

การศึกษาพฤติกรรมของที่รองรับแบบอีลาสโตเมอร์คที่มีเดี่ยว

นายอาทิตย์ อุ่นคำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study on Behavior of elastomeric bearing with dowels

Mr. Arhit Ounkam



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมของทีรองรับแบบอีลาสโตเมอร์คที่มี
เด็ย

โดย

นายอาทิตย์ อุ่นคำ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.หทัยรัตน์ มณีเทศ)

อาทิพย์ อุ่นคำ : การศึกษาพฤติกรรมของที่รองรับแบบอีลาสโตเมอร์ที่มีเดือย (Study on Behavior of elastomeric bearing with dowels) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อาณัติ เรืองรัมย์, 112 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นยางที่รองรับสะพานและเหล็กเดือยรับแรงเฉือนที่ใช้กับสะพาน โดยแผ่นยางมีขนาดด้านกว้างและยาวเท่ากับ 300x400 มิลลิเมตร โดยแผ่นยางที่นำมาทดสอบมีความหนาแตกต่างกันตั้งแต่ 40 มิลลิเมตร, 60 มิลลิเมตร และ 80 มิลลิเมตร รวมถึงได้ทำการทดสอบเหล็กเดือยรับแรงเฉือนด้วย โดยชิ้นส่วนทดสอบทั้งหมดได้นำมาทดสอบรับแรงกระทำแบบวัฏจักรด้วยเครื่องให้แรงไฮดรอลิกแบบความคุมการเคลื่อนตัว ซึ่งในการทดสอบแผ่นยางได้มีการเปลี่ยนแปลงระยะการเคลื่อนตัวและความถี่ จากผลทดสอบพบว่าสตีเฟนสประสิทธิภาพของแผ่นยางลดลงเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น การสลายพลังงานลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และที่สำคัญพบว่าการเลื่อนไถลเกิดขึ้นระหว่างแผ่นยางและผิวคอนกรีต สำหรับผลทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรกับเหล็กเดือยรับแรงเฉือนนั้น ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OpenSees โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนระหว่างผลทั้งสอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของความยาวประสิทธิภาพของเหล็กเดือยรับแรงเฉือนที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งในการทดสอบเมื่อขึ้นตัวอย่างทดสอบเกิดการคราก จะทำให้เกิดการครากเข้าไปในจุดยึดของเหล็กเดือย ส่งผลให้ความยาวประสิทธิภาพมีค่ามากขึ้น และเมื่อปรับแก้ความยาวประสิทธิภาพของเหล็กเดือยในโปรแกรมวิเคราะห์แล้วพบว่าผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบมากยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570526121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: LAMINATED / LAMINATED ELASTOMERIC BEARING / DOWELS TEST / CYCLIC TEST / OPENSEES MODEL

ARTHIT OUNKAM: Study on Behavior of elastomeric bearing with dowels.

ADVISOR: ASSOC. PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, 112 pp.

This research focuses on the cyclic behaviour of elastomeric bearings and shear dowels in bridges. The bearings with a dimension of 300 mm x 400 mm and thicknesses of 40, 60, and 80 mm; as well as the DB12 and DB16 shear dowels are used in the study. The specimens are subjected to cyclic excitation from a hydraulic actuator under displacement control. In the test of elastomeric bearings, the amplitudes and frequencies are varied. It is found that the effective stiffness of the bearings decreases as the amplitude increases. The energy dissipation decreases when the velocity increases. It is important to note that slippage occurs between the bearing and the concrete surface. For the shear dowel test, the cyclic behaviors are obtained and compared with the results from fiber analysis using OpenSees. The discrepancy is observed between the two results. It is partly due to the effective length of the shear dowel. When the specimen yields, yield penetration occurs and results in the longer effective length. Better agreement is obtained when adjusting the effective length.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษางานวิจัยในหัวข้อ "การศึกษาพฤติกรรมของที่รองรับแบบอีลาสโตเมอร์คที่มีเต็อย" สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก รศ.ดร. อาณัติ เรืองรัมย์ ผู้ให้ความกรุณารับเป็นที่ปรึกษา ให้คำแนะนำ ความรู้ ข้อคิด และให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูล แนวทางการทำวิจัยที่ถูกต้องตามระเบียบวิธีจึงทำให้งานวิจัยชิ้นนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ รวมไปถึง รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว และ ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ที่ช่วยให้คำแนะนำ ความรู้ ข้อคิด และให้ความเอื้อเฟื้อต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี พร้อมขอกราบขอบพระคุณ ดร.หทัยรัตน์ มณีเทศ และคุณสมพงษ์ ขำแจ้ง ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำความรู้และขอขอบคุณ คุณอภิชาติ วงศ์ดี และคุณเพชร เครือวิทย์ ที่ให้การช่วยเหลือให้คำปรึกษาและข้อมูลในการทำทดสอบและขอขอบคุณ คุณศักร์เกษม สุวรรณรัต ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทำวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะสาขาวิศวกรรมโครงสร้างที่ได้กรุณาช่วยแนะนำข้อเสนออื่นๆที่มีประโยชน์แก่งานวิจัยนี้จนทำให้สำเร็จไปด้วยดีและสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ วิลาวัลย์ อุ่นคำ และทุกคนในครอบครัวที่ดูแลเลี้ยงดูจนเติบโตมาจนถึงทุกวันนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับที่รองรับสะพาน	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบที่รับรองรับสะพาน	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของที่รองรับสะพาน	17
บทที่ 3 การศึกษาข้อมูลในการวิจัย.....	24
3.1 ศึกษารายละเอียดจากแบบก่อสร้างสะพาน	24
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	25
3.2.1 ที่รองรับสะพาน.....	25
3.2.2 รายละเอียดวางรองรับสะพาน	26
3.2.2 เหล็กเดือย	29

บทที่ 4	การจัดเตรียมอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบที่รองรับ	30
4.1	การจัดเตรียมชุดทดสอบที่รองรับ	30
4.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในตรวจวัดค่า.....	30
4.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	31
4.2	การติดตั้งชุดทดสอบที่รองรับและการตรวจวัด	33
4.2.1	การติดตั้งเครื่องทดสอบ.....	33
4.2.2	การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า.....	35
4.3	รูปแบบการให้แรงในการทดสอบที่รองรับ	37
บทที่ 5	การทดสอบและผลการทดสอบของที่รองรับ.....	39
5.1	การทดสอบที่รองรับ.....	40
5.1.1	การทดสอบที่รองรับ T40.....	40
5.1.2	การทดสอบที่รองรับ T60.....	43
5.1.3	การทดสอบที่รองรับ T80.....	45
5.2	ผลการทดสอบที่รองรับ	49
5.2.1	ผลการทดสอบที่รองรับ T40.....	50
5.2.2	ผลการทดสอบที่รองรับ T60.....	52
5.2.3	ผลการทดสอบที่รองรับ T80.....	55
5.3	วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ	59
5.3.1	วิเคราะห์ผลโดยรวม	59
5.3.2	เปรียบเทียบผลของยางที่รองรับสะพาน.....	68
บทที่ 6	การจัดเตรียมอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบเหล็กเดือย.....	71
6.1	การจัดเตรียมชุดทดสอบเหล็กเดือย.....	71
6.1.1	ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดสอบเหล็กเดือย.....	71

6.1.2 การติดตั้งเหล็กเดือย	72
6.2 การตรวจวัดข้อมูลและบันทึกข้อมูล	73
6.3 รูปแบบการให้แรงในการทดสอบเหล็กเดือย	75
บทที่ 7 การทดสอบและเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองของเหล็กเดือย	77
7.1 การทดสอบเหล็กเดือย	77
7.1.1 การทดสอบเหล็กเดือย S12-60	77
7.1.2 การทดสอบเหล็กเดือย S12-80	80
7.1.3 การทดสอบเหล็กเดือย S16-60	84
7.1.4 การทดสอบเหล็กเดือย S16-80	88
7.2 การทดสอบแรงดึง	92
7.3 การสร้างแบบจำลองของเหล็กเดือยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ	94
บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	107
8.1 สรุปผล	107
8.2 ข้อเสนอแนะ	109
รายการอ้างอิง	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดในการทดสอบเสถียรภาพของที่รองรับ	7
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ	13
ตารางที่ 2.3 ค่าแรงการทดสอบในแนวดิ่ง	14
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของ Laminated Elastomeric Bearing	25
ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของที่รองรับ	26
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการทดสอบของการที่รองรับสะพาน	38
ตารางที่ 6.1 รายละเอียดเหล็กเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ	76
ตารางที่ 7.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม..	93
ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม..	93
ตารางที่ 7.3 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองของเหล็กเดี่ยว	95

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 แบบจำลอง Single degree of freedom.....	1
รูปที่ 1.2 แบบจำลอง Single degree of freedom ที่มีการติดตั้งที่รองรับ (Bearing).....	2
รูปที่ 1.3 รูปแบบของสะพานที่มีการใช้ที่รองรับชนิดยางอีลาสโตเมอร์ที่มีเหล็กเดือย	2
รูปที่ 2.1 วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) พื้นฐานของอุปกรณ์แยกการสั่น	4
รูปที่ 2.2 ชุดการทดสอบ	6
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทดสอบเสถียรภาพ.....	6
รูปที่ 2.4 แรงในแนวแกนเปรียบเทียบกับเส้นโค้งความเครียดเฉือนที่เป็นฟังก์ชันของแรงเฉือน	7
รูปที่ 2.5 แรงวิกฤตที่เป็นฟังก์ชันของแอมปริจูดความเครียดเฉือน.....	8
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนที่เป็นฟังก์ชันของแรงในแนวแกน	8
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับแรงวิกฤตที่ได้จากทฤษฎีที่แตกต่างกัน	8
รูปที่ 2.8 ลักษณะของที่รองรับที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์.....	9
รูปที่ 2.9 การทดสอบแบบแรงอัด (a) ชุดการทดสอบ (b) เครื่องมือการวัด	10
รูปที่ 2.10 การทดสอบการเฉือน	10
รูปที่ 2.11 การเสียรูปของที่รองรับภายใต้ความเครียดเฉือน (a) $d = 40\%t_e$ and (b) $d = 120\%t_e$	11
รูปที่ 2.12 การเสียรูปของที่รองรับภายใต้ความเครียดเฉือน $d = 200\%t_e$	11
รูปที่ 2.13 (ซ้าย) ผลจากการทดสอบแรงอัดของตัวอย่าง(ขวา) ผลจากการทดสอบการเฉือนของตัวอย่าง	12
รูปที่ 2.14 แบบของตัวอย่างทดสอบ (a) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเหล็ก	13
รูปที่ 2.15 แบบของตัวอย่างทดสอบ (a) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเหล็ก	13

รูปที่ 2.16 ชุดการทดสอบ	14
รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัว (a) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเหล็ก	14
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวที่ทดสอบภายใต้แรงในแนวตั้ง 67 กิโลนิวตัน ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยเหล็ก	15
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวที่ทดสอบภายใต้แรงในแนวตั้ง 135 กิโลนิวตัน (a)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยเหล็ก	16
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวแบบวัฏจักรสำหรับแอมพลิจูดของความเครียดเฉือน 100% ที่แรงอัดในแนวตั้งคงที่67กิโลนิวตัน	16
รูปที่ 2.21 ค่าการเคลื่อนตัวของแรงแผ่นดินไหว	18
รูปที่ 2.22 แบบจำลอง Bi-linear ของที่ยางที่รองรับสะพาน	18
รูปที่ 2.23 รูปแบบ Single degree of freedom system ของแบบจำลองเทียบเท่าเชิงเส้นของที่ยรองรับ	20
รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบผลที่ได้จากข้อกำหนดการออกแบบต่างๆ (a) สถิติเนสประสิทธิภาพ	20
รูปที่ 2.25 แบบจำลองโพลีโนเมียลของที่ยรองรับชนิดยาง.....	21
รูปที่ 2.26 ช่วงยืดหยุ่น-เชิงเส้น ที่ตำแหน่งเริ่มให้แรงและที่ตำแหน่งจุดเปลี่ยนแปลงจากการยกเลิกให้แรง	21
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวของที่ยรองรับสะพานที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบ	22
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัวของการทดสอบและจากการวิเคราะห์(a)การเสียรูปน้อย(b)การเสียรูปมาก	23
รูปที่ 2.29 การตรวจแบบจำลองการวิเคราะห์กับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ	23
รูปที่ 3.1 รูปแบบของการติดตั้งยางในสะพาน	24
รูปที่ 3.2 ที่รองรับแบบอีลาสโตเมอร์ค.....	26
รูปที่ 3.3 ขนาดของที่ยรองรับความกว้าง x ความยาว	27

รูปที่ 3.4 รายละเอียดของที่รองรับขนาด 300x400x40 มิลลิเมตร	27
รูปที่ 3.5 รายละเอียดของที่รองรับขนาด 300x400x60 มิลลิเมตร	28
รูปที่ 3.6 รายละเอียดของที่รองรับขนาด 300x400x80 มิลลิเมตร	28
รูปที่ 3.7 คุณสมบัติเชิงกลของยาง	28
รูปที่ 3.8 เหล็กเดือยที่ใช้ในการทดสอบ	29
รูปที่ 4.1 เครื่องวัดระยะ	30
รูปที่ 4.2 เครื่องบันทึก	31
รูปที่ 4.3 แผ่นเหล็กประกบยางที่รองรับ	32
รูปที่ 4.4 เครื่องให้แรงแบบไฮดรอลิก (Actuator)	32
รูปที่ 4.5 แท่นไฮดรอลิกให้แรงอัดในแนวดิ่ง	33
รูปที่ 4.6 บล็อกคอนกรีต	33
รูปที่ 4.7 โครงเหล็กแบบล้อเลื่อน	34
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งติดตั้งล้อเลื่อน	34
รูปที่ 4.9 ชุดทดสอบที่รองรับ	35
รูปที่ 4.10 ตรวจสอบเช็คการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเหล็กรับแรงในแนวนอน	36
รูปที่ 4.11 ตรวจสอบเช็คการเคลื่อนตัวของบล็อกคอนกรีต	36
รูปที่ 4.12 รูปแบบการทดสอบแบบวัฏจักร	37
รูปที่ 5.1 ทิศทางการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ	39
รูปที่ 5.2 การให้แรงอัดในแนวแกนด้วยแท่นไฮดรอลิก	39
รูปที่ 5.3 T40 ระยะ +6mm ที่ 0.01 Hz	40
รูปที่ 5.4 T40 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz	40
รูปที่ 5.5 T40 ระยะ +6mm ที่ 1.0 Hz	41
รูปที่ 5.6 T40 ระยะ -6mm ที่ 1.0 Hz	41
รูปที่ 5.7 T40 ระยะ +10mm ที่ 0.01 Hz	41

รูปที่ 5.8 T40 ระยะ -10mm ที่ 0.01 Hz.....	42
รูปที่ 5.9 T40 ระยะ +10mm ที่ 1.0 Hz.....	42
รูปที่ 5.10 T40 ระยะ -10mm ที่ 1.0 Hz.....	42
รูปที่ 5.11 T60 ระยะ +6mm ที่ 0.01 Hz.....	43
รูปที่ 5.12 T60 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.....	43
รูปที่ 5.13 T60 ระยะ +6mm ที่ 1.0 Hz.....	44
รูปที่ 5.14 T60 ระยะ -6mm ที่ 1.0 Hz.....	44
รูปที่ 5.15 T60 ระยะ +14mm ที่ 0.01 Hz.....	44
รูปที่ 5.16 T60 ระยะ -14mm ที่ 0.01 Hz.....	45
รูปที่ 5.17 T80 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.....	45
รูปที่ 5.18 T80 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.....	46
รูปที่ 5.19 T80 ระยะ +6mm ที่ 1.0 Hz.....	46
รูปที่ 5.20 T80 ระยะ -6mm ที่ 1.0 Hz.....	46
รูปที่ 5.21 T80 ระยะ +14mm ที่ 0.01 Hz.....	47
รูปที่ 5.22 T80 ระยะ -14mm ที่ 0.01 Hz.....	47
รูปที่ 5.23 T80 ระยะ +14mm ที่ 1.0 Hz.....	47
รูปที่ 5.24 T80 ระยะ -14mm ที่ 1.0 Hz.....	48
รูปที่ 5.25 T80 ระยะ +20mm ที่ 0.01 Hz.....	48
รูปที่ 5.26 T80 ระยะ -20mm ที่ 0.01 Hz.....	48
รูปที่ 5.27 T80 ระยะ +20mm ที่ 1.0 Hz.....	49
รูปที่ 5.28 T80 ระยะ -20mm ที่ 1.0 Hz.....	49
รูปที่ 5.29 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 2 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	50
รูปที่ 5.30 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 4 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	50
รูปที่ 5.31 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	51

รูปที่ 5.32 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 8 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	51
รูปที่ 5.33 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 10 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	51
รูปที่ 5.34 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 2 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	52
รูปที่ 5.35 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 4 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	53
รูปที่ 5.36 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	53
รูปที่ 5.37 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 8 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	53
รูปที่ 5.38 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 10 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	54
รูปที่ 5.39 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 12 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	54
รูปที่ 5.40 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 14 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	54
รูปที่ 5.41 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 2 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	55
รูปที่ 5.42 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 4 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	56
รูปที่ 5.43 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	56
รูปที่ 5.44 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 8 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	56
รูปที่ 5.45 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 10 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	57
รูปที่ 5.46 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 12 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.....	57
รูปที่ 5.47 แรงหน่วงของทั้งระบบกับระยะการเคลื่อนตัวของ T40.....	67
รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ของแรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ T60.....	68
รูปที่ 6.1 แผ่นเหล็กประกบยางที่รองรับสะพาน	71
รูปที่ 6.2 ตำแหน่งการติดตั้งโครงสร้างเหล็กสำหรับทดสอบเหล็กเดี่ยว.....	72
รูปที่ 6.3 การเสริมแผ่นเหล็ก.....	72
รูปที่ 6.4 การติดตั้งเหล็กเดี่ยวทางด้านขวาของชุดทดสอบ	73
รูปที่ 6.5 การติดตั้งเหล็กเดี่ยวทางด้านซ้ายมือของชุดทดสอบ	73
รูปที่ 6.6 การบันทึกภาพในระหว่างทดสอบ	74
รูปที่ 6.7 เครื่องวัดแรงของเครื่องไฮดรอลิค	74

รูปที่ 6.8 คอมพิวเตอร์ควบคุมการทดสอบ	75
รูปที่ 6.9 ทิศทางการเคลื่อนตัวของทดสอบเหล็กเดียว	75
รูปที่ 6.10 รูปแบบการให้แรงในการทดสอบ.....	76
รูปที่ 7.1 ลักษณะก่อนการทดสอบตัวอย่าง S12-60	77
รูปที่ 7.2 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60.....	78
รูปที่ 7.3 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-60.....	78
รูปที่ 7.4 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60	78
รูปที่ 7.5 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-60.....	79
รูปที่ 7.6 ระยะเคลื่อนตัว 20 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60	79
รูปที่ 7.7 ระยะเคลื่อนตัว 20 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-60.....	80
รูปที่ 7.8 ระยะเคลื่อนตัว 23 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60	80
รูปที่ 7.9 ลักษณะก่อนการทดสอบตัวอย่าง S12-80.....	80
รูปที่ 7.10 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80	81
รูปที่ 7.11 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80.....	81
รูปที่ 7.12 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80	81
รูปที่ 7.13 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80	82
รูปที่ 7.14 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80	82
รูปที่ 7.15 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80	82
รูปที่ 7.16 ระยะเคลื่อนตัว 21 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80	83
รูปที่ 7.17 ระยะเคลื่อนตัว 21 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80	83
รูปที่ 7.18 ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80	84
รูปที่ 7.19 ลักษณะก่อนการทดสอบตัวอย่าง S16-60.....	84
รูปที่ 7.20 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60	85
รูปที่ 7.21 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-60.....	85

รูปที่ 7.22 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60	85
รูปที่ 7.23 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-60	86
รูปที่ 7.24 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60	86
รูปที่ 7.25 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-60	86
รูปที่ 7.26 ระยะเคลื่อนตัว 19 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60	87
รูปที่ 7.27 ระยะเคลื่อนตัว 19 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60	87
รูปที่ 7.28 ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60	87
รูปที่ 7.29 ลักษณะก่อนการทดสอบเหล็กเดี่ยว S16-80.....	88
รูปที่ 7.30 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80	88
รูปที่ 7.31 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80	88
รูปที่ 7.32 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80	89
รูปที่ 7.33 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80	89
รูปที่ 7.34 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80	89
รูปที่ 7.35 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80	90
รูปที่ 7.36 ระยะเคลื่อนตัว 22 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80	90
รูปที่ 7.37 ระยะเคลื่อนตัว 22 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80	90
รูปที่ 7.38 ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80	91
รูปที่ 7.39 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S12-60	91
รูปที่ 7.40 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S12-80	91
รูปที่ 7.41 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S16-60	92
รูปที่ 7.42 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S16-80	92
รูปที่ 7.43 การทดสอบแรงดึง.....	93
รูปที่ 7.44 การสร้างแบบจำลองของเหล็กเดี่ยว	94
รูปที่ 7.45 แบบจำลองหน้าตัดไฟเบอร์ของเหล็กเดี่ยว	94

รูปที่ 7.46 ความเค้นสูงสุดเทียบกับจำนวนไฟเบอร์	95
รูปที่ 7.47 ความเครียดสูงสุดเทียบกับจำนวนไฟเบอร์	96
รูปที่ 7.48 ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ 1	96
รูปที่ 7.49 ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ 2	97
รูปที่ 7.50 เปรียบเทียบความเค้นและความเครียด	98
รูปที่ 7.51 ผลแรงกับระยะการเคลื่อนตัวจากแบบจำลอง	98
รูปที่ 7.52 ความเค้นและความเครียดด้านรับแรงดึง	99
รูปที่ 7.53 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S12-60.....	100
รูปที่ 7.54 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S12-80.....	100
รูปที่ 7.55 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S16-60.....	101
รูปที่ 7.56 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S16-80.....	101
รูปที่ 7.57 ลักษณะการเสริมเหล็กในช่อง	102
รูปที่ 7.58 การเกิดช่องว่างระหว่างการทดสอบ	102
รูปที่ 7.59 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S12-60	103
รูปที่ 7.60 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S12-80	104
รูปที่ 7.61 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S16-60	104
รูปที่ 7.62 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S16-80	104
รูปที่ 7.63 สติฟเนสประสิทธิผลของแบบจำลองและการทดสอบของ S12-60.....	105
รูปที่ 7.64 สติฟเนสประสิทธิผลของแบบจำลองและการทดสอบของ S12-80.....	105
รูปที่ 7.65 สติฟเนสประสิทธิผลของแบบจำลองและการทดสอบของ S16-60.....	106
รูปที่ 7.66 สติฟเนสประสิทธิผลของแบบจำลองและการทดสอบของ S16-80.....	106

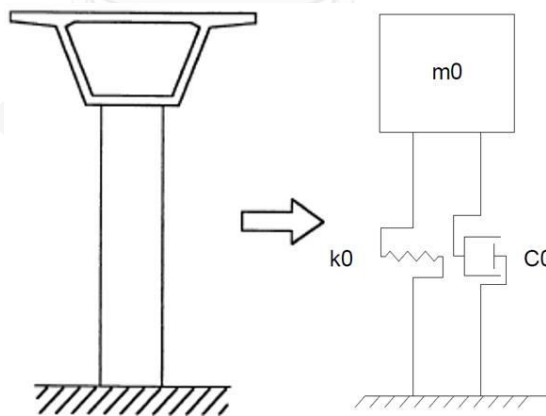


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

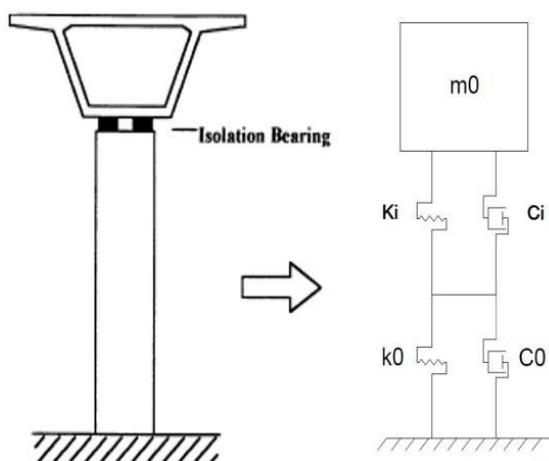
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสิ่งก่อสร้างทั้งอาคารและสะพานได้ถูกสร้างขึ้นใหม่อย่างมากมายและอีกทั้งยังได้ตระหนักถึงความปลอดภัยให้กับโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแผ่นดินไหวเป็นอีกเหตุการณ์ที่วิศวกรให้ความสำคัญในการออกแบบและหาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับโครงสร้างอยู่เสมอ เพื่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแรงจากแผ่นดินไหว เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของโครงสร้าง ลดรอยร้าวหรือความเสียหายที่รุนแรงจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นได้กับโครงสร้าง เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการซ่อมแซมหลังการเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมในการก่อสร้าง อีกทั้งยังได้มีวิธีการที่เสริมอุปกรณ์ต่างๆ ให้กับโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโครงสร้าง และสะพานเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีความสำคัญของระบบคมนาคม เป็นจุดเชื่อมต่อในการขนส่งต่างๆ สะพานจึงมีความสำคัญมากในการเดินทางเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งหากเกิดแผ่นดินไหวสะพานจึงควรที่จะยังคงใช้งานได้โดยที่ยังไม่ได้เกิดความเสียหายที่รุนแรง ซึ่งในการออกแบบและก่อสร้างสะพานในปัจจุบันนั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และได้มีการเสริมอุปกรณ์ที่ช่วยให้สะพานมีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้มากขึ้น เนื่องจากสะพานส่วนมากมีช่วงความยาวที่มากและมีความสามารถในการสลายพลังงานต่ำและมีคาบธรรมชาติของระบบที่น้อย เมื่อเพิ่มอุปกรณ์ที่รองรับ (Bearing) จะทำหน้าที่รับแรงในแนวตั้งและทางด้านข้าง และจะเพิ่มคาบธรรมชาติของระบบของสะพาน



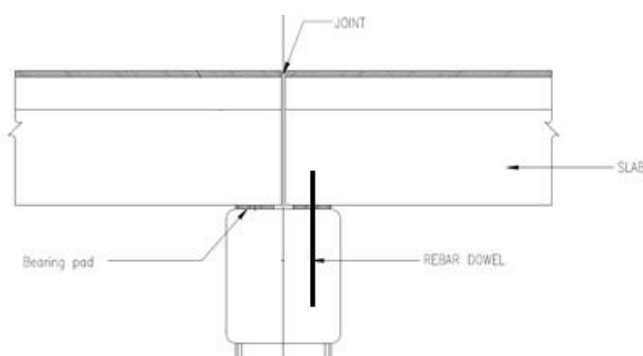
รูปที่ 1.1 แบบจำลอง Single degree of freedom

จากแบบจำลอง Single degree of freedom ได้จำลองให้อยู่ในรูปมวล (M_0) สติฟเนส (K_0) และความหน่วง (C_0) ซึ่งแบบจำลองนี้ยังไม่มีติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกฐาน ซึ่งสะพานในรูปแบบนี้มีคาบธรรมชาติของการสั่นที่สั้น มีความสามารถในการสลายพลังงานที่ต่ำ และโครงสร้างส่วนบนเคลื่อนตัวได้น้อย ซึ่งได้แสดงให้เห็นแบบจำลองในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.2 แบบจำลอง Single degree of freedom ที่มีการติดตั้งที่รองรับ (Bearing)

เมื่อทำการแยกฐานแล้วแสดงในรูปที่ 1.2 จะทำให้สติเฟเนสรวมของระบบที่มีการแยกฐานนั้นมีค่าน้อยลงกว่าสติเฟเนสของระบบที่ไม่มีการแยกฐานจึงส่งผลทำให้โครงสร้างที่มีการแยกฐานนั้นมีคาบธรรมชาติที่ยาวขึ้นกว่าระบบที่ไม่มีการแยกฐาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับเปลี่ยนคาบธรรมชาติของระบบสะพาน ส่งผลให้โครงสร้างส่วนบนของสะพานเกิดการเคลื่อนตัวได้มากขึ้น แต่หากเกิดการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดการเสียรูปที่มากเกินไปของที่รองรับหรือเมื่อเกิดการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปก็อาจจะส่งผลให้เกิดการกระทบกันของสะพานที่ตำแหน่งช่องว่างตรงรอยต่อของสะพานซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกฐานของสะพานนั้นก็มีการพัฒนารูปแบบของอุปกรณ์เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับลักษณะของสะพานที่แตกต่างกันออกไป และสะพานทางหลวงในประเทศไทยมีการเสริมเหล็กเดือยเพิ่มเข้าไปเพื่อช่วยในการรับแรงเฉือนของที่รองรับของสะพานแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งในส่วนนี้เป็นสิ่งที่ยังไม่มีการศึกษา เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของที่รองรับสะพานของกรมทางหลวงชนบท จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของที่รองรับสะพานแบบที่ใช้เหล็กเดือยเพื่อสามารถเป็นแนวทางในการนำไปใช้ออกแบบในสะพานได้อย่างเหมาะสมต่อไป



รูปที่ 1.3 รูปแบบของสะพานที่มีการใช้ที่รองรับชนิดยางอีลาสโตเมอร์คที่มีเหล็กเดือย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์คที่มียางหลายชั้น (Laminate Elastomeric Bearing) โดยพิจารณาความถี่และระยะเวลาเคลื่อนตัวที่ต่างกัน
- 2) เพื่อศึกษาเหล็กเดือย (Shear Dowel) ภายใต้แรงด้านข้าง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทดสอบตัวอย่างที่รองรับสะพานแบบอีลาสโตเมอร์คที่มียางหลายชั้น (Laminate Elastomeric Bearing) ทั้งหมด 3 ชุด โดยมีตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 6 ตัวอย่าง ภายใต้การทดสอบแบบวัฏจักรแบบ กลับไป – กลับมา
- 2) ทดสอบเหล็กเดือยขนาด DB12 SD40 และ DB16 SD40 ที่ระยะ Spacing 60 และ 80 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร กลับไป – กลับมา
- 3) วิเคราะห์ผลจากการทดสอบและเปรียบเทียบผล

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดเป็นพื้นฐานความรู้ เพื่อเป็นองค์ประกอบความรู้ในการทำงานวิจัย เช่นการทดสอบแผ่นยางรองรับสะพาน, ฮีสเทอรีซิสของที่รองรับ, การติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจวัดค่า , ชุดเครื่องมือในการทดสอบ, ลักษณะการให้แรงในการทดสอบ, ลักษณะการเสียรูปของที่รองรับ พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตและแนวทางในการวิจัย
- 2) ศึกษารายการประกอบแบบก่อสร้างสะพานของกรมทางหลวงชนบท
- 3) วางแผนและออกแบบจัดทำชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ
- 4) จัดหาของที่รองรับสะพานเพื่อที่จะนำไปทดสอบ
- 5) ประกอบติดตั้งชุดทดสอบตรวจสอบความผิดพลาดพร้อมทั้งแก้ไขชุดทดสอบ
- 6) ทดสอบที่รองรับสะพานและเหล็กเดือย
- 6) วิเคราะห์และประเมินผลที่ได้จากการทดสอบ
- 7) จัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์คที่มียางหลายชั้นในสะพาน โดยการจำลองการทดสอบให้เหมือนจริง
- 2) เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการรับแรงทางด้านข้างของเหล็กเดือย
- 2) เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของที่รองรับและผลที่เกิดจากลักษณะการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันของยาง
- 4) เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการนำไปศึกษาค้นคว้าเพื่อพัฒนารูปแบบของที่รองรับสะพานเพื่อใช้ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวในอนาคตต่อไป

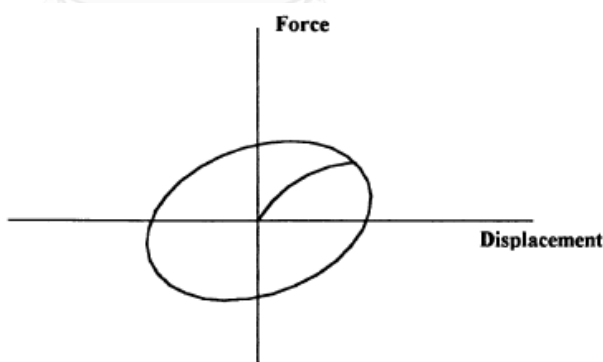
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผลงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับที่รองรับสะพาน

เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรง ทำให้เกิดพลังงานจากแผ่นดินไหวเข้าสู่ในโครงสร้างที่สามารถทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายหรือพังได้ เพื่อให้โครงสร้างยังคงอยู่ได้นั้น โครงสร้างจะมีการกระจายพลังงานผ่านในรูปแบบกลไกการสลายพลังงานตามธรรมชาติหรือโครงสร้างนั้นเสียรูปมากเกินไปจนถึงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่นของโครงสร้าง ซึ่งยิ่งรุนแรงมากสำหรับโครงสร้างสะพาน เพราะสะพานส่วนมากเป็นสะพานแบบช่วงยาว และมีการสลายพลังงานตามธรรมชาติที่ต่ำ เมื่อโครงสร้างสะพานได้รับพลังงานจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรง จะสามารถเกิดการเสียรูปที่มากเกินไปเมื่ออาศัยเพียงแค่กลไกการสลายพลังงานตามธรรมชาติและการเสียรูปที่ไม่ยืดหยุ่น จะเป็นสาเหตุที่นำไปสู่ความเสียหายที่มากหรือพังได้ และด้วยสาเหตุนี้การควบคุมการตอบสนองต่อการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหวจึงนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการต้านแรงแผ่นดินไหวโดยอุปกรณ์เสริมเพื่อกระจายพลังงาน

ซึ่งเมื่อเพิ่มอุปกรณ์ในการกระจายพลังงาน เป็นการสร้างแรงที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันของระยะทางหรือความเร็วของระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกของการกระจายพลังงาน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงรูปแบบวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ของอุปกรณ์สลายพลังงานจากการสั่นแบบทั่วไปได้ดังรูปภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) พื้นฐานของอุปกรณ์แยกการสั่น

(W.K. Chen and L. Duan 2003)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกการสั่นและกระจายพลังงานของสะพาน

ที่รองรับ (Bearing) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ระหว่างโครงสร้างสะพานส่วนบนและโครงสร้างสะพานส่วนล่าง โดยมีหน้าที่หลัก 2 ประการคือ 1) เพื่อถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ลงสู่โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) และ 2) เพื่อปรับสมดุลการเคลื่อนที่ของโครงสร้างสะพานส่วนบนและส่วนล่าง ซึ่งแรงที่กระทำต่อที่รองรับ เช่น น้ำหนักของตัวสะพาน น้ำหนักจากการจราจร

แรงลม แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว และอื่นๆ การเคลื่อนที่ของที่รองรับนั้นมีทั้งการเคลื่อนตัว (Translation) และการหมุน (rotation)

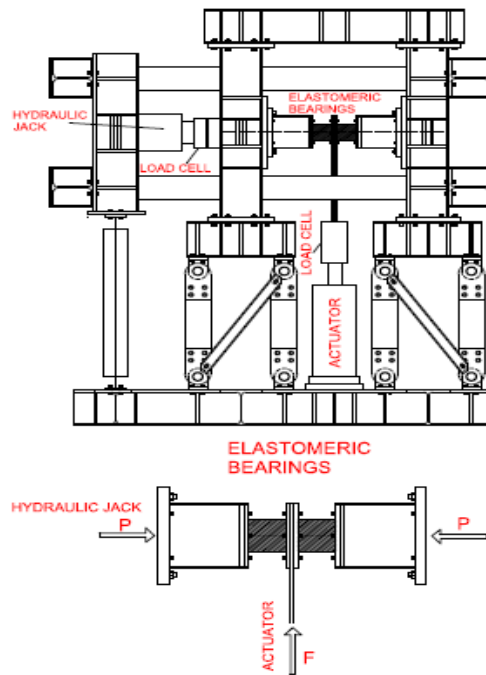
ที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์ค (Elastomeric Bearing) ซึ่งเป็นที่รองรับสะพานที่ถูกทำขึ้นด้วยยางมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ลักษณะในการใช้งานโดยใช้ในการติดตั้งบนเสา ตอม่อและตอม่อริม เพื่อรับแรงในแนวตั้งและเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกแรงที่เกิดขึ้นจากแรงทางด้านข้างซึ่งจะมีความแน่นเมื่อรับแรงในแนวตั้งและความยืดหยุ่นเมื่อรับแรงด้านข้าง มีหนึ่งสาเหตุที่พบคือเมื่อใช้ที่รองรับชนิด อีลาสโตเมอร์คเพียงอย่างเดียวเมื่อเกิดเหตุการณ์จากแผ่นดินไหวมักจะเกิดความเสียหายมากกับที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์ค ทำให้สูญเสียเสถียรภาพของตัวที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์คและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างส่วนบนได้ จึงได้มีการเสริมอุปกรณ์ที่ช่วยกระจายพลังงานคือการเพิ่มแผ่นเหล็กเข้าไปสลับกับยางเพื่อให้มีสติเฟสในการการรับแรงในแนวตั้งและเพื่อกระจายแรงจากแผ่นดินไหวและพัฒนาความสามารถในการรับแรงด้านข้างและมีพฤติกรรมที่เป็นแบบ ยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic – Plastic)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกการสั่นและกระจายพลังงานคุณสมบัติที่ใช้ในการออกแบบนั้นได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติและอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งการทดสอบของอุปกรณ์แยกการสั่นหรืออุปกรณ์กระจายพลังงานต้องการ การทดสอบแบบสถิตศาสตร์ (Static Test) หรือแบบวัฏจักร (Cyclic Test) เท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติที่ดีนั้นจะต้องได้มาจากการทดสอบที่มีความเทียบเคียงพฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวจริงๆ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบที่รับรองสะพาน

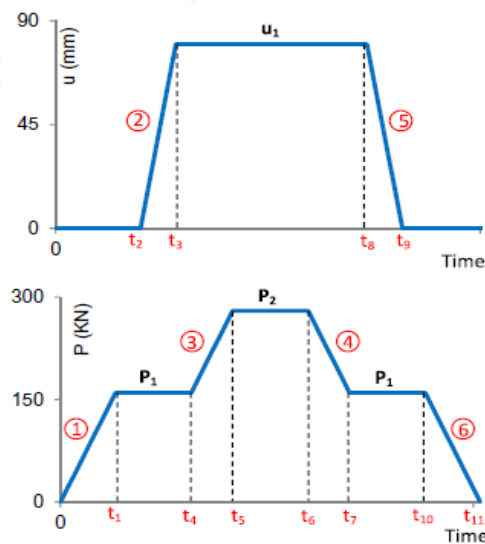
(Cardone .D and Perrone .G 2012) ได้ทำการทดสอบที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์ค ทรงกระบอกเพื่อหาพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักวิกฤตเพื่อประเมินผลการทดลองที่แอมพลิจูดของความเครียดที่แตกต่างกันในช่วงโดยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 150 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นได้นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการทำนายจำนวนของกึ่งการทดลองและทฤษฎี ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นรองรับชนิดอีลาสโตเมอร์คทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. มีชั้นยางจำนวน 10 ชั้น แต่ละชั้นหนา 8 มม.

ชุดการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแกนเดียว อุปกรณ์ชุดทดสอบประกอบด้วยแรงตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบในทิศทางแนวนอนและแรงเฉือนที่มีระยะเคลื่อนตัวในทิศทางแนวตั้งแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งระยะการเฉือนในแนวตั้งถูกให้แรงมาจากเครื่องให้แรง (Actuator) ที่สามารถให้แรงกำลังสูงสุดที่ 250 กิโลนิวตันและมีระยะเคลื่อนตัวสูงสุด ± 125 มม. และแรงของเครื่องจะถูกตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ติดอยู่บนเครื่องให้แรงส่วนระยะเคลื่อนตัวจะถูกตรวจวัดและควบคุมโดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณภายใน และเครื่องให้แรงจะถูกเชื่อมต่อกับแผ่นเหล็กมายังตัวที่รองรับ ในส่วนแรงอัดแนวในนอนของที่รองรับจะถูกให้แรงซึ่งเก็บเป็นค่าคงที่ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งให้แรงโดยเครื่องไฮดรอลิกที่มีกำลังสูงสุดในการให้แรง 300 กิโลนิวตัน และแรงจากเครื่องจะมีระบบติดตามและตรวจวัดจากโพลดเซลล์ของกำลังที่แตกต่างกันติดอยู่บนตัวเครื่องให้แรง



รูปที่ 2.2 ชุดการทดสอบ (Cardone .D and Perrone .G 2012)

ระยะเวลาเลื่อนของตัวอย่างทดสอบจะถูกตรวจวัดจากอุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนตัว (Linear Transducer) 2 อันที่เชื่อมอยู่กับเหล็กรูปตัวที (T - Shaped) และระยะเคลื่อนตัวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบทั้งคู่จะถูกตรวจวัดจากวัดระยะการเคลื่อนตัว (Linear Transducer) ที่ตำแหน่งระหว่างมุมของแผ่นด้านนอกของทั้งสองตัวอย่างเพื่อที่จะประเมินการหมุนของตัวอย่างที่อยู่รอบแกนออกจากระนาบ



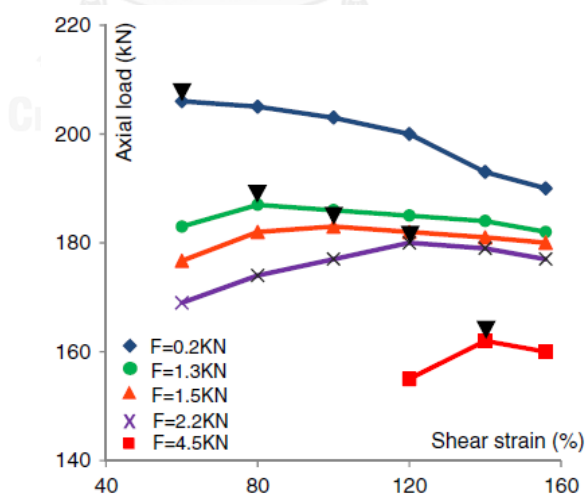
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทดสอบเสถียรภาพ (Cardone .D and Perrone .G 2012)

ขั้นตอนการทดสอบในทุกการทดสอบเสถียรภาพของยางจะทำการทดสอบกับที่รองรับพร้อมกันเป็นคู่ที่เหมือนกันที่ระดับการเสียรูปจากการเฉือนที่แตกต่างกัน และมีขั้นตอนในการทดสอบ 6 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 2.3 การให้แรงโดยขั้นตอนแรกคือให้แรงในแนวแกนเริ่มต้นที่ 150 กิโลนิวตัน เพื่อให้สอดคล้องกับความเค้นอัดที่ออกแบบ ขั้นตอนที่สองกำหนดเป้าหมายของระยะการเคลื่อนตัว (การเสียรูปจากการเฉือน) ขั้นตอนที่สามเพิ่มแรงในแนวแกนจนกระทั่งแรงในแนวด้านข้างติดลบ ขั้นตอนที่สี่ลดแรงเริ่มต้น 150 กิโลนิวตัน ขั้นตอนห้าลดระยะการเคลื่อนตัวจนเท่ากับศูนย์ และขั้นตอนที่หกลดแรงในแนวแกนจนเท่ากับศูนย์

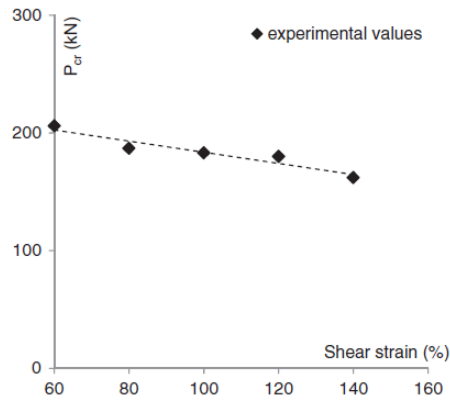
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดในการทดสอบเสถียรภาพของที่รองรับ (Cardone .D and Perrone .G 2012)

Test no.	u_1 (mm)	γ (%)	P_1 (kN)	P_2 (kN)	Step 1		Step 2		Step 3		Step 4		Step 5		Step 6
					t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	t_5 (s)	t_6 (s)	t_7 (s)	t_8 (s)	t_9 (s)	t_{10} (s)	t_{11} (s)
1	48	60	150	280	15	25	35	45	58	68	81	91	101	111	126
2	64	80	150	280	15	25	38	48	61	71	84	94	108	118	133
3	80	100	150	280	15	25	42	52	65	75	88	98	114	124	139
4	96	120	150	280	15	25	45	55	68	78	91	101	121	131	146
5	112	140	150	200	15	25	48	58	63	73	78	88	112	122	137
6	125	160	150	200	15	25	51	61	66	76	81	91	117	127	142

ซึ่งในการทดสอบเสถียรภาพของยางจะมีการเพิ่มระยะการเฉือนจาก 48 มม.ไปจนถึง 125 มม. ที่สอดคล้องกันกับค่าการเสียรูปจากการเฉือนเท่ากับ 60%, 80%, 100%, 120%, 140% และ 160%

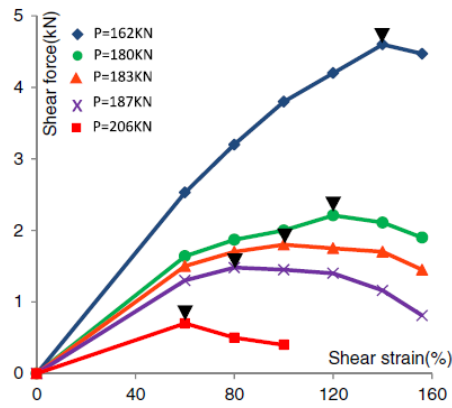


รูปที่ 2.4 แรงในแนวแกนเปรียบกับเส้นโค้งความเครียดเฉือนที่เป็นฟังก์ชันของแรงเฉือน (Cardone .D and Perrone .G 2012)



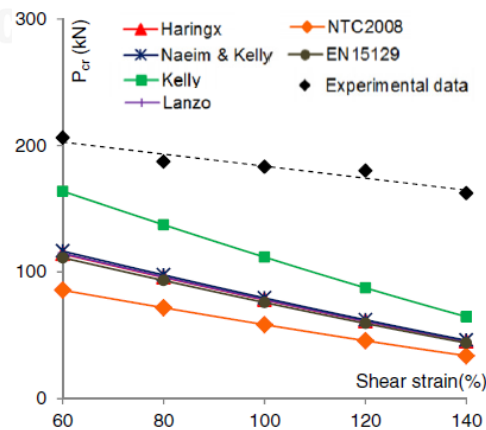
รูปที่ 2.5 แรงวิกฤตที่เป็นฟังก์ชันของแอมปริจูดความเครียดเฉือน

(Cardone .D and Perrone .G 2012)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนที่เป็นฟังก์ชันของแรงในแนวแกน

(Cardone .D and Perrone .G 2012)

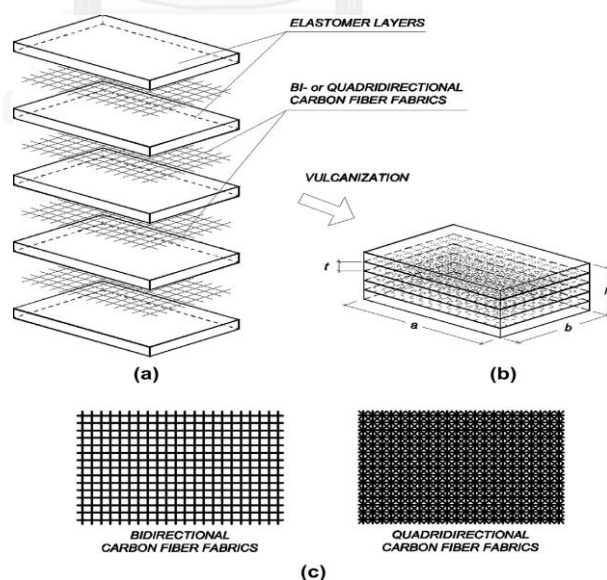


รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับแรงวิกฤตที่ได้จากทฤษฎีที่แตกต่างกัน

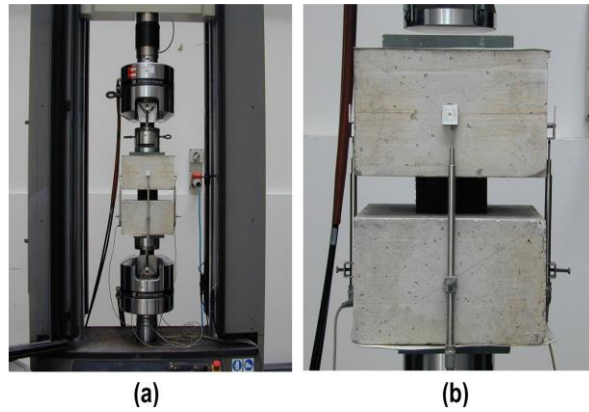
(Donatello Cardone และคณะ 2012)

พฤติกรรมที่ได้จากการทดสอบ ที่แอมพลิจูดของความเครียดที่ต่างกันจาก 50 % ถึง 160 % การทดสอบนี้เพื่อวัตถุประสงค์ที่เฉพาะเจาะจงของการหาผลกระทบของความเครียดเฉือนภายใต้ของแรงวิกฤตของที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์ทรงกระบอกที่ใช้เป็นตัวแยกการสั่นสะท้อนและประเมินวิธีออกแบบที่มีอยู่ ซึ่งในระหว่างการทดสอบระยะเคลื่อนตัวของการเฉือนของตัวอย่าง ที่เป็นค่าตามที่ได้ระบุไว้ ในขณะที่แรงในแนวแกนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแรงวิกฤตตามเงื่อนไขนั้นเกิดขึ้น สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้ที่รองรับได้พิจารณาให้อยู่ในสถานะวิกฤต (Critical State) เมื่อแรงด้านข้างกลายเป็นศูนย์หรือติดลบซึ่งน้ำหนักวิกฤตที่ได้รับการประเมินสำหรับแต่ละแอมพลิจูดความเครียด ซึ่งอยู่บนพื้นฐานเส้นสมมูลที่จากผลการทดสอบ พบว่าแรงวิกฤตนั้นลดลงด้วยความเครียดที่เพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 2.7 และการลดลงของสติฟเนสในแนวราบด้วยแรงในแนวแกนและระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น

(Russo .G et.al 2013) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมแรงเฉือนของที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์ที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตที่ง่ายในการอธิบายการเสีรูปของที่รองรับสะพานภายใต้แรงอัดและแรงเฉือนด้วยการสังเกตพฤติกรรมจากการทดลอง และเพื่อที่จะจำลองสติฟเนสทางด้านข้างเทียบเท่าของที่รองรับชนิดอีลาสโตเมอร์ที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ ในการทดสอบนั้นตัวอย่างจะถูกทดสอบภายใต้แรงอัดและการทดสอบแรงอัดที่มีการเฉือนร่วมด้วย ซึ่งการทดสอบแบบแรงอัดจะวัดค่าการเคลื่อนตัวแนวตั้งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบภายใต้ความเค้นอัด ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้ในระหว่างการทดสอบการเฉือน ในการทดสอบภายใต้แรงอัดที่มีการเฉือน หลังจากนั้นวิเคราะห์การเสีรูปของยางและความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสจริงทางด้านข้างของที่รองรับและองค์ประกอบของการเสีรูป

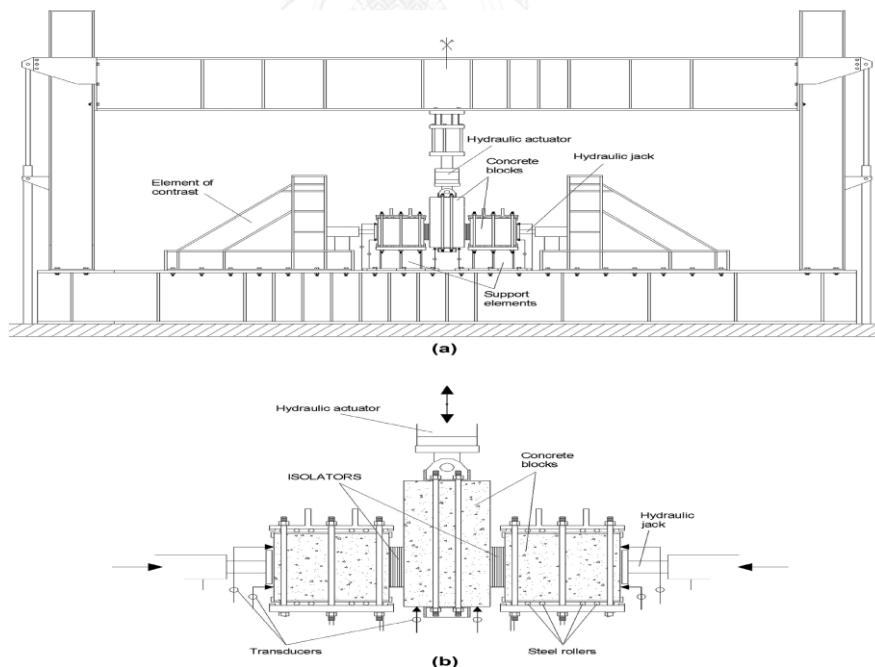


รูปที่ 2.8 ลักษณะของที่รองรับที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (Cardone .D and Perrone .G 2012)



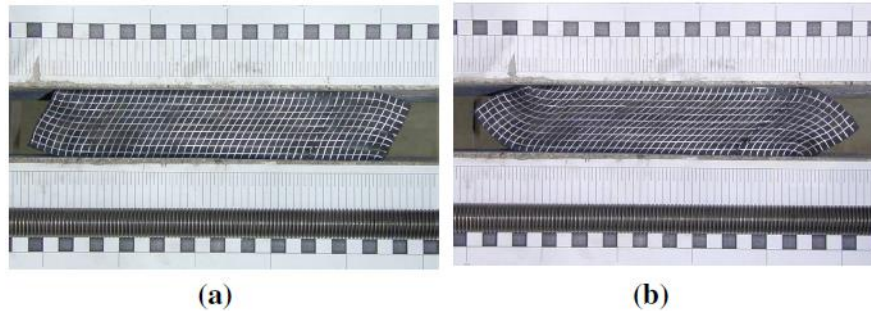
รูปที่ 2.9 การทดสอบแบบแรงอัด (a) ชุดการทดสอบ (b) เครื่องมือการวัด
(Russo .G et.al 2013)

การทดสอบแรงอัดแสดงในรูปที่ 2.9 เพื่อที่จะหาค่าสถิติเฟนสของกำลังอัดซึ่งมีตัวอย่างทดสอบอยู่ระหว่างก้อนคอนกรีตทั้งสองอันโดยที่แรงอัดจะมีอัตราการให้แรงอยู่ที่ 0.01 มม./วินาที ภายใต้การควบคุมระยะเคลื่อนตัวโดยเครื่องให้แรง โดยทุกตัวอย่างทดสอบจะมีการให้แรงและหยุดให้แรงทั้งหมดสามรอบ ซึ่งมีค่าแรงเค้นอัดสูงสุดอยู่ที่ 12 เมกกะปาสคาล สำหรับ 4 ตัวอย่างและ 8 เมกกะปาสคาล สำหรับอีก 4 ตัวอย่าง โดยมีการติดอุปกรณ์เพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของตัวอย่างทดสอบซึ่งติดตั้งอยู่ผิวด้านข้างของก้อนคอนกรีต ซึ่งคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยที่วัดได้

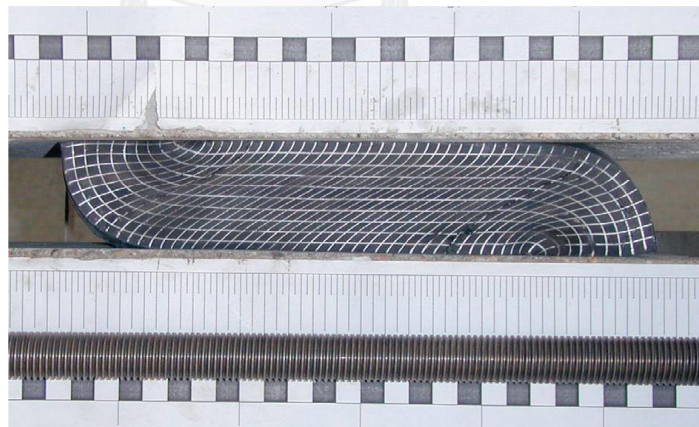


รูปที่ 2.10 การทดสอบการเหือน
(a) ชุดการทดสอบ (b) รายละเอียดต่างๆ (Russo .G et.al 2013)

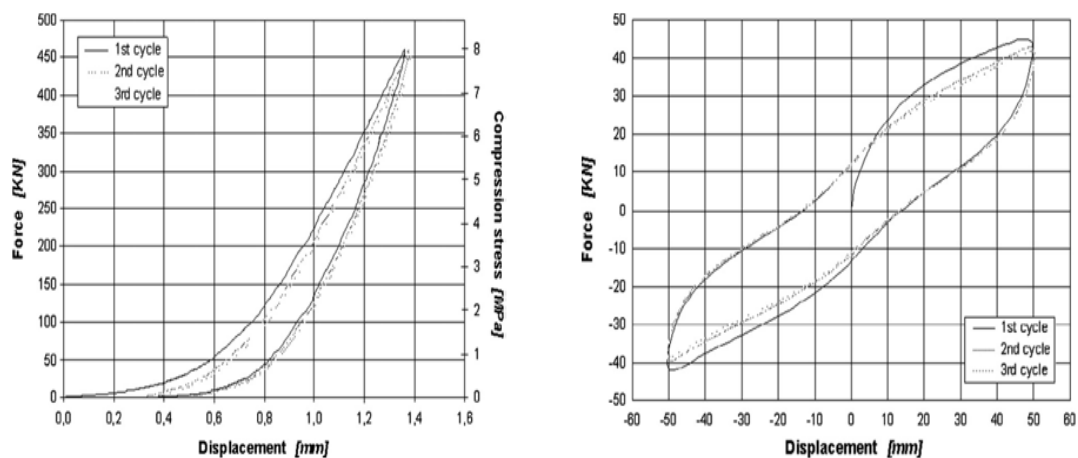
การทดสอบแรงเฉือนแสดงในรูปที่ 2.10 เพื่อหาค่าสติฟเนสในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ ได้นำตัวอย่างทดสอบมาติดตั้งอยู่ระหว่างคอนกรีตทั้งสามก้อนที่จำลองให้เป็นเหมือนโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่าง ซึ่งได้มีการให้แรงเค้นอัดในแนวตั้งของตัวอย่างทดสอบจากเครื่องให้แรงไฮดรอลิกทั้งสองเครื่องที่อยู่ด้านข้างผ่านก้อนคอนกรีตทั้งสองโดยมีการให้แรงคงที่เท่ากับ 6 เมกะปาสคาล ภายใต้การควบคุมน้ำหนัก ซึ่งเมื่อตัวอย่างทดสอบเกิดการบีบอัดจากก้อนคอนกรีตที่ให้แรงมาจากเครื่องให้แรงนั้นตัวก้อนคอนกรีตสามารถเคลื่อนตัวในแนวราบได้จากเหล็กเส้นที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวเลื่อนที่รองรับก้อนคอนกรีต และจะให้การเฉือนตัวอย่างทดสอบจากเครื่องให้แรงโดยการควบคุมการเคลื่อนตัวของเครื่องให้แรงในแนวตั้ง และมีอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว 4 อัน ติดตั้งอยู่แนวตั้งติดกับก้อนคอนกรีตที่อยู่ตรงกลางซึ่งติดอุปกรณ์บันทึกไว้ที่มุมละ 1 อันทุกมุมเพื่อวัดความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว สำหรับการทดสอบแรงเฉือน ใช้ค่าความเครียดเฉือนสูงสุด ซึ่งคำนวณเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ใช้และความหนาทั้งหมดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 2.11 การเสียรูปของที่รองรับภายใต้ความเครียดเฉือน (a) $d = 40\%te$ and (b) $d = 120\%te$. (Russo .G et.al 2013)



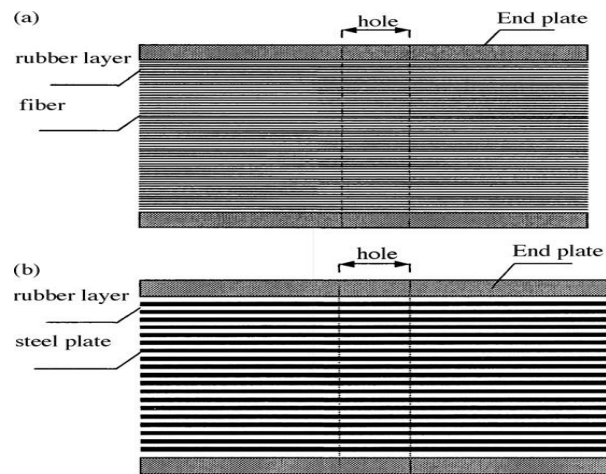
รูปที่ 2.12 การเสียรูปของที่รองรับภายใต้ความเครียดเฉือน $d = 200\%te$. (Russo .G et.al 2013)



รูปที่ 2.13 (ซ้าย) ผลจากการทดสอบแรงอัดของตัวอย่าง(ขวา)ผลจากการทดสอบการเฉือนของตัวอย่าง(Russo .G et.al 2013)

ผลการทดสอบแรงอัดพบว่าตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์มีสติฟเนสเริ่มต้นในแนวตั้งที่ต่ำและในการทดสอบแรงเฉือนพบว่าการลดลงของแรงต้านทานสูงสุดจากเส้นกราฟรอบแรกถึงรอบที่สามนั้น มีการลดลงที่มากในระหว่างรอบแรกกับรอบที่สอง และลดลงน้อยในระหว่างรอบที่สองกับรอบที่สาม โดยการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนถึงที่กำหนดสูงสุด พื้นที่ของผิวของที่รองรับที่ติดกับบล็อกคอนกรีตลดลงเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยของสติฟเนสในแนวราบลดลงด้วย การเสียรูปจากการเฉือนทำให้ค่าเฉลี่ยของสติฟเนสด้านข้างของที่รองรับเพิ่มขึ้นเมื่อการที่รูปร่างของการเสียรูปเพิ่มมากขึ้นและกระบวนการของรีเวอร์รอยที่เกิดขึ้นของที่รองรับทำให้ค่าเฉลี่ยของสติฟเนสด้านข้างเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนความหน่วงลดลงตัวอย่างที่เสริมด้วยผ้าคาร์บอนไฟเบอร์แบบสองทิศทางมีสติฟเนสในแนวอนที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่เสริมด้วยผ้าสี่ทิศทางและที่รองรับที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ที่ผลิตจากยางที่มีค่าความหนืดสูงมีค่าเฉลี่ยของอัตราความหนืดเทียบเคียงกับที่รองรับแบบที่เสริมแรงด้วยเหล็กและตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยผ้าไฟเบอร์4ทิศทางมีความแข็งแรงในแนวตั้งและกระจายพลังงานภายใต้แรงในแนวราบได้มากกว่าตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยผ้าไฟเบอร์ 2 ทิศทาง

(Ashkezarria .G .D et.al 2008) ได้ทำการทดสอบที่รองรับสะพานที่ใช้ในแยกการสั้นจากแผ่นดินไหวชนิดยางที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์และชนิดยางที่เสริมแรงด้วยเหล็กที่มีลักษณะทรงสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่2.14และรูปที่2.15 ภายใต้การทดสอบตัวอย่างแบบแรงอัดในแนวตั้งและแบบแรงเฉือนในแนวราบที่มีแรงอัดในแนวแกนร่วมด้วย เพื่อศึกษาพฤติกรรมจากการทดสอบตัวอย่างและเปรียบเทียบผลการทดสอบ ซึ่งจากผลการทดสอบที่เหมือนกันพบว่าที่รองรับสะพานชนิดยางที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์นั้นมีพฤติกรรมที่คล้ายกันกับตัวอย่างทดสอบแบบที่เสริมแรงด้วยเหล็ก ในด้านการเสียรูปจากการเฉือนรวมทั้งสติฟเนสในแนวตั้งและสติฟเนสประสิทธิภาพทางด้านข้างและการสลายพลังงาน



รูปที่ 2.14 แบบของตัวอย่างทดสอบ (a) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเหล็ก (Ashkezarria .G .D et.al 2008)



รูปที่ 2.15 แบบของตัวอย่างทดสอบ (a) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเหล็ก (Ashkezarria .G .D et.al 2008)

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Ashkezarria .G .D et.al 2008)

Specimen	Horizontal dimensions of isolator (mm × mm)	t_r (mm)	Horizontal dimensions of reinforcement layers (mm × mm)	n_r	$n_{f,s}$	t (mm)	$t_{f,s}$ (mm)	$t_{T \text{ and } B \text{ Plates}}$ (mm)	s
Fiber reinforced no. 1	150 × 150	41.5	145 × 145	16	15	2.59	0.25	9.8	14.46
Fiber reinforced no. 2	150 × 150	40.2	145 × 145	24	23	1.68	0.25	9.8	22.4
Fiber reinforced no. 3	150 × 150	44.3	145 × 145	47	46	0.94	0.25	9.8	39.8
Steel reinforced	150 × 150	43.7	145 × 145	16	15	2.73	1.0	9.8	13.75

t_r : total thickness of rubber in the isolator; n_r : number of rubber layers in the isolator; $n_{f,s}$: number of fiber or steel reinforcement layers in the isolator; t : thickness of each rubber layer in the isolator; $t_{f,s}$: thickness of each layer of fiber or steel reinforcement in the isolator; $t_{T \text{ and } B \text{ plates}}$: thickness of steel top and bottom end plates in the isolator; s : shape factor of elastomer layers in the isolator, i.e. the ratio of loaded area to force-free area.

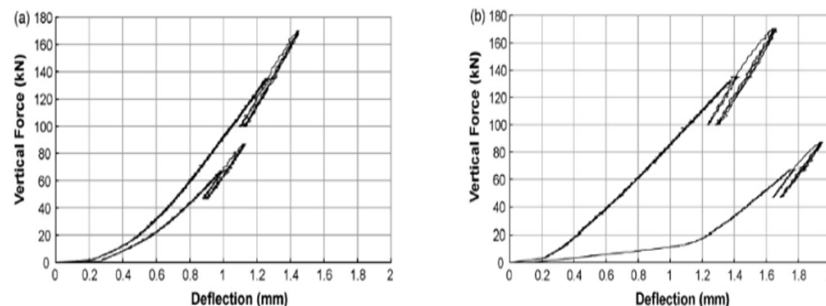
การทดสอบแรงอัดในแนวตั้งนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสตีเฟนในแนวตั้งและโมดูลัสการอัดที่มีประสิทธิภาพของตัวอย่างทดสอบซึ่งค่าจากการทดสอบแสดงในตารางที่ 2.3 และในการทดสอบในแนวตั้งจะมีการแรงอยู่ 2 ระดับที่แตกต่างกันเป็นแอมพลิจูด ΔP ที่แตกต่างกันซึ่งในแต่ละตัวอย่างทดสอบจะมีการให้แรงและหลังจากนั้นก็ให้แรงรวมทั้งหมด 3 รอบ ภายใต้การควบคุมแอมพลิจูดการเคลื่อนตัว ΔP ที่แตกต่างกัน ซึ่งผลจากการทดสอบแนวตั้งจะให้ความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งสังเกตได้จากกราฟว่าในการให้แรงและยกเลิกการให้แรงเส้นกราฟเกือบที่จะเป็นเส้นตรงและในรอบที่สองและสามของการทดสอบกราฟมีความเหมือนกัน

ตารางที่ 2.3 ค่าแรงการทดสอบในแนวตั้ง
(Ghasem Dehghani Ashkezari และคณะ 2007)

Test number	P (kN)	ΔP (kN)
1	67	± 20
2	135	± 35

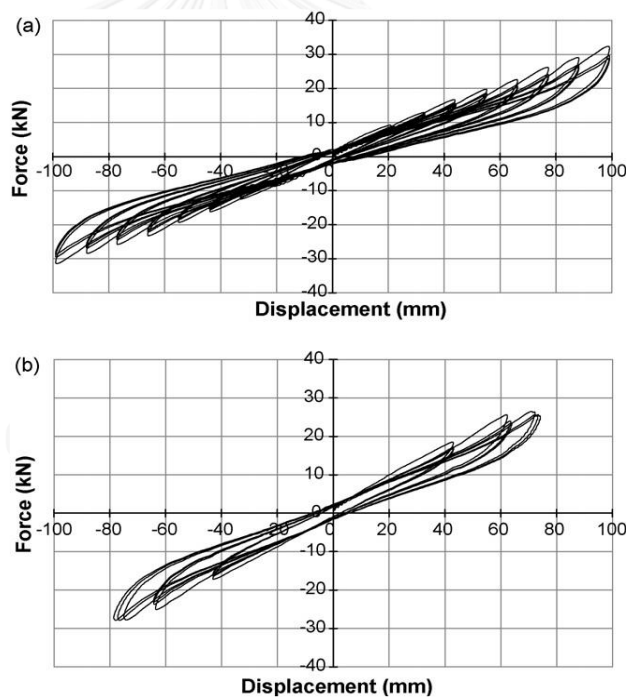


รูปที่ 2.16 ชุดการทดสอบ (Ashkezaria .G .D et.al 2008)

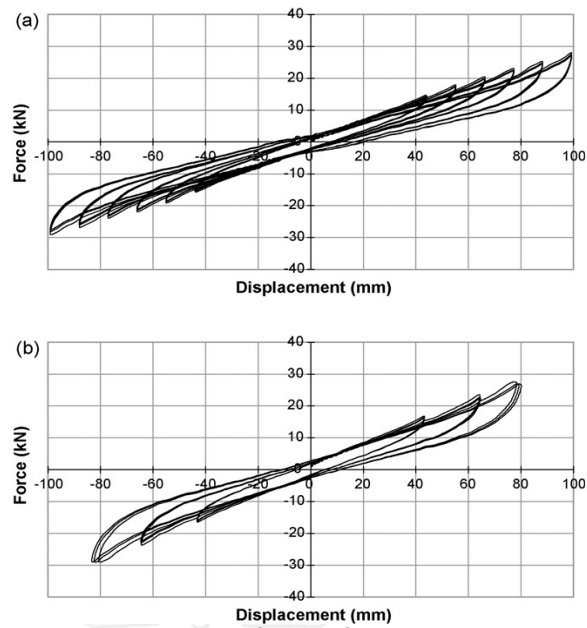


รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัว (a) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์
(b) ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเหล็ก (Ashkezaria .G .D et.al 2008)

การทดสอบในแนวราบหรือการทดสอบแรงเฉือนมีการให้แรงใน 2 ทิศทางคือในแนวตั้งจะใช้แรงคงที่และแนวราบจะมีการเคลื่อนตัวเพื่อให้แรงเฉือนกับตัวอย่างทดสอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมการเฉือนของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะมีการให้แรงมาจากเครื่องไฮดรอลิค 2 เครื่องที่ติดตั้งอยู่ในแนวราบและแนวตั้งของชุดการทดสอบ โดยเครื่องในแนวตั้งให้แรงได้สูงสุด 1000 กิโลนิวตัน และมีระยะเคลื่อนตัวได้สูงสุด ± 150 มิลลิเมตร และเครื่องให้แรงในแนวราบให้แรงได้สูงสุด 250 กิโลนิวตัน และมีระยะเคลื่อนตัวได้สูงสุด ± 150 มิลลิเมตรโดยทั้งสองเครื่องควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ขั้นตอนของการทดสอบในแนวราบหรือทดสอบแรงเฉือนได้ทดสอบทั้งตัวอย่างที่รองรับที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์และเสริมแรงด้วยเหล็กซึ่งถูกทดสอบภายใต้แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนที่แตกต่างกันที่มีค่า 50% ,75% ,100% ,125% ,150% และที่ 175% และมีบางตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ทดสอบไปถึง 200 % และ 225 % ในการทดสอบจะมีการทำซ้ำ 3 รอบสำหรับทุกๆแอมพลิจูดของความเครียดเฉือน และมีการให้แรงในแนวตั้งคงที่ซึ่งจะมีอยู่ 2 ระดับซึ่งในครั้งแรกคือ 67 กิโลนิวตันและในหนึ่งวินาทีที่เพิ่มแรงขึ้นเท่ากับ 135 กิโลนิวตัน ในการให้แรงในแนวตั้งก็เพื่อที่จะตรวจสอบผลกระทบของระดับแรงในแนวตั้งภายใต้การเฉือนด้านข้าง

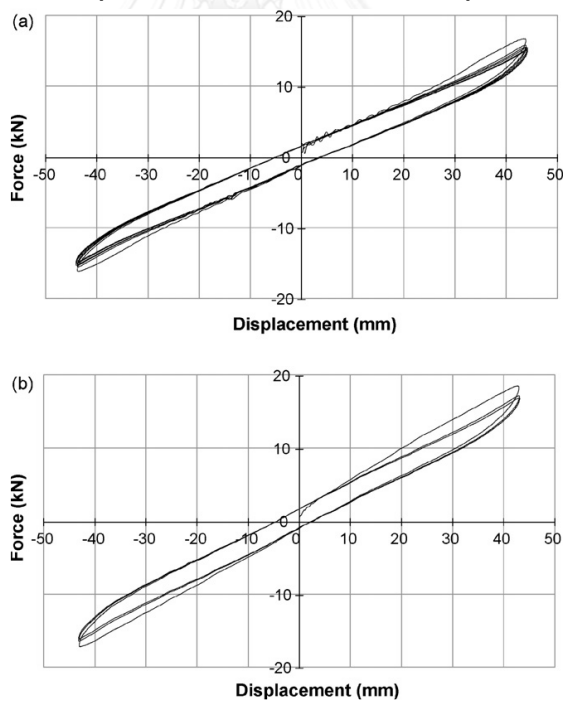


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวที่ทดสอบภายใต้แรงในแนวตั้ง 67 กิโลนิวตัน ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (a)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยเหล็ก (Ashkezaria .G .D et.al 2008)



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวที่ทดสอบภายใต้แรงในแนวตั้ง 135 กิโลนิวตัน (a)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (b)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมแรงด้วยเหล็ก

(Ashkezaria .G .D et.al 2008)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและการเคลื่อนตัวแบบวัฏจักรสำหรับแอมพลิฟิเคชันของความเครียดเฉือน 100% ที่แรงอัดในแนวตั้งคงที่ 67 กิโลนิวตัน (a)ตัวอย่างทดสอบที่เสริมไฟเบอร์ (b)ตัวอย่างทดสอบ

(Ashkezaria .G .D et.al 2008)

จากผลการทดสอบตัวอย่างในแนวดิ่งและการทดสอบแบบวัฏจักรในแนวนอนพบว่าพฤติกรรมของที่รองรับที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์มีพฤติกรรมที่คล้ายกันมากกับที่รองรับแบบที่เสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กในด้านของสติฟเนสในแนวดิ่งและลักษณะของการเฉือนเช่น สติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้างและความหน่วง และการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวดิ่งแสดงในรูปที่ 2.18 และ รูปที่ 2.19 บนการทดสอบแบบวัฏจักรในแนวนอน แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสติฟเนสในแนวนอนหรือโมดูลัสของการเฉือนในช่วงของการให้แรงในแนวดิ่งมีค่าน้อยสำหรับทุกตัวอย่าง แต่แรงในแนวดิ่งมีผลกระทบต่อค่าของ Equivalent viscous damping ratio ของที่รองรับที่เสริมแรงด้วยไฟเบอร์และที่เสริมด้วยแผ่นเหล็ก

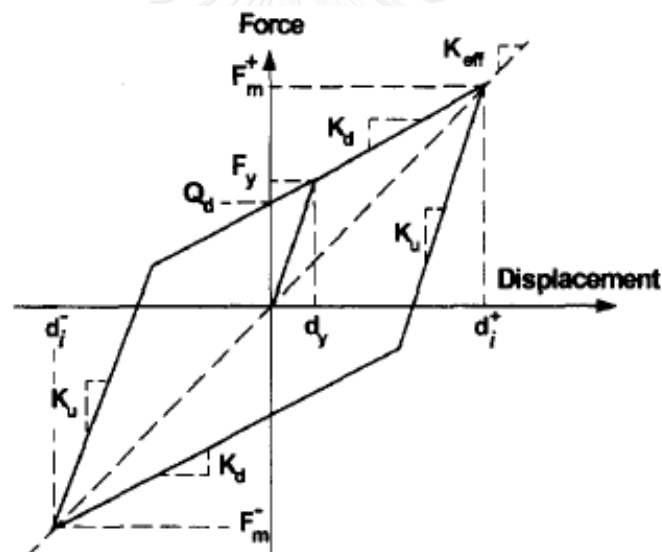
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของที่รองรับสะพาน

หลังจากการทดสอบตัวอย่างในการสร้างแบบจำลองซึ่งผลกระทบของที่รองรับได้รับการตอบสนองแบบพลศาสตร์ของโครงสร้าง ซึ่งวิธีที่ถูกต้องที่สุดในการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์สลายพลังงานคือวิธีวิเคราะห์แบบเชิงเส้นและวิธีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นร่วมกับประวัติเวลา เพื่อใช้สร้างพฤติกรรมที่ถูกต้องของอุปกรณ์กระจายพลังงาน และมักจะแสดงอยู่ในรูปของกลไกการสลายพลังงานที่มีประสิทธิภาพโดยแสดงเป็น Equivalent Damping ratio

(J. S. Hwang and J. M. Chiou 1996) ได้เสนอแบบจำลองเทียบเท่าเชิงเส้น(Equivalent linear model)ในการวิเคราะห์การสั่นของการแยกฐานสะพานที่มีการใช้ที่รองรับแบบยาง โดยเสนอแบบจำลองเทียบเท่าเชิงเส้นที่แก้ไขมาจากแบบจำลองเทียบเท่าเชิงเส้นของข้อกำหนด AASHTO และทำการเปรียบเทียบผลกับข้อกำหนดของ AASHTO, CALTRANS, JPWRI และ NZMWD ในซึ่งสเปกตรัมการเคลื่อนตัวที่ไม่ยึดหยุ่นร่วมกับอัตราส่วนความเหนียวคงที่ของการสั่นจากแผ่นดินไหวสามารถประมาณค่าได้โดยสเปกตรัมเทียบเท่ายึดหยุ่นร่วมกับสติฟเนสประสิทธิผล(Effective Stiffness)และอัตราส่วนเทียบเท่าการสลายพลังงาน(Equivalent damping ratio) ซึ่งสติฟเนสประสิทธิผลและอัตราส่วนเทียบเท่าการสลายพลังงานของการแยกฐานโดยที่รองรับแบบยางได้มีการกำหนดให้ขึ้นอยู่กับสเปกตรัมการตอบสนองต่อการเคลื่อนตัวที่ไม่ยึดหยุ่นของการสั่นของแผ่นดินไหว 20 แบบ แสดงในรูปที่ 2.21

Year	Earthquake station	PGA (g)
1940	Imperial Valley, El Centro, Irrigation District, S00E	0.34
1949	Olympia, Washington Highway Test Laboratory, N86E	0.26
1952	Kern County, Taft, Lincoln School Tunnel, S69E	0.17
1954	Eureka, Eureka Federal Building, N79E	0.26
1966	Parkfield, Cholame, Shandon, California Array 2, N65E	0.49
1971	San Fernando, Pacoima Dam, S16E	1.17
1978	Miyagi-Ken-Oki, Sendai City, Kokutetsu Building, N90W	0.44
1979	Imperial Valley, El Centro Array SMA 2761, 92 Degree	0.24
1983	Coalinga, Cantua Creek School, 360 Degree	0.29
1987	Whittier-Narrows, Los Angeles, Obregon Park, 360 Degree	0.44
1987	Whittier-Narrows, Los Angeles, 116th St. School, 360 Degree	0.40
1987	Whittier-Narrows, Tarzana, Ceder Hill Nursery, 90 Degree	0.63
1989	Loma Prieta, Corralitos, Eureka Canyon Road, 360 Degree	0.62
1989	Loma Prieta, Oakland, Two-Story Office Building, 290 Degree	0.24
1994	Northridge, Castaic, Old Ridge Route, 90 Degree	0.59
1994	Northridge, Newhall, LA County Fire Station, 360 Degree	0.61
1994	Northridge, Pcoima, Kagel Canyon, 360 Degree	0.44
1994	Northridge, Santa Monica, City Hall Grounds, 90 Degree	0.90
1994	Northridge Sylmar County Hospital Parking Lot, 90 Degree	0.61
1994	Northridge, Los Angeles, USC Hospital Grounds, 5 Degree	0.49

รูปที่ 2.21 ค่าการเคลื่อนตัวของแรงแผ่นดินไหว (J. S. Hwang and J. M. Chiou 1996)



รูปที่ 2.22 แบบจำลอง Bi-linear ของที่ยางที่รองรับสะพาน

(J. S. Hwang and J. M. Chiou 1996)

แบบจำลองเทียบเท่าเชิงเส้นในข้อกำหนดต่างๆของการแยกฐานประกอบด้วยสติฟเนสประสิทธิภาพ และอัตราส่วนเทียบเท่าการสลายพลังงานของที่รองรับในข้อกำหนดคู่มือการแยกฐานของ AASHTO ให้อุดมคติของแบบจำลอง Bi-linear ที่จะอธิบายพฤติกรรมของฮิสเทอรีซิสของการแยกแสดงในรูปที่ 2.22 สำหรับที่รองรับสะพานซึ่งสติฟเนสประสิทธิภาพและอัตราส่วนการสลายพลังงานเทียบเท่าจะแสดงได้ดังนี้

$$K_{\text{eff}} = \frac{F_m^+ - F_m^-}{d_i^+ - d_i^-}$$

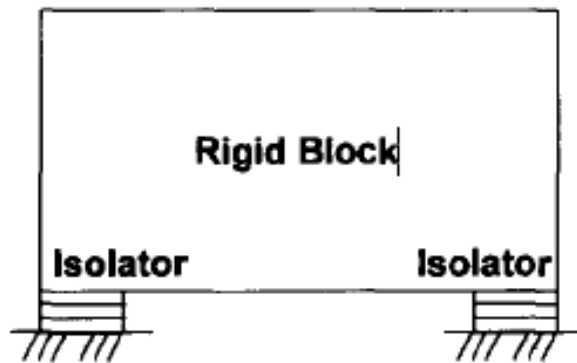
$$= \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} K_u$$

$$\xi_e = \frac{\text{area of hysteresis loop of an isolation unit}}{2\pi K_{\text{eff}} d_i^2}$$

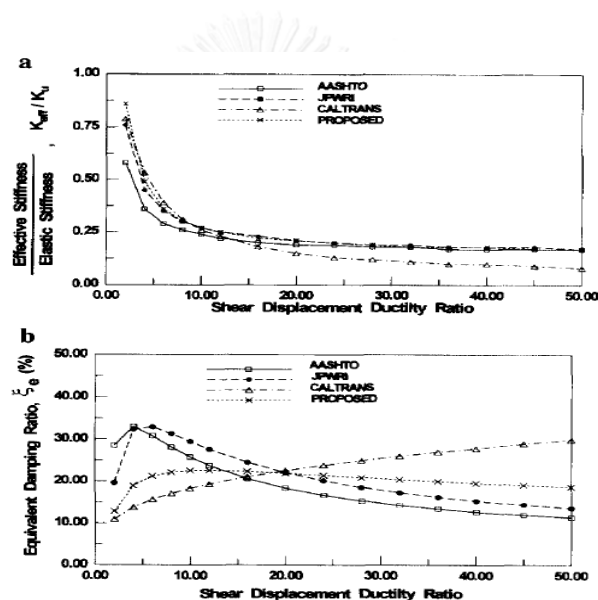
$$\xi_e = \frac{2Q_d[d_i - d_y]}{\pi K_{\text{eff}} d_i^2}$$

ซึ่ง μ คืออัตราส่วนความเหนียวของระยะเคลื่อนตัวของแรงเฉือนที่กำหนดเป็นการเคลื่อนตัวออกแบบ (d_i) ที่ได้มาจากระยะคราก (d_y) ของที่รองรับ ; α คืออัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของความเครียดของสติฟเนสที่ไม่ยืดหยุ่น (K_d) ถึงสติฟเนสยืดหยุ่น (K_u) อัตราส่วนการเพิ่มความเครียดของที่รองรับ และ F_m^+ และ F_m^- เป็นค่าสูงสุดและต่ำสุดของแรงเฉือนที่สอดคล้องกับค่าบวกและลบของระยะการเคลื่อนตัวที่ออกแบบ d_i^+

ซึ่งในแบบจำลองที่ได้ปรับปรุงนั้นได้ทำตามวิธีของ CALTRANS ซึ่งสเปกตรัมการเคลื่อนที่ไม่ยืดหยุ่นและอัตราส่วนความเหนียวคงที่จะสามารถประมาณได้จากสเปกตรัมระยะเคลื่อนตัวยืดหยุ่นและอัตราเทียบเท่าการสลายพลังงานซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของที่รองรับยาง และสเปกตรัมการเคลื่อนที่ของความเหนียวยืดหยุ่นคงที่ ของแบบจำลอง (Single degree of freedom system) แสดงในรูปที่ 2.23 เพื่อใช้คำนวณค่าแรงแผ่นดินไหวจากตารางในรูปที่ 2.21 ผลของสติฟเนสที่มีประสิทธิภาพและอัตราการสลายพลังงานที่ได้ทำนายมาจากข้อกำหนดของ ASSHTO, JPWRI, CALTRANS และจากแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้นำเสนอแสดงในรูปที่ 2.24 นั้นพบว่าในช่วง อัตราส่วนความเหนียวที่ต่ำนั้นแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอได้ค่าที่ใกล้เคียงกับข้อกำหนดของ JPWRI และ CALTRANS ส่วนในช่วงของอัตราส่วนความเหนียวที่สูงนั้นแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้นำเสนอมีความใกล้เคียงกับข้อกำหนดของ AASTHO และ JPWRI



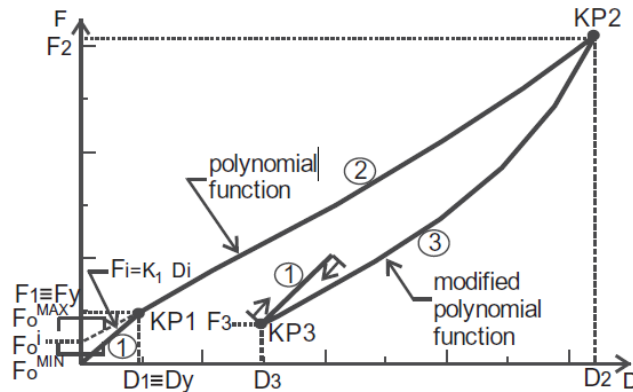
รูปที่ 2.23 รูปแบบ Single degree of freedom system ของแบบจำลองเทียบเท่าเชิงเส้นของ
ที่รองรับ (J. S. Hwang and J. M. Chiou 1996)



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบผลที่ได้จากข้อกำหนดการออกแบบต่างๆ (a) สติฟเนสประสิทธิภาพ
อัตราส่วนเทียบเท่าการสลายพลังงาน (J. S. Hwang and J. M. Chiou 1996)

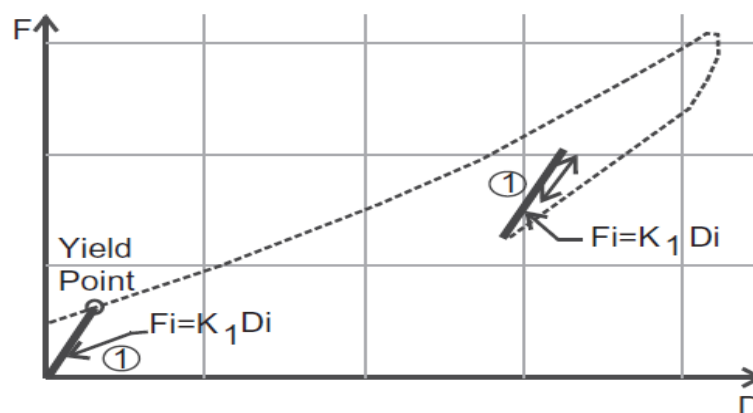
(Gjorgjiev .I and Garevskivv.M 2013) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองโพลีโนเมียล (Polynomial) ของที่รองรับสะพานจากการทดสอบตัวอย่าง ซึ่งได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวของที่รองรับสะพานที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันแบบโพลีโนเมียลและได้เพิ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแบบสองแกน ซึ่งแบบจำลองโพลีโนเมียลนั้นสามารถที่จะจำลองพฤติกรรมของที่รองรับชนิดยางในกรณีที่เกิดการเสีรูปน้อยและการเสีรูปที่มาก ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถครอบคลุมถึงการเสริมกำลังของยางในเงื่อนไขของการเสีรูปมาก รวมถึงผลกระทบจากประวัติการให้แรง โดยได้เปรียบเทียบระหว่างผลจากการวิเคราะห์และผล

จากการทดสอบ และพบว่าแบบจำลองโพลีโนเมียลมีความสามารถเพียงพอที่จะจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวของที่รองรับได้



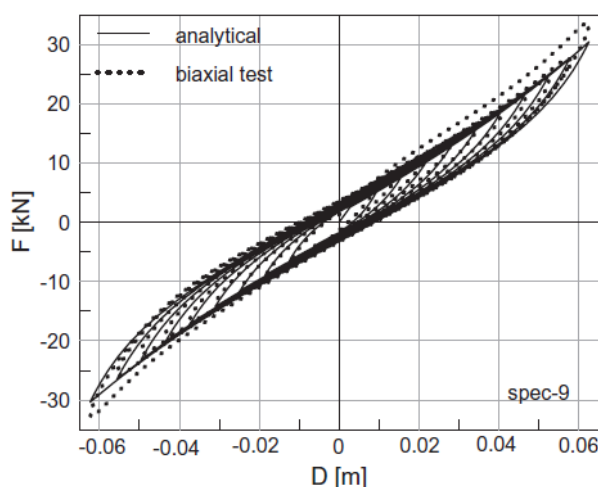
รูปที่ 2.25 แบบจำลองโพลีโนเมียลของที่รองรับชนิดยาง
(Gjorgjiev .I and Garevskiv.M 2013)

โดยทดสอบตัวอย่างที่รองรับสะพานชนิดยาง 18 แบบที่แตกต่างกันโดยทำการทดสอบตัวอย่างที่รองรับทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งหมด 10 ตัวอย่าง บนการทดสอบแบบในแนวแกน และทดสอบที่รองรับทรงกระบอก 2 ตัวอย่าง บนการทดสอบแบบสองแกนและใช้แบบจำลองโพลีโนเมียลเพื่ออธิบายพฤติกรรมของที่รองรับยางโดยที่แบบจำลองประกอบด้วยพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear – Elastic) และพฤติกรรมยืดหยุ่นช่วงหลัง (Post –Elastic) ในช่วงที่มีการให้แรงและพฤติกรรมยืดหยุ่นช่วงหลังในช่วงที่ไม่มีการให้แรงดังรูป ก ในช่วงที่สภาวะยืดหยุ่นเชิงเส้นรวมถึงพฤติกรรมยืดหยุ่นของยางที่ช่วงความเครียดต่ำ ($F = k_1 D$) ซึ่งสภาวะยืดหยุ่นเชิงเส้นของแบบจำลองนี้เกิดขึ้นที่จุดเริ่มต้นของการให้แรงของที่รองรับและที่ตำแหน่งจุดเปลี่ยนแปลงจากการยกเลิกให้แรงเข้าสู่เงื่อนไขของการให้แรง ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.26 ช่วงยืดหยุ่น-เชิงเส้น ที่ตำแหน่งเริ่มให้แรงและที่ตำแหน่งจุดเปลี่ยนแปลงจากการยกเลิกให้แรง (Igor Gjorgjiev 2013)

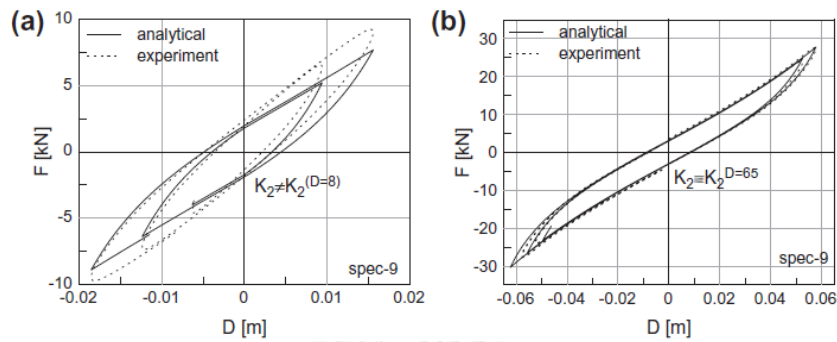
การใส่พารามิเตอร์สำหรับสภาวะช่วงยืดหยุ่น-เชิงเส้น คือ สติฟเนสที่ยืดหยุ่นของที่รองรับ K_1 และการเสียรูปแบบการคราก และสภาวะยืดหยุ่นช่วงหลังที่ให้แรงรวมทั้งพฤติกรรมของที่รองรับ หลังจากจุดที่เกิดการคราก เมื่อเกินจุดครากไปแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวได้ถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียล



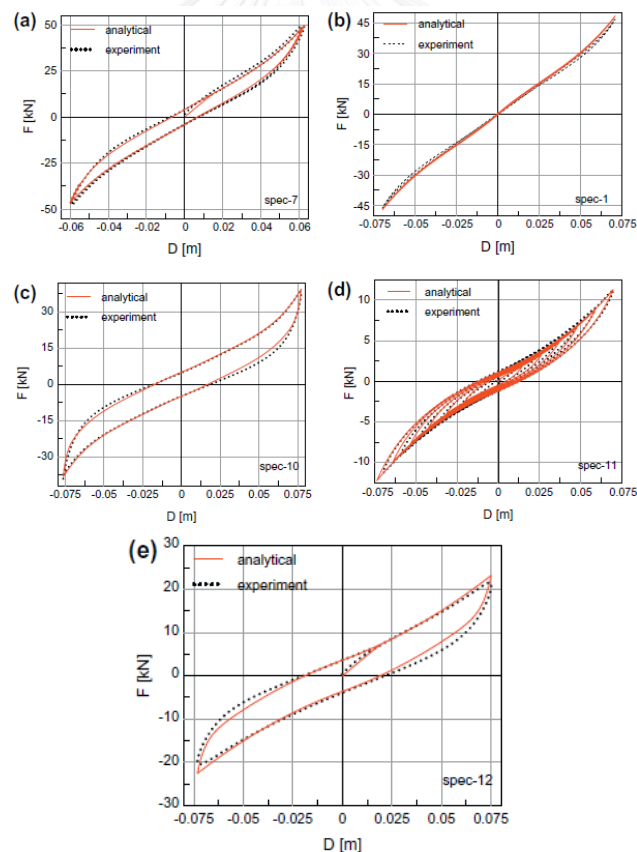
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวของที่รองรับสะพานที่ได้จากการวิเคราะห์ และการทดสอบ (Igor Gjorgjiev 2013)

การตรวจสอบแบบจำลองเพื่อที่จะพิสูจน์เสถียรภาพของแบบจำลองในความเครียดที่แตกต่างกัน ซึ่งมีสามส่วนที่ได้ตรวจสอบคือ ช่วงยืดหยุ่น , ช่วงยืดหยุ่นช่วงหลัง ที่มีการให้แรง และ การยืดหยุ่นช่วงหลัง ที่ไม่มีการให้แรง ซึ่งค่าของแรงกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลองโพลีโนเมียลได้ทำการเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบตัวอย่างจริง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแบบสองแกนได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างที่รองรับแบบทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลมที่มีการใช้ส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ในการให้แรงในทิศทางแนวราบของที่รองรับข้างพร้อมทั้งมีการให้แรงแบบ Harmonics เป็นค่าคงที่ทั้งคู่ และมีการเพิ่มแอมพลิจูด จากรูปที่ 2.29 แบบจำลองการวิเคราะห์สำหรับที่ที่รองรับที่มีชั้นยางที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว รูปที่ 2.29 (a) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของยางโดยที่ไม่มีตัวหน่วง และรูปที่ 2.29 (b-e) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพฤติกรรมเมื่อมีส่วนประกอบของตัวหน่วงภายใน และจากผลการทดสอบตัวอย่างสรุปได้ว่าพฤติกรรมของที่รองรับสะพานเป็นแบบ Bi-linear จนกระทั่งความเครียดเฉือนระดับปานกลาง ที่ช่วงความเครียดเฉือนที่สูงนั้นที่รองรับมีพฤติกรรมในช่วงที่ไม่เป็นเส้นตรงและมีลักษณะที่สติฟเนสเพิ่มขึ้นและจากการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างและผลการทดสอบพบว่า

แบบจำลองโพลีโนเมียลมีความยืดหยุ่นที่จะนำมาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่รองรับสะพานและรูปแบบการวิเคราะห์สามารถนำมาใช้แทนการวิเคราะห์แบบ Bi-linear ของที่รองรับสะพานสำหรับวัตถุประสงค์ของการจำลองที่ดีขึ้นของพฤติกรรมที่ไม่เป็นเส้นตรง ของยางที่รองรับสะพาน



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัวของ การทดสอบและจากการวิเคราะห์ (a) การเสียน้อย (b) การเสียรูปมาก (Igor Gjorgjiev 2013)



รูปที่ 2.29 การตรวจแบบจำลองการวิเคราะห์กับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบ (Igor Gjorgjiev 2013)

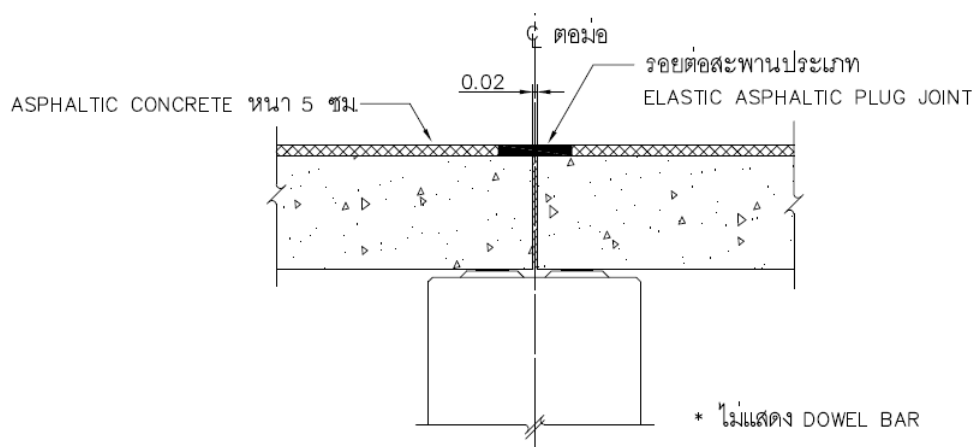
บทที่ 3

การศึกษาข้อมูลในการวิจัย

ในการขั้นตอนการวิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับที่รองรับสะพานเพื่อที่จะเลือกตัวอย่างทดสอบที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะทำการทดสอบแผ่นยางที่รองรับสะพานและเหล็กเดือย โดยทำการจำลองที่รองรับสะพานในชุดการทดสอบให้ได้พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของแผ่นยางและทดสอบเหล็กเดือยที่รับแรงทางด้านข้าง ซึ่งในการทดสอบยางรองสะพานจะให้ระยะการเคลื่อนตัวแบบวัฏจักร กลับไป – กลับมา แล้วนำผลมาวิเคราะห์พฤติกรรมเพื่อดูความสัมพันธ์ที่เกิดจากความถี่และระยะการเคลื่อนตัวที่ต่างกัน ซึ่งข้อมูลรายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

3.1 ศึกษารายละเอียดจากแบบก่อสร้างสะพาน

ที่รองรับ (Bearing) เป็นวัสดุที่อยู่ระหว่างโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างสะพานส่วนล่าง ซึ่งทำหน้าที่หลัก 2 ประการคือ 1) เพื่อถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure) ลงสู่โครงสร้างล่าง (Substructure) และ 2) ทำหน้าที่ปรับสมดุลการเคลื่อนตัวของโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง ซึ่งแรงที่กระทำต่อที่รองรับ เช่น น้ำหนักของตัวสะพาน น้ำหนักจากการจราจร แรงลม แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบของที่รองรับสะพานตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ได้แบ่งลักษณะของที่รับรองสะพานให้เหมาะสมตามช่วงความยาวและลักษณะของสะพานซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกสะพานที่มีช่วงความยาว 20 เมตรและมีที่รับรองสะพานเป็นแบบชนิดอีลาสโตเมอร์คที่มีหลายชั้น



รูปที่ 3.1 รูปแบบของการติดตั้งยางในสะพาน (กรมทางหลวงชนบท 2555)

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของ Laminated Elastomeric Bearing (กรมทางหลวงชนบท 2555)

คานรูปตัวไอ	L(มม.)	W(มม.)	T(มม.)	t(มม.)	จำนวนชั้นของ STEEL LAMINATED PLATE
คานรูปตัวไอช่วง 20 ม.	255	350	26	10	2
คานรูปตัวไอช่วง 25 ม.	255	385	36	10	3
คานรูปตัวไอช่วง 30 ม.	280	420	46	8	4
คานรูปตัวไอช่วง 35 ม.	280	455	56	8	5

จากแบบมาตรฐานในการก่อสร้างสะพานของกรมทางหลวงชนบทพบว่า ยางที่รองรับสะพานมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นตามช่วงสะพานที่ยาวขึ้น แสดงในตารางที่ 3.1 โดยนำมาเป็นข้อมูลที่พิจารณาในการเลือกขนาดเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ที่รองรับสะพาน

หลังจากศึกษารูปแบบของสะพานและลักษณะของแผ่นยางที่ตรงตามแบบของสะพาน ผู้วิจัยได้เลือกใช้ยางแบบอีลาสโตเมอร์คที่มีหลายชั้น (Laminate Elastomeric Bearing) ในการทดสอบ โดยในการทดสอบได้ใช้ที่รองรับที่มีขนาดด้านกว้างและยาวเท่ากัน โดยที่มีความหนาที่แตกต่างกัน เพื่อให้ครอบคลุมตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง มีรายละเอียดตามตารางที่ 3.2 และยาง โดยแผ่นยางรองสะพานที่ใช้ในการทดสอบมีชนิดยางเป็นแบบยางสังเคราะห์ Neoprene (Polychloroprene) Rubber ซึ่งมีค่าความแข็ง 60 ± 5 IRHD และมีค่ากำลังรับแรงดึงต่ำสุด 2,250 psi และมีค่าระยะยืดตัวเมื่อขาดร้อยละ 350 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ASSHTO 1996 ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของที่รองรับ

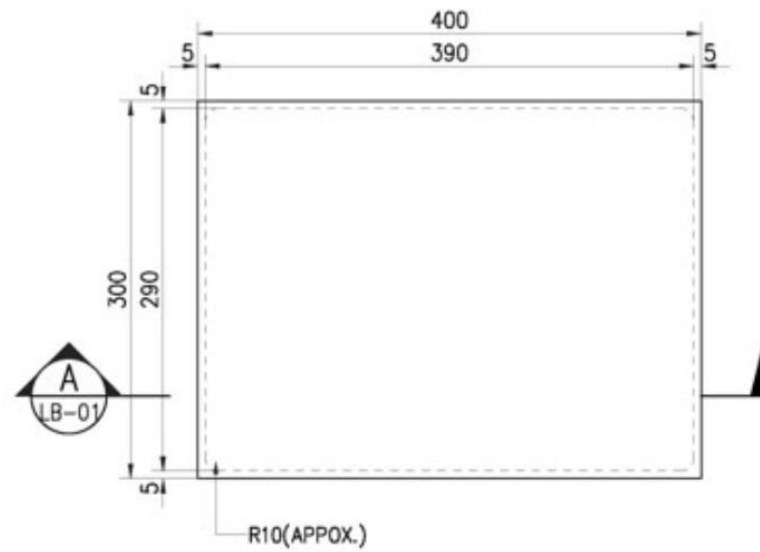
ขนาดของแผ่นยาง (กxยxส) (มม.)	จำนวนชั้นของ Steel laminated plate
300x400x40	4
300x400x60	6
300x400x80	6



รูปที่ 3.2 ที่รองรับแบบอีลาสโตเมอร์ค

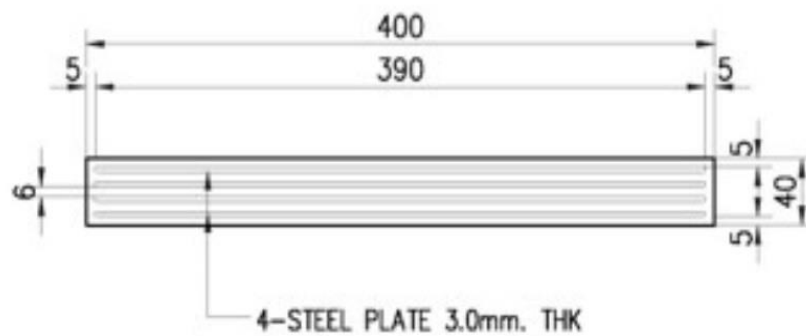
3.2.2 รายละเอียดยางรองสะพาน

ที่รองรับสะพานที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบที่มียางหลายชั้น(Laminated elastomeric bearing) แสดงในรูปที่ 3.2 ทำมาจากยางสังเคราะห์ Neoprene (Polychloroprene) Rubber ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ASSHTO 1996 โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง และมีขนาดความกว้าง x ความยาวเท่ากันทั้ง 3 ตัวอย่างทดสอบ มีขนาดเท่ากับ 300x400 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.3 โดยที่ยางที่รองรับสะพานมีความหนาที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 ขนาด คือ 40, 60, และ 80 มิลลิเมตร

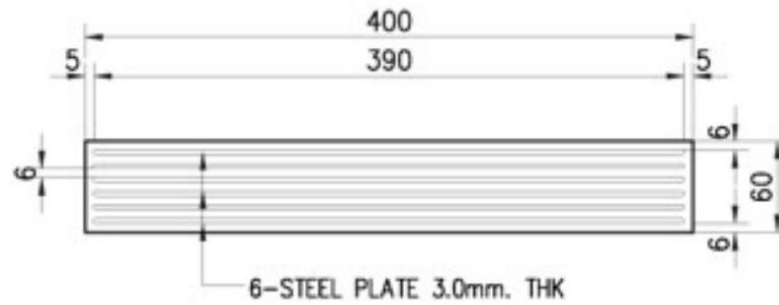


รูปที่ 3.3 ขนาดของที่รองรับความกว้าง x ความยาว

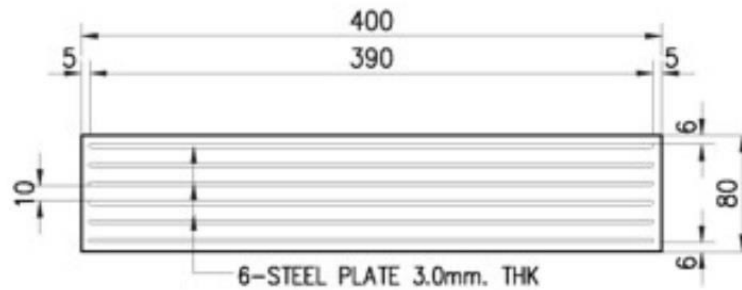
ซึ่งในยางตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีการเสริมแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ในทุกตัวอย่างทดสอบและมีความหนาของยางสลับกับแผ่นเหล็กเป็นชั้นๆ โดยตัวอย่างทดสอบที่มีความหนา 40 มิลลิเมตร มีการเสริมแผ่นเหล็กจำนวน 4 แผ่น และตัวอย่างทดสอบที่มีความหนา 60 และ 80 มิลลิเมตร มีแผ่นเหล็กจำนวน 6 แผ่น ซึ่งได้แสดงรายละเอียดในการเสริมแผ่นเหล็กในรูปภาพที่ 3.4, 3.5, 3.6 ตามลำดับ และคุณสมบัติเชิงกลของยางตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.4 รายละเอียดของที่รองรับขนาด 300x400x40 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 รายละเอียดของที่รองรับขนาด 300x400x60 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 รายละเอียดของที่รองรับขนาด 300x400x80 มิลลิเมตร

TEST	ASTM DESIGNATION	REQUIREMENT
PHYSICAL PROPERTIES		
HARDNESS (SHORE A DUROMETER)	D 2240	60±5
TENSILE STRENGTH, MINIMUM psi	D 412	2,250
ULTIMATE ELONGATION, MINIMUM %		350
HEAT RESISTANCE		
CHANGE IN DUROMETER HARDNESS, MAXIMUM POINTS	D 573 (70 HOURS AT 158°F)	15
CHANGE IN TENSILE STRENGTH, MAXIMUM %		-15
CHANGE IN ULTIMATE ELONGATION, MAXIMUM %		-40
COMPRESSION SET		
22 HOURS @ 212°F, MAXIMUM %	D 395 (METHOD B)	35
OZONE		
100 ppm ozone in air by volume, 20% strain 100°F±2°F	D 1149	NO CRACKS
100 hours mounting procedure D 518, PROCEDURE A		
ADHESION		
BOND MADE DURING VALCANIZATION, MINIMUM, kN/M	D 429 (METHOD B)	6.9

รูปที่ 3.7 คุณสมบัติเชิงกลของยาง

3.2.2 เหล็กเดี่ยว

เหล็กเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ เป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร ที่มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 ksc (กก./ตร.ซม.) ชั้นคุณภาพ SD 40 แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เหล็กเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 4

การจัดเตรียมอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบที่รองรับ

จากที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำชุดทดสอบยางที่รองรับสะพานแล้ว ในบทนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอรายละเอียดต่างๆของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบรวมทั้งขั้นตอนต่างๆของการติดตั้งชุดทดสอบในการทดสอบยางที่รองรับสะพาน การตรวจวัดค่า การตรวจเช็คชุดทดสอบก่อนทำการทดสอบจริง และรูปแบบของการให้แรงในการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

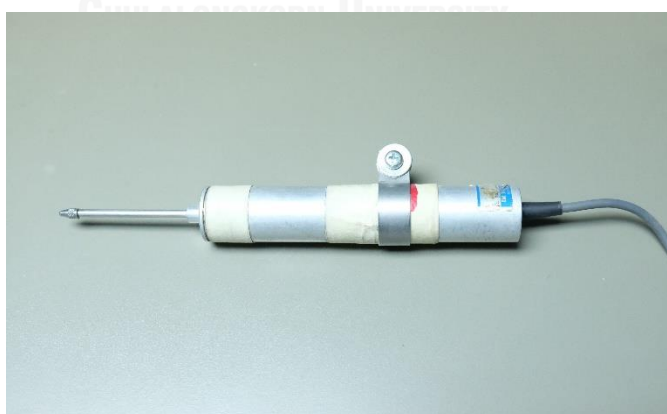
4.1 การจัดเตรียมชุดทดสอบที่รองรับ

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในตรวจวัดค่า

ในการทดสอบจะมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่างๆในระหว่างการทดสอบ เช่น อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนตัวและเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ เช่น เครื่องที่ให้ระยะในการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1) อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer)

อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนตัวหรือเซนเซอร์วัดระยะกระจัด (Displacement Transducer) คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าระยะกระจัด ระยะการเคลื่อนที่ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ ใช้งานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน เช่น การทดสอบระยะการยืดของชิ้นงาน การทดสอบระยะการเคลื่อนที่การเข้ารูปชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดระยะ

2) เครื่องบันทึก

ทำหน้าที่รับค่าที่บันทึกจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะการเคลื่อนตัว โดยเครื่องบันทึกจะมีหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าที่วัดได้ของสัญญาณและสามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำของเครื่องบันทึกนำมาเสนอบนหน้าจอ เพื่อให้ในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล สร้างรูปภาพ แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เครื่องบันทึก

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) แผ่นเหล็กประกบที่รองรับยางในการทดสอบ

ในการทดสอบที่รองรับสะพาน ผู้วิจัยได้จัดทำชุดทดสอบที่รองรับสะพานเพื่อให้เหมือนกับลักษณะจริงในการรับแรงของยางที่รองรับสะพาน โดยแผ่นยางที่รองรับสะพานจะถูกวางอยู่ระหว่างแผ่นเหล็กที่จัดทำขึ้น โดยมีการเทปูนด้านในเพื่อให้มีผิวสัมผัสใกล้เคียงกับคอนกรีตโดยจำลองเป็นเหมือนผิวของสะพานส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่างของสะพานที่สัมผัสกับยางที่รองรับทั้งสองด้านของยาง โดยแผ่นเหล็กมีลักษณะแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผ่นเหล็กประกบยางที่รองรับ

2) เครื่องให้แรงแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Actuator)

เครื่องทดสอบกระบอกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic Actuator) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้แรงกับตัวอย่างทดสอบ โดยที่สามารถเคลื่อน ยืด-หด ตัวกระบอกสูบเพื่อให้ระยะการเคลื่อนกับตัวอย่างทดสอบแบบกลับไปกลับมาได้ตามระยะเป้าหมายของการเคลื่อนตัวที่กำหนดได้ ซึ่งระยะการเคลื่อนตัวของแกนกระบอกสูบสามารถควบคุมได้จากโปรแกรมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ และที่ส่วนปลายของเครื่องมีอุปกรณ์เครื่องวัดแรง (Load cell) ที่สามารถตรวจวัดระยะการเคลื่อนตัวของเครื่องและแรงที่กระทำในระหว่างทดสอบได้ ซึ่งเครื่องทดสอบสามารถให้แรงกระทำได้สูงสุด 50 ตัน โดยมีระยะการยืดหดสูงสุดได้ 50 เซนติเมตร โดยทำหน้าที่เป็นการที่กระทำทางด้านข้างของยางรองสะพาน แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องให้แรงแบบไฮดรอลิก (Actuator)

3) แท่นไฮดรอลิกให้แรงอัดในแนวตั้ง

แท่นไฮดรอลิกสำหรับในแรงกระทำในแนวตั้งที่สามารถให้แรงอัดได้สูงสุด 100 ตัน แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แท่นไฮดรอลิกให้แรงอัดในแนวตั้ง

4.2 การติดตั้งชุดทดสอบที่รองรับและการตรวจวัด

4.2.1 การติดตั้งเครื่องทดสอบ

ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดสอบ เครื่องให้แรงทางด้านข้างจะยึดติดกับบล็อกคอนกรีตขนาดใหญ่ที่มีการยึดบล็อกคอนกรีตเข้ากับพื้นคอนกรีตอัดแรง (Strong floor) ด้วยเหล็กเส้นและมีการให้แรงดึงกับเหล็กเส้นด้วยเครื่องให้แรงดึง เพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างบล็อกคอนกรีตและพื้น ป้องกันการเคลื่อนตัวของบล็อกคอนกรีตในระหว่างการที่มีการให้ระยะการเคลื่อนตัวกับยางตัวอย่างที่ทดสอบแสดงในรูปที่ 4.6

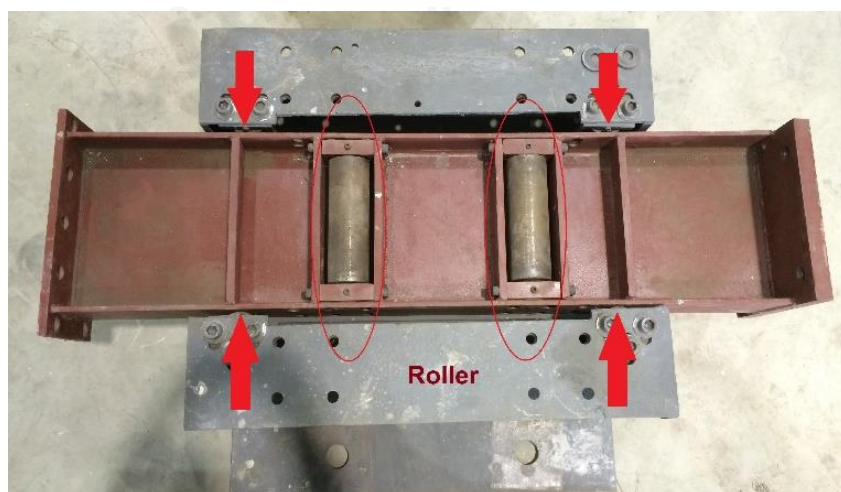


รูปที่ 4.6 บล็อกคอนกรีต

ส่วนปลายของเครื่องในแรงทางด้านข้าง จะยึดติดกับโครงเหล็กแบบล้อเลื่อน โดยมีทิศทางเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 4.7 และภายในโครงเหล็กแบบล้อเลื่อนจะมีการติดตั้งล้อเลื่อน (Roller) ทั้งด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และขวาของโครงเหล็กแบบล้อเลื่อนแสดงในรูปที่ 4.8 เพื่อให้การเคลื่อนตัวของเครื่องให้แรงทางด้านข้างเคลื่อนตัวอยู่ในระนาบที่ถูกต้องในระหว่างการทดสอบและโครงเหล็กแบบล้อเลื่อนจะยึดติดกับแผ่นเหล็กที่ประกบกับยางที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งภาพรวมของชุดทดสอบทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 โครงเหล็กแบบล้อเลื่อน



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งติดตั้งล้อเลื่อน



รูปที่ 4.9 ชุดทดสอบที่รองรับ

4.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า

ในขั้นตอนก่อนทำการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทดลองทำการทดสอบชุดทดสอบจริงกับตัวอย่างที่รองรับสะพานที่เตรียมไว้สำหรับตรวจเช็คเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของชุดทดสอบ ก่อนทำการทดสอบจริงและเพื่อทำการตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆ ว่ามีการเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งที่มีการติดตั้งไว้ในระหว่างการทดสอบหรือไม่ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระยะการเคลื่อนตัวทั้งหมดสองจุด โดยตำแหน่งแรกคือ ตำแหน่งหลังโครงสร้างเหล็กที่ยึดติดกับชุดประกบยางที่รองรับสะพาน แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งโครงสร้างเหล็กนี้ยึดติดกับแผ่นประกบยางที่รองรับสะพาน จะรับแรงในแนวราบที่กระทำมาจากเครื่องให้แรงทางด้านข้างที่กระทำกับที่รองรับสะพาน ซึ่งโครงสร้างเหล็กนี้ได้ทำการยึดติดกับพื้น (Strong floor) โดยยึดผ่านเหล็กเส้นที่ทำการให้แรงดึงด้วยเครื่องดึงเหล็กเพื่อให้เกิดแรงเสียดทานมากเพียงพอที่จะทำให้โครงเหล็กไม่เกิดการเคลื่อนตัวในระหว่างการทดสอบ โดยผลจากการตรวจสอบพบว่าไม่มีการเคลื่อนในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 4.10 ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเหล็กรับแรงในแนวราบ

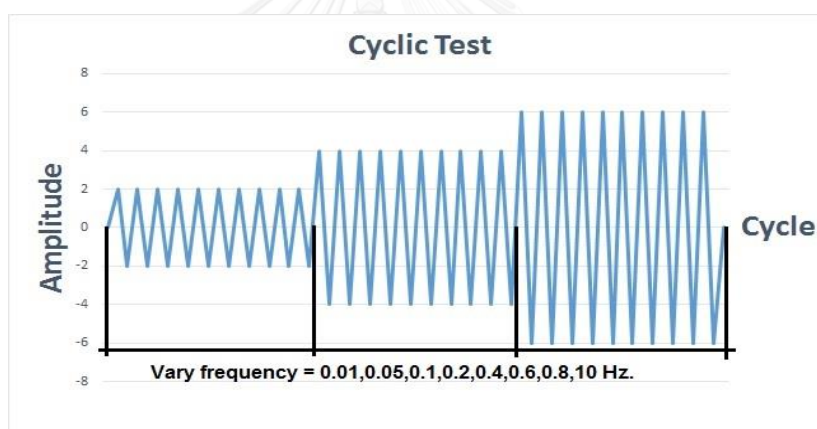
ตำแหน่งที่สองที่ทำการตรวจสอบคือตรวจสอบการเคลื่อนตัวของบล็อกคอนกรีต (Concrete wall) โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดระยะการเคลื่อนตัวดังรูปที่ 4.11 เพื่อทำการตรวจสอบการเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งที่ติดตั้ง โดยผลจากการตรวจสอบพบว่าการเคลื่อนตัวในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 4.11 ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของบล็อกคอนกรีต

4.3 รูปแบบการให้แรงในการทดสอบที่รองรับ

ในการทดสอบแผ่นยางที่รองรับสะพาน เป็นการทดสอบแบบวัฏจักร (Cyclic) กลับไป – กลับมา ในทิศทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบด้วยการควบคุมระยะการเคลื่อนตัว (Amplitude) ของยางด้วยเครื่องให้แรง (Actuator) โดยที่ยางที่ใช้ในการทดสอบทุกขนาดจะมีระยะเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด ซึ่งในการทดสอบจะมีการให้ระยะเคลื่อนตัวเริ่มต้นที่ 2 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นทีละ 2 มิลลิเมตรไปจนถึงจะระยะเคลื่อนตัวสูงสุดตามที่กำหนดแสดงในรูปที่ 4.12 โดยที่ในแต่ละการทดสอบของทุกค่าระยะการเคลื่อนตัว จะมีหลายค่าความถี่ (frequency) ที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ความถี่ 0.01 Hz. ถึง 1.0 Hz. เป็นการเคลื่อนตัวแบบกลับไป – กลับมา 10 รอบของทุกค่าระยะการเคลื่อนตัว และในทุกการทดสอบมีการให้แรงในแนวตั้งกับตัวอย่างทดสอบเท่ากับน้ำหนักส่วนของโครงสร้างส่วนบนของสะพานด้วยแท่นไฮดรอลิก โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.12 รูปแบบการทดสอบแบบวัฏจักร

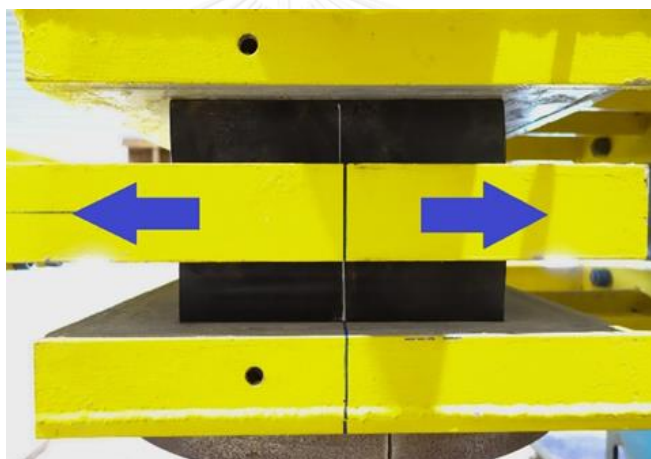
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการทดสอบของการที่รองรับสะพาน

Specimen No.	Size (mm.)	Amplitude (mm.)	Frequency (Hz.)	Axial load (Ton)
T40	300x400x40	2 ถึง 10	0.01	20
T60	300x400x60	2 ถึง 14	0.05	20
T80	300x400x80	2 ถึง 20	0.10	20
			0.20	20
			0.40	20
			0.60	20
			0.80	20
			1.0	20

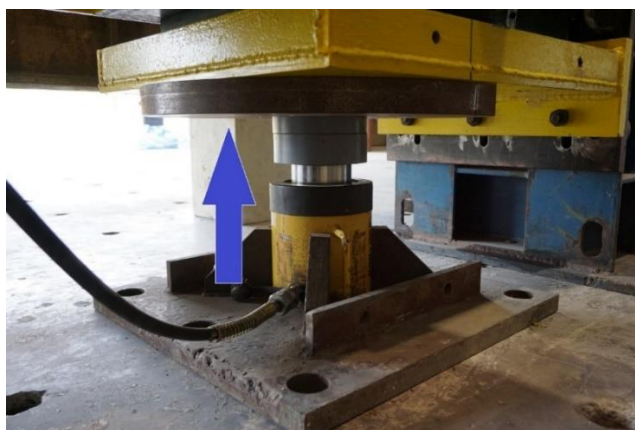
บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบของที่รองรับ

ในบทนี้ผู้วิจัย ได้นำเสนอการทดสอบยางที่รองรับสะพานพร้อมทั้งผลจากการทดสอบที่รองรับ โดยในการทดสอบจะใช้ยางที่รองรับสะพานจำนวน 2 แผ่น ในการทดสอบเพื่อให้เกิดการสมมาตรของแรงที่กระทำทางด้านข้างของยางและเป็นการป้องกันการเกิดโมเมนต์ในตัวยางที่ทดสอบ โดยที่ยางทั้งสองแผ่นจะมีขนาด กว้างxยาวxสูง ที่เท่ากัน และหลังจากที่ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าไปในชุดทดสอบแล้วจะมีทิศทางการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 5.1 และมีการให้แรงอัดคงที่ในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 20 ตันทุกตัวอย่างทดสอบด้วยแท่นไฮดรอลิกที่ติดตั้งอยู่ส่วนล่างของชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ทิศทางการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 5.2 การให้แรงอัดในแนวแกนด้วยแท่นไฮดรอลิก

5.1 การทดสอบที่รองรับ

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอลักษณะการเคลื่อนตัวของที่รองรับจากการทดสอบ โดยเริ่มจากระยะเคลื่อนตัวที่น้อยไปหามาก และมีความเร็วในการเคลื่อนตัวที่ 0.01 Hz. และ 1.0 Hz. โดยที่ได้กำหนดชื่อตัวอย่างทดสอบจากความหนาของยางที่มีขนาด 40, 60 และ 80 มิลลิเมตร เป็นตัวอย่าง T40, T60 และ T80 ตามลำดับ

5.1.1 การทดสอบที่รองรับ T40

การทดสอบที่รองรับ T40 คือ ที่รองรับที่มีขนาด 300x400x40 มิลลิเมตร โดยนำเสนอระยะเวลาการเคลื่อนตัวที่ 6 และ 10 มิลลิเมตร ในทิศทางการเคลื่อนตัวทางบวกและลบ และที่ความถี่ 0.01 Hz และ 1.0 Hz. ตามลำดับ โดยที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัว 6 มม. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 3 มม. และที่ระยะเคลื่อนตัว 10 มม. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 5 มม.



รูปที่ 5.3 T40 ระยะ +6mm ที่ 0.01 Hz.



รูปที่ 5.4 T40 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.



รูปที่ 5.5 T40 ระยะ +6mm ที่ 1.0 Hz.



รูปที่ 5.6 T40 ระยะ -6mm ที่ 1.0 Hz.

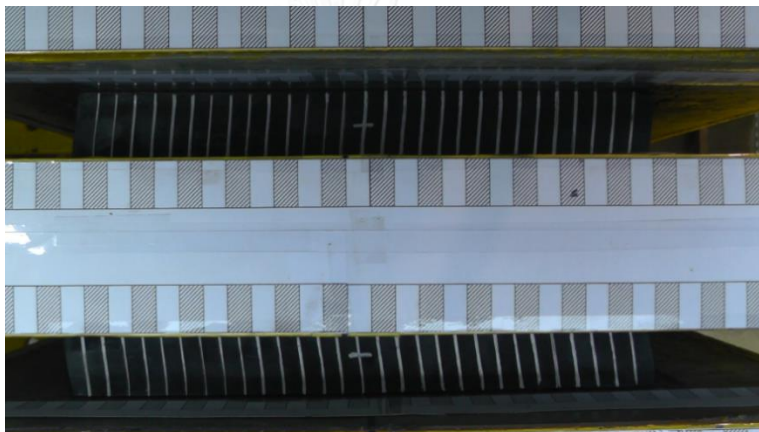
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



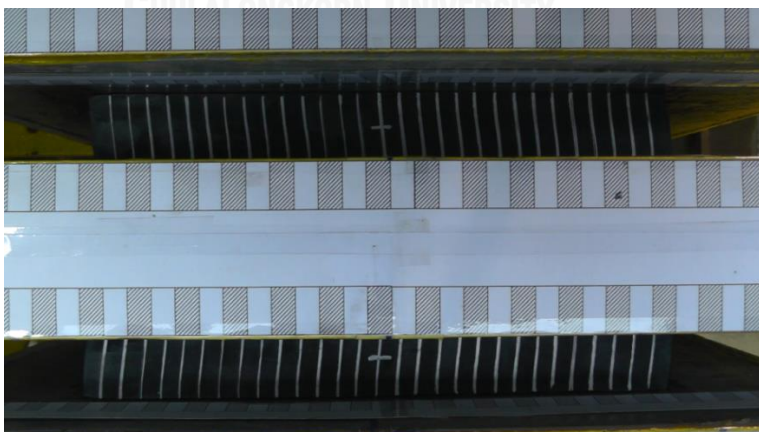
รูปที่ 5.7 T40 ระยะ +10mm ที่ 0.01 Hz.



รูปที่ 5.8 T40 ระยะ -10mm ที่ 0.01 Hz.



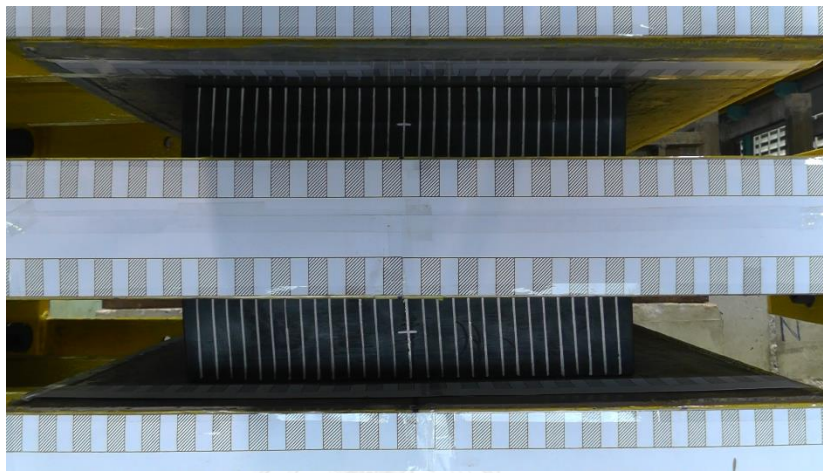
รูปที่ 5.9 T40 ระยะ +10mm ที่ 1.0 Hz.



รูปที่ 5.10 T40 ระยะ -10mm ที่ 1.0 Hz.

5.1.2 การทดสอบที่รองรับ T60

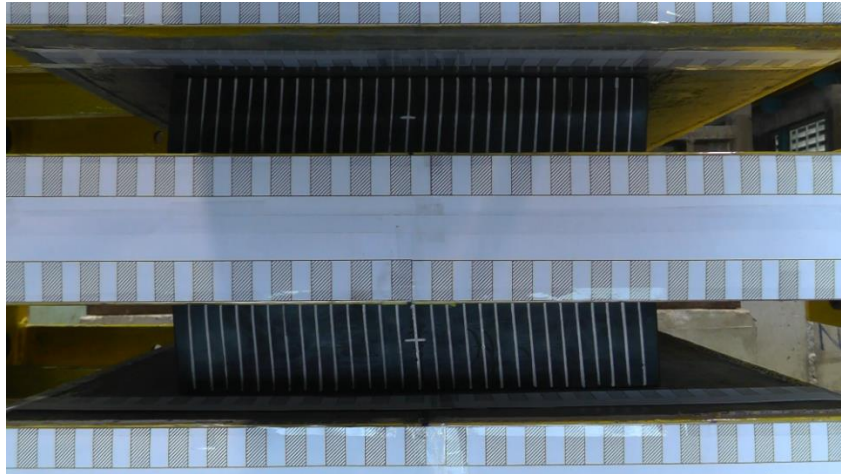
การทดสอบที่รองรับ T60 คือ ที่รองรับที่มีขนาด 300x400x60 มิลลิเมตร โดยนำเสนอระยะการเคลื่อนตัวที่ 6 และ 14 มิลลิเมตร ในทิศทาง การเคลื่อนตัวทางบวกและลบ และที่ความถี่ 0.01 Hz. และ 1.0 Hz. ตามลำดับ โดยระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 3 มม. และที่ระยะเคลื่อนตัว 14 มม. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 6 มม.



รูปที่ 5.11 T60 ระยะ +6mm ที่ 0.01 Hz.



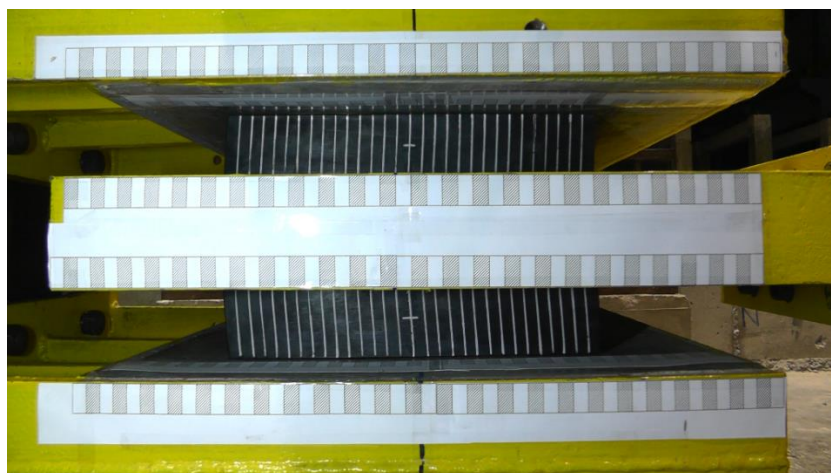
รูปที่ 5.12 T60 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.



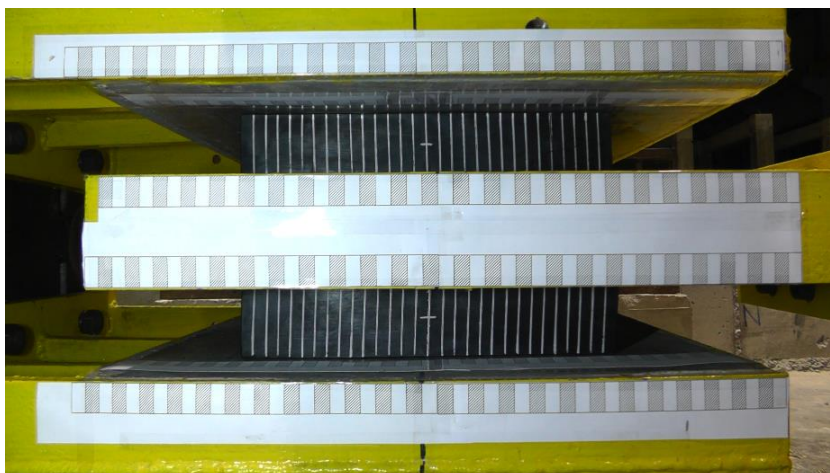
รูปที่ 5.13 T60 ระยะ +6mm ที่ 1.0 Hz.



รูปที่ 5.14 T60 ระยะ -6mm ที่ 1.0 Hz.



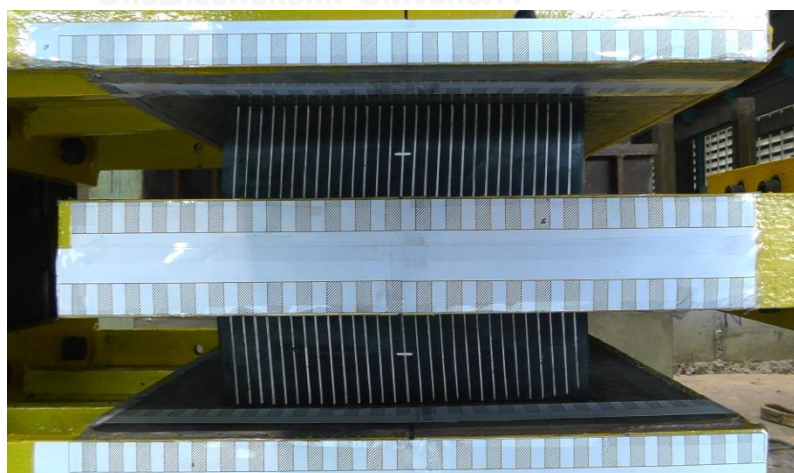
รูปที่ 5.15 T60 ระยะ +14mm ที่ 0.01 Hz.



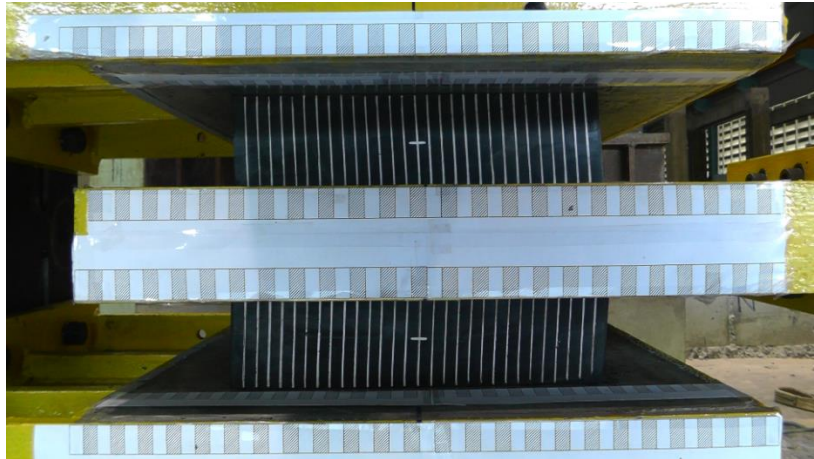
รูปที่ 5.16 T60 ระยะ -14mm ที่ 0.01 Hz.

5.1.3 การทดสอบที่รองรับ T80

การทดสอบที่รองรับ T80 คือ ที่รองรับที่มีขนาด 300x400x80 มิลลิเมตร โดยนำเสนอรยะการเคลื่อนตัวที่ 6, 14 และ 20 มิลลิเมตร ในทิศทางการเคลื่อนตัวทางบวกและลบ และที่ความถี่ 0.01 Hz. และ 1.0 Hz. ตามลำดับ โดยที่ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 2 มม. ที่ระยะเคลื่อนตัว 14 มม. ของความถี่ 0.01 Hz. ยางเลื่อนไถลโดยประมาณ 11 มม. และที่ความถี่ 1.0 Hz. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 5 มม. และที่ระยะเคลื่อน 20 มม. ที่ความถี่ 0.01 Hz. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 10 มม. และที่ความถี่ 1.0 Hz. ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยประมาณ 5 มม.



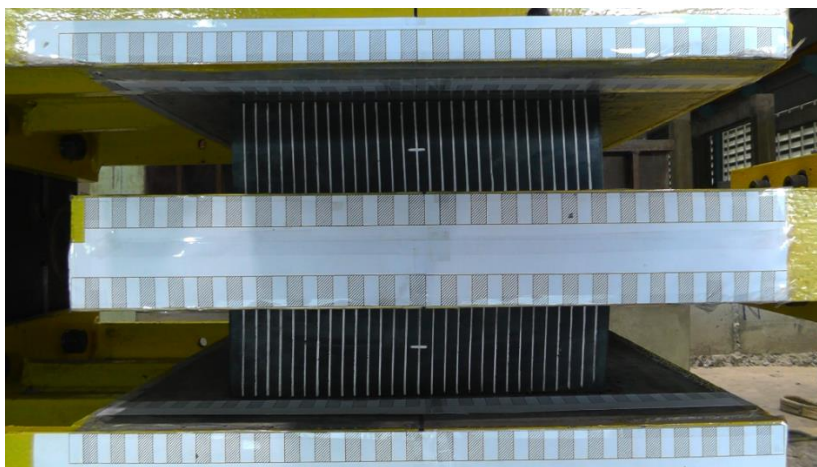
รูปที่ 5.17 T80 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.



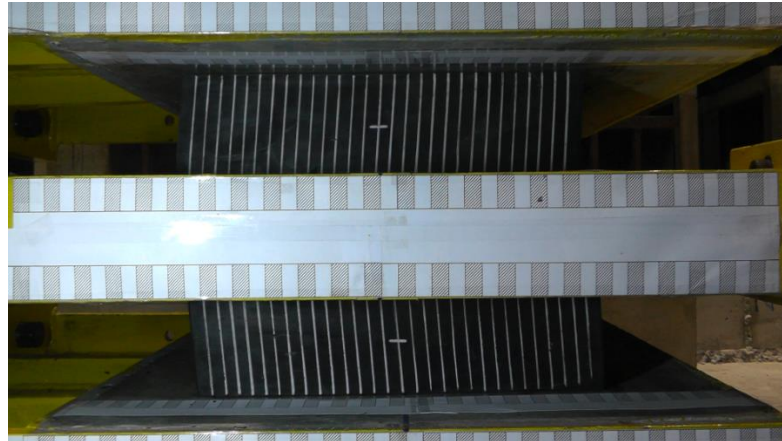
รูปที่ 5.18 T80 ระยะ -6mm ที่ 0.01 Hz.



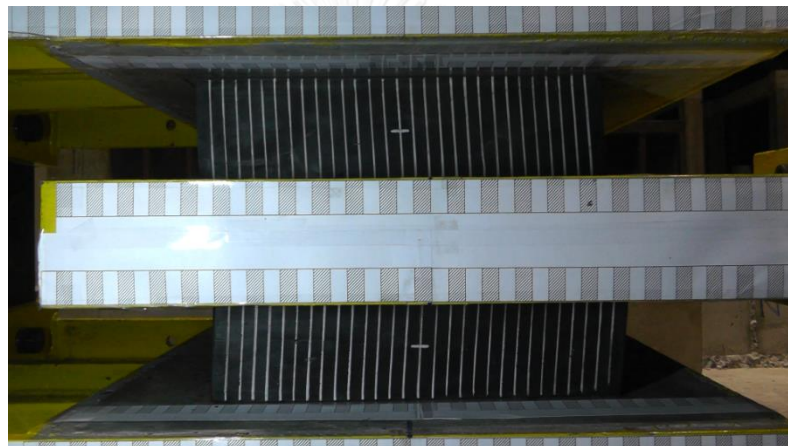
รูปที่ 5.19 T80 ระยะ +6mm ที่ 1.0 Hz.



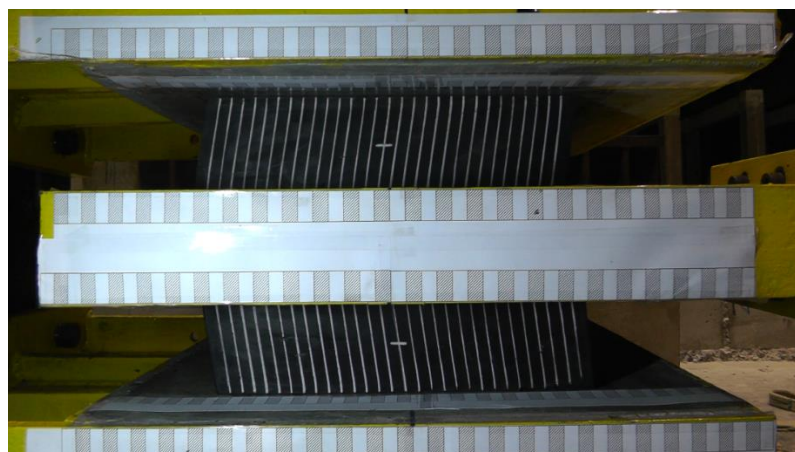
รูปที่ 5.20 T80 ระยะ -6mm ที่ 1.0 Hz.



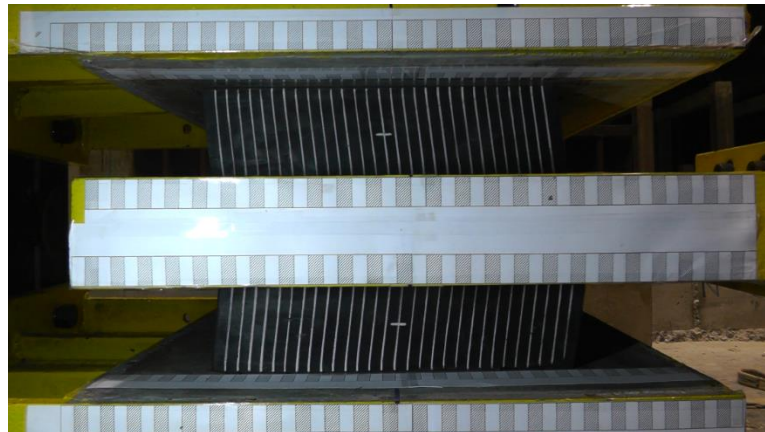
รูปที่ 5.21 T80 ระยะ +14mm ที่ 0.01 Hz.



รูปที่ 5.22 T80 ระยะ -14mm ที่ 0.01 Hz.



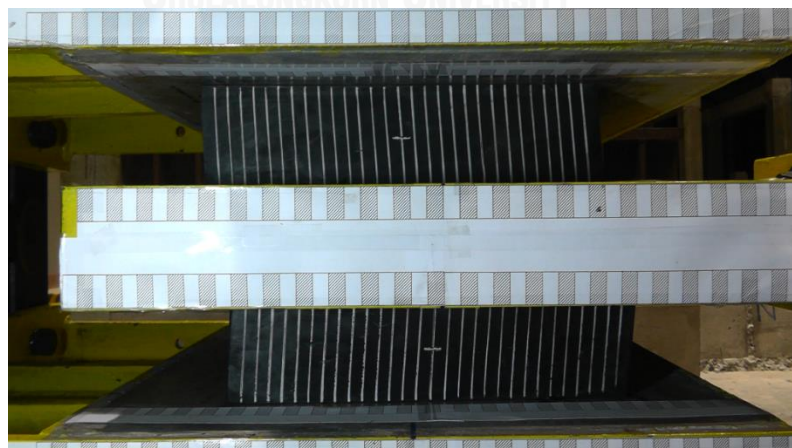
รูปที่ 5.23 T80 ระยะ +14mm ที่ 1.0 Hz.



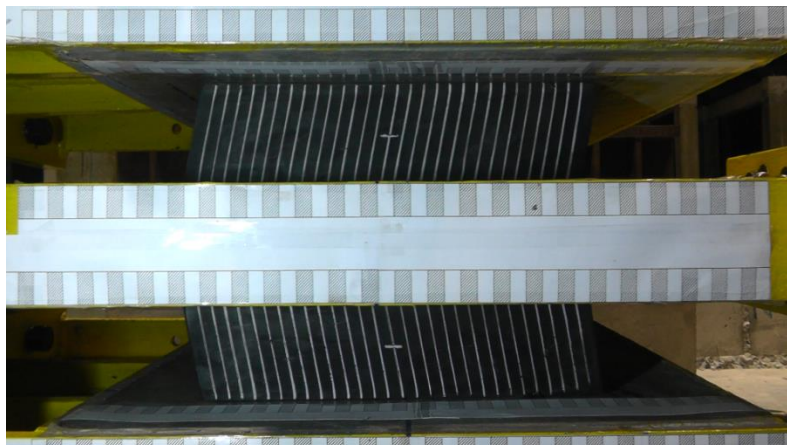
รูปที่ 5.24 T80 ระยะ -14mm ที่ 1.0 Hz.



รูปที่ 5.25 T80 ระยะ +20mm ที่ 0.01 Hz.



รูปที่ 5.26 T80 ระยะ -20mm ที่ 0.01 Hz.



รูปที่ 5.27 T80 ระยะ +20mm ที่ 1.0 Hz.



รูปที่ 5.28 T80 ระยะ -20mm ที่ 1.0 Hz.

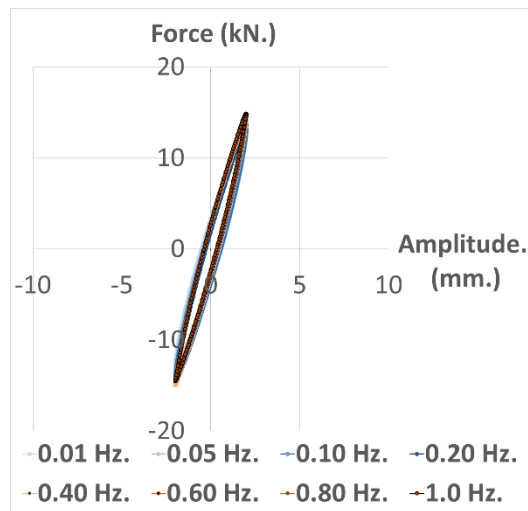
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ผลการทดสอบที่รองรับ

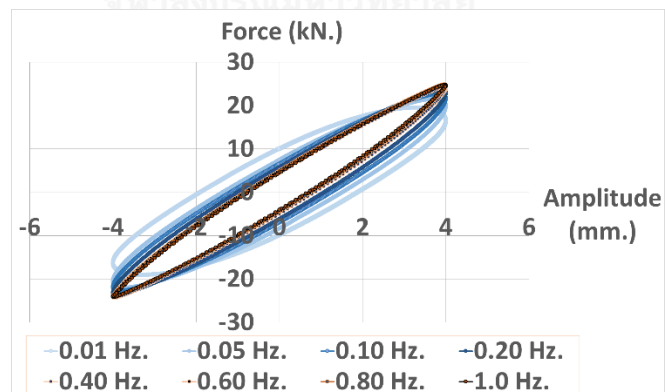
จากการทดสอบที่รองรับสะพาน ด้วยวิธีกำหนดระยะการเคลื่อนตัว (Displacement Control) ให้แรงกระทำทางด้านข้างกับที่รองรับสะพานแบบที่มียางหลายชั้น (Laminated Elastomeric Bearing Pad) โดยที่ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ T40, T60 และ T80 เป็นยางที่รองรับสะพานที่มีความหนาแตกต่างกัน คือ 40, 60 และ 80 มิลลิเมตร โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของการเคลื่อนตัวจาก 0.01 Hz ถึง 1.0 Hz. ในทุกๆระยะการเคลื่อนตัวแบบกลับไป - กลับมา 10 รอบ และได้บันทึกค่าแรงที่กระทำจากเครื่องวัดแรง (Load cell) ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องให้แรง (Actuator) จากนั้นนำผลมาพล็อตค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว (Amplitude) ที่มีค่าความถี่ที่แตกต่างกัน โดยนำเสนอผลจากการทดสอบตัวอย่างดังนี้

5.2.1 ผลการทดสอบที่รองรับ T40

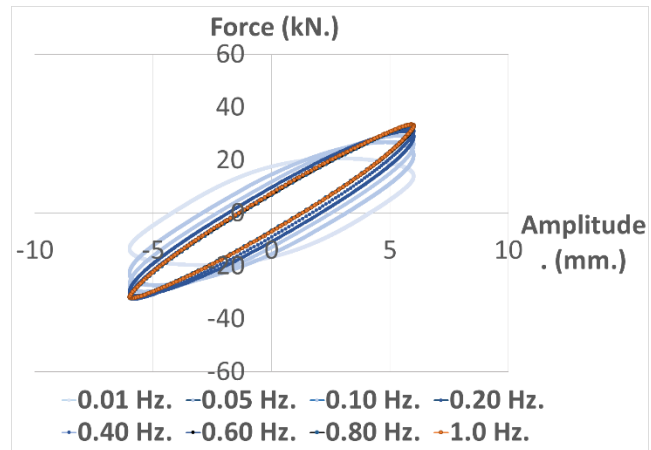
จากการทดสอบที่รองรับ T40 คือตัวอย่างที่มีขนาด 300x400x40 มิลลิเมตร โดยนำเสนอผลจากการทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับระยะการเคลื่อนตัว โดยมีระยะการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2 ถึง 10 มิลลิเมตร โดยทุกระยะการเคลื่อนตัวมีค่าความถี่ (Frequency) ที่ 0.01 ถึง 1.0 Hz. แสดงในรูปที่ 5.29 ถึงรูปที่ 5.33 ตามลำดับ



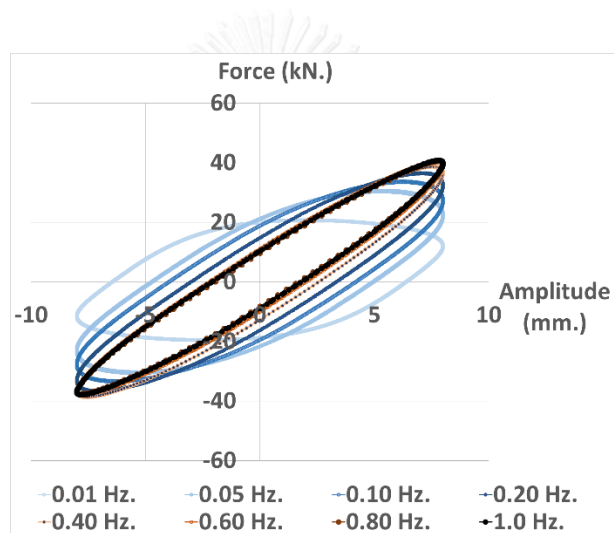
รูปที่ 5.29 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 2 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



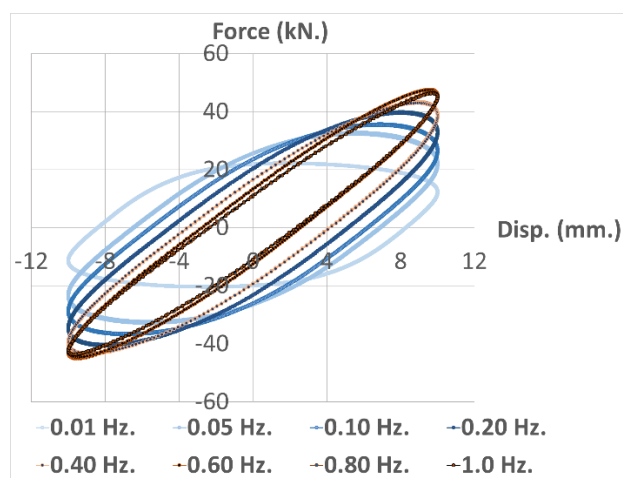
รูปที่ 5.30 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 4 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.31 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.32 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 8 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.

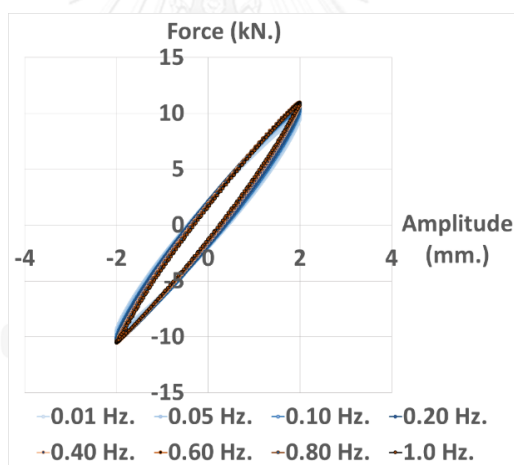


รูปที่ 5.33 ที่รองรับ T40 ระยะการเคลื่อนตัว 10 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.

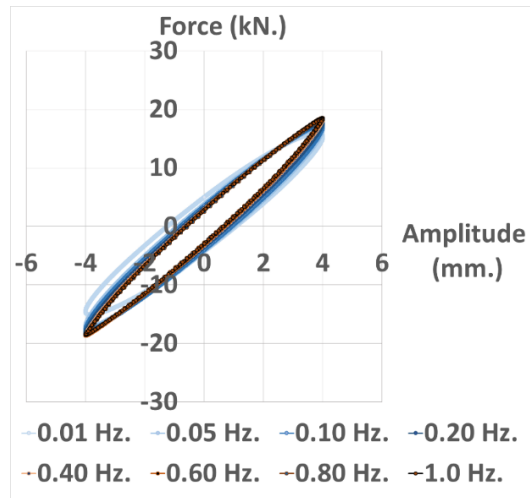
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัวที่มีความถี่ที่แตกต่างกันของที่รองรับ T40 พบว่า ที่ระยะการเคลื่อนตัว 2 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.29 กราฟมีความชันมากที่สุด และในทุกค่าความถี่มีแรงที่เกิดขึ้นในที่รองรับใกล้เคียงกัน และพบว่าเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นไปจนถึง 10 มิลลิเมตร กราฟมีความชันลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบความถี่ที่ต่ำไปจนถึงความถี่สูง พบว่าความถี่สูงมีผลทำให้มีผลทำให้แรงเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงความถี่ต่ำอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

5.2.2 ผลการทดสอบที่รองรับ T60

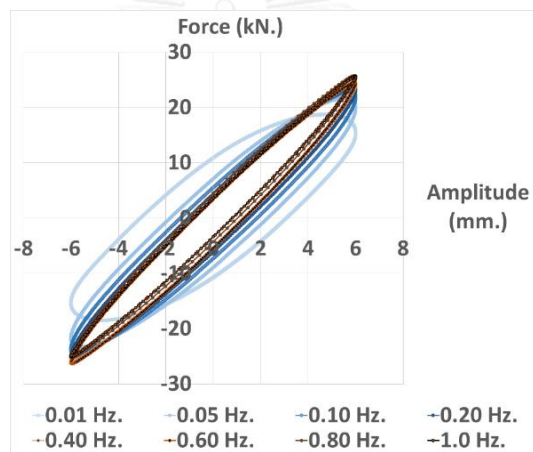
จากการทดสอบที่รองรับ T60 คือตัวอย่างที่มีขนาด 300x400x60 มิลลิเมตร โดยนำเสนอผลจากการทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับระยะการเคลื่อนตัว โดยมีระยะการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2 ถึง 14 มิลลิเมตร โดยทุกระยะการเคลื่อนตัวมีค่าความถี่ (Frequency) ที่ 0.01 ถึง 1.0 Hz. แสดงในรูปที่ 5.34 ถึงรูปที่ 5.40 ตามลำดับ



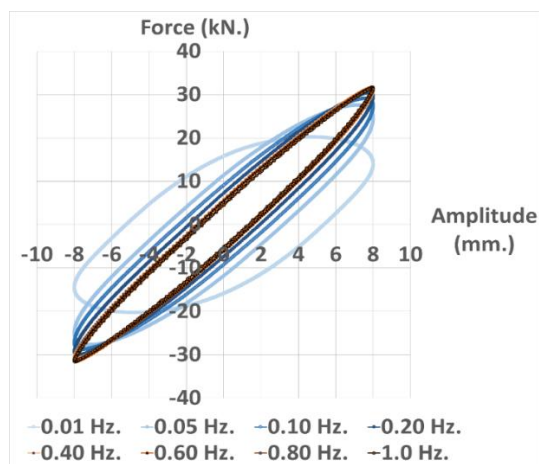
รูปที่ 5.34 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 2 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



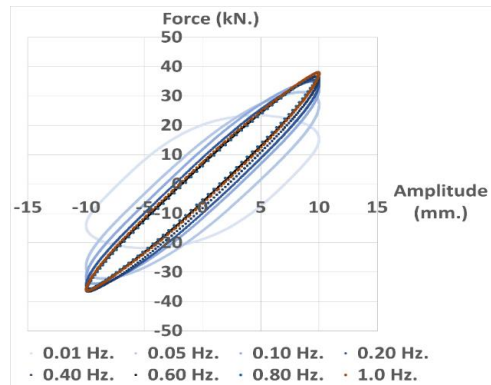
รูปที่ 5.35 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 4 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



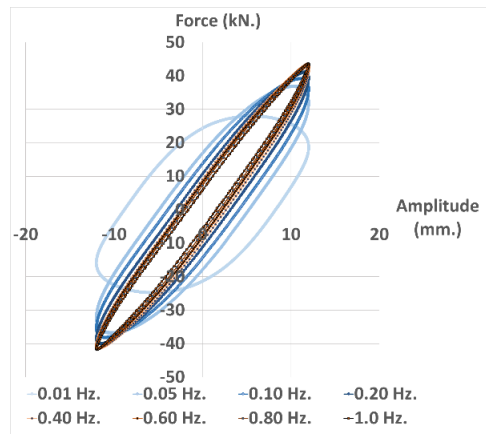
รูปที่ 5.36 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



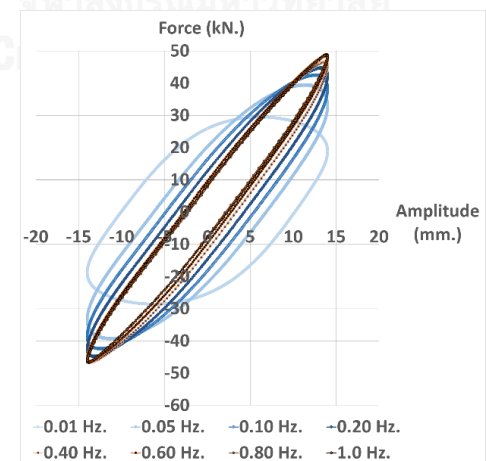
รูปที่ 5.37 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 8 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.38 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 10 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.39 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 12 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



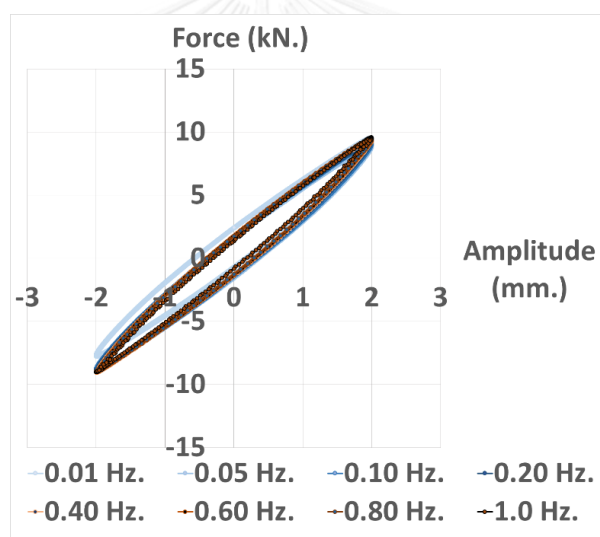
รูปที่ 5.40 ที่รองรับ T60 ระยะการเคลื่อนตัว 14 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัวที่มีความถี่ที่แตกต่างกันของ
ที่รองรับ T60 พบว่า ที่ระยะการเคลื่อนตัว 2 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.34 กราฟมีความชันมากที่สุด

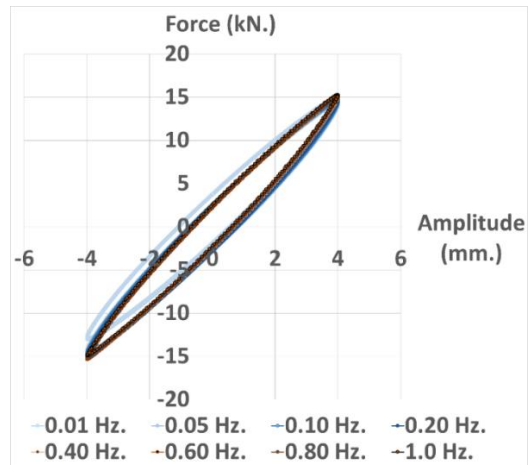
และในทุกค่าความถี่มีแรงที่เกิดขึ้นในที่รองรับใกล้เคียงกัน และพบว่าเมื่อระยะเวลาการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 6 มิลลิเมตร ไปจนถึง 14 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.36 และ รูปที่ 5.40 ตามลำดับ พบว่ากราฟมีความชันลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบความถี่ที่ต่ำไปจนถึงความถี่สูง พบว่าความถี่สูงมีผลทำให้แรงเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงความถี่ต่ำอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีระยะเวลาการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

5.2.3 ผลการทดสอบที่รองรับ T80

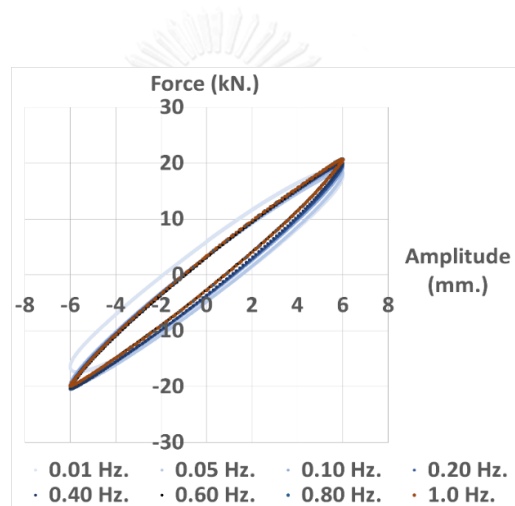
จากการทดสอบที่รองรับ T80 คือตัวอย่างที่มีขนาด 300x400x80 มิลลิเมตร โดยนำเสนอผลจากการทดสอบที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับระยะเวลาการเคลื่อนตัว โดยมีระยะเวลาการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2 ถึง 20 มิลลิเมตร โดยทุกระยะการเคลื่อนตัวมีค่าความถี่ (Frequency) ที่ 0.01 ถึง 1.0 Hz. แสดงในรูปที่ 5.41 ถึงรูปที่ 5.50 ตามลำดับ



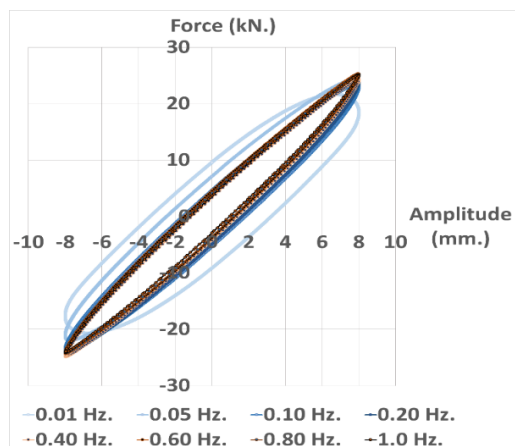
รูปที่ 5.41 ที่รองรับ T80 ระยะเวลาการเคลื่อนตัว 2 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



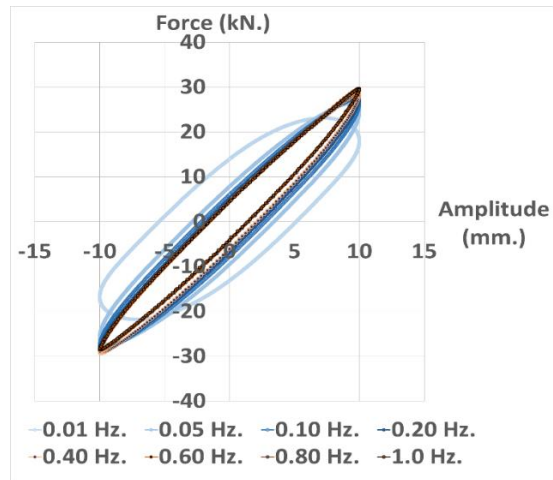
รูปที่ 5.42 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 4 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



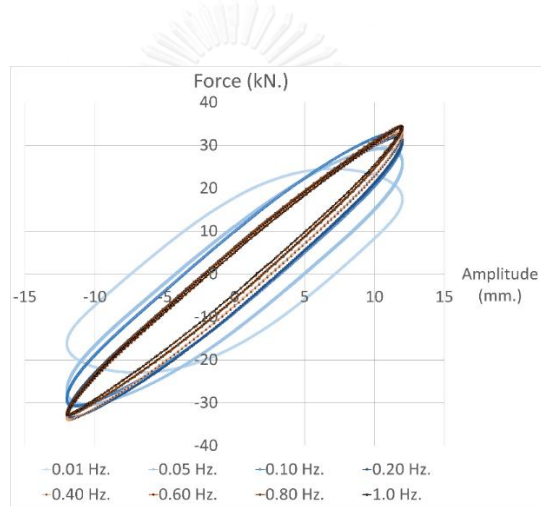
รูปที่ 5.43 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 6 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



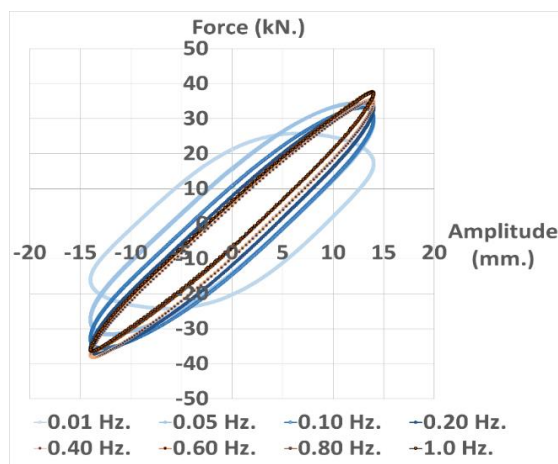
รูปที่ 5.44 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 8 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



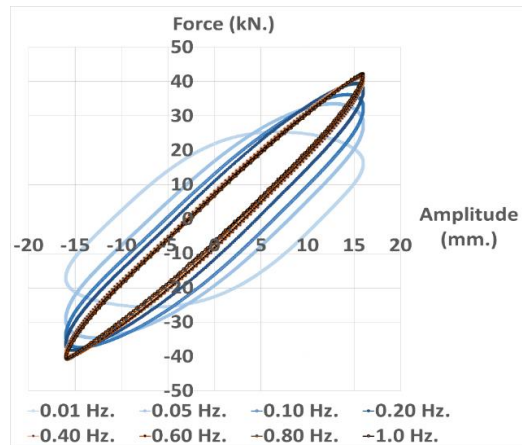
รูปที่ 5.45 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 10 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



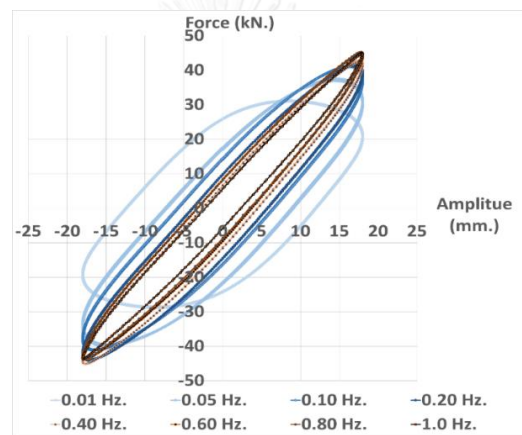
รูปที่ 5.46 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 12 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



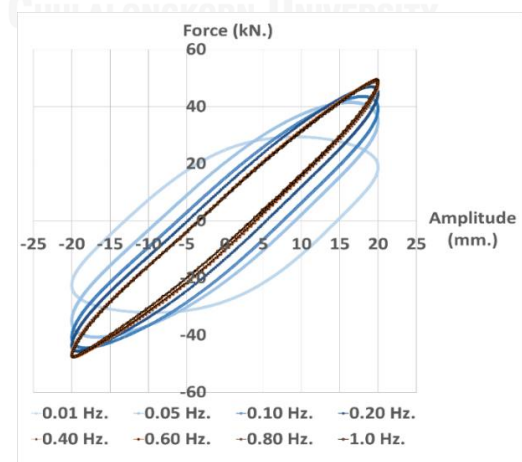
รูปที่ 5.47 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 14 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.48 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 16 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.49 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 18 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.



รูปที่ 5.50 ที่รองรับ T80 ระยะการเคลื่อนตัว 20 มม. ความถี่ 0.01 ถึง 1.0 Hz.

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัวที่มีความถี่ที่แตกต่างกันของ ที่รองรับ T80 พบว่า ที่ระยะการเคลื่อนตัว 2 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.41 กราฟมีความชันมากที่สุด และในทุกค่าความถี่มีแรงที่เกิดขึ้นในที่รองรับใกล้เคียงกัน และพบว่าเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 8 มิลลิเมตร ไปจนถึง 20 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.44 และ รูปที่ 5.50 ตามลำดับ พบว่า กราฟมีความชันลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบความถี่ที่ต่ำไปจนถึงความถี่สูง พบว่าความถี่สูงมีผลทำให้แรงเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงความถี่ต่ำอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

ผลจากการทดสอบอย่างทุกตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะการเคลื่อนตัวที่น้อยของยาง เส้นกราฟมีความเอียงเปลี่ยนไปน้อยในทุกๆค่าความถี่ (frequency) และมีขนาดพื้นที่ของวงรอบ ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่แคบ และพบว่าเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น ในช่วงที่ความถี่ต่ำมีขนาดวงรอบฮิสเทอรีซิสที่กว้างขึ้นมากกว่าช่วงที่ระยะการเคลื่อนที่น้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดพื้นที่ของฮิสเทอรีซิสแปรผันโดยตรงกับระยะการเคลื่อนตัวในช่วงที่ความเร็วต่ำ

5.3 วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ

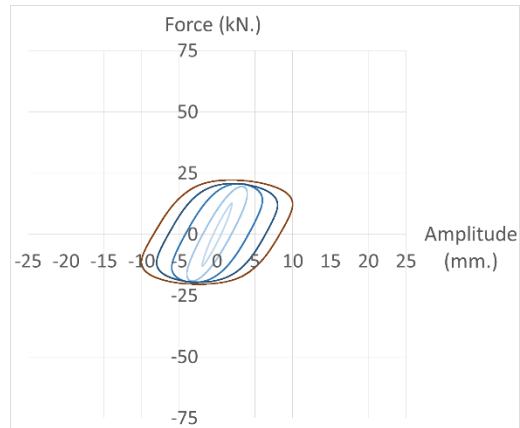
5.3.1 วิเคราะห์ผลโดยรวม

ในส่วนนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาผลจากการทดสอบ โดยผู้วิจัยได้นำเสนอผลความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ในแต่ละระยะการเคลื่อนตัว กราฟมีความเอียงในช่วงแรกโดยระยะการเคลื่อนตัวเป็นสัดส่วนกันในแนวเส้นตรงและเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) กล่าวคือจากแรงที่เกิดขึ้นในวงรอบฮิสเทอรีซิสมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนยืดหยุ่น (Elastic) กับส่วนที่หน่วง (Viscous) ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงและเป็นตัวหน่วงที่ดี โดยอธิบายได้ในรูปสมการที่ (5.1) โดยทั้งนี้ผลของแรงรวมที่ได้จากการทดสอบคือผลของแรงรวมทั้งระบบที่รวมทั้งแรงเสียดทานและผลจากการที่ยางเกิดการเลื่อนไถลตัวรวมเข้าไปด้วย

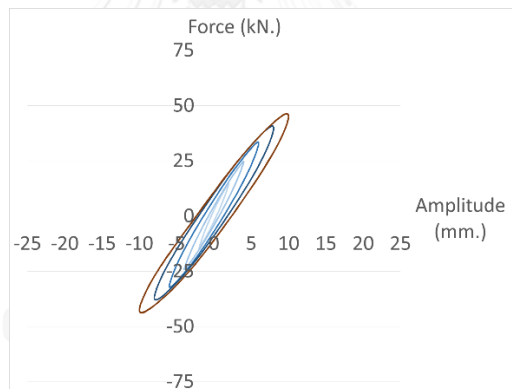
$$F_{Total} = F_s + F_d \quad (5.1)$$

โดยที่ F_{Total} คือแรงลัพธ์ของระบบทั้งหมดที่รวมทั้งผลจากแรงเสียดทานและการเลื่อนไถลที่เกิดขึ้นของยางรวมทั้งสติเฟนสและแรงหน่วงของยางที่ได้จากการทดสอบ โดยมี F_s เป็นแรงส่วนหนึ่งของแรงทั้งหมดของระบบจากการทดสอบนี้ โดยที่ F_s คือแรงจากสติเฟนสของระบบที่รวมผลของการ

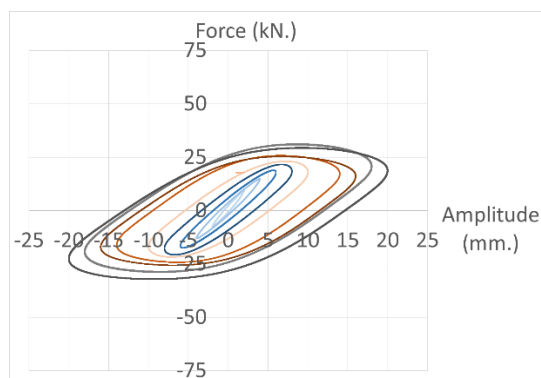
เกิดการเลื่อนไถลของยางด้วย และมี F_d เป็นแรงส่วนหนึ่งของแรงทั้งหมดของระบบจากการทดสอบนี้ โดยที่ F_d คือแรงจากความหน่วงของระบบที่รวมผลของการเลื่อนไถลของยางด้วย



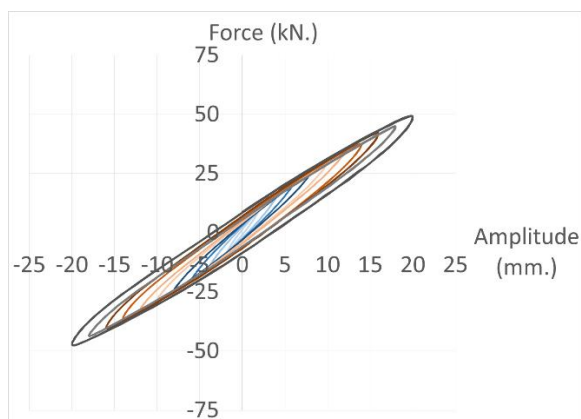
รูปที่ 5.51 ความสัมพันธ์แรงและระยะการเคลื่อนที่ 0.01 Hz. ของ T40



รูปที่ 5.52 ความสัมพันธ์แรงและระยะการเคลื่อนที่ 1.0 Hz. ของ T40



รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์แรงและระยะการเคลื่อนที่ 0.01 Hz. ของ T80



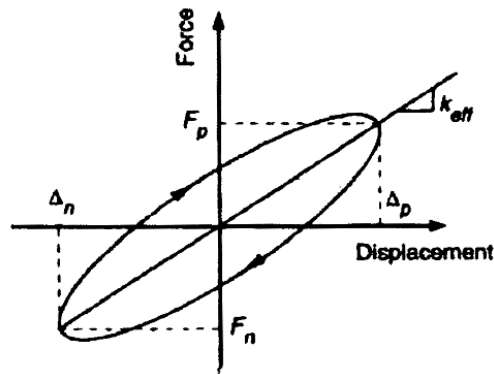
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์แรงและระยะการเคลื่อนที่ 1.0 Hz ของ T80

จากการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ส่งผลทำให้วงรอบฮิสเทอริซิส (Hyteresis loop) มีผลที่แตกต่างกันระหว่างช่วงความถี่ต่ำแสดงในรูปที่ 5.51, 5.53 และความถี่สูงแสดงในรูปที่ 5.52, 5.54 เป็นผลเนื่องมาจากยางเกิดการเลื่อนไถล

พบว่ายางที่มีขนาดความหนาแน่นจะเกิดการเลื่อนไถลของยางได้ง่ายกว่ายางที่มีขนาดหนา มากกว่าเนื่องจากมีระยะการเอียงตัวที่น้อยกว่า โดยในช่วงระยะการเคลื่อนที่น้อยในช่วงความถี่ต่ำ และความถี่สูงวงรอบฮิสเตอร์มีลักษณะเป็นวงแคบที่มีลักษณะเหมือนกันโดยที่ยางเกิดการเลื่อนไถล น้อยมาก และเมื่อมีระยะการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นพบว่าในช่วงที่ความถี่ต่ำวงรอบฮิสเตอร์มีขนาด กว้างขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากยางเกิดการเลื่อนไถลตัวไปตามระยะการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น

ผลจากการทดสอบที่ความถี่สูงยังพบว่าวงรอบฮิสเตอร์มีขนาดแคบกว่าที่ความถี่ต่ำในทุก ช่วงระยะการเคลื่อนที่และพบว่าเมื่อมีระยะการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นแรงยังคงเพิ่มขึ้นตามระยะการ เคลื่อนที่ตัวเป็นสัดส่วนกันเป็นผลเนื่องมาจากยางเกิดการเลื่อนไถลเนื่องจากความถี่ที่สูงโดยที่ยางมี ลักษณะการเอียงตัวมากกว่าช่วงที่เกิดการเคลื่อนที่ที่ความถี่ต่ำ

เมื่อพิจารณาค่าสถิติประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งเป็นค่าสถิติของทั้งระบบที่มีส่วนของ แรงต้านของยางและรวมทั้งผลที่ยางเกิดการเลื่อนไถลโดยที่สามารถหาได้จากสมการที่ (5.2)

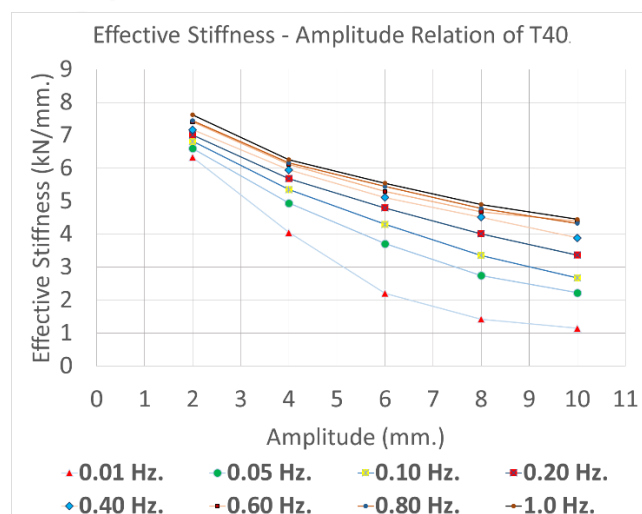


รูปที่ 5.55 นิยามของสติฟเนสประสิทธิภาพ

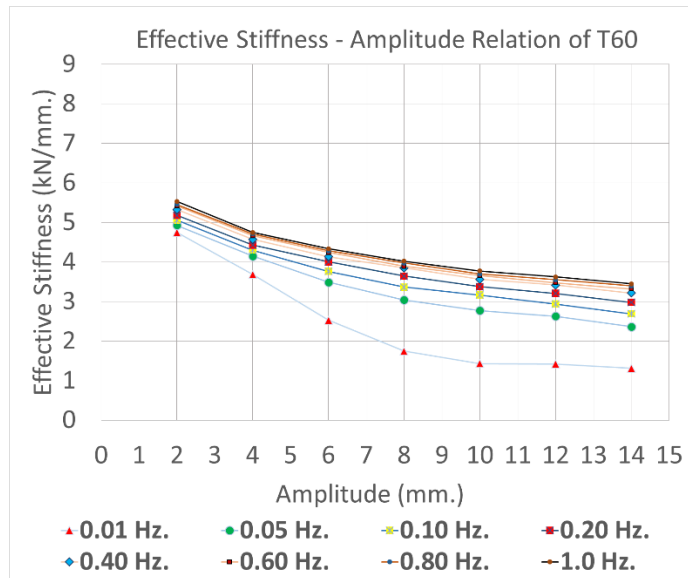
(Guide Specification for seismic isolation Design 2010)

$$K_{eff} = \frac{F_p - F_n}{\Delta_p - \Delta_n} \quad (5.2)$$

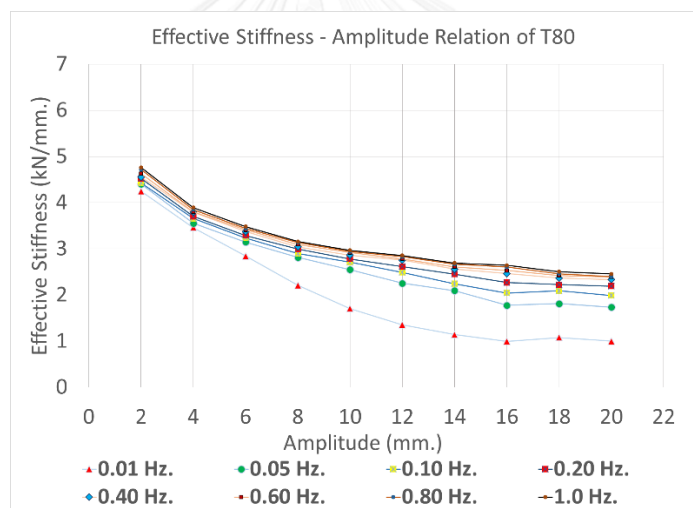
ซึ่ง Δ_p และ Δ_n คือค่าจากการทดสอบที่เป็นระยะเคลื่อนตัวสูงสุดด้านบวกและระยะเคลื่อนตัวต่ำสุดด้านลบตามลำดับ ซึ่ง F_p และ F_n เป็นแรงสูงสุดด้านบวกและเป็นแรงต่ำสุดด้านลบที่ตำแหน่งเดียวกันกับระยะเคลื่อนตัวของ Δ_p และ Δ_n ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 5.54 โดยได้พิจารณาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบกับระยะเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนไปโดยมีความถี่ตั้งแต่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 Hz. ในแต่ละระยะของการเคลื่อนตัวของตัวอย่าง T40, T60 และ T80 ดังในรูปที่ 5.56 ถึง รูปที่ 5.58 ตามลำดับ



รูปที่ 5.56 ความสัมพันธ์ของสติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบกับระยะการเคลื่อนตัวของ T40



รูปที่ 5.57 ความสัมพันธ์ของสติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบกับระยะการเคลื่อนตัวของ T60



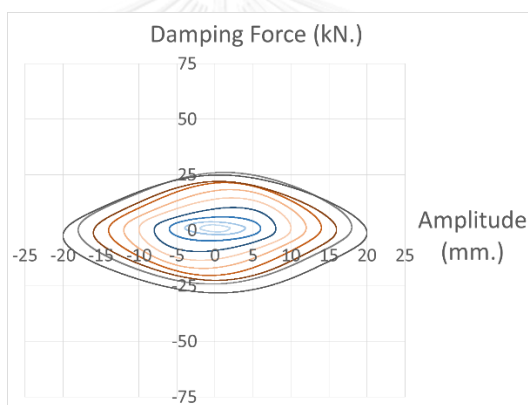
รูปที่ 5.58 ความสัมพันธ์ของสติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบกับระยะการเคลื่อนตัวของ T80

เมื่อเปรียบเทียบช่วงที่ย่างมีระยะการเคลื่อนตัวน้อย พบว่าสติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบมีค่าสูงใกล้เคียงกันในทุกความถี่ของการเคลื่อนตัว และสติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มระยะเคลื่อนตัวของยาง และในช่วงความถี่ต่ำของการเคลื่อนตัวมีผลให้สติฟเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบลดลงมากเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากยางเกิดการเลื่อนไถลไปตามระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงความถี่สูงยางเกิดการเลื่อนไถลอย่างรวดเร็วทำโดยที่ย่างเกิดจากเปลี่ยนรูปของยางอย่างรวดเร็วส่งผลให้ยางได้รับแรงมากกว่าช่วงความถี่ต่ำ

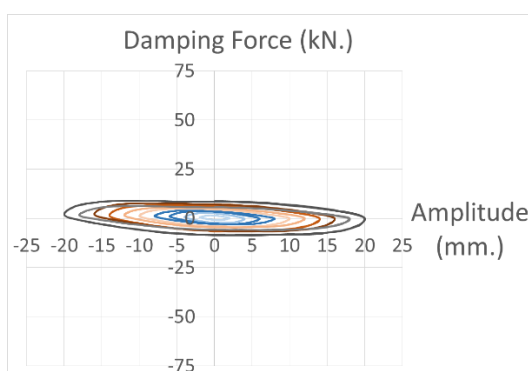
ในการทดสอบเมื่อให้ระยะเวลาเคลื่อนตัวแบบกลับไป - กลับมา จะได้แรงที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะเวลาเคลื่อนตัวนั้นๆ จะเป็นแรงที่เกิดขึ้นมาจากสองส่วน โดยแรงส่วนหนึ่งมาจากแรงของสติฟเนสของทั้งระบบการทดสอบ (F_s) และแรงอีกส่วนหนึ่งมาจากแรงที่เกิดจากแรงของความหน่วง (F_d) ของทั้งระบบที่มีทั้งแรงเสียดที่ Yang เกิดการเลื่อนไหลโดยที่สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 5.3

$$F_d = F_{Total} - F_s \quad (5.3)$$

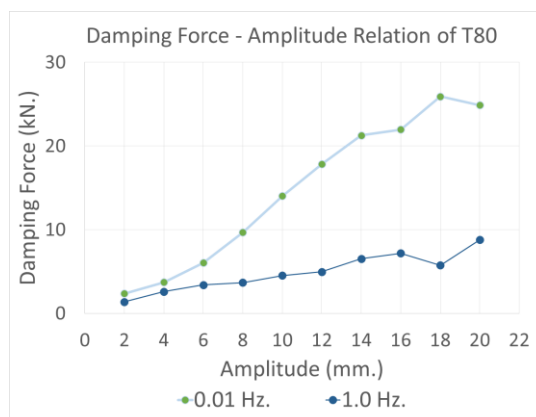
ต่อไปได้นำเสนอ รูปแบบฮิสเทอริซิสของความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงของทั้งระบบกับระยะเวลาเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงที่ 0.01 Hz และ 1.0 Hz. ของตัวอย่าง T80 แสดงในรูปที่ 5.59 และ รูปที่ 5.60



รูปที่ 5.59 แรงหน่วงของทั้งระบบกับระยะเวลาเคลื่อนตัวที่มีความถี่ 0.01 Hz. ของ T80



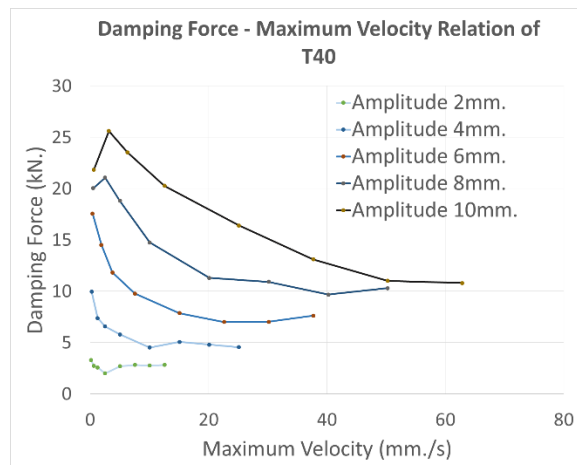
รูปที่ 5.60 แรงหน่วงของทั้งระบบกับระยะเวลาเคลื่อนตัวที่มีความถี่ 1.0 Hz. ของ T80



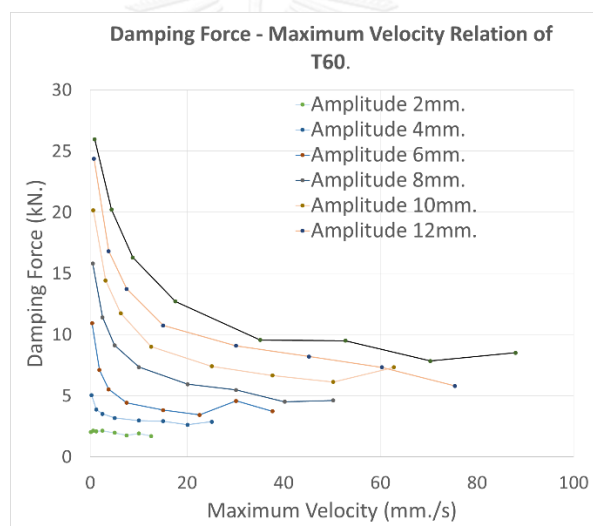
รูปที่ 5.61 แรงหน่วงของทั้งระบบกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวที่ความถี่ 0.01 และ 1.0 Hz. ของ T80

พบว่าในช่วงที่มีระยะเวลาการเคลื่อนตัวน้อย ที่ความถี่ต่ำและความถี่สูงแรงของความหน่วงของทั้งระบบมีค่าน้อยใกล้เคียงกันทุกความถี่และแรงหน่วงของทั้งระบบมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นแสดงในรูปที่ 5.61 และในช่วงความถี่ต่ำผลของแรงหน่วงของทั้งระบบมีค่าสูงขึ้นมากกว่าช่วงความถี่สูงซึ่งเป็นผลมาจากการที่ย่างเกิดการเลื่อนไถลไปตามระยะเวลาการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงหน่วยของระบบเกิดการสะสมแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

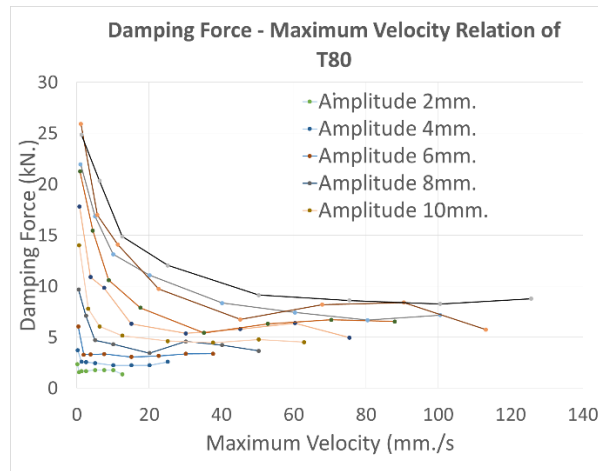
เมื่อพิจารณาผลของความเร็วจากการเคลื่อนตัวของยางที่รวมทั้งผลของการเลื่อนไถลที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการเคลื่อนตัว โดยได้เสนอรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดในแต่ละระยะเวลาการเคลื่อนตัวกับแรงของความหน่วงของทั้งระบบดังแสดงในรูปที่ 5.62, 5.63 และ 5.64 พบว่าในช่วงที่ความเร็วต่ำเท่ากับที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัวน้อยพบว่าแรงจากความหน่วงของทั้งระบบมีค่าน้อยกว่าช่วงที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัวมากขึ้น เนื่องจากในช่วงที่มีระยะเวลาการเคลื่อนตัวน้อยยางมีการเลื่อนไถลเกิดขึ้นเล็กน้อยไปตามระยะเวลาการเคลื่อนตัว แต่เมื่อระยะเวลาการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทำให้ยางมีการเลื่อนไถลเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมแรงหน่วงของทั้งระบบไปตามระยะเวลาการเคลื่อนตัว แม้ว่าที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วต่ำสุดของแต่ละการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นตาม แต่ยังคงเป็นความเร็วที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถลไปอย่างช้าๆ แต่ในช่วงที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นและความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วต่างกันมากกับช่วงที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัวน้อยสุด ทำให้ยางเกิดการเลื่อนไถลอย่างรวดเร็วจนทำให้ของแรงหน่วงของทั้งระบบลดลง



รูปที่ 5.62 แรงหน่วงของทั้งระบบกับความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ของยาง T40

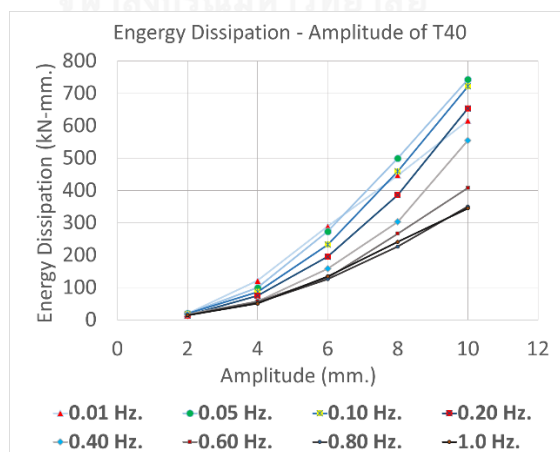


รูปที่ 5.63 แรงหน่วงของทั้งระบบกับความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ของยาง T60

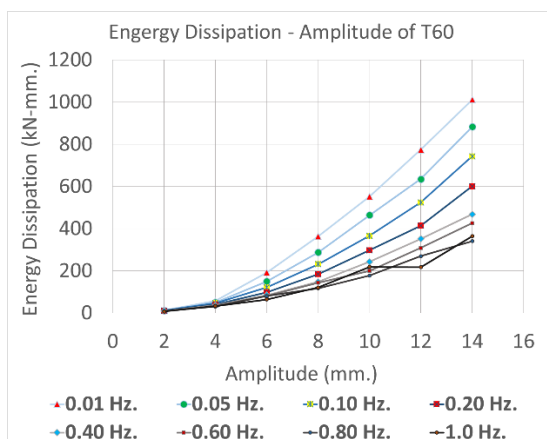


รูปที่ 5.64 แรงหน่วงของทั้งระบบกับความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ของยาง T80

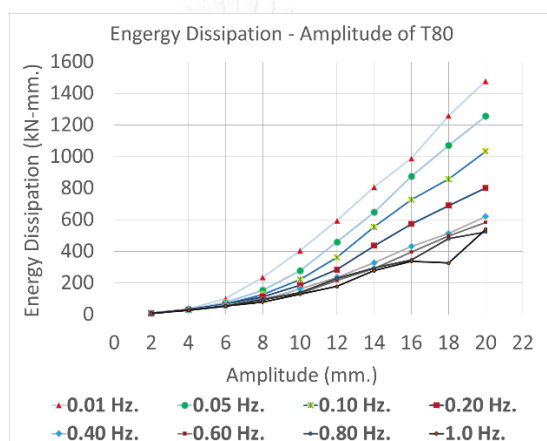
ยางที่รองรับสะพานเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการสลายพลังงานให้กับโครงสร้างสะพานได้ดี เมื่อพิจารณาให้ส่วนของการสลายพลังงาน (Energy Dissipation) ของยางที่รองรับสะพานกับ ในรูปที่ 5.65, 5.66 และ 5.67 ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการสลายพลังงานของยางที่รองรับสะพานเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น และสามารถสลายพลังงานได้มากที่สุดในช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากยางเกิดการเลื่อนไถลตัวทำให้เกิดพื้นที่วงรอบฮิสเทอรีซิสกว้างซึ่งบอกลักษณะความสามารถในการสลายพลังงานที่ดี



รูปที่ 5.47 แรงหน่วงของทั้งระบบกับระยะการเคลื่อนตัวของ T40



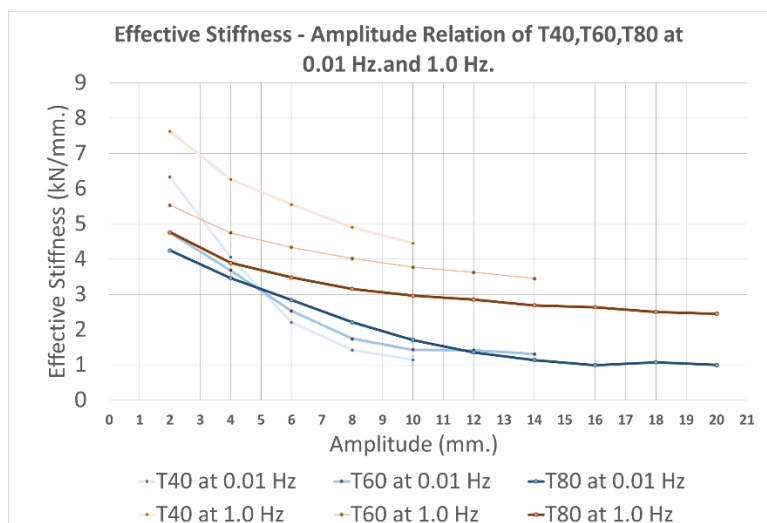
รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ของแรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ T60



รูปที่ 5.67 ความสัมพันธ์ของแรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ T80

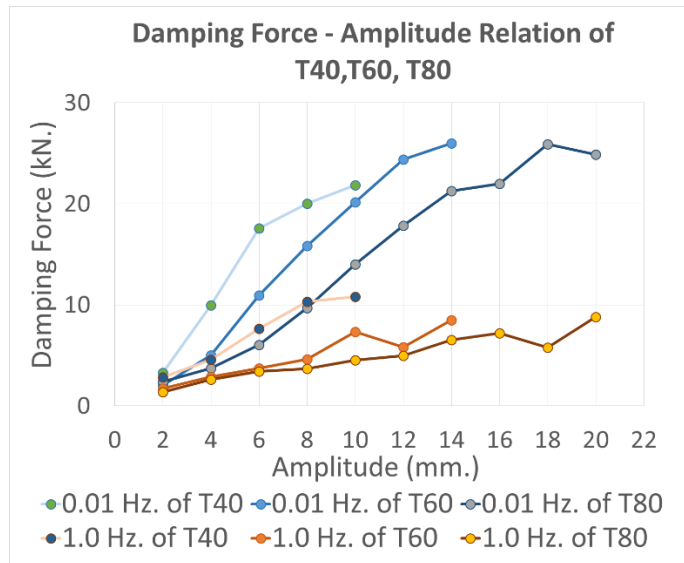
5.3.2 เปรียบเทียบผลของยางที่รองรับสะพาน

จากทดสอบและวิเคราะห์ผลของยางที่รองรับสะพาน โดยมีตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งหมด 3 ขนาดที่มาจากความหนาแตกต่างกัน โดยมีขนาดด้านกว้างและด้านยาวเท่ากันคือ 300x400 มิลลิเมตร โดยมีขนาดความหนาที่แตกต่างกันคือ 40, 60 และ 80 มิลลิเมตร โดยที่ได้กำหนดเป็น ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ T40, T60 และ T80 ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบผลของค่า สติฟเนสประสิทธิภาพของระบบ, ค่าการสลายพลังงานของระบบ (Energy Dissipation)

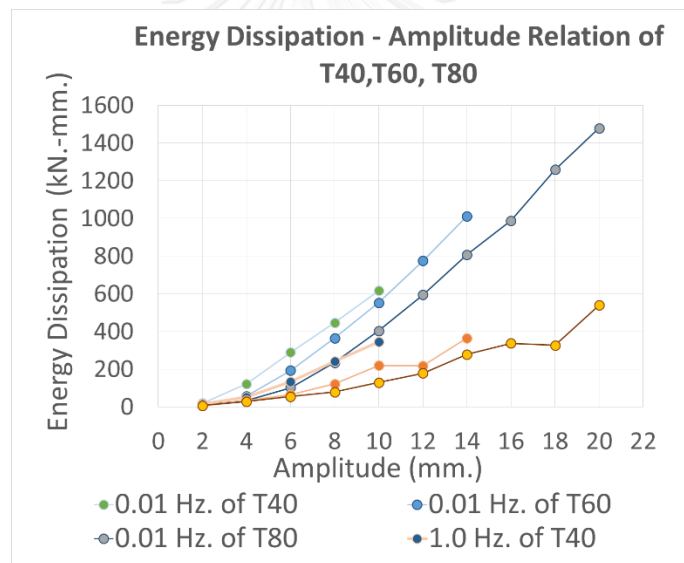


รูปที่ 5.68 เปรียบเทียบสตีฟเนสประสิทธิภาพผลของระบบของ T40,T60,T80

ผลของสตีฟเนสประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบโดยทำการเปรียบเทียบกันพบว่า ในช่วงที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 1.0 Hz. ยางที่มีขนาดความหนามากที่สุดคือ T80 มีสตีฟเนสของระบบต่ำกว่ายางที่มีขนาดความหนาน้อย คือ T60 และ T40 ตามลำดับตลอดช่วงระยะการเคลื่อนตัว และในช่วงที่ความถี่ 0.01 Hz. ในช่วงที่มีระยะการเคลื่อนตัวน้อยเป็นช่วงที่มีการเลื่อนไถลของยางน้อยมาก ยางที่มีขนาดความหนาน้อย T40 ให้ผลของสตีฟเนสของระบบสูงกว่ายางที่มีความหนามากกว่า แต่พบว่าที่ความถี่ 0.01 ซึ่งเป็นความถี่ที่ต่ำเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทำให้ยางที่มีความหนาน้อยเกิดการเลื่อนไถลแบบซ้ๆตามระยะการเคลื่อนตัวส่งผลให้ค่าสตีฟเนสของระบบลดลงมากไปใกล้เคียงกับยางที่มีความหนามาก ซึ่งยางที่มีความหนามากกว่าจะเกิดการเลื่อนไถลตัวได้ยากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.69 เปรียบเทียบผลแรงหน่วงของทั้งระบบของ T40,T60,T80



รูปที่ 5.70 เปรียบเทียบผลการสลายพลังงานของ T40,T60,T80

ผลของความสามารถในการสลายพลังงานของระบบและแรงหน่วงของระบบโดยทำการเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 5.69 และ 5.70 โดยพบว่าayang T40 ซึ่งเป็นยางที่มีขนาดความหนาแน่นน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ T60 และ T80 ซึ่งเป็นยางที่มีขนาดความหนาแน่นมากกว่าตามลำดับ พบว่าทั้งความถี่ 0.01 Hz. และ 1.0 Hz. ในช่วงระยะการเคลื่อนตัวเท่ากันยางที่มีความหนาแน่นน้อยให้ผลของการสลายพลังงานงานของระบบได้มากกว่ายางที่มีความหนาแน่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะการเคลื่อนตัวเท่ากัน

บทที่ 6

การจัดเตรียมอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบเหล็กเดือย

จากที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำชุดทดสอบยางที่รองรับสะพาน โดยในการทดสอบเหล็กเดือยได้ใช้ชุดทดสอบเดียวกันกับการทดสอบที่รองรับสะพาน โดยได้ติดตั้งชุดทดสอบเหล็กเดือยเพิ่มเข้าไปในชุดทดสอบที่รองรับสะพาน ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอรายละเอียดต่างๆของการจัดเตรียมชุดทดสอบเหล็กเดือย และรายละเอียดของการให้แรงในการทดสอบที่ใช้ในการทดสอบรวมทั้งขั้นตอนต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

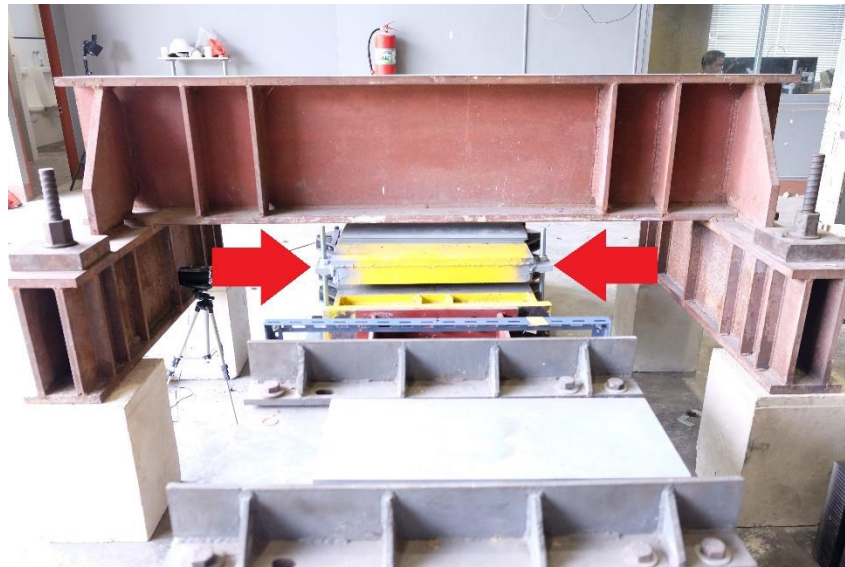
6.1 การจัดเตรียมชุดทดสอบเหล็กเดือย

6.1.1 ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดสอบเหล็กเดือย

จากการทดสอบยางที่รองรับสะพานได้นำเอาแผ่นเหล็กที่ประกบยาง มาทำการติดตั้งชุดทดสอบเหล็กเดือยเข้าไปทางด้านข้างของแผ่นเหล็กประกบสี่เหลี่ยม โดยทำการเชื่อมโครงสร้างเหล็กเข้าไปติดทางด้านข้างตามลูกศรแสดงในรูปที่ 6.1 โดยเชื่อมติดเข้าไปทั้งสองข้างของแผ่นประกบ และเชื่อมโครงสร้างเหล็กที่ใช้สำหรับทดสอบเหล็กเดือยเข้ากับแผ่นประกบสี่เหลี่ยมทั้งสามชุด โดยเชื่อมโครงสร้างเหล็กเข้าไปทั้งหมด 6 จุด และแสดงตำแหน่งติดตั้งเมื่อประกอบเข้าไปในชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 6.2



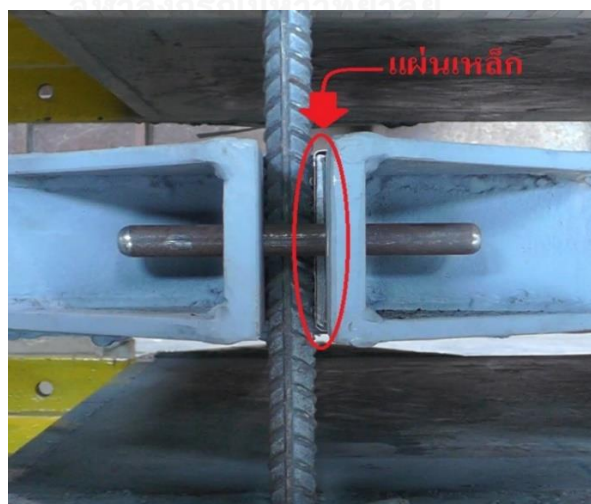
รูปที่ 6.1 แผ่นเหล็กประกบยางที่รองรับสะพาน



รูปที่ 6.2 ตำแหน่งการติดตั้งโครงสร้างเหล็กสำหรับทดสอบเหล็กเดียว

6.1.2 การติดตั้งเหล็กเดียว

การติดตั้งเหล็กเดียวเข้าไปในชุดสอบเหล็กเดียว สามารถนำเหล็กเดียวเข้าทางด้านข้างของชุดทดสอบและนำเหล็กเดียวเข้าไปในช่องใส่เหล็กเดียว ได้ทำการเสริมแผ่นเหล็กที่มีหลายขนาดเพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างในตำแหน่งของช่องใส่เหล็กเดียว เพื่อให้ได้รับแรงและระยะการเคลื่อนตัวที่กำหนดอย่างถูกต้อง โดยแสดงวิธีการเสริมแผ่นเหล็กเข้าไปในช่องว่างของช่องใส่เหล็กเดียวแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การเสริมแผ่นเหล็ก

ในขั้นตอนการติดตั้งเหล็กเดือยเข้าสู่ชุดทดสอบ ได้เสริมแผ่นเหล็กในช่องว่างเพื่อให้แน่นในทุกๆจุดและเสริมแผ่นเหล็กเข้าไปทั้งสองด้านของชุดการทดสอบและเมื่อติดตั้งเหล็กเดือยเข้าไปในชุดทดสอบทั้งสองด้านของชุดทดสอบจะแสดงได้ในรูปที่ 6.4 และ 6.5 ซึ่งเลือกใช้เหล็กติดตั้งเข้าไปสองด้านเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของแรงกระทำและป้องกันการเกิดแรงดัดที่สามารถเกิดขึ้นได้กับเครื่องให้แรงทางด้านข้าง



รูปที่ 6.4 การติดตั้งเหล็กเดือยทางด้านขวาของชุดทดสอบ



รูปที่ 6.5 การติดตั้งเหล็กเดือยทางด้านซ้ายมือของชุดทดสอบ

6.2 การตรวจวัดข้อมูลและบันทึกข้อมูล

ในการทดสอบเหล็กเดือย จะทำการบันทึกวิดีโอในทุกๆการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.6 โดยที่ผลของแรงและระยะการเคลื่อนสามารถบันทึกได้โดยตรงจากเครื่องให้แรงทางด้านข้าง (Actuator) เนื่องจากภายในเครื่องไฮดรอลิกมีเครื่องวัดแรง (Load cell) ติดตั้งอยู่ภายในเครื่องให้แรงแสดงในรูป

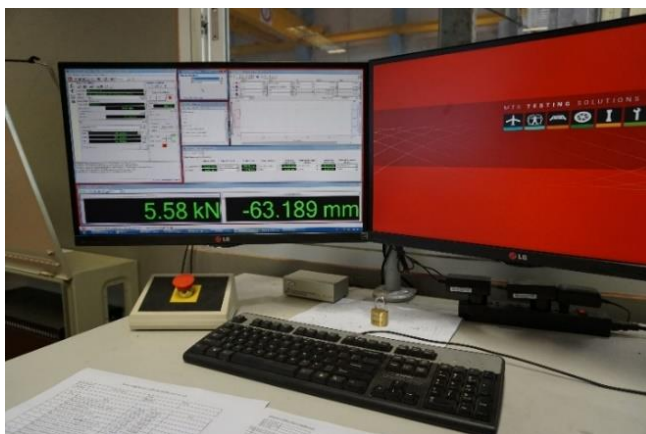
ที่ 6.7 ซึ่งเชื่อมต่อโดยตรงเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.8 โดยที่คอมพิวเตอร์จะบันทึกค่าต่างๆจากเครื่องวัดแรง (Load cell)



รูปที่ 6.6 การบันทึกภาพในระหว่างทดสอบ



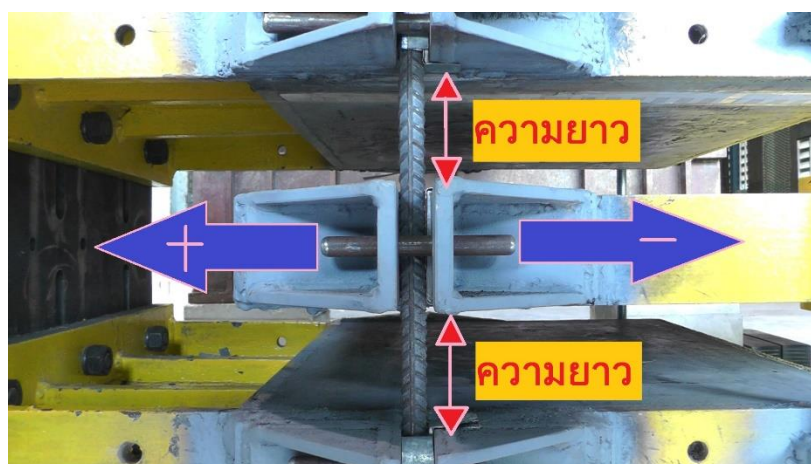
รูปที่ 6.7 เครื่องวัดแรงของเครื่องไฮดรอลิก



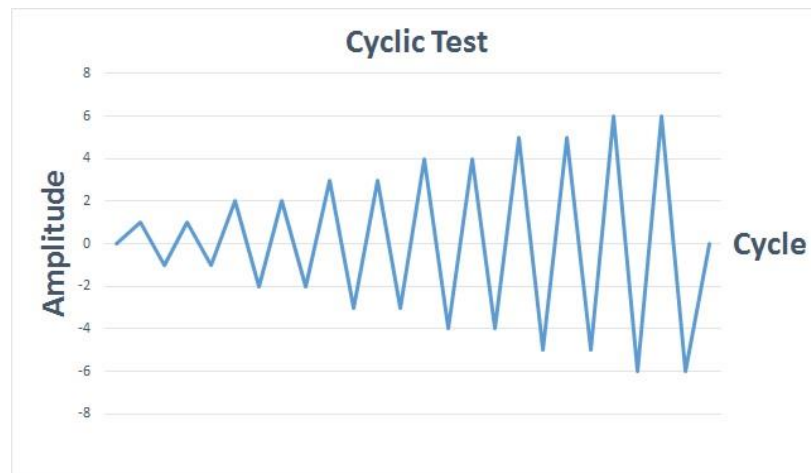
รูปที่ 6.8 คอมพิวเตอร์ควบคุมการทดสอบ

6.3 รูปแบบการให้แรงในการทดสอบเหล็กเตี้ย

ในการทดสอบเหล็กเตี้ยเป็นการทดสอบแบบวัฏจักร (Cyclic) แบบกลับไป – กลับมา โดยเป็นการให้แรงกระทำทางด้านข้างของเหล็กซึ่งกำหนดเป็นระยะการเคลื่อนตัว (Displacement control) ด้วยเครื่องให้แรง (Actuator) แสดงในรูปที่ 6.7 โดยในการทดสอบจะให้ระยะการเคลื่อนตัวกลับไป – กลับมา 2 รอบโดยในทุกระยะการเคลื่อนตัว กำหนดเป็นทิศทางสองทิศทาง การเคลื่อนตัวคือ ทิศทางบวกและทิศทางลบ แสดงในรูป 6.9 โดยมีระยะการเคลื่อนตัวที่กระทำกับเหล็กเตี้ยเริ่มต้นที่ 1 มิลลิเมตร และเพิ่มระยะการเคลื่อนตัวทีละ 1 มิลลิเมตร ไปจนกระทั่งเหล็กวิบัติ แสดงในรูปที่ 6.10 โดยที่ในการทดสอบเหล็กเตี้ยมีความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละการทดสอบ แสดงในตารางที่ 6.1 โดยที่ผลของแรงที่ได้จากการทดสอบจะทำการบันทึกจากเครื่องวัดแรงที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องให้แรง (Actuator) และเก็บข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผล



รูปที่ 6.9 ทิศทางการเคลื่อนตัวของ การทดสอบเหล็กเตี้ย



รูปที่ 6.10 รูปแบบการให้แรงในการทดสอบ

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดเหล็กเดือยที่ใช้ในการทดสอบ

Test	Specimen	Dowels size (mm.)	Length (mm.)
1	S12-60	DB12	60
2	S12-80	DB12	80
3	S16-60	DB16	60
4	S16-80	DB16	80

บทที่ 7

การทดสอบและเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองของเหล็กเดือย

ในบทนี้ผู้วิจัยนำเสนอการทดสอบแบบวัฏจักร กลับไป – กลับมา 2 รอบต่อระยะการเคลื่อนตัว โดยนำเสนอลักษณะการเสียรูปของเหล็กเดือยในระหว่างการทดสอบจนถึงระยะเคลื่อนตัวที่เหล็กเดือยเกิดการวิบัติ ซึ่งจะนำเสนอระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กเดือยที่ใช้ในการทดสอบ โดยเรียงลำดับการนำเสนอตัวอย่างทดสอบ S12-60, S12-80, S16-60, S16-80 และนำเสนอผลจากการทดสอบตามลำดับ

7.1 การทดสอบเหล็กเดือย

7.1.1 การทดสอบเหล็กเดือย S12-60

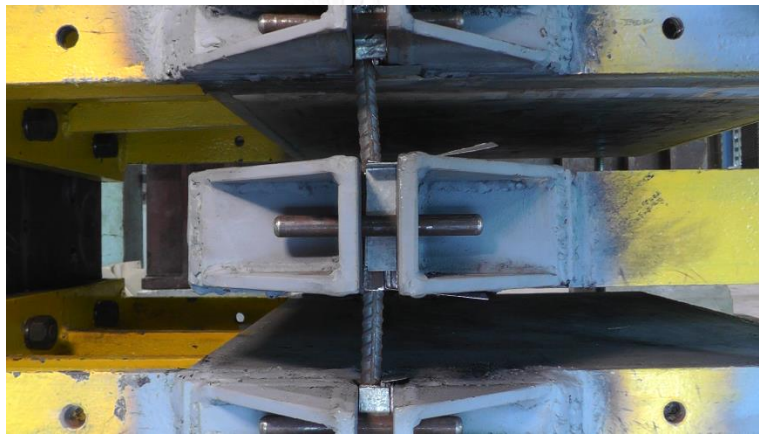
การทดสอบเหล็กเดือย S12-60 คือ เหล็กขนาด DB12 มิลลิเมตร โดยมีความยาวของเหล็กจากจุดยึดถึงจุดยึดเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะก่อนการเริ่มทดสอบแสดงในรูปที่ 7.1 และแสดงระยะการเคลื่อนตัว 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ไปจนถึงระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดแรงสูงสุดและระยะที่เหล็กเดือยเกิดการวิบัติตามลำดับ



รูปที่ 7.1 ลักษณะก่อนการทดสอบตัวอย่าง S12-60



รูปที่ 7.2 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60



รูปที่ 7.3 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.4 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60



รูปที่ 7.5 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-60

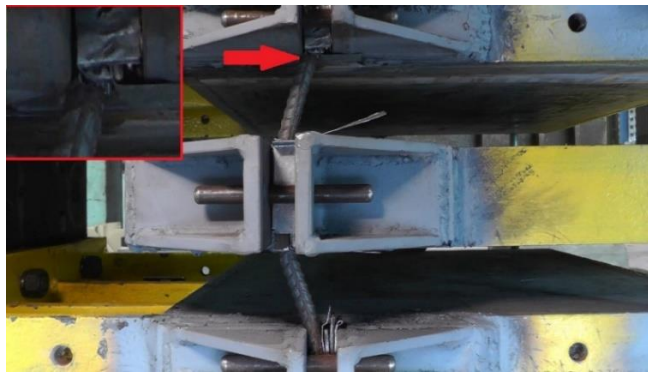
จากระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเดือย S12-60 พบว่าเหล็กรับกำลังเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตามระยะการเคลื่อนตัว และเพิ่มขึ้นไปจนถึงที่ระยะ 20 มิลลิเมตร พบว่าเป็นระยะที่เหล็กเดือยรับแรงสูงสุดแสดงในรูปที่ 7.6 และ 7.7 ในทิศทางบวกและลบตามลำดับ หลังจากนั้นแรงต้านทานของเหล็กเริ่มลดลงตามระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะการเคลื่อนตัวที่ 22 มิลลิเมตร เนื้อเหล็กเดือยมีการฉีก และขาดแยกออกจากกันในระยะการเคลื่อนตัวที่ 23 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.6 ระยะเคลื่อนตัว 20 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60



รูปที่ 7.7 ระยะเคลื่อนตัว 20 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-60



รูปที่ 7.8 ระยะเคลื่อนตัว 23 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-60

7.1.2 การทดสอบเหล็กเดือย S12-80

การทดสอบเหล็กเดือย S12-80 คือ เหล็กขนาด DB12 มิลลิเมตร โดยมีความยาวของเหล็กจากจุดยึดถึงจุดยึดเท่ากับ 80 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะก่อนการเริ่มทดสอบแสดงในรูปที่ 7.9 และแสดงระยะการเคลื่อนตัว 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ไปจนถึงระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดแรงสูงสุดและระยะที่เหล็กเดือยเกิดการวิบัติตามลำดับ



รูปที่ 7.9 ลักษณะก่อนการทดสอบตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.10 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.11 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.12 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.13 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.14 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.15 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80

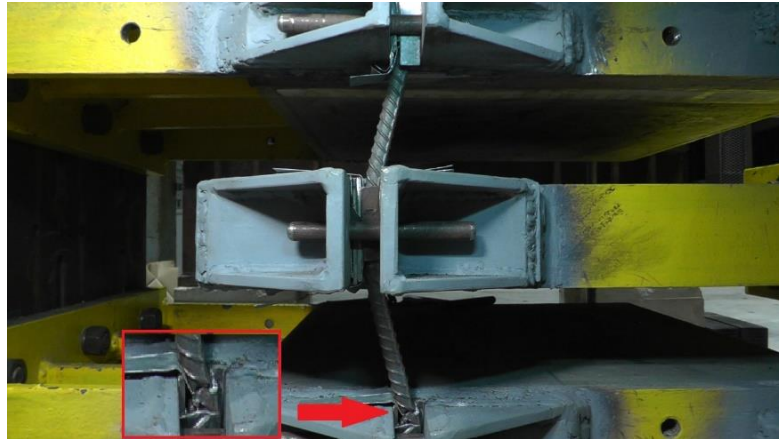
จากระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเดือย S12-80 พบเหล็กรับกำลังเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะการเคลื่อนตัว และเพิ่มขึ้นไปจนถึงที่ระยะ 21 มิลลิเมตร พบว่าเป็นระยะที่เหล็กเดือยรับแรงสูงสุดแสดงในรูปที่ 7.16 และ 7.17 ตามลำดับ หลังจากนั้นแรงต้านทานของเหล็กเริ่มลดลงตามระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะการเคลื่อนตัวที่ 26 มิลลิเมตร เนื้อเหล็กเดือยมีการฉีก และขาดแยกออกจากกันในระยะการเคลื่อนตัวที่ 28 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.16 ระยะเคลื่อนตัว 21 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.17 ระยะเคลื่อนตัว 21 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S12-80



รูปที่ 7.18 ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S12-80

7.1.3 การทดสอบเหล็กเดือย S16-60

การทดสอบเหล็กเดือย S16-60 คือ เหล็กขนาด DB16 มิลลิเมตร โดยมีความยาวของเหล็กจากจุดยึดถึงจุดยึดเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะก่อนการเริ่มทดสอบแสดงในรูปที่ 7.19 และแสดงระยะการเคลื่อนตัว 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ไปจนถึงระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดแรงสูงสุดและระยะที่เหล็กเดือยเกิดการวิบัติตามลำดับ



รูปที่ 7.19 ลักษณะก่อนการทดสอบตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.20 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.21 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.22 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.23 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.24 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.25 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-60

จากระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเดือย S16-60 พบเหล็กรับกำลังเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะการเคลื่อนตัว และเพิ่มขึ้นไปจนถึงที่ระยะ 19 มิลลิเมตร พบว่าเป็นระยะที่เหล็กเดือยรับแรงสูงสุดแสดงในรูปที่ 7.26 และ 7.27 ตามลำดับ หลังจากนั้นแรงต้านทานของเหล็กเริ่มลดลงตามระยะ

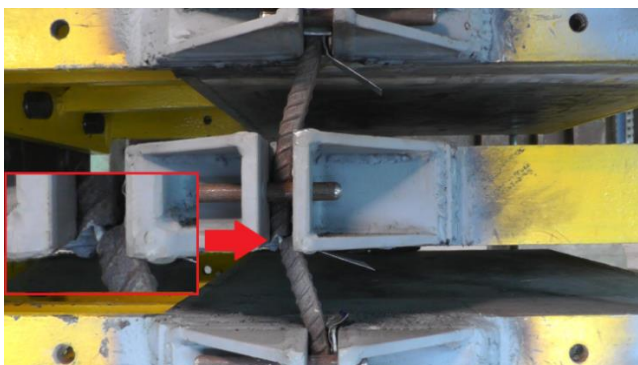
การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะการเคลื่อนตัวที่ 21 มิลลิเมตร เนื้อเหล็กเดียวมีการฉีก และขาด แยกออกจากกันในระยะการเคลื่อนตัวที่ 28 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 7.28



รูปที่ 7.26 ระยะเคลื่อนตัว 19 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.27 ระยะเคลื่อนตัว 19 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60



รูปที่ 7.28 ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-60

7.1.4 การทดสอบเหล็กเดือย S16-80

การทดสอบเหล็กเดือย S16-80 คือ เหล็กขนาด DB16 มิลลิเมตร โดยความยาวของเหล็ก จากจุดยึดถึงจุดยึดเท่ากับ 80 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะก่อนการเริ่มทดสอบแสดงในรูปที่ 7.29 และแสดง ระยะการเคลื่อนตัว 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ไปจนถึงระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดแรงสูงสุดและระยะที่ เหล็กเดือยเกิดการวิบัติตามลำดับ



รูปที่ 7.29 ลักษณะก่อนการทดสอบเหล็กเดือย S16-80



รูปที่ 7.30 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80



รูปที่ 7.31 ระยะเคลื่อนตัว 5 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80



รูปที่ 7.32 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80



รูปที่ 7.33 ระยะเคลื่อนตัว 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80



รูปที่ 7.34 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80



รูปที่ 7.35 ระยะเคลื่อนตัว 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80

จากระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเดือย S16-80 พบเหล็กรับกำลังเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะการเคลื่อนตัว และเพิ่มขึ้นไปจนถึงที่ระยะ 22 มิลลิเมตร พบว่าเป็นระยะที่เหล็กเดือยรับแรงสูงสุดแสดงในรูปที่ 7.36 และ 7.37 ตามลำดับ หลังจากนั้นแรงต้านทานของเหล็กเริ่มลดลงตามระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะการเคลื่อนตัวที่ 24 มิลลิเมตร เนื้อเหล็กเดือยมีการฉีก และขาดแยกออกจากกันในระยะการเคลื่อนตัวที่ 28 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 7.38



รูปที่ 7.36 ระยะเคลื่อนตัว 22 มิลลิเมตร ในทิศทางบวกของตัวอย่าง S16-80

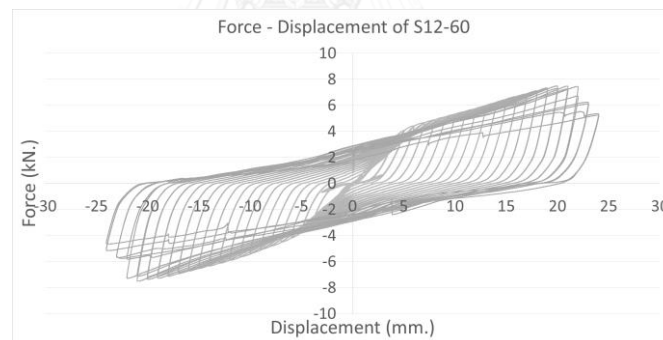


รูปที่ 7.37 ระยะเคลื่อนตัว 22 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80

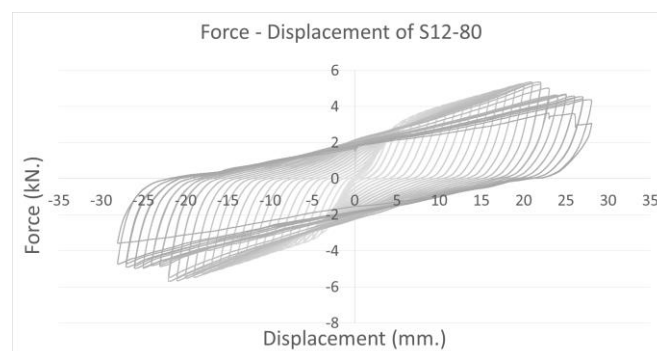


รูปที่ 7.38 ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร ในทิศทางลบของตัวอย่าง S16-80

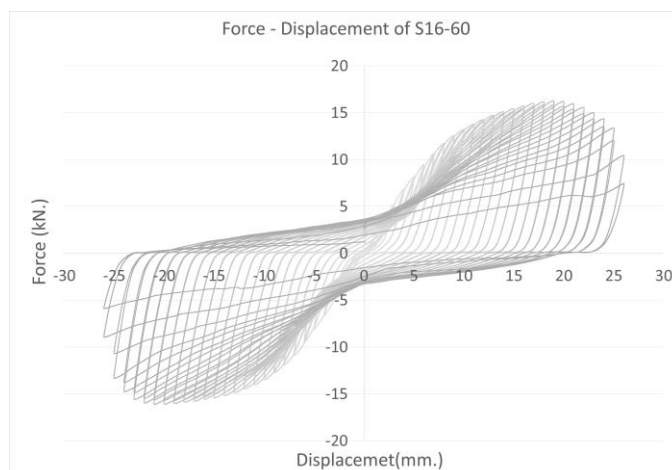
เมื่อทำการทดสอบเสร็จ ได้นำผลของแรงที่ได้จากการบันทึกของเครื่องบันทึก มาพล็อตกราฟ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กเดือย S12-60, S12-80, S16-60 และ S16-80 ตามลำดับ เพื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม โดยแสดงในรูปที่ 7.39 ถึง 7.41 ตามลำดับ



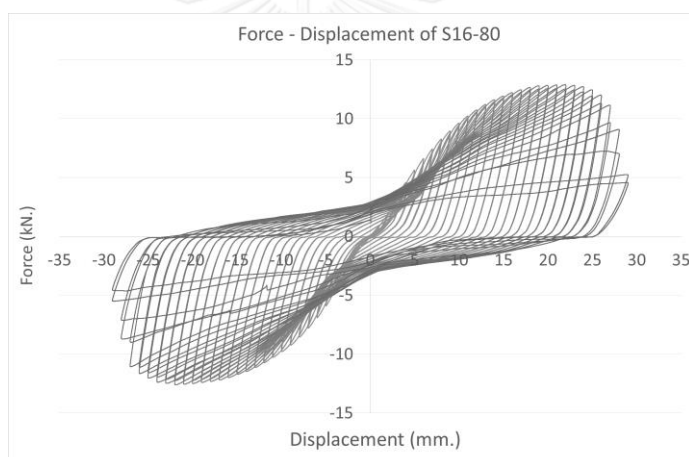
รูปที่ 7.39 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S12-60



รูปที่ 7.40 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S12-80



รูปที่ 7.41 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S16-60



รูปที่ 7.42 แรงกับระยะการเคลื่อนตัวของ S16-80

7.2 การทดสอบแรงดึง

เหล็กเดือยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 2 ขนาด ซึ่งเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. (DB12) เป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 มีกำลังที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 กก./ซม². และเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. (DB16) เป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 มีกำลังที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 กก./ซม². โดยทดสอบตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเดือย (f_y), กำลังรับแรงดึงประลัย (f_{su}), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (E_s) เพื่อจะนำผลจากการทดสอบไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมจากด้วยโปรแกรม ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2



รูปที่ 7.43 การทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 7.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

ตัวอย่างทดสอบ	f_y (กก./ตร.ซม.)	f_{su} (กก./ตร.ซม.)	E_s (กก./ตร.ซม.)
1	4951.5	6366	2.0×10^6
2	4951.4	6764	2.0×10^6
ค่าเฉลี่ย	4951	6587	2.0×10^6

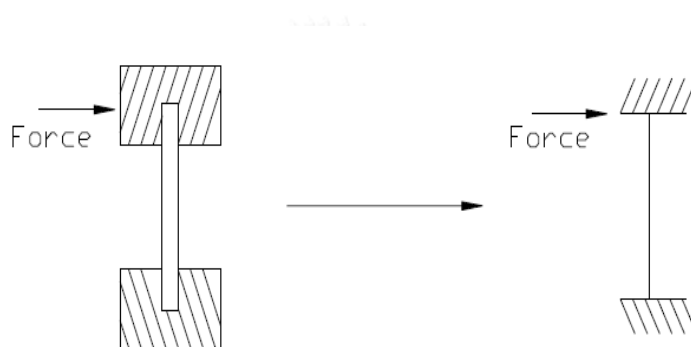
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม.

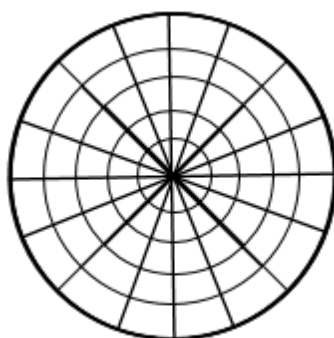
ตัวอย่างทดสอบ	f_y (กก./ตร.ซม.)	f_{su} (กก./ตร.ซม.)	E_s (กก./ตร.ซม.)
1	5869	6839	2.0×10^6
2	4576	6491	2.0×10^6
3	4277	6440	2.0×10^6
ค่าเฉลี่ย	4907	6590	2.0×10^6

7.3 การสร้างแบบจำลองของเหล็กเดือยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

ในโครงสร้างมีคานที่ตัดผ่านหัวเสาต่อม่อของสะพานโดยถูกแบ่งเป็นสองฝั่งคือ ฝั่งอิสระ (Free) และฝั่งมีเหล็กเดือย (Fixed) ไว้สำหรับวางโครงสร้างสร้างสะพานส่วนบน โดยเหล็กเดือยจะติดตั้งอยู่ระหว่างคานพาดหัวเสาต่อม่อกับโครงสร้างสะพานส่วนบน โดยทำหน้าที่ช่วยในการรั้งโครงสร้างส่วนบนไม่ให้ตกจากยางรองสะพานเมื่อเกิดการรับแรงทางด้านข้าง ซึ่งเหล็กเดือยมีระยะยึดรั้ง (Fixed length) เท่ากับความหนาของยางรองสะพานโดยในการสร้างแบบจำลองว่าเหล็กเดือยถูกยึดรั้งแน่น (Fixed) ให้เหมือนกับที่เหล็กเดือยติดตั้งอยู่ในสะพานดังแสดงในรูปที่ 7.44 โดยมีระยะยึดรั้งที่เปลี่ยนไปตามขนาดความหนาของยางที่ใช้ในการทดสอบคือ 60 มิลลิเมตร และ 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.44 การสร้างแบบจำลองของเหล็กเดือย



รูปที่ 7.45 แบบจำลองหน้าตัดไฟเบอร์ของเหล็กเดือย

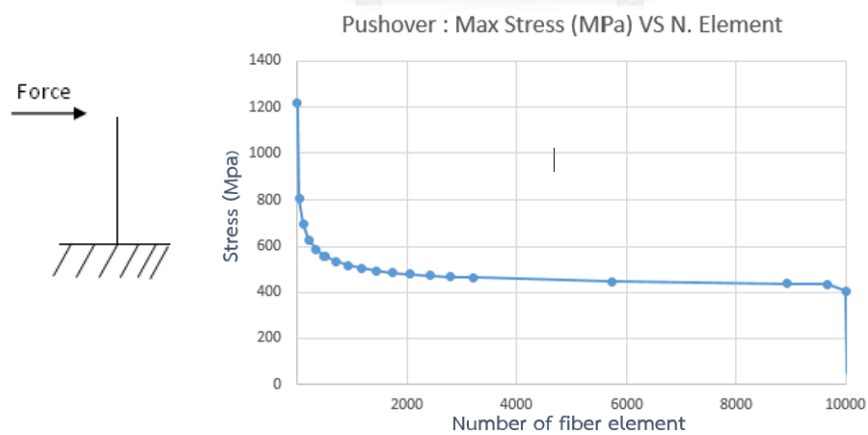
ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โดยได้สร้างแบบจำลองของเหล็กเดือยเป็นแบบไฟเบอร์ โดยแบ่งย่อยเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ โดยมีตัวแปรที่จำเป็นในการวิเคราะห์คือ ขนาดเหล็กเดือย ช่วงความยาวของเหล็กและกำลังรับแรงดึงของเหล็กเดือยที่ได้จากการทดสอบแรงดึง โดยเหล็กเดือยที่ถูกสร้างเป็นแบบจำลองเป็นเหล็กข้ออ้อยที่มีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองของเหล็กเดือย

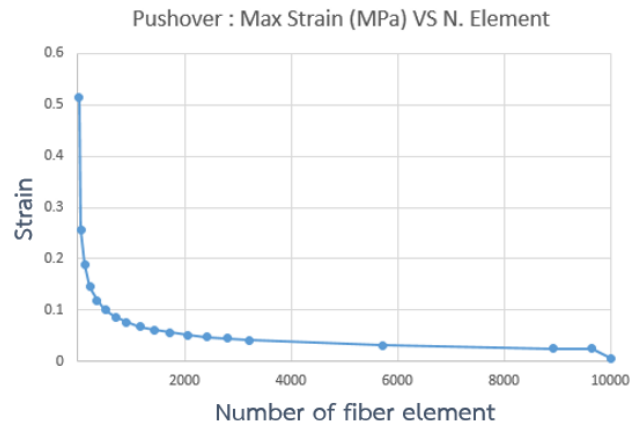
เส้นผ่านศูนย์กลาง ของเหล็กเดือย (มม.)	ระยะยัดตั้งของเหล็ก เดือย (มม.)	กำลังรับแรงดึงที่จุด ครากของเหล็กเดือย จากการทดสอบ (กก./ตร.ซม.)
12	60	4950
	80	
16	60	4950
	80	

7.3.1 การตรวจสอบจำนวนไฟเบอร์ที่เหมาะสม

การตรวจสอบปริมาณไฟเบอร์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลที่ดี จาก
การวิเคราะห์โดยให้แรงกระทำทางด้านข้างและเพิ่มปริมาณไฟเบอร์



รูปที่ 7.46 ความเค้นสูงสุดเทียบกับจำนวนไฟเบอร์

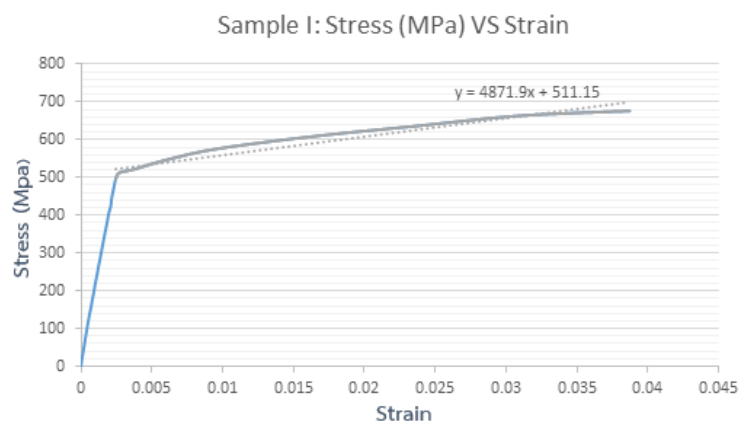


รูปที่ 7.47 ความเครียดสูงสุดเทียบกับจำนวนไฟเบอร์

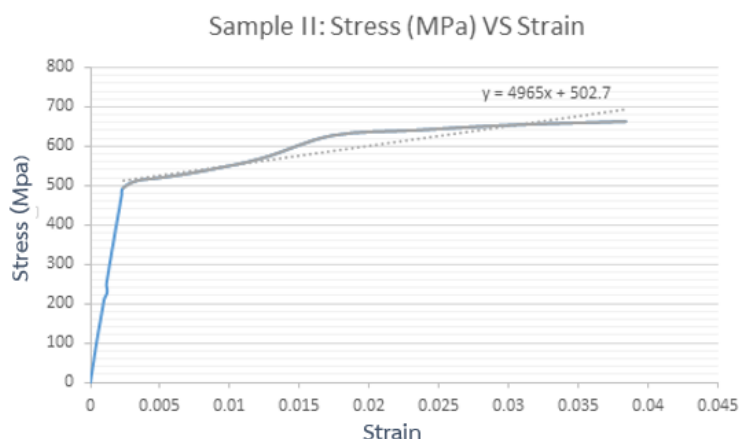
ผลจากการวิเคราะห์พบว่าโดยการเพิ่มปริมาณไฟเบอร์ พบว่าช่วงปริมาณไฟเบอร์ที่ทำให้ความเค้นและความเครียดได้ผลที่ดี อยู่ในช่วงประมาณ 6000 ถึง 8000 แสดงในรูปที่ 7.46 และ 7.47 โดยที่เพิ่มปริมาณไฟเบอร์เกิน 10000 ทำให้โปรแกรมไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ (Error)

7.3.2 การสร้างแบบจำลองของเหล็กเดี่ยวเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดึง

หาค่าความเค้นที่จุดครากและค่าความเครียดที่จุดครากจากการทดสอบแรงดึง (Tension) ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง DB12 SD40 จากตัวอย่างที่ 1 และ 2 และหาค่าโมดูลัสของเหล็กหลังเกิดการครากของเหล็กที่เปลี่ยนไป โดยนำผลของความเค้นและความเครียด มาพล็อตค่า แล้วหาค่าเฉลี่ยจากทั้งสองตัวอย่าง



รูปที่ 7.48 ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 7.49 ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ 2

เหล็กตัวอย่างที่ 1 มีค่าความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 495.15 MPa และ มีค่าความเครียดที่จุดครากเท่ากับ 0.002435 โดยค่าเฉลี่ยของโมดูลัสหลังการเกิดความเค้นที่จุดครากที่แสดงในเส้นสีเทาหาได้จากเส้นเทรนที่อยู่ในรูปสมการ $y = mx + c$ มีค่ากับ 4871.9 Mpa โดยค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าโมดูลัสหลังจากจุดครากเท่ากับ $(4872 / 200000) \times 100 = 2.43 \%$

เหล็กตัวอย่างที่ 2 มีค่าความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 495.15 Mpa และมีค่าความเครียดที่จุดครากเท่ากับ 0.00236 โดยค่าเฉลี่ยของโมดูลัสหลังการเกิดความเค้นที่จุดครากหาได้จากเส้นเทรนที่อยู่ในรูปสมการ $y = mx + c$ มีค่ากับ 4965 Mpa โดยค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าโมดูลัสหลังจากความเค้นจุดคราก เท่ากับ $(4965/200000) \times 100 = 2.48 \%$

หาค่าเฉลี่ยของความเค้นที่จุดคราก, ความเครียดที่จุดคราก และตัวคูณลดกำลังเพื่อนำไปเป็นค่าในการสร้างแบบจำลองเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบเพื่อตรวจเช็คความถูกต้องของแบบจำลอง

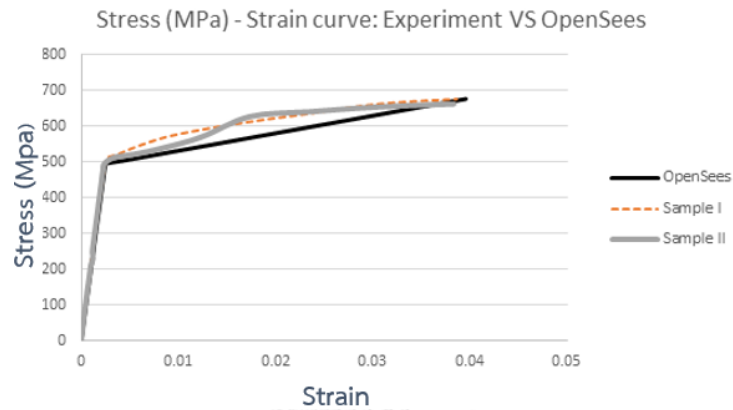
$$f_y = \frac{495.15 + 495.14}{2} = 495.145 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = \frac{0.002435 + 0.00236}{2} = 0.00239$$

$$E = \frac{4872 + 4965}{2} = 4918.5 \text{ MPa}$$

$$\text{ตัวคูณลดกำลัง เท่ากับ } b = \frac{4918.5}{200000} = 2.45\%$$

เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลจากแบบจำลองโดยแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ ความเค้น – ความเครียด แสดงในรูปที่ 7.50

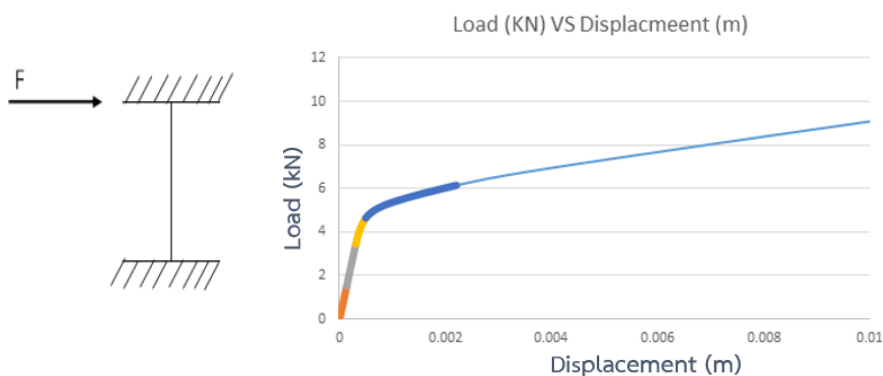


รูปที่ 7.50 เปรียบเทียบความเค้นและความเครียด

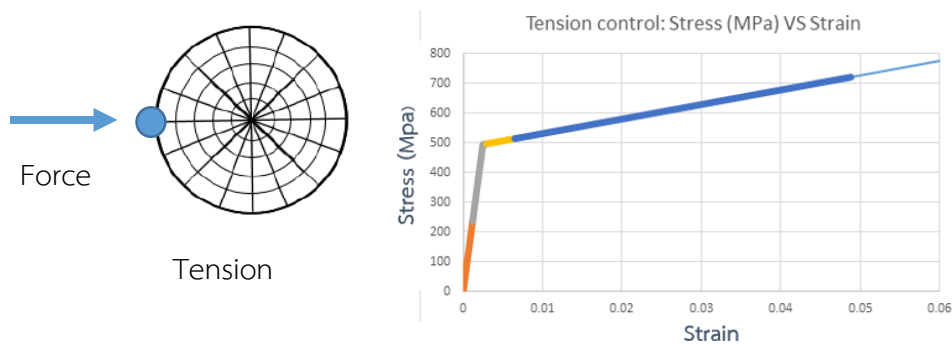
ผลจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น – ความเครียด จากการทดสอบกับผลจากการสร้างแบบจำลองให้ผลที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นผลของคุณสมบัติที่มาจากวัสดุเดียวกัน

7.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองโดยให้แรงทางด้านข้าง

การวิเคราะห์แบบจำลองโดยให้แรงทางด้านข้าง เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น – ความเครียด กับ แรง – ระยะการเคลื่อนตัว ที่ตำแหน่งต่างกันโดยแบ่งเป็น เส้นสี่เหลี่ยม เส้นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเส้นน้ำเงินเข้ม เพื่อดูผลของ แรง – ระยะการเคลื่อนตัว ในแต่ละจุดเทียบกับผลที่ ความเค้น – ความเครียด ที่เกิดขึ้นในจุดเดียวกัน เพื่อให้ทราบผลการเปลี่ยนแปลงของเหล็กไปจนถึงจุดที่แรงและระยะการเคลื่อนตัวที่ทำให้เหล็กเกิดความเค้นที่จุดคราก



รูปที่ 7.51 ผลแรงกับระยะการเคลื่อนตัวจากแบบจำลอง

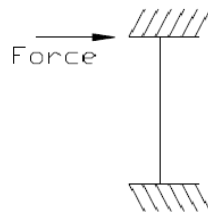


รูปที่ 7.52 ความเค้นและความเครียดด้านรับแรงดึง

โดยอธิบายได้ดังนี้

จุดที่ 1 เส้นสีส้มเป็นจุดที่เริ่มเกิดแรงในหน้าตัดโดยหน้าตัดยังไม่เกิดการคราก จุดที่ 2 เส้นที่เทาเป็นจุดที่แรงเพิ่มมากขึ้นโดยที่หน้าตัดด้านที่รับแรงดึงเริ่มเกิดการคราก จุดที่ 3 เส้นสีเหลืองเป็นจุดที่สติฟเนสเริ่มลดลงโดยที่หน้าตัดด้านที่รับแรงดึงเกิดการครากไปในจุดก่อนหน้าแล้ว และเป็นจุดที่โมดูลัสของเหล็กลดลงโดยหน้าตัดด้านที่รับแรงอัดเริ่มรับมีความเค้นเกิดขึ้น จุดที่ 4 เส้นสีน้ำเงินเข้ม เป็นจุดที่สติฟเนสลดลงมาก และการความเค้นด้านที่รับแรงดึงลดลงมากเนื่องจากเกิดการครากของหน้าตัดด้านที่รับแรงไปแล้ว ส่งผลให้ความเค้นในหน้าตัดด้านที่รับแรงอัดเพิ่มขึ้น

เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จแล้วทำการตรวจเช็คเปรียบเทียบผลจากโปรแกรมกับการคำนวณและค่าการผลการทดสอบ โดยทำการหาค่าสติฟเนสเริ่มต้น (initial stiffness) ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่ในช่วงอีลาสติกที่สามารถคำนวณตรวจเช็คด้วยมือได้ดังนี้



$$K = \frac{12EI}{L^3} = \frac{12 \times 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \times 1.017 \times 10^{-9} \text{ m}^4}{0.06^3 \text{ m}} = 11300 \text{ kN/m}$$

โดยในแบบจำลองของเหล็กเต็ยเพื่อหาค่าสติฟเนสเริ่มต้น (initial stiffness) ได้ทำการให้แรง แบบ Static load ก่อนที่โปรแกรมจะทำการให้แรงแบบการควบคุมระยะการเคลื่อนตัว (Displacement control) ไปจนเหล็กเข้าสู่ช่วงที่พฤติกรรมการรับแรงของเหล็กเต็ยไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear)

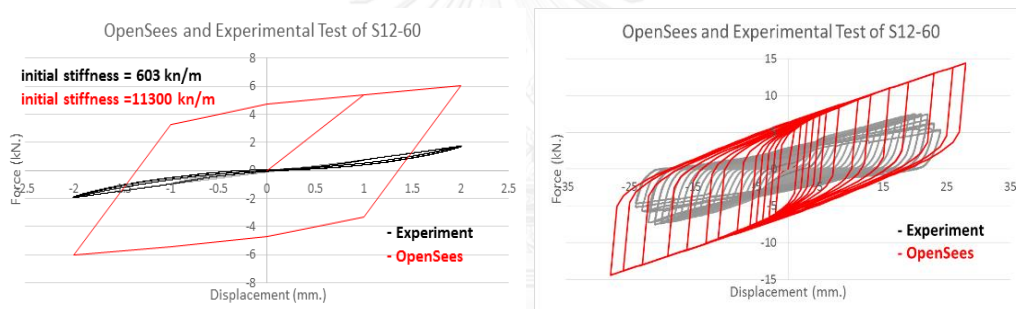
โดยสรุปค่า สติฟเนสเริ่มต้น (initial stiffness) ได้ดังนี้

$$K_{\text{hand}} = 11300 \text{ kN/m}$$

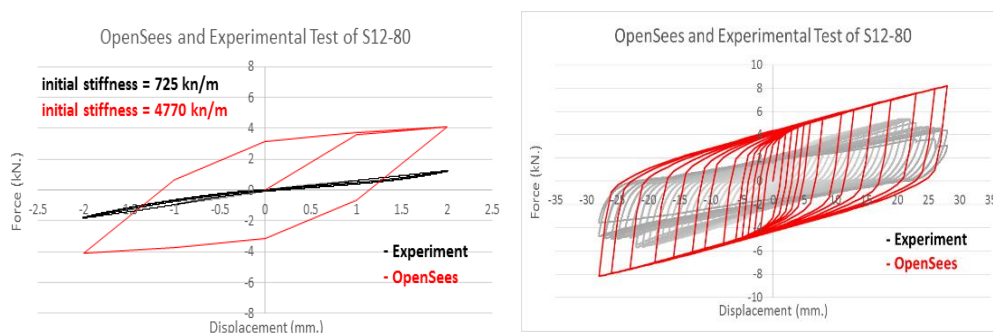
$$K_{\text{OpenSees}} = 11300 \text{ kN/m}$$

$$K_{\text{Test}} = 603 \text{ kN/m}$$

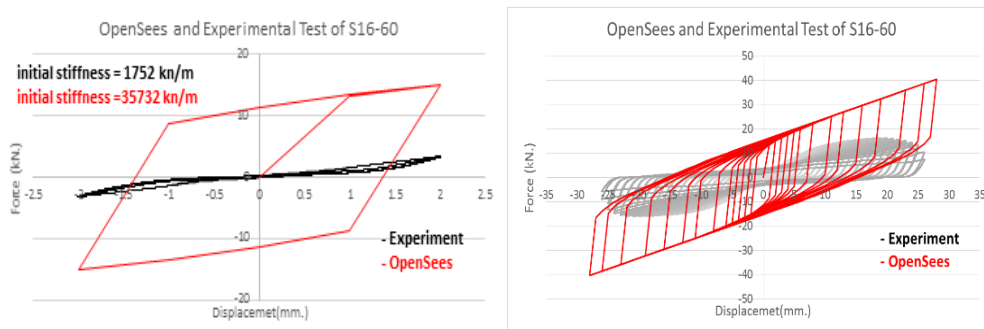
โดยต่อไปได้นำเสนอวงรอบฮีสเทอรีซิส (Hyteresis loop) ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สร้างแบบจำลอง พบว่าวงรอบฮีสเทอรีซิสมีความแตกต่างกัน โดยเส้นสีแดงคือวงรอบฮีสเทอรีซิสที่ได้จากโปรแกรม OpenSees และวงรอบสีดำคือวงรอบฮีสเทอรีซิสที่ได้จากการทดสอบเหล็กเดี่ยวของตัวอย่าง S12-60, S12-80, S16-60 และ S16-80 ดังแสดงในรูปที่ 7.53, 7.55, 7.56 และ 7.56 ตามลำดับ



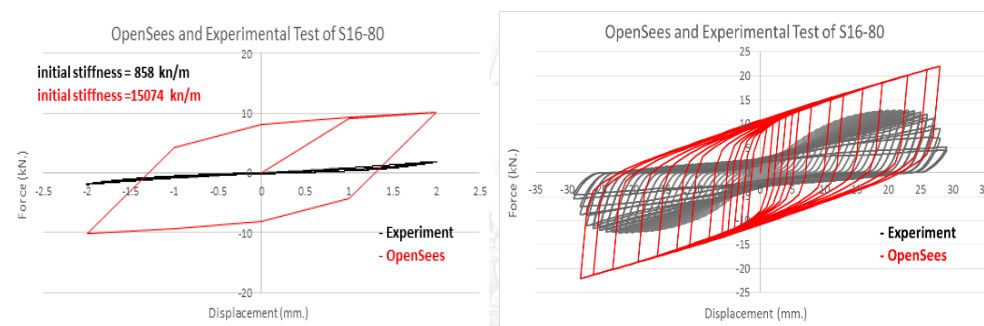
รูปที่ 7.53 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S12-60



รูปที่ 7.54 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S12-80



รูปที่ 7.55 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S16-60



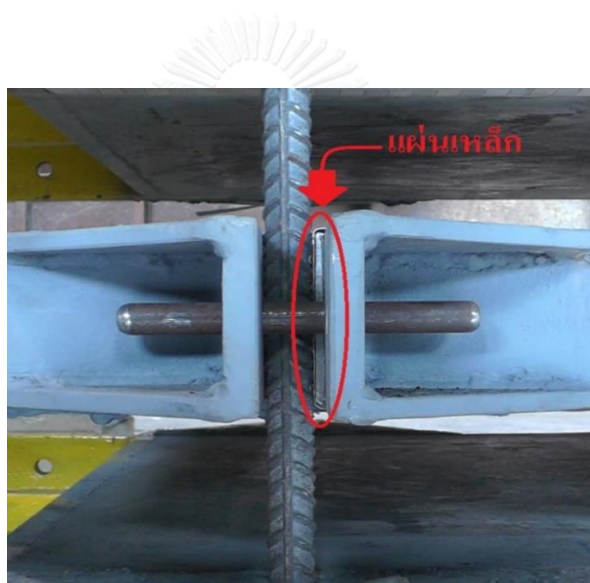
รูปที่ 7.56 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดสอบของ S16-80

จากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและผลจากการทดสอบ พบว่ามีความแตกต่างกันโดยพบว่าผลของเหล็กเดียวจากแบบจำลองมีวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ใหญ่กว่าผลจากการทดสอบ เนื่องจากในการสร้างแบบจำลองอยู่ภายใต้ความสมบูรณ์แบบของสมมติฐาน โดยที่ในส่วนของ การทดสอบไม่สามารถทำให้อยู่ภายใต้ความสมบูรณ์แบบของสมมติฐานได้ร้อยเปอร์เซ็นต์เหมือนกับแบบจำลอง เนื่องจากในการทดสอบเมื่อมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการยึดตัวที่อยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น (nonlinear) ของเหล็กจึงทำให้ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กมีขนาดลดลงตาม ทำให้ชิ้นส่วนแผ่นเหล็กที่เสริมเข้าไปในช่องการติดตั้งของเหล็กเดียวในการทดสอบ

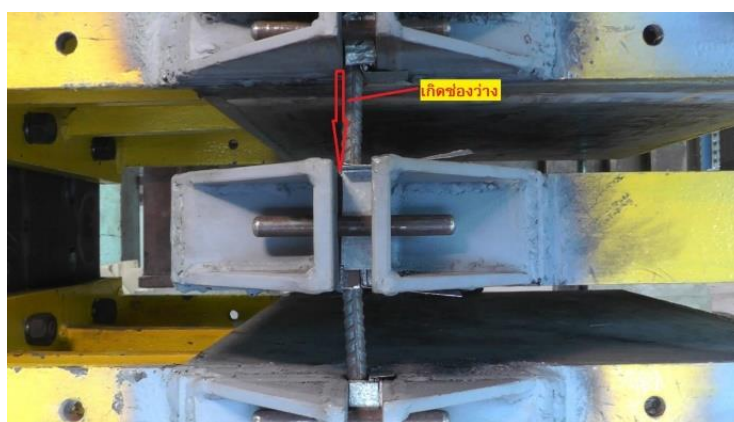
จากการสร้างแบบจำลองให้แรงกระทำแบบกลับไป กลับ - กลับมา โดยเปรียบเทียบกับระหว่างความสัมพันธ์ของ แรง - ระยะการเคลื่อนตัว โดยพบว่าเกิดความแตกต่างกันของ ฮิสเทอรีซิส (Hysteris loop) และผลของสตีเฟนช่วงแรกมีความชันแตกต่างกันมาก โดยมีสาเหตุโดยสรุปได้ดังนี้

สาเหตุโดยสรุปที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันของสตีเฟนตั้งแต่จุดเริ่ม โดยผลที่สตีเฟนเกิดความชันมากหรือน้อยเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ของ แรง - ระยะการเคลื่อนตัว โดยอธิบายได้ว่า

1. แบบจำลองได้ผลที่สมบูรณ์แบบของสมมติฐาน และความสัมพันธ์ของ แรง – ระยะการเคลื่อนตัว ที่ได้เป็นค่าที่แม่นยำ โดยเป็นผลของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะ มาจากระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงของเหล็กในการสร้างแบบจำลอง
2. ในการทดสอบผลที่ได้จากการทดสอบแล้วนำมาพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง แรง – ระยะการเคลื่อนตัว เป็นผลที่มาจาก การอ่านบันทึกข้อมูลจากเครื่องทดสอบ โดยผลระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กที่สัมพันธ์กับแรงกระทำไม่เหมือนการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากระยะที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนตัวเป็นระยะของเครื่องตรวจวัดไม่ใช่การระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กอย่างสมบูรณ์ และยังพบว่า ระหว่างการทดสอบเหล็กเดียว แผ่นเหล็กที่เสริมในช่องว่างของการติดตั้งเหล็กเดี่ยวถูกบีบให้ยุบตัวเล็กน้อยและทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างเหล็กเดียวกับแผ่นเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 7.57 และรูปที่ 7.58

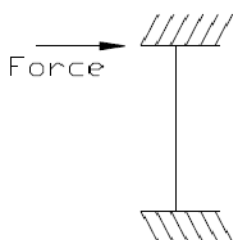


รูปที่ 7.57 ลักษณะการเสริมเหล็กในช่อง



รูปที่ 7.58 การเกิดช่องว่างระหว่างการทดสอบ

โดยทำการทดลองเปลี่ยนระยะความยาวของเหล็กเดือยโดยตั้งสมมติฐานจากเหล็กที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวเนื่องการจากเกิดการหลวมของแผ่นเหล็กเสริม โดยทดลองเพิ่มระยะจากความยาวเดิมไปอีก ช่วงละ 1 ซม. จะได้ดังนี้



$$K = \frac{12EI}{L^3} = \frac{12 \times 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \times 1.017 \times 10^{-9} \text{ m}^4}{0.08^3 \text{ m}} = 4767.18 \text{ kN/m}$$

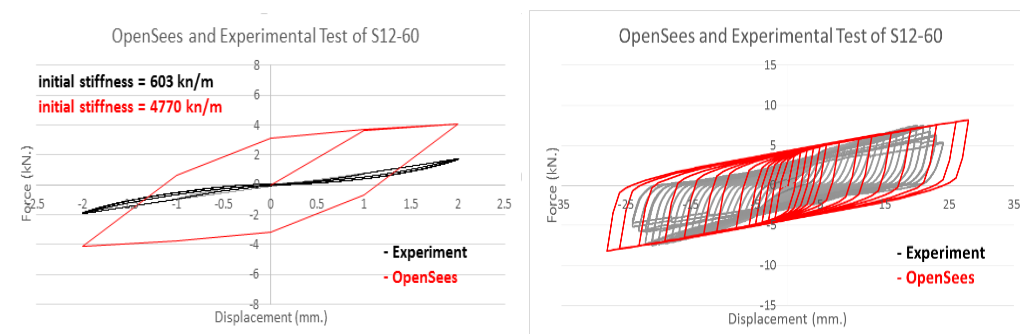
โดยสรุปค่าสติฟเนสเริ่มต้น (initial stiffness) ได้ดังนี้

$$K_{\text{hand}} = 4767.18 \text{ kN/m}$$

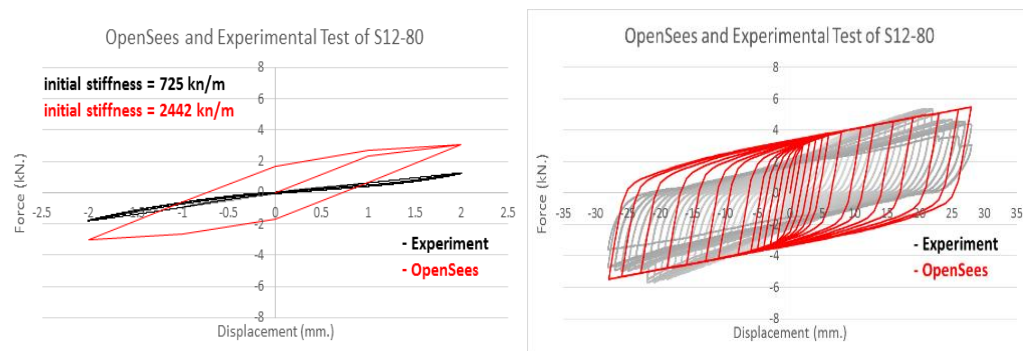
$$K_{\text{openSees}} = 4770 \text{ kN/m}$$

$$K_{\text{Test}} = 603 \text{ kN/m}$$

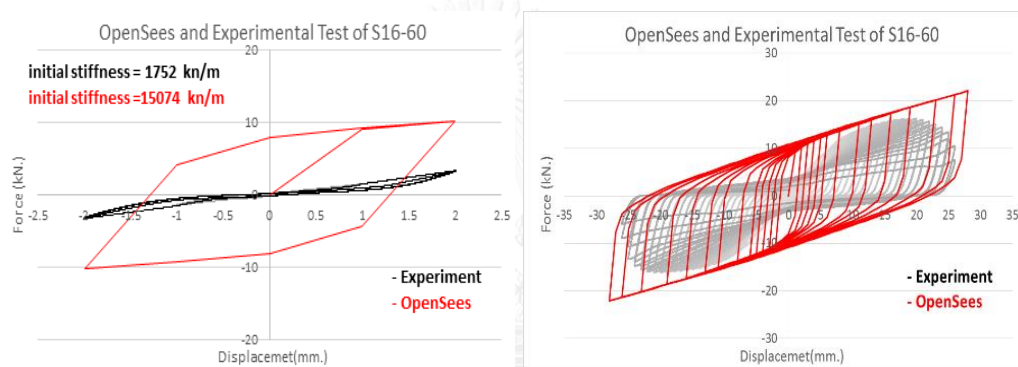
โดยต่อไปได้นำเสนอวงรอบฮีสเทอรีซิส (Hysterisis loop) ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัวที่ทำการปรับแก้ความยาวโดยประมาณ ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สร้างแบบจำลอง พบว่าวงรอบฮีสเทอรีซิสมีความเทียบเคียงกันมากขึ้น โดยเส้นสีแดงคือวงรอบฮีสเทอรีซิสที่ได้จากโปรแกรม OpenSees และวงรอบสีดำคือวงรอบฮีสเทอรีซิสที่ได้จากการทดสอบเหล็กเดือยของตัวอย่าง S12-60, S12-80, S16-60 และ S16-80 ดังแสดงในรูปที่ 7.59, 7.60, 7.61 และ 7.62 ตามลำดับ



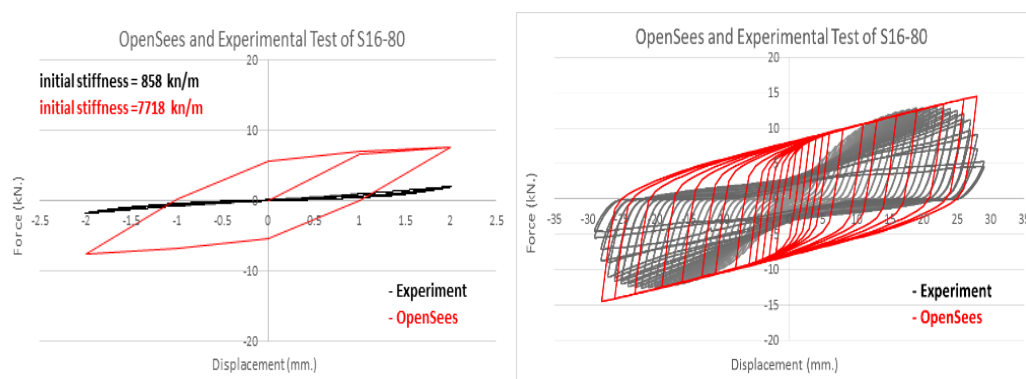
รูปที่ 7.59 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S12-60



รูปที่ 7.60 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S12-80

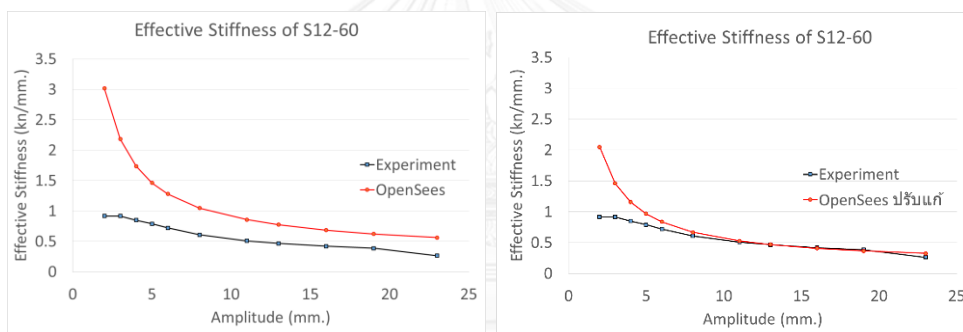


รูปที่ 7.61 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S16-60

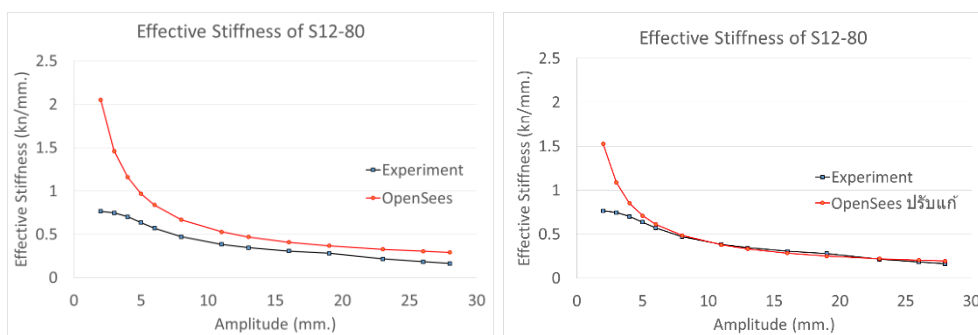


รูปที่ 7.62 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ปรับแก้และการทดสอบของ S16-80

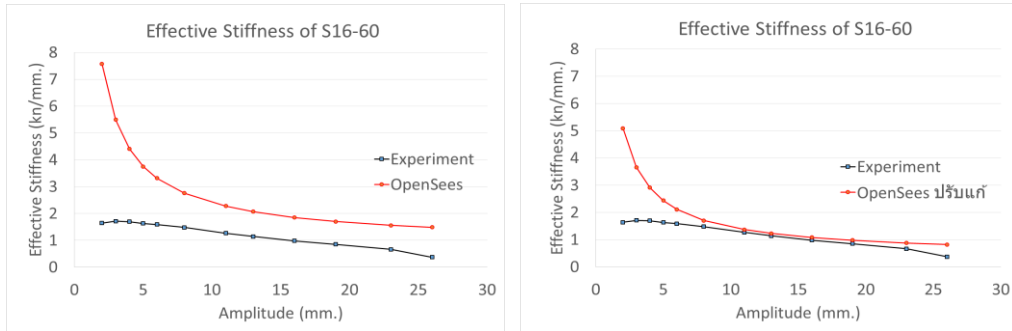
เมื่อพิจารณาผลของสติฟเนสประสิทธิภาพ (Effective Stiffness) ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง และจากแบบจำลอง โดยเส้นสีแดงคือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองและเส้นสีดำคือผลจากการทดสอบตัวอย่างจริง โดยเปรียบเทียบระหว่างผลของการทดสอบกับผลจากแบบจำลอง และเปรียบเทียบระหว่างผลของการทดสอบกับผลจากแบบจำลองที่ทำการปรับแก้ความยาว พบว่าสติฟเนสประสิทธิภาพจากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าผลจากแบบจำลองในช่วงที่มีระยะการเคลื่อนตัวน้อย เนื่องจากแบบจำลองให้ผลที่แม่นยำของแรงและระยะการเคลื่อนตัวโดยที่ผลจากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากระยะที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนตัวเป็นระยะของเครื่องตรวจวัดไม่ใช่การระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กอย่างสมบูรณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการทดสอบ จึงทำให้แรงที่สัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนตัวเกิดความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและผลจากการทดสอบ และพบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองที่ปรับแก้ความยาวกับผลจากการทดสอบ สติฟเนสประสิทธิภาพมีความเทียบเคียงกันมากขึ้น แสดงในรูปที่ 7.63 ถึงรูปที่ 7.66



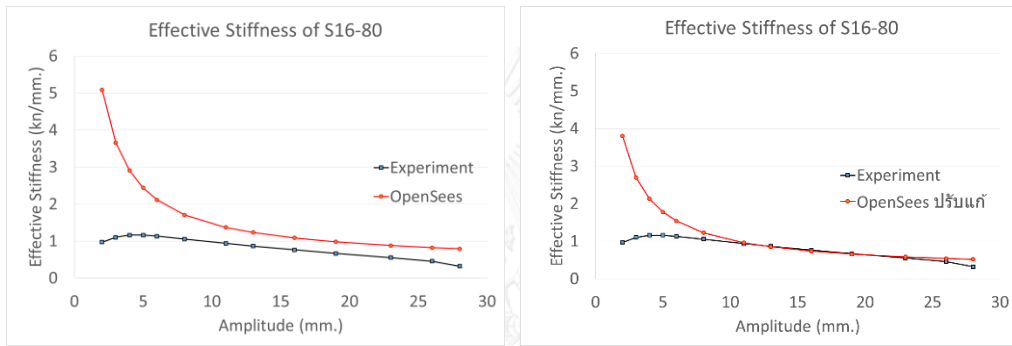
รูปที่ 7.63 สติฟเนสประสิทธิภาพของแบบจำลองและการทดสอบของ S12-60



รูปที่ 7.64 สติฟเนสประสิทธิภาพของแบบจำลองและการทดสอบของ S12-80



รูปที่ 7.65 สถิติประสิทธิภาพของแบบจำลองและการทดสอบของ S16-60



รูปที่ 7.66 สถิติประสิทธิภาพของแบบจำลองและการทดสอบของ S16-80

บทที่ 8

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้จำลองชุดทดสอบแผ่นยางลองสะพานโดยจำลองพฤติกรรมการรับแรงที่เกิดขึ้นจริงในสะพานช่วงความยาว 20 เมตร เพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นจริง โดยมีการให้แรงในแนวตั้งเท่ากับน้ำหนักจริงที่มาจากโครงสร้างส่วนบนของสะพาน และมีการให้ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของยางรองสะพานแบบกลับไป-กลับมา (Cyclic Test) โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอความสัมพันธ์ในรูปแบบของแรงและระยะเคลื่อนตัวของยางโดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ และระยะของการเคลื่อนตัว จากการทดสอบพบว่ายางมีพฤติกรรมแบบวัฏจักรโดยมีลักษณะเป็นวงรีเอียง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและมีคุณสมบัติเป็นตัวหน่วง โดยผลจากการทดสอบและวิเคราะห์ผลเป็นผลรวมของระบบในการทดสอบนี้ โดยแรงทั้งหมดรวมผลของแรงเสียดทานและผลจากยางเกิดการเลื่อนไถลเข้าไปด้วย โดยสรุปได้ดังนี้

1) การจากทดสอบที่รองรับทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการทดสอบแบบวัฏจักร กลับไป-กลับมา โดยให้แรงในแนวตั้งคงที่ โดยในแต่ละระยะการเคลื่อนตัวมีการเพิ่มความถี่ของการเคลื่อนตัว จาก 0.01 Hz. ถึง 1.0 Hz. สรุปได้ว่า ยางเกิดการเลื่อนไถลเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัว ซึ่งเกิดขึ้นได้ด้วย 2 ปัจจัย คือ น้ำหนักในแนวตั้งและผิวที่สัมผัสกับยาง โดยการทดสอบที่ความถี่ต่างกัน พบว่าลักษณะของการเลื่อนไถลโดยที่การเคลื่อนตัวด้วยความถี่ต่ำจะทำให้เกิดการเลื่อนไถลตัวไปตามระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นโดยที่ยางจะเกิดการเคลื่อนตัวน้อยเนื่องจากการเคลื่อนตัวที่ช้าทำให้ยางพยายามดึงตัวกับเข้าสู่ลักษณะตรง และการเลื่อนไถลของยางที่การเคลื่อนตัวด้วยความถี่สูงขึ้นโดยที่ยางจะถูกเกิดการเคลื่อนตัวตัวมาก กลับไป-กลับมาอย่างรวดเร็ว

2) ผลสถิติเนสประสิทธิภาพที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นสถิติเนสประสิทธิภาพของทั้งระบบจากการทดสอบนี้ที่รวมผลของการเลื่อนไถลของยาง พบว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกับระยะการเคลื่อนตัวของยางและความถี่ในการเคลื่อนตัว โดยพบว่าเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวที่น้อยจะทำให้สถิติเนสประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงและลดลงเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้น และยางมีค่าสถิติเนสประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ของการเคลื่อนตัวเพิ่ม

3) ผลของแรงหน่วงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นผลแรงหน่วงของทั้งระบบจากการทดสอบนี้ที่รวมผลของการเลื่อนไถลของยาง พบว่ามีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนตัวและความเร็วในการเคลื่อนตัว โดยพบว่าเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นแรงหน่วงของระบบเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวโดยที่ยางมีระยะการเลื่อนไถลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มเร็วของการเคลื่อนตัวยาง

เกิดการเลื่อนไถลไปอย่างรวดเร็ว และพบว่าผลของแรงหน่วงของระบบลดลงแปรผกผันกับความเร็วที่เพิ่มขึ้น

4) คุณสมบัติในการสลายพลังงาน (Energy Dissipation) ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นค่าการสลายพลังงานของทั้งระบบจากการทดสอบนี้ที่รวมผลของการเลื่อนไถลของยาง โดยสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนตัวและความเร็วโดยเมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนตัว ค่าการสลายพลังงานของระบบเพิ่มขึ้น และค่าการสลายพลังงานของระบบในช่วงความถี่ต่ำของการเคลื่อนตัวมีค่าสูงและค่าการสลายพลังงานของระบบลดลงเมื่อความถี่ของการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนตัวที่ช้าทำให้ยางเกิดการสะสมพลังงานไปพร้อมกับการเกิดเลื่อนไถล

5) ผลจากการทดสอบนี้และนำไปวิเคราะห์พบว่ามีความผิดปกติที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานของวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) เนื่องจากสมมติฐานว่าแรงหน่วงของยางจะแปรผันตรงกับความเร็ว โดยที่สมมติฐานจะเป็นจริงเมื่อจะต้องไม่เกิดการเลื่อนไถลเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แรงหน่วงจะเพิ่มขึ้น โดยผลจากการทดสอบไม่ได้แยกผลของแรงเสียดทานและการเลื่อนไถลที่เกิดขึ้นกับยาง จึงทำให้พบว่าแรงหน่วงแปรผกผันกับความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอในรูปแบบของแรงกับระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นเป็นแรงรวมและระยะการเคลื่อนตัวของทั้งระบบ

6) ผลจากการสร้างแบบจำลองและนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ สรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันโดยที่ผลของเหล็กเดี่ยวจากแบบจำลองมีวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ใหญ่กว่าผลจากการทดสอบ เนื่องจากการสร้างแบบจำลองอยู่ภายใต้ความสมบูรณ์แบบของสมมติฐาน โดยที่ในส่วนของการทดสอบไม่สามารถทำให้อยู่ภายใต้ความสมบูรณ์แบบของสมมติฐานได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ เหมือนกับแบบจำลอง โดยผลจากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้น ทำให้แผ่นเหล็กที่เสริมในช่องการติดตั้งเหล็กเดี่ยวเกิดการถูกบีบตัวจากเหล็กเดี่ยวรวมทั้งเมื่อเกิดการเคลื่อนตัวที่มากขึ้นทำให้เหล็กเกิดการยึดตัวส่งผลให้ขนาดของเหล็กที่ตำแหน่งจุดรองรับเกิดช่องว่างในจุดรองรับทำให้เกิดระยะความยาวจากเดิมที่ทดสอบเปลี่ยนไปเป็นผลที่แตกต่างกันที่จะไม่เกิดขึ้นกับการสร้างแบบจำลองและเมื่อทำการสมมติปรับแก้ระยะความยาวของเหล็กจากสมมติฐานที่ว่าแผ่นเหล็กเสริมในช่องของการติดตั้งเกิดการหลวมตัวจึงทำให้ความยาวของเหล็กที่วัดจากจุดรองรับที่ปลายถึงปลายอีกด้านเปลี่ยนไป และผลของการปรับแก้ความยาวแล้วเปรียบเทียบกับแบบทดสอบพบว่ามีความเทียบเคียงกันมากขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ได้มีข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะทำการทดสอบยางและสร้างแบบจำลองมาเพื่อที่จะเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลอง จะต้องมีการทดสอบยางแบบไม่ให้เกิดการเลื่อนไถลตัวเพื่อให้ได้เห็นผลเฉพาะเพียงแค่พฤติกรรมของยางเพื่อให้ได้เห็นผลที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับแบบจำลอง แต่ถ้าผู้ที่สนใจต้องการศึกษาพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นในสะพาน ในการสร้างแบบจำลองต้องคำนึงถึงผลจากแรงเสียดทานด้วย ที่ส่งผลมาจากผิวของวัตถุที่ยางสัมผัสที่ตำแหน่งติดตั้งยางและน้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งกับยางด้วย



รายการอ้างอิง

Ashkezaria .G .D et.al (2008). "Design, manufacturing and evaluation of the performance of steel like fiber reinforced elastomeric seismic isolators." journal of materials processing technology: 140–150

Cardone .D and Perrone .G (2012). "Critical load of slender elastomeric seismic isolators." Engineering Structures 40: 198–204.

Gjorgjiev .I and Garevskivv.M (2013). "A polynomial analytical model of rubber bearings based on series of tests." Engineering Structures 56.

Guide Specification for seismic isolation Design (2010). (Third Edition)).

J. S. Hwang and J. M. Chiou (1996). "An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings." Engineering Structures: 528-536.

Russo .G et.al (2013). "A study on experimental shear behavior of fiber-reinforced elastomeric isolators with various fiber layouts, elastomers and aging conditions." Engineering Structures 52: 422–433.

W.K. Chen and E. L. Duan (2003). Bridge Engineering Handbook.

กรมทางหลวงชนบท (2555). "รายการและข้อกำหนดงานก่อนสร้างถนนและสะพาน คสล."



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อาทิตย์ อุ้นคำ เกิดวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาจากวิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ปี พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2554

