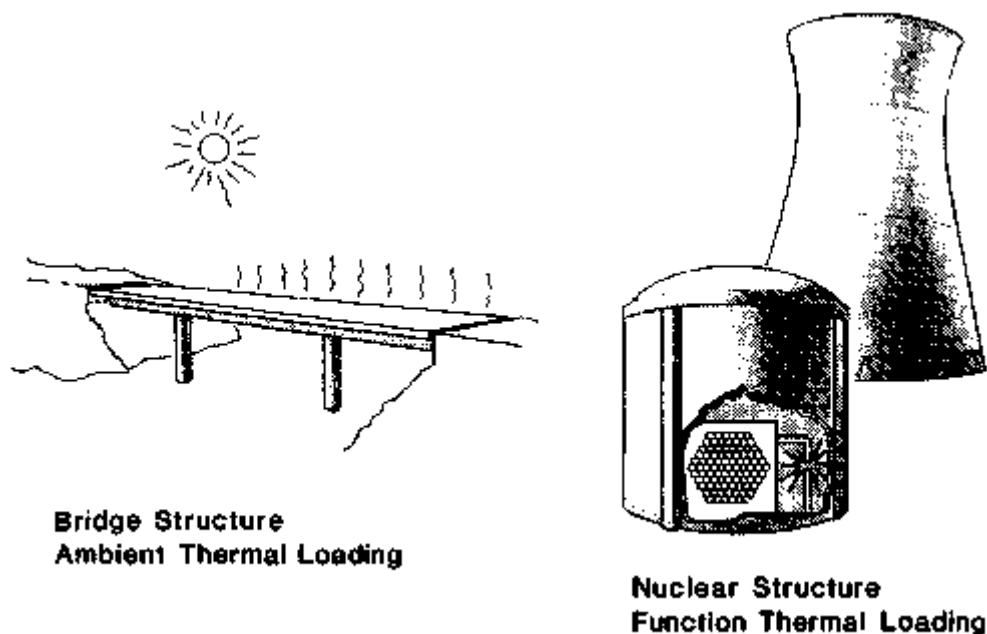
สำหรับการหาอุณหภูมิที่บริเวณผิวบนและล่างของสะพานโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดจากสิ่งแวดล้อมนั้น
สามารถดำเนินการตามขั้นตอนที่เสนอโดย

โดยในการหาค่าของอุณหภูมิที่ผิวบนและล่างของสะพานหรือโครงสร้างอื่นๆ หากสามารถติดตั้งอุปกรณ์วัด
อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ในภาคสนามได้จะได้ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความจริงที่สุด

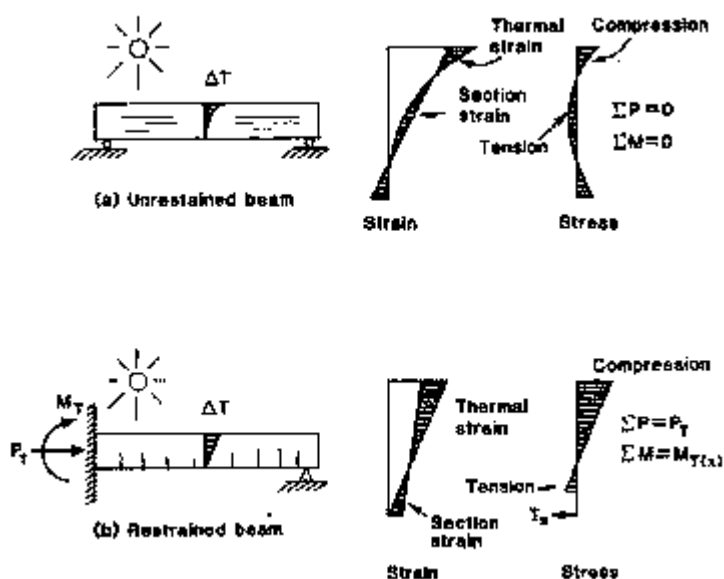
สำหรับการประเมินโครงสร้างสะพานดินในโครงการนี้จะพิจารณาใช้ค่าของอุณหภูมิที่ตรวจวัดบริเวณผิวบนและผิวล่าง
ของสะพานร่วมกับการวิเคราะห์แบบไฟไนต์อีลิเมนต์ที่เป็นลักษณะ Heat Transfer ในการหาค่าของการกระจายตัวของ
Temperature เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นในสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่าง
วันต่อไป

การวิเคราะห์การกระจายตัวของ Temperature ในหน้าตัดของสะพาน โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ

โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรืออัดแรงเมื่ออยู่ภายใต้ความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเวลาต่างๆ เช่น โครงสร้างสะพานอยู่ภายใต้การแผ่ความร้อนของดวงอาทิตย์ โครงสร้างกันสาร์กัมมันตภาพรังสีของ Nuclear Reactor โครงสร้างเหล่านี้จะต้องอยู่ในสภาพการถ่ายเทอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันระหว่างสภาพภายนอกโครงสร้างและภายในเนื้อโครงสร้างซึ่งผลของการถ่ายเทอุณหภูมิภายในเนื้อโครงสร้างจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ในบางกรณีเป็นลักษณะเชิงเส้น และส่วนใหญ่เป็นในลักษณะไม่เชิงเส้น



รูปที่ 6-40 โครงสร้างภายใต้อุณหภูมิภายนอก



รูปที่ 6-41 ผลของความเครียด ความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดหน้าตัดคาน

ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดหน้าตัดของโครงสร้างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Temperature Distribution) ค่าของการยืดหดตัวของ Fiber บนหน้าตัดเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ไม่เชิงเส้นจะไม่เป็นเชิงเส้น Nonlinear Strain อย่างไรก็ตามเนื่องจากสุดท้าย Net Strain Distribution ตลอดหน้าตัดของคานจะต้องเป็น Linear Strain Distribution ดังนั้นในหน้าตัดของโครงสร้างใดๆ จะเกิดแรงภายในที่เรียกว่า Self Equilibrating Forces เพื่อให้ Net Strain บนหน้าตัดเป็น Linear Strain Distribution ซึ่งผลของ Self Equilibrating Forces นี้จะทำให้ ค่าของ Net Stress บนหน้าตัดไม่เป็นเชิงเส้นด้วย อย่างไรก็ตามหากโครงสร้างมีฐานรองรับเป็นลักษณะ Determinate Structure แรงรวมเนื่องจาก Nonlinear Temperature Distribution ภายนอกของโครงสร้างยังคงเป็นศูนย์หรือโดยรวมโครงสร้างยังคงเคลื่อนตัวได้โดยไม่มีการยึดรั้ง

สำหรับกรณีที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดหน้าตัดเป็นเชิงเส้น (Linear Temperature Distribution) แต่โครงสร้างมีฐานรองรับเป็นลักษณะ Indeterminate Structure ผลของแรงภายนอกจะทำให้เกิดแรงที่ฐานรองรับไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปข้างต้น

จากพฤติกรรมข้างต้นจะเห็นว่าการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างใดๆ หรือโครงสร้างสะพานจะต้องทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุของโครงสร้างก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการแก้สมการ Heat Transfer ดังแสดงข้างล่างนี้

Heat transfer is governed by similar equation

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (C_T (T - T_{ref})) = C_T \frac{\partial T}{\partial t} = -div(J_T)$$

where

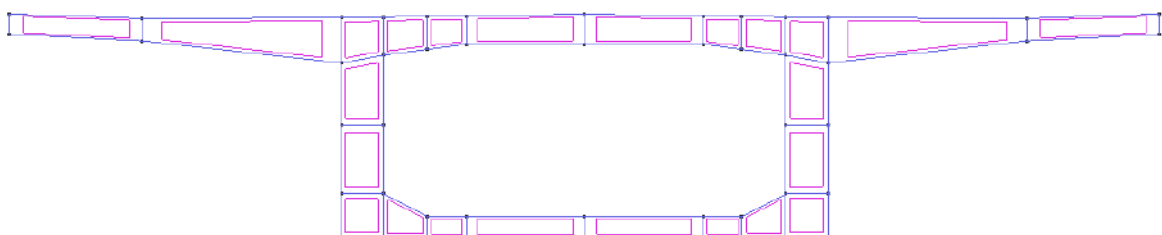
Q is total amount of energy in a unit volume [J/m^3]

C_T is heat capacity [$J/(K.m^3)$],

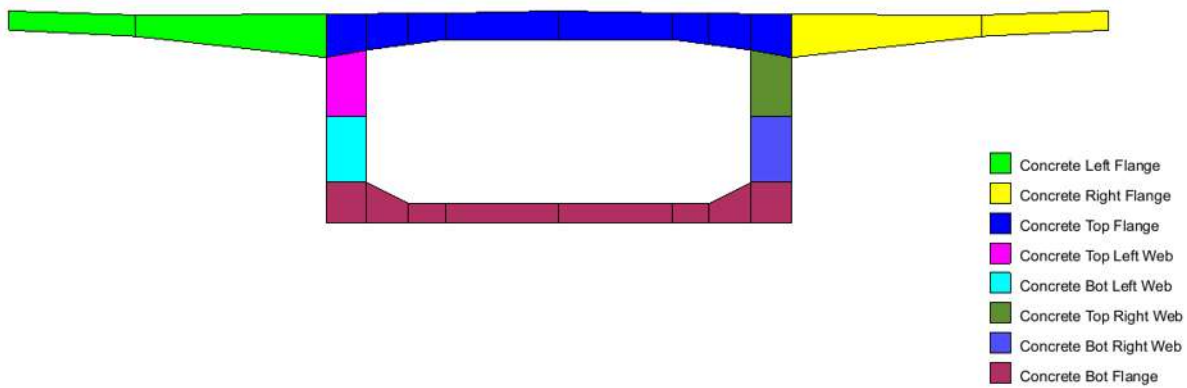
J_T is heat flux [$J/(day.m^2)$].

หลังจากการแก้สมการ Heat Transfer ที่ขึ้นกับคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ ค่าของอุณหภูมิภายนอกของโครงสร้างแล้ว เมื่อดำเนินการหาค่าของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่หน้าตัดใดๆ จะทำให้สามารถได้ค่าของกราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดหน้าตัดของโครงสร้างเพื่อนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป

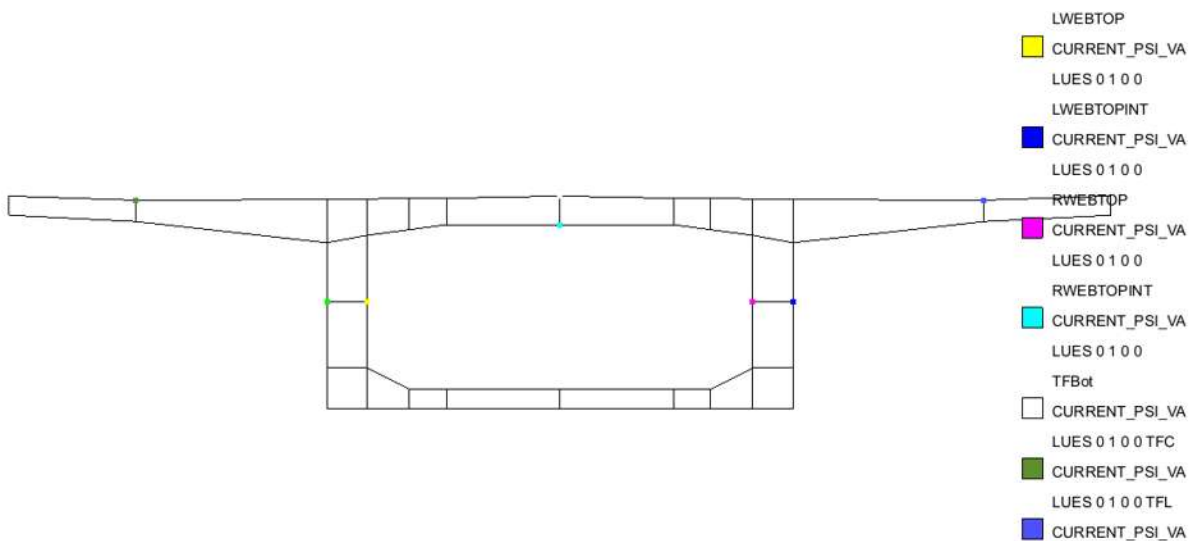
การสร้างแบบจำลองของหน้าตัดสะพานเพื่อการวิเคราะห์ Temperature



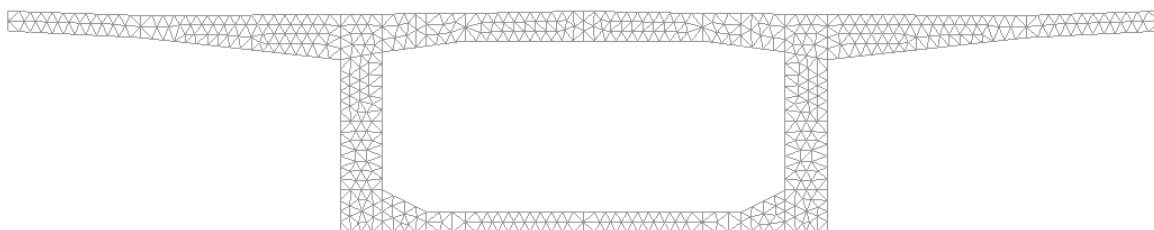
รูปที่ 6-42 รูปแสดง Macro Element เพื่อสร้างแบบจำลอง Box Girder



รูปที่ 6-43 รูปแสดง ประเภทของ Material เพื่อพิจารณา Initial Temperature



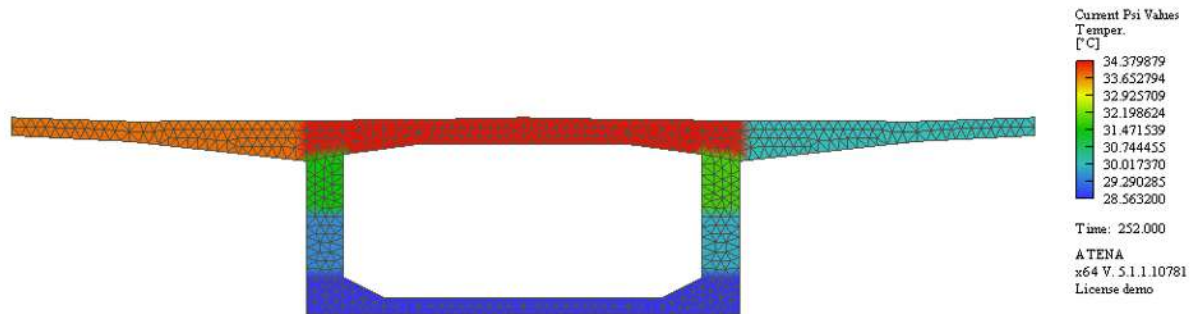
รูปที่ 6-44 รูปแสดง Monitoring Point เพื่อพิจารณา การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 6-45 รูปแสดง Mesh ใน Box Girder เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

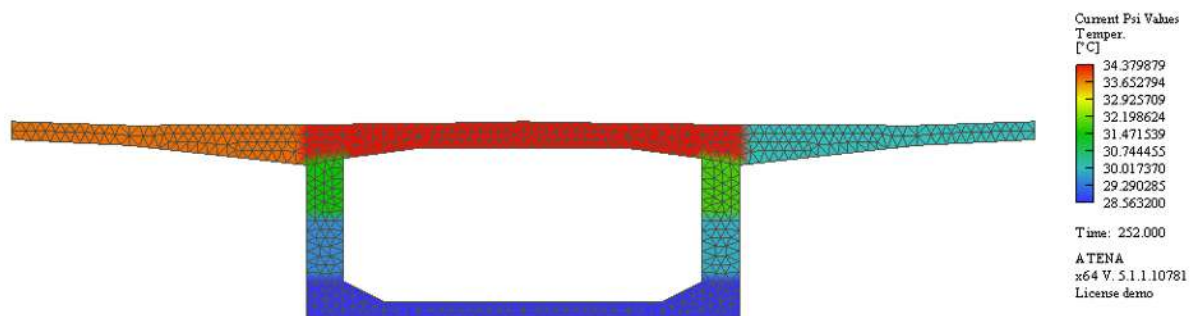
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของ Temperature

- ที่เวลาเริ่มต้น (0.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



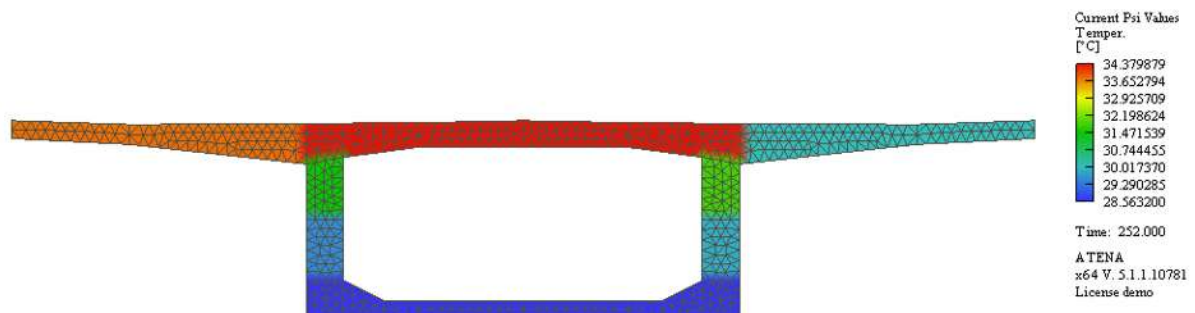
รูปที่ 6-46 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (1.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



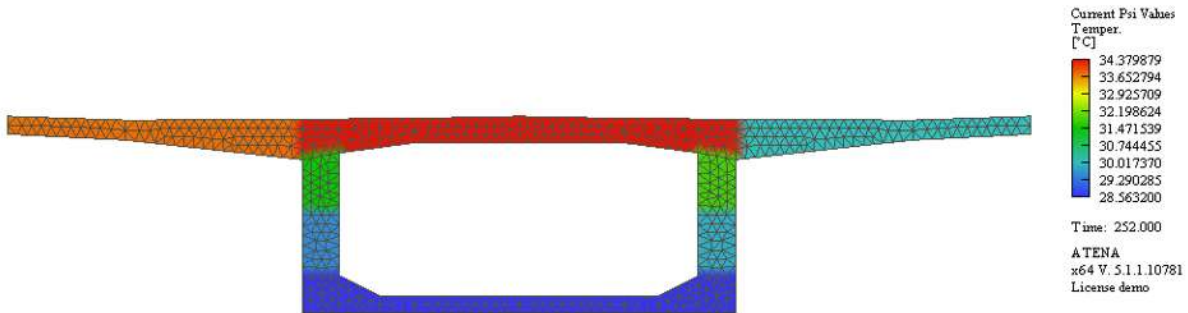
รูปที่ 6-47 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (2.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



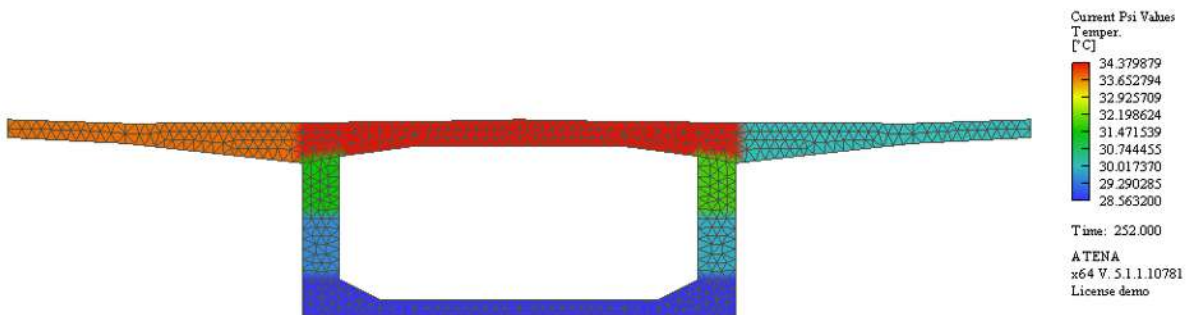
รูปที่ 6-48 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (3.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



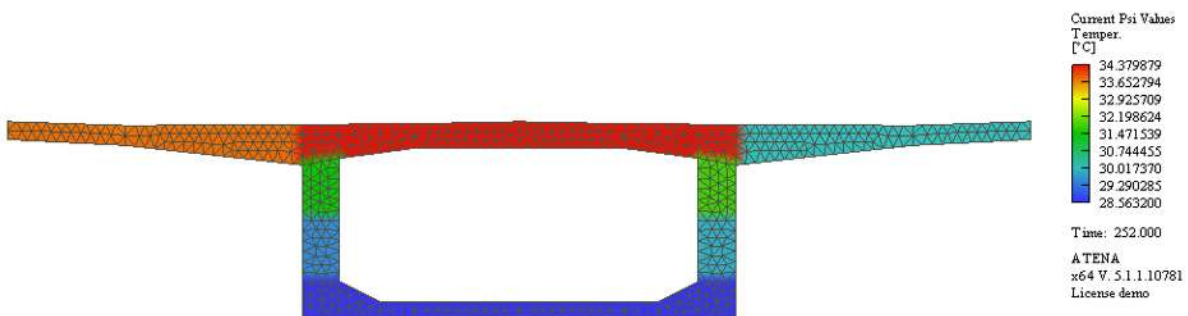
รูปที่ 6-49 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (4.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



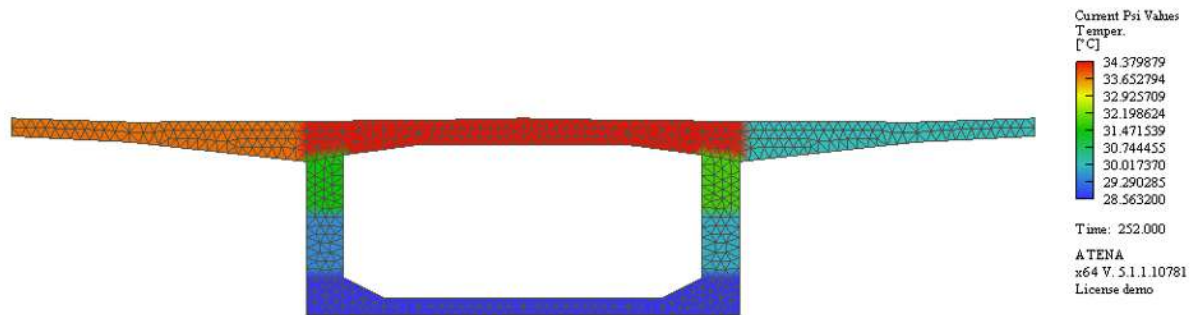
รูปที่ 6-50 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (5.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



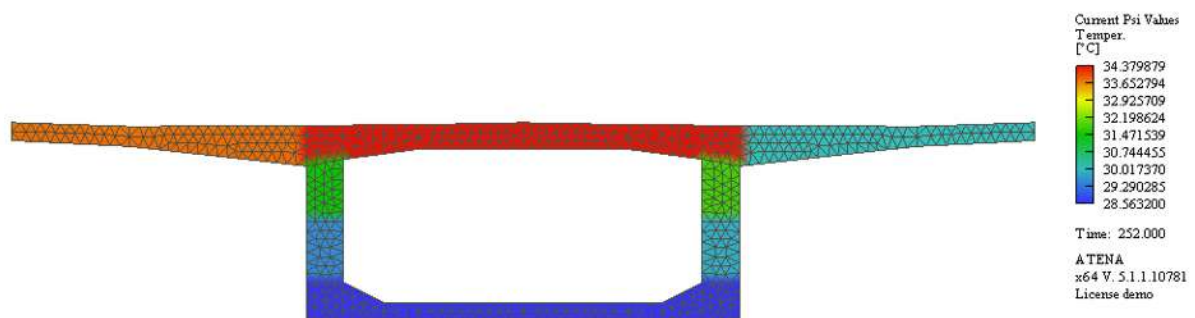
รูปที่ 6-51 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (6.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



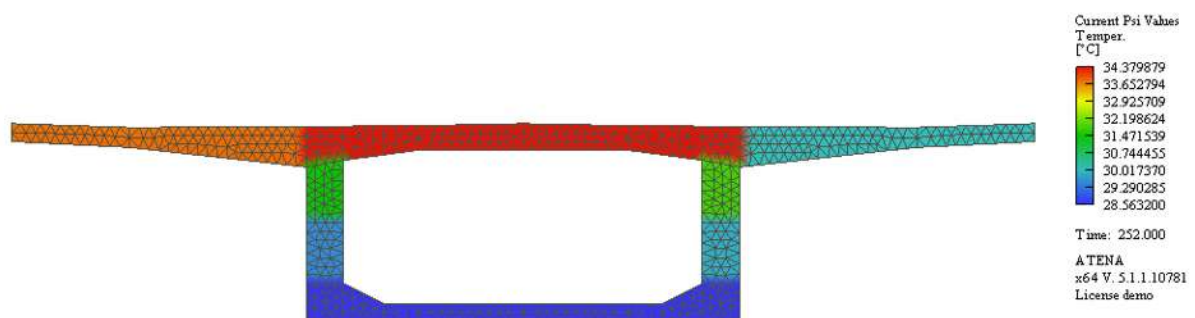
รูปที่ 6-52 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (7.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



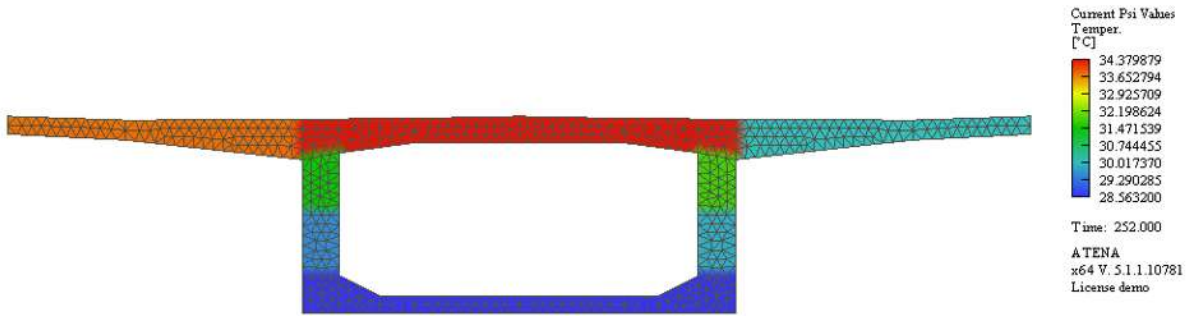
รูปที่ 6-53 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (8.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)



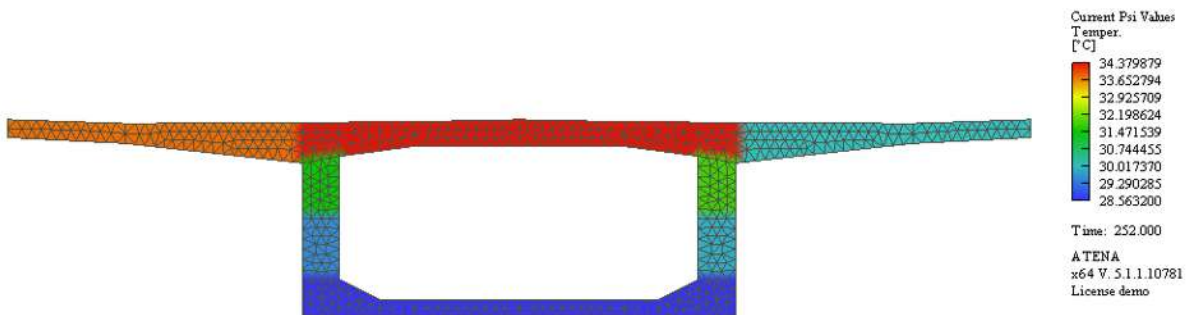
รูปที่ 6-54 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (9.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)



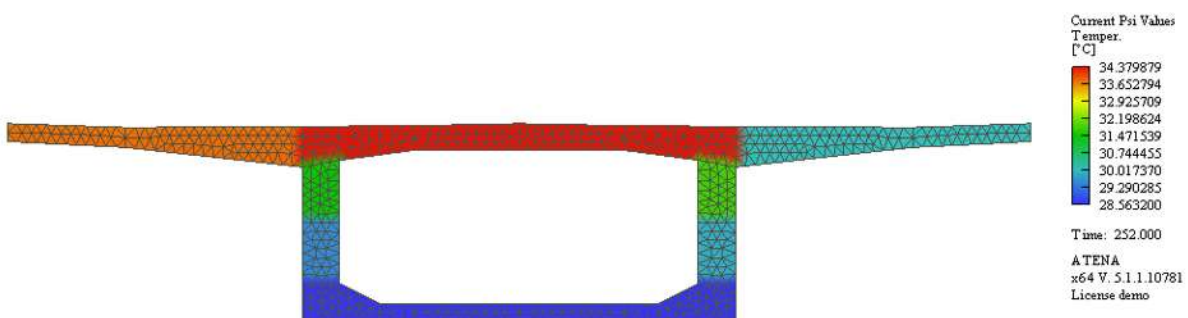
รูปที่ 6-55 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (10.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)

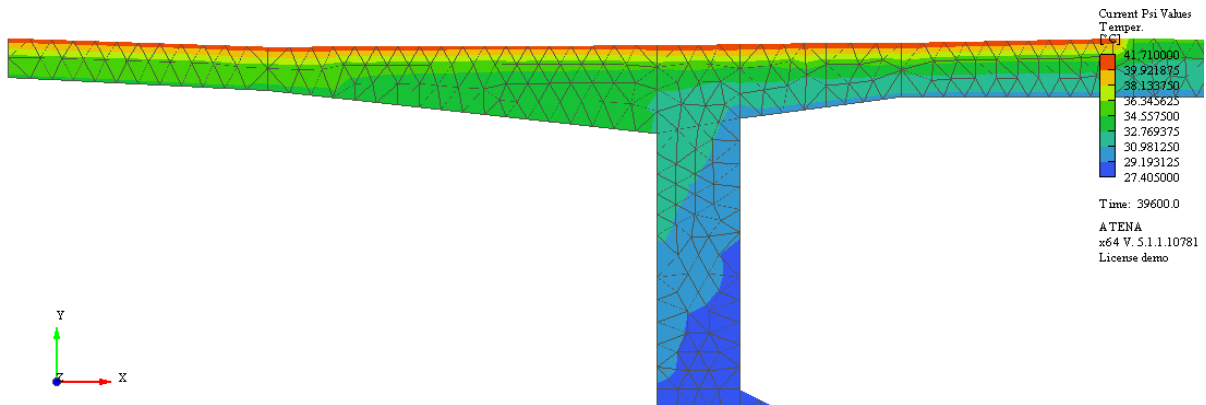


รูปที่ 6-56 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (11.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)

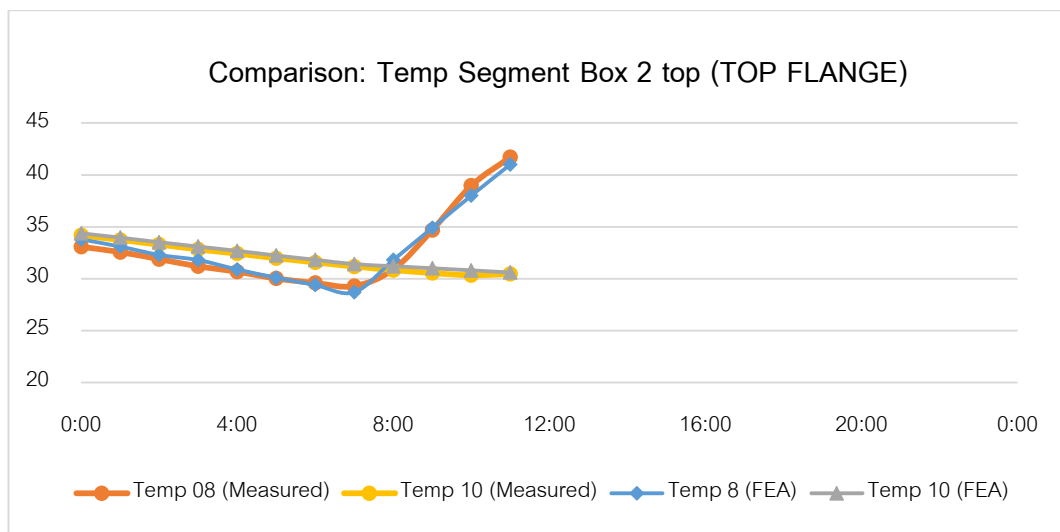


รูปที่ 6-57 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

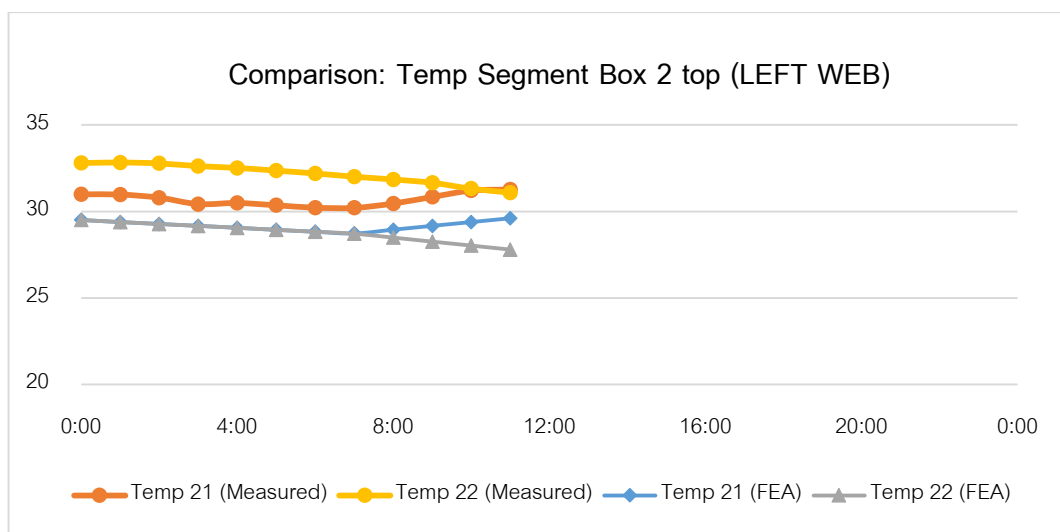


รูปที่ 6-58 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณปีกและ Flange ของ Box Girder

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดการกระจายตัวของ Temperature



รูปที่ 6-59 รูปแสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ Top Flange:Box Girder



รูปที่ 6-60 รูปแสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ Left Web:Box Girder

6.6 การวิเคราะห์แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในหน้าตัดสะพานเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient

การวิเคราะห์ผลเนื่องจากอุณหภูมิ (Nonlinear Temperature Gradient) ในแนวยาวของสะพาน

การวิเคราะห์ผลของ Nonlinear Temperature Gradient ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

3.12.3 Temperature Gradient

For the purpose of this Article, the country shall be subdivided into zones as indicated in Figure 1. Positive temperature values for the zones shall be taken as specified for various deck surface conditions in Table 1. Negative temperature values shall be obtained by multiplying the values specified in Table 1 by -0.30 for plain concrete decks and -0.20 for decks with an asphalt overlay.

The vertical temperature gradient in concrete and steel superstructures with concrete decks may be taken as shown in Figure 2.

Dimension A in Figure 2 shall be taken as:

- For concrete superstructures that are 400 mm or more in depth—300 mm.
- For concrete sections shallower than 400 mm—100 mm less than the actual depth
- For steel superstructures—300 mm and the distance t shall be taken as the depth of the concrete deck

Temperature value T_3 shall be taken as 0°C , unless a site-specific study is made to determine an appropriate value, but it shall not exceed 3°C .

Where temperature gradient is considered, internal stresses and structure deformations due to both positive and negative temperature gradients may be determined in accordance with the provisions of Article 4.6.6.

C3.12.3

Temperature gradient is included in various load combinations in Table 3.4.1-1. This does not mean that it need be investigated for all types of structures. If experience has shown that neglecting temperature gradient in the design of a given type of structure has not lead to structural distress, the Owner may choose to exclude temperature gradient. Multibeam bridges are an example of a type of structure for which judgment and past experience should be considered.

Redistribution of reactive loads, both longitudinally and transversely, should also be calculated and considered in the design of the bearings and substructures.

The temperature gradient given herein is a modification of that proposed in Imbsen et al. (1985), which was based on studies of concrete superstructures. The addition for steel superstructures is patterned after the temperature gradient for that type of bridge in the Australian bridge specifications (AUSTROADS 1992).

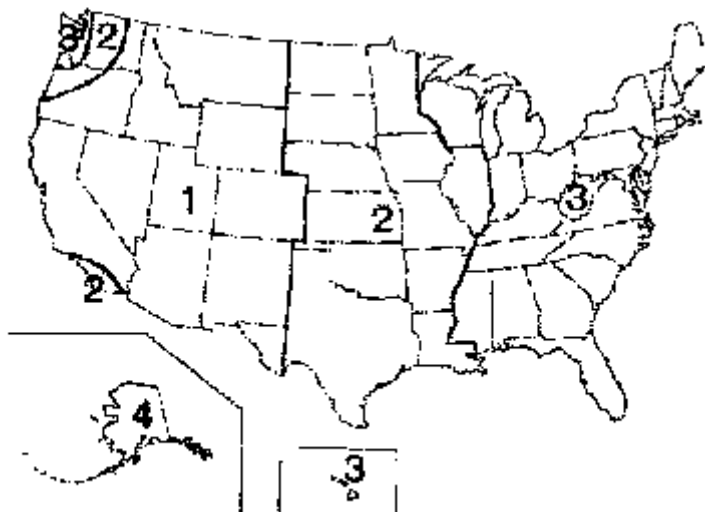
The data in Table 1 does not make a distinction regarding the presence or lack of an asphaltic overlay on decks. Field measurements have yielded apparently different indications concerning the effect of asphalt as an insulator or as a contributor (Spring 1997). Therefore, any possible insulating qualities have been ignored herein.

The temperatures given in Table 1 form the basis for calculating the change in temperature with depth in the cross-section, not absolute temperature.

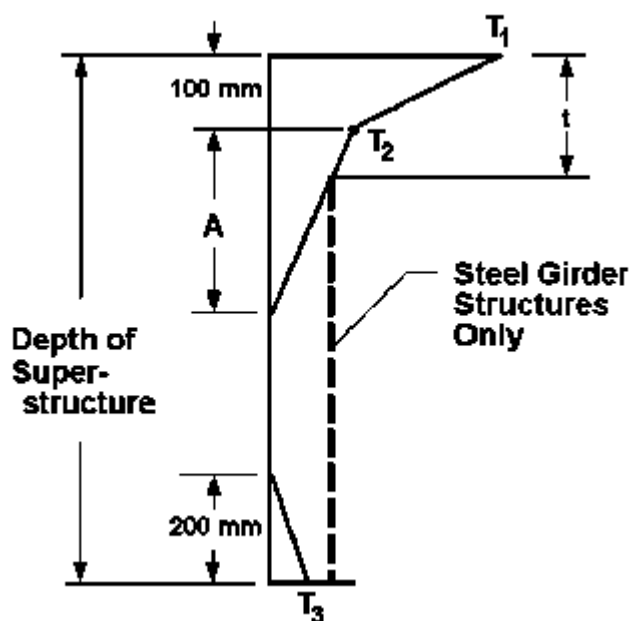
รูปที่ 6-61 Temperature Gradient ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

Table: Basis for Temperature Gradients.

Zone	T_1 (°C)	T_2 (°C)
1	30	7.8
2	25	6.7
3	23	6.0
4	21	5.0

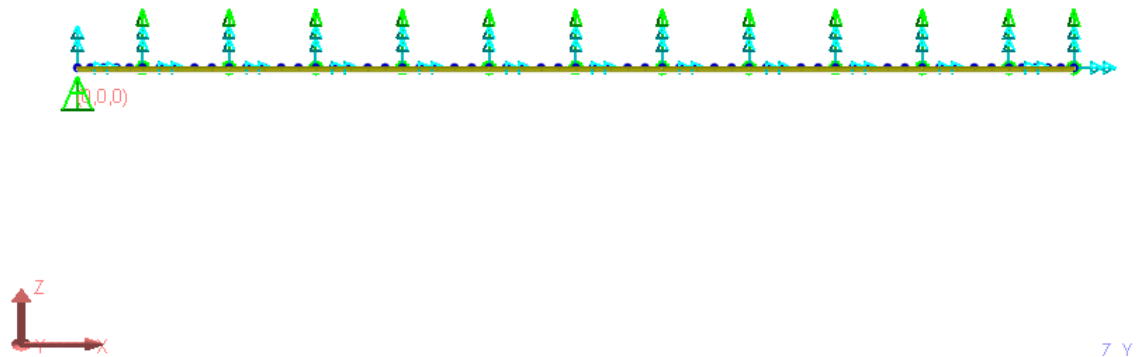


รูปที่ 6-62 Solar Radiation Zones for the United States.

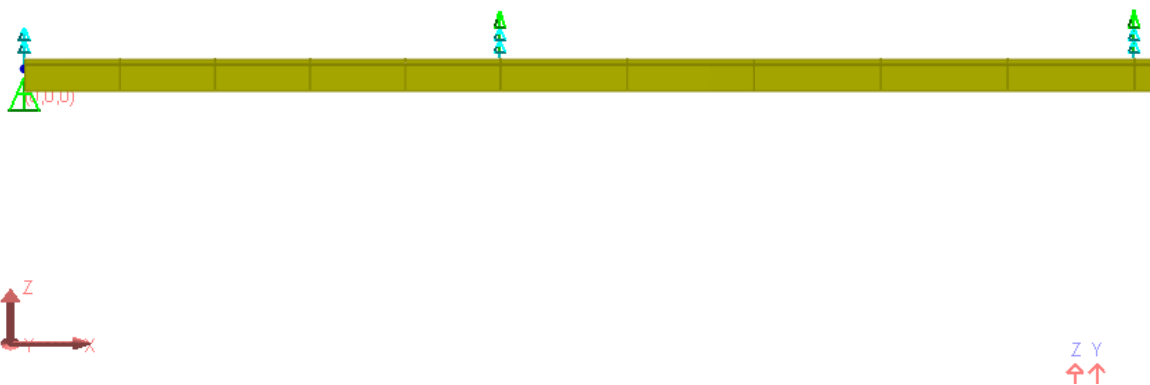


รูปที่ 6-63 Positive Vertical Temperature Gradient in Concrete and Steel Superstructures.

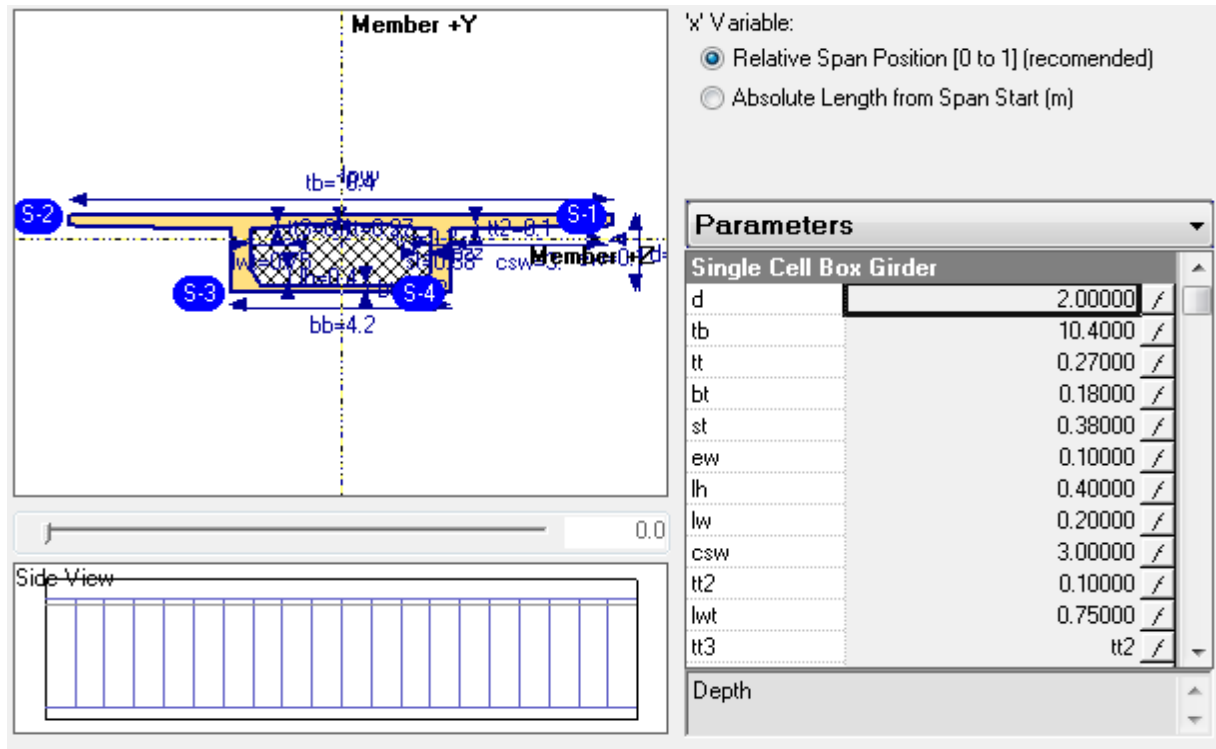
แบบจำลองสะพานตามแนวยาวโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



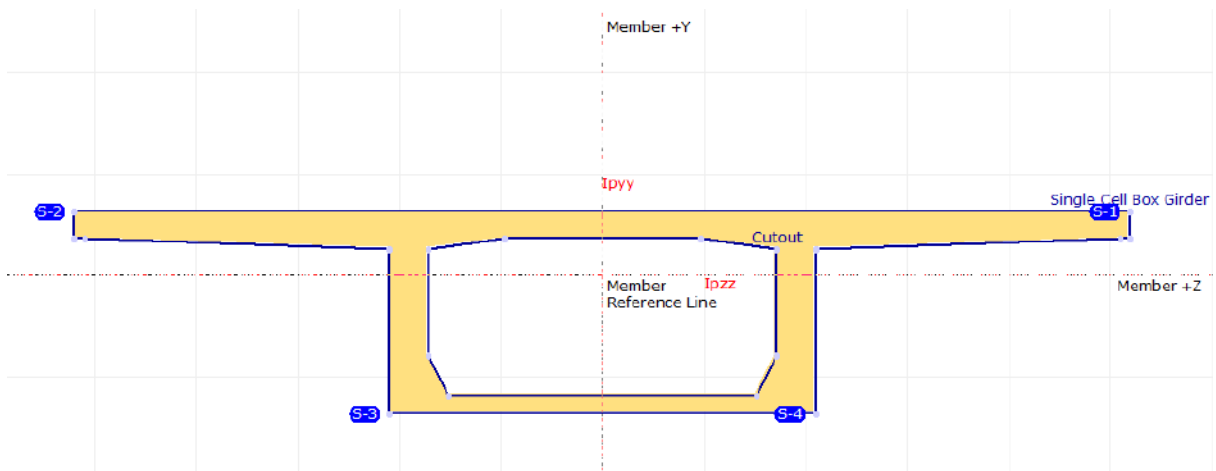
รูปที่ 6-64 รูปแบบจำลอง Frame Element ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามแนวยาว



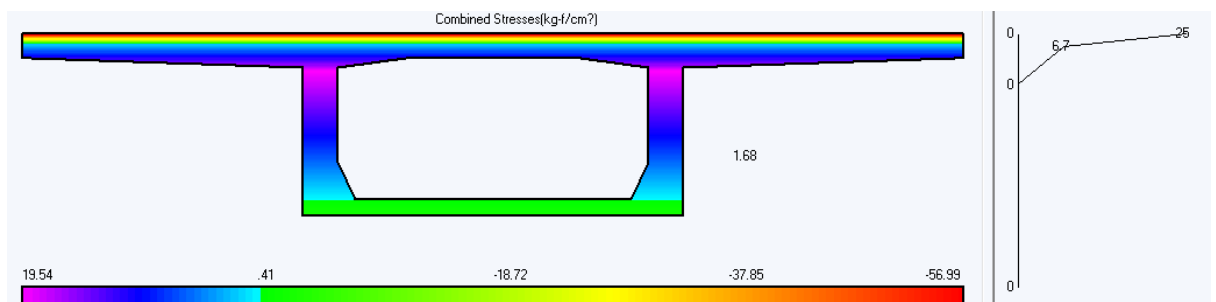
รูปที่ 6-65 รูปแบบจำลอง Frame Element ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามแนวยาว (End Span+ Interior Span)



รูปที่ 6-66 หน้าตัดสะพาน Box Girder ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง

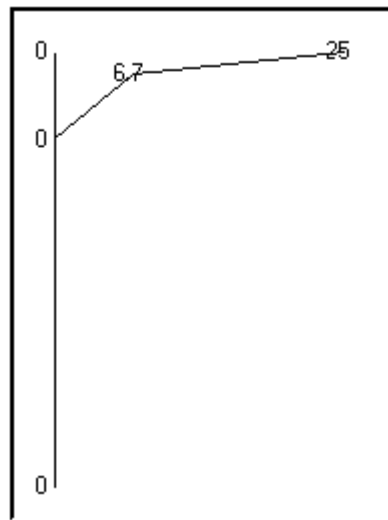


รูปที่ 6-67 หน้าตัดสะพาน Box Girder ฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง
(Standard Segment)



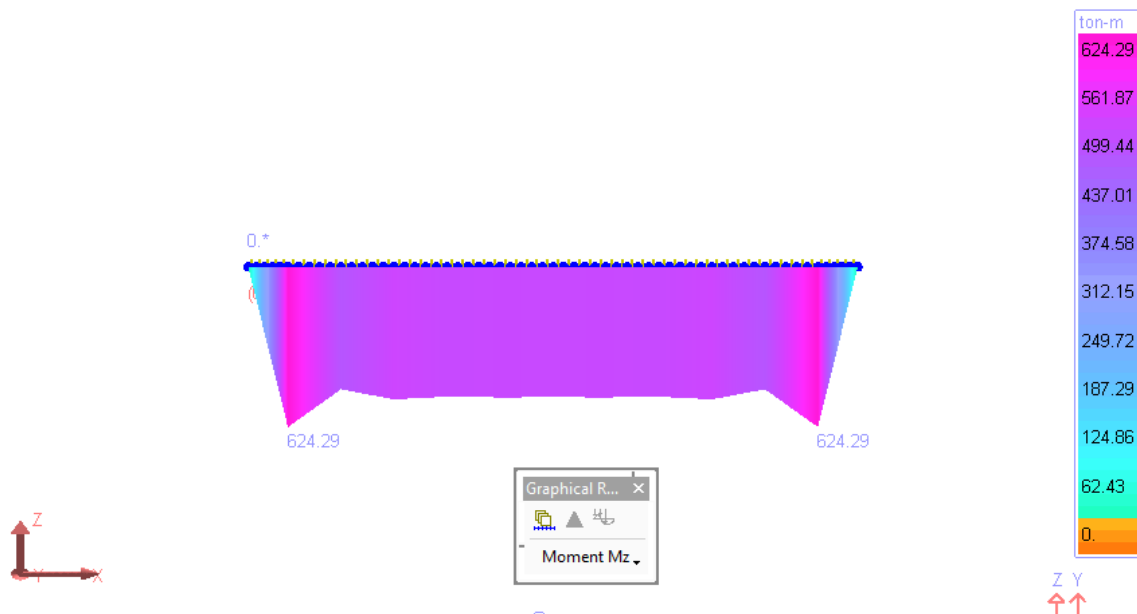
รูปที่ 6-68 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว

การวิเคราะห์ผลเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient (AASHTO LRFD) ZONE 2

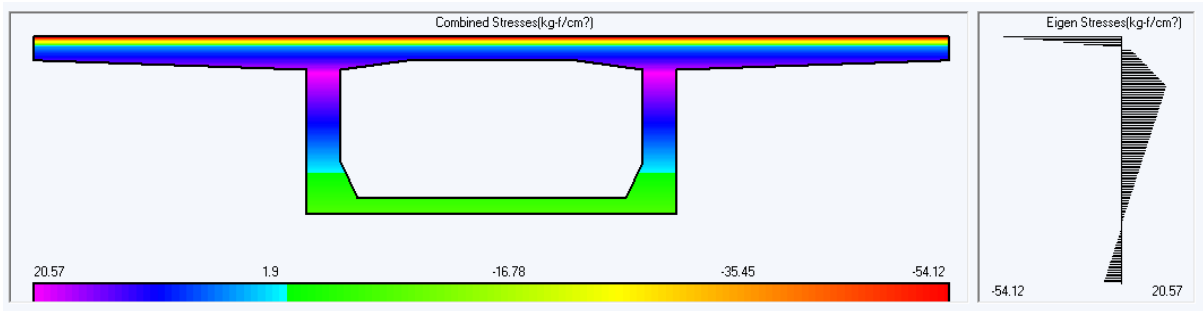


รูปที่ 6-69 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (AASHTO ZONE2)

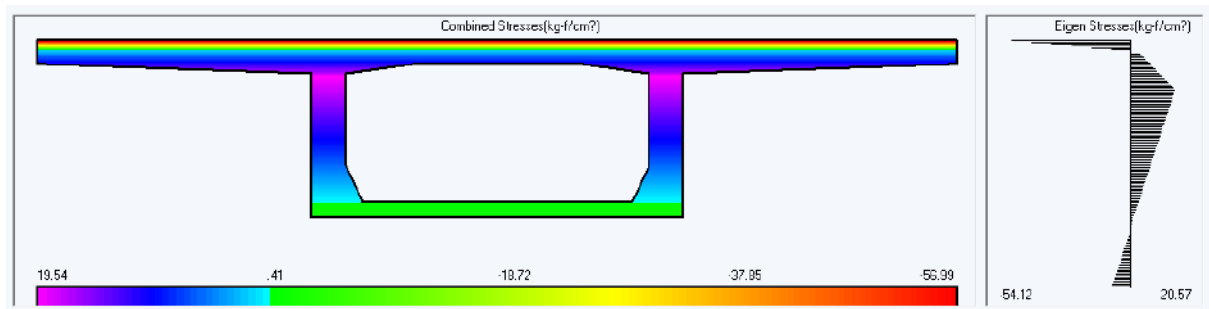
Zoom 1.000X
 Member Forces - Moment Mz - TempRiseZone2



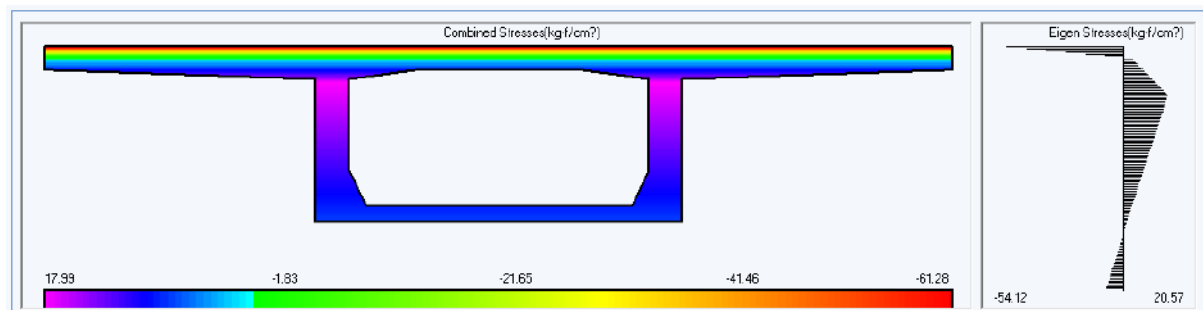
รูปที่ 6-70 ค่าของ Moment Mz เนื่องจาก Temperature Gradient (AASHTO ZONE2)



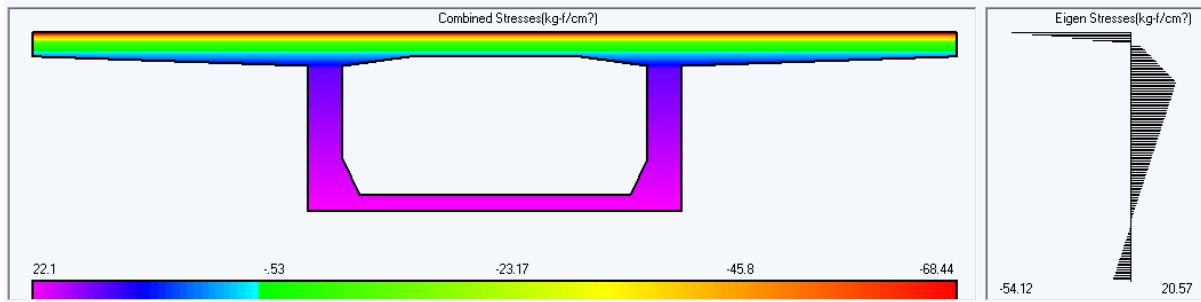
รูปที่ 6-71 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD) at 0 m from Abutment



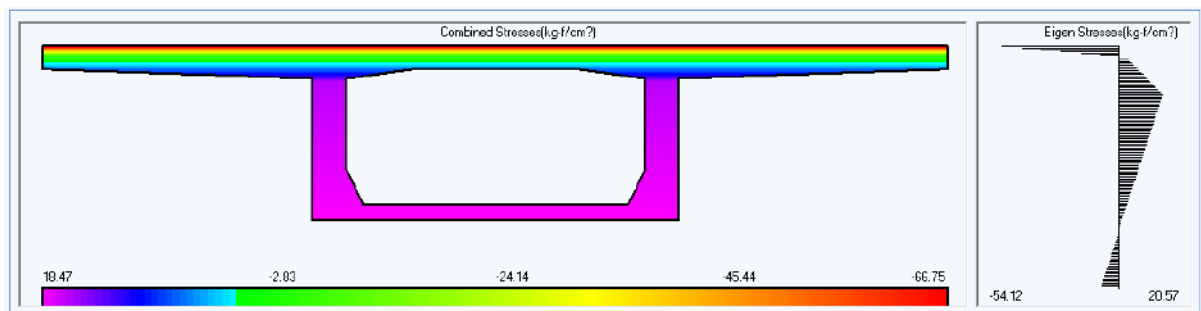
รูปที่ 6-72 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD) at 6 m from Abutment



รูปที่ 6-73 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD) at 9 m from Abutment



รูปที่ 6-74 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
at 30 m from Abutment

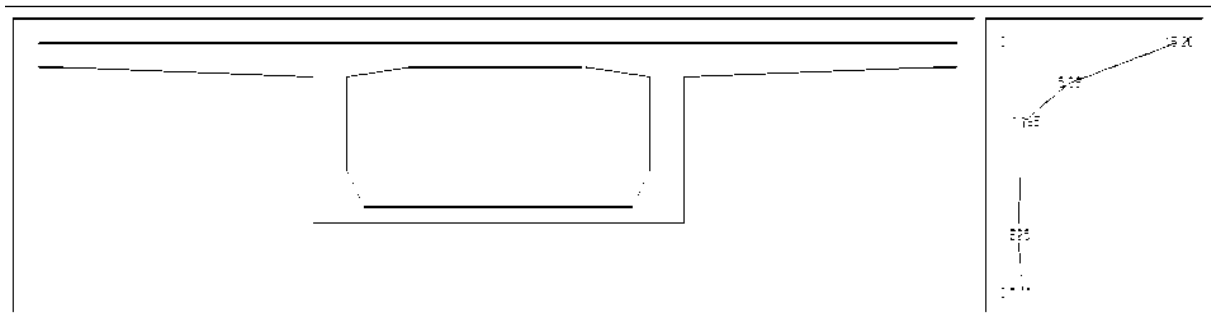


รูปที่ 6-75 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
at 49 m from Abutment



รูปที่ 6-76 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
at 200 m Abutment

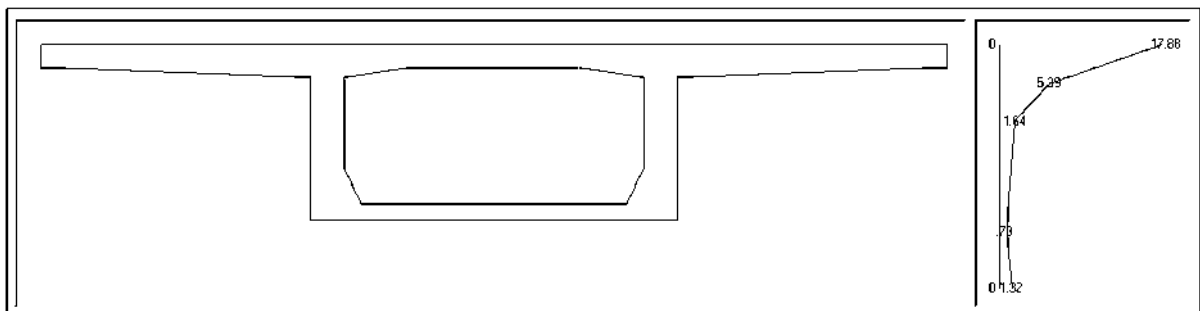
การวิเคราะห์ผลเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient (จากการตรวจวัดในสนาม)



รูปที่ 6-77 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (Field Measurement)
(Average Value)

Reference: Top, Distance: 0, Temperature: 15.205
Reference: Top, Distance: .32, Temperature: 5.39
Reference: Top, Distance: .631, Temperature: 1.165
Reference: Top, Distance: 1.532, Temperature: .625
Reference: Top, Distance: 2, Temperature: 1.11

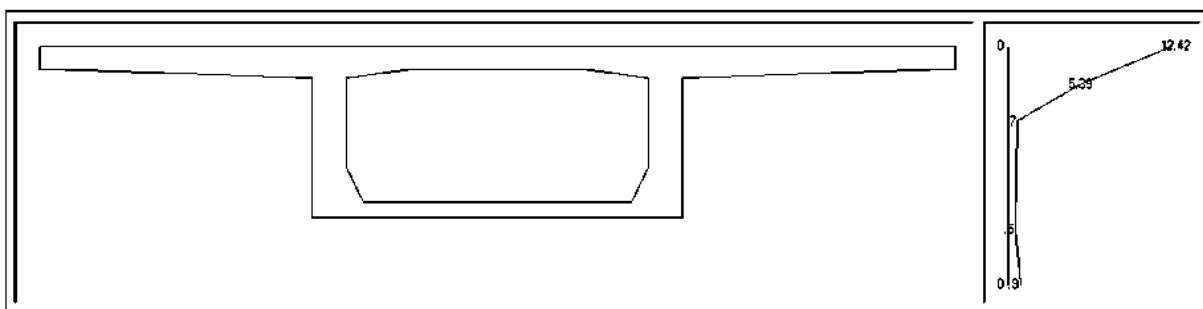
รูปที่ 6-78 ตัวอย่าง Temperature Gradient (Average Value)



รูปที่ 6-79 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (Field Measurement)
(MAX Value)

Reference: Top, Distance: 0, Temperature: 17.88
Reference: Top, Distance: .32, Temperature: 5.39
Reference: Top, Distance: .631, Temperature: 1.64
Reference: Top, Distance: 1.532, Temperature: .73
Reference: Top, Distance: 2, Temperature: 1.32

รูปที่ 6-80 ตัวอย่าง Temperature Gradient (MAX Value)

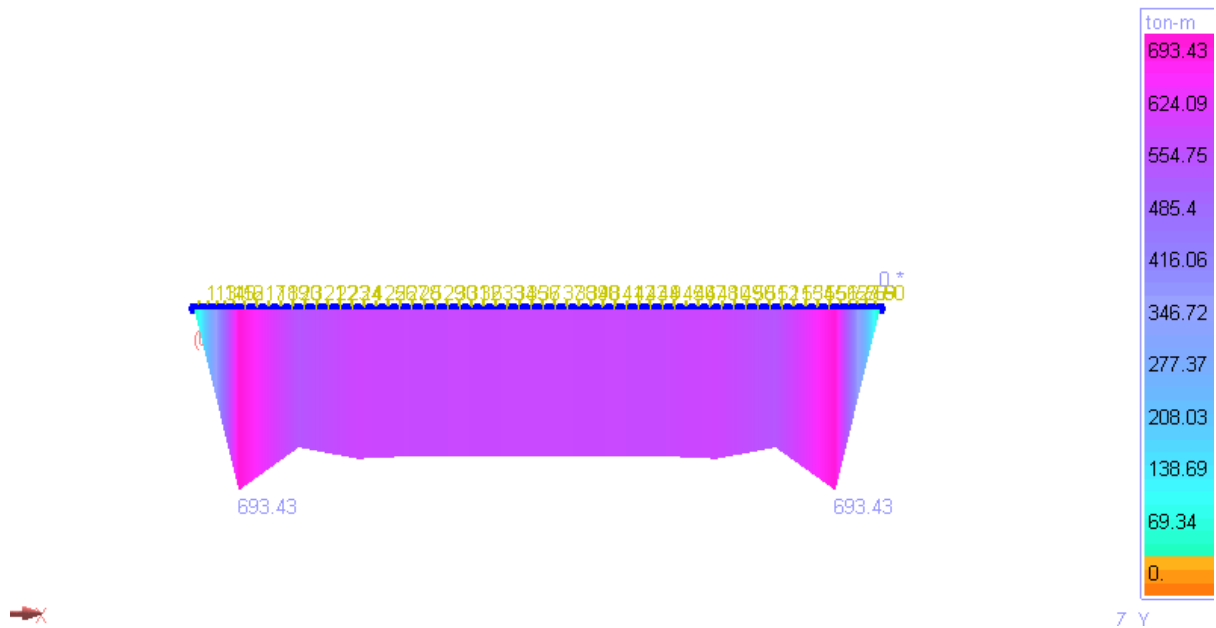


รูปที่ 6-81 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (Field Measurement)
(MIN Value)

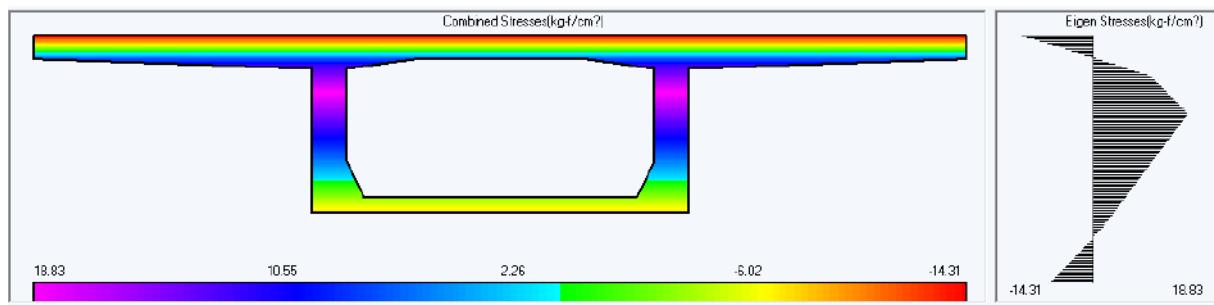
Reference: Top, Distance: 0, Temperature: 12.42
Reference: Top, Distance: .32, Temperature: 5.39
Reference: Top, Distance: .631, Temperature: .7
Reference: Top, Distance: 1.532, Temperature: .5
Reference: Top, Distance: 2, Temperature: .9

รูปที่ 6-82 ตัวอย่าง Temperature Gradient (MIN Value)

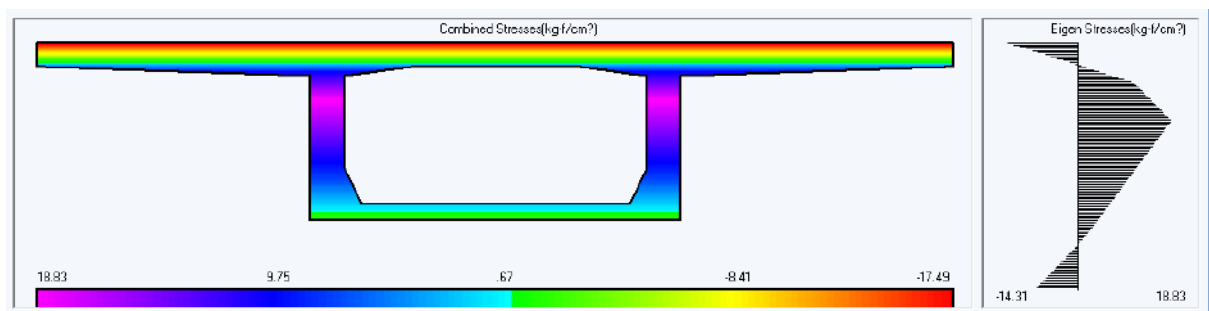
Moment Mz - GRADTEMP(FIELD)AVE



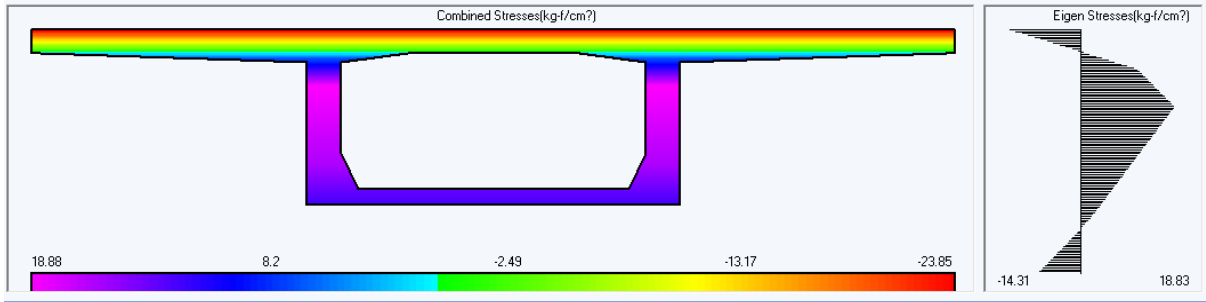
รูปที่ 6-83 ค่าของ Moment Mz เนื่องจาก Temperature Gradient
(MEASUREMENT: AVERAGE)



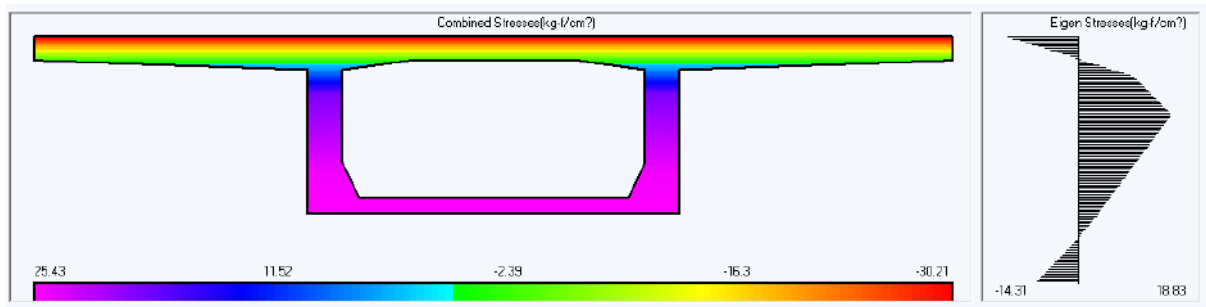
รูปที่ 6-84 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 0 m from Abutment



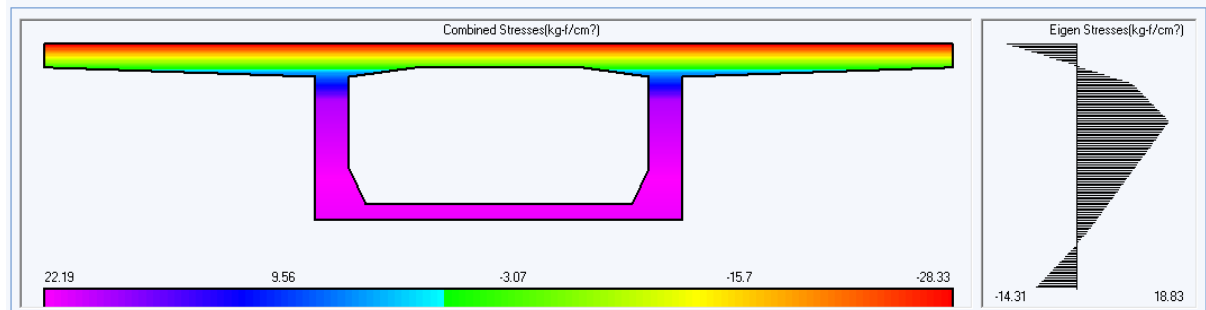
รูปที่ 6-85 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 6 m from Abutment



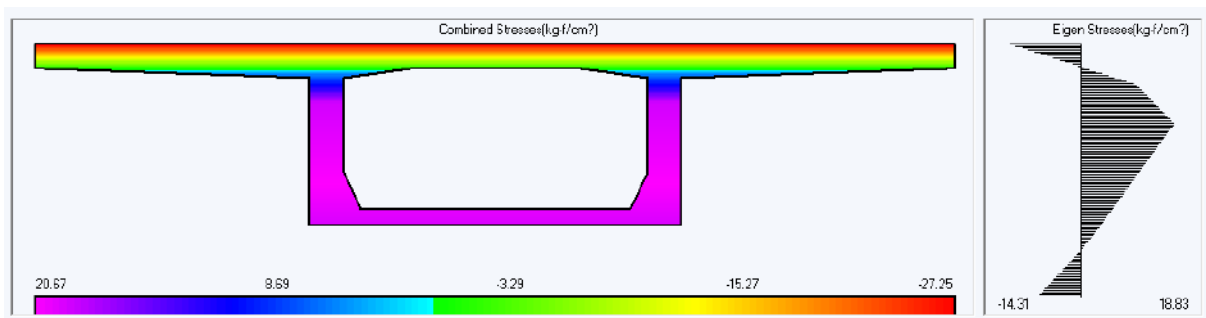
รูปที่ 6-86 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 9 m from Abutment



รูปที่ 6-87 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 30 m from Abutment

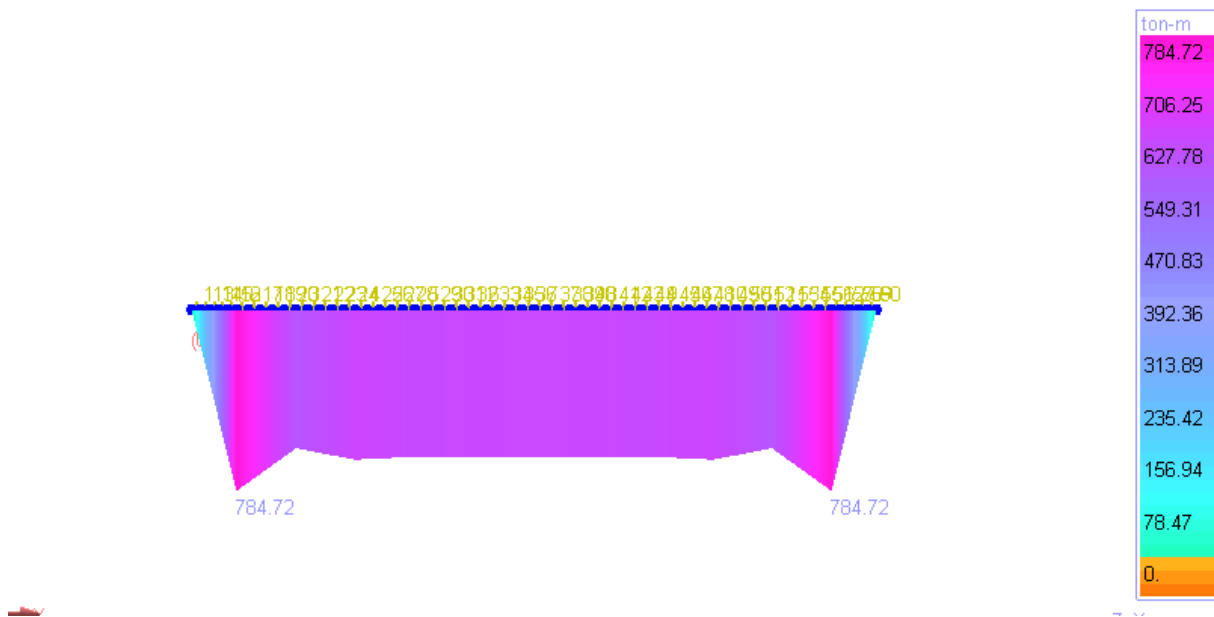


รูปที่ 6-88 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 49 m from Abutment

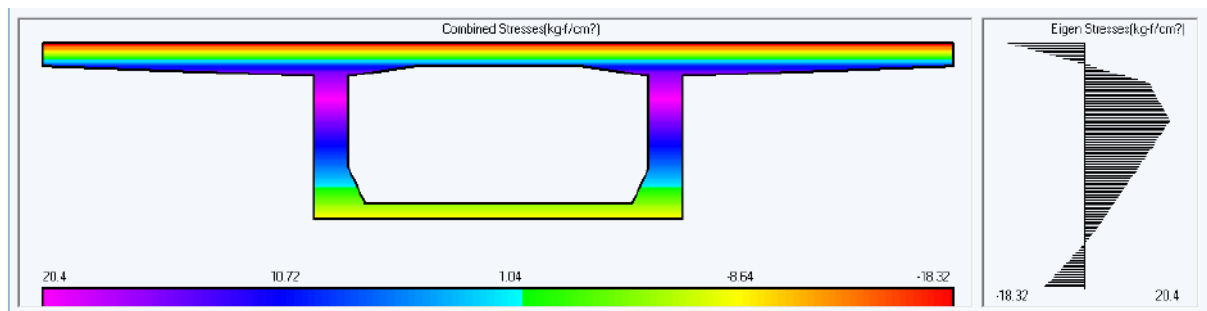


รูปที่ 6-89 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 200 m Abutment

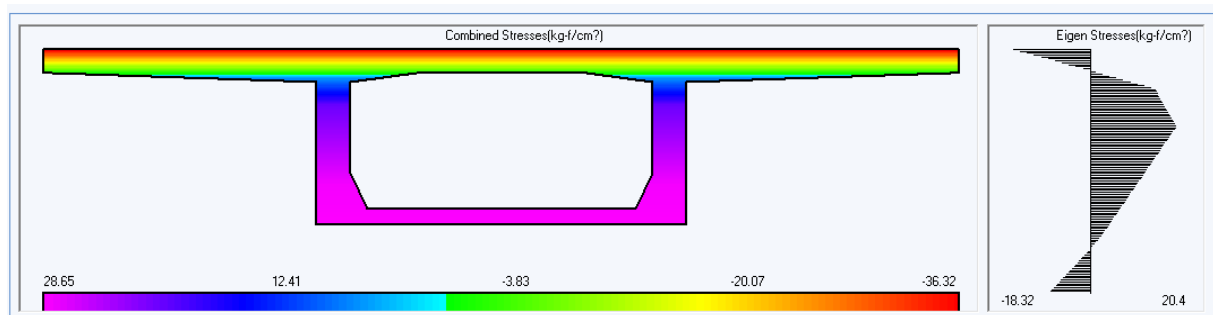
Moment Mz - GRADTEMP(FIELD)MAX



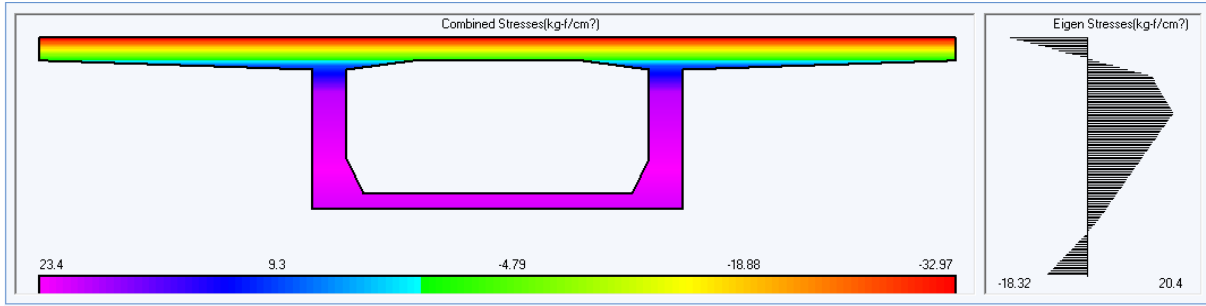
รูปที่ 6-90 ค่าของ Moment Mz เนื่องจาก Temperature Gradient
(MEASUREMENT: MAX)



รูปที่ 6-91 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: MAX)
at 0 m from Abutment

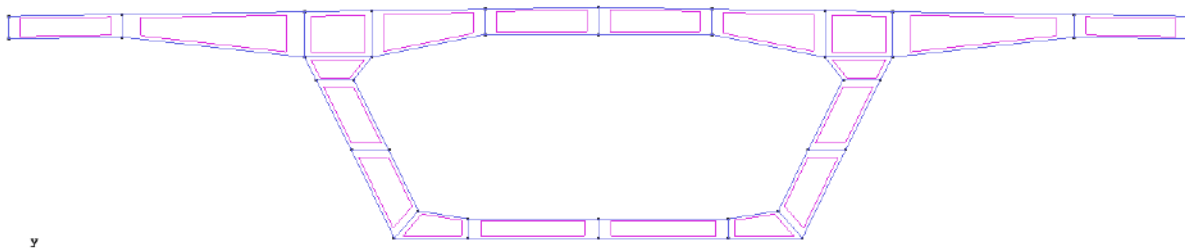


รูปที่ 6-92 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: MAX)
At 30 m from Abutment

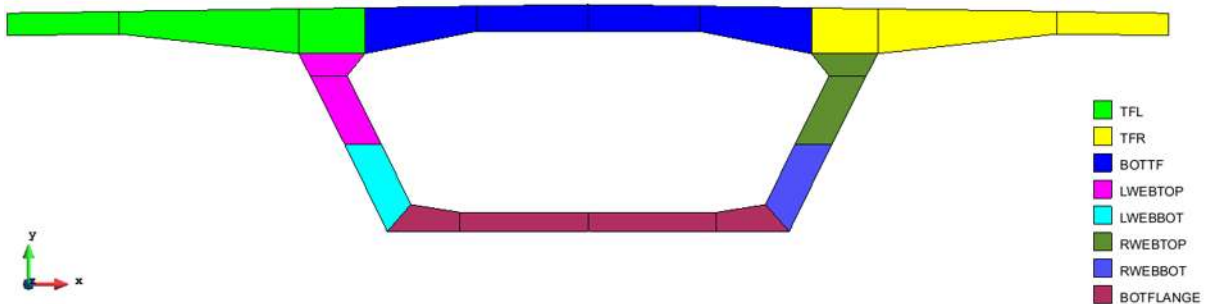


รูปที่ 6-93 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT:MAX)
 at 200 m Abutment

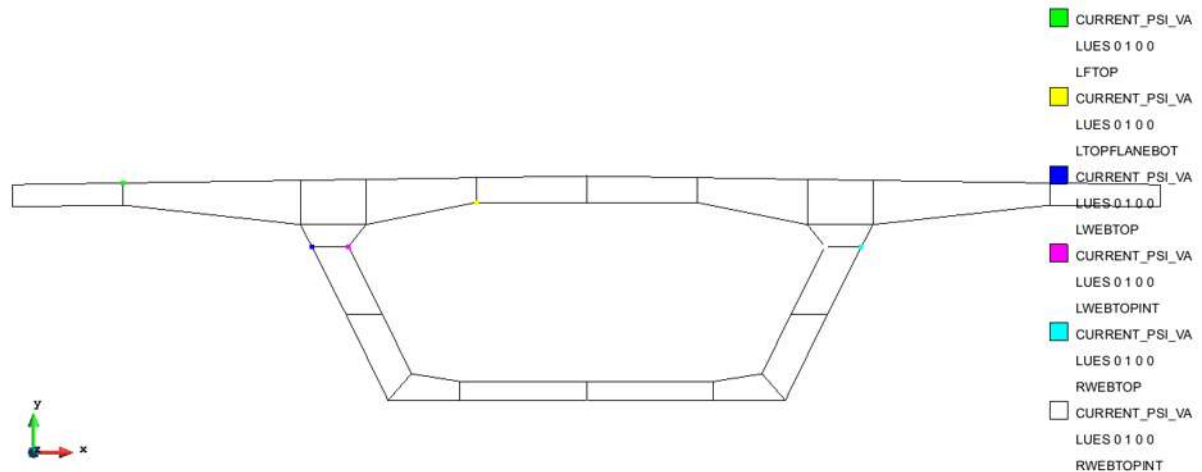
การสร้างแบบจำลองของหน้าตัดสะพานเพื่อการวิเคราะห์ Temperature กรณีสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)



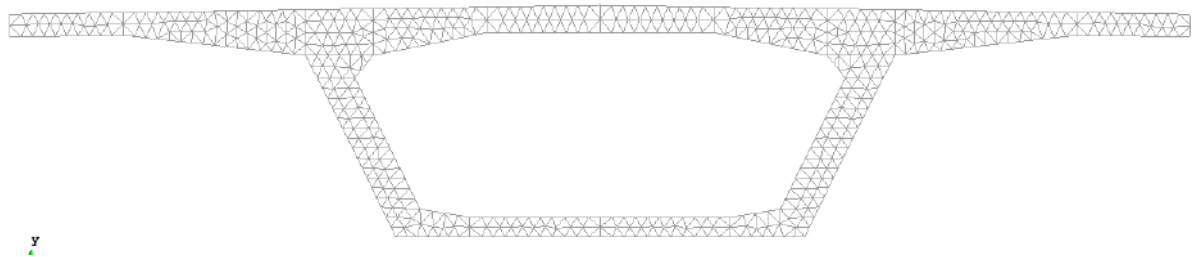
รูปที่ 6-94 รูปแสดง Macro Element เพื่อสร้างแบบจำลอง Box Girder



รูปที่ 6-95 รูปแสดง ประเภทของ Material เพื่อพิจารณา Initial Temperature



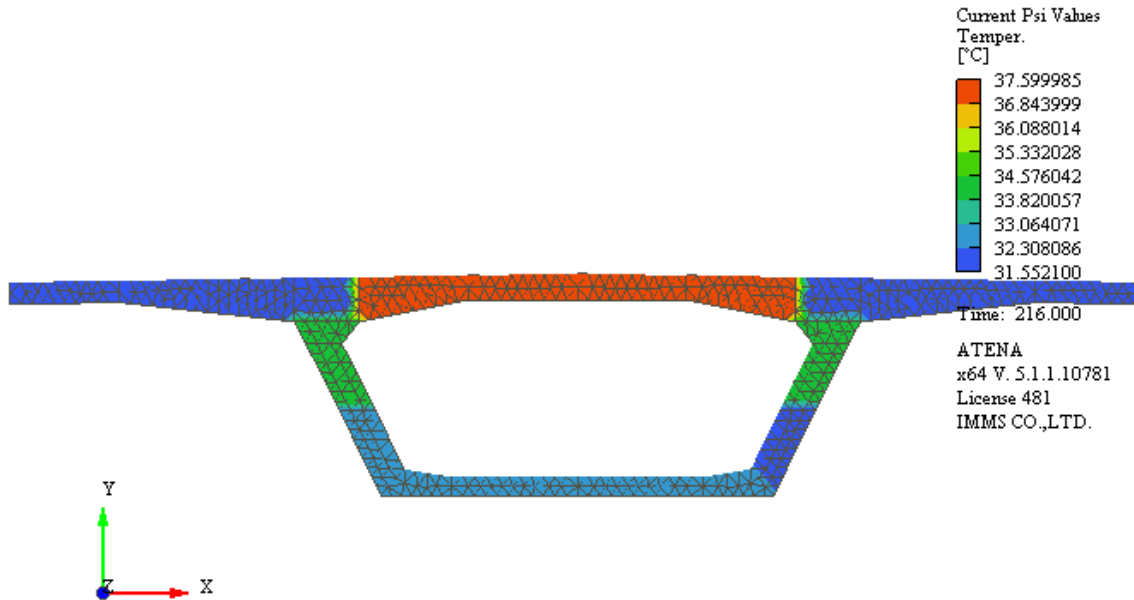
รูปที่ 6-96 รูปแสดง Monitoring Point เพื่อพิจารณา การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 6-97 รูปแสดง Mesh ใน Box Girder เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

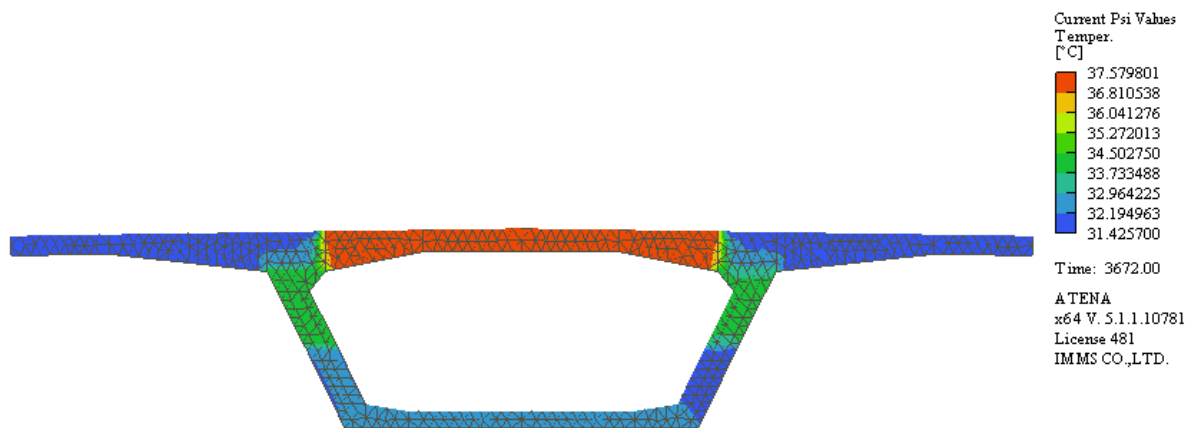
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของ Temperature

- ที่เวลาเริ่มต้น (0.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



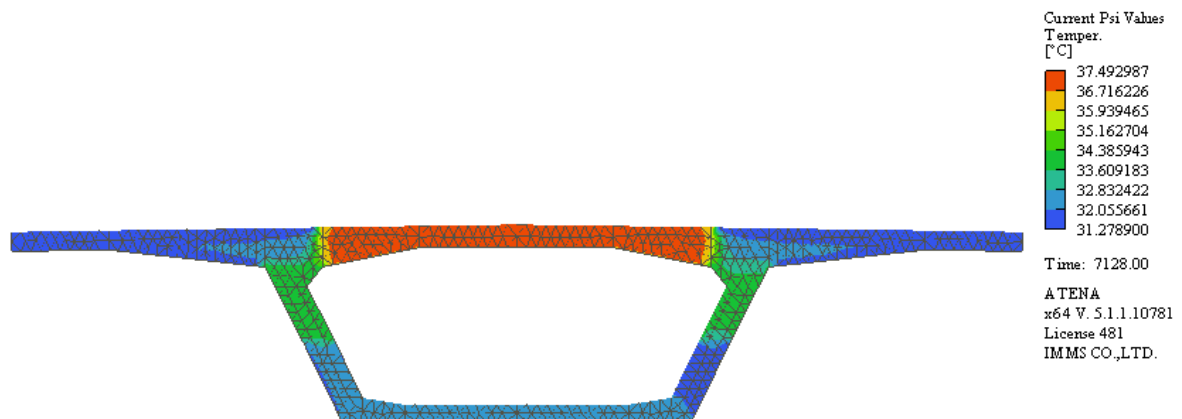
รูปที่ 6-98 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (1.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



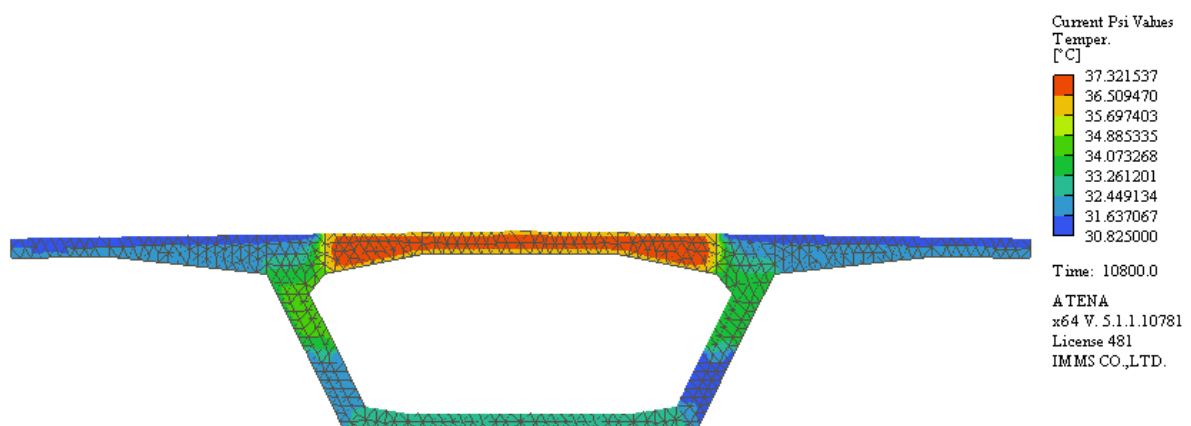
รูปที่ 6-99 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (2.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



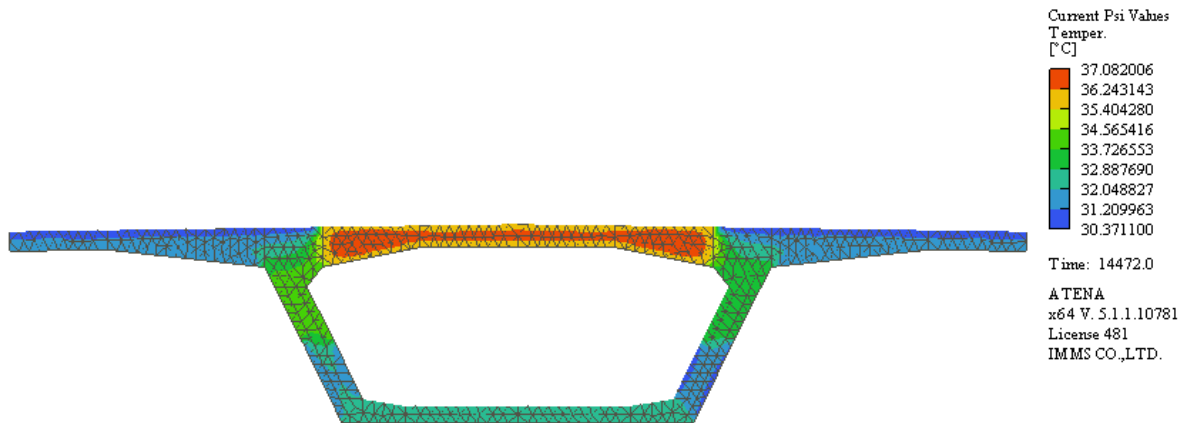
รูปที่ 6-100 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (3.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



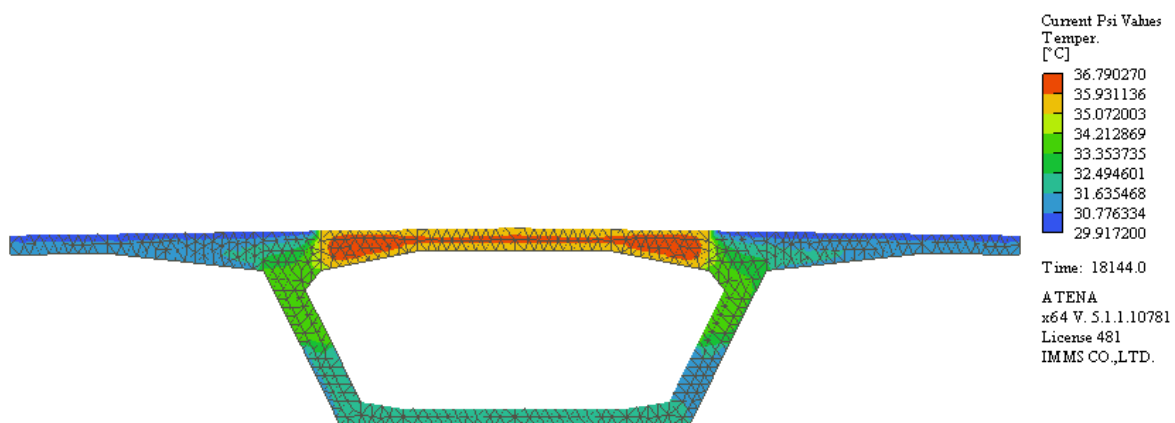
รูปที่ 6-101 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (4.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



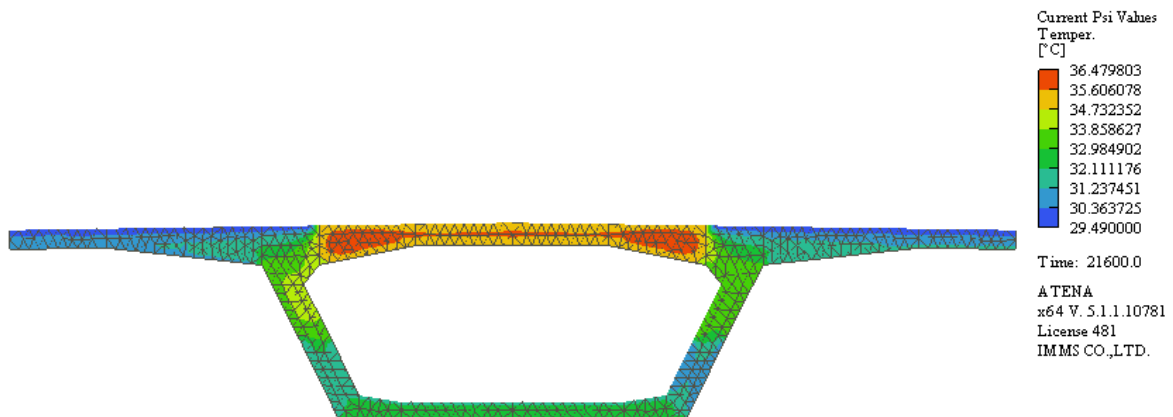
รูปที่ 6-102 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (5.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



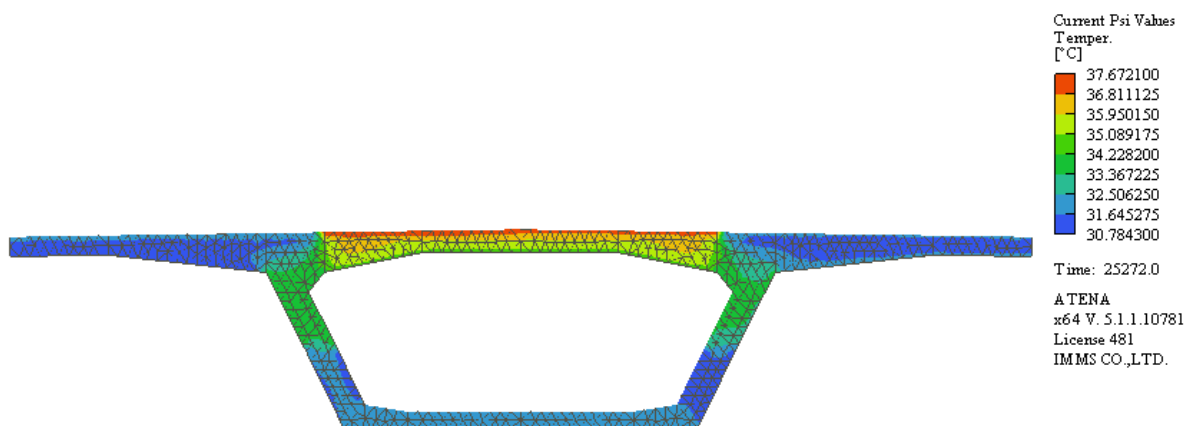
รูปที่ 6-103 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (6.00 น.) (ช่วงลดลงของอุณหภูมิ)



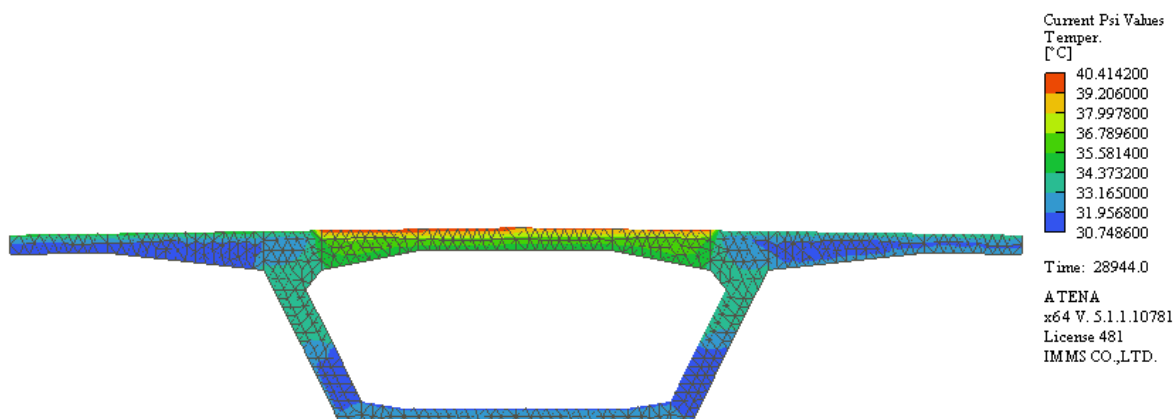
รูปที่ 6-104 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (7.00 น.) (ช่วงเพิ่มของอุณหภูมิ)



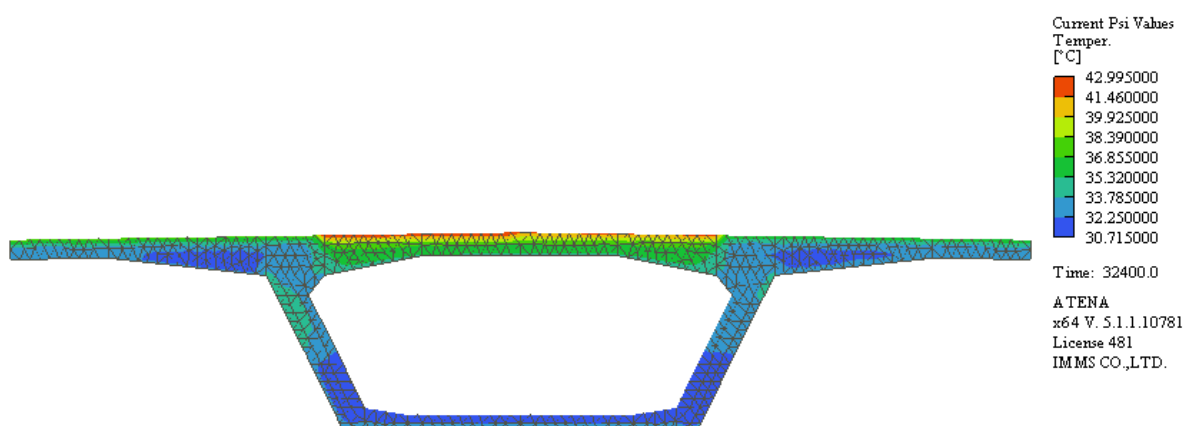
รูปที่ 6-105 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (8.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)



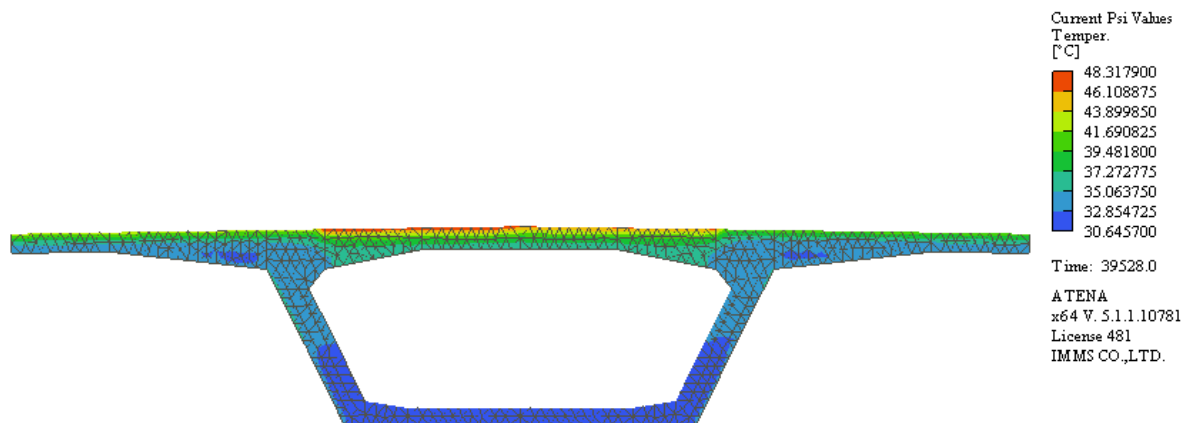
รูปที่ 6-106 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (9.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)



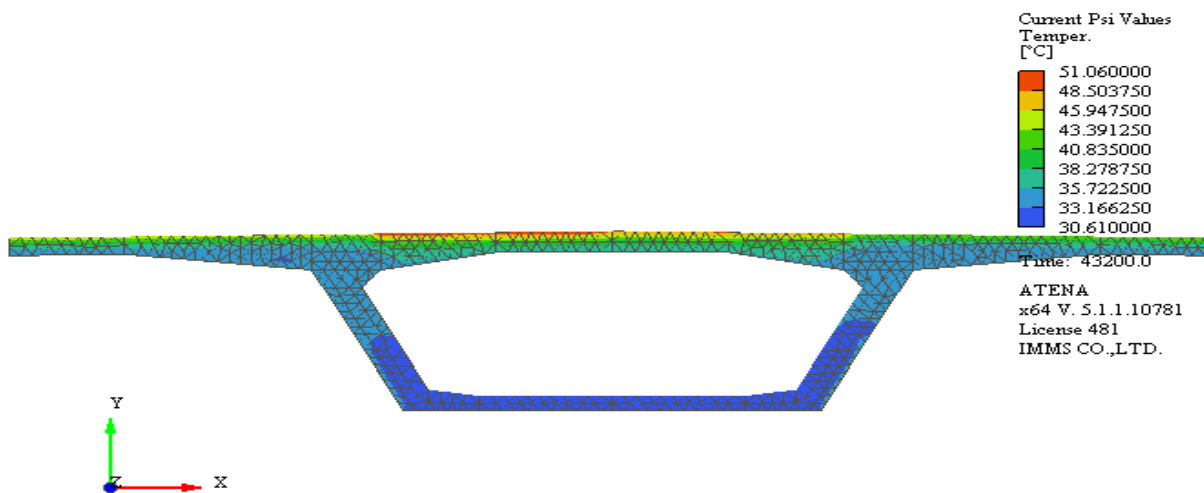
รูปที่ 6-107 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (11.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)

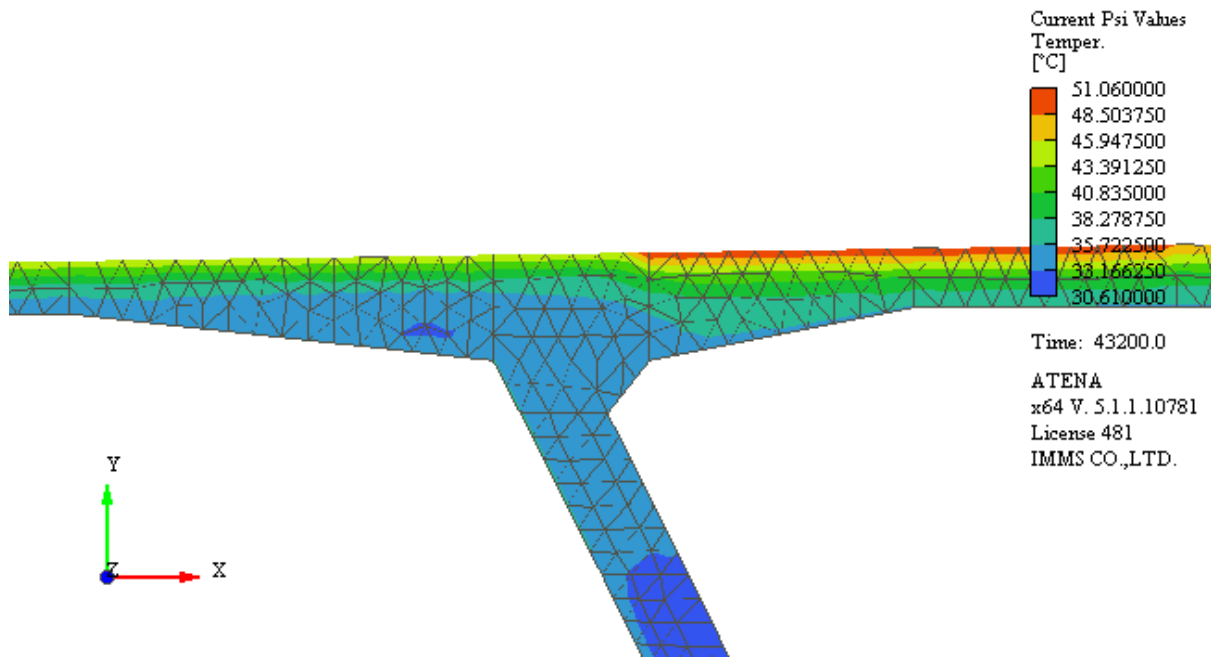


รูปที่ 6-108 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

- เวลาเริ่มต้น (12.00 น.) (ช่วงเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ)

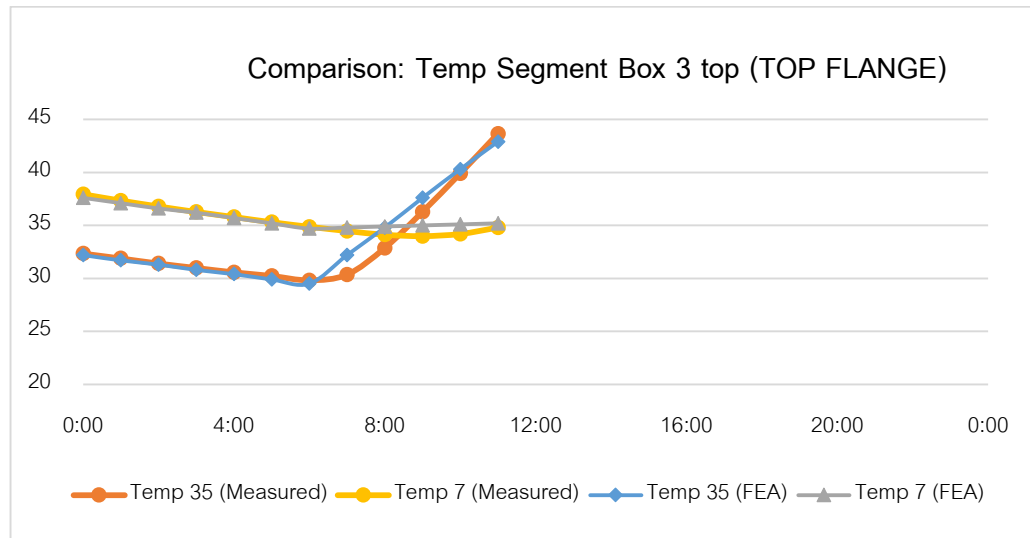


รูปที่ 6-109 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรอบและภายในของ Box Girder

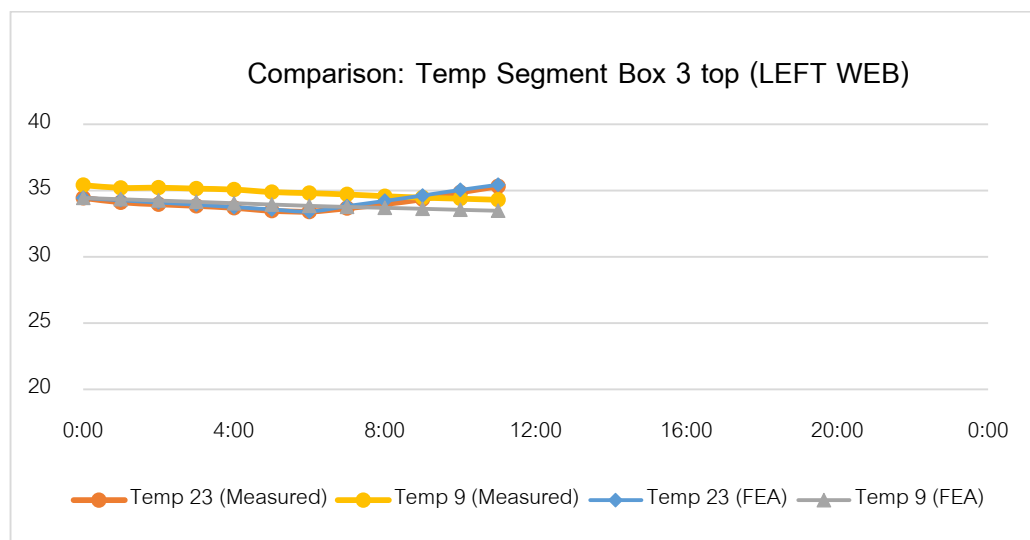


รูปที่ 6-110 รูปแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณปีกและ Flange ของ Box Girder

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดการกระจายตัวของ Temperature



รูปที่ 6-111 รูปแสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ Top Flange:Box Girder



รูปที่ 6-112 รูปแสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ Left Web:Box Girder

การวิเคราะห์ผลเนื่องจากอุณหภูมิ (Nonlinear Temperature Gradient) ในแนวยาวของสะพาน

การวิเคราะห์ผลของ Nonlinear Temperature Gradient ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

3.12.3 Temperature Gradient

For the purpose of this Article, the country shall be subdivided into zones as indicated in Figure 1. Positive temperature values for the zones shall be taken as specified for various deck surface conditions in Table 1. Negative temperature values shall be obtained by multiplying the values specified in Table 1 by -0.30 for plain concrete decks and -0.20 for decks with an asphalt overlay.

The vertical temperature gradient in concrete and steel superstructures with concrete decks may be taken as shown in Figure 2.

Dimension A in Figure 2 shall be taken as:

- For concrete superstructures that are 400 mm or more in depth—300 mm.
- For concrete sections shallower than 400 mm—100 mm less than the actual depth
- For steel superstructures—300 mm and the distance t shall be taken as the depth of the concrete deck

Temperature value T_3 shall be taken as 0°C , unless a site-specific study is made to determine an appropriate value, but it shall not exceed 3°C .

Where temperature gradient is considered, internal stresses and structure deformations due to both positive and negative temperature gradients may be determined in accordance with the provisions of Article 4.6.6.

C3.12.3

Temperature gradient is included in various load combinations in Table 3.4.1-1. This does not mean that it need be investigated for all types of structures. If experience has shown that neglecting temperature gradient in the design of a given type of structure has not lead to structural distress, the Owner may choose to exclude temperature gradient. Multibeam bridges are an example of a type of structure for which judgment and past experience should be considered.

Redistribution of reactive loads, both longitudinally and transversely, should also be calculated and considered in the design of the bearings and substructures.

The temperature gradient given herein is a modification of that proposed in Imbsen et al. (1985), which was based on studies of concrete superstructures. The addition for steel superstructures is patterned after the temperature gradient for that type of bridge in the Australian bridge specifications (AUSTROADS 1992).

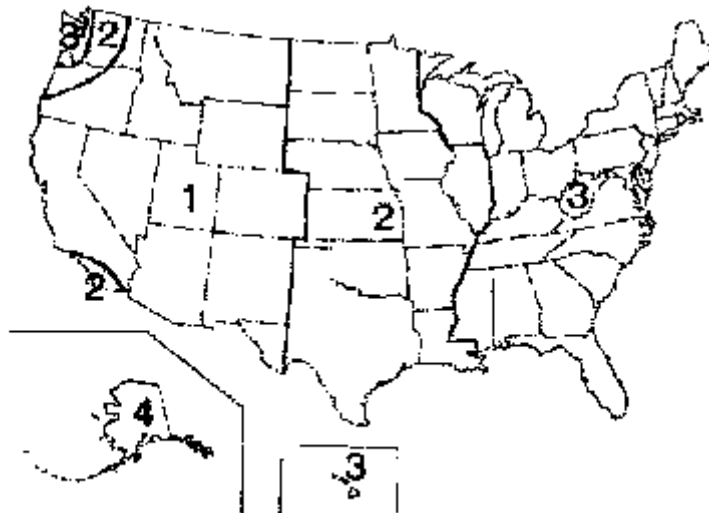
The data in Table 1 does not make a distinction regarding the presence or lack of an asphaltic overlay on decks. Field measurements have yielded apparently different indications concerning the effect of asphalt as an insulator or as a contributor (Spring 1997). Therefore, any possible insulating qualities have been ignored herein.

The temperatures given in Table 1 form the basis for calculating the change in temperature with depth in the cross-section, not absolute temperature.

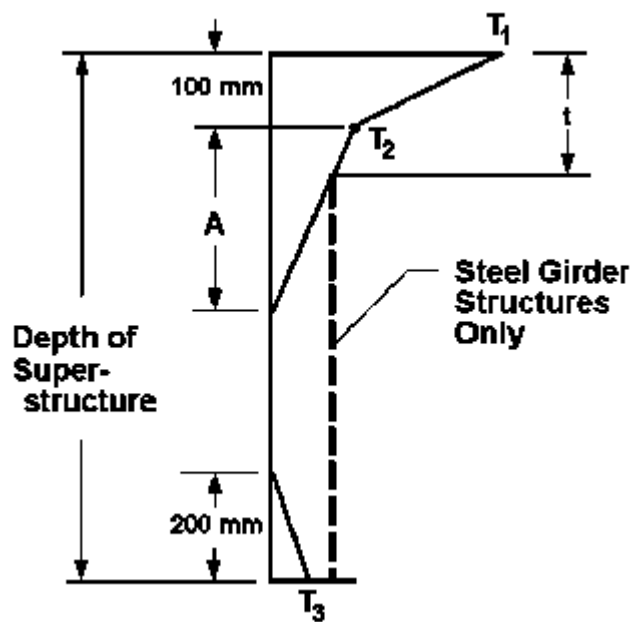
รูปที่ 6-113 Temperature Gradient ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

Table: Basis for Temperature Gradients.

Zone	T_1 (°C)	T_2 (°C)
1	30	7.8
2	25	6.7
3	23	6.0
4	21	5.0

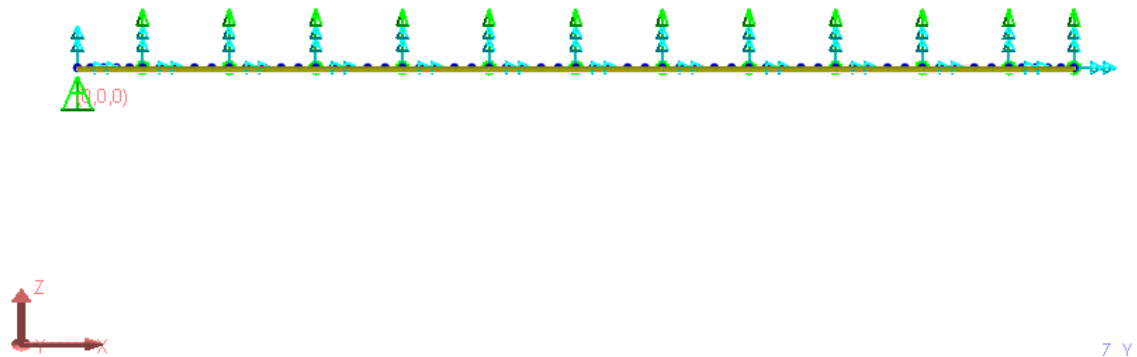


รูปที่ 6-114 Solar Radiation Zones for the United States.

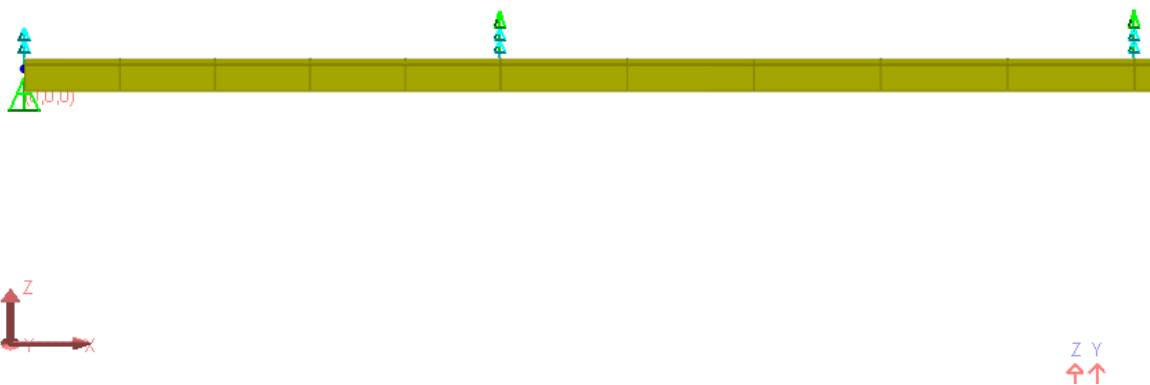


รูปที่ 6-115 Positive Vertical Temperature Gradient in Concrete and Steel Superstructures.

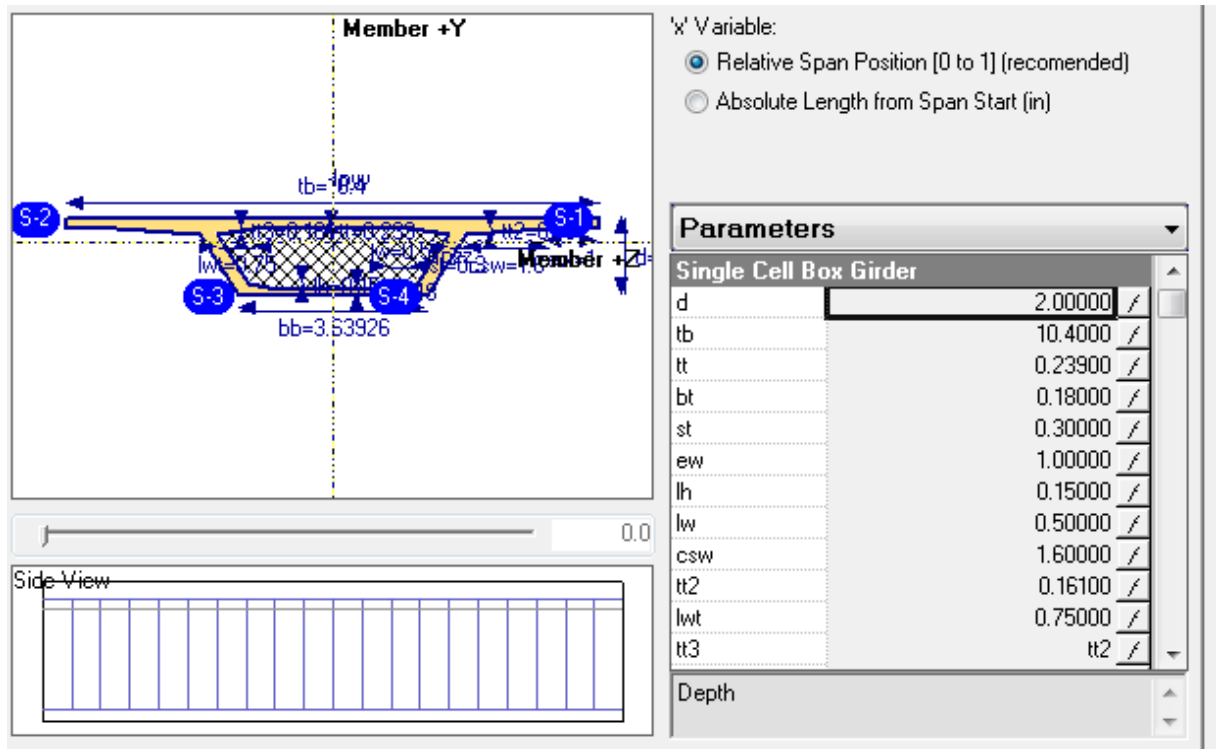
แบบจำลองสะพานตามแนวยาวโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



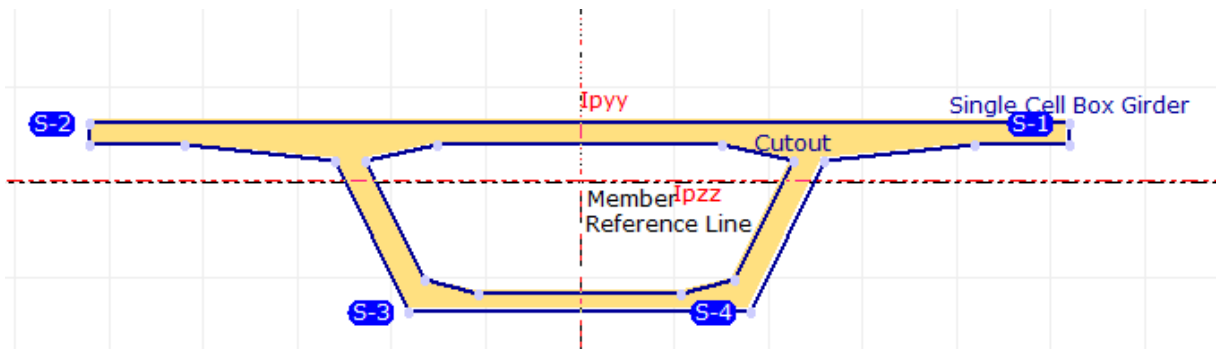
รูปที่ 6-116 รูปแบบจำลอง Frame Element ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามแนวยาว



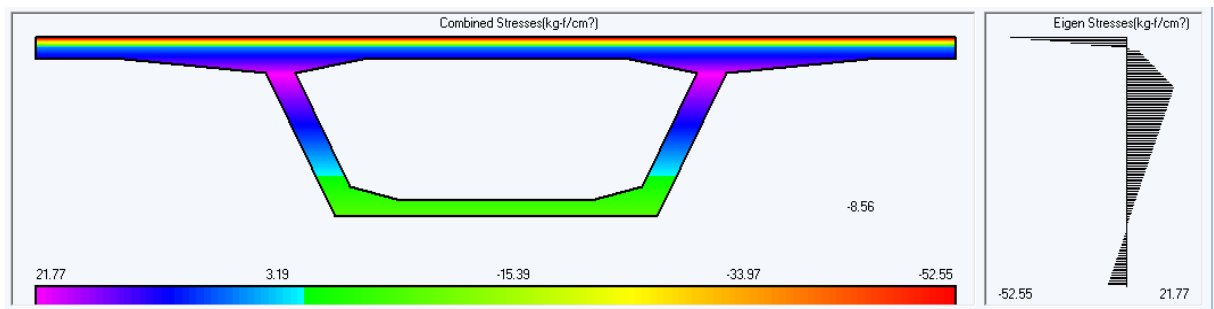
รูปที่ 6-117 รูปแบบจำลอง Frame Element ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามแนวยาว (End Span+ Interior Span)



รูปที่ 6-118 หน้าตัดสะพาน Box Girder ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง

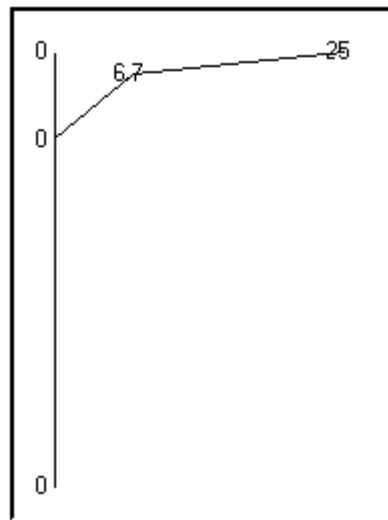


รูปที่ 6-119 หน้าตัดสะพาน Box Girder ฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง
(Standard Segment)

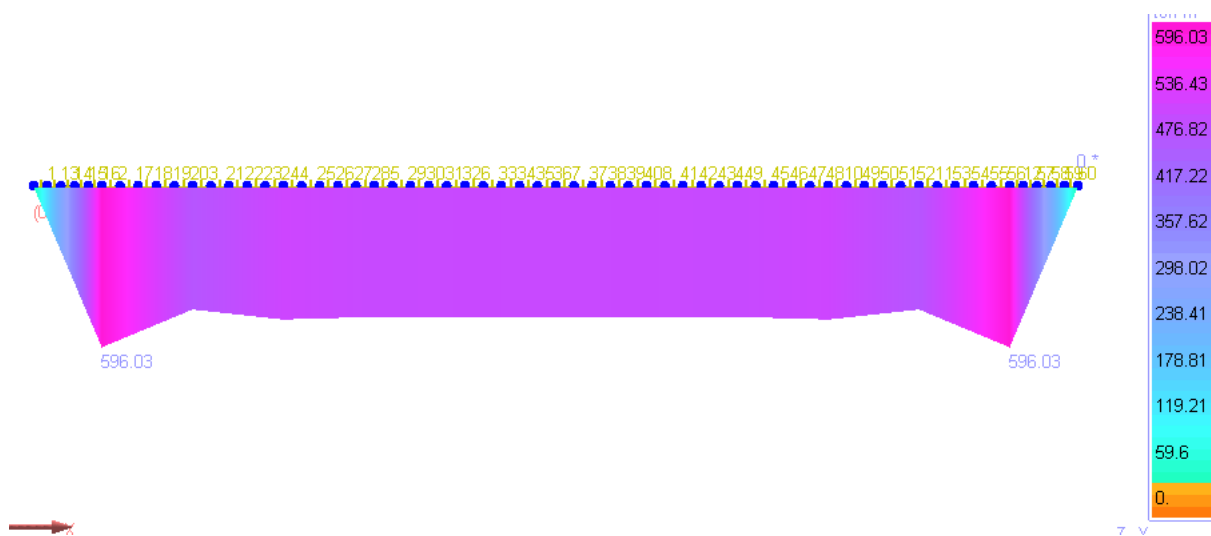


รูปที่ 6-120 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว

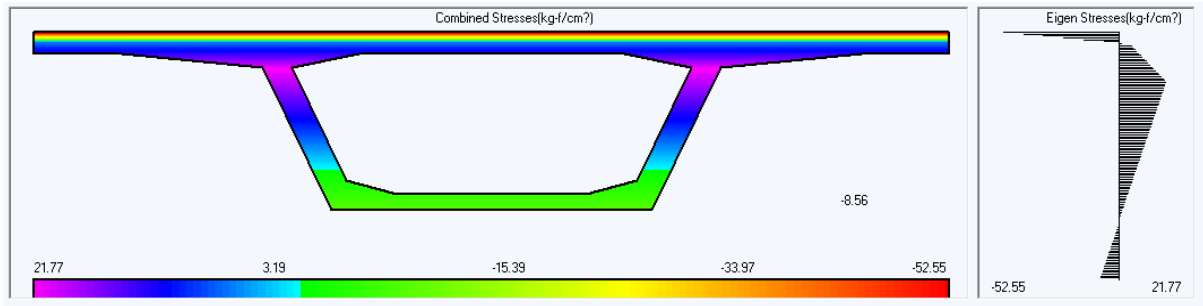
การวิเคราะห์ผลเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient (AASHTO LRFD) ZONE 2



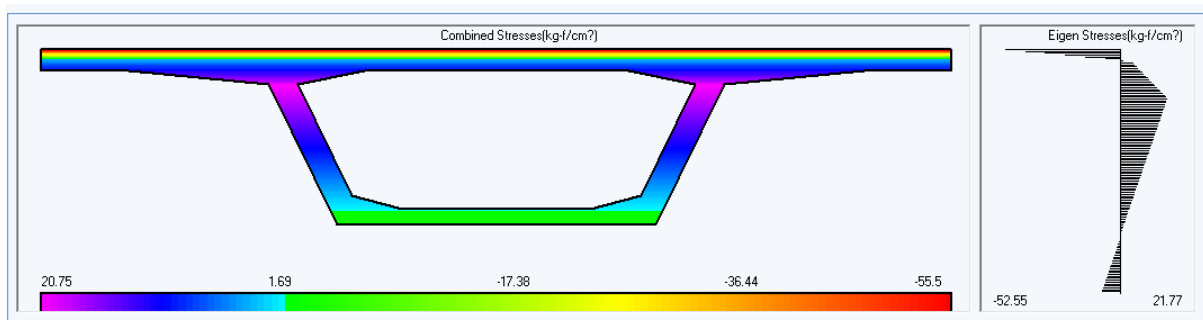
รูปที่ 6-121 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (AASHTO ZONE2)



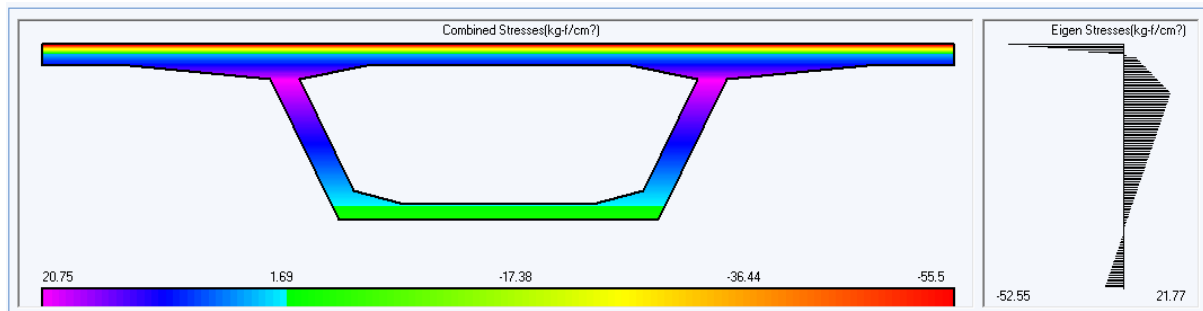
รูปที่ 6-122 ค่าของ Moment Mz เนื่องจาก Temperature Gradient (AASHTO ZONE2)



รูปที่ 6-123 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
at 0 m from Abutment



รูปที่ 6-124 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
at 6 m from Abutment



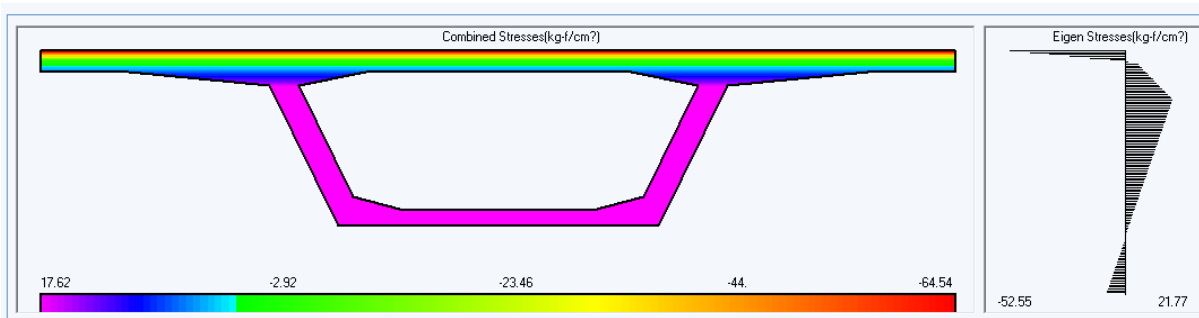
รูปที่ 6-125 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
at 9 m from Abutment



รูปที่ 6-126 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
 at 30 m from Abutment

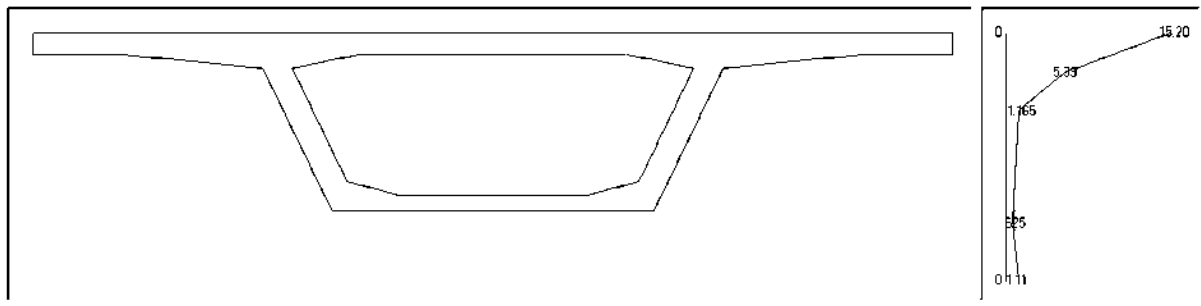


รูปที่ 6-127 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
 at 49 m from Abutment



รูปที่ 6-128 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient Zone2 (AASHTO LRFD)
 at 200 m Abutment

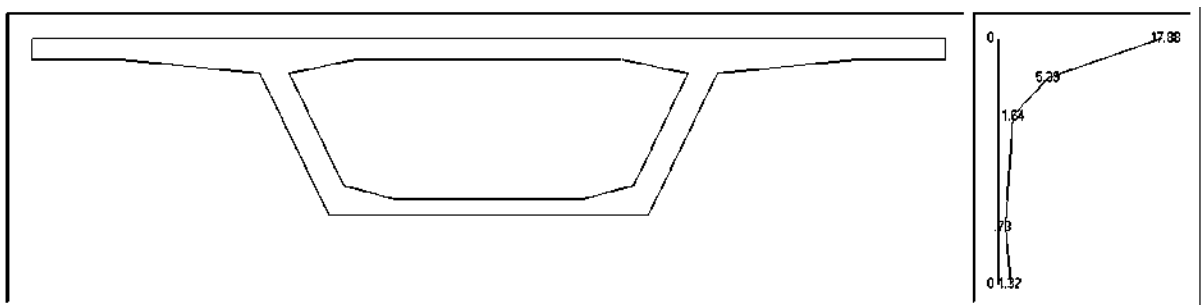
การวิเคราะห์ผลเนื่องจาก Nonlinear Temperature Gradient (จากการตรวจวัดในสนาม)



รูปที่ 6-129 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (Field Measurement)
(Average Value)

Reference: Top, Distance: 0, Temperature: 15.205
Reference: Top, Distance: .32, Temperature: 5.39
Reference: Top, Distance: .631, Temperature: 1.165
Reference: Top, Distance: 1.532, Temperature: .625
Reference: Top, Distance: 2, Temperature: 1.11

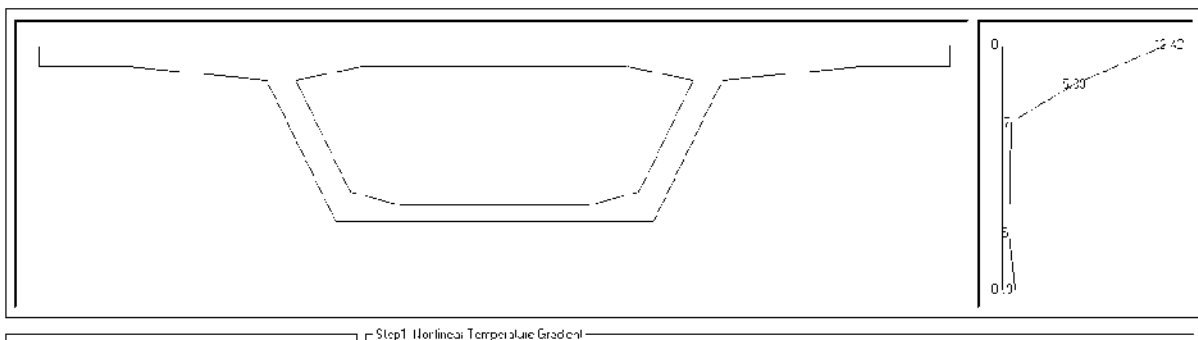
รูปที่ 6-130 ตัวอย่าง Temperature Gradient (Average Value)



รูปที่ 6-131 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (Field Measurement)
(MAX Value)

Reference: Top, Distance: 0, Temperature: 17.88
Reference: Top, Distance: .32, Temperature: 5.39
Reference: Top, Distance: .631, Temperature: 1.64
Reference: Top, Distance: 1.532, Temperature: .73
Reference: Top, Distance: 2, Temperature: 1.32

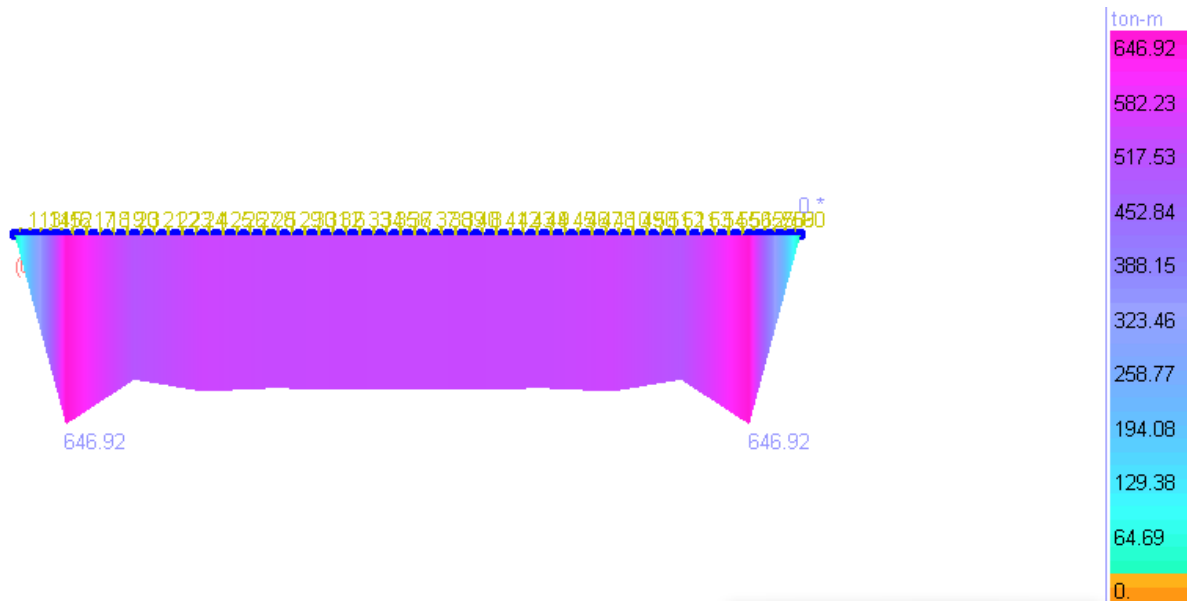
รูปที่ 6-132 ตัวอย่าง Temperature Gradient (MAX Value)



รูปที่ 6-133 ตัวอย่าง Temperature Gradient ที่ใช้ในการวิเคราะห์สะพานตามยาว (Field Measurement)
(MIN Value)

Reference: Top, Distance: 0, Temperature: 12.42
Reference: Top, Distance: .32, Temperature: 5.39
Reference: Top, Distance: .631, Temperature: .7
Reference: Top, Distance: 1.532, Temperature: .5
Reference: Top, Distance: 2, Temperature: .9

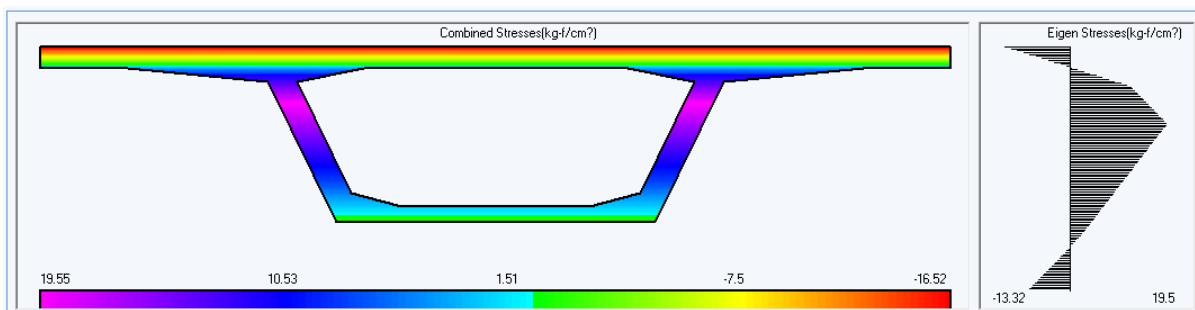
รูปที่ 6-134 ตัวอย่าง Temperature Gradient (MIN Value)



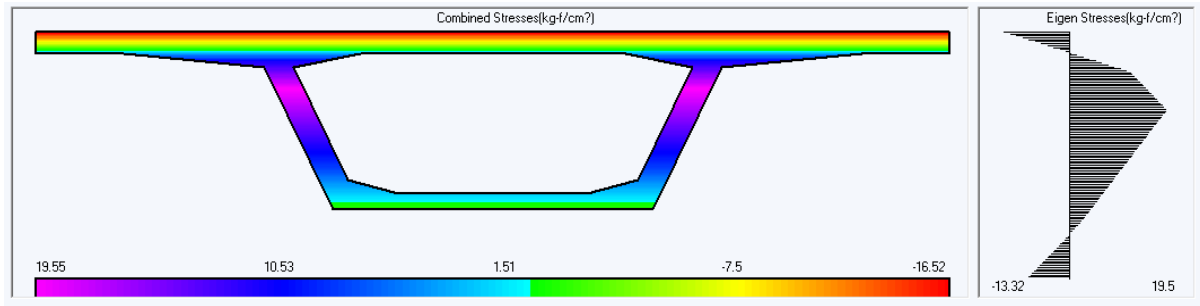
รูปที่ 6-135 ค่าของ Moment M_z เนื่องจาก Temperature Gradient
(MEASUREMENT: AVERAGE)



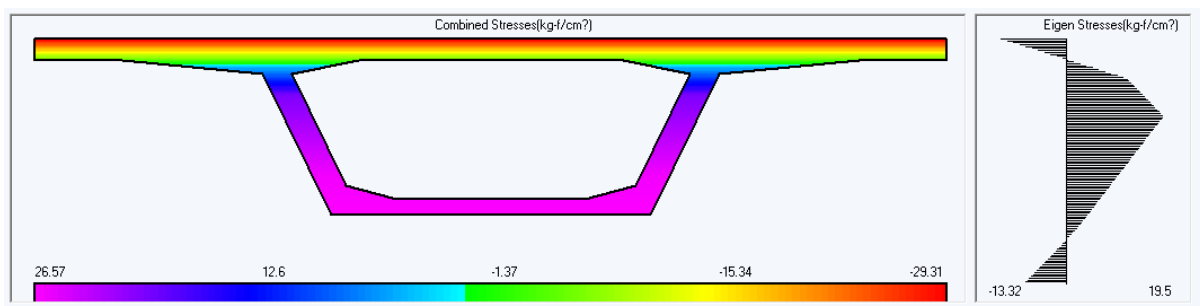
รูปที่ 6-136 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 0 m from Abutment



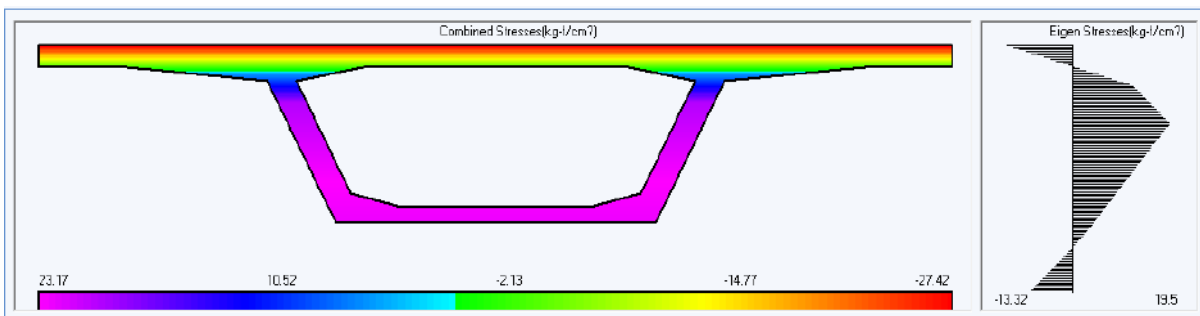
รูปที่ 6-137 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 6 m from Abutment



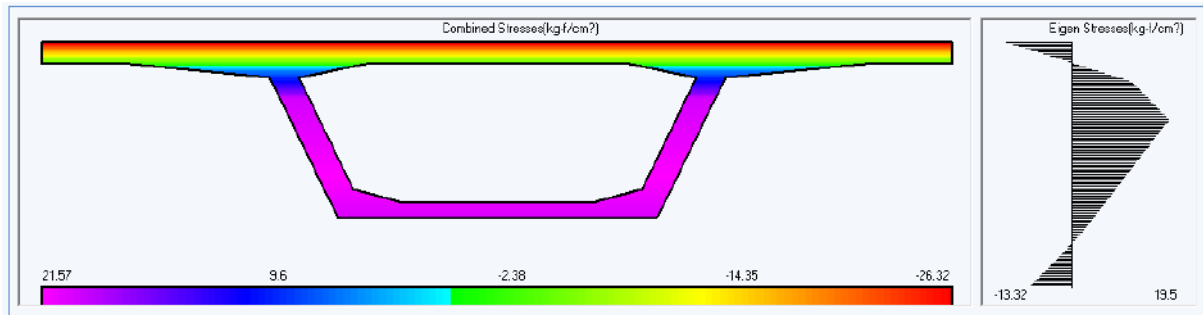
รูปที่ 6-138 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 9 m from Abutment



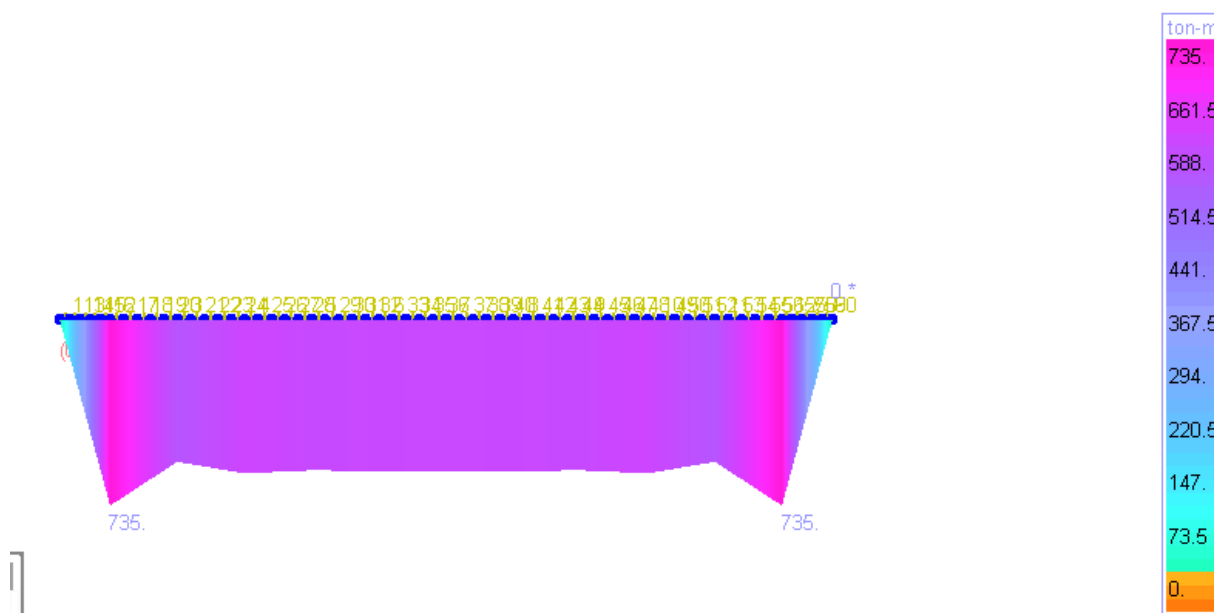
รูปที่ 6-139 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 30 m from Abutment



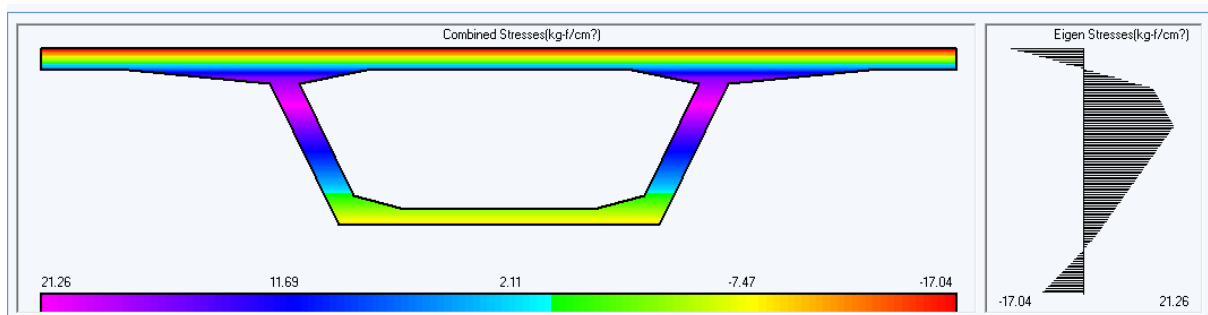
รูปที่ 6-140 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE) at 49 m from
Abutment



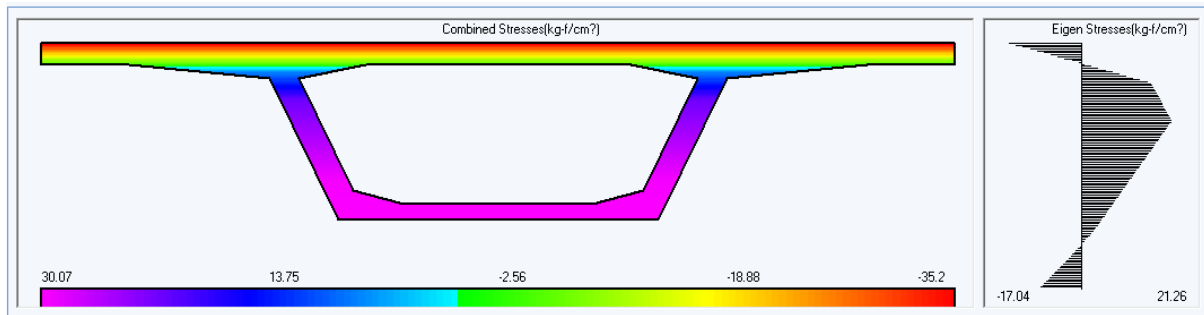
รูปที่ 6-141 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: AVERAGE)
at 200 m Abutment



รูปที่ 6-142 ค่าของ Moment Mz เนื่องจาก Temperature Gradient
(MEASUREMENT: MAX)



รูปที่ 6-143 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: MAX)
at 0 m from Abutment



รูปที่ 6-144 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: MAX)
 At 30 m from Abutment



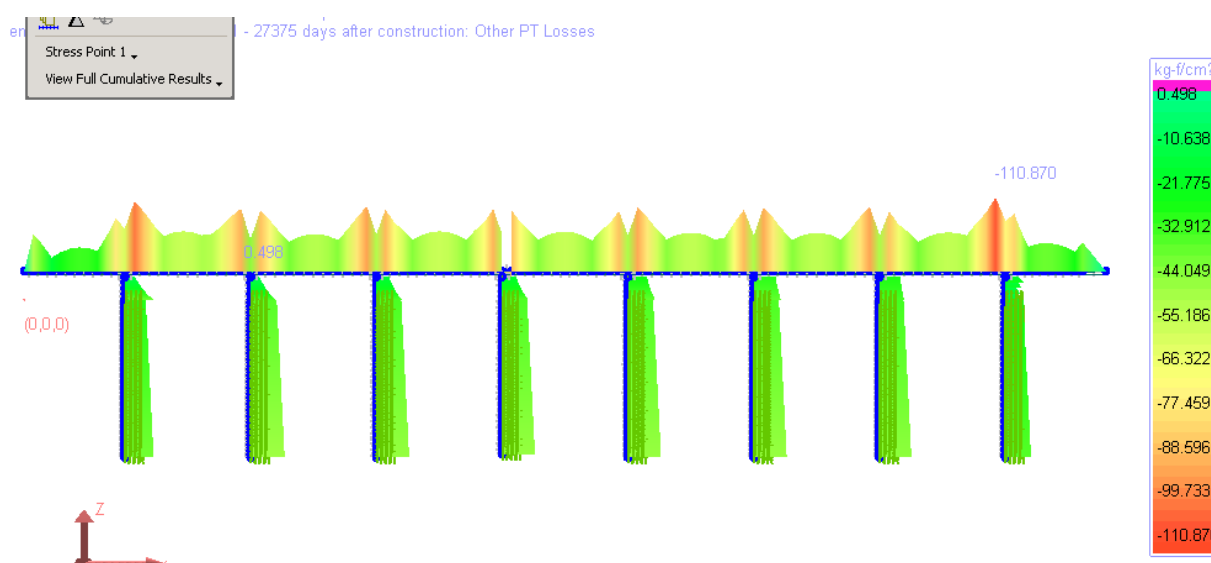
รูปที่ 6-145 รูปแสดงความเค้นเนื่องจาก Temperature Gradient (MEASUREMENT: MAX)
 at 200 m Abutment

6.7 การวิเคราะห์แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในหน้าตัดสะพานเนื่องจาก Construction Stage Analysis

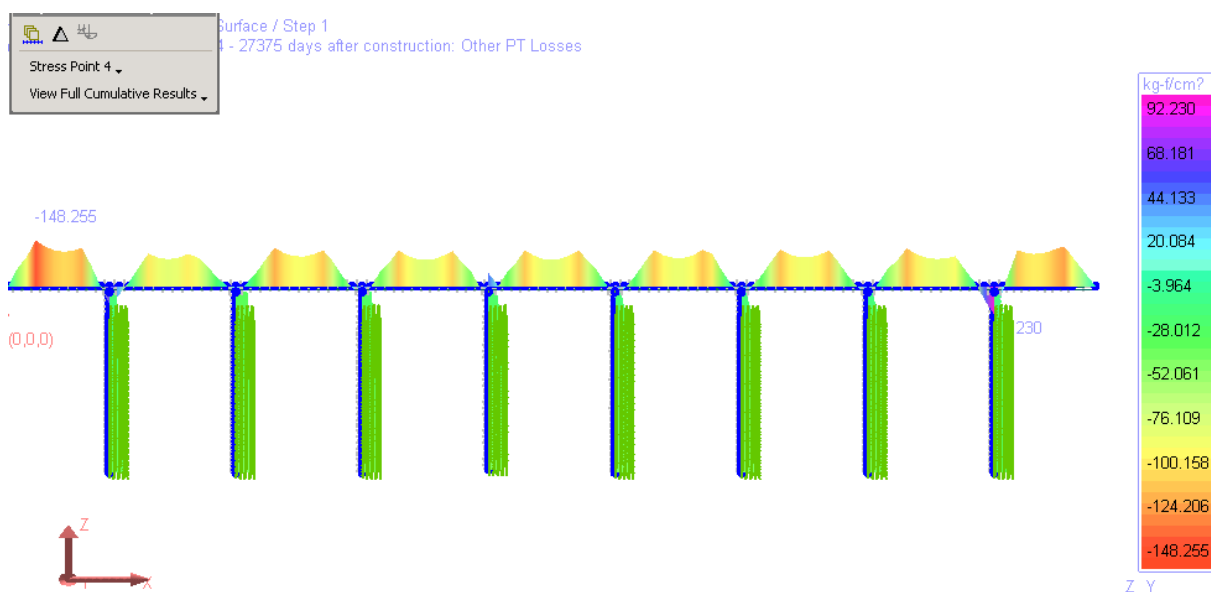
จากการหาแรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นภายใน Box Girder ในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้ แบบจำลองที่ปรับค่าคาบการสั่นของโครงสร้างตามผลการทดสอบในภาคสนามได้นำมาทำการวิเคราะห์แบบ construction stage analysis เพื่อประมาณหาค่าของความเค้นในหน้าตัด ณ หลังจากการก่อสร้างเพื่อนำค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นมาทำการรวมผลกับความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันหรือ Nonlinear Temperature Gradient ต่อไป

โดยจากการวิเคราะห์ Construction Stage Analysis แสดงผลของความเค้นตามยาวด้านผิวบนและผิวล่าง (S11 และ S44) ดังนี้

สะพานฝังขั้วทาง (สะพานใหม่) (Internal Prestressing System)

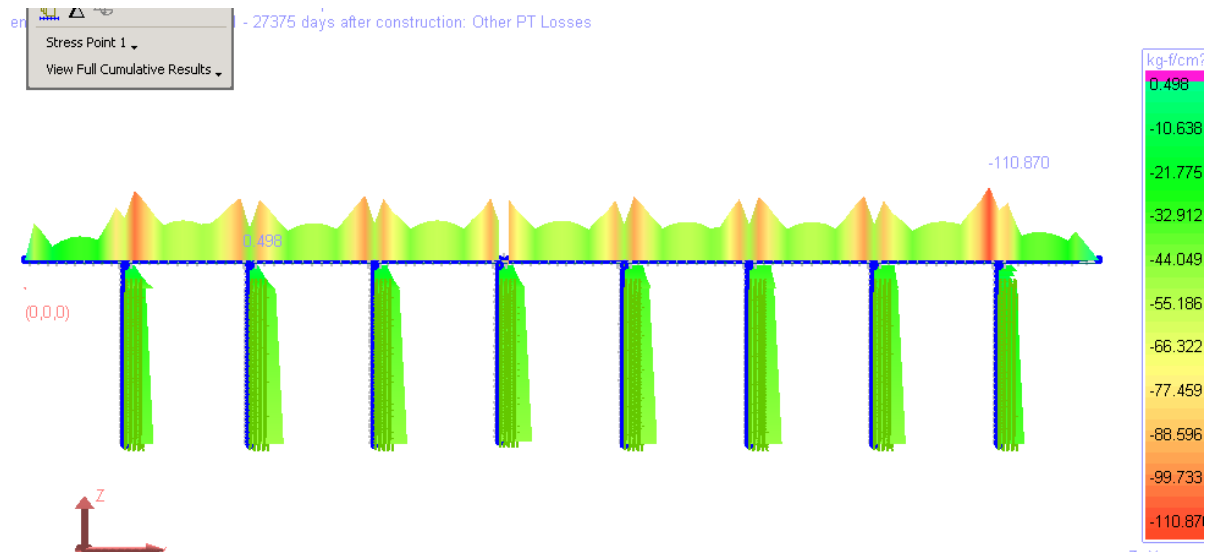


รูปที่ 6-146 แสดงผลของความเค้น S11

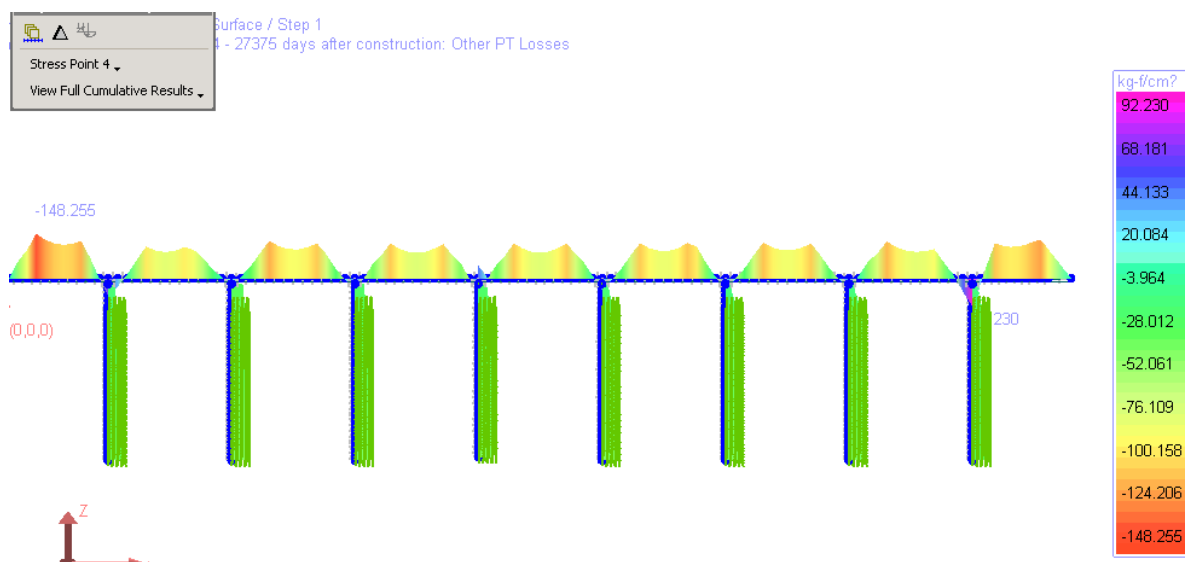


รูปที่ 6-147 แสดงผลของความเค้น S44

สะพานฝังขาทาง (สะพานใหม่) (External Prestressing System)



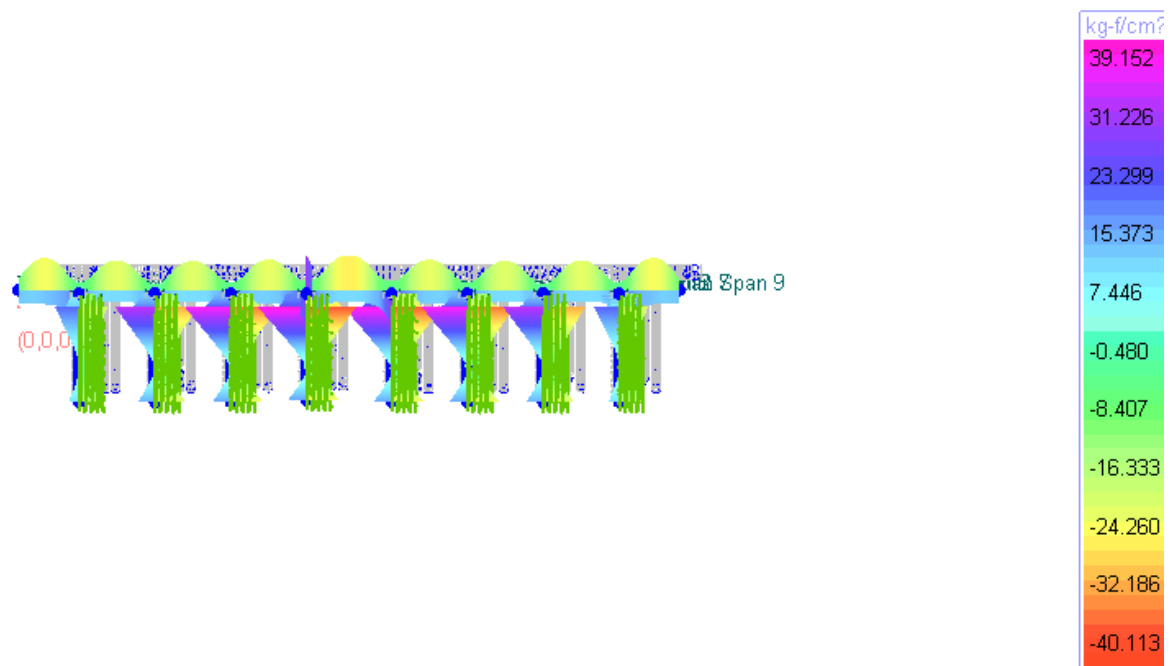
รูปที่ 6-148 แสดงผลของความเค้น S11



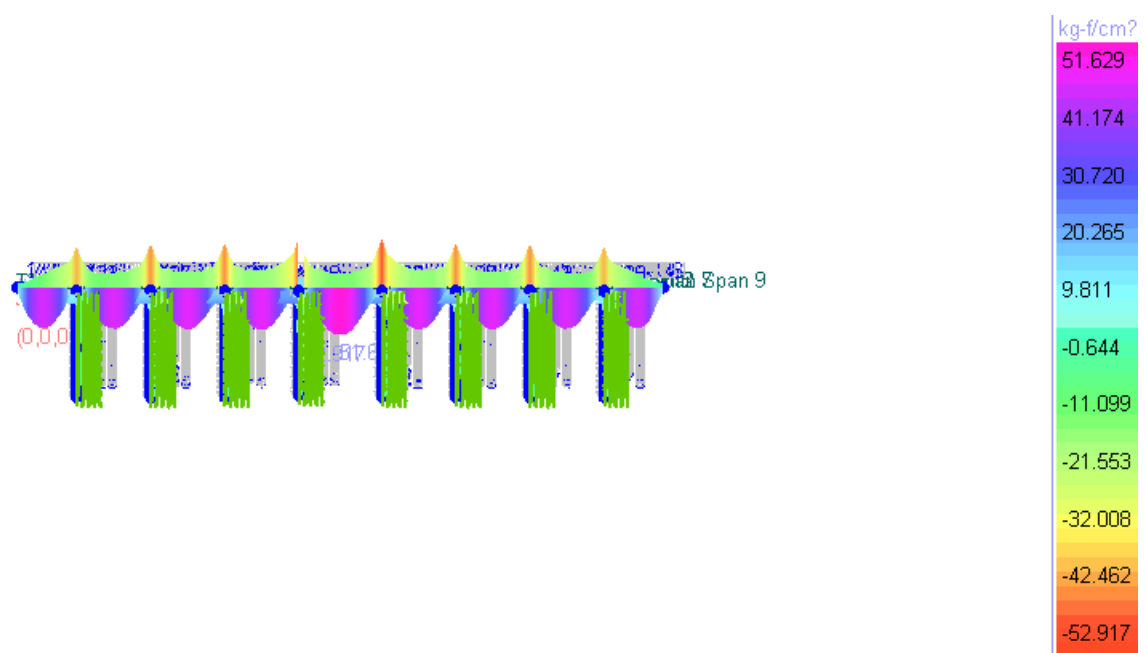
รูปที่ 6-149 แสดงผลของความเค้น S44

จากผลการวิเคราะห์ค่าของความเค้นในหน้าตัดของสะพานฝังขาทาง (สะพานใหม่) กับสะพานฝังขาทาง (สะพานเดิม) ในช่วงความยาวต่างๆ ที่พิจารณาจากด้านบนของสะพานจนถึงด้านล่างของหน้าตัดสะพานจะอยู่ในช่วงของ -20 ksc ถึง -80 ksc โดยเฉลี่ย ดังนั้นค่าของความเค้นที่กระจายในหน้าตัดของคานสะพานนี้ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างที่รวมผลของ น้ำหนักของคานสะพาน แรงของลวดอัดแรง และผลของเวลาเช่น Shinkage, Creep, Relaxtion ณ เวลาที่ทำการทดสอบสะพานในโครงการนี้

นอกจากการวิเคราะห์ผลเนื่องจาก Construction Stage Analysis แล้ว เพื่อรวมผลที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการสัจจกรของรถบรรทุกที่อาจเกิดความเค้นที่รวมกับความเค้นที่เกิดจาก Construction Stage Analysis และ ผลของ Nonlinear Temperature Gradient ที่ปรึกษาได้ทำการวิเคราะห์ผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรประเภท HI-93 ดังแสดงผลดังนี้



รูปที่ 6-150 แสดงผลของความเค้น S11 (HL-93)(1+IM)



รูปที่ 6-151 แสดงผลของความเค้น S44 (HL-93)(1+IM)

จากผลการวิเคราะห์ค่าของความเค้นในหน้าตัดของสะพานในช่วงความยาวกึ่งกลางต่างๆ ที่พิจารณาจากด้านบนของหน้าตัดสะพานจะอยู่ในช่วงของ -18 ksc ถึง -20 ksc โดยเฉลี่ย และค่าของด้านล่างของหน้าตัดสะพานจะอยู่ในช่วงของ 30 ksc ถึง 50 ksc สำหรับความเค้นในหน้าตัดสะพานในช่วงปลายๆ ความยาวหรือใกล้กับฐานรองรับ พิจารณาจากด้านบนของหน้าตัดสะพานจะอยู่ในช่วงของ -40 ksc ถึง 39 ksc โดยเฉลี่ย และค่าของด้านล่างของหน้าตัดสะพานจะอยู่ในช่วงของ -50 ksc ถึง 30 ksc

6.8 การรวมผลของขั้นตอนการก่อสร้างและผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

หลังจากได้ทำการวิเคราะห์ผลของขั้นตอนการก่อสร้างของสะพาน หรือ Nonlinear Construction Stage Analysis และผลของความเค้นที่เกิดจาก Moving Load ของรถบรรทุกแล้ว รวมทั้งได้ผลของความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างวัน (Nonlinear Temperature Gradient) ในขั้นตอนต่อไปคือการรวมผลของความเค้นเนื่องจากการก่อสร้าง อายุของสะพาน ผลของน้ำหนักบรรทุกจร และผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเข้าด้วยกันโดยใช้การรวมแรงแบบเชิงเส้นหรือ Linear Load Combination โดยเนื่องจากมาตรฐาน AASHTO LRFD ได้กำหนดให้พิจารณาผลของ Nonlinear Temperature Gradient ในสภาวะการใช้งาน ดังนั้น Load Combination ที่ใช้ในการรวมความเค้นสำหรับการประเมินสะพานได้ใช้ตาม SERVICE I: Load Combination ดังแสดงในตารางดังนี้

ตารางที่ 6-11 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและการรวมแรงมาตรฐาน AASHTO LRFD

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time			
										EQ	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength II	γ_p	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength III	γ_p	—	1.00	1.40	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength IV	γ_p	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—
Strength V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Extreme Event I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—
Extreme Event II	γ_p	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	0.80	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	0.70	—	1.00	1.00/1.20	—	1.0	—	—	—	—
Fatigue I—LL, IM & CE only	—	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue I II— LL, IM & CE only	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

โดยจากตารางแสดงให้เห็นว่า Service I Load Combination หรือการรวมความเค้นแบบเชิงเส้นเพื่อพิจารณาผลของ Nonlinear Temperature Gradient (TG) ทำได้ดังนี้

$$\text{ความเค้นที่ผิวบน หน้าตัดใดๆ} = 1.0 \times \text{ความเค้นที่ผิวบน (DC+DD+DW+CR+SD+PS)} + 1.0 \times \text{ความเค้นที่ผิวบน (LL+IM)} + 0.5 \times \text{ความเค้นที่ผิวบน TG}$$

$$\text{ความเค้นที่ผิวล่าง หน้าตัดใดๆ} = 1.0 \times \text{ความเค้นที่ผิวล่าง (DC+DD+DW+CR+SD+PS)} + 1.0 \times \text{ความเค้นที่ผิวล่าง (LL+IM)} + 0.5 \times \text{ความเค้นที่ผิวล่าง TG}$$

$$\text{ความเค้นที่กลางหน้าตัดใดๆ} = 1.0 \times \text{ความเค้นที่กลางหน้าตัด (DC+DD+DW+CR+SD+PS)} + 1.0 \times \text{ความเค้นที่กลางหน้าตัด (LL+IM)} + 0.5 \times \text{ความเค้นที่กลางหน้าตัด TG}$$

ดังนั้นจากสมการข้างต้น

- 1) พิจารณابริเวณกลางช่วงความยาวสะพานและพิจารณากรณี Temperature Gradient Max (-17 ksc, 22 ksc)

$$\text{ความเค้นรวมที่ผิวบนหน้าตัดใดๆ} = 1.0x(-50 \text{ ksc}) + 1.0x(-18 \text{ ksc}) + 0.5x(-17 \text{ ksc}) = -76.5 \text{ ksc}$$

$$\text{ความเค้นรวมที่ผิวล่างหน้าตัดใดๆ} = 1.0x(-70 \text{ ksc}) + 1.0x(50 \text{ ksc}) + 0.5x(-17 \text{ ksc}) = -28.5 \text{ ksc}$$

$$\text{ความเค้นรวมที่ประมาณกลางหน้าตัดใดๆ} = 1.0x(-60 \text{ ksc}) + 1.0x(10 \text{ ksc}) + 0.5x(22 \text{ ksc}) = -39 \text{ ksc}$$

- 2) พิจารณابริเวณปลายช่วงความยาวสะพานและพิจารณากรณี Temperature Gradient Max (-17 ksc, 22 ksc)

$$\text{ความเค้นรวมที่ผิวบนหน้าตัดใดๆ} = 1.0x(-80 \text{ ksc}) + 1.0x(39 \text{ ksc}) + 0.5x(-17 \text{ ksc}) = -49.5 \text{ ksc}$$

$$\text{ความเค้นรวมที่ผิวล่างหน้าตัดใดๆ} = 1.0x(-10 \text{ ksc}) + 1.0x(30 \text{ ksc}) + 0.5x(-17 \text{ ksc}) = 11.5 \text{ ksc}$$

$$\text{ความเค้นรวมที่ประมาณกลางหน้าตัดใดๆ} = 1.0x(-45 \text{ ksc}) + 1.0x(34 \text{ ksc}) + 0.5x(22 \text{ ksc}) = 0 \text{ ksc}$$

6.9 การประเมินความแข็งแรงของสะพานโดยพิจารณาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น

จากการวิเคราะห์ค่าของความเค้นรวมที่หน้าตัดของสะพานในหัวข้อที่ผ่านมา ความเค้นรวมที่ได้จากการรวมความเค้นจากผลของขั้นตอนการก่อสร้าง (DL+SDL+PS+TIME) กับผลของความเค้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรกับผลของความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน (Nonlinear Temperature Gradient) ที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างและกึ่งกลางของหน้าตัดสะพานจะนำมาเปรียบเทียบกับหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดและแนะนำโดยมาตรฐาน AASHTO LRFD โดยหน่วยแรงที่ยอมให้แสดงดังนี้

Allowable Stress in Segmental PC members

1) Transfer State

Compressive Stress : 0.55f_{ci} (MPa) Section 26.5.2.2

$$f_{ci} = 32 \text{ MPa}$$

$$0.55f_{ci} = 17.6 \text{ MPa}$$

Tensile Stress

No tension allow for joints without the minimum bonded rebars

2) Service State (After all losses)

Compressive Stress : 0.4f_c (Mpa)

$$\text{DL+PS+LL } 0.4f_c = 16 \text{ Mpa}$$

Tensile Stress Table 5.9.4.2.2-1

Joint without the minimum bonded rebars -No tension

$$\text{Other area with bonded rebars : } 0.50\sqrt{f_c} \text{ Mpa} = 3.16$$

$$\text{Principal Tensile Stress at N.A. in Web: } 0.289\sqrt{f_c} \text{ Mpa} = 1.83$$

ในช่วงของ Service State ผลของความเค้นที่เกิดขึ้นจากความเค้นอัด (Compressive Stress) หลังจากเกิดการสูญเสียแรงดึงในลวดอัดแรงแล้ว ให้เกิดได้ไม่เกิน 16 Mpa หรือ 160 ksc และกรณีของความเค้นดึงใน Segmental Box Girder นั้น หากเป็น Joint ที่ไม่มี เหล็กเสริมผ่านรอยต่อ ไม่ให้เกิดความเค้นดึงขึ้นในรอยต่อ

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ความเค้นดึงบริเวณผิวล่างและกึ่งกลางหน้าตัดของ Pier Segment ที่ใกล้ Pot Bearing มีโอกาสเกิดความเค้นดึงขึ้น เนื่องจากความเค้นอัดที่เกิดจากลวดอัดแรงมีการลดน้อยลงตามเวลาการใช้งาน ดังนั้นหากเกิดความเค้นดึงซึ่งหากรอยต่อยังไม่มีการเปิดหรือยังมีการปิดแน่นเนื่องจาก Shear Key ความเค้นจะถ่ายไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นโดยใช้เหล็กเสริมภายใน Segment ที่ใกล้ผิวล่างของหน้าตัดนั้น ซึ่งกรณีนี้ความเค้นดึงก็อาจจะไม่ทำให้เกิดรอยร้าวหากมีการเสริมเหล็กบริเวณด้านล่างของหน้าตัดเพียงพอ

อย่างไรก็ตามหากสะพานมีอายุการใช้งานค่อนข้างมากและความเค้นอัดลดน้อยลงก็ยังมีโอกาสที่จะเกิดรอยร้าวบริเวณผิวล่างและกึ่งกลางหน้าตัดได้ ดังนั้นจึงควรหมั่นตรวจสอบในสนามบริเวณดังกล่าวและหากเกิดรอยร้าวขึ้นก็ควรที่จะซ่อมแซมหรือเสริมกำลังต่อไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของสะพาน

6.10 การประเมินความแข็งแรงของรอยต่อ Shear Key ของสะพาน

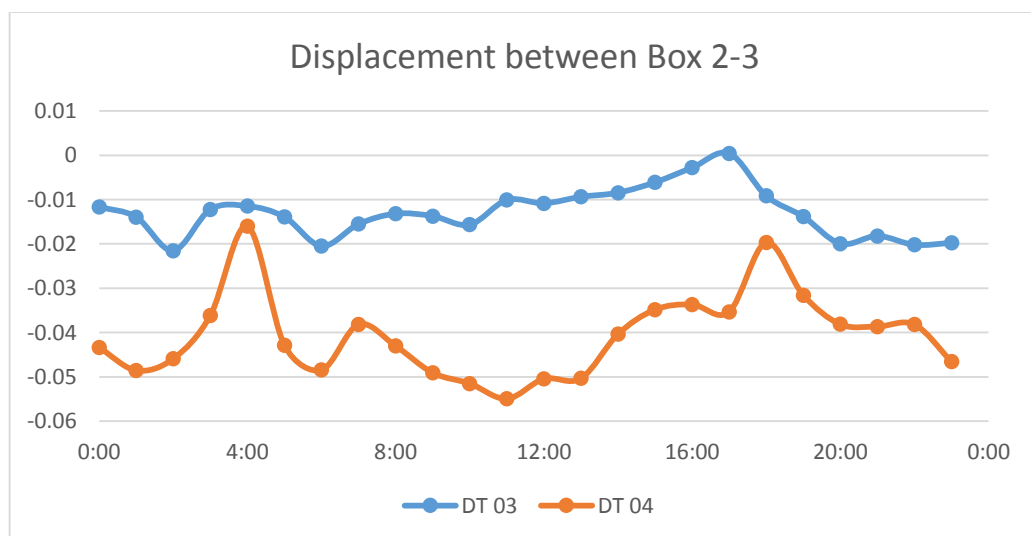
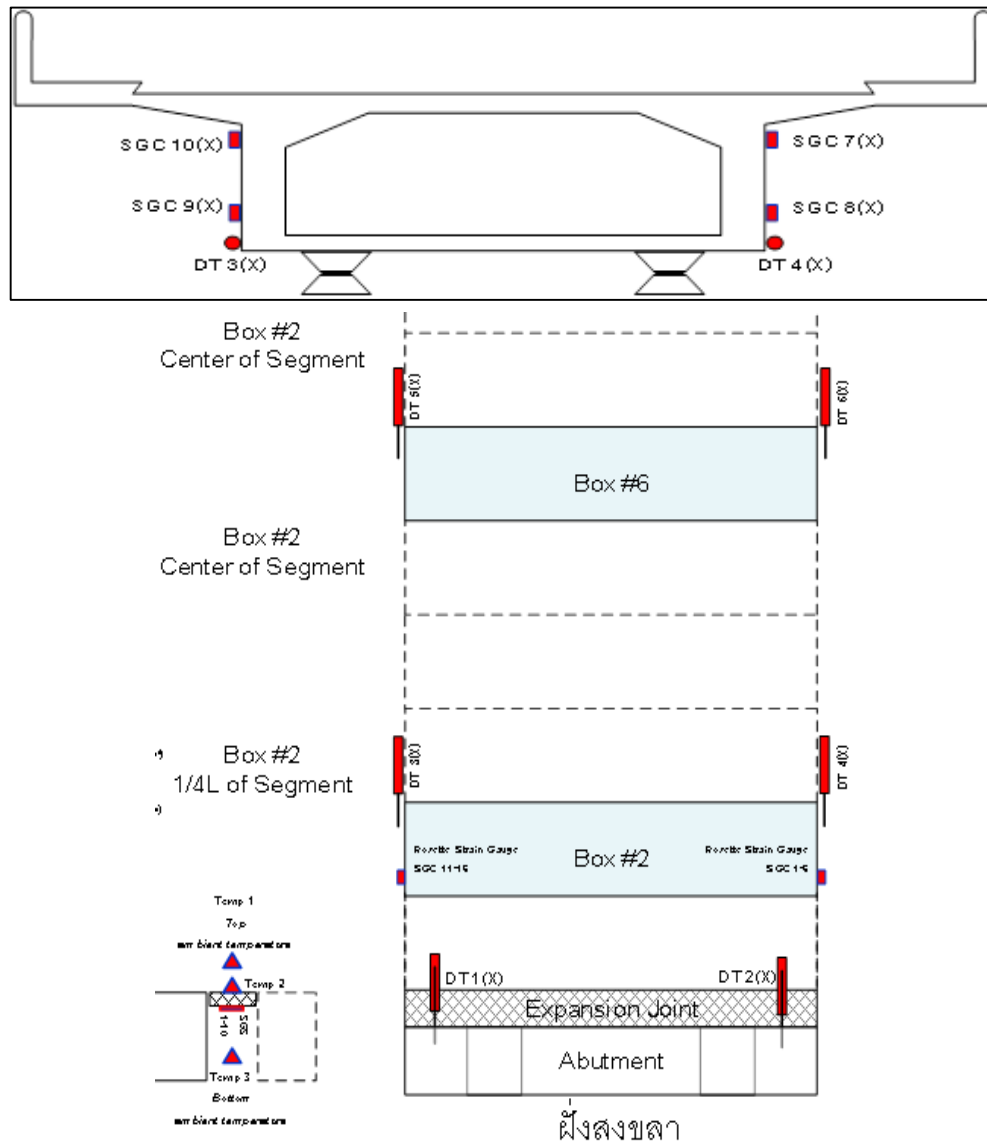
ในการประเมินความแข็งแรงของรอยต่อ Shear Key ของสะพานประเภท Precast Segmental Box Girder ที่นำเสนอในโครงการนี้พิจารณาโดย 2 ส่วนได้แก่ 1) ข้อมูลการตรวจวัดในภาคสนาม 2) ข้อมูลวิเคราะห์และประเมินตามมาตรฐานการออกแบบตาม AASHTO LRFD Bridge Design Specification

ข้อมูลการตรวจวัดในภาคสนาม

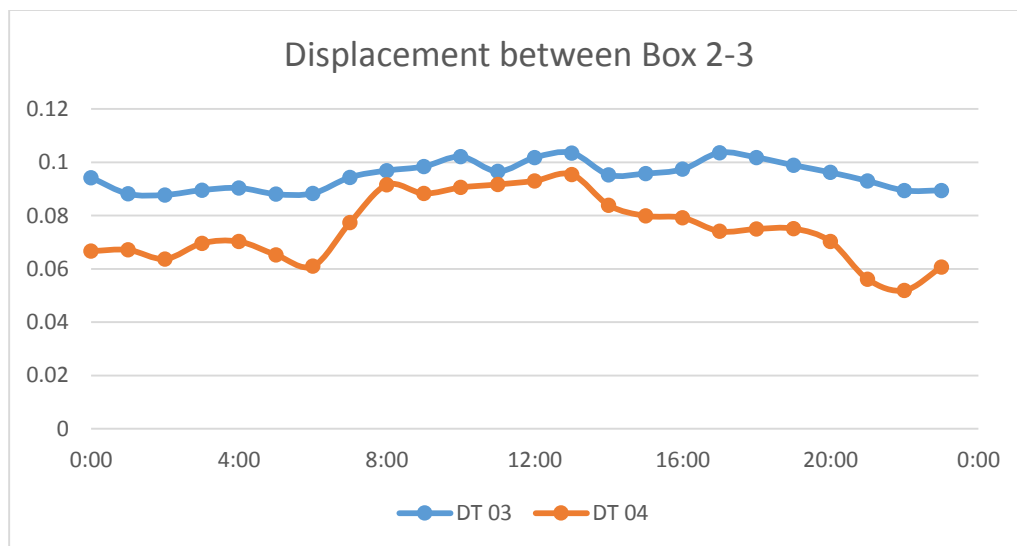
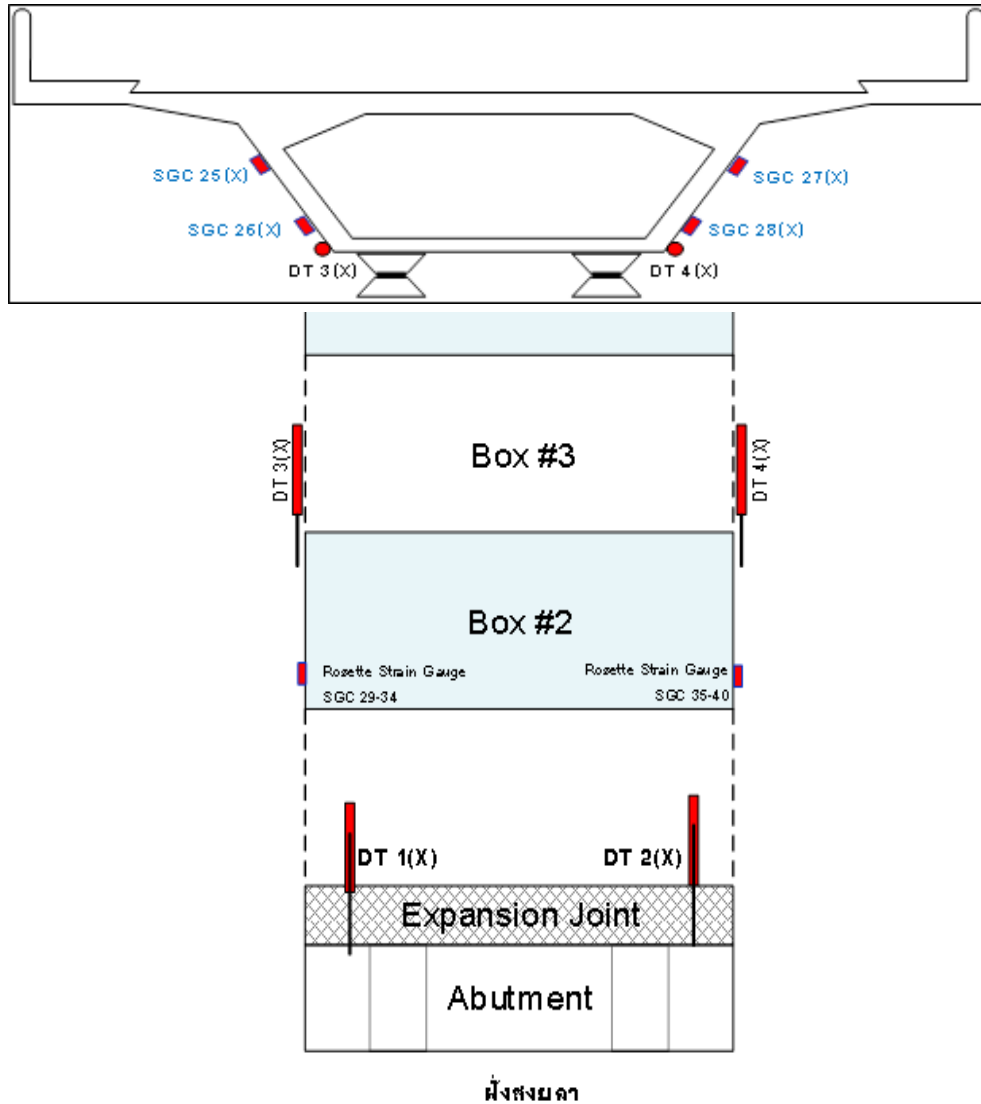
ในโครงการนี้เพื่อที่จะตรวจสอบสภาพและความแข็งแรงของ Shear Key ของสะพานที่ปรึกษาได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภท Displacement Transducer (DT) ที่บริเวณด้านข้างเยื้องไปทางกันของ Box Girder โดยการติด DT ได้ทำการติดคร่อมรอยต่อ Shear Key ระหว่าง Box Girder ที่ติดกัน ดังนั้นหากค่าของ DT ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากก็จะสามารถบ่งชี้ว่ารอยต่อของ Shear Key อาจมีการขยับหรือเปิดร้าวออกซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำการถ่ายแรงระหว่าง Box Girder ได้อย่างที่ออกแบบไว้นั่นเอง

จากแนวความคิดนี้ผลของ DT และลักษณะการติดตั้งแสดงดังต่อไปนี้

สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)



สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)



จากผลการตรวจวัดค่าของ DT ที่วัดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างรอยต่อของ Box Girder ที่ติดกันมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.1 mm ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างน้อย ดังนั้นในเชิงปฏิบัติจึงสรุปได้ว่ารอยต่อ Shear Key ของ Box Girder ของสะพานดินตัวเก่าและตัวใหม่ยังไม่มีอาการเคลื่อนตัวที่บ่งชี้ว่าเกิดความเสียหายหรือไม่สามารถถ่ายแรงได้

ข้อมูลวิเคราะห์และประเมินตามมาตรฐาน

จากผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของ Shear Key ข้างต้น ที่ปรึกษาได้ดำเนินการประเมินความแข็งแรงของรอยต่อสะพานโดยใช้ค่าของ AASHTO LRFD Bridge Design Specification เพื่อตรวจสอบใช้เชิงรายการคำนวณเพื่อยืนยันความแข็งแรงของรอยต่อ Shear Key ของ Box Girder

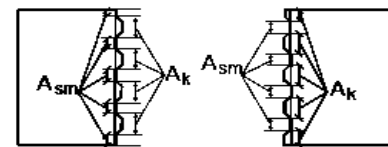
โดย AASHTO Recommendation ได้ให้สมการเพื่อออกแบบและประเมินกำลังของรอยต่อ Shear Key ระหว่างชิ้นส่วน Box Girder ดังนี้

The joints of many segmental bridges had been designed according to the AASHTO Recommendations [4]. Equation 1 is mainly based on tests with small specimens having usually one shear key only [7] similar to that shown in figure 16 [8].

$$V_j = A_{sm} \cdot \sqrt{6,792 \cdot 10^{-3} f_{ck} (12 + 2,466 \cdot \sigma_n)} + 0,6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad (1)$$

[m, MN, MPa]

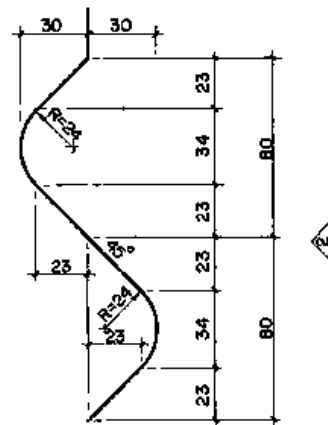
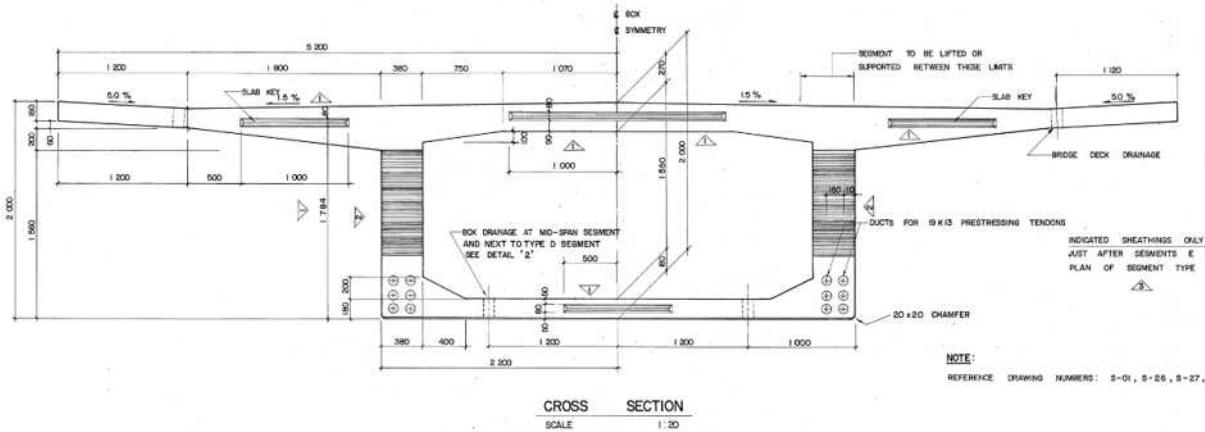
where: σ_n average compressive stress across the joint
 A_{sm} area of contact between smooth surfaces in the failure plane
 f_{ck} characteristic concrete compressive strength
 A_{key} min. area of the base of all keys in the failure plane



จากสมการข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการประมาณความแข็งแรงของ Shear Key ของ Segmental Box Girder ได้ดังนี้

สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)

จากแบบของ Shear Key ของสะพานดินตัวเก่าซึ่งแสดงข้างล่างนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการหาค่ากำลังของ Joint ของ Shear Key ได้ดังนี้



DETAIL "2" WEB KEY
SCALE 1:2

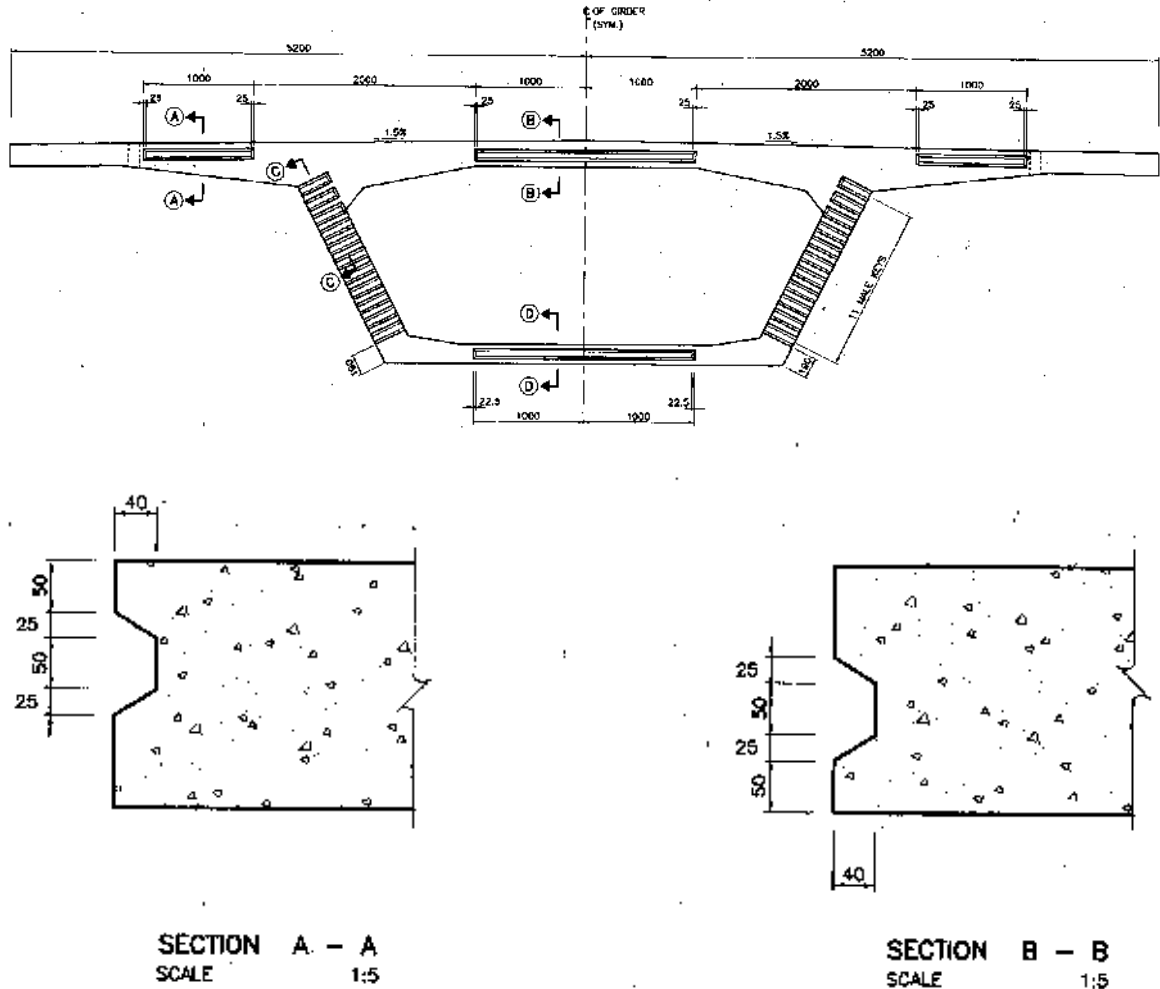
Akey=	0.7648	m ²
Asm=	0.4648	m ²
Sn=	4	Mpa
Vj=	9.83	MN
0.9Vj=	884.82	T

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน Precast Segmental Box Girder โดยทำการวิเคราะห์แบบ Nonlinear Construction Stage และการวิเคราะห์ Moving Load Analysis และทำการรวมแรงแบบ Linear Load Combination ตามที่กำหนดใน AASHTO LRFD เพื่อคำนวณหาแรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของ Box Girder

จากขั้นตอนข้างต้นนั้น ค่าแรงเฉือนประลัย $V_u = 635 \text{ T}$ ดังนั้น น้อยกว่าค่าของ $0.9V_j$ ซึ่งแสดงว่า Shear Key ของ Segmental Box Girder มีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้น

สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่)

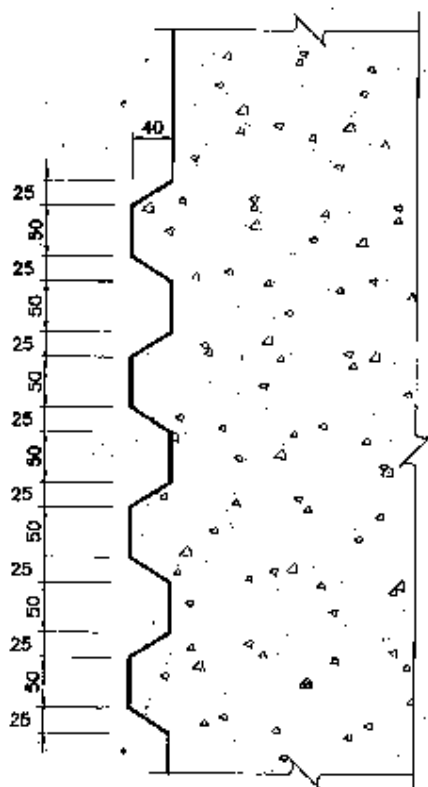
จากแบบของ Shear Key ของสะพานดินตัวใหม่ซึ่งแสดงข้างล่างนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการหาค่ากำลังของ Joint ของ Shear Key ได้ดังนี้



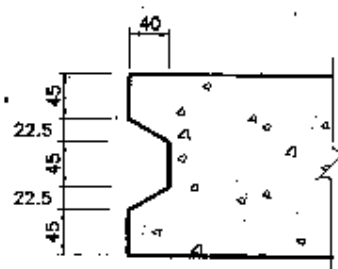
Akey=	1.26	m ²
Asm=	0.63	m ²
Sn=	4.5	Mpa
Vj=	16.87	MN
0.9Vj=	1518.29	T

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน Precast Segmental Box Girder โดยทำการวิเคราะห์แบบ Nonlinear Construction Stage และการวิเคราะห์ Moving Load Analysis และทำการรวมแรงแบบ Linear Load Combination ตามที่กำหนดใน AASHTO LRFD เพื่อดำเนินการหาแรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของ Box Girder

จากขั้นตอนข้างต้นนั้น ค่าแรงเฉือนประลัย $V_u = 615 \text{ T}$ ดังนั้น น้อยกว่าค่าของ $0.9V_j$ ซึ่งแสดงว่า Shear Key ของ Segmental Box Girder มีความแข็งแรงและเพียงพอต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้น



SECTION C - C
SCALE 1:5



SECTION D - D
SCALE 1:5

6.11 สรุปผลการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของคนและรอยต่อระหว่างคน

หน้าตัดคานและรอยต่อระหว่างคานของสะพานทั้งสองแห่ง มีความแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันทำให้เกิดหน่วยแรงแด้งขึ้นบนหน้าตัดคานในระดับที่ค่อนข้างสูง ประกอบกับการสูญเสียกำลังของลวดอัดแรงเนื่องจากการคลายตัว รวมถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกที่อาจมีขึ้นในอนาคต ผลรวมของทั้ง 3 ปัจจัยนี้อาจส่งผลให้หน้าตัดคานและรอยต่อระหว่างคานมีส่วนความปลอดภัยลดลงไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ จึงแนะนำให้ทำการทดสอบและประเมินความสามารถของคานและรอยต่อระหว่างคานอีกครั้งในอีก 10 ปีข้างหน้า

บทที่ 7 การประเมินศักยภาพในการให้บริการของ โครงสร้างสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจร

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกก่อให้เกิดหน่วยแรงแบบวัฏจักรขึ้นใน
โครงสร้างสะพาน หน่วยแรงแบบวัฏจักรนี้ทำให้โครงสร้างเกิดการล้า อันอาจส่งผลถึงศักยภาพในการให้บริการของสะพาน
ได้ เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการนำหน่วยแรงแบบวัฏจักรที่ตรวจวัดได้ มาวิเคราะห์หาความล้าที่เกิดขึ้น เพื่อประเมินศักยภาพ
ในการให้บริการของสะพาน

7.1 ความล้าของวัสดุ

เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำซ้ำหรือแรงกระทำแบบวัฏจักรจนกระทั่งวัสดุวิบัติ โดยที่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่าน้อย
กว่าหน่วยแรงที่วัสดุจะวิบัติภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ การวิบัติของวัสดุในลักษณะแบบนี้เรียกว่าการวิบัติโดยความล้า
โดยทั่วไปการทดสอบความล้าของวัสดุจะแสดงอยู่ในรูปเส้นโค้งความล้า หรือ เส้นโค้ง $S - N$ โดยเส้นโค้งนี้แสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ N ที่วัสดุวิบัติกับหน่วยแรงสูงสุด S ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติ สมการที่
7-1 แสดงความสัมพันธ์ $S - N$ ของคอนกรีต

$$\log N = 17 \cdot \left[\frac{1 - S_{max}}{1 - S_{min}} \right] = 17 \cdot \left[1 - \frac{S_r}{1 - S_{min}} \right] \quad (7-1)$$

โดยที่ N คือจำนวนรอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ

$$S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{f} \quad (7-2)$$

$$S_{min} = \frac{\sigma_p}{f} \quad (7-3)$$

$$S_r = S_{max} - S_{min} \quad (7-4)$$

โดยที่ σ_{max} คือหน่วยแรงสูงสุด σ_p คือหน่วยแรงต่ำสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้ำ และ f คือกำลังรับแรงแบบ
สถิตย์ของคอนกรีต

ความสัมพันธ์ $S - N$ ในสมการที่ 7-1 เป็นสมการที่ยอมรับใช้กันทั่วไปในวงการวิศวกรรม โดยสามารถใช้ในการ
ประเมินความล้าของคอนกรีตกำลังปกติภายใต้แรงอัด แรงดึง และแรงดัดได้

การทดสอบความล้าของวัสดุจะทดสอบที่ค่า Amplitude คงที่ค่าหนึ่งๆของแรงกระทำ ผลของการเปลี่ยนแปลง Amplitude ของแรงกระทำที่มีต่อความล้าของวัสดุสามารถประเมินได้จากหลักเกณฑ์การสะสมความล้าเชิงเส้นของ Palmgren และ Miner (Palmgren-Miner linear criterion of cumulative damage) โดยหลักเกณฑ์นี้ แต่ละรอบที่ $\sigma_{max,i}$ กระทำต่อวัสดุ จะทำให้วัสดุเกิดความล้า $\frac{1}{N_i}$ โดยวัสดุจะเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าเมื่อความล้าสะสมเท่ากับ 1 ดังสมการที่ 7-5

$$\sum \frac{1}{N_i} = 1 \quad (7-5)$$

7.2 แนวทางการประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกทุกจรในโครงสร้างสะพาน

จากหลักการเกี่ยวกับความล้าของวัสดุตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 7.1 การประเมินความล้าเนื่องจากแรงกระทำซ้ำหรือแรงกระทำแบบวัฏจักรในโครงสร้างสะพาน จำเป็นต้องอาศัยเส้นโค้งความล้า หรือ สมการ $S - N$ ของโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้างที่ต้องการประเมิน จากนั้นใช้หลักเกณฑ์การสะสมความล้าเชิงเส้นของ Palmgren และ Miner มาประเมินความล้าของโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง Amplitude ของแรงกระทำได้ แต่อย่างไรก็ตาม สมการ $S - N$ ของโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้าง เช่น คานสะพานหรือแผ่นพื้นสะพาน จะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของโครงสร้างสะพานและเงื่อนไขขอบเขตของสะพาน ทำให้ไม่มีสมการ $S - N$ ของโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้าง ที่แน่นอน การได้มาซึ่งสมการ $S - N$ ของโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้างรูปแบบหนึ่งๆ จำเป็นต้องอาศัยการทดสอบโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้างนั้นๆ ภายใต้แรงกระทำซ้ำซึ่งมีลักษณะเสมือนแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้าง ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของสะพานตามที่กำหนด

การสร้างสมการ $S - N$ ของโครงสร้างสะพานหรือส่วนของโครงสร้างตามที่ได้กล่าวข้างต้น ไม่ได้อยู่ในขอบเขตงานของโครงการนี้ ดังนั้นการประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกทุกจรในโครงสร้างสะพาน ในส่วนของคานคอนกรีต จึงเป็นการประเมินความล้าของคานคอนกรีตคานสะพาน โดยหากคานคอนกรีตคานสะพานได้รับความเสียหายเนื่องจากความล้าก็จะถือว่าเป็นจุดที่ต้องเริ่มเฝ้าระวังและตรวจสอบการลุกลามของความเสียหาย ในส่วนของเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน ซึ่งเหล็กรอยต่อพื้นสะพานทำหน้าที่เป็นคานเหล็ก สมการ $S - N$ ของคานเหล็กสามารถอ้างอิงได้จากเอกสารวิชาการ และจะถูกนำมาใช้ในการประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกทุกจรของเหล็กรอยต่อพื้นสะพานของโครงการนี้

ในโครงการนี้ การประเมินความล้าของคานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกทุกจร อาศัยข้อมูลการตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ สมการ $S - N$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ N ที่วัสดุวิบัติกับหน่วยแรงสูงสุด S ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติ จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ สมการ $\epsilon - N$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ N ที่วัสดุวิบัติกับความเครียดสูงสุด ϵ ซึ่งเป็นความเครียดที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติ ดังนั้นสมการ $S - N$ ของคานคอนกรีต สมการที่ 7-1 โดยสมมติให้ หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้ำเท่ากับศูนย์ สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ $\epsilon - N$ ได้ดังสมการที่ 7-6

$$\log N = 17 \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right] \quad (7-6)$$

โดยที่ ε คือความเครียดที่เกิดขึ้น และ ε_f คือความเครียดสูงสุดที่ยอมให้คอนกรีตด้านทานได้เมื่อคอนกรีตรับแรงแบบสถิตย์ ค่า ε_f สำหรับคอนกรีตรับแรงดึงมีค่าระหว่าง $100\mu \sim 150\mu$ ส่วน ε_f สำหรับคอนกรีตรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 450μ

ในส่วนของเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน ความสัมพันธ์ $\varepsilon - N$ ที่นำมาใช้ในโครงการนี้แสดงไว้ในสมการที่ 7-7

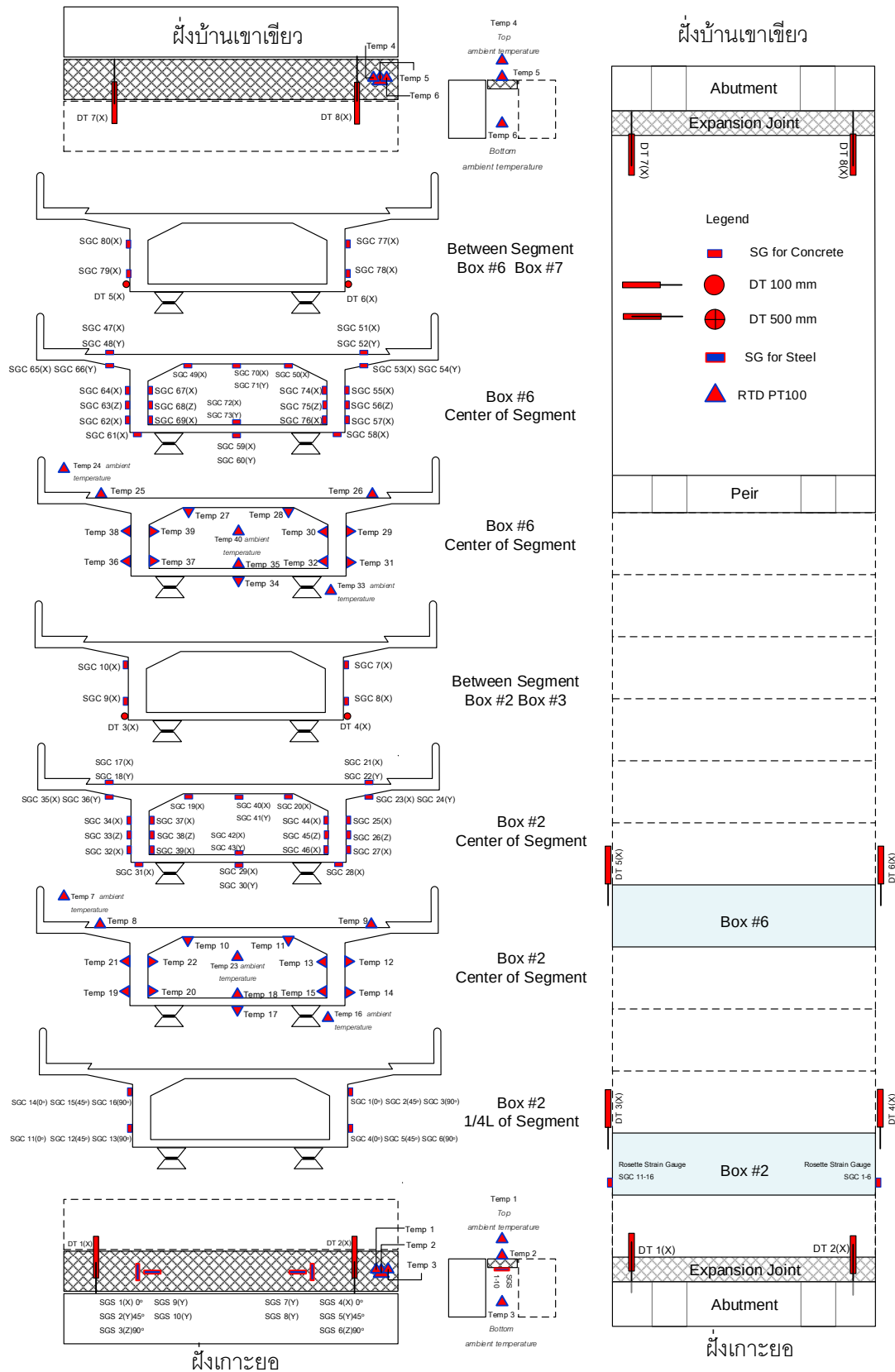
$$\log N = -4.149 - 3.372 \cdot \log \varepsilon \quad (7-7)$$

ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จากทั้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของล้อรถบรรทุก จะถูกนำมาคำนวณหาความล้า $\frac{1}{N_i}$ ที่เกิดขึ้นที่คอนกรีตคานสะพานและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน โดยใช้สมการที่ 7-6 และ 7-7 ตามลำดับ

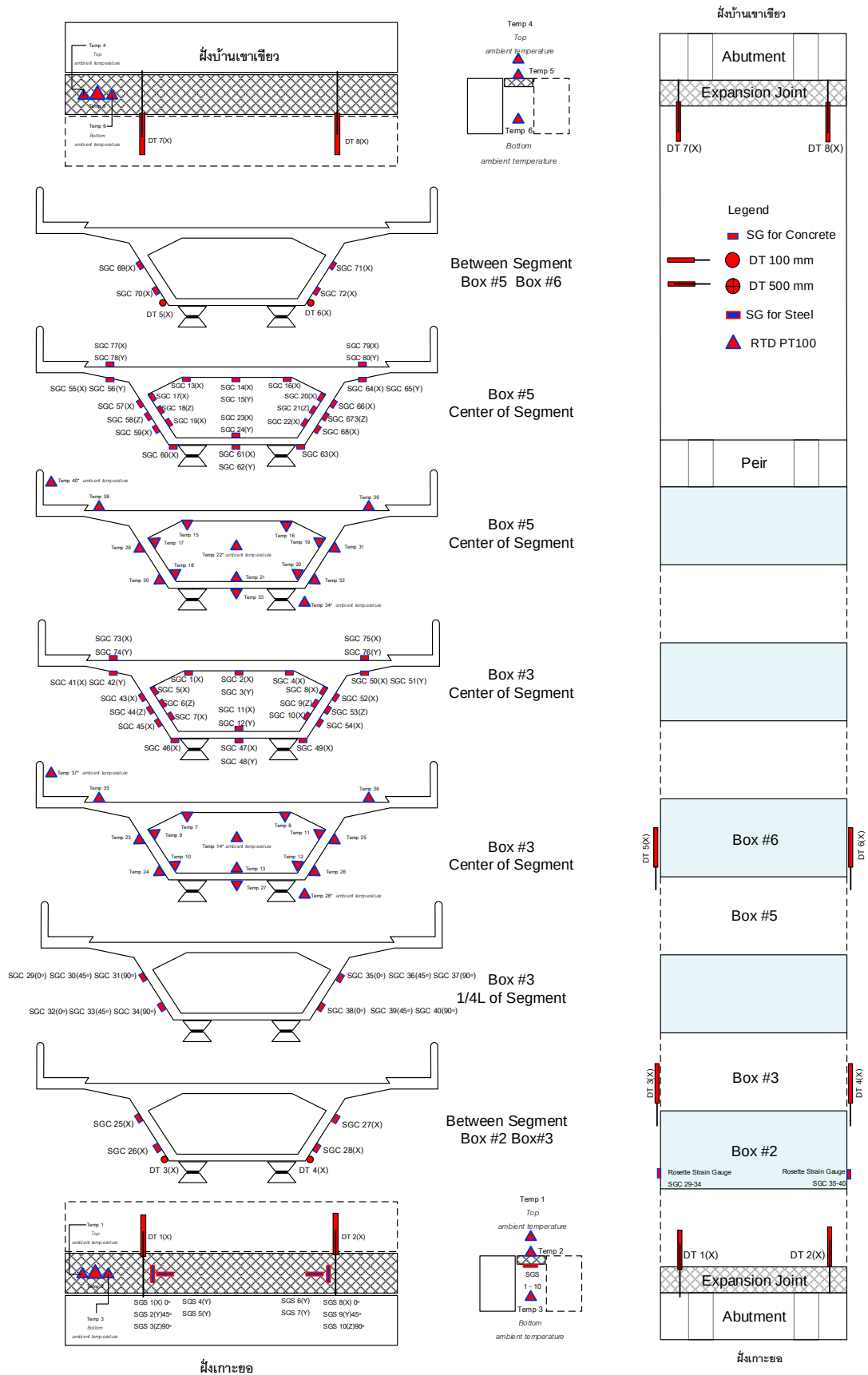
เนื่องจากพฤติกรรมของความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของล้อรถบรรทุกมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันจะเริ่มจากค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดแล้วกลับมายังค่าต่ำสุด หรือ Amplitude จะครบรอบใน 1 วัน ในขณะที่ Amplitude ของความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำของล้อรถบรรทุกจะครบรอบในช่วงเวลาสั้นๆ ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน ดังนั้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันกับผลของความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำของล้อรถบรรทุก และเพื่อความสะดวกในการประเมินความล้า งานวิจัยนี้จะพิจารณาความล้าสะสมที่เกิดขึ้นใน 1 วัน ทั้งนี้เนื่องจากความล้าสะสมใน 1 วันมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นความล้าสะสมใน 1 วันจะแสดงอยู่ในรูปของเส้นโค้งการกระจายตัว จากนั้นจะอาศัยการสุ่มค่าความล้าสะสมใน 1 วันด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาระยะเวลาที่เกิดการวิบัติจากสมการที่ 7-5

7.3 การประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกจรในคานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน

ในโครงการนี้ การประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกจรในคานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน อาศัยข้อมูลการตรวจวัดความเครียด โดยในแต่ละสะพานได้ทำการวัดตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและน้ำหนักบรรทุกจรต่อเนื่องกันเป็นเวลา 45 วัน รูปที่ 7-1 และรูปที่ 7-2 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดความเครียดของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานตัวเดิม) และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานตัวใหม่) ตามลำดับ



รูปที่ 7-1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสะพาน ผังซ้ายทาง



รูปที่ 7-2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสะพาน ฝั่ขวาทาง

อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดได้ถูกติดตั้งไว้ตามผิวคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน ทั้งในทิศทางตามแนวสะพานและทิศทางตั้งฉากกับแนวสะพาน โดยในส่วนของการคอนกรีตได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบริเวณสองส่วนหลักได้แก่ บริเวณ Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และบริเวณ Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน

สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ซึ่งเป็นสะพาน Box Segment รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้ทำการตรวจวัดต่อเนื่องกัน 45 วัน ระหว่างวันที่ 12 มี.ค. ถึง 25 เม.ษ. 2558 มีรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานจำนวน 27,072 คัน หรือเฉลี่ยประมาณ 600 คันต่อวัน อุณหภูมิอากาศภายนอก Box Segment วัดค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุดได้ 4°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศภายใน Box Segment มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 32°C อุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตวัดค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุดได้ 6°C ส่วนอุณหภูมิที่เหล็กรอยต่อพื้นสะพานวัดค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุดได้ 9°C

สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ซึ่งเป็นสะพาน Box Segment รูปสี่เหลี่ยมคางหมู ได้ทำการตรวจวัดต่อเนื่องกัน 45 วัน ระหว่างวันที่ 29 เม.ษ. ถึง 21 มิ.ย. 2558 มีรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานจำนวน 11,322 คัน หรือเฉลี่ยประมาณ 250 คันต่อวัน อุณหภูมิอากาศภายนอก Box Segment วัดค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุดได้ 5°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศภายใน Box Segment มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 34°C อุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตวัดค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุดได้ 5°C ส่วนอุณหภูมิที่เหล็กรอยต่อพื้นสะพานวัดค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุดได้ 11°C

จากผลการตรวจวัดความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ ของสะพานทั้งสองแห่ง พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันจะมี Amplitude ที่คงที่ ส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำของล้อรถบรรทุกจะมี Amplitude ที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับการกระทำหรือน้ำหนักล้อของรถบรรทุก โดยตำแหน่งที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกมากที่สุด ได้แก่บริเวณกลางท้องปีกบนของ Box Segment ที่ทำหน้าที่เป็นพื้นสะพาน ซึ่งตรงกับ Strain Gauge ดังนี้

- สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) คือตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC41Y ของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และหมายเลข SGC71Y ของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน
- สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) คือตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC3Y ของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และหมายเลข SGC15Y ของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน

โดย Strain Gauge ดังกล่าวเป็น Strain Gauge ที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับแนวสะพาน ให้ค่าความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับแนวสะพาน ϵ_y ดังนี้

- SGC41Y ให้ค่า ϵ_y เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน หรือ $\epsilon_{y,temp}$ เท่ากับ 114μ ส่วน ϵ_y เนื่องจากแรงกระทำของล้อรถบรรทุก หรือ $\epsilon_{y,truck}$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 87μ
- SGC71Y ให้ค่า $\epsilon_{y,temp}$ เท่ากับ 228μ ส่วน $\epsilon_{y,truck}$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 192μ
- SGC3Y ให้ค่า $\epsilon_{y,temp}$ เท่ากับ 15μ ส่วน $\epsilon_{y,truck}$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 23μ
- SGC15Y ให้ค่า $\epsilon_{y,temp}$ เท่ากับ 68μ ส่วน $\epsilon_{y,truck}$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 55μ

เป็นที่น่าสังเกตว่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ ที่ตรวจวัดได้จาก SGC71Y มีค่าสูงเกินกว่าค่า ϵ_f สำหรับคอนกรีตรับแรงดึงซึ่งมีค่าระหว่าง $100\mu \sim 150\mu$ ดังนั้น ผิวคอนกรีตบริเวณตำแหน่ง SGC71Y ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ได้เกิดรอยแตกขึ้น ซึ่งรอยแตกนี้ยังคงเป็นรอยแตกขนาดเล็กมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ส่วน $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ ที่ตรวจวัดได้จาก SGC41Y ซึ่งเป็น

ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ก็มีค่าอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับค่า ϵ_f สำหรับคอนกรีตรับแรงดึง ซึ่งจะมีผลทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกเนื่องจากความล้าได้

ในส่วนของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ถึงแม้ว่าค่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ ที่ตรวจวัดได้จาก SGC15Y และ SGC3Y จะมีค่าต่ำกว่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ ที่ตรวจวัดได้จาก SGC71Y และ SGC41Y ของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) อยู่มาก แต่ก็มีค่าความเป็นไปได้ที่ $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ ที่ตรวจวัดได้จาก SGC15Y จะรวมกันจนมีค่าสูงเกินกว่าค่า ϵ_f สำหรับคอนกรีตรับแรงดึง ทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกได้

การตรวจวัดความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับแนวสะพานทั้งจาก $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ของสะพานทั้งสองแห่งยังสะท้อนพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพานจะมีค่ามากกว่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน ทั้งที่ค่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment แต่ละตัวควรมีค่าใกล้เคียงเนื่องจากการขยายตัวในทางข้าง (ทิศทางตั้งฉากกับแนวสะพาน) แต่เนื่องจากผลการอัดแรงที่ลดลงบริเวณกลางช่วงสะพานทำให้ Membrane Action ที่เกิดขึ้นกับพื้นสะพานของ Box Segment บริเวณกลางช่วงสะพานลดลง ในขณะที่ Box Segment บริเวณปลายช่วงสะพานมีความแข็งแรงที่สูงกว่า Box Segment บริเวณกลางช่วงสะพานประกอบกับผลของการอัดแรงที่มากกว่า ทำให้ Membrane Action ที่เกิดขึ้นกับพื้นสะพานของ Box Segment บริเวณปลายช่วงสะพานมีค่ามากกว่า Membrane Action ที่เกิดขึ้นกับพื้นสะพานของ Box Segment บริเวณกลางช่วงสะพาน ส่งผลให้ทั้ง $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพานมีค่ามากกว่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน ทำให้พื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานมีแนวโน้มที่จะได้รับความเสียหายมากกว่าพื้นสะพานบริเวณปลายช่วงสะพาน

ความยาวของ Box Segment มีผลต่อ $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพาน กล่าวคือ Box segment ของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) มีความยาวมากกว่า Box segment ของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ทำให้พื้นสะพานของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) มีความยาว (ระยะตามแนวสะพาน) มากกว่าพื้นสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ในขณะที่ความกว้าง (ระยะตั้งฉากกับแนวสะพาน) ของพื้นสะพานของสะพานทั้งสองแห่งมีค่าเท่ากัน ทำให้พื้นสะพานของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) กระจายแรงทั้งในทิศทางตามแนวสะพานและทิศทางตั้งฉากกับแนวสะพานได้ดีกว่าพื้นสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ค่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) จึงต่ำกว่าค่า $\epsilon_{y,temp}$ และ $\epsilon_{y,truck}$ บริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ดังนั้น Box segment ของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) จึงมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกน้อยกว่า Box segment ของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม)

ความเครียดที่ตำแหน่งอื่นๆบนผิวคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำจนไม่อาจทำให้คอนกรีตได้รับความเสียหายได้ ยกเว้นความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน บริเวณค่อนไปทางด้านบนของหน้าตัดคาน ซึ่งเป็นความเครียดในทิศทางตามแนวสะพาน ได้แก่

- สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC34X ($\epsilon_{x,temp} = 45\mu$) SGC37X ($\epsilon_{x,temp} = 40\mu$) SGC44X ($\epsilon_{x,temp} = 43\mu$) และ SGC25X ($\epsilon_{x,temp} = 45\mu$) ของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC64X ($\epsilon_{x,temp} = 40\mu$) SGC67X ($\epsilon_{x,temp} = 38\mu$) SGC74X ($\epsilon_{x,temp} = 39\mu$) และ SGC55X ($\epsilon_{x,temp} = 40\mu$) ของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน
- สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC43X ($\epsilon_{x,temp} = 43\mu$) SGC5X ($\epsilon_{x,temp} = 50\mu$) SGC8X ($\epsilon_{x,temp} = 50\mu$) และ SGC52X ($\epsilon_{x,temp} = 40\mu$) ของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC57X ($\epsilon_{x,temp} = 30\mu$) SGC17X ($\epsilon_{x,temp} = 40\mu$) SGC20X ($\epsilon_{x,temp} = 38\mu$) และ SGC66X ($\epsilon_{x,temp} = 40\mu$) ของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน

ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในระดับนี้ เมื่อนำไปรวมกับผลของความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Secondary Moment ของการอัดแรง และค่าความเครียดจากน้ำหนักบรรทุกจร บริเวณ Box Segment ปลายช่วงสะพาน อาจส่งผลให้หน่วยแรงอัดในหน้าตัดคานลดลงจนอาจเกิดแรงดึง ทำให้สัดส่วนความปลอดภัยของสะพานลดลงไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ

ส่วนค่าความเครียดที่เหล็กรอยต่อพื้นสะพานมีรายละเอียดดังนี้

- สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข
SGS7Y ($\epsilon_{y,temp} = 100\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 163\mu$) SGS8Y ($\epsilon_{y,temp} = 100\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 203\mu$)
SGS9Y ($\epsilon_{y,temp} = 100\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 157\mu$) SGS10Y ($\epsilon_{y,temp} = 100\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 148\mu$)
- สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข
SGS4Y ($\epsilon_{y,temp} = 30\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 63\mu$) SGS5Y ($\epsilon_{y,temp} = 30\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 53\mu$)
SGS6Y ($\epsilon_{y,temp} = 30\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 30\mu$) SGS7Y ($\epsilon_{y,temp} = 30\mu, \max \epsilon_{y,truck} = 28\mu$)

เมื่อพิจารณาสมการที่ 7-2 ความเครียดที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่อาจทำให้เหล็กรอยต่อพื้นสะพานเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้

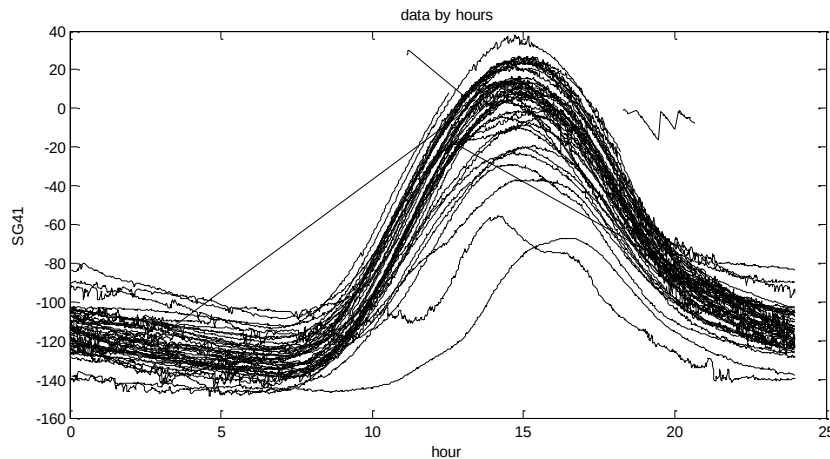
จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น การประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกจะพิจารณาเฉพาะบริเวณกลางท้องปีกบนของ Box Segment ที่ทำหน้าที่เป็นพื้นสะพาน ซึ่งตรงกับ Strain Gauge ดังนี้

- สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) คือตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC41Y ของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และหมายเลข SGC71Y ของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน
- สะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) คือตำแหน่ง Strain Gauge หมายเลข SGC3Y ของ Box Segment ใกล้ปลายช่วงสะพาน และหมายเลข SGC15Y ของ Box Segment ใกล้กลางช่วงสะพาน

ตัวอย่างการประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกของผิว
คอนกรีตบริเวณ Strain Gauge SGC41Y มีรายละเอียดดังนี้

การประเมินความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน SGC41Y

$\epsilon_{y,temp}$ ของ SGC41Y มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ที่ 114μ รูปที่ 7-3 แสดง $\epsilon_{y,temp}$ ของ SGC41Y ที่ตรวจวัดได้ใน 45
วัน



รูปที่ 7-3 $\epsilon_{y,temp}$ ของ SGC41Y ที่ตรวจวัดได้ใน 45 วัน

พิจารณาที่ค่า ϵ_f สำหรับคอนกรีตรับแรงดึงที่ 150μ แทนค่า $\epsilon = \epsilon_{y,temp} = 114\mu$ และ $\epsilon_f = 150\mu$ ลงในสมการที่
7-6 ซึ่งเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 7-8

$$\log N = 17 \cdot \left[1 - \frac{114\mu}{150\mu} \right] \quad (7-8)$$

จากสมการที่ 7-8 ค่าความล้าที่เกิดขึ้นใน 1 วัน $\frac{1}{N} = 8.3176 \times 10^{-5}$ ดังนั้นผิวคอนกรีตจะเกิดรอยแตกเนื่องจาก
ความล้าที่ $N = 12022$ วัน หรือ 32.9 ปี

การประเมินความล้าเนื่องจากแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก SGC41Y

ตลอดระยะเวลา 45 วัน ที่ได้ทำการตรวจวัดมี $\epsilon_{y,truck}$ เกิดขึ้น 27072 ข้อมูล ค่า $\epsilon_{y,truck}$ แต่ละค่าได้ถูกนำมา
คำนวณหาความล้าที่เกิดขึ้นโดยการคำนวณหาว่า $\frac{1}{N}$ จากสมการที่ 7-6 โดยตัวอย่างนี้พิจารณาที่ค่า ϵ_f สำหรับคอนกรีตรับ
แรงดึงที่ 100μ จากนั้นได้ทำการคำนวณหาความล้าสะสมใน 1 วันโดยการรวมค่า $\frac{1}{N}$ ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ดังนั้น จึงมีค่า
ความล้าสะสมใน 1 วันอยู่ 45 ข้อมูล ค่าความล้าสะสมนี้ได้แสดงอยู่ในรูปเส้นโค้งการกระจายตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย
เส้นโค้งการกระจายตัวแบบ Standard Beta ซึ่งมีสมการดังนี้

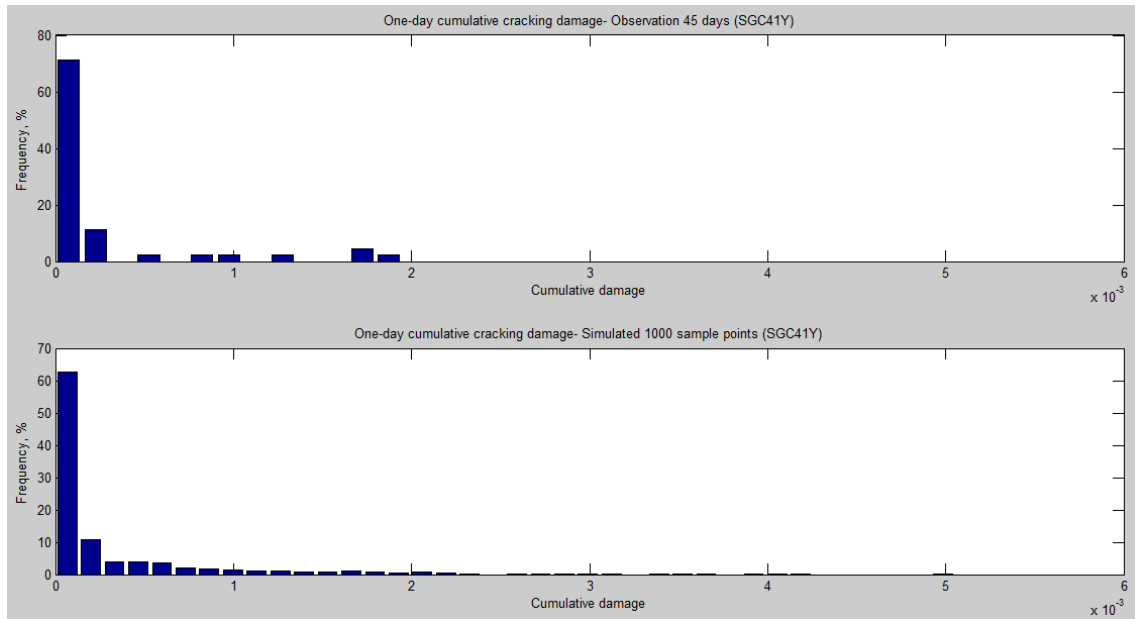
$$f_X(x) = \frac{1}{B(q,r)} x^{q-1} (1-x)^{r-1} \quad 0 \leq x \leq 1.0 \quad (7-9)$$

$$= 0 \quad elsewhere$$

โดยที่
$$B(q, r) = \int_0^1 x^{q-1} (1-x)^{r-1} dx \quad (7-10)$$

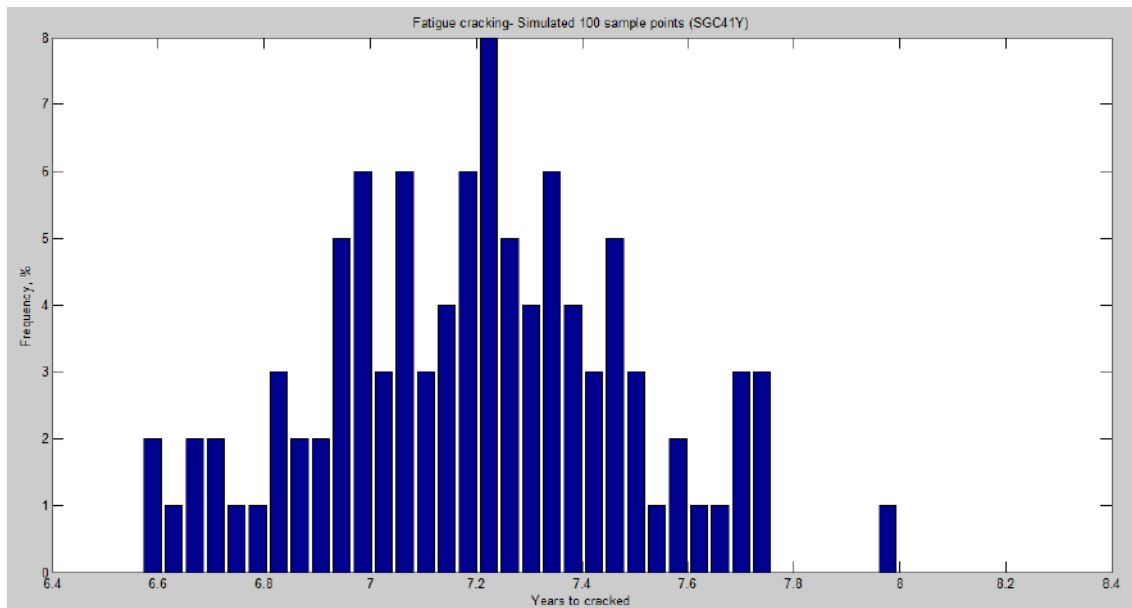
สำหรับกรณีนี้ $q = 0.2219$ และ $r = 582.7555$

กราฟแจกแจงความถี่ของความล้าสะสมใน 1 วันที่ได้จากการตรวจวัด 45 วัน และที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 1000 ข้อมูลจากสมการที่ 7-9 โดยที่ $q = 0.2219$ และ $r = 582.7555$ แสดงไว้ในรูปที่ 7-4



รูปที่ 7-4 กราฟแจกแจงความถี่ของความล้าสะสมใน 1 วันที่ได้จากการตรวจวัด 45 วัน และที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 1000 ข้อมูลจาก Standard Beta Distribution โดยที่ $q = 0.2219$ และ $r = 582.7555$

จากนั้นค่าความล้าสะสมใน 1 วันได้ถูกสุ่มขึ้นมาจากสมการที่ 7-9 โดยที่ $q = 0.2219$ และ $r = 582.7555$ และนำมารวมกันจนกระทั่งความล้าสะสมเท่ากับ 1 โดยจำนวนวันที่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าหรือความล้าสะสมเท่ากับ 1 จะเท่ากับจำนวนข้อมูลที่สุ่มขึ้นมา ทำเช่นนี้เป็นจำนวน 100 รอบจะได้ข้อมูลจำนวนวันที่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าจำนวน 100 ข้อมูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งการกระจายตัวแบบ Normal ที่มีค่าเฉลี่ย 2631 วันและค่าเบี่ยงเบน 111 วัน หรือคิดเป็นปี จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.2 ปีและค่าเบี่ยงเบนอยู่ที่ 0.3 ปี รูปที่ 7-5 แสดงกราฟแจกแจงความถี่ของจำนวนปีที่ทำให้เกิดความเสียหายคอนกรีตเกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า



รูปที่ 7-5 กราฟแจกแจงความถี่ของจำนวนปีที่ทำให้เกิดความเสียหายคอนกรีตเกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า

โดยหากพิจารณาผลของความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก พร้อมกันให้นำความล้าสะสมใน 1 วันมารวมกัน จากนั้นใช้วิธีการตามที่ได้กล่าวข้างต้นในการคำนวณหาระยะเวลาที่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ตารางที่ 7-1 สรุประยะเวลาการเกิดรอยแตกที่ผิวคอนกรีตบริเวณกลางท้องปีกบนของ Box Segment ที่ทำหน้าที่เป็นพื้นสะพาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน เนื่องจากแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกพร้อมกัน

ตารางที่ 7-1 ระยะเวลาการเกิดรอยแตกที่ผิวคอนกรีตบริเวณกลางท้องปีกบนของ Box Segment เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก

สะพานซ้ายทาง (สะพานเก่า)				สะพานขวาทาง (สะพานใหม่)							
Strain gauge	เวลาการเกิดรอยแตกที่ผิวคอนกรีต (ปี)						Strain gauge				
	Truck	Temp.	Truck&Temp.	Truck	Temp.	Truck&Temp.					
	7.2 ปีขึ้นไป	0 ถึง 32.9 ปี	0 ถึง 32.9 ปี	มากกว่า 75 ปี	มากกว่า 75 ปี	มากกว่า 75 ปี					
SGC41Y						SGC3Y					
Temp. Ey = 114μ						Temp. Ey = 15μ					
Truck Ey = 87μ (max)						Truck Ey = 23μ (max)					
Box ปลายช่วงสะพาน						Box ปลายช่วงสะพาน					
SGC71Y	0 ปี	0 ปี	0 ปี	มากกว่า 75 ปี	มากกว่า 75 ปี	มากกว่า 75 ปี	SGC15Y				
Temp. Ey = 228μ											Temp. Ey = 68μ
Truck Ey = 192μ (max)											Truck Ey = 55μ (max)
Box กลางช่วงสะพาน											Box กลางช่วงสะพาน

จากตารางที่ 7-1 จะเห็นว่าได้สะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) พื้นสะพานของ Box Segment บริเวณกลางช่วงสะพานตำแหน่ง SGC71Y ได้เกิดรอยแตกบนผิวคอนกรีตแล้ว และอาจจะอนุมานได้ว่าพื้นสะพานของ Box Segment บริเวณกลางช่วงสะพานของช่วงสะพานอื่นๆ เกิดรอยแตกบนผิวคอนกรีตแล้วเช่นกัน ส่วนพื้นสะพานของ Box Segment บริเวณปลายช่วงสะพานตำแหน่ง SGC41Y มีความเสี่ยงสูงที่เกิดรอยแตกบนผิวคอนกรีตเนื่องจากสะพานมีอายุการใช้งานจนถึงปัจจุบันเป็นเวลา 29 ปี ในขณะที่การทำนายการเกิดรอยแตกบนผิวคอนกรีตอยู่ที่ 0 ถึง 32.9 ปี

พิจารณาที่ตำแหน่ง SGC71Y ซึ่งเกิดรอยแตกที่ผิวแล้ว หากจะคำนวณหาระยะเวลาที่คอนกรีตที่ระดับ 1/4 ของความหนาพื้นจะเกิดรอยแตก ซึ่งเป็นระดับที่พื้นสะพานจะเริ่มสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก โดยสมมติให้ Neutral Axis ของพื้นสะพานอยู่ที่กึ่งกลางพื้นสะพาน ความเครียดที่ระดับ 1/4 ของความหนาพื้น จะมีค่าครึ่งหนึ่งของความเครียดที่ผิวพื้นสะพาน ซึ่งสามารถคำนวณระยะเวลาการเกิดรอยแตกในเนื้อคอนกรีตที่ระดับ 1/4 ของความหนาพื้นดังแสดงในตารางที่ 7-2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานมีความเสี่ยงสูงที่จะสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก

ตารางที่ 7-2 ระยะเวลาการเกิดรอยแตกในเนื้อคอนกรีตที่ระดับ 1/4 ของความหนาพื้นตำแหน่ง SGC71Y

สะพานซ้ายทาง (สะพานเก่า)			
Strain gauge	เวลาการเกิดรอยแตกในเนื้อคอนกรีตที่ระดับ 1/4 ของความหนาพื้น (ปี)		
	Truck	Temp.	Truck&Temp.
SGC71Y Temp. $\epsilon_y = 114\mu$ Truck $\epsilon_y = 96\mu$ (max) Box : ปลายช่วงสะพาน	0.2 ปีขึ้นไป	0 ถึง 32.9 ปี	0 ถึง 32.9 ปี

ในส่วนของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ระยะเวลาที่ผิวคอนกรีตพื้นสะพานจะเกิดรอยแตกนั้นนานกว่าอายุออกแบบของสะพาน 75 ปี จึงอาจกล่าวได้ว่าสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ไม่ได้รับผลกระทบจากความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก

7.4 สรุปผลการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพาน

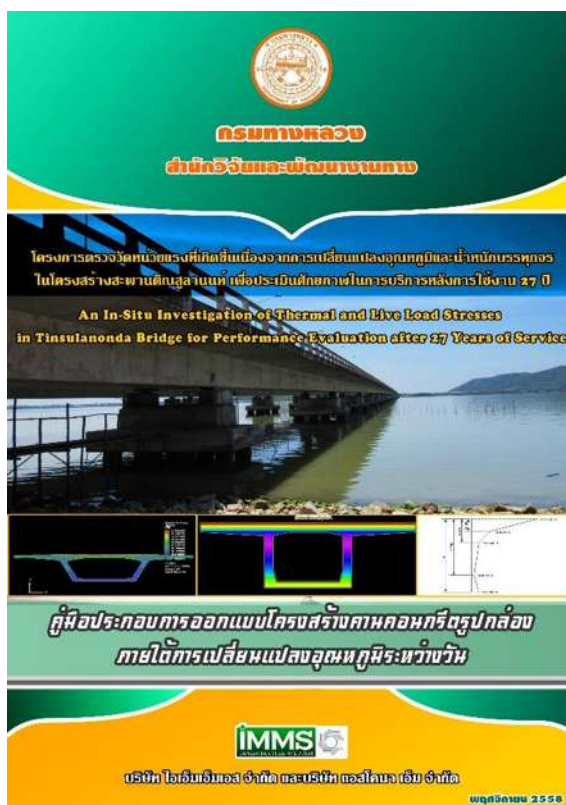
ผลการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานติณสูลานนท์ช่วงเกาะยอ-สิงหนคร ทั้งสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) โดยพิจารณาปัจจัยด้านความล้า สามารถสรุปได้ว่า

ความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานเฉพาะส่วนที่เป็นพื้นสะพาน โดยไม่มีผลกระทบต่อเหล็กยึดต่อพื้นสะพาน พื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) เกิดรอยแตกและมีแนวโน้มที่จะลุกลามเข้าไปในเนื้อคอนกรีตส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพาน จึงแนะนำให้ทำการเสริมกำลังพื้นสะพานของ Box segment บริเวณกลางช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่ม membrane action ให้กับพื้นสะพานทำให้ค่าความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจรมีระดับต่ำลง ลดความเสี่ยงต่อการลุกลามของรอยแตก สำหรับสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) สะพานฝั่งนี้ยังไม่ได้รับผลกระทบจากความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันอยู่ในระดับที่สูง หากมีรถบรรทุกหนักวิ่งผ่านในช่วงเวลาที่เหมาะสมก็อาจจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นได้โดยง่าย จึงแนะนำให้ทำการตรวจวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกบริเวณพื้นสะพานของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) อีกครั้งในอีก 10 ปีข้างหน้า

บทที่ 8 การจัดทำคู่มือสำหรับคานคอนกรีตรูป กล่องและการถ่ายทอดความรู้

8.1 การจัดทำคู่มือสำหรับคานคอนกรีตรูปกล่อง

โครงการนี้ได้จัดทำคู่มือสำหรับคานกรีตรูปกล่อง จำนวน 2 เล่ม คือ คู่มือประกอบการออกแบบโครงสร้างคาน
คอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน เพื่อใช้ประกอบกับคู่มือหลักในการออกแบบโครงสร้าง
สะพานคอนกรีตรูปกล่อง และคู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง เพื่อใช้เป็น
แนวทางในการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานคานคอนกรีตรูปกล่องให้กับเจ้าหน้าที่ระดับปฏิบัติการของกรมทางหลวง



คู่มือประกอบการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูป
กล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน



คู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคาน
คอนกรีตรูปกล่อง

รูปที่ 8-1 คู่มือสำหรับคานคอนกรีตรูปกล่อง

8.2 การถ่ายทอดความรู้

ที่ปรึกษาได้จัดให้มีการถ่ายทอดความรู้ที่เกี่ยวกับโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง ประกอบด้วย การตรวจวัดพฤติกรรมสะพาน การตรวจสอบความเสียหายของสะพาน การประเมินศักยภาพของสะพานติณสูลานนท์ และการออกแบบสะพานคานคอนกรีตรูปกล่องโดยพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน ณ โรงแรมแกรนด์ทาวเวอร์ อินน์ เมื่อวันที่ 26 ตุลาคม 2558 โดยรายละเอียดกำหนดการถ่ายทอดความรู้แสดงดังตารางที่ 8-1 ซึ่งมีเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวงให้ความสนใจเข้าร่วมฟังการถ่ายทอดความรู้รวมทั้งสิ้น 33 คน โดยมีรายชื่อแสดงดังรูปที่ 8-2 สำหรับบรรยากาศภายในงานแสดงได้ดังรูปที่ 8-3

ตารางที่ 8-1 กำหนดการถ่ายทอดความรู้

เวลา	รายการกำหนด	วิทยากร
8.30 – 9.00 น.	ลงทะเบียน	
9.00 – 9.15 น.	ประธานในพิธีกล่าวเปิดงาน	นายจิตรพงศ์ กฤตยเรืองโรจน์
9.15 – 10.00 น.	Section 1 : ภาพรวมของการดำเนินโครงการ	ดร.โชติ สรณาคมน์
10.00 – 10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง	
10.15 – 11.15 น.	Section 2 : การตรวจวัดสะพาน	นายสุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา
11.15 – 12.00 น.	Section 3 : การตรวจสอบสะพานคานคอนกรีตรูปกล่อง	ดร.โชติ สรณาคมน์
12.00 – 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน	
13.00 – 13.45 น.	Section 4 : การประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน
13.45 – 14.30 น.	Section 5 : การประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน
14.30 – 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง	
14.45 – 15.30 น.	Section 6 : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน
15.30 – 16.15 น.	Section 7 : การออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน
16.15 น.	จบการถ่ายทอดความรู้	

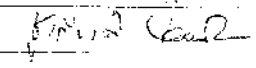
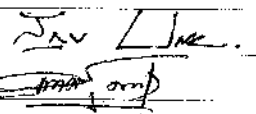
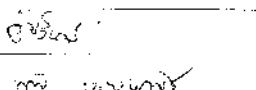
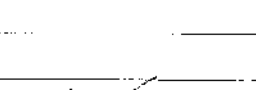
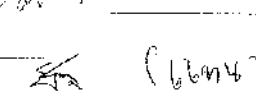
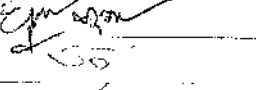
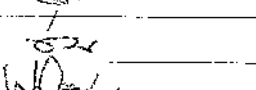
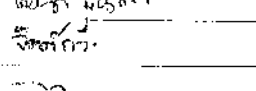
รายชื่อผู้เข้าร่วมการฝึกอบรม

โครงการตรวจวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจร

ในโครงสร้างสะพานดินสุสานเพื่อประเมินศักยภาพในการบริการหลังการใช้งาน ๒๗ ปี

ณ โรงแรมแกรนด์ หวาเวอร์ อินน์ กรุงเทพมหานคร

วันจันทร์ที่ ๒๖ ตุลาคม ๒๕๕๔ เวลา ๐๘.๓๐ - ๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล		ตำแหน่ง	ลายเซ็น
	สำนักสำรวจและออกแบบ			
๑	นายชูเกียรติ	โอทาทิก	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๒	นายจรงค์	สุภัทรากุล	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๓	นายสุกิจ	ยินดีสุข	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๔	นายวิศิษฐ์คำดี	หนูสุวรรณ	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๕	นายพรพล	แฉาพิมพ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๖	นายอัมรินทร์	ตั้งสุขสันต์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๗	นายทวีช	จอพานิช	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๘	นายภุชงค์	แสนทวีสุข	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๙	นายสรายุทธชัย	มีมุข	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๑๐	นายอดิพงษ์	พรหมทะสาร	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
	สำนักก่อสร้างสะพาน			
๑๑	นายวิชัย	กังอุบล	ผู้อำนวยการศูนย์สร้างบูรณะสะพานที่ ๔	
๑๒	นายยุทธศิลป์	หุยมะ	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๑๓	นายวิพล	เหมธานนท์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๑๔	นายสุเทพย์	บุญตะโก	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๑๕	นายพวิศักดิ์	รุจจรรยาวัฒน์	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๑๖	นายพรวิมลมา	ฉันทประภัสสร	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๑๗	นายพวิศักดิ์	ชาญวรรณกุล	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๑๘	นายปรเมศวร์	ตันมณีวัฒนา	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๑๙	นายเจษฎา	พงษ์ศรี	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๒๐	นายจิตรภัฏ	อนุศรี	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๒๑	นายรัฐเชต	รุ่งสว่าง	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๒๒	นายฉัตรชัย	อัครโคโรจน์	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๒๓	นายศราวุธ	เทพทอง	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๒๔	นายมานพ	ยุทธมานพ	นายช่างโยธาอาวุโส	

๑๓

รูปที่ 8-2 รายชื่อผู้เข้าร่วมการถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง

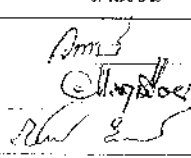
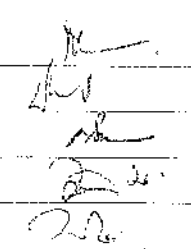
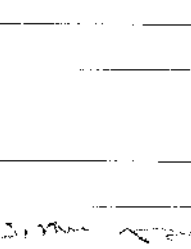
รายชื่อผู้เข้าร่วมการฝึกอบรม

โครงการตรวจวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจร

ในโครงสร้างสะพานดินสุสานนท์เพื่อประเมินศักยภาพในการบริการหลังการใช้งาน 27 ปี

ณ โรงแรมแกรนด์ ทาวเวอร์ อินน์ กรุงเทพมหานคร

วันจันทร์ที่ ๒๖ ตุลาคม ๒๕๕๘ เวลา ๐๘.๓๐ - ๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่ง	ลายเซ็น
๒๕	นายวิโรจน์ ถ้อยมวงษ์	นายช่างโยธาอาวุโส	
๒๖	นายวิระศักดิ์ นามเมือง	นายช่างโยธาอาวุโส	
๒๗	นายสมเกียรติ ยิ้มพงษ์	นายช่างโยธาอาวุโส	
๒๘	นายนิรัตน์ ฉับบตรง	นายช่างโยธาอาวุโส	
๒๙	นายพนพล มหัทธน	นายช่างโยธารักษาณูงาน	
๓๐	นายประสาร ชุมละยอง	นายช่างโยธารักษาณูงาน	
๓๑	นายจิตตินันท์ ทรมทุ่ง	นายช่างโยธารักษาณูงาน	
๓๒	นายสมชาย พารานนท์	นายช่างโยธารักษาณูงาน	
๓๓	นายนิกร คำชัยวงศ์	นายช่างโยธาปฏิบัติงาน	
สำนักวิจัยและพัฒนาทาง			
๓๔	นายปกรณ์ มลิณะเลข	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ	
๓๕	นายเศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ	วิศวกรโยธารักษาณูการพิเศษ	
๓๖	นายกมล หำเรือรักษ์	วิศวกรโยธารักษาณูการพิเศษ	
๓๗	นายพฤทธิพงษ์ สังขสราษ	วิศวกรโยธารักษาณูการพิเศษ	
๓๘	นายราชวิมลภักดิ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๓๙	นายอรุณ ขวามาก	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๔๐	นายภัทรพล สิลควาณ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๔๑	นายณัฐวุฒิ หัสศิริจิตร	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๔๒	น.ส.ลาวัณย์ จงรักจิตต์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๔๓	นายสาคร ชูแก้ว	นายช่างโยธาปฏิบัติการ	

รูปที่ 8-2 รายชื่อผู้เข้าร่วมการถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง (ต่อ)



รูปที่ 8-3 บรรยายภาพในงานถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง

บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้ได้ทำการประเมินศักยภาพในการให้บริการของโครงสร้างส่วนบนของสะพานดินสุลาลัยส่วนเหนือช่วงเกาะยอ-สิงหนคร ทั้งสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) ซึ่งผ่านการใช้งานมา 29 ปี นับถึงปี 2558 โครงสร้างส่วนบนเป็นคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้า และสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) ซึ่งผ่านการใช้งานมา 10 ปี โครงสร้างส่วนบนเป็นคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมคางหมู การประเมินศักยภาพในการให้บริการครอบคลุมการประเมินความล้าที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตและเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน และการประเมินกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตและรอยต่อระหว่างคานคอนกรีต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุก โดยการประเมินต่างๆ อาศัยผลการตอบสนองของโครงสร้างที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัด ประกอบกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบสภาพสะพาน จัดทำแบบแสดงความเสียหายของสะพาน รวมถึงจัดทำคู่มือประกอบการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน และคู่มือประกอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่อง ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างส่วนบนของสะพานทั้งสองฝั่งซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตรูปกล่อง มากกว่าแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุก จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันในการออกแบบคานคอนกรีตรูปกล่อง โครงการนี้ได้นำเสนอกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิบนหน้าตัดคานคอนกรีตรูปกล่อง ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน เพื่อนำมาใช้ในการประกอบการออกแบบโครงสร้างสะพานคานคอนกรีตรูปกล่องในประเทศไทย รายละเอียดอยู่ในคู่มือประกอบการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตรูปกล่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน

พื้นสะพานเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด ข้อมูลการตรวจวัดชี้ให้เห็นว่า พื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานมีแนวโน้มที่จะได้รับความเสียหายมากกว่าพื้นสะพานบริเวณปลายช่วงสะพาน นอกจากนี้ พื้นสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) มีแนวโน้มที่จะได้รับความเสียหายมากกว่าพื้นสะพานของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) โดยผลการประเมินความล้าของพื้นสะพานของสะพานทั้งสองฝั่ง พบว่า พื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) เกิดรอยแตกขึ้นที่ผิวคอนกรีต ถึงแม้จะเป็นรอยแตกขนาดเล็กมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ก็มีแนวโน้มที่จะลุกลามเข้าไปในเนื้อคอนกรีตส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพาน ในส่วนของสะพานฝั่งขวาทาง (สะพานใหม่) พื้นสะพานไม่ได้รับผลกระทบจากความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุก แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันอยู่ในระดับที่สูง หากมีรถบรรทุกหนัก

วิ่งผ่านในช่วงเวลาที่เหมาะสมก็อาจจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นได้โดยง่าย ผลการประเมินความล้าของเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน พบว่า ความล้าที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อเหล็กรอยต่อพื้นสะพาน

คานคอนกรีตและรอยต่อระหว่างคานคอนกรีตของสะพานทั้งสองฝั่ง มีความแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามมาตรฐานการออกแบบ AASHTO LRFD ที่กรมทางหลวงใช้อ้างอิงอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ค่อนข้างสูงบริเวณประมาณกลางหน้าตัดคานคอนกรีตไปทางด้านล่าง ประกอบกับการสูญเสียกำลังของลวดอัดแรงเนื่องจากการคลายตัว รวมถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกที่อาจมีขึ้นในอนาคต ผลรวมของทั้ง 3 ปัจจัยนี้อาจส่งผลให้หน่วยแรงอัดบนหน้าตัดคานและรอยต่อระหว่างคาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณปลายช่วงสะพาน ลดลงจนกระทั่งเกิดหน่วยแรงดึง ทำให้สัดส่วนความปลอดภัยในการรับน้ำหนักลดลงไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ

ผลการตรวจสอบสภาพสะพานทั้งสองฝั่ง พบการสึกกร่อนและหลุดล่อนของคอนกรีต รวมถึงรอยแตกทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม ทั้งในส่วนของทางเท้า คานคอนกรีต และตอม่อสะพาน ความเสียหายดังกล่าวยังคงกินบริเวณไม่มาก แต่มีแนวโน้มที่จะลุกลามจนกระทั่งส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของสะพานโดยรวม โดยการซ่อมชิ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหายควรเลือกใช้คอนกรีตสำหรับสภาพแวดล้อมทะเล (Marine Concrete) ซึ่งมีความสามารถด้านทานคลอไรด์และซัลเฟตได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไปหรือคอนกรีตด้านทานซัลเฟตสูง

กล่าวโดยสรุป สะพานติณสูลานนท์ส่วนเหนือทั้งสองฝั่งยังคงมีศักยภาพในการให้บริการได้ตามปกติ แต่ควรรีบทำการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิมตามที่ได้ตรวจพบ และควรรีบทำการเสริมกำลังพื้นสะพานบริเวณกลางช่วงสะพานของสะพานฝั่งซ้ายทาง (สะพานเดิม) เพื่อเป็นการเพิ่ม membrane action ให้กับพื้นสะพาน ทำให้ค่าความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกมีระดับต่ำลง ลดความเสี่ยงต่อการลุกลามของรอยแตก นอกจากนี้ กรมทางหลวงควรกำหนดให้มีการประเมินศักยภาพในการให้บริการของสะพานทั้งสองฝั่งอีกครั้งในอีก 10 ปีข้างหน้า

รูปร่างและมิติของคานคอนกรีตรูปกล่องมีผลต่อศักยภาพในการให้บริการของสะพาน ดังจะเห็นได้จากพื้นสะพานของคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมคางหมู (สะพานฝั่งขวาทาง) ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุก น้อยกว่าพื้นสะพานของคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้า (สะพานฝั่งซ้ายทาง) ดังนั้นคานคอนกรีตรูปกล่องรูปแบบอื่นอาจช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นกับพื้นสะพานได้มากกว่าคานคอนกรีตรูปกล่องสี่เหลี่ยมคางหมู การวิเคราะห์โครงสร้างขั้นสูงร่วมกับการทำ Structural Optimization จึงเป็นเรื่องที่ควรทำการวิจัยในอนาคต เพื่อเลือกรูปแบบคานคอนกรีตรูปกล่องที่เหมาะสมในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับพื้นสะพานเนื่องจากเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันและจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุก