

รายชื่อคณะกรรมการกำกับโครงการและตรวจการจ้าง

รายชื่อคณะกรรมการกำกับโครงการ

1.	นายวิเชียร	มหาอำรชัย	ประธานกรรมการ
2.	นายปรกรณ์	มลินทะเลข	กรรมการ
3.	นายเศกชัย	อนเวชศิริเกียรติ	กรรมการ
4.	นายสมศักดิ์	เชื้อสุกิจวัฒนา	กรรมการ
5.	นายพรชัย	ศีลารมย์	กรรมการ
6.	นายวิโรจน์	คงแก้ว	กรรมการ
7.	นายราชวัลลภ	กำพุพงศ์	กรรมการ
8.	นายกิตติศักดิ์	ทองมาก	กรรมการและวิศวกรกำกับโครงการ

รายชื่อคณะกรรมการตรวจการจ้าง

1.	นายวิเชียร	มหาอำรชัย	ประธานกรรมการ
2.	นายปรกรณ์	มลินทะเลข	กรรมการ
3.	นายกิตติศักดิ์	ทองมาก	กรรมการ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	i
บทคัดย่อ	iii
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-1
1.3 ขอบเขตของงาน	1-2
บทที่ 2 งานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 รูปแบบและประเภทของฐานรองคอสะพาน (Bearing)	2-1
2.2 ปัจจัยการเสื่อมสภาพของแผ่นยางรองคอสะพาน	2-22
2.3 ลักษณะสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสะพาน	2-26
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแผ่นยางรองคอสะพาน	2-28
2.5 การทดสอบความล้าของยางรองคอสะพาน	2-47
2.6 การออกแบบแผ่นยางรองคอสะพาน	2-53
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แผ่นยางรองคอสะพาน	2-72
2.8 วิธีการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสะพานประเภทต่าง ๆ	2-81
บทที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุยางรองคอสะพาน	
3.1 สรุปรายชื่อผลิตภัณฑ์ที่ใช้ดำเนินการทดสอบ	3-1
3.2 การทดสอบผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสะพาน	3-2
3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมแผ่นยางรองคอสะพาน	3-3
3.4 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	3-18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบวัสดุแผ่นยางรองคอสพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกและการประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสพาน	
4.1 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุยางรองคอสพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก	4-1
4.2 การจัดเตรียมชุดเครื่องมือทดสอบ	4-3
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุยางรองคอสพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก	4-6
4.4 การประเมินอายุวัสดุยางรองคอสพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก	4-27
4.5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	4-28
บทที่ 5 การประเมินระดับสภาพวัสดุยางรองคอสพาน	
5.1 แนวทางในการประเมินสภาพแผ่นยางรองคอสพาน	5-1
5.2 สรุปผลการประเมินจากฐานข้อมูลสะพาน	5-6
5.3 สรุปการประเมินจากการสำรวจภาคสนาม	5-45
บทที่ 6 การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์	
6.1 แนวทางในการวิเคราะห์	6-1
6.2 การวิเคราะห์สตีเฟนส์ของแผ่นยางรองคอสพาน	6-6
6.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพาน	6-10
6.4 การวิเคราะห์หน่วยแรงในแผ่นยางรองคอสพาน	6-28
6.5 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์และข้อเสนอแนะ	6-38
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก ก รายงานผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุยางรองคอสพาน	
ภาคผนวก ข รายงานผลการทดสอบวัสดุยางรองคอสพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก	
ภาคผนวก ค รายชื่อสะพานที่ดำเนินการสำรวจภาคสนาม	

บทคัดย่อ

สะพานแต่ในละตัวนั้นจะมีระบบรองรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนบนของสะพาน หรือ Bearing ซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ถ่ายไปยังโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) และรองรับการเคลื่อนตัวของโครงสร้างส่วนบนโดยเฉพาะผลของแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรและการยึดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ เป็นต้น

ที่ปรึกษาได้ทำการศึกษาและรวบรวมรูปแบบ ข้อมูล ประเภท ขนาด และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ Bearing ที่ใช้อยู่กับสะพานของกรมทางหลวง ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีและผลการศึกษาต่างๆ ที่เกี่ยวกับ Bearing ที่ใช้ในงานสะพาน รวมถึงวิธีการซ่อมแซมหรือปรับปรุงฐานรองรับโครงสร้างส่วนบนของโครงสร้างสะพานตามรูปแบบต่างๆ

ที่ปรึกษาได้ทำการประเมินระดับสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานตามระดับสภาพการใช้งาน โดยการประเมินครอบคลุมพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9 – 15 และสำนักงานทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี) ซึ่งแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- (1) การประเมินแผ่นยางรองคอสสะพานโดยอาศัยข้อมูลพื้นฐาน การสำรวจและภาพถ่ายจากฐานข้อมูลสะพานที่มีอยู่ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ซึ่งมีจำนวนสะพานในพื้นที่ศึกษาจำนวน 7,374 สะพาน ผลการประเมินจากภาพถ่ายของแผ่นยางรองคอสสะพานทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่ของโครงการมีสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับพอใช้ ประมาณ 55% ระดับสภาพชำรุด 39% และระดับสภาพดี 6% ตามลำดับ
- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่การศึกษา คือ สะพานประเภท Slab Type รองลงมาคือ Plank Girder, Box Girder และ I-Girder ตามลำดับ
- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่การศึกษามีอายุมากกว่า 20 ปี รองลงมา คือ มีอายุสะพานระหว่าง 11 – 20 ปี และสะพานที่อายุน้อยกว่า 10 ปี เป็นกลุ่มสะพานที่น้อยที่สุด
- เมื่อพิจารณาแยกตามพื้นที่ตั้งของสะพานตามสำนักทางหลวง พบว่า สะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 12 และ 15 ส่วนใหญ่จะมีระดับสภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน ระดับชำรุด ส่วนแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงอื่น ๆ ในโครงการส่วนใหญ่จะมีระดับสภาพพอใช้

- (2) สสำรวจสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานของสะพานช่วงสั้น (ความยาวช่วงสะพานไม่เกิน 20 เมตร) ในพื้นที่ของโครงการด้วยสายตา (Visual Inspection) รวมถึงทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานในบริเวณที่เข้าถึงได้ (จำนวน 314 สะพาน) ผลการสำรวจพบว่า

- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่ของโครงการจะมีสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับพอใช้

- สะพานประเภท Slab Type, Plank Girder และ Box Girder ที่ใช้แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน ส่วนใหญ่มีค่า Durometer (Shore A) มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (50 ± 5 Durometer Shore A) ทุกช่วงอายุของสะพาน ในขณะที่สะพานประเภท I-Girder มีค่า Durometer (Shore A) อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (60 ± 5 Durometer Shore A) ทุกช่วงอายุของสะพาน

ที่ปรึกษาได้ทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์วัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในงานก่อสร้างสะพาน ทั้งประเภทชนิดยางล้วนและชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยในแต่ละประเภทจะใช้ผลิตภัณฑ์ทั้งแบบยางธรรมชาติและแบบยางสังเคราะห์ โดยวัสดุ ชนิด และคุณภาพ ถือตามมาตรฐานสากลที่กรมทางหลวงใช้งาน โดยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวข้างต้น ได้นำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ 2 รูปแบบ คือ

- (1) การทดสอบคุณสมบัติวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานกรมทางหลวง
- (2) การทดสอบความต้านทานความล้าจากแรงเฉือน (Shear Fatigue Test) เพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพาน พิจารณาอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO ที่ระดับอายุการใช้งาน 55 ปี แผ่นยางรองคอสสะพานสามารถรับแรงที่กระทำซ้ำได้ 20,000 รอบ ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้
 - ผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ จำนวน 8 ผลิตภัณฑ์ มีอายุการใช้งานมากกว่า 55 ปี
 - ผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ มีอายุการใช้งานมากกว่า 55 ปี มีเพียง 3 ผลิตภัณฑ์ใน 8 ผลิตภัณฑ์

ที่ปรึกษาได้นำผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการมาประกอบกับการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาปัจจัยที่อาจจะส่งผลต่ออายุการใช้งานสะพาน อาทิเช่น น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของสะพาน น้ำหนักบรรทุกจรจากการใช้งานสะพาน และผลของอุณหภูมิ เป็นต้น การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์นั้นได้ทำการจำลองพฤติกรรมของแผ่นยางรองคอสสะพาน และลักษณะการรับแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) โดยจำลองพฤติกรรมแผ่นยางรองคอสสะพานที่ใช้กับสะพานประเภท Slab Type, Plank Girder, Box Girder และ I-Girder แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกปรับเทียบความถูกต้องด้วยผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบสะพาน รวมถึงผลของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงในประเทศไทยนั้น พบว่า ผลของพฤติกรรมความเครียดเฉือนมีผลน้อยกว่าพฤติกรรมความเครียดอัดอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ปรึกษาได้จัดทำคู่มือแผ่นยางรองคอสสะพานประกอบด้วย ☐ รูปแบบ ข้อมูล ประเภท ขนาดและคุณสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นยางรองคอสสะพาน ☐ ประเภทและสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ของแผ่นยางรองคอสสะพาน รวมถึง ☐ การประเมินสภาพและระดับของความเสียหาย พร้อมภาพประกอบ ☐ วิธีเสนอแนะในการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพาน รวมทั้งจัดทำแบบรายละเอียด พร้อมด้วย ☐ แบบการประมาณราคาและคำนวณราคากลางงานในการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพาน เพื่อให้กรมทางหลวงนำไปประกอบใช้ในการดำเนินงานเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานได้อเนก

Abstract

Currently, each bridge has a bearing system to support the superstructure and transfer the loads to the substructure. The bearing also accommodates the movement of superstructure due to traffic loading and the expansion and contraction due to temperature changes.

Literature review of bearing pads used by the Department of Highways was conducted in various aspects such as types, product information, sizes, theory, and past study results. The reviews also included the repair or modification of bearing pads by types of bridges

The survey team evaluated the condition rating of the bearing pads used in the area of Bureau of Highways No.9 – 15 and Krabi (Surat Thani) Office of Highways. The evaluation was conducted by either two methods:

(1) Evaluation of the bearing pads using the pictures downloaded from the database of The Bureau of Road Research and Development, Department of Highways. The total number of bridges evaluated by this method was 7,374 and the results can be concluded as follows:

- The majority of bridges (55%) in the study areas had a fair condition rating while the damaged and good condition ratings were 39% and 6%, respectively.
- Type of bridges in the study areas were mainly slab type, followed by plank girder, box girder and I girder, respectively.
- Age of bridges in the study area were mainly in the range of 20 years or older, followed by 11-20 years. The 10 years and lower was the smallest proportion.
- When consider the bridges by locations, it found that the majority of bearing pads in the Bureau of Highways 12 and 15 had a damaged condition rating while the bearing pads in other Bureau of Highways have a fair condition rating.

(2) Survey of bearing pads by visual inspection and hardness test at sites for 314 short span bridges (the length less than 20 meters) in the area of study. The results were as the followings:

- The majority of bearing pads in the study area had a fair condition rating.
- The majority of plain bearing pads used in the slab type, plank girder and box girder bridges had Durometer (Shore A) higher than the specification (50 ± 5 Durometer Shore A) for every age group while the I girder bridges had

Durometer (Shore A) within the specification range (60 ± 5 Durometer Shore A) for every age group.

The study selected the plain and laminate bearing pad products which are normally used in the practice. Each type may be either natural rubber or neoprene. The materials, types and quality grades were referred to The Department of Highways Standards. The products mentioned above were tested in the laboratory for 2 aspects:

- (1) Bearing pad test according to the standard used by The Department of Highways.
- (2) Shear fatigue test to estimate the service life of the bearing pads: The shear fatigue test simulates the force applying to the bearing pad, which includes the dead loads, live loads and deformation due to temperature changes. The AASHTO was used as a reference standard that the bearing pad at the age of 55 years must be able to withstand a repeated load of 20,000 cycles. The test results can be concluded as the following:
 - All eight products of the plain bearing pads had service life more than 55 years.
 - Only three out of eight products of the laminated bearing pads had service life more than 55 years.

The experimental results from the laboratory were used in conjunction with the numerical analysis in order to identify the potential factors such as dead loads, live loads, and deformation due to temperature changes that may affect the service life. Finite element models were used to simulate the behavior of bearing pads under various types of loading. The simulations were performed for 4 types of bridges: slab type, plank girder, box girder and I girder. The finite element models were calibrated by using the experimental data obtained from the laboratory. Under the assumptions of the standard design loads and the range of temperature changes in Thailand, it concluded that the effect of shear strain was significantly less than that of compressive strain.

The manual of bearing pad was written. It covered several aspects of the bearing pads such as characteristics, product information, types, sizes and engineering properties. It also covered the types and causes of damages in the bearing pad. The manual provided the criteria and example pictures for evaluation of condition rating. At the end, it proposed the method for bearing pad replacement with detailed drawings and the cost estimation model for calculating a fair price such that The Department of Highway can use them in the future.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

สะพานเป็นหนึ่งในโครงข่ายทางหลวงที่สำคัญ โดยสามารถเชื่อมโยงโครงข่ายถนนและเชื่อมการคมนาคมขนส่งเข้าด้วยกันได้อย่างทั่วถึง กรมทางหลวงมีสะพานที่อยู่ในความดูแลเป็นจำนวนมากและมีหลายประเภทของสะพาน เช่น สะพานแผ่นพื้นหล่อในที่ (Reinforced Concrete Slab) สะพานที่เป็นรูปตัวไอ (I-Girder) หรือสะพานที่เป็นแบบรูปกล่อง (Box Girder) เป็นต้น โดยสะพานแต่ละตัวนั้นจะมีระบบรองรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนบนของสะพาน หรือ Bearing ซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ถ่ายไปยังโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) และรองรับการเคลื่อนตัวของโครงสร้างส่วนบนโดยเฉพาะผลของแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรและการยึดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ เป็นต้น

สะพานที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวงมีอยู่เป็นจำนวนมาก อีกทั้งสะพานเริ่มมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น และรองรับปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากสภาพของยางรองคอสสะพานเกิดความเสียหายหรืออยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์หรือหมดอายุการใช้งาน จะทำให้น้ำหนักบรรทุกถ่ายลงสู่คานขวางโดยตรงซึ่งจะก่อให้เกิด Stress Concentration บริเวณดังกล่าว และอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อโครงสร้างได้ อีกทั้งการเปลี่ยนยางรองคอสสะพานนั้นกรมทางหลวงมีประสบการณ์ในการเปลี่ยนเฉพาะบางประเภทสะพานเท่านั้น แต่ยังมีได้มีการศึกษาแนวทางการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานสำหรับใช้เป็นแนวทางปฏิบัติ (Code of Practice) อย่างจริงจัง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบ ศึกษาปัญหา ตลอดจนทำการประเมินสภาพการใช้งานหรือระดับความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพาน รวมถึงศึกษาหาวัสดุ และวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการซ่อมบำรุงรักษารูปร่างของโครงสร้างสะพานให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัญหาการเสื่อมสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานและทำการประเมินระดับสภาพความเสียหาย พร้อมทำการจัดกลุ่มแผ่นยางรองคอสสะพานที่มีคุณภาพดี พอใช้ ชำรุด
2. ศึกษาอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานที่เหมาะสม ที่ควรจะต้องทำการเปลี่ยนหรือบำรุงรักษา เพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัย
3. เสนอแนะวิธีการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานที่มีผลกระทบต่อผู้ใช้ทางให้น้อยที่สุด
4. จัดทำคู่มือแผ่นยางรองคอสสะพาน

1.3 ขอบเขตของงาน

งานศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นงานวิจัยที่กรมทางหลวงเป็นผู้วิจัยหลัก โดยการดำเนินงานของที่ปรึกษาจะเป็นการดำเนินงานในลักษณะร่วมกับสำนักวิจัยและพัฒนาทางเพื่อให้งานออกมามีคุณภาพ และตรงกับวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้ โดยขอบเขตของงาน ได้แก่

1.3.1 งานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1. ที่ปรึกษาจะต้องทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีและผลการศึกษาต่างๆ ที่เกี่ยวกับ Bearing ที่ใช้ในงานสะพาน รวมถึงวิธีการซ่อมแซมหรือปรับปรุงฐานรองรับโครงสร้างส่วนบนของโครงสร้างสะพานตามรูปแบบต่างๆ
2. ที่ปรึกษาจะต้องศึกษาและรวบรวมรูปแบบ ข้อมูล ประเภท ขนาด และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ Bearing ที่ใช้อยู่กับสะพานของกรมทางหลวง เพื่อศึกษาคุณสมบัติและจำแนกประเภทสำหรับใช้งานกับสะพานแต่ละชนิด

1.3.2 การประเมินสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพาน

ที่ปรึกษาจะต้องทำการประเมินระดับสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานตามระดับสภาพการใช้งาน การประเมินจะต้องครอบคลุมพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9 – 15 และสำนักงานทางหลวงกระปี่ (สุราษฎร์ธานี) โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐาน การสำรวจและภาพถ่ายจากฐานข้อมูลสะพานที่มีอยู่ ของ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ใช้เกณฑ์การประเมินระดับสภาพความเสียหายของยางรองคอสสะพานดังตารางที่ 1.3-1 และที่ปรึกษาจะต้องสำรวจสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานช่วงสั้น (ความยาวช่วงสะพานไม่เกิน 20 เมตร) จำนวนไม่น้อยกว่า 300 สะพาน ด้วยสายตา (Visual Inspection) รวมถึงทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานในบริเวณที่เข้าถึงได้ โดยให้ความสำคัญกับสะพานที่แผ่นยางรองคอสสะพานเสื่อมสภาพและมีความเสียหายมาก

ตารางที่ 1.3-1 เกณฑ์สภาพความเสียหายของยางรองคอสสะพาน

สภาพ	สภาพยางรองคอสสะพาน
ดี	- สภาพดี ไม่มีความเสียหาย
พอใช้	- สภาพใช้งานได้
ชำรุด	- สภาพชำรุดไม่อยู่ในสภาพใช้งานได้

ทั้งนี้จำนวนสะพานและรายละเอียดการประเมินสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเห็นชอบของคณะกรรมการกำกับโครงการ

1.3.3 การคัดเลือกผลิตภัณฑ์วัสดุแผ่นยางรองคอสสะพาน

ที่ปรึกษาจะต้องทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์วัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในงานก่อสร้างสะพาน ทั้งประเภทชนิดยางล้วนและชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยในแต่ละประเภทจะใช้ผลิตภัณฑ์ทั้งแบบยางธรรมชาติ และแบบยางสังเคราะห์ โดยวัสดุ ชนิด และคุณภาพ ถือตามมาตรฐานสากลที่กรมทางหลวงใช้งาน เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) และ/หรือ ASTM และ/หรือ มาตรฐานร่วม ASTM /SAE (หมายเหตุ SAE : Society of Automotive Engineering) และ/หรือ มาตรฐาน AASHTO หรือเทียบเท่า

จำนวนตัวอย่างผลิตภัณฑ์วัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานมีดังต่อไปนี้

- ประเภทชนิดยางล้วน (Plain) ที่เป็นยางธรรมชาติ ที่ผลิตในประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์และนำเข้าจากต่างประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์
- ประเภทชนิดยางล้วน (Plain) ที่เป็นยางสังเคราะห์ ที่ผลิตในประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์และนำเข้าจากต่างประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์
- ประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Laminated) ที่เป็นยางธรรมชาติ ที่ผลิตในประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์และนำเข้าจากต่างประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์
- ประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Laminated) ที่เป็นยางสังเคราะห์ ที่ผลิตในประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์และนำเข้าจากต่างประเทศ 2 ผลิตภัณฑ์

โดยประเภทของแผ่นยางรองคอสสะพานที่นำเข้าจากต่างประเทศแต่ละผลิตภัณฑ์จะต้องไม่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากแหล่งเดียวกัน ทั้งนี้การเลือกผลิตภัณฑ์และรายละเอียดคุณสมบัติผลิตภัณฑ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเห็นชอบของคณะกรรมการกำกับโครงการ

1.3.4 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพาน

ที่ปรึกษาจะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพาน ตามภาคผนวก ก (ตามTOR) โดยวิธีการทดสอบ ต้องเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.951-2533 หรือ มาตรฐาน ASTM หรือ มาตรฐานร่วม ASTM D2000/SAE J200 (หมายเหตุ SAE : Society of Automotive Engineering) หรือ มาตรฐาน AASHTO หรือ มาตรฐาน BS5400หรือมาตรฐานสากลอื่น ๆ ทั้งนี้รายละเอียดการทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเห็นชอบของคณะกรรมการกำกับโครงการ

1.3.5 การทดสอบวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุก

ที่ปรึกษาจะต้องทดสอบวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพาน ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกและศึกษาพฤติกรรมวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานตามภาคผนวก ข (ตามTOR) ทั้งนี้วิธีและรายละเอียดการทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเห็นชอบของคณะกรรมการกำกับโครงการ

1.3.6 การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

ที่ปรึกษาจะต้องวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบและปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพาน เช่น น้ำหนักบรรทุกจร และอุณหภูมิ เป็นต้น

1.3.7 การประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพาน

ที่ปรึกษาจะต้องประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานจากผลการทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขการรับน้ำหนักบรรทุก โดยแนวทางการประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพาน จะต้องได้รับการเห็นชอบจากคณะกรรมการกำกับโครงการ

1.3.8 การจัดทำคู่มือแผ่นยางรองคอสสะพาน

ที่ปรึกษาจะต้องจัดทำคู่มือแผ่นยางรองคอสสะพานที่เป็นรูปเล่มและเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแก้ไขได้ โดยในคู่มือฯ ต้องประกอบด้วยเนื้อหาอย่างน้อยดังนี้

- บทนำ และวัตถุประสงค์ของการจัดทำร่างคู่มือแผ่นยางรองคอสสะพาน
- รูปแบบ ข้อมูล ประเภท ขนาดและคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นยางรองคอสสะพาน พร้อมภาพประกอบที่ชัดเจน
- ประเภทและสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ของแผ่นยางรองคอสสะพาน พร้อมภาพประกอบที่ชัดเจน
- การประเมินสภาพและระดับของความเสียหาย พร้อมภาพประกอบที่ชัดเจน
- วิธีเสนอแนะในการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพาน พร้อมภาพประกอบ
- การเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทและระดับของความเสียหาย พร้อมภาพประกอบที่ชัดเจน รวมทั้งจัดทำแบบรายละเอียดการซ่อมแซม
- แบบการประมาณราคาและคำนวณราคากลางงานในการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพาน

1.3.9 รายงานแนะนำการบริหารจัดการแผ่นยางรองคอสสะพาน

ที่ปรึกษาจะต้องสรุปผลการศึกษา และจัดทำข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ต่อการทำงานของกรมทางหลวง เพื่อให้กรมทางหลวงนำไปประกอบการตัดสินใจในการดำเนินการกับแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่ที่ทำการศึกษได้ เช่น ให้ใช้งานต่อได้ หรือให้ทำการเปลี่ยน เป็นต้น

บทที่ 2

งานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบและประเภทของฐานรองคอสสะพาน (Bearing)

ฐานรองคอสสะพาน (Bearing) เป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนบนซึ่งเป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่าง โดยแผ่นยางรองคอสสะพานมีหน้าที่หลัก 3 ประการ คือ

- 1) เพื่อส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจากโครงสร้างส่วนบนไปยังโครงสร้างส่วนล่าง
- 2) เพื่อให้โครงสร้างหลักสามารถเคลื่อนตัวตามแนวยาว เนื่องจากการขยายตัวจากความร้อนและการหดตัวได้
- 3) เพื่อรองรับการหมุน (Rotation) เนื่องจากการโก่งตัวโดยน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

ชนิดของฐานรองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ฐานรองแบบเชิงกล (Mechanical Bearing) และฐานรองแบบแผ่นยางหรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

2.1.1 ฐานรองแบบเชิงกล (Mechanical Bearing)

ฐานรองแบบเชิงกลจะมีการใช้งานกับโครงสร้างสะพานบางส่วน เพื่อถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างส่วนบนลงสู่โครงสร้างส่วนล่าง ฐานรองประเภทนี้มักทำจากโลหะจึงเกิดสนิมได้ง่าย อีกทั้งจำเป็นต้องตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ ฐานรองประเภทนี้เหมาะสมกับสะพานที่มีความยาวช่วงมากและมีการเคลื่อนตัวในแนวแกนค่อนข้างสูง ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มฐานรองสะพานแบบเชิงกลได้ดังนี้

- Rocker Bearing เป็นแบร้งประเภทหนึ่งที่มีจะใช้กับสะพานที่มีน้ำหนักบรรทุกจรค่อนข้างมาก และมีการนำมาใช้งานกับสะพานที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 13.1 เมตรขึ้นไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบร้งประเภทนี้มักทำจากเหล็ก และทำการเชื่อมติดกับโครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure) โดยผ่านแผ่นเหล็กที่เรียกว่า Masonry Plate ด้วยวิธีการเชื่อมหรือใช้สลักเกลียว (พิจารณาจากรูปที่ 2.1-1)
- Roller Bearing เป็นแบร้งที่มีลักษณะคล้ายกับ Rocker Bearing แบร้งประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่ได้โดยใช้ลูกกลิ้ง (Roller) ขณะที่ส่วนบนของแบร้งสามารถปรับสภาพได้เมื่อโครงสร้างเกิดการหมุนแบบเดียวกับ Rocker Bearing ซึ่งแบร้งประเภทนี้เหมาะสมกับสะพานที่มีความยาวช่วงขนาดกลาง (พิจารณาจากรูปที่ 2.1-2)
- Sliding Plate Bearing เป็นแบร้งที่ตอบสนองหรือปรับตัวให้เข้ากับการเคลื่อนที่ของโครงสร้างด้วยการใช้หลักการ slide ของแผ่นเหล็ก ชนิดและประเภทของแบร้งประเภทนี้จะถูกกำหนดโดยค่าที่ยอมให้เกิดการหมุนของโครงสร้างสะพานเป็นหลัก สำหรับความยาวช่วงสะพานที่มีค่าน้อยกว่า 13.1 เมตร AASHTO

ยอมให้ผู้ออกแบบมองข้ามในเรื่องของการแอ่นตัว ดังนั้นจากเงื่อนไขดังกล่าวจะทำให้การใช้ Silding Plate Bearing เหมาะกับโครงสร้างสะพานขนาดเล็กแต่มีความยาวช่วงไม่เกิน 13.1 เมตร (พิจารณาจากรูปที่ 2.1-3)

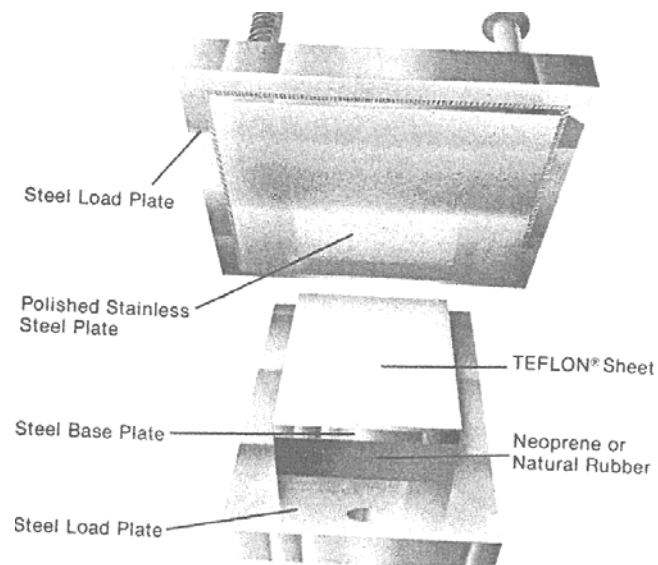
- Pot Bearings เป็นแปรงที่ปรับตัวได้กับการเคลื่อนที่ตัวของโครงสร้างสะพาน และสามารถรับแรงกระทำในแนวดิ่งได้ค่อนข้างมาก แปรงประเภทนี้จะประกอบด้วยเหล็กทรงกระบอกที่มีความสูงไม่มากนัก ภายในบรรจุด้วยแผ่นยางสังเคราะห์ โดยแผ่นยางสังเคราะห์นี้จะทำหน้าที่เหมือนกับของไหลที่มีความหนืด หรือเป็นของไหลไฮดรอลิค ดังนั้นแปรงประเภทนี้สามารถหมุนหรือเอียงได้อย่างสะดวก (พิจารณาจากรูปที่ 2.1-4)



รูปที่ 2.1-1 Rocker Bearing



รูปที่ 2.1-2 Roller Bearing



รูปที่ 2.1-3 Sliding Bearing



รูปที่ 2.1-4 Pot Bearing

2.1.2 ฐานรองแบบแผ่นยางหรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomer Bearing)

จากรายงานของ NCHRP 499 พบว่าฐานรองคอสสะพานแบบอีลาสโตเมอร์ถูกนำมาติดตั้งระหว่างโครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure) ตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 โดยมีวัตถุประสงค์ในด้านการรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) โดยผลของการรับน้ำหนักบรรทุกที่กล่าวมานี้จะส่งผลต่อแผ่นยางรองคอสสะพานได้แก่ การเสียรูปในแนวดิ่ง (Vertical Deformation), การเสียรูปด้านข้าง (Horizontal Deformation) ที่เกิดเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างสะพานส่วนบน และการหมุนซึ่งอาจเกิดจากการที่โครงสร้างสะพานส่วนบนรับโมเมนต์ดัด ซึ่งการที่จะนำแผ่นยางรองคอสสะพานมาใช้รองรับโครงสร้างสะพานส่วนบนนั้นจะต้องพิจารณาคุณลักษณะของการเสียรูปเหล่านี้เพื่อที่จะทำให้เกิดการส่งถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างสะพานส่วนบนและโครงสร้างสะพานส่วนล่างได้อย่างสมบูรณ์

โดยทั่วไปฐานรองคอสสะพานแบบแผ่นยางที่นำมาใช้ผลิตเป็นฐานรองคอสสะพานนั้น ส่วนใหญ่จะผลิตมาจากยาง 2 ประเภท ได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) และยางสังเคราะห์ (Neoprene หรือ Chloroprene) ซึ่งยางทั้งสองประเภทนี้มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติหรือยางพาราส่วนมากเป็นยางที่ได้จากต้นยางพารา ซึ่งน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 30% (โดยน้ำหนัก) แขนงลอยอยู่ในน้ำ ทั้งนี้ปริมาณของเนื้อยางแห้งขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล ซึ่งโดยทั่วไปยางธรรมชาติยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆได้แก่ น้ำยาง และยางแห้ง

- 1) **น้ำยาง** เนื่องจากน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไปไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในยางสดจนกระทั่งได้ปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็น 60% โดยน้ำหนัก และเรียกน้ำยางที่ได้ใหม่นี้ว่ายางข้น (Concentrated latex) แต่เนื่องจากน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน และ ฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสารเหล่านี้สามารถย่อยสลายได้ด้วยเชื้อจุลินทรีย์หรือเชื้อแบคทีเรีย ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบไนโตรเจน ดังนั้นน้ำยางจึงสามารถบูดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียหรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน
- 2) **ยางแห้ง** ได้จากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคของยางจับตัวเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา

2.1.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ (Natural Rubber Properties)

- 1) **ความยืดหยุ่น (Elasticity)** คุณสมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว
- 2) **ความเหนียวติดกัน (Tack)** ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีคุณสมบัติดีเยี่ยมในความเหนียวติดกันซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น
- 3) **ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)** เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (ประมาณ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารเสริมแรงลงไปจะทำให้ช่วยมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีความทนทานต่อแรงดึงต่ำ
- 4) **การทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)** เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความคงทนต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง
- 5) **คุณสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties)** ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) ที่สูงมากอีกด้วย
- 6) **ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance)** ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ประเภทอื่นๆ
- 7) **ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation)** ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

- 8) **ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and Chemical Resistance)** เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนแบบไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อการกัดและฉีกขาดได้ดีแต่ไม่ทนต่อการกร่อนในกรด และกรดกำมะถัน
- 9) **การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging Properties)** เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตจึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti-Degradants) และไข (Wax)) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ
- 10) **การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Flexibility)** ยางธรรมชาติยังคงรักษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก
- 11) **การเสียรูปหลังการกด (Compression Set)** ยางธรรมชาติมีการเสียรูปหลังการกดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่าการเสียรูปหลังการกด ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิต่ำจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติการเสียรูปหลังการกดด้อยลง
- 12) **การกระด้างกระดอน (Rebound Resilience)** ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติการกระด้างกระดอนสูง และในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมที่ต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต
- 13) **อุณหภูมิของการใช้งาน (Service Temperature)** ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามหากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส หรือสูงถึง 100 องศาเซลเซียส (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรโดยคุณสมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเยิ้มเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การที่จะใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งยางที่ได้รับการผสมสารเคมีเหล่านี้จะเรียกว่ายางคอมพาวด์ (Rubber Compound) และจำถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการคงรูปยางหรือกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) โดยยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้จะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate)” ซึ่งคุณสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมสารเคมีจึงต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยางโดยการตัดโมเลกุลของยาง (ลดน้ำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกลโดยอาศัยแรงเฉือนในเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) หรือในเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) ซึ่งขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดยางก่อนผสมสารเคมีนี้เรียกว่า “มาสตีเคชัน (Mastication)”

2.1.2.3 ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubbers)

การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการผลิตมอนอเมอร์ (Monomer) ซึ่งมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์ยางส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และ 2) ขั้นตอนการนำมอนอเมอร์หลายๆ มอนอเมอร์มาต่อกันให้ได้เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน” ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยางสังเคราะห์ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ และชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ประกอบกันเป็นพอลิเมอร์

สำหรับยางสังเคราะห์ที่มีการนำมาผลิตเพื่อใช้เป็นแผ่นยางรองคอสสะพานนั้นจะเป็นยางที่มีชื่อเรียกว่ายางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber, CR) ซึ่งเป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของคลอโรพรีน (Chloroprene Monomer) โดยโมเลกุลของยาง CR สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยาง CR นอกจากจะมีความทนทานต่อแรงดึงสูง (โดยที่ไม่ใส่สารตัวเสริมแรง) ยังมีความทนทานต่อการฉีกขาดและมีความต้านทานต่อการขูดถูอีกด้วย

2.1.2.4 คุณสมบัติทั่วไปของยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber Properties)

- 1) **ความเหนียวติดกัน (Tack)** ยาง CR มีคุณสมบัติคล้ายกับยางธรรมชาติคือมีความเหนียวติดกันที่ดี นอกจากนี้ยางชนิดนี้ยังสามารถไหลเข้ามาเชื่อมกันได้ดี จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหารอยต่อของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปด้วยน้ำพิมพ์
- 2) **ความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด (Tensile and Tear Strength)** เนื่องจากยาง CR สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงและทนทาน

ต่อการฉีกขาดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ประเภทอื่นๆ ที่ไม่สามารถแตกหักได้ (แต่ยังคงต่ำกว่ายางธรรมชาติ) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงเช่นเขม่าดำหรือซิลิกาเข้าไป สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางชนิดนี้ให้มีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติได้ ทั้งนี้หากยาง CR ได้นับการเสริมแรงด้วยซิลิกาหรือเขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบตา จะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีความคงทนต่อการฉีกขาดสูงเป็นพิเศษ

- 3) **การติดไฟ (Flammability)** เนื่องจากยาง CR มีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบซึ่งอะตอมของคลอรีนจะทำให้ยางมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการทนต่อเปลวไฟ นั่นคือเปลวไฟจะดับได้เอง (Self-Extinguish) หลังจากที่แหล่งของเปลวไฟถูกนำออก ในขณะที่ถ้าเป็นยางชนิดอื่นๆ การเผาไหม้จะยังคงดำเนินต่อไปแม้แหล่งของเปลวไฟจะถูกนำออกไปแล้วก็ตาม อย่างไรก็ตาม การเติมน้ำมันซึ่งติดไฟได้ลงไปในยาง CR ในปริมาณสูงๆ ก็จะทำให้คุณสมบัติการทนต่อการติดไฟของยางชนิดนี้ด้อยลงไปได้เช่นกัน
- 4) **ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Properties)** นอกจากคลอรีนจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านการติดไฟแล้ว คลอรีนยังช่วยให้ยาง CR ทนต่อสภาพอากาศ ความร้อน โอโซน และแสงแดดได้ดีกว่ายางทั่วไป การเติมเขม่าดำอาจช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซนได้เล็กน้อย แต่การเติมน้ำมันอะโรมาติกอาจส่งผลในทางตรงกันข้าม
- 5) **ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and Chemical Resistance)** ยาง CR เป็นยางที่มีขั้วเนื่องจากประกอบด้วยอะตอมของคลอรีน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีขั้วพบว่ายาง CR จะทนต่อการบวมพองในน้ำมันได้ปานกลางถึงดี และทนต่อการกัดหรือต่างเจือจางได้ดีกว่ายางธรรมชาติ แต่จะไม่ทนต่อน้ำมันเชื้อไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนหรือคลอรีนเป็นองค์ประกอบ
- 6) **ความเป็นฉนวน (Insulation)** อะตอมของคลอรีนในยาง CR ทำให้ยางมีความเป็นขั้วสูง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของยาง กล่าวคือทำให้ยางนำไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะในช่วง 10^{10} ถึง 10^{12} ohm.cm ซึ่งต่ำกว่ายางธรรมชาติมาก ยาง CR จึงจัดอยู่ในกลุ่ม “Antistatic” ไม่ใช่กลุ่มที่เป็นฉนวน ดังนั้นยางชนิดนี้จึงไม่สามารถนำมาทำเป็นฉนวนของสายเคเบิล อย่างไรก็ตามการออกแบบสูตรเคมีที่เหมาะสมก็สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของยาง CR ได้ เช่นการเติมทาลค์เมอร์พิเศษหรือดินขาวลงไปก็จะช่วยลดการนำไฟฟ้าของยางได้
- 7) **การซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability)** ยาง CR มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่ายางธรรมชาติ
- 8) **อุณหภูมิของการใช้งาน (Service Temperature)** ยาง CR มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงการใช้งาน -40 องศาเซลเซียส ถึง 90 องศาเซลเซียส (บางครั้งยาง CR จะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการตกผลึกของยาง) แต่ถ้ามีการออกแบบสูตรผสมเคมีที่ดีก็สามารถนำยาง CR ไปใช้ได้ในสภาวะที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปยาง CR เมื่อถูกใช้งานในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับอากาศสามารถทนต่ออุณหภูมิที่ 99 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง และที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10,000 ชั่วโมง

จากคุณคุณสมบัติของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถเปรียบเทียบคุณ
คุณสมบัติทางกายภาพของยางทั้งสองชนิดได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1-1

ตารางที่ 2.1-1 เปรียบเทียบคุณคุณสมบัติระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (พงษ์ธร, 2547)

คุณคุณสมบัติ	ชนิดของยาง	
	ยางธรรมชาติ	ยางสังเคราะห์
ความทนทานต่อแรงดึง (กรณีไม่มีสารตัวเสริมแรง)	1	3
ความทนทานต่อแรงดึง (กรณีมีสารตัวเสริมแรง)	1	2
การยืดตัวสูงสุด	1	2
ความต้านทานต่อการขาดฉีก (กรณีมีสารตัวเสริมแรง)	4	3
ความทนทานต่อการฉีกขาด	2	2
การกระเด็นกระดอน	2	3
การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ	2	3
ความทนทานต่อความร้อน	5	3
ความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	4	2
ความทนทานต่อแสง UV	4	2
ความทนทานต่อโอโซนและสภาพ อากาศ	4	2
ความทนทานต่อน้ำมัน	6	2
ความทนทานต่อน้ำมันเชื้อเพลิง	6	3
ความทนทานต่อการกรด	3	2
ความทนทานต่อต่าง	3	2
ความทนทานต่อการติดไฟ	6	2
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	1	4
การซึมผ่านได้ของก๊าซ	5	3

หมายเหตุ: 1=ดีมากที่สุด 6=ด้อยที่สุด

2.1.3 รูปแบบของแผ่นยางรองคอสสะพานแบบอิลาสโตเมอร์

ฐานรองแบบอิลาสโตเมอร์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบยางล้วน (Plain) และแบบเสริมกำลัง (Laminate) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

แผ่นยางรองคอสสะพานอิลาสโตเมอร์ชนิดยางล้วน

แผ่นยางรองคอสสะพานชนิดยางล้วน เป็นฐานรองที่ผลิตจากยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์ เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กหรือใยสังเคราะห์ (Fabric) ฐานรองประเภทนี้จะรับน้ำหนักได้น้อยกว่าการเสริมกำลังที่มีพื้นที่รับแรงเท่ากัน มีความสามารถต้านทานการเสียรูปได้ต่ำกว่าชนิดเสริมกำลัง และมีระยะยุบตัวภายใต้ น้ำหนักคงที่มากกว่าชนิดเสริมกำลังเมื่อมีความหนาเท่ากัน ข้อดีของฐานรองชนิดยางล้วน คือ ราคาถูก ดังนั้นจึง เหมาะกับการใช้งานภายใต้ น้ำหนักบรรทุกที่ไม่มากนัก การเลือกชนิดของยางที่จะนำมาใช้ทำฐานรองนั้นขึ้นอยู่กับ ปัจจัยหลายประการอาทิเช่น คุณคุณสมบัติที่ต้องการใช้งาน ข้อกำหนดการออกแบบ และงบประมาณในการก่อสร้าง เป็นต้น แต่โดยรวมแล้วยางสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติเหนือกว่ายางธรรมชาติมาก ดังนั้นยางสังเคราะห์จึงมีราคา สูงกว่ายางธรรมชาติ



รูปที่ 2.1-5 แผ่นยางรองคอสสะพานชนิดยางล้วน

แผ่นยางรองคอสสะพานอิลาสโตเมอร์ชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

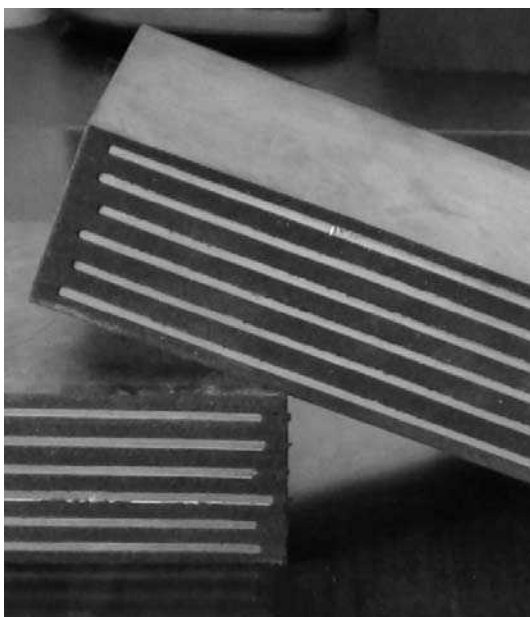
แผ่นยางรองคอสสะพานชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนี้จะถูกผลิตขึ้นโดยการใส่แผ่นเหล็กให้แทรกตัวอยู่ ระหว่างชั้นยาง การเสริมแผ่นเหล็กในลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการปูดของแผ่นยางขณะรับน้ำหนักบรรทุก (Primus, 2007) โดยความเค้นส่วนใหญ่ที่แผ่นยางรองคอสสะพานได้รับจะถูกส่งถ่ายไปยังแผ่นเหล็กในลักษณะของ หน่วยแรงดึง (Tensile Stress) จึงทำให้แผ่นยางรองคอสสะพานมีการปูดนูนที่น้อยลง

ในปี 1995 Muscarella และ Yura ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้สภาวะการรับแรงอัด ในแนวดิ่งโดยพิจารณาทั้งแผ่นยางรองคอสสะพานชนิดยางล้วนและแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้ข้อสรุปว่าแผ่นยางรองคอสสะพานชนิดยางล้วนมีการเสียรูปที่ค่อนข้างมากภายใต้สภาวะการรับแรงอัดค่า

เดียวกับชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ยิ่งไปกว่านั้นผลของความหนาของแผ่นยางรองคอสะพานยังมีส่วนต่อการเสียรูปด้วย

ในปี ค.ศ.1987 Roeder และ Syanton ได้รายงานพฤติกรรมของแผ่นยางรองคอสะพานชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เปรียบเทียบกับแผ่นยางรองคอสะพานชนิดยางล้วน ภายใต้การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (uniaxial) พบว่าแผ่นยางรองคอสะพานชนิดยางล้วนจะมีการคงคุณลักษณะการเสียรูปที่เพิ่มขึ้นตลอดแนวระยะนาบ ขณะที่ชนิดที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะไม่มีการเสียรูปด้านข้างในบริเวณตำแหน่งของชั้นที่มีการเสริมเหล็กทำให้การปูดนูนของแผ่นยางชนิดนี้มีค่าน้อย และทำให้ค่าสถิติเอนสของการรับแรงกดมีค่ามากขึ้น

ฐานรองชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนี้มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ การอัดร้อน และการอัดเย็น โดยการผลิตแบบอัดร้อนใช้การหล่อลงในแบบหล่อซึ่งอัดด้วยความดัน และความร้อน ส่วนการผลิตแบบอัดเย็นนั้นอาศัยการเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างยางกับแผ่นเหล็ก สำหรับการผลิตแบบอัดร้อนนี้ยางจะหุ้มแผ่นเหล็กทั้งหมดโดยไม่เห็นรอยต่อระหว่างชั้น ขณะที่การผลิตแบบอัดเย็นจะปรากฏรอยต่อระหว่างชั้นยางกับแผ่นเหล็กซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า



รูปที่ 2.1-6 แผ่นยางรองคอสะพานชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

2.1.4 คุณคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแผ่นยางรองคอสะพาน

2.1.4.1 คุณคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเป็นอิลาสติก

อิลาสโตเมอร์ ที่มีใช้งานโดยทั่วไปจะทำจากยางธรรมชาติ หรือวัสดุสังเคราะห์ ที่มีคุณลักษณะและคุณคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ใช้และกระบวนการผลิต ซึ่งโดยทั่วไปในการจำแนก

ความแตกต่างของฮาร์ดเนสของยางอะซายด์ชนิดนี้ที่ได้จากการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุ โดยค่าความแข็งนี้สามารถประเมินได้โดยพิจารณาจากการคืนตัวในช่วงอีลาสติก (Elastic) ซึ่งวัดค่าได้โดยใช้เครื่องมือ Durometer ค่าความแข็งนี้จะมีหน่วยเป็น International Rubber Hardness (IRHD) หรือ Shore

ตารางที่ 2.1-2 แสดงคุณสมบัติของยางอะซายด์ชนิดนี้ที่มีค่า IRHD ที่แตกต่างกัน จากตารางจะสังเกตเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่า IRHD จะมีผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) เปลี่ยนแปลงประมาณ 5% และค่า Bulk Modulus ของวัสดุประเภทนี้จะมีค่าค่อนข้างสูง โดยเฉพาะยางอะซายด์ที่มีค่า IRHD ต่ำ ดังนั้น ในบางครั้งพบว่าการพิจารณาพฤติกรรมในเชิงกลศาสตร์ของวัสดุชนิดนี้เป็นแบบวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุอะซายด์มีการยืดตัว (Elongation) ภายใต้แรงดึงค่อนข้างสูงซึ่งจากการทดสอบโดยทั่วไปพบว่าจะมีค่าร้อยละการยืดตัวที่จุดแตกหัก (Bearing Point) มากกว่า 400%

ตารางที่ 2.1-2 คุณสมบัติของยางอะซายด์ที่มีค่าความแข็ง (Hardness) ค่าต่างๆ (Long,1974)

ค่าความแข็ง	อีลาสติกโมดูลัส E	โมดูลัสความเครียดเฉือน G
IRHD	N/mm ²	N/mm ²
50	2.3	0.6
60	3.7	1.0
70	6.2	1.4

2.1.4.2 พฤติกรรมการรับแรงกดแบบสมดุ (Static Behavior of Compression)

เมื่อแผ่นยางรองคอสพานได้รับแรงอัดในแนวตั้งด้วยอัตราการใช้แรงที่คงที่ (Static Compression) แผ่นยางจะทำการต้านทานการเสียรูปและการเคลื่อนที่โดยอาศัยแรงเสียดทานหรือแรงยึดเหนี่ยวภายใน

ค่าสตีฟเนสการอัด (Compression Stiffness) ขึ้นอยู่กับการนูนของแผ่นยางด้านข้าง โดยทั่วไปจะนิยามผ่านค่าปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ระนาบการรับแรงหารด้วยพื้นที่ผิวบริเวณด้านข้างที่ปราศจากแรงหรือน้ำหนักกระทำ พิจารณาตัวอย่างการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์รูปร่างของแผ่นยางอะซายด์ที่มีพื้นที่หน้าตัดการรับแรงเป็นพื้นที่วงกลมได้จากสมการ (2.1)

$$S = \frac{1}{4} \frac{\pi D^2}{\pi D t} \quad (2.1)$$

เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และ t คือความหนาของแผ่นยาง

สำหรับแผ่นยางรองคอสะพานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมยาวค่าปัจจัยรูปร่างสามารถหาได้จากการพิจารณาแผ่นยางที่ความยาวหนึ่งหน่วยดังสมการที่ (2.2)

$$S = \frac{B}{2t} \quad (2.2)$$

เมื่อ B คือความกว้างของแผ่นยาง และ t คือความหนาของแผ่นยาง

ตารางที่ 2.1-3 แสดงสมการที่ใช้คำนวณปัจจัยรูปร่าง (Long, 1974)

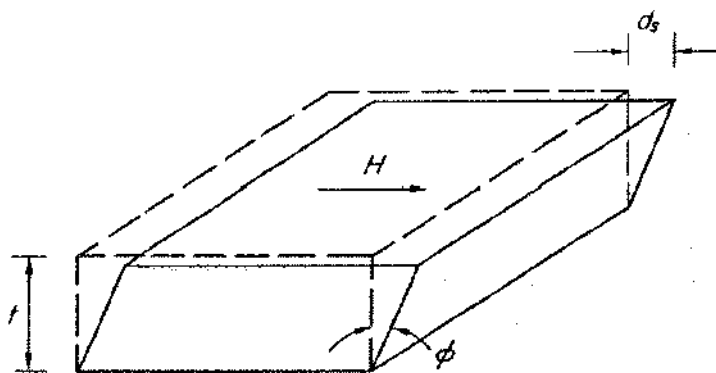
รูปร่างยางรองคอสะพาน	ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor)
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular)	$\frac{LB}{2t(L+B)}$
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square)	$\frac{L}{4t}$
วงกลม (Circular)	$\frac{D}{4t}$
แผ่นสี่เหลี่ยมยาว (Strip)	$\frac{B}{2t}$

2.1.4.3 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนแบบสมดุล (Static Behavior in Shear)

ระหว่างการทำแรงเฉือนแบบสมดุลกับแผ่นยางรองคอสะพานนั้น ถ้าแผ่นยางไม่มีการเลื่อนไถล ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการเสียรูปจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์รูปร่างซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งค่าความเครียดเฉือน (e_s) ค่าหน่วยแรงเฉือน (f_s) และค่าโมดูลัสเฉือน (G) สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.3)

$$e_s = \frac{f_s}{G} \quad (2.3)$$

โดยค่าความเครียดเฉือนนี้คือค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความหนาของแผ่นยางรองคอสะพาน ($\tan \phi$) โดยค่าความเค้นเฉือนในแนวราบ (total horizontal force) H แสดงทิศทางในรูปที่ 2.1-7



รูปที่ 2.1-7 ลักษณะการเสียรูปของยางรองคอสพานภายใต้การรับแรงเฉือน

เมื่อหารสมการ 2.3 ด้วยค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นยาง สามารถเขียนขึ้นใหม่ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$e_s = \tan \phi = \frac{H}{AG} \quad (2.4)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวในแนวดิ่งและค่าความเครียดเฉือนสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.5)

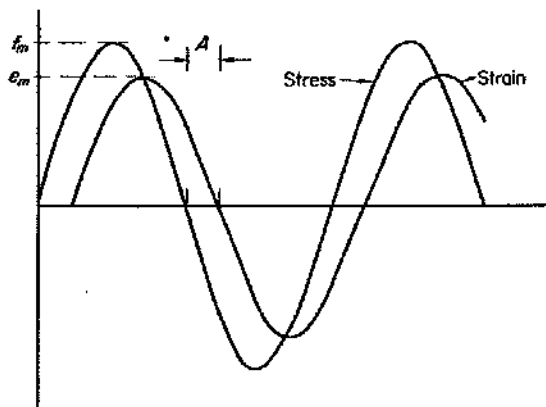
$$\text{ค่าการยุบตัวในแนวดิ่ง} = d_s \tan \phi \quad (2.5)$$

โดย

$$d_s = t \frac{\tan \phi}{(1 + \tan \phi)} \quad (2.6)$$

2.1.4.4 การตอบสนองการให้แรงพลศาสตร์ (Dynamic Response)

ในแผ่นยางรองคอสพานแบบอีลาสโตเมอร์ มักจะเกิดพฤติกรรมการเหลื่อมระหว่างค่าความเค้นและความเครียด ณ เวลา t ใดๆ เมื่อมีการรับแรงแบบกระทำซ้ำหรือเป็นวัฏจักรดังรูปที่ 2.1-8



รูปที่ 2.1-8 พฤติกรรมการเหลื่อมกันระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นยางรองคอสพาน

จากรูปที่ 2.1-8 สามารถเขียนค่าความเค้น และความเครียดที่เวลา t ใดๆ ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$f_i = f_m \sin \omega t \quad (2.7)$$

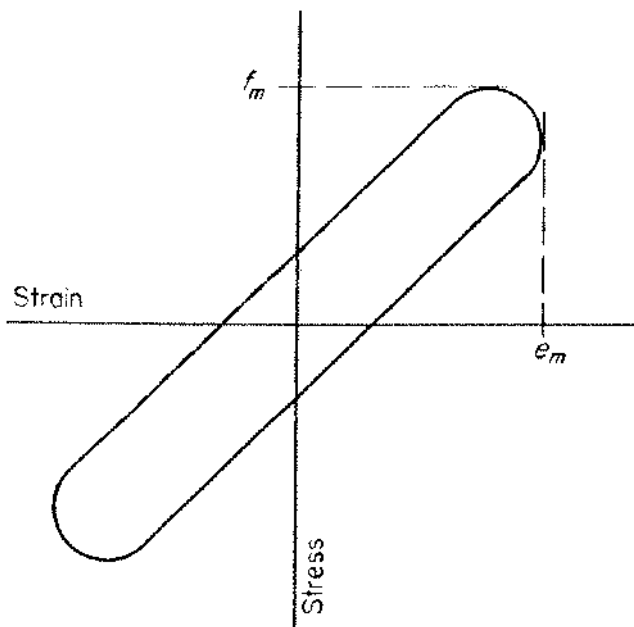
$$e_i = e_m \sin(\omega t - A) \quad (2.8)$$

เมื่อ f_i และ e_i คือค่าของความเค้นและความเครียดที่เวลา t ใดๆ

f_m และ e_m คือค่าของความเค้นและความเครียดสูงสุด

A คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าการเคลื่อนที่เชิงมุม

ผลของพฤติกรรมที่เชื่อมกันระหว่างความเค้นและความเครียดนี้ จะมีการปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อน ระหว่างที่อีลาสโตเมอร์เกิดการเสียรูป ซึ่งเมื่อลองพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้สภาวะการให้แรงแบบวัฏจักรจะพบว่าเมื่อเคลื่อนย้ายหน่วยแรงที่กระทำกับอีลาสโตเมอร์ออกจะพบว่าการเสียรูปของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์จะไม่มีการคืนตัวมาอยู่ที่เดิม ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์แบบวงรอบปิด (Close Loop) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรูปวงรีเรียกว่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ดังรูปที่ 2.1-9



รูปที่ 2.1-9 ฮิสเทอรีซิสลูป

ทั้งนี้พลังงานการสูญเสียมีค่าเท่ากับพื้นที่ภายในฮิสเตอร์ซิส และสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อบอกคุณ
คุณสมบัติของแผ่นยางภายใต้แรงแบบวัฏจักรได้ดังนี้

1. มุมเฟส ϕ มีค่าเท่ากับ

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{P_z}{P_o} \right) \quad (2.9)$$

P_o คือค่าแรงเฉือนที่กระทำ

P_z คือค่าแรงเฉือนในตำแหน่งที่ระยะยึดเป็นศูนย์

2. สติฟเนสการสะสม K_s มีค่าเท่ากับ

$$K_s = \frac{P_o}{u_o} \cos \phi \quad (2.10)$$

u_o คือระยะยึดตัวสูงสุด

3. สติฟเนสการสูญเสีย K_L มีค่าเท่ากับ

$$K_L = \frac{P_o}{u_o} \sin \phi \quad (2.11)$$

4. สัมประสิทธิ์ความหน่วง C มีค่าเท่ากับ

$$C = \frac{K_L}{\omega}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.12)$$

เมื่อ T เท่ากับคาบของการให้แรงกระทำในหนึ่งรอบ

5. สัดส่วนความหน่วง (drumpling ratio) ξ มีค่าเท่ากับ

$$\xi = \frac{1}{2} \tan \phi \quad (2.13)$$

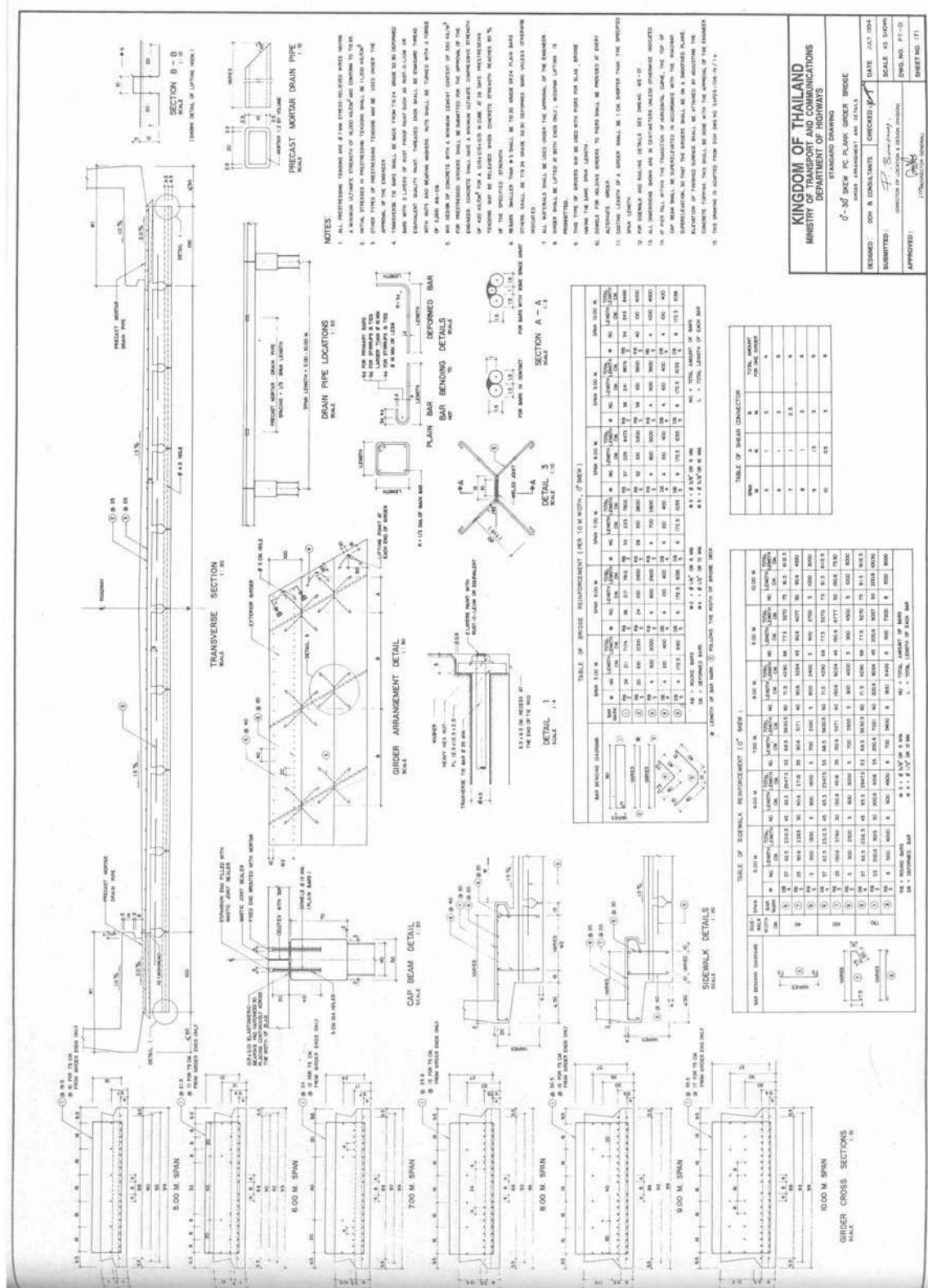
พฤติกรรมของฮิสโตแกรมภายใต้สภาวะการรับแรงแบบพลศาสตร์จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของการประยุคต์
หน่วยแรง และอุณหภูมิ โดยที่สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำการตอบสนองต่อหน่วยแรงที่มากกระทำจะต่ำ เช่นเดียวกับการ
ประยุคต์หน่วยแรงที่มีความถี่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับในช่วงสภาวะที่ความถี่สูงจะมีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงที่กระทำกับ
ฮิสโตแกรมอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเกิดความเค้นเพื่อตอบสนองแก่หน่วยแรงที่มากกระทำได้ทัน ซึ่ง
ในสภาวะเช่นนี้ฮิสโตแกรมจะมีลักษณะที่แข็ง โดยในความเป็นจริงคุณคุณสมบัติยืดหยุ่นของยางฮิสโตแกรม
จะขึ้นอยู่กับประยุคต์ความถี่ที่กระทำกับฮิสโตแกรม นั้นหมายความว่าค่าสติฟเนสของการให้แรงแบบสถิต
(Static) จะมีค่าแตกต่างจากการให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ โดยค่าสติฟเนสของการให้แรงแบบสถิตนั้นจะมีค่าที่
ต่ำกว่า

2.1.5 ฐานรองคอสสะพานที่ใช้ในประเทศไทย

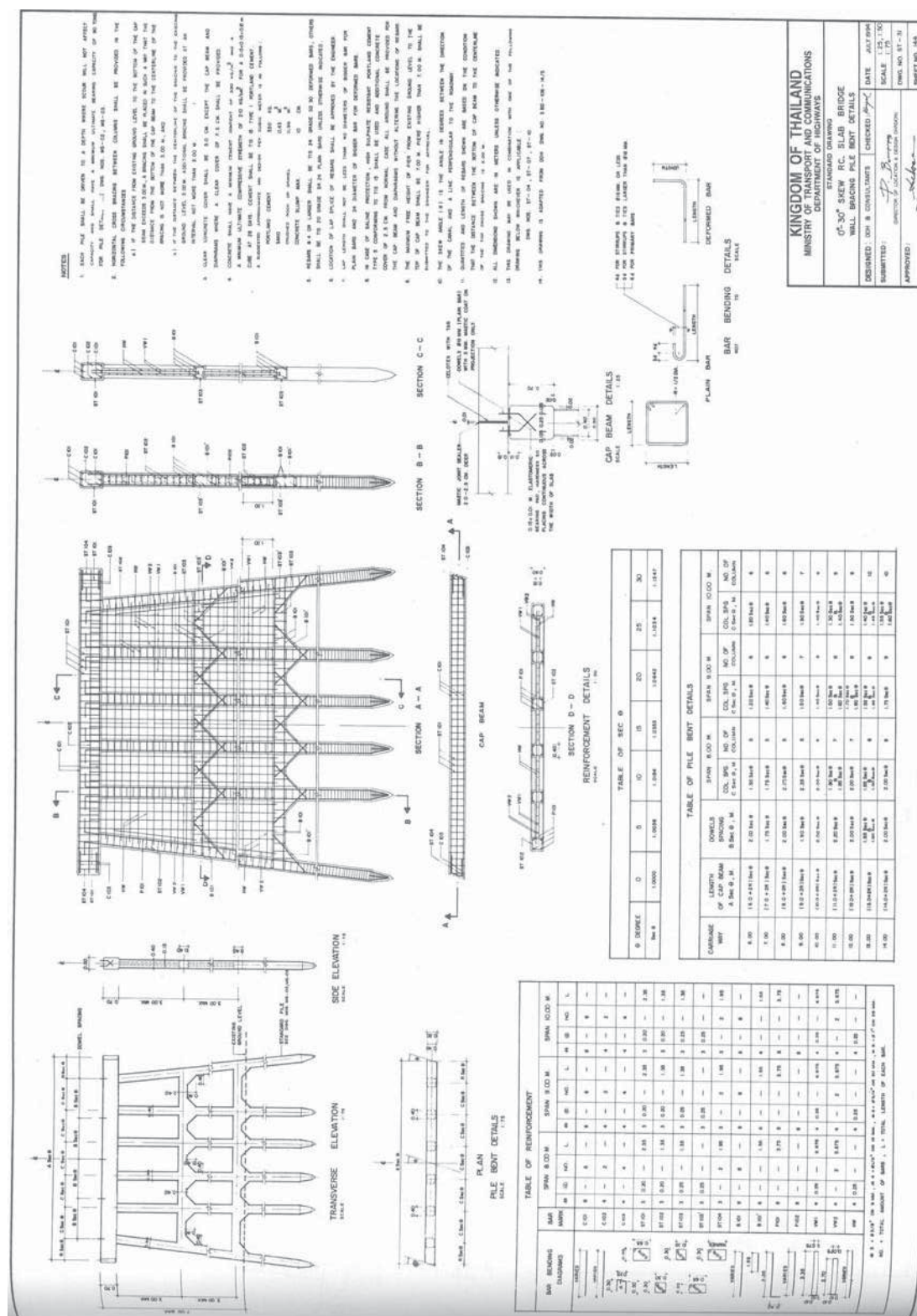
ในปัจจุบันพัฒนาการด้านเทคโนโลยีวัสดุทำให้วิศวกรมีทางเลือกที่หลากหลายในการใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานจึงได้มีการนำแผ่นยางรองคอสสะพาน หรือ อีลาสโตเมอร์ (Elastomer) เข้ามาใช้รองรับคอสสะพานเนื่องด้วยวัสดุดังกล่าวมีราคาไม่สูง ติดตั้งง่าย การบำรุงรักษาน้อย ไม่เกิดสนิม และมีอายุการใช้งานยาวนาน ซึ่งโดยทั่วไปการใช้แผ่นยางรองคอสสะพานกับสะพานที่มีความยาวช่วงต่างๆพิจารณาจากตารางที่ 2.1-4 และแบบที่ใช้ในการติดตั้งแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐานกรมทางหลวงพิจารณาจากรูปที่ 2.1-10 ถึง 2.1-13

ตารางที่ 2.1-4 ขนาดของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ใช้กับสะพานที่มีความยาวช่วงต่างๆ

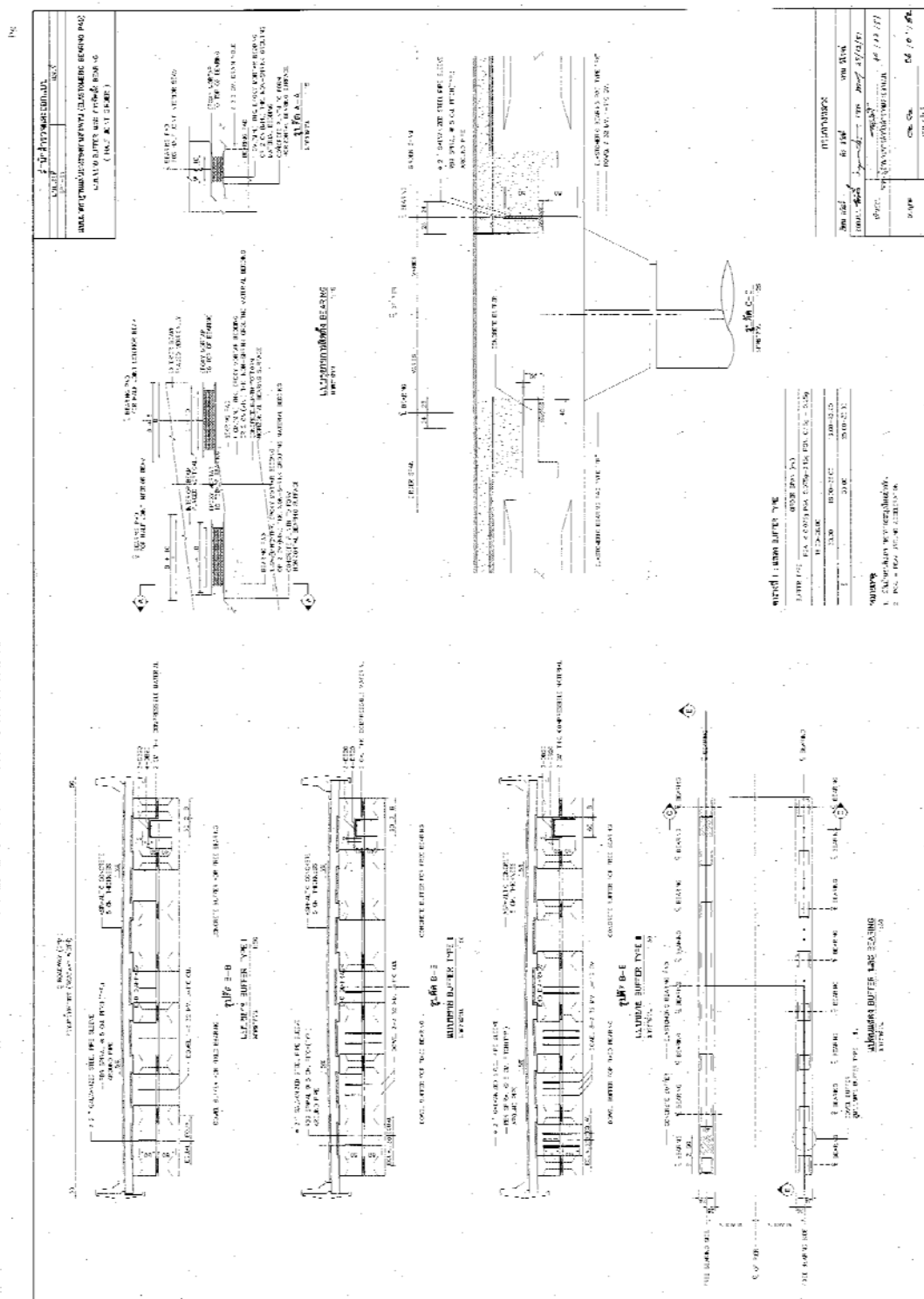
ความยาวช่วงสะพาน	รูปแบบโครงสร้างสะพาน	แผ่นยางรองคอสสะพาน
5-10 เมตร	พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่	Strip Bearing หนาประมาณ 10-20 มม.
7-12 เมตร	แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง	Strip Bearing หนาประมาณ 10 มม.
15-25 เมตร	คานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง	Strip Bearing หนาประมาณ 20-30 มม.
20-35 เมตร	คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอหรือตัวยู	Isolate Bearing หนาประมาณ 30-60 มม.



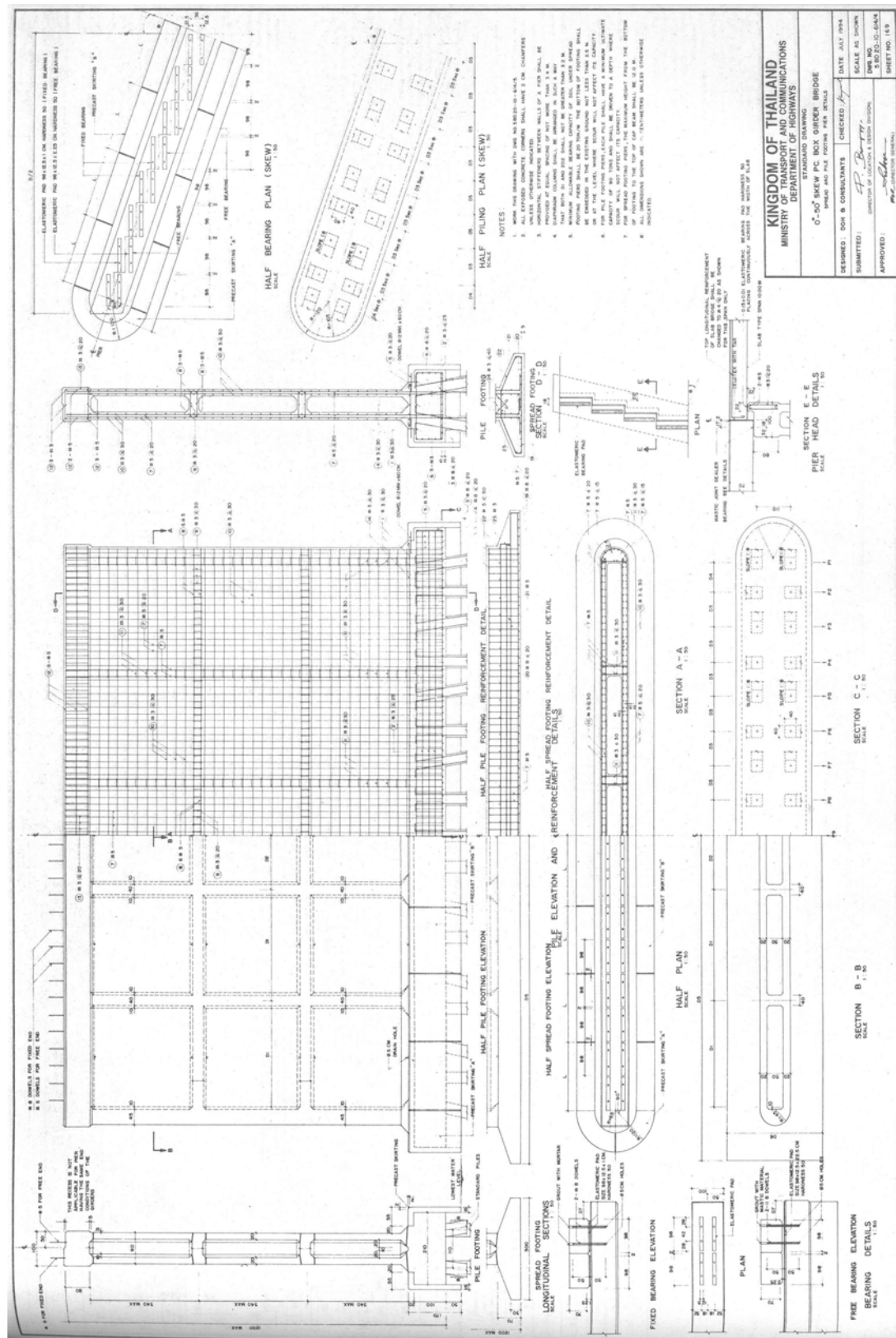
รูปที่ 2.1-10 แบบมาตรฐานสะพานช่วงสั้น Plank Girder



รูปที่ 3.1-11 แบบมาตรฐานสะพานช่วงสั้น Slab Type



รูปที่ 2.1-12 แบบมาตรฐานสะพาน I-Girder



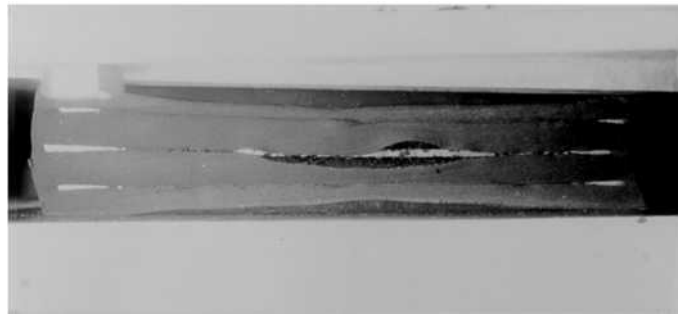
รูปที่ 2.1-13 แบบมาตรฐานสะพาน Box Girder

2.2 ปัจจัยการเสื่อมสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพาน

ระบบรองรับพื้นและคานสะพานหากไม่สามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์การใช้งานได้ นั้นหมายถึงเกิดการเสื่อมสภาพของระบบรองรับ ซึ่งมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.2.1 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้า

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้าของแผ่นยางรองคอสสะพานมีสาเหตุเกิดขึ้นมาจากการเกิดการเคลื่อนที่ไปมาของรถบรรทุก และเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวัน English et.al (1994) การเกิดแรงอัดร่วมกับการเกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนแบบกระทำซ้ำ (Cyclic Shear Deformation) ของแผ่นยางรองคอสสะพานนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากความล้า ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนบริเวณรอยต่อของยางและแผ่นเหล็ก นอกจากนี้ยังมีรายงานผลการศึกษาอีกว่า การเกิดรอยร้าวเนื่องจากความล้ายังมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ซึ่งรวมถึงขนาดของน้ำหนักสูงสุดที่มากกระทำและคุณสมบัติของยางอีลาสโตเมอร์ โดยที่การเกิดรอยร้าวนี้อาจนำไปสู่การเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสทิฟเนสตามแนวแกนและสทิฟเนสแรงเฉือน



รูปที่ 2.2-1 การเสียรูปของยางรองคอสสะพานเนื่องมาจากการรับแรงเฉือนแบบกระทำซ้ำ

2.2.2 การแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก

การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็กนี้เกิดจากสาเหตุเนื่องมาจาก (Muscare และ Yura, 1995)

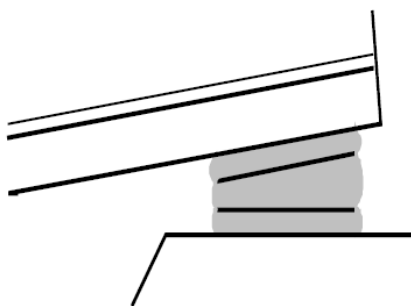
- แรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางและแผ่นเหล็กเสริมไม่ดีพอ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization)
- น้ำหนักที่ถ่ายลงแผ่นยางรองคอสสะพานไปกระทำที่บริเวณแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางและแผ่นเหล็กที่ไม่ดีพอ

การแยกตัวระหว่างเนื้อยางและแผ่นเหล็กนี้จะทำให้พฤติกรรมตอบสนองต่อการเสียรูปเมื่อรับน้ำหนักกด (Compressive Load) ที่แย่งลง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าสะพานจะเกิดการวิบัติขึ้นได้ ทั้งนี้เมื่อแผ่นยางรองคอสสะพานมีค่าการเสียรูปที่ต่างจากการเสียรูปเริ่มต้นประมาณ 100-200 เปอร์เซ็นต์ อาจจะต้องทำการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานใหม่

2.2.3 การเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพาน

ถ้าเกิดการเคลื่อนตัวของแผ่นยางรองคอสสะพานย่อมส่งผลกระทบต่อการใช้งานของสะพานเป็นอย่างยิ่ง โดยปัจจัยทั่วไปที่ทำให้สะพานเกิดการเคลื่อนตัวได้แก่ การเกิดการเอียงตัวของสะพาน อิทธิพลเนื่องจากการโค้งตัวของสะพาน พื้นโครงสร้างสะพานเกิดการโค้งตัวคล้ายหลังเต่า น้ำหนักอันเป็นผลเนื่องมาจากการจราจร ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการก่อสร้าง การทรุดตัวของฐานรองรับ และอิทธิพลเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการเกิดคืบก็ถือได้ว่าเป็นสาเหตุหนึ่งของการเคลื่อนตัวของพื้นสะพานในทิศทางตามแนวยาว ทั้งนี้จากรายงานผลการวิจัยของ Yazdani et al. (2000) สรุปว่าถ้าสะพานมีมุมเอียงตัวของพื้นสะพานที่สูง จำเป็นต้องมีการใช้แผ่นยางรองคอสสะพานที่ฐานรองรับที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ที่สูงเพื่อที่จะช่วยลดการแอ่นตัวของพื้นสะพาน ขณะที่ถ้าพื้นสะพานมีมุมเอียงตัวที่น้อยเกินไปอาจจะส่งผลให้เกิดการยก (Uplift) บริเวณด้านปลายของคานสะพาน และอาจส่งผลให้พื้นผิวของคานสะพานสัมผัสกับผิวของแผ่นยางรองคอสสะพานได้ไม่เต็มที่ หรือน้ำหนักที่กระทำต่อแผ่นยางรองคอสสะพานกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอกับผิวของแผ่นยาง

การโก่งตัวของคานสะพานในระยะเวลาเริ่มต้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนตัวของแผ่นยางรองคอสสะพาน โดยการหมุนที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการโก่งตัวของคานสะพาน และปัจจัยด้านการก่อสร้าง ซึ่งถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้แผ่นยางรองคอสสะพานเกิดการหมุน



รูปที่ 2.2-2 การเกิดการหมุนของตัวของยางรองคอสสะพาน

2.2.4 การเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน แสงแดด และสภาวะแวดล้อม

การเสื่อมสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานจะเห็นผลได้ชัดเจนของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ผลิตจากยางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโอโซนที่มีอยู่ทั่วไปในชั้นบรรยากาศ (1ในร้อยล้านส่วน) สามารถทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณผิวของแผ่นยางภายในไม่กี่สัปดาห์ (Lindley, 1992) ขณะที่ยางสังเคราะห์ (Neoprene) สามารถต้านทานการเสื่อมสภาพได้ดีกว่า ดังนั้นการจะนำยางธรรมชาติมาใช้งานนั้นมักจะมีการเติมสารเพื่อต่อต้านปฏิกิริยาเนื่องจากโอโซนโดยการเติมสารที่เรียกว่า WAX ลงไปในชั้นยาง โดยแผ่นยางที่มีสภาพผ่านตามมาตรฐาน AASHTO นั้นต้องไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นที่ผิวเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีโอโซนเข้มข้น 25 ในร้อยล้านส่วน ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และถูกยืดที่ค่าความเครียด 20%



รูปที่ 2.2-3 การเกิดรอยร้าวที่ผิวของแผ่นยางเนื่องมาจากอิทธิพลของโอโซน

William Potter และคณะ (2006) ได้ทำการตรวจสอบสภาพและทดสอบกำลังของวัสดุของฐานรองชนิด Neoprene ซึ่งไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ฐานรองที่ถูกนำมาศึกษาได้มาจากสะพาน Bryant Patton ในมลรัฐฟลอริดา สะพานดังกล่าวเปิดให้ใช้งานในปี ค.ศ.1964 จนกระทั่งมีการเปลี่ยนฐานรองในปี ค.ศ.2004 รวมอายุการใช้งานสะพานดังกล่าว 40 ปีโดยประมาณ ระหว่างช่วงที่มีการใช้งานฐานรองได้อยู่ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและความชื้น ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมบริเวณชายหาดของมลรัฐฟลอริดา ในการตรวจสอบสภาพของฐานรองในครั้งนี้ได้มีการตรวจสอบกำลังการรับแรงของฐานรองด้วยการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของยางด้วยอุปกรณ์ Durometer และการทดสอบความสามารถด้านทานแรงเฉือน ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยสายตาพบว่าบริเวณฐานรองมีการแตกบริเวณผิวเพียงเล็กน้อยและมักจะเกิดบริเวณมุมนอกที่ถูกคนกดทับ รอยแตกที่พบเกิดจากการใช้งานฐานรองซึ่งสัมผัสกับอากาศและแสงแดดโดยตรง การปูดที่ขอบเป็นผลมาจากฐานรองอยู่ภายใต้ น้ำหนักกดทับจนก่อให้เกิดแรงดึงบริเวณผิวซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวของฐานรองโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการใช้งาน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของฐานรองมีค่าน้อยมาก กล่าวคือมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0 ถึง 6.5% ของขนาดเดิมเท่านั้น และผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งแรงด้วยอุปกรณ์ Durometer พบว่าระดับความแข็งแรงของยางอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างสูง แต่พบว่าค่าความแข็งแรงของยางมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงที่ระยะเริ่มต้น ยิ่งไปกว่านั้นค่าความแข็งแรงโดยรอบขอบของฐานรองที่ไม่มีน้ำหนักกดทับมีค่าสูงกว่าบริเวณด้านในซึ่งมีค่าความแข็งแรงประมาณ 70 IRHD นั่นเป็นตัวบ่งชี้ว่าสภาพอากาศและผลการเกิด Oxidation ส่งผลเฉพาะขอบด้านนอกของฐานรองเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแรงมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งแผ่น ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าหากต้องการความทนทานของฐานรองก็สามารถทำได้โดยการกำหนดรายละเอียดให้ฐานรองอยู่ภายใต้แรงกดตลอดทั่วทั้งแผ่นโดยจะช่วยลดการสัมผัสกับอากาศและการเกิดรอยแตก สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนกลับให้ผลการทดสอบที่ขัดแย้งกับข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบัน โดยพบว่าค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) มีค่ามากกว่าข้อกำหนดประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากในการออกแบบมิได้มีการพิจารณาค่าโมดูลัสของแรงเฉือน ดังนั้นจึงไม่สามารถนำค่าโมดูลัสดังกล่าวมาเทียบกับข้อกำหนดในปัจจุบันได้

2.2.5 การเลื่อนไถล (Slip หรือ Pad Walking)

ในปัจจุบันนี้ปัญหาการเลื่อนไถลของแผ่นยางรองคอสสะพานถือว่ามีมีความสำคัญต่อการใช้งานสะพาน (Primus, 2007) ซึ่งสาเหตุการเลื่อนไถลนี้มักจะมีสาเหตุมาจากปัจจัย 3 กรณีคือ

1. การที่มีการเติมสารที่เรียกว่า WAX ลงไปในเนื้ออย่างมากเกินไปจนมีการซึมออกมาที่ผิวนอกของเนื้อยาง ทำให้เกิดการลดทอนแรงยึดระหว่างยางและคอนกรีต (ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวของแผ่นยางกับแท่นรองคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.33)
2. มีแรงกระทำทางด้านข้างกระทำต่อแผ่นยางรองคอสสะพาน โดยแรงเหล่านี้จะเกิดขึ้นมาจากการหดตัวของโครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือการเกิดคืบของคานสะพาน
3. การออกแบบติดตั้งแผ่นยางที่มีขนาดบางเกินไป ซึ่งแผ่นยางที่บางเกินไปไม่สามารถรองรับการยืด-หดตัวของพื้นสะพานได้ดีเนื่องจากแผ่นยางที่บางจะมีค่าต้านทานแรงเฉือนมาก (High Shear Stiffness) เมื่อมีการยืด-หดตัวของพื้นสะพานจึงไม่ดูดซับแรงเฉือนเท่าที่ควร และถ่ายแรงเฉือนดังกล่าวสู่โครงสร้างต่อม่อ เมื่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าแรงยึดต้านทานระหว่างแผ่นยางกับแท่นรองรับ จะทำให้แผ่นยางเกิดการเลื่อนหลุดได้

จากรายงานการวิจัยของ Roeder และ Syanton ในปี ค.ศ.1987 พบว่าปัญหาการเลื่อนไถลของแผ่นยางรองคอสสะพานมักจะเกิดกับแผ่นยางประเภทยางล้วนมากกว่าประเภทที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนจะไม่มีการเลื่อนไถลบริเวณขอบของคานสะพานได้ถ้าปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) น้อยกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางและคอนกรีตโครงสร้างสะพานส่วนบน



รูปที่ 2.2-4 การเลื่อนไถลของยางรองคอสสะพาน

Heymsfield, E. และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาปัญหาฐานรองเกิดการขยับออกจากตำแหน่ง (Slippage out of Position) ซึ่งเกิดขึ้นกับสะพานคอนกรีตอัดแรง โดยสะพานดังกล่าวอยู่ภายใต้การดูแลของกรมการขนส่งทางมลรัฐหลุยส์เซียน่า สหรัฐอเมริกา ในการตรวจสอบปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของสะพานอันเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิ พร้อมทั้งการติดตั้งกล้องวิดีโอเพื่อติดตามพฤติกรรมของฐานรองและสภาพการจราจรบนสะพาน ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ทำให้พบว่าปัญหาการขยับตัวของฐานรองเกิดขึ้นในเวลากลางวันอันเป็น

ผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้าง นอกจากนี้นักวิจัยยังได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเพื่อหาสาเหตุของปัญหาดังกล่าว ซึ่งพบว่าสาร Wax ที่ผสมเข้าไปในยาง neoprene เพื่อช่วยให้ยางทนทานต่อโอโซน มีผลทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฐานรองสะพานลดลง จึงทำให้ฐานรองขยับตัวได้ง่ายเมื่อแรงกระทำตามแนวราบกระทำกับตัวฐาน

2.2.6 คุณสมบัติของเนื้อยางที่ใช้ออกแบบไม่ได้มาตรฐาน

คุณสมบัติของวัสดุยางที่ใช้ในการออกแบบที่สำคัญ และใช้ในการออกแบบแผ่นยางคือ โมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus, G) ซึ่งทางปฏิบัติค่าโมดูลัสนี้จะหาค่าได้จากการเทียบเคียงจากค่าความแข็งของแผ่นยาง (Hardness, Shore A Scale) ค่าโมดูลัสที่เหมาะสมสำหรับเลือกใช้ไม่ควรมีค่าเกิน 1.3 MPa เนื่องจากค่าที่สูงกว่านี้จะมีค่าความยืดตัวขณะขาด (Elongation at Break) น้อย มีค่าความแข็ง (Stiffness) สูง และมีค่าคืบตัวสูง

2.3 ลักษณะสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพาน

เกณฑ์กำหนดสภาพการใช้งานภายหลังจากการตรวจสอบแผ่นยางรองคอสสะพานแบ่งออกเป็น 3 ระดับตามตารางที่ 2.3-1

ตารางที่ 2.3-1 เกณฑ์สภาพความเสียหายของยางรองคอสสะพาน

สภาพ	สภาพยางรองคอสสะพาน	รายละเอียด
ดี	สภาพดีไม่มีความเสียหาย	- สภาพดีเหมือนใหม่
พอใช้	สภาพใช้งานได้	- มีการไถเยียงไม่เกิน 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันไม่เกิน 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคอสสะพานไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองคอสสะพาน - พบการบริแตกที่ผิวแต่ไม่พบรอยฉีกขาด - ไม่พบการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก
ชำรุด	สภาพชำรุดไม่อยู่ในสภาพใช้งานได้	- มีการไถเยียงเกิน 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันเกิน 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคอสสะพานเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองคอสสะพาน - พบรอยฉีกขาด - พบการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก

จากหลักเกณฑ์การพิจารณาดังกล่าวทางที่ปรึกษาได้สรุปรูปแบบสภาพการใช้งานพร้อมภาพประกอบจาก
ฐานข้อมูลสะพานดังตารางที่ 2.3-2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประเมินสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองค
สะพาน

ตารางที่ 2.3-2 ตัวอย่างสภาพความเสียหายของยางรองคสะพาน

สภาพ	ภาพถ่ายความเสียหาย	สภาพยางรองคสะพาน
ดี		สภาพดีไม่มีความเสียหาย แผ่นยางอยู่ใน ตำแหน่งที่ถูกต้อง ไม่มีการปูดนูน และมีสภาพดี เหมือนใหม่
พอใช้		มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคสะพานไม่เกิน ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองค สะพาน
ชำรุด		มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคสะพานเกิน ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองค สะพาน

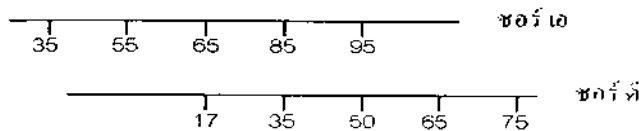
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแผ่นยางรองคอสพาน

2.4.1 การทดสอบวัดความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็ง (Hardness) เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับคุณสมบัติแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งจะแตกต่างจากความแข็งแรงแรง (Stiffness) เพราะความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น แต่ความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางทั้งก้อน หลักการพื้นฐานของการวัดค่าความแข็งก็คือจะนำหัวกด (Indenter) ไปกดลงบนชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกด (Depth of Penetration) จะสะท้อนถึงค่าความแข็งของยางเพราะยางที่มีความแข็งสูงก็จะมีค่าความลึกของการทะลุทะลวงต่ำ

เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มี 2 แบบ คือ เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบชอร์ เอ (Shore A) และแบบชอร์ ดี (Shore D) และเครื่องวัดความแข็งในหน่วยของ IRHD (International Rubber Hardness Degree) เนื่องจากเครื่องดูโรมิเตอร์ส่วนใหญ่ใช้แรงกดจากสปริงจึงมีความแม่นยำต่ำกว่าเครื่องวัดความแข็งในหน่วย IRHD ซึ่งใช้น้ำหนักที่คงที่เป็นตัววัด อย่างไรก็ตาม เครื่องดูโรมิเตอร์ก็ยังเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเครื่องมีราคาถูกกว่า

เครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ เอ นิยมใช้วัดความแข็งสำหรับยางทั่วไปที่มีความแข็งต่ำกว่า 90 ชอร์ เอ แต่สำหรับยางที่มีความแข็งสูงกว่านี้จะนิยมใช้เครื่องวัดแบบชอร์ ดี รูปที่ 3.4-1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างชอร์ เอ และชอร์ ดี อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้เสมอว่าค่า 100 ชอร์ เอ ไม่เท่ากับค่า 100 ชอร์ ดี ดังนั้น สเกลจาก 95-100 ของชอร์ เอ จึงไม่เทียบเท่ากับสเกลจาก 50-100 ของชอร์ ดี



รูปที่ 2.4-1 การเปรียบเทียบความแข็งของชอร์ เอ และชอร์ ดี

ปัจจุบัน การวัดค่าความแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีตามมาตรฐานต่างๆ มากมายดังแสดงในตารางที่ 2.4-1 แม้ว่ามาตรฐาน ISO จะไม่ได้กำหนดวิธีการวัดค่าความแข็งของยางด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ แต่มาตรฐาน ISO 868 ที่ออกแบบสำหรับทดสอบพลาสติกและยางแข็งอีโบนิต (Ebonite) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติความแข็งของยางทั่วไป

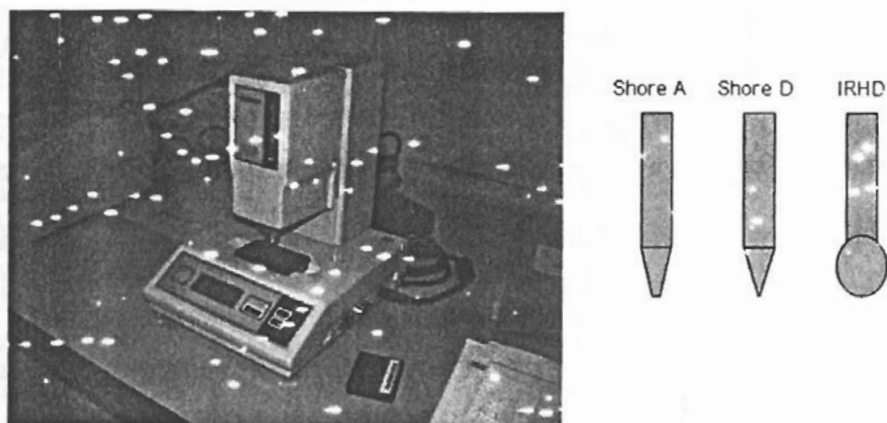
ตารางที่ 2.4-1 มาตรฐานในการทดสอบคุณสมบัติความแข็ง (พงษ์ธร และชาคริต, 2550)

มาตรฐาน ISO	การทดสอบ	มาตรฐานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
868	Plastics and ebonite-Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)	ASTM D 2240, BS 2719, DIN 53505
48	Vulcanized rubber-Determination of hardness (hardness between 10 and 100 IRHD)	ASTM D 1415, BS 903, Part A26, DIN 53519

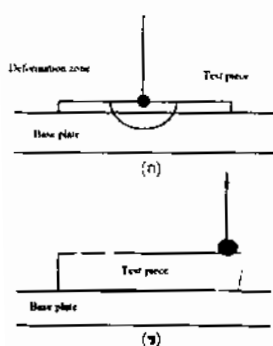
ตารางที่ 2.4-1 (ต่อ) มาตรฐานในการทดสอบคุณสมบัติความแข็ง(พวงษ์ธร และชาคริต, 2550)

มาตรฐาน ISO	การทดสอบ	มาตรฐานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
7619-1	Rubbers, vulcanized or thermoplastic- Determination of indentation hardness-Part 1: Durometer method (Shore hardness)	ASTM D 2240, BS 2719, DIN 53505

รูปที่ 2.4-2 แสดงตัวอย่างเครื่องวัดความแข็งแบบตั้งโต๊ะพร้อมทั้งลักษณะของหัวกดชนิดต่างๆ ขึ้นทดสอบที่นำมาทดสอบควรมีผิวเรียบทั้งด้านบนและด้านล่างและพื้นที่ทั้งสองต้องขนานกัน ค่าความแข็งที่อ่านได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของขึ้นทดสอบโดยเฉพาะความหนาเพราะถ้าขึ้นทดสอบบางมากเกินไปก็จะทำให้ผลการวัดที่ได้มีความผิดพลาดสูง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกดหัวกดลงบนขึ้นทดสอบ ยางที่อยู่ในบริเวณรอบๆจุดที่ถูกกดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อตอบสนองต่อแรงกด (เป็นวัฏจักรรูปครึ่งวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.4-3) หากขึ้นตัวอย่างบางมากเกินไป การตอบสนองต่อแรงกดจะไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจากยางเท่านั้น แต่จะรวมการตอบสนองที่เกิดจากฐานกดซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งมากๆ เข้าไปด้วย ในกรณีเช่นนี้ยางก็จะมีผลต้านทานต่อการทะลุทะลวงของหัวกดสูงกว่าปกติ ส่งผลให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ในทำนองกลับกัน การวัดค่าความแข็ง ณ บริเวณที่ชิดขอบขึ้นทดสอบมากเกินไปก็จะส่งผลให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงเพราะยางสามารถยุบตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย ณ บริเวณขอบ



รูปที่ 2.4-2 เครื่องวัดความแข็งและลักษณะของหัวกดแบบต่างๆ



รูปที่ 2.4-3 ลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของขึ้นทดสอบในกรณี (ก) ขึ้นทดสอบบางมากเกินไป
(ข) ทำการวัดชิดขอบของขึ้นทดสอบมากเกินไป

สำหรับการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ (ในหน่วยชอร์) มาตรฐาน ASTM D 2240 ได้กำหนดไว้ว่าชิ้นทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร (ชิ้นทดสอบอาจเตรียมจากการนำยางแผ่นเรียบหลายๆแผ่นมาวางซ้อนกันจนได้ความหนาตามต้องการ อย่างไรก็ตาม การเตรียมชิ้นทดสอบแบบนี้จะใช้ได้เฉพาะในกรณีที่แผ่นยางทั้งหมดสามารถแนบกันได้สนิทเท่านั้น) และชิ้นทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้าง (Lateral Dimensions) ที่สูงเพียงพอที่จะทำให้ผู้ทดสอบสามารถวัดความแข็งของยางในบริเวณที่ห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตรได้ การกดหัวกดลงบนชิ้นทดสอบควรกระทำด้วยความรวดเร็วและต้องออกแรงกดที่มากพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบแล้วจึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที โดยทั่วไป ผู้ทดสอบควรทำการวัดความแข็งอย่างน้อย 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้ อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าผลการทดสอบอาจมีความแปรปรวนได้เนื่องจากค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วของการกดหัวกดลงบนชิ้นทดสอบ ระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็ง และแรงที่ใช้กดหัวกด เป็นต้น การเพิ่มความเร็วของการกดหัวกดจะให้ความแข็งของยางที่วัดได้จากเครื่องมีค่าสูงขึ้น (เช่นเดียวกับการกระโดดลงน้ำจากแผ่นกระดานซึ่งผู้กระโดดจะรู้สึกว่ามีน้ำมีความแข็งมากขึ้นหากกระโดดจากที่สูงเพราะความเร็วของผู้กระโดดขณะที่สัมผัสกับน้ำจะสูงขึ้นตามระดับความสูง) ส่วนระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็งก็มีผลอย่างมากต่อค่าที่วัดได้เช่นกันเพราะโดยทั่วไปแล้ว การอ่านค่าทันทีหลังจากที่ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบก็อาจทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าการอ่านค่าหลังจากนั้น 2-3 วินาที การลดลงของค่าความแข็งตามเวลาจะเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้าเพียงใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัสดุโพลีเอสเตอร์ของยางสำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นสูง (มีองค์ประกอบที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง) ค่าความแข็งที่วัดได้ก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามเวลาที่อ่านค่า แต่สำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นต่ำก็จะพบว่าค่าความแข็งที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามเวลาที่อ่านค่า ส่วนปัจจัยสุดท้ายที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งที่อ่านได้คือแรงที่ใช้ในการกดหัวกด ในเชิงทฤษฎีแล้ว มาตรฐานได้ระบุว่าแรงที่ใช้ในการกดควรมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบกันสนิทกับชิ้นทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้ทดสอบแต่ละคนก็จะออกแรงกดที่แตกต่างกันทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้เพราะแรงกดที่สูงก็อาจทำให้ค่าที่อ่านได้สูงตามไปด้วย ดังนั้น มาตรฐาน ASTM จึงได้เสนอแนะให้นำน้ำหนักมาตรฐานไปวางไว้ที่ตรงกลางของแกนหัวกดเพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดสอบที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งน้ำหนักมาตรฐานที่แนะนำคือ 1 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ เอ และ 5 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ ดี

สำหรับการวัดความแข็งในหน่วย IRHD มาตรฐาน ASTM D1415 ได้กำหนดไว้ว่าชิ้นทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้างไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 4 มิลลิเมตร (นิยมเตรียมชิ้นทดสอบที่มีความหนาประมาณ 8-10 มิลลิเมตร) ในบางกรณีผู้ทดสอบอาจนำยางผิวเรียบ 2 ชั้นมาวางประกบกันเพื่อทำให้ได้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาตามต้องการได้ อย่างไรก็ตาม หากจำเป็นต้องวัดความแข็งของชิ้นทดสอบที่บางมากๆ หรือชิ้นทดสอบที่มีความหนาสูงกว่า 4 มิลลิเมตร แต่มีขนาดทางด้านข้างต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดหรือชิ้นทดสอบที่ไม่มีผิวแบนราบ เช่น ยางโอริง ฯลฯ ผู้ทดสอบควรใช้เครื่องมือวัดขนาดเล็กที่เรียกว่า micro IRHD instrument แทน โดยทั่วไป การวัดความแข็งในหน่วย IRHD จะทำการวัด 3 หรือ 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่ากลาง

การวัดค่าความแข็งควรทำที่อุณหภูมิห้อง (ในช่วง $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) และในการรายงานผลการทดสอบนั้น ควรมีการระบุขนาดของชิ้นทดสอบ ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ อุณหภูมิ และลักษณะของพื้นผิว (เช่นได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์หรือได้จากการขัดผิวให้เรียบ) เป็นต้น สำหรับค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นทดสอบที่ไม่ได้มาตรฐานเรียกว่าค่าความแข็งปรากฏ (Apparent Hardness) ส่วนค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นทดสอบมาตรฐานเรียกว่าค่าความแข็งมาตรฐาน (Standard Hardness) ค่าความแข็งปรากฏของยางชนิดเดียวกันอาจมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างและ

ความหนา ส่วนค่าความแข็งที่วัดได้พื้นผิวโค้ง เช่น ยางโอรัง จะเป็นค่าเฉพาะที่ใช้กับชิ้นส่วนนั้นๆ เท่านั้น ซึ่งค่าที่ได้ อาจจะแตกต่างจากค่าความแข็งมาตรฐานมากถึง 10 IRHD หรืออาจมากกว่านั้น

2.4.2 การทดสอบคุณสมบัติแรงดึง (Testing of Tensile Properties)

คุณสมบัติแรงดึงที่นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยางได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) และโมดูลัส (Modulus) มาตรฐานที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติแรงดึงมีหลายแบบ ได้แก่ มาตรฐาน ASTM D 412 มาตรฐาน ISO 37 มาตรฐาน BS 903 Part A2 และมาตรฐาน DIN 53504

คุณสมบัติแรงดึงของยางสามารถวัดได้โดยการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ (มาตรฐาน ASTM D 412 ได้กำหนดอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 ± 50 มิลลิเมตร/นาที) เครื่องที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่ จะเรียกว่าเครื่อง Universal Testing Machine หรือ Tensile Testing Machine (รูปที่ 2.4-4) ในระหว่างการดึง เครื่อง จะทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของยางแล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพล็อตเป็น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าโมดูลัสที่ความเครียดต่างๆ

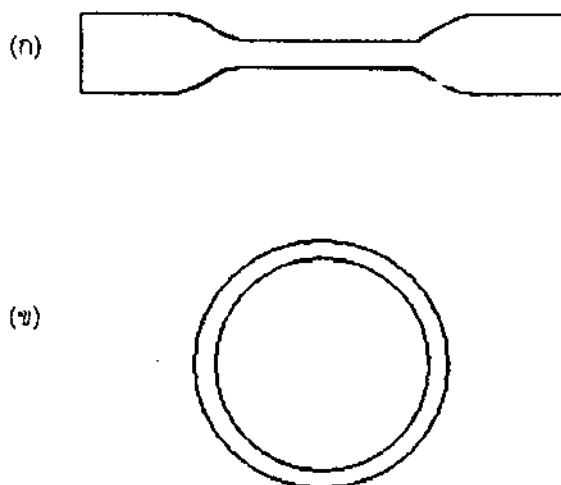


รูปที่ 2.4-4 เครื่อง Universal Testing Machine

โดยทั่วไป ชิ้นทดสอบที่จะนำมาทดสอบควรได้รับการคงรูปมาแล้วไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบนั้นได้รับการคงรูปอย่างสมบูรณ์แล้ว อย่างไรก็ตาม ไม่ควรเก็บชิ้นทดสอบไว้นานเกิน 28 วันหลังการคงรูป (ยกเว้นในกรณีเตรียมชิ้นทดสอบจากผลิตภัณฑ์) สำหรับรูปร่างของชิ้นทดสอบมาตรฐานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ รูปดัมเบลล์ และรูปวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.4-5

ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ควรได้จากการขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์หรือการตัดจากยางแผ่นเรียบที่มีความหนาในช่วง 1.3 ถึง 3.3 มิลลิเมตร โดยยางแผ่นเรียบนี้อาจได้มาจากการเตรียมโดยตรงจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์หรือ

อาจได้จากการนำผลิตภัณฑ์ยางมาตัดให้เป็นแผ่นและขัดผิวให้เรียบ ซึ่งในกรณีหลังนี้ ผู้ทดสอบต้องแน่ใจว่าชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ต้องมีพื้นผิวที่เรียบและไม่มีชั้นผ้าใบอยู่ภายใน หากทำการเตรียมยางแผ่นเรียบโดยวิธีตามมาตรฐาน ASTM Practice D3182 ชิ้นทดสอบควรมีความหนาอยู่ในช่วง 2 ± 0.2 มิลลิเมตร และในระหว่างทำการตัดชิ้นทดสอบด้วยด้ายรูปดัมเบลล์ ผู้ตัดควรตัดยางให้ขาดด้วยการกดตายเพียงครั้งเดียว (Single Impact Stroke) ทั้งนี้เพื่อให้พื้นที่ผิวที่เกิดจากการตัดเรียบปราศจากรอยตำหนิ (พื้นผิวที่ไม่เรียบหรือมีรอยขีดข่วนเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความทนทานต่อแรงดึงที่วัดค่าได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง) นอกจากนี้ ผู้ตัดต้องแน่ใจว่าได้ทำการตัดชิ้นทดสอบตามแนวความยาวในทิศที่ขนานกับทิศที่ออกมาจากเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง เพราะการตัดชิ้นทดสอบในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางที่ยางไหลออกมาจากลูกกลิ้งจะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนการวัดความหนาของชิ้นทดสอบนั้น มาตรฐาน ASTM D 412 ได้กำหนดให้ทำการวัดความหนา 3 จุดคือที่บริเวณกึ่งกลางและที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของคอดัมเบลล์ จากนั้นก็นำค่ากลางไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบไม่ควรนำชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนาดำสุดและสูงสุดต่างกันเกิน 0.08 มิลลิเมตร มาใช้ในการทดสอบ

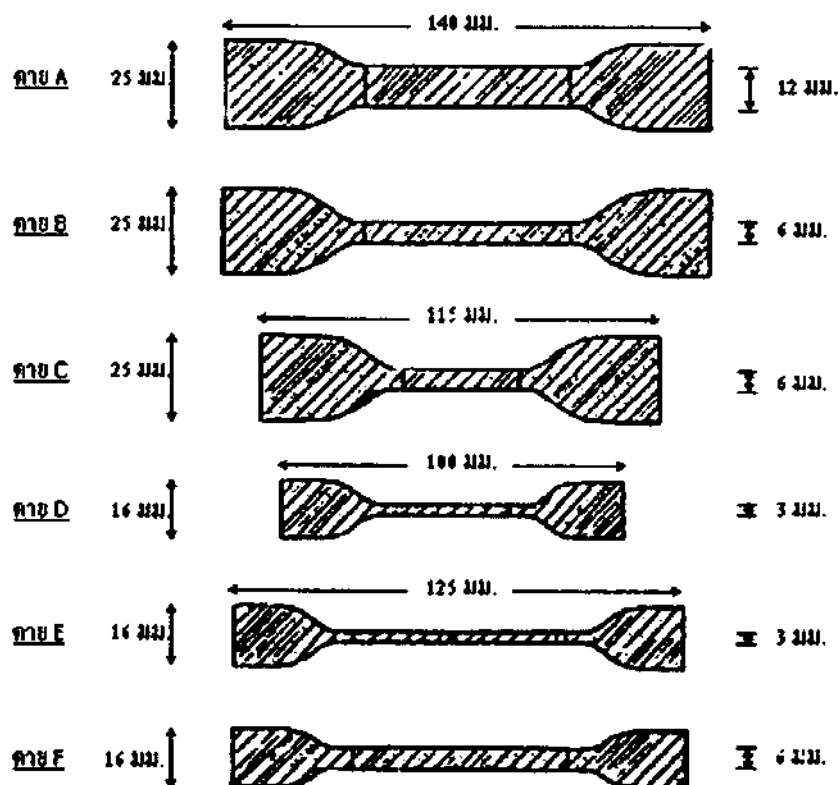


รูปที่ 2.4-5 รูปร่างของชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติแรงดึง (ก) รูปดัมเบลล์ และ (ข) รูปวงแหวน

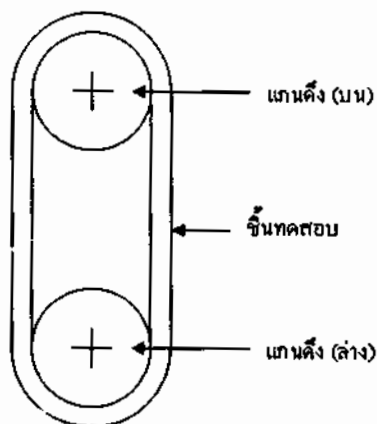
สำหรับการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพนั้น โดยทั่วไปควรทำการทดสอบ 3 ถึง 5 ครั้งและรายงานค่ากลาง (Median) แต่สำหรับการวิจัยแล้วนิยมทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ครั้งและรายงานค่าเฉลี่ย (Mean) พร้อมทั้งค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

เนื่องจากชิ้นทดสอบมาตรฐานนั้นมีหลายขนาดให้ผู้ทดสอบได้เลือกใช้ เช่น มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ออกเป็น 6 ขนาดตั้งแต่ด้ายเอถึงด้ายเอฟ (รูปที่ 2.4-6) และแบ่งชิ้นทดสอบรูปวงแหวนออกเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก (Type 1) ซึ่งมีเส้นรอบวงภายในเท่ากับ 50 มิลลิเมตรและขนาดใหญ่ (Type 2) ซึ่งมีเส้นรอบวงภายในเท่ากับ 100 มิลลิเมตร เป็นต้น ดังนั้น หากผู้ทดสอบต้องการเปรียบเทียบคุณสมบัติแรงดึงของยางก็ควรเลือกใช้ชิ้นทดสอบที่มีรูปร่างและขนาดเท่ากัน เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าทั้งขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบล้วนแล้วแต่มีผลต่อค่าที่วัดได้ทั้งสิ้น โดยทั่วไป ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบว่าชิ้นทดสอบรูปวงแหวนจะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่าชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ทั้งนี้เนื่องจากว่าในระหว่างการดึงชิ้นทดสอบรูปวงแหวนนั้น ความเค้นและความเครียดของยางจะกระจายตัวไม่

สมมติเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของยางเพราะค่าเหล่านี้จะสูงสุดที่บริเวณเส้นรอบวงด้านในและจะมีค่าต่ำสุดที่บริเวณเส้นรอบวงด้านนอก ด้วยเหตุนี้ ชิ้นทดสอบรูปวงแหวนจึงไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม ชิ้นทดสอบรูปวงแหวนก็มีข้อดีเหนือชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์คือไม่ก่อให้เกิดปัญหาการลื่นไถล (Slip) ของชิ้นทดสอบในระหว่างการดึงเพราะชิ้นทดสอบจะถูกคล้องเข้ากับแกนของเครื่องดึง อีกทั้งยังสามารถวัดระยะของการดึงหรือวัดความเครียดได้โดยตรงจากระยะห่างระหว่างแกนดึงทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.4-7



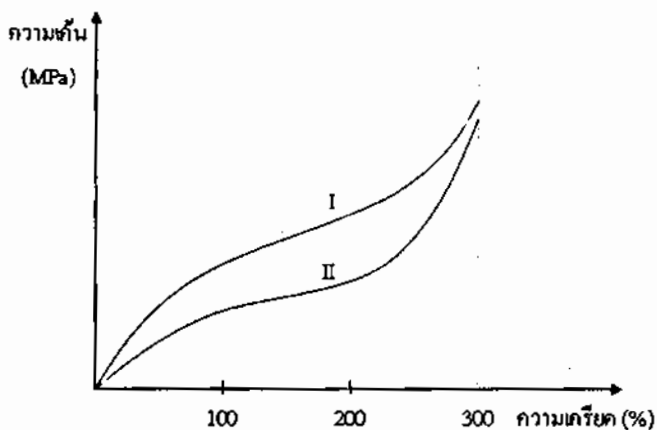
รูปที่ 2.4-6 รูปร่างของชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์แบบต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D412



รูปที่ 2.4-7 ลักษณะการดึงชิ้นทดสอบแบบวงแหวน

อัตราเร็วในการดึงยางก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อค่าที่วัดได้ โดยทั่วไป การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะส่งผลทำให้ยางมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง มีค่าโมดูลัสสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงอาจสูงขึ้นหรือลดลงก็ได้ นอกจากนี้ ทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยางที่เกิดขึ้นในขณะที่ยางถูกรีดผ่านเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งก็มีผลต่อคุณสมบัติแรงดึงของยางด้วยเช่นกัน โดยพบว่า ถ้าทำการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงในทิศทางตามแนวการจัดเรียงโมเลกุลยาง (ขนานกับทิศทางการรีดผ่านลูกกลิ้ง) จะพบว่าความทนทานต่อแรงดึงที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ด้วยเหตุนี้ ในการเตรียมชิ้นทดสอบควรมีการระบุทิศทางของยางที่ผ่านออกมาจากลูกกลิ้งด้วย เพราะมาตรฐานส่วนใหญ่ได้กำหนดให้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงในทิศทางตามแนวการจัดเรียงของสายโซ่โมเลกุลยาง

ข้อควรระวังของการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงก็คือชิ้นทดสอบที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นทดสอบที่ไม่เคยได้รับแรงหรือความเค้นจากภายนอกมาก่อน ผู้ทดสอบต้องหลีกเลี่ยงการนำชิ้นทดสอบที่เคยได้รับการดึงมาก่อนมาทำการทดสอบ เพราะการดึงในครั้งแรกและในครั้งที่ถัดไป จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4-8



รูปที่ 2.4-8 ตัวอย่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของยาง

จากรูปจะเห็นว่าเส้นที่ I ซึ่งเป็นเส้นที่ได้จากการดึงครั้งแรกจะมีค่าความเค้นสูงกว่าเส้นที่ II ซึ่งเป็นเส้นที่ได้จากการดึงในครั้งที่ 2 (โดยในการดึงครั้งแรกนั้น ชิ้นทดสอบถูกดึงไป 300 % ความเครียด จากนั้นก็จะปล่อยให้กลับคืนสู่สภาวะเดิมก่อนจะทำการดึงในครั้งที่ 2) แต่เมื่อดึงยางให้ยืดไปมากกว่า 300 % ความเครียด จะพบว่าทั้งเส้นที่ I และ II จะให้ค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกัน (เส้นกราฟอาจทับกันได้สนิท) พฤติกรรมการลดลงของค่าความเค้นเมื่อดึงในครั้งหลังเรียกว่า “stress softening”

คุณสมบัติแรงดึงเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการผลิต เนื่องจากค่าความทนทานต่อแรงดึงเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามการเปลี่ยนแปลงของยางอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนสูตรการผสมเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการผลิต นอกจากนี้ คุณสมบัตินี้ยังนิยมใช้เป็นตัววัดความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสิ่งเร้าต่างๆ เช่น ความร้อน ของเหลว ก๊าซ สารเคมี โอโซน สภาพอากาศ ฯลฯ โดยทั่วไป การทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติแรงดึงของยางทั้งก่อนและหลังการสัมผัสสิ่งเร้าดังกล่าว ซึ่งถ้าคุณสมบัติแรงดึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็แสดงว่ายางมีความทนทานต่อสิ่งเร้าได้ดีและยางควรจะมียอายุการใช้งานที่ยาวนานภายใต้สิ่งเร้าดังกล่าว

2.4.3 การทดสอบคุณสมบัติแรงกด (Testing of Compressive Properties)

การทดสอบคุณสมบัติแรงกดเป็นการทดสอบที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบความแข็งแกร่ง (Compressive Stiffness) ของยางสูตรต่างๆ นักเทคโนโลยียางจึงนิยมใช้การทดสอบนี้ในการพัฒนาสูตรเคมียางสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องรับแรงกดในระหว่างการใช้งาน วิธีการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อยางได้รับแรงกดแบบสถิต (Static Compression) ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM D575 และ BS 903: Part A4 เครื่องมือที่นิยมใช้ในการทดสอบได้แก่ เครื่อง “universal testing machine” มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบคือ

- แบบ A : การทดสอบที่กำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Compression Test of Specified Deflection) ในกรณีนี้ ผู้ทดสอบจะทำการวัดแรงที่ใช้ในการกดเพื่อทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ยุบตัว) ตามระยะที่กำหนด
- แบบ B : การทดสอบที่กำหนดแรงกด (Compression Test of Specified Force) ในกรณีนี้ ผู้ทดสอบจะทำการวัดขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (วัดระยะยุบตัว) เมื่อชิ้นทดสอบได้รับแรงกดตามค่าที่กำหนด

การทดสอบเริ่มต้นด้วยการนำชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28.6 ± 0.1 มิลลิเมตร และหนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร ไปวางไว้ในเครื่องทดสอบโดยมีแผ่นกระดาษทรายวางคั่นระหว่างชิ้นทดสอบกับแผ่นกดของเครื่องทดสอบ ซึ่งกระดาษทรายที่นำมาวางคั่นกลางนี้จะช่วยให้พื้นผิวสัมผัสของยางไม่เกิดการลื่นไถลไปทางด้านข้างในระหว่างที่ทำการทดสอบ ด้วยเหตุนี้ การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM นี้จึงเป็นการทดสอบคุณสมบัติแรงกดของยางในสภาวะที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน (Non-Homogeneous Deformation)

สำหรับการทดสอบแบบ A ชิ้นทดสอบจะถูกกดในแนวตั้งโดยใช้อัตราเร็วในการกดขึ้นทดสอบเท่ากับ 12 ± 3 มิลลิเมตร/นาที เมื่อกดจนกระทั่งชิ้นทดสอบมีระยะยุบตัวตามที่กำหนดแล้วก็จะทำการปล่อยแรงกดด้วยอัตราเร็วที่เท่าเดิม จากนั้นก็จะทำการทดสอบซ้ำในรอบที่ 2 และ 3 แต่ผู้ทดสอบจะทำการบันทึกผลการทดสอบ (ค่าความเค้นและความเครียด) เฉพาะในรอบที่ 3 เท่านั้น เพราะการกดใน 2 รอบแรกนั้นกระทำไปเพื่อทำลายโครงสร้างของสารตัวเติม (Filler Structure) โดยทั่วไป นิยมทดสอบขึ้นทดสอบจำนวน 3 ขึ้นและรายงานค่ากลางที่วัดได้

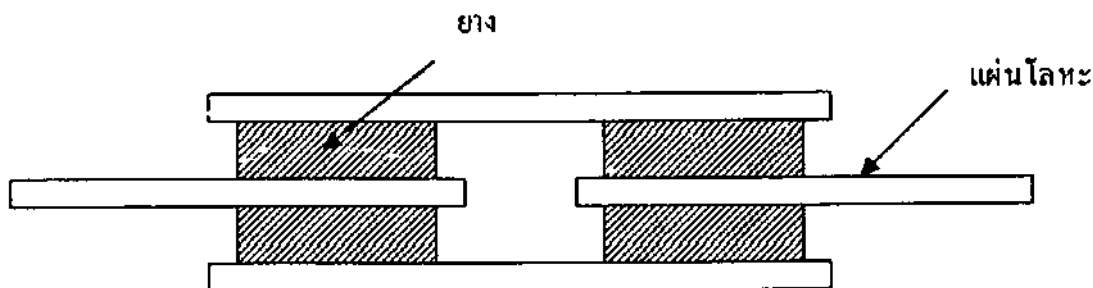
สำหรับการทดสอบแบบ B ชิ้นทดสอบจะถูกกดในแนวตั้งด้วยแรงเพียงเล็กน้อย จากนั้นก็จะทำการปรับปรุงตั้งเกจวัดค่าระยะการยุบตัว ณ จุดนั้นให้เป็นศูนย์ ก่อนที่จะเริ่มกดยางด้วยแรงที่กำหนดไว้และอ่านค่าระยะยุบตัวหลังจากที่ออกแรงกด 3 วินาทีโดยแสดงผลในรูปร้อยละของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อเทียบกับความหนาตั้งต้น โดยทั่วไป นิยมทดสอบขึ้นทดสอบจำนวน 3 ขึ้นและรายงานค่ากลางที่วัดได้เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ A

อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าค่าความแข็งแกร่งที่วัดได้นี้เหมาะสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางแต่ละสูตรเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลิตภัณฑ์จริงในระหว่างการใช้งานได้เพราะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดและความเครียดดกนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยเฉพาะอัตราส่วนระหว่างพื้นที่รับแรงต่อพื้นที่ที่ไม่ได้รับแรง (Load Area/Free Surface Area) ซึ่งเรียกว่า Shape Factor (S) ซึ่งถ้า S มีค่าสูงก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีค่าความแข็งแกร่งหรือความต้านทานต่อการกด (Compressive Stiffness) ที่สูงด้วยเช่นกัน

2.4.4 การทดสอบคุณสมบัติแรงเฉือนและความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับโลหะ

(Testing of Shear Properties and Adhesion to Rigid Plates)

วิธีการวัดค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus, G) ของยางได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 1827 และ BS 903: Part A14 โดยทั่วไป ชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคล้ายรูปแซนด์วิช 2 ชิ้นอยู่รวมกันอย่างสมมาตร (Quadruple Sandwich) ดังแสดงในรูปที่ 2.4-9



รูปที่ 2.4-9 รูปร่างของชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติแรงเฉือน

จากรูปจะพบว่าชิ้นทดสอบ 1 ชิ้นจะประกอบด้วยยางทั้งหมด 4 ก้อน ซึ่งยางแต่ละก้อนจะมีความหนาประมาณ 4 ± 1 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 20 ± 5 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 25 ± 5 มิลลิเมตร ยางทั้ง 4 ก้อนจะถูกยึดติดกับแผ่นโลหะที่มีความกว้างเท่ากับก้อนยางจำนวน 4 แผ่น โดยใช้ระบบการเชื่อมติดที่เหมาะสม

เมื่อเตรียมชิ้นทดสอบเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนด้วยเครื่อง universal testing machine โดยกำหนดให้อัตราเร็วของการดึงเท่ากับ 5 ± 1 มิลลิเมตร/นาที และจะดึงจนกระทั่งชิ้นทดสอบมีความเครียดเฉือนประมาณ 30% จากนั้นก็ทำการบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (ซึ่งก็คือแรงเฉือนสำหรับยาง) และระดับของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นทดสอบ ท้ายสุดจึงนำค่าแรงและระดับของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความเค้นเฉือน (τ) และค่าความเครียดเฉือน (γ) โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\tau = F / 2A$$

และ

$$\gamma = d / 2c$$
(2.14)

เมื่อ	F	คือแรงในหน่วยนิวตัน
	A	คือพื้นที่หนึ่งด้านของยางหนึ่งก้อนในบริเวณที่ยางยึดติดกับแผ่นโลหะในหน่วยตารางมิลลิเมตร
	d	คือระดับของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในหน่วยมิลลิเมตร
	c	คือความหนาของก้อนยาง 1 ก้อนในหน่วยมิลลิเมตร

โดยทั่วไป ค่าโมดูลัสเฉือนของยางนิยมนำค่าความเครียดเฉือนเท่ากับ 25% ดังนั้น ผู้ทดสอบสามารถคำนวณหาค่าโมดูลัสเฉือนได้จากสมการ (2.15)

$$G = \tau_{25} / \gamma_{25} = \tau_{25} / 0.25$$
(2.15)

สำหรับในกรณีที่ต้องมีการปรับสภาวะเชิงกล (Mechanical Conditioning) ของยาง ขึ้นทดสอบควรได้รับแรงเฉือนจนกระทั่งยางมีความเครียดเท่ากับ 30% ก่อนที่จะปล่อยแรงเฉือนออกเพื่อให้ยางกลับคืนสู่สภาพเดิม การปรับสภาวะเชิงกลดังกล่าวควรทำประมาณ 5 ครั้งเพื่อกำจัดผลที่อาจเกิดจากโครงสร้างของสารตัวเติมให้หมดไป ก่อนที่จะทำการบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระดับของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง การทดสอบส่วนใหญ่จะทำ 3 ครั้ง และรายงานค่ากลาง

ปัจจุบัน การทดสอบคุณสมบัติแรงเฉือนไม่เป็นที่ยอมรับมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในการเตรียมชิ้นทดสอบเพราะชิ้นทดสอบจะต้องถูกยึดติดกับแผ่นโลหะ ดังนั้น การเตรียมชิ้นทดสอบจึงต้องเตรียมจากยางคอมพาวด์ และต้องทำการขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ ด้วยเหตุนี้ การทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนของยางส่วนใหญ่จึงใช้เพื่อจุดประสงค์ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น สำหรับการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องกระทำเป็นประจำนั้น โรงงานส่วนใหญ่จะนิยมวัดค่าโมดูลัสกดหรือค่าความแข็งมากกว่า

นอกจากค่าโมดูลัสเฉือนแล้ว ผู้ทดสอบยังสามารถใช้วิธีการที่ระบุไว้ในมาตรฐานทั้งสองดังกล่าว สำหรับการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด (Adhesion) ระหว่างยางกับแผ่นโลหะได้อีกด้วย ซึ่งในกรณีหลังนี้ ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงเฉือนที่อัตราเร็วของการดึงเท่ากับ 50 ± 5 มิลลิเมตร/นาทีและจะเพิ่มแรงเฉือนต่อไปเรื่อยๆจนกว่าชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกันและบันทึกค่าแรงเฉือนสูงสุด จากนั้นก็คำนวณหาค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นโลหะได้จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงของการยึดติด} = F_{\max}/2A \quad (2.16)$$

เมื่อ $F_{\max}$ คือค่าแรงเฉือนสูงสุด และ

A คือพื้นที่หนึ่งด้านของยางหนึ่งก้อนในบริเวณที่ยางยึดติดกับแผ่นโลหะ

นอกจากการรายงานผลในรูปของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแล้ว ผู้ทดสอบควรใช้สัญลักษณ์ต่อไปนี้เพื่อระบุถึงลักษณะของการประลัยหรือการฉีกขาดของชิ้นทดสอบ

R เมื่อการประลัยเกิดขึ้นในเนื้อยาง

RC เมื่อการประลัยเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างยางและกาวชั้นนอก (cover)

CP เมื่อการประลัยเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างกาวชั้นนอกและกาวคลุมผิว (primer)

M เมื่อการประลัยเกิดขึ้นที่พื้นผิวของแผ่นโลหะ

2.4.5 การทดสอบการเสียรูปหลังการกด (Compression Set)

การเสียรูปหลังการกดเป็นการวัดระดับการได้กลับคืนมา (degree of recovery) ของยาง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไปหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการวัดค่าการเสียรูปหลังการกดเป็นการวัดความสามารถของยางในการรักษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นภายหลังจากที่ยางได้รับแรงกดเป็นระยะเวลาหนึ่ง แม้ว่าค่าการเสียรูปหลังการกดจะไม่สัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการอุดรอยรั่วเหมือนค่าการคลายตัวของความเค้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าการเสียรูปหลังการกดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการคลายตัวของความเค้น ดังนั้น ผู้ทดสอบส่วนใหญ่จึงนิยมใช้ค่าการเสียรูปหลังการกดในการทำนายประสิทธิภาพในการอุดรอยรั่วมากกว่าการใช้ค่าการคลายตัวของความเค้น เพราะการวัดค่าการเสียรูปหลังการกดสามารถทำได้โดยง่ายและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบก็มีราคาถูก ตารางที่ 2.4-2 แสดงวิธีการมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าการเสียรูปหลังการกดของยาง

ตารางที่ 2.4-2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติการเสีรูปหลังการกด (พหุขอร์ และชาคริต, 2550)

มาตรฐาน ISO	การทดสอบ	มาตรฐานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
815	Vulcanized rubbers-Determination of compression set under constant deflection at normal and high temperatures	ASTM D 395, BS 903 : Part A6, DIN 53517
1653	Vulcanized rubbers-Determination of compression set under constant deflection at low temperatures	ASTM D 1229, BS 903 : Part A39, DIN 53517

มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งวิธีการทดสอบหาค่าการเสีรูปหลังการกดออกเป็น 2 แบบคือ

แบบที่ 1 : การทดสอบภายใต้แรงกดคงที่ในอากาศ (Constant Force in Air) และ

แบบที่ 2 : การทดสอบภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างคงที่ในอากาศ (Constant Deflection in Air)

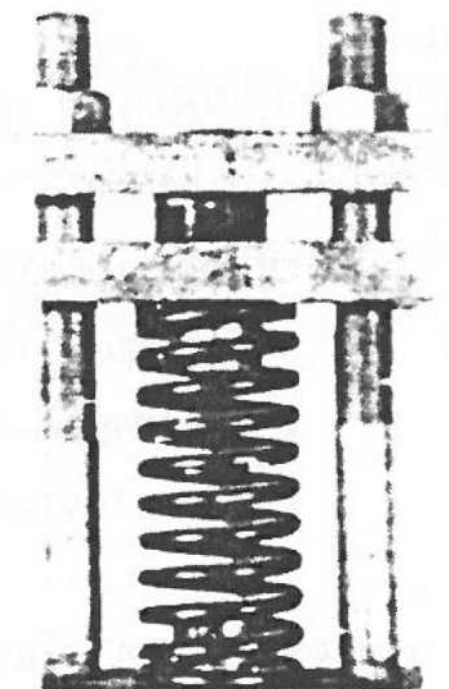
ซึ่งการเลือกใช้วิธีทดสอบแบบใดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของยางนั้นๆ แต่โดยทั่วไป วิธีการทดสอบแบบหลังจะได้รับความนิยมมากกว่าแบบแรก อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบแบบหลังนี้ก็ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทดสอบยางที่มีค่าความแข็งสูงกว่า 90 IRHD

ขั้นตอนทดสอบมาตรฐานสำหรับการวัดค่าการเสีรูปหลังการกดมีรูปร่างเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนา 29 ± 0.5 และ 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ หรือขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนา 13 ± 0.2 และ 6 ± 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการทดสอบ โดยขั้นตอนทดสอบขนาดใหญ่สามารถนำไปใช้ได้กับการทดสอบทั้งแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แต่ขั้นตอนทดสอบขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ได้เฉพาะกับการทดสอบในแบบที่ 2 เท่านั้น ส่วนการรายงานผลการทดสอบก็อาจรายงานในรูปของค่าเฉลี่ยที่ได้จากขั้นตอนทดสอบจำนวน 2 ขั้นตอนหรืออาจรายงานผลในรูปของค่ากลางที่วัดได้จากขั้นตอนทดสอบจำนวน 3 ขั้นตอน

สำหรับการทดสอบในแบบที่ 1 เมื่อทำการวัดความหนาของขั้นตอนทดสอบแล้ว ขั้นตอนทดสอบก็จะถูกกดด้วยแรงคงที่ประมาณ 1.8 kN โดยใช้เครื่องกดที่ตั้งแสดงในรูปที่ 2.4-10 จากนั้นก็นำชุดทดสอบไปปรับสภาวะภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด (เช่น ไว้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หรือ 100°C เป็นระยะเวลา 70 ชั่วโมง เป็นต้น) หลังจากนั้นก็นำขั้นตอนทดสอบออกจากเครื่องกดและนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นบนพื้นผิวที่เป็นฉนวน เช่น ไม้ นานประมาณ 30 นาทีก่อนที่จะทำการวัดค่าความหนาสุดท้ายและทำการคำนวณค่าการเสีรูปหลังการกด (C) เป็นร้อยละเมื่อเทียบกับความหนาดั้งเดิมโดยใช้สมการ (2.17)

$$C = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (2.17)$$

เมื่อ t_0 คือความหนาดั้งเดิม
 t_f คือความหนาสุดท้าย

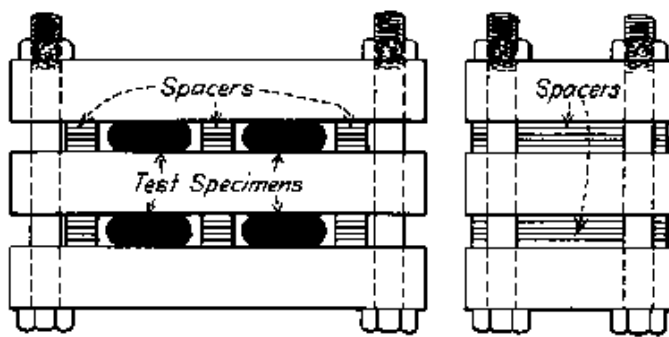


รูปที่ 2.4-10 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดค่าการเสียรูป หลังการกดภายใต้แรงกดคงที่ (ASTM D395)

สำหรับการทดสอบในแบบที่ 2 ขึ้นทดสอบที่ได้รับการวัดค่าความหนาเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปกดให้ยุบตัวด้วยเครื่องกดดังแสดงในรูปที่ 2.4-11 จากรูปจะเห็นว่าระยะที่ย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะถูกกำหนดโดยความหนาของแท่งโลหะ (spacer bars) ที่วางคั่นอยู่ระหว่างแผ่นกดแต่ละแผ่น สำหรับขึ้นทดสอบขนาดใหญ่ ผู้ทดสอบต้องใช้แท่งโลหะที่มีความหนาเท่ากับ 9.5 ± 0.02 มิลลิเมตร แต่สำหรับขึ้นทดสอบขนาดเล็ก ผู้ทดสอบต้องใช้แท่งโลหะที่มีความหนาเท่ากับ 4.5 ± 0.01 มิลลิเมตร การใช้แท่งโลหะวางคั่นกลางระหว่างแผ่นกดดังกล่าวจะทำให้ขึ้นทดสอบที่ได้รับแรงกดมีความหนาสุดท้ายเท่ากับ ความหนาของแท่งโลหะหรืออย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างประมาณ 25% เมื่อเทียบกับความหนาตั้งต้นของขึ้นทดสอบ จากนั้นก็นำชุดทดสอบไปปรับสภาวะภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เช่นเดียวกับในกรณีของการทดสอบในแบบที่ 1 เมื่อทำการปรับสภาวะเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำขึ้นทดสอบออกจากเครื่องกดและนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นบนพื้นผิวที่เป็นฉนวนนานประมาณ 30 นาทีก่อนที่จะทำการวัดค่าความหนาสุดท้ายและคำนวณการเสียรูปหลังการกด (C) เป็นร้อยละเมื่อเทียบกับระยะยุบตัวตั้งต้นโดยใช้สมการ (2.18)

$$C = \frac{t_0 - t_f}{t_0 - t_n} \times 100 \quad (2.18)$$

เมื่อ	t_n	คือความหนาของแท่งโลหะที่ใช้ในการทดสอบ
	t_0	คือความหนาตั้งต้น
	t_f	คือความหนาสุดท้าย



รูปที่ 2.4-11 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดค่าการเสียรูปหลังการกดภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างคงที่

อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้เสมอว่าค่าการเสียรูปทรงหลังการกดที่วัดได้อาจไม่สัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ เพราะประสิทธิภาพในการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ยางนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆอีกมากมาย เช่น ถ้ายางสัมผัสกับของเหลวก็อาจทำให้เกิดการบวมพองจนทำให้คุณสมบัติการเสียรูปหลังการกดมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง หรือในบางครั้งถ้ายางมีค่าการเสียรูปหลังการกดสูงและเกิดการหดตัวของยางควบคู่ไปด้วยก็จะทำให้ประสิทธิภาพในอุดรอยรั่วสูญเสียไป

2.4.6 การทดสอบความทนทานต่อความร้อน (Testing of Heat Resistance)

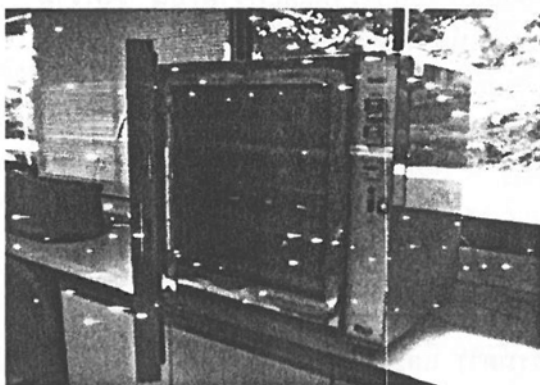
การทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางเพียงอย่างเดียวสามารถทำได้โดยดำเนินการทดสอบในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เช่น ทดสอบภายใต้สุญญากาศหรือภายใต้ก๊าซเฉื่อย อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงนั้น ยางต้องสัมผัสกับทั้งออกซิเจนและความร้อน ซึ่งความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการทดสอบภายใต้สภาวะที่มีความร้อนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้ การทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางจึงนิยมทำภายใต้บรรยากาศปกติหรือภายใต้ออกซิเจน ดังนั้น ผลทดสอบที่ได้จึงเป็นผลอันเนื่องมาจากทั้งความร้อนและออกซิเจน

วิธีการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางได้แสดงไว้ในมาตรฐาน ISO 188 BS903: Part A16 DIN 53508 และ ASTM D 572 D 573 และ D 865 แม้ว่าจะมีวิธีการทดสอบอยู่หลายวิธี แต่ในภาพรวมแล้วการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อความร้อนภายใต้บรรยากาศปกติ (ทดสอบโดยใช้เตาอบธรรมดา) และการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อความร้อนภายใต้แรงดันของออกซิเจน (เรียกว่า Oxygen Bomb)

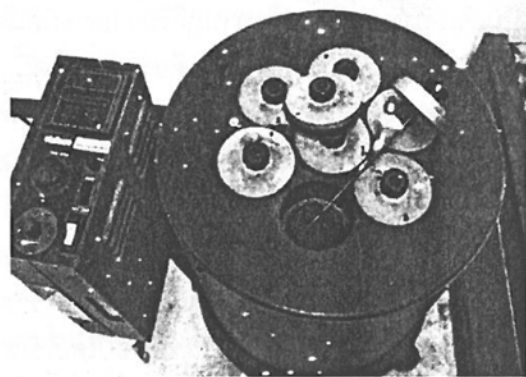
สำหรับวิธีการทดสอบแบบใช้เตาอบธรรมดา (ตามมาตรฐาน ASTM D573 และ ASTM D865) ขึ้นทดสอบจะถูกอบหรือถูกบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศปกติและภายในระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของยางก่อนทำการอบ การบ่มแรงเพื่อให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนนี้สามารถทำได้โดยใช้เตาอบแบบที่มีช่องอบเดียว (Single Chamber) หรือใช้เตาอบแบบที่มีหลายช่อง (Multicell Oven) ก็ได้ ทั้งนี้การเลือกใช้ชนิดของเตาอบจะขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ทดสอบ กล่าวคือ หากต้องการบ่มแรงยางที่มีสูตรการผสมเคมีคล้ายๆกัน ก็สามารถใช้เตาอบแบบที่มีช่องอบเดียวได้ โดยนำตัวอย่างยางทั้งหมดไปอบพร้อมกัน แต่หากต้องการบ่มแรงยางที่มีสูตรการผสมเคมีแตกต่างกันมาก เช่น หาก

ต้องการทดสอบคุณสมบัติของยางที่มีปริมาณกำมะถันสูงเปรียบเทียบกับสูตรที่มีปริมาณกำมะถันต่ำหรือหากต้องการทดสอบคุณสมบัติของยางสูตรที่มีปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพสูงเปรียบเทียบกับสูตรที่มีปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่ำ การทดสอบในกรณีนี้ควรใช้เตาอบแบบที่มีหลายช่องอบ (ใ้ย่าง 1 สูตรต่อ 1 ช่องอบ) ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการปนเปื้อนอันเกิดจากการแพร่ผ่าน (Migration) ของสารเคมีต่างๆที่เป็นองค์ประกอบในยาง เช่น กำมะถัน สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ฯลฯ โดยทั่วไป เตาอบทั้ง 2 แบบควรมีอัตราการหมุนเวียนของอากาศคงที่และที่สำคัญคือขึ้นทดสอบต้องสัมผัสกับอากาศร้อนในทุกทิศทาง ภายหลังการบ่มเร่งเสร็จสิ้น ขึ้นทดสอบจะถูกนำออกมาจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของขึ้นทดสอบดังกล่าวหลังจากที่นำขึ้นทดสอบออกจากตู้อบอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง โดยทั่วไป ผู้ทดสอบมักทำการทดสอบขึ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น และรายงานค่ากลางที่ได้จากการทดสอบและนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากขึ้นทดสอบที่ไม่ได้รับการบ่มเร่ง

สำหรับการทดสอบความทนทานต่อความร้อนภายใต้แรงดันของออกซิเจน (ตามมาตรฐาน ASTM D572) หรือที่เรียกว่า Oxygen Bomb นั้น ขึ้นทดสอบจะถูกอบภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิและความดันสูงๆตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นก็นำขึ้นทดสอบไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่ง โดยทั่วไปนิยมทำการทดสอบที่อุณหภูมิ $70 \pm 1^\circ\text{C}$ และที่ความดันของออกซิเจนเท่ากับ $2,100 \pm 100 \text{ kPa}$



รูปที่ 2.4-12 เตาอบแบบที่มีช่องอบเดียว



รูปที่ 2.4-13 เตาอบแบบที่มีหลายช่อง

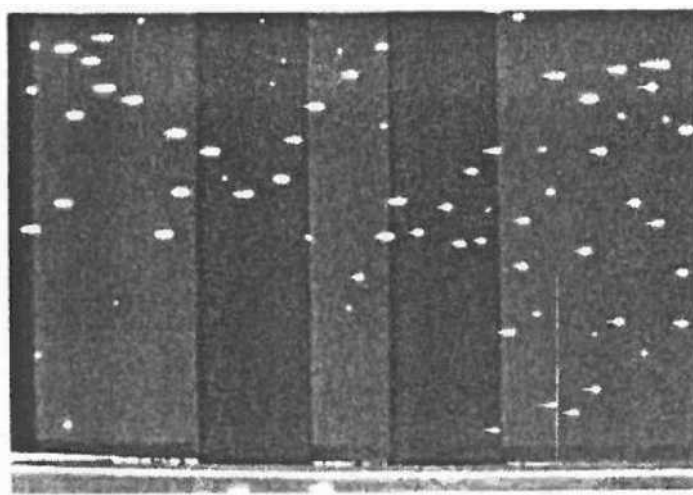
นอกจากการทดสอบทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีการทดสอบอีกแบบหนึ่งซึ่งอยู่ระหว่างการทดสอบทั้งสอง เรียกว่า Air Bomb (ตามมาตรฐาน ASTM D454) ในกรณีนี้ ชิ้นทดสอบจะถูกอบที่อุณหภูมิ 125°C ภายใต้ความดันอากาศเท่ากับ 550 ± 14 kPa เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมก่อนที่จะนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่อไป

อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบต้องตระหนักไว้ว่าผลการทดสอบที่ได้ อาจไม่สัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ เพราะชิ้นทดสอบที่นำมาใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นมีขนาดที่ค่อนข้างบาง (มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง) ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปในยางได้ง่าย การเสื่อมสภาพจึงเกิดได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จริงอาจมีขนาดใหญ่ การเสื่อมสภาพของยางที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกจึงเกิดอย่างรุนแรงกว่ายางที่อยู่บริเวณด้านใน นอกจากนี้ ผลการทดสอบที่ได้จากการเร่งการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและออกซิเจนนี้ไม่ควรนำไปใช้ในการทำนายการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการใช้งาน เนื่องจากในระหว่างการใช้งานจริงนั้น ยางไม่เพียงแค่อุณหภูมิและความร้อนเท่านั้น แต่ยางยังได้รับความชื้น แสงแดด และโอโซนอีกด้วย

2.4.7 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Testing of Resistance to Ozone)

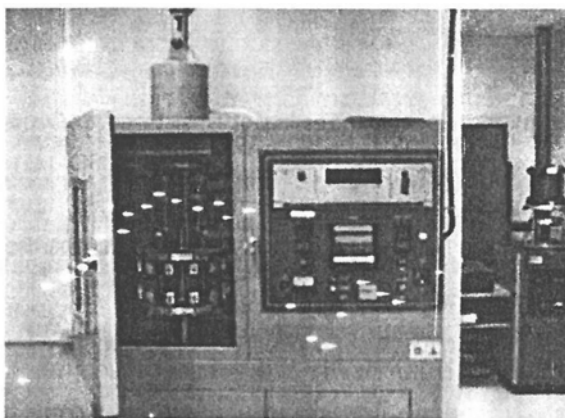
วิธีการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 1431/1 และ 1431/2 สำหรับการทดสอบที่ชิ้นทดสอบได้รับความเครียดแบบสถิต (Static Strain Test) และแบบพลวัต (Dynamic Strain Test) ตามลำดับ มาตรฐานการทดสอบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ BS 903: Part A 23 DIN 53509 และ ASTM D1149

หลักการเบื้องต้นของการทดสอบคือการนำชิ้นทดสอบที่ได้รับความเครียด (มีการยืดตัว) ไปสัมผัสกับอากาศที่มีปริมาณโอโซนสูงและปรับสภาวะต่างๆตามมาตรฐานกำหนด จากนั้นก็สังเกตรอยแตกที่เกิดขึ้น (เป็นรอยแตกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.4-14) ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ในการทดสอบมักสูงกว่าระดับความเข้มข้นปกติที่พบในธรรมชาติ ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ ได้แก่ ความเข้มข้นของโอโซน ระดับของความเครียด อุณหภูมิ และระดับของการบวมของสารเคมีในยาง



รูปที่ 3.4-14 ตัวอย่างลักษณะของรอยแตกที่เกิดจากโอโซน

มาตรฐาน ASTM D1149 ได้ระบุว่าตัวอย่างยางที่จะนำมาทดสอบควรจะได้รับการคงรูปโดยมีแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์หรือแผ่นฟิล์มพอลิเอสเตอร์ (ไมลาร์) ประกบอยู่ทั้ง 2 ด้าน ซึ่งแผ่นฟอยล์หรือฟิล์มดังกล่าวจะเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของยางแผ่นเพื่อป้องกันไม่ให้ยางแผ่นสัมผัสกับโอโซนในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อเริ่มการทดลอง ผู้ทดสอบก็นำแผ่นยางที่เตรียมไว้มาตัดเป็นชิ้นทดสอบมาตรฐานซึ่งมีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 25×150 มิลลิเมตรและหนาประมาณ 1.9-2.5 มิลลิเมตร (2 ชิ้น/ตัวอย่าง) จากนั้นก็นำชิ้นทดสอบไปปรับสภาวะที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนที่จะนำชิ้นทดสอบออกมาแล้วทำการแกะฟอยล์หรือแผ่นฟิล์มออกและทำการจับยึดชิ้นทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบพร้อมทั้งดึงชิ้นทดสอบให้เกิดการยืดตัว 20% เมื่อดึงยางเรียบร้อยแล้วก็นำชุดทดสอบไปปรับสภาวะที่อุณหภูมิ 40°C ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีโอโซนเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงก่อนที่จะย้ายชุดทดสอบไปไว้ในห้องทดสอบโอโซนซึ่งตามมาตรฐานแล้วมักจะทำการตั้งค่าอุณหภูมิของห้องทดสอบโอโซนไว้ที่ 40°C และตั้งค่าความเข้มข้นของโอโซนไว้ที่ 25, 50, 100 หรือ 200 ส่วนในร้อยล้านส่วน (pphm) สำหรับการรายงานผลการทดสอบนั้น ผู้ทดสอบอาจรายงานผลในรูปของระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยแตกบนพื้นผิวของยางหรืออาจรายงานลักษณะของพื้นผิวของชิ้นทดสอบหลังจากที่ชิ้นทดสอบได้รับโอโซนตามระยะเวลาที่กำหนดไว้



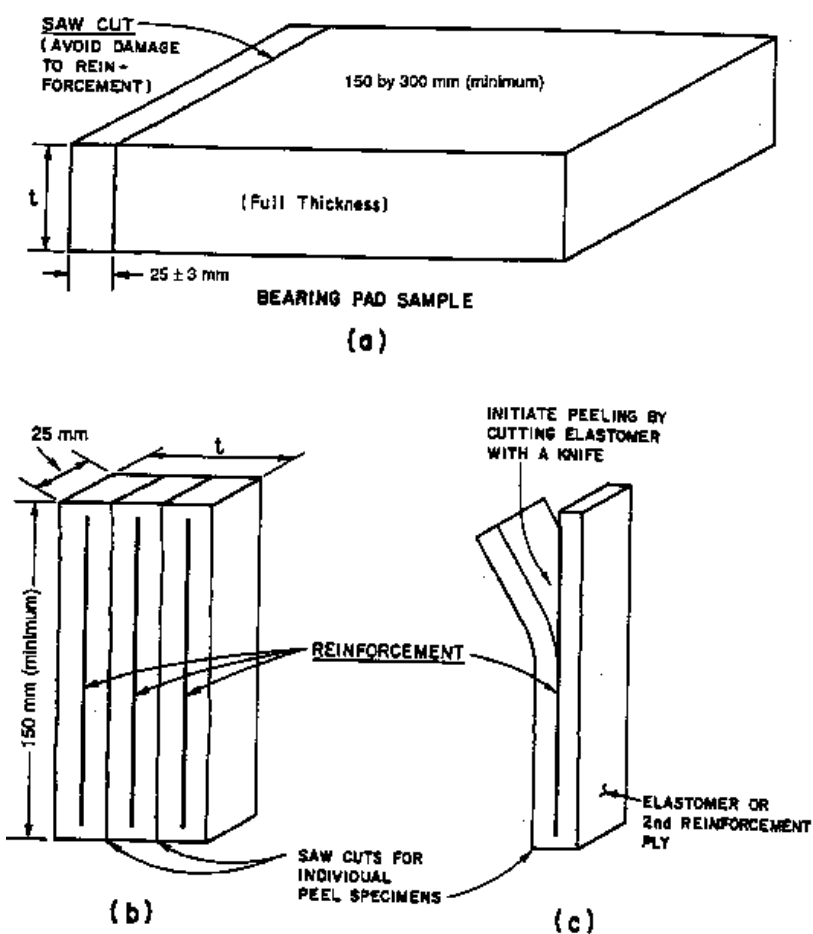
รูปที่ 2.4-15 เครื่องทดสอบคุณสมบัติความต้านทานต่อโอโซน

โดยทั่วไป ผลการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานของโอโซนที่ได้จากห้องปฏิบัติการไม่สามารถนำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ยางได้ เนื่องจากในการใช้งานจริงนั้น ความเข้มข้นของโอโซนและอุณหภูมิจะเปลี่ยนไปตามฤดูและสถานที่ นอกจากนี้ในการใช้งานกลางแจ้งนั้น ยังมีอิทธิพลอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความเข้มของแสงแดด และความชื้นในอากาศอีกด้วย (แสงแดดทำให้ยางเกิดรอยแตกที่เรียกว่า Crazing ได้เช่นกัน) ด้วยเหตุนี้ การทดสอบวัดความต้านทานต่อโอโซนของยางจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางคอมพาวด์แต่ละชนิดเท่านั้น

2.4.8 การทดสอบความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวในช่วงยางแข็งตัว (Bond of Elastomer During Vulcanization)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D429 (Method B) โดยการทดสอบต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่สามารถวัดค่าแรงดึงได้ 0.5 ตันเป็นอย่างน้อย และค่าอัตราการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบอยู่ที่ 50 ± 5 มิลลิเมตรต่อนาที และ

ตัวอย่างต้องมีขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร เป็นอย่างน้อย ทั้งนี้ต้องดำเนินการตัดชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร (พิจารณาจากรูปที่ 2.4-16) จากนั้นจึงนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางและแผ่นเหล็กโดยทำการทดสอบจนกระทั่งยางและแผ่นเหล็กแยกตัวออกจากกัน 50 มิลลิเมตร (พิจารณาจากรูปที่ 2.4-16) ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวนี้หาได้จากค่าแรงดึงเฉลี่ยที่ได้ทำการบันทึกค่าไว้ตลอดช่วงการทดสอบหารด้วยระยะทางที่เหล็กและยางแยกออกจากกัน ทั้งนี้ค่าที่ได้ต้องไม่ต่ำกว่า 7 นิวตัน/มิลลิเมตร



รูปที่ 2.4-16 การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงยึดเหนี่ยว

จากกระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของยางตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น การที่จะนำแผ่นยางรองคอสสะพานไปใช้งานจริงจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวว่าผ่านเกณฑ์การพิจารณาตามมาตรฐานที่นำมาใช้งานหรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกัน 3 มาตรฐาน มาตรฐาน BS 5400 มาตรฐาน AASHTO และมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย (มอก.951-2533) (พิจารณาได้จากตารางที่ 2.4-3 ถึง 2.4-5)

ตารางที่ 2.4-3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแผ่น Elastomeric Bearings ตามมาตรฐาน BS 5400

BS 5400 : Section 9.1		
Physical	Natural Rubber (NR)	Chloroprene Rubber (CR)
Tensile Strength Minimum (see 3.7.3.1)	13.5 N/mm ²	13.5 N/mm ²
Elongation at Break, Minimum (see 3.7.3.1)		
45 IRHD TO 55 IRHD	450%	400%
56 IRHD TO 65 IRHD	400%	350%
66 IRHD TO IRHD	300%	300%
Aging Resistance (see 3.7.3.3) Maximum change from initial value:		
Hardness	10 IRHD	15 IRHD
Tensile Strength	15%	15%
Elongation at Break	20%	40%
Compression Set Maximum (see 3.7.3.4)	30%	35%
Ozone Resistance (see 3.7.3.8) 25 pphm, 20% Elongation, 30±1°C, 96 hours	No Cracks	No Cracks
Bonding of Elastomer Minimum	7 N/mm ²	7 N/mm ²

ตารางที่ 2.4-4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแผ่น Elastomeric Bearings ตามมาตรฐาน AASHTO

AASHTO Standard Specification for Highway Bridge					
ASTM Standard	Physical Properties	Natural Rubber (NR)		Chloroprene Rubber (CR)	
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	50+/-5	60+/-5	50+/-5	60+/-5
D412	Tensile Strength, Min psi. Ultimate Elongation Min%	2250 450	2250 400	2250 400	2250 350
D573	Heat Resistance NR 70 hours at 158 °F CR 70 hours at 212 °F Change in Durometer Hardness, Max Point Change in Tensile Strength, Max% Change in Ultimate Elongation, Max%	10 -25 -25	10 -25 -25	15 -15 -40	15 -15 -40
D395 Method B	Compression Set NR 22 hours at 158 °F CR 70 hours at 212 °F	25	25	35	35
D1149 Mounting Procedure D518 Procedure A	Ozone Resistance NR 25 pphm, 20% strain, 100+/-2 ° F 48 hours CR 100 pphm, 20% strain, 100+/-2 ° F 100 hours	No Cracks	No Cracks	No Cracks	No Cracks
D429	Adhesion Bond Made During Vulcanization lbs/inch.	40	40	40	40

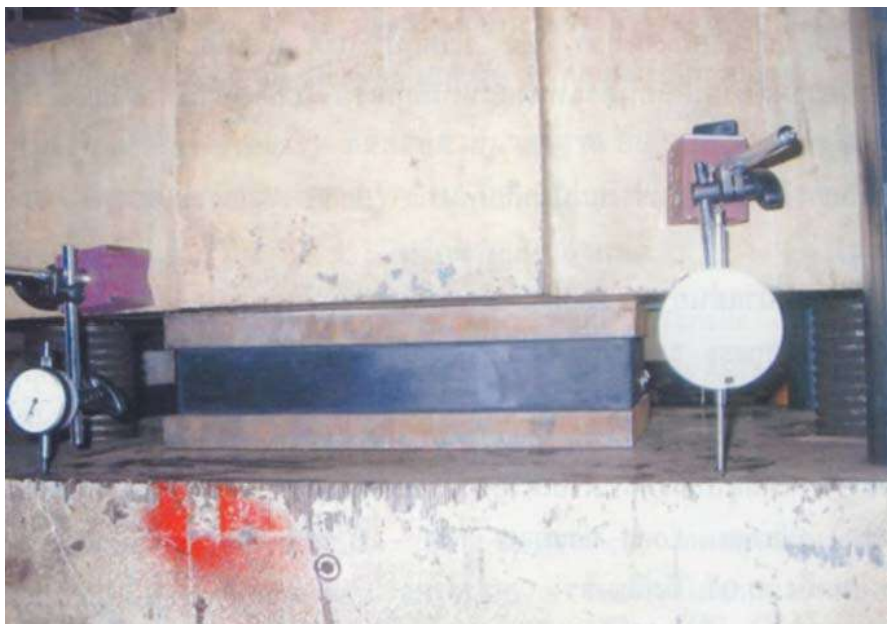
ตารางที่ 2.4-5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแผ่น Elastomeric Bearings ตามมาตรฐาน มอก.951-2533

ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด				วิธีทดสอบ
		แผ่นยางชนิดยางธรรมชาติ		แผ่นยางชนิดยางสังเคราะห์		ตามที่ระบุใน มอก.951-2533
		ชนิด 50	ชนิด 60	ชนิด 50	ชนิด 60	
1	ความแข็ง IRHD	50+/-5	60+/-5	50+/-5	60+/-5	ข้อ 9.5
2	ความต้านทานแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	17	17	17	17	ข้อ 9.6
3	ความยืดเมื่อขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	450	400	400	350	ข้อ 9.6
4	ความทนอุณหภูมิสูง - ความแข็ง เพิ่มขึ้น IRHD ไม่เกิน - ความต้านทานแรงดึง ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน - ความยืดเมื่อขาด ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	10 25 25	10 25 25	15 15 40	15 15 40	
5	การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ร้อยละไม่เกิน	25	25	35	35	ข้อ 9.8
6	ความทนทานโอโซน	ไม่มีรอยแตก	ไม่มีรอยแตก	ไม่มีรอยแตก	ไม่มีรอยแตก	ข้อ 9.9
7	ความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางกับวัสดุเสริมแรงไม่น้อยกว่า (ต่อความกว้าง 1 มม.)	7 นิวตัน	7 นิวตัน	7 นิวตัน	7 นิวตัน	ข้อ 6.5

2.4.9 การทดสอบความทนแรงกด (Compression Resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน มอก.951-2533 ข้อ 9.10 โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยเครื่อง Compression ที่มีประสิทธิภาพที่สามารถกดด้วยแรงกดมากกว่า Maximum Design Load ประมาณ 1.5-2 เท่า และ Dial Gauge ที่สามารถอ่านค่า Deflection ได้ละเอียดถึง 0.01 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ให้น้ำหนักกดลงบนแผ่นยางรองคอสสะพาน โดยเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 0.2 เท่าของน้ำหนักกดที่ออกแบบภายในเวลา 84 ถึง 156 วินาที เมื่อเพิ่มน้ำหนักกดแต่ละครั้งให้ทิ้งน้ำหนักค้างไว้เป็นเวลา 30 วินาที แล้วบันทึกค่าของน้ำหนักกด และระยะยุบตัว (Deflection) เพิ่มน้ำหนักกดจนเท่าน้ำหนักที่ออกแบบ แล้วนำค่าที่บันทึกไว้มาคำนวณค่าโมดูลัสแรงอัด (Compression Stiffness)
2. เพิ่มน้ำหนักกดลงบนแผ่นยางให้มีค่า 1.5 เท่าของน้ำหนักกดที่ออกแบบ จากนั้นทิ้งน้ำหนักค้างไว้จนกระทั่งน้ำหนักกดหรือการยุบตัวมีค่าคงที่ แล้วตรวจสอบตัวอย่างที่ทดสอบ โดยถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าไม่เกิดการล่อนหลุดระหว่างยางกับวัสดุเสริมแรง และไม่มีรอยแตกขนาดกว้างและลึกเกิน 2 มิลลิเมตรมากกว่า 2 รอยขึ้นไปถือว่าผ่านการทดสอบ
3. ปล่อน้ำหนักออกและวัดความหนาของชั้นยาง



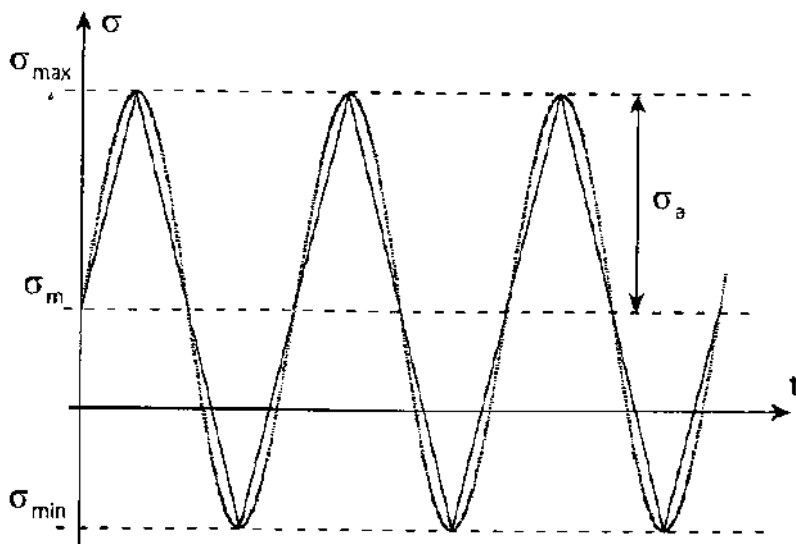
รูปที่ 2.4-17 เครื่องทดสอบการกด (Compression Test Machine) (จิตพันธ์, 2547)

2.5 การทดสอบความล้าของยางรองคอสสะพาน

2.5.1 การทดสอบความล้าทั่วไป

การทดสอบเรื่องความล้า (Fatigue) เป็นการทดสอบเพื่อติดตามและประเมินการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการรับแรงแบบกระทำซ้ำ (Cyclic Loading) ซึ่งถือได้ว่าเป็นการปรากฏการณ์การวิบัติของวัสดุอันเนื่องมาจากความล้านี้เป็นการวิบัติที่อันตรายในรูปแบบหนึ่งสำหรับวัสดุทั่วไป

การเกิดความล้ามักจะถือได้ว่าเป็นปัจจัยการวิบัติของโครงสร้างที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ซึ่งในความเป็นจริงเมื่อทุกชิ้นส่วนของวัสดุมีการเคลื่อนที่ การหมุน หรือ เกิดการสั่นสะเทือน ถือได้ว่าวัสดุดังกล่าวมีโอกาสที่จะวิบัติเนื่องมาจากความล้า ในกรณีการเกิดความล้าเนื่องจากอุณหภูมิถือได้ว่าเป็นการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิแบบกลับไปกลับมา



รูปที่ 2.5-1 การทดสอบด้วยการให้แรงแบบวัฏจักรแบบ Sinusoidal และแบบสามเหลี่ยม (Triangular)

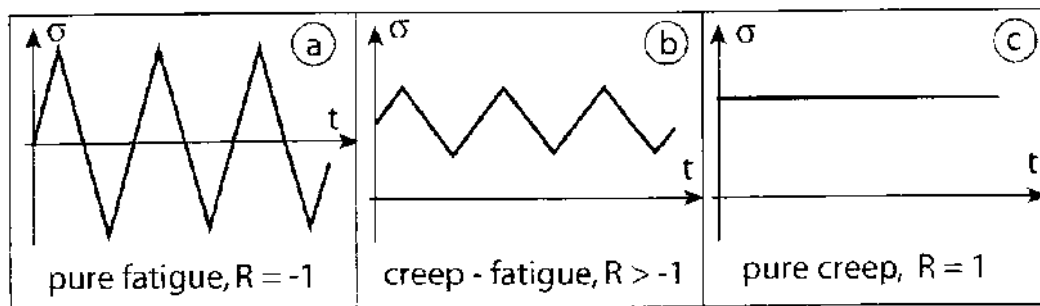
การทดสอบความล้าของวัสดุโดยทั่วไปจะทำการทดสอบโดยการให้หน่วยแรงกระทำซ้ำเป็นวัฏจักรรูป Sine Wave (Sinusoidal) หรือรูปสามเหลี่ยม (Triangular) (พิจารณาจากรูปที่ 2.5-1) และค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ควบคุมการทดสอบพิจารณาได้จากสมการ (2.19) ถึง (2.21)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.19)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.21)$$

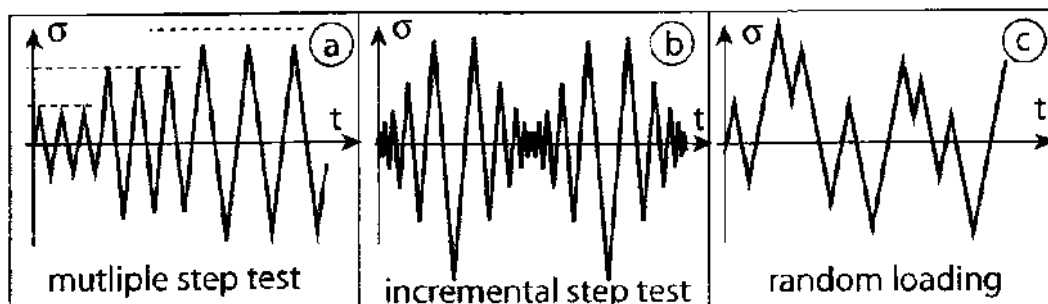
ส่วนใหญ่จะดำเนินการทดสอบความล้าด้วยการให้แรงแบบกระทำซ้ำที่ค่า R เท่ากับ -1 และถ้ามีการทดสอบที่ค่า $\sigma_m \neq 0$ จะเรียกว่าการทดสอบคืบ-ความล้า (Creep-Fatigue Test)



รูปที่ 2.5-2 แสดงลักษณะการทดสอบความล้าที่ค่าพารามิเตอร์ R แบบต่างๆ

กรณีการทดสอบที่มีการควบคุมหน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุแบบไม่คงที่นั้นโดยทั่วไปสามารถดำเนินการทดสอบได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

- 1) การทดสอบแบบ Multiple Step Test, เป็นการทดสอบที่ควบคุมให้หน่วยแรงเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาเล็กน้อยระหว่างการให้แรงแบบวัฏจักร (พิจารณาจากรูปที่ 2.5-3)
- 2) การทดสอบแบบ Increment Step Test, เป็นการเพิ่มและลดหน่วยแรงเป็นกลุ่มในแต่ละรอบการให้แรงแบบวัฏจักร (พิจารณาจากรูปที่ 2.5-3)
- 3) การทดสอบแบบ Random Loading test, เป็นการทดสอบแบบโดยการปรับค่าหน่วยแรงทุกการทดสอบที่ครั้งรอบ (พิจารณาจากรูปที่ 2.5-3)

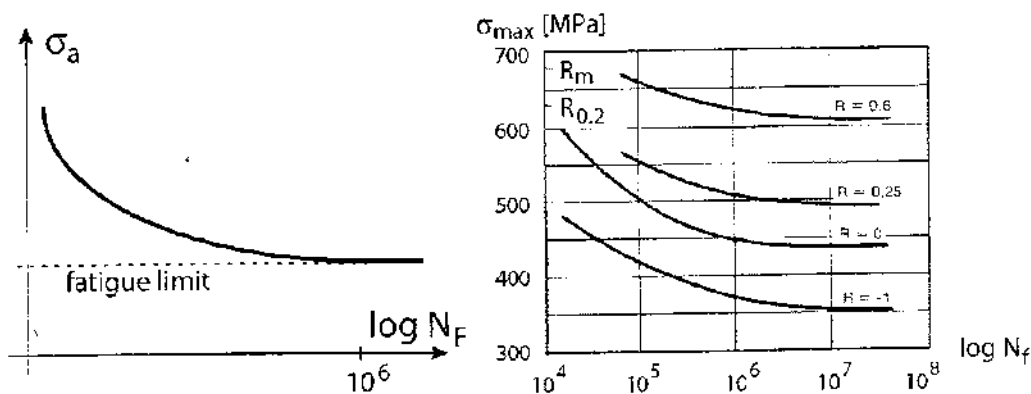


รูปที่ 2.5-3 การทดสอบความล้าแบบต่างๆ

นอกจากการทดสอบความล้าโดยการควบคุมหน่วยแรงที่กระทำซ้ำแล้ว การทดสอบความล้ายังมีการควบคุมการทดสอบที่ค่าความเครียดในลักษณะต่างๆดังที่ได้อธิบายมาแล้ว

2.5.2 การทำนายอายุวัสดุจากการทดสอบความล้า (Fatigue Life)

จากรายงานของ Kruml และ Michal (2005) ได้อธิบายวิธีการทำนายการอายุการใช้งานเนื่องจากความล้าโดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_d และจำนวนรอบการวิบัติ และเรียกชื่อกราฟนี้ว่า Wohler Curve หรือ SN-Curve (พิจารณาจากรูปที่ 2.5-4)



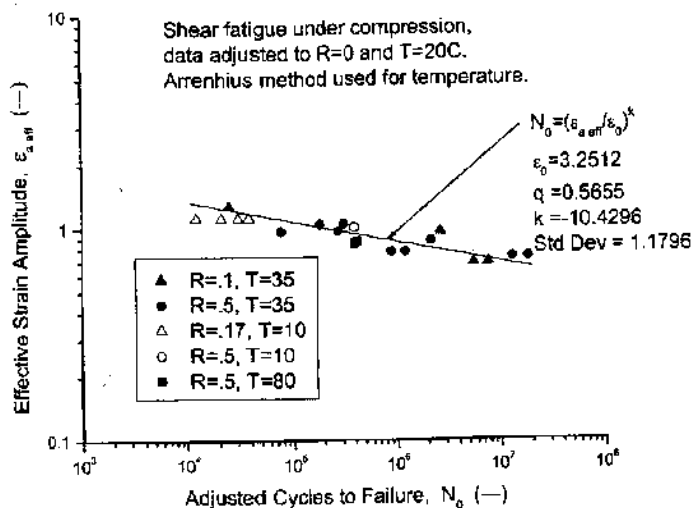
รูปที่ 2.5-4 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและจำนวนรอบการวิบัติ (SN-Curve)

จากรูปที่ 2.5-4 สรุปได้ว่าถ้าค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุน้อยกว่าค่าหน่วยแรงที่อยู่ในช่วง Fatigue Limit แสดงว่าวัสดุนั้นจะไม่มี การวิบัติด้วยค่าของหน่วยแรงดังกล่าว

สำหรับการทดสอบความล้าของวัสดุประเภทยางโดยทั่วไปมักจะทดสอบด้วยการควบคุมค่าความเครียด (Strain Control) และมักจะไม่มี การทดสอบจนกระทั่งขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งมักจะดำเนินการทดสอบจนกระทั่งขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติเพียงไม่กี่ตัวอย่าง (ทดสอบที่ค่าความเครียดเฉือนที่สูง) จากนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดและจำนวนรอบการวิบัติดังสมการที่ 2.22

$$N = \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} \right)^k \quad (2.22)$$

โดย N คือจำนวนรอบการวิบัติ ε_a คือแอมพลิจูดความเครียด ε_0 และ k คือค่าคงที่หาได้จากการทดสอบขึ้นตัวอย่างจนกระทั่งเกิดการวิบัติอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง ซึ่งการใช้สมการที่ (2.22) ในการทำนายเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดเฉือนกับจำนวนรอบการวิบัติในขึ้นตัวอย่างยางที่อุณหภูมิต่างๆพิจารณาจากตัวอย่างในรูปที่ 3.5-5



รูปที่ 2.5-5 ข้อมูลการทดสอบความล้าเนื่องจากแรงเฉือนในการทดสอบยาง

2.5.2 การทดสอบความล้าเนื่องจากแรงเฉือนในยางรองคอสสะพาน

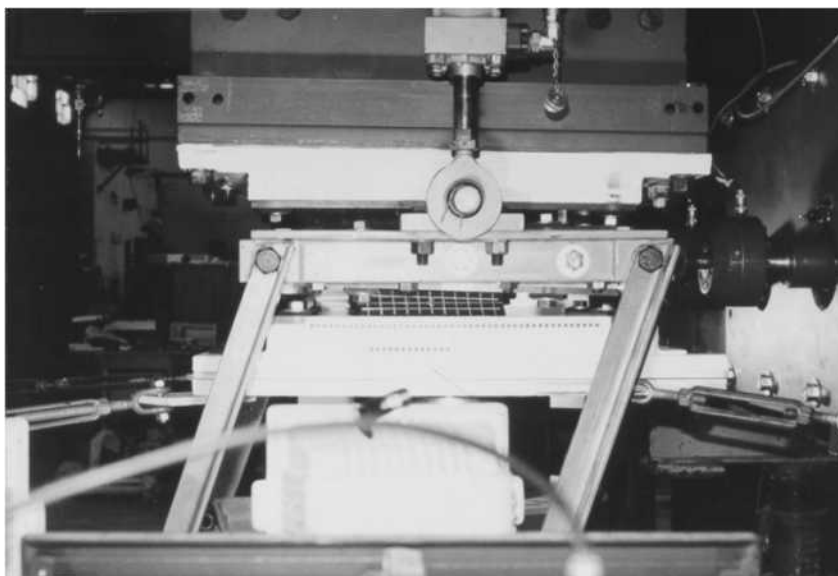
การเกิดความล้าจากแรงเฉือนของยางรองคอสสะพานมีสาเหตุเบื้องต้นมาจากการขยายตัว และการหดตัวอันเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลอุณหภูมิที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม น้ำหนักจากการจราจรก็อาจส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนต่อแผ่นยางรองคอสสะพานด้วย ซึ่งในการทดสอบความล้าเนื่องจากแรงเฉือนจะพิจารณาผลจากการขยายตัว และหดตัวของอุณหภูมิเป็นหลัก โดยค่าความเครียดเฉือนได้กำหนดให้ใช้ได้ถึง 50% แต่โดยปกติการทดสอบในภาคสนามจะใช้ค่าแรงเฉือนน้อยกว่า 20% (Muscarella และ Yura, 1995)

ในปี 2009 มหาวิทยาลัยฟลอริดา ได้ดำเนินการศึกษาและประเมินค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Stiffness Shear Modulus) ของแผ่นรองรับคานสะพานแบบสังเคราะห์ (Neoprene แผ่นยางรองคอสสะพาน) ภายใต้สภาวะการรับแรงกระทำแบบช่วงเวลานาน (Long Term Load) โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการจำนวน 42 ตัวอย่าง โดยผลการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสแรงเฉือนมีค่าลดลง 7 % เมื่อดำเนินการทดสอบที่ 50% ของความเครียดเฉือน (Shear Strain)

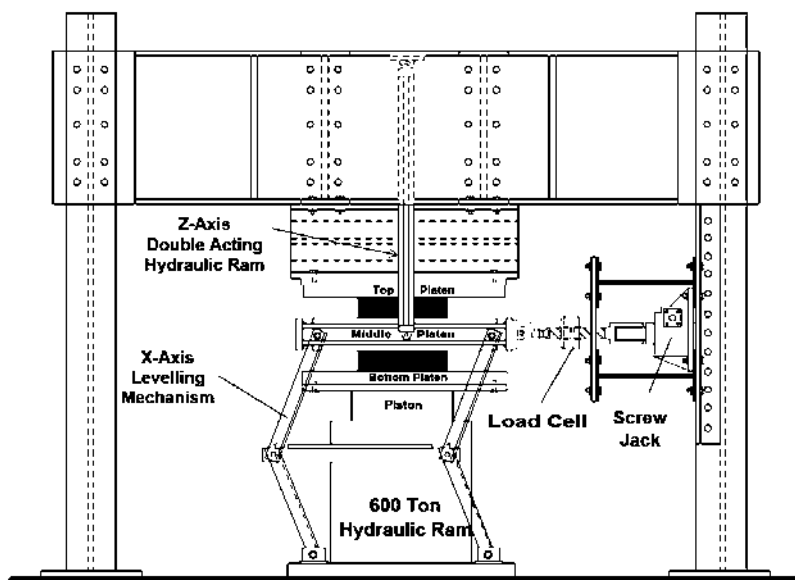
สำหรับแผ่นยางรองคอสสะพานโดยทั่วไปแล้วจะสามารถรับแรงเฉือนที่กระทำซ้ำได้ประมาณ 20,000 รอบ หรืออายุการใช้งานประมาณ 55 ปี ที่ 50 % ของความเครียดเฉือน ภายใต้สภาวะความเค้นในแนวตั้งที่ 3.45 MPa (500 psi) ซึ่งจะสังเกตเห็นถึงการหลุดล่อนหรือรอยแตกกว้างในทิศทางตามแนวแรงของชั้นทดสอบเมื่อขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติ ทั้งนี้เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความเครียดเฉือนนี้ต้องมีศักยภาพเพียงพอในการประยุกต์แรงเฉือนให้กระทำต่อยางรองคอสสะพานให้สอดคล้องกับแนวทางการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างชุดเครื่องมือที่ใช้ทดสอบที่ได้จัดทำขึ้นและถือได้ว่ามีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการทดสอบในปัจจุบันนั้นยังคงมีเฉพาะในต่างประเทศเท่านั้น

ชุดเครื่องทดสอบของมหาวิทยาลัย Texas at Austin

เครื่องทดสอบสำหรับการทดสอบแผ่นยางรองคอสพานภายใต้สภาวะการให้แรงเฉือนโดยตรง (Pure Shear) แบบกระทำซ้ำได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกและผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งมีทั้งการให้แรงกด และแรงเฉือน กระทำกับตัวอย่าง โดยในระหว่างการทดสอบแผ่นยางจะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างแท่นของเครื่องทดสอบดังรูปที่ 2.5-6 และรูปที่ 2.5-7



รูปที่ 3.5-6 การทดสอบแผ่นยางในเครื่องทดสอบ



Side View of the Elastomeric Bearing Test Setup

รูปที่ 2.5-7 การติดตั้งเครื่องทดสอบแผ่นยางรองคอสพาน

ชุดเครื่องมือดังกล่าวจะใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 600 ตัน ในการควบคุมการให้แรงอัดในแนวตั้งแก่แผ่นยางรองคอสะพาน ขณะที่การจำลองพฤติกรรมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิจะใช้ชุด Screw Jack ในการควบคุมความเครียดเฉือนแบบวัฏจักรกระทำต่อยางรองคอสะพาน

2.6 การออกแบบแผ่นยางรองคอสะพาน

การออกแบบแผ่นยางรองคอสะพานจำเป็นต้องดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เช่น น้ำหนัก แรง ตัวคูณแรง การรวมแรง มิติและคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นยางรองคอสะพาน การคำนวณตรวจสอบหน่วยแรง การเคลื่อนที่ และอื่นๆ โดยอ้างอิงมาตรฐาน AASHTO

2.6.1 การวิเคราะห์น้ำหนักกระทำต่อแผ่นยางรองคอสะพานตามมาตรฐาน AASHTO

การออกแบบแผ่นยางรองคอสะพานตามมาตรฐาน AASHTO แบ่งเป็น 2 วิธี คือ Method A และ B โดย Method A ใช้ออกแบบได้ทั้งแผ่นยางล้วนและแผ่นยางเสริมวัสดุเสริมแรง ส่วน Method B จะใช้ออกแบบเฉพาะแผ่นยางเสริมวัสดุเสริมแรง ทั้งสองกรณีอาจจำแนกเป็นประเภทย่อยตามลักษณะของที่รองรับคือ ที่รองรับแบบยึดแน่น (Fixed-End Bearing) และที่รองรับแบบเคลื่อนตัวได้ (Movable Bearing) โดยน้ำหนักหรือแรงกระทำต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบแผ่นยางรองคอสะพานมีดังนี้

- **น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)** เป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่เคลื่อนที่หรือกระทำต่อโครงสร้างอย่างถาวรแบ่งเป็น
 - น้ำหนักของโครงสร้าง (Self Weight)
 - น้ำหนักคงที่ส่วนเพิ่ม (Superimposed Dead Load) ได้แก่ น้ำหนักผิวจราจร รวดสะพาน แผงกันตก
- **น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)** คือน้ำหนักบรรทุกที่เคลื่อนไหว มีค่าไม่แน่นอน หรือเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จำแนกได้ดังนี้
 - **น้ำหนักรถบรรทุก (Truck Load)** น้ำหนักรถบรรทุก ตามมาตรฐาน AASHTO จำแนกเป็น 4 ประเภท คือ รถบรรทุกชนิด 2 เพลา (H 15-44 และ H 20-44) และ 3 เพลา (HS 15-44 และ HS 20-44) ส่วน AASHTO LRFD ใช้ รถบรรทุก HL-93 โดยมีมิติและน้ำหนักรถบรรทุกเท่ากับรถ HS 20-44 มิติและน้ำหนักของรถบรรทุกทั้ง 4 ประเภท โดยในแต่ละช่องจราจร (Traffic Lane) จะมีรถบรรทุกเพียง 1 คัน ตลอดทุกความยาวช่วง ปกติรถบรรทุกจะให้ค่าแรงปฏิกิริยา ณ ที่รองรับที่สูงสุด จนถึงความยาวช่วง 9.728 เมตร (32 ฟุต) และโมเมนต์ดัดสูงสุด จนถึงความยาวช่วง 17.02 เมตร (56 ฟุต) หลังจากนั้นแรงปฏิกิริยาและโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่กระจาย และกระทำเป็นจุด

- น้ำหนักแผ่กระจาย และกระทำเป็นจุด (Uniformed and Concentrated Load or Lane Load) มาตรฐาน AASHTO 3.6.1 ถึง 3.6.4 และ 3.11.1 ถึง 3.11.4 กล่าวถึงน้ำหนักแผ่กระจายว่าเป็นน้ำหนักที่กระทำเป็นแถบกว้าง 3 เมตร (10 ฟุต) มีความยาวไม่จำกัด และมีน้ำหนักกระทำเป็นจุดที่สามารถเคลื่อนที่ไปมา 2 ทิศทาง เพื่อเกิดหน่วยแรงสูงสุด (โมเมนต์ดัดและแรงเฉือน) ส่วนใน AASHTO LRFD ให้ใช้น้ำหนักแผ่กระจายขนาด 9.3 กิโลนิวตันต่อเมตร

- ค่าตัวคูณขยายเผื่อน้ำหนักจร (Overload Provision) มาตรฐาน AASHTO ไม่ได้กำหนดค่าตัวคูณขยายหรือเผื่อน้ำหนักจรเอาไว้ แต่ในทางปฏิบัติในประเทศไทย การคำนวณออกแบบภายใต้ข้อกำหนดของหลายๆ หน่วยงาน อาทิเช่น กรมทางหลวง กรมโยธาธิการ การทางพิเศษแห่งประเทศไทย กำหนดใช้ค่าตัวคูณดังกล่าวซึ่งมีค่า 1.3
- ตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) เป็นค่าตัวคูณขยายเผื่อน้ำหนักจร กรณีที่น้ำหนักจรเหล่านั้นกระแทกโครงสร้างสะพาน โดยค่าตัวคูณขยายขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพานแต่ไม่เกินร้อยละ 30 (AASHTO 3.8.2.1) ดังนี้

$$I = \frac{15.24}{L + 38} \leq 30 \quad (2.23)$$

โดยที่ I = ตัวคูณขยายแรงกระแทก, ร้อยละ

L = ความยาวช่วงสะพาน, เมตร

สำหรับ AASHTO LRFD จะใช้ตัวคูณร้อยละ 33 และเพิ่มได้อีกร้อยละ 15 สำหรับ กรณี Fatigue และ Fracture

- แรงตามทิศทางจลาจร (Longitudinal Forces) AASHTO 3.9 กำหนดให้คิดแรงตามทิศทางจลาจร (หรือแรงตามยาว) มีค่าร้อยละ 5 ของน้ำหนักจร โดยแรงดังกล่าว กระทำทุกช่องจลาจร ในทิศทางเดียวกัน
- แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Forces) AASHTO 3.10.1 กำหนดให้คำนวณแรงหนีศูนย์กลาง เนื่องจากรถบรรทุกวิ่งเข้าสู่ส่วนโค้ง (Curve) ของสะพาน โดยให้แรงดังกล่าวเป็นสัดส่วนกับความเร็วและรัศมี ความโค้งกระทำในแนวระนาบสูงจากผิวสะพาน 1.8 เมตร (6 ฟุต) ณ จุดศูนย์กลางการวิ่งของสะพาน ดังนี้

$$C = \frac{0.79 \cdot S^2}{R} \quad (2.24)$$

เมื่อ S = ความเร็วของรถบรรทุก, กิโลเมตรต่อชั่วโมง

R = รัศมี, เมตร

สำหรับ AASHTO LRFD 3.6.3 จะใช้สมการ

$$C = f \frac{V^2}{gR} \quad (2.25)$$

เมื่อ f = 4/3 กรณี การรวมแรงอื่นๆ นอกจาก Fatigue

และเท่ากับ 1.00 กรณี คิดผลจาก Fatigue

V = ความเร็วออกแบบ, เมตรต่อวินาที

R = รัศมี, เมตร

- **แรงลม (Wind Forces)** AASHTO 3.15 กำหนดให้คิดคำนวณแรงลมซึ่งกระทำในแนวราบที่ความเร็วพื้นฐาน 160.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (100 ไมล์ต่อชั่วโมง) สำหรับการรวมแรง Group II และ V แต่ไม่ครอบคลุมการรวมแรงใน Group III และ VI ผลรวมของแรงนี้อาจเพิ่มหรือลด ตามสัดส่วนของกำลังสองระหว่างความเร็วลมที่ออกแบบกับความเร็วลมพื้นฐานนอกจากนั้น AASHTO 3.15.1 ได้กล่าวถึงการรวมแรงใน Group II และ V สำหรับการออกแบบโครงสร้างส่วนบน (Superstructures) ของสะพาน โดยเฉพาะการออกแบบของคานสะพาน (Girders and Beams) ให้ใช้แรงดันที่มีค่า 2.39 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (50 ปอนด์ต่อตารางฟุต) กระทำในแนวราบ โดยแรงดังกล่าวจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4.38 กิโลนิวตันต่อเมตร (300 ปอนด์ต่อฟุต) ตามความยาวช่วงของคานสะพาน
- **แรงเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ (Thermal Forces)** AASHTO 3.16 กล่าวถึงการคำนวณออกแบบที่ต้องคำนึงถึงหน่วยแรง หรือการเคลื่อนตัวของโครงสร้างซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโครงสร้างของคอนกรีตเสริมเหล็ก ในสภาพภูมิอากาศปานกลาง (Moderate Climate) ช่วงค่าอุณหภูมิจะแปรผันระหว่าง -40 ถึง -1.1 องศาเซลเซียส (-40 ถึง +30 องศาฟาเรนไฮต์) อย่างไรก็ตามหากคำนึงถึงสภาพภูมิอากาศในท้องถิ่นอื่นอาจใช้ช่วงค่าอุณหภูมิที่แตกต่างจากนี้ได้ อาทิเช่น ในประเทศไทย อาจใช้ช่วงค่า ± 20 องศาเซลเซียส หนึ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 1.08×10^{-5} และ 1.17×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าประมาณ 0.0002

นอกจากนั้น AASHTO ยังได้กล่าวถึงแรงอื่นๆ ที่อาจต้องนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างส่วนบนและแผ่นยางรองพื้นและคานสะพาน ได้แก่ แรงยกตัว (Uplift Forces; AASHTO 3.17.1 และ 3.17.2) และแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Earthquakes; AASHTO 3.21 และ Division I-A; Seismic Design)

● การรวมแรง (Load Combination)

ในมาตรฐาน AASHTO ได้แสดงการกระทำร่วมกันของน้ำหนักหรือแรงต่างๆ โดยอธิบายอิทธิพลหรือความรุนแรงของน้ำหนักหรือแรงด้วยตัวคูณแรง (Load factor) เมื่อรวมผลของน้ำหนักหรือแรงที่เกิดหรือแรงกระทำต่อโครงสร้างพร้อมๆ กัน เรียกว่า การรวมแรง (Combination of Loads) ตารางที่ 2.6-1 แสดงตัวคูณแรงและกลุ่มการรวมแรงตามมาตรฐาน AASHTO ถึงแม้ว่าตัวคูณแรงดังกล่าวจะมีได้เกี่ยวข้องหรือใช้ในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพาน แต่แสดงให้เห็นว่ามีน้ำหนักหรือแรงใดบ้าง อาจเกิดหรือกระทำต่อโครงสร้างสะพาน รวมถึงแผ่นยางรองสะพานในคราวเดียวหรือพร้อมๆ กันได้

ตารางที่ 2.6-1 ตัวคูณแรงโครงสร้างตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	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— LL, IM & CE ONLY	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ตารางที่ 2.6-1 ตัวคูณแรงโครงสร้างสะพาน ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (ต่อ)

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

2.6.2 การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพาน

การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานจะต้องพิจารณาให้มีกำลังความสามารถเพียงพอในการต้านทานแรงกระทำและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างเหมาะสมภายใต้ข้อกำหนดด้านการใช้งานและด้านกำลัง โดยสตีเฟนของแผ่นยางรองคอสสะพานจะส่งผลต่อเนื่องต่อแรงที่กระทำบริเวณจุดต่อภายในโครงสร้าง โครงสร้างส่วนบน และโครงสร้างส่วนล่าง โดยภายใต้สภาวะการใช้งานปกติความเสียหายจะต้องไม่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของจุดต่อและแผ่นยางรองคอสสะพานที่อาจเกิดจากแรงกระทำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การคืบ Shrinkage อุณหภูมิ และผลของความคลาดเคลื่อนในการติดตั้ง โดยปกติผลของแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกจะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบจุดต่อในโครงสร้างสะพาน แต่ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพาน มาตรฐาน AASHTO LRFD ได้ให้วิธีการคำนวณออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานไว้สองวิธีคือ Method A และ Method B โดยแผ่นยางรองคอสสะพานชนิดเสริมวัสดุเสริมแรงสามารถออกแบบตาม Method A และ Method B แต่แผ่นยางรองคอสสะพานแบบยางล้วนออกแบบได้ตาม Method A โดยข้อกำหนดหน่วยแรงที่ระบุใน Method A จะให้กำลังในการรับแรงของแผ่นยางน้อยกว่า Method B การเพิ่มขึ้นของกำลังใน Method B ได้มาจากข้อกำหนดเพิ่มเติมของการทดสอบและควบคุมคุณภาพใน Method B

แผ่นยางรองคอสสะพานชนิดเสริมวัสดุเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กมีกำลังในการรับแรงมากกว่าแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทอื่น จึงทำให้หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทนี้มีค่ามากกว่าและแผ่นยางที่ได้มีความขรุขระมากกว่า ซึ่งจะส่งผลให้แรงในแนวราบที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนล่างมีค่าน้อยกว่า ในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐาน AASHTO ทั้ง Method A และ Method B มีลำดับขั้นตอนในการคำนวณออกแบบดังนี้

- 1) วิเคราะห์การเคลื่อนตำแหน่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในคานหรือโครงสร้างส่วนบน
- 2) วิเคราะห์การหดตัวของคานหรือโครงสร้างส่วนบนเนื่องจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ผลของการอัดแรง และ Shrinkage เป็นต้น
- 3) เลือกความหนาของแผ่นยางรองคอสสะพานจากความต้องการในการเคลื่อนตำแหน่ง
- 4) คำนวณขนาดแผ่นยางรองคอสสะพานจากข้อกำหนดของหน่วยแรงอัด
- 5) คำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงอัด
- 6) ตรวจสอบความสามารถในการหมุนของแผ่นยางรองคอสสะพานกับมุมหมุนที่ต้องการในสภาวะใช้งาน
- 7) ตรวจสอบผลรวมของการอัดและการหมุนในแผ่นยาง เพื่อป้องกันการรบกวนตัวของแผ่นยาง
- 8) ตรวจสอบเสถียรภาพของแผ่นยาง
- 9) ตรวจสอบข้อกำหนดการเสริมเหล็กในแผ่นยาง

ข้อกำหนดการออกแบบสำหรับ AASHTO-Method A และ AASHTO-Method B มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.2.1 การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐาน AASHTO-Method A

วิธีการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐาน AASHTO-Method A สามารถใช้ในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดยางล้วนและประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ทั้งนี้ สำหรับแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะต้องมีความหนาของแต่ละชั้นเท่ากัน ยกเว้นความหนาของชั้นยางที่ผิวด้านบนจะต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 70% ของความหนาของชั้นยางด้านใน

คุณคุณสมบัติที่สำคัญของแผ่นยางรองคอสสะพานในการออกแบบประกอบด้วย

1) ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) แสดงถึงความสามารถในการขยายตัวออกด้านข้างภายใต้แรงกระทำ ขนาดของปัจจัยรูปร่างของยางแต่ละชั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสติฟเนสการอัดและการหมุนของแผ่นยาง แต่จะไม่มีผลต่อสติฟเนสการเคลื่อนที่แนวราบและความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยาง ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor, S_i) ของยางแต่ละชั้นในแผ่นยางรองคอสสะพานคำนวณได้จาก

$$S_i = \frac{L \cdot W}{2 \cdot h_{ii} \cdot (L + W)} \quad (2.25)$$

เมื่อ L = ขนาดแผ่นยางด้านขนานกับคานสะพาน (มม.)
 W = ขนาดแผ่นยางด้านตั้งฉากกับคานสะพาน (มม.)
 h_{ii} = ความหนาของยางแต่ละชั้น (มม.)

2) โมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus, G) เนื่องจากแผ่นยางรองคอสสะพานจะต้องรับแรงกระทำในแนวราบจากน้ำหนักบรรทุกจร และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโครงสร้าง โดยสติฟเนสการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวราบของแผ่นยางรองคอสสะพานจะส่งผลต่อแรงในแนวราบในโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน ในการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจะต้องพิจารณาจากโมดูลัสแรงเฉือนของแผ่นยางที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 23 °C มาตรฐาน AASHTO-Method A ได้ให้ช่วงค่าโมดูลัสแรงเฉือนของแผ่นยางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.60 MPa ถึง 1.75 MPa

3) ค่าความแข็ง (Hardness) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่คืนตัวได้แบบอีลาสติกที่ได้จากการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่กำหนด โดยปกติแล้ว แผ่นยางรองคอสสะพานจะทำการทดสอบค่าความแข็งด้วย IRHD (International Rubber Hardness Degree) หรือ Shore A scale ค่าความแข็งสามารถใช้เป็นดัชนีในการระบุโมดูลัสแรงเฉือนของยางได้ แต่ไม่ได้นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบแผ่นยาง ทั้งนี้ มาตรฐาน AASHTO-Method A ได้ให้

ช่วงความแข็งของแผ่นยางระหว่าง 50 ถึง 70 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและโมดูลัสแรงเฉือนสามารถแสดงได้
ดังตารางที่ 2.6-2

ตารางที่ 2.6-2 โมดูลัสแรงเฉือน (G)

	Hardness (Shore A)		
	50	60	70
โมดูลัสแรงเฉือน @ 23°C (MPa)	0.66-0.90	0.90-1.38	1.38-2.07
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการคืบที่ 25 ปี หาร ด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบทันที	0.25	0.35	0.45

ในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานจะต้องตรวจสอบหน่วยแรง การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และเสถียรภาพ
ของแผ่นยาง โดยอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของแผ่นยางรองคอสพานดังกล่าวแล้วข้างต้น โดยมีรายละเอียด
ข้อกำหนดการออกแบบดังต่อไปนี้

1) หน่วยแรงอัด

หน่วยแรงอัดเฉลี่ย (Average Compressive Stress, σ_s) ของยางแต่ละชั้นภายใต้สภาวะการใช้งาน
(Service State) จะต้องไม่เกินกว่าที่กำหนดให้ดังต่อไปนี้

สำหรับแผ่นยางประเภทชนิดแผ่นยางล้วน

$$\sigma_s \leq 5.5 \text{ MPa} \quad (2.26)$$

สำหรับแผ่นยางประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

$$\sigma_s \leq 7 \text{ MPa} \quad \text{และ} \quad \sigma_s \leq 1.0 G_s \quad (2.27)$$

เมื่อ S คือปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) ของยางชั้นที่หนาสุดของแผ่นยางรองคอสพาน ทั้งนี้ มาตรฐาน
AASHTO ยอมให้สามารถเพิ่มค่าขีดจำกัดของหน่วยแรงข้างต้นได้อีก 10% เมื่อมีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
เนื่องจากแรงเฉือนในแผ่นยาง

2) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงอัด

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัดภายใต้สภาวะการใช้งานที่ไม่รวมผลของแรงกระแทกและที่ไม่รวมผล
ของการคืบในแผ่นยางประเภทชนิดแผ่นยางล้วนและแต่ละชั้นของยางในแผ่นยางประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่น
เหล็กจะต้องมีค่าไม่เกินกว่า $0.07h_n$ เมื่อ h_n คือ ความหนาของยางแต่ละชั้น

3) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน

การเคลื่อนตำแหน่งของโครงสร้างสะพานส่วนบนจะต้องพิจารณาผลรวมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการคืบ Shrinkage การอัดแรง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางจะต้องพิจารณารวมผลของสถิติเนตโครงสร้างส่วนล่างและขั้นตอนการก่อสร้าง เพื่อป้องกันการม้วน (Rollover) ของขอบแผ่นยางและการเกิด Delamination จากความล้ม มาตรฐาน AASHTO ได้กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (Δ_s) ภายใต้สภาวะใช้งานมีข้อกำหนดดังนี้

$$h_r \geq 2\Delta_s \quad (2.28)$$

เมื่อ h_r คือ ความหนาทั้งหมดของแผ่นยางรองคอสสะพาน (มม.)

4) การหมุน

แผ่นยางรองคอสสะพานอาจเกิดการหมุน (Rotation) มากในกรณีต่างๆ ดังนี้ 1) การคืบตัวของแคมเบอร์ (Camber) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ 2) การหมุนที่ปลายคานภายใต้สมมติฐานของจุดรองรับอย่างง่าย 3) สะพานมีความเบ้ (Skew) หรือคานมีความโค้ง

การตรวจสอบการหมุนของแผ่นยางรองคอสสะพานเป็นการป้องกันการยกตัว (Uplift) ของแผ่นยาง โดยอาศัยข้อกำหนดของหน่วยแรงภายใต้สภาวะใช้งานที่ทำให้เกิดการหมุนสูงสุดในแผ่นยาง

สำหรับแผ่นยางประเภทชนิดแผ่นยางล้วน

$$\sigma_s \geq 0.5GS \left(\frac{L}{h_r} \right)^2 \theta_{s,x} \quad (2.29)$$

$$\text{และ} \quad \sigma_s \geq 0.5GS \left(\frac{W}{h_r} \right)^2 \theta_{s,z} \quad (2.30)$$

เมื่อ

- σ_s = หน่วยแรงอัดเฉลี่ยใช้งานเนื่องจากแรงทั้งหมดที่ทำให้เกิดการหมุน (MPa)
- G = โมดูลัสแรงเฉือนของยาง (MPa)
- S = ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) ของชั้นที่มีความหนามากที่สุดของแผ่นยางรองคอสสะพาน
- L = ความยาวของแผ่นยางรองคอสสะพานด้านที่ขนานกับทิศทางการจราจร
- h_r = ความหนาทั้งหมดของแผ่นยางรองคอสสะพาน (MPa)
- W = ความกว้างของแผ่นยางรองคอสสะพานด้านที่ตั้งฉากกับทิศทางการจราจร
- $\theta_{s,x}$ = มุมหมุน (Rad) รอบแกนตามขวางภายใต้แรงใช้งานทั้งหมด

$\theta_{s,z}$ = มุมหมุน (Rad) รอบแกนตามยาวภายใต้แรงใช้งานทั้งหมด

สำหรับแผ่นยางประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

$$\sigma_s \geq 0.5GS \left(\frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_{s,x}}{n} \quad (2.31)$$

$$\text{และ} \quad \sigma_s \geq 0.5GS \left(\frac{W}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_{s,z}}{n} \quad (2.32)$$

เมื่อ

n = จำนวนของชั้นยางภายในที่มีการยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้ง 2 สองหน้า ทั้งนี้ ในกรณีที่ยื่นทางด้านนอกซึ่งมีการยึดติดกับแผ่นเหล็กเพียงด้านเดียวมีความหนา มากกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นยางด้านใน ให้เพิ่มค่าของ n ด้วย 0.50 สำหรับแต่ละชั้นของยางด้านนอก

h_{ri} = ความหนาแต่ละชั้นของแผ่นยางรองคอสสะพาน (มม.)

5) เสถียรภาพ

ความหนาทั้งหมดของแผ่นยางจะต้องมีค่าไม่เกินกว่า $L/3$ หรือ $W/3$ เมื่อ L และ W คือ ความยาวและความกว้างของแผ่นยางในทิศทางขนานและตั้งฉากกับทิศทางการจราจร ตามลำดับ

6) การเสริมเหล็กในแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

แผ่นเหล็กเสริมกำลังจะต้องมีความสามารถในการรับแรงดึงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางภายใต้แรงดัด การตรวจสอบความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังจะต้องตรวจสอบภายใต้สภาวะใช้งานและความล้า ดังนี้

ภายใต้สภาวะใช้งาน (Service Stage)

$$h_s \geq \frac{3h_{\max} \sigma_s}{F_y} \quad (2.33)$$

ภายใต้สภาวะความล้า (Fatigue Limit State)

$$h_s \geq \frac{2.0h_{\max} \sigma_L}{\Delta F_{TH}} \quad (2.34)$$

เมื่อ

ΔF_{TH} = Constant Amplitude Fatigue Threshold สำหรับ Category A มีค่าเท่ากับ 165 MPa

$h_{\max}$ = ความหนาของชั้นยางที่หนาสุด (มม.)

σ_L = หน่วยแรงอัดเฉลี่ยภายใต้สภาวะใช้งานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (MPa)

σ_s = หน่วยแรงอัดเฉลี่ยภายใต้สภาวะใช้งานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (MPa)

2.6.2.2 การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐาน AASHTO-Method B

แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กสามารถออกแบบตาม AASHTO-Method A ตามที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น หรือออกแบบตาม AASHTO-Method B โดยการออกแบบตาม AASHTO-Method B จะต้องมีการทดสอบและควบคุมคุณภาพของแผ่นยางมากกว่า ทำให้สามารถกำหนดค่ากำลังในการรับแรงได้สูงกว่าที่ยอมไว้ในวิธี AASHTO-Method A ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกและออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานมีค่าปัจจัยรูปร่าง โมดูลัสแรงเฉือน และความแข็งของแผ่นยางเช่นเดียวกับ AASHTO-Method A แต่วิธี AASHTO Method-B กำหนดให้แผ่นยางจะต้องมีค่าโมดูลัสแรงเฉือนอยู่ในช่วง 0.60 ถึง 1.3 MPa และมีความแข็งตาม Shore A scale ระหว่าง 50 ถึง 60

ในการออกแบบจะต้องพิจารณาตรวจสอบในหัวข้อต่างๆ เช่นเดียวกับวิธี AASHTO-Method A โดยมีข้อกำหนดการตรวจสอบที่เหมือนและต่างกันดังต่อไปนี้

1) หน่วยแรงอัด

หน่วยแรงอัดเฉลี่ยของยางแต่ละชั้นในแผ่นยางภายใต้สภาวะใช้งานจะต้องมีค่าอยู่ในขอบเขตดังต่อไปนี้

สำหรับแผ่นยางที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือน

$$\sigma_s \leq 1.66GS \leq 11 \text{ MPa} \quad (2.35)$$

$$\sigma_L \leq 0.66GS \quad (2.36)$$

สำหรับแผ่นยางที่มีการยึดรั้งป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือน

$$\sigma_s \leq 2.0GS \leq 12.0 \text{ MPa} \quad (2.37)$$

$$\sigma_L \leq 1.0GS \quad (2.38)$$

เมื่อ

σ_s = หน่วยแรงอัดใช้งานเฉลี่ยเนื่องจากแรงกระทำทั้งหมด (MPa)

σ_L = หน่วยแรงอัดใช้งานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (MPa)

G = โมดูลัสแรงเฉือน (MPa)

S = ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor)

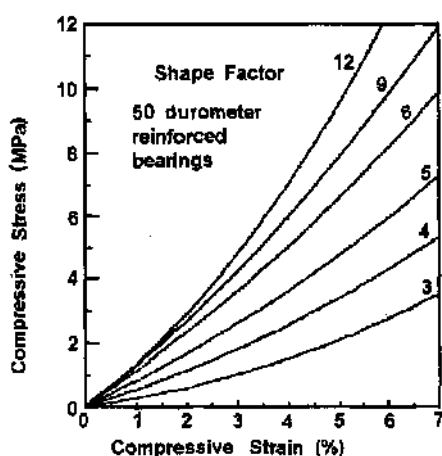
2) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงอัด

การจำกัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัดจะช่วยป้องกันความเสียหายของจุดต่อในโครงสร้าง รวมทั้งลดแรงกระแทกจากยานพาหนะ มาตรฐาน AASHTO แนะนำให้จำกัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสัมพัทธ์ของแผ่นยางรองคอสพานและส่วนของโครงสร้างที่อยู่ติดกันไว้ 3 มม. โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างรวม (δ) ทั้งหมดของแผ่นยางรองคอสพานสามารถคำนวณได้จาก

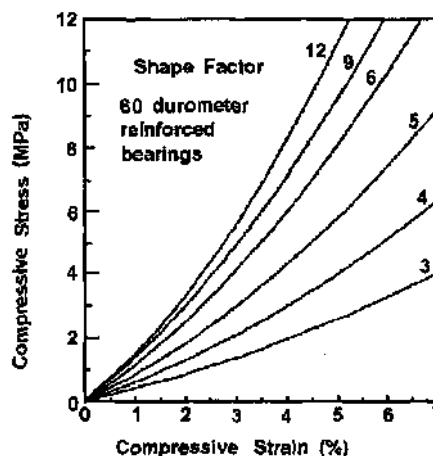
$$\delta = \sum \epsilon_i h_i \quad (2.39)$$

เมื่อ ϵ_i = ความเครียดของยางชั้นที่ i
 h_i = ความหนาของแผ่นยางชั้นที่ i

โดยปกติแล้วแผ่นยางรองคอสพานประเภทชนิดเสริมกำลังจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัดแบบไม่เป็นเส้นตรง ความเครียดของแผ่นยางสามารถหาได้จากการทดสอบหรือการวิเคราะห์ โดยจะต้องรวมผลการคืบของแผ่นยาง ในกรณีที่ไม่ใช่ข้อมูลเฉพาะเจาะจงของแผ่นยางรองคอสพานที่ใช้ สามารถใช้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงอัดได้



ก) แผ่นยางที่มีค่าความแข็ง 50



ข) แผ่นยางที่มีค่าความแข็ง 60

รูปที่ 2.6-1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

3) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน

เช่นเดียวกับวิธี AASHTO-Method A การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (Δ_s) ภายใต้สภาวะใช้งานของวิธี AASHTO-Method B กำหนดไว้ดังนี้

$$h_r \geq 2\Delta_s \quad (2.40)$$

เมื่อ h_r คือ ความหนาทั้งหมดของแผ่นยางรองคอสพาน (มม.)

4) การหมุน

การตรวจสอบการหมุนของแผ่นยางรองคอสสะพานเป็นการป้องกันหน่วยแรงอัดที่สูงเกินไปที่บริเวณขอบและป้องกันการยกตัว (Uplift) ของแผ่นยาง โดยการยกตัวของแผ่นยางจะทำให้เกิดความเครียดกลับทิศในแผ่นยาง ซึ่งจะส่งผลในการลดกำลังต้านทานความล้าของแผ่นยาง มาตรฐาน AASHTO-Method B กำหนดให้มีการตรวจสอบการหมุนของแผ่นยางดังต่อไปนี้

สำหรับการยกตัวของแผ่นยาง

$$\sigma_s > 1.0GS \left(\frac{\theta_s}{n} \right) \left(\frac{B}{h_{ri}} \right)^2 \quad (2.41)$$

สำหรับแผ่นยางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือน

$$\sigma_s < 1.875GS \left[1 - 0.20 \left(\frac{\theta_s}{n} \right) \left(\frac{B}{h_{ri}} \right)^2 \right] \quad (2.42)$$

สำหรับแผ่นยางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการยึด เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือน

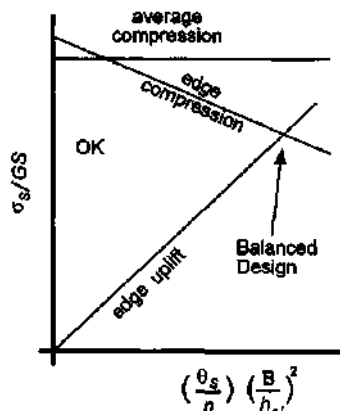
$$\sigma_s < 2.25GS \left[1 - 0.167 \left(\frac{\theta_s}{n} \right) \left(\frac{B}{h_{ri}} \right)^2 \right] \quad (2.43)$$

เมื่อ

- n = จำนวนของชั้นยางภายในที่มีการยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้ง 2 สองหน้า ทั้งนี้ ในกรณีที่ชั้นยางด้านนอกซึ่งมีการยึดติดกับแผ่นเหล็กเพียงด้านเดียวมีความหนา มากกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นยางด้านใน ให้เพิ่มค่าของ n ด้วย 0.50 สำหรับแต่ละชั้นของยางด้านนอก
- h_{ri} = ความหนาแต่ละชั้นของแผ่นยางรองคอสสะพาน (มม.)
- σ_s = หน่วยแรงในแผ่นยางรองคอสสะพาน (MPa)
- B = ความยาวของแผ่นยางรองคอสสะพานกรณีที่เป็นการหมุนรอบแกนทางขวางหรือความกว้างของแผ่นยางรองคอสสะพานกรณีที่เป็นการหมุนรอบแกนตามยาว (มม.)
- θ_s = มุมหมุนสูงสุดเนื่องจากแรงทั้งหมด (Rad.)

โดยปกติแล้วในการออกแบบแผ่นยางที่มีการหมุนจะต้องพิจารณาปัจจัยรูปของแผ่นยางรองคอสสะพานที่เหมาะสม เนื่องจากปัจจัยรูปร่างที่สูงจะทำให้แผ่นยางรองคอสสะพานสามารถรับแรงอัดได้ดี แต่ปัจจัยรูปร่างที่ต่ำจะ

ช่วยให้แผ่นยางสามารถหมุนได้ง่าย ดังนั้น การออกแบบที่ประหยัดจะต้องพิจารณาสมดุลระหว่างการอัดและการหมุนของแผ่นยางดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.6-2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและการหมุนของแผ่นยาง

ตารางที่ 2.6-3 แสดงจุดสมดุลในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีรูปร่างต่างๆ

ตารางที่ 2.6-3 จุดสมดุลในการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ประเภทแผ่นยางรองคอสสะพาน	$\frac{\sigma_s}{GS}$	$\left(\frac{\theta_s}{n}\right)\left(\frac{B}{h_{ci}}\right)^b$
Fixed Rectangular	1.636	1.636
Movable Rectangular	1.364	1.364
Fixed Circular	2.000	2.667
Movable Circular	1.667	2.222

5) เสถียรภาพ

แผ่นยางรองคอสสะพานจะต้องมีเสถียรภาพภายใต้การรวมผลของแรงที่สภาวะใช้งาน โดยสามารถตรวจสอบได้ดังต่อไปนี้

$$\text{กรณีที่ } 2A \leq B$$

แผ่นยางรองคอสสะพานมีเสถียรภาพและไม่ต้องการตรวจสอบเพิ่มเติม

กรณีที่ $2A > B$

สำหรับพื้นสะพานที่มีการเคลื่อนในแนวราบได้อย่างอิสระ

$$\sigma_s \leq \frac{GS}{2A - B} \quad (3.43)$$

สำหรับพื้นสะพานที่ยึดรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนในแนวราบได้อย่างอิสระ

$$\sigma_s \leq \frac{GS}{A - B} \quad (3.44)$$

โดยที่

$$A = \frac{1.92 \frac{h_r}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2.0L}{W}}} \quad \text{และ} \quad B = \frac{2.67}{(S + 2.0) \left(1 + \frac{L}{4.0W} \right)}$$

เมื่อ

G = โมดูลัสแรงเฉือน (MPa)

L = ความยาวของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ขนานกับความยาวสะพาน (มม.)

W = ความกว้างของแผ่นยางรองคอสสะพานในทิศทางขวางกับความยาวสะพาน (มม.)

ในกรณีที่แผ่นยางรองคอสสะพานมีความยาว (L) ของแผ่นในทิศขนานกับความยาวสะพานมากกว่าความกว้าง (W) ของแผ่นซึ่งอยู่ในทิศทางขวางกับความยาวสะพาน ให้สลับการแทนค่า L และ W ในสมการข้างบน

6) การเสริมเหล็กในแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

แผ่นเหล็กเสริมกำลังจะต้องมีความสามารถในการรับแรงดึงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางภายใต้แรงอัด การตรวจสอบความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังจะต้องตรวจสอบภายใต้สภาวะใช้งานและความล้า ดังนี้

สภาวะใช้งาน (Service Stage)

$$h_s \geq \frac{3h_{\max} \sigma_s}{F_y} \quad (3.45)$$

สภาวะความล้า (Fatigue Limit State)

$$h_s \geq \frac{2.0h_{\max} \sigma_L}{\Delta F_{TH}} \quad (3.46)$$

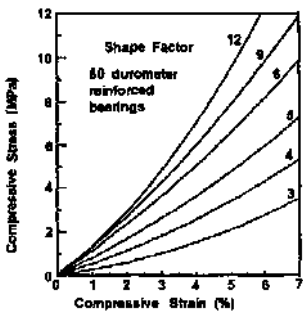
เมื่อ ΔF_{TH} = Constant Amplitude Fatigue Threshold สำหรับ Category A มีค่าเท่ากับ 6.6 MPa

$h_{\max}$ = ความหนาของชั้นยางที่หนาสุด (มม.)

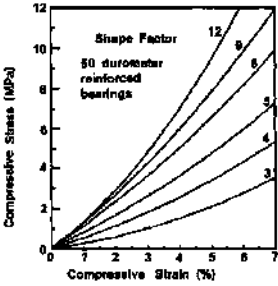
σ_L = หน่วยแรงอัดเฉลี่ยภายใต้สภาวะใช้งานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (MPa)

σ_s = หน่วยแรงอัดเฉลี่ยภายใต้สภาวะใช้งานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (MPa)

วิธีการออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานตามวิธีของ AASHTO LRFD 2007 ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น
สามารถนำมาใช้พิจารณาออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานของสะพานประเภทต่างๆได้จากรูปที่ 2.6-3 ถึง 2.6-6

รายการคำนวณแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทแผ่นยางล้วน สะพาน Slab Type (Method A - AASHTO LRFD 2007)									
Input Parameter									
Load and Displacement									
Bridge Span	=	10000	mm						
DL Reaction	=	62.39	kN	LL Reaction	=	84.66	kN		
θ_s Rotation	=	0.00169	Rad	Temp. Change	=	20	°C		
Property of Elastomer									
L	=	150	mm	(Length of bearing parallel to longitudinal bridge axis)					
W	=	1000	mm	(Width of bearing in transverse direction)					
h _{rt}	=	10	mm	(Thickness of elastomer layer)					
S	=	6.52		(Shape factor)					
G	=	0.60	MPa	(Shear Modulus)					
Calculation Check									
1. Compressive Stress									
Total Reaction	=	147.05	kN						
σ_c	=	0.980	MPa	≤	5.50	MPa	(AASHTO 14.7.6.3.2-1)	OK	
2. Compressive Deflection									
Deflection in any layer (Determine from Figure)	=	0.09	mm	≤	0.7	mm	(AASHTO 14.7.6.3.3)	OK	
									
3. Shear Deformation									
Δ_c	=	0.43		≤	5	mm	(AASHTO 14.7.6.3.4-1)	OK	
4. Rotation									
σ_c	≥	$0.5GS \left(\frac{L}{h_{rt}} \right)^2 \theta_{s,x}$		(AASHTO 14.7.6.3.5b-1)					
	≥	0.74	MPa	OK					
5. Stability									
h _{rt}	≤	1/3		=	50	mm	(AASHTO 14.7.6.3.6)	OK	
	≤	W/3		=	333	mm	(AASHTO 14.7.6.3.6)	OK	

รูปที่ 2.6-3 การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนของสะพาน Slab Type

รายการคำนวณแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทแผ่นยางล้วน สะพาน Plank Girder (Method A - AASHTO LRFD 2007)									
Input Parameter									
Load and Displacement									
Bridge Span	=	10000	mm						
DL Reaction	=	52.97	kN	LL Reaction	=	89.41	kN		
θ_s Rotation	=	0.000591	Rad	Temp. Change	=	20	$^{\circ}\text{C}$		
Creep (CEB-FIP 1990)	=	2.62	mm						
Property of Elastomer									
L	=	150	mm	(Length of bearing parallel to longitudinal bridge axis)					
W	=	1000	mm	(Width of bearing in transverse direction)					
h _{rt}	=	10	mm	(Thickness of elastomer layer)					
S	=	6.52		(Shape factor)					
G	=	0.60	MPa	(Shear Modulus)					
Calculation Check									
1. Compressive Stress									
Total Reaction	=	142.38	kN						
σ_s	=	0.949	MPa	≤	5.50	MPa	(AASHTO 14.7.6.3.2-1)	OK	
2. Compressive Deflection									
Deflection in any layer (Determine from Figure)	=	0.09	mm	≤	0.7	mm	(AASHTO 14.7.6.3.3)	OK	
									
3. Shear Deformation									
Δ_s	=	4.13	mm	≤	5	mm	(AASHTO 14.7.6.3.4-1)	OK	
4. Rotation									
σ_s	≥	$0.5GS \left(\frac{L}{h_{rt}} \right)^2 \theta_{s,x}$		(AASHTO 14.7.6.3.5b-1)					
	≥	0.26	MPa					OK	
5. Stability									
h _{rt}	≤	L/3	=	50	mm	(AASHTO 14.7.6.3.6)	OK		
	≤	W/3	=	333	mm	(AASHTO 14.7.6.3.6)	OK		

รูปที่ 2.6-4 การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนของสะพาน Plank Girder

รายการคำนวณแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทแผ่นยางล้วน สะพาน Box Girder (Method A - AASHTO LRFD 2007)

Input Parameter

Load and Displacement

Bridge Span	=	20000	mm	LL Reaction	=	$0.78 \times 357.25 = 278.66$	kN
DL Reaction	=	127.14	kN	Temp. Change	=	20	°C
θ_s Rotation	=	0.000904	Rad				
Creep (CEB-FIP 1990)	=	7.93	mm				

Property of Elastomer

L	=	125	mm	(Length of bearing parallel to longitudinal bridge axis)
W	=	980	mm	(Width of bearing in transverse direction)
h _{rt}	=	22.5	mm	(Thickness of elastomer layer)
S	=	2.46		(Shape factor)
G	=	0.60	MPa	(Shear Modulus)

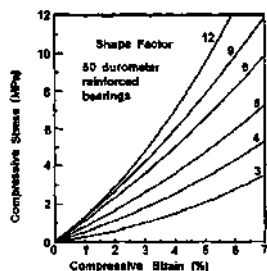
Calculation Check

1. Compressive Stress

Total Reaction	=	405.80	kN				
σ_c	=	3.313	MPa	≤	5.50	MPa (AASHTO 14.7.6.3.2-1)	OK

2. Compressive Deflection

Deflection in any layer	=	0.60	mm	≤	1.575	mm (AASHTO 14.7.6.3.3)	OK
(Determine from Figure)							



3. Shear Deformation

Δ_s	=	11.70		≤	11.25	mm (AASHTO 14.7.6.3.4-1)	NOT OK
------------	---	-------	--	---	-------	--------------------------	--------

4. Rotation

$$\sigma_s \geq 0.5GS \left(\frac{L}{h_{rt}} \right)^2 \theta_{s,x} \quad (\text{AASHTO 14.7.6.3.5b-1})$$

$$\geq 0.02 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

5. Stability

h _{rt}	≤	1/3	=	41.66666667	mm (AASHTO 14.7.6.3.6)	OK
	≤	W/3	=	327	mm (AASHTO 14.7.6.3.6)	OK

รูปที่ 2.6-5 การออกแบบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนของสะพาน Box Girder (FR)

รายการคำนวณแผ่นยางรองคอสพานประเภทแผ่นยางล้วน สะพาน Box Girder (Method A - AASHTO LRFD 2007)

Input Parameter

Load and Displacement

Bridge Span	=	20000	mm				
DL Reaction	=	127.14	kN	LL Reaction	=	0.78x357.25 =	278.66 kN
$\theta_{s,x}$ Rotation	=	0.000004	Rad	Temp. Change	=	20	°C
Creep (CEB-FIP 1990)	=	7.93	mm				

Property of Elastomer

L	=	125	mm	(Length of bearing parallel to longitudinal bridge axis)
W	=	980	mm	(Width of bearing in transverse direction)
h _{rt}	=	10	mm	(Thickness of elastomer layer)
S	=	5.54		(Shape factor)
G	=	0.60	MPa	(Shear Modulus)

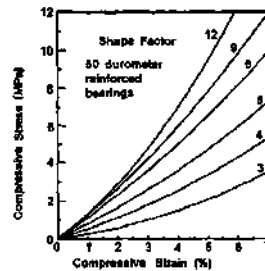
Calculation Check

1. Compressive Stress

Total Reaction	=	405.80	kN				
σ_s	=	3.313	MPa	≤	5.50	MPa (AASHTO 14.7.6.3.2-1)	OK

2. Compressive Deflection

Deflection in any layer (Determine from Figure)	=	0.27	mm	≤	0.7	mm (AASHTO 14.7.6.3.3)	OK
--	---	------	----	---	-----	------------------------	----



3. Rotation

σ_s	≥	$0.5GS \left(\frac{L}{h_{rt}} \right)^2 \theta_{s,x}$	(AASHTO 14.7.6.3.5b-1)				
	≥	0.23	MPa				OK

4. Stability

h _{rt}	≤	1/3	=	41.66666667	mm (AASHTO 14.7.6.3.6)	OK
	≤	W/3	=	327	mm (AASHTO 14.7.6.3.6)	OK

รูปที่ 2.6-6 การออกแบบแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วนของสะพาน Box Girder (F_x)

รายการคำนวณแผ่นยางรองคอสพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก สะพาน I-Girder (Method A - AASHTO LRFD 2007)

Input Parameter

Load and Displacement

Bridge Span	=	14,000	mm		
DL Reaction	=	80.96	kN	LL Reaction	= 0.72x124.3 = 89.50 kN
θ_s Rotation	=	0.001107	Rad	Temp. Change	= 20 °C
Creep (CEB-FIP 1990)	=	1.99	mm		

Property of Elastomer

L	=	300	mm	(Length of bearing parallel to longitudinal bridge axis)
W	=	400	mm	(Width of bearing in transverse direction)
h _{ri}	=	12	mm	(Thickness of elastomer layer)
h _{rt}	=	45	mm	(Total elastomer thickness)
S	=	7.14		(Shape factor)
h _s	=	3.00	mm	(Thickness of steel laminate)
n	=	3		(Number of layers of elastomers)
G	=	1.00	MPa	(Shear Modulus)

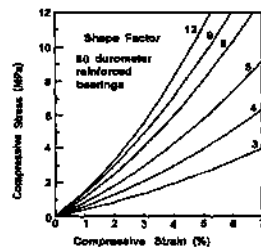
Calculation Check

1. Compressive Stress

Total Reaction	=	170.46	kN		
σ_s	=	1.420	MPa	≤ 7.00 MPa (AASHTO 14.7.6.3.2-4)	OK
				≤ 7.14 MPa (AASHTO 14.7.6.3.2-4) (1.0GS)	OK

2. Compressive Deflection

Deflection in any layer (Determine from Figure)	=	0.15	mm	≤ 0.84 mm (AASHTO 14.7.6.3.3)	OK
---	---	------	----	-------------------------------	----



3. Shear Deformation

Δ_s	=	2.61		≤ 22.5 mm (AASHTO 14.7.6.3.4-1)	OK
------------	---	------	--	---------------------------------	----

4. Rotation

σ_s	≥	$0.5GS \left(\frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_{s,x}}{n}$		(AASHTO 14.7.6.3.5d-1)	
	≥	0.82 MPa			OK

5. Stability

h _{rt}	≤	L/3	=	100	mm (AASHTO 14.7.6.3.6)	OK
	≤	W/3	=	133	mm (AASHTO 14.7.6.3.6)	OK

6. Reinforcement

At service limit state

h _s	≥	$\frac{3h_{max}\sigma_s}{F_y}$		(AASHTO 14.7.5.3.7-1)	
	≥	0.213072 mm			OK

At fatigue limit state

h _s	≥	$\frac{2.0h_{max}\sigma_L}{\Delta F_{TH}}$		(AASHTO 14.7.5.3.7-2)	
	≥	0.11 mm			OK

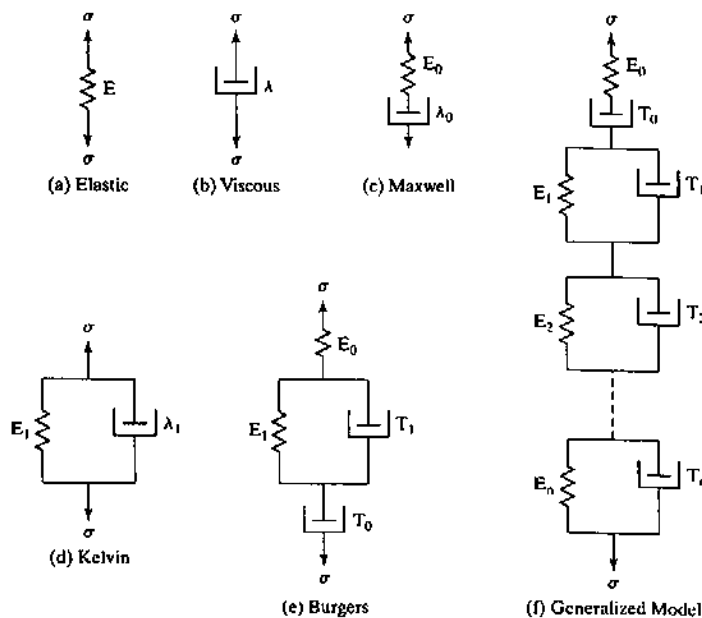
รูปที่ 2.6-7 การออกแบบแผ่นยางรองคอสพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กของสะพาน I-Girder

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แผ่นยางรองคอสสะพาน

2.7.1 แบบจำลองวิสโคอีลาสติก (Visco-Elastic Model)

แบบจำลอง visco-elastic เป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุ โดยแบ่งพฤติกรรมของวัสดุออกเป็นสององค์ประกอบ ได้แก่ ส่วนที่เป็นของแข็งที่แสดงคุณสมบัติแบบอีลาสติก และส่วนที่เป็นของเหลวหนืด โดยข้อดีของการใช้แบบจำลองแบบ Visco-Elastic นี้คือสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ (Time Dependent)

แบบจำลองนี้จะพิจารณาพฤติกรรมแบบอีลาสติกโดยการจำลองพฤติกรรมผ่านสปริง ส่วนพฤติกรรมแบบของเหลวหนืดนี้จะจำลองอยู่ในลักษณะที่เป็นของไหลที่บรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิด (Dashpot) ซึ่งการใช้งานแบบจำลอง Visco-Elastic นี้มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ อาทิเช่น แบบจำลองของ Maxwell แบบจำลองของ Kelvin แบบจำลองของ Burgers และแบบจำลองแบบทั่วไป (Generalized Model) (พิจารณาจากรูปที่ 2.7-1)



รูปที่ 2.7-1 รูปแบบของแบบจำลอง Viscoelastic

แบบจำลองเบื้องต้น แบบจำลองนี้จะอธิบายพฤติกรรมส่วนอีลาสติกโดยการใช้กฎของฮุคดังสมการที่

(3.47)

$$\sigma = \varepsilon E \quad (3.47)$$

โดยที่ σ คือความเค้น ε คือความเครียด และ E คืออีลาสติกโมดูลัส

วัสดุที่มีพฤติกรรมแบบหนืดจะจำลองอยู่ในลักษณะที่เป็นของไหลที่บรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิด (dashpot) และใช้กฎของนิวตันในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังสมการที่ (3.48)

$$\sigma = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.48)$$

λ คือ ค่าวิสโคซิตี และ t คือเวลา ซึ่งถ้าพิจารณาภายใต้สภาวะที่ความเค้นคงที่สมการที่ (3.48) สามารถที่จะอินทิเกรตได้ดังสมการที่ (3.49)

$$\varepsilon = \lambda \frac{\sigma t}{\lambda} \quad (3.49)$$

แบบจำลอง Maxwell แบบจำลองนี้จะทำการรวมแบบจำลองแบบอีลาสติก และแบบจำลองของเหลวหนืดเข้าไว้ด้วยกันดังรูปที่ 3.7-1 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่สภาวะที่ความเค้นคงที่ค่าความเค้นรวมสามารถหาได้จากสมการ (3.50)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\lambda_0} = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) \quad (3.50)$$

$T_0 = \lambda_0 / E_0$ คือค่าเวลาการคลายตัว (relaxation time) ถ้าค่าของหน่วยแรงหรือความเค้นมีค่าคงที่พฤติกรรมแบบสปริงจะตอบสนองให้เกิดค่าความเครียดอย่างทันทีที่ σ_0 / E_0 แต่ถ้ากำหนดให้ค่าความเครียดมีค่าคงที่ จะทำให้เกิดการคลายตัวของหน่วยแรงแบบช้าๆจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเค้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาดังสมการที่ (3.51)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E_0} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\lambda_0} \quad (3.51)$$

ในเทอมแรกของสมการด้านขวามือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดต่อหนึ่งหน่วยเวลาของสปริงเทอมที่สองคือค่าความเครียดเฉือนของของไหลที่บรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิด (Dashpot) ถ้าการเปลี่ยนแปลงความเครียดมีค่าคงที่ $\partial \varepsilon / \partial t = 0$ จะได้สมการความสัมพันธ์ของหน่วยแรงหรือความเค้นดังสมการที่ (3.52)

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(-\frac{t}{T_0} \right) \quad (3.52)$$

เมื่อกำหนดให้ $t = 0$, $\sigma = \sigma_0$ และ $t = \infty$, $\sigma = 0$ แสดงว่าเวลาที่ $t = T_0$, $\sigma = 0.368 \sigma_0$ ดังนั้นค่าเวลาหน่วง T_0 ของแบบจำลอง Maxwell คือค่าเวลาที่ทำให้หน่วยแรงหรือความเค้นคลายตัวลงไป 36.8%

แบบจำลอง Kelvin แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่นำพฤติกรรมแบบสปริง กับของไหลที่บรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิด (dashpot) มาต่อแบบขนานกันดังสมการที่ 3.53

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.53)$$

กรณีที่ความเค้นหรือหน่วยแรงมีค่าคงที่จะได้สมการของค่าความเครียดที่เวลาใดๆดังสมการ 3.54

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] \quad (3.54)$$

สำหรับสมการของ Kelvin นี้มีวิธีการเช่นเดียวในการหาค่าเวลาหน่วง T_1 ซึ่งโดยสรุปแล้วจะได้นิยามว่าค่าเวลาหน่วงของแบบจำลอง Kelvin นี้ จะเป็นเวลาที่ให้เกิดการชะลอตัวของค่าความเครียดเหลือ 63.2% ของความเครียดทั้งหมด

แบบจำลอง Burgers แบบจำลองนี้เป็นการรวมแบบจำลองของ Maxwell และ Kelvin เข้าไว้ด้วยกันทำให้ได้สมการค่าความเครียดที่เวลาใดๆดังสมการ (3.55)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] \quad (3.55)$$

ค่าความเครียดรวมที่เกิดขึ้นประกอบด้วยค่าความเครียด 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ความเครียดแบบอีลาสติก ความเครียดหนืด และความเครียดที่เกิดขึ้นทันทีที่เกิดขึ้นที่เวลา t เท่ากับ 0

แบบจำลอง Generalized แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของวัสดุใดๆ ซึ่งสมการค่าความเครียดที่เวลาใดๆดังสมการ (3.56)

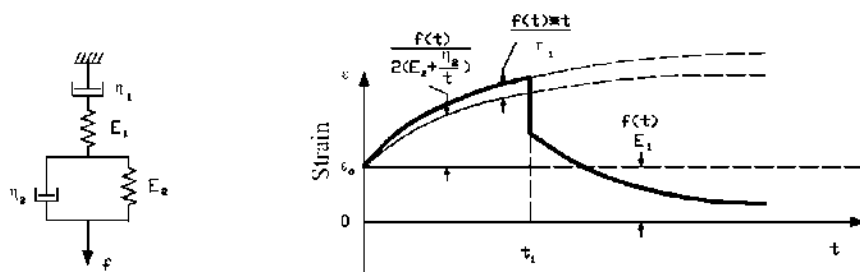
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right) \right] \quad (3.56)$$

โดย n คือจำนวนแบบจำลองของ Kelvin

ในปี ค.ศ. 1980 Meinecke ได้สรุปพฤติกรรมการตอบสนองของยางอีลาสโตเมอร์เมื่อถูกน้ำหนักกระทำ เพื่อที่จะต้องพิจารณาสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไว้ 3 หัวข้อ

- 1) ยางอีลาสโตเมอร์จะตอบสนองต่อน้ำหนักกระทำอย่างทันทีทันใด
- 2) การตอบสนองโดยการแสดงคุณสมบัติแบบวิสโคอีลาสติกแบบชั่วคราว
- 3) การตอบสนองโดยการแสดงคุณสมบัติแบบวิสโคอีลาสติกแบบถาวร

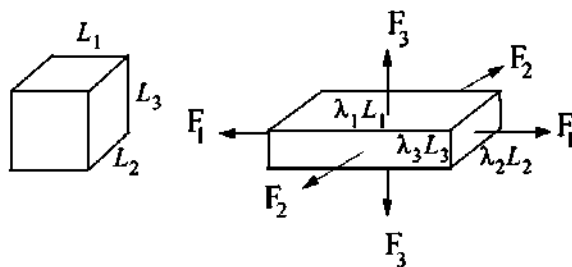
เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทั้ง 3 หัวข้อนี้จะทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของยางอีลาสโตเมอร์ในเรื่องของความล้า (creep) และการคืนตัวของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ระหว่างการเกิดความล้าได้ โดย Meinecke ได้อธิบายหลักการการใช้แบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายค่าการเสียรูปของยางอีลาสโตเมอร์ภายใต้สภาวะการกระทำของน้ำหนักหลายชนิด ได้แก่ การใช้แบบจำลองวิสโคอีลาสติกแบบ Burgers ในการอธิบายพฤติกรรมของยางอีลาสโตเมอร์ภายใต้น้ำหนักบรรทุก (พิจารณาจากรูปที่ 2.7-2)



รูปที่ 2.7-2 การใช้แบบจำลอง Viscoelastic ในการทำนายพฤติกรรมของยางรองคอสพาน

2.7.2 แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic model)

แบบจำลองวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติกเป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียด (Nonlinear Stress-Strain Relation) ของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง (Hyperelastic materials) ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงวัสดุอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) หรือยาง (Rubbers) แบบจำลองนี้จะอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function) กับอัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratios) หรือค่าอินแวเรียนต์ (Invariants) โดยเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพิจารณาจากรูปที่ 2.7-3



รูปที่ 2.7-3 แบบจำลองการเปลี่ยนรูปร่างของยางเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกต่างๆ เหล่านี้จะตั้งอยู่บนสมมุติฐานของยางดังต่อไปนี้

- 1) มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบไม่เป็นเชิงเส้น
- 2) เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อหยุดภาระ (Load) ที่มากระทำ
- 3) คุณสมบัติความยืดหยุ่นไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียด (Strain Rate)
- 4) มีคุณสมบัติเชิงกลเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) กล่าวคือ คุณสมบัติเชิงกลของยางไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางที่ใช้ในการวัด
- 5) เป็นวัสดุที่ไม่สามารถบีบอัดได้ นั่นคือปริมาตรของยางจะไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

คุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติกจะต้องใช้สมการที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเขียนในรูปของฟังก์ชันกัลพลังงานความเครียด (Stain Energy Function, W) ได้ดังนี้

$$W = W(U) \quad (2.57)$$

เมื่อ U คือเทนเซอร์ระยะยืด (Stretch Tensor) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของ Strain Invariants (I_1, I_2 และ I_3) ได้ดังนี้

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2.58)$$

ทั้งนี้ Mooney-Rivlin (1997) ได้นำเสนอฟังก์ชันกัลพลังงานความเครียดในรูปของ Strain Invariants (I_1, I_2 และ I_3) ดังสมการที่ (3.59)

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (2.59)$$

โดยที่ C_{ijk} = สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.60)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (2.61)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2.62)$$

เมื่อ λ_1, λ_2 และ λ_3 เป็นอัตราส่วนระยะยืด (Extension Ratio) ในทิศทางตามแนวแกนหลัก X, Y และ Z ตามลำดับ สำหรับวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ สามารถเขียนได้ว่า

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{(v + \Delta v)}{v} = 1 \quad (2.63)$$

เมื่อ V = ปริมาตร ทำให้

$$I_3 = J^2 = 1 \quad (2.64)$$

ดังนั้น จะเขียนได้

$$W = W(I_1, I_2) \quad (2.65)$$

หรือ
$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2.66)$$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (2.67)$$

พิจารณาภาวะการดึงแกนเดียว (Simple Tension Test) อัตราส่วนระยะยืด $\lambda_1 = \lambda$ และ $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda}$ ซึ่งจะทำให้ Strain Invariants เขียนได้

$$I_1 = \lambda^2 + 2/\lambda \quad (2.68)$$

$$I_2 = 2\lambda + 1/\lambda^2 \quad (2.69)$$

หน่วยแรงสามารถหาได้จากอนุพันธ์ของฟังก์ชันพลังงานความเครียด ซึ่งเขียนได้

$$\sigma = \partial W / \partial \lambda \quad (2.70)$$

นอกจากพลังงานความเครียดที่นำเสนอโดย Mooney-Rivlin (1997) ยังมีฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ได้ถูกนำเสนอเพื่อทำนายพฤติกรรมของยางอีลาสโตเมอร์โดยขึ้นอยู่กับค่าความเครียดที่ใช้งานดังตารางที่ 2.7-1

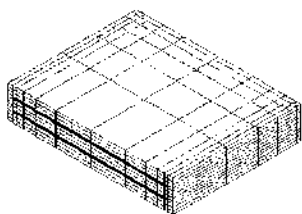
ตารางที่ 2.7-1 การเลือกใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกตามระดับความเครียดการใช้งาน

แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก	ความเครียดที่ใช้งาน	หมายเหตุ
นีโอ-ฮุกเกียน	น้อยกว่า 40%	
มูเนียร์-ฟริน	น้อยกว่า 100%	ไม่เหมาะกับการวิเคราะห์การรับแรงกด
ออกเดน	น้อยกว่า 700%	ต้องใช้ข้อมูลที่เป็นผลจากการทดสอบถึง 3 แบบ
โยห์	น้อยกว่า 100%	- ใช้ได้เมื่อมีข้อมูลจากการรับแรงดึงที่เท่ากันในแนวแกนเดียวเพียงอย่างเดียว - ไม่เหมาะสำหรับความเครียดต่ำๆ
โพลีโนเมียล	น้อยกว่า 300%	
อาร์รูดา-บอยส์	น้อยกว่า 300%	ใช้ได้เมื่อมีข้อมูลจากการรับแรงดึงที่เท่ากันในแนวแกนเดียว
เจนต์	น้อยกว่า 300%	

2.7.3 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้แก้ปัญหาในด้านต่างๆ รวมทั้งปัญหาเชิงโครงสร้างในทางวิศวกรรม โดยมีขั้นตอนต่างๆ เริ่มจากการแบ่งปัญหาที่ต้องการหาคำตอบออกเป็นปัญหาย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) จากนั้นทำการหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่สามารถใช้อธิบายปัญหาย่อยนั้นได้โดยใช้ระเบียบวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) เพื่อให้สมการเชิงอนุพันธ์อยู่ในรูปของสมการอย่างง่ายที่มีเพียงการบวก ลบ คูณ หรือหารเท่านั้น จากนั้นจึงดำเนินการรวมสมการแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันจะได้สมการรวมของระบบและสามารถทำการคำนวณหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการได้ ถ้าเป็นการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างที่เป็นเชิงเส้น (Linear Structure) ตัวแปรที่จะต้องใช้ในการคำนวณได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัส ค่าอัตราส่วนปัวซอง และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

อย่างไรก็ตามถ้าเป็นการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Structure Analysis) ของวัสดุอีลาสโตเมอร์หรือยาง ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นค่าคงที่ของวัสดุ (Material Constant) ตัวอย่างเช่นการเลือกใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกจะมีค่าคงที่ของวัสดุได้แก่ อัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratio) และค่าอินยง (Invariant) มาใช้ในการคำนวณหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันความเครียด ซึ่งจากการศึกษาวิจัยในอดีตได้มีนักวิจัยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงกระทำของแผ่นยางรองคอสสะพาน Yura et. al. (2001) ใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานกับผลการทดสอบ ดังตัวอย่างแบบจำลองและผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.7-4 โดยในการสร้างแบบจำลอง ได้ทำการจำลองส่วนของยางและเหล็กเสริมในแผ่นยางรองคอสสะพานด้วย Solid เอลิเมนต์ ที่มี 27 โหนดต่อเอลิเมนต์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.7-5) คุณสมบัติของยางได้รับการปรับแก้ให้สอดคล้องกับตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงเฉือนที่อุณหภูมิทดสอบ 32°C ในส่วนของเหล็กเสริมได้พิจารณาเป็นวัสดุแบบ Isotropic ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วง อิลาสติก 200,000 MPa มีค่าหน่วยแรงที่จุดครากเท่ากับ 345 MPa และมีพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่มหลังจากจุดคราก โดยมีค่าหน่วยแรงเพิ่มเป็น 490 MPa ที่ความเครียด 0.3 ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแผ่นยางภายใต้แรงกระทำได้พิจารณาเป็นอนลิเนีย (Nonlinear) ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติวัสดุ โดยใช้สมการของ Newton-Rapson Numerical Method ในการแก้สมการสมดุล

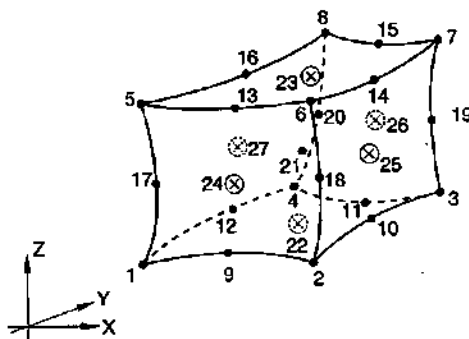


ก) แบบจำลองแผ่นยางรองคอสสะพาน



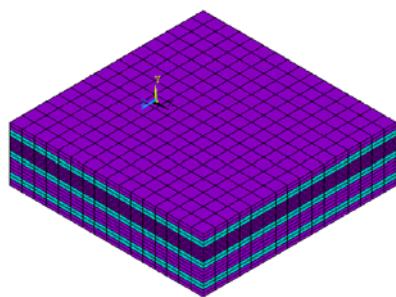
ข) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูปที่ 2.7-4 แบบจำลองของ Yura et. al. (2001)

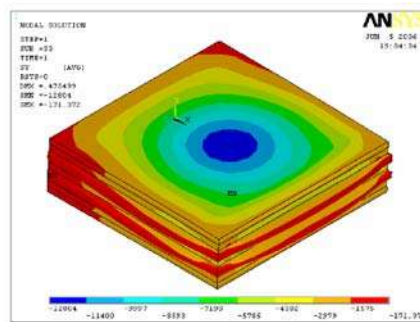


รูปที่ 3.7-5 อิลิเมนต์ Solid ของโปรแกรม ABAQUS

Mtenga (2005) ได้สร้างแบบจำลองแผ่นยางรองคอสสะพานด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อศึกษาพฤติกรรมและหน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงอัดและการหมุน ดังตัวอย่างแบบจำลองและหน่วยแรงในแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2.7-6 แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยใช้ Solid 185 แทนส่วนของยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7-7 ซึ่งอิลิเมนต์ ดังกล่าวมีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมแบบ Hyperelastic อิลิเมนต์ ดังกล่าวเหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยมี 8 โหนดต่ออิลิเมนต์ แต่ละโหนดมีการเคลื่อนที่อิสระในทิศทางแกน X Y และ Z และสามารถกำหนดให้มีคุณสมบัติพิเศษเป็น Plasticity, Hyperelasticity, Stress Stiffening, Creep, Large Deflection และ Large Strain Capability ได้ ในส่วนของแผ่นเหล็กได้ใช้ Solid 45 ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ อิลิเมนต์ ดังกล่าวประกอบขึ้นด้วย 8 โหนด แต่ละโหนดมีการเคลื่อนที่อิสระในทิศทางแกน x, y, z และมีคุณสมบัติเป็น Orthotropic Material พื้นผิวสัมผัสระหว่างยางรองสะพานและแผ่นเหล็กใช้อิลิเมนต์ Contact และ Target โดยอิลิเมนต์ ดังกล่าวจะยอมให้มีการเลื่อนไถลและแยกออกจากกันของแผ่นยางรองสะพานจากแผ่นเหล็ก อิลิเมนต์ Contact 174 เป็นอิลิเมนต์ ที่ใช้เป็นตัวแทนของการเชื่อมต่อ (Contact) ระหว่างพื้นผิวที่ต้องการใน Solid และ Shell อิลิเมนต์ ซึ่งรูปร่างทางเรขาคณิตของ contact 174 จะมีลักษณะเหมือนกับพื้นผิวที่ไปเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.7-8 การนำ Contact อิลิเมนต์ ไปใช้จำเป็นต้องมีการสร้าง Surface Element (Target 170) เพื่อเป็นการกำหนดพื้นผิวที่ต้องการไปเชื่อมต่อเสียก่อน Contact อิลิเมนต์ สามารถกำหนดสัมประสิทธิ์การเลื่อนไถล และยอมให้เกิดการแยกตัวของ Bonded Contact ต่อจำลอง Interface Delaminate จากผลการศึกษาวิจัยได้ข้อสรุปว่าหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการวิบัติและการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

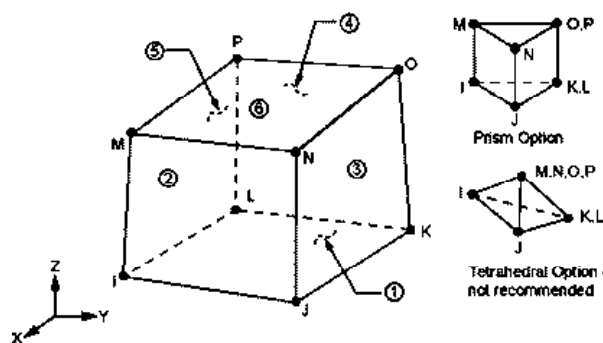


ก) แบบจำลองแผ่นยางรองคอสสะพาน

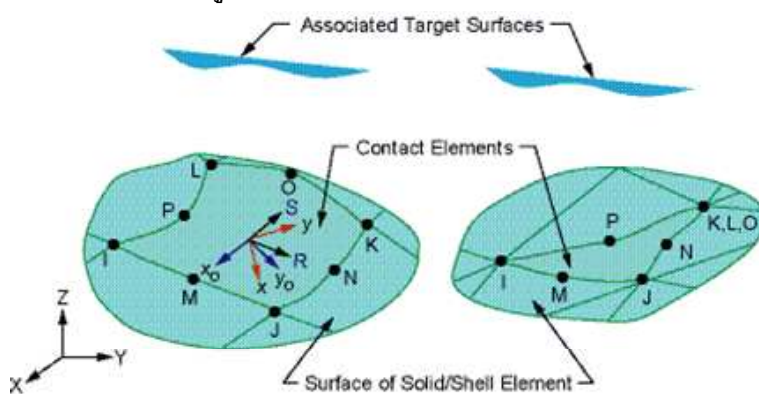


ข) หน่วยแรง

รูปที่ 2.7-5 แบบจำลองของ Mtenga (2005)



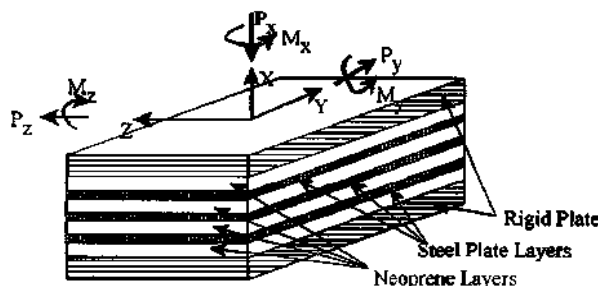
รูปที่ 2.7-7 อิลิเมนต์ Solid ของโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 2.7-8 Contact อิลิเมนต์ ของโปรแกรม ANSYS

By Nur yazdani และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแผ่นรองคานสะพาน (ประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก) ของคานคอนกรีตอัดแรงประเภท I-Girder ที่ทำการหล่อตามมาตรฐาน AASHTO ซึ่งประสิทธิภาพของแผ่นยางที่มีผลต่อคานสะพานดังกล่าวได้ทำการประเมินผ่านค่า Stiffness บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นรองสะพานและคาน I-Girder โดยใช้แบบจำลองทาง finite element (พิจารณาจากรูปที่ 2.7-9) จากผลการศึกษาพบว่าอิทธิพล

ของความหน่วงของแผ่นยางมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของคาน I-Girder และตัวโครงสร้างสะพาน อย่างไรก็ตาม ค่าความหน่วงจะมีผลต่อประสิทธิภาพน้อยเมื่อแผ่นยางรองคอสสะพานอยู่ในสภาพที่ใหม่ และค่า Stiffness มีค่าที่สูง อันเนื่องมาจากแผ่นยางรองคอสสะพานมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.7-9 แสดงทิศทางของแรง และโมเมนต์ที่กระทำต่อแผ่นยางรองคอสสะพานชนิดเสริมกำลัง

สำหรับการวิเคราะห์ด้วย finite element

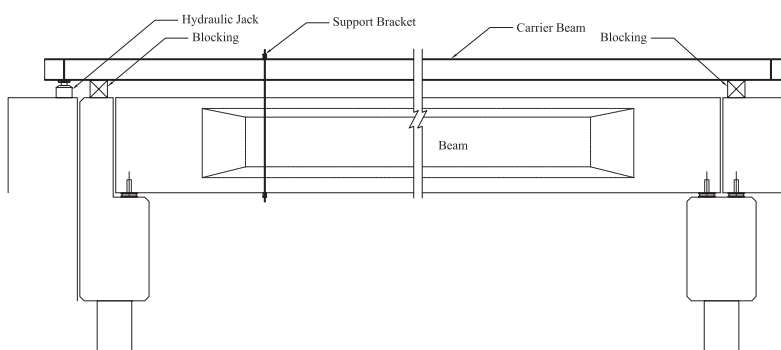
2.8 วิธีการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทต่างๆ

ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานนั้น สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ การยกโครงสร้างคานสะพานเพื่อที่จะสามารถดำเนินการเปลี่ยนหรือซ่อมแซมแผ่นยางรองคอสสะพานได้อย่างสะดวกและปลอดภัย ซึ่งทางที่ปรึกษาได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลการยกสะพานไว้ดังนี้

- AASHTO Maintenance Manual 2004 ได้เสนอการยกสะพานเพื่อซ่อมแซมหรือเปลี่ยนฐานรองไว้ 2 วิธีคือ การใช้คานหนุน และการหิ้วสะพานด้วย Carrier Beam การเลือกใช้วิธีการใดวิธีหนึ่งนั้นขึ้นอยู่กับสภาพหน้างานและเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานเป็นหลัก ตัวอย่างเช่นการยกสะพานโดยใช้คานหนุนนิยมใช้กับสะพานที่มีความสูงไม่มากนักสามารถทำโครงขึ้นไปรับสะพานได้ แต่หากตัวสะพานอยู่สูงจากพื้นมากก็อาจพิจารณาเลือกใช้วิธีการหิ้วสะพานแทน



รูปที่ 2.8-1 การยกสะพานโดยใช้คานหมุน (AASHTO Maintenance Manual, 2004)



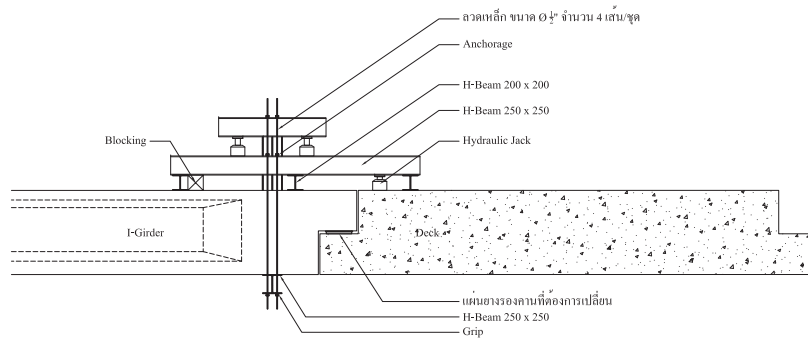
รูปที่ 2.8-2 ชุดอุปกรณ์สำหรับยกสะพาน Carrier Beam

- Sun-Kyu และคณะ (2001) ได้นำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์แรงขณะทำการยกคานสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อให้สามารถเปลี่ยนฐานรองได้อย่างปลอดภัยโดยมีผลกระทบต่องานโครงสร้างน้อยที่สุด โดยในการวิเคราะห์ให้คำนึงถึงผลของความหนาแน่นของหน่วยแรง(stress concentration) บริเวณจุดที่จะทำการยกคานด้วย hydraulic jack เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด bursting บริเวณข้างคาน เนื่องด้วยวิธีการดังกล่าวที่นำเสนอเป็นการยกคานทีละตัวเพื่อทำการเปลี่ยนฐานรอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์โครงสร้างโดยรวมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับระบบคานและแผ่นพื้นของโครงสร้างสะพาน
- Yanagihara และคณะ (2003) ได้ทำการยกเปลี่ยนสะพานเหล็ก "Golden Hom Bridge" ประเทศตุรกีโดยกำหนดระยะยกไว้สูงสุด 20 มิลลิเมตร จาก GUIDE BRIDGE SPECIAL PROVISIONS (GBSP) ของกรมขนส่ง Illinois กำหนดระยะยกสะพานไว้สองรูปแบบ โดยรูปแบบแรกเป็นการยกสะพานโดยไม่มีการรื้อพื้นสะพานออก และยอมให้มีการยกสูงสุดได้ไม่เกิน 7 มิลลิเมตร หากทำการยกสะพานพร้อมกันทุกตัว แต่ถ้าหากทำการยกสะพานทีละตัวจะยอมให้มีระยะการยกสูงสุดได้ไม่เกิน 4 มิลลิเมตร และรูปแบบที่2 เป็นการยก

สะพานโดยมีการรื้อพื้นสะพานออกโดยมีระยะยกสูงสุดได้ไม่เกิน 19 มิลลิเมตร หากทำการยกสะพานพร้อมกันทุกตัว หากทำการยกสะพานทีละตัวยอมให้มีระยะสูงสุดได้ไม่เกิน 7 มิลลิเมตร

2.8.1 การเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานโดยทำงานจากด้านบน

- 1) ตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานที่จะทำการยกก่อน โดยทำการตรวจสอบจากแบบมาตรฐาน หรือแบบที่ใช้ก่อสร้างสะพานนั้น เพื่อกำหนดรูปแบบขั้นตอนและวิธียก
- 2) คำนวณน้ำหนักของโครงสร้างที่จะทำการยกเพื่อกำหนดขนาดของแม่แรงไฮดรอลิกให้เหมาะสม
- 3) กำหนดตำแหน่งที่จะทำการเจาะรูที่พื้นสะพาน และร้อยลวด PC Strand เพื่อใช้ยึด Transfer Beam สำหรับหนุนได้คาน
- 4) ประกอบชุด Carrier Beam เพื่อใช้ในการยกตัวสะพานให้ลอยขึ้น ทั้งนี้ชุดยก Carrier Beam ต้องได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพสะพานที่จะยก
- 5) ทำการ Pre Load ลวดอัดแรง จากนั้นจึงทำการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก ตามตำแหน่งที่วิศวกรกำหนด จากนั้นจึงยกสะพานด้วยอัตรายกที่เท่ากัน ซึ่งถ้าสะพานอยู่ในแนวโค้งจะต้องปรับระดับฐานของแม่แรงให้อยู่ในแนวระนาบทุกตัว
- 6) เมื่อยกระดับพื้นสะพานได้ระดับความสูงพอที่จะถอดเปลี่ยนฐานรองได้จึงใช้แผ่นเหล็กหนุนที่ carrier beam ด้านใกล้แม่แรงไฮดรอลิก
- 7) นำฐานรองที่ชำรุดออก พร้อมตรวจสอบว่าบริเวณที่ฐานรองมีสภาพเสียหายหรือไม่ ถ้าหากมีความเสียหายจะต้องดำเนินการซ่อมแซมด้วย อีพอกซีมอร์ตาร์ ให้ได้ระดับอยู่ในแนวราบก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนฐานรองใหม่
- 8) เมื่ออีพอกซีมอร์ตาร์ได้กำลังตามกำหนดแล้วจึงปลดวางชุดยกลง ให้คานหรือพื้นสะพานวางลงในตำแหน่งเดิม
- 9) รื้อชุด carrier beam ไปติดตั้งในตำแหน่งที่จะทำการเปลี่ยนฐานรองช่วงต่อไป แล้วเริ่มดำเนินการตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจนเปลี่ยนฐานรองสะพานแล้วเสร็จทุกตำแหน่ง
- 10) ดูตัวอย่างการยกพื้นสะพานได้จากรูปที่ 2.8-3 ถึง 2.8-7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนฐานรองสะพานกลับรถที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง



รูปที่ 2.8-3 แสดงการติดตั้งชุดยกสะพาน (Carrier Beam)



รูปที่ 2.8-4 การเจาะรูบริเวณพื้นสะพานเพื่อร้อยลวด PC Stand (จิตพันธ์, 2547)



รูปที่ 2.8-5 การประกอบชุดยกสะพาน Carrier beam (จิตพันธ์, 2547)



รูปที่ 2.8-6 บริเวณด้านใต้คาน I-Girder จะถูกยึดด้วยคานเหล็กรูปพรรณ และลวด PC Stand (จิตพันธ์, 2547)



รูปที่ 2.8-7 การ Pre Load ลวด PC Stand (จิตพันธ์, 2547)

2.8.2 การเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานโดยทำงานจากด้านล่าง

กรณีเสาตอม่อเป็นแบบ Pier Wall

- 1) ตรวจสอบการหลุดตัวของสะพาน โดยทำการยกระดับสะพานเมื่อสะพานหยุดการหลุดตัว ในกรณีที่จำเป็นต้องยกสะพานที่ยังมีการหลุดตัว ต้องทำการเสริมความแข็งแรงของฐานรากก่อน
- 2) สำหรับการติดตั้งนั่งร้านวิธีนี้จะใช้ชิ้นส่วนของสะพานเบรียกว้างบนฐานรากของเสาตอม่อ ทำการเจาะกำแพงเพื่อให้โครงแผงสะพานเบรียยึดติดกับกำแพงเสาตอม่อสะพาน
- 3) เมื่อทำการติดตั้งนั่งร้านสะพานจนได้ความสูงที่ต้องการจึงติดตั้งคานเหล็กรองรับคาน Girder และคานเหล็กสำหรับเป็นที่รองรับแม่แรงยกสะพาน
- 4) คำนวณขนาดและจำนวนของแม่แรงที่ใช้สำหรับยกระดับสะพาน จากนั้นจึงทำการยกสะพาน
- 5) นำฐานรองที่ชำรุดออก พร้อมตรวจสอบว่าบริเวณที่ฐานรองมีสภาพเสียหายหรือไม่ ถ้าหากมีเสียหาย จะต้องดำเนินการซ่อมแซมด้วย อีพอกซีมอร์ตาร์ ให้ได้ระดับอยู่ในแนวราบก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนฐานรองใหม่
- 6) เมื่ออีพอกซีมอร์ตาร์ได้กำลังตามกำหนดแล้วจึงปลดวางชุดยกลง ให้คานหรือพื้นสะพานวางลงในตำแหน่งเดิม



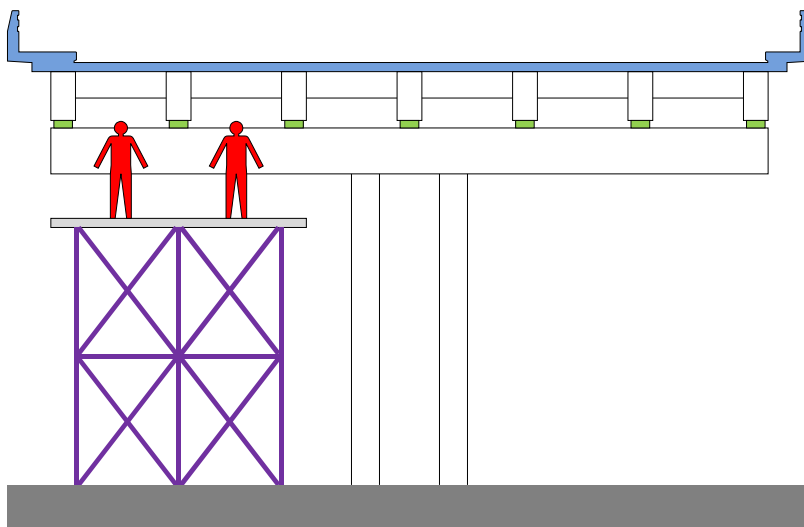
รูปที่ 2.8-8 การยกพื้นสะพานโดยใช้สะพานเบลีย์ (จิตพันธ์, 2547)

กรณีเสาตอม่อไม่เป็นแบบ Pier Wall

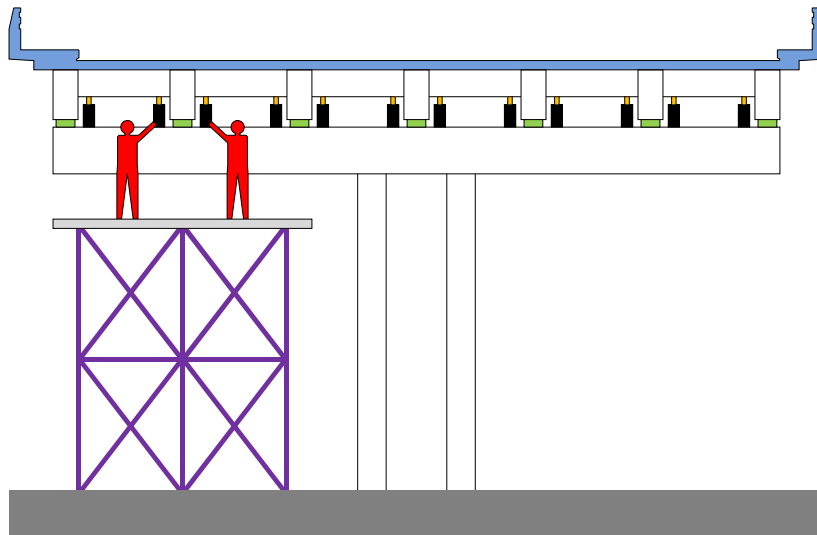
- 1) ทำการตั้งนั่งร้าน (Platform) บริเวณใต้รอยต่อที่จะดำเนินการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพาน หากพื้นที่การทำงานอยู่คร่อมถนนหรือทางแยกให้ทำการตั้งกรวย ป้ายเตือน และไฟสัญญาณ เพื่อให้ผู้ใช้สะพานรับทราบว่ากำลังมีการดำเนินการปรับปรุงสะพาน
- 2) ทำความสะอาดบริเวณพื้นที่ที่จะดำเนินการติดตั้ง Hydraulic Jack และปรับพื้นที่ให้ได้ระดับ
- 3) ทำการติดตั้ง Hydraulic Jack ในตำแหน่งที่จะทำการยกโดยมีแผ่นเหล็กขนาด 40*40*25 มิลลิเมตร รองใต้ท้องคาน End Diaphragm เพื่อใช้ในการกระจายแรง
- 4) ทำการติดตั้ง Dial Gauge เพื่อตรวจสอบระยะยกของคานแต่ละตัวขณะทำการยกสะพานโดยให้มีค่าแตกต่างระหว่างคานที่อยู่ติดกันไม่เกิน 4 มิลลิเมตร
- 5) ทำการ Pre-Load เพื่อให้แผ่นเหล็กแนบติดกับโครงสร้างของคาน End Diaphragm
- 6) ทำการยกสะพานขึ้นเป็นช่วงสั้นๆ จนกระทั่งระยะห่างระหว่างหัวคานกับ Crosshead เท่ากับระยะยกที่กำหนด
- 7) ทำการสอดขาเหล็กค้ำยันชั่วคราวเข้าไปใต้ End Diaphragm เพื่อคงระยะการยกตัว และรองรับน้ำหนักของสะพานไว้
- 8) ทำการถอดแผ่นยางรองคอสสะพานที่เสียหายออก พร้อมทั้งทำการตรวจสอบระดับของพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งฐานรองด้วยอีปอกซีมอร์ตาร์
- 9) ทำการติดตั้งฐานรองคอสสะพานขึ้นใหม่เข้าในตำแหน่งที่กำหนด

- 10) เมื่ออีปอกซีมอร์ตาร์ได้กำลังตามกำหนดจึงดำเนินการถอนแรงออกเพื่อให้คานแต่ละตัวค่อยๆวางลงในตำแหน่ง

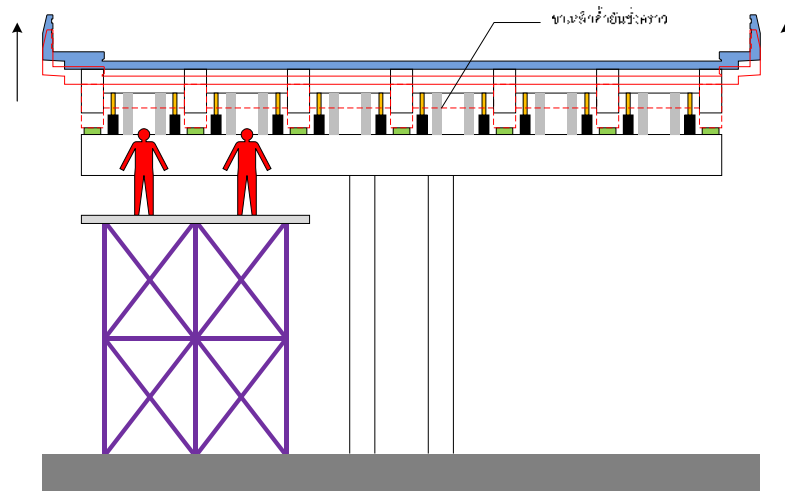
ทั้งนี้สำหรับรอยต่อที่มีความสกปรกมากอาจจะต้องมีการทำความสะอาดบริเวณรอยต่อเพื่อให้โครงสร้างสามารถขยับตัวได้โดยง่ายและสะดวกในการยกขึ้นพร้อมๆกันเพื่อให้ได้ระดับ นอกจากนี้ควรระมัดระวังในการตรวจสอบเครื่องมือและการทำงาน เช่น ตรวจสอบการรั่วของ Hydraulic Jack และจังหวะการยกขึ้นของแม่แรง เป็นต้น รูปที่ 2.8-9 ถึง 2.8-13 แสดงวิธีการเปลี่ยนแผ่นยางรองคอสสะพานตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



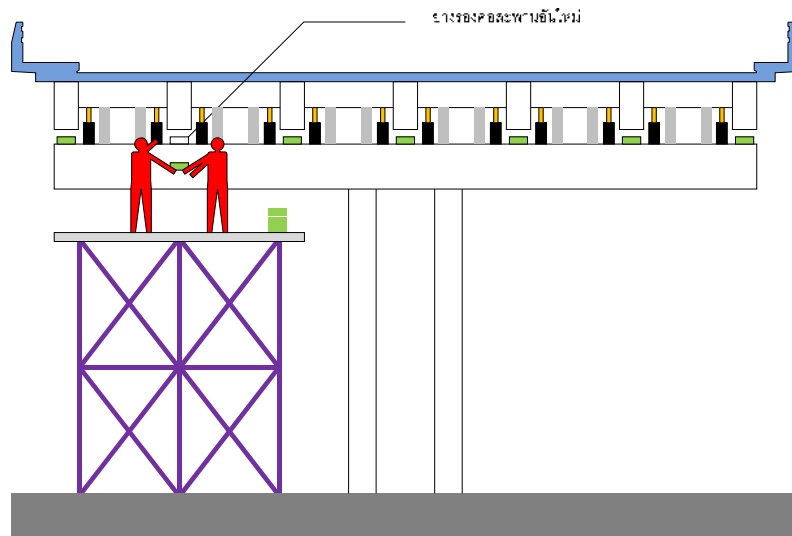
รูปที่ 2.8-9 ทำการตั้งนั่งร้านบริเวณรอยต่อที่จะดำเนินการเปลี่ยนฐานรอง



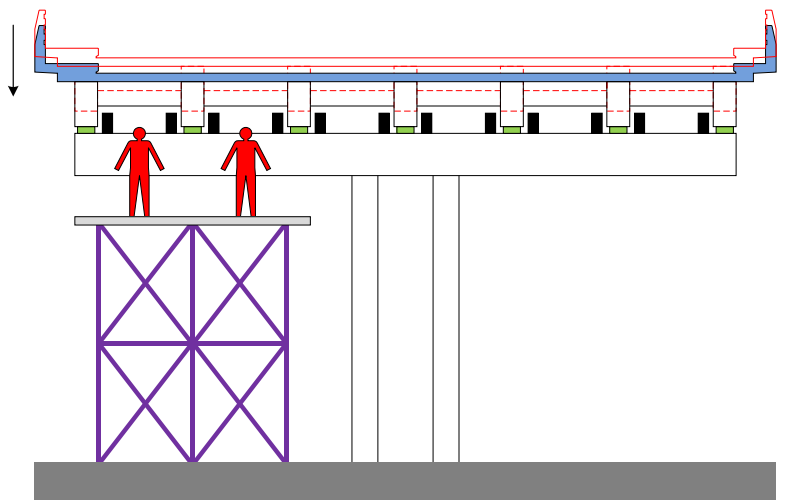
รูปที่ 2.8-10 ทำการติดตั้ง Hydraulic Jack และ Dial Gauge ในตำแหน่งที่จะทำการยกสะพาน



รูปที่ 2.8-11 ทำการยกสะพานขึ้นเป็นช่วงโดยแต่ละช่วงมีระยะยกที่ไม่มาก จนกระทั่งได้ระยะยกที่กำหนด
โดยมีการตรวจสอบค่าระยะยกจาก Dial Gauge ตลอดเวลา



รูปที่ 2.8-12 ทำการถอดแผ่นยางรองคอสพานเดิมออกและติดตั้งแผ่นยางรองคอสพานตัวใหม่เข้าไปแทน



รูปที่ 2.8-13 ทำการปลดแรงของ Hydraulic Jack ออกเพื่อให้คานหรือพื้นสะพานค่อยๆวางลงในตำแหน่งเดิม

บทที่ 3

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุยางรองคอสสะพาน

3.1 สรุปรายชื่อผลิตภัณฑ์ที่ใช้ดำเนินการทดสอบ

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดหาผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (Plain Pads) และประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Laminate) (โดยในแต่ละประเภทได้ดำเนินการจัดซื้อทั้งชนิดยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์) ที่ผลิตภายในประเทศ 8 ผลิตภัณฑ์ และที่ผลิตจากต่างประเทศ 8 ผลิตภัณฑ์ คิดเป็นจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ทางที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดซื้อทั้งสิ้น 16 ผลิตภัณฑ์ ตามตารางที่ 3.1-1 และ 3.1-2

ตารางที่ 3.1-1 สรุปรายชื่อผลิตภัณฑ์ยางรองคอสสะพานภายในประเทศ

ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดยางที่ผลิต	รายชื่อผลิตภัณฑ์
ประเภทยางล้วน (Plain Pad) ขนาดกว้าง 15 มม. ยาว 1.0 ม. ต่อชิ้น และหนา 10 มม.	ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง 1 ผลิตภัณฑ์
	ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง 1 ผลิตภัณฑ์
ประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Laminated) ขนาดกว้าง 300 มม. ยาว 400 มม. และหนา 45 มม.	ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง 1 ผลิตภัณฑ์
	ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง 1 ผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3.1-2 สรุปรายชื่อผลิตภัณฑ์ยางรองคอสสะพานจากต่างประเทศ

ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดยางที่ผลิต	รายชื่อผลิตภัณฑ์
ประเภทยางล้วน (Plain Pad) ขนาดกว้าง 15 มม. ยาว 1.0 ม. ต่อชิ้น และหนา 10 มม.	ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จากประเทศมาเลเซีย (บจก. Cakra Ulung) 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จากประเทศจีน (บจก. Jiangsu Pacific Rubber) 1 ผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3.1-2(ต่อ) สรุปรายชื่อผลิตภัณฑ์ยางรองคอสพานจากต่างประเทศ

ประเภทยางรองคอสพาน	ชนิดยางที่ผลิต	รายชื่อผลิตภัณฑ์
ประเภทยางล้วน (Plain Pad) ขนาดกว้าง 15 มม. ยาว 1.0 ม. ต่อชิ้น และหนา 10 มม.	ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จากประเทศมาเลเซีย (บจก. Cakra Ulung) 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จากประเทศจีน (บจก. Jiangsu Pacific Rubber) 1 ผลิตภัณฑ์
ประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่น เหล็ก (Laminated) ขนาดกว้าง 300 มม. ยาว 400 มม. และหนา 45 มม.	ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จากประเทศมาเลเซีย (บจก. Cakra Ulung) 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จากประเทศจีน (บจก. Jiangsu Pacific Rubber) 1 ผลิตภัณฑ์
	ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จากประเทศมาเลเซีย (บจก. Cakra Ulung) 1 ผลิตภัณฑ์
		ผลิตภัณฑ์จากประเทศจีน (บจก. Jiangsu Pacific Rubber) 1 ผลิตภัณฑ์

3.2 การทดสอบผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสพาน

ผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสพานทั้งหมดที่ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดซื้อและนำเข้าได้ถูกส่งไปดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามมาตรฐาน AASHTO และมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย โดยจัดส่งไปดำเนินการทดสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งพิจารณารายละเอียดได้จากตารางที่ 3.2-1

ตารางที่ 3.2-1 สรุปรายชื่อหน่วยงานที่ที่ปรึกษาได้จัดส่งวัสดุยางรองคอสพานไปดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม

รายการทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วยงานทดสอบ
Hardness	ASTM D2240	กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.)
Tensile Strength, Min psi. Ultimate Elongation Min %	ASTM D412	กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.)
Heat Resistance	ASTM D573	กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.)
Compression Set (Method B)	ASTM D395	กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.)
Ozone Resistance	ASTM D1149	กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.)

หมายเหตุ: การทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO อ้างอิงมาจากมาตรฐาน ASTM

ตารางที่ 3.2-1 (ต่อ) สรุปรายชื่อหน่วยงานที่ปรึกษาได้จัดส่งวัสดุยางรองคอสสะพานไปดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม

รายการทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วยงานทดสอบ
Adhesion Bond made During Vulcanization	ASTM D429	กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วศ.)
Compression Test	มอก.951-2533 ข้อ 9.10	ม.เกษตรศาสตร์ (บางเขน)
Dimension Test	มอก.951-2533 ข้อ 9.1-9.4	ม.เกษตรศาสตร์ (บางเขน)
การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุก		จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หมายเหตุ: การทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO อ้างอิงมาจากมาตรฐาน ASTM

3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมแผ่นยางรองคอสสะพาน

3.3.1 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน

การทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานได้ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.951-2533 ข้อ 9.10 โดยทำการให้แรงกดแก่แผ่นยางรองคอสสะพานสูงสุด 37.50 ตัน (ประมาณ 55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

จากตารางที่ 3.3-1 และ 3.3-2 พบว่ายางรองคอสสะพานทั้งแปดผลิตภัณฑ์นี้ถือได้ว่าเป็นการทดสอบการให้แรงกดตามมาตรฐาน มอก.951-2533 เนื่องจากไม่พบรอยแตกร้าวในเนื้อยางภายหลังจากการให้น้ำหนักกดคงค้างไว้เป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.3-1 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนที่ผลิตภายในประเทศ

ชนิดยางรองคอสสะพาน (ประเภทยางล้วน)	รายชื่อผลิตภัณฑ์	สภาพหลังการ ค้ำน้ำหนักกดไว้ เป็นเวลา 1 นาที	ค่าสถิติในสการ อัด ตัน/มม.
ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข	ไม่พบรอยแตก	4.13
	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง	ไม่พบรอยแตก	7.63
ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข	ไม่พบรอยแตก	4.22
	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง	ไม่พบรอยแตก	4.94

ตารางที่ 3.3-2 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วนที่ผลิตจากต่างประเทศ

ชนิดยางรองคอสพาน (ประเภทยางล้วน)	รายชื่อผลิตภัณฑ์	สภาพหลังการ ค้ำน้ำหนักกดไว้ เป็นเวลา 1 นาที	ค่าสตีฟเนสการ อัด ตัน/มม.
ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Cakra Ulung	ไม่พบรอยแตก	6.21
	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Jiansu Pacific Rubber	ไม่พบรอยแตก	8.70
ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Cakra Ulung	ไม่พบรอยแตก	4.04
	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Jiansu Pacific Rubber	ไม่พบรอยแตก	10.64



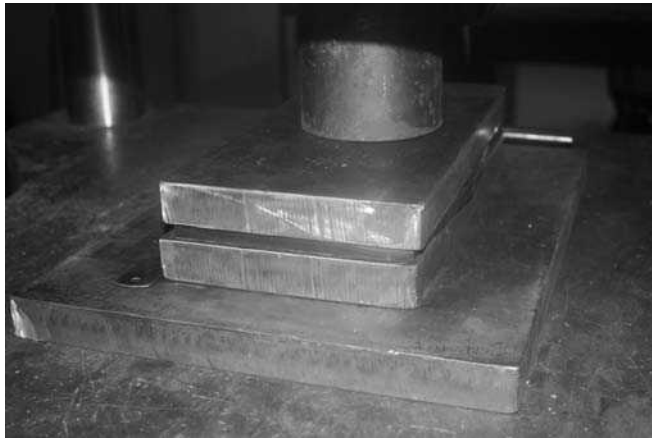
รูปที่ 3.3-1 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.วัฒนาสุข



รูปที่ 3.3-2 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.วัฒนาสุข



รูปที่ 3.3-3 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง



รูปที่ 3.3-4 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง



รูปที่ 3.3-5 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ. Cakra Ulung



รูปที่ 3.3-6 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ. Cakra Ulung



รูปที่ 3.3-7 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber



รูปที่ 3.3-8 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน
(ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber

3.3.2 ผลการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนตามมาตรฐาน AASHTO

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐาน AASHTO พิจารณาได้จากตารางที่ 3.3-3

และ 3.3-6

ตารางที่ 3.3-3 ผลการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนที่ผลิตภายในประเทศตามมาตรฐาน AASHTO (ชนิดยางธรรมชาติ)

ASTM Standard	Physical Properties	Natural Rubber Standard Property	บ. พิษิพี		บ. วัฒนาสุข	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	50+/-5	57	ไม่ผ่าน	52	ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	4196	ผ่าน	3819	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	450	591	ผ่าน	635	ผ่าน
D573	Heat Resistance					
	NR 70 hours at 158°F					
	CR 60 hours at 212°F					
	Change in Durometer	10	-0.1	ผ่าน	2	ผ่าน
	Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%	-25	-0.4	ผ่าน	2	ผ่าน
	Change in Ultimate Elongation, Max%	-25	-9	ผ่าน	-3	ผ่าน
D395	Compression Set	25	26	ไม่ผ่าน	21	ผ่าน
Method B	NR 22 hours at 158°F					
	CR 22 hours at 212°F					
D1149	Ozone Resistance	No Cracks	No Cracks	ผ่าน	No Cracks	ผ่าน
Mounting	NR 25 pphm, 20% strain,					
Procedure	100+/-2°F, 48 hours					
D518,	CR 100 pphm, 20%					
Procedure A	Strains, 100+/- 2°F, 100 hours					

ตารางที่ 3.3-4 ผลการทดสอบยางรองคอสพานประเภทยางล้วนที่ผลิตภายในประเทศตามมาตรฐาน AASHTO (ชนิดยางสังเคราะห์)

ASTM Standard	Physical Properties	Chloroprene Rubber Standard Property	บ.พีซีพี		บ.วัฒนาสุข	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	50 +/-5	49	ผ่าน	55	ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	3073	ผ่าน	2356	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	400	789	ผ่าน	500	ผ่าน
D573	Heat Resistance NR 70 hours at 158°F	15	7	ผ่าน	2	ผ่าน
	CR 60 hours at 212°F					
	Change in Durometer Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%					
	Change in Ultimate Elongation, Max%					
D395 Method B	Compression Set	35	65	ไม่ผ่าน	59	ไม่ผ่าน
	NR 22 hours at 158°F					
	CR 22 hours at 212°F					
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	Ozone Resistance NR 25 pphm, 20% strain, 100+/-2°F, 48 hours CR 100 pphm, 20% Strains, 100+/-2°F, 100 hours	No Cracks	Cracks	ไม่ผ่าน	No Cracks	ผ่าน

ตารางที่ 3.3-5 ผลการทดสอบยางรองคอสพานประเภทยางล้วนที่ผลิตจากต่างประเทศตามมาตรฐาน AASHTO (ชนิดยางธรรมชาติ)

ASTM Standard	Physical Properties	Natural Rubber Standard Property	บ. Cakra Ulang		บ. Jiangsu Pacific Rubber	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	50+/-5	68	ไม่ผ่าน	57	ไม่ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	3135	ผ่าน	2442	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	450	505	ผ่าน	572	ผ่าน
D573	Heat Resistance NR 70 hours at 158 °F CR 60 hours at 212 °F Change in Durometer	10	+1	ผ่าน	+0.03	ผ่าน
	Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%					
	Change in Ultimate Elongation, Max%					
D395 Method B	Compression Set	25	20	ผ่าน	33	ไม่ผ่าน
	NR 22 hours at 158 °F					
	CR 22 hours at 212 °F					
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	Ozone Resistance	No Cracks	No Cracks	ผ่าน	Cracks	ไม่ผ่าน
	NR 25 pphm, 20% strain,					
	100+/-2 °F, 48 hours					
	CR 100 pphm, 20% Strains, 100+/- 2 °F, 100 hours					

ตารางที่ 3.3-6 ผลการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนที่ผลิตจากต่างประเทศตามมาตรฐาน AASHTO (ชนิดยางสังเคราะห์)

ASTM Standard	Physical Properties	Chloroprene Rubber Standard Property	บ. Cakra Ulang		บ. Jiangsu Pacific Rubber	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	50 +/-5	58	ไม่ผ่าน	66	ไม่ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	3254	ผ่าน	2394	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	400	584	ผ่าน	521	ผ่าน
D573	Heat Resistance NR 70 hours at 158°F	15	-0.1	ผ่าน	+2	ผ่าน
	CR 60 hours at 212°F					
	Change in Durometer Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%					
D395 Method B	Change in Ultimate Elongation, Max%	-15	-46	ไม่ผ่าน	-6	ผ่าน
	Change in Ultimate Elongation, Max%	-40	-27	ผ่าน	-7	ผ่าน
	Compression Set NR 22 hours at 158°F	35	69	ไม่ผ่าน	49	ไม่ผ่าน
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	CR 22 hours at 212°F	No Cracks	No Cracks	ผ่าน	Cracks	ไม่ผ่าน
	Ozone Resistance NR 25 pphm, 20% strain, 100+/-2°F, 48 hours CR 100 pphm, 20% Strains, 100+/-2°F, 100 hours					

3.3.3 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

การทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานได้ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.951-2533 ข้อ 9.10 โดยทำการให้แรงกดแก่แผ่นยางรองคอสสะพานสูงสุด 100.50 ตัน (ประมาณ 83.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

จากตารางที่ 3.3-7 และ 3.3-8 พบว่ายางรองคอสสะพานของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ และผลิตภัณฑ์จากประเทศมาเลเซีย ถือได้ว่าการทดสอบการให้แรงกดตามมาตรฐาน มอก.951-2533 เนื่องจากไม่พบรอยแตกร้าวในเนื้อยางหลังจากการให้น้ำหนักกดคงค้างไว้เป็นเวลา 1 นาที ขณะที่ผลิตภัณฑ์จากประเทศจีนไม่ผ่านการทดสอบการให้แรงกดตามมาตรฐาน มอก.951-2533 ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์เนื่องจากพบรอยแตกร้าวในเนื้อยางหลังจากการให้น้ำหนักกดคงค้างไว้เป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.3-7 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตภายในประเทศ

ชนิดยางรองคอสสะพาน	รายชื่อผลิตภัณฑ์	สภาพหลังการ ค้ำน้ำหนักกดไว้ เป็นเวลา 1 นาที	ค่าความแข็ง ตัน/มม.
ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข	ไม่พบรอยแตก	48.29
	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง	ไม่พบรอยแตก	25.77
ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.วัฒนาสุข	ไม่พบรอยแตก	77.68
	ผลิตภัณฑ์จาก บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง	ไม่พบรอยแตก	23.93

ตารางที่ 3.3-8 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตจากต่างประเทศ

ชนิดยางรองคอสสะพาน	รายชื่อผลิตภัณฑ์	สภาพหลังการ ค้ำน้ำหนักกดไว้ เป็นเวลา 1 นาที	ค่าความแข็ง ตัน/มม.
ยางธรรมชาติ	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Cakra Ulung	ไม่พบรอยแตก	16.49
	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Jiansu Pacific Rubber	พบรอยแตก	30.11
ยางสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Cakra Ulung	ไม่พบรอยแตก	16.75
	ผลิตภัณฑ์จาก บ. Jiansu Pacific Rubber	พบรอยแตก	41.55

3.3.4 ผลการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ตามมาตรฐาน AASHTO

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางรองคอสสะพานตามมาตรฐาน AASHTO พิจารณาได้จากตารางที่ 3.3-5

และ 3.3-6

ตารางที่ 3.3-9 ผลการทดสอบยางรองคอสพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตภายในประเทศตามมาตรฐาน AASHTO
(ชนิดยางธรรมชาติ)

ASTM Standard	Physical Properties	Natural Rubber Standard Property	บ. พิษิพี		บ. วัฒนาสูช	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	60+/-5	59	ผ่าน	59	ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	3025	ผ่าน	3023	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	400	431	ผ่าน	440	ผ่าน
D573	Heat Resistance					
	NR 70 hours at 158 °F					
	CR 60 hours at 212 °F					
	Change in Durometer	10	1.9	ผ่าน	5.5	ผ่าน
	Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%	-25	-7.9	ผ่าน	2.9	ผ่าน
	Change in Ultimate Elongation, Max%	-25	-2.9	ผ่าน	-1.2	ผ่าน
D395 Method B	Compression Set	25	21	ผ่าน	17	ผ่าน
	NR 22 hours at 158 °F					
	CR 22 hours at 212 °F					
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	Ozone Resistance	No Cracks	No Cracks	ผ่าน	No Cracks	ผ่าน
	NR 25 pphm, 20% strain,					
	100+/-2 °F, 48 hours					
	CR 100 pphm, 20%					
	Strains, 100+/- 2 °F, 100 hours					
D429	Adhesion Bond made During Vulcanization lbs/inch.	40	31	ไม่ผ่าน	51	ผ่าน

ตารางที่ 3.3-10 ผลการทดสอบยางรองคอสพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตภายในประเทศตามมาตรฐาน AASHTO
(ชนิดยางสังเคราะห์)

ASTM Standard	Physical Properties	Chloroprene Rubber Standard Property	บ.พีซีพี		บ.วัฒนาสุข	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	60+/-5	62	ผ่าน	58	ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	2590	ผ่าน	2819	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	350	646	ผ่าน	498	ผ่าน
D573	Heat Resistance					
	NR 70 hours at 158°F					
	CR 60 hours at 212°F					
	Change in Durometer	15	5.4	ผ่าน	4.2	ผ่าน
	Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%	-15	-8.3	ผ่าน	-8.8	ผ่าน
	Change in Ultimate Elongation, Max%	-40	-14.5	ผ่าน	-18.4	ผ่าน
D395 Method B	Compression Set	35	65	ไม่ผ่าน	70	ไม่ผ่าน
	NR 22 hours at 158°F					
	CR 22 hours at 212°F					
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	Ozone Resistance	No Cracks	Cracks	ไม่ผ่าน	No Cracks	ผ่าน
	NR 25 pphm, 20% strain,					
	100+/-2°F, 48 hours					
	CR 100 pphm, 20%					
	Strains, 100+/-2°F,					
	100 hours					
D429	Adhesion Bond made During Vulcanization lbs/inch.	40	95	ผ่าน	75	ผ่าน

ตารางที่ 3.3-11 ผลการทดสอบยางรองคอสพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตจากต่างประเทศตามมาตรฐาน AASHTO
(ชนิดยางธรรมชาติ)

ASTM Standard	Physical Properties	Natural Rubber Standard Property	บ. Cakra Ulang		บ. Jiangsu Pacific Rubber	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	60+/-5	63	ผ่าน	61	ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	2829	ผ่าน	3985	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	400	520	ผ่าน	539	ผ่าน
D573	Heat Resistance					
	NR 70 hours at 158 °F					
	CR 60 hours at 212 °F					
	Change in Durometer	10	+1	ผ่าน	+1	ผ่าน
	Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%	-25	-4	ผ่าน	-52	ไม่ผ่าน
	Change in Ultimate Elongation, Max%	-25	-3	ผ่าน	-57	ไม่ผ่าน
D395 Method B	Compression Set	25	23	ผ่าน	22	ผ่าน
	NR 22 hours at 158 °F					
	CR 22 hours at 212 °F					
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	Ozone Resistance	No Cracks	No Cracks	ผ่าน	Cracks	ไม่ผ่าน
	NR 25 pphm, 20% strain,					
	100+/-2 °F, 48 hours					
	CR 100 pphm, 20%					
	Strains, 100+/- 2 °F, 100 hours					
D429	Adhesion Bond made During Vulcanization lbs/inch.	40	129	ผ่าน	11	ไม่ผ่าน

ตารางที่ 3.3-12 ผลการทดสอบยางรองคอสพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตจากต่างประเทศตามมาตรฐาน AASHTO
(ชนิดยางสังเคราะห์)

ASTM Standard	Physical Properties	Chloroprene Rubber Standard Property	บ. Cakra Ulang		บ. Jiangsu Pacific Rubber	
			ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าการทดสอบ	ผลการทดสอบ
D2240	Hardness (Shore A Durometer)	60 +/-5	59	ผ่าน	71	ไม่ผ่าน
D412	Tensile Strength, Min psi.	2250	2173	ไม่ผ่าน	2409	ผ่าน
	Ultimate Elongation Min %	350	304	ไม่ผ่าน	382	ผ่าน
D573	Heat Resistance					
	NR 70 hours at 158°F					
	CR 60 hours at 212°F					
	Change in Durometer	15	+2	ผ่าน	+3	ผ่าน
	Hardness, max points					
	Change in Tensile Strength, Max%	-15	-2	ผ่าน	+4	ผ่าน
	Change in Ultimate Elongation, Max%	-40	+2	ผ่าน	-2	ผ่าน
D395 Method B	Compression Set	35	31	ผ่าน	85	ไม่ผ่าน
	NR 22 hours at 158°F					
	CR 22 hours at 212°F					
D1149 Mounting Procedure D518, Procedure A	Ozone Resistance	No Cracks	No Cracks	ผ่าน	No Cracks	ผ่าน
	NR 25 pphm, 20% strain,					
	100 +/- 2°F, 48 hours					
	CR 100 pphm, 20%					
	Strains, 100 +/- 2°F,					
	100 hours					
D429	Adhesion Bond made During Vulcanization lbs/inch.	40	37	ไม่ผ่าน	49	ผ่าน



รูปที่ 3.3-9 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภท
เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.วัฒนาสุข



รูปที่ 3.3-10 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภท
เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.วัฒนาสุข



รูปที่ 3.3-11 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภท
เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง



รูปที่ 3.3-12 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภท
เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง



รูปที่ 3.3-13 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภท
เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ. Cakra Ulung



รูปที่ 3.3-14 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภท
เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ. Cakra Ulung



รูปที่ 3.3-15 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภท

เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ.Jiangsu Pacific Rubber



รูปที่ 3.3-16 การทดสอบ Compression Test ของแผ่นยางรองคอสพานประเภท

เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก(ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ.Jiangsu Pacific Rubber

3.4 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

3.4.1 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน

- 1) แผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วนของบริษัท พีซีพี เอ็นจิเนียริง จำกัด ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ทั้งชนิดยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ (ยางธรรมชาติไม่ผ่านการทดสอบการเสียรูปหลังการกด ส่วนยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบการเสียรูปหลังการกด และการทดสอบความต้านทานโอโซน)
- 2) แผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วนของบริษัท วัฒนาสุข จำกัด ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ชนิดยางธรรมชาติเพียงชนิดเดียว ขณะที่ชนิดยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบในส่วนของการเสียรูปหลังการกด
- 3) แผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วนจากประเทศมาเลเซีย (บริษัท Cakra Ulung) ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ยางธรรมชาติไม่ผ่านการทดสอบค่า

- ความแข็ง ส่วนยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบค่าความแข็ง ความต้านทานความร้อน และการเสียรูปหลังการกด)
- 4) แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนจากประเทศจีน (บริษัท Jiangsu Pacific Rubber) ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบค่าความแข็ง การเสียรูปหลังการกด และความต้านทานโอโซน)
 - 5) แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนที่ผลิตภายในประเทศจะให้ค่าสตีฟเนสการอัด (Compression Stiffness) ที่ต่ำกว่ายางที่ผลิตจากต่างประเทศ
 - 6) เมื่อเปรียบเทียบค่าสตีฟเนสการอัด (Compression Stiffness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนชนิดยางธรรมชาติกับชนิดยางสังเคราะห์พบว่าค่าสตีฟเนสการอัดของยางรองคอสสะพานชนิดยางธรรมชาติจะมีค่าสูงกว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบทั้งผลิตภัณฑ์ภายในประเทศและผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ
 - 7) เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง (Load) และค่าการเสียรูป (Displacement) ที่ได้จากการทดสอบแรงกด (พิจารณาจากภาคผนวก ก) จะพบว่าพฤติกรรมการรับแรงอัดของยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนทั้งชนิดยางธรรมชาติและชนิดยางสังเคราะห์มีพฤติกรรมแบบ Hardening ซึ่งหมายความว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงอัด มีค่าแปรผันกับการเสียรูปในทิศทางเดียวกับแรงกระทำ

3.4.2 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

- 1) แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กของบริษัท พีซีพี เอ็นจิเนียริง จำกัด ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ยางธรรมชาติไม่ผ่านการทดสอบแรงยืดเหนียวเนื่องจากกระบวนการ Vulcanization ส่วนยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบการเสียรูปหลังการกด และการทดสอบความต้านทานโอโซน)
- 2) แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กของบริษัท วัฒนาสุข จำกัด ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ชนิดยางล้วนเพียงชนิดเดียว ขณะที่ชนิดยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบในส่วนของการเสียรูปหลังการกด
- 3) แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กชนิดยางธรรมชาติจากประเทศมาเลเซีย (บริษัท Cakra Ulung) ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ขณะที่ชนิดยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว (ไม่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงดึง และการทดสอบแรงยืดเหนียว)
- 4) แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนจากประเทศจีน (บริษัท Jiangsu Pacific Rubber) ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ทั้งยางธรรมชาติไม่ผ่านการทดสอบการต้านทานความร้อน การต้านทานโอโซน และการทดสอบแรงยืดเหนียว และยางสังเคราะห์ไม่ผ่านการทดสอบค่าความแข็ง และการเสียรูปหลังการกด)

- 5) เมื่อพิจารณาค่าสติฟเนสการอัด (Compression Stiffness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน มอก.951-2533 และพบว่ายางรองคอสสะพานที่ผลิตภายในประเทศจะมีค่าสติฟเนสการอัดที่สูงกว่า
- 6) เมื่อเปรียบเทียบค่าสติฟเนสการอัด (Compression Stiffness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตภายในประเทศพบว่าผลิตภัณฑ์ของบริษัท พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด มีค่าสติฟเนสการอัดที่ไม่แตกต่างกันนักทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ขณะที่ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติของบริษัท วัฒนาสุข จำกัด จะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่ายางสังเคราะห์
- 7) เมื่อเปรียบเทียบค่าสติฟเนสการอัด (Compression Stiffness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ผลิตจากต่างประเทศพบว่าผลิตภัณฑ์ของบริษัท Cakra Ulung มีค่าสติฟเนสการอัดที่ไม่แตกต่างกันนักทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ขณะที่ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติของบริษัท Jiansu Pacific Rubber จะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่ายางสังเคราะห์
- 8) เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง (Load) และค่าการเสียรูป (Displacement) ในภาคผนวก ก จะพบว่าพฤติกรรมการรับแรงอัดของยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กทั้งชนิดยางธรรมชาติและชนิดยางสังเคราะห์มีพฤติกรรมแบบ Hardening ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงอัด มีค่าแปรผันกับการเสียรูปในทิศทางเดียวกับแรงกระทำ

3.4.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบบนพื้นฐานข้อมูลอันจำกัดที่ได้นำมาทดสอบในโครงการนี้ แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติเชิงกลและเชิงเคมีโดยทั่วไปของแผ่นยางรองคอสสะพานที่นำมาใช้กับสะพานนั้น อาจจะไม่มีความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น สิ่งที่กรมทางหลวงควรจะต้องพิจารณาดำเนินการเป็นมาตรการในอนาคต คือ การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ทั้งจากตัวอย่างแผ่นยางรองคอสสะพานที่ได้นำมาทดสอบจากโรงงานผู้ผลิตและจากตัวอย่างที่ได้เสนอใช้งานจริงในการติดตั้งแผ่นยางรองคอสสะพานที่ภาคสนาม ควรจะต้องควบคุมคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนด โดยแนวทางที่กรมทางหลวงสามารถดำเนินการได้ มีดังนี้

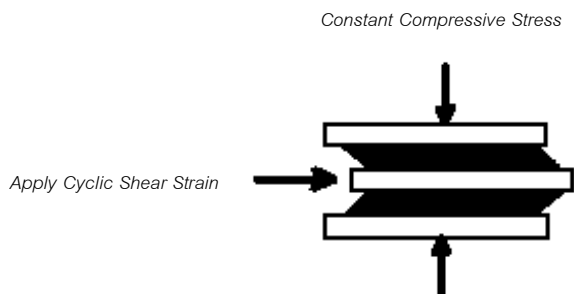
- รวบรวมรายชื่อผลิตภัณฑ์และโรงงานผู้ผลิตแผ่นยางรองคอสสะพานที่มักจะถูกเสนอใช้ในการติดตั้งแผ่นยางรองคอสสะพานให้กับกรมทางหลวง และจัดเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวงเข้าสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์เป็นประจำอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ โดยอาจจะไปสุ่มชักตัวอย่างเพื่อทดสอบและควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ทุก ๆ 3 เดือน
- หากโรงงานผู้ผลิตแผ่นยางรองคอสสะพานได้รับการรับรองคุณภาพการผลิตตามมาตรฐาน ISO น่าจะเป็นการมั่นใจได้ถึงคุณภาพที่สม่ำเสมอของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ได้จากโรงงานดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 4

การทดสอบวัสดุแผ่นยางรองคอสะพานภายใต้น้ำหนัก บรรทุกและการประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรอง คอสะพาน

4.1 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุยางรองคอสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก

การศึกษาในครั้งนี้จะนำแผ่นยางที่ผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการกำกับโครงการมาดำเนินการทดสอบทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกซึ่งมีน้ำหนักคงที่กระทำในแนวดิ่ง โดยนำแผ่นยางรองคอสะพานมาทำการทดสอบการให้แรงเฉือนตรงแบบกระทำซ้ำหรือที่เรียกว่าการทดสอบความล้า (Fatigue Test) ที่ความถี่ 1.0 เฮิร์ต สำหรับยางรองคอสะพานชนิดยางล้วน และ 1.0 เฮิร์ต สำหรับยางรองคอสะพานชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยระหว่างการทดสอบต้องควบคุมหน่วยแรงอัดในแนวดิ่ง (Vertical Compressive Stress) ให้มีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4.1-1



รูปที่ 4.1-1 การทดสอบ Shear Fatigue Test แผ่นยางรองคอสะพาน

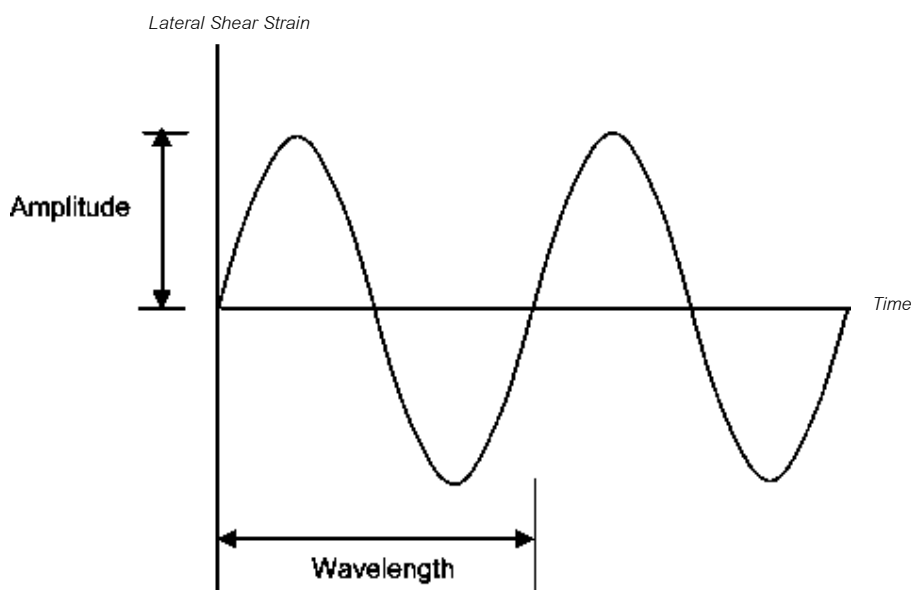
ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงอัดในแนวดิ่งพิจารณาจากค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่กระทำกับแผ่นยางรองคอสะพานช่วงสั้นไม่เกิน 20 เมตรเท่ากับ 3.45 MPa ดังตารางที่ 4.1-1

ตารางที่ 4.1-1 ค่าหน่วยแรงอัดแนวตั้งที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดแผ่นยางรองคอสสะพาน	หน่วยแรงอัดในแนวตั้งระหว่างการทดสอบ (MPa)	ความถี่ (เฮิร์ต)
ยางล้วน	3.45	0.5
ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	3.45	0.5

4.1.1 การควบคุมความเครียดเฉือนระหว่างการทดสอบความล้าของแผ่นยางรองคอสสะพาน

เนื่องจากการทดสอบความล้าโดยทั่วไปแล้วสามารถควบคุมได้ทั้งค่าหน่วยแรงหรือความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยการศึกษาในครั้งนี้นำทางที่ปรึกษาได้พิจารณาการทดสอบแบบควบคุมความเครียดเฉือนแบบ Pure Shear ทำการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละผลิตภัณฑ์โดยควบคุมให้เกิดค่าโมดูลัสเฉือนที่ $\pm 50\%$ Shear Strain ของแต่ละขั้นการทดสอบ และดำเนินการทดสอบจนกระทั่งขั้นตัวอย่างเกิดการวิบัติ (สังเกตได้จากรอยร้าว หรือรอยแตกที่เกิดขึ้นของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ดำเนินการทดสอบ หรือเมื่อถึง 20,000 รอบจึงจะหยุดการทดสอบ) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนที่ให้แก่แผ่นยางรองคอสสะพานกับเวลาขณะดำเนินการทดสอบได้จากรูปที่ 4.1-1



รูปที่ 4.1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพาน

4.1.2 การตรวจสอบค่าความแข็งของยาง

ช่วงก่อนเริ่มและหลังการทดสอบได้ดำเนินการตรวจสอบค่าความแข็งของยางตามมาตรฐาน ASTM D2240 (Durometer Shore A)

4.1.3 ขนาดและจำนวนแผ่นยางที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดและจำนวนแผ่นยางรองคอสสะพานที่ผู้ดำเนินการทดสอบจะต้องจัดเตรียมในการทดสอบต่อหนึ่งค่าการประยุกต์แรงเฉือนตามตารางที่ 4.1-2 และชุดเครื่องมือทดสอบดังรูปที่ 4.1-2

ตารางที่ 4.1-2 ขนาดและจำนวนชั้นยางที่ใช้ในการทดสอบต่อหนึ่งค่าการประยุกต์แรงเฉือน

ชนิด	ขนาด (กว้าง*ยาว*สูง) มม./ชั้น	จำนวนชั้นยางที่ใช้ทดสอบต่อหนึ่งค่าการประยุกต์แรงเฉือน
ยางล้วน (Plain Pad)	150×400×10	2 ชั้น
ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Laminated)	300×400×45	

4.2 การจัดเตรียมชุดเครื่องมือทดสอบ

การทดสอบวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกในครั้งนี้ ได้ดำเนินการทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.สระบุรี โดยใช้เครื่องมือประยุกต์แรงเฉือนที่เรียกว่า Hydraulic Actuator ที่สามารถประยุกต์แรงให้กับชิ้นตัวอย่างได้สูงสุดที่ 500 kN (รายละเอียดพิจารณาจากตารางที่ 4.1-3)

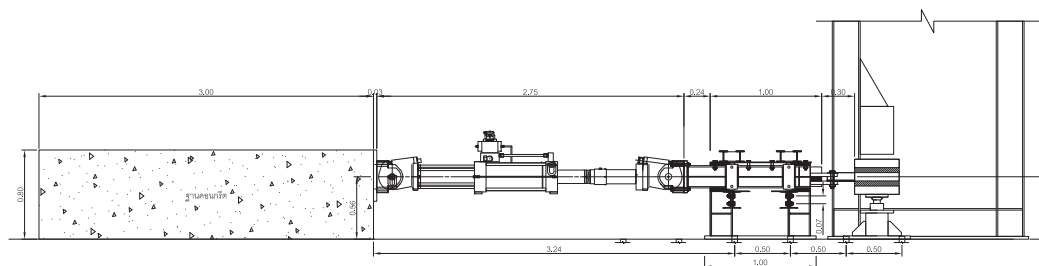
ตารางที่ 4.1-3 ลักษณะและความสามารถของ Hydraulic Actuator

Hydraulic Actuator	
Model Number	3.45
Serial Number	10348953
Assembly Number	100-211-845
Force	500 kN
Static Stroke	508 mm
Dynamic Stroke	508 mm



รูปที่ 4.2-1 เครื่อง hydraulic Actuator ขนาด 500 kN ที่ใช้ทดสอบ shear fatigue test

นอกจากนี้ทางที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดทำและออกแบบชุดเครื่องมือเพื่อประกอบเข้ากับ Hydraulic Actuator เพื่อที่จะทำให้สามารถดำเนินการทดสอบแรงเฉือนตรงแบบกระทำซ้ำแก่แผ่นยางรองคอสพานได้อย่างสมบูรณ์

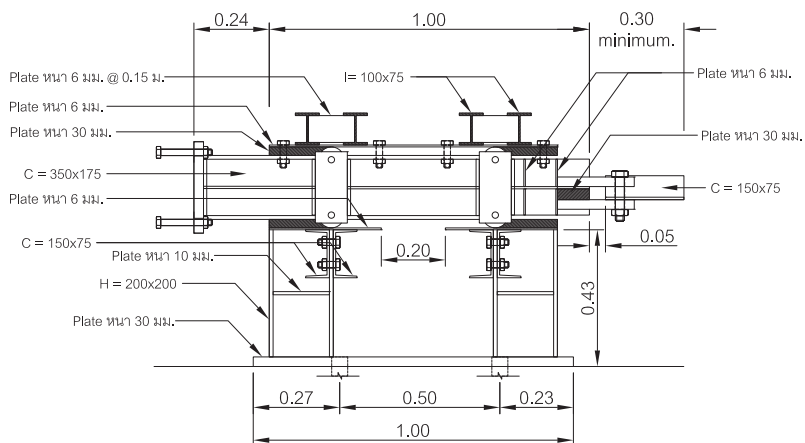


รูปที่ 4.2-2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการประยุกต์แรงเฉือนให้กับแผ่นยางรองคอสพาน

จากรูปที่ 5-2 สามารถแบ่งชุดทดสอบที่ทางที่ปรึกษาได้จัดทำขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมทิศทางแรง และส่วนควบคุมระนาบแรงเฉือน (Arm Link)

ส่วนควบคุมทิศทางของแรง

ส่วนควบคุมทิศทางแรงเฉือนนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ป้องกันการเคลื่อนที่ของหัว Hydraulic Actuator ให้ออกแรงกระทำกับแท่นทดสอบขึ้นทดสอบได้โดยตรงโดยปราศจากการเกิดโมเมนต์ โดยชุดควบคุมนี้ได้ออกแบบโดยใช้เหล็กรูปพรรณ H-Beam เป็นส่วนโครงสร้างหลักที่ใช้ในการส่งถ่ายแรงกระทำแบบวัฏจักรจาก Actuator ไปยังขึ้นทดสอบ ซึ่งเหล็กรูปพรรณ H-Beam จะถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้เพียงเฉพาะทิศทางของแรงเฉือนเท่านั้น (พิจารณาจากรูปที่ 4.2-3)



รูปที่ 4.2-3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการประยุกต์แรงเฉือนให้กับแผ่นยางรองคอสสะพาน

ส่วนควบคุมระนาบแรงเฉือน (Arm Link)

ส่วนควบคุมระนาบแรงเฉือนนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการควบคุมระนาบการเคลื่อนที่ของตัวอย่างยางรองคอสสะพานให้เคลื่อนที่ได้สอดคล้องกับแนวแรงเฉือนที่กระทำ ซึ่งชุดเครื่องมือนี้จะประกอบด้วยแผ่น Plate 3 แผ่น ได้แก่ Plate ตัวบน ตัวกลาง และตัวล่าง โดยชุด Plate ตัวล่างจะยึดติดกับกับ Hydraulic Ram Capacity 100 ตัน ส่วน Plate กลางเป็นชิ้นส่วนที่ใช้ควบคุมระนาบการเฉือนให้สอดคล้องกับทิศทางแรงเฉือนที่กระทำ ทั้งนี้ระนาบของ Plate ส่วนที่สัมผัสกับยางรองคอสสะพานเป็นผิวคอนกรีตหยาบ (พิจารณาจากรูปที่ 4.2-4)



รูปที่ 4.2-4 ชุดควบคุมระนาบแรงเฉือน (arm link)

เมื่อนำชุดเครื่องมือทั้ง 2 ส่วนมาประกอบเข้ากับเครื่อง Hydraulic Actuator จะทำให้ได้ชุดเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบยางรองคอสสะพานภายใต้สภาวะการให้แรงแบบวัฏจักรดังรูปที่ 4.2-5



รูปที่ 4.2-5 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการประยุกต์แรงเฉือนให้กับแผ่นยางรองคอสสะพาน

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุยางรองคอสสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก

4.3.1 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.วัฒนาสุข

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.วัฒนาสุข สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 51.3 เหลือ 48.6 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-1)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.61 MPa แต่ภายหลังที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.65 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-2)
3. หลังการทดสอบแผ่นยางทดสอบมีการขยายตัวออกทางด้านข้างประมาณ 1 เซนติเมตร และไม่พบความเสียหายตลอดความหนาของยางรองคอสสะพาน

ตารางที่ 4.3-1 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

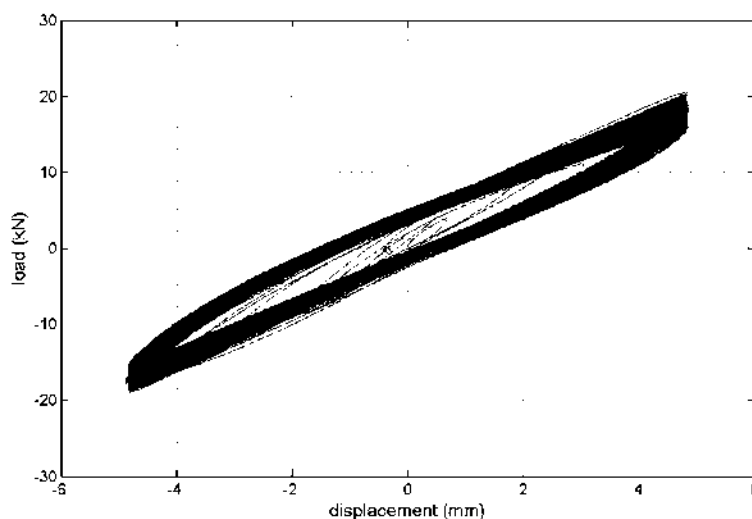
(ยางล้วน (NC) บจก.วัฒนาสุข)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	51.6	51.0	51.3
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	49.2	48	48.6

ตารางที่ 4.3-2 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (NC) บจก.วัฒนาสุข)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.61
10,000 รอบ	0.61
20,000 รอบ	0.65



รูปที่ 4.3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางล้วน (NC) บจก.วัฒนาสุข)

4.3.2 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.วัฒนาสุข

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.วัฒนาสุข สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 52.4 เหลือ 49.1

(พิจารณาจากตารางที่ 4.3-3)

- ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.87 MPa แต่ภายหลังที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.83 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-4)
- หลังการทดสอบแผ่นยางมีการขยายตัวออกทางด้านข้างประมาณ 1 เซนติเมตร เกิดความเสียหายบริเวณผิวหน้ายาง แต่ไม่พบความเสียหายตลอดความหนาของยางรองคอสสะพาน

ตารางที่ 4.3-3 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

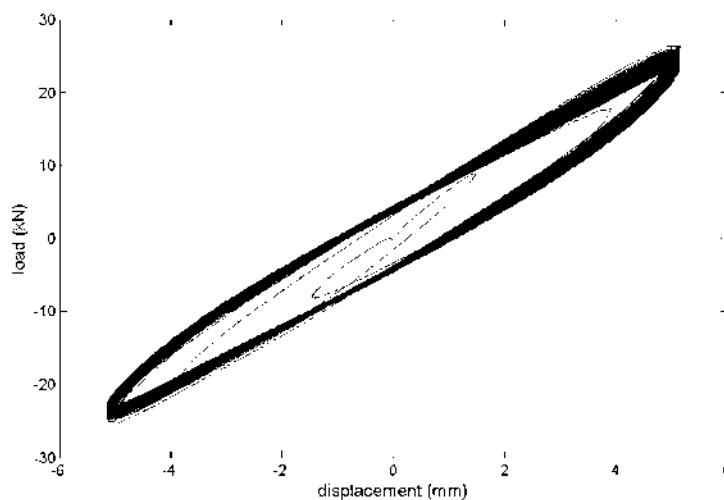
(ยางล้วน (CR) บจก.วัฒนาสุข)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	53.8	51.0	52.4
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	50.2	48	49.1

ตารางที่ 4.3-4 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (CR) บจก.วัฒนาสุข)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.87
10,000 รอบ	0.85
20,000 รอบ	0.83



รูปที่ 4.3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (CR) บจก.วัฒนาสุข)

4.3.3 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียรริ่ง

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียรริ่ง สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 52.8 เหลือ 51.8 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-5)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.62 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลง และกลับมาสูงขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.62 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-6)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

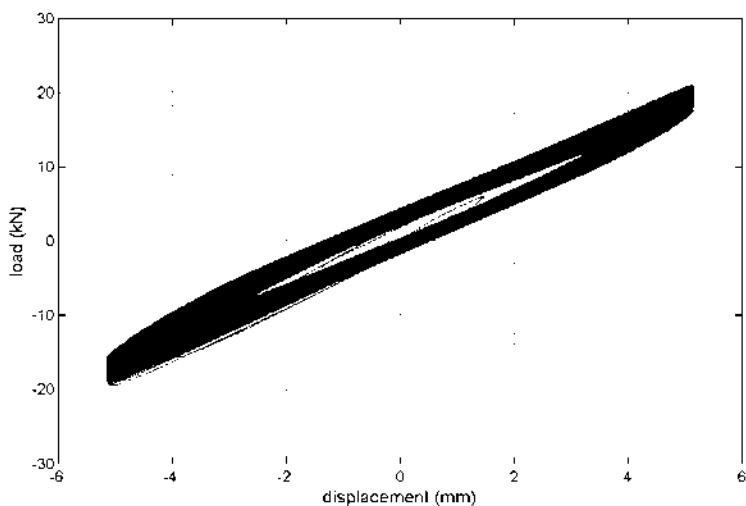
ตารางที่ 4.3-5 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (NR) บจก.พีซีพี)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	52.4	53.2	52.8
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	51.2	52.4	51.8

ตารางที่ 4.3-6 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (NR) บจก.พีซีพี)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.62
10,000 รอบ	0.64
20,000 รอบ	0.62



รูปที่ 4.3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (NR) บจก.พีซีพี)

4.3.4 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง สรุปผลได้ดังนี้

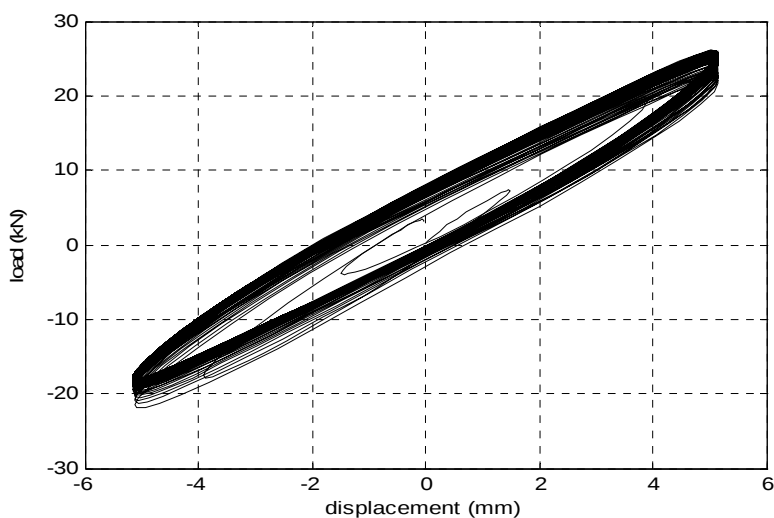
1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 53.0 เหลือ 49.3 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-7)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.72 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.73 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-8)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3-7 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (CR) บจก.พีซีพี)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	53.2	52.8	53.0
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	48.4	50.2	49.3

ตารางที่ 4.3-8 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ
(ยางล้วน (CR) บจก.พีซีที)

จำนวนรอบการ ทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.72
10,000 รอบ	0.73
20,000 รอบ	0.73



รูปที่ 4.3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test
(ยางล้วน (CR) บจก.พีซีที)

4.3.5 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber Co.,Ltd

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber Co.,Ltd สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 57.5 เหลือ 51.8 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-9)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.61 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้น และกลับลดลงขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.61 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-10)

3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

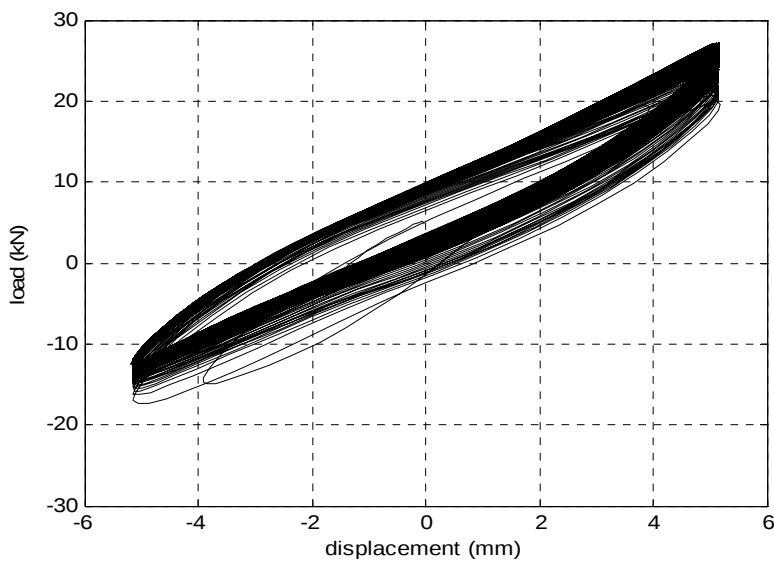
ตารางที่ 4.3-9 ค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (NR) 1.Jiangsu)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งเฉลี่ย
ค่าความแข็งเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	56.8	58.2	57.5
ค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการทดสอบ	51.0	52.6	51.8

ตารางที่ 4.3-10 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (NR) 1.Jiangsu)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.61
10,000 รอบ	0.64
20,000 รอบ	0.61



รูปที่ 4.3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (CR) 1.Jiangsu)

4.3.6 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber Co.,Ltd

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber Co.,Ltd สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 66.0 เหลือ 55.8 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-11)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.61 MPa แต่ภายหลังที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลง และกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.94 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-12)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

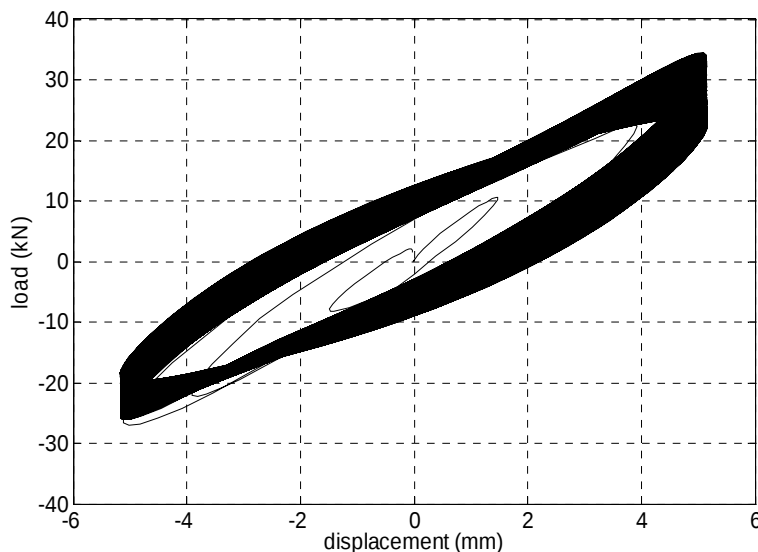
ตารางที่ 4.3-11 ค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test (ยางล้วน (NR) บ. Jiangsu)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งเฉลี่ย
ค่าความแข็งเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	66.0	66.0	66.0
ค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการทดสอบ	50.0	61.6	55.8

ตารางที่ 4.3-12 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (NR) บ. Jiangsu)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.98
10,000 รอบ	0.89
20,000 รอบ	0.94



รูปที่ 4.3-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test
(ยางล้วน (CR) บ. Jiangsu)

4.3.7 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บ. Cakra Ulung

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บ. Cakra Ulung สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 61.8 เหลือ 59.1 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-13)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.06 MPa แต่ภายหลังจากที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลง และกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 1.06 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-14)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3-13 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

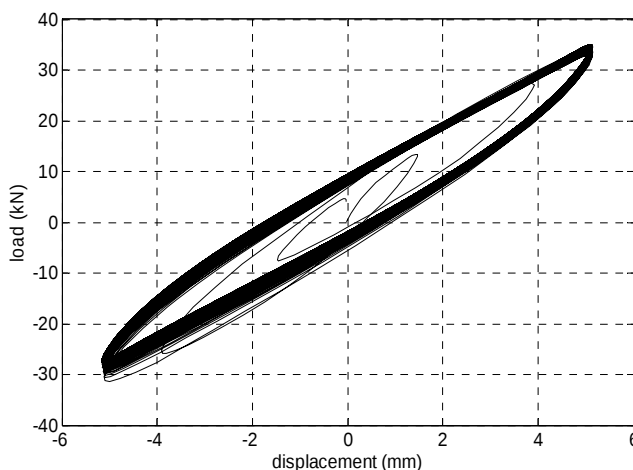
(ยางล้วน (NR) บ. Cakra Uluung)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	62.6	61.0	61.8
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	59.2	59.0	59.1

ตารางที่ 4.3-14 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (NR) บ. Cakra Uluung)

จำนวนรอบการ ทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.06
10,000 รอบ	1.05
20,000 รอบ	1.06



รูปที่ 4.3-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางล้วน (NR) บ. Cakra Uluung)

4.3.8 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บ. Cakra Ulung

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ. Cakra Ulung สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 54.1 เหลือ 52.6 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-15)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.85 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.77 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-16)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3-15 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

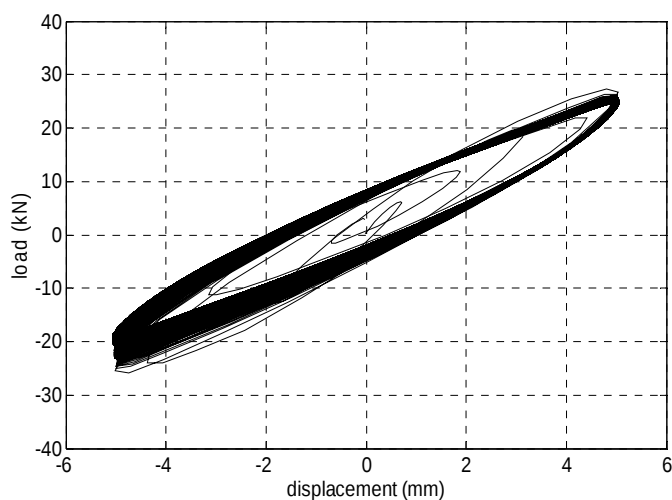
(ยางล้วน (CR) บ. Cakra Uluung)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	54.2	54.0	54.1
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	52.8	52.4	52.6

ตารางที่ 4.3-16 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางล้วน (CR) บ. Cakra Uluung)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	0.85
10,000 รอบ	0.77
20,000 รอบ	0.77



รูปที่ 4.3-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางล้วน (CR) บ. Cakra Uluung)

4.3.9 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บจก.วัฒนาสุข

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.วัฒนาสุข สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 62.7 เหลือ 51.7 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-17)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.14 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.79 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-18)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3-17 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

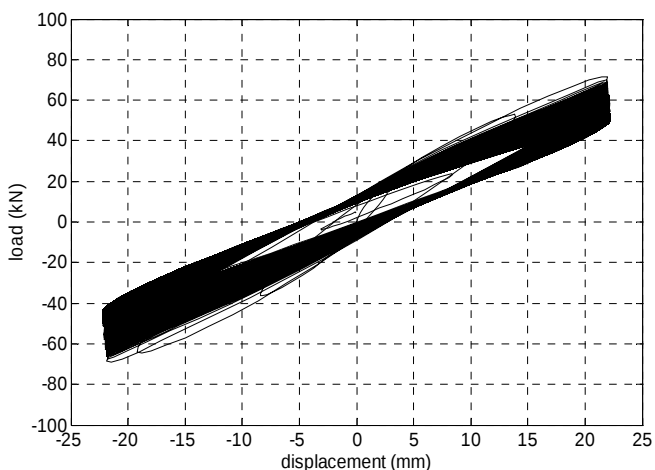
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บจก.วัฒนาสุข)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	63	62.4	62.7
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	48	55.4	51.7

ตารางที่ 4.3-18 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บจก.วัฒนาสุข)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.14
10,000 รอบ	0.79
20,000 รอบ	0.79



รูปที่ 4.3-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บจก.วัฒนาสุข)

4.3.10 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บจก.วัฒนาสุข

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.วัฒนาสุข สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 57.0 เหลือ 57.4 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-19)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.29 MPa แต่ภายหลังที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงและกลับมามีค่าสูงขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.94 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-20)
3. เกิดการวิบัติที่จำนวนรอบที่ 20,000

ตารางที่ 4.3-19 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

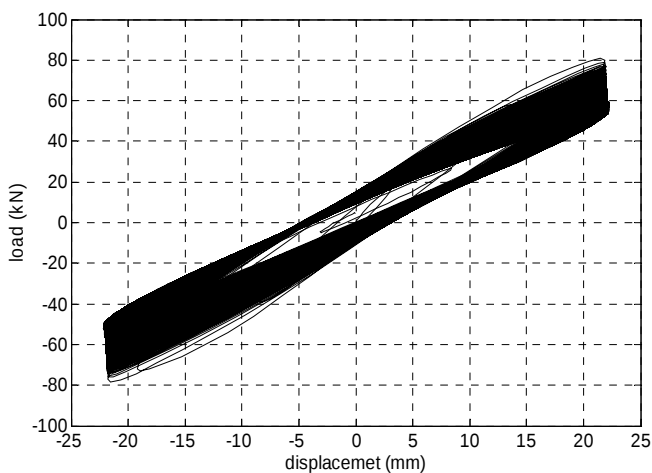
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บจก.วัฒนาสุข)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	56.8	57.2	57.0
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	57.2	57.6	57.4

ตารางที่ 4.3-20 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บจก.วัฒนาสุข)

จำนวนรอบการ ทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.29
10,000 รอบ	0.92
20,000 รอบ	0.94



รูปที่ 4.3-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บจก.วัฒนาสุข)

4.3.11 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บจก.พีซีพี

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บจก.พีซีพี สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 58.7 เหลือ 54.1 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-21)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.24 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.91 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-22)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3-21 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

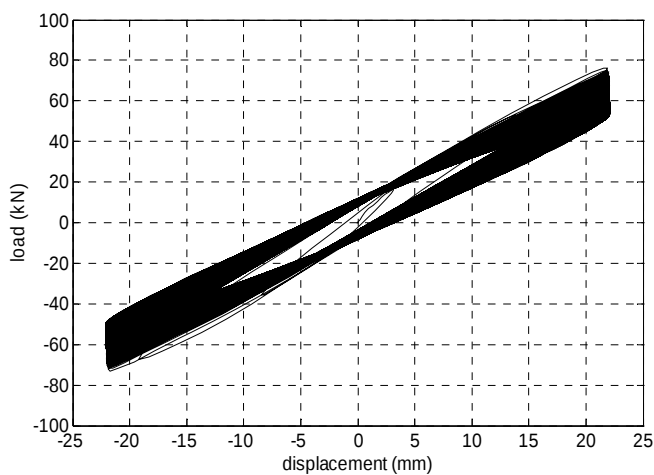
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บจก.วัฒนาสุข)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	59.6	57.8	58.7
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	54.2	54.0	54.1

ตารางที่ 4.3-22 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บจก.พีซีพี)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.24
10,000 รอบ	0.93
20,000 รอบ	0.91



รูปที่ 4.3-11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บจก.พีซีพี)

4.3.12 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บจก.พีซีพี

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บจก.พีซีพี สรุปผลได้ดังนี้

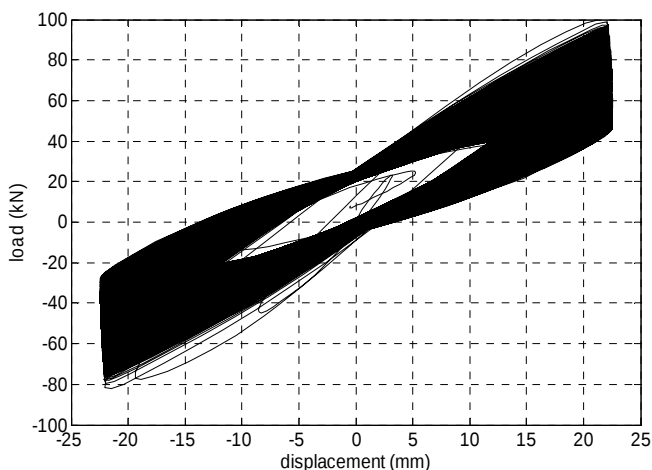
1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 64.0 เหลือ 54.6 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-23)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.44 MPa แต่ภายหลังจากที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.64 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 6,200 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-24)
3. เกิดการวิบัติที่จำนวนรอบที่ 4,400

ตารางที่ 4.3-23 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บจก.พีซีพี)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	64.2	63.8	64.0
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	59.6	49.6	54.6

ตารางที่ 4.3-24 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บจก.พีซีพี)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.44
6,200 รอบ	0.64
20,000 รอบ	-



รูปที่ 4.3-12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บจก.พีซีที)

4.3.13 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber Co.,Ltd

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก
(ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 57.8 เหลือ 52.0
(พิจารณาจากตารางที่ 4.3-25)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.0 MPa
แต่ภายหลังที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมี
แนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.85 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 2,400 รอบ (พิจารณาจาก
ตารางที่ 4.3-26)
3. เกิดการวิบัติที่จำนวนรอบที่ 2,000

ตารางที่ 4.3-25 ค่าความแข็งของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

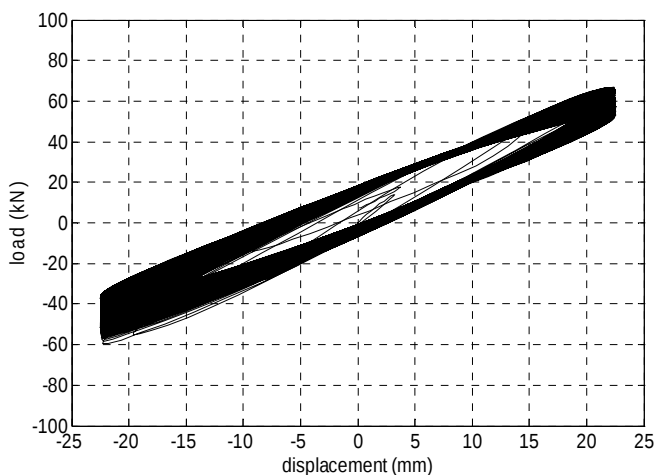
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บ. Jiangsu)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งเฉลี่ย
ค่าความแข็งเฉลี่ยก่อน การทดสอบ	56.8	58.8	57.8
ค่าความแข็งเฉลี่ยหลัง การทดสอบ	50.4	53.6	52.0

ตารางที่ 4.3-26 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บ. Jiangsu)

จำนวนรอบการ ทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.0
2,400 รอบ	0.85
20,000 รอบ	-



รูปที่ 4.3-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บ. Jiangsu)

4.3.14 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber Co.,Ltd

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ. Jiangsu Pacific Rubber สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 57.9 เหลือ 52.2 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-27)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.5 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.53 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 200 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-28)
3. พบการวิบัติที่จำนวนรอบที่ 95

ตารางที่ 4.3-27 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

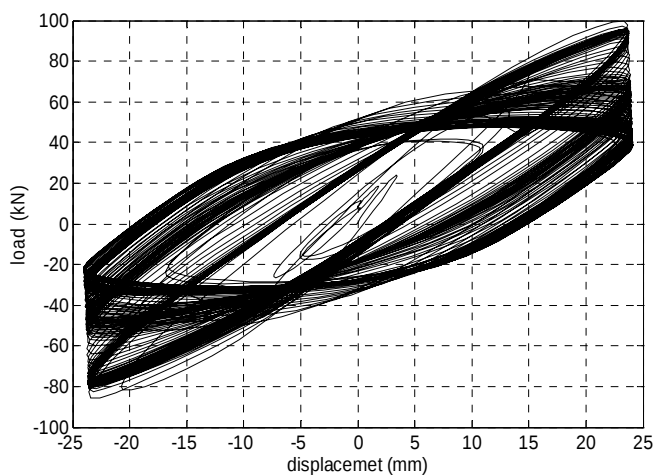
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บ. Jiangsu)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	57.6	58.2	57.9
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	51.6	52.8	52.2

ตารางที่ 4.3-28 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บ. Jiangsu)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.5
200 รอบ	0.53
20,000 รอบ	-



รูปที่ 4.3-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บ. Jiangsu)

4.3.15 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ)

ของ บ. Cakra Ulung

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางธรรมชาติ) ของ บ. Cakra Ulung สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 60.0 เหลือ 54.6 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-29)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.04 MPa แต่ภายหลังจากดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.73 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-30)
3. ไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นตลอดความหนาของยางรองคอสสะพานภายหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3-29 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test

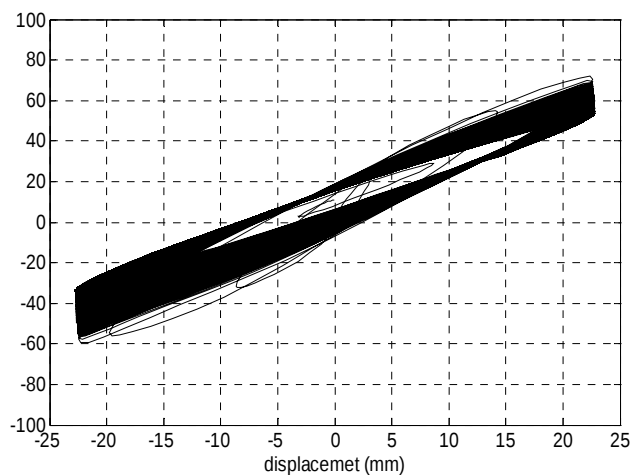
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บ. Cakra Ulung)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางขึ้นบน	แผ่นยางขึ้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	58.6	61.4	60.0
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	54.6	54.6	54.6

ตารางที่ 4.3-30 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บ. Cakra Ulung)

จำนวนรอบการทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.04
10,000 รอบ	0.74
20,000 รอบ	0.73



รูปที่ 4.3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (NR) บ. Cakra Ulung)

4.3.16 ผลการทดสอบยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์)

ของ บ. Cakra Ulung

จากการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรแก่แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ชนิดยางสังเคราะห์) ของ บ. Cakra Ulung สรุปผลได้ดังนี้

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานมีค่าลดลงจาก 58.2 เหลือ 53.3 (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-31)
2. ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของแผ่นยางรองคอสสะพานสภาพเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.0 MPa แต่ภายหลังจากที่ดำเนินการทดสอบที่จำนวนรอบของการประยุกต์แรงเฉือนที่สูงขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0.74 ที่จำนวนรอบการกระทำซ้ำที่ 10,000 รอบ (พิจารณาจากตารางที่ 4.3-32)
3. พบการวิบัติที่จำนวนรอบที่ 5,000

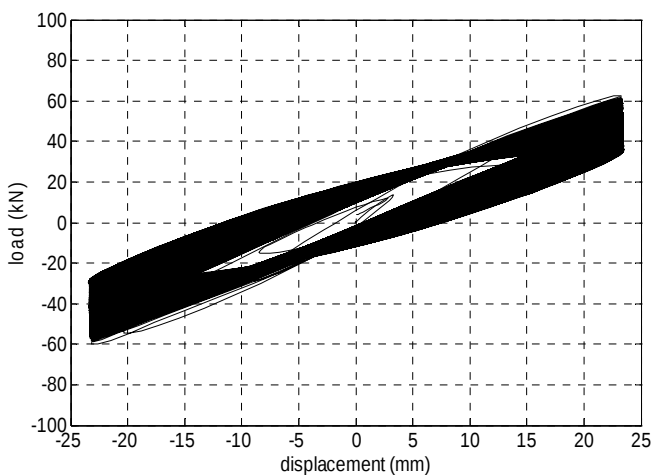
ตารางที่ 4.3-31 ค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานก่อนและหลังการทดสอบ shear fatigue test
(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บ. Cakra Ulung)

ช่วงเวลาทดสอบ	แผ่นยางชั้นบน	แผ่นยางชั้นล่าง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนการทดสอบ	56.8	59.6	58.2
ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังการทดสอบ	55.6	51.0	53.3

ตารางที่ 4.3-32 ค่าโมดูลัสเฉือนที่การทดสอบที่รอบกระทำซ้ำรอบต่างๆ

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บ. Cakra Ulung)

จำนวนรอบการ ทดสอบ	ค่าโมดูลัสเฉือน (MPa)
1 รอบ	1.0
10,000 รอบ	0.74
20,000 รอบ	-



รูปที่ 4.3-16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ shear fatigue test

(ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (CR) บ. Cakra Ulung)

4.4 การประเมินอายุวัสดุยางรองคอสสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก

หลักเกณฑ์การประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานทั้ง 3 ผลัดภณที่ได้จากการทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักบรรทุกนั้น (การทดสอบแรงกระทำแบบวัฏจักรในหัวข้อ 5.1-5.3) จะดำเนินการได้โดยการเทียบกับผลงานการวิจัยของ Muscarella และ Yura (1995) ที่ระบุอายุการใช้งานไว้ที่จำนวนรอบการให้แรงแบบวัฏจักรที่ 20,000 รอบ เทียบเท่ากับอายุการใช้งานที่ 55 ปี ดังนั้นหากในระหว่างการทดสอบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรนั้น หากแผ่นยางรองคอสสะพานมีการฉีกขาดหรือเกิดความเสียหายบริเวณช่วงความหนา ก่อนจำนวนรอบกระทำซ้ำที่ 20,000 รอบ ย่อมหมายความว่าแผ่นยางรองคอสสะพานมีอายุการใช้งานน้อยกว่า 55 ปี โดยพิจารณาอายุการใช้งานเทียบสัดส่วนกับจำนวนรอบที่ 20,000 รอบ

สำหรับการประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานทั้งสิ้น 16 ผลัดภณที่พิจารณาได้จากตารางที่ 4.4-1 และ 4.4-2

ตารางที่ 5.4-1 สรุปอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน

ชนิดของยางรองคอสสะพานประเภท ยางล้วน	ความเสียหายที่เกิด ระหว่างการทดสอบ	อายุการใช้งาน
ยางธรรมชาติ (บจก.วัฒนาสุข)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บจก.วัฒนาสุข)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางธรรมชาติ (บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางธรรมชาติ (บ. Jiangsu)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บ. Jiangsu)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางธรรมชาติ (บ. Cakra Ulung)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บ. Cakra Ulung)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี

ตารางที่ 5.4-2 สรุปอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ชนิดของยางรองคอสสะพานประเภท ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	ความเสียหายที่เกิด ระหว่างการทดสอบ	อายุการใช้งาน
ยางธรรมชาติ (บจก.วัฒนาสุข)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บจก.วัฒนาสุข)	เสียหายที่ 20,000 รอบ	55 ปี
ยางธรรมชาติ (บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริง)	เสียหายที่ 4,400 รอบ	12 ปี
ยางธรรมชาติ (บ. Jiangsu)	เสียหายที่ 2,000 รอบ	5 ปี
ยางสังเคราะห์ (บ. Jiangsu)	เสียหายที่ 95 รอบ	0.26 ปี
ยางธรรมชาติ (บ. Cakra Ulung)	ไม่พบความเสียหาย	มากกว่า 55 ปี
ยางสังเคราะห์ (บ. Cakra Ulung)	เสียหายที่ 5,000 รอบ	13 ปี

4.5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

4.5.1 สรุปผลการทดสอบ

- จากการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก ซึ่งทำการทดสอบโดยการให้ความเครียดเฉือนแบบกระทำซ้ำกับแผ่นยางรองคอสสะพานที่ 50% Shear Strain พบว่าแผ่นยางรองคอสสะพานชนิดยางสังเคราะห์ทั้ง 2 ประเภท (ประเภทยางล้วน และ ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก) จะมีลักษณะการขยายตัวมากกว่าชนิดยางธรรมชาติ
- การทดสอบความต้านทานความล้าจากแรงเฉือน (Shear Fatigue Test) เพื่อประเมินหาอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพาน โดยลักษณะการทดสอบความต้านทานความล้าจากแรงเฉือน เป็นการจำลองลักษณะแรงกระทำต่อแผ่นยางรองคอสสะพาน ทั้งรูปแบบการประยุกต์แรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานที่กระทำต่อแผ่นยาง แรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรและผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเกณฑ์การพิจารณาอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO ที่ระดับอายุการใช้งาน 55 ปี แผ่นยางรองคอสสะพานสามารถรับแรงที่กระทำซ้ำได้ 20,000 รอบ ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสระพานประเภทยางล้วน ทั้งชนิดยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ จำนวน 8 ผลิตภัณฑ์ มีอายุการใช้งานมากกว่า 55 ปี
 - ผลิตภัณฑ์แผ่นยางรองคอสระพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ทั้งชนิดยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ มีอายุการใช้งานมากกว่า 55 ปี มีเพียง 3 ผลิตภัณฑ์ใน 8 ผลิตภัณฑ์
- 3) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ทดสอบตามมาตรฐานฐาน AASHTO พบว่าแผ่นยางรองคอสระพานที่มีอายุการใช้งานน้อยกว่า 55 ปี ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบการเสียรูปหลังการกด และความต้านทานไอโซน

4.5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดสอบแผ่นยางรองคอสระพานในการศึกษานี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขการนำผลิตภัณฑ์ใหม่มาทดสอบทั้งหมด และทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในทางปฏิบัติและการใช้งานจริงของสะพานนั้น จะมีผลของความร้อน ไอโซน และอุณหภูมิด้วย ปัจจัยสภาพแวดล้อมดังกล่าวส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของแผ่นยางรองคอสระพาน ดังนั้น หากในอนาคตสามารถจำลองสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องด้วยการเร่งสภาวะให้กับแผ่นยางรองคอสระพานในห้องปฏิบัติการและนำมาทดสอบในรูปแบบ Compression Fatigue Test หรือ Shear Fatigue Test จะทำให้แผ่นยางมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากขึ้น และการประเมินอายุการใช้งานอาจจะสอดคล้องความเป็นจริงได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 5

การประเมินระดับสภาพวัสดุยางรองคอสะพาน

5.1 แนวทางในการประเมินสภาพแผ่นยางรองคอสะพาน

แนวทางการตรวจสอบสภาพการใช้งานของแผ่นยางรองคอสะพานในพื้นที่ที่ทำการศึกษานี้ จะพิจารณาจากสาเหตุและปัจจัยการเสื่อมสภาพของยางรองคอสะพานที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาเป็นเกณฑ์ในการจำแนกขั้นตอนการตรวจสอบและประเมินสภาพยางรองคอสะพาน โดยมีแนวทางในการสำรวจและตรวจสอบ ดังนี้

1) การตรวจสอบรอยแตกร้าวที่ผิว

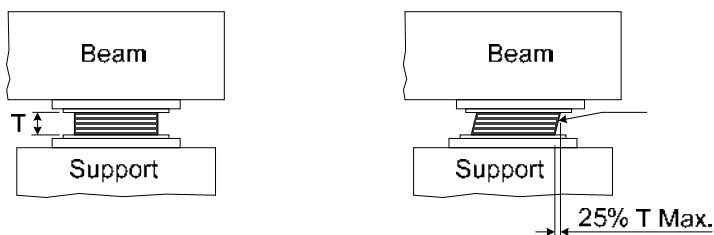
ซึ่งถือว่าการตรวจสอบสภาพของแผ่นยางรองคอสะพานอันเนื่องมาจากอายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสะพาน โดยดำเนินการตรวจสอบว่าแผ่นยางรองคอสะพานมีรอยร้าว รอยแตก หรือฉีกขาดจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถใช้งานได้หรือไม่

2) การเลื่อนหลุดของแผ่นยางรองคอสะพาน

อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากพื้นสะพานมีการยึดหดตัวตามอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนในแต่ละช่วงเวลาของวัน การมีสารประกอบประเภท WAX ในเนื้อยางมากเกินไป หรือแผ่นยางรองคอสะพานมีความหนาไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ทั้งนี้หากพบว่าแผ่นยางรองคอสะพานมีความเสียหายดังกล่าวเกิดขึ้นผู้ดำเนินการสำรวจจะต้องทำการบันทึกตำแหน่งและระยะการเคลื่อนตัวของยางรองคอสะพานให้ชัดเจน

3) การเสียรูปภายใต้แรงเฉือน

การตรวจสอบความเสียหายลักษณะนี้จะต้องพิจารณาว่าแผ่นยางรองคอสะพานมีการไถตัวไปตามแนวแกนสะพาน หรือมีลักษณะที่ต้งฉากกับแนวแกนสะพานมากน้อยเพียงใด (พิจารณาจากรูปที่ 5.1-2)



รูปที่ 5.1-1 ลักษณะการเสียรูปของแผ่นยางรองคอสะพานภายใต้แรงเฉือน

4) การตรวจสอบการหมุน

ตรวจสอบได้จากการประเมินความหนาของแผ่นยางรองคอสะพาน ซึ่งถ้าตรวจสอบพบว่าค่าความสูงของด้านหน้าและด้านหลังมีค่าแตกต่างกันจนมองเห็นได้ชัดเจน แสดงว่าบริเวณจุดรองรับโครงสร้างคานสะพานมีการหมุนเกิดขึ้น



รูปที่ 5.1-2 การยุบตัวไม่ไ้ระดับของแผ่นยางรองคอสะพาน

5) การแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก

กรณีที่แผ่นยางเป็นชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก หากพบว่ามีรอยร้าวหรือมีความเสียหายดังกล่าวถือได้ว่าสภาพการใช้งานของแผ่นยางอยู่ในสภาพชำรุด

6) การฉีกขาด

ที่ปรึกษาจะพิจารณาจากภาพถ่ายว่าแผ่นยางรองคอสะพานมีรอยฉีกขาดหรือไม่ ซึ่งถ้าพิจารณาเห็นว่ารอยฉีกขาดเกิดขึ้นแสดงว่าสภาพการใช้งานของแผ่นยางอยู่ในสภาพชำรุด

ตารางที่ 5.1-1 สรุปรายการตรวจสอบ แผ่นยางรองคอสะพาน

วัสดุรองรับคอสะพาน	รายการตรวจสอบ
แผ่นยางรองคอสะพาน	1. การตรวจสอบรอยร้าวที่ผิว 2. การเลื่อนหลุดของแผ่นยางรองคอสะพาน 3. การเสียรูปภายใต้แรงเฉือน 4. การตรวจสอบการหมุน 5. การแยกตัวระหว่างแผ่นยางและแผ่นเหล็ก 6. การฉีกขาด

สำหรับเกณฑ์การพิจารณาสภาพการใช้งานของแผ่นยางรองคอสะพาน จะพิจารณาแบ่งเกณฑ์สภาพการใช้งานภายหลังจากการตรวจสอบแผ่นยางรองคอสะพานออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ สภาพดี พอใช้ และชำรุด (รายละเอียดพิจารณาจากตารางที่ 2.1-2)

5.1.1 การทดสอบค่าความแข็งของยางรองคอสสะพาน

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ที่ปรึกษาได้ดำเนินการสำรวจค่า ความแข็ง (Hardness) ของยางรองคอสสะพานเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบคุณภาพของยางจากภาคสนาม ซึ่งการทดสอบหาค่าความแข็งของยางได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า Durometer ชนิด Shore A โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ทำความสะอาดพื้นผิวที่จะดำเนินการทดสอบ
- 2) ทำการตั้งค่าเข็มของ Durometer ไปที่ตำแหน่งศูนย์ กรณีใช้ Durometer เป็นแบบเข็มคู่ ให้ปรับค่าเข็มทั้ง 2 ไปที่ตำแหน่งศูนย์
- 3) กดเครื่องทดสอบโดยให้ระนาบปลายเข็ม Durometer แนบสนิทกับแผ่นยางที่ทดสอบ
- 4) ทำการอ่านค่าจากเข็มของ Durometer สำหรับกรณีที่ใช้ Durometer ชนิดเข็มเดี่ยวให้ดำเนินการอ่านค่าทันทีที่ระนาบปลายเข็มแนบกับแผ่นยางที่ทดสอบ กรณีที่ใช้ Durometer แบบเข็มคู่ให้ดำเนินการอ่านค่าเข็มสีแดง โดยเข็มสีแดงนี้สามารถอ่านได้เมื่อนำ Durometer ออกจากชิ้นยางแล้ว
- 5) บันทึกค่า และทำซ้ำตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วจนครบ 10 ครั้ง
- 6) หาค่าเฉลี่ยของการทดสอบในทิศทางที่ทำการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบพิจารณาได้จากรูปที่ 1.2-1 ถึง 1.2-3



รูปที่ 5.1-3 กรณีพบสภาพแวลดล้อมโดยรอบมีความสกปรกต้องดำเนินการทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกออกก่อนจึงเริ่มทดสอบค่าความแข็ง



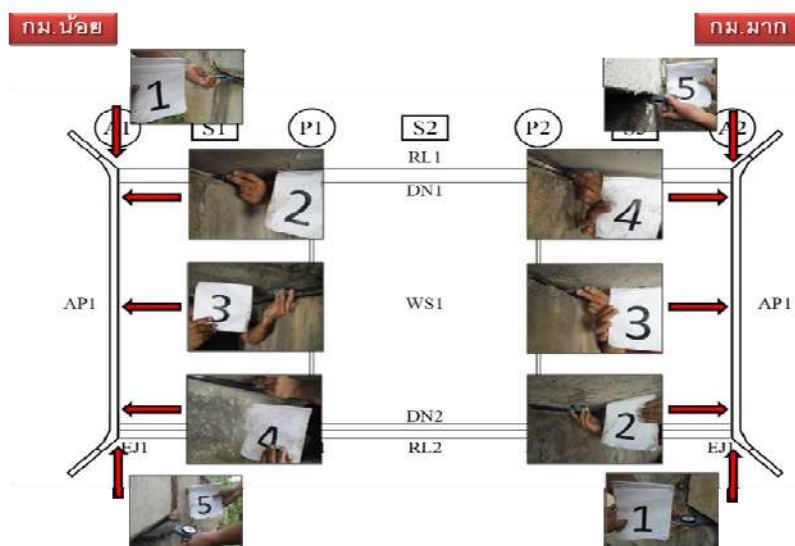
รูปที่ 5.1-4 กด Durometer จนแนบสนิทกับแผ่นยางรองคอสสะพานที่ทดสอบ



รูปที่ 5.1-5 ทำการอ่านค่าและจดบันทึก

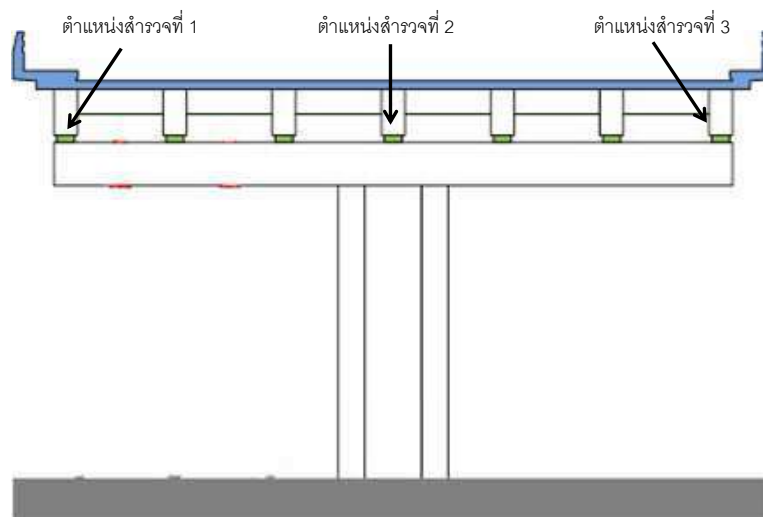
อย่างไรก็ตามตำแหน่งและทิศทางของการทดสอบค่าความแข็งนี้ให้พิจารณาจากประเภทของยางรองคอสพานดังนี้

แผ่นยางรองคอสพานประเภทยางล้วน ในการดำเนินการในแต่ละฝั่งของลาดป้องกันดิ่งให้ทดสอบค่าความแข็งทั้งสิ้น 5 ตำแหน่งๆละ 5-10 ค่า พิจารณาจากรูปที่ 5.1-6

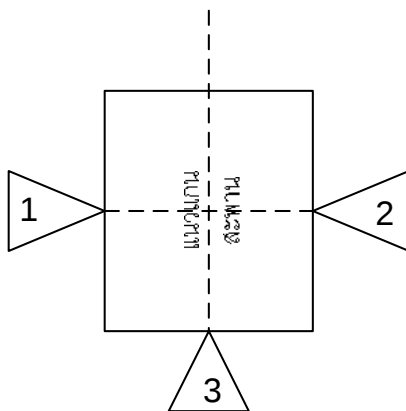


รูปที่ 5.1-6 แสดงตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วน

แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ดำเนินการเก็บค่าไม่น้อยกว่า 3 ตำแหน่ง (3 ชั้น) โดยในแต่ละตำแหน่งให้ทดสอบทั้งสิ้น 3ทิศทาง และในแต่ละทิศทางจะดำเนินการทดสอบทิศทางละ 5-10 ครั้ง พิจารณาจากรูปที่ 3.2-6 และ 3.2-7



รูปที่ 5.1-7 แสดงตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก



รูปที่ 5.1-8 แสดงทิศทางการทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานประเภทยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กต่อ
หนึ่งตำแหน่งการทดสอบ

5.2 สรุปผลการประเมินจากฐานข้อมูลสะพาน

จากแนวทางการสำรวจและตรวจสอบที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.1 จะถูกนำไปใช้ในการประเมินสภาพการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 9 (ลพบุรี) – 15 (สงขลา) และสำนักงานทางหลวงกระบี่ ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของสำนักงานทางหลวงที่ 9 จนถึงสำนักงานทางหลวงที่ 15 และสำนักงานทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี) โดยอาศัยข้อมูลจากภาพถ่าย สามารถแบ่งกลุ่มของสะพานแยกตามชนิด ในแต่ละพื้นที่สำนักงานทางหลวงได้ดังตารางที่ 5.2-1

ตารางที่ 5.2-1 สรุปประเภทสะพานแยกตามพื้นที่ของโครงการ

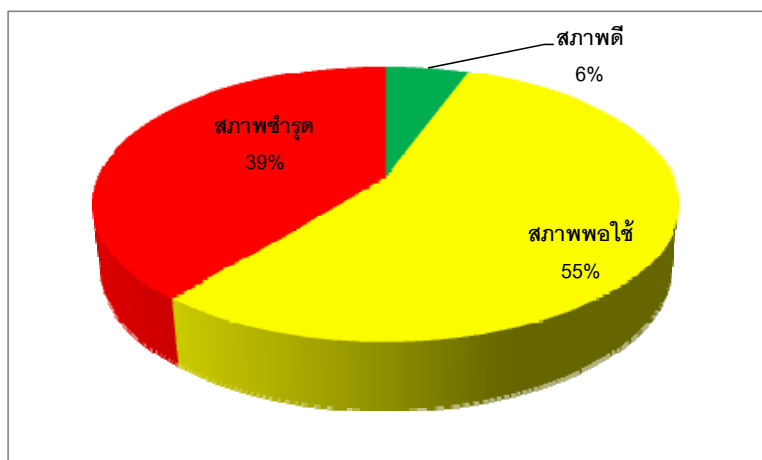
สำนักงานทางหลวง /สำนักงานทางหลวง	จำนวนสะพานแบ่งตามประเภท						
	ทั้งหมด	สะพาน Slab Type	สะพาน Plank Girder	สะพาน I-Girder	สะพาน Box Girder	สะพาน T- Girder	สะพาน ประเภท อื่นๆ
ที่ 9 (ลพบุรี)	681	380	212	1	38	6	44
ที่ 10 (สุพรรณบุรี)	676	352	127	47	56	4	90
ที่ 11 (กรุงเทพ)	1,358	356	676	73	151	5	97
ที่ 12 (ชลบุรี)	929	421	350	39	67	2	50
ที่ 13 (ประจวบคีรีขันธ์)	918	424	345	35	27	4	83
ที่ 14 (นครศรีธรรมราช)	1,092	642	324	54	48	12	12
ที่ 15 (สงขลา)	1,280	825	294	45	32	12	72
สง.ทล. กระบี่	440	381	41	8	5	5	0
รวม	7,374	3,781	2,369	302	424	50	448

จากการประเมินระดับความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานตามระดับสภาพการใช้งานในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 9 -15 และสำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี) โดยอาศัยภาพถ่ายจากฐานข้อมูลสะพานที่มีอยู่ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง สามารถสรุปสภาพความเสียหายของยางรองคอสสะพานได้ดังนี้

ตารางที่ 5.2-2 สรุปข้อมูลสะพานในพื้นที่โครงการตามระดับสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพาน

สำนักงานทางหลวง /สำนักงานทางหลวง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			รวม
	สภาพดี	สภาพพอใช้	สภาพชำรุด	
ที่ 9 (ลพบุรี)	37	462	128	681
ที่ 10 (สุพรรณบุรี)	41	504	131	676
ที่ 11 (กรุงเทพ)	56	860	442	1,358
ที่ 12 (ชลบุรี)	15	422	492	929
ที่ 13 (ประจวบคีรีขันธ์)	21	637	260	918
ที่ 14 (นครศรีธรรมราช)	167	477	477	1,091
ที่ 15 (สงขลา)	24	460	734	1,219
สง.ทล. กระบี่	44	223	174	441
รวม	406	4,045	2,862	7,313

ผลการประเมินสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานจากฐานข้อมูลสะพาน สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง สามารถสรุปภาพรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่การศึกษาของโครงการได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3-1 ซึ่งพบว่า แผ่นยางรองคอสสะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่ของโครงการมีสภาพพอใช้ สภาพชำรุด และสภาพดี ตามลำดับ



รูปที่ 5.3-1 สภาพการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่การศึกษาของโครงการจากฐานข้อมูลสะพาน

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ศึกษาของโครงการพบว่าสะพาน I-Girder จะมีจำนวนสะพานที่มีสภาพยางรองคอสสะพานอยู่ในสภาพดีที่สุดคิดเป็น 22.20% ของสะพานประเภทเดียวกันขณะที่สะพาน T-Girder จะมีจำนวนสะพานที่มีสภาพยางรองคอสสะพานอยู่ในสภาพชำรุดมากที่สุดคิดเป็น 52.00% ของสะพานประเภทเดียวกัน

ตารางที่ 5.2-3 สรุปสภาพการใช้งานยางรองคอสสะพานพื้นที่โครงการ
แยกตามประเภทสะพาน

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	93	1,285	990
สะพาน Slab Type	164	2,014	1,600
สะพาน Box Girder	17	174	108
สะพาน I-Girder	95	258	75
สะพาน T-Girder	1	23	26
สะพานประเภทอื่นๆ	37	293	63

ตารางที่ 5.2-4 สรุปสภาพการใช้งานยางรองคอสสะพานพื้นที่โครงการ
แยกตามประเภทสะพาน

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	3.93%	54.27%	41.81%
สะพาน Slab Type	4.34%	53.31%	42.35%
สะพาน Box Girder	5.69%	58.19%	36.12%
สะพาน I-Girder	22.20%	60.28%	17.52%
สะพาน T-Girder	2.00%	46.00%	52.00%
สะพานประเภทอื่นๆ	9.41%	74.55%	16.03%

5.2.1 ประเมินสภาพยางรองคอสสะพานจากฐานข้อมูลสะพานแยกตามสำนักทางหลวง

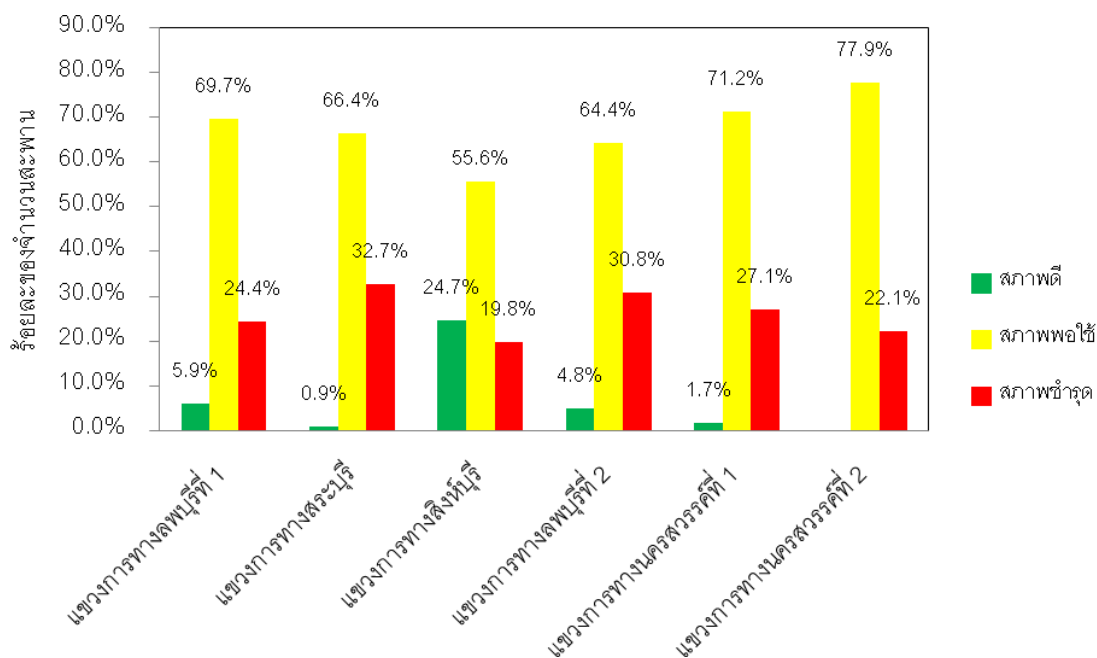
ในการประเมินสภาพความเสียหายจะแบ่งเกณฑ์การประเมินสภาพยางรองคอสสะพานออกเป็น 3 ระดับ คือ สภาพดี สภาพพอใช้ และสภาพชำรุด ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่าย โดยแยกพิจารณาตามแขวงของแต่ละสำนักทางหลวงดังนี้

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9

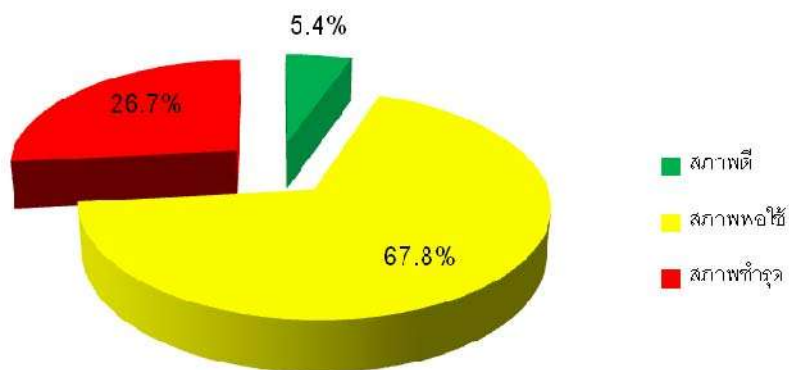
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 9 ทั้งสิ้น 681 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงการทาง ดังตารางที่ 5.2-5 และรูปที่ 5.3-2 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9 ได้ดังรูปที่ 5.3-3

ตารางที่ 5.2-5 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงการทางในพื้นที่ สทล. 9

แขวงการทาง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงการทางลพบุรีที่ 1	7	83	29
แขวงการทางสระบุรี	1	75	37
แขวงการทางสิงห์บุรี	20	45	16
แขวงการทางลพบุรีที่ 2	7	94	45
แขวงการทางนครสวรรค์ที่ 1	2	84	32
แขวงการทางนครสวรรค์ที่ 2	0	81	23
จำนวนสะพานทั้งหมด	681 สะพาน		



รูปที่ 5.3-2 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแขวงทางหลวงพื้นที่ สทล.9

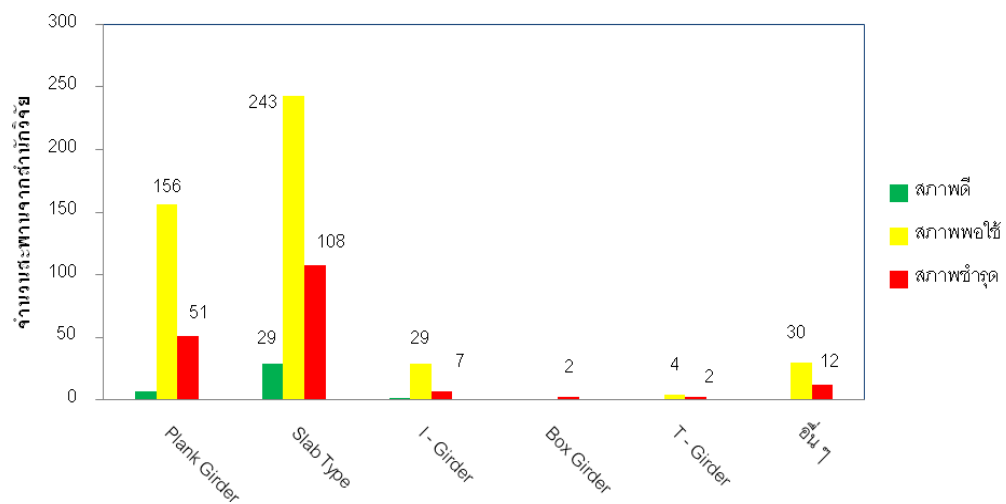


รูปที่ 5.3-3 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล. 9

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-6 และรูปที่ 5.3-4

ตารางที่ 5.2-6 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 9

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	7	156	51
สะพาน Slab Type	29	243	108
สะพาน Box Girder	1	29	7
สะพาน I-Girder	0	0	2
สะพาน T-Girder	0	4	2
สะพานประเภทอื่นๆ	0	30	12



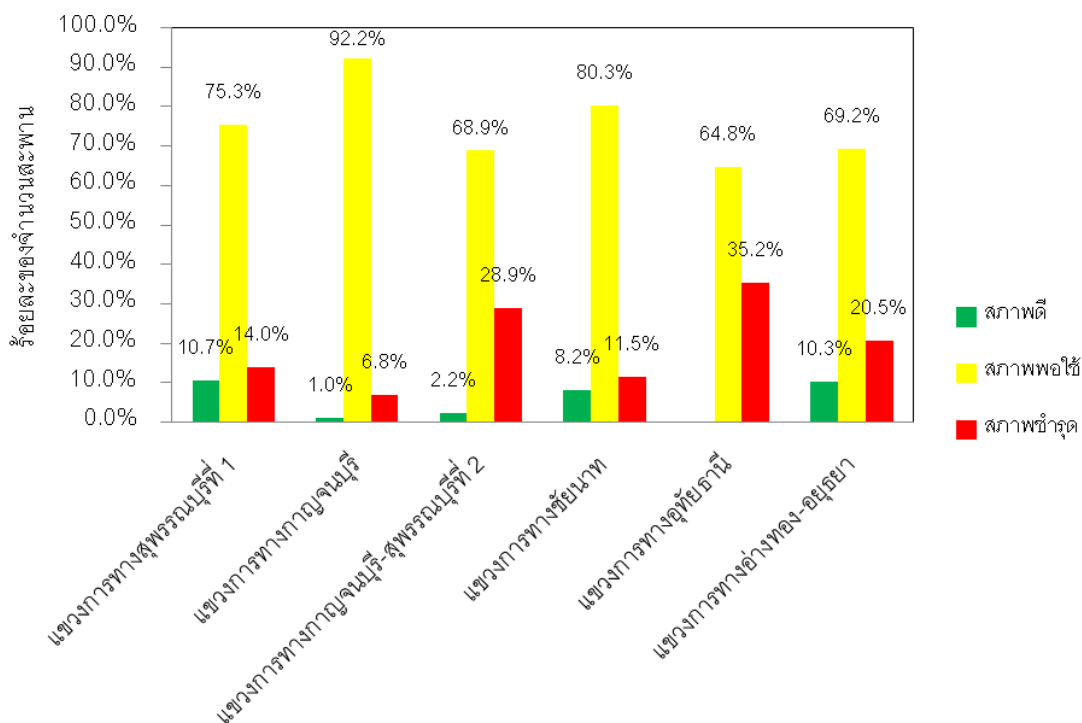
รูปที่ 5.3-4 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล. 9

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักทางหลวงที่ 10

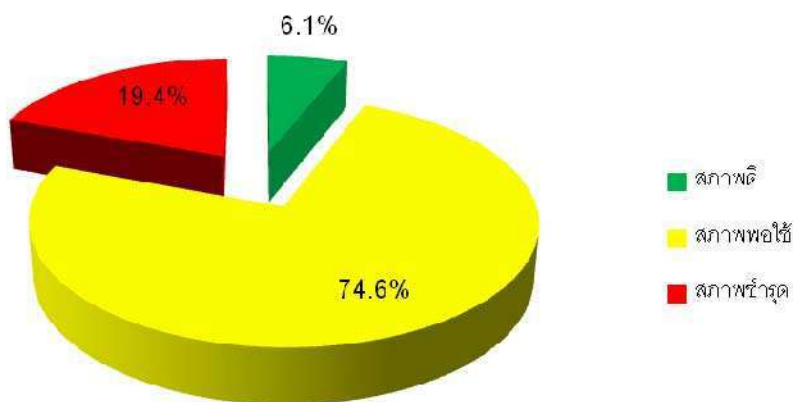
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 10 ทั้งสิ้น 676 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวง
การทาง ดังตารางที่ 5.2-7 และรูปที่ 5.3-5 โดยสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักทางหลวงที่ 10 ได้ดัง
รูปที่ 5.3-6

ตารางที่ 5.2-7 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงการทางในพื้นที่ สทล.10

แขวงการทาง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงการทางสุพรรณบุรีที่ 1	16	113	21
แขวงการทางกาญจนบุรี	1	95	7
แขวงการทางกาญจนบุรี-สุพรรณบุรีที่ 2	3	93	39
แขวงการทางชัยนาท	5	49	7
แขวงการทางอุทัยธานี	0	46	25
แขวงการทางอ่างทอง-อยุธยา	16	108	32
จำนวนสะพานทั้งหมด	676 สะพาน		



รูปที่ 5.3-5 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแขวงทางพื้นที่ สทล.10

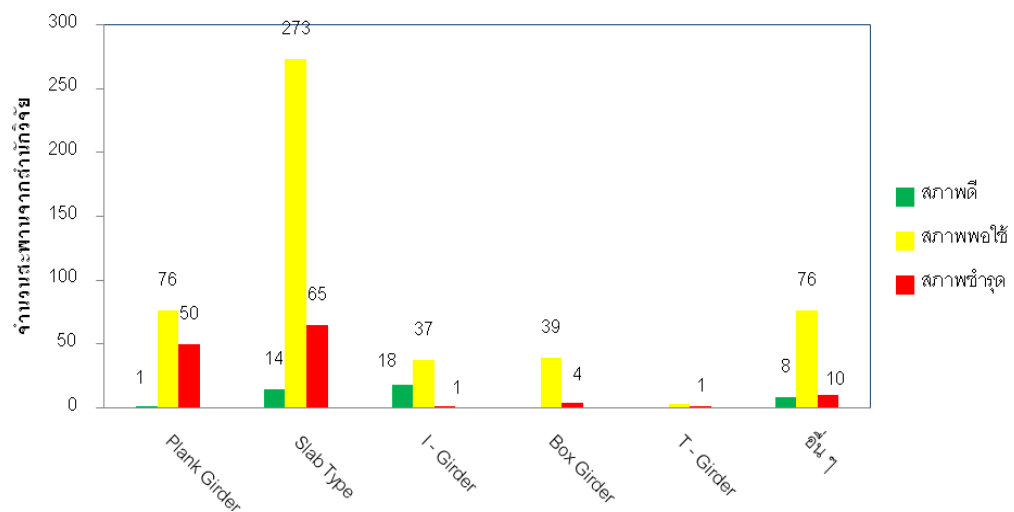


รูปที่ 5.3-6 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล.10

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-8 และรูปที่ 5.3-7

ตารางที่ 5.2-8 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 10

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	1	76	50
สะพาน Slab Type	14	273	65
สะพาน Box Girder	18	37	1
สะพาน I-Girder	0	39	4
สะพาน T-Girder	0	3	1
สะพานประเภทอื่นๆ	8	76	10



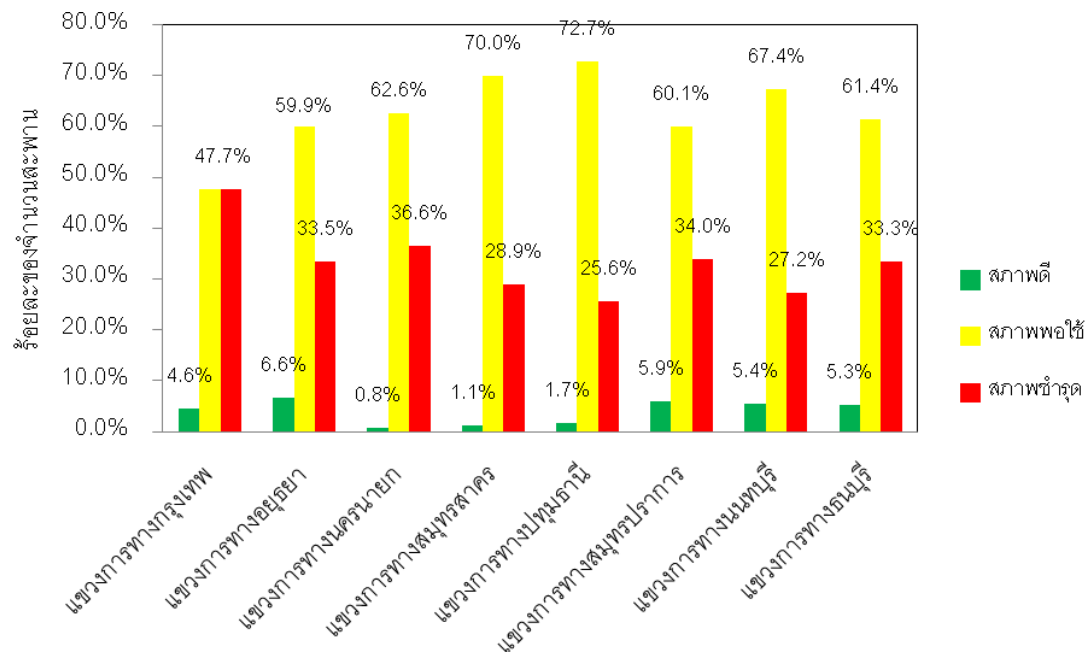
รูปที่ 5.3-7 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 10

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักทางหลวงที่ 11

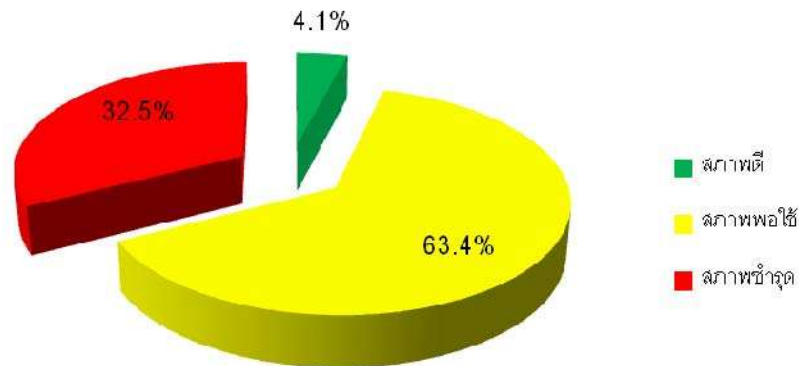
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 11 ทั้งสิ้น 1,358 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตาม
แขวงทางหลวง ดังตารางที่ 5.2-9 และรูปที่ 5.3-8 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักทาง
หลวงที่ 11 ได้ดังรูปที่ 5.3-9

ตารางที่ 5.2-9 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางหลวงในพื้นที่ สทล.11

แขวงทางหลวง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงทางหลวงกรุงเทพ	5	52	52
แขวงทางหลวงอยุธยา	14	127	71
แขวงทางหลวงนครนายก	1	77	45
แขวงทางหลวงสมุทรสาคร	2	126	52
แขวงทางหลวงปทุมธานี	3	128	45
แขวงทางหลวงสมุทรปราการ	12	122	69
แขวงทางหลวงนนทบุรี	10	124	50
แขวงทางหลวงธนบุรี	9	105	57
จำนวนสะพานทั้งหมด	1,358 สะพาน		



รูปที่ 5.3-8 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแขวงทางพื้นที่ สทล.11

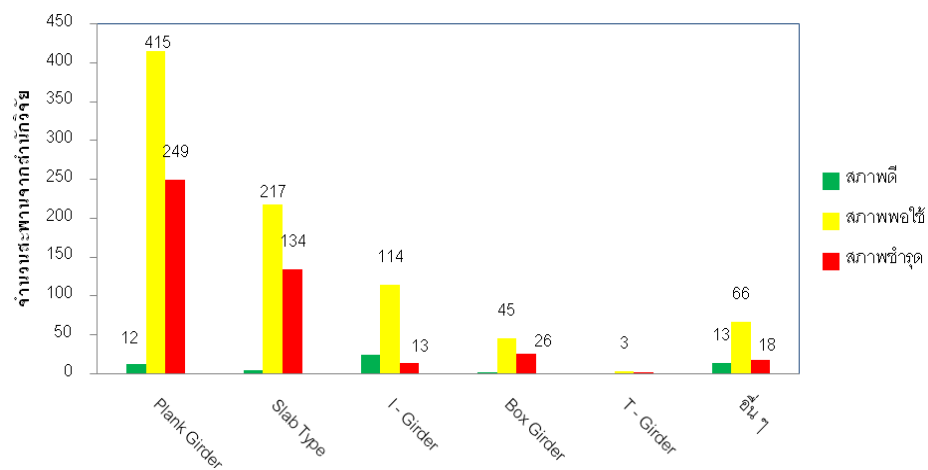


รูปที่ 5.3-9 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล. 11

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-10 และรูปที่ 5.3-10

ตารางที่ 5.2-10 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 11

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	12	415	249
สะพาน Slab Type	5	217	134
สะพาน Box Girder	24	114	13
สะพาน I-Girder	2	45	26
สะพาน T-Girder	0	3	2
สะพานประเภทอื่นๆ	13	66	18



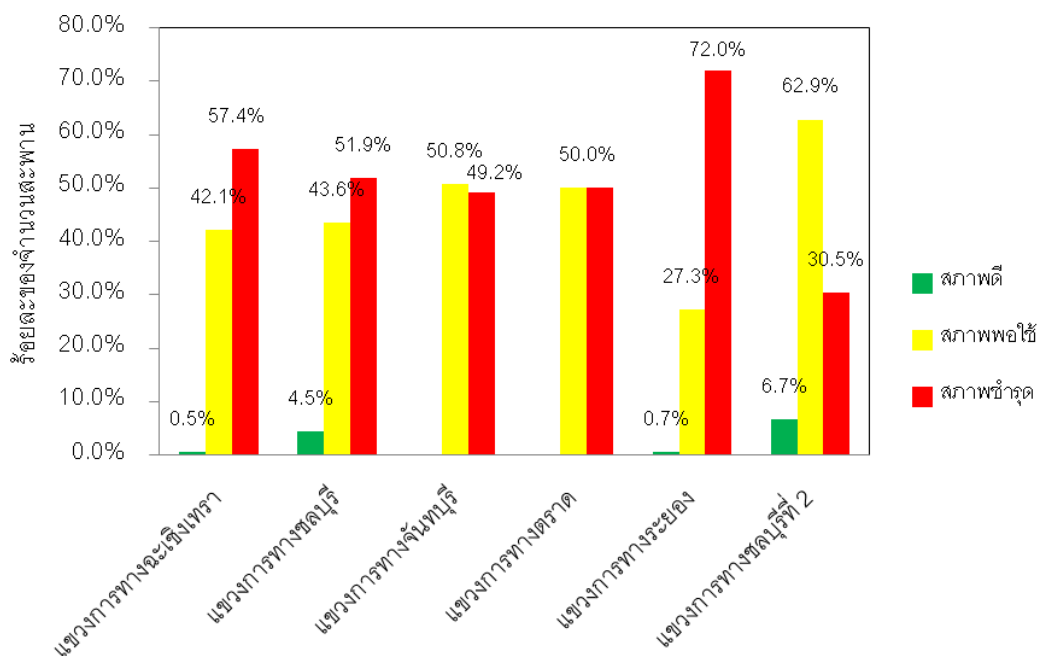
รูปที่ 5.3-10 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล. 11

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักทางหลวงที่ 12

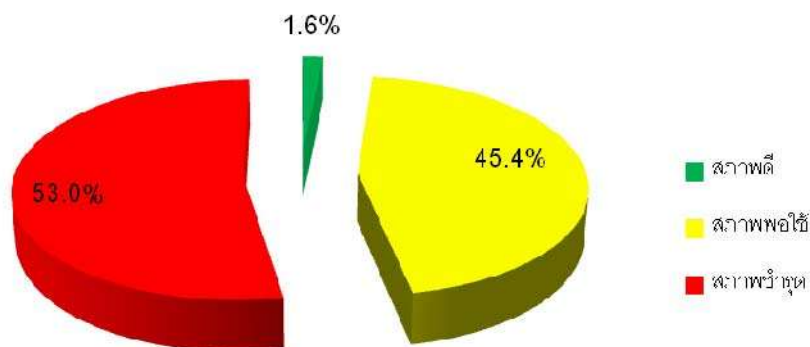
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 12 ทั้งสิ้น 929 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวง
การทาง ดังตารางที่ 5.2-11 และรูปที่ 5.3-11 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักทางหลวง
ที่ 12 ได้ดังรูปที่ 5.3-12

ตารางที่ 5.2-11 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงการทางในพื้นที่ สทล.12

แขวงการทาง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงการทางฉะเชิงเทรา	1	80	109
แขวงการทางชลบุรี	6	58	69
แขวงการทางจันทบุรี	0	95	92
แขวงการทางตราด	0	82	82
แขวงการทางระยอง	1	41	108
แขวงการทางชลบุรีที่ 2	7	66	32
จำนวนสะพานทั้งหมด	929 สะพาน		



รูปที่ 5.3-11 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสพานในแต่ละแฉงการทางพื้นที่ สทล.12

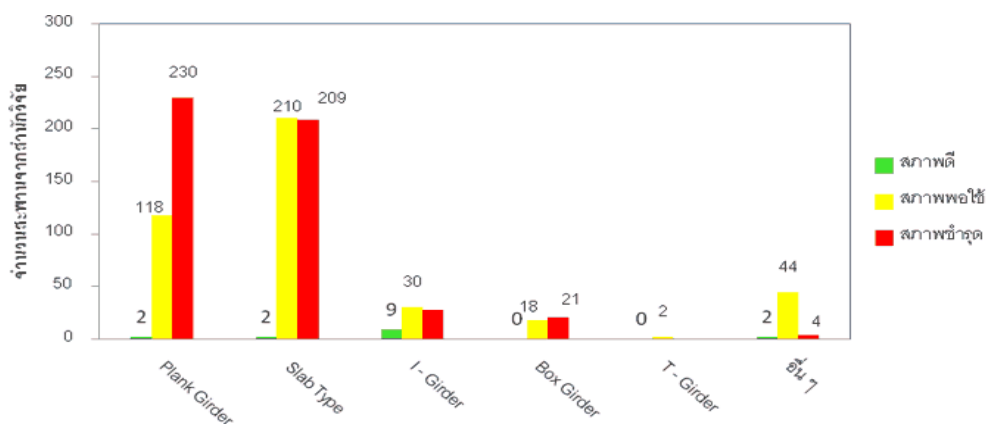


รูปที่ 5.3-12 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสพานพื้นที่ สทล.12

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-12 และรูปที่ 5.3-13

ตารางที่ 5.2-12 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 12

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	12	415	249
สะพาน Slab Type	5	217	134
สะพาน Box Girder	24	114	13
สะพาน I-Girder	2	45	26
สะพาน T-Girder	0	3	2
สะพานประเภทอื่นๆ	13	66	18



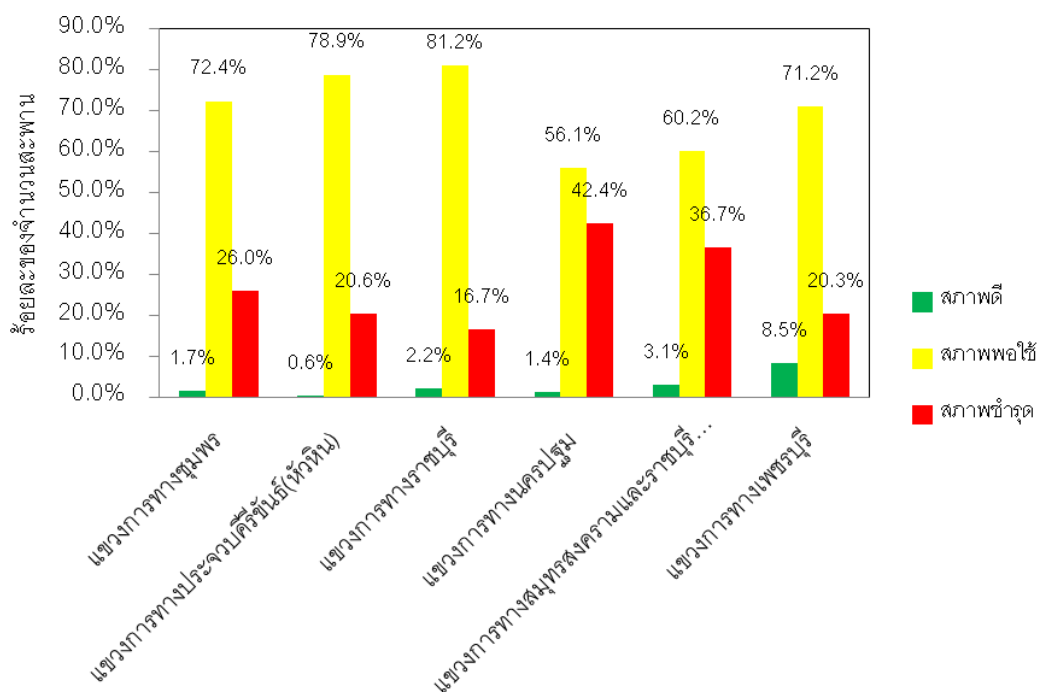
รูปที่ 5.3-13 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล. 12

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักทางหลวงที่ 13

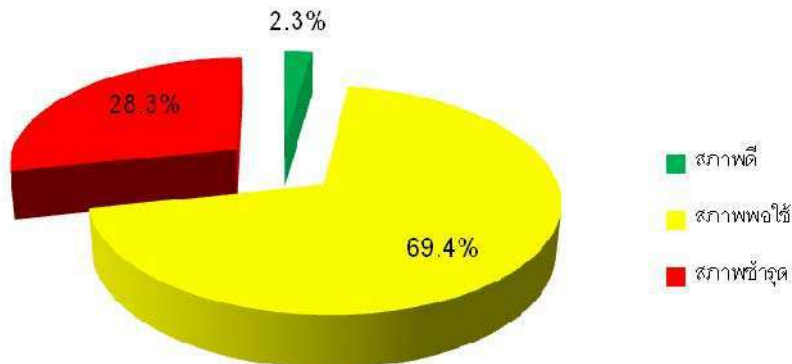
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 13 ทั้งสิ้น 918 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทาง
ทาง ดังตารางที่ 5.2-13 และรูปที่ 5.3-14 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักทางหลวงที่
13 ได้ดังรูปที่ 5.3-15

ตารางที่ 5.2-13 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางในพื้นที่ สทล.13

แขวงทาง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงทางชุมพร	3	131	47
แขวงทางประจวบคีรีขันธ์(หัวหิน)	1	138	36
แขวงทางราชบุรี	3	112	23
แขวงทางนครปฐม	2	78	59
แขวงทางสมุทรสงครามและราชบุรี ส่วนที่ 2	7	136	83
แขวงทางเพชรบุรี	5	42	12
จำนวนสะพานทั้งหมด	918 สะพาน		



รูปที่ 5.3-14 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแขวงทางพื้นที่ สทล.14

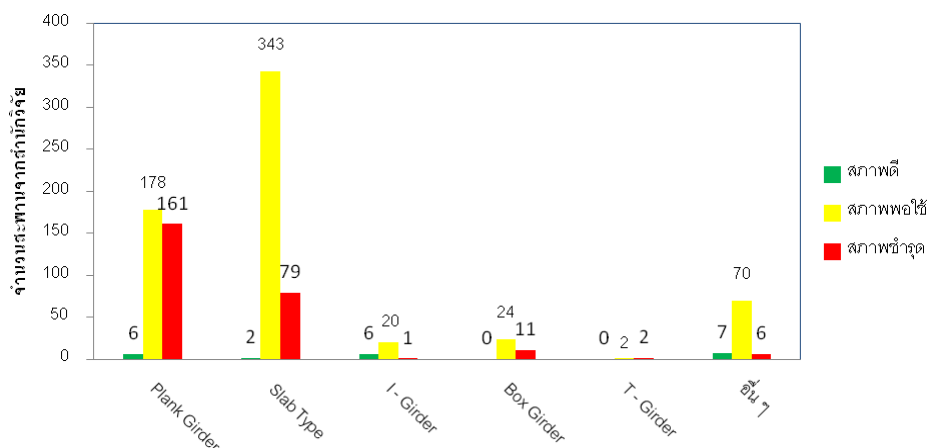


รูปที่ 5.3-15 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานในพื้นที่ สทล.13

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-14 และรูปที่ 5.3-16

ตารางที่ 5.2-14 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสพา
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 13

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	6	178	161
สะพาน Slab Type	2	343	79
สะพาน Box Girder	6	20	1
สะพาน I-Girder	0	24	11
สะพาน T-Girder	0	2	2
สะพานประเภทอื่นๆ	7	70	6



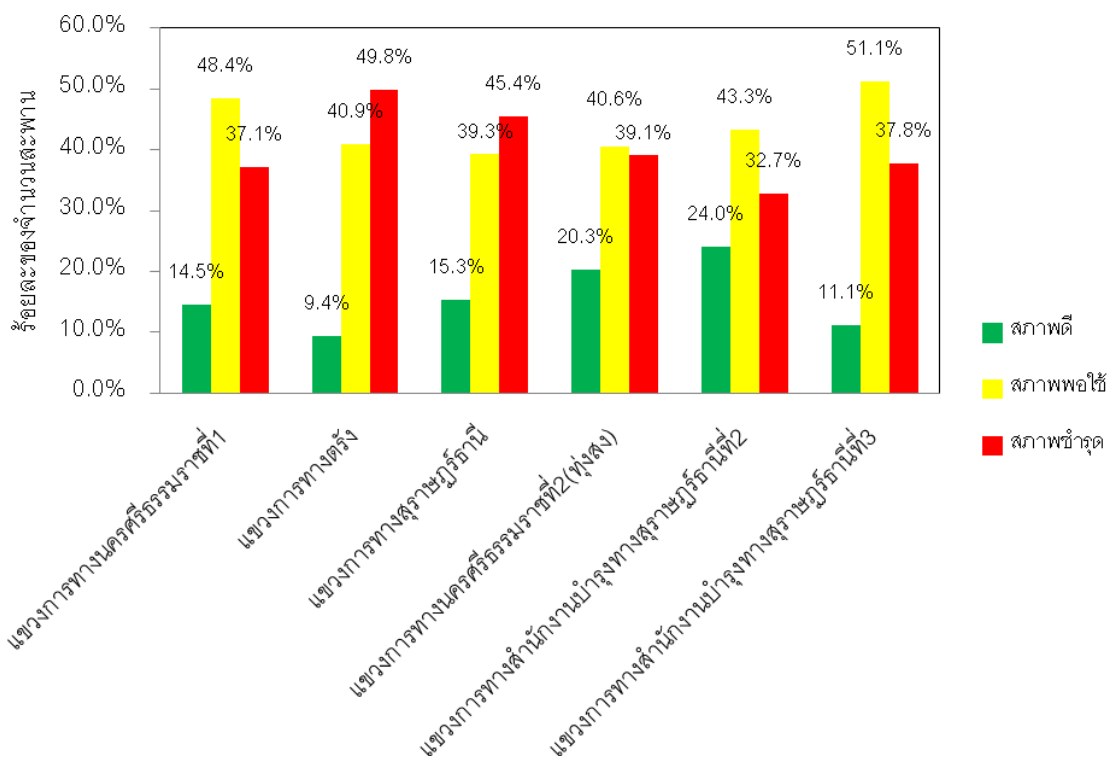
รูปที่ 5.3-16 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล. 13

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักทางหลวงที่ 14

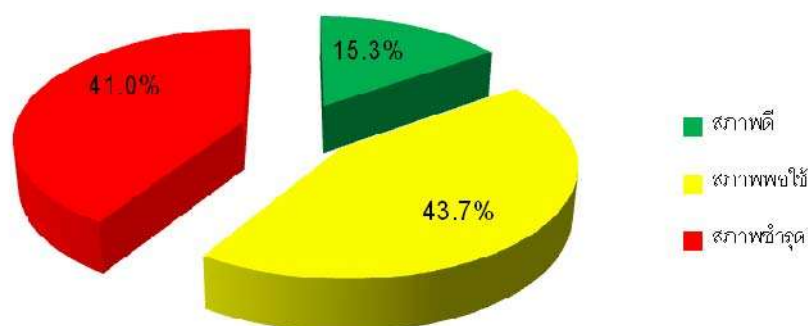
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 14 ทั้งสิ้น 870 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสพานแยกตามแขวง การทาง ดังตารางที่ 5.2-15 และรูปที่ 5.3-17 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักทางหลวง ที่ 14 ได้ดังรูปที่ 5.3-18

ตารางที่ 5.2-15 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสพานแยกตามแขวงการทางในพื้นที่ สทล.14

แขวงการทาง	สภาพแผ่นยางรองคอสพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงการทางนครศรีธรรมราชที่1	32	107	82
แขวงการทางตรัง	22	96	117
แขวงการทางสุราษฎร์ธานี	30	77	89
แขวงการทางนครศรีธรรมราชที่2(ทุ่งสง)	27	54	52
แขวงการทางสำนักงานบำรุงทางสุราษฎร์ธานีที่ 2	41	74	56
แขวงการทางสำนักงานบำรุงทางสุราษฎร์ธานีที่ 3	15	69	51
จำนวนสะพานทั้งหมด	1091 สะพาน		



รูปที่ 5.3-17 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแขวงทางพื้นที่ สทล.14

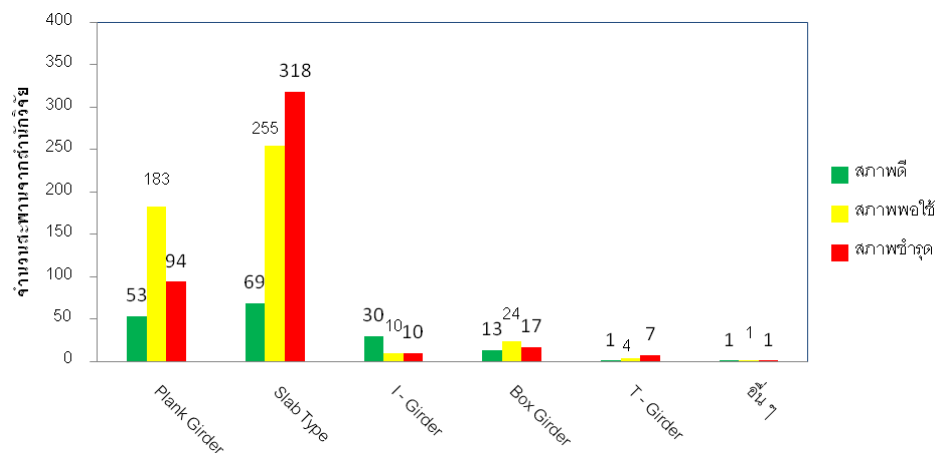


รูปที่ 5.3-18 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล.14

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-16 และรูปที่ 5.3-19

ตารางที่ 5.2-16 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 14

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	53	183	94
สะพาน Slab Type	69	255	318
สะพาน Box Girder	30	10	10
สะพาน I-Girder	13	24	17
สะพาน T-Girder	1	4	7
สะพานประเภทอื่นๆ	1	1	1



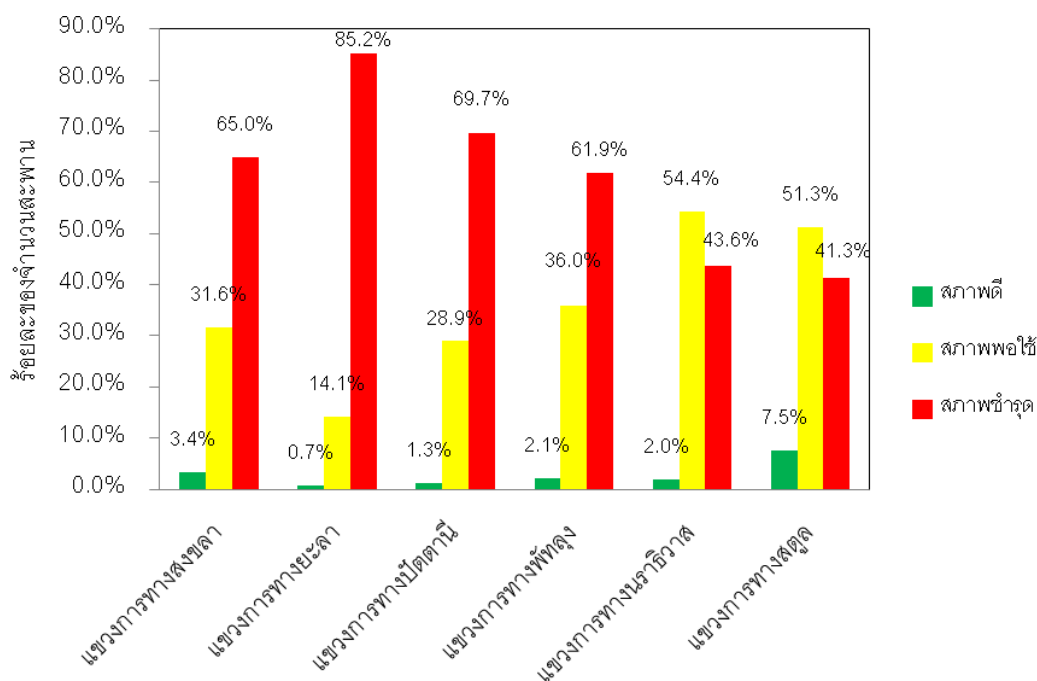
รูปที่ 5.3-19 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล. 14

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักทางหลวงที่ 15

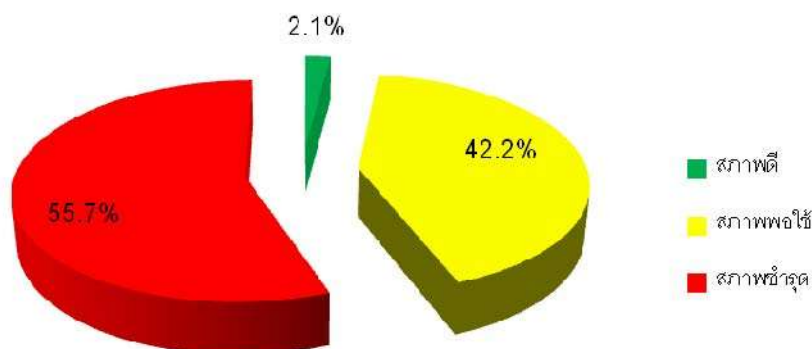
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 15 ทั้งสิ้น 1,219 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตาม
แขวงทางหลวง ดังตารางที่ 5.2-17 และรูปที่ 5.3-20 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักทาง
หลวงที่ 15 ได้ดังรูปที่ 5.3-21

ตารางที่ 5.2-17 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางหลวงในพื้นที่ สทล.15

แขวงทางหลวง	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงทางหลวงสงขลา	4	37	76
แขวงทางหลวงยะลา	1	21	127
แขวงทางหลวงปัตตานี	2	44	106
แขวงทางหลวงพัทลุง	5	86	148
แขวงทางหลวงนราธิวาส	6	167	134
แขวงทางหลวงสตูล	6	41	33
จำนวนสะพานทั้งหมด	1219 สะพาน		



รูปที่ 5.3-20 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแขวงทางพื้นที่ สทล.15

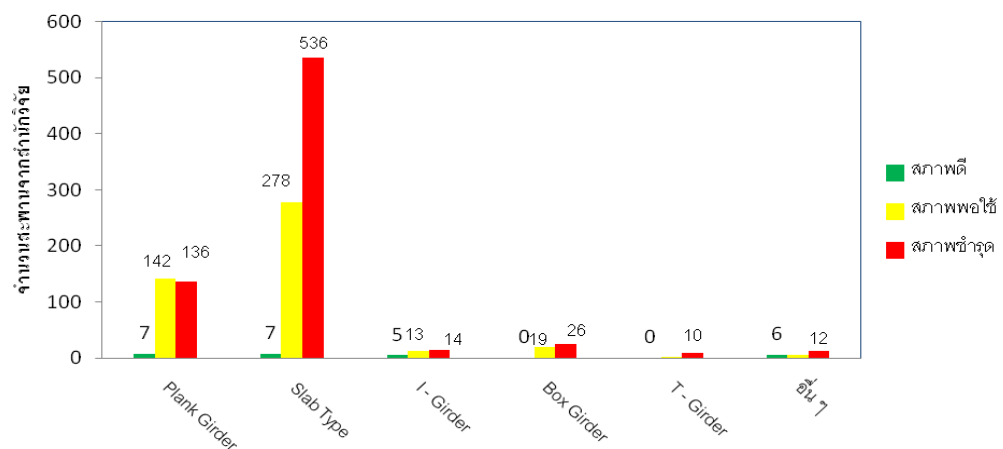


รูปที่ 5.3-21 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล.15

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-18 และรูปที่ 5.3-22

ตารางที่ 5.2-18 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สทล. 15

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	7	142	136
สะพาน Slab Type	7	278	536
สะพาน Box Girder	5	13	14
สะพาน I-Girder	0	19	26
สะพาน T-Girder	0	2	10
สะพานประเภทอื่นๆ	6	6	12



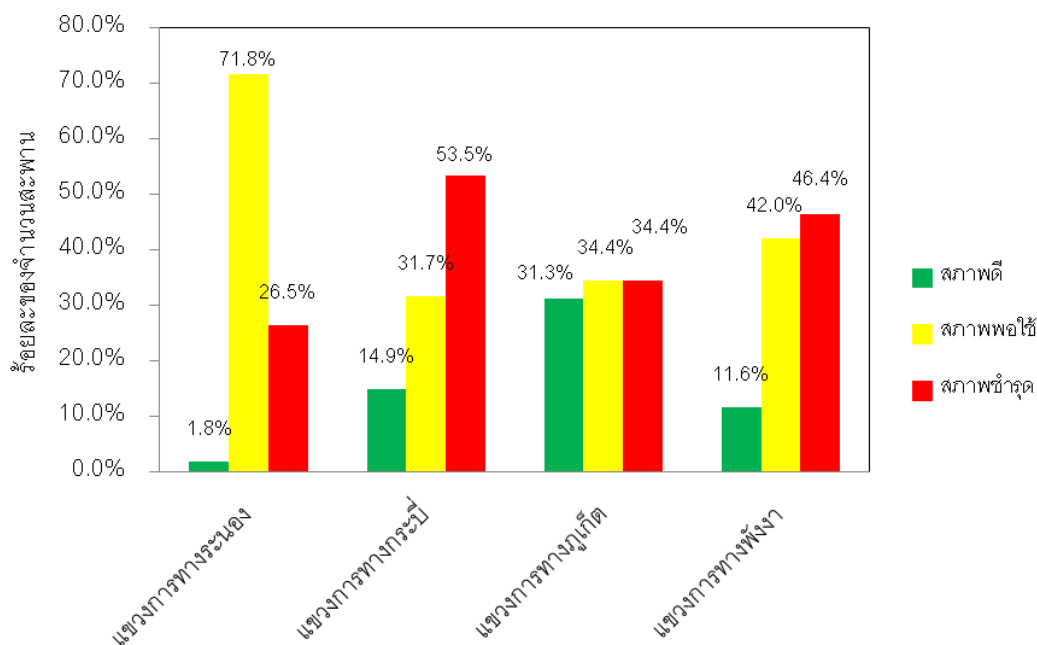
รูปที่ 5.3-22 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล. 15

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานสำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี)

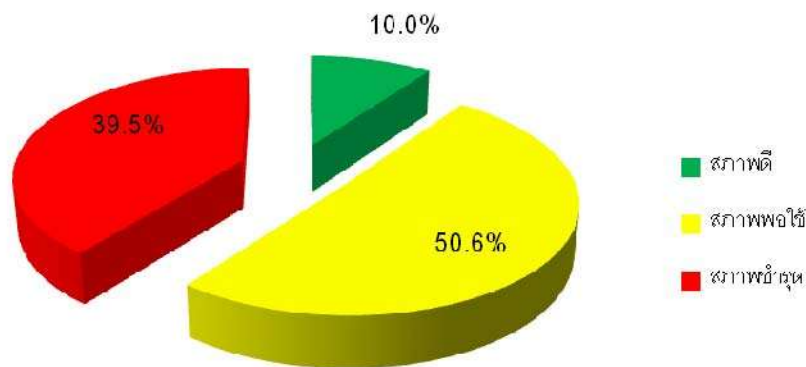
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี) ทั้งสิ้น 441 สะพาน สภาพโดยรวมของแผ่นยางรองคอสะพานแยกตามแขวงทางหลวง ดังตารางที่ 5.2-19 และรูปที่ 5.3-23 โดยสามารถสรุปเป็นสัดส่วนภาพรวมความเสียหายของสำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี) ได้ดังรูปที่ 5.3-24

ตารางที่ 5.2-19 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสะพานแยกตามแขวงทางหลวงพื้นที่พื้นที่ สนง.ทล.กระบี่(สุราษฎร์ธานี)

แขวงทางหลวง	สภาพแผ่นยางรองคอสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
แขวงทางหลวงระนอง	3	122	45
แขวงทางหลวงกระบี่	15	32	54
แขวงทางหลวงภูเก็ต	10	11	11
แขวงทางหลวงพังงา	16	58	64
จำนวนสะพานทั้งหมด	441 สะพาน		



รูปที่ 5.3-23 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานในแต่ละแนวทางการทางพื้นที่ สนง.ทล.กระบี่(สุราษฎร์ธานี)

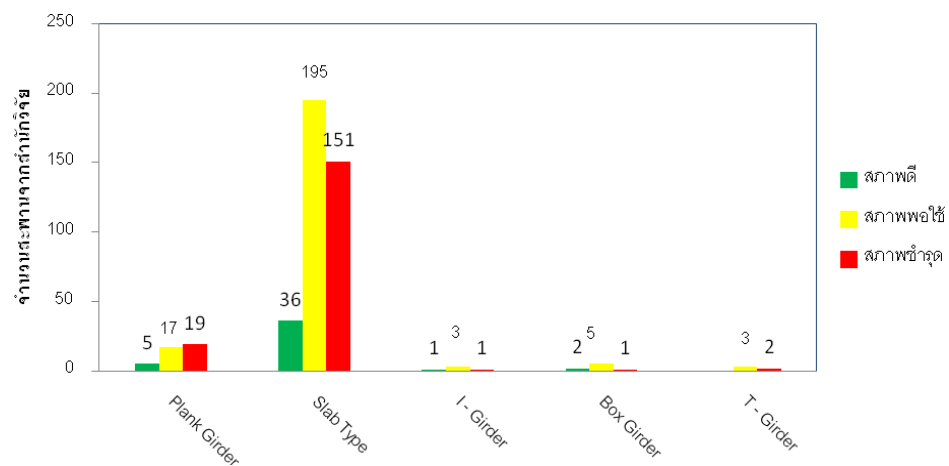


รูปที่ 5.3-24 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สนง.ทล.กระบี่(สุราษฎร์ธานี)

ทั้งนี้สามารถพิจารณาสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.2-20 และรูปที่ 5.3-25

ตารางที่ 5.2-20 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพาน
แยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สนง.ทล.กระบี่(สุราษฎร์ธานี)

ประเภทสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน		
	ดี	พอใช้	ชำรุด
สะพาน Plank Girder	5	17	19
สะพาน Slab Type	36	195	151
สะพาน Box Girder	1	3	1
สะพาน I-Girder	2	5	1
สะพาน T-Girder	0	3	2
สะพานประเภทอื่นๆ	0	0	0



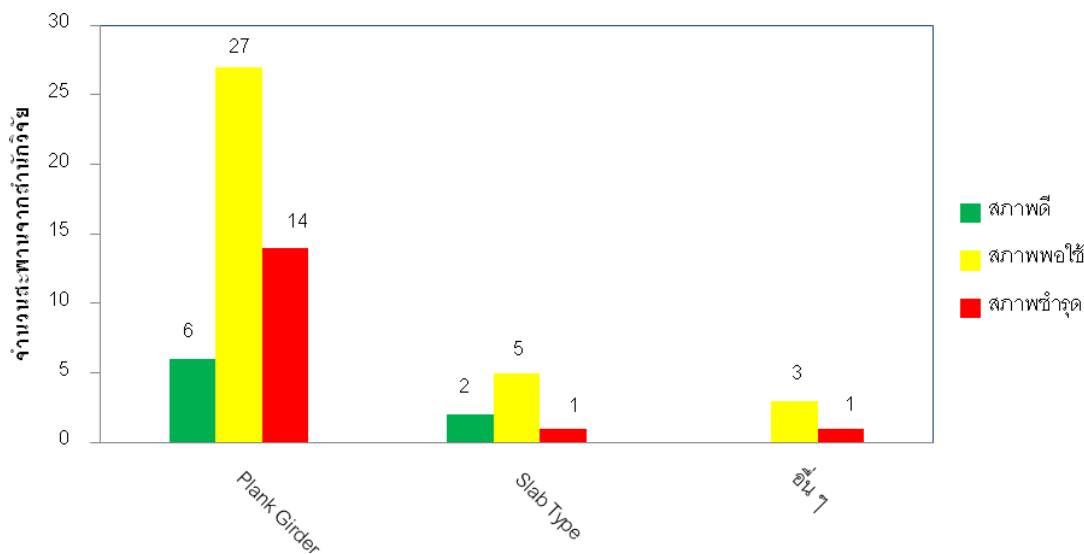
รูปที่ 5.3-25 เปรียบเทียบสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ สนง.ทล.กระบี่(สุราษฎร์ธานี)

5.2.2 ประเมินสภาพยางรองคอสสะพานจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งเกณฑ์ตามอายุสะพาน

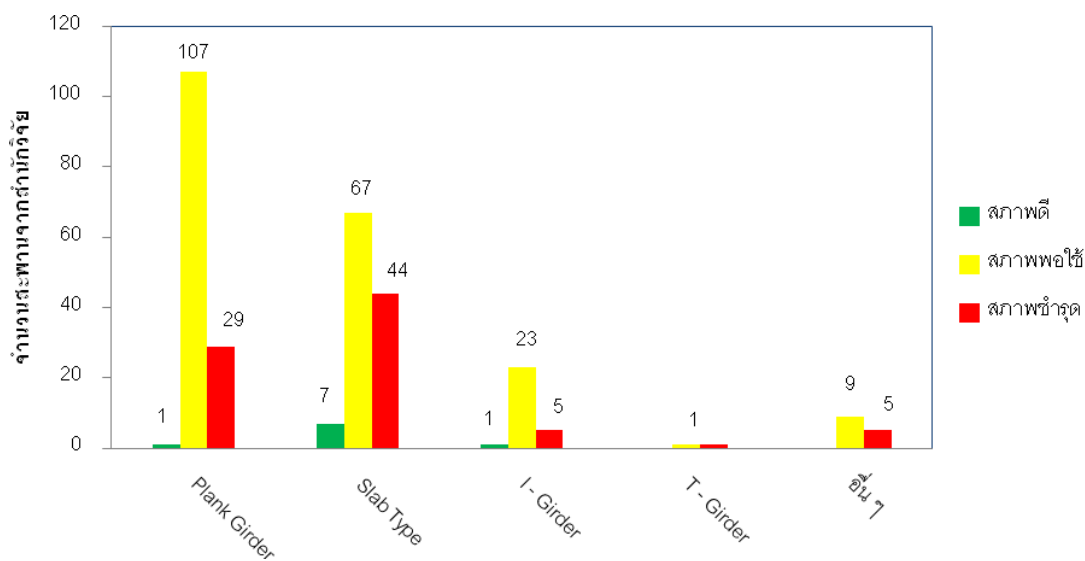
ในการประเมินสภาพความเสียหายโดยแบ่งตามอายุนั้นจะแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ อายุไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี อายุมากกว่า 10 ปี แต่ไม่เกิน 20 ปี และอายุมากกว่า 20 ปี ซึ่งจะแบ่งตามชนิดของสะพานของแต่ละสำนักทางหลวงนั้น

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 9

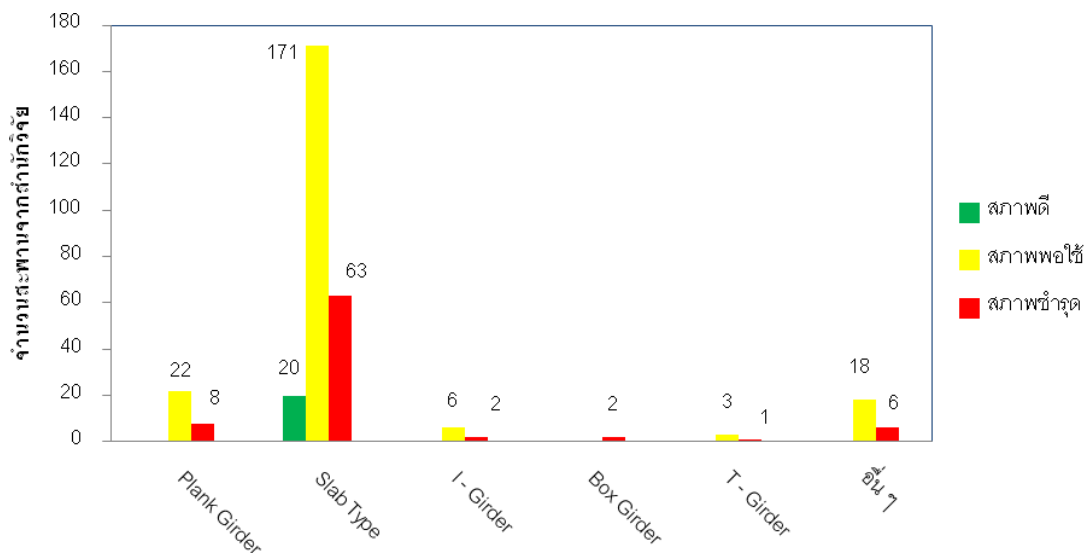
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9 ทั้งสิ้น 681 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-26 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปี แต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-27 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-28



รูปที่ 5.3-26 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



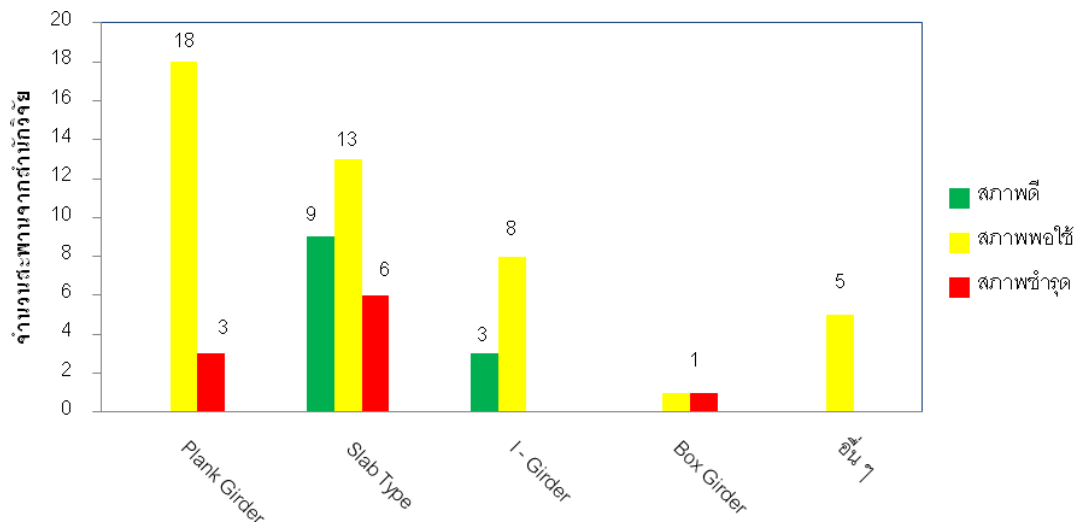
รูปที่ 5.3-27 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



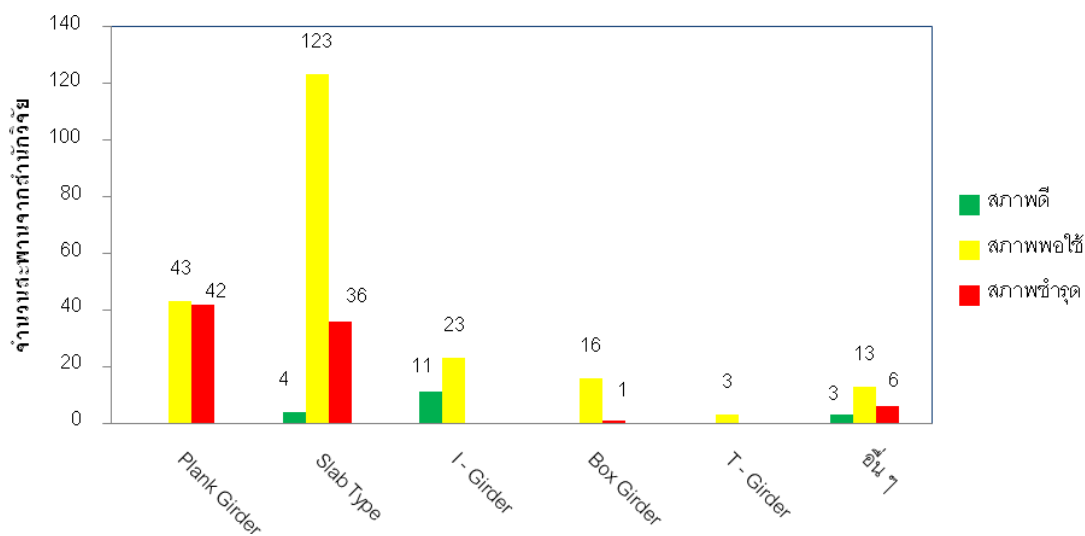
รูปที่ 5.3-28 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 10

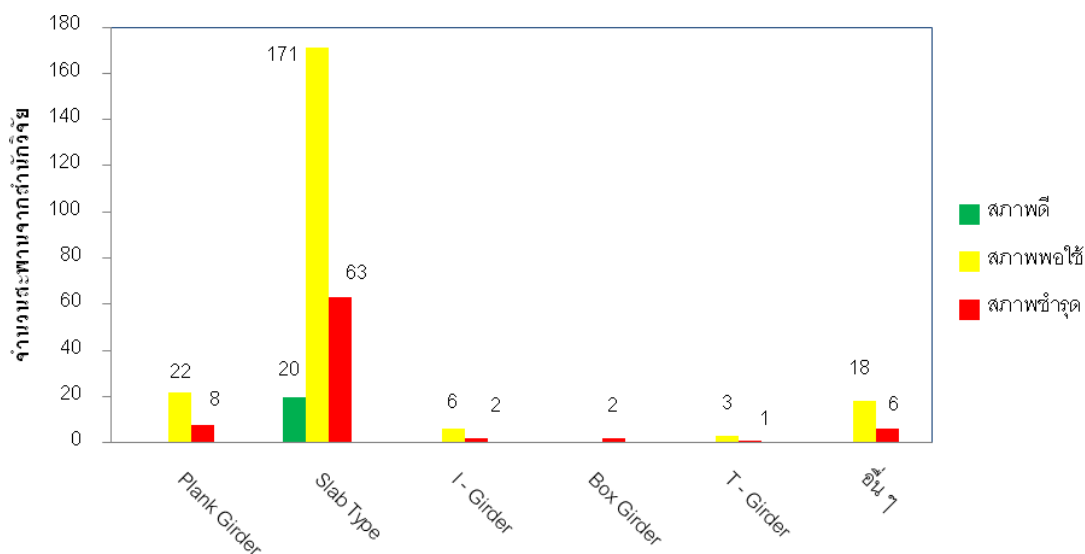
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 10 ทั้งสิ้น 676 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-29 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-30 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-31



รูปที่ 5.3-29 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



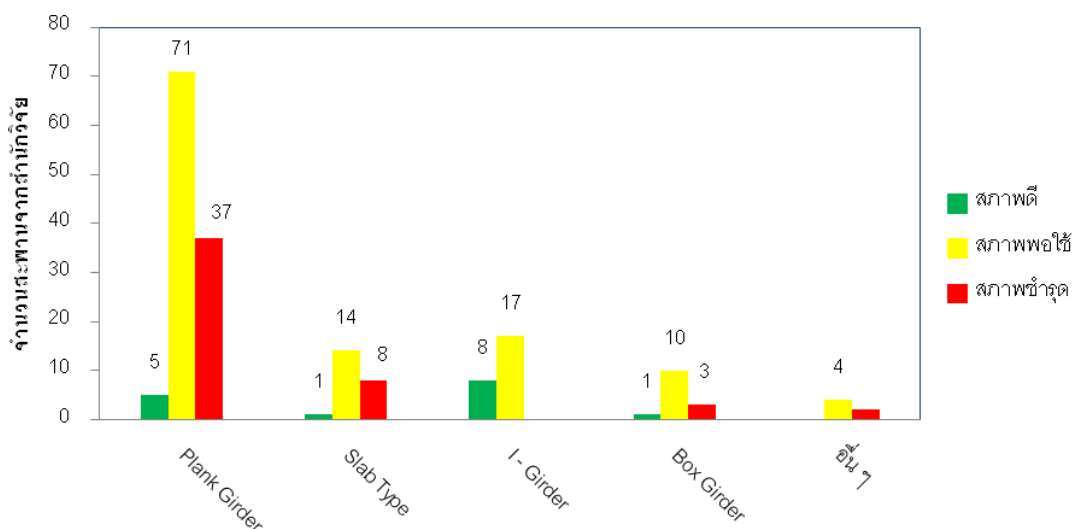
รูปที่ 5.3-30 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



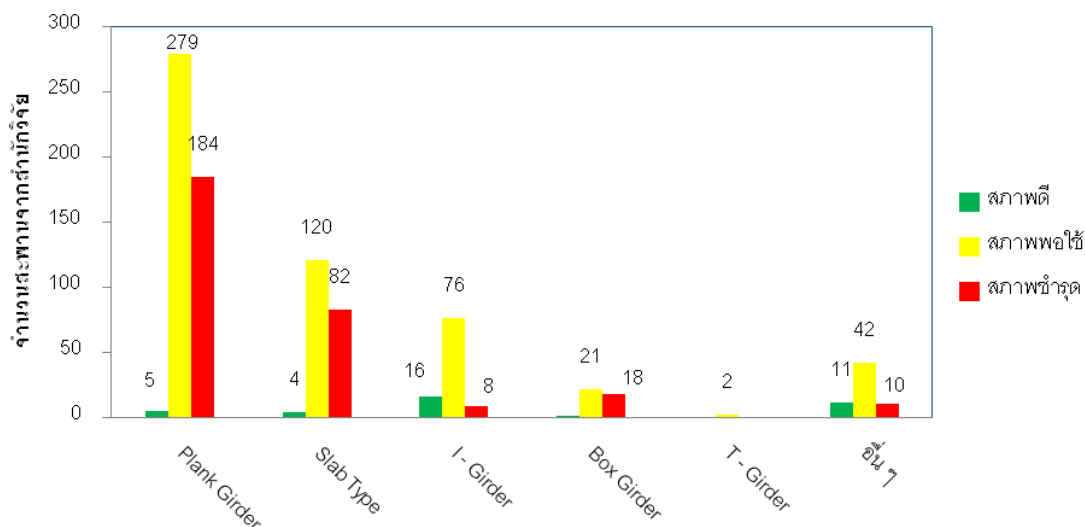
รูปที่ 5.3-31 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 11

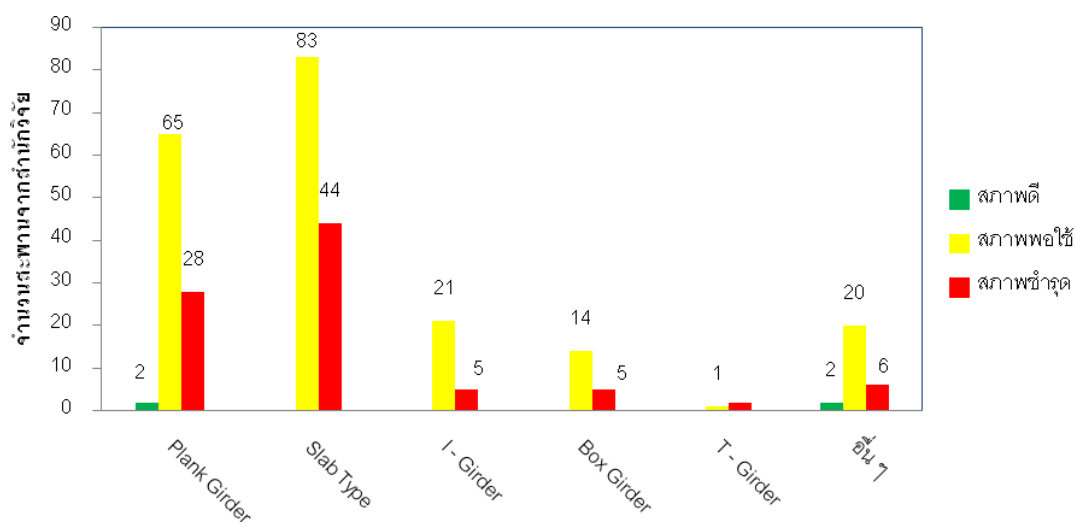
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 11 ทั้งสิ้น 1358 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-32 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-33 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-34



รูปที่ 5.3-32 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



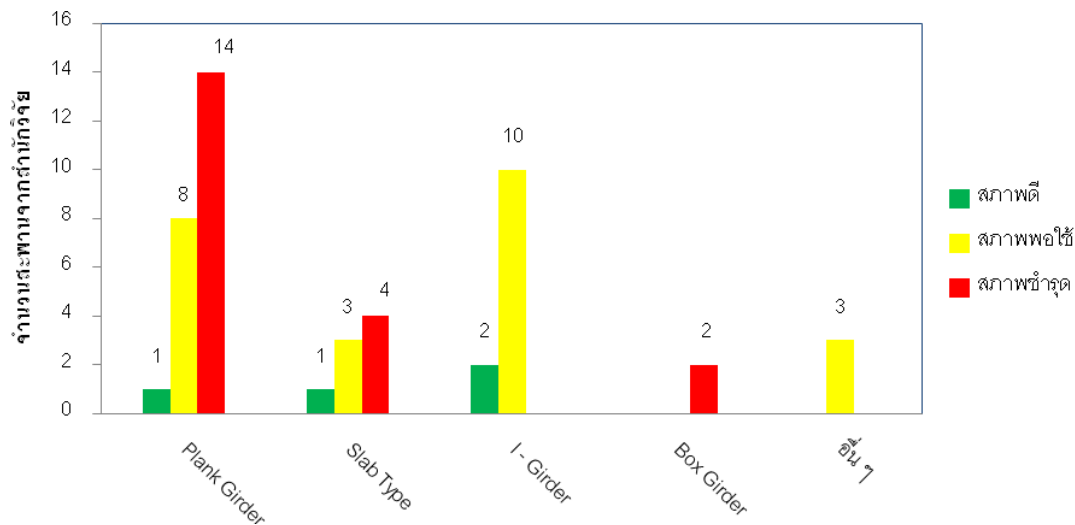
รูปที่ 5.3-33 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



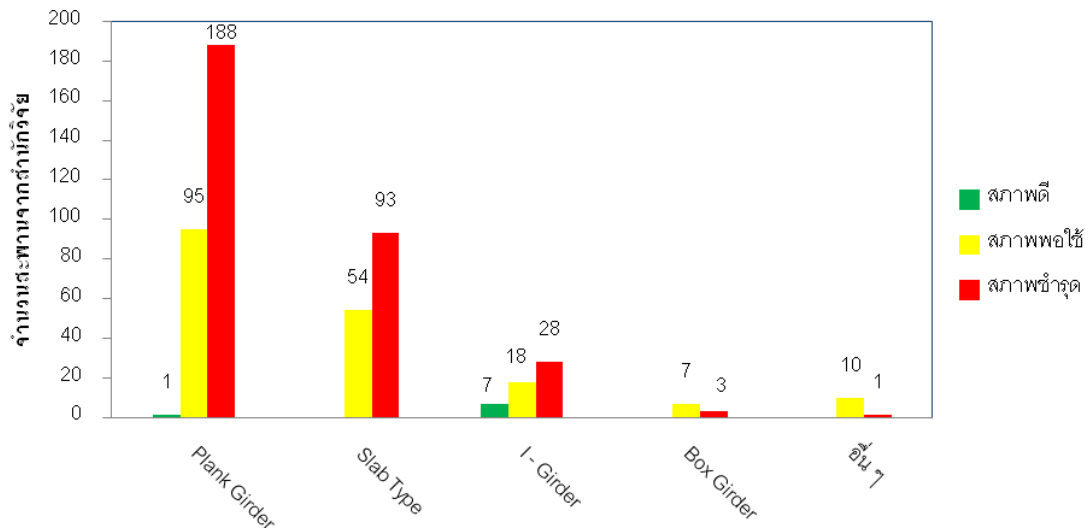
รูปที่ 5.3-34 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 12

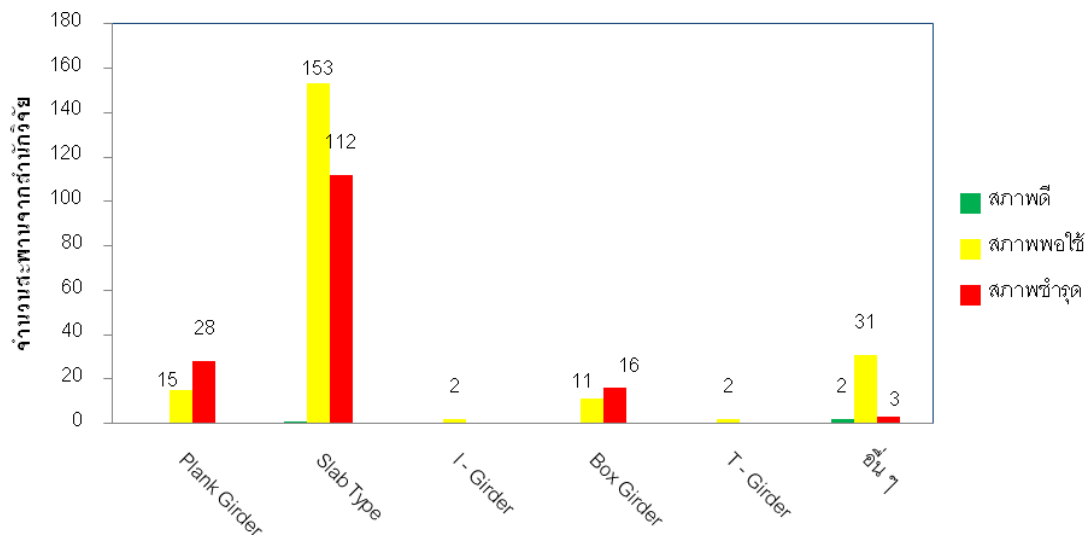
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 12 ทั้งสิ้น 929 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-35 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-36 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-37



รูปที่ 5.3-35 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



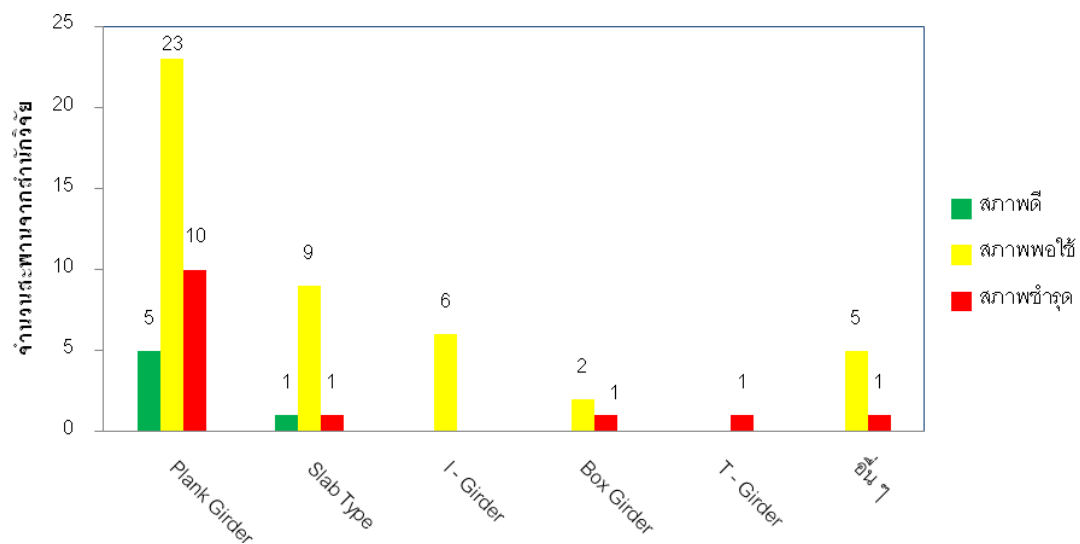
รูปที่ 5.3-36 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



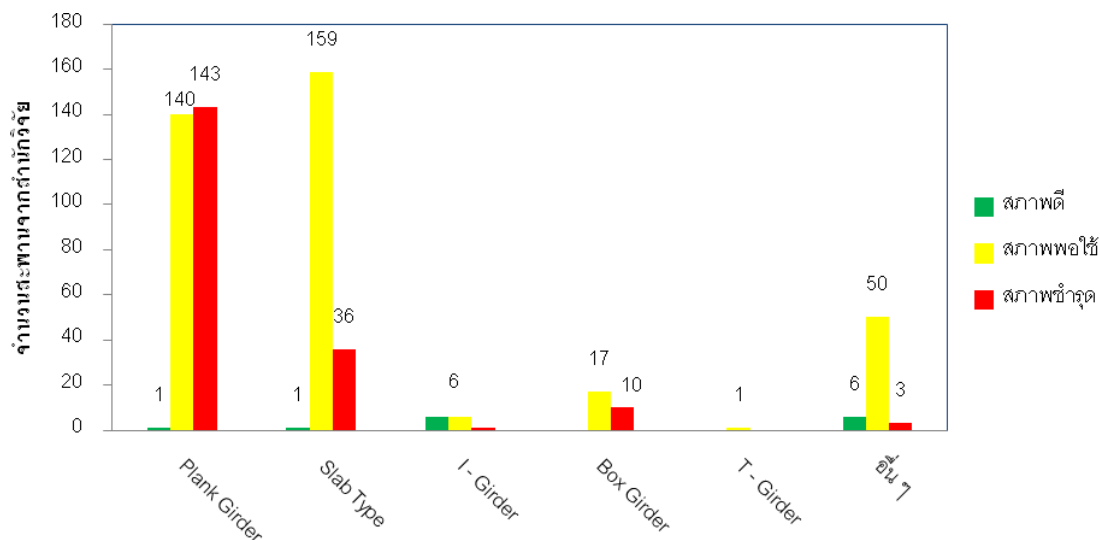
รูปที่ 5.3-37 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 13

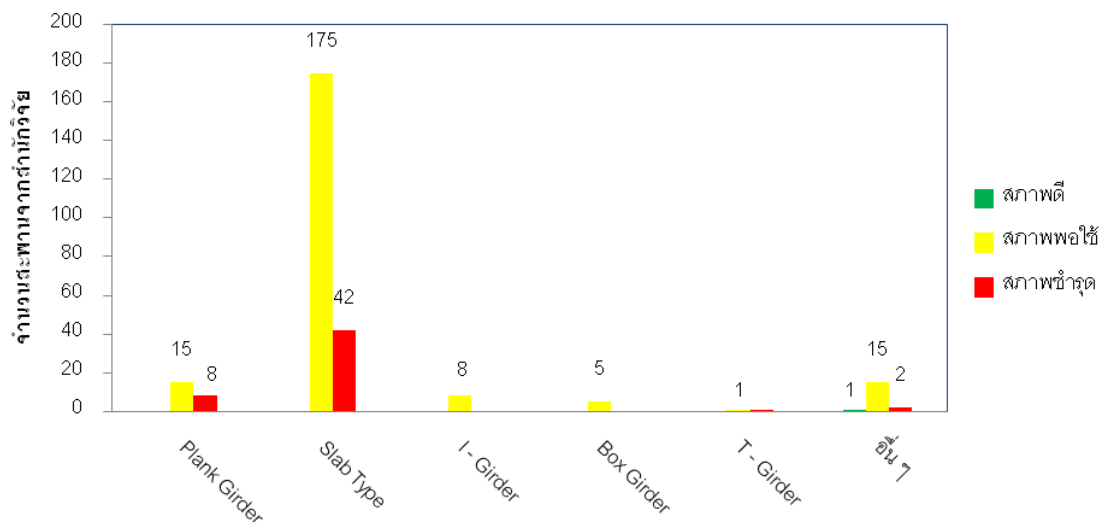
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 13 ทั้งสิ้น 918 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-38 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-39 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-40



รูปที่ 5.3-38 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



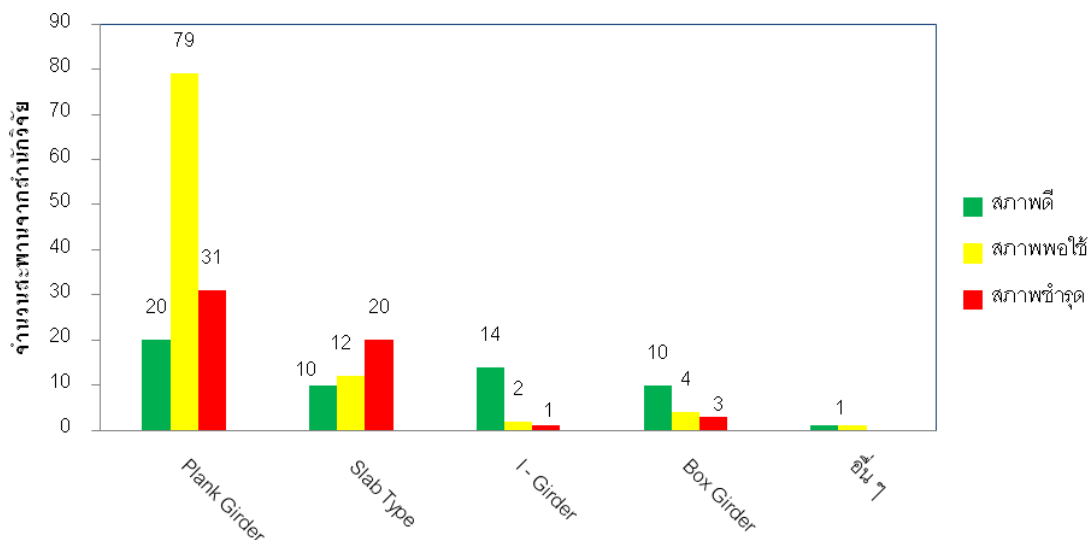
รูปที่ 5.3-39 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



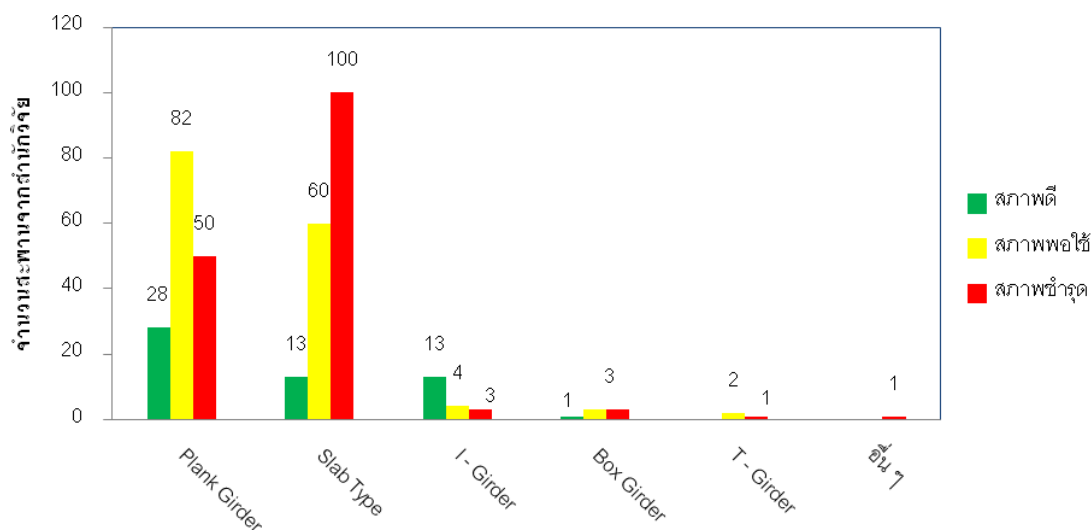
รูปที่ 5.3-40 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 14

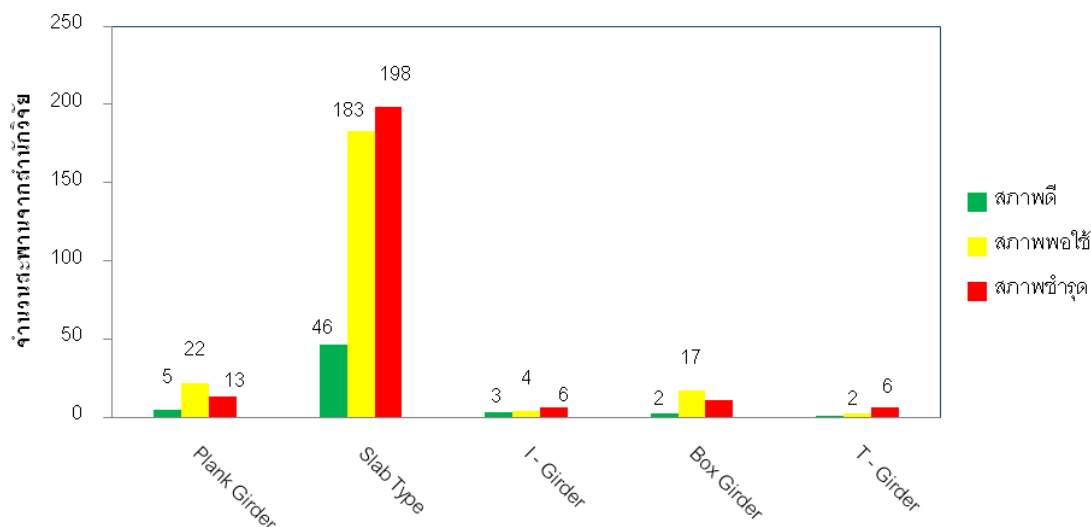
ในพื้นที่สำนักงานหลวงที่ 14 ทั้งสิ้น 1091 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-41 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-42 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-43



รูปที่ 5.3-41 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



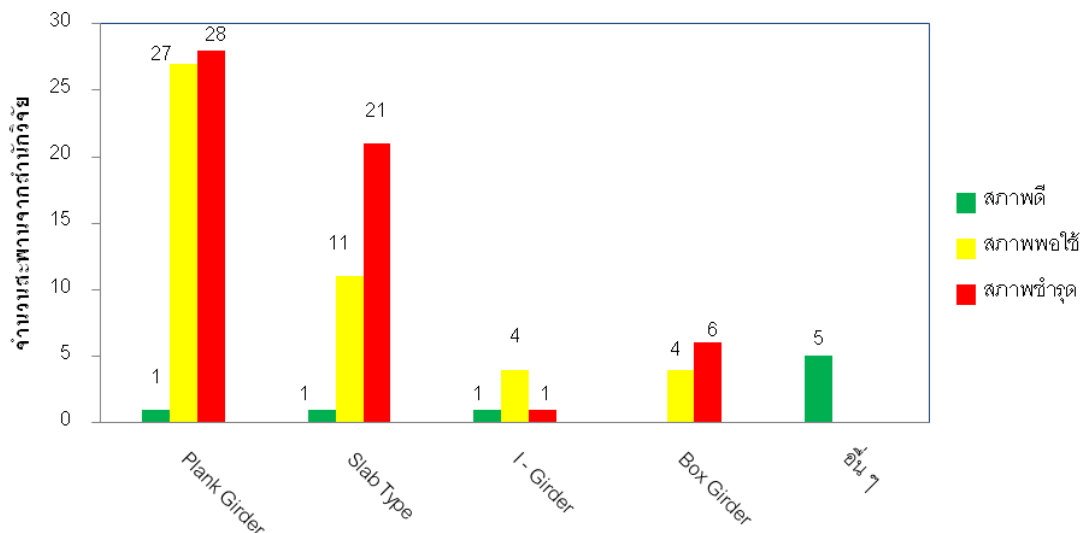
รูปที่ 5.3-42 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่ไม่น้อยกว่า 20 ปี



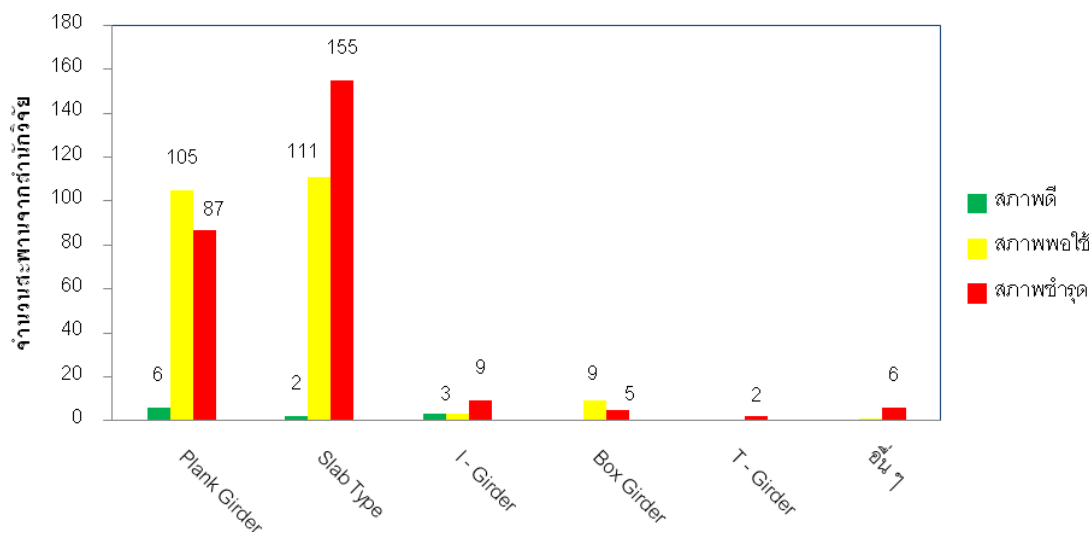
รูปที่ 5.3-43 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักทางหลวงที่ 15

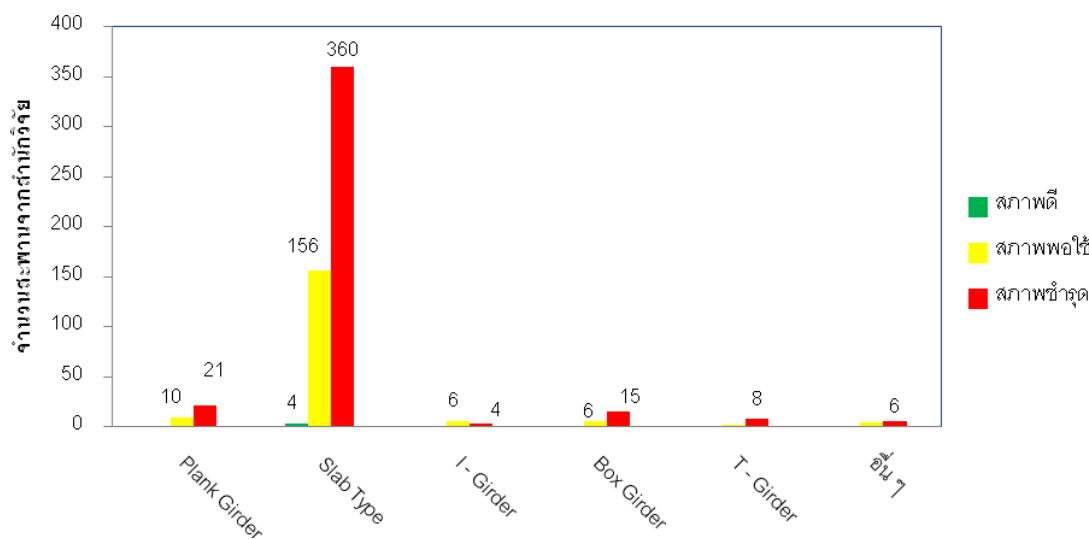
ในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 15 ทั้งสิ้น 1219 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-44 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-45 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-46



รูปที่ 5.3-44 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



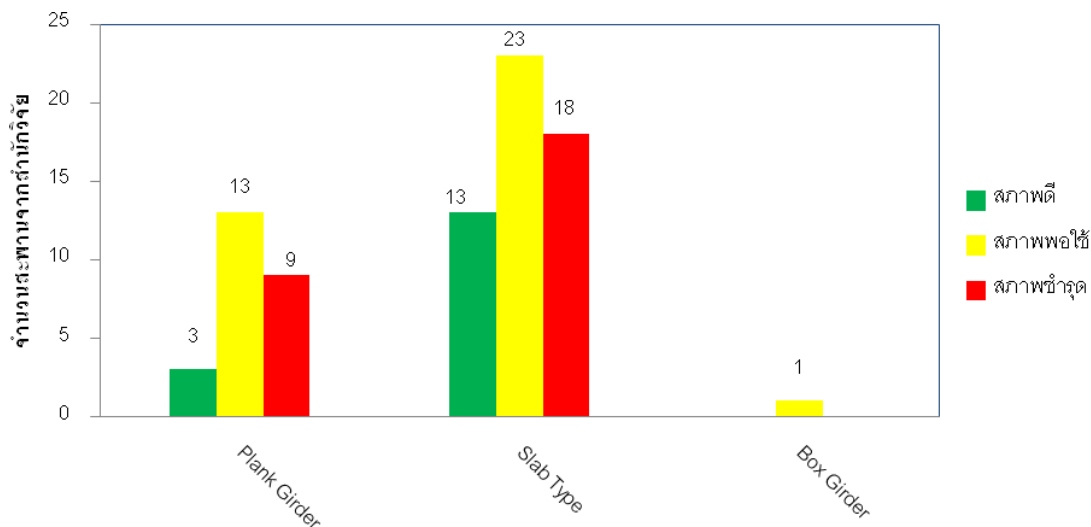
รูปที่ 5.3-45 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



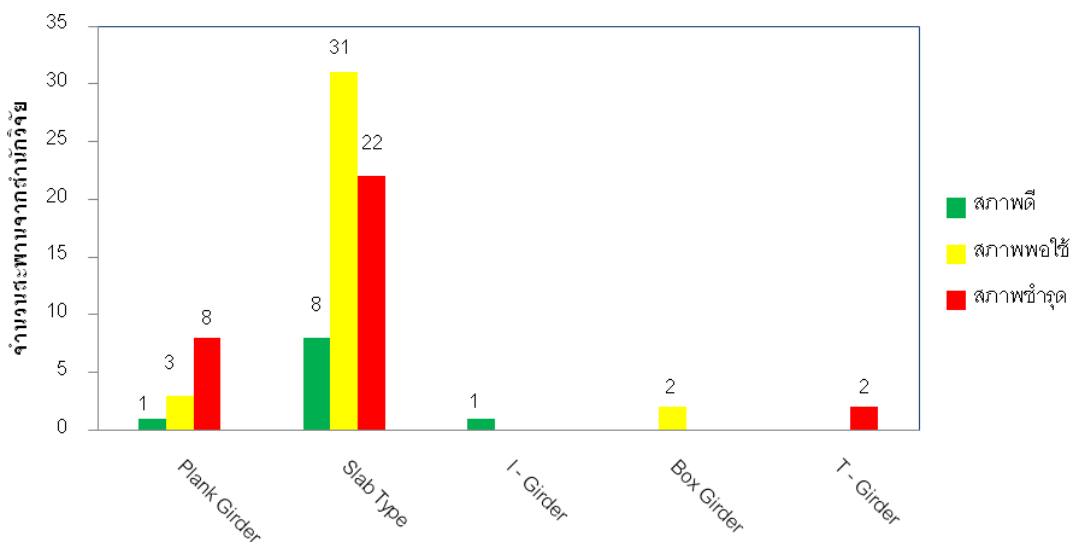
รูปที่ 5.3-46 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

ประเมินจากฐานข้อมูลสะพานโดยแบ่งตามอายุของสำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี)

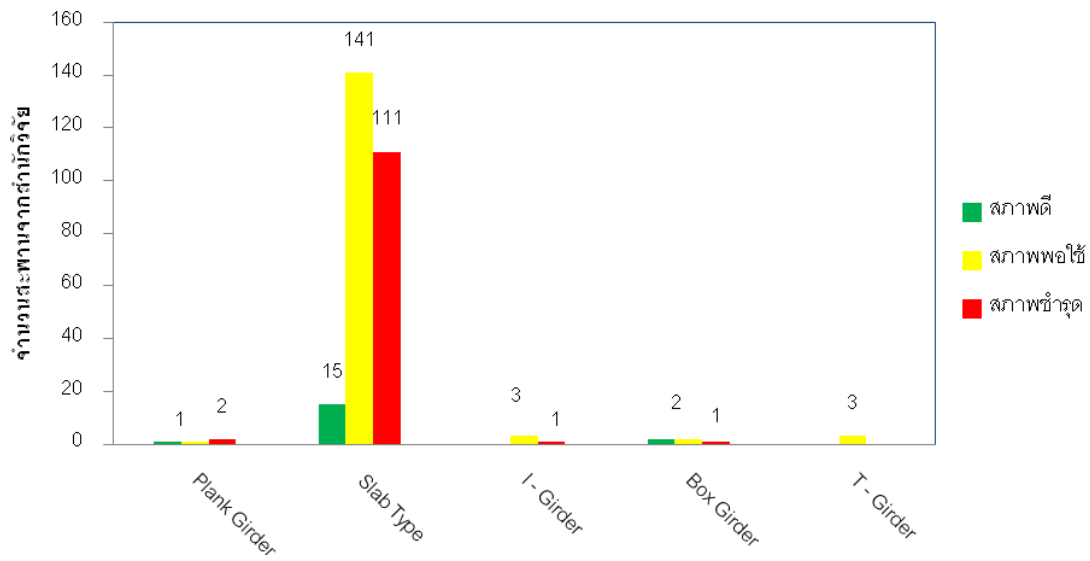
ในพื้นที่สำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี) ทั้งสิ้น 441 สะพาน โดยช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-47 ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-48 และอายุที่มากกว่า 20 ปี แสดงดังรูปที่ 5.3-49



รูปที่ 5.3-47 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี



รูปที่ 5.3-48 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี แต่น้อยกว่า 20 ปี



รูปที่ 5.3-49 สรุปจำนวนสะพานตามระดับความเสียหายในแต่ละชนิดของสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

5.3 สรุปการประเมินจากการสำรวจภาคสนาม

จากการประเมินระดับความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานตามระดับสภาพการใช้งานในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 9 ถึงสำนักงานทางหลวงกระบี่(สุราษฎร์ธานี) นั้น โดยทำการสำรวจจากภาคสนามซึ่งสามารถสรุปสภาพความเสียหายของได้ดังนี้

5.3.1 ภาพรวมของการสำรวจแผ่นยางรองคอสสะพาน 314 สะพาน

ที่ปรึกษาได้ทำการสำรวจสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานช่วงสั้น (ความยาวช่วงไม่เกิน 20 เมตร) ด้วยสายตา (Visual Inspection) ในพื้นที่การศึกษาของโครงการ จำนวน 314 สะพาน รวมถึงทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของแผ่นยางรองคอสสะพานในบริเวณที่เข้าถึงได้ โดยสะพานแต่ละประเภทที่ได้ทำการสำรวจ สรุปดังแสดงในตารางที่ 5.3-1 และที่ปรึกษาได้ทำการประเมินสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานสะพานตามระดับเกณฑ์สภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่กรมทางหลวงกำหนด สามารถสรุปสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่ต่าง ๆ และแยกตามประเภทสะพานได้ดังตารางที่ 5.3-2

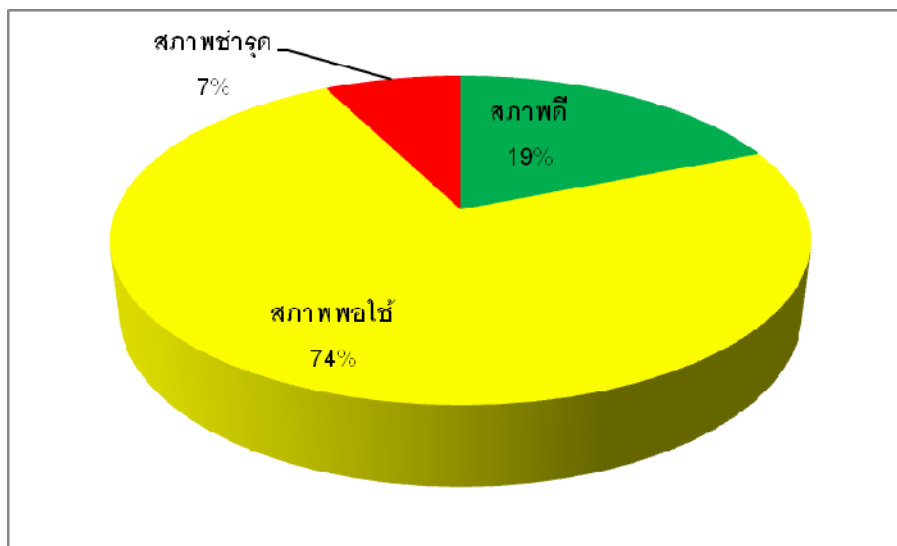
ตารางที่ 5.3-1 สรุปประเภทสะพานที่ได้ทำการสำรวจสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพาน

สำนักงานทางหลวง /สำนักงานทางหลวง	ประเภทสะพาน				
	Slab Type	Plank Girder	I-Girder	Box Girder	T- Girder
ที่ 9 (ลพบุรี)	15	25	5	1	2
ที่ 10 (สุพรรณบุรี)	14	16	4	4	2
ที่ 11 (กรุงเทพ)	9	19	13	0	2
ที่ 12 (ชลบุรี)	7	23	10	6	1
ที่ 13 (ประจวบคีรีขันธ์)	12	15	10	2	1
ที่ 14 (นครศรีธรรมราช)	9	13	11	4	3
ที่ 15 (สงขลา)	2	10	5	3	0
สง.ทล. กระบี่	14	17	0	3	2
รวม	82	138	58	23	13

ตารางที่ 5.3-2 สภาพแผ่นยางรองคอสะพานที่ได้จากการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ของโครงการ

สำนักทางหลวง /สำนักงานทางหลวง	สภาพแผ่นยางรองคอสะพาน			รวม
	สภาพดี	สภาพพอใช้	สภาพชำรุด	
ที่ 9 (ลพบุรี)	10	31	7	48
ที่ 10 (สุพรรณบุรี)	0	38	2	40
ที่ 11 (กรุงเทพ)	9	31	3	43
ที่ 12 (ชลบุรี)	0	47	0	47
ที่ 13 (ประจวบคีรีขันธ์)	12	28	0	40
ที่ 14 (นครศรีธรรมราช)	9	29	2	40
ที่ 15 (สงขลา)	11	9	0	20
สง.ทล. กระบี่	2	26	8	36
รวม	52	238	24	314

ผลการประเมินสภาพแผ่นยางรองคอสะพานจากการสำรวจภาคสนาม สามารถสรุปภาพรวมของแผ่นยางรองคอสะพานในพื้นที่การศึกษาของโครงการได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3-1 ซึ่งพบว่า แผ่นยางรองคอสะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่ของโครงการมีสภาพพอใช้ สภาพดี และสภาพชำรุด ตามลำดับ



รูปที่ 5.3-1 สภาพการใช้งานของแผ่นยางรองคอสะพานในพื้นที่การศึกษาของโครงการจากการสำรวจภาคสนาม

5.3.2 ประเมินความเสียหายของยางรองคอสสะพานจากการสำรวจภาคสนาม

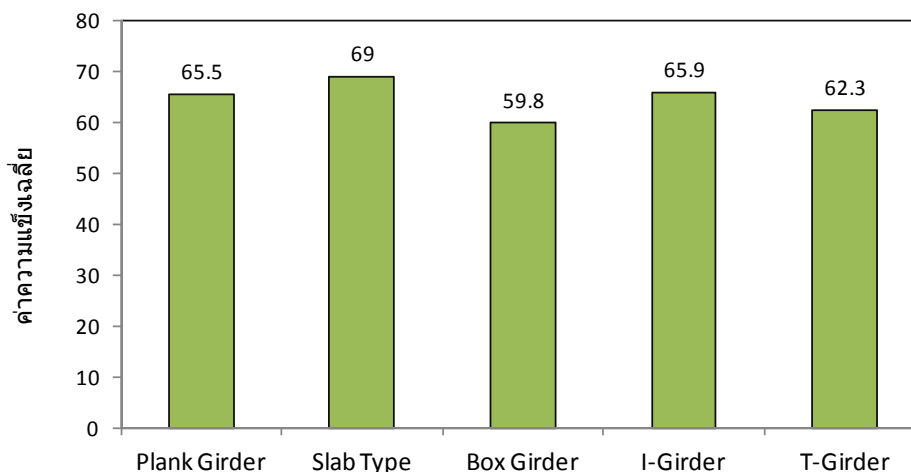
จากการสำรวจสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานสามารถสรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานโดยแยกตามพื้นที่สำนักงานทางหลวงได้ ดังนี้

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9

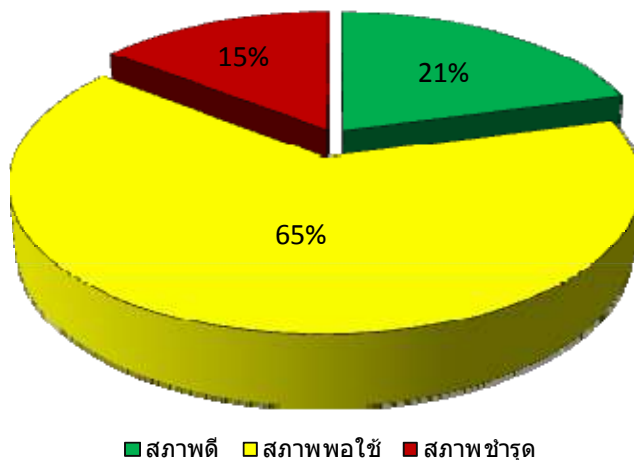
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 9 ทั้งสิ้น 48 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-3 และรูปที่ 5.3-2 ถึง 5.3-3

ตารางที่ 5.3-3 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 9

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	25	7	18	-	65.5
สะพาน Slab Type	15	2	7	6	69.0
สะพาน Box Girder	1	-	1	-	59.8
สะพาน I-Girder	5	1	4	-	65.86
สะพาน T-Girder	2	-	1	1	62.3



รูปที่ 5.3-2 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.9



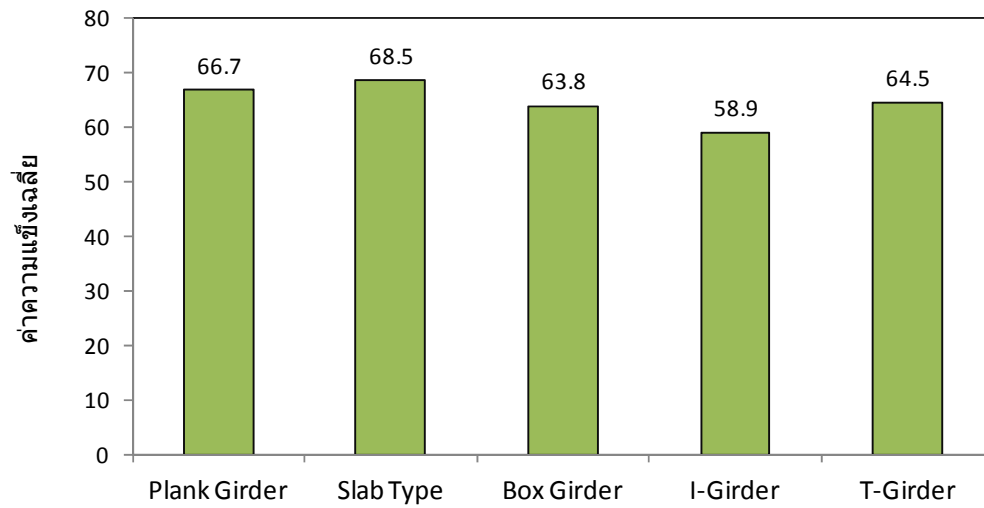
รูปที่ 5.3-3 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล. 9

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 10

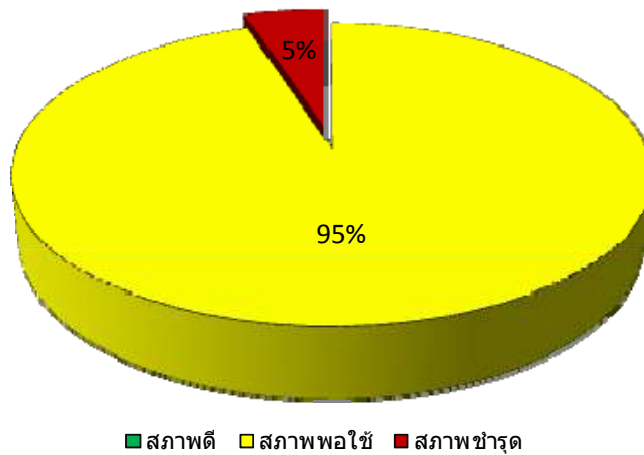
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 10 ทั้งสิ้น 40 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-4 และรูปที่ 5.3-4 ถึง 5.3-4

ตารางที่ 5.3-4 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางหลวงในพื้นที่ สทล.10

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	16	-	16	-	66.7
สะพาน Slab Type	14	-	14	-	68.5
สะพาน Box Girder	4	-	4	-	63.8
สะพาน I-Girder	4	-	4	-	58.9
สะพาน T-Girder	2	-	-	2	64.5



รูปที่ 5.3-4 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.10



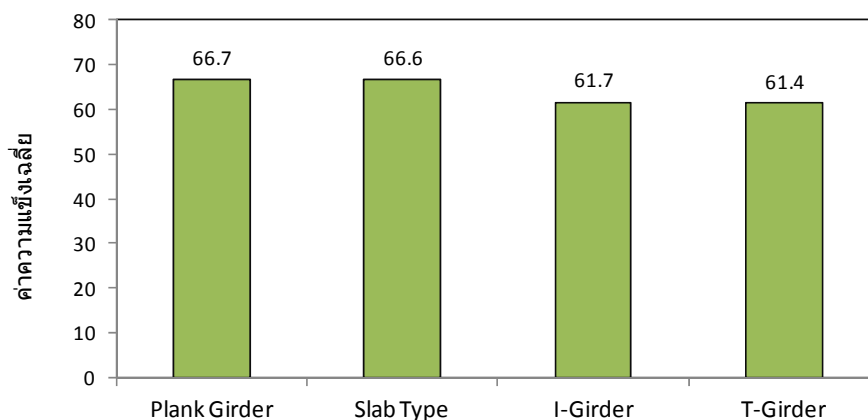
รูปที่ 5.3-5 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล. 10

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 11

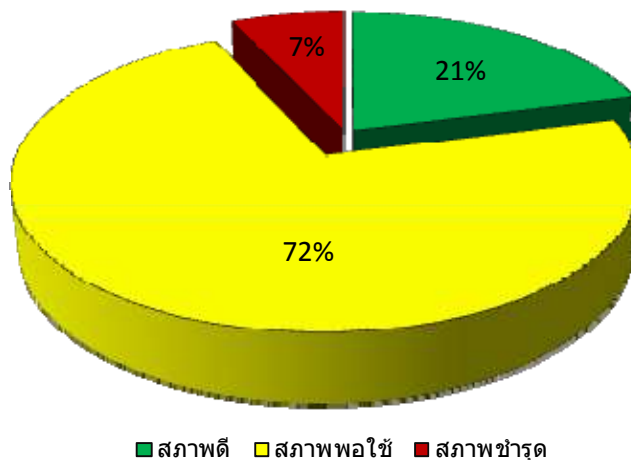
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 11 ทั้งสิ้น 43 สะพาน ซึ่งได้สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-5 รูปที่ 5.3-6 และรูปที่ 5.3-7

ตารางที่ 5.3-5 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแนวทางการทางในพื้นที่ สทล. 11

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	19	5	12	2	66.7
สะพาน Slab Type	9	1	8	-	66.6
สะพาน Box Girder	5	-	-	-	-
สะพาน I-Girder	13	3	10	-	61.7
สะพาน T-Girder	2	-	1	1	61.4



รูปที่ 5.3-6 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.11



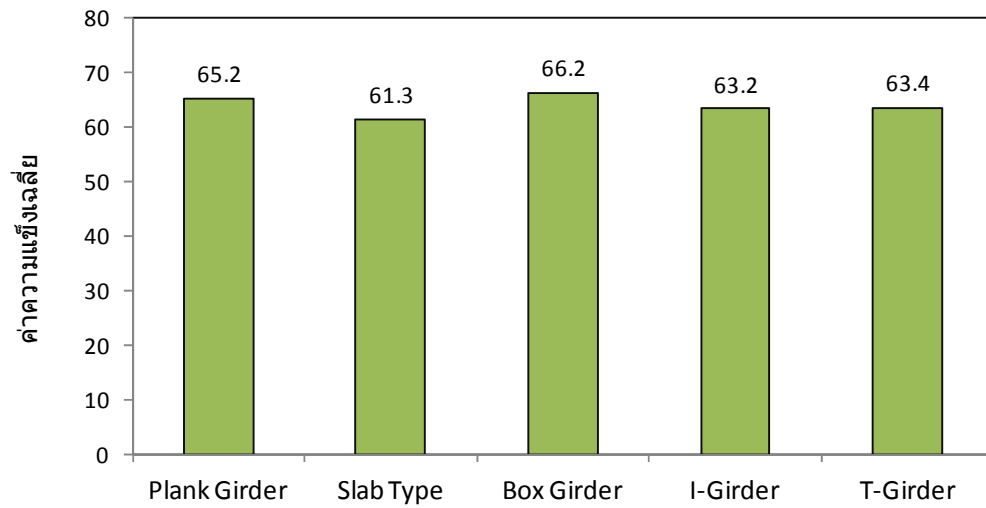
รูปที่ 5.3-7 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานสำนักทางหลวงที่ 11

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 12

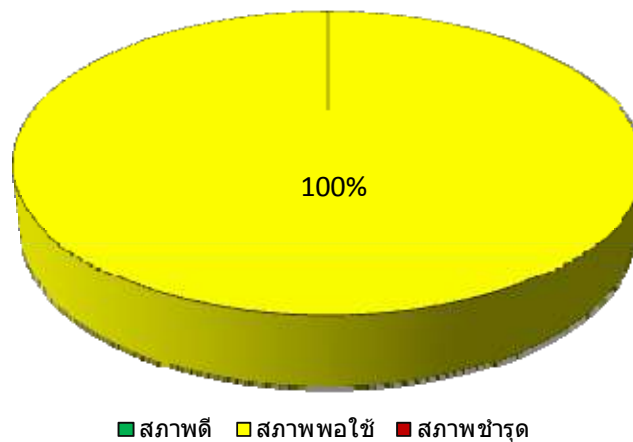
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 12 ทั้งสิ้น 47 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-6 และรูปที่ 5.3-8 ถึง 5.3-9

ตารางที่ 5.3-6 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางในพื้นที่ สทล. 12

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	23	-	23	-	65.2
สะพาน Slab Type	7	-	7	-	61.3
สะพาน Box Girder	6	-	6	-	66.2
สะพาน I-Girder	10	-	10	-	63.2
สะพาน T-Girder	1	-	1	-	63.4



รูปที่ 5.3-8 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.12



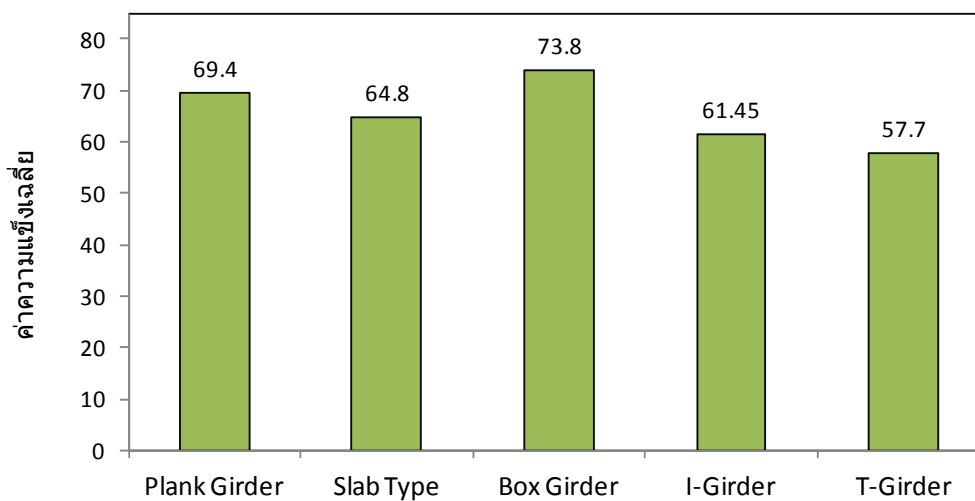
รูปที่ 5.3-9 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล.12

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 13

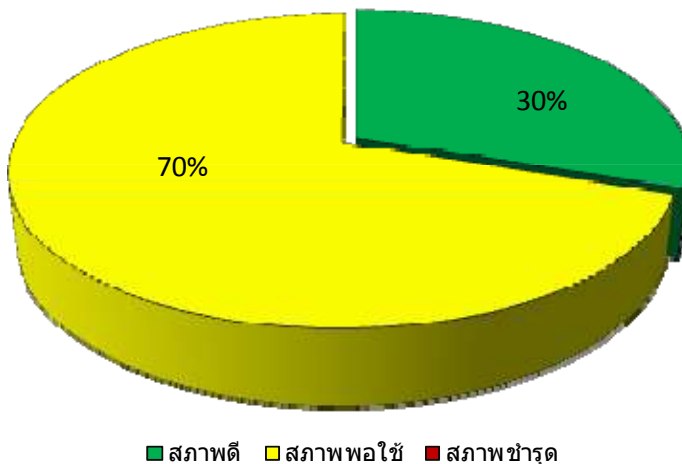
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 13 ทั้งสิ้น 40 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-7 และรูปที่ 5.3-10 ถึง 5.3-11

ตารางที่ 5.3-7 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางหลวงในพื้นที่ สทล.13

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	15	3	12	-	69.4
สะพาน Slab Type	12	3	9	-	64.8
สะพาน Box Girder	2	-	2	-	73.8
สะพาน I-Girder	10	5	5	-	61.45
สะพาน T-Girder	1	1	-	-	57.7



รูปที่ 5.3-10 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.13



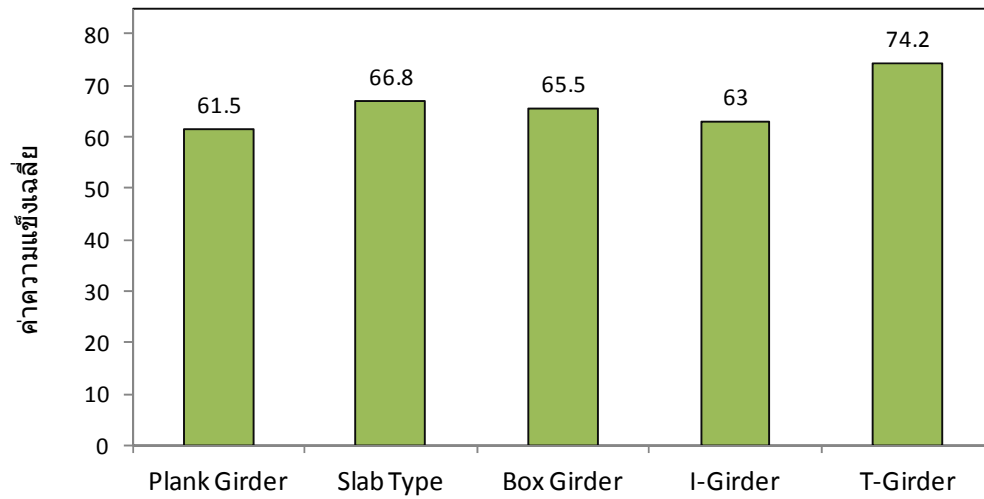
รูปที่ 5.3-11 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล.13

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 14

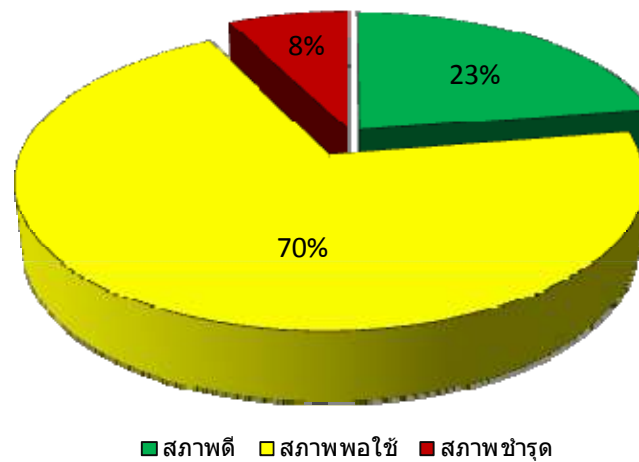
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 14 ทั้งสิ้น 40 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-8 และรูปที่ 5.3-12 ถึง 5.3-13

ตารางที่ 5.3-8 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางหลวงในพื้นที่ สทล. 14

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	13	2	11	-	61.5
สะพาน Slab Type	9	-	9	-	66.8
สะพาน Box Girder	4	1	2	1	65.5
สะพาน I-Girder	11	6	5	-	63.0
สะพาน T-Girder	3	-	2	1	74.2



รูปที่ 5.3-12 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.14



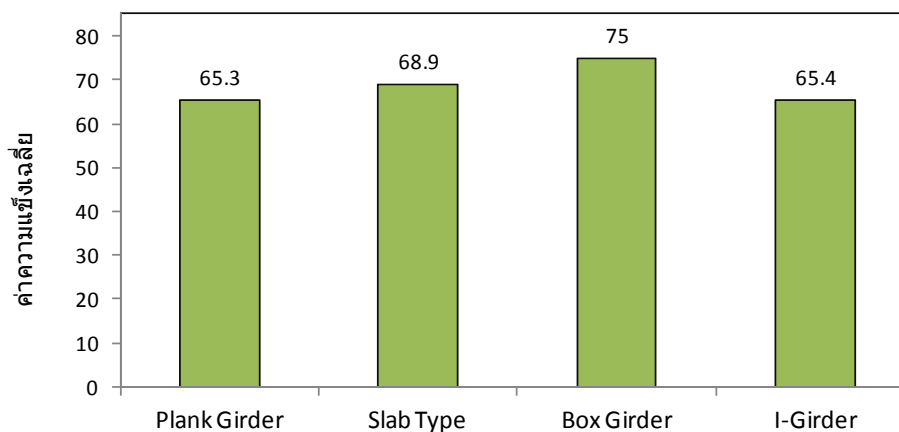
รูปที่ 5.3-13 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล.14

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 15

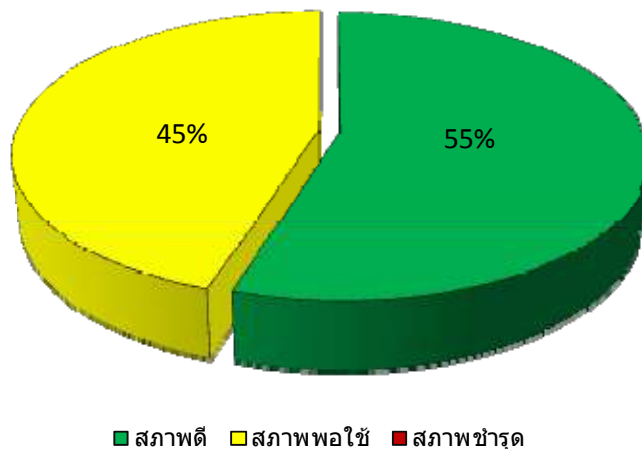
จากการประเมินสภาพแผ่นการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักทางหลวงที่ 15 ทั้งสิ้น 20 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-9 และรูปที่ 5.3-14 ถึง 5.3-15

ตารางที่ 5.3-9 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแนวทางการทางในพื้นที่ สทล.15

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	10	5	5	-	65.3
สะพาน Slab Type	2	2	-	-	68.9
สะพาน Box Girder	3	-	3	-	75.0
สะพาน I-Girder	5	4	1	-	65.4



รูปที่ 5.3-14 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สทล.15



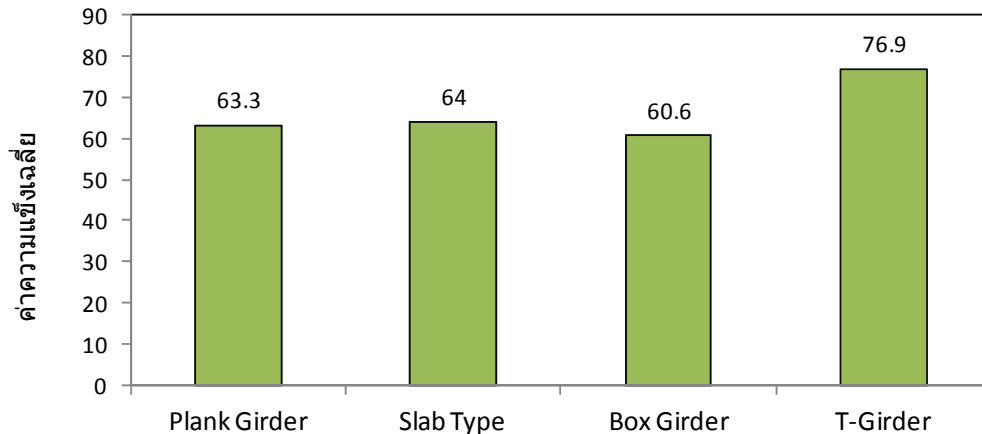
รูปที่ 5.3-15 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายของยางรองคอสสะพานพื้นที่ สทล. 15

การสำรวจภาคสนามพื้นที่สำนักงานทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี)

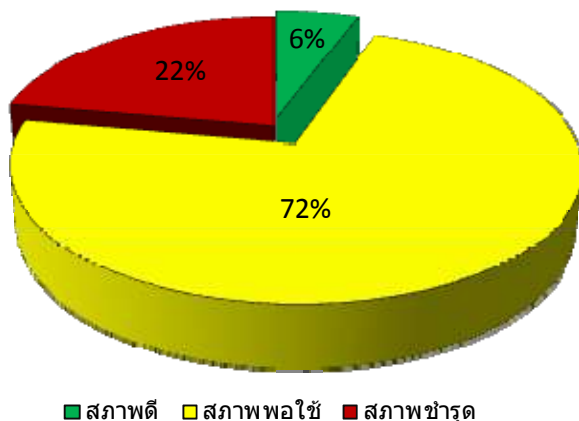
จากการประเมินสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักงานทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี) ทั้งสิ้น 36 สะพาน สรุปสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานที่สำรวจภาคสนาม ดังตารางที่ 5.3-10 และรูปที่ 5.3-16 ถึง 5.3-17

ตารางที่ 5.3-10 สรุปสภาพการใช้งานแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามแขวงทางพื้นที่ สง.ทล.กระบี่ (สุราษฎร์ธานี)

ประเภทสะพาน	จำนวนสะพาน	สภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน			ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย
		ดี	พอใช้	ชำรุด	
สะพาน Plank Girder	17	1	13	3	63.3
สะพาน Slab Type	14	-	9	5	64.0
สะพาน Box Girder	3	1	2	-	60.6
สะพาน T-Girder	2	-	2	-	76.9



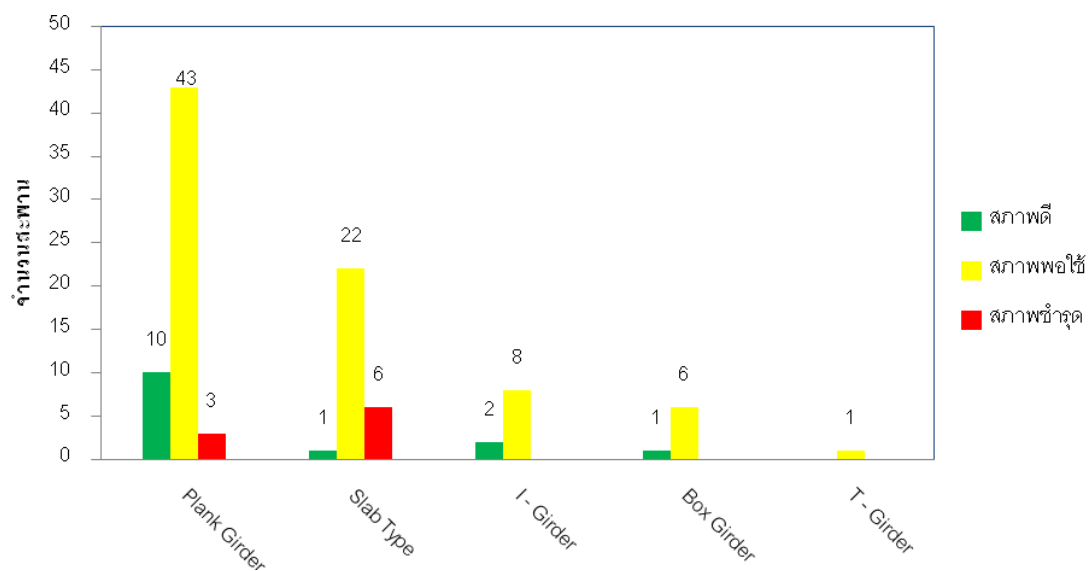
รูปที่ 5.3-16 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานพื้นที่ สง.ทล.กระบี่ (สุราษฎร์ธานี)



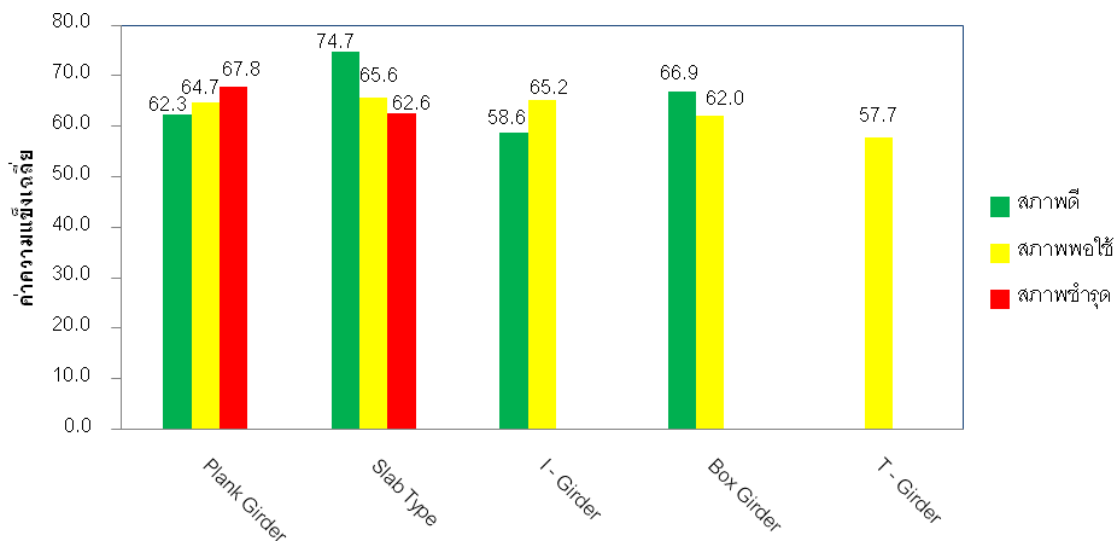
รูปที่ 5.3-17 เปรียบเทียบสัดส่วนความเสียหายยางรองคอสสะพานพื้นที่ สง.ทล.กระบี่ (สุราษฎร์ธานี)

5.3.3 สภาพความเสียหายจากการสำรวจภาคสนามแยกตามอายุ

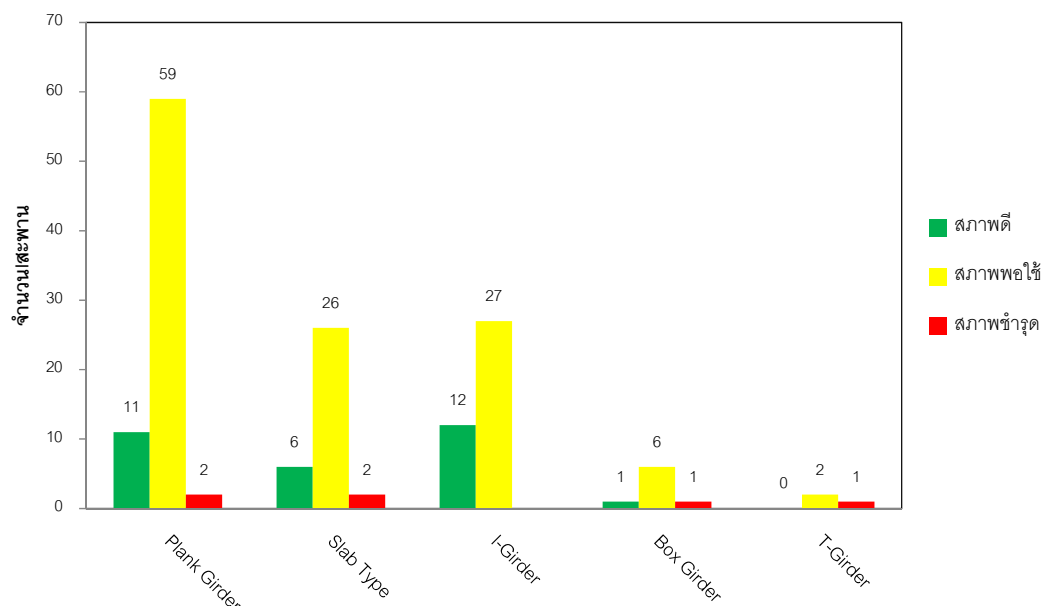
การประเมินค่าความเสียหายจากการสำรวจภาคสนามโดยพิจารณาแบ่งเป็นช่วงอายุทั้งสิ้น 3 ช่วงอายุ คือ ช่วงอายุสะพานน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี ช่วงอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี และอายุที่มากกว่า 20 ปี โดยเปรียบเทียบความเสียหายของยางรองคอสสะพานในแต่ละช่วงอายุแยกตามชนิดสะพาน และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยในแต่ละช่วงอายุ แสดงดังรูปที่ 5.3-18 ถึง 5.3-23



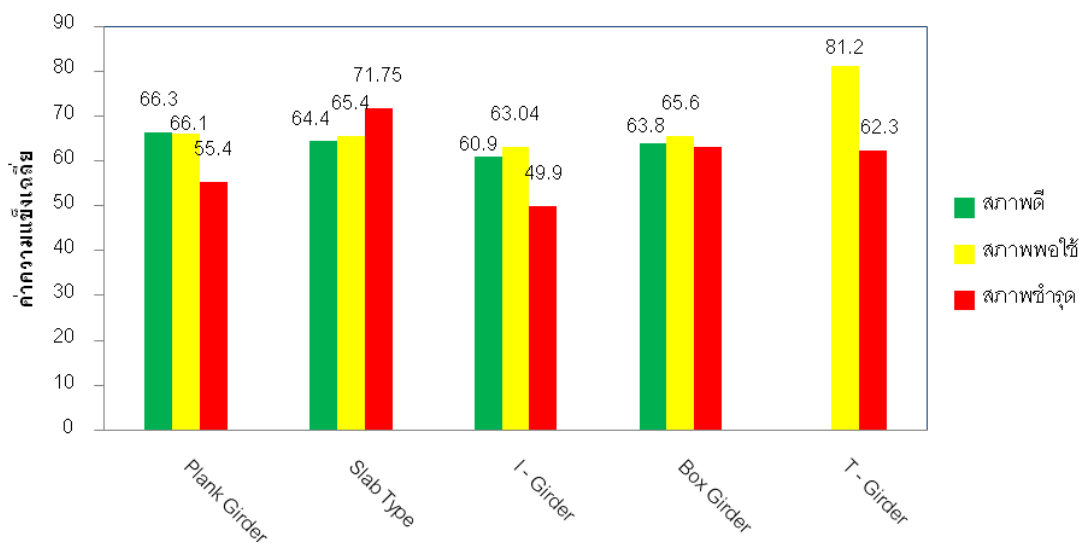
รูปที่ 5.3-18 สภาพแผ่นยางรองคอสสะพานที่มีอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี



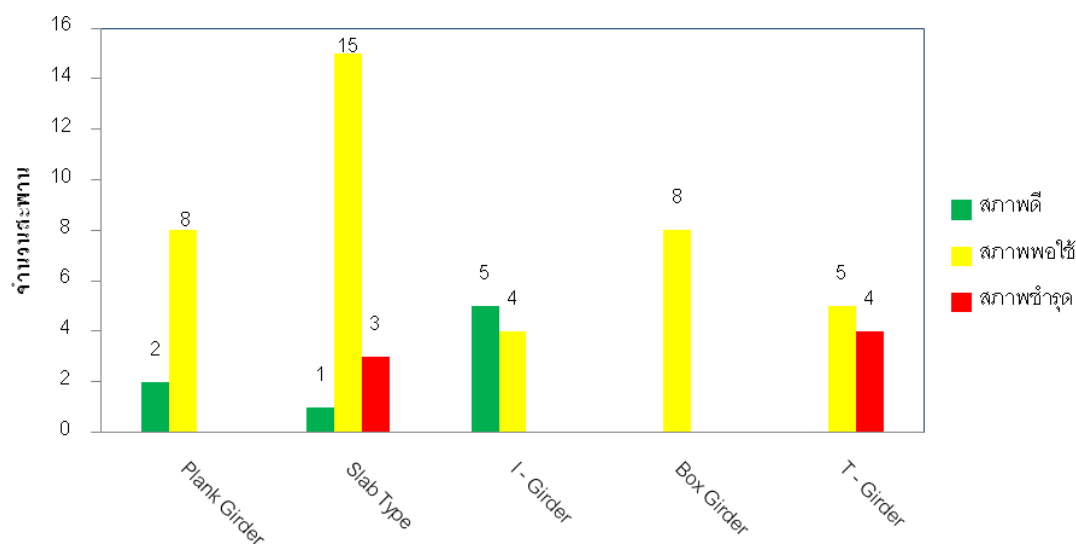
รูปที่ 5.3-19 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองสะพานที่มีอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี



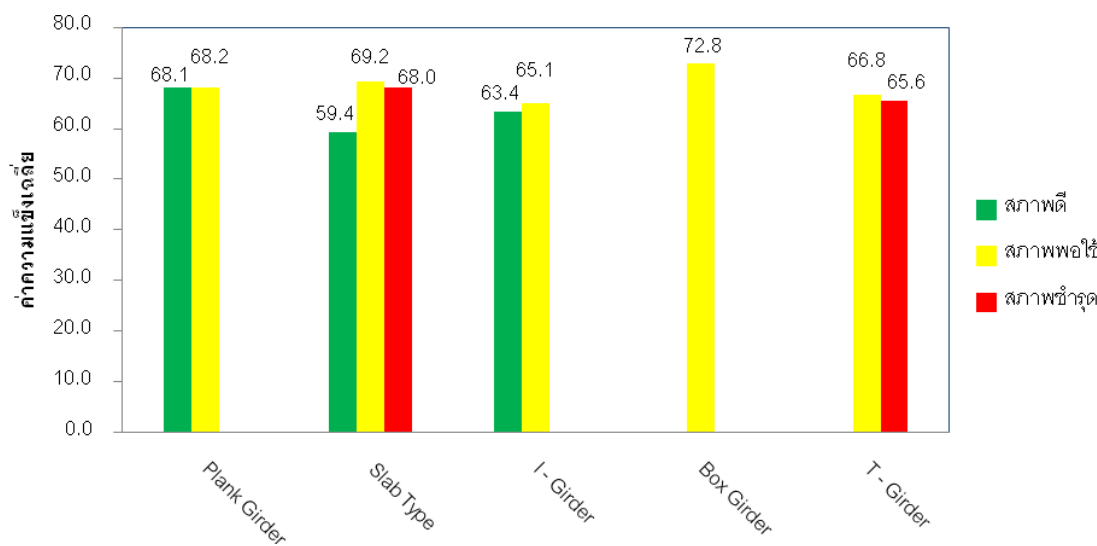
รูปที่ 5.3-20 สภาพแผ่นยางรองสะพานที่มีอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี



รูปที่ 5.3-21 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองสะพานที่มีอายุมากกว่า 10 ปีแต่ไม่เกิน 20 ปี



รูปที่ 5.3-22 สภาพแผ่นยางรองสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี



รูปที่ 5.3-23 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแผ่นยางรองสะพานที่มีอายุมากกว่า 20 ปี

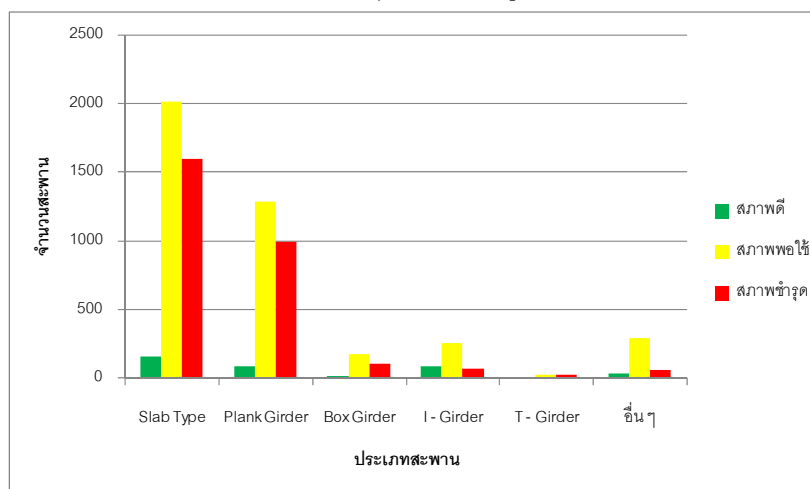
5.4 สรุปผลการประเมินสภาพยางรองคอสสะพานและข้อเสนอแนะ

การประเมินระดับสภาพความเสียหายของแผ่นยางรองคอสสะพานตามระดับสภาพการใช้งาน โดยการประเมินครอบคลุมพื้นที่ด้านทางหลวงที่ 9 – 15 และสำนักงานทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี) สรุปได้ดังนี้

5.4.1 สรุปการประเมินสภาพยางรองคอสสะพานจากฐานข้อมูลสะพาน

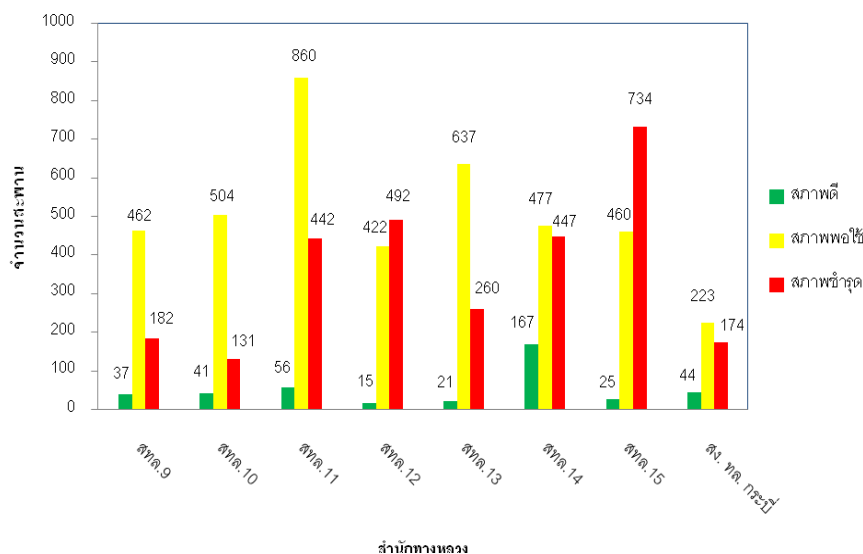
สรุปภาพรวมผลการประเมินสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่ศึกษาของโครงการจากภาพถ่ายของข้อมูลสะพานได้ดังนี้

- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่ของโครงการทุกลักษณะประเภทของสะพาน มีสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับสภาพพอใช้ และสภาพชำรุด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 5.4-1 ระดับสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานแบ่งแยกตามประเภทของสะพานในพื้นที่ของโครงการ
(จากฐานข้อมูลสะพาน กรมทางหลวง)

- เมื่อพิจารณาสภาพการใช้งานของยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทสะพานในพื้นที่ศึกษาของโครงการพบว่า สะพาน I-Girder จะมีจำนวนสะพานที่มีสภาพยางรองคอสสะพานอยู่ในสภาพดีที่สุด คิดเป็น 22.20% ของสะพานประเภทเดียวกันขณะที่ สะพาน T-Girder จะมีจำนวนสะพานที่มีสภาพยางรองคอสสะพานอยู่ในสภาพชำรุดมากที่สุดคิดเป็น 52.00% ของสะพานประเภทเดียวกัน
- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่การศึกษามีอายุมากกว่า 20 ปี รองลงมา คือ มีอายุสะพานระหว่าง 11 – 20 ปี และสะพานที่อายุน้อยกว่า 10 ปี เป็นกลุ่มสะพานที่น้อยที่สุด
- เมื่อพิจารณาแยกตามพื้นที่ตั้งของสะพานตามสำนักงานทางหลวง พบว่า สะพานในพื้นที่สำนักงานทางหลวงที่ 12 และ 15 ส่วนใหญ่จะมีระดับสภาพแผ่นยางรองคอสสะพาน ระดับชำรุด ส่วนแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่สำนักงานทางหลวงอื่นๆ ในโครงการส่วนใหญ่จะมีระดับสภาพพอใช้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4-1

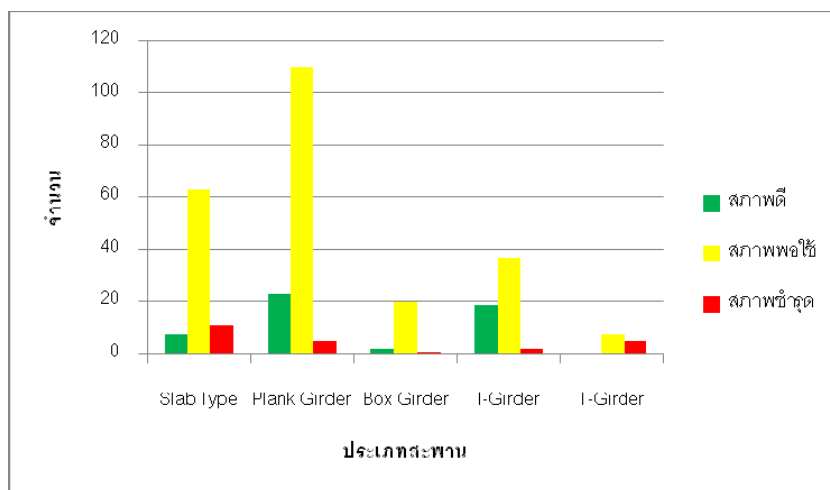


รูปที่ 5.4-2 ระดับสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามพื้นที่สำนักทางหลวง
(จากฐานข้อมูลสะพาน กรมทางหลวง)

5.4.2 สรุปการประเมินค่าความเสียหายจากการสำรวจภาคสนาม

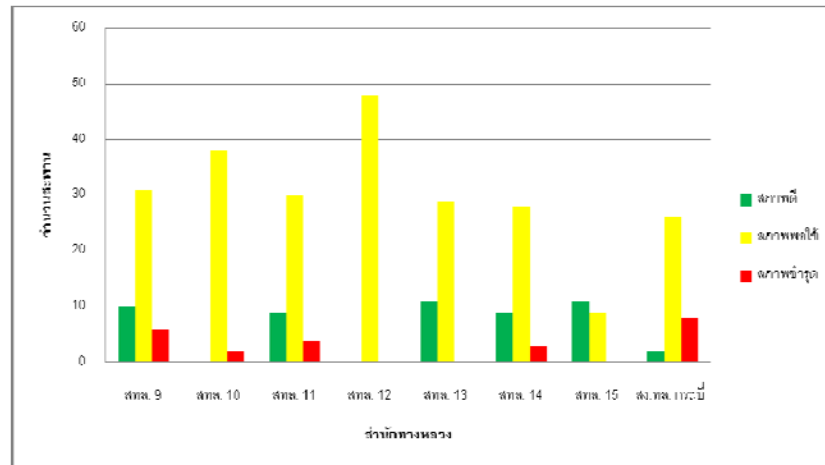
สรุปภาพรวมผลการประเมินสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานในพื้นที่ศึกษาของโครงการจากการสำรวจภาคสนามได้ดังนี้

- สะพานส่วนใหญ่ในพื้นที่ของโครงการมีสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับพอใช้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4-3



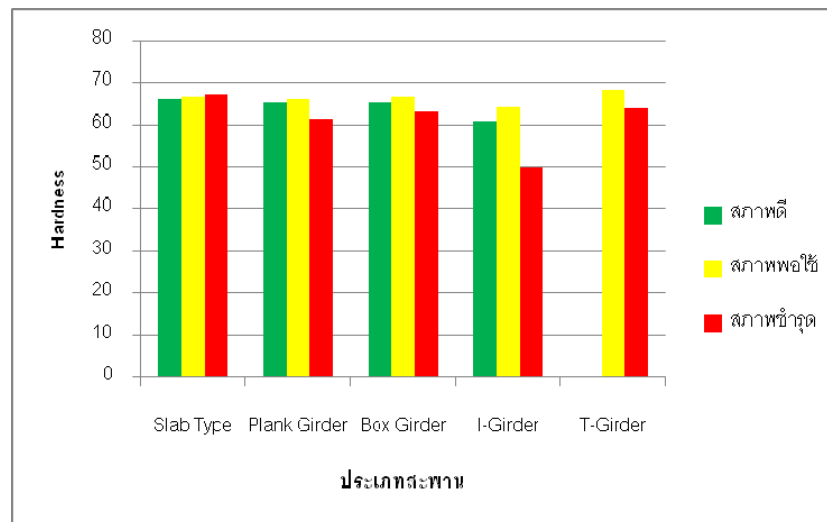
รูปที่ 5.4-3 ระดับสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานแบ่งแยกตามประเภทของสะพานในพื้นที่ของโครงการ
(จากผลการสำรวจภาคสนาม)

- เมื่อพิจารณาแยกตามพื้นที่ตั้งของสะพานตามสำนักทางหลวง จากผลการสำรวจภาคสนามพบว่า สะพานส่วนใหญ่มีสภาพแผ่นยางรองคอสสะพานระดับพอใช้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4-4



รูปที่ 5.4-4 สภาพแผ่นยางรองคอสสะพานแยกตามประเภทของสะพาน (จากผลการสำรวจภาคสนาม)

- สะพานประเภท Slab Type, Plank Girder และ Box Girder ที่ใช้แผ่นยางรองคอสสะพานประเภท ยางลื่น ส่วนใหญ่มีค่า Durometer (Shore A) มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (50 ± 5 Durometer Shore A) ทุกช่วงอายุของสะพาน ในขณะที่สะพานประเภท I-Girder มีค่า Durometer (Shore A) อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (60 ± 5 Durometer Shore A) ทุกช่วงอายุของสะพาน



รูปที่ 5.4-5 ค่าความแข็งของสะพานประเภทต่าง ๆ ตามระดับสภาพของแผ่นยางรองคอสสะพาน
(จากผลการสำรวจภาคสนาม)

5.4.3 สรุปข้อเสนอแนะ

การทดสอบค่าความแข็งแรงของยางรองคอสสะพานจากการทดสอบภาคสนามที่ส่วนใหญ่มักจะทำการทดสอบที่บริเวณโดยรอบคอสสะพานซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีน้ำหนักกดทับ โดยค่าความแข็งแรงที่ได้นี้จะมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ William และคณะ (2006) ที่ได้อธิบายถึงสาเหตุดังกล่าวว่าสภาพอากาศและผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีผลกระทบต่อบริเวณแผ่นยางรองคอสสะพานบริเวณที่ไม่ได้ถูกน้ำหนักกดทับค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม William และคณะ (2006) ได้เสนอแนะทางการบำรุงรักษาแผ่นยางรองคอสสะพานโดยการกำหนดให้แผ่นยางรองคอสสะพานอยู่ภายใต้แรงกดตลอดทั่วทั้งแผ่น

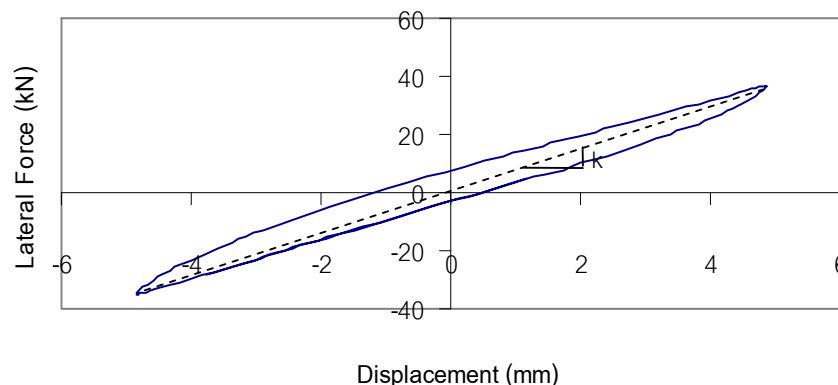
บทที่ 6

การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

6.1 แนวทางในการวิเคราะห์

จากข้อกำหนดการศึกษาระบุว่า ที่ปรึกษาจะต้องวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบและปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของแผ่นยางรองคอสสะพาน เช่น น้ำหนักบรรทุกจร และอุณหภูมิ เป็นต้น การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์มีลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล กำลังรับแรง และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบแผ่นยางรองคอสสะพานในห้องปฏิบัติการ มาประกอบร่วมกับข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ระบุไว้ในข้อกำหนดการออกแบบ เพื่อวิเคราะห์หาค่าสติฟเนส (Stiffness) ในการรับแรงอัด แรงเฉือน และการต้านทานการหมุนของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทต่างๆ ทั้งนี้จากการทดสอบ Shear Fatigue Test ในห้องปฏิบัติการจะได้ค่าสติฟเนสของยางแต่ละประเภทจากการพิจารณาความลาดชันของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางดังแสดงในรูปที่ 6.1-1 ตารางที่ 6.1-1 แสดงค่าสติฟเนสของยางแต่ละประเภทที่ได้จากการทดสอบ Shear Fatigue Test ข้อมูลที่ได้ในส่วนนี้จะนำไปใช้ปรับแก้คุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองแผ่นยางรองคอสสะพานในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีค่าสติฟเนสสอดคล้องกับผลการทดสอบ แล้วจึงนำแบบจำลองที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าสติฟเนสการอัดและการหมุนของแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทต่างๆ ต่อไป โดยในการศึกษาจะพิจารณาเฉพาะแผ่นยางที่ให้ค่าสติฟเนสสูงสุดและต่ำสุดสำหรับยางแต่ละประเภทที่แสดงใน ตารางที่ 6.1-1



รูปที่ 6.1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางภายใต้การทดสอบ
Shear Fatigue Test

ตารางที่ 6.1-1 ค่าสถิติของแผ่นยางภายใต้การทดสอบ Shear Fatigue Test

ประเภทยางรองคอสพาน	ชนิดยางที่ผลิต	รายชื่อผลิตภัณฑ์	Stiffness (kN/mm)
ประเภทยางล้วน	ยางธรรมชาติ	บจก.วัฒนาสุข	7.22
		บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง	9.19
		บจก. Jiangsu Pacific Rubber	7.05
		บจก. Cakra Ulung	11.86
	ยางสังเคราะห์	บจก.วัฒนาสุข	9.19
		บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง	8.15
		บจก. Jiangsu Pacific Rubber	10.74
		บจก. Cakra Ulung	8.81
ประเภทยางเสริมกำลังด้วย แผ่นเหล็ก	ยางธรรมชาติ	บจก.วัฒนาสุข	4.16
		บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง	2.72
		บจก. Jiangsu Pacific Rubber	4.61
		บจก. Cakra Ulung	3.75
	ยางสังเคราะห์	บจก.วัฒนาสุข	4.96
		บจก.พีซีพี เอ็นจิเนียริ่ง	3.34
		บจก. Jiangsu Pacific Rubber	2.55
		บจก. Cakra Ulung	2.80

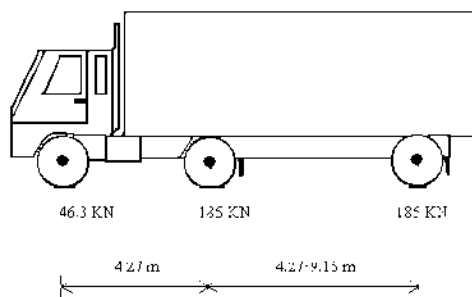
2. ประเมินขนาดของแรงกดอัดที่กระทำบนแผ่นยางรองคอสพานและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกต่างๆ โดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ดังนี้

- น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Loads – Bridge Self Weight)

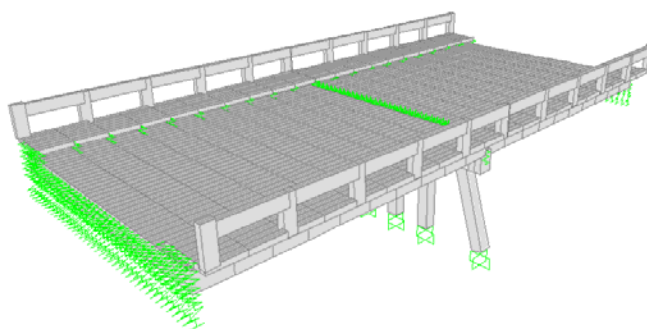
น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Loads) คือ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อสะพานอยู่ตลอดเวลาจากการใช้งาน เช่น น้ำหนักของโครงสร้างสะพาน ตลอดจนอุปกรณ์สาธารณูปโภคอื่นๆ โดยปกติ น้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนจะขึ้นอยู่กับขนาดและหน่วยน้ำหนักของชิ้นส่วนนั้น ดังนั้น เพื่อความถูกต้องขนาดและหน่วยน้ำหนักที่ใช้ต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

- น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายจากยานพาหนะ (Live Loads – Vehicle Loading)

น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายใช้ในการวิเคราะห์เป็นน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 1.3HS20-44 โดยมีการจัดเรียงเพลาตามมาตรฐานของ AASHTO ในการประเมินขนาดของแรงกดอัดที่ปรึกษาจะทำการจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติและประยุกต์น้ำหนักบรรทุกในรูปแบบต่างๆ เพื่อหาผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ เนื่องจากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรโดยการวิเคราะห์แบบ 3 มิติจะช่วยให้สามารถรวมผลของความยืดหยุ่นของแผ่นยางรองคอสพานที่ฐานรองรับที่มีต่อการกระจายน้ำหนักในโครงสร้างได้

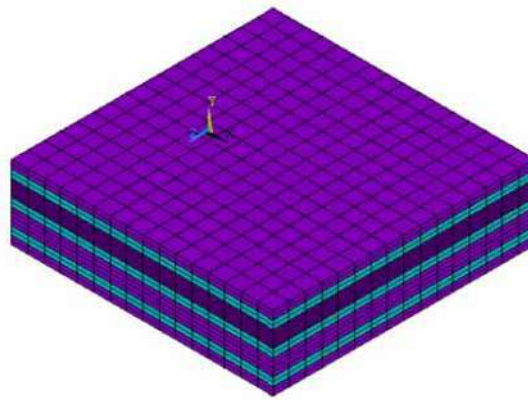


รูปที่ 6.1-2 รถบรรทุกออกแบบ 1.3HS20-44

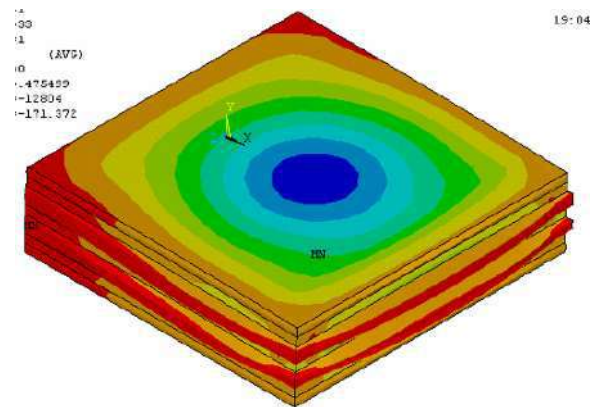


รูปที่ 6.1-3 ตัวอย่างแบบจำลองสะพาน Plank Girder

3. ประเมินขนาดของแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละวันและช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบปี โดยพิจารณาจากค่าสถิติต่างๆ ของประเทศไทยประกอบร่วมกับแบบจำลองโครงสร้างสะพาน 3 มิติ ที่ใช้ในการประเมินขนาดของแรงกดอัดในขั้นตอนที่ 2
4. ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้ผลของน้ำหนักบรรทุกจรและอุณหภูมิ เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติภายในแผ่นยางรองคอสสะพานที่อาจเกิดความเสียหายเนื่องจากการใช้งาน



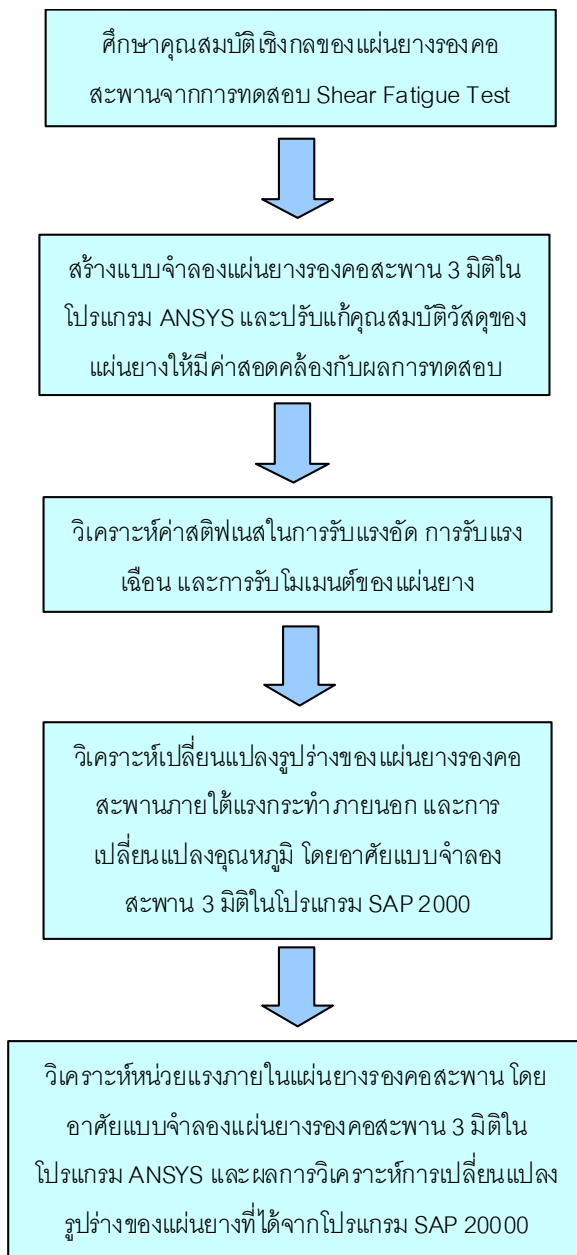
ก) แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นยางรองคอสสะพาน



ข) ตัวอย่างหน่วยแรงภายในแผ่นยางรองคอสสะพาน

รูปที่ 6.1-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์แผ่นยางรองคอสสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากวิธีการดำเนินการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปเป็นภาพรวมในการ
วิเคราะห์ดังรูปที่ 6.1-5



รูปที่ 6.1-5 ขั้นตอนการวิเคราะห์แผ่นยางรองคอสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6.2 การวิเคราะห์สตีฟเนสของแผ่นยางรองคอสสะพาน

ในการศึกษาได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแผ่นยางรองคอสสะพานแบบ 3 มิติในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS เพื่อวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ โดยในการวิเคราะห์ได้ใช้เอลิเมนต์ Solid 185 ในการจำลองส่วนของยางและแผ่นเหล็กเสริมกำลังในแผ่นยางรองคอสสะพาน ซึ่งเอลิเมนต์ดังกล่าวมีความสามารถในการแสดงคุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) ของยางและคุณสมบัติด้านพลาสติกของเหล็กเสริมได้ นอกจากนี้ เนื่องจากสตีฟเนสของแผ่นยางภายใต้แรงกระทำจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในการขยายออกด้านข้างภายใต้แรงกระทำ ในการวิเคราะห์จึงได้มีการใช้เอลิเมนต์ Solid 45 แทนแผ่นเหล็กที่เป็นที่รองรับด้านล่างของแผ่นยางรองคอสสะพานและแทนแผ่นเหล็กที่กดทับด้านบนแผ่นยางเพื่อช่วยในการกระจายแรงกระทำและจำกัดการขยายตัวออกด้านข้างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำ โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นยางรองคอสสะพานและแผ่นเหล็กนี้ได้ใช้เอลิเมนต์ Contact 174 และ Target 170 เพื่อแทนพฤติกรรมระหว่างผิวสัมผัส โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสเท่ากับ 0.30 (Yura *et al.* 2001)

ในการวิเคราะห์สตีฟเนสและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นยางรองคอสสะพานได้อาศัยค่าสตีฟเนสในการรับแรงด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ Shear Fatigue Test ในการปรับแก้แบบจำลอง โดยพิจารณาค่าสตีฟเนสสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จากการทดสอบของยางแต่ละประเภท ซึ่งค่าโมดูลัสแข็งเกร็ง (Modulus of Rigidity) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมสตีฟเนสรับแรงด้านข้างของแผ่นยาง จากข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ เมื่อนำมาใช้ในการปรับแก้แบบจำลองจะทำให้ได้คุณสมบัติวัสดุของแผ่นยางรองคอสสะพานดังแสดงข้างล่างและตารางที่ 6.2-1

สำหรับแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดแผ่นยางล้วน

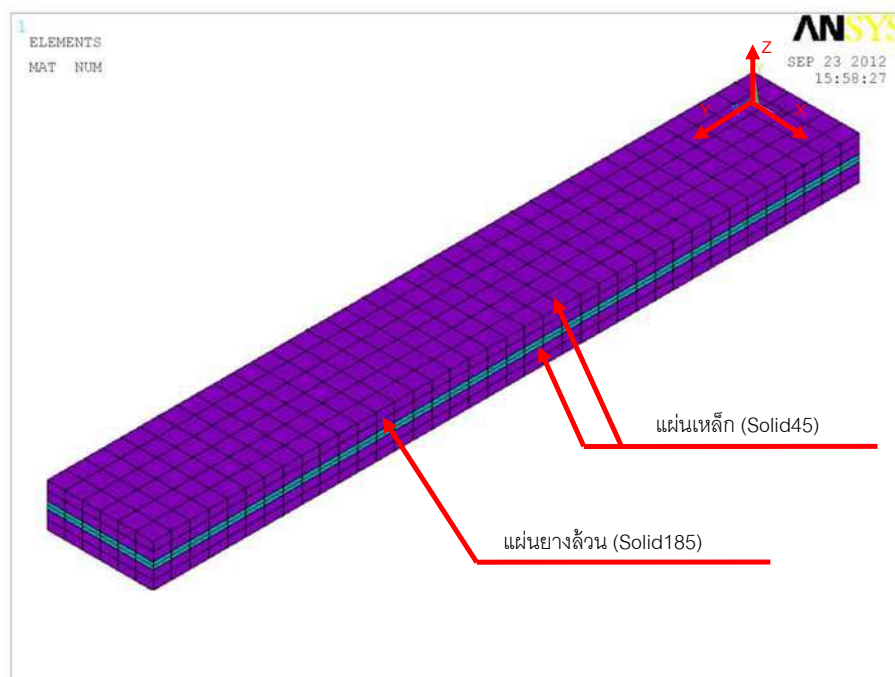
ขนาดแผ่นยาง	=	150x1000x10	มม.
อัตราส่วนปัวซองของยาง	=	0.50	

สำหรับแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

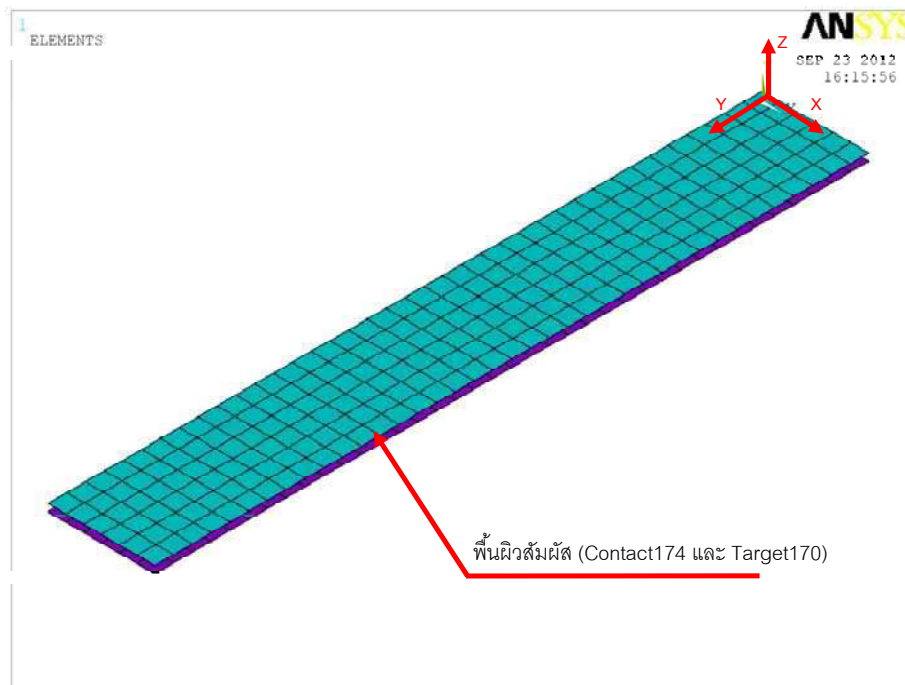
ขนาดแผ่นยาง	=	300x400x45	มม.
ความหนาแต่ละชั้นของยางชั้นใน	=	6 และ 12	มม.
ความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง	=	3	มม.
อัตราส่วนปัวซองของยาง	=	0.50	
โมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของเหล็ก	=	201	GPa
โมดูลัสแรงเฉือน (G) ของเหล็ก	=	75.80	GPa
อัตราส่วนปัวซองของเหล็ก	=	0.30	

ตารางที่ 6.2-1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแข็งแรงดึงของแผ่นยางรองคอสพานแต่ละประเภท

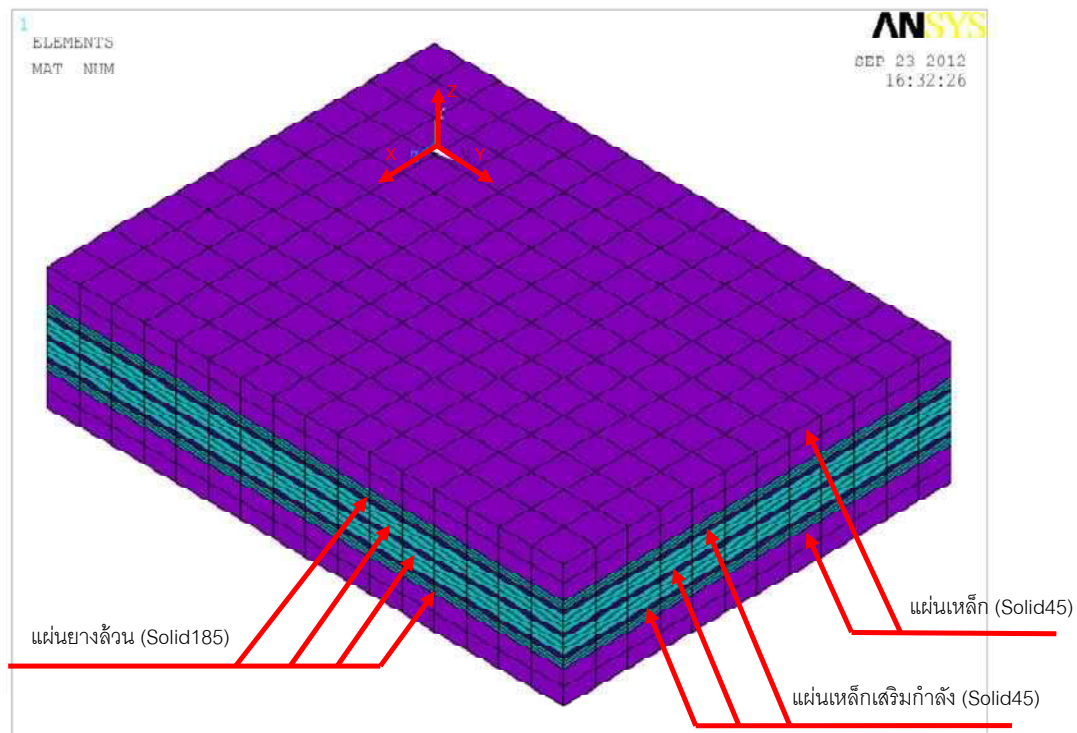
ประเภทยางรองคอสพาน	ชนิดยางที่ผลิต	ขอบเขต	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	โมดูลัสแข็งแรงดึง (MPa)
ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	ค่าสูงสุด	6.174	2.058
		ค่าต่ำสุด	3.547	1.182
	ยางสังเคราะห์	ค่าสูงสุด	5.142	1.804
		ค่าต่ำสุด	4.086	1.321
ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	ยางธรรมชาติ	ค่าสูงสุด	4.149	1.383
		ค่าต่ำสุด	2.439	0.813
	ยางสังเคราะห์	ค่าสูงสุด	4.449	1.483
		ค่าต่ำสุด	2.259	0.765



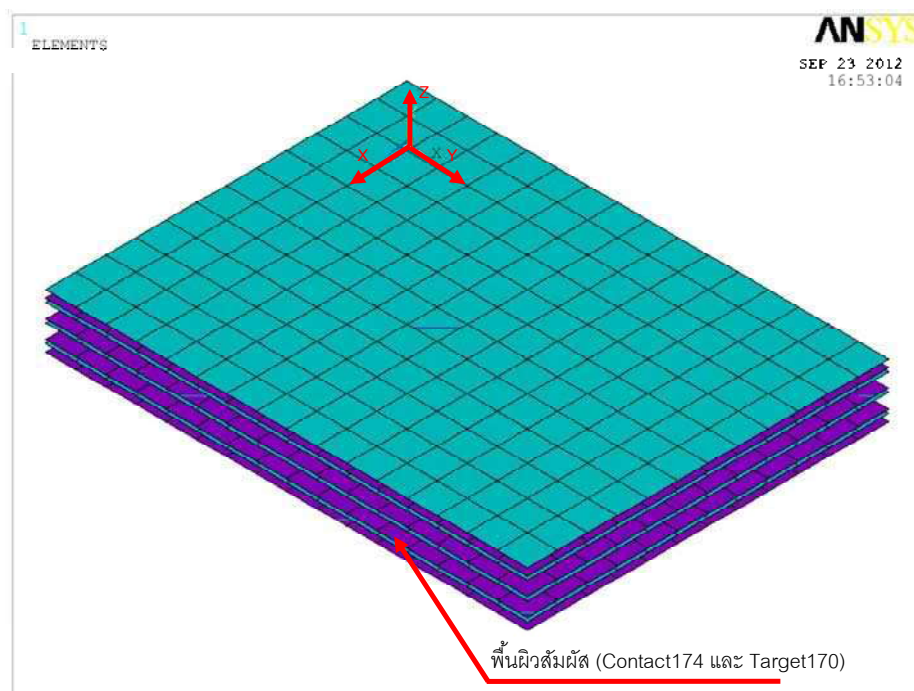
รูปที่ 6.2-1 องค์ประกอบโดยรวมของแบบจำลองยางรองคอสพานชนิดแผ่นยางล้วน



รูปที่ 6.2-2 เอลิเมนต์พื้นผิวสัมผัสของยางรองคอสพานชนิดแผ่นยางล้วน



รูปที่ 6.2-3 องค์ประกอบโดยรวมของแบบจำลองยางรองคอสพานชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก



รูปที่ 6.2-4 เอลิเมนต์พื้นผิวสัมผัสของยางรองคอสพานชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงของแผ่นยางรองคอสพานได้อาศัยการคำนวณแบบ Displacement Control เพื่อค่าสถิติในการรับแรงอัด แรงเฉือน และสถิติด้านทานการหมุนของแผ่นยางรองคอสพานในแต่ละแกน โดยได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 6.2-2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์พฤติกรรมในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 6.2-2 ค่าสถิติในสของแผ่นยางรองสะพานประเภทต่างๆ

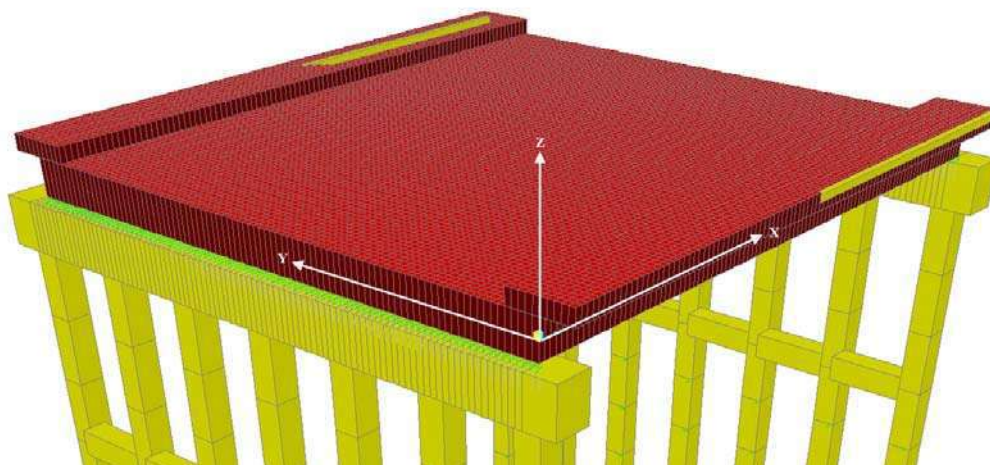
ประเภท	ชนิดยางที่ ผลิต	ขอบเขต	E (MPa)	G (MPa)	Com. Stiffness (kz) (ton/mm)	Shear Stiffness (kx) (ton/mm)	Shear Stiffness (ky) (ton/mm)	Rotational Stiffness (t-m/deg.) (kθx)	Rotational Stiffness (t-m/deg.) (kθy)
ยางล้วน (หนา 10 มม.)	ยาง ธรรมชาติ	ค่าสูงสุด	6.174	2.058	127.406	2.851	2.852	8.456	2.246
		ค่าต่ำสุด	3.547	1.182	74.291	1.675	1.673	5.134	1.284
	ยาง สังเคราะห์	ค่าสูงสุด	5.142	1.804	111.892	2.518	2.518	7.586	1.966
		ค่าต่ำสุด	4.086	1.321	84.852	1.921	1.920	5.990	1.481
ยางล้วน (หนา 22.5 มม.)	ยาง ธรรมชาติ	ค่าสูงสุด	6.174	2.058	59.280	1.341	1.365	6.505	0.793
		ค่าต่ำสุด	3.547	1.182	38.535	0.770	0.785	4.383	0.499
	ยาง สังเคราะห์	ค่าสูงสุด	5.142	1.804	54.297	1.175	1.197	5.961	0.713
		ค่าต่ำสุด	4.086	1.321	43.261	0.888	0.904	4.906	0.565
ยางเสริมกำลัง ด้วยแผ่นเหล็ก	ยาง ธรรมชาติ	ค่าสูงสุด	4.149	1.383	81.427	0.458	0.457	7.417	5.740
		ค่าต่ำสุด	2.439	0.813	79.072	0.270	0.270	5.972	4.136
	ยาง สังเคราะห์	ค่าสูงสุด	4.449	1.483	80.782	0.491	0.490	7.629	5.935
		ค่าต่ำสุด	2.259	0.765	77.874	0.254	0.254	5.789	4.011

6.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพาน

การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานส่วนบนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้ผลรวมของแรงกระทำประเภทต่างๆ ได้อาศัยแบบมาตรฐานสะพานของกรมทางหลวงและค่าสถิติของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนก่อน ในการศึกษาได้พิจารณาผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO และแรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อแรงภายในโครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพาน โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองและผลการวิเคราะห์ของสะพานแต่ละประเภทดังต่อไปนี้

6.3.1 สะพานพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่

สะพานพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ที่พิจารณาเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดช่วงความยาวสะพาน 10 ม. มีความกว้างสะพาน 8 ม. รองรับการจราจร 2 ช่องจราจร มีความหนาของแผ่นพื้นสะพาน 0.53 ม. ในการวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรม SAP 2000 โดยจำลองพื้นสะพานและทางเท้าด้วย Shell Element ขนาด $10 \times 10 \times 53$ ซม. และขนาด $10 \times 10 \times 23$ ซม. ตามลำดับ ในส่วนของคานขวางและเสาสะพานได้จำลองด้วย Frame Element ขนาด $60 \times 70 \times 10$ ซม. และขนาด $40 \times 40 \times 10$ ซม. ตามลำดับ เนื่องจากค่าสถิติในสัมพัทธ์ของโครงสร้างสะพานส่วนบน โครงสร้างสะพานส่วนล่าง และแผ่นยางรองคอสสะพานจะส่งผลโดยตรงต่อแรงภายในโครงสร้าง ดังนั้น ในการศึกษาจึงได้แทนโครงสร้างสะพานส่วนล่างด้วย Frame Element โดยกำหนดค่าสถิติในสัมพัทธ์ของแรงต้านทานจากดินในแนวราบเท่ากับ $1,018 \text{ ton/m}^3$ ซึ่งเป็นตัวแทนสถิติในสัมพัทธ์ของดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 6.3-1 แบบจำลองสะพานแบบพื้น

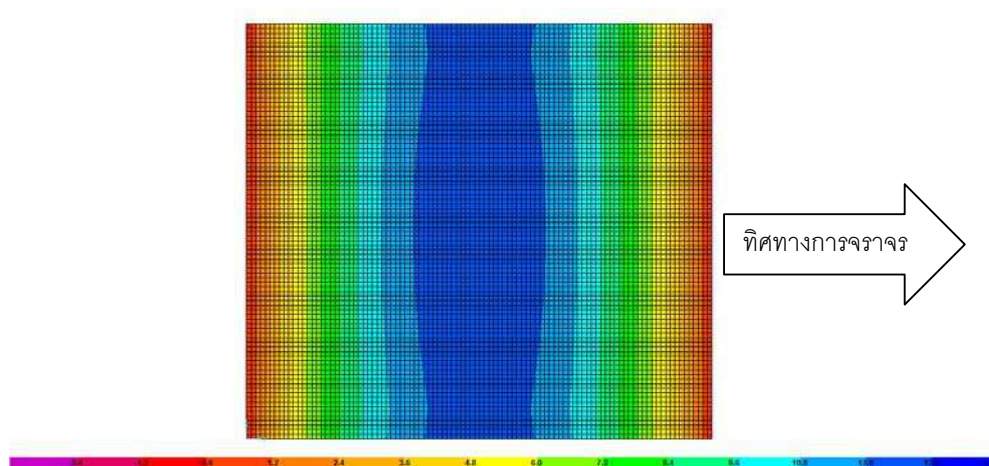
แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) น้ำหนักบรรทุกจร 1.3HS20-44 (LL) จำนวน 2 คัน และความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวันที่ผิวด้านบนมีค่าสูงกว่าที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบปีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส รูปที่ 6.3-2 ถึง 6.3-6 แสดงการกระจายของโมเมนต์ในแผ่นพื้นสะพานเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และ

ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นสะพาน ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณกลางช่วงสะพาน ในขณะที่แรงภายในจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าสูงที่บริเวณจุดรองรับ

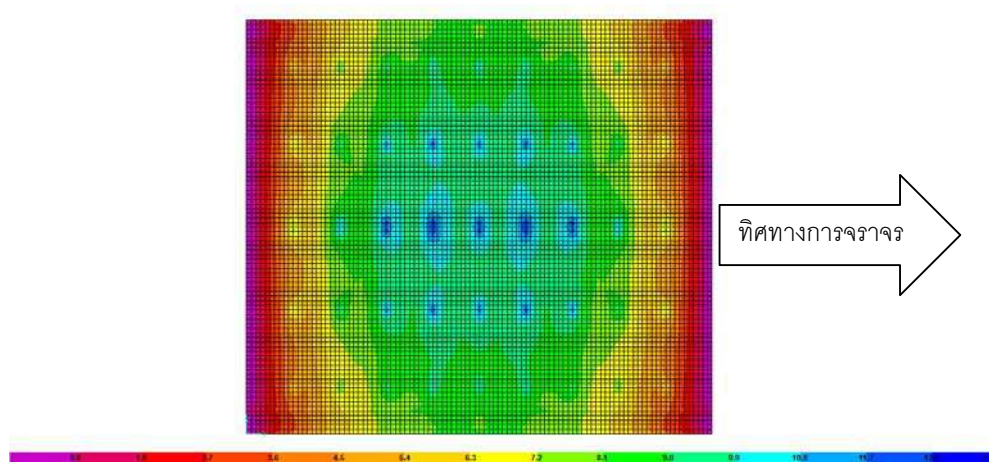
ในการหาผลรวมของแรงกระทำ ได้พิจารณาผลรวมของแรงกระทำภายใต้สภาวะ Strength Limit State I และ Service Limit State I ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) (ดังแสดงในรูปที่ 6.3-5 และ 7.3-6) ดังนี้

$$\text{Strength Limit State I} = 1.25\text{DL} + 1.75\text{LL} + 1.20\text{Temp}$$

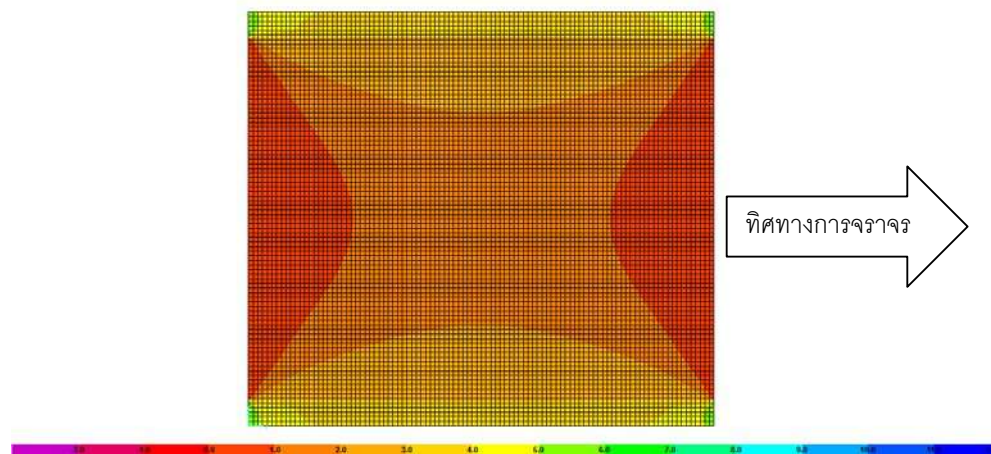
$$\text{Service Limit State I} = 1.0\text{DL} + 1.0\text{LL} + 1.0\text{Temp}$$



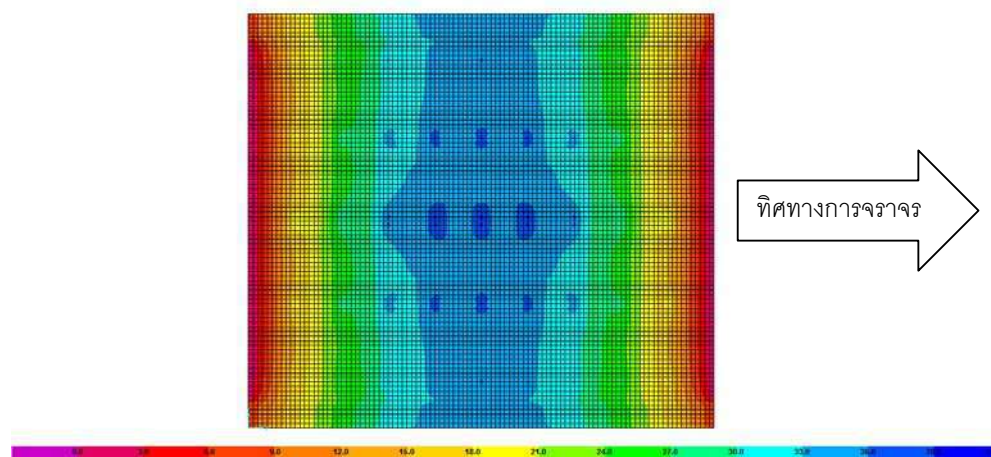
รูปที่ 6.3-2 Moment Diagram จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)



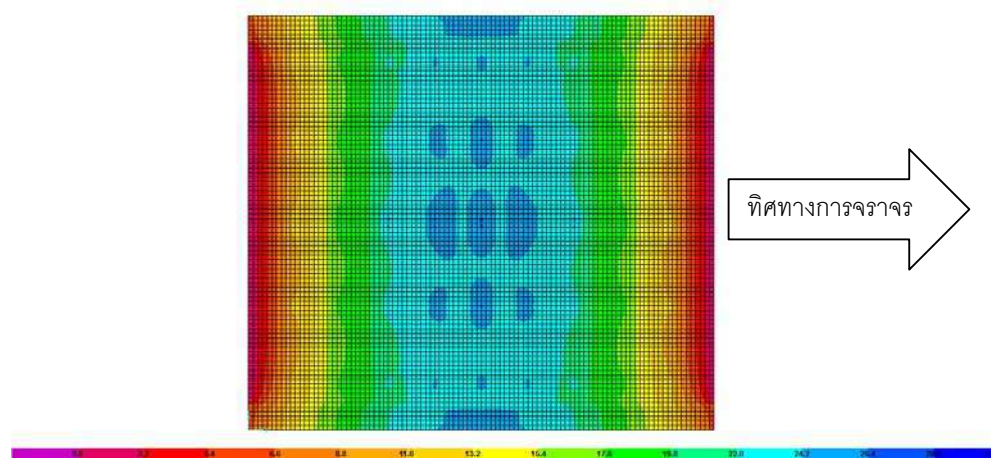
รูปที่ 6.3-3 Moment Diagram จากน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)



รูปที่ 6.3-4 Moment Diagram จากอุณหภูมิ (Temp)



รูปที่ 6.3-5 Moment Diagram จากการรวมแรงระดับ Strength I



รูปที่ 6.3-6 Moment Diagram จากการรวมแรงระดับ Service I

ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสพานแสดงในตารางที่ 6.3-1
ถึง 6.3-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3-1 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

Load Case	Maximum Stress (ksc)		Maximum Moment (kg-m)	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	91.08	91.04	39,868	39,862
Service 1	63.94	63.94	26,995	26,995

ตารางที่ 6.3-2 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Maximum Stress (ksc)		Maximum Moment (kg-m)	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	91.07	91.05	39,867	39,865
Service 1	63.94	63.94	26,996	26,995

ตารางที่ 6.3-3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

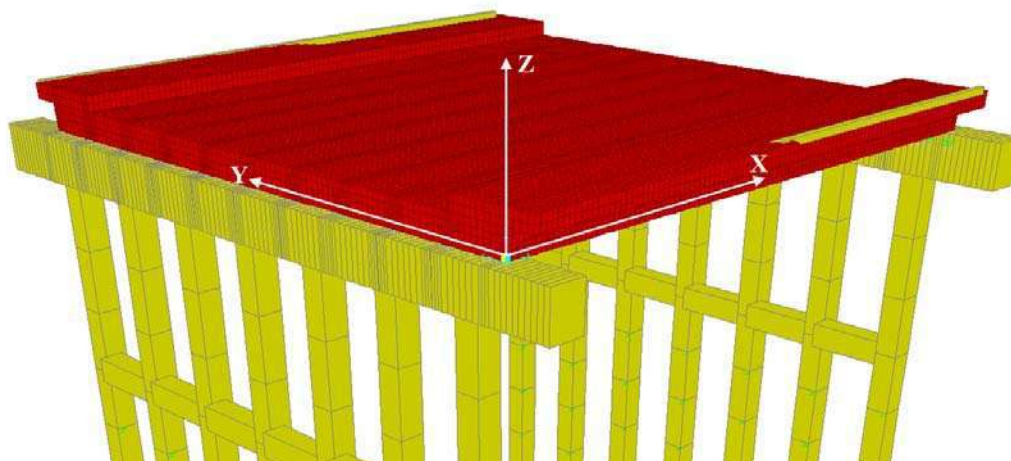
Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	0.13121	0.07902	-0.79628	0.12937	0.07540	-0.77556	0.000061	0.001373	0.000046	0.001370
LL	0.10414	0.15868	-0.50437	0.10402	0.15946	-0.49740	0.000104	0.000959	0.000102	0.000957
Temperature 20'	0.06049	0.04389	-0.26277	0.06133	0.04626	-0.24461	0.000330	0.001016	0.000309	0.001016
Temperature 5'	0.25396	0.20919	-0.02904	0.25717	0.20288	-0.04281	0.000022	0.000010	0.000033	0.000015
Strength 1	0.57842	0.40985	-1.94743	0.57875	0.41212	-1.90627	0.000578	0.002597	0.000538	0.002594
Service 1	0.42882	0.28979	-1.43204	0.42923	0.29098	-1.40122	0.000457	0.001698	0.000427	0.001696

ตารางที่ 6.3-4 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	0.13079	0.07817	-0.79074	0.12985	0.07632	-0.78018	0.000057	0.001372	0.000050	0.001370
LL	0.10411	0.15889	-0.50245	0.10404	0.15929	-0.49890	0.000104	0.000959	0.000103	0.000958
Temperature 20'	0.06068	0.04444	-0.25795	0.06111	0.04566	-0.24867	0.000325	0.001016	0.000314	0.001016
Temperature 5'	0.25472	0.20770	-0.03229	0.25636	0.20448	-0.03933	0.000024	0.000012	0.000030	0.000014
Strength 1	0.57852	0.41038	-1.93567	0.57869	0.41155	-1.91467	0.000567	0.002597	0.000547	0.002595
Service 1	0.42894	0.29007	-1.42324	0.42915	0.29068	-1.40752	0.000449	0.001698	0.000434	0.001697

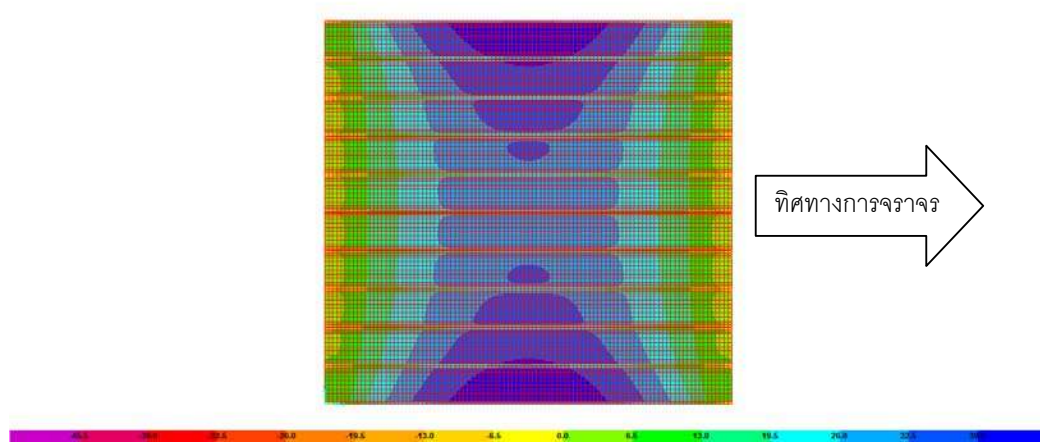
6.3.2 สะพานพื้นคอนกรีตอัดแรง

สะพานพื้นคอนกรีตอัดแรงที่พิจารณาเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรงขนาดช่วงความยาวสะพาน 10 ม. มีความกว้างสะพาน 8 ม. รองรับจราจร 2 ช่องจราจร มีความหนาของแผ่นพื้นสะพาน 0.40 ม. ในการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรม SAP 2000 โดยจำลองพื้นสะพานและทางเท้าด้วย Solid Element ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม. ในส่วนของคานขวางและเสาสะพานได้จำลองด้วย Frame Element ขนาด $60 \times 70 \times 10$ ซม. และขนาด $40 \times 40 \times 10$ ซม. ตามลำดับ เนื่องจากค่าสถิติแรงสัมพัทธ์ของโครงสร้างสะพานส่วนบน โครงสร้างสะพานส่วนล่าง และแผ่นยางรองคอสสะพานจะส่งผลโดยตรงต่อแรงภายในโครงสร้าง ดังนั้น ในการศึกษาจึงได้แทนโครงสร้างสะพานส่วนล่างด้วย Frame Element โดยกำหนดค่าสถิติแรงของแรงต้านทานจากดินในแนวราบเท่ากับ $1,018 \text{ ton/m}^3$ ซึ่งเป็นตัวแทนสถิติแรงของดินเหนียวอ่อน

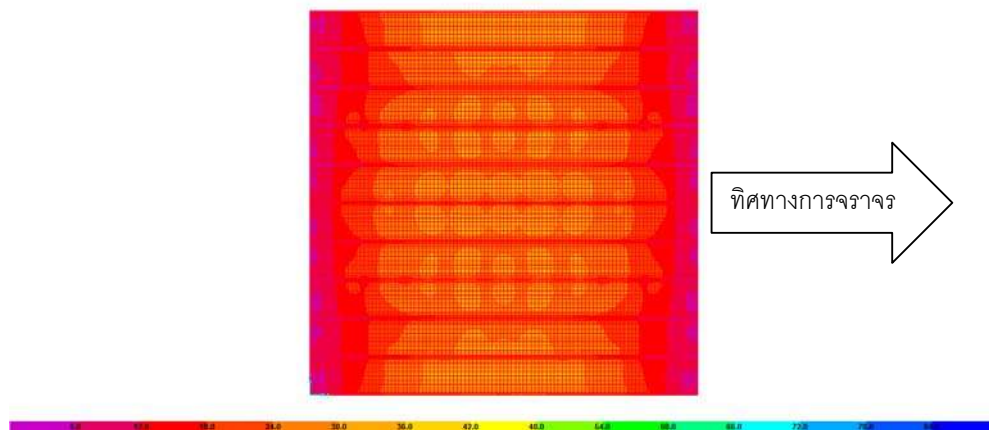


รูปที่ 6.3-7 แบบจำลองสะพานแบบ Plank Girder

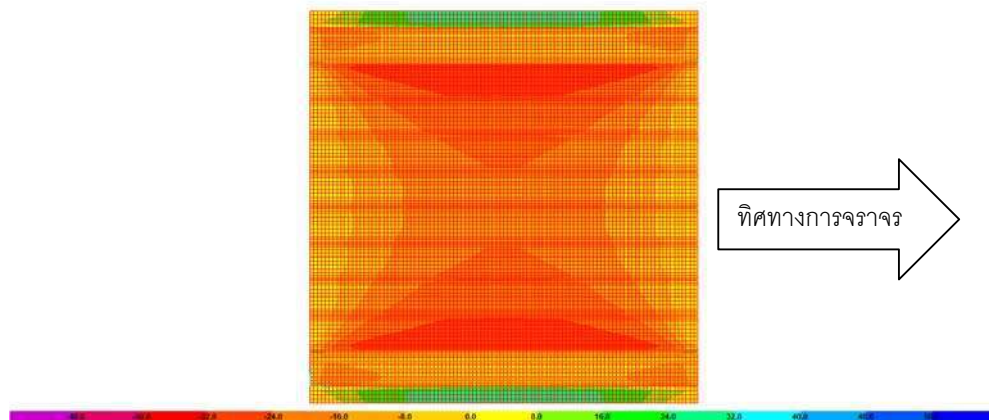
แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) น้ำหนักบรรทุกจร 1.3HS20-44 (LL) จำนวน 2 คัน และความแตกต่างของอุณหภูมิโดยกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวันที่ผิวด้านบนมีค่าสูงกว่าที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบปีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส รูปที่ 6.3-8 ถึง 6.3-11 แสดงการกระจายของหน่วยแรงภายในแผ่นพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นสะพาน ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณกลางช่วงสะพาน ในขณะที่หน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าสูงบริเวณจุดรองรับ



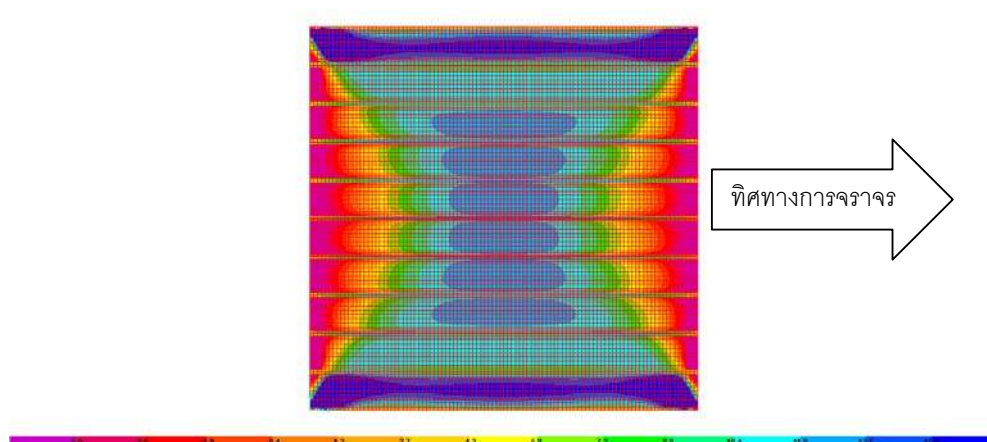
รูปที่ 6.3-8 Stress Diagram จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)



รูปที่ 6.3-9 Stress Diagram จากน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)



รูปที่ 6.3-10 Stress Diagram จากอุณหภูมิที่ผิวบนพื้นสะพาน (Temp)

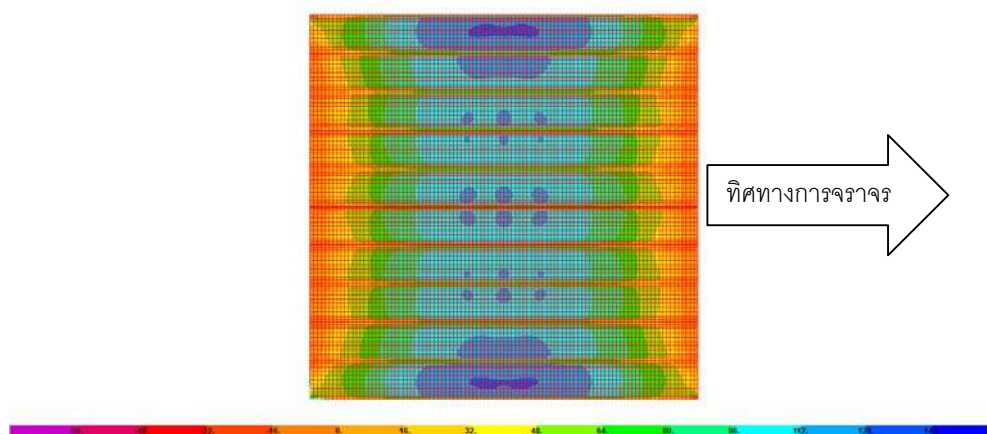


รูปที่ 6.3-11 Stress Diagram จากอุณหภูมิที่ผิวล่างพื้นสะพาน (Temp)

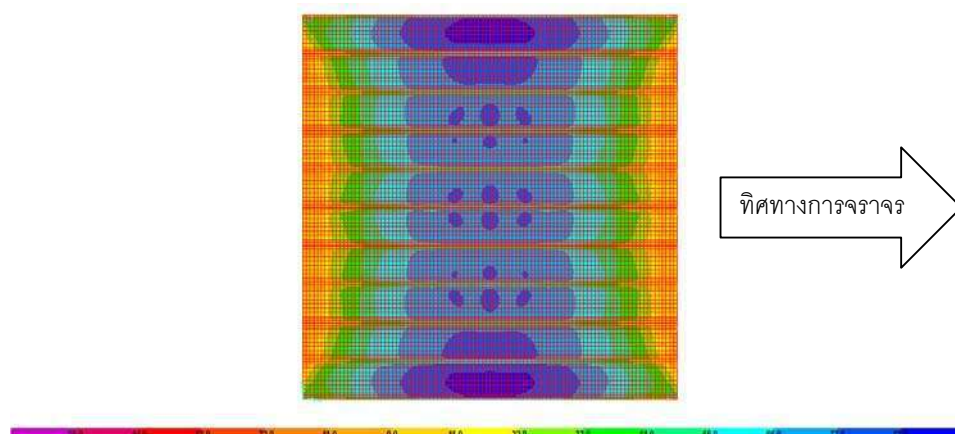
ในการหาผลรวมของแรงกระทำ ได้พิจารณาผลรวมของแรงกระทำภายใต้สภาวะ Strength Limit State I และ Service Limit State I ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) (ดังแสดงในรูปที่ 6.3-12 และ 7.3-13) ดังนี้

$$\text{Strength Limit State I} = 1.25\text{DL} + 1.75\text{LL} + 1.20\text{Temp}$$

$$\text{Service Limit State I} = 1.0\text{DL} + 1.0\text{LL} + 1.0\text{Temp}$$



รูปที่ 6.3-12 Stress Diagram จากการรวมแรงระดับ Strength I



รูปที่ 6.3-13 Stress Diagram จากการรวมแรงระดับ Service I

ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานแสดงในตารางที่ 6.3-5 ถึง 6.3-8 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3-5 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

Load Case	Maximum Stress (ksc)	
	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	130.14	130.79
Service 1	91.78	92.36

ตารางที่ 6.3-6 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Maximum Stress (ksc)	
	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	130.30	130.63
Service 1	91.92	92.22

ตารางที่ 6.3-7 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

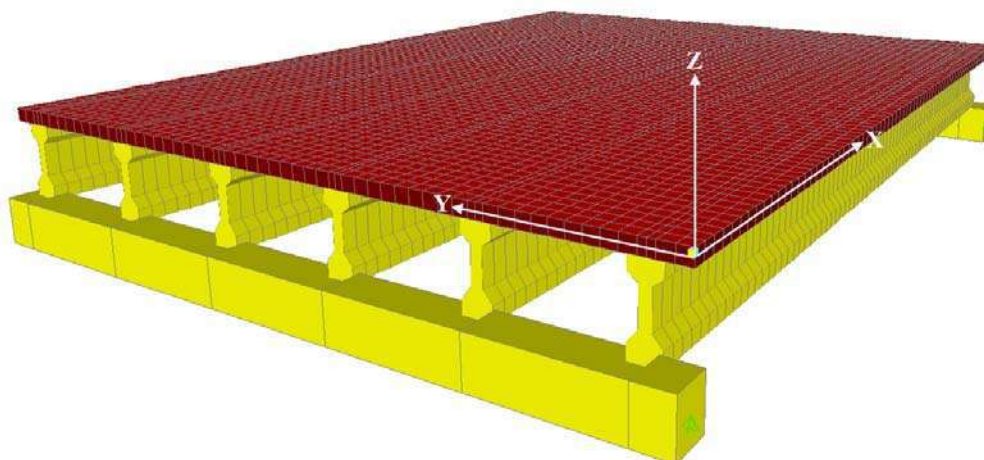
Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	0.55860	0.12473	-0.85478	0.55163	0.11246	-0.82928	0.000110	0.000103	0.000095	0.000103
LL	0.43179	0.21510	-0.49513	0.42921	0.21367	-0.48864	0.000106	0.000079	0.000105	0.000009
Temperature 20'	0.50898	0.56653	-0.57269	0.52752	0.53034	-0.62456	0.000398	0.000093	0.000442	0.000096
Temperature 5'	0.27108	0.20316	-0.06497	0.27904	0.18808	-0.08845	0.000045	0.000057	0.000062	0.000058
Strength 1	2.06326	0.84571	-2.44041	2.07034	0.82081	-2.46277	0.000715	0.000380	0.000744	0.000382
Service 1	1.49823	0.63027	-1.81868	1.50567	0.60840	-1.84046	0.000565	0.000276	0.000591	0.000278

ตารางที่ 6.3-8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	0.55684	0.12166	-0.84821	0.55328	0.11539	-0.83521	0.000107	0.000103	0.000099	0.000103
LL	0.43111	0.21475	-0.49328	0.42979	0.21402	-0.48998	0.000106	0.000079	0.000106	0.000079
Temperature 20'	0.51371	0.55724	-0.58508	0.52319	0.53818	-0.61162	0.000409	0.000094	0.000432	0.000095
Temperature 5'	0.27308	0.19921	-0.07079	0.27715	0.19155	-0.08278	0.000049	0.000057	0.000058	0.000057
Strength 1	2.06503	0.83955	-2.44488	2.06864	0.82681	-2.45640	0.000723	0.000380	0.000737	0.000382
Service 1	1.50011	0.62485	-1.82324	1.50391	0.61366	-1.83444	0.000572	0.000276	0.000585	0.000278

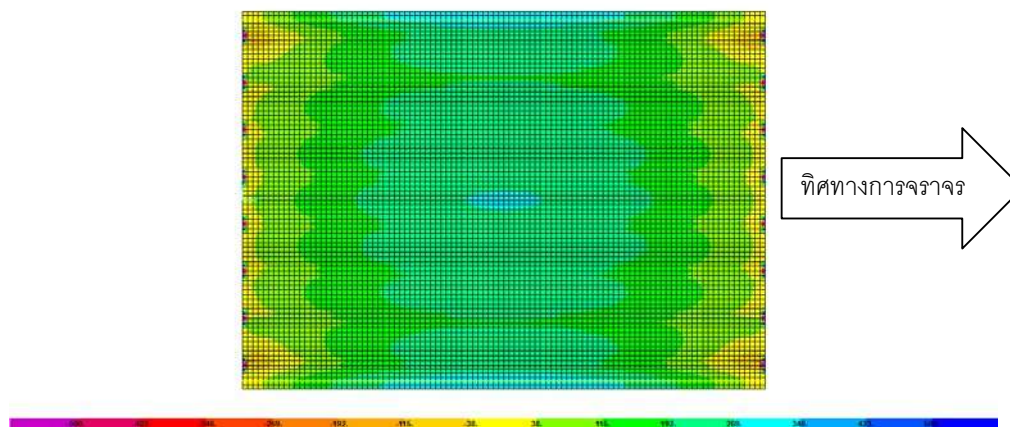
6.3.3 สะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ

สะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่พิจารณาเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงขนาดช่วงความยาวสะพาน 14 ม. มีความกว้างสะพาน 10 ม. รองรับจราจร 3 ช่องจราจร มีความหนาของแผ่นพื้นสะพาน 0.20 ม. ในการวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรม SAP 2000 โดยจำลองพื้นสะพานด้วย Shell Element ขนาด 20 x 20 x 20 ซม. จำลองคานรูปตัวไวด้วย Frame Element ยาว 20 ซม. ในส่วนของคานขวาง Frame Element ขนาด 60 x 70 x 10 ซม. เนื่องจากค่าสถิติเนสส์สัมพัทธ์ของโครงสร้างสะพานส่วนบน โครงสร้างสะพานส่วนล่าง และแผ่นยางรองคอสสะพานจะส่งผลโดยตรงต่อแรงภายในโครงสร้าง ดังนั้นในการศึกษาจึงได้แทนโครงสร้างสะพานส่วนล่างด้วย Frame Element

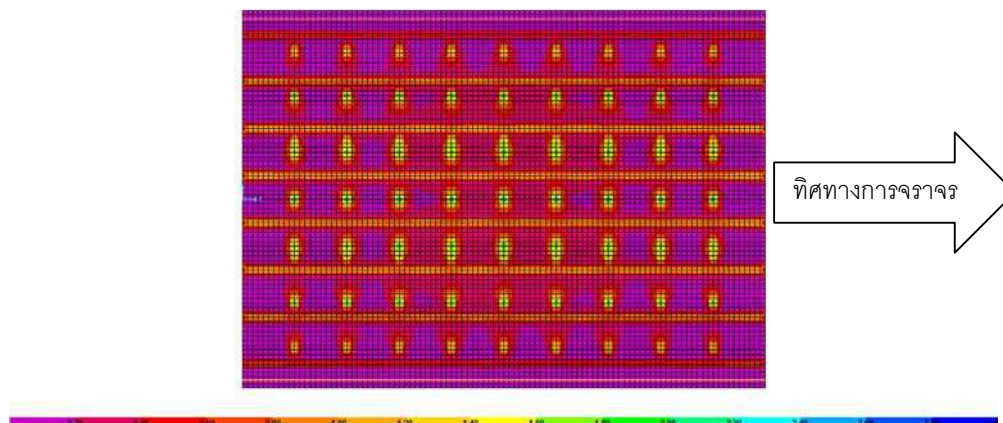


รูปที่ 6.3-14 แบบจำลองสะพานแบบ I-Girder

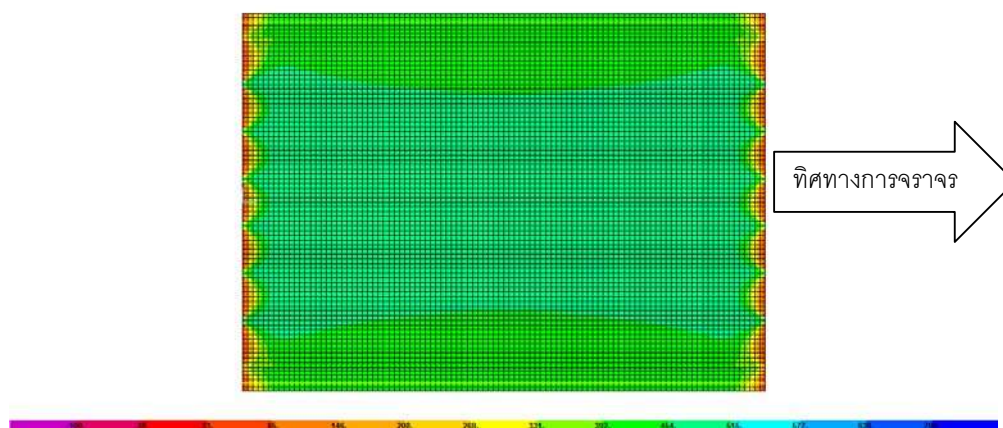
แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) น้ำหนักบรรทุกจร 1.3HS20-44 (LL) จำนวน 3 คัน และความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวันที่ผิวด้านบนมีค่าสูงกว่าที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบปีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส รูปที่ 6.3-15 ถึง 6.3-17 แสดงการกระจายของโมเมนต์ในแผ่นพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นสะพาน ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณกลางช่วงสะพาน ในขณะที่แรงภายในจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าสูงที่บริเวณจุดรองรับ



รูปที่ 6.3-15 Moment Diagram จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)



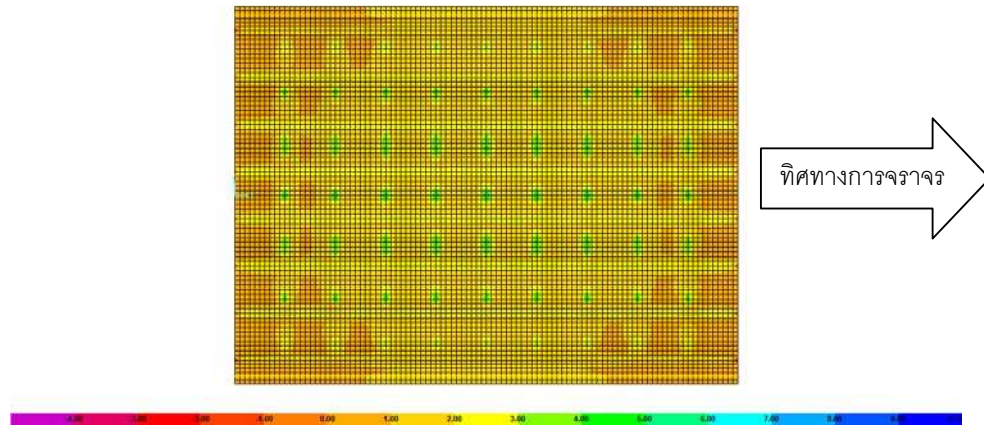
รูปที่ 6.3-16 Moment Diagram จากน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)



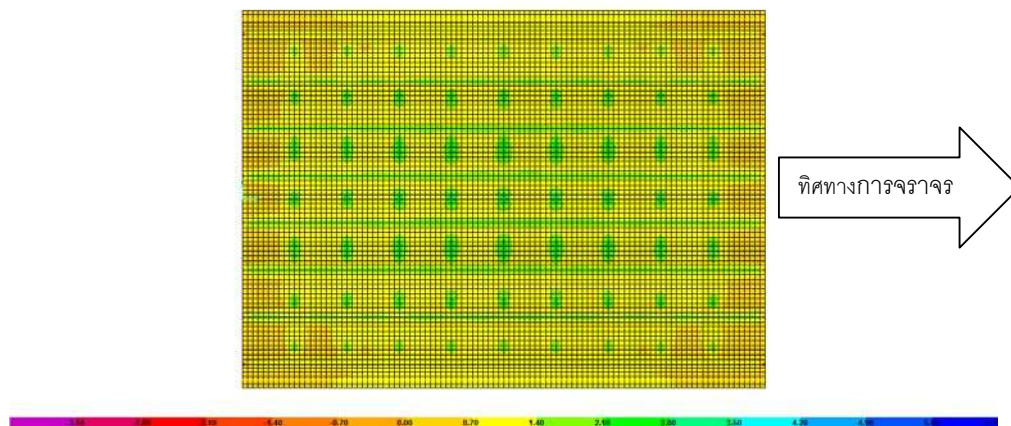
รูปที่ 6.3-17 Moment Diagram จากอุณหภูมิ (Temp)

ในการหาผลรวมของแรงกระทำ ได้พิจารณาผลรวมของแรงกระทำภายใต้สภาวะ Strength Limit State I และ Service Limit State I ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) (ดังแสดงในรูปที่ 6.3-18 และ 7.3-19) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Strength Limit State I} &= 1.25\text{DL} + 1.75\text{LL} + 1.20\text{Temp} \\ \text{Service Limit State I} &= 1.0\text{DL} + 1.0\text{LL} + 1.0\text{Temp} \end{aligned}$$



รูปที่ 6.3-18 Moment Diagram จากการรวมแรงระดับ Strength I



รูปที่ 6.3-19 Moment Diagram จากการรวมแรงระดับ Service I

ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานแสดงใน ตารางที่ 6.3-9 ถึง 6.3-12 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3-9 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

Load Case	Maximum Stress (ksc)		Maximum Moment (kg-m)	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	116.46	116.42	7,754	7,751
Service 1	68.95	68.93	4,605	4,603

ตารางที่ 6.3-10 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Maximum Stress		Maximum Moment	
	(ksc)		(kg-m)	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	116.47	116.43	7,755	7,752
Service 1	68.96	68.93	4,605	4,603

ตารางที่ 6.3-11 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	0.22415	0.06384	-0.14833	0.22409	0.06281	-0.14403	0.000067	0.000612	0.000065	0.000612
LL	0.33823	0.25362	-0.29089	0.33810	0.24735	-0.28250	0.000397	0.000857	0.000393	0.000857
Temperature 20'	0.01843	0.13461	-0.01734	0.01842	0.13254	-0.01676	0.000217	0.000041	0.000214	0.000041
Temperature 5'	0.07039	0.25702	-0.00034	0.07031	0.25396	-0.00017	0.000005	0.000322	0.000009	0.000322
Strength 1	0.93813	0.65092	-0.69022	0.93780	0.62738	-0.67019	0.000690	0.001831	0.000684	0.001830
Service 1	0.61741	0.42866	-0.43568	0.61720	0.41461	-0.42301	0.000393	0.001107	0.000390	0.001107

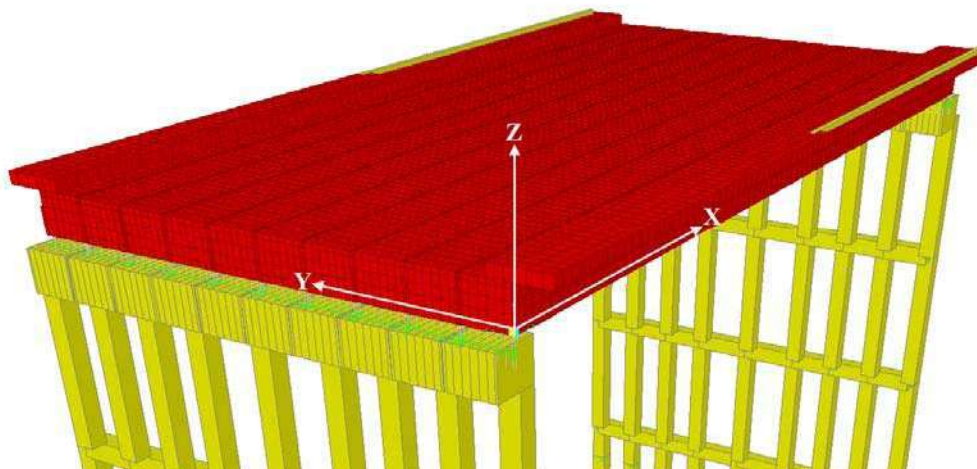
ตารางที่ 6.3-12 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	0.22415	0.06402	-0.15062	0.22408	0.06272	-0.14518	0.000067	0.000612	0.000065	0.000612
LL	0.33819	0.25460	-0.29532	0.33804	0.24675	-0.28471	0.000398	0.000857	0.000393	0.000857
Temperature 20'	0.01841	0.13492	-0.01761	0.01840	0.13232	-0.01688	0.000218	0.000041	0.000214	0.000041
Temperature 5'	0.07040	0.25729	-0.00036	0.07030	0.25343	-0.00015	0.000004	0.000322	0.000010	0.000322
Strength 1	0.93806	0.65451	-0.70076	0.93766	0.62506	-0.67544	0.000691	0.001831	0.000684	0.001830
Service 1	0.61738	0.43076	-0.44234	0.61712	0.41316	-0.42632	0.000394	0.001107	0.000390	0.001107

6.3.4 สะพานแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงกลวง

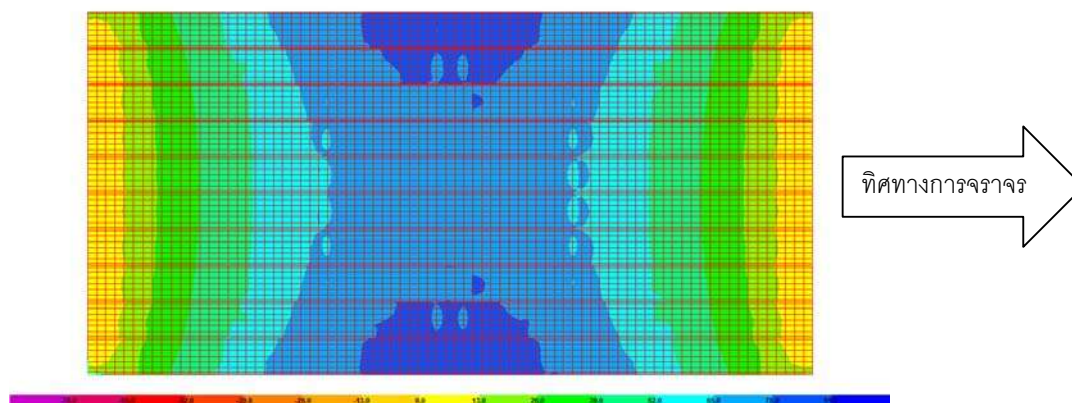
สะพานพื้นคอนกรีตอัดแรงกลวงที่พิจารณาเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรงขนาดช่วงความยาวสะพาน 20 ม. มีความกว้างสะพาน 8 ม. รองรับการจราจร 2 ช่องจราจร มีความหนาของแผ่นพื้นสะพาน 0.80 ม. ในการวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรม SAP 2000 โดยจำลองพื้นสะพานและทางเท้าด้วย Solid Element ขนาด 20 x 20 x 20 ซม. ในส่วนของคานขวางและเสาสะพานได้จำลองด้วย Frame Element ขนาด 100 x 80 x 10 ซม. และขนาด 40 x 40 x 10 ซม. ตามลำดับ เนื่องจากค่าสติเฟสซึมพัทธ์ของโครงสร้างสะพานส่วนบน โครงสร้างสะพานส่วนล่าง และแผ่นยางรองคอสพานจะส่งผลโดยตรงต่อแรงภายในโครงสร้าง ดังนั้น ในการศึกษาจึงได้แทนโครงสร้างสะพานส่วนล่างด้วย Frame

Element โดยกำหนดค่าสตีเฟนสของแรงต้านทานจากดินในแนวราบ เท่ากับ $1,018 \text{ ton/m}^3$ ซึ่งเป็นตัวแทนสตีเฟนสของดินเหนียวอ่อน

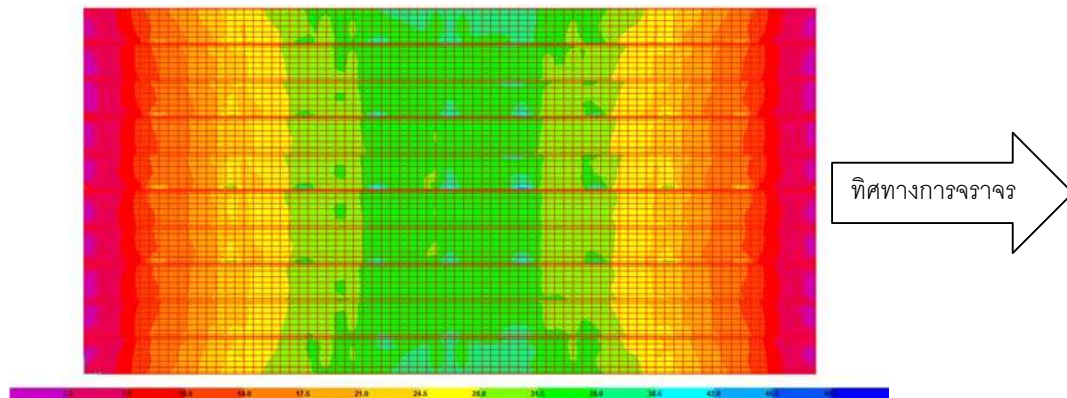


รูปที่ 6.3-20 แบบจำลองสะพานแบบ Box-Girder

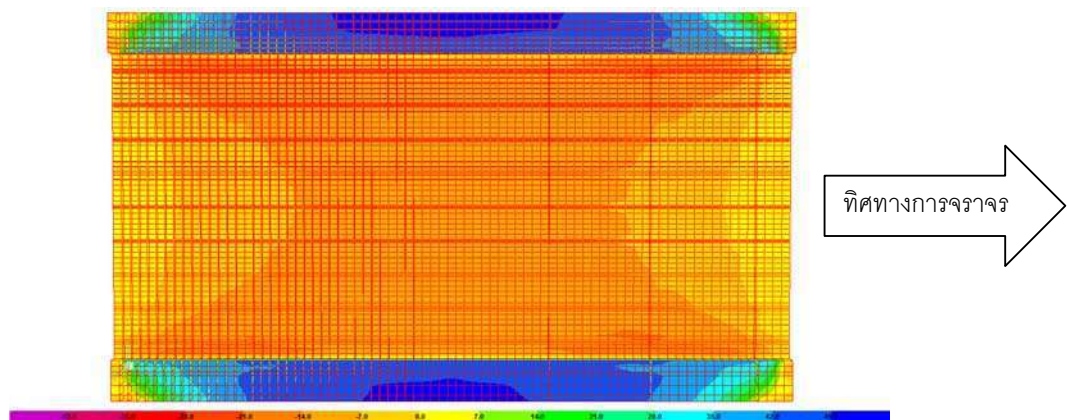
แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) น้ำหนักบรรทุกจร 1.3HS20-44 (LL) จำนวน 2 คัน และความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวันที่ผิวด้านบนมีค่าสูงกว่าที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบปีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส รูปที่ 6.3-21 ถึง 6.3-24 แสดงการกระจายของโมเมนต์ในแผ่นพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นสะพาน ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณกลางช่วงสะพาน ในขณะที่แรงภายในจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าสูงที่บริเวณจุดรองรับ



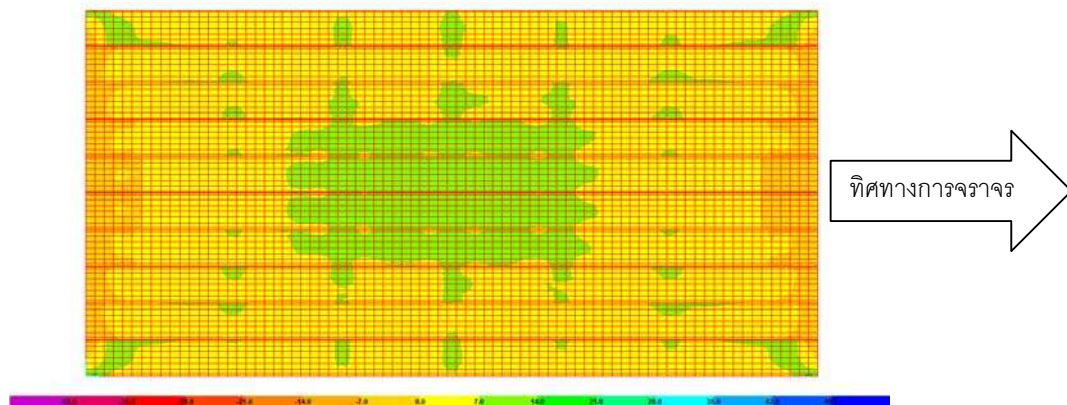
รูปที่ 6.3-21 Stress Diagram จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)



รูปที่ 6.3-22 Stress Diagram จากน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)



รูปที่ 6.3-23 Stress Diagram จากอุณหภูมิที่ผิวบนพื้นสะพาน (Temp)

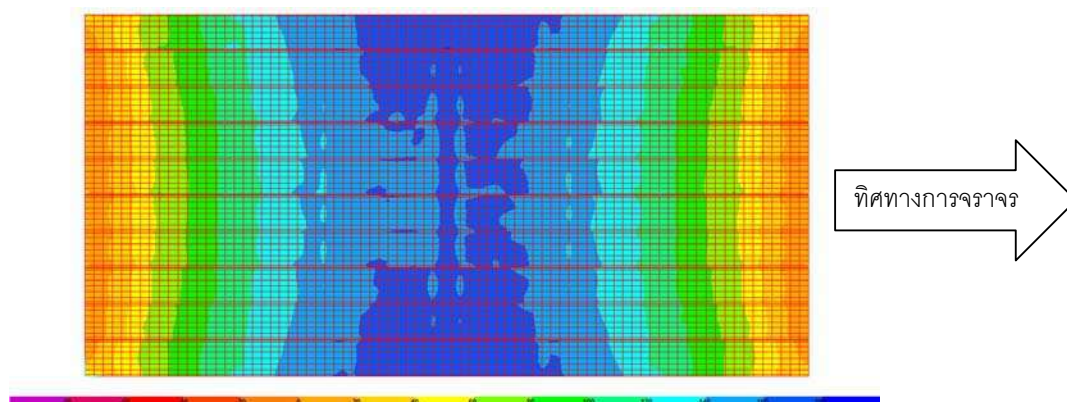


รูปที่ 6.3-24 Stress Diagram จากอุณหภูมิที่ผิวใต้พื้นสะพาน (Temp)

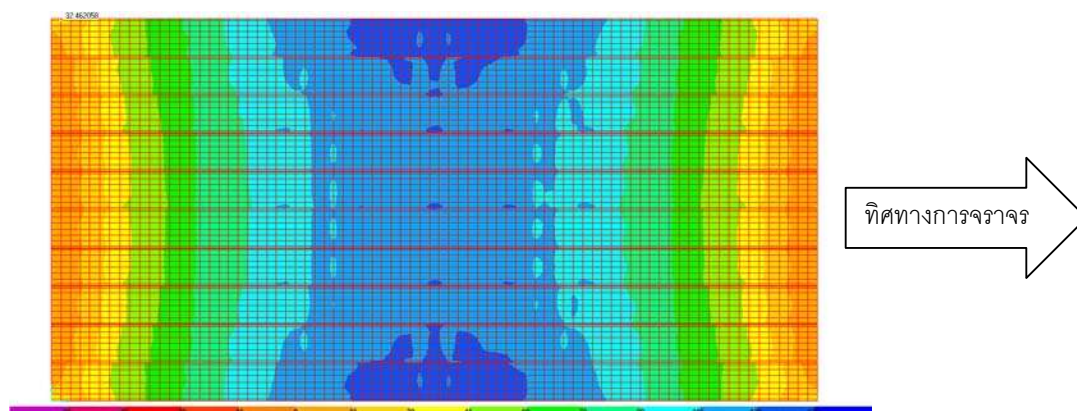
ในการหาผลรวมของแรงกระทำ ได้พิจารณาผลรวมของแรงกระทำภายใต้สภาวะ Strength Limit State I และ Service Limit State I ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) (ดังแสดงในรูปที่ 6.3-25 และ 6.3-26) ดังนี้

$$\text{Strength Limit State I} = 1.25\text{DL} + 1.75\text{LL} + 1.20\text{Temp}$$

$$\text{Service Limit State I} = 1.0\text{DL} + 1.0\text{LL} + 1.0\text{Temp}$$



รูปที่ 6.3-25 Moment Diagram จากการรวมแรงระดับ Strength I



รูปที่ 6.3-26 Moment Diagram จากการรวมแรงระดับ Service I

ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานแสดงในตารางที่ 6.3-12 ถึง 6.3-16 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3-13 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

Load Case	Maximum Stress (ksc)	
	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	174.56	174.54
Service 1	125.67	125.74

ตารางที่ 6.3-14 แรงภายในสูงสุดของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Maximum Stress (ksc)	
	Lower Bound	Upper Bound
Strength 1	174.48	174.52
Service 1	125.69	125.73

ตารางที่ 6.3-15 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางธรรมชาติ

Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	2.06932	0.22722	-1.72868	2.06364	0.20502	-1.71318	0.000042	0.000469	0.000047	0.000474
LL	0.78846	0.48034	-0.78698	0.78765	0.47918	-0.75958	0.000112	0.000178	0.000107	0.000179
Temperature 20'	0.55161	0.74289	-0.27678	0.54838	0.70266	-0.31705	0.000135	0.000126	0.000172	0.000128
Temperature 5'	0.50243	0.22060	-0.03121	0.50687	0.20698	-0.04630	0.000017	0.000123	0.000026	0.000124
Strength 1	5.14445	1.79650	-3.38010	5.16281	1.75141	-3.38759	0.000213	0.001195	0.000257	0.001207
Service 1	3.83945	1.29002	-2.51594	3.85535	1.25228	-2.52477	0.000161	0.000895	0.000199	0.000904

ตารางที่ 6.3-16 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำประเภทต่างๆ สำหรับแผ่นยางสังเคราะห์

Load Case	Displacement (mm)						Rotation (rad)			
	Lower Bound			Upper Bound			Lower Bound		Upper Bound	
	dx	dy	dz	dx	dy	dz	rx	ry	rx	ry
DL	2.06802	0.22151	-1.71631	2.06513	0.21011	-1.71334	0.000043	0.000471	0.000046	0.000473
LL	0.78825	0.47990	-0.77957	0.78784	0.47927	-0.76539	0.000111	0.000178	0.000108	0.000179
Temperature 20'	0.55077	0.73435	-0.28479	0.54908	0.71400	-0.30502	0.000144	0.000127	0.000163	0.000127
Temperature 5'	0.50344	0.21752	-0.03463	0.50570	0.21059	-0.04228	0.000019	0.000123	0.000024	0.000123
Strength 1	5.14868	1.78754	-3.37611	5.15807	1.76477	-3.37913	0.000223	0.001199	0.000245	0.001204
Service 1	3.84312	1.28252	-2.51362	3.85125	1.26347	-2.51750	0.000170	0.000898	0.000189	0.000902

6.3.5 สรุปผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานของสะพานแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 6.3-17 และ ตารางที่ 6.3-18 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานที่ได้จากการพิจารณาค่าสถิติเฟนสที่ขอบเขตบนและขอบเขตล่างไม่ได้ส่งผลต่อค่าหน่วยแรงภายในโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางภายใต้แรงกระทำต่างๆ เนื่องจากสถิติเฟนสของโครงสร้างส่วนบนที่มีค่าสูงกว่าค่าสถิติเฟนสของแผ่นยางรองคอสสะพานมาก ทั้งนี้ ผลที่ได้รับจากการศึกษาจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงภายในแผ่นยางรองคอสสะพานในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 6.3-17 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำ Service 1 (Displacement)

โครงสร้างสะพาน	ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดยางที่ผลิต	Displacement (mm)					
			Lower Bound			Upper Bound		
			dx	dy	dz	dx	dy	dz
คอนกรีตหล่อในที่	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	0.42882	0.28979	-1.43204	0.42923	0.29098	-1.40122
		ยางสังเคราะห์	0.42894	0.29007	-1.42324	0.42915	0.29068	-1.40752
คอนกรีตอัดแรง	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	1.49823	0.63027	-1.81868	1.50567	0.6084	-1.84046
		ยางสังเคราะห์	1.50011	0.62485	-1.82324	1.50391	0.61366	-1.83444
คอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ	ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	ยางธรรมชาติ	0.61741	0.42866	-0.43568	0.6172	0.41461	-0.42301
		ยางสังเคราะห์	0.61738	0.43076	-0.44234	0.61712	0.41316	-0.42632
คอนกรีตอัดแรงกลวง	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	3.83945	1.29002	-2.51594	3.85535	1.25228	-2.52477
		ยางสังเคราะห์	3.84312	1.28252	-2.51362	3.85125	1.26347	-2.5175

ตารางที่ 6.3-18 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานภายใต้แรงกระทำ Service 1 (Rotation)

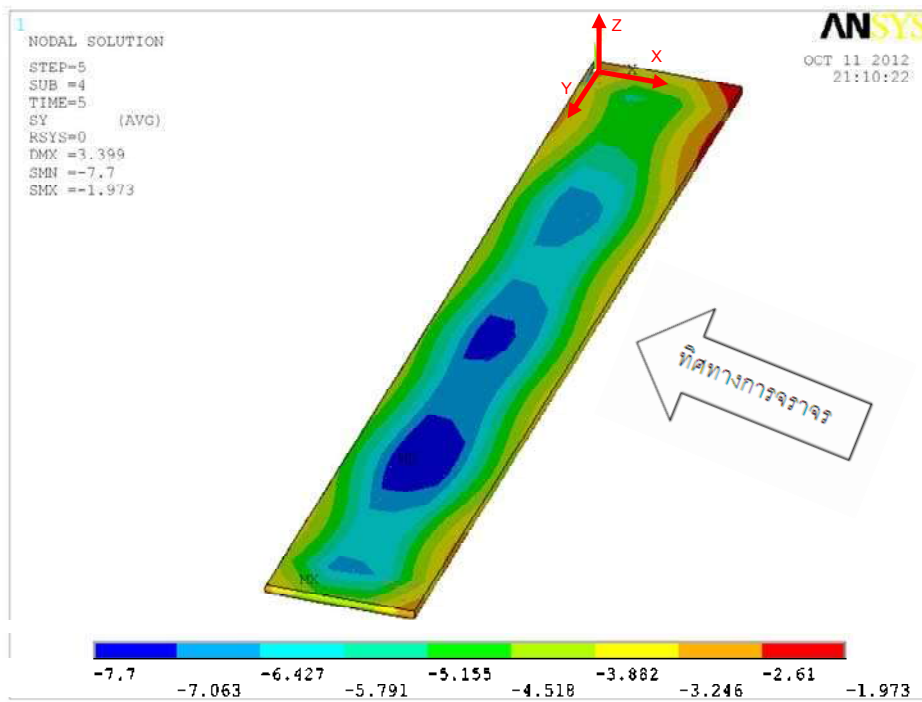
โครงสร้างสะพาน	ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดยางที่ผลิต	Rotation (rad)			
			Lower Bound		Upper Bound	
			rx	ry	rx	ry
คอนกรีตหล่อในที่	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	0.000457	0.001698	0.000427	0.001696
		ยางสังเคราะห์	0.000449	0.001698	0.000434	0.001697
คอนกรีตอัดแรง	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	0.000565	0.000276	0.000591	0.000278
		ยางสังเคราะห์	0.000572	0.000276	0.000585	0.000278
คอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ	ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	ยางธรรมชาติ	0.000393	0.001107	0.00039	0.001107
		ยางสังเคราะห์	0.000394	0.001107	0.00039	0.001107
คอนกรีตอัดแรงกลวง	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	0.000161	0.000895	0.000199	0.000904
		ยางสังเคราะห์	0.00017	0.000898	0.000189	0.000902

6.4 การวิเคราะห์หน่วยแรงในแผ่นยางรองคอสสะพาน

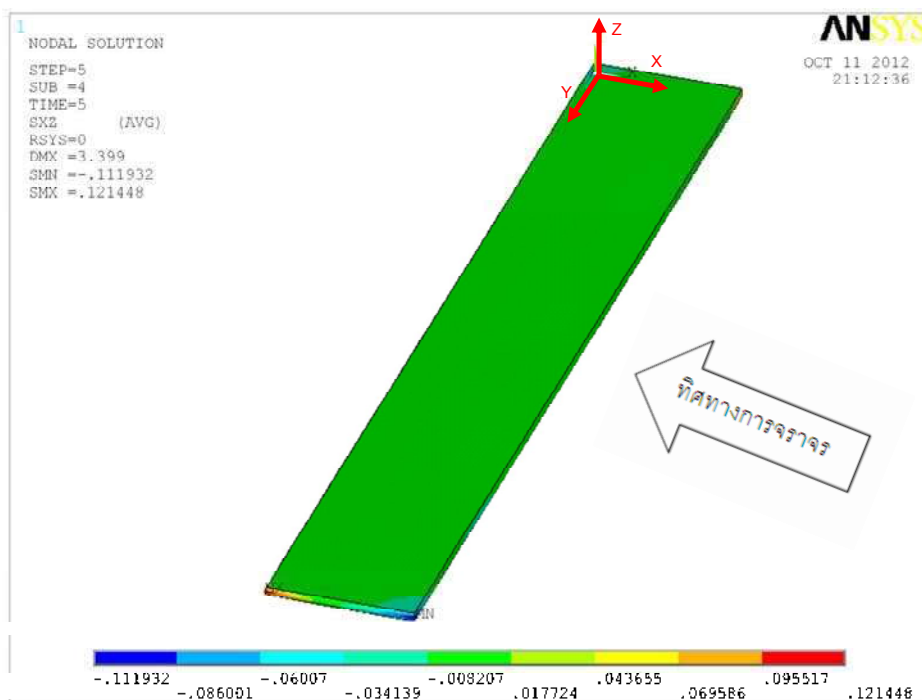
การวิเคราะห์หน่วยแรงในแผ่นยางรองคอสสะพานได้ทำการจำลองแผ่นยางรองคอสสะพานแบบ 3 มิติในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการวิเคราะห์แผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดแผ่นยางล้วนใช้เอลิเมนต์ Solid 185 ขนาด 25x25x2.5 มม สำหรับแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทชนิดเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กใช้เอลิเมนต์ Solid 45 ขนาด 25x25x1.5 มม แทนแผ่นเหล็กที่เสริมกำลัง และใช้เอลิเมนต์ Solid 185 ขนาด 25x25x1 และ 25x25x4 มม สำหรับแผ่นยางที่อยู่ด้านบนและระหว่างแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังตามลำดับ ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นยางรองคอสสะพานและแผ่นเหล็กใช้เอลิเมนต์ Contact 174 และ Target 170 เพื่อแทนพฤติกรรมที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังและแผ่นยางรองคอสสะพาน

6.4.1 แผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่

การวิเคราะห์หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานได้อาศัยการคำนวณแบบ Displacement Control โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับ Service 1 จากตารางที่ 7.3-17 และตารางที่ 6.3-18 มาวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่รูปที่ 6.4-1 และ 6.4-2 แสดงการกระจายของหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนบนแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.4-1 หน่วยแรงอัดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางระดับ Service I



รูปที่ 6.4-2 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางระดับ Service I

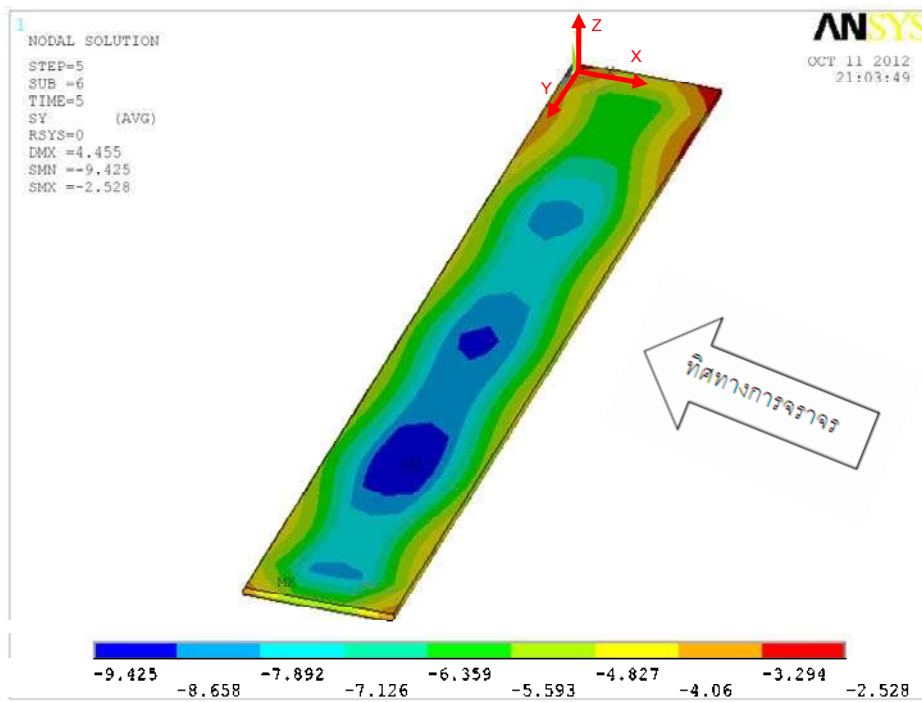
ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตหล่อในที่แสดงในตารางที่ 6.4-1 โดยหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 7.7 MPa และ 0.121 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย 5.5 MPa ที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO จะได้ค่าหน่วยแรงอัดที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ (Local Stress) ในขณะที่มาตรฐานการออกแบบพิจารณาค่าหน่วยแรงเฉลี่ย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติความแข็งแรงของแผ่นยางที่มีค่า G เท่ากับ 2.058 MPa จะได้ว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับความเครียดเฉือน 0.5 มีค่าเท่ากับ 1.029 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์มาก

ตารางที่ 6.4-1 หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่

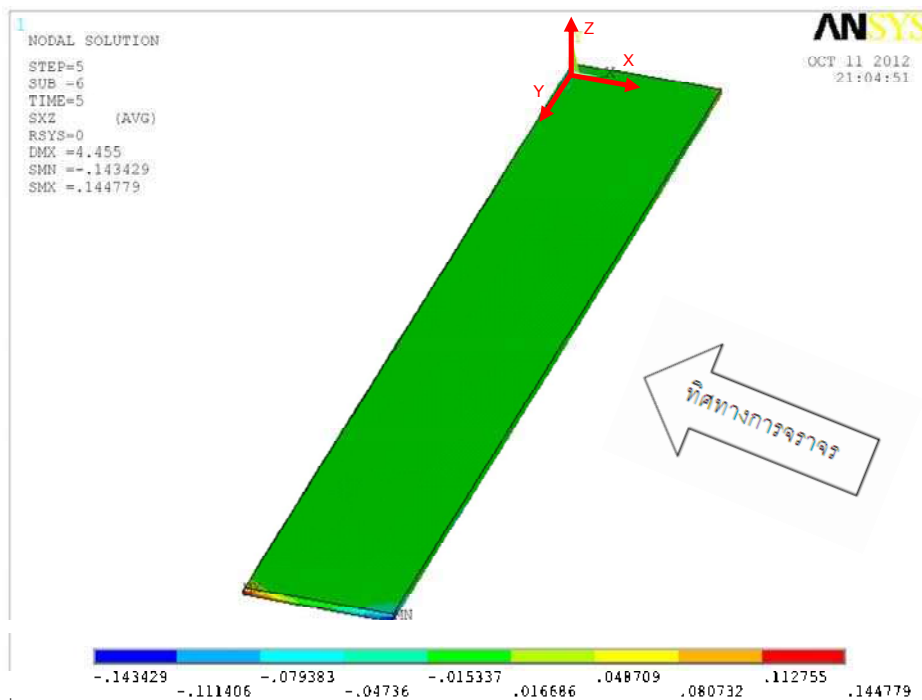
ประเภทสะพาน	ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดของยางที่ผลิต	ค่าขอบล่าง				ค่าขอบบน			
			หน่วยแรงอัด (MPa)		หน่วยแรงเฉือน (MPa)		หน่วยแรงอัด (MPa)		หน่วยแรงเฉือน (MPa)	
			ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
Slab Type	ยางล้น	ยางธรรมชาติ	4.547	1.198	0.0747	0.069	7.700	1.973	0.121	0.112
		ยางสังเคราะห์	5.223	1.373	0.085	0.0789	6.777	1.743	0.108	0.09982

6.4.2 แผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตอัดแรง

การวิเคราะห์หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานได้อาศัยการคำนวณแบบ Displacement Control โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับ Service 1 จากตารางที่ 7.3-17 และตารางที่ 6.3-18 มาวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นยางรองคอสสะพานคอนกรีตอัดแรง รูปที่ 6.4-3 และ 6.4-4 แสดงการกระจายของหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนบนแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้นหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.4-3 หน่วยแรงอัดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางระดับ Service I



รูปที่ 6.4-4 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางระดับ Service I

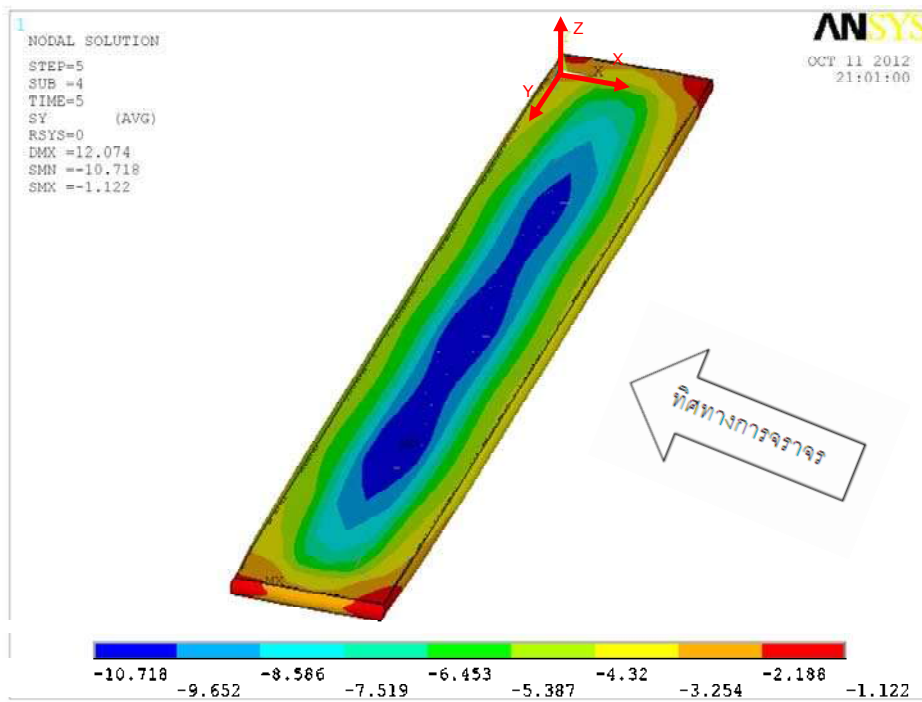
ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตอัดแรงแสดงในตารางที่ 6.4-2 โดยหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 9.425 MPa และ 0.1447 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย 5.5 MPa ที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO จะได้ค่าหน่วยแรงอัดที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ (Local Stress) ในขณะที่มาตรฐานการออกแบบพิจารณาค่าหน่วยแรงเฉลี่ย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติความแข็งแรงของแผ่นยางที่มีค่า G เท่ากับ 2.058 MPa จะได้ว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับความเครียดเฉือน 0.5 มีค่าเท่ากับ 1.029 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์มาก

ตารางที่ 6.4-2 หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตอัดแรง

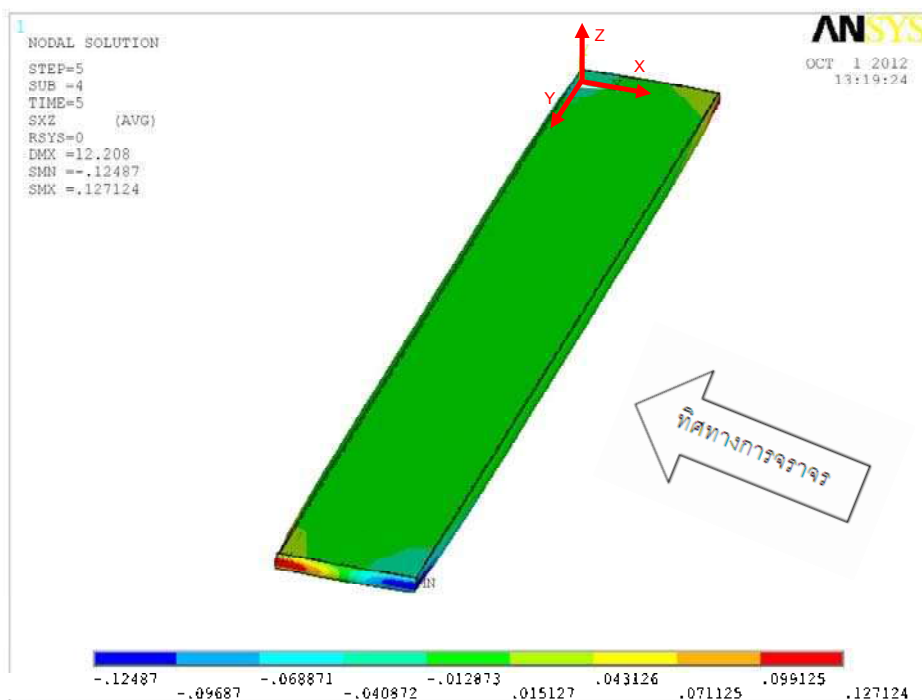
ประเภทสะพาน	ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดของยางที่ผลิต	ค่าขอบบน					
			หน่วยแรงอัด (MPa)		หน่วยแรงเฉือน (MPa)	หน่วยแรงอัด (MPa)		หน่วยแรงเฉือน (MPa)
			ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
Plank Girder	ยางล้วน	ยางธรรมชาติ	5.421	1.482	0.0870	9.425	2.528	0.1447
		ยางสังเคราะห์	6.244	1.700	0.0992	8.268	2.221	0.1286

6.4.3 แผ่นยางรองคอสสะพานของสะพานแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงกลวง

การวิเคราะห์หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานได้อาศัยการคำนวณแบบ Displacement Control โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับ Service 1 จากตารางที่ 6.3-17 และตารางที่ 6.3-18 มาวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นยางรองคอสสะพานคอนกรีตอัดแรงอัดแรงกลวง รูปที่ 6.4-5 และ 6.4-6 แสดงการกระจายของหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนบนแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทยางล้วนหนา 22.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.4-5 หน่วยแรงอัดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางระดับ Service I



รูปที่ 6.4-6 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางระดับ Service I

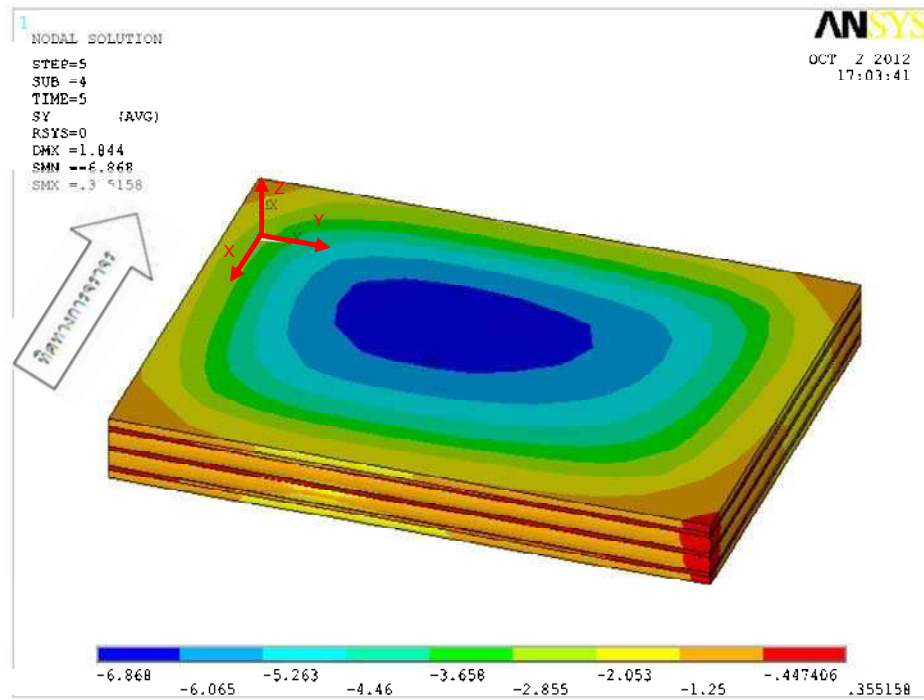
ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตอัดแรงกลางแสดงในตารางที่ 6.4-3 โดยหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10.718 MPa และ 0.2067 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย 5.5 MPa ที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO จะได้ค่าหน่วยแรงอัดที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ (Local Stress) ในขณะที่มาตรฐานการออกแบบพิจารณาค่าหน่วยแรงเฉลี่ย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคูณสมบัติความแข็งแรงของแผ่นยางที่มีค่า G เท่ากับ 2.058 MPa จะได้ว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับความเครียดเฉือน 0.5 มีค่าเท่ากับ 1.029 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์มาก

ตารางที่ 6.4-3 หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตอัดแรงกลาง

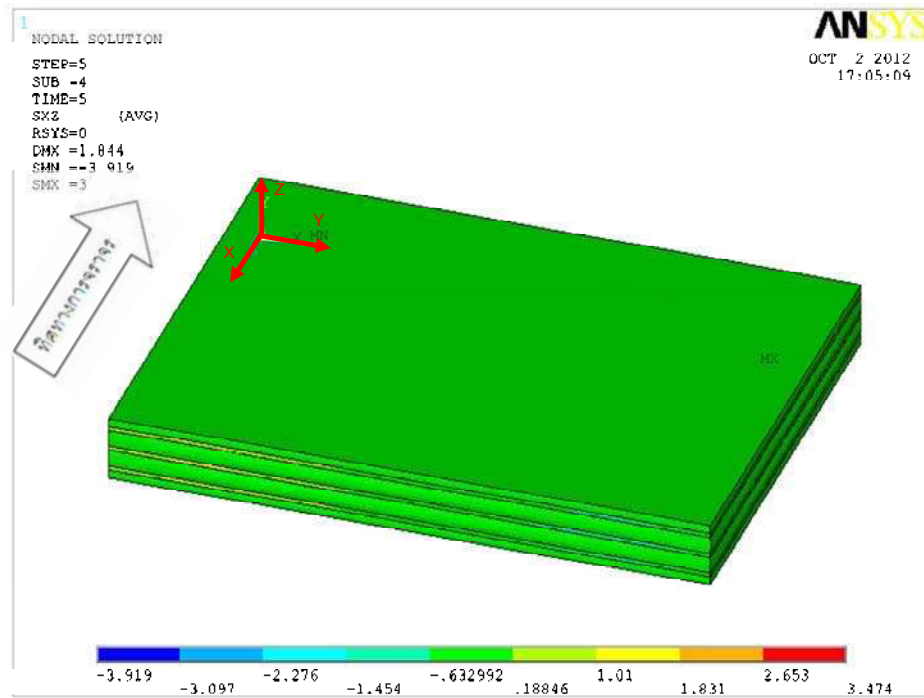
ประเภทสะพาน	ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดของยางที่ผลิต	ค่าขอบล่าง				ค่าขอบบน			
			หน่วยแรงอัด (MPa)		หน่วยแรงเฉือน (MPa)		หน่วยแรงอัด (MPa)		หน่วยแรงเฉือน (MPa)	
			ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
Box Girder	ยางลื่น	ยางธรรมชาติ	6.268	0.667	0.127	0.125	10.718	1.122	0.2104	0.2067
		ยางสังเคราะห์	7.177	0.765	0.145	0.142	9.474	0.9925	0.1878	0.1844

6.4.4 แผ่นยางรองคอสสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ

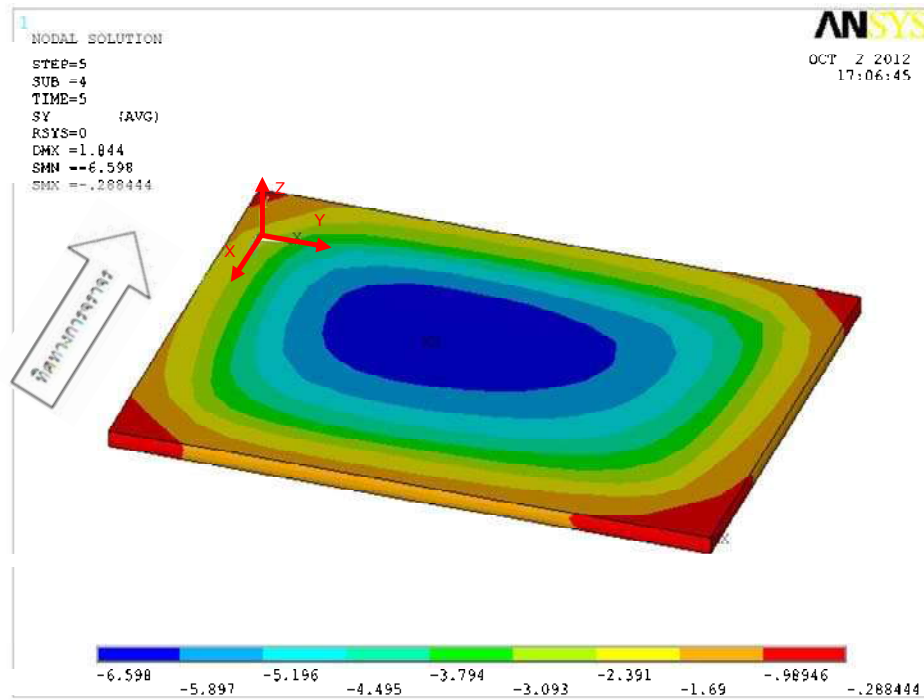
การวิเคราะห์หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานได้อาศัยการคำนวณแบบ Displacement Control โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานระดับ Service 1 จากตารางที่ 6.3-17 และตารางที่ 6.3-18 มาวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นยางรองคอสสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ รูปที่ 6.4-7 ถึง 6.4-12 แสดงการกระจายของหน่วยแรงแผ่นยางรองคอสสะพานประเภทเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก



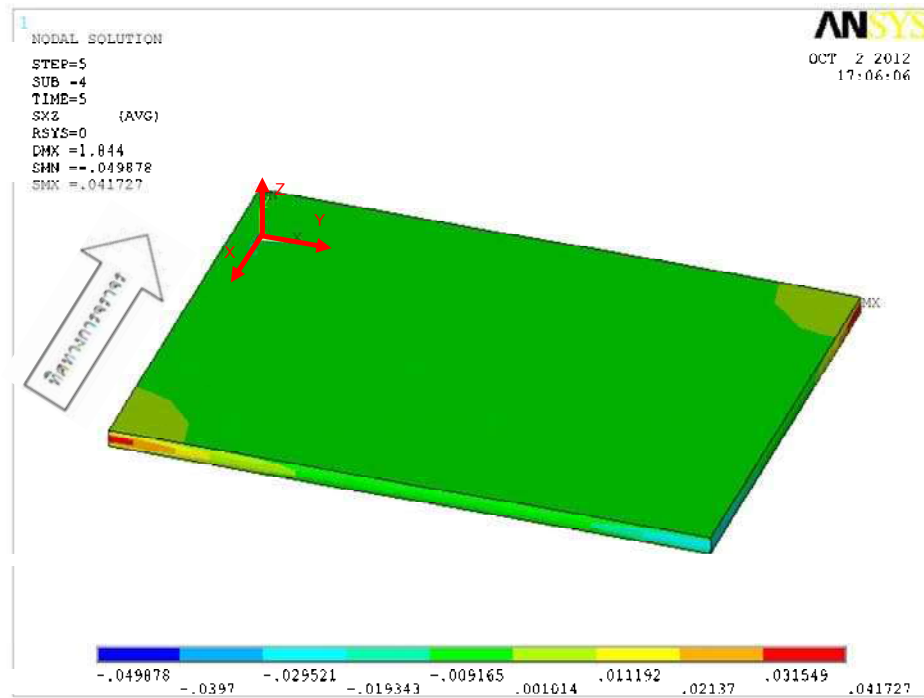
รูปที่ 6.4-7 หน่วยแรงอัดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กระดับ Service I



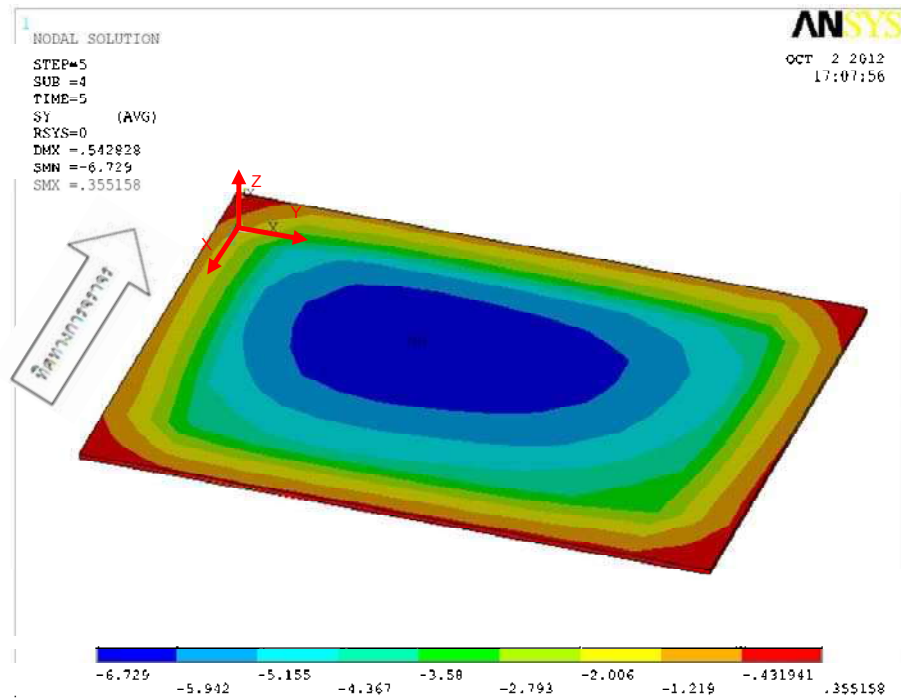
รูปที่ 6.4-8 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กระดับ Service I



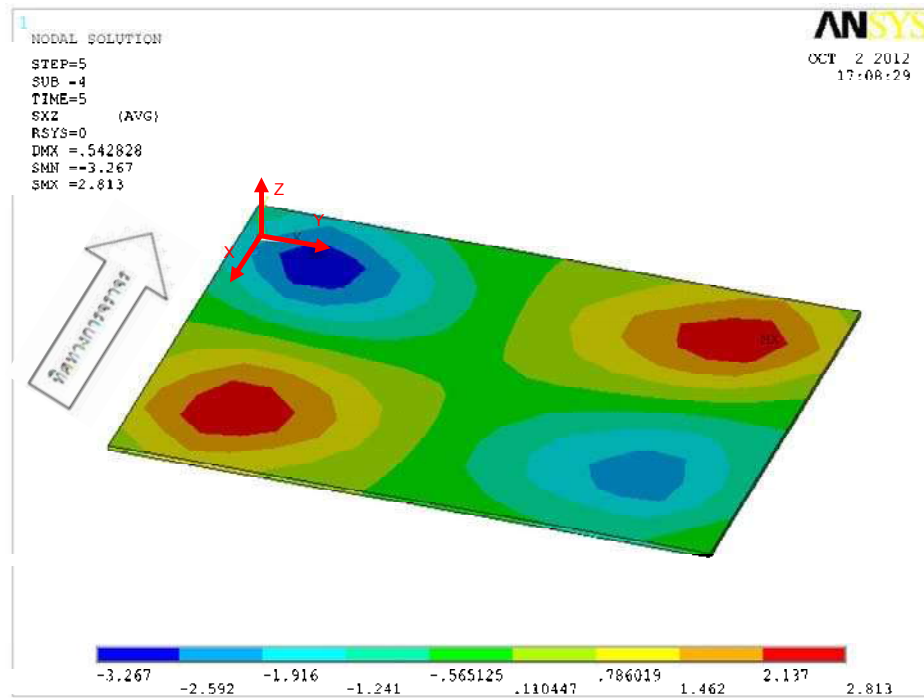
รูปที่ 6.4-9 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นยางแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กระดับ Service I



รูปที่ 6.4-10 หน่วยแรงเฉือนของแผ่นยาง



รูปที่ 6.4-11 หน่วยแรงอัดของแผ่นเหล็ก



รูปที่ 6.4-12 หน่วยแรงเฉือนของแผ่นเหล็ก

ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานแสดงในตารางที่ 6.4-4 โดยหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 7.121 MPa และ 0.052 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย 7 MPa ที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO จะได้ค่าหน่วยแรงอัดที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ (Local Stress) ในขณะที่มาตรฐานการออกแบบพิจารณาหน่วยแรงเฉลี่ย เมื่อพิจารณาคุณสมบัติความแข็งแรงของแผ่นยางที่มีค่า G เท่ากับ 1.483 MPa จะได้ว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับความเครียดเฉือน 0.5 มีค่าเท่ากับ 0.742 MPa ซึ่งมีความมากกว่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์มาก นอกจากนี้ หน่วยแรงเฉือนสูงสุดในแผ่นเหล็ก 4.037 MPa ยังมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนของแผ่นเหล็กมาก

ตารางที่ 6.4-4 หน่วยแรงของแผ่นยางรองคอสสะพานพื้นคอนกรีตอัดแรง

ประเภทสะพาน	ประเภทยางรองคอสสะพาน	ชนิดของยางที่ผลิต	ค่าขอบล่าง			ค่าขอบบน		
			หน่วยแรงอัด (MPa)	หน่วยแรงเฉือนของแผ่นเหล็ก (MPa)	หน่วยแรงเฉือนของแผ่นยาง (MPa)	หน่วยแรงอัด (MPa)	หน่วยแรงเฉือนของแผ่นเหล็ก (MPa)	หน่วยแรงเฉือนของแผ่นยาง (MPa)
			ค่าสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าสูงสุด
I Girder	ยางเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	ยางธรรมชาติ	5.144	3.462	0.050	6.868	3.919	0.050
		ยางสังเคราะห์	5.073	3.010	0.032	7.121	4.037	0.052

6.5 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์และข้อเสนอแนะ

6.5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

- 1) ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานอันเนื่องมาจากผลของน้ำหนักบรรทุก และอุณหภูมิ พบว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย ที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ (Local Stress) ในขณะที่มาตรฐานการออกแบบพิจารณาหน่วยแรงเฉลี่ย
- 2) ผลการวิเคราะห์แรงภายในและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นยางรองคอสสะพานอันเนื่องมาจากผลของน้ำหนักบรรทุก และอุณหภูมิ พบว่ายางรองคอสสะพานชนิดยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์จะให้ผลของหน่วยแรงภายในไม่แตกต่างกันมากนัก

6.5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความเครียดอัดมีผลต่อพฤติกรรมของแผ่นยางรองคอสสะพานอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น หากในอนาคตสามารถทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการในรูปแบบ Compression Fatigue

Test ซึ่งเป็นการจำลองพฤติกรรมของน้ำหนักบรรทุกจริงที่กระทำบนสะพานและแผ่นยาง จะทำให้การประเมินอายุการใช้งานของแผ่นยางรองสะพานครอบคลุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้มากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

1. เกรียงไกร เตโชเวโรจน์, พิสนธ์ อุดมวรรัตน์ และ อาณัติ เรืองรัมย์. (2552). พฤติกรรมของแผ่นยางรองสะพานภายใต้แรงแบบวัฏจักร. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ, 14.
2. จิตพันธ์ ประกอบพร. (2547). คู่มือวิธีการปฏิบัติงานบูรณะและปรับปรุงสะพานและท่อเหลี่ยม. กรุงเทพฯ: สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง.
3. พงษ์ธร แซ่ฮุย (2547). ยาง สมบัติ และการใช้งาน. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
4. พงษ์ธร แซ่ฮุย และชาคริต สิริสิงห (2550). ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
5. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.951-2533.แผ่นยางรองสะพาน (Standard for Rubber Bridge Bearings). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
6. AASHTO LRFD. (2007). *Bridge Design Specifications*. (4th ed.).
7. AASHTO M251 (1997). *Standard Specifications for Plain and Laminated Elastomeric Bridge Bearings*.
8. AASHTO M251 (1997). *Standard Specifications for Plain and Laminated Elastomeric Bridge Bearings*.
9. AASHTO. (2004). *Maintenance Manual*. Washington D.C.
10. ASTM D1149. *Standard Test Method for Rubber Deterioration-Surface Ozone Cracking in a Chamber*.
11. ASTM D1149. *Standard Test Methods for Rubber Deterioration-Cracking in an Ozone Controlled Environmen*.
12. ASTM D1415. *Standard Test Method for Rubber Property International Hardness*.
13. ASTM D2240. *Standard Test Methods for Rubber Property-Durometer Hardness*.
14. ASTM D3182. *Standard Practice for Rubber-Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets*.
15. ASTM D395. *Standard Test Method for Rubber Property-Compression Set*.

16. ASTM D412-98a. *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension.*
17. ASTM D429. *Standard Test Method for Rubber Property-Adhesion to Rigid Substrates.*
18. ASTM D454. *Standard Test Method for Rubber Deterioration by Heat and Air Pressure.*
19. ASTM D572. *Standard Test Method for Rubber-Deterioration by Heat and Oxygen.*
20. ASTM D573. *Standard Test Method for Rubber-Deterioration in an Air Oven.*
21. ASTM D575. *Standard Practice for Rubber-Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets.*
22. ASTM D865. *Standard Test Method for Rubber Deterioration by Heating in Air (Test Tube Enclosure).*
23. Bauman, J. T. (2008). *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers.*
24. British Standard BS 5400-9.2. (1983). *Steel, concrete and composite bridges – Part 9 : Bridge bearings – Section 9.2 Specification for materials, manufacture and installation of bridge bearings.* UK.
25. BS 903:Part A14.(1992). *Physical testing of rubber. Method for determination of modulus in shear or adhesion to rigid plates. Quadruple shear method.*
26. BS 903:Part A16.(1992). *Physical testing of rubber. Determination of the effect of liquids.*
27. BS 903:Part A19.(1986). *Physical testing of rubber. Heat resistance and accelerated ageing tests.*
28. BS 903:Part A2. (1989). *Physical testing of rubber. Determination of tensile stress-strain properties.*
29. BS 903:Part A21.(1989). *Physical testing of rubber. Determination of rubber to metal bond strength.*
30. BS 903:Part A26.(1969). *Physical testing of rubber. Determination of hardness.*
31. BS 903:Part A4.(1990). *Physical testing of rubber. Determination of compression stress-strain properties.*
32. BS 903:Part A43.(1982). *Methods of testing vulcanized rubber. Determination of resistance to ozone cracking (static strain test).*

33. BS 903:Part A6.(1969). *Methods of testing vulcanized rubber. Determination of compression set after constant strain.*
34. By Nur Yazdani, Fellow, P. E., Scott Eddy, & Chun, S. (2000). EFFECT OF BEARING PADS ON PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES. *Journal of BRIDGE ENGINEERING*, 224-232.
35. DIN 53504. *Testing of rubber; determination of tensile strength at break, tensile stress at yield, elongation at break and stress values in a tensile test.*
36. DIN 53508. *Testing of rubber - Accelerated ageing.*
37. English, B. A., R. E. Klingner, and J. A. Yura. (1994).Elastomeric Bearings: Background Information and Field Study. *Research Report CTR 1304-1*, Center for Transportation Research, University of Texas Austin
38. Heymsfield, E., McDonald, J., & Avent, R. (2001). Neoprene Bearing Pad Slippage at Louisiana Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 6(1), 30-36.
39. ISO 1431/1. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Resistance to ozone cracking - Part 1: Static and dynamic strain testing.*
40. ISO 1431/2. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Resistance to ozone cracking - Part 2: Static and dynamic strain testing.*
41. ISO 1827. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of shear modulus and adhesion to rigid plates -Quadruple-shear methods.*
42. ISO 188. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Accelerated ageing and heat resistance tests.*
43. ISO 37. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties.*
44. ISO 48. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of hardness (hardness between 10 IRHD and 100 IRHD).*
45. ISO 813. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of adhesion to a rigid substrate - 90 degree peel method.*
46. ISO 815. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of compression set - Part 1: At ambient or elevated temperatures.*

47. ISO 868. *Plastics and ebonite-Determinate of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness).*
48. Kruml, T., Michel (2005). *MECHANICAL TESTING OF MATERIALS.*
49. Lindley, P.B. (1992). *Engineering Design with Natural Rubber.* Malaysian Rubber Producers' Research Association.
50. Long, J. E. (1974). *Bearings in Structural Engineering.* (1st ed.): Newnes-Butterworths.
51. Marcus, H. A. (2009). *STIFFNESS EVALUATION OF NEOPRENE BEARING PADS UNDER LONG TERM LOADS (No. BD545 RPWO#39).* Florida: STATE OF FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.
52. Meinecke, E.A.(1980).Comparing the Time and Rate Dependent Mechanical Properties of Elastomer, The University of Akron, Institute of Polymer Science, Akron, Ohio 44325, *Presented at a meeting of the Rubber Division, American Chemical Society.*
53. Mtenga, P.V. (2005). *Elastomeric Bearing Pads Under Combined Loading (Final Report No. BC352-16).* Florida: STATE OF FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.
54. Muscarella, J.V. and Yura, J.A. (1995). *An Experimental Study of Elastomeric Bridge Bearings with Design Recommendations.* Research Report 1304-3, Center for Transportation Research The University of Texas at Austin.
55. NCHRP. (2001). *Elastomeric Bridge Bearings: Recommended Test Methods* (No. Report 449).
56. Primus, V. M. (2007). *Elastomeric Bearing Pads Under Combined Loading.* Tallahassee: Florida Department of Transportation, Florida
57. Rivlin, R. S. (1997). Some Applications of Elasticity Theory to Rubber Engineering. *in Collected Papers of R. S. Rivlin vol. 1 and 2, Springer.*
58. Roedor, C.W., Syanton, J.F. (1987). *Performance of Elastomeric Bearings.*
59. Sun-Kyu, Hyeong-Yeol Kim & Jung-Hyuk kim. (2001). Bearing Replacement for Prestressed Concrete I-Girder Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 6(4).
60. William, P., Maec, A., & Primus. (2006). Condition of Elastomeric Bearing Pads after 40 Years of Service. *Transportation Research Board of the National Acadimic.*
61. Yanagihara, M., Matsuzawa, T., & Kudo, M. (2003). Repair of Golden Horn Bridge in Turkey. *Engineering Review*, 36(2).

62. Yazdani, Eddy, S.M and Cai, C.S. (2000). Validation of AASHTO Bearing stiffness for Standard Precast concrete Bridge Girders. *ACI Structural journal*.
63. Yeoh, O. H. (1993). Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chemistry and technology*, Vol. 66 (5)
64. Yura, J., Kumar, A., Yakut, A., Topkaya, C., Becker, E., and Collingwood, J. (2001). Elastomeric Bridge Bearings: Recommended Test Methods, NCHRP Report 449, *Transportation Research Board*, Washington D.C.

ภาคผนวก ก

รายงานผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุยางรองคอสะพาน

ภาคผนวก ข

รายงานผลการทดสอบวัสดุยางรองคอสะพานภาย ใต้น้ำหนักบรรทุก

ภาคผนวก ค

รายชื่อสะพานที่ดำเนินการสำรวจภาคสนาม