

พฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล

นายเพชร เครือวิทย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS  
WITH MECHANICAL SPLICES

Mr. Pochara Kruavit

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล

โดย

นายพชร เครือวิทย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี)

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

พชร เครือวิทย์ : พฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล. (CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH MECHANICAL SPLICES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. อาณัติ เรืองรัมย์ , 127 หน้า.

การก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องมีการต่อทาบเหล็กเสริมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การใช้ข้อต่อเชิงกลในการต่อทาบเหล็กเสริมเป็นทางหนึ่งที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ยังมีได้มีการศึกษาคุณสมบัติของข้อต่อเชิงกลที่เพียงพอ โดยเฉพาะภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก งานวิจัยนี้ได้ทำการพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรจำนวน 2 ตัวอย่างซึ่งมีขนาดหน้าตัด 0.40 เมตร x 0.40 เมตร สูง 2.2 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมแบบปกติ และมีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ซึ่งทั้ง 2 ตัวอย่างมีอัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 0.0245 และมีอัตราส่วนปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 0.00753 ซึ่งจากผลการทดสอบเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงอัดตามแนวแกนพบว่าเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลสามารถชะลอการโก่งเดาะได้ดีขึ้นรวมถึงสามารถสลายพลังได้สูงกว่าเหล็กเสริมควบคุม

จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรพบว่า ตัวอย่างเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงกว่าตัวอย่างเสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมแบบปกติ ซึ่งเมื่อเสาเกิดความเสียหายหลังจากรับแรงกระทำสูงสุดแล้วยังคงมีพฤติกรรมในการรับแรงที่ลดลงช้ากว่าเช่นเดียวกัน โดยตัวอย่างเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีความเหนียวมากกว่าถึง 2.76 เท่า ของตัวอย่างเสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมแบบปกติ และมีความสามารถสลายพลังงานสะสมได้สูงกว่าอย่างชัดเจน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2556.....



# # 5470285821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : MECHANICAL SPLICE / COLUMNS / CYCLIC / LAP SPLICE

POCHARA KRUA VIT : CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE  
COLUMNS WITH MECHANICAL SPLICES. ADVISOR : ASST. PROF. ANAT  
RUANGRASSAMEE, Ph.D., 127 pp.

Construction practices in the building of reinforced concrete members have the reinforcement of members were inevitable spliced. The mechanical splices can be used to replace the conventional lapped steel reinforcement. However, previous studies on the structural behavior of reinforced concrete columns using mechanical splice under cyclic loading are still limited. This research has to study the behavior of reinforced concrete column with mechanical splice and lap splice are conducted. The cross section of column is 0.4m x 0.4m, and columns height is 2.2m. The ratio of cross section of column is 0.0245, and the volumetric ratio of transverse reinforcement is 0.00753. From the monotonic loading test, it is found that the longitudinal reinforcement with mechanical splice significantly improve the buckling behavior. Energy dissipation of the longitudinal reinforcement with mechanical splice is higher than the bare bar.

Then, cyclic loading tests of two reinforced concrete The column with mechanical splice and lap splice, it is found that the maximum lateral load of column with mechanical splice more than the column with lap splice include the few of strength degradation. The ductility enhancement about 2.76 times, comparing to the column with lap splice cause the increase of energy dissipation.

Department : Civil Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2013 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งเป็นผู้ดูแลและดำเนินการทดสอบ และกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี และดร. หทัยรัตน์ มณีเทศ ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ หน่วยงานและบุคคลต่างๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ดังรายนามต่อไปนี้

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้ให้เงินสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

บริษัท เด็กซ์ตร้า แมนูแฟคเจอร์ส จำกัด ที่สนับสนุนด้านวัสดุในการทำวิจัย

คุณศรประสิทธิ์ ลำภาที่ช่วยในการเตรียมตัวอย่างทดสอบการติดตั้งอุปกรณ์และดำเนินการทดสอบ

คุณสมพงษ์ ขำแจ้งที่ช่วยในการติดตั้งอุปกรณ์และคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

คุณศิริโรจน์ ถนอมพันธ์ และคุณกฤษฎา ภูมิที่ช่วยดำเนินการทดสอบและแนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

รุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบ รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

และที่สำคัญที่สุดที่ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณและให้ความเคารพคือ บิดา มารดา ที่เป็นผู้ดูแลเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน ให้มีการศึกษามีความรู้ และคอยให้ปรึกษาในทุกปัญหาและให้กำลังใจในการทำงานให้ผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ ไปได้ เป็นผู้ที่ทำให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน จนทำให้ข้าพเจ้าจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	5
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริม .....	6
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อ เชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแบบวิฎจักร.....	6
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตาม แนวแกนและแรงกระทำแบบวิฎจักร .....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบวิฎจักร .....	16
2.3 ค่าพารามิเตอร์และดัชนีของโครงสร้างเสา .....	31
2.3.1 อัตราส่วนความสูงต่อความลึกหน้าตัด (Shear span ratio) .....	31
2.3.2 อัตราส่วนโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือน (Moment to shear capacity ratio).....	31
2.3.3 อัตราส่วนแรงในแนวแกน (Axial force ratio) .....	31
2.3.4 ดัชนีเหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal reinforcement index) .....	32
2.3.5 ดัชนีเหล็กเสริมตามขวาง (Transverse steel index) .....	32
2.4 มาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	33
2.4.1 มาตรฐานเกี่ยวกับเหล็กเสริมตามยาว .....	33
2.4.2 มาตรฐานเกี่ยวกับเหล็กเสริมตามขวาง .....	33
2.4.2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับขนาดของเหล็กเสริมตามขวางในเสา .....	33

2.4.2.2	มาตรฐานเกี่ยวกับปริมาณและระยะห่างของเสริมตามขวาง.....	33
2.4.2.3	มาตรฐานเกี่ยวกับระยะของมาตรฐานของเหล็กเสริมตาม ขวาง.....	35
2.4.3	มาตรฐานเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดตามขวาง .....	36
2.4.4	มาตรฐานเกี่ยวกับระยะหุ้มของคอนกรีต .....	36
2.4.5	มาตรฐานเกี่ยวกับการต่อต้านข้อต่อเชิงกล.....	37
บทที่ 3	การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อต้านข้อต่อเชิงกล .....	38
3.1	คุณสมบัติของข้อต่อเชิงกลและเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ .....	38
3.2	การทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมที่ต่อต้านข้อต่อเชิงกล .....	39
3.2.1	การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อต้านข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบดึง .....	40
3.2.2	การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อต้านข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบอัด.....	41
3.2.3	การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อต้านข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบวง จักร.....	41
3.2.4	การเตรียมการทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อต้านข้อต่อเชิงกล.....	43
3.3	ผลการทดสอบตัวอย่าง .....	45
3.3.1	ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบดึง.....	45
3.3.2	ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบอัด .....	48
3.3.3	ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวงจักร .....	54
บทที่ 4	การเตรียมตัวอย่างเสาและการทดสอบ .....	63
4.1	ตัวอย่างเสาทดสอบ .....	63
4.1.1	ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100.....	64
4.1.2	ตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100 .....	65
4.2	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	69
4.2.1	คอนกรีต.....	69
4.2.2	เหล็กเสริม .....	70
4.2.3	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	71
4.3	การเตรียมการทดสอบ.....	79
4.3.1	การเตรียมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ .....	79
4.3.2	การติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบ .....	82

4.3.3	การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ (displacement transducer) .....	83
4.3.4	หน่วยรวบรวมข้อมูล (data acquisition unit).....	86
4.4	ขั้นตอนการทดสอบ .....	87
4.5	การปรับแก้การเคลื่อนที่จากการเลื่อนไถลและการหมุนของฐานรากรวมถึงการ เลื่อนไถลของผนังรับแรง.....	88
บทที่ 5	ผลการทดสอบ .....	92
5.1	พฤติกรรมของเสาทดสอบที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบ.....	92
5.1.1	ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 .....	92
5.1.3	เสาทดสอบ C-MS-100 .....	95
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง .....	104
5.3.1	ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 .....	106
5.3.2	ตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100 .....	110
5.4	การสลายพลังงาน.....	115
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้ง .....	119
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริม .....	127
5.6.1	ความเครียดในเหล็กเสริมของเสาตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 .....	128
5.6.2	ความเครียดในเหล็กเสริมของเสาตัวอย่างทดสอบ C-MS-100.....	128
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	143
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	143
6.2	ข้อเสนอแนะ .....	145
	รายการอ้างอิง.....	147

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางผลการทดสอบข้อต่อเชิงกลแต่ละประเภท (Rowell และ Grey, 2009) .....	10
ตารางที่ 2.2 ตารางเปอร์เซ็นต์ผลการทดสอบของข้อต่อเชิงกลเทียบกับเหล็กควบคุม (Rowell และ Grey, 2009).....	10
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดขนาดปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม (Ruangrassamee และ Sawaroj, 2010)	14
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเสา (Ozcebe และ Saatcioglu, 1987) .....	16
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเสา (Wehbe และคณะ, 1999) .....	18
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของเสา (Mo และ Wang, 2000) .....	20
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของเสา (Ongsupankul และคณะ, 2006) .....	23
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของเสา (Sezen และ Moehle, 2006).....	25
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของเสา (Melek และ Wallace, 2004) .....	27
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของเสา (Ruangrassamee และ Sawaroj, 2010).....	29
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม .....	39
ตารางที่ 3.2 อัตราการให้แรงในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบดึง .....	40
ตารางที่ 3.3 อัตราการให้แรงในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบอัด .....	41
ตารางที่ 3.4 อัตราการให้แรงในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวิงจักร .....	42
ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	52
ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวิงจักร.....	59
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบ .....	68
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย .....	69
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. .	70
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. .	70
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการเคลื่อนที่การเลื่อนไถลและการหมุนของฐานรากรวมถึงการเลื่อนไถลของผนังรับแรง.....	89
ตารางที่ 5.1 ลักษณะความเสียหายระหว่างการทดสอบและการวิบัติหลังการทดสอบของตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 .....	76
ตารางที่ 5.2 ลักษณะความเสียหายระหว่างการทดสอบและการวิบัติหลังการทดสอบของตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100 .....	97

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 และ C-MS-100...	101
ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างเสา .....	114
ตารางที่ 5.5 ค่าพลังงานในแต่ละรอบการทดสอบ .....	118
ตารางที่ 5.6 ค่าความโค้งและค่ามูมหมุนของตัวอย่างเสาทดสอบ .....	125

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างรายละเอียดเหล็กเสริมบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างเสาและคาน (Joint) ของ โครงสร้างที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมแบบปกติ (ซ้าย) และต่อด้วยข้อต่อเชิงกล (ขวา) .....	2
รูปที่ 1.2 การต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวของโครงสร้างเสา ซึ่งมีการต่อทาบที่โคนเสา เมื่อขึ้นเสาชั้น ถัดไป (ซ้าย) และการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวจากฐานราก (ขวา) .....	2
รูปที่ 1.3 การต่อเหล็กเสริมตามยาวด้วยข้อต่อเชิงกลบริเวณจุดหมุนพลาสติก .....	3
รูปที่ 2.1 ข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในการศึกษา (Ruangrassamee และMounnarath ,2006) .....	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเสียรูป โดยแปรผันช่องว่างของข้อต่อเชิงกล(ซ้าย), แปรผันความหนา(ขวา) (Ruangrassamee และMounnarath ,2006) .....	7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการเสียรูป โดยแปรผันช่องว่างของข้อต่อเชิงกล (Ruangrassamee และMounnarath ,2006) .....	7
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและความโค้งของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบปกติ เปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล (Ruangrassamee และMounnarath ,2006) .....	7
รูปที่ 2.5 ประเภทของข้อต่อเชิงกล Taper-threaded, Upset-head, Grouted-sleeve, Shear- screw, Threaded-rebar ตามลำดับ (Rowell และGrey ,2009) .....	8
รูปที่ 2.6 การวิบัติที่เหล็กเสริมภายนอกข้อต่อเชิงกลของข้อต่อเชิงกลประเภท Taper-threaded (ซ้าย), Upset-head (ขวา), Threaded-rebar (กลาง) ตามลำดับ (Rowell และGrey ,2009).....	9
รูปที่ 2.7 การวิบัติในลักษณะที่เหล็กเสริมหลุดออกจะตัวข้อต่อเชิงกลประเภท Grouted Sleeve Coupler (Rowell และGrey,2009) .....	9
รูปที่ 2.8 การวิบัติในลักษณะที่เหล็กเสริมหลุดออกจะตัวข้อต่อเชิงกลประเภท Shear Screw (Rowell และGrey ,2009) .....	9
รูปที่ 2.9 อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ที่มีผลต่อความสามารถ ในการรับแรงอัด (Monti และNuti ,1992).....	11
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้ แรงกระทำ แบบวัฏจักร (Monti และNuti ,1992) .....	11
รูปที่ 2.11 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bae และคณะ ,2005) .....	12



## หน้า

รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเหล็ก No.8 และ No.10 (Bae และคณะ ,2005) .....	13
รูปที่ 2.13 ผลของอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงประลัยกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กที่มีผลต่อพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของเหล็กเสริม (Bae และคณะ ,2005) .....	13
รูปที่ 2.14 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ(ซ้าย) การทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม(ขวา) (Ruangrassamee และSawaroj ,2010) .....	14
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม แปรผันความยาว(บน), แปรผันความหนา(ล่าง) (Ruangrassamee และSawaroj ,2010).....	15
รูปที่ 2.16 ความเสียหายของเหล็กเสริมที่ความเครียด 0.13 (Ruangrassamee และSawaroj ,2010).....	15
รูปที่ 2.17 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Ozcebe และSaatcioglu ,1987) .....	16
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U3 (Ozcebe และSaatcioglu ,1987).....	17
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U4 (Ozcebe และSaatcioglu ,1987) .....	17
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U6 (Ozcebe และSaatcioglu ,1987) .....	17
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U7 (Ozcebe และSaatcioglu ,1987).....	17
รูปที่ 2.22 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Wehbe และคณะ ,1999) .....	18
รูปที่ 2.23 ผลของปริมาณเหล็กปลอกที่มีผลต่อความเหนียวของเสา (Wehbe และคณะ ,1999)	19
รูปที่ 2.24 ผลของแรงอัดตามแนวแกนที่มีผลต่อความเหนียวของเสาและความสามารถ ในการรับแรงทางด้านข้าง (Wehbe และคณะ ,1999).....	19
รูปที่ 2.25 รูปแบบของเหล็กเสริมตามขวาง (Mo และWang ,2000) .....	20
รูปที่ 2.26 ค่าอัตราการสลายพลังงานของเสาที่มีการเสริมเหล็กตามขวางแต่ละรูปแบบ (Mo และ Wang ,2000) .....	21

## หน้า

รูปที่ 2.27 ค่าอัตราการสลายพลังงานของเสาที่มีการเสริมเหล็กตามขวางแต่ละรูปแบบ (Mo และ Wang ,2000) .....	21
รูปที่ 2.28 ลักษณะการวิบัติและลักษณะการแตกร้าวของเสา (Mo และWang ,2000).....	22
รูปที่ 2.29 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Ongsupankul และคณะ ,2006) .....	23
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Ongsupankul และคณะ ,2006) .....	24
รูปที่ 2.31 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Sezen และMoehle ,2006).....	25
รูปที่ 2.32 ลักษณะการวิบัติของเสาแบบเฉือน และแรงตามแนวแกน (Sezen และMoehle ,2006).....	26
รูปที่ 2.33 ขนาดหน้าตัดและระยะการต่อทาบเสริมเหล็ก (Melek และWallace ,2004) .....	27
รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Melek และWallace ,2004) .....	28
รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำที่จุดคราก กับ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Melek และWallace ,2004) .....	28
รูปที่ 2.36 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Ruangrassamee และSawaroj ,2010) ....	29
รูปที่ 2.37 ความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติก ภายหลังการทดสอบ C1(ซ้าย),C2(ขวา) (Ruangrassamee และSawaroj,2010) .....	30
รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Ruangrassamee และSawaroj,2010) .....	30
รูปที่ 3.1 ข้อต่อเชิงกลระบบเกลียว .....	38
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแต่ละขนาด.....	39
รูปที่ 3.3 รูปแบบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักร .....	42
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดและเครื่องบันทึกข้อมูลทดสอบ .....	43
รูปที่ 3.5 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึง .....	44
รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและรับแรงกระทำแบบวัฏจักร .....	44

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเค้นต่อความเค้นที่จุดคราก และอัตราส่วนของความเครียดต่อความเครียดที่จุดคราก ..... 45

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 20 มิลลิเมตร ..... 46

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร ..... 47

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ..... 47

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมควบคุมขนาด 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16 ..... 48

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 20 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16..... 49

รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16..... 50

รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาว ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16..... 50

รูปที่ 3.15 การเสียรูปขณะทำการทดสอบ (a) และเสริจขึ้นการทดสอบของเหล็กเสริม ที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุม (b) ..... 51

รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงาน (Strain energy) ของเหล็กเสริมขนาด 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16 ..... 53

รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 ..... 55

รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10.....	55
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 .....	56
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 .....	56
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 .....	57
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 .....	57
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 .....	58
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 .....	58
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานและจำนวนรอบการให้แรงของเหล็กเสริม ขนาด 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10.....	60
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานและจำนวนรอบการให้แรงของเหล็กเสริม ขนาด 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16.....	60
รูปที่ 3.27 ลักษณะเกิดรอยร้าวบริเวณจุดที่เกิดการโก่งเดาะจากการรับแรงแบบวัฏจักร ผ่านไป 5 รอบการให้แรง ของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 มิลลิเมตร .....	61
รูปที่ 3.28 การวิบัติของเหล็กเสริมขณะให้แรงดึงของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 25 มิลลิเมตร .....	62

รูปที่ 3.29 การเสียรูปแบบถาวรในลักษณะโก่งคาะของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 32 มิลลิเมตร .....	62
รูปที่ 4.1 การตัดให้มีความลาดเอียงของเหล็กเสริมส่วนที่ตัดเยื้องกัน เมื่อเทียบกับแกนของเสา..	64
รูปที่ 4.2 การขันเหล็กเสริมที่ต่อภายในข้อต่อเชิงกลด้วย ประแจควมคุมแรงบิด (Torque wrench) ที่ระดับแรงบิดเท่ากับ 200 นิวตัน-เมตร.....	65
รูปที่ 4.3 ขนาดและลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 .....	66
รูปที่ 4.4 ขนาดและลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ C-MS-10 .....	67
รูปที่ 4.5 การปรับระดับพื้นให้ไม่มีความลาดเอียง (ซ้าย) ตีเส้นเพื่อแสดงตำแหน่งต่างๆ (ขวา)....	72
รูปที่ 4.6 ประกอบเหล็กของฐานให้ตรงตำแหน่งที่ตีเส้นไว้เพื่อความแม่นยำในการประกอบ เหล็กเสริมตามยาวและการตั้งแบบหล่อคอนกรีต.....	73
รูปที่ 4.7 การตั้งเสาโดยผูกเหล็กยื่นกับเหล็กของฐานโดยมีการตรวจเช็คระยะห่างระหว่างเหล็กยื่นจุดศูนย์กลางเสาและระดับแนวตั้ง .....	73
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างเสา C-SP-100 เมื่อทำการประกอบเหล็กเสริมเสร็จสิ้น .....	74
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างเสา C-MS-100 เมื่อทำการประกอบเหล็กเสริมเสร็จสิ้น .....	75
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 .....	61
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 .....	61
รูปที่ 4.12 การตั้งแบบหล่อคอนกรีตของฐานราก (ซ้าย) และเมื่อถอดแบบหล่อคอนกรีต (ขวา) ..	78
รูปที่ 4.13 การติดตั้งเกจวัดความเครียดของเสา C-SP-100 (ซ้าย) และ C-MS-100 (ขวา) .....	78
รูปที่ 4.14 การตั้งแบบหล่อคอนกรีตของเสา (ซ้าย) และเมื่อถอดแบบหล่อคอนกรีต (ขวา).....	79
รูปที่ 4.15 วางแผนรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์การทดสอบ.....	80
รูปที่ 4.16 ขนย้ายโครงให้แรงในแนวแกน .....	80
รูปที่ 4.17 การจัดวางผนังรับแรง .....	81
รูปที่ 4.18 การจัดวางอุปกรณ์รองรับเครื่องให้แรง .....	81
รูปที่ 4.19 เสร็จสิ้นการเตรียมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ .....	82
รูปที่ 4.20 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า .....	83
รูปที่ 4.21 ออกแบบอุปกรณ์ติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า .....	84

รูปที่ 4.22 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ของฐานราก (ซ้าย) วัดการเคลื่อนที่ของผนังรับแรง (ขวา) และวัดการเคลื่อนที่ของหัวเสา (ล่าง).....	84
รูปที่ 4.23 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าความโค้งของเสา.....	85
รูปที่ 4.24 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้วัดการหมุนของฐานราก.....	85
รูปที่ 4.25 อุปกรณ์สำหรับบันทึกผลการทดสอบ .....	86
รูปที่ 4.26 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) Kyowa UCAM-60B (ซ้าย) และ Kyowa UCAM-60A (ขวา).....	86
รูปที่ 4.27 รูปแบบการให้แรงกระทำ (loading scheme) .....	87
รูปที่ 4.28 การปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่และการหมุนของฐานราก.....	88
รูปที่ 5.1 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 0.25\%$ ถึง $\pm 0.75\%$ ของตัวอย่างเสา C-SP-100.....	93
รูปที่ 5.2 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 1\%$ ถึง $\pm 2\%$ ของตัวอย่างเสา C-SP-100.....	93
รูปที่ 5.3 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 2.5\%$ ถึง $\pm 3.5\%$ ของตัวอย่างเสา C-SP-100.....	94
รูปที่ 5.4 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 4\%$ ของตัวอย่างเสา C-SP-100.....	94
รูปที่ 5.5 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 0.25\%$ ถึง $\pm 0.75\%$ ของตัวอย่างเสา C-MS-100.....	98
รูปที่ 5.6 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 1\%$ ถึง $\pm 2\%$ ของตัวอย่างเสา C-MS-100.....	98
รูปที่ 5.7 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 2.5\%$ ถึง $\pm 3.5\%$ ของตัวอย่างเสา C-MS-100.....	99
รูปที่ 5.8 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 4\%$ ถึง $\pm 5\%$ ของตัวอย่างเสา C-MS-100.....	99
รูปที่ 5.9 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว $\pm 6.5\%$ ถึง $\pm 6\%$ ของตัวอย่างเสา C-MS-100.....	100
รูปที่ 5.10 เครื่องหมายแสดงค่าของการให้แรงและการเคลื่อนที่ของเครื่องให้แรง .....	104
รูปที่ 5.11 วิธีการหาค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวโดย Sheikh และ Houry (1993).....	105

หน้า

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา C-SP-100 .. 106

รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  drift ถึง  $\pm 1\%$  drift..... 107

รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1.5\%$  drift ถึง  $\pm 3\%$  drift..... 107

รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 3.5\%$  drift ถึง  $\pm 5\%$  drift..... 108

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 5.5\%$  drift ถึง  $\pm 6\%$  drift..... 108

รูปที่ 5.17 เส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) ตัวอย่างเสา C-SP-100 ..... 109

รูปที่ 5.18 การหาค่าระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณค่าความเหนียว..... 109

รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่าง C-MS-100..... 110

รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  drift ถึง  $\pm 1\%$  drift..... 111

รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1.5\%$  drift ถึง  $\pm 3\%$  drift..... 111

รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 3.5\%$  drift ถึง  $\pm 5\%$  drift..... 112

รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 5.5\%$  drift ถึง  $\pm 7\%$  drift..... 112

รูปที่ 5.24 เส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) ตัวอย่างเสา C-MS-100 ..... 113

รูปที่ 5.25 การหาค่าระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณค่าความเหนียว ..... 113

รูปที่ 5.26 เส้นโค้งขอบนอก (envelop) ของตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 และ C-MS-100... 114

รูปที่ 5.27 การหาค่าการสลายพลังงานใน 1 รอบการทดสอบ ..... 116

รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานกับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ ..... 117

รูปที่ 5.29 การหาค่าความโค้ง (curvature) ..... 119

รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 1 ของตัวอย่าง C-SP-100..... 121

รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 2 ของตัวอย่าง C- SP -100... 121

รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 3 ของตัวอย่าง C- SP -100...	122
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 4 ของตัวอย่าง C- SP -100...	122
รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 1 ของตัวอย่าง C-MS-100 ....	123
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 2 ของตัวอย่าง C-MS-100 ....	123
รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 3 ของตัวอย่าง C-MS-100 ....	124
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 4 ของตัวอย่าง C-MS-100 ....	124
รูปที่ 5.38 มุมหมุนสะสมของหน้าตัดเสาแต่ละระดับ.....	125
รูปที่ 5.39 เครื่องหมายแสดงค่าของการให้แรงและการเคลื่อนที่ของเครื่องให้แรง .....	127
รูปที่ 5.40 ตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาทดสอบ .....	127
รูปที่ 5.41 ตำแหน่งในการติดตั้งวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 .....	129
รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 1 .....	130
รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 2 .....	131
รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 2 .....	132
รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 3 .....	133
รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 4 .....	134
รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 1 และ 2 .....	135
รูปที่ 5.48 ตำแหน่งในการติดตั้งวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-MS-100 .....	136
รูปที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 1 .....	137



หน้า

รูปที่ 5.50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของ ตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 2 .....	139
รูปที่ 5.51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของ ตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 2 .....	140
รูปที่ 5.52 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของ ตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 3 .....	141
รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของ ตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 4 .....	142
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของ ตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 1 และ 2.....	143

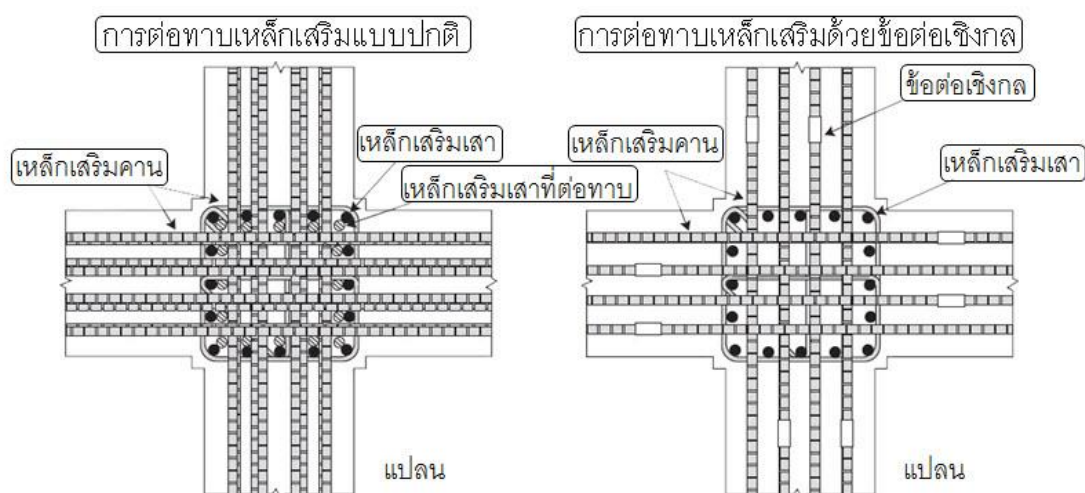
# บทที่ 1

## บทนำ

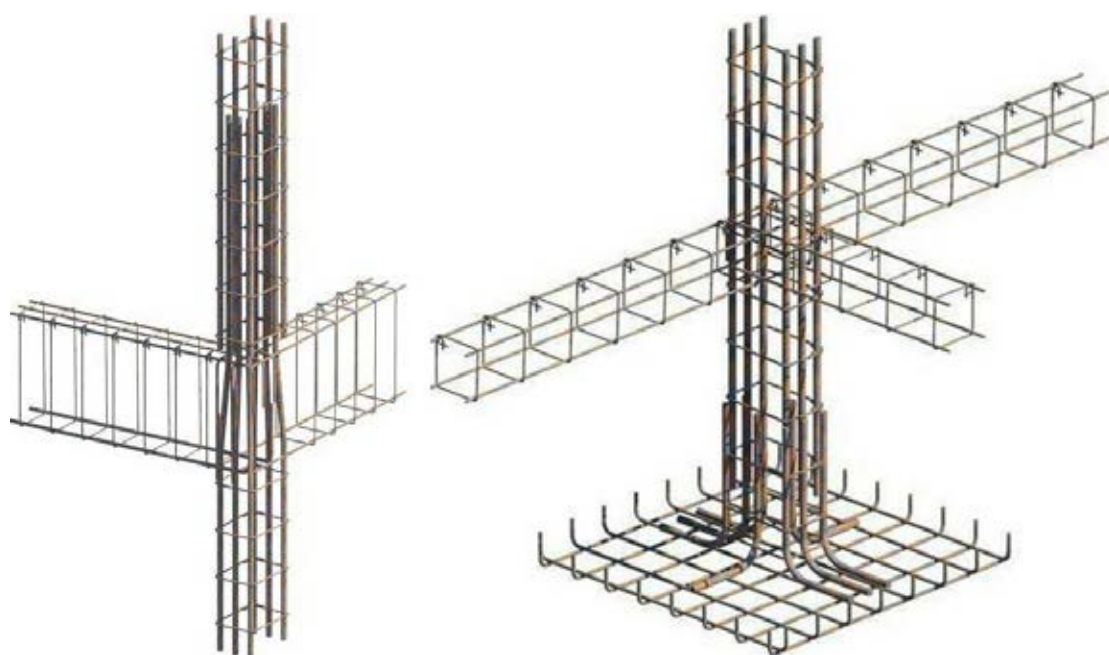
ภัยธรรมชาติ ณ ปัจจุบันยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นและยากแก่การคาดเดาถึงขนาด ความรุนแรงและเวลาที่เกิด ซึ่งภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดความเสียหายส่งผลต่อการสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินอย่างประเมินค่ามิได้คือ “แผ่นดินไหว” จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่น ประเทศนิวซีแลนด์และ ประเทศพม่า เป็นต้น แสดงให้เห็นถึงความอันตรายและความเสียหาย ซึ่งสำหรับประเทศไทยที่เกิดแผ่นดินไหว ไม่บ่อยครั้ง โครงสร้างส่วนใหญ่มักไม่ได้ออกแบบและก่อสร้างให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวเป็นเรื่องที่ควรให้ความสำคัญ เนื่องจากเมื่อโครงสร้างได้รับแรงจากแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงจะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว บริเวณรอยต่อ (joint) ขององค์อาคารและสูญเสียกำลังในการรับแรงและหากเกิดความเสียหายกับ โครงสร้างเสาซึ่งมีหน้าที่รับน้ำหนักตามแนวแกนและแรงดัด จะทำให้เหล็กเสริมอยู่ในสภาวะรับ แรงอัดและเกิดการโก่งเดาะส่งผลให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ

การก่อสร้างของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในอดีตสำหรับโครงสร้างเสามักจะมีการ ต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวเนื่องจากเหล็กเสริมที่ผลิตจากโรงงานมีความยาวจำกัดและเพื่อ ความสะดวกในการทำงานส่งผลให้ไม่สามารถเสริมเหล็กตามยาวให้เป็นเส้นเดียวกันตลอด ทั้งความยาวเสาได้ การใช้ข้อต่อเชิงกลในการต่อเหล็กเสริมเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจมาใช้ในการ ต่อทาบแบบปกติเนื่องจากอาจมีข้อจำกัดจากปริมาณเหล็กเสริมที่มากเกินไปที่บริเวณต่อทาบและ ยังส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายจากปริมาณเหล็กที่ต่อทาบลดลงสำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งการใช้ ข้อต่อเชิงกลกำลังเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับโครงสร้างในประเทศไทยแต่ยังมีได้ มีการคำนึงถึงบริเวณที่ควรหลีกเลี่ยงการต่อทาบและคุณสมบัติของข้อต่อเชิงกลที่เพียงพอ รวมถึง การศึกษาพฤติกรรมของชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลยังมีจำนวนน้อย ฉะนั้น การศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงแผ่นดินไหว เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและหาวิธีการป้องกันการพังทลายให้มีความเหมาะสมกับ ประเทศไปต่อไป

โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วย ข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักร รวมถึงเหล็กเสริม ที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวัฏจักร



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างรายละเอียดเหล็กเสริมบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างเสาและคาน (Joint) ของโครงสร้างที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมแบบปกติ (ซ้าย) และต่อด้วยข้อต่อเชิงกล (ขวา)



รูปที่ 1.2 การต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวของโครงสร้างเสา ซึ่งมีการต่อทาบที่โคนเสา เมื่อขึ้นเสาชั้นถัดไป (ซ้าย) และการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวจากฐานราก (ขวา)



รูปที่ 1.3 การต่อเหล็กเสริมตามยาวด้วยข้อต่อเชิงกลบริเวณจุดหมุนพลาสติก

### 1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวงจรร
2. ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลบริเวณจุดหมุนพลาสติกภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างแบบวงจรร
3. ศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลบริเวณจุดหมุนพลาสติกกับเสาที่มีการต่อแบบปกติของเหล็กเสริมเหล็กตามยาวภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างแบบวงจรร

## 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40
2. ประเภทข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในการทดสอบเป็นประเภทระบบเกลียว ซึ่งเป็นประเภทที่มีการใช้งานอยู่จริงกับโครงสร้างในประเทศไทย โดยมีการผลิตที่ถูกต้องตามหลักสากล
3. ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.4 ม. X 0.4 ม. ซึ่งเป็นตัวแทนของสะพานทางหลวงชนบทช่วงความยาว 10 ม. โดยกำหนดตัวแปรควบคุมดังนี้
  - ก. กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 250 กก./ซม.<sup>2</sup>
  - ข. อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาวกับพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 0.0245
  - ค. อัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กเสริมทางขวาง (Volumetric Ratio ) มีค่าเท่ากับ 0.00754
  - ง. ระหว่างการทดสอบมีการให้แรงอัดตามแนวแกนแบบคงที่ ซึ่งมีอัตราส่วนของแรงอัดตามแนวแกนต่อความสามารถรับกำลังอัดของหน้าตัด (Axial Load Ratio) เท่ากับ  $0.075 f'_c A_g$
  - จ. รายละเอียดการตัดเหล็กเสริม การงอขอและระยะปลายยื่นของเหล็กเสริม รวมถึงการต่อทาบเหล็กเสริมเป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI (American Concrete Institute) และตามข้อกำหนด วสท.
4. ทำการทดสอบเสาเดี่ยวที่ไม่ได้อยู่ในโครงสร้างข้อแข็ง
5. ทดสอบเสาดัดตัวอย่างโดยการให้แรงกระทำแบบสถิตทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Quasi-Static Cyclic Lateral Loading)

### 1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับข้อบกพร่องพฤติกรรมของเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวงจักร รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสถียรภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างแบบวงจักร
2. เตรียมตัวอย่างเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล โดยพิจารณาขนาดของเหล็กเสริมและ ความยาวของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16
3. ทดสอบเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลในห้องปฏิบัติการ
4. เตรียมตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งอ้างอิงจากแบบสะพานของกรมทางหลวงชนบท โดยเปรียบเทียบระหว่างเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลกับเสาที่มีการต่อทาบแบบปกติ
5. ทดสอบเสถียรภายใต้แรงอัดตามแนวแกนคงที่และแรงกระทำทางด้านข้างแบบวงจักร โดยการให้แรงกระทำทางด้านข้างจะกระทำจากเครื่องให้แรง (Hydraulics Actuator) ซึ่งในการทดสอบมีการให้แรงแบบในลักษณะควบคุมระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Displacement Control) ซึ่งมีการติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) เพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัวของหัวเสาและการหมุนของหน้าตัดเสา รวมถึงเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่ติดบนเหล็กเสริมภายในเสา โดยมีการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ระหว่างทดสอบตลอดเวลา
6. วิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากการเก็บข้อมูลในการทดสอบ
7. สรุปผลการวิจัย
8. เขียนวิทยานิพนธ์

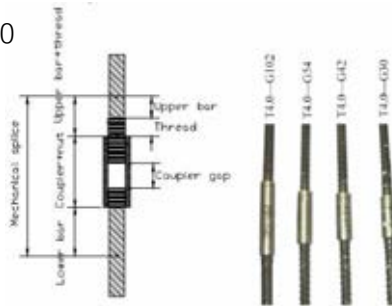
## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริม

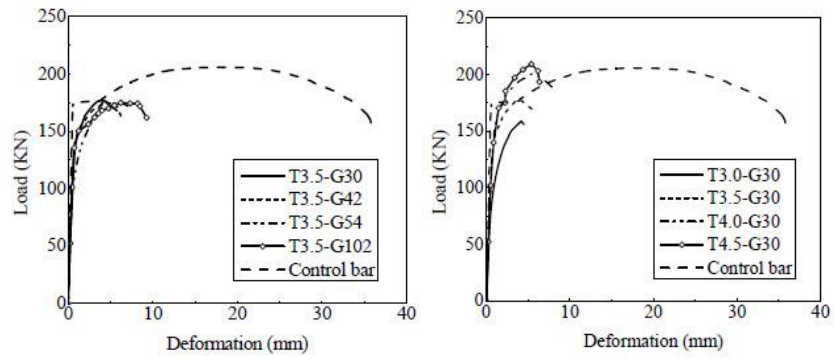
##### 2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแบบวัฏจักร

Ruangrassamee และMounnarath (2006) ทำการศึกษาข้อต่อเชิงกลสำหรับใช้ในการต่อทาบเหล็กเสริมสำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยทดสอบข้อต่อเชิงกลระบบเกลียว (Threaded Rebar) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีการแปรผันความหนาและระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทั้ง 2 ด้าน (Coupler gap) โดยเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กคุณภาพ SD50 และข้อต่อเชิงกลใช้เหล็กคุณภาพ SS400

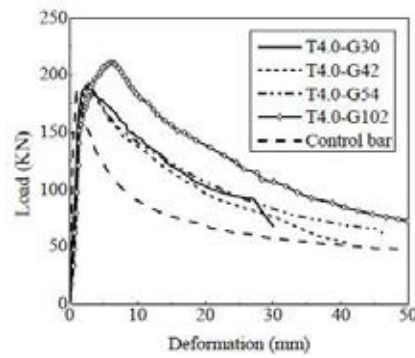


รูปที่ 2.1 ข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในการศึกษา (Ruangrassamee และMounnarath ,2006)

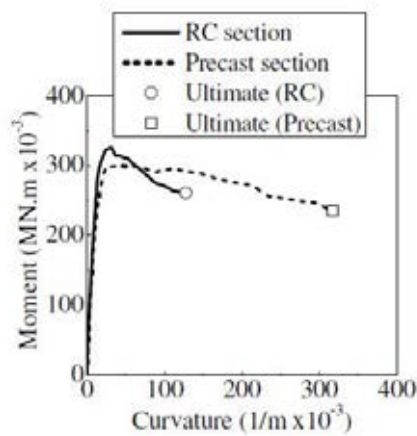
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของข้อต่อเชิงกลจะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงสูงขึ้น และจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มช่องว่างของข้อต่อเชิงกลแต่ยังมีความเหนียวน้อยกว่าเหล็กเสริมปกติ 5 เท่า แสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทั้ง 2 ด้าน ส่งผลให้มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่มีช่องว่างของข้อต่อเชิงกลเท่ากับ 102 mm มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น 11.8% และสามารถสลายพลังงานได้เป็น 4.88 เท่า ของเหล็กเสริมปกติ แสดงดังรูปที่ 2.3 จากนั้นทำการวิเคราะห์หน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเหล็กที่ไม่มีการต่อทาบเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกล พบว่าเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีความเหนียวประมาณ 2.5 เท่า ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการต่อทาบ เนื่องจากเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าเหล็กเสริมปกติส่งผลให้สามารถชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเสียรูป โดยแปรผันช่องว่างของข้อต่อเชิงกล(ซ้าย),  
แปรผันความหนา(ขวา) (Ruangrassamee และMounnarath ,2006)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการเสียรูป โดยแปรผันช่องว่างของข้อต่อเชิงกล  
(Ruangrassamee และMounnarath ,2006)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและความโค้งของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบปกติ  
เปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล  
(Ruangrassamee และMounnarath ,2006)



Rowell และ Grey (2009) ทำการศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงของข้อต่อเชิงกลจากการให้อัตราความเครียดที่สูงของข้อต่อเชิงกลแต่ละประเภท สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อแรงระเบิด โดยทดสอบข้อต่อเชิงกล 5 ประเภทคือ Taper-threaded, Upset-head, Grouted-sleeve, Shear-screw, Threaded-rebar แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยการทดสอบใช้วิธีควบคุมเครื่องให้แรงด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) ซึ่งมีการให้อัตราความเครียดแบบช้าปานกลาง และเร็ว ที่ค่าอัตราการให้ความเครียดต่อนาทีเท่ากับ 0.001 ถึง 3.5



รูปที่ 2.5 ประเภทของข้อต่อเชิงกล Taper-threaded, Upset-head, Grouted-sleeve, Shear-screw, Threaded-rebar ตามลำดับ (Rowell และ Grey ,2009)

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อการให้อัตราความเครียดที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังที่จุดครากรวมถึงกำลังที่จุดวิบัติของเหล็กมีค่ามากขึ้นตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1 อีกทั้งยังส่งผลต่อพฤติกรรมในการรับแรงดึงโดยข้อต่อเชิงกลทุกประเภทจะมีพฤติกรรมแย่งกว่าเหล็กเสริมควบคุมโดยแสดงให้เห็นเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบของผลการทดสอบ ดังตารางที่ 2.2 โดยจะเห็นได้ว่าข้อต่อเชิงกลประเภท Threaded Rebar Coupler System และ Upset Head ยังคงมีพฤติกรรมให้เคียงเหล็กควบคุมในทุกระดับของการให้อัตราความเครียด และการวิบัติโดยส่วนใหญ่จะเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริมภายนอกข้อต่อเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยความเสียหายจะเกิดมากขึ้นเมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้นส่งผลให้ข้อต่อเชิงกลประเภท Grouted Sleeve และ Shear Screw เกิดการวิบัติในลักษณะที่เหล็กเสริมหลุดออกจะตัวข้อต่อเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 การวิบัติที่เหล็กเสริมภายนอกข้อต่อเชิงกลของข้อต่อเชิงกลประเภท Taper-threaded (ซ้าย), Upset-head (ขวา), Threaded-rebar (กลาง) ตามลำดับ (Rowell และ Grey ,2009)



รูปที่ 2.7 การวิบัติในลักษณะที่เหล็กเสริมหลุดออกจอตั้วข้อต่อเชิงกลประเภท Grouted Sleeve Coupler (Rowell และ Grey,2009)



รูปที่ 2.8 การวิบัติในลักษณะที่เหล็กเสริมหลุดออกจอตั้วข้อต่อเชิงกลประเภท Shear Screw (Rowell และ Grey ,2009)

ตารางที่ 2.1 ตารางผลการทดสอบข้อต่อเชิงกลแต่ละประเภท (Rowell และ Grey, 2009)

Specimen Name	Slow Strain Rate			Intermediate Strain Rate			Rapid Strain Rate		
	Yield Stress (psi)	Ultimate Strength (psi)	Strain Rate	Yield Stress (psi)	Ultimate Strength (psi)	Strain Rate	Yield Stress (psi)	Ultimate Strength (psi)	Strain Rate
Control Bar 1	70800	117000	0.0037	74800	119500	0.064	89800	129600	3.2
TTC	69100	117100	0.003	73100	109200	0.060	86500	98800	3.2
UHC	71000	119200	0.003	73400	118100	0.062	87700	116800	3.2
GSC	70200	114500	0.004	74200	122000	0.061	83600	124700	3.2
SSC	69300	86000	0.004	72900	100000	0.064	80000	98800	3.5
Control Bar 2	76100	110400	0.0031	81500	115200	0.0052	99000	122000	3.2
TBC	80600	111600	0.003	80900	113700	0.049	96400	121800	3.3

ตารางที่ 2.2 ตารางเปอร์เซ็นต์ผลการทดสอบของข้อต่อเชิงกลเทียบกับเหล็กควบคุม (Rowell และ Grey, 2009)

Specimen Name	Slow Strain Rate			Intermediate Strain Rate			Rapid Strain Rate		
	Yield Stress (psi)	Dynamic Ultimate Strength	Ductility Ratio	Yield Stress	Dynamic Ultimate Strength	Ductility Ratio	Yield Stress	Dynamic Ultimate Strength	Ductility Ratio
TTC	97	100	116	97	91	53	96	76	13
UHC	100	102	110	98	99	60	97	90	49
GSC	99	98	61	99	102	79	93	96	53
SSC	97	73	21	97	84	32	89	76	16
TBC	105	100	63	99	99	81	97	99	82

หมายเหตุ : TTC – Taper Threaded Coupler System

UHC – Upset Head System

GSC – Grouted Sleeve Coupler System

SSC – Shear Screw Coupler System

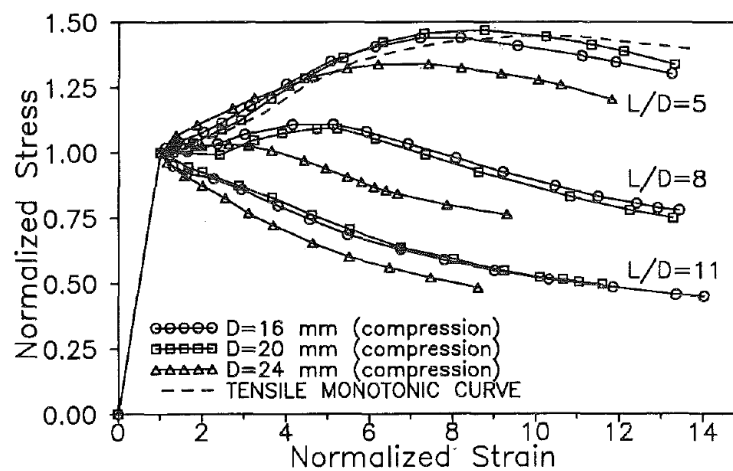
TBC – Threaded Rebar Coupler System

Control Bar 1 ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับ TTC, UHC, GSC, SSC

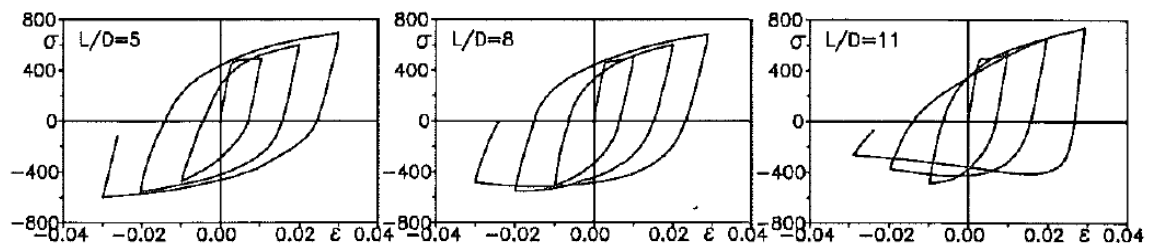
Control Bar 2 ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับ TBC

## 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวัฏจักร

Monti และ Nuti (1992) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว และแรงกระทำแบบวัฏจักร โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ( $L/D$ ) ซึ่งอัตราส่วนที่พิจารณามีค่า 5, 8 และ 11 ซึ่งมีที่มาจากค่าของระยะห่างของเหล็กปลอกที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป โดยในการทดสอบได้ใช้เหล็กที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 440 เมกะปาสคาล และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16, 20 และ 24 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดสอบพบว่า เมื่ออัตราส่วนความขะลูดมีค่าเท่ากับ 5 พบว่าพฤติกรรมใกล้เคียงกับกับเหล็กเสริมรับแรงดึง แต่เมื่อค่าอัตราส่วนนี้มีค่ามากกว่า 5 ความสามารถในการรับแรงหลังเลยจากจุดครากจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 2.9

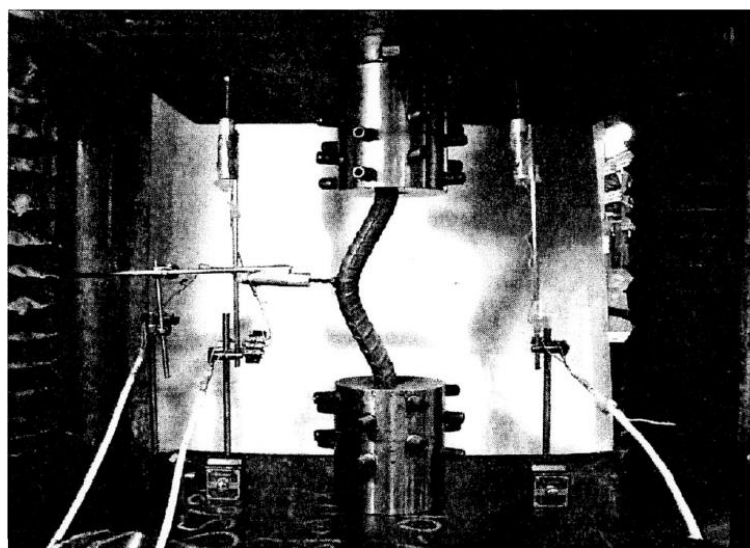


รูปที่ 2.9 อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด (Monti และ Nuti ,1992)



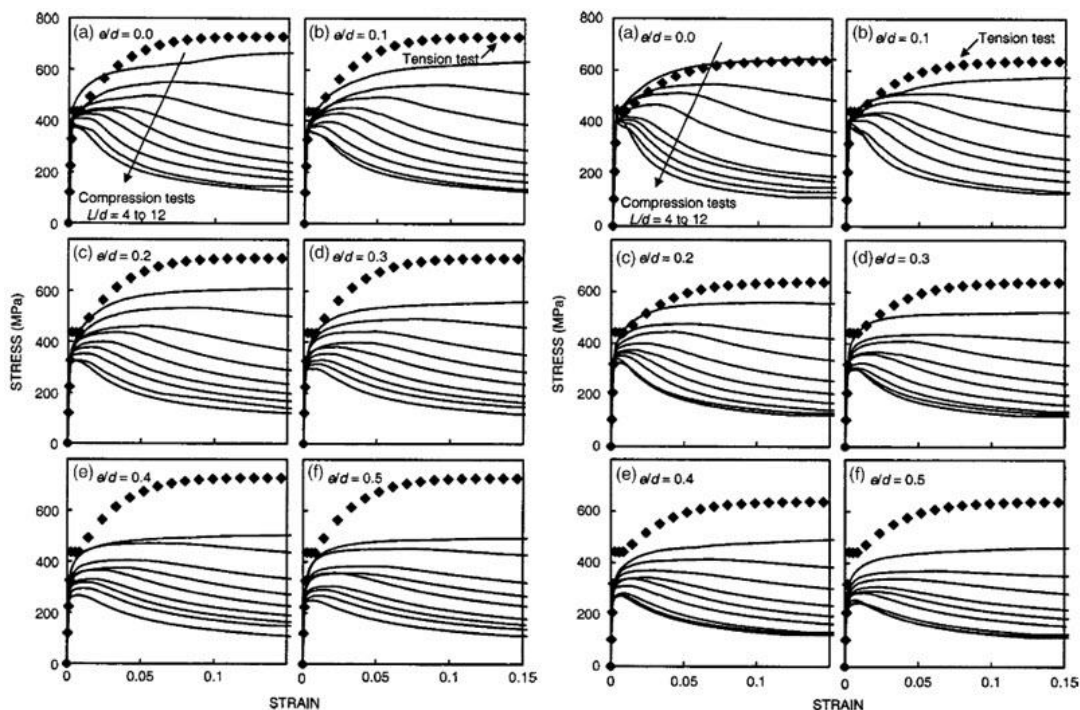
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Monti และ Nuti ,1992)

Bae และคณะ (2005) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมจำนวน 162 เส้น ภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ( $L/d$ ) ผลความไม่สมมาตรเริ่มต้นหรือการเยื้องศูนย์เริ่มต้น ( $e/d$ ) ซึ่งอัตราส่วนความชะลูดที่พิจารณามีค่า 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 และค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้นมีค่า 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยในการทดสอบได้ใช้เหล็ก Grade 60 ขนาด No. 8 และ No. 10 ซึ่งมีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 440 เมกะปาสคาล และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25.4 และ 32.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบได้ติดตั้งอุปกรณ์การวัดการเคลื่อนที่ จำนวน 3 ตัว โดยที่ 2 ตัวไว้สำหรับการวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และอีก 1 ตัว ไว้สำหรับการวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบ ซึ่งในการทดสอบไม่ใช้การตรวจวัดด้วยเกจวัดความเครียดเนื่องจากว่าการติดเกจวัดความเครียดจะเป็นการรบกวนตัวอย่างทดสอบ โดยการลดพื้นที่หน้าตัด อีกทั้งไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมภาพรวมของเหล็กเสริมภายหลังการโก่งเดาะได้

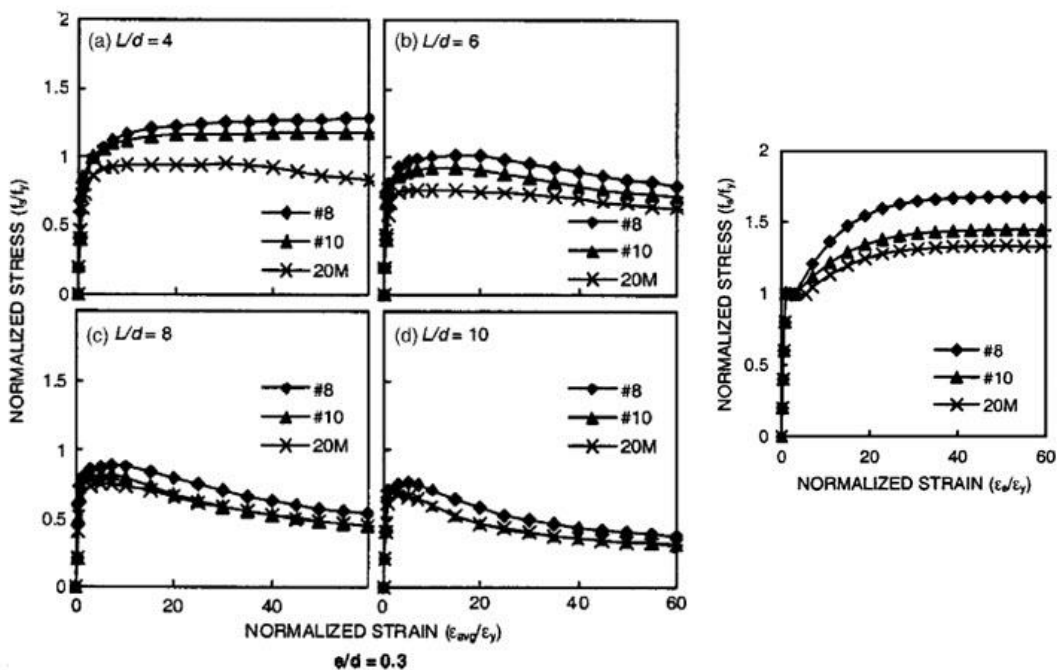


รูปที่ 2.11 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bae และคณะ ,2005)

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมจะเป็นแบบเหนียวกล่าวคือ เหล็กเสริมยังคงสามารถรับแรงได้สูงกว่าค่าความเค้นที่จุดครากเมื่อค่าความเครียดของ เมื่ออัตราส่วนความชะลูดและค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการรับแรงลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมไม่สามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดคราก เนื่องจากเกิดการโก่งเดาะก่อนถึงจุดคราก นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมภายหลังการโก่งเดาะยังดีขึ้น เมื่อค่าอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงประลัยกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมมีค่าสูงขึ้น โดยอ้างอิงผลการทดสอบเพิ่มเติมจาก Bayrak และ Sheikh (2001)

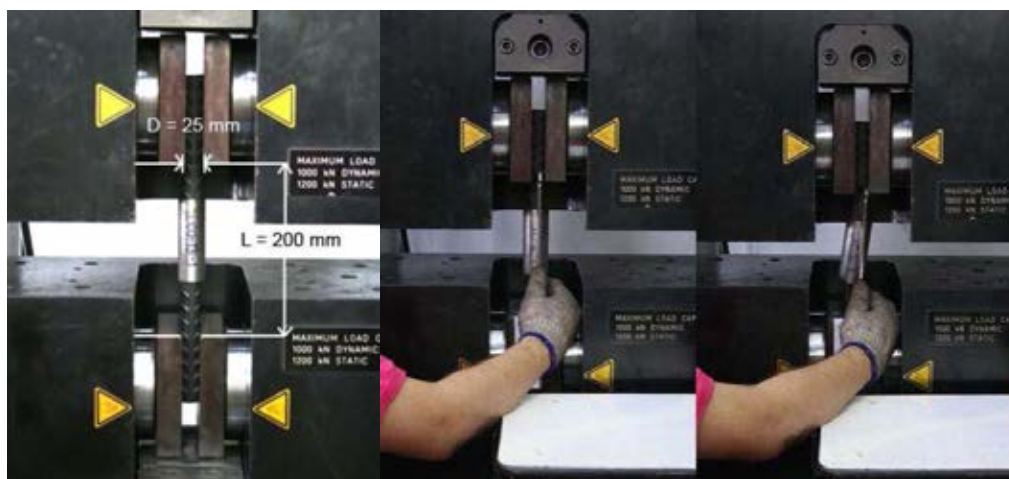


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเหล็ก No.8 และ No.10 (Bae และคณะ ,2005)



รูปที่ 2.13 ผลของอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงประลัยกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กที่มีผลต่อพฤติกรรมหลังการโค้งเดาะของเหล็กเสริม (Bae และคณะ ,2005)

Ruangrassamee และ Sawaraj (2010) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำอัดตามแนวแกน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่สวมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม โดยในการทดสอบได้ใช้เหล็กที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 492 เมกะปาสคาล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลูด (L/d) เท่ากับ 8 และมีการสวมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมซึ่งทำจากเหล็ก เกรดSS400 ซึ่งเป็นเหล็กที่ไม่มีผลเนื่องจากการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (Strain hardening) ที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 513 เมกะปาสคาล โดยทดสอบด้วยเครื่องให้แรงตามแนวแกนโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) โดยรูปที่ 2.14 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์พร้อมทั้งการทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม และขนาดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.3



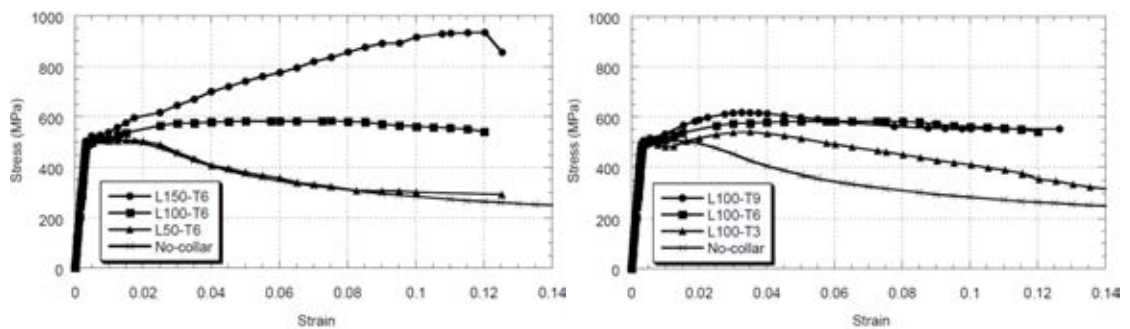
รูปที่ 2.14 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (ซ้าย) การทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม (ขวา)  
(Ruangrassamee และ Sawaraj, 2010)

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดขนาดปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม (Ruangrassamee และ Sawaraj, 2010)

Length (mm)	Thickness (mm)		
	9	6	3
150	-	L150-T6	-
100	L100-T9	L100-T6	L100-T3
50	-	L50-T6	-



จากผลการทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังรับแรงอัดที่จุดครากที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีความแตกต่างกันภายหลังจุดคราก โดยที่ตัวอย่าง L150-T6 สามารถรับแรงอัดตามแนวแกนภายหลังจุดครากได้สูงที่สุด ซึ่งสามารถรับแรงได้มากกว่ากำลังที่จุดคราก และตัวอย่าง L50-T6 มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และพบว่าตัวอย่าง L100-T6 และ T100-T9 สามารถรับแรงได้ค่อนข้างคงที่ภายหลังจุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 แสดงความเสียหายของเหล็กเสริมภายหลังการทดสอบ



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม แปรรูปความยาว(บน), แปรรูปความหนา(ล่าง) (Ruangrassamee และSawaroj ,2010)

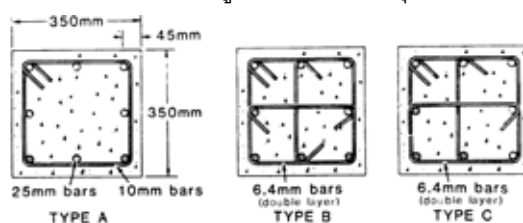


รูปที่ 2.16 ความเสียหายของเหล็กเสริมที่ความเครียด 0.13 (Ruangrassamee และSawaroj ,2010)



## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

Ozcebe และ Saatcioglu (1987) ได้ทำการทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.35x0.35 เมตร สูง 0.90 เมตร เสาจำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวัฏจักร และแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลของระยะห่างของเหล็กปลอก และรูปแบบการเสริมเหล็กปลอก โดยรูปแบบการเสริมเหล็กปลอกที่พิจารณามี 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 เหล็กปลอกเดี่ยวของอ 135 องศา ที่มีการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-83 ที่คำนึงผลของแผ่นดินไหวสำหรับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง รูปแบบที่ 2 และ 3 มีการเสริมเหล็กยึดทางขวาง (crosstie) เพิ่มเติมจากรูปแบบที่ 1 โดยในรูปแบบที่ 2 ปลายทั้งสองข้างของเหล็กยึดทางขวางใช้ของอ 135 องศา และรูปแบบที่ 3 ปลายด้านหนึ่งของเหล็กยึดทางขวางใช้ของอ 135 องศา และอีกด้านหนึ่งใช้ของอ 90 องศา โดยรูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัดแสดงในรูปที่ 2.17 และคุณสมบัติเสาแสดงดังตารางที่ 2.4

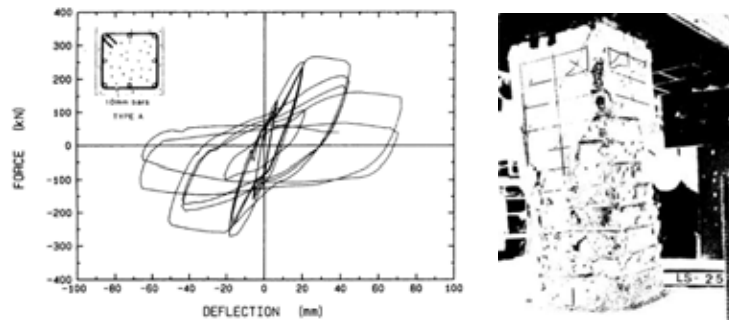


รูปที่ 2.17 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Ozcebe และ Saatcioglu ,1987)

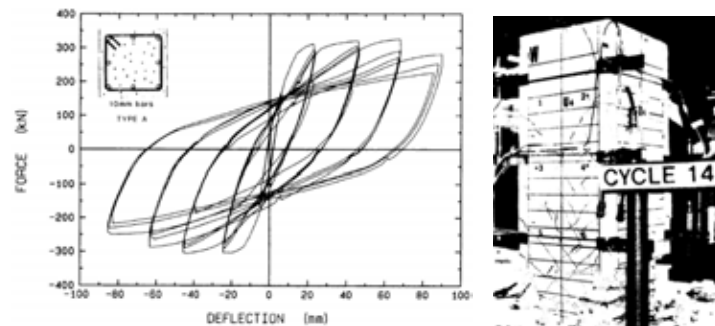
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเสา (Ozcebe และ Saatcioglu ,1987)

Specimen	Concrete strength (MPa)	Longitudinal steel		Transverse steel				
		Fyl (Mpa)	$\rho_l$ (present)	Fyt (Mpa)	$\rho_t$ (present)	S (mm)	Confin. Config.	Astfyt/s (N/mm)
U3	34.8	438	3.27	470	1.69	75	Type A	1253
U4	32.0	438	3.27	470	2.54	50	Type A	1880
U6	37.3	437	3.27	425	1.95	65	Type B	1262
U7	39.0	437	3.27	425	1.95	65	Type C	1262

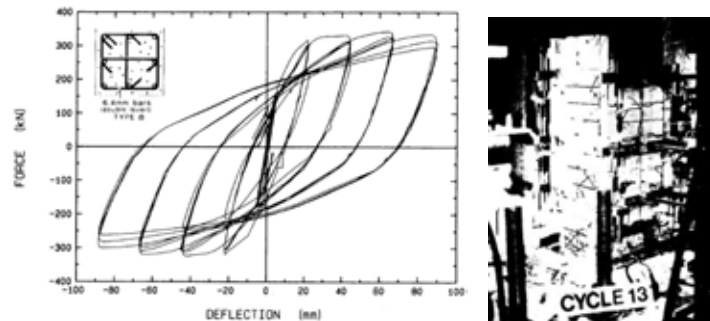
ผลการทดสอบพบว่าในเสาที่มีรูปแบบการเสริมเหล็กปลอกเหมือนกัน ความเหนียวและความสามารถในการรับแรงทางข้างของเสามีค่าสูงขึ้น เมื่อระยะห่างของเหล็กปลอกลดลง และพบว่าเสาที่มีการเพิ่มเหล็กยึดทางขวาง (crosstie) มีความเหนียวและความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างที่ดีกว่า แม้ว่าปริมาณเหล็กปลอกน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กยึดทางขวางที่มีของอ 135 องศา ทั้งสองข้าง มีประสิทธิภาพเหมือนกับเหล็กยึดทางขวางที่มีของอ 135 องศา และ 90 องศา จากรูปที่ 2.18 ถึงรูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา



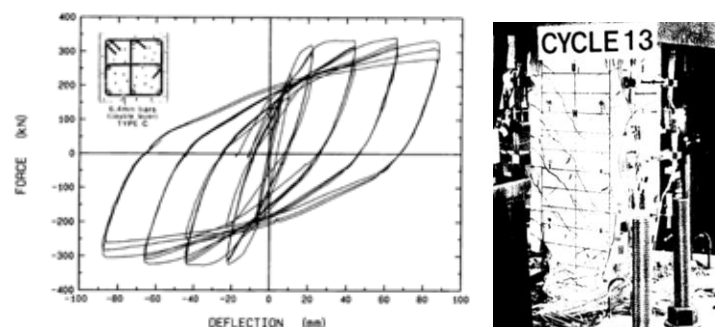
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U3  
(Ozcebe และ Saatcioglu ,1987)



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U4  
(Ozcebe และ Saatcioglu ,1987)

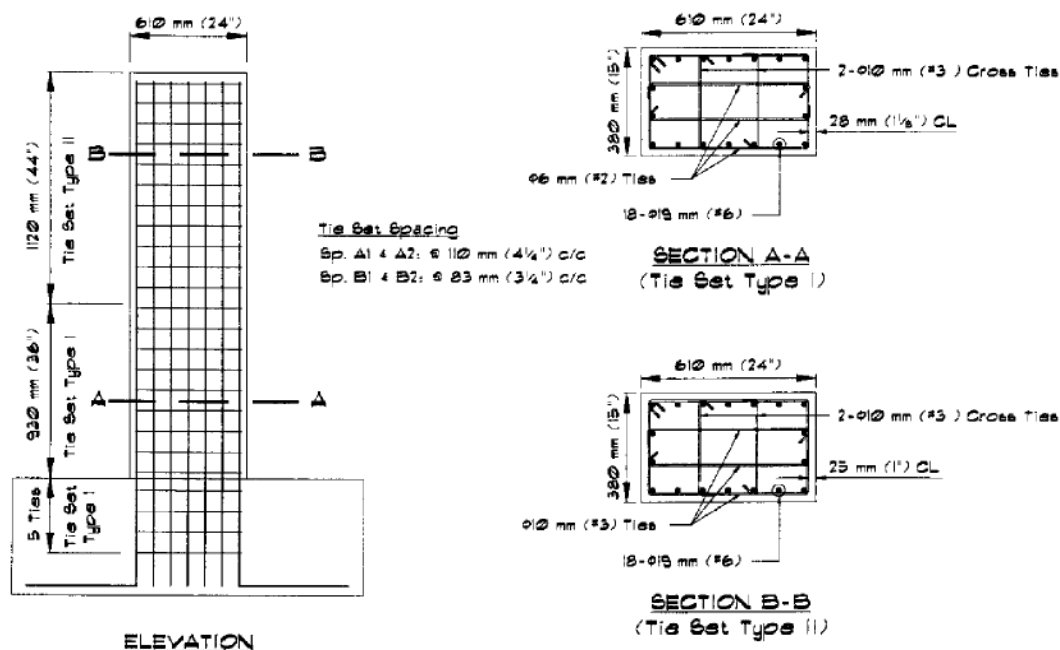


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U6  
(Ozcebe และ Saatcioglu ,1987)



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา U7  
(Ozcebe และ Saatcioglu ,1987)

Wehbe และคณะ (1999) ได้ทำการทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.38x0.61 เมตร สูง 2.05 เมตร เสาจำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวิวิจจักร และแรงกระทำตามแนวแกนคดงที่ โดยพิจารณาผลของปริมาณการเสริมเหล็กปลอก และแรงอัดตามแนวแกน ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กปลอกที่พิจารณามีค่า 46% และ 60% ของปริมาณเหล็กปลอกตามมาตรฐาน AASHOTO และแรงอัดตามแนวแกนที่มีค่าประมาณ 0.1 และ 0.25f<sub>c</sub>'A<sub>g</sub> รูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัดแสดงดังรูปที่ 2.22 และคุณสมบัติของเสาแสดงดังตารางที่ 2.5

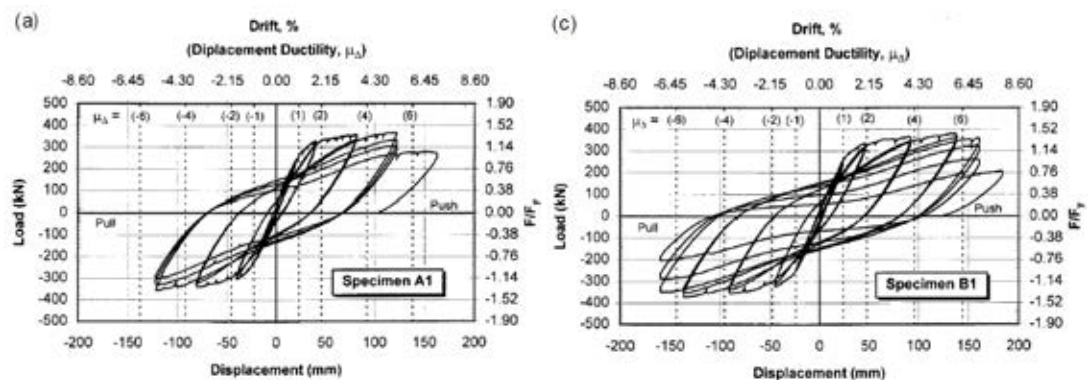


รูปที่ 2.22 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Wehbe และคณะ ,1999)

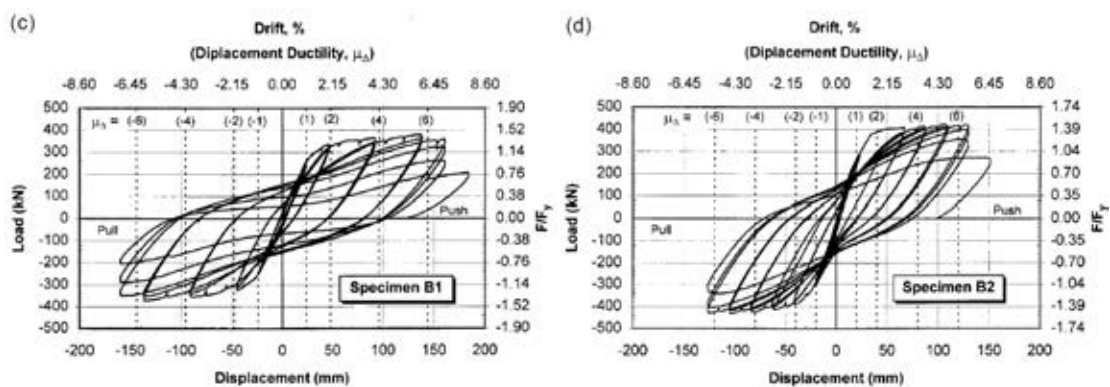
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเสา (Wehbe และคณะ ,1999)

Specimen	Concrete strength (MPa)	Axial Load (kN)	Axial load ratio (P/fc'Ag)	Longitudinal Reinforcement		Transverse Reinforcement			
				Fyl (Mpa)	ρl (%)	Fyt (Mpa)		ρt (present)	
				Ø19	Ø19	Ø6	Ø10	Short	Long
A1	31.7	615	0.1	448	2.2	455	428	0.37	0.35
A2	27.2	1505	0.24					0.37	0.35
B1	29.7	601	0.009					0.48	0.46
B2	28.1	1514	0.23					0.48	0.46

จากผลการทดสอบพบว่าความเหนียวของเสามีค่าประมาณ 5 เมื่อมีการเสริมเหล็กปลอกประมาณ 50%ตามมาตรฐานการออกแบบ AASHTO จากรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ค่าความเหนียวของเสามีค่ามากขึ้นแต่ไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อความสามารถในการรับแรงทางด้านข้าง และเมื่อแรงอัดตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเหนียวของเสาลดลง แต่สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.24



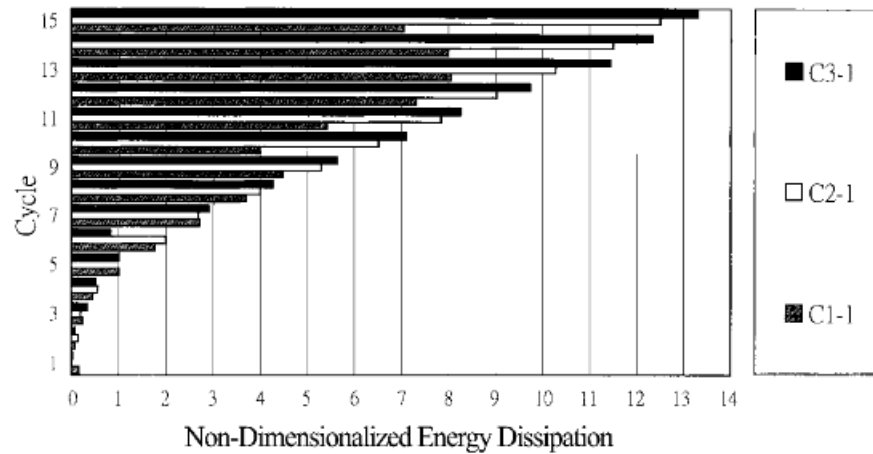
รูปที่ 2.23 ผลของปริมาณเหล็กปลอกที่มีผลต่อความเหนียวของเสา (Wehbe และคณะ ,1999)



รูปที่ 2.24 ผลของแรงอัดตามแนวแกนที่มีผลต่อความเหนียวของเสาและความสามารถในการรับแรงทางด้านข้าง (Wehbe และคณะ ,1999)

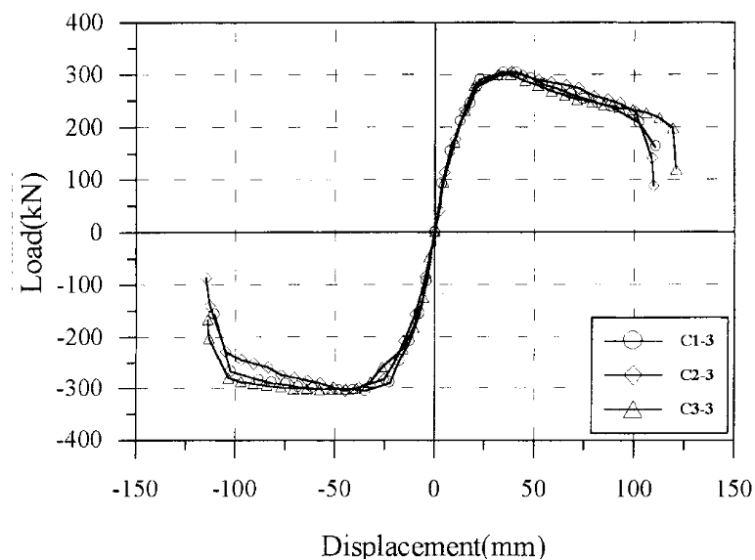


จากผลการทดสอบพบว่า ความเหนียวของเสามีค่าใกล้เคียงกันในการเสริมเหล็กตามขวางแต่ละรูปแบบ แต่เสาที่มีการเสริมเหล็กแบบ C2 และ C3 มีค่าอัตราการสลายพลังงานที่สูงกว่าเสาแบบ C1 และเสาที่มีแรงอัดตามแนวแกนมากจะมีค่าอัตราการสลายพลังงานที่สูงกว่าเสาที่มีแรงอัดตามแนวแกนน้อยกว่า อีกทั้งยังพบว่าอัตราการสลายพลังงานของเสาแต่ละแบบจะมีความแตกต่างกันมากขึ้นในการทดสอบช่วงหลัง



(a) Effect of Configuration of Transverse Reinforcement

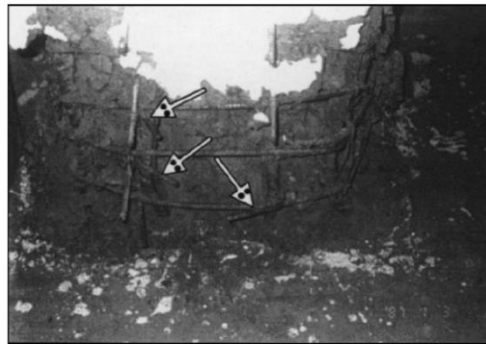
รูปที่ 2.26 ค่าอัตราการสลายพลังงานของเสาที่มีการเสริมเหล็กตามขวางแต่ละรูปแบบ (Mo และ Wang ,2000)



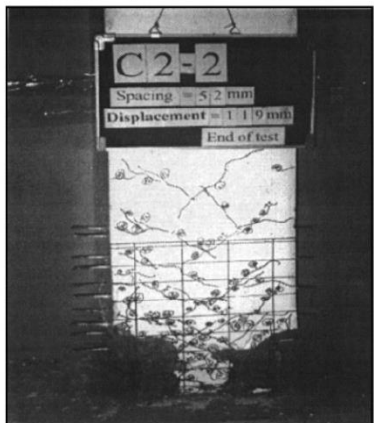
รูปที่ 2.27 ค่าอัตราการสลายพลังงานของเสาที่มีการเสริมเหล็กตามขวางแต่ละรูปแบบ (Mo และ Wang ,2000)



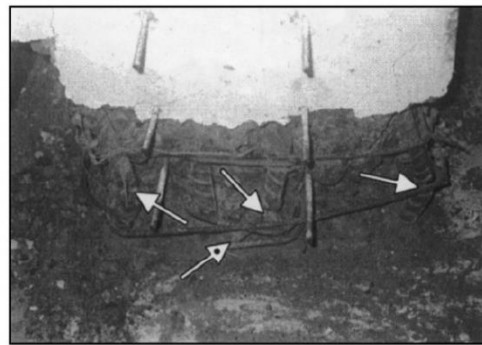
(a) Specimen C1-1



(b) Plastic Hinge Region of Specimen C1-1



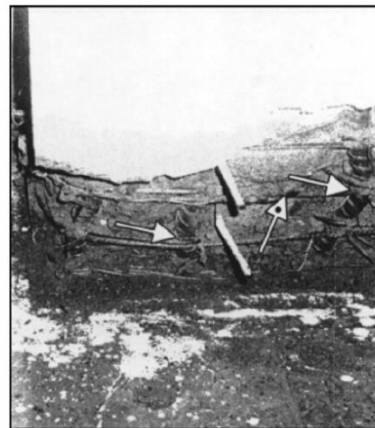
(c) Specimen C2-2






(d) Plastic Hinge Region of Specimen C2-2



(e) Specimen C3-1

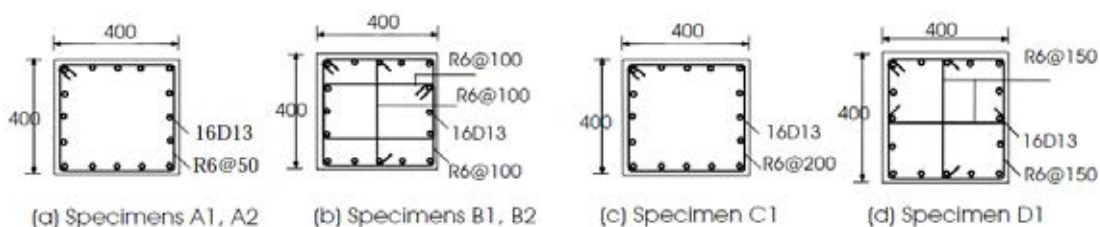


(f) Plastic Hinge Region of Specimen C3-1

Notes :  Longitudinal bar rupture  
 Tie rupture  
 Crosstie loose

รูปที่ 2.28 ลักษณะการวิบัติและลักษณะการแตกร้าวของเสา (Mo และ Wang ,2000)

Ongsupankul และคณะ (2006) ได้ทำการทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.40x0.40 เมตร สูง 1.55 เมตร เสาจำนวน 6 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวิวัจักร และแรงกระทำตามแนวแกนคียงที่ ซึ่งเป็นเสาที่ลดสัดส่วนมาจากเสาสะพานที่มีอยู่จริง โดยพิจารณาผลของการเยื้องศูนย์, รูปแบบการเสริมเหล็กปลอก และปริมาณการเสริมเหล็กปลอกที่มีต่อกำลัง และระยะการเคลื่อนตัวสูงสุด ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กปลอกที่พิจารณามีค่า 25% ของปริมาณเหล็กปลอกตามมาตรฐานการออกแบบ AASHOTO ที่คำนึงผลของแผ่นดินไหวสำหรับ Zone3 ( $0.19g < a < 0.29g$ ) และตามมาตรฐานการออกแบบ AASHOTO ที่ไม่คำนึงผลของแผ่นดินไหว และพิจารณาการเยื้องศูนย์ที่ระยะ 0.15 ของขนาดเสา โดยรูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัดแสดงดังรูปที่ 2.29 และคุณสมบัติของเสาแสดงดังตารางที่ 2.7



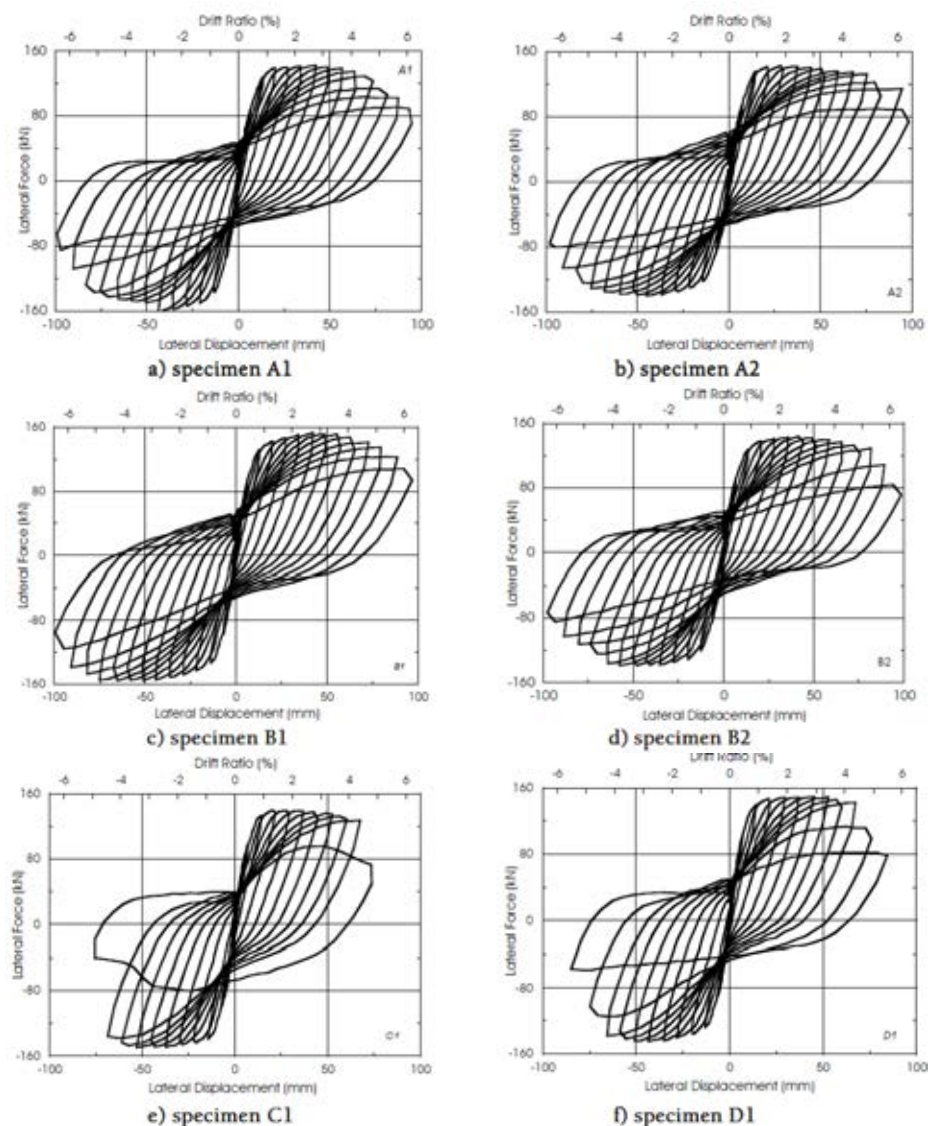
รูปที่ 2.29 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Ongsupankul และคณะ ,2006)

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของเสา (Ongsupankul และคณะ ,2006)

Specimens	A1	A2	B1	B2	C1	D1
Section size, b x h (mm)	400x400 (square)					
Effective height, L (mm)	1550					
Effective depth, d (mm)	360					
Ratio of tie reinforcement $\{A_{sh}/(S_{hc}), \rho_s(\%)\}$	0.37		0.37		0.09	0.19
Volume ratio of tie bar $\{V_{core}/(V_{sh}), \rho_{st}(\%)\}$	0.75		0.93		0.19	0.50
Cylinder strength of concrete ( $f'_c$ )(MPa)	32.36		29.61		32.36	29.61
Longitudinal reinforcement (%) ( $F_y=390$ MPa)	1.27% (16DB13 SD345)					
Tie reinforcement ( $F_y=245$ MPa)	1-R6@50		2-R6@100		1-R6@200	1.5-R6@150
Axial force (kN)	384 kN					
Axial force index $\{P/(f'_c A_g)\}$	0.074		0.081		0.074	0.081
Eccentricity (e/h)	0	0.15	0	0.15	0	0



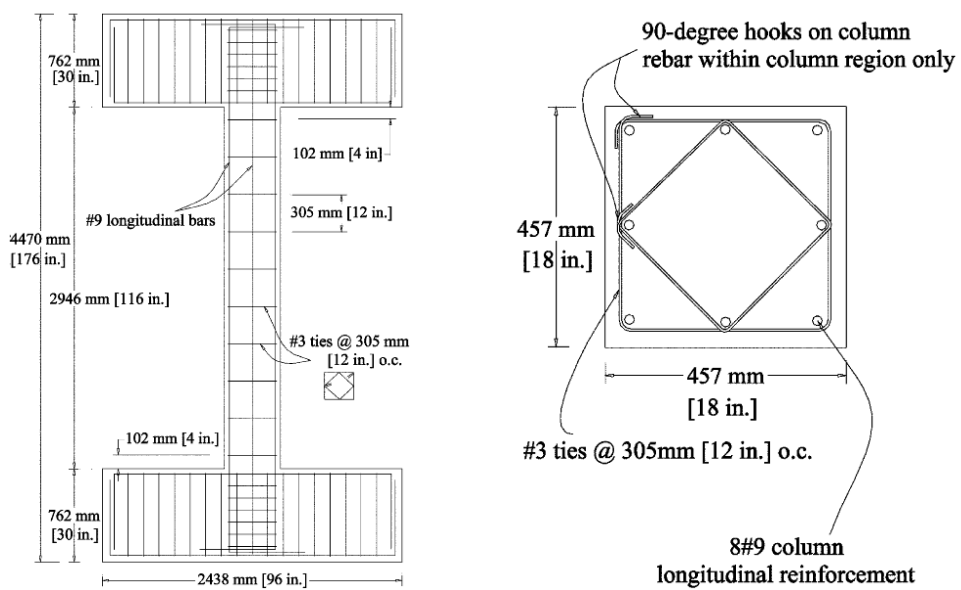
จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกไม่ส่งผลต่อค่ากำลังในการรับแรง ด้านข้างที่จุดครากและจุดสูงสุด แต่จะส่งผลให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด ค่าความเหนียว และค่าการสลายพลังงานเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มเหล็กยึดทางขวาง(cross tie) หรือการเพิ่มเหล็กปลอกวงใน (cross closed) จะส่งผลให้เสามีพฤติกรรมที่ดีกว่าการเสริมด้วยเหล็กรักรอบเพียงอย่างเดียว จะช่วยไม่ให้เหล็กเสริมรักรอบเกิดการโก่งเดาะ และลดการถูกอัดแตกของแกนคอนกรีต อีกทั้งเสามีแรงกระทำตามแนวแกนเยื้องศูนย์กลางที่ระยะ 0.15 ของขนาดเสา กับเสาที่รับแรงกระทำที่ศูนย์กลาง เสา มีพฤติกรรมกรรมที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา

(Ongsupankul และคณะ ,2006)

Sezen และ Moehle (2006) ได้ทำการทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.457x0.457 เมตร สูง 2.946 เมตร เสาจำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวิถัจกร และแรงกระทำตามแนวแกนคงที่และไม่คงที่ โดยพิจารณาผลของประวัติการให้แรงตามแนวแกน และการให้แรงทางข้าง โดยมีการพิจารณาเสาที่มีการให้แรงกระทำทางข้างทิศทางเดียว (monotonic) โดยเสาที่ทดสอบเป็นเสาที่มีการเสริมเหล็กทางข้างในปริมาณต่ำ ซึ่งเป็นเสาทั่วไปในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว โดยรูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัดแสดงดังรูปที่ 2.31 และคุณสมบัติของเสาแสดงดังตารางที่ 2.8

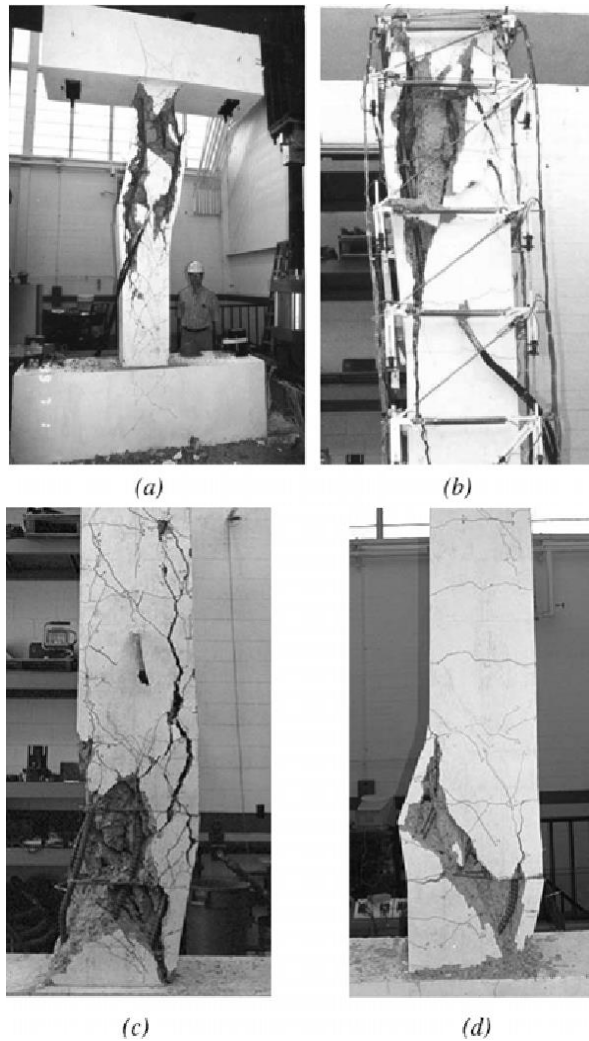


รูปที่ 2.31 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Sezen และ Moehle ,2006)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของเสา (Sezen และ Moehle ,2006)

Specimen	Concrete strength (MPa)	Axial Load (kN)	Axial Force Ratio ( $P/f_c'Ag$ )	Longitudinal Reinforcement		Transverse Reinforcement		Displacement history
				$\rho_l$	$F_y$ (MPa)	$\rho_s$	$F_{sh}$ (MPa)	
1	21.1	667	0.16	0.025	438	0.0017	476	Standard
2	21.1	2670	0.63					Standard
3	20.9	2670 / -250	0.636					Standard
4	21.8	667	0.152					Monotonic

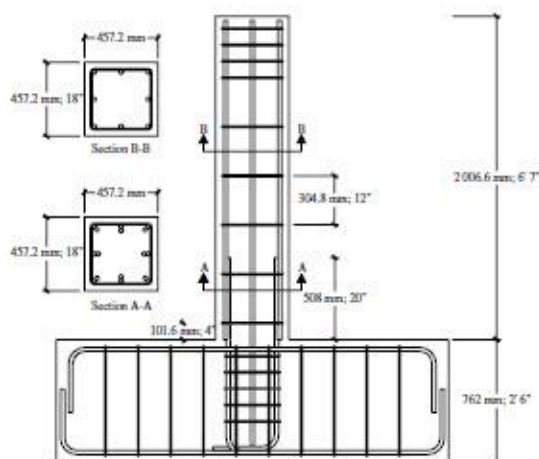
จากผลการทดสอบพบว่า เสาทั้ง 4 ต้นมีรูปแบบการวิบัติแบบเฉือน และแรงตามแนวแกน ดังแสดงดังรูปที่ 2.32 ซึ่งถือเป็นการวิบัติแบบเปราะที่เสาคจะสูญเสียกำลังรับแรงทันทีเมื่อเกิดการวิบัติ โดยประวัติการให้แรงตามแนวแกน และการให้แรงทางข้างมีผลต่อพฤติกรรมของเสา โดยเสาที่รับแรงกระทำตามแนวแกนสูงกว่าจะมีระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดที่น้อยกว่าเสาที่มีแรงกระทำต่ำกว่า และเสาที่มีการแปรผันแรงกระทำตามแนวแกน พบว่าในช่วงรับแรงดึงและแรงอัดมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันโดยกำลังจะลดลงเมื่อเสาอยู่ในช่วงรับแรงอัด เสาที่รับแรงกระทำทางข้างทิศทางเดียว(monotonic) จะมีค่าความเหนียว และค่าการเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุดมากกว่าเสาที่รับแรงกระทำทางข้างแบบวัฏจักร อีกทั้งการลื่นหลุดของเหล็กเสริมตามยาวส่งผลอย่างมากต่อสติฟเนสทางด้านข้าง



รูปที่ 2.32 ลักษณะการวิบัติของเสาแบบเฉือน และแรงตามแนวแกน

(Sezen และ Moehle ,2006)

Melek และWallace (2004) ได้ทำการทดสอบเสาที่มีขนาดหน้าตัด 0.457 ม. x 0.457 ม. สูงระหว่าง 1.53 ม. ถึง 1.83 ม. จำนวน 5 ต้น ที่มีการต่อทาบของเหล็กเสริมตามยาวเป็นระยะ 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยื่น ดังรูปที่ 2.33 โดยศึกษาการแปรผันค่าแรงอัดตามแนวแกน และผลจากค่าโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือน แสดงดังตารางที่ 2.9



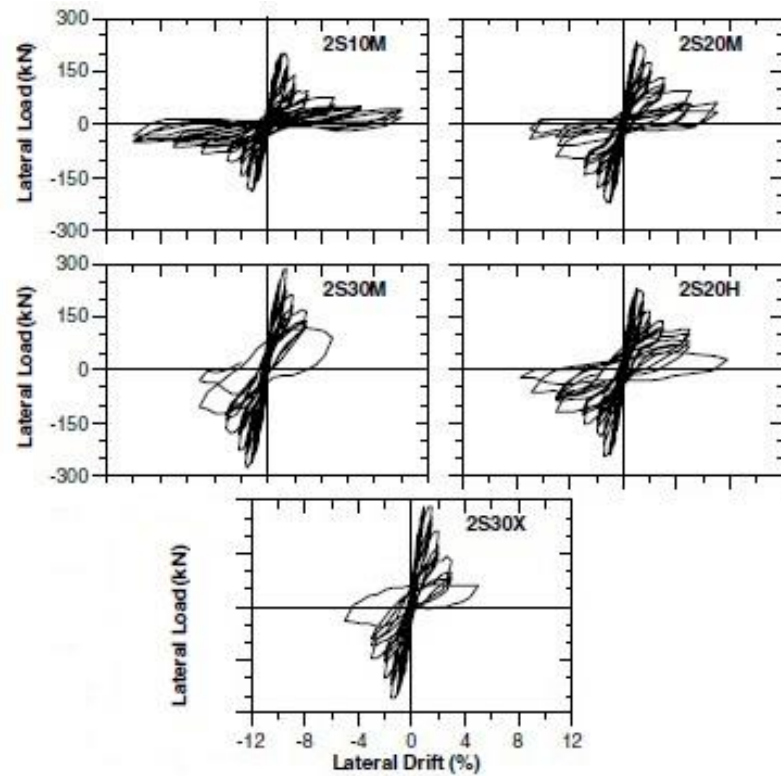
รูปที่ 2.33 ขนาดหน้าตัดและระยะการต่อทาบเสริมเหล็ก (Melek และWallace ,2004)

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของเสา (Melek และWallace ,2004)

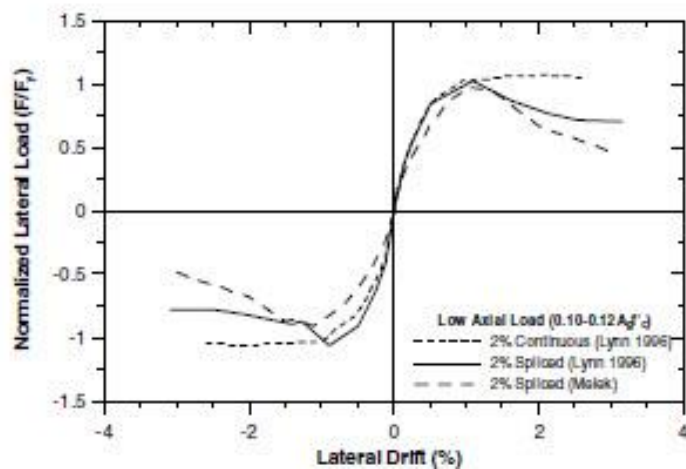
Specimen	$\% \frac{P}{A_s f'_c}$	$\frac{I_s \text{ provided}}{I_s \text{ required}}$	$V_c$ (kN)	$V_n$ (kN)	$\frac{V_u @ M_{EXP}}{V_n}$	Column Height (mm)
2S10M	10	0.65	212	301	0.67	1829
2S20M	20	0.65	245	334	0.70	1829
2S30M	30	0.65	278	367	0.78	1829
2S20H	20	0.64	242	331	0.81	1676
2S30X	30	0.64	275	363	0.93	1524

ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนจะส่งผลให้ค่าความเหนียวและการสลายพลังงานสะสมลดลง โดยเสาที่มีแรงอัดตามแนวแกนสูงจะมีความเหนียวต่ำกว่าเสาที่มีแรงอัดตามแนวแกนต่ำ ส่งผลให้มีความสามารถในการสลายพลังงานที่ตามเช่นกัน สำหรับอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเฉือน ส่งผลต่อรูปแบบการเสียหายของเสาทดสอบ โดยเมื่ออัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเฉือนที่มีค่าสูง จะเกิดความเสียหายเล็กน้อยในช่วงการเคลื่อนที่น้อยๆ และเมื่อให้แรงที่อัตราการเคลื่อนที่ตัวสูงจะสูญเสียกำลังรับแรงทางด้านข้างอย่างรวดเร็ว ซึ่งเสาทดสอบที่มีการต่อทาบเหล็กตามยาวสามารถเคลื่อนตัวที่ได้ประมาณ 1.5% drift จากนั้นจะเริ่มสูญเสียความสามารถ

ในการรับแรงทางด้านข้างเหลือประมาณร้อยละ 80-90 ของเสาที่ไม่มี การต่อทาบเหล็กตามยาว เนื่องจากเกิดการเลื่อนหลุดระหว่างเหล็กที่มีความยาวในการต่อทาบไม่เพียงพอ

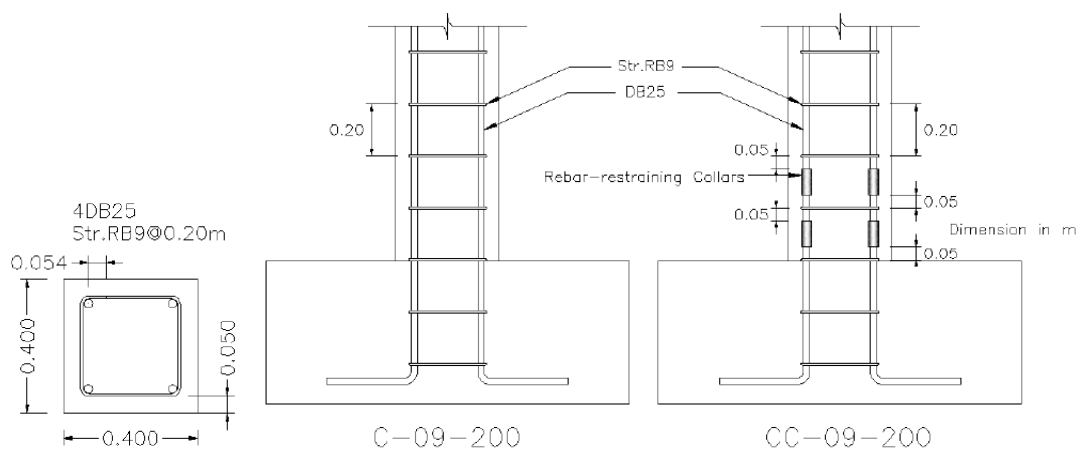


รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Melek และWallace ,2004)



รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำที่จุดคราก กับอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Melek และWallace ,2004)

Ruangrassamee และSawaroj (2010) ทำการทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.4x0.4 เมตร สูง 2.15 เมตร จำนวน 2 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวิถุจักร และแรงกระทำตามแนวแกน คงที่ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมา เพื่อป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยพิจารณาผลของผลของเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งขนาดของเสาที่ใช้ในการทดสอบเป็นขนาดของ เสาสะพานตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับสะพานชุมชนที่มีช่วงยาว 10 เมตร ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน โดยขนาดหน้าตัดและรูปแบบเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 2.36 และ คุณสมบัติของเสาแสดงดังตารางที่ 2.10

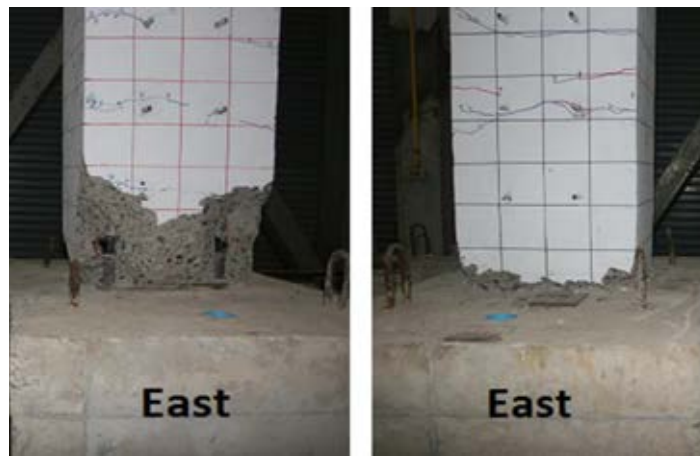


รูปที่ 2.36 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Ruangrassamee และSawaroj ,2010)

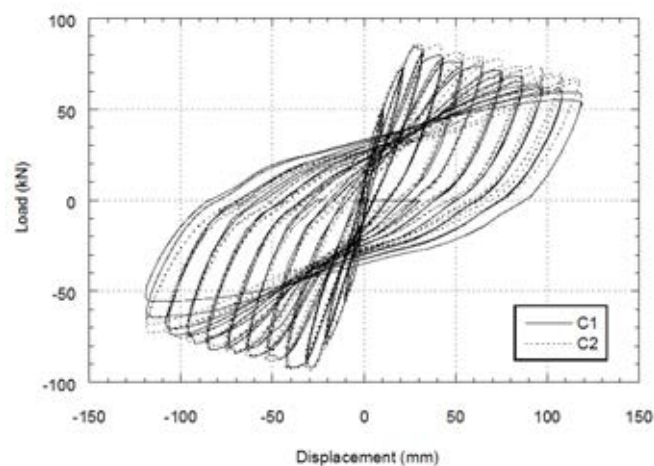
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของเสา (Ruangrassamee และSawaroj,2010)

Parameters of columns	C1	C2
Rebar-Restraining collars	No	Yes
Cross-section dimension (m)	0.40x0.40	
Effective height (m)	2.15	
Longitudinal reinforcement ratio	0.0123	
Volumetric ratio of transverse reinforcement	0.00424	
Cylinder compressive strength of concrete (MPa)	34.3	
Longitudinal reinforcement	4-DB 25 mm	
Transverse reinforcement	RB 9 mm @ 200 mm	
Axial force (kN)	314	
Axial force ratio, $P/fc'Ag$ (%)	5.7	

จากผลการทดสอบพบว่า เสาที่มีการเสริมปลอกยี่ดรั้งเหล็กเสริมมีการหลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณโคนเสาน้อยกว่าเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดรั้งเหล็กเสริม และไม่พบการโก่งเดาะของเหล็กเสริมสำหรับเสาต้นที่มีการเสริมปลอกยี่ดรั้งเหล็กเสริม และค่าความเหนียวของเสาที่มีค่าสูงชันกว่าเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดรั้งเหล็กเสริม 17% อีกทั้งพบว่าเหล็กเสริมตามยาวมีค่าความเครียดในด้านการรับแรงดึงที่สูงกว่าในด้านการรับแรงอัด เนื่องจากในด้านการรับแรงดึง มีเพียงเหล็กเสริมตามยาวเท่านั้นที่เป็นตัวรับแรง แต่ในด้านการรับแรงอัดมีคอนกรีตเป็นตัวช่วยในการรับแรง ดังแสดงดังรูปที่ 2.37นอกจากนี้จากรูปที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดของเหล็กตามขวางในด้านที่ขนานกับแรงกระทำมีค่าสูงกว่าด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำ



รูปที่ 2.37 ความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติก ภายหลังจากการทดสอบ C1(ซ้าย),C2(ขวา)  
(Ruangrassamee และSawaroj,2010)



รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา  
(Ruangrassamee และSawaroj,2010)

## 2.3 ค่าพารามิเตอร์และดัชนีของโครงสร้างเสา

### 2.3.1 อัตราส่วนความสูงต่อความลึกหน้าตัด (Shear span ratio)

$$\text{อัตราส่วนความสูงต่อความลึกหน้าตัด} = \frac{a}{h} \quad (2.1)$$

โดยที่  $a$  = ความสูงของเสาวัดจากผิวรอยต่อของเสากับคานถึงจุดเปลี่ยนความโค้ง

$h$  = ความกว้างของหน้าตัดเสาในด้านที่ขนานกับแรงกระทำด้านข้าง

ค่าอัตราส่วนความสูงต่อความลึกหน้าตัดแสดงให้เห็นถึงโอกาสที่จะในการเกิดการวิบัติในรูปแบบต่างๆ โดยหากค่าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยจะมีโอกาสที่จะเกิดการวิบัติแบบเฉือนได้สูงกว่าเสาที่มีค่าอัตราส่วนมาก

### 2.3.2 อัตราส่วนโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือน (Moment to shear capacity ratio)

$$\text{อัตราส่วนโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือน} = \frac{M_n}{h \cdot V_n} \quad (2.2)$$

โดยที่  $M_n$  = ค่าโมเมนต์ดัดระบุ

$V_n$  = ค่ากำลังรับแรงเฉือน

$h$  = ความสูงของเสาวัดจากผิวรอยต่อของเสากับคานถึงจุดเปลี่ยนความโค้ง

ค่าโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือนเป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงลักษณะการวิบัติของเสา โดยถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากกว่า 1 เสาจะมีโอกาสเกิดการวิบัติแบบเฉือน แต่หากมีค่าน้อยกว่า 1 เสาจะมีโอกาสเกิดการวิบัติแบบดัด

### 2.3.3 อัตราส่วนแรงในแนวแกน (Axial force ratio)

$$\text{อัตราส่วนแรงในแนวแกน} = \frac{P}{f'_c A_g} \quad (2.3)$$

โดยที่  $P$  = ผลรวมของน้ำหนักบรรทุกสถิต (dead load) และน้ำหนักบรรทุกจรเสมือนจริง ซึ่งขึ้นกับลักษณะการใช้งานของอาคาร

$f'_c$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต

ดัชนีนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความโค้งที่จุดคราก และความโค้งสูงสุดของโครงสร้าง โดยเสาที่มีค่าอัตราส่วนนี้มากจะส่งผลให้ค่าความโค้งที่จุดคราก และความโค้งสูงสุดของโครงสร้างมีค่าลดลง



### 2.3.4 ดัชนีเหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal reinforcement index)

$$\text{ดัชนีเหล็กเสริมตามยาว} = \frac{A_l}{b_w d} \quad (2.4)$$

โดยที่  $A_l$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาวทั้งหมด

$b_w$  = ความกว้างของหน้าตัดเสาในด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำด้านข้าง

$d$  = ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด

เสาที่มีค่าดัชนีนี้สูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการวิบัติแบบเฉือนสูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าโมเมนต์ดัดกระทำ

### 2.3.5 ดัชนีเหล็กเสริมตามขวาง (Transverse steel index)

$$\text{ดัชนีเหล็กเสริมตามขวาง} = \rho_s \sqrt{b''} / s \quad (2.5)$$

โดยที่  $\rho_s$  = ปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางในหนึ่งช่วงของเหล็กเสริมตามขวางหารด้วย ปริมาตรคอนกรีตซึ่งขนาดหน้าตัดคำนวณจากศูนย์กลางเหล็กเสริมตามขวางถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริม

$b''$  = ความกว้างของหน้าตัดเสาในด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำด้านข้าง โดยวัดจากศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวางถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง

$s$  = ระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวาง

โดยดัชนีนี้บ่งบอกถึงระดับของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และความเหนียวของเสา

## 2.4 มาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 2.4.1 มาตรฐานเกี่ยวกับเหล็กเสริมตามยาว

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาว (Ast) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.01A_g$  และไม่เกิน  $0.08A_g$  สำหรับการออกแบบที่ไม่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว และสำหรับการออกแบบที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.01A_g$  และไม่เกิน  $0.06A_g$  และต้องมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามยาวไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว และไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตร ด้วยเหตุผลที่เกี่ยวกับขนาดของมวลรวมหยาบในคอนกรีต

### 2.4.2 มาตรฐานเกี่ยวกับเหล็กเสริมตามขวาง

#### 2.4.2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับขนาดของเหล็กเสริมตามขวางในเสา

ต้องใช้เหล็ก No.10(9.5 มม.) หรือใหญ่กว่า สำหรับเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดไม่เกินเหล็ก No.32(32.3 มม.) และใช้เหล็ก No.13(12.7 มม.) หรือใหญ่กว่า สำหรับเหล็กเสริมตามยาว No.36(35.8 มม.), No.43(43.0 มม.) และ No.57(57.3 มม.)

#### 2.4.2.2 มาตรฐานเกี่ยวกับปริมาณและระยะห่างของเสริมตามขวาง

#### สำหรับการออกแบบที่ไม่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว

ได้กำหนดค่าระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางโดยให้เลือกใช้ค่าน้อยที่สุด

- 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว
- 48 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง
- ความกว้างด้านแคบสุดของหน้าตัดเสา

#### สำหรับการออกแบบที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวในบริเวณที่มีแผ่นดินไหวปานกลาง

ในบริเวณหัวเสา(ระยะ  $l_0$  จากผิวรอยต่อของเสา) ต้องมีค่าระยะห่างของเหล็กเสริมไม่เกิน

- 8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดน้อยที่สุด
- 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง(เหล็กรัศรอบ)
- 1/2 เท่าของความกว้างด้านแคบสุดของเสา
- 300 มิลลิเมตร

โดยที่ระยะ  $l_0$  ให้เลือกใช้ค่ามากที่สุดระหว่าง

- 1/6 เท่าของความสูงประสิทธิภาพผลของเสา
- ความกว้างด้านยาวสุดของหน้าตัดเสา
- 450 มิลลิเมตร

และระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางนอกช่วง  $l_0$  ต้องไม่มากกว่าข้อกำหนดสำหรับการออกแบบที่ไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหวดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

**สำหรับการออกแบบที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวในบริเวณที่มีแผ่นดินไหวรุนแรง**

ปริมาณพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามขวาง ( $A_{sh}$ ) ต้องไม่น้อยกว่า

$$A_{sh} = 0.3 \frac{sb_c f_c'}{f_{yt}} \left[ \left( \frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

และ

$$A_{sh} = 0.09 \frac{sb_c f_c'}{f_{yt}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $s$  = ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง โดยวัดจากจุดศูนย์กลางของเหล็กถึงศูนย์กลางของเหล็กอีกเส้น (มิลลิเมตร)

$b_c$  = ความกว้างของหน้าตัดคอนกรีตส่วนที่ได้รับการโอบรัดโดยวัดจากขอบนอกของเหล็กเสริมตามขวางถึงขอบนอกของเหล็กเสริมตามขวาง (มิลลิเมตร)

$f_c'$  = กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

$f_{yt}$  = กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (เมกะปาสคาล)

$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดของเสา (ตารางมิลลิเมตร)

$A_{ch}$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาโดยวัดจากขอบนอกของเหล็กเสริมตามขวางถึงขอบนอกของเหล็กเสริมตามขวาง (ตารางมิลลิเมตร)

โดยระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางต้องมีค่าไม่มากกว่า

- 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว
- 150 มิลลิเมตร

และระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางบริเวณหัวเสา (ระยะ  $L_0$  จากผิวรอยต่อของเสา) ต้องมีค่าไม่มากกว่า

- $1/3$  เท่าของความกว้างด้านแคบสุดของหน้าตัดเสา
- 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดน้อยที่สุด
- $S_0 = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3}\right)$  โดยที่  $h_x$  คือระยะห่างตามแนวนอนสูงสุดระหว่างเหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กยึดทางขวาง โดยวัดจากศูนย์กลางเหล็กเสริมถึงศูนย์กลางเหล็กเสริม โดยต้องไม่เกินกว่า 150 มิลลิเมตร และต้องไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร โดยที่ระยะ  $L_0$  ให้เลือกใช้ค่ามากที่สุดระหว่าง

- ความลึกประสิทธิภาพ
- $1/6$  เท่าของความสูงประสิทธิภาพของเสา
- 450 มิลลิเมตร

ทั้งนี้เสาต้องสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวได้โดยจะส่งผลกระทบต่อปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางในการออกแบบโดยรายละเอียดการหาค่ารับแรงเฉือนของหน้าตัด ได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 2.4.2.3 มาตรฐานเกี่ยวกับระยะของมาตรฐานของเหล็กเสริมตามขวาง

สำหรับการออกแบบที่ไม่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว สามารถเลือกใช้ลักษณะของอและความยาวของเหล็กเสริมได้ดังนี้

- 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง ที่มีของอ 90 องศา สำหรับเหล็ก No.16(15.9 มม.) หรือเล็กกว่า
- 12 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง ที่มีของอ 90 องศา สำหรับเหล็ก No.19(19.1 มม.) , No.22(22.2 มม.) และ No.25(25.4 มม.)
- 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง ที่มีของอ 135 องศา สำหรับเหล็ก No.25(25.4 มม.) หรือเล็กกว่า

สำหรับการออกแบบที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว

- ได้กำหนดลักษณะของอให้ไม่น้อยกว่า 135 องศา โดยมีระยะของของอเท่ากับ 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามขวาง และมีค่าไม่น้อยกว่า 75 มิลลิเมตร

### 2.4.3 มาตรฐานเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดตามขวาง

กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดมาจาก 2 ส่วน คือกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต และกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมตามขวาง ดังสมการที่ 2.5.1-2.5.3

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.8)$$

$$\text{โดยที่} \quad V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.9)$$

$$V_c = 0.17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.10)$$

- โดยที่
- $A_v$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามขวาง (ตารางมิลลิเมตร)
  - $f_{yt}$  = กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (เมกะปาสคาล)
  - $d$  = ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด (มิลลิเมตร)
  - $s$  = ระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวาง (มิลลิเมตร)
  - $N_u$  = แรงกระทำตามแนวแกน (นิวตัน)
  - $A_g$  = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต (ตารางมิลลิเมตร)
  - $\lambda$  = สัมประสิทธิ์เพื่อปรับแก้คุณสมบัติของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตปกติ = 1 สำหรับคอนกรีตมวลเบา มีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 1
  - $f'_c$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ตารางมิลลิเมตร)
  - $b_w$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (มิลลิเมตร)
  - $d$  = ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด (มิลลิเมตร)

### 2.4.4 มาตรฐานเกี่ยวกับระยะหุ้มของคอนกรีต

ได้กำหนดระยะหุ้มของคอนกรีตสำหรับเสาและคานที่ไม่สัมผัสพื้นดินหรือบริเวณที่มีความชื้นสูง โดยระยะห่างจากผิวคอนกรีตจนถึงผิวเหล็กเสริมตามยาว หรือผิวเหล็กเสริมตามขวาง ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตร

#### 2.4.5 มาตรฐานเกี่ยวกับการต่อต้านด้วยข้อต่อเชิงกล

##### สำหรับการออกแบบที่ไม่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว

- ข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในการต่อทาบต้องสามารถรับลัดตั้งและกดได้เป็น 125% ของค่ากำลังของ จุดครากที่ระบุ ( $1.25f_y$ ) ของเหล็กเสริม
- บริเวณในการต่อทาบจะต้องทำการต่อทาบนอกเหนือบริเวณที่สามารถเกิดการครากของเหล็กเสริม (Yielding Region)

##### สำหรับการออกแบบที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวในบริเวณที่มีแผ่นดินไหว

ข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในการต่อทาบแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ Type 1 และ Type 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- Type 1 ข้อต่อเชิงกลจะต้องสามารถรับลัดตั้งและกดได้เป็น 125% ของค่ากำลังของ จุดครากที่ระบุ ( $1.25f_y$ ) ของเหล็กเสริม
- Type 2 ข้อต่อเชิงกลจะต้องสามารถพัฒนากำลังรับแรงตั้งได้ไม่เกิน 95% ของค่ากำลังของ เหล็กเสริมวิบัติ ( $0.95f_u$ ) หรือ 160% ของค่ากำลังของ จุดครากที่ระบุ ( $1.60f_y$ ) ของเหล็กเสริม

บริเวณในการต่อทาบเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกล

- สำหรับข้อต่อเชิงกล Type 1 จะต้องทำการต่อทาบนอกเหนือบริเวณที่สามารถเกิดการครากของเหล็กเสริม (Yielding Region)
- สำหรับข้อต่อเชิงกล Type 2 สามารถต่อทาบบริเวณได้ก็ได้ของโครงสร้าง

### บทที่ 3

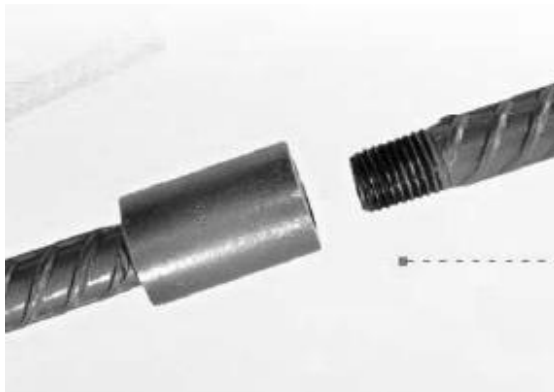
#### การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล และศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ภายใต้แรงตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวัฏจักร ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของข้อต่อเชิงกลและเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลและผลการทดสอบ

#### 3.1 คุณสมบัติของข้อต่อเชิงกลและเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ

ข้อต่อเชิงกลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นชนิดระบบเกลียว ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้รับการรับรองจากหน่วยงาน International Code Council ถึงคุณสมบัติที่เป็นไปตามข้อกำหนด ACI318 (American Concrete Institute) และ IBC (International Building Code) ซึ่งจัดเป็นข้อต่อเชิงกลประเภทที่ 2 คือข้อต่อเชิงกลต้องมีคุณสมบัติด้านกำลังอย่างน้อย 1.6 เท่าของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม หรือ 0.95 เท่าของกำลังที่จุดวิบัติของเหล็กเสริมโดยด้านการใช้งานสามารถใช้ข้อต่อเชิงกลชนิดนี้ต่อทาบในชิ้นส่วนของโครงสร้างได้ทุกที่แม้จะเป็นจุดที่อาจเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge)

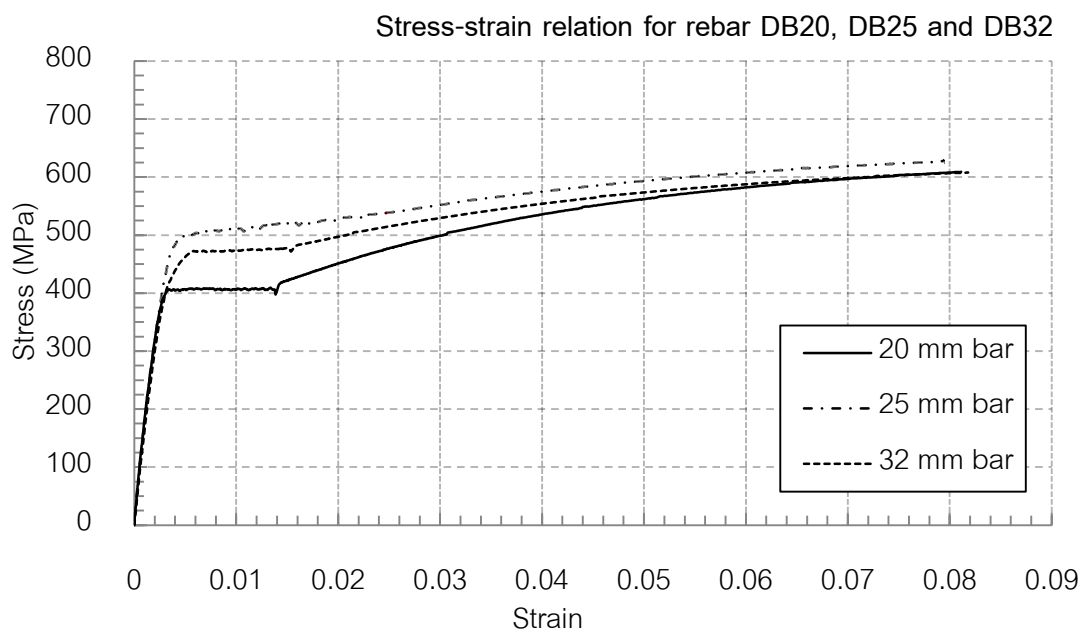
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 โดยเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.1 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ข้อต่อเชิงกลระบบเกลียว

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	กำลังที่จุดคราก, $f_y$ (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, $E_s$ (เมกกะปาสคาล)	ความเครียดที่จุดคราก, $\epsilon_y$	กำลังที่จุดวิบัติ, $f_u$ (เมกกะปาสคาล)
20	407	203508	0.0020	625
25	498	197544	0.0025	639
32	473	193228	0.0024	622



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแต่ละขนาด

### 3.2 การทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล

การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวงจรรทดสอบโดยเครื่องให้แรงแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ทำการให้แรงในช่วงอีลาสติกตลอดจนช่วงอินอีลาสติก โดยทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบดึง พฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบอัด รวมถึงพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวงจรร ของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมที่ไม่มีการต่อทาบตามข้อกำหนดการทดสอบข้อต่อเชิงกล ของ ASTM A1034/A (American Society for Testing and Materials)



### 3.2.1 การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบดึง

สำหรับการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบดึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลกับเหล็กเสริมที่ไม่มีการต่อทาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร โดยข้อกำหนดได้มีการกำหนดรูปแบบการให้แรงกระทำต่อเหล็กเสริมโดยควบคุมแรงกระทำ (Force Control) ระหว่าง 70-700 เมกกะปาสคาลต่อหน้าพื้นที่ซึ่งเครื่องให้แรงที่ใช้ในการทดสอบสามารถควบคุมการให้แรงด้วยการเคลื่อนที่ (Displacement control) เพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนการให้แรงด้วยหลักการดังนี้

จากคุณสมบัติทางวัสดุที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.1)$$

$E$  คือ โมดูลัสของอิลาสติก (เมกกะปาสคาล)

$\sigma$  คือ ความเค้น (เมกกะปาสคาล)

$\epsilon$  คือ ความเครียด

ซึ่งจากคุณสมบัติของเหล็กเสริมทั้ง 3 ขนาดที่มีค่าโมดูลัสเท่ากับ 203508 เมกกะปาสคาล 197544 เมกกะปาสคาล และ 193228 เมกกะปาสคาล สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร ตามลำดับ สามารถหาค่าความเครียดที่เกิดจากการอัตราการใช้แรงตามข้อกำหนดได้ ซึ่งในการทดสอบกำลังรับแรงดึงได้ใช้เหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลที่มีความยาวระหว่างแป้นจับยึดไฮดรอลิกเท่ากับ 500 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสามารถควบคุมอัตราการใช้แรงด้วยการเคลื่อนที่ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราการใช้แรงในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบดึง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	อัตราการใช้แรงตามข้อกำหนด (เมกกะปาสคาลต่อหน้าพื้นที่)	โมดูลัสยืดหยุ่น, $E_s$ (เมกกะปาสคาล)	อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นต่อหน้าพื้นที่	อัตราการใช้แรงด้วยการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตรต่อหน้าพื้นที่)
20	70 – 700	203508	0.00034 – 0.0034	0.17 – 1.7
25		197544	0.00035 – 0.0035	0.175 – 1.75
32		193228	0.00036 – 0.0036	0.18 – 1.8

### 3.2.2 การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบอัด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงแบบอัดได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของผลจากค่าอัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16 ของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุม สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบมีรูปแบบการให้แรงกระทำต่อเหล็กเสริมโดยควบคุมความเครียดที่มีอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นต่ออนาทีเท่ากับ 0.005 ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการให้แรงด้วยการเคลื่อนที่ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราการให้แรงในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบอัด

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	อัตราส่วนความยาวต่อ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D)	ความยาวของ เหล็กเสริม (มิลลิเมตร)	อัตราความเครียดที่ เกิดขึ้นต่ออนาที	อัตราการให้แรง ด้วยการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตรต่ออนาที)
20	10	200	0.005	1
	12	240		1.2
	16	320		1.6
25	10	250		1.25
	12	300		1.5
	16	400		2
32	10	320		1.6
	12	384		1.92
	16	512		2.56

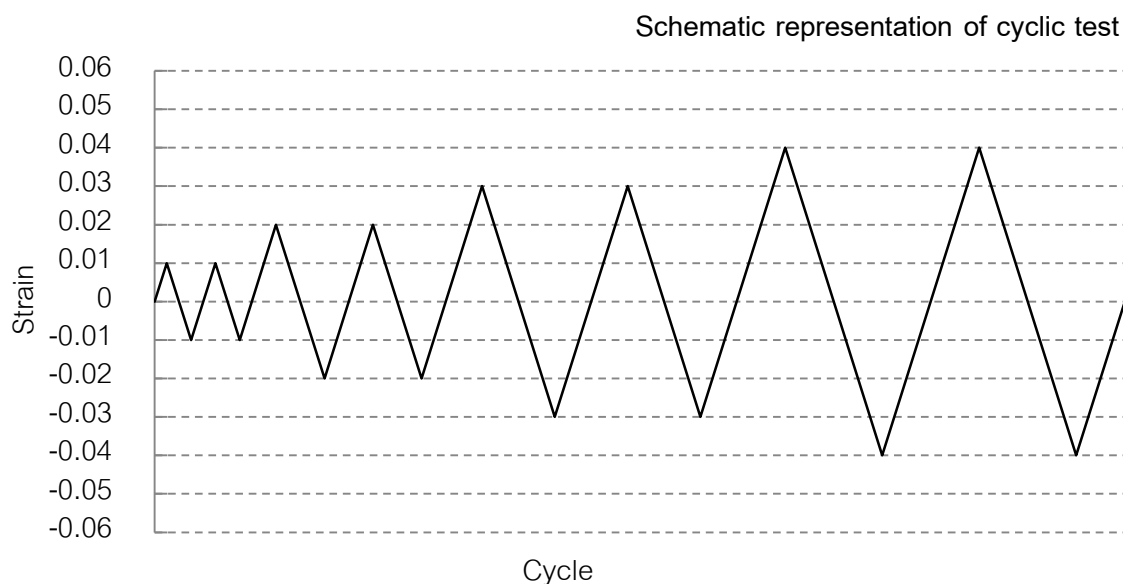
### 3.2.3 การทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

สำหรับการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักรได้ทำการทดสอบแตกต่างจากข้อกำหนดเพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่ต่อทาบด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุม โดยพิจารณาผลจากค่าอัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10 และ 16 สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 32 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบเริ่มจากการให้แรงดึงตามอัตราการให้แรงตาม

ข้อกำหนดการทดสอบแรงดึงไปจนถึงค่าความเครียดเท่ากับ 0.01 หลังจากนั้นให้แรงอัดอัตราการให้แรงตามข้อกำหนดการทดสอบแรงอัดจนถึงค่าความเครียดเท่ากับ 0.01 จำนวน 2 รอบ จากนั้นทำการให้แรงในลักษณะเดิมโดยเพิ่มค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทีละ 0.01 และทดสอบที่ค่าความเครียดนั้นจำนวน 2 รอบไปจนกว่าเหล็กเสริมเกิดการวิบัติ ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการให้แรงด้วยการเคลื่อนที่ดังตารางที่ 3.4 และมีลักษณะการให้แรงในการทดสอบกำลังรับแรงกระทำแบบวัฏจักรแสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 อัตราการให้แรงในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร

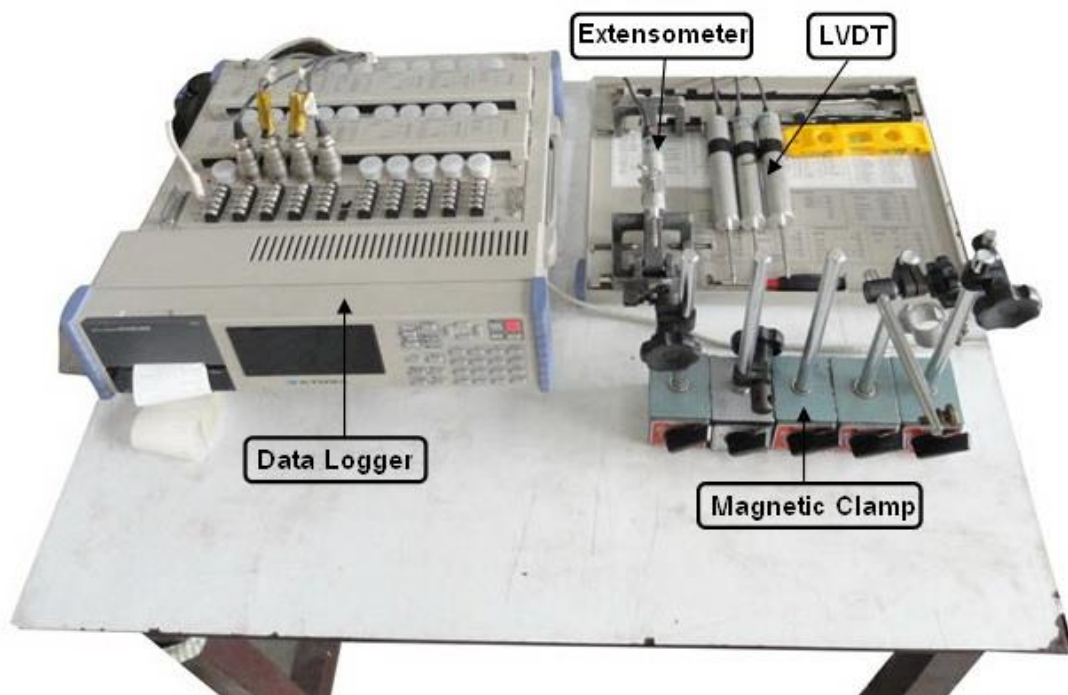
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	อัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D)	ความยาวของเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)	อัตราการให้แรงดึงด้วยการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตรต่อนาที)	อัตราการให้แรงอัดด้วยการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตรต่อนาที)
25	12	300	0.105 – 1.05	1.25
	16	400	0.14 – 1.4	1.5
32	12	384	0.138 – 1.38	2
	16	512	0.184 – 1.84	1.6



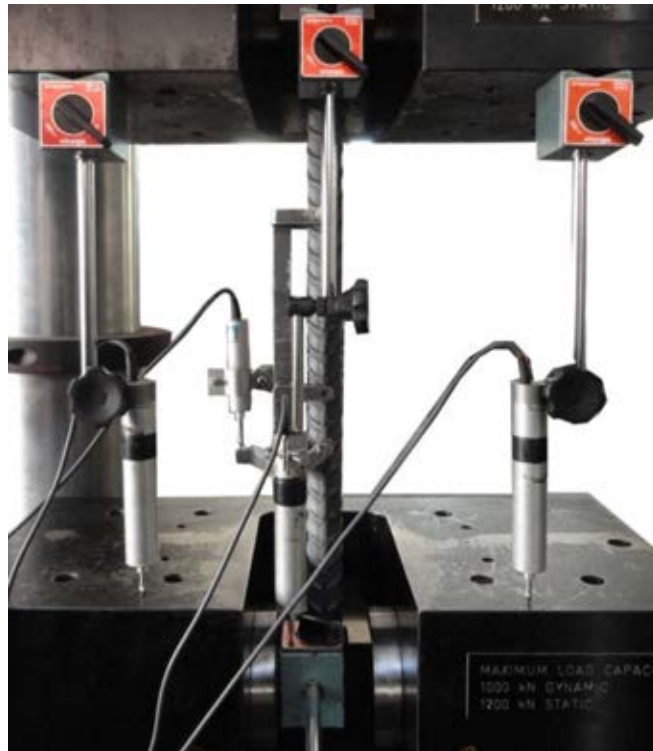
รูปที่ 3.3 รูปแบบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักร

### 3.2.4 การเตรียมการทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล

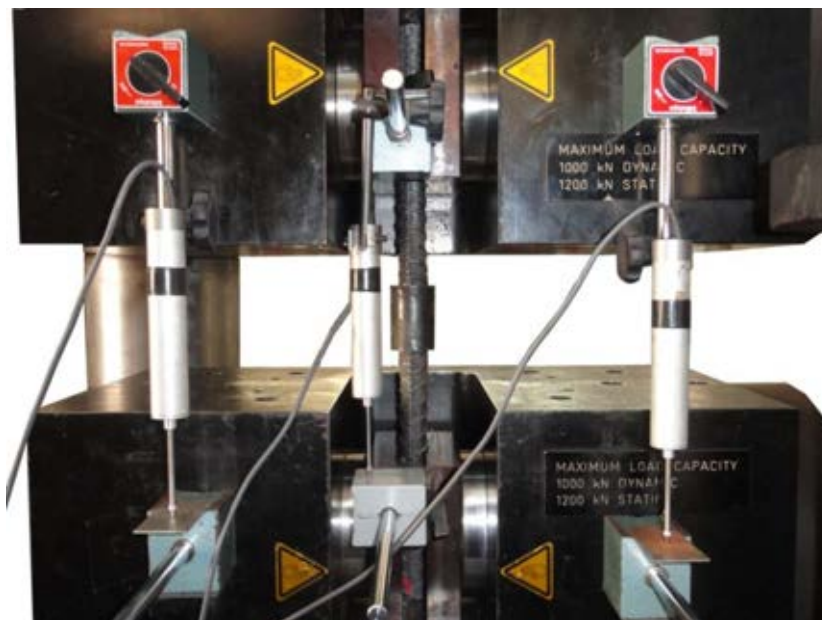
ในการทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวงจกร มีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดและเครื่องบันทึกข้อมูลทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.4 ทดสอบโดยเครื่องให้แรงแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ทำการยึดเหล็กเสริมกับเครื่องให้แรงซึ่งใช้ระบบตัวยึดจับเหล็กเสริมด้วยแป้นจับยึดไฮดรอลิก โดยในการทดสอบมีการติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่บริเวณแป้นจับยึดเหล็กเสริมเพื่อหาระยะของการเสียรูปของเหล็กเสริมและยังติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่บริเวณหัวของเครื่องให้แรงบริเวณด้านซ้ายและด้านขวาเพื่อวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องให้แรงที่กระทำกับเหล็กเสริม และสำหรับการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบดึงได้มีการติดตั้งเครื่องวัดการเสียรูปของเหล็กเสริม (Extensometer) ซึ่งจะจับที่ตัวเหล็กเสริมโดยมีระยะเริ่มต้นที่ 200 มิลลิเมตร และจะยึดตามเหล็กเสริมจนเมื่อเหล็กเสริมได้รับแรงดึงใกล้ถึงจุดคราก จากนั้นทำการถอดเครื่องวัดการเสียรูปออก โดยรูปแบบการติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัดรวมถึงการทดสอบกำลังรับแรงกระทำแบบวงจกร ได้แสดงดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดและเครื่องบันทึกข้อมูลทดสอบ



รูปที่ 3.5 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึง

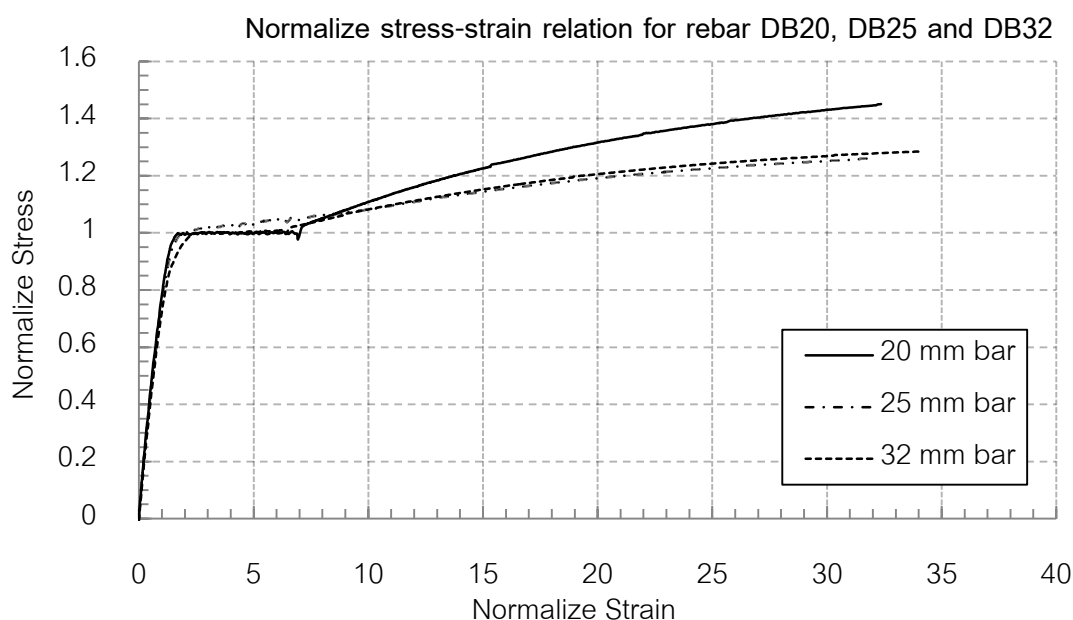


รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและรับแรงกระทำแบบวัฏจักร

### 3.3 ผลการทดสอบตัวอย่าง

#### 3.3.1 ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบดึง

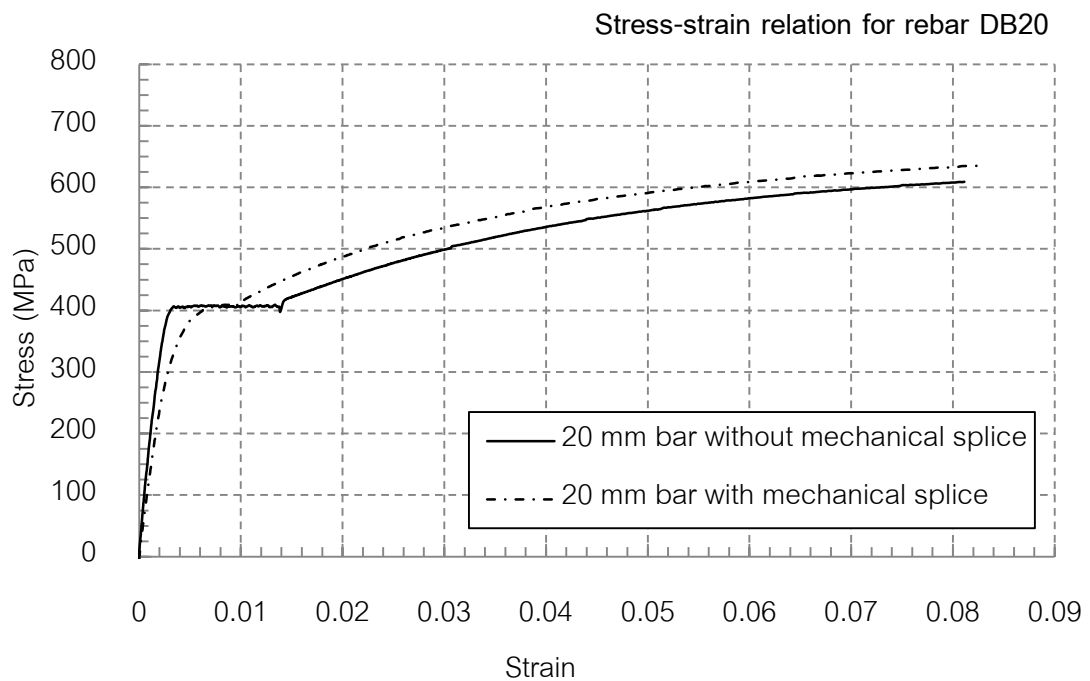
จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.2 นำมาแสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเค้นต่อความเค้นที่จุดครากและอัตราส่วนของความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากดังรูปที่ 3.7 จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากำลังหลังจุดครากของเหล็กแต่ละขนาด ซึ่ง Bae และ คณะ (2005) ได้มีการทดสอบและสามารถสรุปพฤติกรรมนี้ได้ว่าถ้าเหล็กเสริมสามารถพัฒนากำลังหลังจุดครากได้สูงจะส่งผลต่อพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะโดยจะสามารถชะลอการโก่งเดาะได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.3.2



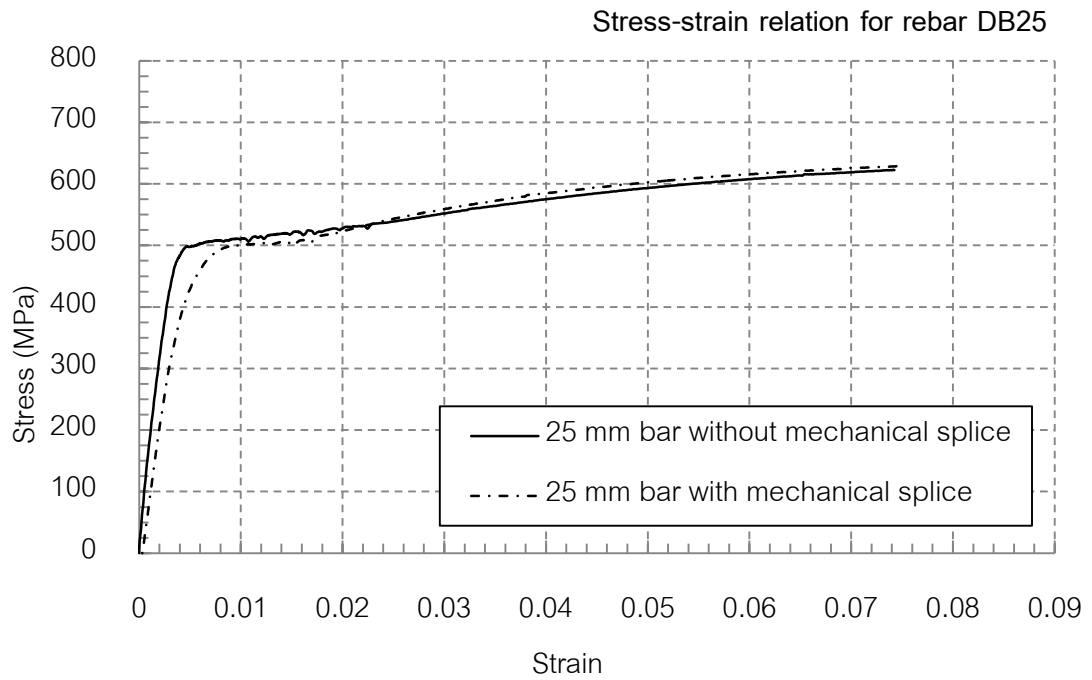
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเค้นต่อความเค้นที่จุดคราก และอัตราส่วนของความเครียดต่อความเครียดที่จุดคราก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลแสดงเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมภายใต้แรงดึงพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 3.8 ถึง รูปที่ 3.10 โดยเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 20 มิลลิเมตร มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 408 เมกะปาสคาล และกำลังที่จุดวิบัติเท่ากับ 653 เมกะปาสคาล และสำหรับเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 มิลลิเมตร มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 501 เมกะปาสคาล และและกำลังที่จุดวิบัติเท่ากับ 642 เมกะปาสคาล

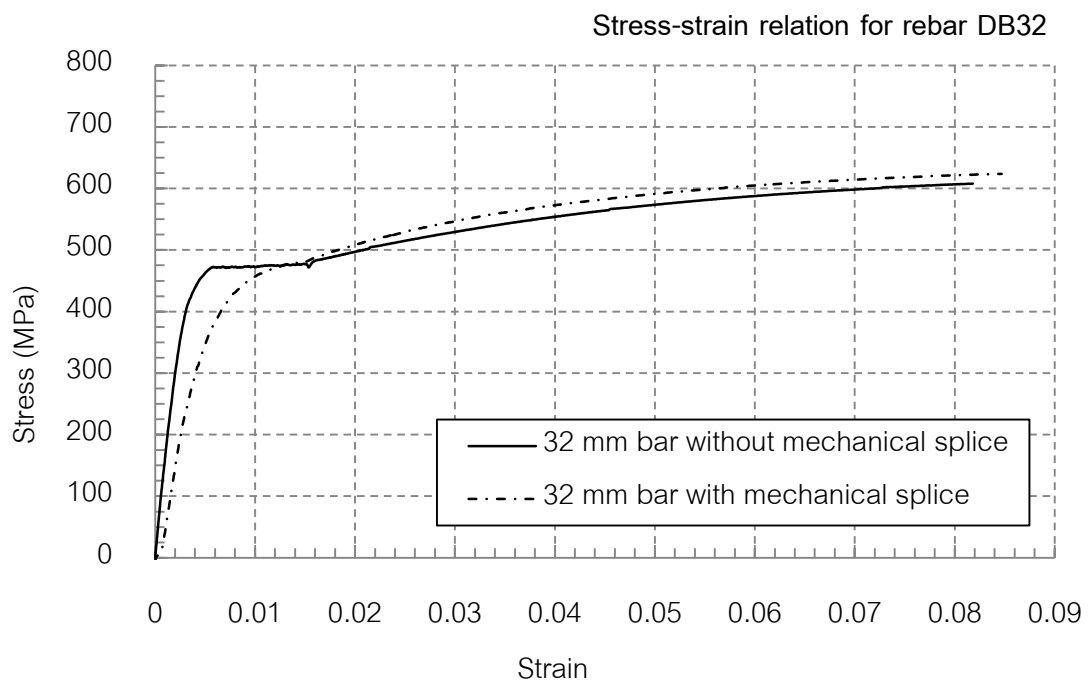
และเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 32 มิลลิเมตร มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 479 เมกะปาสคาล และและกำลังที่จุดวิบัติเท่ากับ 632 เมกะปาสคาลโดยมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กเสริมควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งการวิบัติที่เกิดขึ้นจะเกิดการเสียหายที่เหล็กเสริมและไม่มี ความเสียหายใดๆที่ตัวข้อต่อเชิงกล โดยหลังจากทำการทดสอบเหล็กเสริมในส่วนด้านที่เป็นเกลียวที่ต่อเข้าไปในข้อต่อเชิงกลมีการคลายตัวอย่างเห็นได้ชัดซึ่งแตกต่างจากก่อนเริ่มทำการทดสอบซึ่งเกลียวที่เหล็กเสริมทั้ง 2 ด้านถูกขันจนแน่น และสำหรับพฤติกรรมในช่วงก่อนถึงจุดครากของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากการเสียรูปที่เกิดขึ้นมาจากการเสียรูปของเหล็กเสริมและการเสียรูปของข้อต่อเชิงกล



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล  
เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร

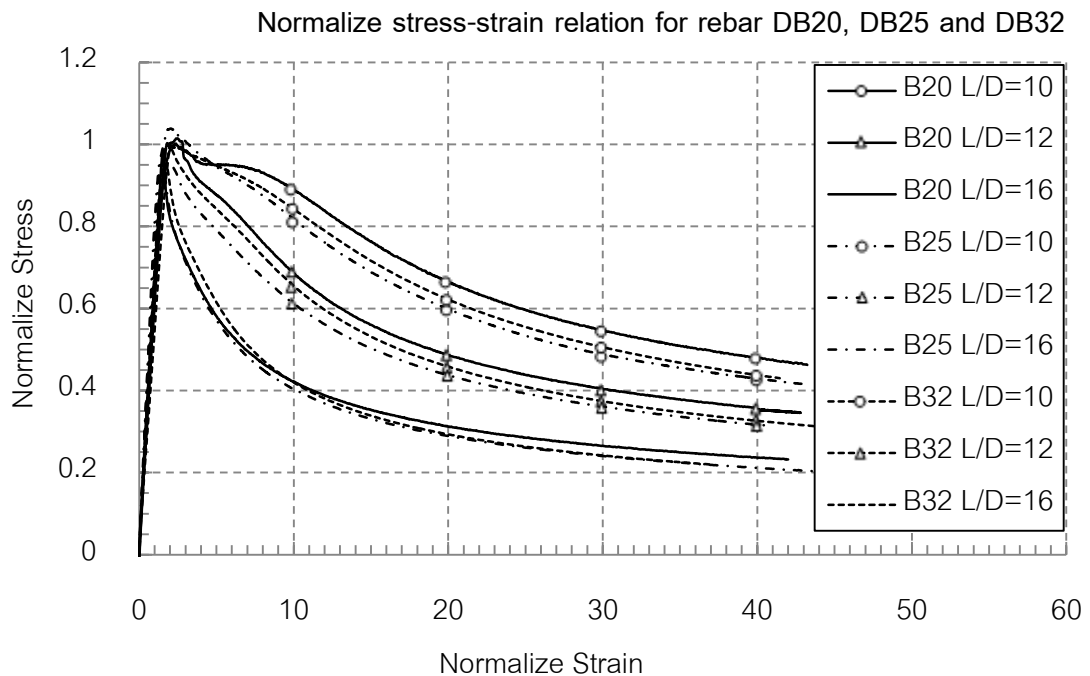


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล  
เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร



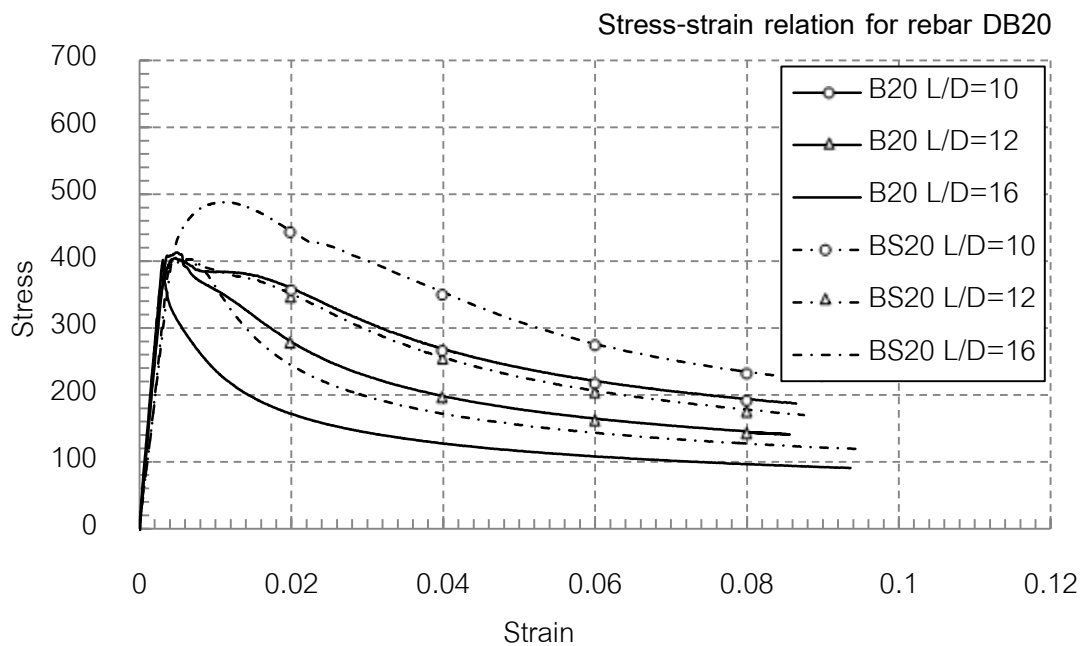
### 3.3.2 ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบอัด

พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแบบอัดของตัวอย่างเหล็กเสริมควบคุมพบว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร มีรูปแบบการโก่งเดาะไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยจะมีพฤติกรรมโก่งเดาะที่ช้ากว่า และเมื่อนำผลการทดสอบมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเค้นต่อความเค้นที่จุดครากและอัตราส่วนของความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากดังรูปที่ 3.11 พบว่าจากคุณสมบัติพัฒนากำลังหลังจุดครากของเหล็กเสริมแต่ละขนาด มีผลต่อพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะ โดยที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เหล็กเสริมที่มีความสามารถพัฒนากำลังหลังจุดครากได้สูงจะส่งผลให้มีความสามารถชะลอการโก่งเดาะได้ช้ากว่า สังเกตจากค่าอัตราส่วนของความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากที่เท่ากัน เหล็กเสริมขนาด 20 มิลลิเมตรจะมีค่าอัตราส่วนของความเค้นต่อความเค้นที่จุดครากสูงกว่าเหล็กเสริมขนาด 32 มิลลิเมตร และยิ่งสูงกว่าเหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ

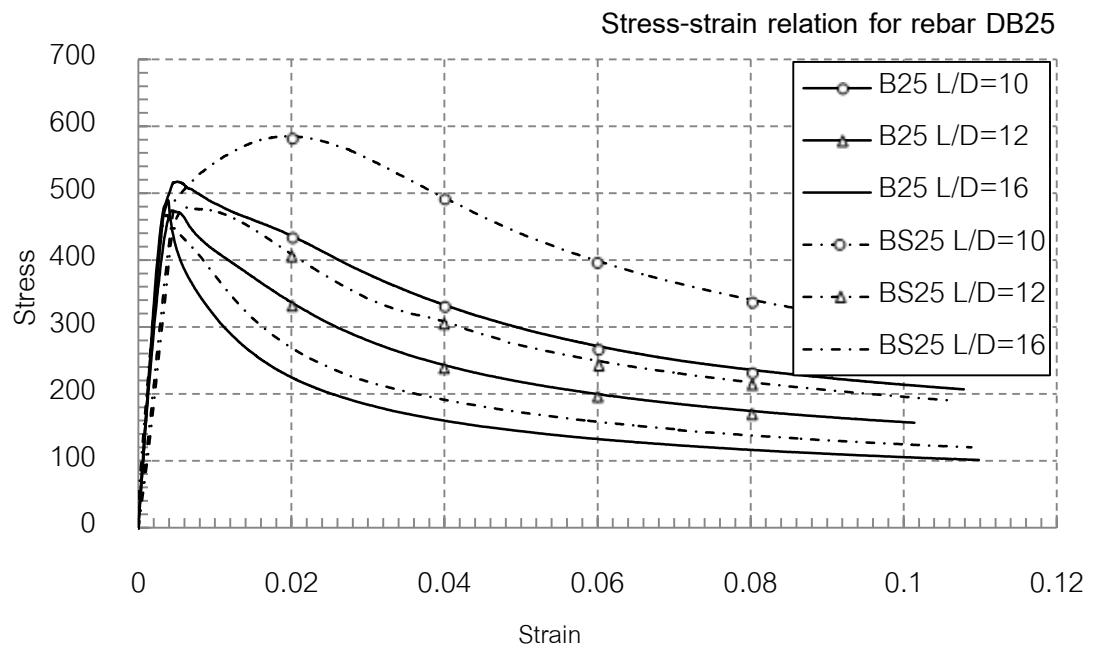


รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมควบคุมขนาด 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16

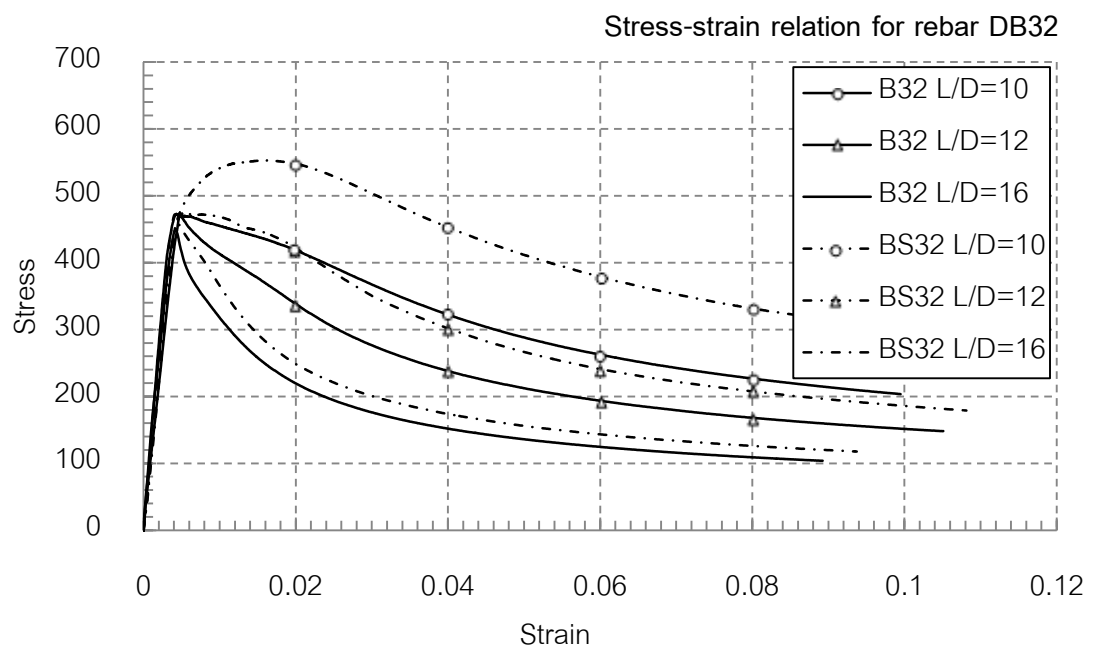
จากการทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงอัดตามแนวแกนที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร พบว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10 เหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลสามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่ากำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริมควบคุมและยังเกิดการโก่งเดาะช้ากว่าเหล็กเสริมควบคุม โดยเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร สามารถรับกำลังอัดสูงสุดได้ 488, 585 และ 552 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 12 และ 16 เหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลสามารถรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกับกำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริมควบคุม โดยเกิดการโก่งเดาะพร้อมกันซึ่งพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับเหล็กเสริมควบคุมที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10 และ 12 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ถึง รูปที่ 3.14



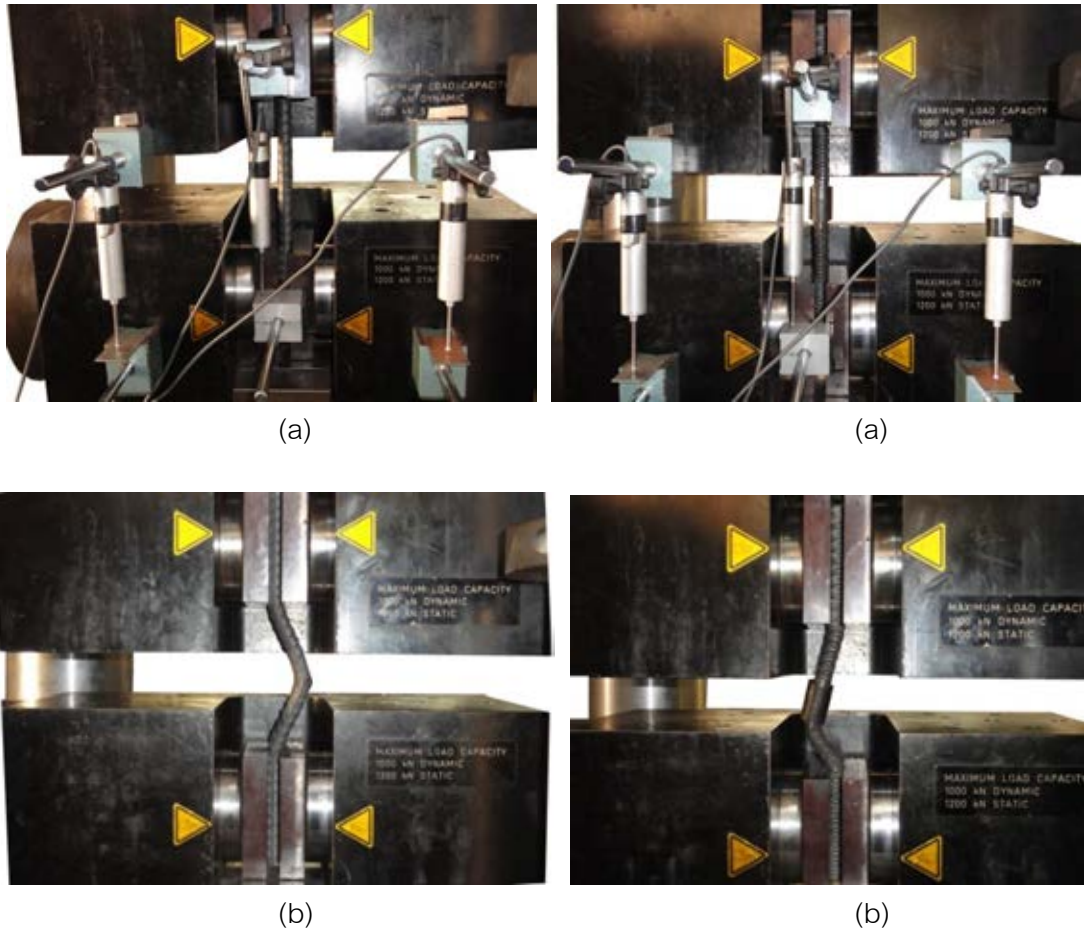
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 20 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16



รูปที่ 3.15 การเสียรูปขณะทำการทดสอบ (a) และเสร็จสิ้นการทดสอบของเหล็กเสริม  
ที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุม (b)

สำหรับการสลายพลังงาน (Strain energy) ของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลและเหล็กเสริมควบคุม โดยพิจารณาเมื่อกำลังรับแรงอัดลดลง 20% จากกำลังรับแรงอัดสูงสุด พบว่าเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีค่าการสลายพลังงานมากกว่าเหล็กเสริมควบคุม โดยมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กเสริมควบคุมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) ที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมแต่ละขนาดและอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการสลายพลังงานกับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) พบว่าค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กเสริมควบคุมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) ที่มากกว่า ดังแสดงดังตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

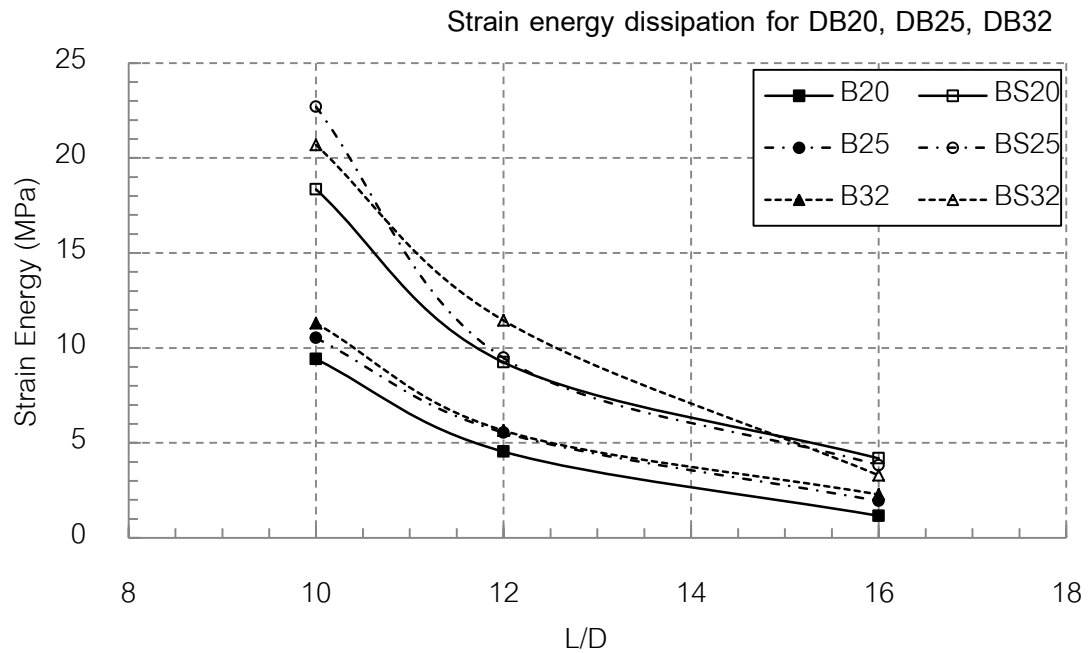
Specimens	L/D Ratio	Maximum strength (MPa)	Strain Energy (MPa)
B20	10	404	9.41
	12	412	4.54
	16	401	1.16
BS20	10	488	18.35
	12	404	9.24
	16	402	4.18
B25	10	517	10.52
	12	473	5.54
	16	489	1.94
BS25	10	585	22.69
	12	478	9.47
	16	467	3.8-
B32	10	471	11.30
	12	473	5.65
	16	450	2.28
BS32	10	552	20.68
	12	473	11.45
	16	472	3.30

หมายเหตุ ชื่อของ Specimens สามารถอธิบายได้ดังนี้

B คือ เหล็กเสริมควบคุม (bare bar)

BS คือ เหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล (bar splice)

ตัวเลข คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม หน่วยเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงาน (Strain energy) ของเหล็กเสริมขนาด 20, 25 และ 32 มิลลิเมตร กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10, 12 และ 16

การพิจารณาค่าอัตราส่วนความเค้นต่อความเค้นที่จุดครากและความเครียดต่อความเครียดที่จุดคราก และสำหรับค่าสลายพลังงานของเหล็กเสริมแต่ละขนาดสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

Normalized stress

$$N = \frac{\sigma}{\sigma_{y,T}} \quad (3.2)$$

Normalized strain

$$N_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{y,T}} \quad (3.3)$$

Strain Energy Dissipation

$$\text{Strain Energy} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (3.4)$$

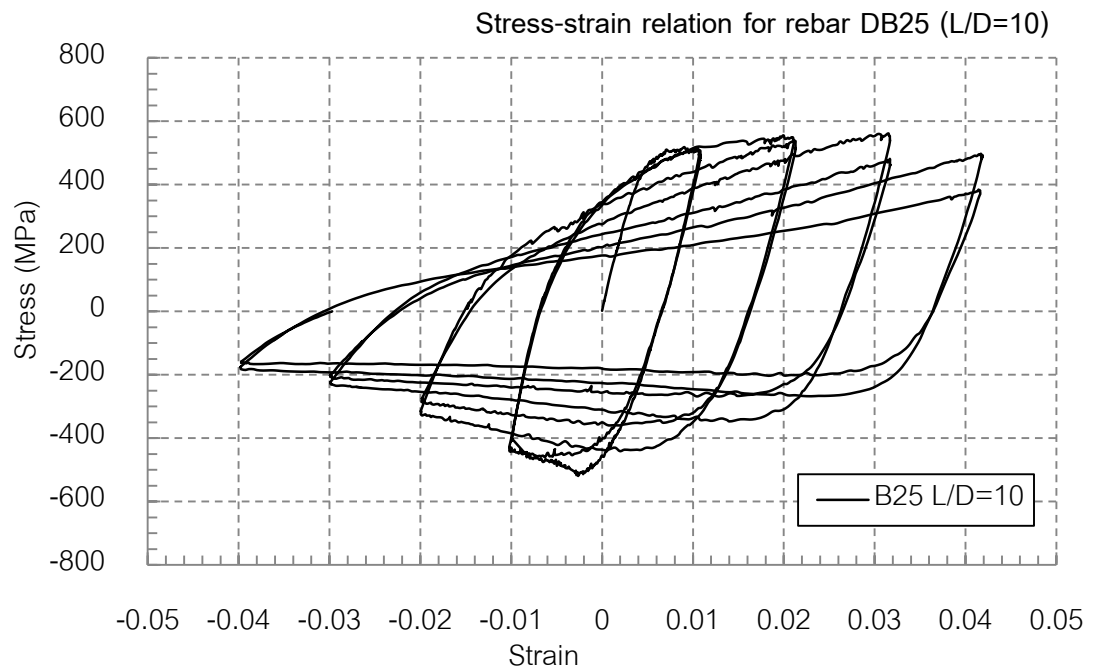
$\sigma_{y,T}, \varepsilon_{y,T}$  คือ ค่าความเค้นและความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง

$\sigma, \varepsilon$  คือ ค่าความเค้นและความเครียดที่จุดคราก ณ จุดใดๆ

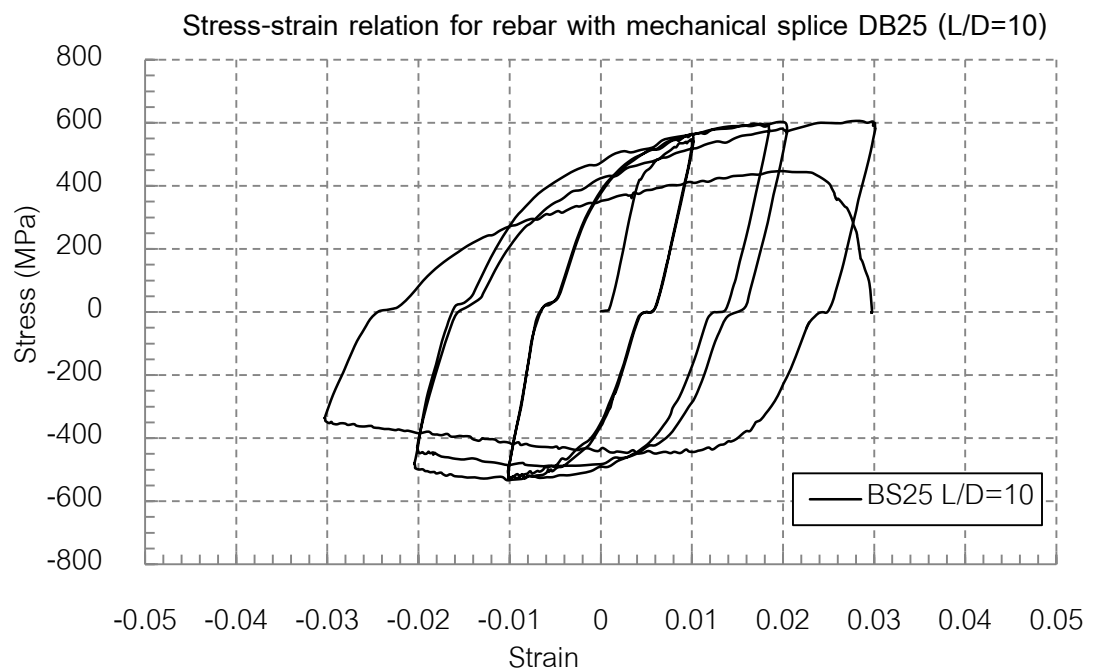
### 3.3.3 ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร พบว่ามีแนวโน้มเดียวกับพฤติกรรมเมื่อรับแรงกระทำแบบดึงและรับแรงกระทำแบบอัด โดยสำหรับเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีพฤติกรรมในช่วงรับแรงกระทำแบบดึงก่อนถึงจุดครากจะมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดไม่เป็นเส้นตรง และสำหรับพฤติกรรมในช่วงรับแรงกระทำแบบอัด สามารถชะลอการโก่งเดาะได้ช้ากว่าเหล็กเสริมควบคุมซึ่งแสดงถึงความสามารถในการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าเมื่อแรงกระทำเปลี่ยนจากการให้แรงดึงเป็นแรงอัดจะเกิดการเคลื่อนตัวอย่างกะทันหัน (Pinching) เนื่องจากการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลที่ใช้เป็นประเภทระบบเกลียวเมื่อมีการรับแรงในลักษณะสลับไปมาส่งผลให้เกิดการเสียรูปของเกลียวภายใน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลกับเหล็กเสริมควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ถึง รูปที่ 3.24

ผลการทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมควบคุมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร แสดงให้เห็นถึงการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสำหรับเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 มิลลิเมตร ที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 มีค่าการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวัฏจักรที่จำนวนรอบ 2, 4 และ 6 รอบ เป็น 0.87, 1.16 และ 1.92 เท่าของเหล็กเสริมควบคุมตามลำดับ และที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 มีค่าการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวัฏจักรที่จำนวนรอบ 2, 4 และ 6 รอบ เป็น 1.28, 1.34 และ 1.23 เท่าของเหล็กเสริมควบคุมตามลำดับ และสำหรับเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 32 มิลลิเมตร ที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 มีค่าการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวัฏจักรที่จำนวนรอบ 2, 4 และ 6 รอบ เป็น 0.92, 1.45 และ 2.19 เท่าของเหล็กเสริมควบคุมตามลำดับ และที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 มีค่าการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวัฏจักรที่จำนวนรอบ 2, 4 และ 6 รอบ เป็น 1.08, 1.11 และ 1.08 เท่าของเหล็กเสริมควบคุมตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวัฏจักรแสดงดังตารางที่ 3.6

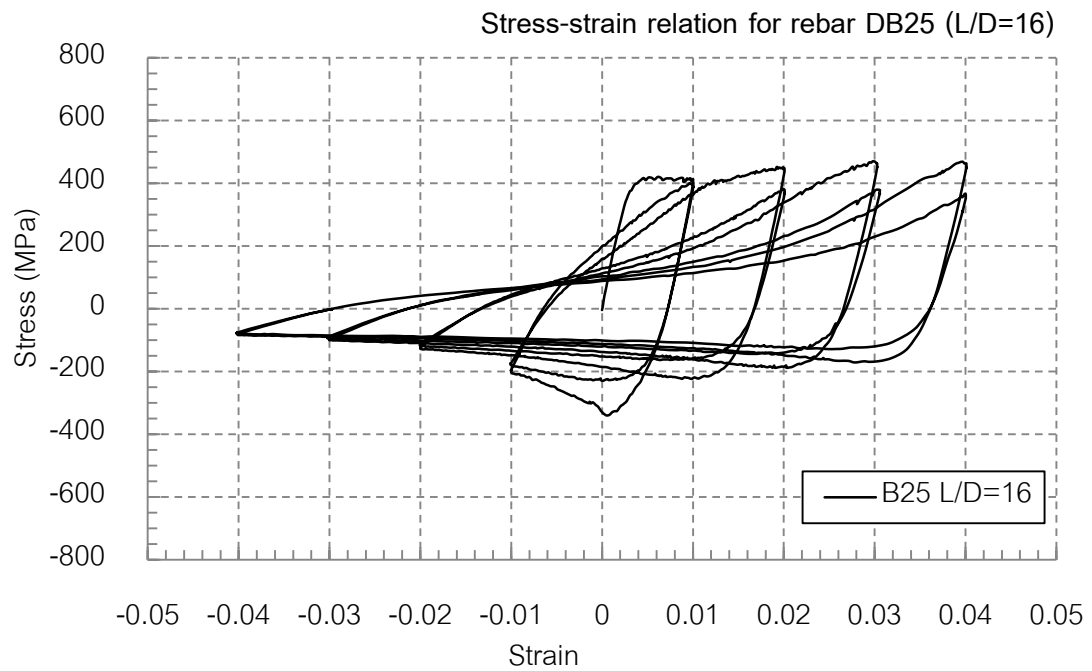


รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10

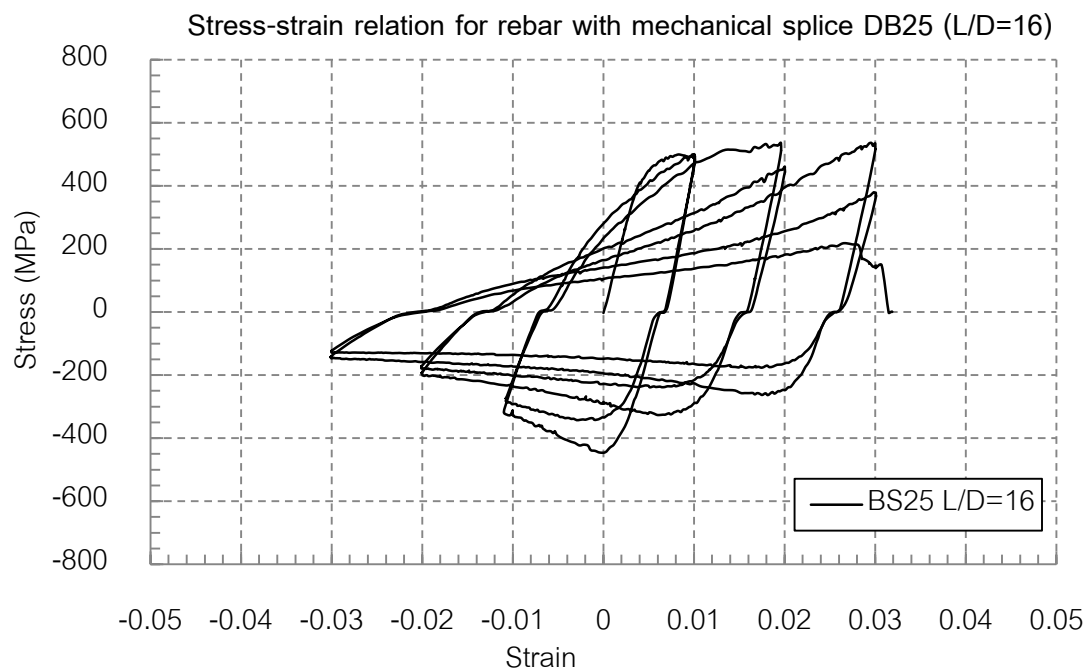


รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10

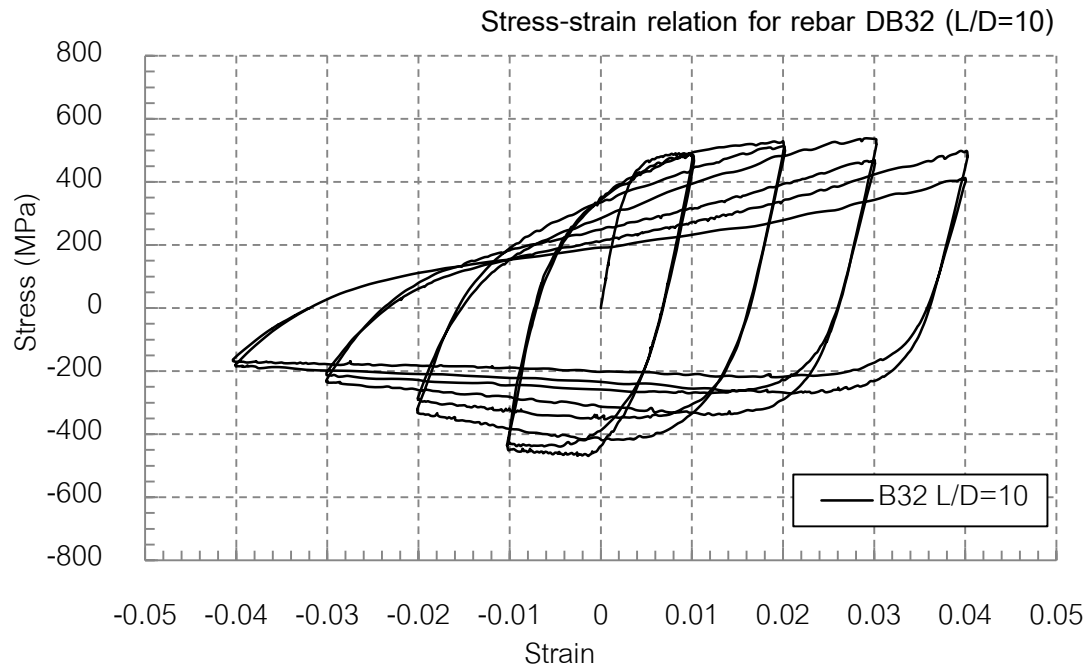




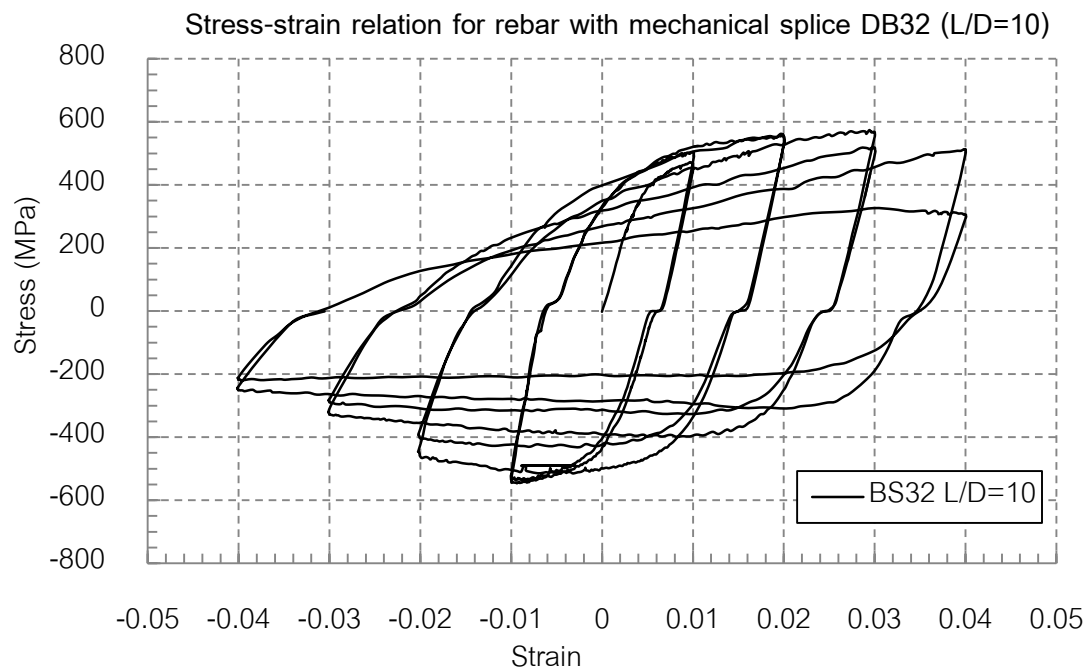
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16



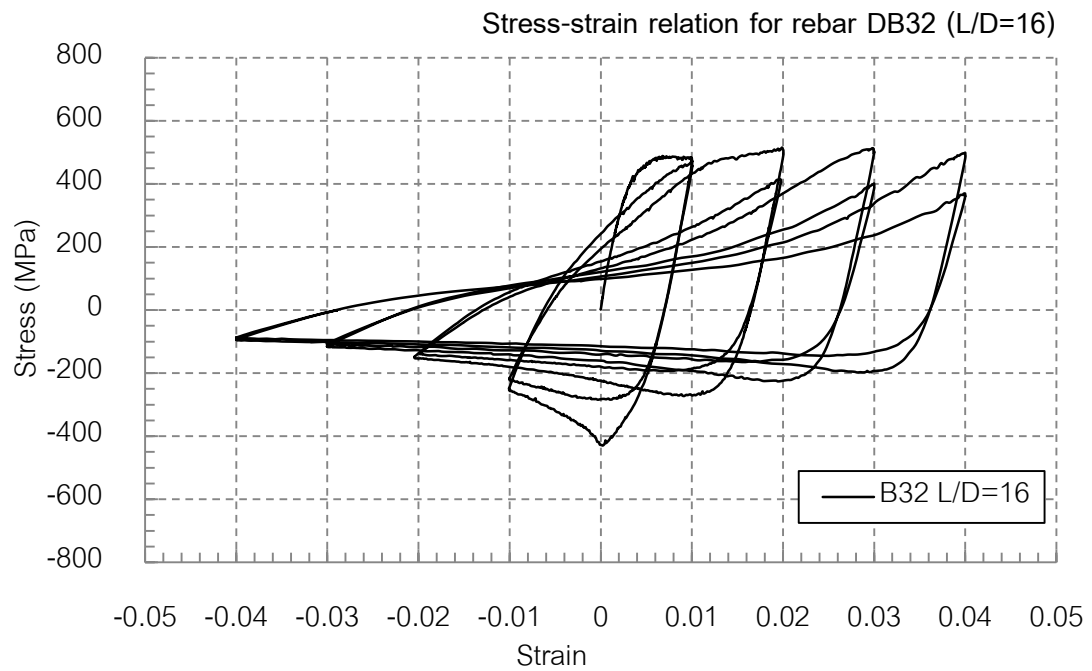
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16



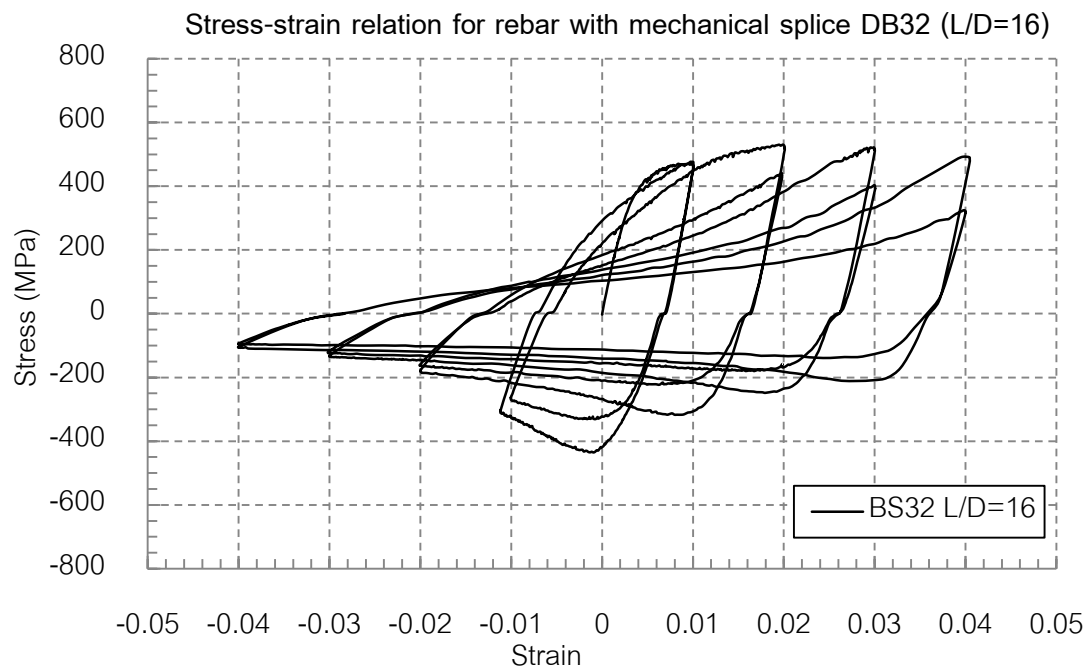
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมควบคุมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16

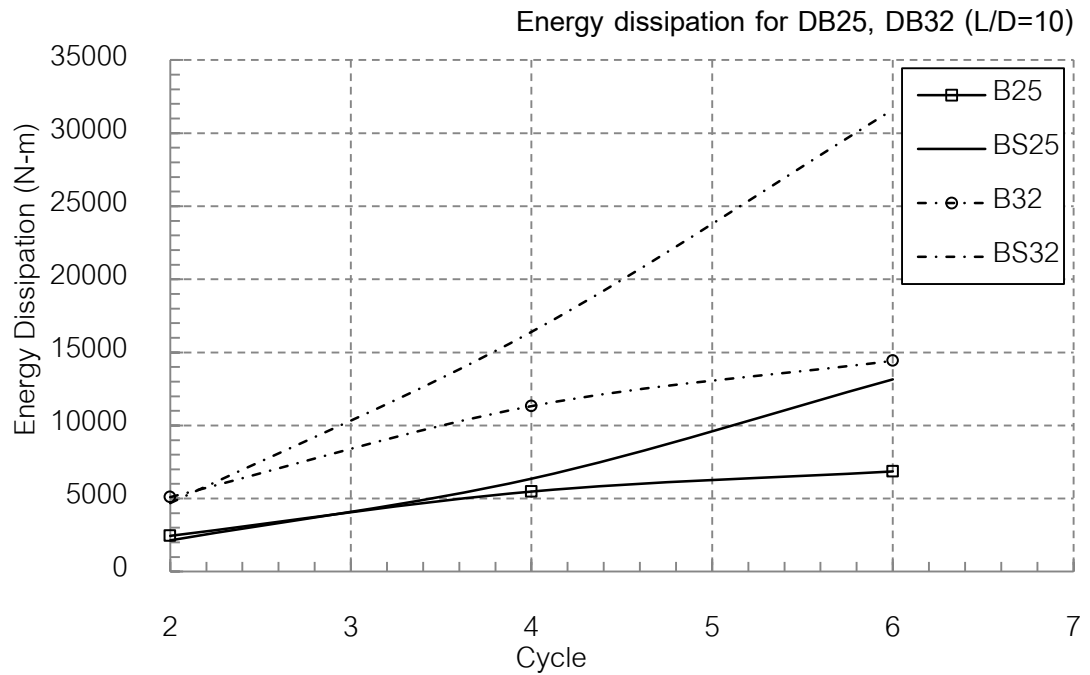
ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการสลายพลังงานจากการรับแรงแบบวัฏจักร

Specimen	L/D	Energy Dissipation (N-m)		
		1,2 Cycle	3,4 Cycle	5,6 Cycle
B25	10	2447	5477	6855
	16	2594	4386	5635
BS25	10	2137	6360	13153
	16	3318	5911	6933
B32	10	5098	11324	14423
	16	6418	10767	13296
BS32	10	4684	16405	31602
	16	6962	11970	14465

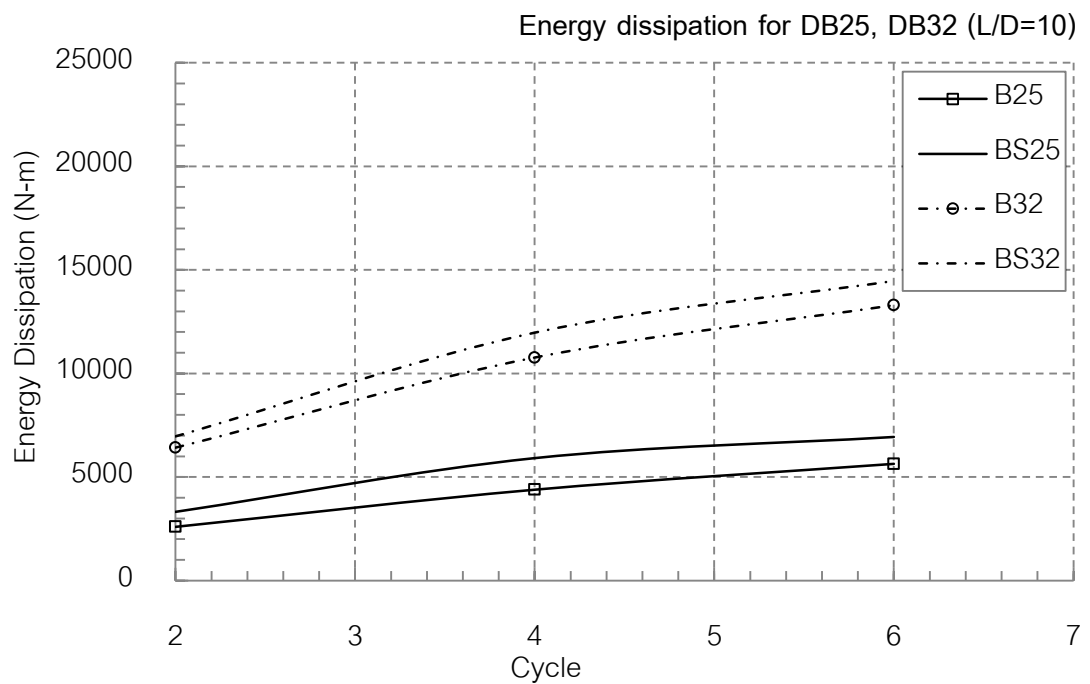
การพิจารณาค่าสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่ได้แสดงในตารางที่ 3.5 เป็นค่าการสลายพลังงานจากแรงที่กระทำต่อเหล็กเสริมซึ่งส่งผลให้เกิดการเสียรูปในลักษณะยืดออกเมื่อได้รับแรงกระทำแบบดึงและลักษณะโก่งเดาะ (Buckling) เมื่อได้รับแรงกระทำแบบอัด ซึ่งสามารถหาค่าการสลายพลังงานจากการให้แรงแบบวัฏจักรในช่วงการให้แรงจนถึงค่าความเครียดเท่ากับ 0.01 (1,2 Cycle), 0.02 (3,4 Cycle) และ 0.03 (5,6 Cycle) และเมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการสลายพลังงานที่เกิดขึ้นด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานและจำนวนรอบการให้แรงของเหล็กเสริมขนาด 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 และ 16 จะเห็นถึงความสามารถในการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลทั้ง 2 ขนาดที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10 แต่สำหรับที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 มีแนวโน้มการสลายพลังงานในแนวทางเดียวกับเหล็กเสริมควบคุมแต่ยังมีค่าการสลายพลังงานที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ รูปที่ 3.26 ตามลำดับ

การพิจารณาค่าสลายพลังงานของเหล็กเสริมสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้  
Energy Dissipation

$$Energy\ Dissipation = \frac{1}{2} fd \quad (3.5)$$

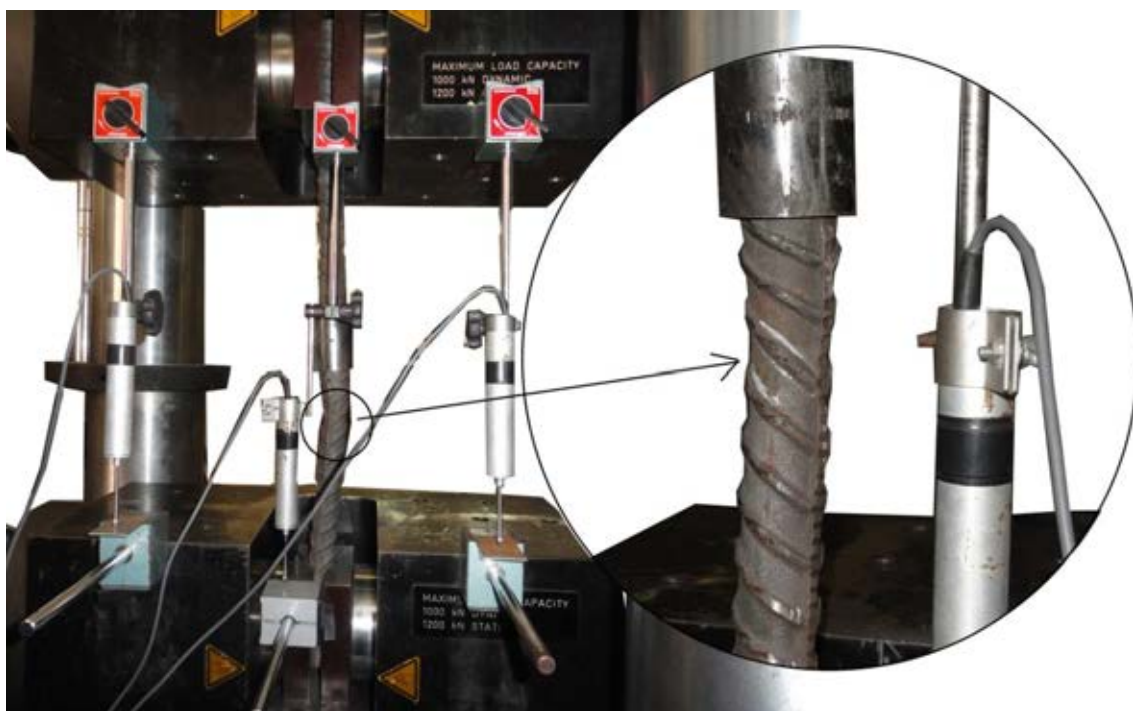


รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานและจำนวนรอบการให้แรงของเหล็กเสริมขนาด 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 10

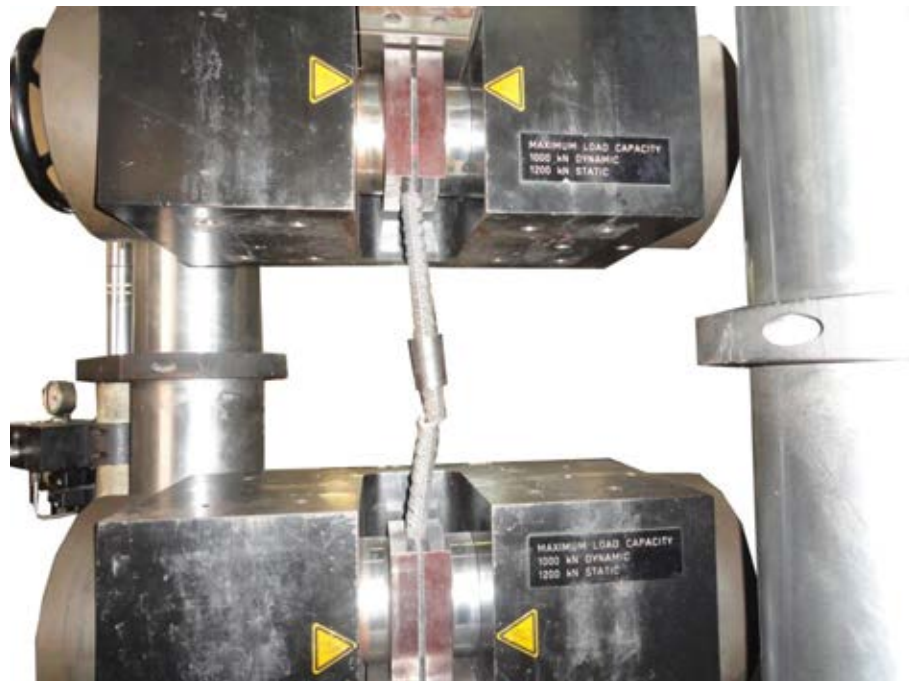


รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานและจำนวนรอบการให้แรงของเหล็กเสริมขนาด 25 และ 32 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16

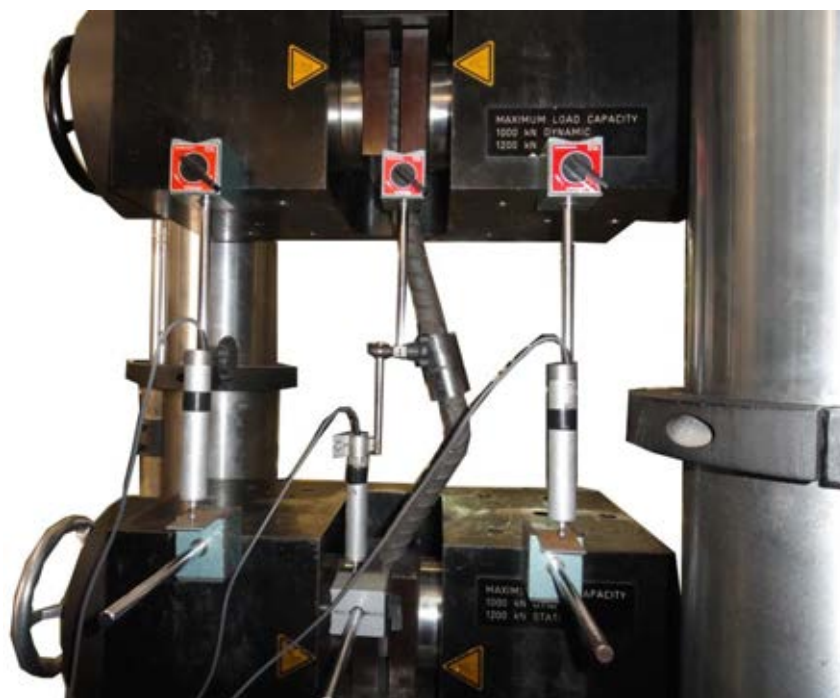
เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 และ 32 มิลลิเมตร พบว่ารูปแบบการวิบัติของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 มิลลิเมตร มีพฤติกรรมการวิบัติที่เหล็กเสริมขณะให้แรงดึง ในช่วงรอบการให้แรงที่ 6 โดยระหว่างการทดสอบเหล็กเสริมเริ่มเกิดความเสียหายในลักษณะเกิดรอยร้าวบริเวณจุดที่เกิดการโก่งเดาะ และเมื่อหลังจากการให้แรงในช่วงที่ 5 เหล็กเสริมมีการเสียรูปแบบถาวรในลักษณะโก่งเดาะเล็กน้อย จากนั้นทำการให้แรงดึงในช่วงรอบการให้แรงที่ 6 แต่ยังไม่ถึงค่าความเครียดไม่ถึง 0.03 เหล็กเสริมก็เกิดการวิบัติ ในรูปแบบเดียวกันทั้ง 2 การทดสอบที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $L/D$ ) เท่ากับ 10 และ 16 แตกต่างจากเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 32 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถรับแรงแบบวัฏจักรได้จนครบรอบการให้แรงจนถึงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 0.04 โดยหลังจากการให้แรงเสร็จสิ้นเหล็กเสริมยังคงรูปแบบการเสียรูปแบบถาวรในลักษณะโก่งเดาะ แสดงดังรูปที่ 3.27 ถึง รูปที่ 3.29



รูปที่ 3.27 ลักษณะเกิดรอยร้าวบริเวณจุดที่เกิดการโก่งเดาะจากการรับแรงแบบวัฏจักรผ่านไป 5 รอบการให้แรง ของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลขนาด 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.28 การวัดของเหล็กเสริมขณะให้แรงดึงของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล  
ขนาด 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.29 การเสียรูปแบบถาวรในลักษณะโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกล  
ขนาด 32 มิลลิเมตร

## บทที่ 4

### การเตรียมตัวอย่างเสาและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเสาจะกล่าวถึง ลักษณะเสาที่ใช้ในการทดสอบซึ่งแสดงขนาดหน้าตัด ความสูง รายละเอียดของเหล็กเสริม และลักษณะการต่อทาบของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่าง เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อาทิเช่น กำลังคอนกรีต กำลังของเหล็กเสริมแต่ละขนาด ตลอดจนตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages)

สำหรับการทดสอบจะกล่าวถึง ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือและตัวอย่างเสาทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่ไฟฟ้า (Linear Variable Displacement Transducer) วิธีการติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูลระหว่างการทดสอบด้วยเครื่อง (Data Logger) และ ขั้นตอนการให้แรงแบบวัฏจักรกับตัวอย่างทดสอบโดยให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่ตลอดการทดสอบ พร้อมทั้งวิธีปรับแก้ผลการทดสอบ

#### 4.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ

ตัวอย่างเสาทดสอบมีจำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 0.4 เมตร x 0.4 เมตร โดยมีความสูงของเสาเท่ากับ 2.40 เมตร และที่ระดับความสูงถึงศูนย์กลางแรงกระทำทางด้านข้างเท่ากับ 2.20 เมตร สำหรับเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกรัดรอบใช้เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีกำลังที่จุดคราก ( $f_y$ ) ไม่น้อยกว่า 4000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้มีจำนวน 8 เส้น และเหล็กปลอกรัดรอบ (hoop ties) มีการงอขอที่ปลาย 135 องศา มีรัศมีการดัดของขอเท่ากับ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางขวาง และมีส่วนปลายยื่นต่อออกไปอีก 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางขวางแต่ต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 75 มม. ซึ่งในการสวมปลอกรัดรอบในเสาได้มีการสลัดปลายของขอไปมาในแต่ละชั้นของเหล็กเสริมตามขวางตลอดแนวเสา โดยขนาดของตัวอย่างเสาทดสอบรายละเอียดเหล็กยื่น เหล็กเสริมตามขวาง และลักษณะการต่อทาบเหล็กเสริม ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.4



ซึ่งงานวิจัยนี้ มีตัวอย่างเสาทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง ทำการเปรียบเทียบผลของการต่อทาบเหล็กเสริมด้วยวิธีปกติและต่อเหล็กเสริมด้วยข้อต่อเชิงกล เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างเสาทดสอบซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ชื่อตัวอย่าง C-( X1)-( X2)

(X1) แสดงลักษณะการต่อทาบ ดังนี้

SP หมายถึง มีการต่อทาบแบบปกติ (Lap splice)

MS หมายถึง มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล (Mechanical splice)

( X2) แสดงถึงปริมาณ (%) ของการต่อทาบเหล็กเสริมบริเวณโคนเสา

#### 4.1.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100

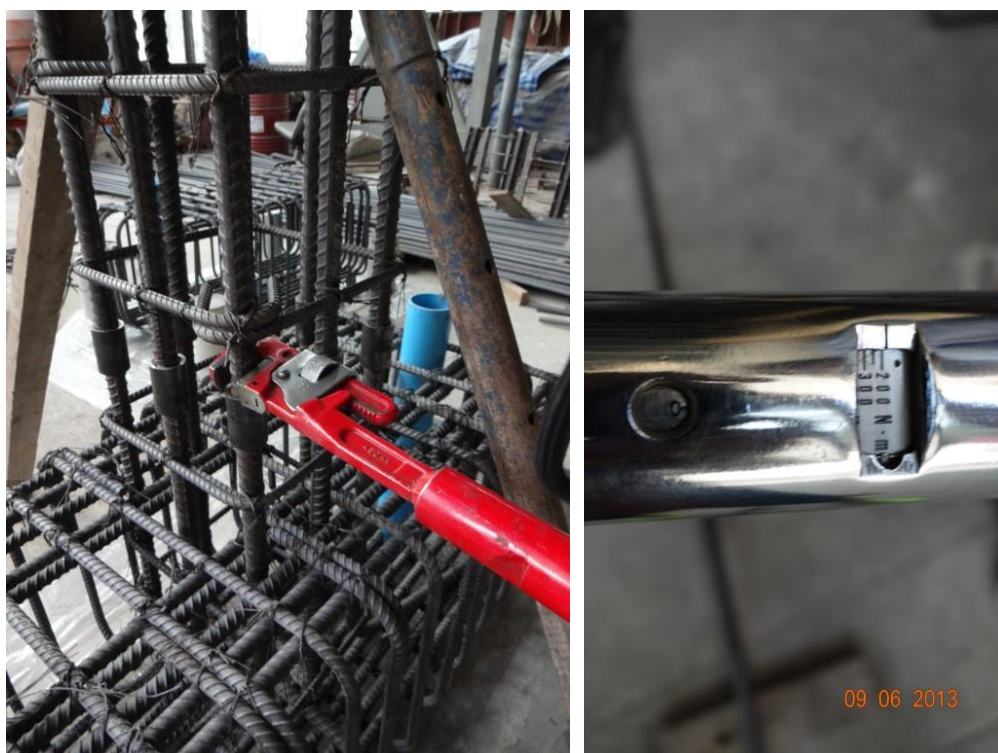
เสาทดสอบ C-SP-100 ซึ่งเป็นเสาที่มีการต่อทาบแบบปกติทั้งหน้าตัด โดยเสมือนมีเหล็กตามยาวที่เผื่อสำหรับการต่อทาบจากฐานรากเป็นระยะ 70 ซม. (28d) จากนั้นทำการต่อทาบตั้งแต่ผิวบนของฐานรากขึ้นไปเป็นระยะที่ความสูงเสาเท่ากับ 2.4 ม. โดยเหล็กเสริมที่นำมาต่อทาบต้องมีการตัดที่ระยะพ้นจากจุดต่อทาบให้มีความลาดเอียงของเหล็กเสริมส่วนที่ตัดเยื้องกัน เมื่อเทียบกับแกนของเสาเป็นระยะ 15 ซม. (6d) เพื่อให้เหล็กเสริมตามยาวที่ต่อทาบอยู่ในแกนเดียวกับเหล็กเสริมตามยาวจากฐานรากดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณที่ไม่ต่อทาบและมีการต่อทาบต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด ( $A_{st}/A_g$  %) เท่ากับ 2.45% และ 4.90% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว ( $f_y$ ) เท่ากับ 4495 กก./ $\text{cm}^2$  และกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมทางขวางเท่ากับ 5216 กก./ $\text{cm}^2$  มีกำลังอัดประลัยคอนกรีต เท่ากับ 236 กก./ $\text{cm}^2$  โดยระหว่างการทดสอบให้แรงอัดในแนวแกนเท่ากับ 304 กิโลนิวตัน ( $0.082f_c A_g$ ) และคาดว่ารูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นจะเป็น การวิบัติแบบดัด (Flexure Failure)



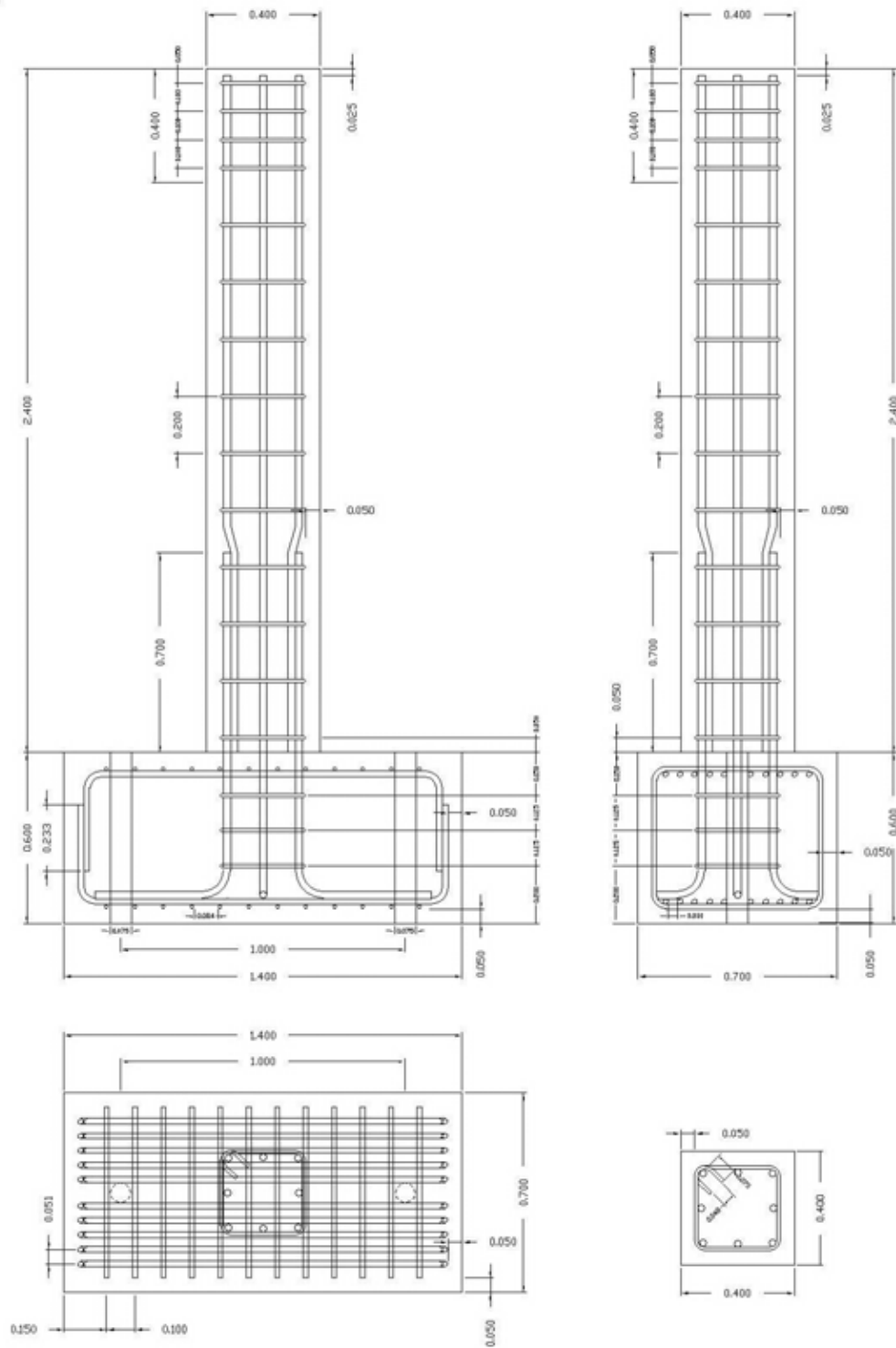
รูปที่ 4.1 การตัดให้มีความลาดเอียงของเหล็กเสริมส่วนที่ตัดเยื้องกัน เมื่อเทียบกับแกนของเสา

#### 4.1.2 ตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100

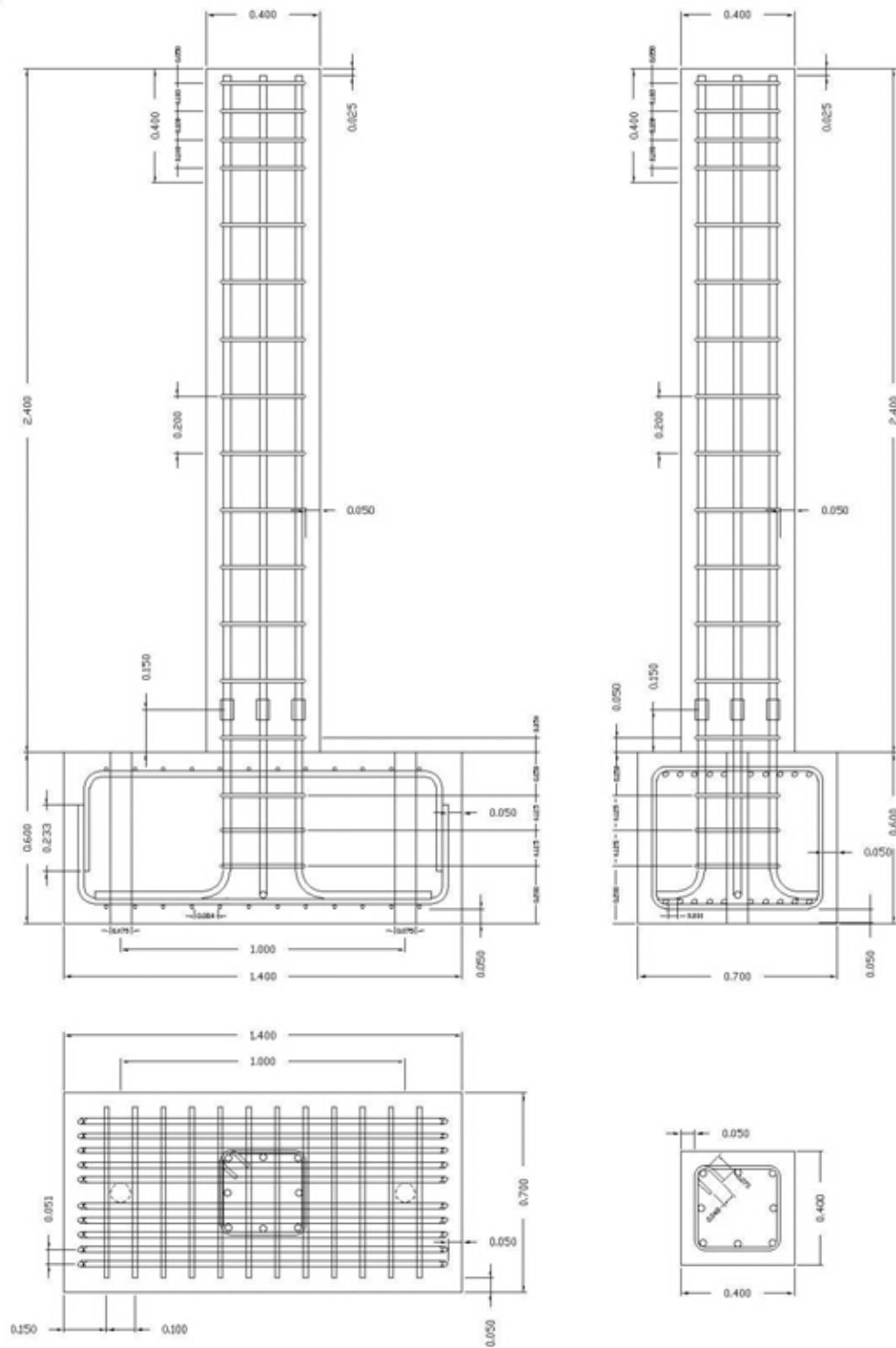
เสาทดสอบ C-MS-100 เป็นเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลทั้งหน้าตัด โดยตำแหน่งที่ทำการต่อเหล็กเสริมอยู่สูงจากผิวบนของฐานรากเท่ากับ 15 ซม. เนื่องจากเหล็กเสริมทางขวางที่ระดับแรกอยู่สูงจากผิวฐานรากเท่ากับ 5 ซม. และมีระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางในชั้นถัดไปเป็นระยะทุกๆ 20 ซม. ซึ่งตำแหน่งที่ทำการต่อทาบจะเป็นระยะที่กึ่งกลางของระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางที่ระดับแรกและระดับที่สอง โดยการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลประเภทเกลียวได้มีการควบคุมแรงบิดในการขันเหล็กเสริมที่ต่อภายในข้อต่อเชิงกลด้วย ประแจควบคุมแรงบิด (Torque wrench) ที่ระดับแรงบิดเท่ากับ 200 นิวตัน-เมตร ตามคำแนะนำของผลิตภัณฑ์ข้อต่อเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 4.2 สำหรับอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามยาวต่อพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด ( $A_{sr}/A_g$  %) เท่ากับ 2.45% มีกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว ( $f_y$ ) เท่ากับ 4495 กก./ซม.2 และกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมทางขวางเท่ากับ 5216 กก./ซม.2 มีกำลังอัดประลัยคอนกรีต เท่ากับ 236 กก./ซม.2 โดยระหว่างการทำทดสอบให้แรงอัดในแนวแกนเท่ากับ 304 กิโลนิวตัน ( $0.082f_c A_g$ ) และคาดว่ารูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นจะเป็น การวิบัติแบบดัด (Flexure Failure)



รูปที่ 4.2 การขันเหล็กเสริมที่ต่อภายในข้อต่อเชิงกลด้วย ประแจควบคุมแรงบิด (Torque wrench) ที่ระดับแรงบิดเท่ากับ 200 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 4.3 ขนาดและลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100



รูปที่ 4.4 ขนาดและลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ C-MS-10

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบ

ชื่อตัวอย่างเสาทดสอบ		C-SP-100	C-MS-100
กำลังปลายคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)		236	236
ขนาด ตัวอย่าง เสา	ความกว้าง	0.40 ม.	
	ความลึก	0.40 ม.	
	ความสูงที่แรงด้านข้าง กระทำ	2.20 ม.	
ความสูงต่อความลึกหน้าตัด		5.5	
เหล็กเสริม ตามยาว	จำนวน/ขนาดเหล็ก	8-DB25	
	ร้อยละ $A_{st}/A_g$	2.45%	
	กำลังที่จุดคราก	4495 (กก./ตร.ซม.)	
เหล็กเสริม ตามขวาง	จำนวน/ขนาดเหล็ก	1-DB12 @200	
	อัตราส่วนโดยปริมาตร (Volumetric ratio)	0.00753	
	กำลังที่จุดคราก	5216 (กก./ตร.ซม.)	
อัตราส่วนแรงในแนวแกน $\frac{P}{f_c' \cdot A_g}$		0.082	
มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาว		ต่อทาบปกติ	ข้อต่อเชิงกล
รูปแบบการวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น		แบบดัด (Flexure Failure)	

## 4.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

### 4.2.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นคอนกรีตที่ผสมเสร็จ มีค่าการยุบตัว (slump) เท่ากับ  $10 \pm 2.5$  ซม. มีค่ากำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) ที่ใช้ในการออกแบบของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกเท่ากับ  $250 \text{ กก./ซม.}^2$  (24.5 เมกะปาสคาล) โดยในการหล่อตัวอย่างได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยมีการบ่มด้วยความชื้นตลอดเวลาด้วยกระสอบชุบน้ำในลักษณะเดียวกันกับการบ่มตัวอย่างเสาทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบกำลังของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่างทดสอบ	ตัวอย่างรูปทรงกระบอก	ขนาดของตัวอย่าง (ซม.)		แรงอัด (กก.)	$f_c'$ (กก./ซม. <sup>2</sup> )	อายุ (วัน)	หมายเหตุ
		เส้นผ่านศูนย์กลาง.	ความสูง				
1	C1	15.104	30.1	38318	213	8	
	C2	15.093	30.1	36269	202	8	
	C3	14.998	30.2	39867	225	8	
	ค่าเฉลี่ย					213	
2	C4	15.002	30.2	39877	225	25	
	C5	14.997	30.2	-	-	25	ยกเว้น
	C6	15.013	30.1	40112	226	25	
	ค่าเฉลี่ย					225.5	
3	C7	15.043	30.0	44709	251	28	
	C8	15.031	30.0	42130	237	28	
	C9	15.112	30.1	39531	220	28	
	ค่าเฉลี่ย					236	

#### 4.2.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 2 ขนาด ซึ่งประกอบไปด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. (DB25) เป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งกำลังที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 กก./ชม.2 ใช้เป็นเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. (DB12) เป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งกำลังที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 กก./ชม.2 ใช้เป็นเหล็กปลอกรัดรอบโดยแต่ละขนาดได้ทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว ( $f_y$ ) และของเหล็กเสริมทางขวาง ( $f_{yh}$ ), กำลังรับแรงดึงประลัย ( $f_{su}$ ), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม, ( $E_s$ ) ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม.

ตัวอย่างทดสอบ	$f_y$ (กก./ชม.2)	$f_{su}$ (กก./ชม.2)	$E_s$ (กก./ชม.2)
1	4278	6091	2036879
2	4318	6111	2031601
3	4889	6641	2050191
ค่าเฉลี่ย	4495	6281	2039557

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

ตัวอย่างทดสอบ	$f_y$ (กก./ชม.2)	$f_{su}$ (กก./ชม.2)	$E_s$ (กก./ชม.2)
1	5260	6631	2080012
2	5172	6498	2047091
3	5216	6543	2031356
ค่าเฉลี่ย	5216	6557	2052819

### 4.2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการเตรียมพื้นที่ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต โดยมีการวางแผนการจัดวางพื้นที่ในการเตรียมตัวอย่างให้สะดวกในการเทคอนกรีต จากนั้นได้ทำการปรับระดับพื้นให้ไม่มีความลาดเอียงด้วย non shrink grout และตีเส้นสำหรับเพื่อแสดงตำแหน่งของเหล็กเสริมที่นำมาประกอบรวมถึงเส้นของการตั้งแบบหล่อคอนกรีตและท่อ PVC จากนั้นนำเหล็กเสริมขนาดต่างๆที่ทำการตัดให้ได้รูปตามแบบที่กำหนดมาประกอบเป็นฐานรากในตำแหน่งที่ตีเส้นไว้ และทำการตั้งเสาโดยผูกเหล็กยื่นไว้กับเหล็กของฐานซึ่งมีการตรวจเช็คระยะห่างระหว่างเหล็กยื่น จุดศูนย์กลางเสา ระดับแนวตั้ง ให้ถูกต้องจากนั้นจึงสวมเหล็กปลอกโดยมีการวนของตำแหน่งของอในลักษณะตามเข็มนาฬิกาในแต่ละระดับของเหล็กปลอก

สำหรับเสาทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีการติดเกจวัดความเครียด (strain gages) ที่เหล็กยื่นในตำแหน่งเหล็กเสริมที่มุมของเสา 4 เส้น บริเวณใต้ผิวบนของฐานราก 10 ซม. จากนั้นทำการตั้งแบบหล่อคอนกรีตของฐานรากและทำการค้ำยันแบบเพื่อป้องกันการปริแตกของแบบหล่อคอนกรีต เมื่อทำการเทคอนกรีตฐานรากเสร็จสิ้นจึงได้ทำการถอดแบบหล่อคอนกรีต และทำการติดเกจวัดความเครียด (strain gages) ที่เหล็กยื่นในตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 โดยมีขั้นตอนในการติดเกจวัดความเครียด (strain gages) ดังนี้

- ใช้เครื่องเจียร เจียรส่วนที่เป็นปล้องของเหล็กข้ออ้อยออกให้ผิวเรียบมีความยาวอย่างน้อย 1 ซม. ในบริเวณที่จะทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด
- ใช้กระดาษทรายเบอร์ละเอียดขัดผิวเหล็กเสริมที่จะติดเกจวัดความเครียดให้เรียบ
- ทำความสะอาดบริเวณที่ทำการขัดผิวด้วยสารอะซิโตน (acetone)
- เตรียมเกจวัดความเครียดโดยตัดสายไฟบริเวณที่ออกมาจากตัวเกจวัดความเครียดให้ห่างออกจากกันเพื่อป้องกันความเสียหาย
- ใช้กาวไซยาโนอะครีเลต (Cyano-Acrylate Adhesive) ชนิด CC-33A ยี่ห้อ Kyowa ทาลงบนตัวเกจวัดความเครียด
- จากนั้นทำการติดเกจวัดความเครียดลงบนตำแหน่งที่ต้องการโดยใช้แผ่นพลาสติกกดทับเกจวัดความเครียดไว้ประมาณ 1 นาทีเพื่อใช้กาวแห้งตัว
- หุ้มเกจวัดความเครียดด้วยเทปกั้นน้ำเพื่อป้องกันความเสียหายในระหว่างเทคอนกรีต



จากนั้นทำการเรียงสายเกจวัดความเครียดตามแนวเหล็กเสริมแล้วรวมกันที่ด้านที่ไม่ได้รับแรงทั้ง 2 ข้างเพื่อนำออกนอกแบบหล่อคอนกรีตเสาะโดยการตั้งแบบหล่อคอนกรีตเสาะ โดยวิธีที่ควบคุมให้ระยะหุ้มของคอนกรีตเท่ากับ 5 ซม.เท่ากันตลอดทุกด้านและตลอดช่วงความสูงเสาะได้ใช้ลูกปูนที่เตรียมหล่อไว้ซึ่งมีความสูง 5 ซม. พร้อมลวดผูกเหล็กที่ฝังอยู่ไว้ ทำการมัดกับเหล็กเสริมเสาะเพื่อที่จะบังคับไม่ให้เหล็กเสริมเสาะมีการขยับตัวขณะเทคอนกรีต ซึ่งเมื่อทำการตั้งแบบหล่อคอนกรีตได้มีการตรวจเช็คระดับแนวตั้งด้วยลูกดิ่งและทำการค้ำยันเสาะ 2 ด้าน จากนั้นตั้งนั่งร้านให้มีระดับที่เหมาะสมกับการทำงานเนื่องจากบริเวณพื้นที่หล่อคอนกรีตไม่มีโครงยกของจะใช้วิธีการเทคอนกรีตด้วยถังปูน ซึ่งมีการวางแผนการทำงานให้เทคอนกรีตเสาะทุกต้นพร้อมกันให้แล้วเสร็จในเวลา 1.5 ชม. ในการหล่อตัวอย่างได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวนอย่างน้อย 24 ตัวอย่าง โดย 12 ตัวอย่างแรกเป็นคอนกรีตเมื่อรถส่งคอนกรีตมาถึงสถานที่หล่อตัวอย่าง และอีก 6 ตัวอย่าง เป็นคอนกรีตในระหว่างการเทตัวอย่างไปแล้วครึ่งหนึ่ง และ 6 ตัวอย่างสุดท้ายคือคอนกรีตที่ทำการเทตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้วเมื่อคอนกรีตเสาะแข็งตัวจึงทำการถอดแบบหล่อคอนกรีตและทำการบ่มด้วยความชื้นโดยใช้กระสอบชุบน้ำห่อรอบเสาะ รวมถึงตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกก็ทำการบ่มในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4.5 การปรับระดับพื้นให้ไม่มีความลาดเอียง (ซ้าย) ตีเส้นเพื่อแสดงตำแหน่งต่างๆ (ขวา)



รูปที่ 4.6 ประกอบเหล็กของฐานให้ตรงตำแหน่งที่ตีเส้นไว้เพื่อความแม่นยำในการประกอบเหล็กเสริมตามยาวและการตั้งแบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 4.7 การตั้งเสาโดยผูกเหล็กยื่นกับเหล็กของฐานโดยมีการตรวจเช็คระยะห่างระหว่างเหล็กยื่นจุดศูนย์กลางเสาและระดับแนวตั้ง

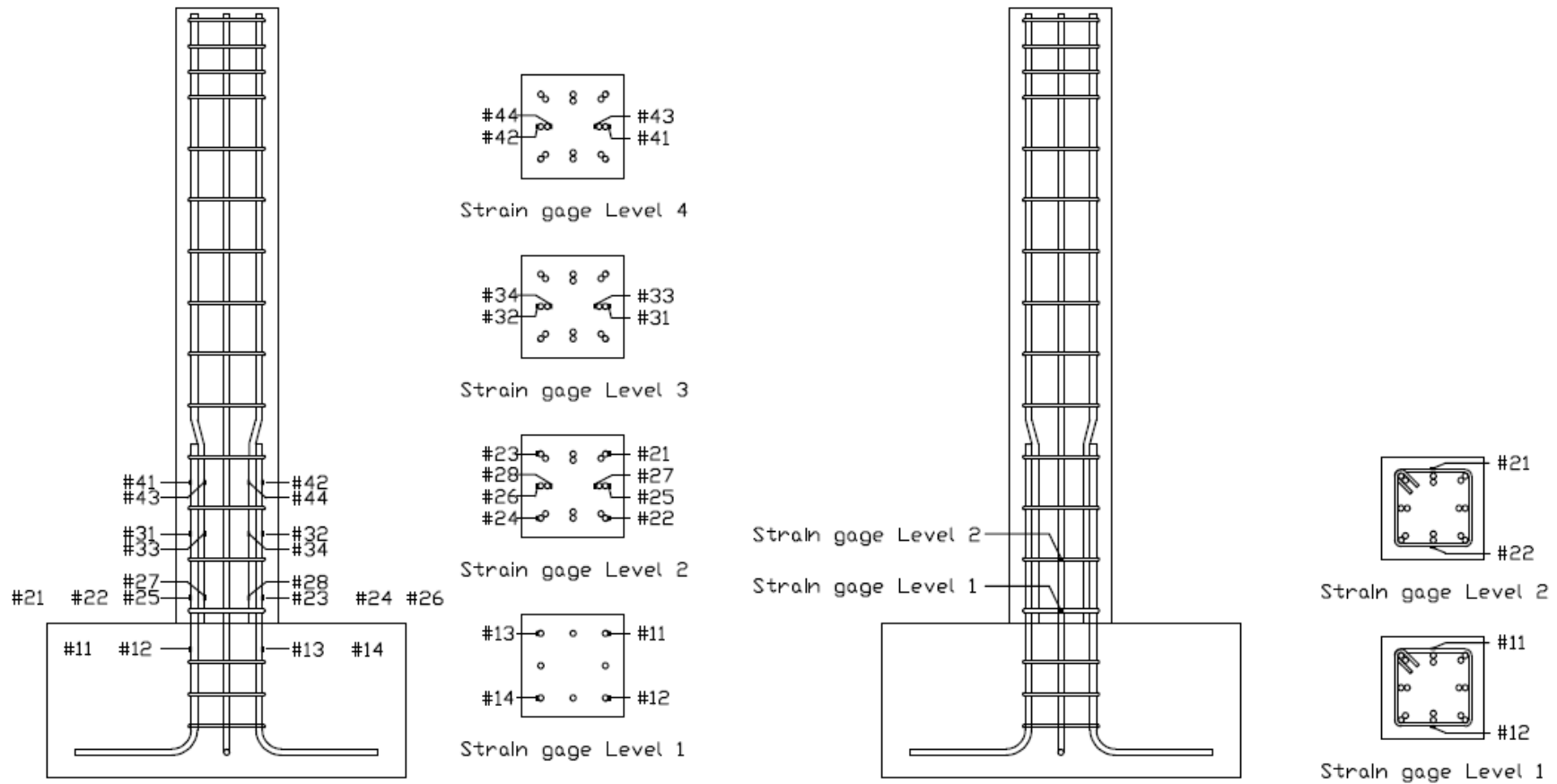


รูปที่ 4.8 ตัวอย่างเสา C-SP-100 เมื่อทำการประกอบเหล็กเสริมเสร็จสิ้น

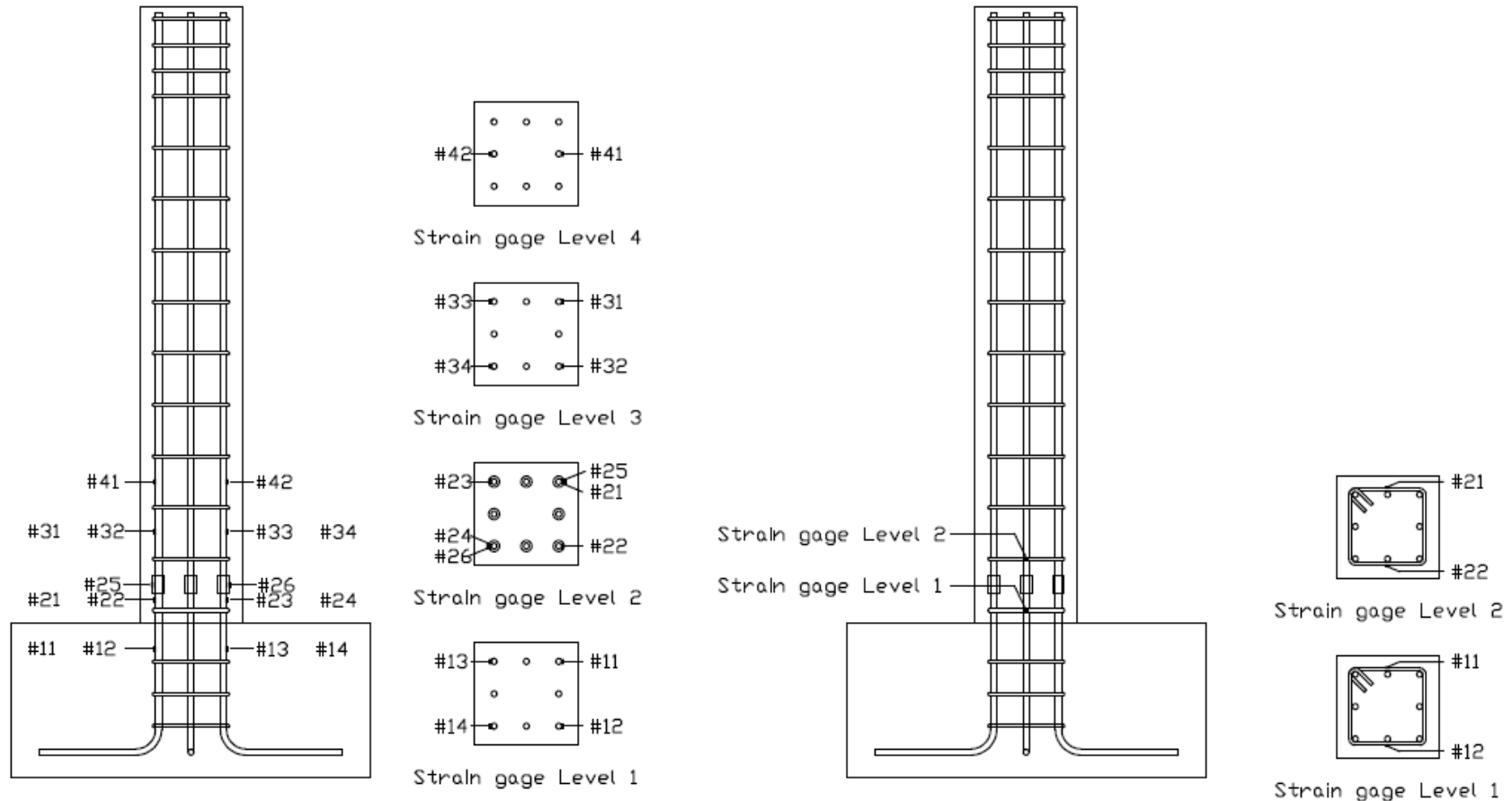


รูปที่ 4.9 ตัวอย่างเสา C-MS-100 เมื่อทำการประกอบเหล็กเสริมเสร็จสิ้น





รูปที่ 4.10 ตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-MS-100





รูปที่ 4.12 การตั้งแบบหล่อคอนกรีตของฐานราก (ซ้าย) และเมื่อถอดแบบหล่อคอนกรีต (ขวา)



รูปที่ 4.13 การติดตั้งเกจวัดความเครียดของเสา C-SP-100 (ซ้าย) และ C-MS-100 (ขวา)





รูปที่ 4.14 การตั้งแบบหล่อคอนกรีตของเสา (ซ้าย) และเมื่อถอดแบบหล่อคอนกรีต (ขวา)

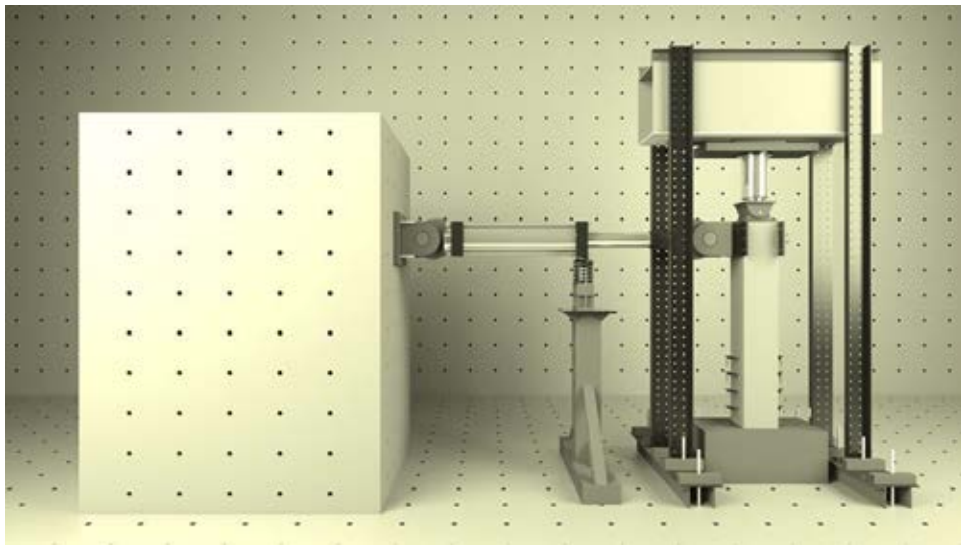
### 4.3 การเตรียมการทดสอบ

#### 4.3.1 การเตรียมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างจริงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ซึ่งก่อนที่จะเริ่มงานทดสอบสำหรับวิจัยนี้ได้ ต้องมีการวางแผนและออกแบบการติดตั้งเครื่องมือทดสอบต่างๆ อาทิเช่น รูปแบบการจัดวางเรียงผนังรับแรง ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องให้แรง อุปกรณ์รองรับเครื่องให้แรง ตำแหน่งของโครงให้แรงในแนวแกน ชั้นตอนในการยกของต่างๆ และอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ

โดยเริ่มจากการขนย้ายโครงให้แรงในแนวแกนจากห้องปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างจริงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร ไปยังห้องปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างจริงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี จากนั้นทำการเคลื่อนย้ายผนังรับแรงมาเรียงกันจำนวน 5 ชั้น ซึ่งทำการยึดกับพื้นห้องปฏิบัติการด้วย Posttension bar จำนวน 6 เส้น จากนั้นทำการเคลื่อนย้าย

โครงให้แรงในแนวแกนไปยังตำแหน่งที่ออกแบบไว้และทำการยึดด้วย Postension bar จำนวน 10 เส้น ซึ่งระหว่างผนังรับแรงและโครงให้แรงในแนวแกนจะมีอุปกรณ์รองรับเครื่องให้แรง โดยเครื่องให้แรงจะทำการยึดกับแผ่นเพลทเหล็กขนาด 70 ซม. x 60 ซม. x 6 ซม. ที่ติดตั้งอยู่บนผนังรับแรงชั้นที่ 4 ด้วยน็อตขนาด M36 G12.9 จำนวน 4 ตัว และวางลงบนอุปกรณ์รองรับเครื่องให้แรง จึงเสร็จสิ้นการเตรียมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 4.15 วางแผนรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์การทดสอบ



รูปที่ 4.16 ขนย้ายโครงให้แรงในแนวแกน





รูปที่ 4.17 การจัดวางผนังรับแรง



รูปที่ 4.18 การจัดวางอุปกรณ์รองรับเครื่องให้แรง



รูปที่ 4.19 เสร็จสิ้นการเตรียมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ

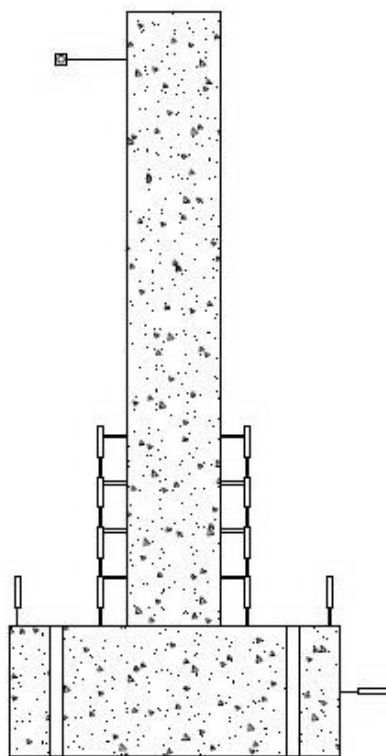
#### 4.3.2 การติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบ

ตัวอย่างเสาทดสอบนั้นจะทำการทาสีขาวที่ตัวอย่างเสาทดสอบเพื่อช่วยให้สามารถสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้อย่างชัดเจนในขณะทำการทดสอบ นอกจากนั้นจะได้ทำการตีเส้นอ้างอิงตั้งแต่โคนเสาที่ระดับต่างๆ โดยแต่ละระดับจะห่างกันระดับละ 10 ซม. เพื่อเป็นการสะดวกในการบันทึกรอยแตกร้าวบนตัวอย่างทดสอบ จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบมาวางในตำแหน่งที่ต้องการโดยจะต้องตรวจสอบให้ตัวอย่างเสาตรงอยู่ในแนวแรงกระทำทางด้านข้างโดยไม่มีการเอียงของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนั้นจะทำการให้แรงด้านข้างจากเครื่องให้แรง (hydraulic actuator) ซึ่งมีค่าสูงจะนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการเคลื่อนที่หรือผลึกคว่ำของตัวอย่างทดสอบจึงได้ทำการยึดตัวอย่างทดสอบกับพื้นห้องปฏิบัติการโดยการใส่พอนเหล็กกำลังสูงจำนวน 2 เส้นร้อยผ่านฐานรากของเสาตัวอย่างลงไปยังพื้นห้องปฏิบัติการจากนั้นทำการยึดโดยการใช้อัดแรงจากนั้นเมื่อนำตัวอย่างทดสอบวางในตำแหน่งที่ต้องการแล้ว ทำการติดตั้งอุปกรณ์การให้แรงในแนวตั้ง โดยการตรวจสอบให้ตำแหน่งให้แรงอยู่ในแนวกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบโดยมีการปรับระดับผิวหัวเสาเพื่อให้อุปกรณ์ให้แรงในแนวตั้งสามารถถ่ายแรงลงสู่เสาได้อย่างเต็มพื้นที่หน้าตัดเสา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเทียบ (calibration) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบอันได้แก่ เครื่องให้แรงที่ใช้สำหรับการให้แรงในแนวแกนแกตัวอย่างทดสอบโดยได้ใช้เครื่องวัดแรง (Load cell) เป็นเครื่องมือในการช่วยทดสอบเทียบ

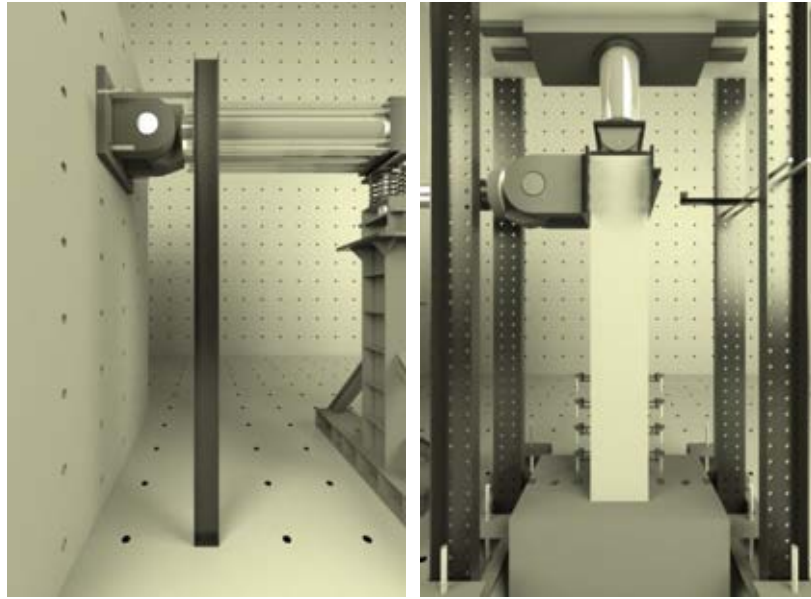
#### 4.3.3 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ (displacement transducer)

เครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 13 ตัว โดยแบ่งเป็น เครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบ Strain base จำนวน 8 ตัว เพื่อใช้วัดค่าความโค้งเสาที่ระดับทุกๆ 20 ซม. จำนวน 4 ระดับ จากโคนเสา และอีก 1 ตัว ใช้วัดการเคลื่อนตัวของผนังรับแรง ซึ่งที่หัวเสา จะใช้เครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบ Strain base ที่เป็นรูปแบบสลิงที่สามารถวัดได้  $\pm 25$  ซม. อีก 1 ตัว และสำหรับเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบ Voltage base จำนวน 3 ตัว ใช้วัดการพลิกตัวและการเคลื่อนตัวของฐานราก โดยเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบ Voltage base จะใช้แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก (power supply) แบบปรับค่าได้ โดยเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการอ่านค่าได้ 0.01 มม. ซึ่งจะต้องทำการทดสอบเทียบ (calibration) เพื่อความถูกต้อง โดยตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าจะ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า

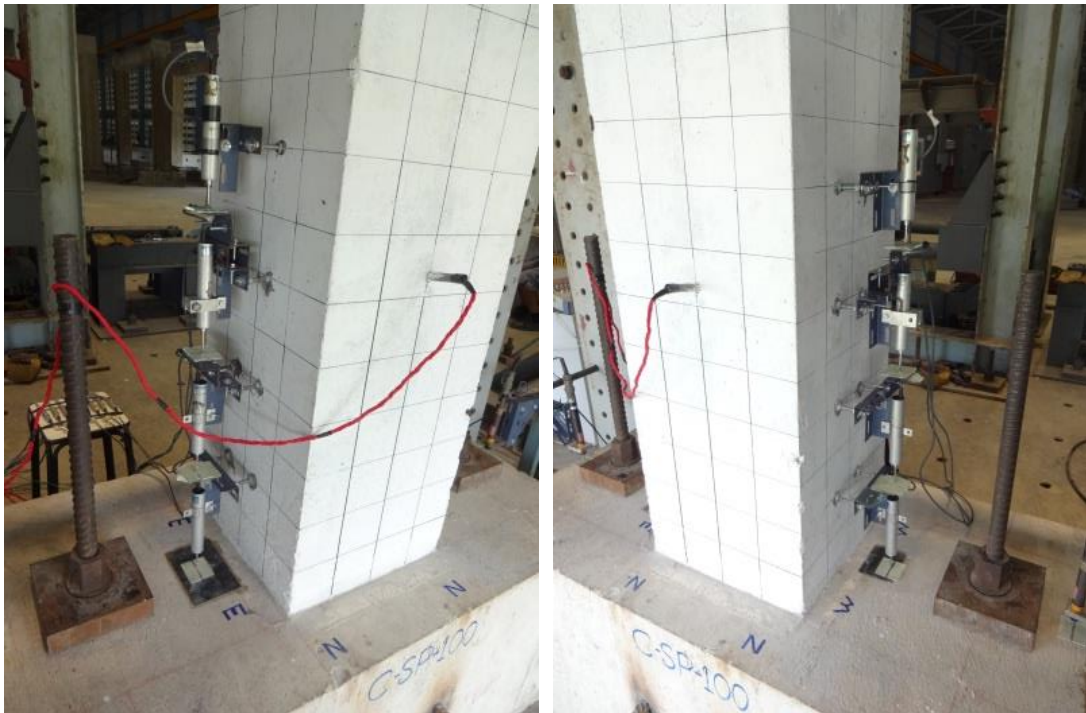




รูปที่ 4.21 ออกแบบอุปกรณ์ติดตั้งเครื่องมีวัดระยะการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.22 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ของฐานราก (ซ้าย)  
วัดการเคลื่อนที่ของผนังรับแรง (ขวา) และวัดการเคลื่อนที่ของหัวเสา (ล่าง)



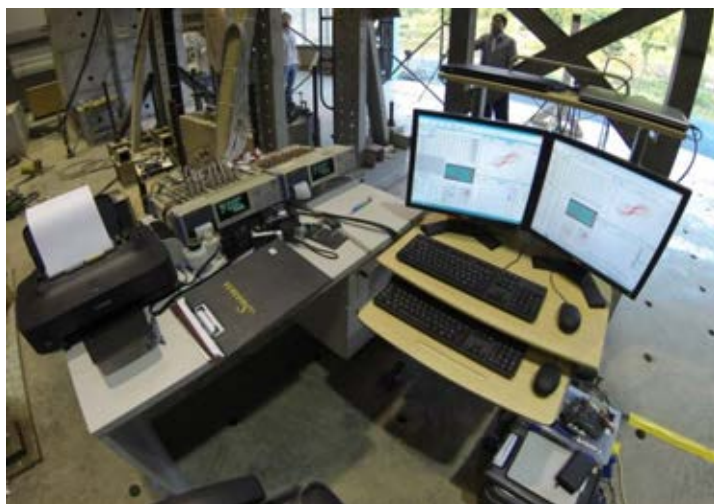
รูปที่ 4.23 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าความโค้งงอของเสา



รูปที่ 4.24 การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าที่ใช้วัดการหมุนของฐานราก

#### 4.3.4 หน่วยรวบรวมข้อมูล (data acquisition unit)

ระหว่างการทดสอบจะทำการบันทึกผลจากเครื่องมือตรวจวัดต่างๆด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) Kyowa UCAM-60A และ Kyowa UCAM-60B โดยต่อเข้ากับเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า เกจวัดความเครียดชนิดที่ใช้ในการวัดความเครียดบนเหล็กเสริม รวมถึงบันทึกแรงที่กระทำทางด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ของหัวเสาจากเครื่องควบคุมเครื่องให้แรงที่ใช้หลักการแสดงค่าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง  $\pm 10$  โวลต์ โดยต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลทั้ง 2 เครื่องซึ่งข้อมูลจะทำการบันทึกลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ตลอดการทดสอบ



รูปที่ 4.25 อุปกรณ์สำหรับบันทึกผลการทดสอบ

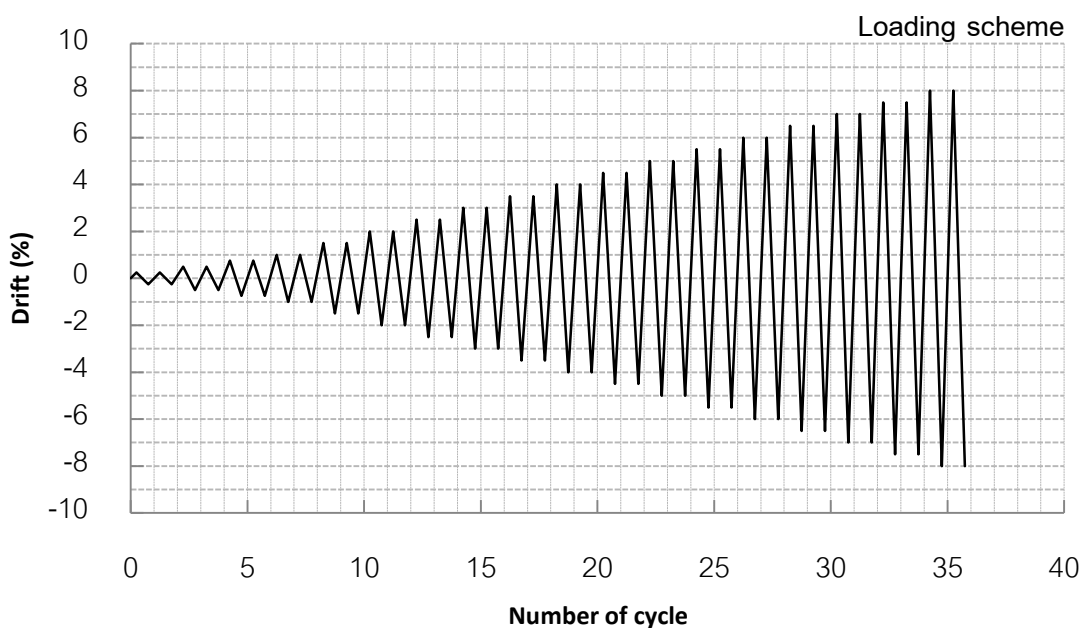


รูปที่ 4.26 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) Kyowa UCAM-60B (ซ้าย)  
และ Kyowa UCAM-60A (ขวา)



#### 4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบเสาตัวอย่างจะเริ่มทำการบันทึกผลเครื่องมือตรวจวัดเป็นสิ่งแรก จากนั้นทำการขยับเครื่องให้แรงไปสัมผัสกับเสาเพื่อทำการยึดหัวเสา และเริ่มให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นจะให้แรงทางด้านข้างแบบวัฏจักรกระทำกับเสาตัวอย่างทดสอบ โดยควบคุมการให้แรงกระทำทางด้านข้างจากอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างของหัวเสาตัวอย่างทดสอบ (Displacement Control) ซึ่งแสดงประวัติการให้แรงของเสาตัวอย่างทดสอบโดยการควบคุมอัตราการเคลื่อนตัวของหัวเสาตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.27 โดยจะทำการให้แรงแบบวัฏจักรแก่ตัวอย่างทดสอบ 2 รอบต่ออัตราการเคลื่อนตัวที่กำหนดเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้หรือไม่ (การทดสอบ 1 รอบหมายถึงเริ่มที่ค่าแรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นทำการให้แรงกระทำทางด้านข้างจนตัวอย่างทดสอบมีอัตราการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมีค่าตามที่กำหนดในทิศทาง + จากนั้นให้แรงกระทำทางด้านข้างจนตัวอย่างทดสอบมีการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมีค่าตามที่กำหนดในทิศทาง -) ในแต่ละรอบจะทำการหยุดเพื่อทำการจดบันทึกข้อมูลค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียด การเคลื่อนที่จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า และข้อมูลแรงกระทำด้านข้าง นอกจากนี้ยังได้ทำการบันทึกรายละเอียดต่างๆที่สังเกตได้ระหว่างการทดสอบได้แก่ การบันทึกรอยแตกร้าวและพฤติกรรมของเสาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบโดยการทดสอบจะกระทำจนกว่าเสาตัวอย่างจะพังหรือเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้างไม่สามารถทดสอบต่อไปได้

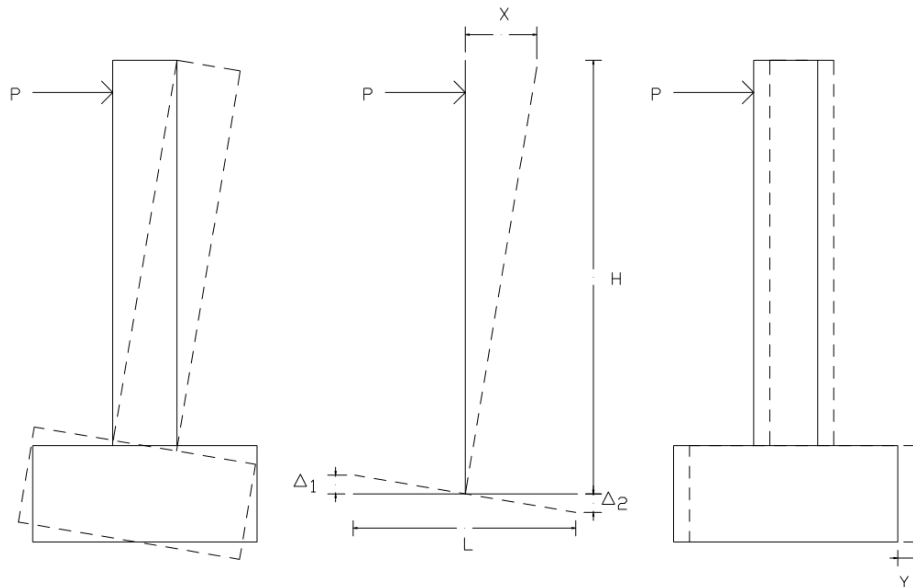


รูปที่ 4.27 รูปแบบการให้แรงกระทำ (loading scheme)

#### 4.5 การปรับแก้การเคลื่อนที่จากการเลื่อนไถลและการหมุนของฐานรากรวมถึงการเลื่อนไถลของผนังรับแรง

สำหรับการทดสอบเสาตัวอย่าง จะมีการให้แรงกระทำทางด้านข้างจากเครื่องให้แรง ซึ่งอาจส่งผลให้มีการเลื่อนไถลของฐานของตัวอย่างทดสอบรวมถึงการเลื่อนไถลของผนังรับแรง ซึ่งทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของเสาตัวอย่างนั้นมีค่ามากเกินไปกว่าค่าที่เป็นจริง โดยการปรับแก้จะกระทำโดยนำระยะการเคลื่อนที่ของฐานตัวอย่างทดสอบซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูล นำมาลบออกจากระยะการเคลื่อนที่ของฐานตัวอย่างเสาและการเคลื่อนที่ของผนังรับแรงที่สภาวะนั้นๆ

นอกจากเลื่อนไถลแล้วของฐานตัวอย่างทดสอบที่อาจเกิดขึ้นนั้น ยังอาจเกิดการหมุนตัวของฐาน ซึ่งการหมุนตัวอย่างฐานนั้นจะทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของเสาตัวอย่างผิดจากความเป็จริง ซึ่งวิธีการปรับแก้การหมุนของฐานรากนั้นจะทำได้โดยการคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่เกิดจากการหมุนของฐานตัวอย่างทดสอบจากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตแล้วทำการลบออกจากระยะการเคลื่อนที่ของเสาตัวอย่างที่สภาวะนั้นๆ ซึ่งรูปที่ 4.28 แสดงภาพประกอบการปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและการหมุนของฐานราก โดยสมการที่ 4.1 และ 4.2 แสดงถึงการปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่และการหมุนของฐานรากตามลำดับ



รูปที่ 4.28 การปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่และการหมุนของฐานราก

$$\Delta_{real} = \Delta_{record} - X - Y - Z \quad (4.1)$$

$$X = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{L} \cdot H \quad (4.2)$$

- โดยที่
- $X$  = ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากการหมุนของฐานราก
  - $Y$  = ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากการไถลของฐานราก
  - $Z$  = ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากการไถลของผนังรับแรง
  - $\Delta_1$  = การหมุนเอียงของฐานราก1
  - $\Delta_2$  = การหมุนเอียงของฐานราก2
  - $H$  = ระยะจากจุดหมุนของเสาถึงจุดที่ให้แรงกระทำทางด้านข้าง
  - $L$  = ระยะห่างระหว่างเครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ทั้งสองตัว

โดยมีตัวอย่างแสดงการคำนวณการปรับแก้การเคลื่อนที่ทางด้านข้างเนื่องจากผลของการเลื่อนไถลของฐานรากและการหมุนเอียงของฐานรากรวมถึงการเลื่อนไถลของผนังรับแรง โดยตัวอย่างการคำนวณมีค่า  $H = 2200$  มม.  $L = 1330$  มม. แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการเคลื่อนที่การเลื่อนไถลและการหมุนของฐานรากรวมถึงการเลื่อนไถลของผนังรับแรง

ลำดับข้อมูล	ระยะเคลื่อนที่ทางด้านข้าง (มม.)	แรงกระทำทางด้านข้าง (ตัน)	การเลื่อนไถลของฐานราก (มม.)	การหมุนเอียงของฐานราก $\Delta_1$ (มม.)	การหมุนเอียงของฐานราก $\Delta_2$ (มม.)	การเลื่อนไถลของผนังรับแรง (มม.)
1	0	0	0	0	0	
2	5.506	38.344	0.02	-0.02	0.02	0.12

- จากนั้นทำการหาค่าระยะเนื่องจากผลของการหมุนเอียงของฐานราก ( $X$ )

$$X = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{L} \cdot H = \frac{0.02 - (-0.02)}{1330} \cdot 2200 = 0.06 \text{ มม.}$$

- ระยะการเลื่อนไถลของฐานราก ( $Y$ ) มีค่าเท่ากับ 0.02 มม.
- ระยะการเลื่อนไถลของผนังรับแรง ( $Z$ ) มีค่าเท่ากับ 0.12 มม.

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ

$$\Delta_{real} = \Delta_{real} = 5.506 - 0.02 - 0.06 - 0.12$$

$$\Delta_{real} = 5.306 \text{ มม.}$$

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมและผลการทดสอบของเสาตัวอย่างทั้ง 2 ตัวอย่าง เพื่ออธิบายให้เห็นถึงพฤติกรรมภายใต้การรับแรงแบบวิถัจกรของเสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมและที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล โดยจะอธิบายถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบเสาตัวอย่างด้วยรูปภาพที่แสดงถึง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น รูปแบบการแตกร้าวที่อัตราการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ตำแหน่งต่างๆ และแสดงผลการทดสอบด้วยความสัมพันธ์ต่างๆ ด้วยกราฟ ความสัมพันธ์ดังนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงานกับอัตราการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ที่กระทำและค่าความโค้ง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับค่าความเครียดในเหล็กเสริม รวมถึงทำการเปรียบเทียบค่าความเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ

#### 5.1 พฤติกรรมของเสาทดสอบที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบ

##### 5.1.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100


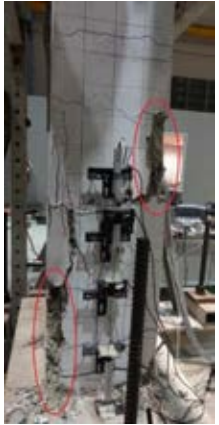

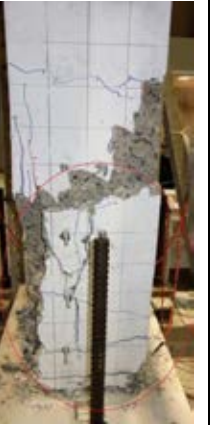

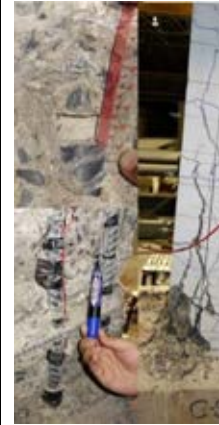
ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 มีลักษณะการแตกร้าวส่วนใหญ่จากแรงดัด และเมื่อเสามีการเคลื่อนตัวที่อัตราการเคลื่อนตัวที่สูงส่งผลให้คอนกรีตเกิดการกะเทาะออกทำให้เหล็กเสริมที่ต่อทาบสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวเป็นเหตุให้เสาเกิดการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมที่อัตราการเคลื่อนตัวต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

- เมื่อเริ่มให้แรงกระทำทางด้านข้างไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 0.25% ในรอบแรก ยังไม่พบความเสียหายใดๆ จนกระทั่งให้แรงไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 0.25% ในรอบที่สองพบว่าเริ่มมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่เสาทดสอบด้านทิศใต้และทิศตะวันตก
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 0.5% เริ่มมีรอยแตกร้าวที่รอยต่อของโคนเสาและฐานราก และเกิดรอยแตกร้าวในทุกด้านของเสาทดสอบโดยรอยแตกร้าวมีลักษณะยาวขึ้นในแนวราบ
- เมื่อให้แรงไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 0.75% รอยแตกร้าวเริ่มมีความกว้างมากขึ้นและยาวขึ้น โดยเฉพาะ ด้านทิศตะวันออก และเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในทิศตะวันออกและ

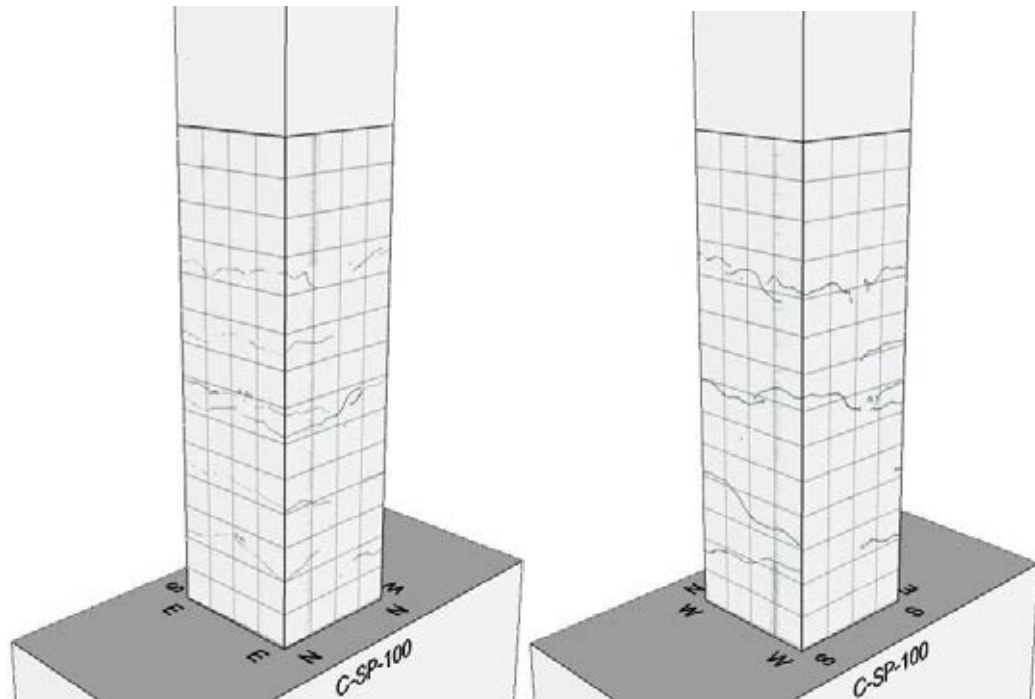
ทิศตะวันตกที่ระดับความสูง 20, 40, 60, 80, 100, 120 ซม. ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ใกล้เคียงกับเหล็กเสริมทางขวาง

- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 1% เริ่มมีรอยแตกร้าวลักษณะเอียง  $45^{\circ}$  ที่ระดับความสูง 60, 70 ซม. ในด้านทิศใต้ และที่ระดับความสูง 70, 80 ซม. ในด้านทิศเหนือ และมีลักษณะกว้างขึ้นเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวมีค่าเท่ากับ 1.5%
- อัตราการเคลื่อนตัว 2% คอนกรีตที่มุมเสาในด้านทิศเหนือและทิศตะวันตกเริ่มหลุดร่อน (spalling) ที่ตำแหน่งจากฐานสูงขึ้นมา 10 ซม. และเกิดความเสียหายในลักษณะเดียวกันที่มุมเสาในด้านทิศใต้และทิศตะวันออกเมื่อให้แรงไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 2.5%
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 3% เริ่มเกิดรอยแตกร้าวด้านทิศใต้ในลักษณะร้าวจากโคนเสาสูงขึ้นไปที่ระดับ 75 ซม. ตามแนวของเหล็กเสริมตามยาวฝั่งทิศตะวันตก เกิดความเสียหายในลักษณะเดียวกันในทิศเหนือซึ่งเกิดรอยแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริมตามยาวฝั่งทิศตะวันออก
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 3.5% คอนกรีตที่มุมเสากะเทาะออกมาในด้านทิศเหนือกับทิศตะวันตก บริเวณโคนเสาถึงระดับความสูง 40 ซม. และเกิดการกะเทาะที่มุมเช่นเดียวกันในด้านทิศใต้กับทิศตะวันตกที่ระดับความสูง 70 ถึง 100 ซม. ซึ่งรอยแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริมด้านทิศใต้มีลักษณะขยายใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 4% คอนกรีตที่มุมเสากะเทาะเพิ่มขึ้นในด้านทิศเหนือกับทิศตะวันตก บริเวณโคนเสาถึงระดับความสูง 70 ซม. โดยมีความลึกถึงเหล็กเสริมตามยาว และรอยแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริมด้านทิศใต้ขยายถึง 2 ซม.
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 4.5% คอนกรีตที่โคนเสาด้านทิศตะวันออกกะเทาะมากขึ้น และที่มุมเสากะเทาะเพิ่มขึ้นในด้านทิศเหนือกับทิศตะวันตก จนถึงอัตราการเคลื่อนตัว 5%
- เมื่ออัตราการเคลื่อนตัว 5.5% คอนกรีตฝั่งทิศตะวันตกกะเทาะออกมาทั้งหน้าเสาจากโคนเสาถึงระดับความสูง 70 ซม. โดยเห็นเหล็กเสริมทางขวางและเหล็กเสริมตามยาวที่ต่อทาบกันอย่างชัดเจน
- จากนั้นทำการให้แรงไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 6% สามารถเห็นถึงพฤติกรรมการเลื่อนหลุดของเหล็กที่ต่อทาบที่ปราศจากแรงยึดเหนี่ยวจากคอนกรีตโดยทำการขีดเส้นที่เหล็กเสริมที่ต่อทาบทั้ง 2 เส้น จากนั้นทำการให้แรง พบว่าเหล็กเสริมทั้ง 2 เส้นหลุดเลื่อนจากกันเป็นระยะถึง 1.5 ซม. โดยระหว่างการเคลื่อนตัวเสามีลักษณะแข็งตรงจากโคนเสาถึงปลายเสา ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปได้ด้วยการหมุนที่โคนเสาอย่างชัดเจน

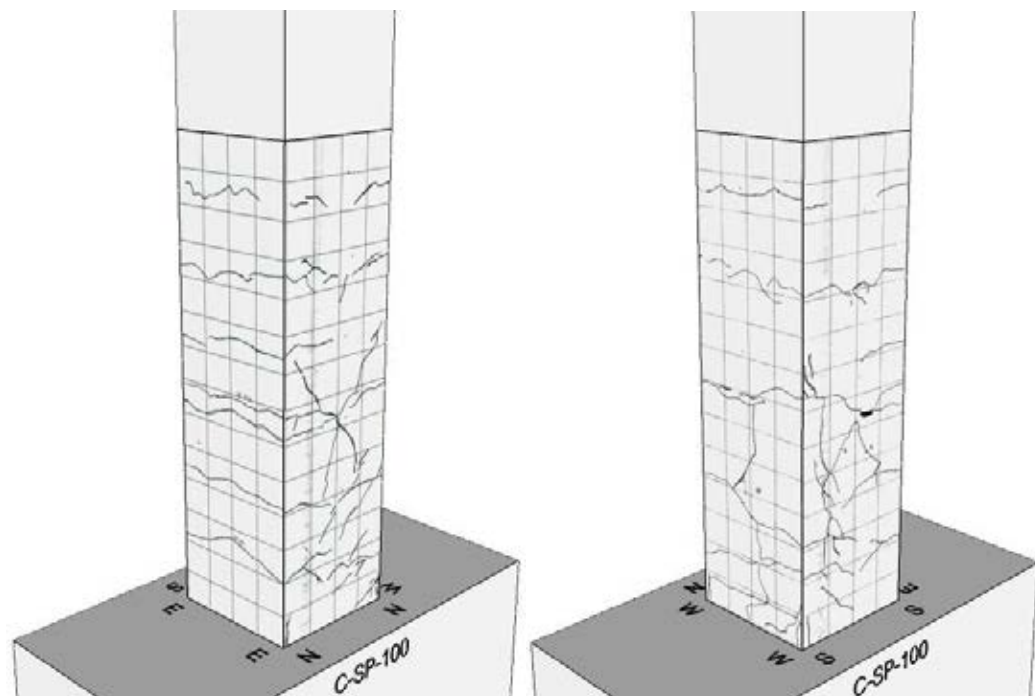
ตารางที่ 5.1 ลักษณะความเสียหายระหว่างการทดสอบและการวิบัติหลังการทดสอบของตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100

(% Drift)	3%	3.5%	4%	4.5% - 5%	5.5%	6%
รูปภาพ ความเสียหาย						
ลักษณะ ความเสียหาย	รอยแตกร้าวตามแนว เหล็กเสริมตามยาว ( $S_w$ )	คอนกรีตที่มุมเสา ( $W_N$ ) กะเทาะออกมา บริเวณโคนเสาถึง ระดับความสูง 40 ซม. และ ( $W_S$ ) ที่ ระดับความสูง 70 ถึง 100 ซม	คอนกรีตที่มุมเสา ( $W_N$ ) กะเทาะ เพิ่มขึ้น บริเวณโคน เสาถึงระดับความ สูง 70 ซม. โดยมี ความลึกถึงเหล็ก เสริมตามยาว	คอนกรีตที่โคนเสา (E) กะเทาะมากขึ้น และที่มุมเสากะเทาะ เพิ่มขึ้น ( $W_N$ )	คอนกรีต (W) กะเทาะ ออกมาทั้งหน้าเสาจาก โคนเสาถึงระดับความสูง 70 ซม. เห็นเหล็กเสริม ทางขวางและเหล็กเสริม ตามยาวที่ต่อกัน อย่างชัดเจน	เห็นถึงพฤติกรรมการเลื่อนหลุด ของเหล็กที่ต่อทาบที่ปราศจาก แรงยึดเหนี่ยวจากคอนกรีตโดย ทำการขีดเส้นที่เหล็กเสริมที่ต่อ ทาบทั้ง 2 เส้น พบว่าเหล็กเสริม ทั้ง 2 เส้นหลุดออกจากกันเป็น ระยะถึง 1.5 ซม.



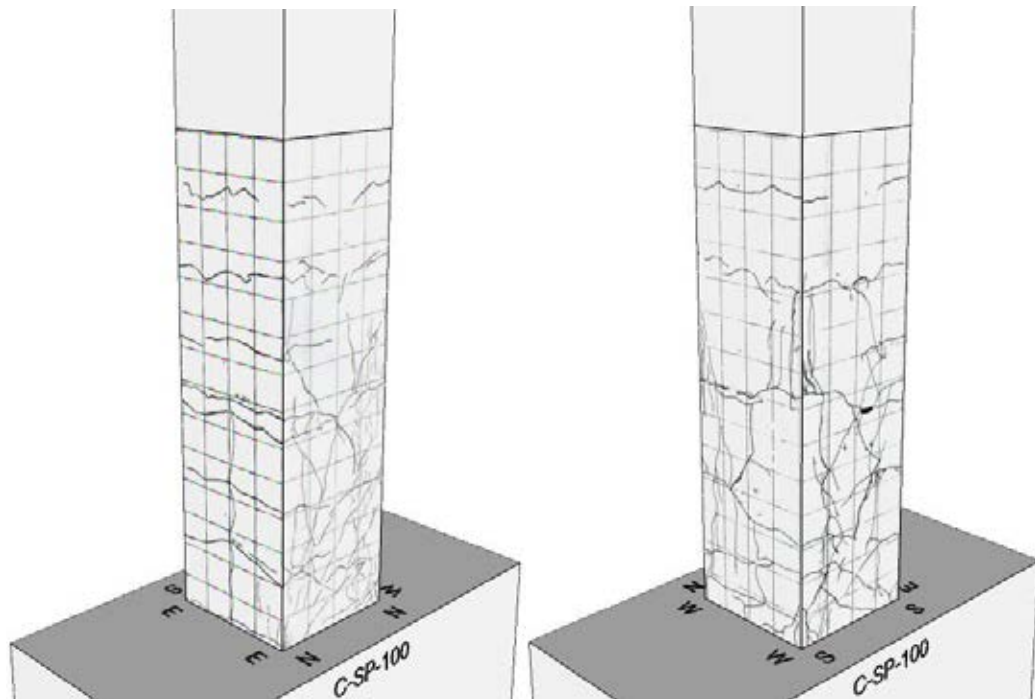


รูปที่ 5.1 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  ถึง  $\pm 0.75\%$   
ของตัวอย่างเสา C-SP-100

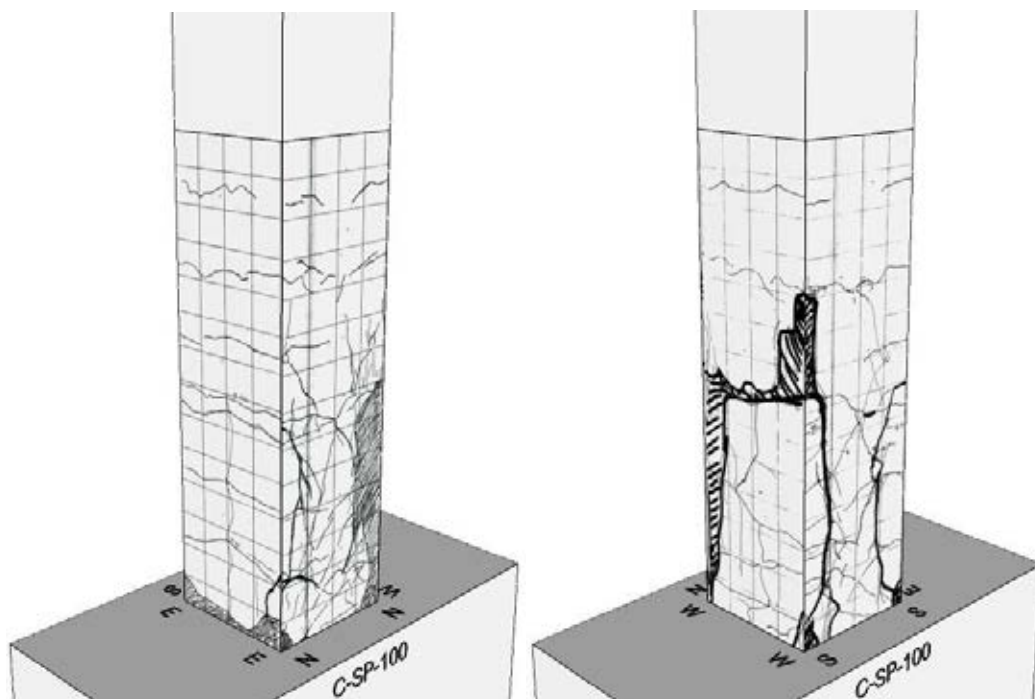


รูปที่ 5.2 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1\%$  ถึง  $\pm 2\%$   
ของตัวอย่างเสา C-SP-100





รูปที่ 5.3 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 2.5\%$  ถึง  $\pm 3.5\%$   
ของตัวอย่างเสา C-SP-100



รูปที่ 5.4 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 4\%$   
ของตัวอย่างเสา C-SP-100

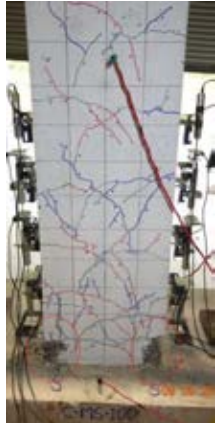





### 5.1.3 เสาทดสอบ C-MS-100

ตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100 มีลักษณะการแตกร้าวส่วนใหญ่จากแรงดัด โดยรอยแตกร้าวจากแรงดัดเกิดที่ระดับความสูงถึง 120 ซม. โดยความเสียหายจะเกิดขึ้นที่โคนเสาและเมื่อเสามีการเคลื่อนตัวที่ระยะใกล้เคียงผลให้คอนกรีตเกิดการกะเทาะออกมีความลึกจนเห็นเหล็กเสริมที่ตามยาวเป็นเหตุให้เสาสูญเสียกำลังรับแรงดัดและเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะซึ่งเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเสียรูปตามการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวทำให้บริเวณของข้อต่อและเกิดการวิบัติในที่สุด ซึ่งพฤติกรรมที่อัตราการเคลื่อนตัวต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

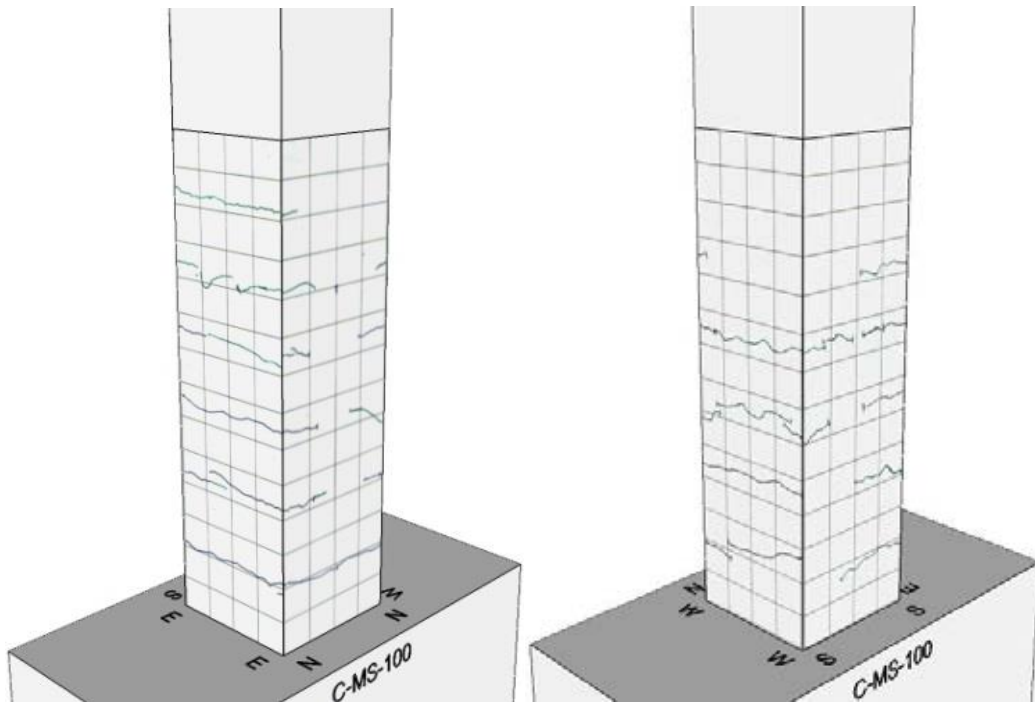
- เมื่อเริ่มให้แรงกระทำทางด้านข้างไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 0.25% ยังไม่พบความเสียหายใดๆ
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 0.5% เริ่มมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่เสาทดสอบด้านทิศใต้และทิศตะวันตกที่ระดับความสูง 20, 40 ซม. และเริ่มมีรอยแตกร้าวลักษณะเดียวกันในด้านทิศเหนือและทิศตะวันออกระดับความสูง 20 ซม.
- เมื่อให้แรงไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 0.75% รอยแตกร้าวเริ่มมีความยาวมากขึ้นโดยมีความยาวตลอดทั้งหน้าเสาในด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก และเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นในทิศตะวันออกและทิศตะวันตกที่ระดับความสูง 70, 80, 90, 100, 110, 120 ซม. ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ใกล้เคียงกับเหล็กเสริมทางขวาง และมีลักษณะของรอยร้าวที่ยาวขึ้นตลอดทั้งหน้าเสาในด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวมีค่าเท่ากับ 1%
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 1.5% เริ่มมีรอยแตกร้าวที่รอยต่อของโคนเสาและฐานรากรวมถึงเกิดการกะเทาะของคอนกรีตที่มุมเสาด้านทิศเหนือกับทิศตะวันออก
- จากนั้นระหว่างการให้แรงไปยังตำแหน่ง 2% คอนกรีตที่มุมเสาด้านทิศใต้และทิศตะวันตกเริ่มหลุดร่อน (spalling) ที่ตำแหน่งจากฐานสูงขึ้นมา 10 ซม. และเริ่มมีรอยแตกร้าวลักษณะเอียง 45° ที่ระดับความสูง 20, 40, 60, 80, 100 ซม. ในด้านทิศใต้
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 2.5% มีการกะเทาะของคอนกรีตที่มุมเสาด้านทิศเหนือกับทิศตะวันออกเพิ่มขึ้นถึงระดับความสูง 5 ซม. และเริ่มมีรอยแตกร้าวลักษณะเอียง 45° ที่ระดับความสูง 10, 50, 60, 80 ซม. ในด้านทิศเหนือ และรอยแตกร้าวก่อนหน้านี้เริ่มขยายใหญ่ขึ้น

- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 3% คอนกรีตที่มุ่มเสากะเทาะออกมามากขึ้นในด้านทิศเหนือกับทิศตะวันออกและรอยแตกร้าวก่อนหน้านี้นี้เริ่มขยายใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการเคลื่อนตัวมีค่าเท่ากับ 3.5%
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 4% คอนกรีตที่มุ่มเสาริมกะเทาะเพิ่มขึ้นในด้านทิศเหนือกับทิศตะวันตก โดยมุ่มเสาด้านทิศเหนือกับทิศตะวันออกคอนกรีตเริ่มหลุดออกมา
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 4.5% คอนกรีตที่มุ่มเสาเหนือกับทิศตะวันตกเริ่มหลุดออกมา และที่โคนเสาในด้านทิศตะวันออกมีการหลุดของคอนกรีตออกมาเช่นเดียวกัน
- เมื่ออัตราการเคลื่อนตัว 5% คอนกรีตฝั่งทิศตะวันออกบริเวณโคนเสากะเทาะออกมาในลักษณะเป็นแผ่นตลอดทั้งหน้าเสาถึงระดับความสูง 20 ซม.
- เมื่ออัตราการเคลื่อนตัว 5.5% คอนกรีตฝั่งทิศตะวันตกบริเวณโคนเสากะเทาะออกมาในลักษณะเป็นแผ่นตลอดทั้งหน้าเสาถึงระดับความสูง 10 ซม.
- จากนั้นทำการให้แรงไปยังอัตราการเคลื่อนตัว 6% มีรอยร้าวลักษณะเอียง  $45^\circ$  ยาวขึ้นอย่างชัดเจนในด้านทิศเหนือและทิศใต้ และคอนกรีตด้านทิศตะวันออกหลุดออกมากขึ้นจนเหล็กเหล็กเสริมภายใน
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 6.5% เมื่อเสาด้านทิศตะวันออกรับแรงอัดโดยไม่มีคอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัดส่งผลให้เห็นการโก่งเดาะของเหล็กเสริมอย่างชัดเจน โดยช่วงการโก่งเดาะเกิดขึ้นตั้งแต่โคนเสาสูงขึ้นไปถึงระดับความสูง 20 ซม. ซึ่งเหล็กปลอกมีลักษณะถูกดันออกจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว และรอยร้าวลักษณะเอียง  $45^\circ$  กว้างขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากเสาสูญเสียความสามารถรับแรงอัด
- ที่อัตราการเคลื่อนตัว 7% เมื่อเสารับแรงซ้ำไปซ้ำมาโดยที่เหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงอัดแทนคอนกรีตทำให้เห็นเหล็กเสริมมีการโก่งเดาะ 2 รูปแบบคือ เหล็กเสริมที่อยู่บริเวณริมเสาจะมีการโก่งเดาะ 2 ช่วง จากโคนเสาถึงเหล็กปลอกระดับแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกล และช่วงเหล็กปลอกระดับที่สองและสามจะเห็นการโก่งเดาะของเหล็กเสริมซึ่งมีการโก่งเดาะที่มากกว่าช่วงแรก สำหรับการโก่งเดาะแบบที่ 2 เกิดที่เหล็กเสริมที่อยู่ระหว่างเหล็กเสริมที่มุ่มเสา โดยลักษณะจะมีการโก่งเดาะช่วงเดียวตั้งแต่โคนเสาจนถึงเหล็กปลอกช่วงที่สาม จึงทำให้เหล็กปลอกช่วงที่สองเสียรูปตามการโก่งของเหล็กเสริมตามยาว จากนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกนลดลงและเมื่อทำการเพิ่มแรงตามแนวแกนให้คงที่พบว่าเหล็กปลอกบริเวณที่มีการงอ  $135^\circ$  มีการอ้าออกอย่างกะทันหันส่งผลให้เสาเกิดการวิบัติ

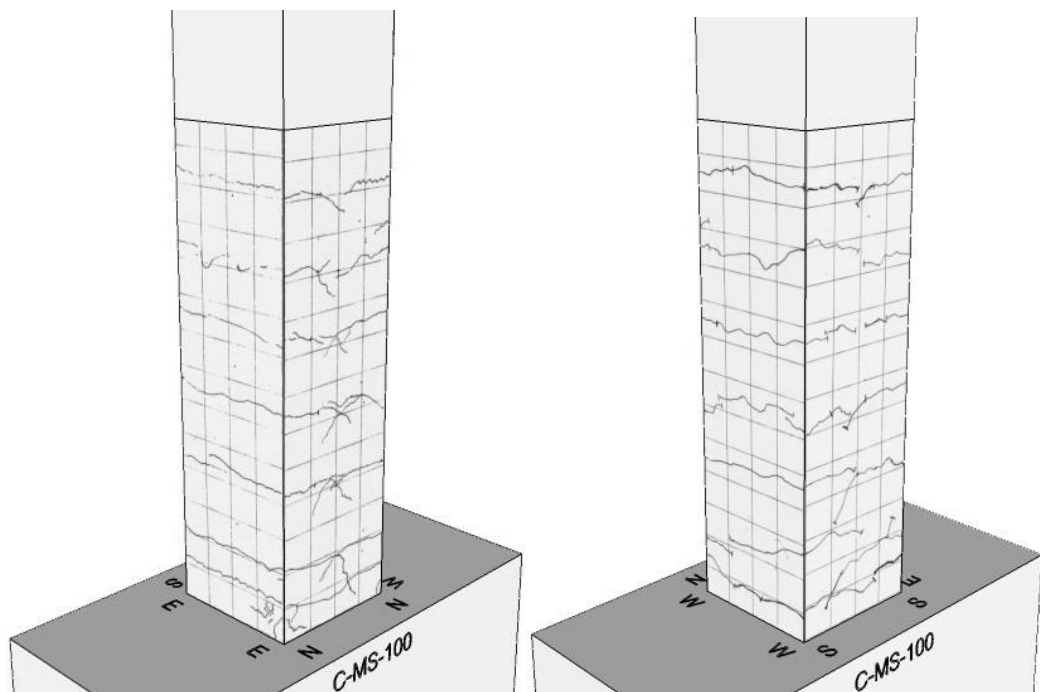
ตารางที่ 5.2 ลักษณะความเสียหายระหว่างการทดสอบและการวิบัติหลังการทดสอบของตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100

(% Drift)	2%	4%	5%	6%	6.5%	7%
<p>รูปภาพ ความ เสียหาย</p>						
<p>ลักษณะ ความ เสียหาย</p>	<p>คอนกรีตที่มุมเสา (<math>S_w</math>) เริ่มหลุดร่อนที่จากฐานสูงขึ้นมา 10 ซม. และ (S) เริ่มมีรอยแตกเอนเฉียง <math>45^\circ</math> ที่ระดับ 20, 40, 60, 80, 100 ซม.</p>	<p>คอนกรีตที่มุมเสาเริ่มกะเทาะเพิ่มขึ้นในด้านทิศเหนือกับทิศตะวันตก โดยมีมุมเสาด้านทิศเหนือกับทิศตะวันออกคอนกรีตเริ่มหลุดออกมา</p>	<p>คอนกรีต (E) บริเวณโคนเสากะเทาะออกมาในลักษณะเป็นแผ่นตลอดทั้งหน้าเสาถึงระดับความสูง 20 ซม.</p>	<p>มีรอยร้าวลักษณะเอียง <math>45^\circ</math> ยาวขึ้นอย่างชัดเจน (N), (S) และคอนกรีต (E) หลุดออกมากขึ้นจนเหล็กเหล็กเสริมภายใน</p>	<p>เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมอย่างชัดเจน โดยเกิดตั้งแต่โคนเสาถึงระดับ 20 ซม. ซึ่งเหล็กปลอกถูกดันออกจากการโก่งเดาะ และรอยร้าวเอียง <math>45^\circ</math> กว้างขึ้นเนื่องจากเสาสูญเสียความสามารถรับแรงดัด</p>	<p>เหล็กเสริมริมเสาจะโก่งเดาะ 2 ช่วงจากโคนเสาถึงเหล็กปลอกระดับแรก และช่วงเหล็กปลอกระดับที่สองถึงสาม สำหรับเหล็กเสริมระหว่างเหล็กเสริมมุม เสา จะการโก่งเดาะช่วงเดียวตั้งแต่โคนเสาจนถึงเหล็กปลอกช่วงที่สาม จึงทำให้เหล็กปลอกช่วงที่สองเสียรูปจนงอขอ <math>135^\circ</math> อ้าออกส่งผลให้เสาวิบัติ</p>

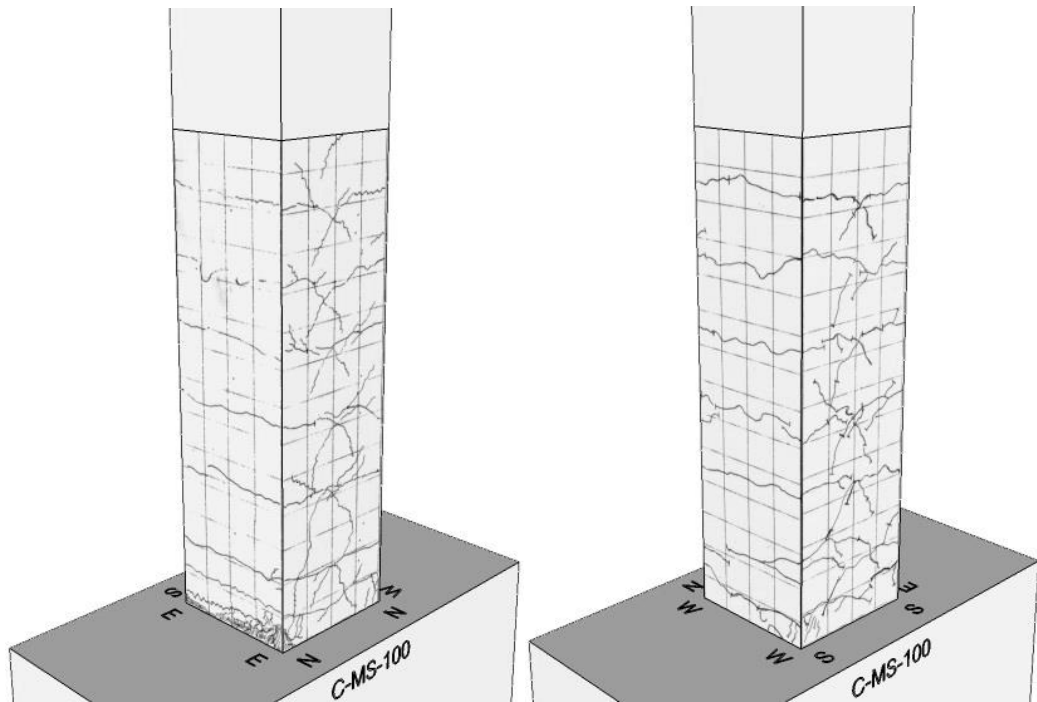




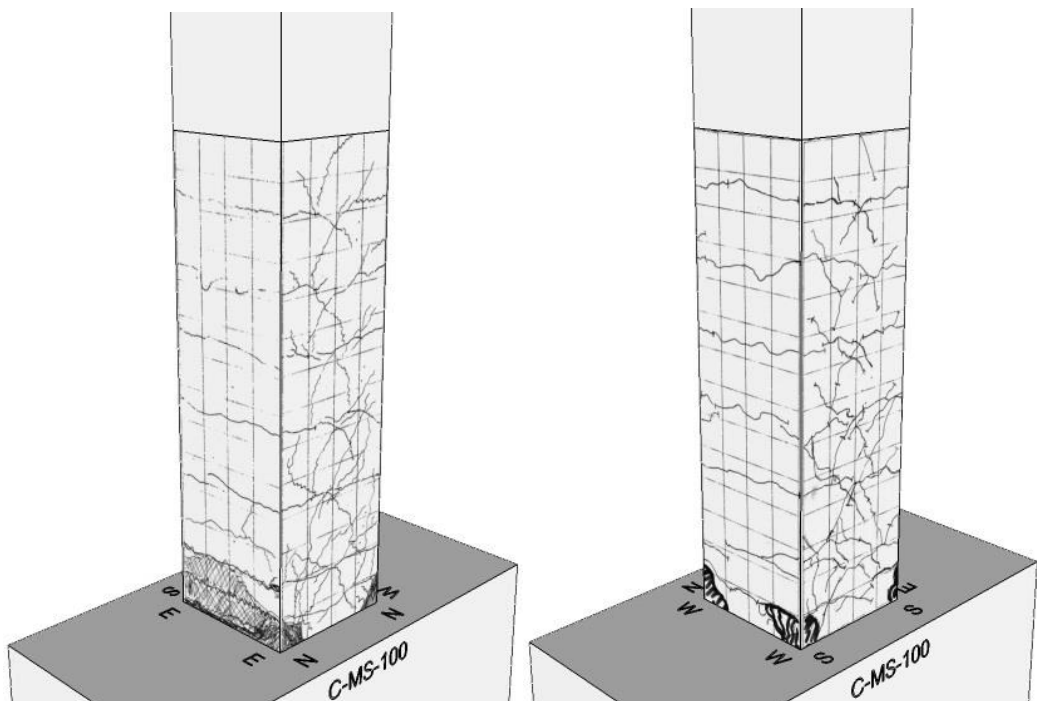
รูปที่ 5.5 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  ถึง  $\pm 0.75\%$   
ของตัวอย่างเสา C-MS-100



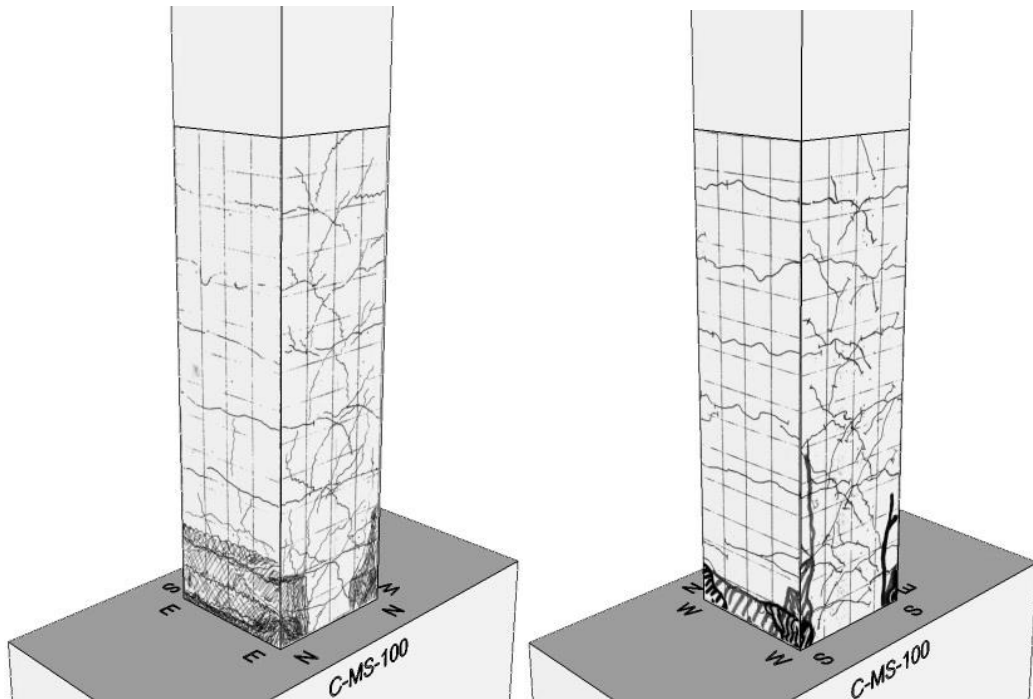
รูปที่ 5.6 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1\%$  ถึง  $\pm 2\%$   
ของตัวอย่างเสา C-MS-100



รูปที่ 5.7 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 2.5\%$  ถึง  $\pm 3.5\%$   
ของตัวอย่างเสา C-MS-100



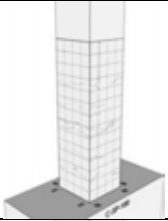
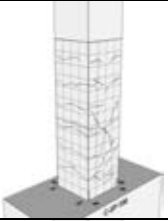
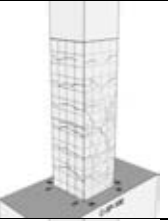
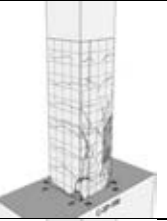
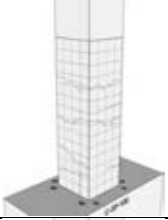
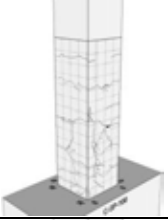
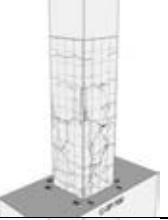
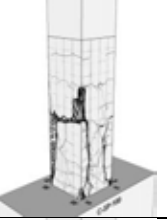

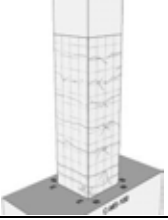
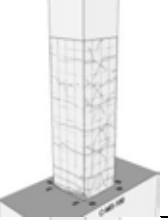
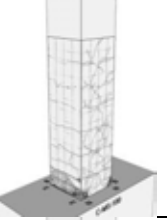
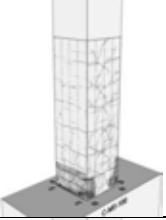
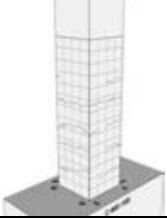
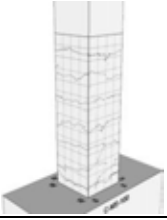
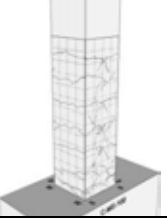
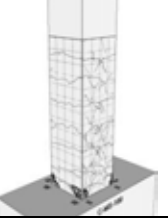
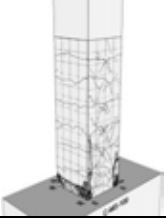
รูปที่ 5.8 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 4\%$  ถึง  $\pm 5\%$   
ของตัวอย่างเสา C-MS-100



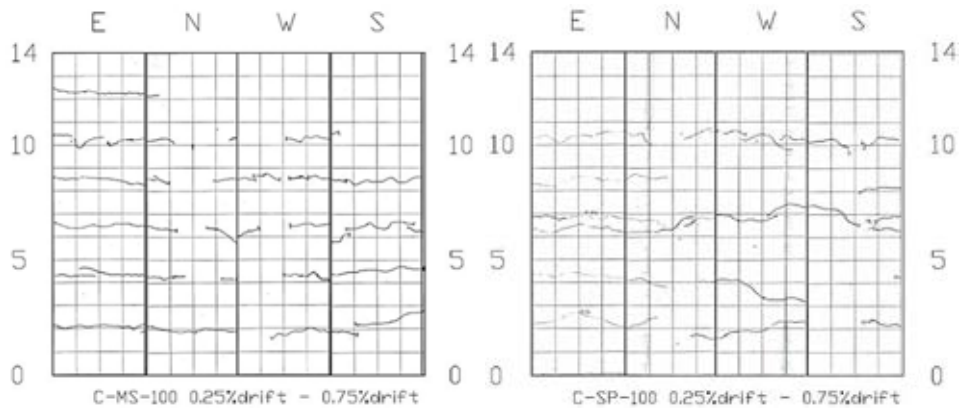
รูปที่ 5.9 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 5.5\%$  ถึง  $\pm 6\%$   
ของตัวอย่างเสา C-MS-100



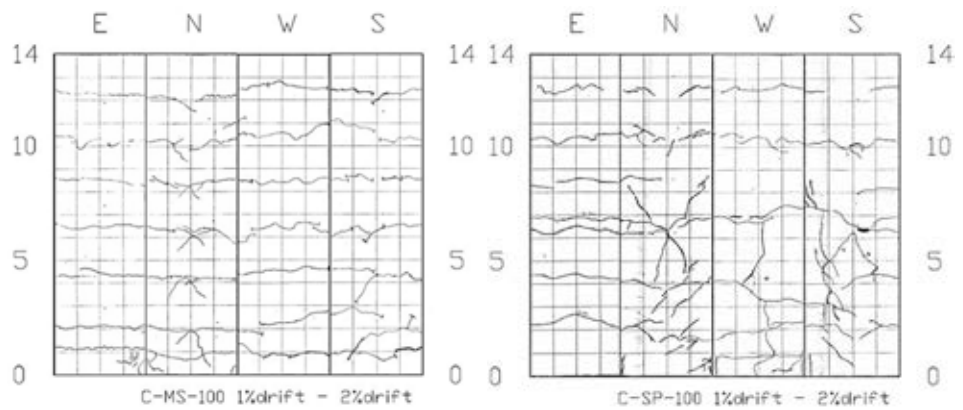
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 และ C-MS-100

Specimen/%Drift	$\pm 0.25\%$ ถึง $\pm 0.75\%$	$\pm 1\%$ ถึง $\pm 2\%$	$\pm 2.5\%$ ถึง $\pm 3.5\%$	$\pm 4\%$ ถึง $\pm 5\%$	$\pm 5.5\%$ ถึง $\pm 6.5\%$
C-SP-100					Column Fail
					Column Fail
C-MS-100					
					

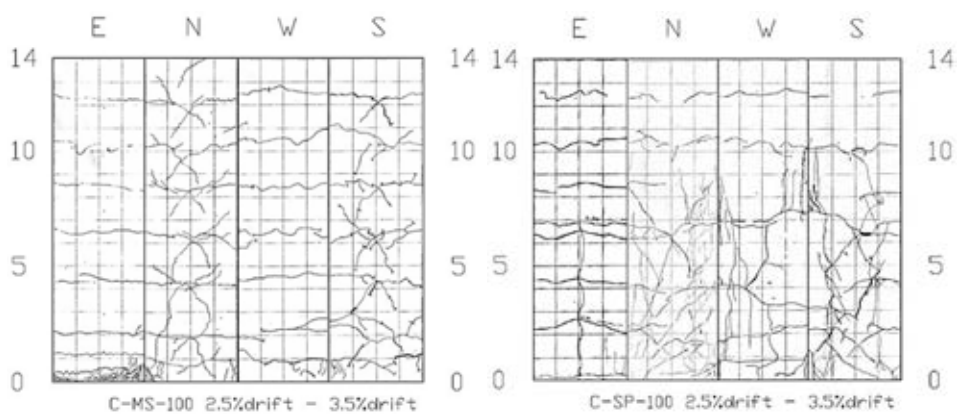




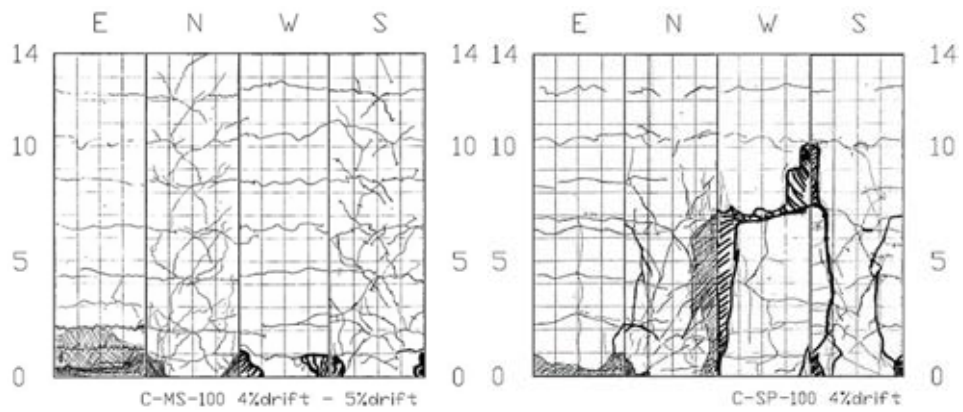
รูปที่ 5.10 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  ถึง  $\pm 0.75\%$  ของตัวอย่างเสา C-SP-100 (ซ้าย) และ C-MS-100 (ขวา)



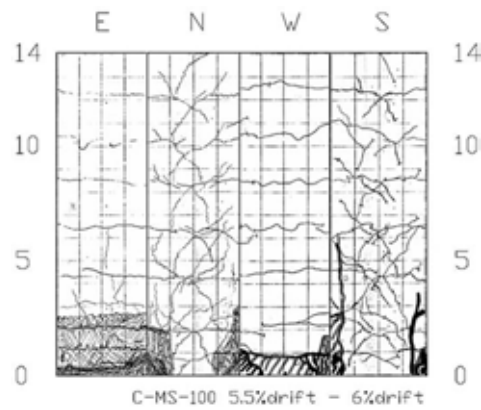
รูปที่ 5.11 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1\%$  ถึง  $\pm 2\%$  ของตัวอย่างเสา C-SP-100 (ซ้าย) และ C-MS-100 (ขวา)



รูปที่ 5.12 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 2.5\%$  ถึง  $\pm 3.5\%$  ของตัวอย่างเสา C-SP-100 (ซ้าย) และ C-MS-100 (ขวา)



รูปที่ 5.13 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 4\%$  ถึง  $\pm 5\%$  ของตัวอย่างเสา C-SP-100 (ซ้าย) และ C-MS-100 (ขวา)

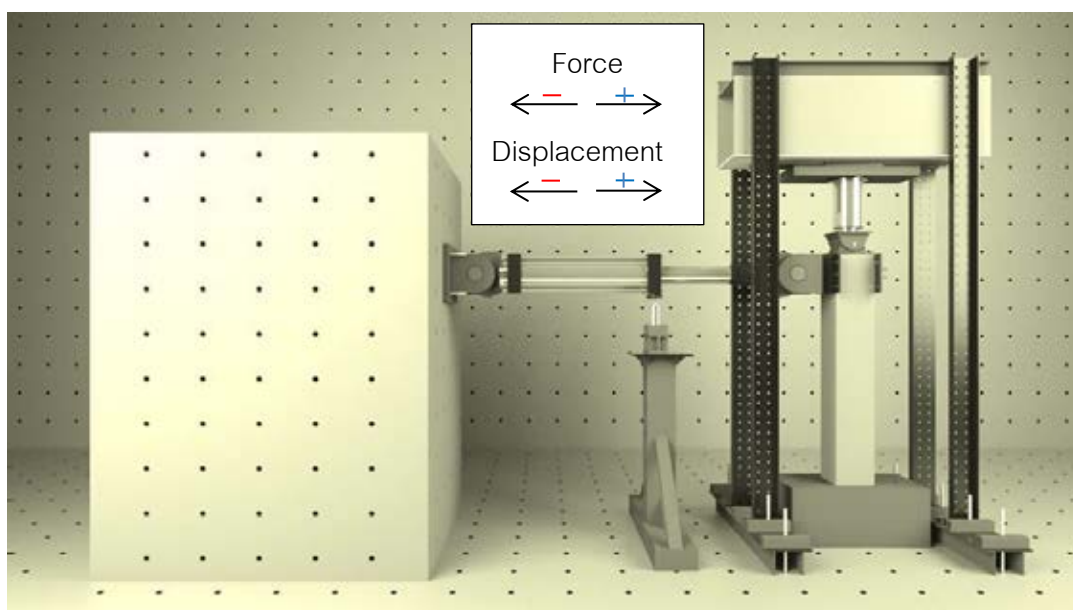


รูปที่ 5.14 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 5.5\%$  ถึง  $\pm 6\%$  ของตัวอย่างเสา C-MS-100

### 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

จากการทดสอบตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 2 ต้นนั้น ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง โดยการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้นั้น ได้ทำการปรับแก้ค่าผลเนื่องจากเลื่อนไถลของฐานรากและการหมุนของฐานราก รวมถึงการเลื่อนไถลของผนังรับแรงตามหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของตัวอย่างเสาทดสอบที่อัตราส่วนการเคลื่อนที่ตัวต่างๆ โดยได้แยกให้เห็นโดยละเอียดด้วยการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเป็นช่วงของอัตราส่วนการเคลื่อนที่ตัว 0.25% - 1% , 1.5% - 3% , 3.5% - 5% และ 5.5% - 6% สำหรับตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 และ 5.5% - 7% สำหรับตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100 และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างตลอดการทดสอบสามารถหาเส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาค่าความเหนียว ค่าการสลายพลังงาน และค่าความโค้ง ของตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 2 ต้น

โดยแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างนั้นถูกกำหนดด้วยหลักการดังนี้ เมื่อแรงทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเคลื่อนตัวไปยังด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องให้แรงทางด้านข้าง ซึ่งจะเกิดแรงอัดในเครื่องให้แรง จะแสดงผลของแรงและการเคลื่อนที่ตัวเป็นเครื่องหมาย + และเมื่อแรงทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเคลื่อนตัวไปยังด้านเดียวกับเครื่องให้แรงทางด้านข้าง ซึ่งจะเกิดแรงดึงในเครื่องให้แรง จะแสดงผลของแรงและการเคลื่อนที่ตัวเป็นเครื่องหมาย -



รูปที่ 5.15 เครื่องหมายแสดงค่าของการให้แรงและการเคลื่อนที่ของเครื่องให้แรง

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างนั้นจะอ้างอิงจากค่าอัตราการเคลื่อนตัวซึ่งนิยามว่า

$$\text{อัตราการเคลื่อนตัว} = \frac{\delta}{L} \times 100 \quad (5.1)$$

โดยที่  $\delta$  คือระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่หัวเสา  
 $L$  คือระยะความสูงของเสา (ในงานวิจัยนี้มีค่า 2200 มม.)

และค่าความเหนียวนิยามโดย

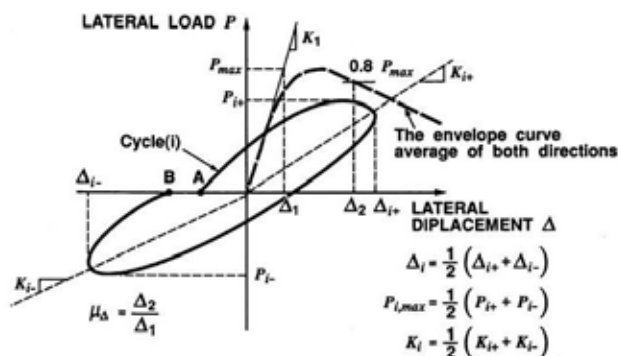
$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (5.2)$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าความเหนียว  
 $\delta_u$  คือระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่หัวเสาเมื่อแรงกระทำทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% ของแรงกระทำสูงสุด

$\delta_y$  คือระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่หัวเสา ณ จุดคราก

โดยค่าความเหนียว  $\mu$  สามารถหาค่า  $\delta_y$  ได้หลายวิธีที่ต่างกันได้แก่

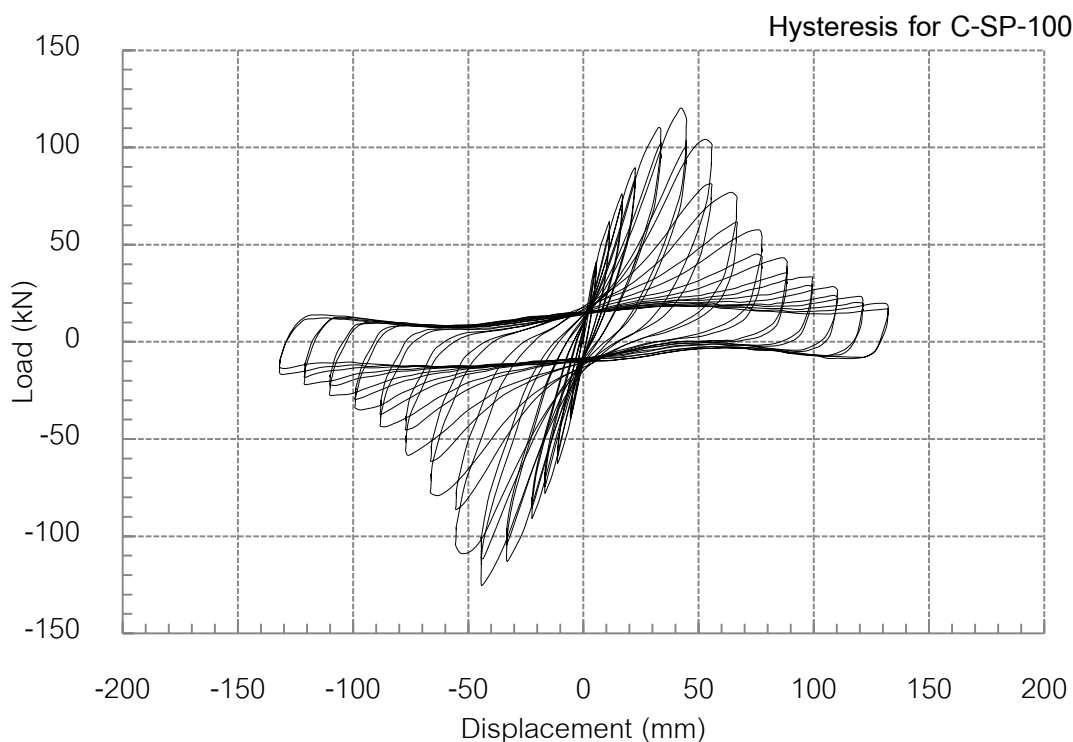
- การหาระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ณ จุดครากจากจุดที่เหล็กยื่นรับแรงดึงเส้นแรกเริ่มคราก (1<sup>st</sup> steel yielding) โดย Xiao and Yun (2002)
- การหาระยะการเคลื่อนที่ที่จุดคราก โดยการหาจากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นมาตัดผ่านจุดที่แรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 75 % ของแรงกระทำสูงสุด (75% secant approach) จนไปถึงเส้นตรงที่ขนานกับแกนนอนที่ลากจากจุดที่แรงกระทำทางด้านข้างมีค่ามากที่สุด จากนั้นลากเส้นขนานกับแกนตั้งไปตัดกับแกนการเคลื่อนที่ด้านข้าง วิธีนี้แนะนำโดย Priestly (1992)



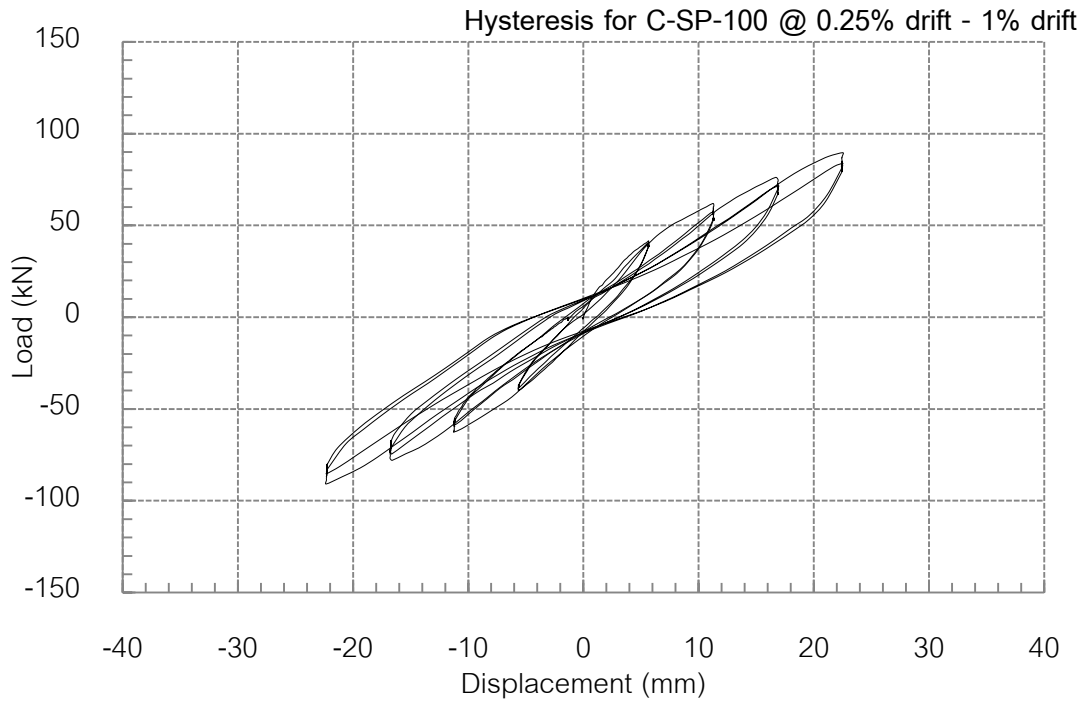
รูปที่ 5.16 วิธีการหาค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวโดย Sheikh และ Khoury (1993)

### 5.3.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100

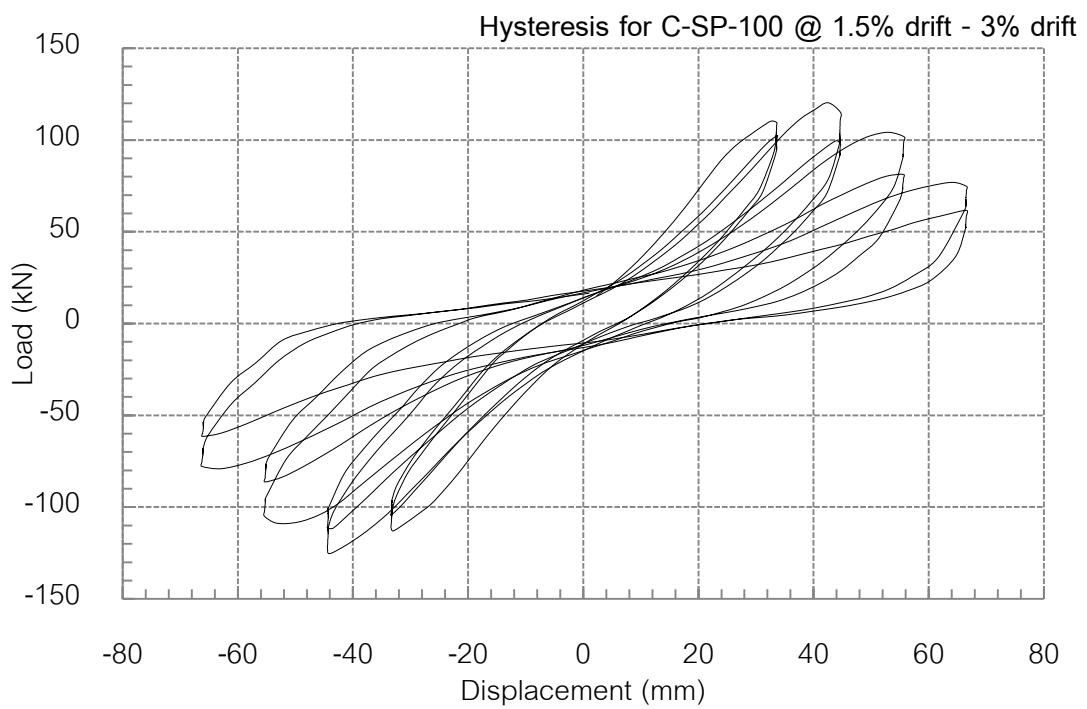
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่าง C-SP-100 นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 โดยแยกให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเป็นช่วงของอัตราส่วนการเคลื่อนที่ 0.25% - 1% , 1.5% - 3% , 3.5% - 5% และ 5.5% - 6% ซึ่งจะพบพฤติกรรมกรรมการรับแรงมีลักษณะที่มีเสถียรภาพ (stable hysteresis loop) จนสิ้นสุดการทดสอบ โดยค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 122.21 กิโลนิวตัน ที่การเคลื่อนที่ตัวทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 43.56 มิลลิเมตร (2% drift) และเมื่อให้แรงทางด้านข้างจนเสาเคลื่อนที่ตัวทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 57.85 มิลลิเมตร (2.6% drift) พบว่าความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% จากความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างสูงสุด และพบว่าเมื่อให้การเคลื่อนที่ทางด้านข้างไปที่ 111.68 กิโลนิวตัน โดยมีระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง 32.98 มิลลิเมตร (1.5% drift) พบว่าเหล็กเสริม #22 ซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่ฝังลงไปในส่วนรากตรงตำแหน่งที่โคนเสาระดับเหนือฐานราก 10 ซม. เกิดการครากเป็นเส้นแรก และเมื่อให้แรงทางด้านข้างจนเสาเคลื่อนที่มากจนจบการทดสอบพบว่าความสามารถในการเคลื่อนที่มากที่สุดเท่ากับ 132.29 มิลลิเมตร (6% drift) และความสามารถรับแรงทางด้านข้างเท่ากับ 18.88 กิโลนิวตัน คิดเป็น 15.4% ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุด



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา C-SP-100

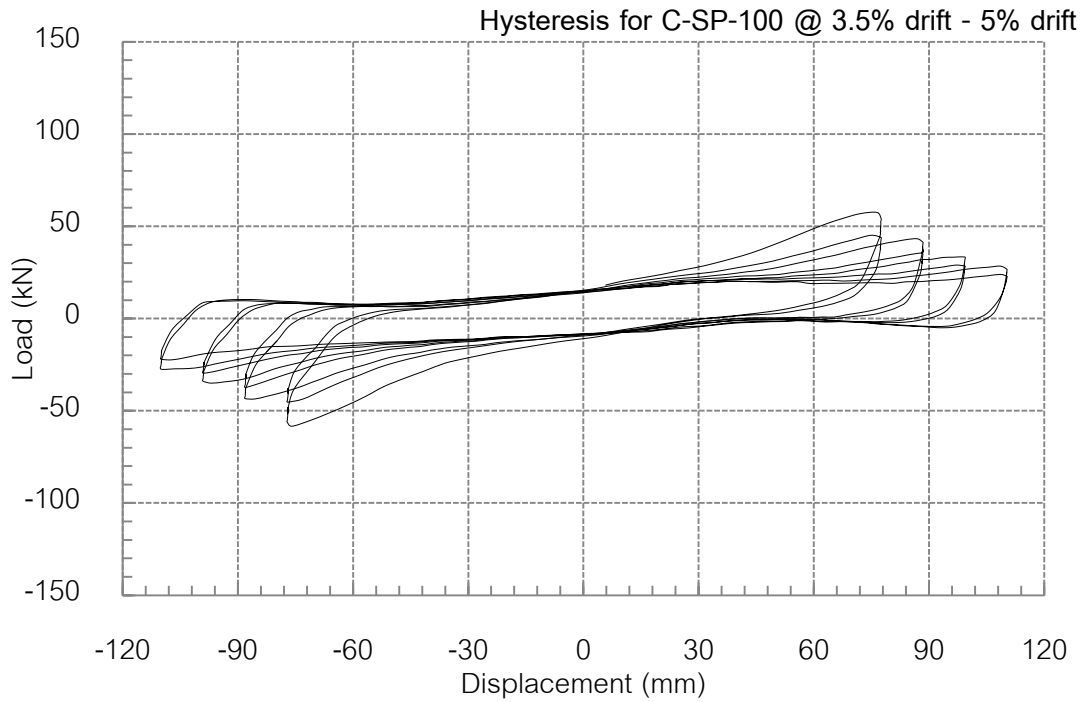


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  drift ถึง  $\pm 1\%$  drift

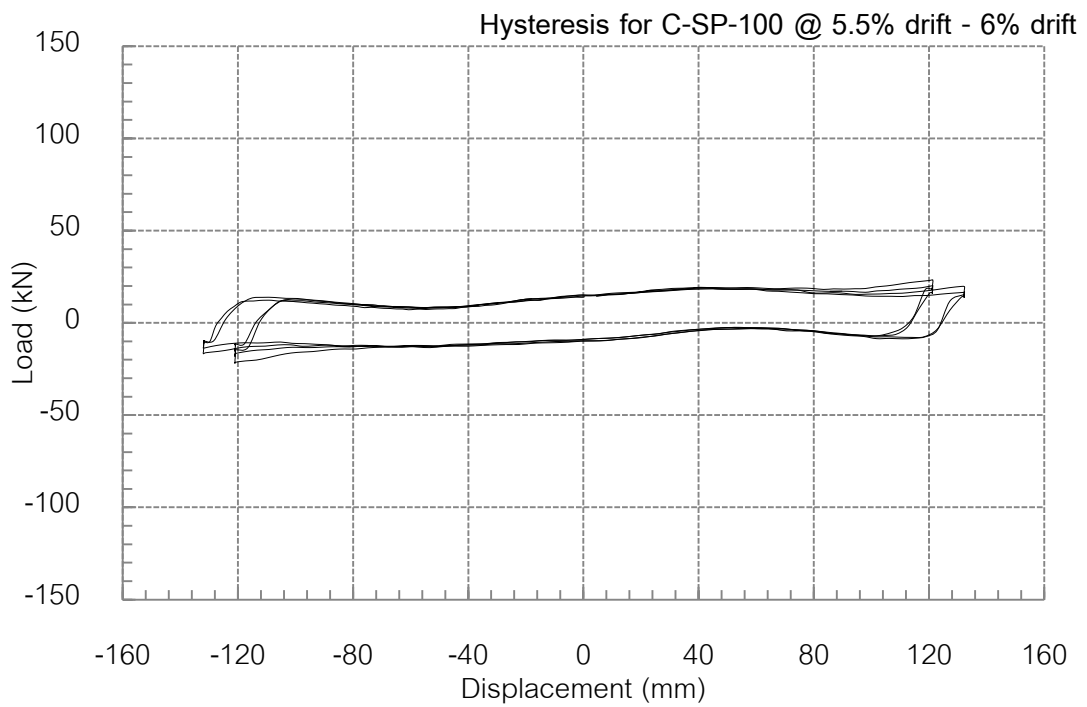


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1.5\%$  drift ถึง  $\pm 3\%$  drift

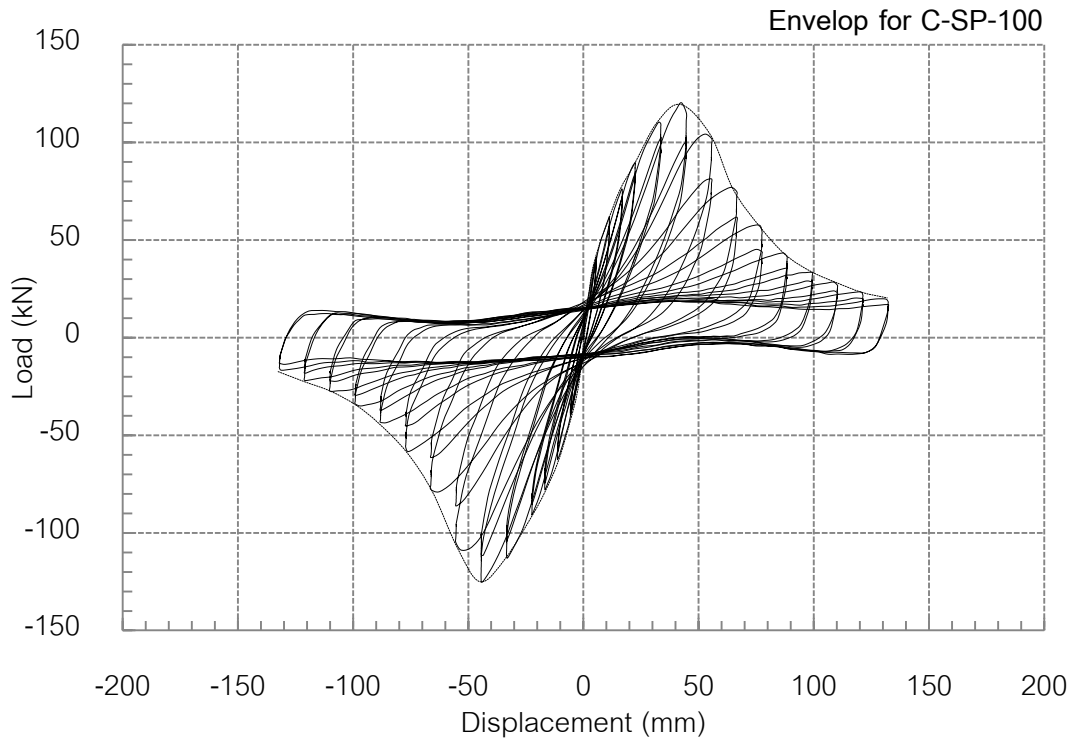




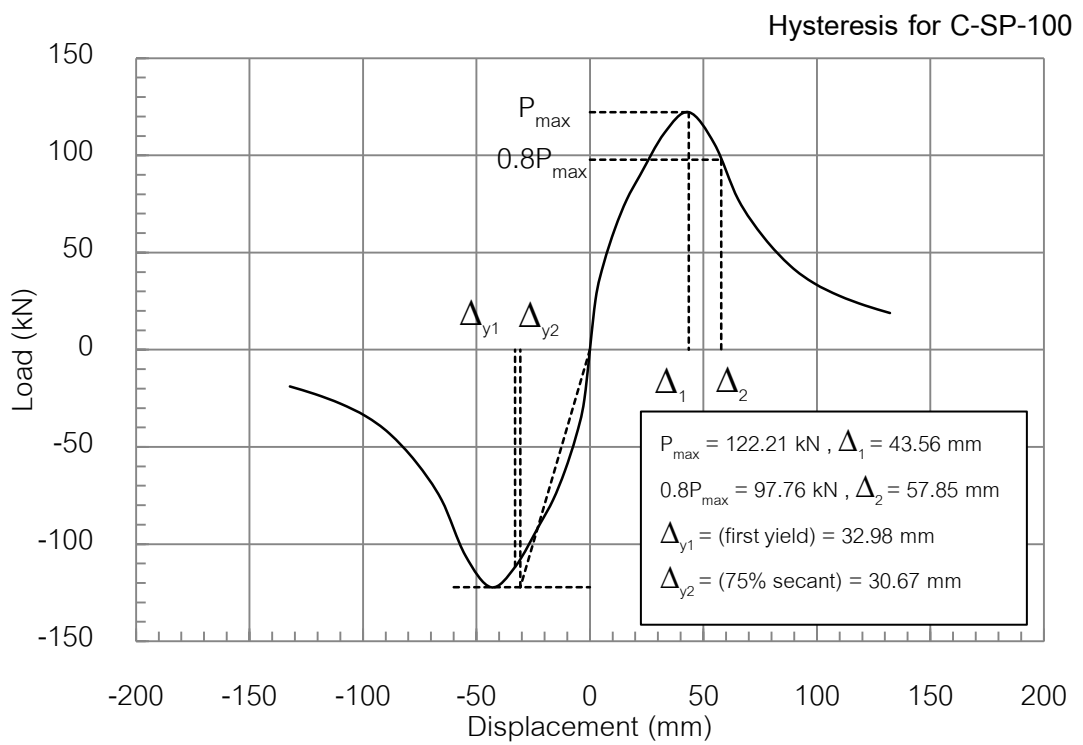
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 3.5\%$  drift ถึง  $\pm 5\%$  drift



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 5.5\%$  drift ถึง  $\pm 6\%$  drift



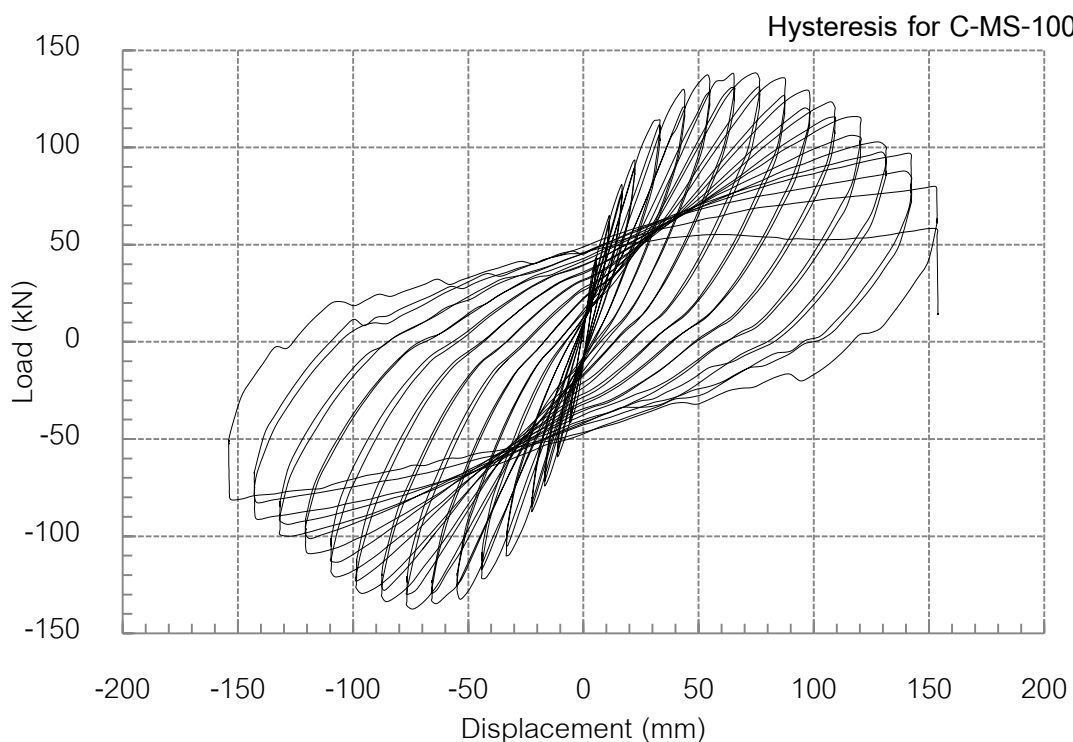
รูปที่ 5.22 เส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) ตัวอย่างเสา C-SP-100



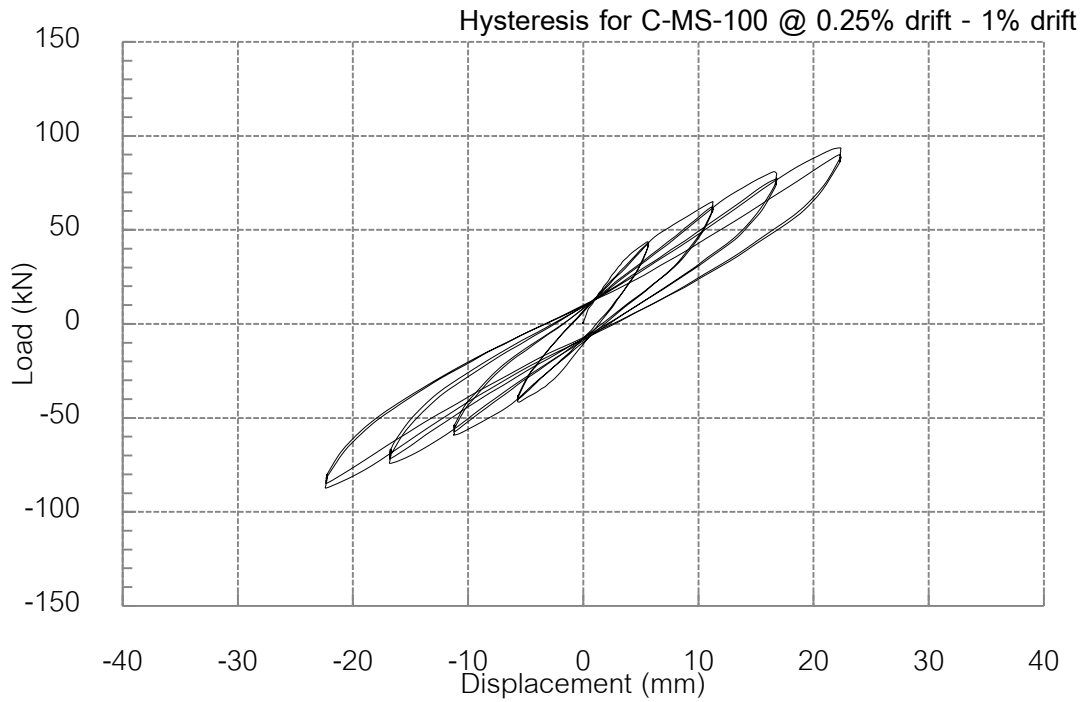
รูปที่ 5.23 การหาค่าระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณค่าความเหนียว

### 5.3.2 ตัวอย่างเสาทดสอบ C-MS-100

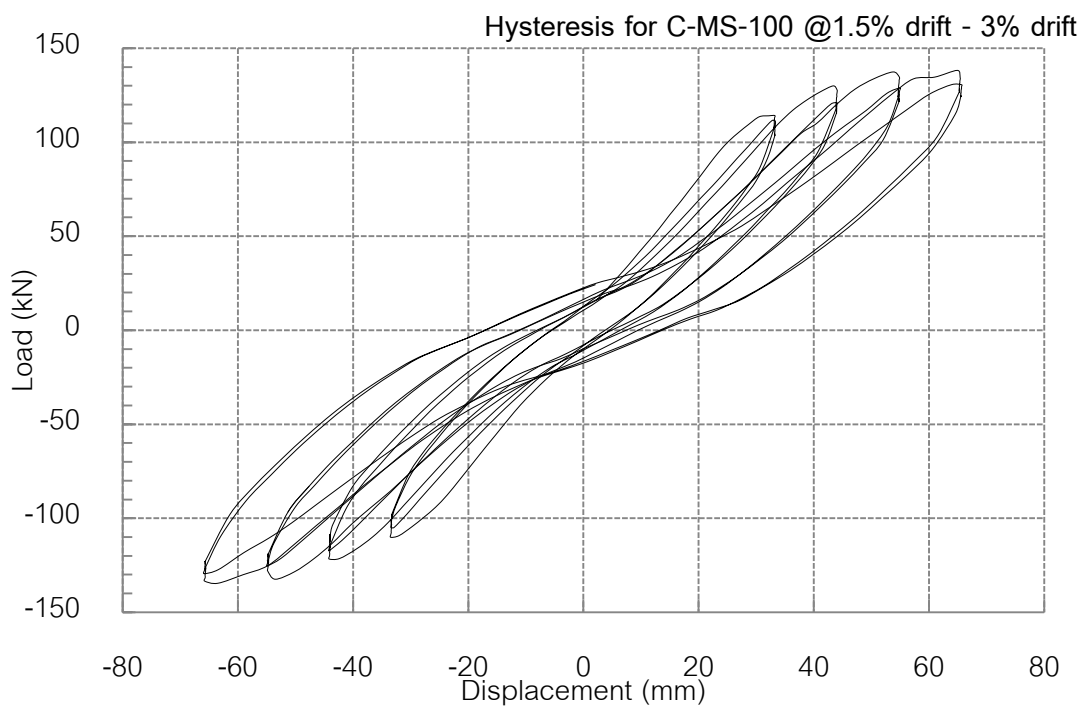
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่าง C-MS-100 นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.24 โดยแยกให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเป็นช่วงของอัตราส่วนการเคลื่อนที่ 0.25% - 1% , 1.5% - 3% , 3.5% - 5% และ 5.5% - 7% ซึ่งจะพบพฤติกรรมกรรมการรับแรงมีลักษณะที่มีเสถียรภาพ (stable hysteresis loop) จนสิ้นสุดการทดสอบ โดยค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 137.67 กิโลนิวตัน ที่การเคลื่อนที่ทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 75.15 มิลลิเมตร (3.4% drift) และเมื่อให้แรงทางด้านข้างจนเสาเคลื่อนที่ทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 118.94 มิลลิเมตร (5.4% drift) พบว่าความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% จากความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างสูงสุด และพบว่าเมื่อให้การเคลื่อนที่ทางด้านข้างไปที่ 95.04 กิโลนิวตัน โดยมีระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง 24.43 มิลลิเมตร (1.1% drift) พบว่าเหล็กเสริม #23 และ #24 ซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่ฝังลงไปในฐานะรากตรงตำแหน่งที่โคนเสาระดับเหนือฐานราก 10 ซม. เกิดการครากพร้อมกันทั้ง 2 เส้น ละเมื่อให้แรงทางด้านข้างจนเสาเคลื่อนที่มากจนจบการทดสอบพบว่าความสามารถในการเคลื่อนที่มากที่สุดเท่ากับ 153.07 มิลลิเมตร (7% drift) และความสามารถรับแรงทางด้านข้างเท่ากับ 80.14 กิโลนิวตัน คิดเป็น 58.21% ของแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด



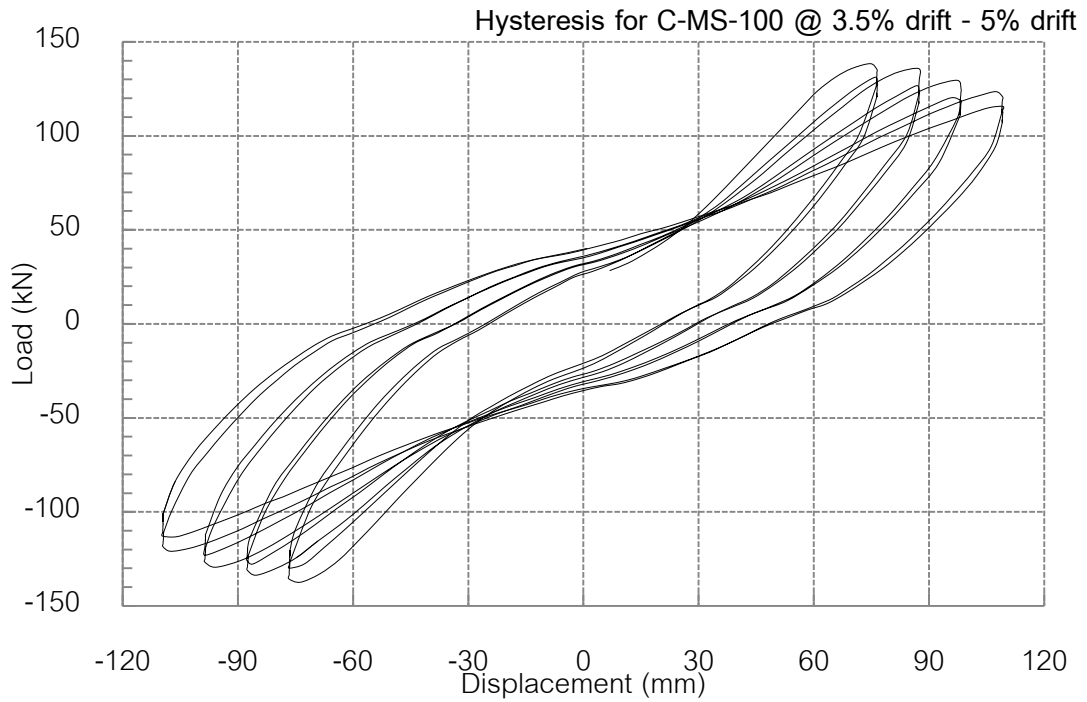
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่าง C-MS-100



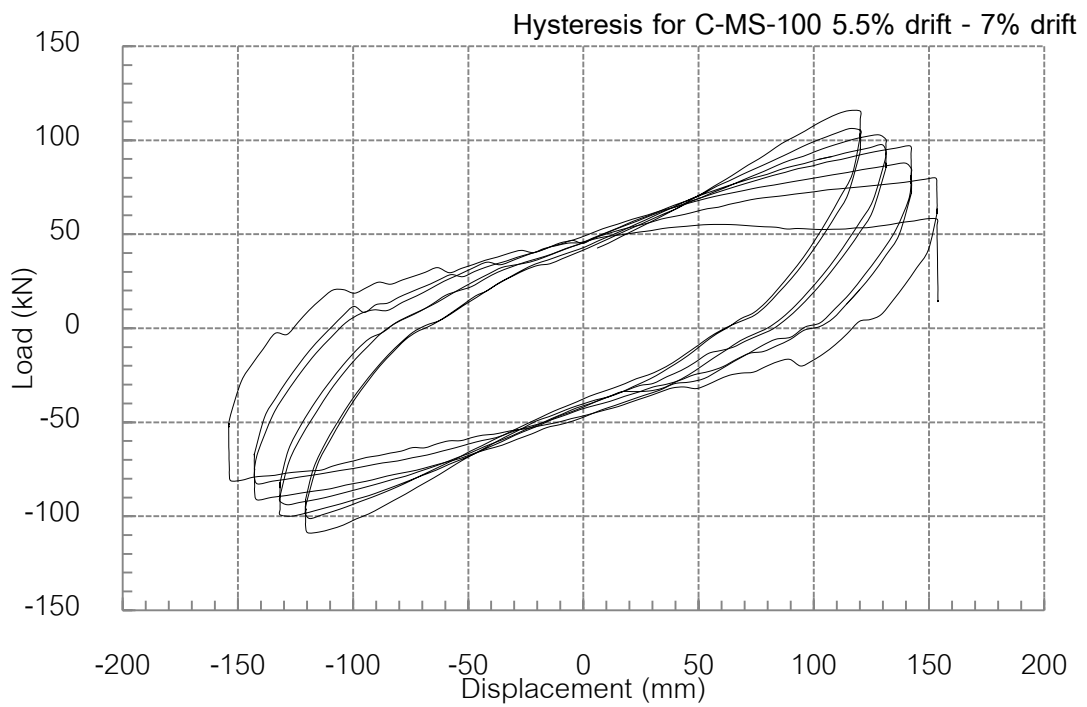
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 0.25\%$  drift ถึง  $\pm 1\%$  drift



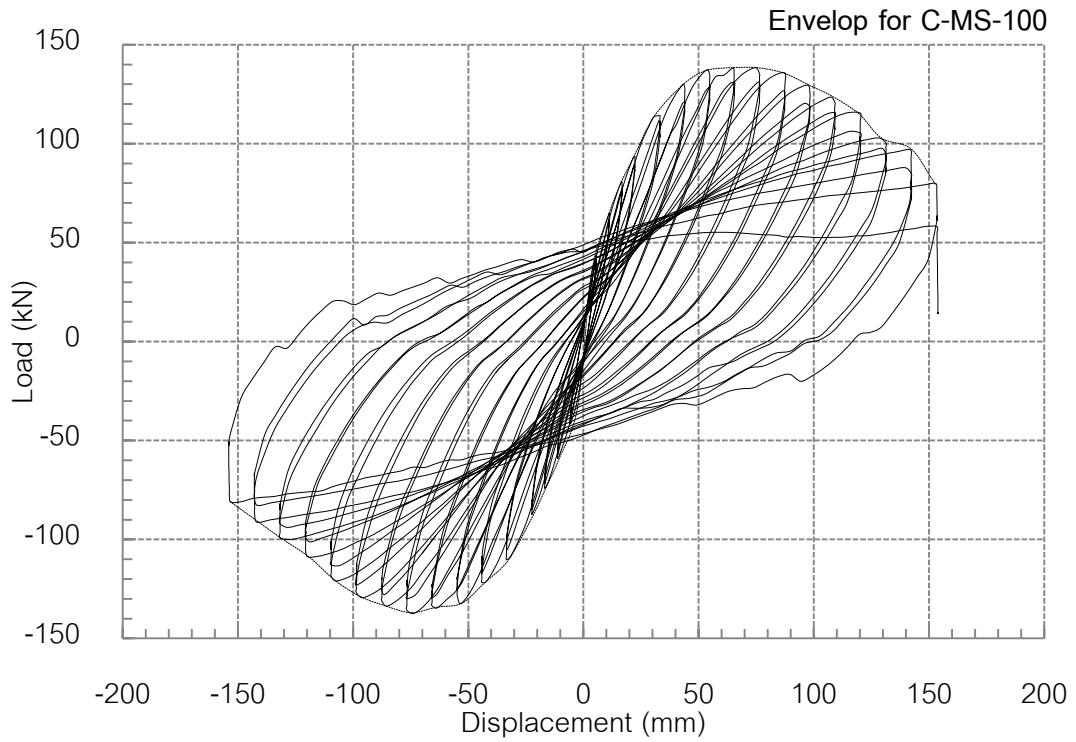
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 1.5\%$  drift ถึง  $\pm 3\%$  drift



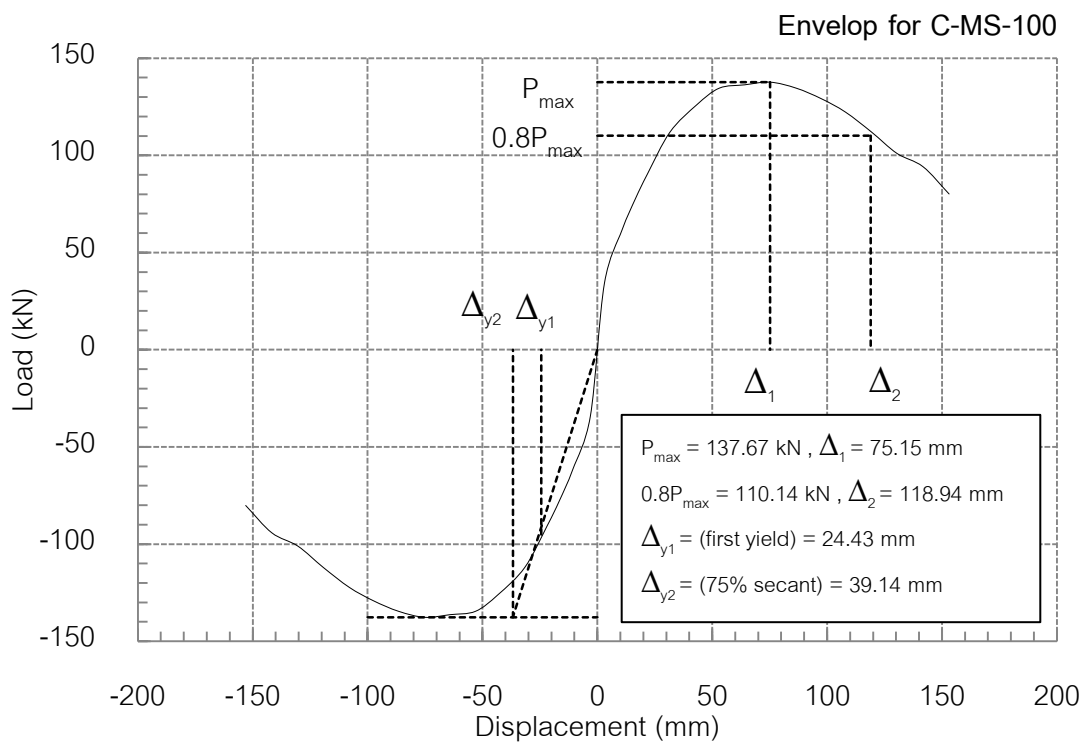
รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 3.5\%$  drift ถึง  $\pm 5\%$  drift



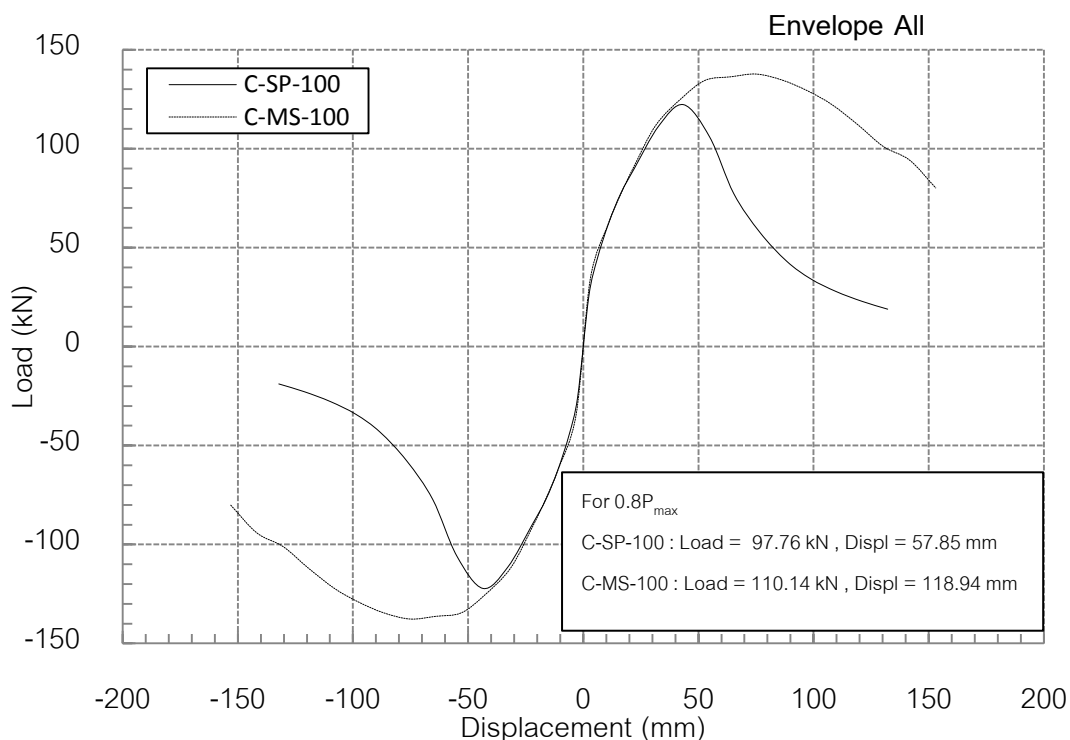
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง  
ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัว  $\pm 5.5\%$  drift ถึง  $\pm 7\%$  drift



รูปที่ 5.29 เส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) ตัวอย่างเสา C-MS-100



รูปที่ 5.30 การหาค่าระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณค่าความเหนียว



รูปที่ 5.31 เส้นโค้งขอบนอก (envelop) ของตัวอย่างเสาทดสอบ C-SP-100 และ C-MS-100

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างเสา

Specimen	$P_{max}$ (kN)	Disp@ $P_{max}$ (mm)	0.8 $P_{max}$ (ton)	Displ@0.8 $P_{max}$ (mm)	Drift@0.8 $P_{max}$ (%)
C-SP-100	122.21	43.56	97.76	57.85	2.6
C-MS-100	137.76	75.15	110.14	118.94	5.4

Specimen	Displ (mm)	Ductility	Displ (mm)	Ductility
	1 <sup>st</sup> steel yielding	1 <sup>st</sup> steel yielding	75% secant	75% secant
C-SP-100	32.98	1.75	30.67	1.88
C-MS-100	24.43	4.86	39.14	3.03

จากรูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งขอบนอก (envelop) ของตัวอย่างทดสอบ ทั้ง 2 ตัวอย่าง ซึ่งจะพบว่าในช่วงอัตราเคลื่อนที่ 2% ของเส้นโค้งขอบนอกตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยในช่วงการลดลงของกำลัง (strength degradation) พบว่าตัวอย่าง C-SP-100 มีการลดลงของแรงกระทำด้านข้างอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับตัวอย่าง

C-MS-100 ซึ่งยังมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับการเคลื่อนที่ที่ลดลงอย่างค่อนข้างคงที่ โดยตารางที่ 5.4 แสดงผลการสรุปการทดสอบของเสาตัวอย่างทั้ง 2 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 ซึ่งเป็นเสาที่มีการต่อทาบแบบปกติมีอัตราการเคลื่อนตัวเมื่อความสามารถในการน้ดแรงทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% มีค่าเท่ากับ 2.6 %drift โดยมีค่าความเหนียวเพียง 1.75 และสำหรับตัวอย่าง C-MS-150 ซึ่งเป็นเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลซึ่งมีความสามารถในการน้ดแรงทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% มีค่าเท่ากับ 5.5 % drift โดยมีค่าความเหนียวเท่ากับ 4.88 นอกจากนี้เมื่อหาจุดครากด้วยวิธีลากผ่านจุดที่มีค่าแรงกระทำด้านข้างมีค่า 75% ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดจะให้ค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 มีค่าความเหนียวเท่ากับ 1.88 และสำหรับตัวอย่าง C-MS-100 มีค่าความเหนียวเท่ากับ 3.03 ซึ่งความเหนียวมีค่าน้อยกว่าหาระยะที่จุดครากด้วยวิธี (1<sup>st</sup> steel yielding) เพราะว่าวิธีหาจุดครากด้วยการลากผ่านจุดที่มีค่าแรงกระทำด้านข้างมีค่า 75% ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุด มีการรวมผลของช่วงการพัฒนากำลังของวัสดุเข้าไปด้วยจะส่งผลให้ตัวอย่างมีระยะที่จุดครากที่สูงกว่า

#### 5.4 การสลายพลังงาน

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่สามารถหา ค่าความเหนียวและแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของตัวอย่างเสาด้วยเส้นโค้งขอบนอกแล้ว ยังสามารถหาค่าการสลายพลังงาน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถ ในการรองรับแรงจากแผ่นดินไหว เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวพลังงานจำนวนมากจะถูกถ่ายทอด ให้กับโครงสร้างในรูปแบบการสั่นสะเทือน ถ้าโครงสร้างสามารถที่จะสลายพลังงานได้มาก หมายถึงโครงสร้างนั้นสามารถเปลี่ยนพลังงานจะการสั่นไหวมาเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นใน รูปแบบของการเสียรูปของวัสดุ ซึ่งเมื่อถ้าโครงสร้างนั้นสามารถเคลื่อนตัวได้มากและยังคงรักษา กำลังได้มากแสดงว่าโครงสร้างนั้นมีความสามารถในการต้านแผ่นดินไหวได้ดีนั่นเอง

ในการคำนวณหาค่าการสลายพลังงาน (energy dissipation) คือการหาพื้นที่ใต้กราฟ ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ ใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) เพื่อใช้ในการหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยจะทำการหาพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละรอบของการทดสอบ ซึ่งจะเริ่มจากจุดที่การเคลื่อนที่ด้านข้างมีค่า เท่ากับศูนย์แล้วให้แรงกระทำทางด้านข้างไปในทิศทางบวก จากนั้นให้แรงกระทำทางด้านข้างไปในทิศทางลบและให้แรงไปในทิศทางบวกอีกครั้งจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีค่าการเคลื่อนที่ เท่ากับศูนย์จึงถือว่าครบ 1 รอบการทดสอบ



โดยวิธีเชิงตัวเลขแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) มีสมการดังนี้

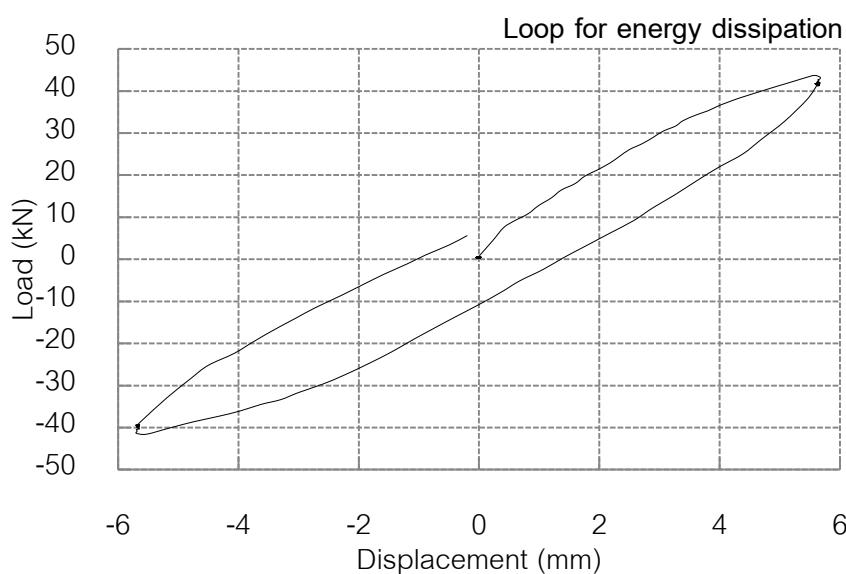
$$Area = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_{i+1} + y_i)(x_{i+1} - x_i) \quad (5.3)$$

ค่าการสลายพลังงาน (Energy dissipation)

$$Energy\ dissipation = \frac{1}{2} Fd \quad (5.4)$$

$F$  คือ แรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral force)

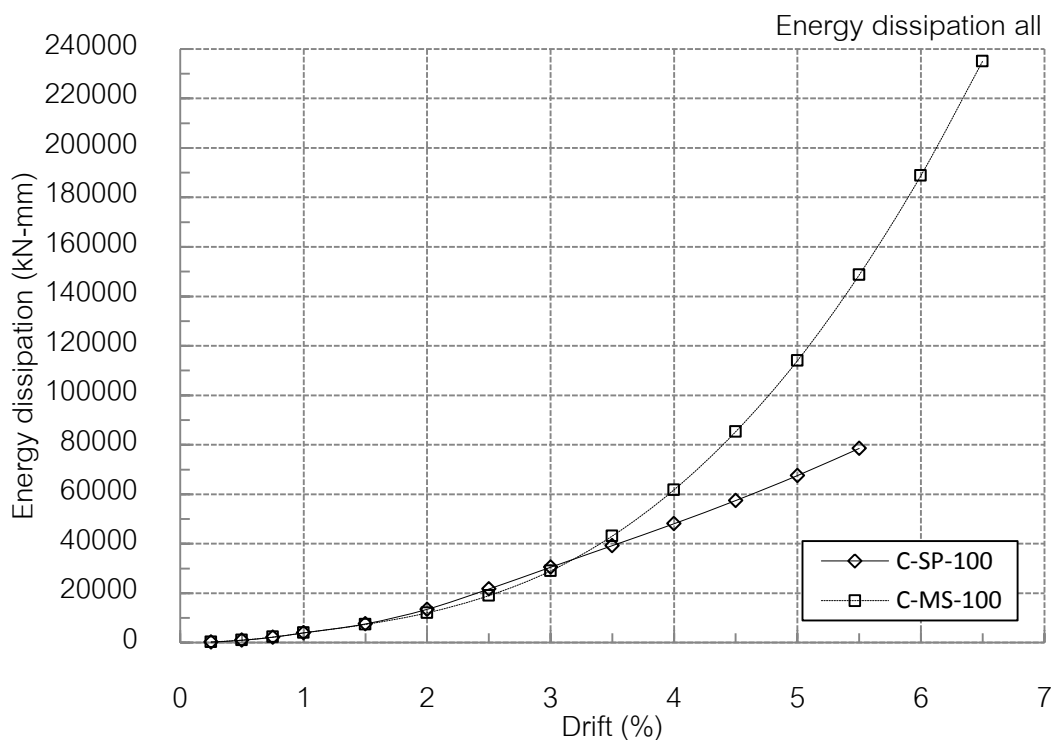
$d$  คือ ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง



รูปที่ 5.32 การหาค่าการสลายพลังงานใน 1 รอบการทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่าง โดยเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดสอบนั้น (0%-2% drift) ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างมีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ 2% drift ตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 มีค่าการสลายพลังงานสะสมเท่ากับ 13503 kN-mm และตัวอย่างทดสอบ C-MS-100 มีค่าการสลายพลังงานสะสมเท่ากับ 12060 kN-mm ซึ่งจากพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะเป็นรอยแตกกว้างจากแรงดัดเช่นเดียวกัน โดยหลังจากอัตราส่วนการเคลื่อนที่ที่ 2% drift ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างมีแนวโน้มของการสลายพลังงานที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยสำหรับตัวอย่างทดสอบ C-SP-100 สามารถรับกำลังได้สูงสุดถึงอัตราส่วนการเคลื่อนที่เท่ากับ 2% drift โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้น

มีลักษณะที่คอนกรีตเกิดความเสียหายและมีรอยแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริมตามแนวแกน และเมื่อคอนกรีตบริเวณนั้นกะเทาะออก ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงลดลงอย่างกะทันหัน เนื่องจากเหล็กเสริมสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว จึงส่งผลให้ค่าการสลายพลังงานมีแนวโน้มที่ต่ำกว่า โดยค่าการสลายพลังงานสะสมมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 78521 kN-mm สำหรับตัวอย่าง C-MS-100 ซึ่งสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดที่อัตราส่วนการเคลื่อนที่เท่ากับ 6% และหลังจากนั้นยังมีพฤติกรรมการเสื่อมถอยของกำลังรับแรงที่ช้ากว่า เนื่องจากหลังจากคอนกรีตกะเทาะออกมาจนเห็นเหล็กเสริมภายใน เสาทดสอบเกิดความเสียหายในลักษณะเกิดรอยร้าวเอียง 45° ซึ่งเห็นได้ว่าเสายังคงสามารถรับกำลังได้จากกำลังรับแรงเฉือนและหลังจากคอนกรีตเสียหายเพิ่มขึ้นเสาทดสอบยังคงมีแนวโน้มรับแรงกระทำทางด้านข้างได้อยู่เนื่องจากเหล็กเสริมตามยาวสามารถรับแรงอัดแทนคอนกรีตที่เสียหายไปจึงส่งผลให้เกิดการโก่งเดาะ แต่เมื่อมีการโก่งเดาะมีสูงส่งผลให้เหล็กเสริมตามขวางเกิดความเสียหายเป็นผลให้เกิดการวิบัติ ซึ่งแสดงว่าความสามารถสลายพลังงานมีค่าสูงเพราะสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้ที่สูงที่อัตราส่วนการเคลื่อนที่มาก โดยค่าการสลายพลังงานสะสมมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 235033 kN-mm



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายพลังงานกับอัตราส่วนการเคลื่อนที่

ตารางที่ 5.5 ค่าพลังงานในแต่ละรอบการทดสอบ

อัตรา เคลื่อนตัว	ค่าการสลายพลังงาน (กิโลนิวตัน-มม.)			
	C-SP-100		C-MS-100	
	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	237	237	295	295
0.5	738	976	751	1047
0.75	1231	2208	1223	2270
1.0	1773	3981	1691	3962
1.5	3605	7586	3411	7374
2.0	5916	13503	4686	12060
2.5	8183	21687	6971	19031
3.0	8811	30498	9973	29005
3.5	8730	39228	14114	43120
4.0	8849	48078	18663	61784
4.5	9386	57464	23522	85307
5.0	10094	67558	28684	113991
5.5	10963	78521	34624	148616
6.0	-	-	40188	188805
6.5	-	-	46228	235033

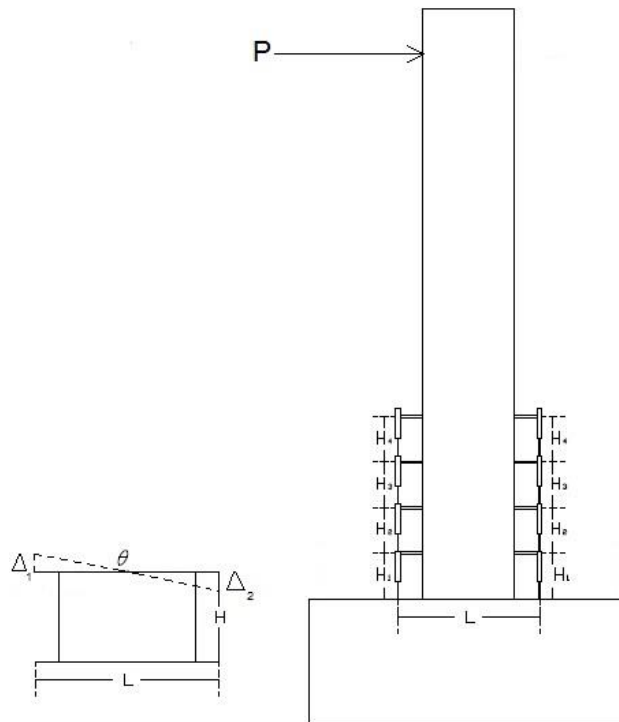
## 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้ง

ในการทดสอบได้มีการติดเครื่องมือวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 8 ตัวดังแสดงได้ในรูปที่ 4.23 รูปที่ 4.21 ซึ่งสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้ง (curvature) โดยใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตในการหาค่าความโค้งดังสมการที่ 5.5 และ 5.6 ซึ่งระยะต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งของตัวอย่างทั้ง 2 ตัวอย่างแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 ถึงรูปที่ 5.42

$$\text{Curvature, } \rho = \frac{\theta}{L} \quad (5.5)$$

$$= \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{L} \cdot \frac{1}{H} \quad (5.6)$$

$$\text{Rotation} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{L} \quad (5.7)$$

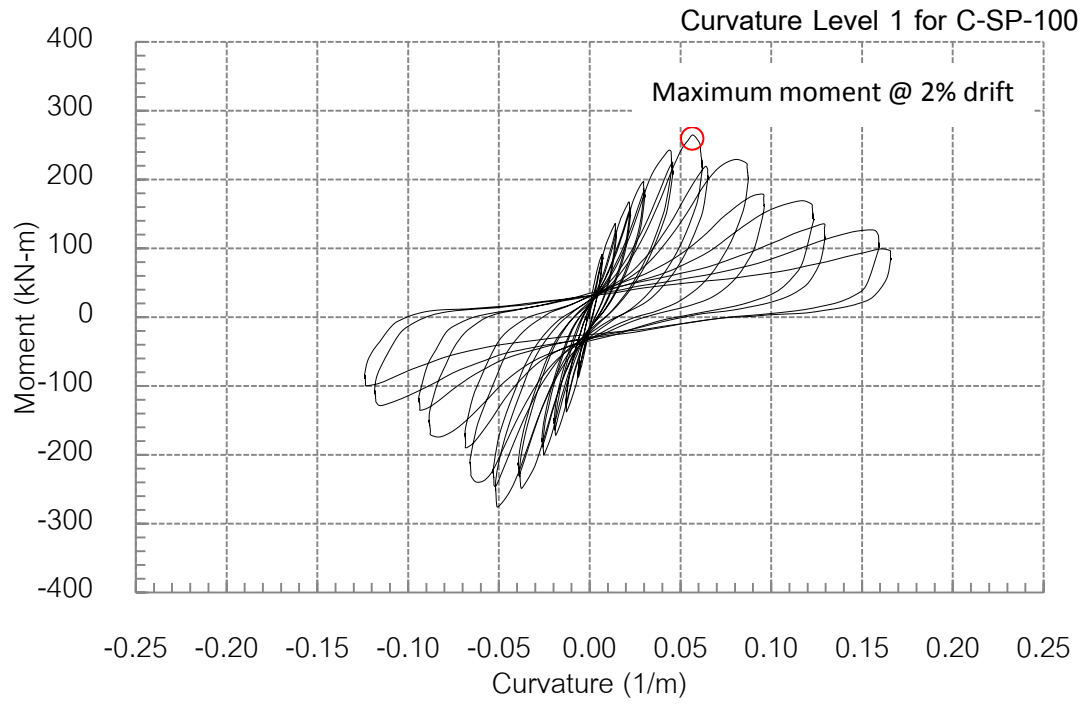


รูปที่ 5.34 การหาค่าความโค้ง (curvature)

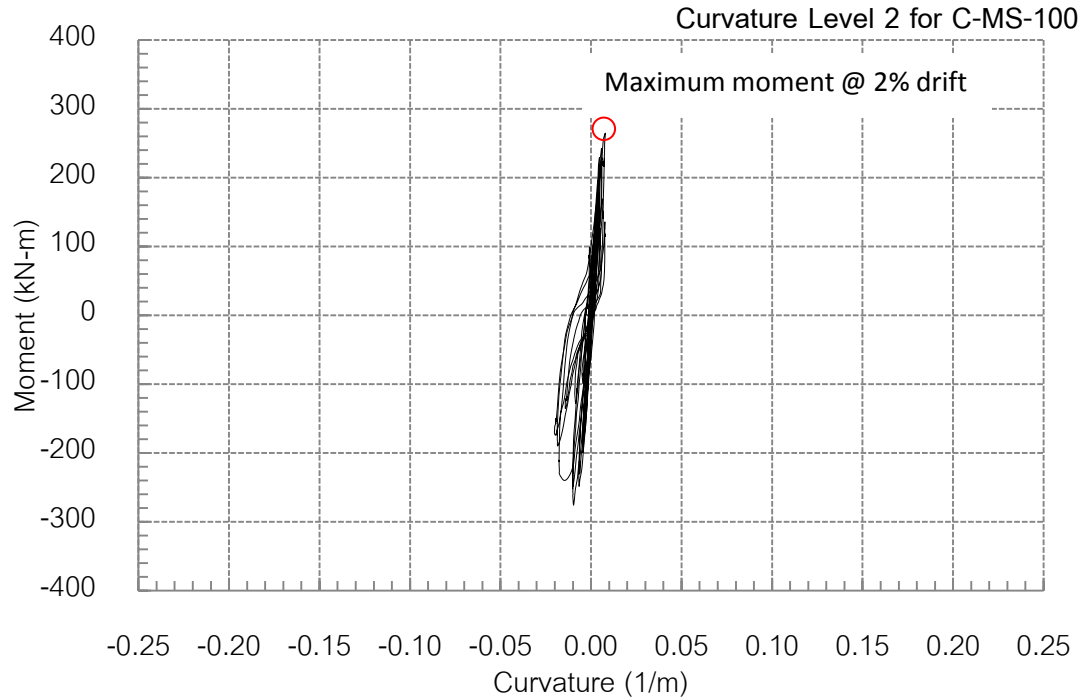
จากการทดสอบสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้ง (curvature) ของตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 2 ต้น ซึ่งเห็นถึงความแตกต่างของพฤติกรรมในการรับโมเมนต์ของเสา

อย่างชัดเจนโดย ตัวอย่างเสา C-SP-100 ที่เป็นเสาที่มีการต่อทาบแบบปกติที่บริเวณโคนเสา โดยมีระยะการต่อทาบเท่ากับ 70 ซม. โดยเมื่อเสารับแรงกระทำทางด้านข้างจะเกิดการบิดตัวของหน้าตัดบริเวณโคนเสาซึ่งสามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 1 ของตัวอย่าง C-SP-100 ที่ค่าโมเมนต์สูงสุดที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2% drift จะเกิดค่าความโค้งเท่ากับ  $0.0568 \text{ m}^{-1}$  ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและเมื่อความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างลดลงจะเห็นได้ว่าค่าความโค้งมีแนวโน้มที่มีค่าความโค้งมากขึ้นที่ค่าโมเมนต์ลดลง แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 5.36 และรูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 3 ของตัวอย่าง C-SP-100 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นเชิงเส้นตลอดการทดสอบ โดยที่ค่าโมเมนต์สูงสุดที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2% drift จะเกิดค่าความโค้งเท่ากับ  $0.0079 \text{ m}^{-1}$  และ  $0.0009 \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ และสำหรับรูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 4 ของตัวอย่าง C-SP-100 ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ 80 ซม. จากฐานรากจะเกิดการบิดตัวของหน้าตัดมากกว่าค่าความโค้งที่ระดับที่ 2 และระดับที่ 3 เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่เหนือตำแหน่งต่อทาบ ซึ่งที่ค่าโมเมนต์สูงสุดที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2% drift จะเกิดค่าความโค้งเท่ากับ  $0.0258 \text{ m}^{-1}$  แต่ยังมีค่าน้อยกว่าค่าความโค้งระดับที่ 1 ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ซึ่งรูปแบบการเสียรูปของเสาระหว่างทำการทดสอบจะเห็นว่าเสามีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) โดยมีความเสียหายที่โคนเสามาก

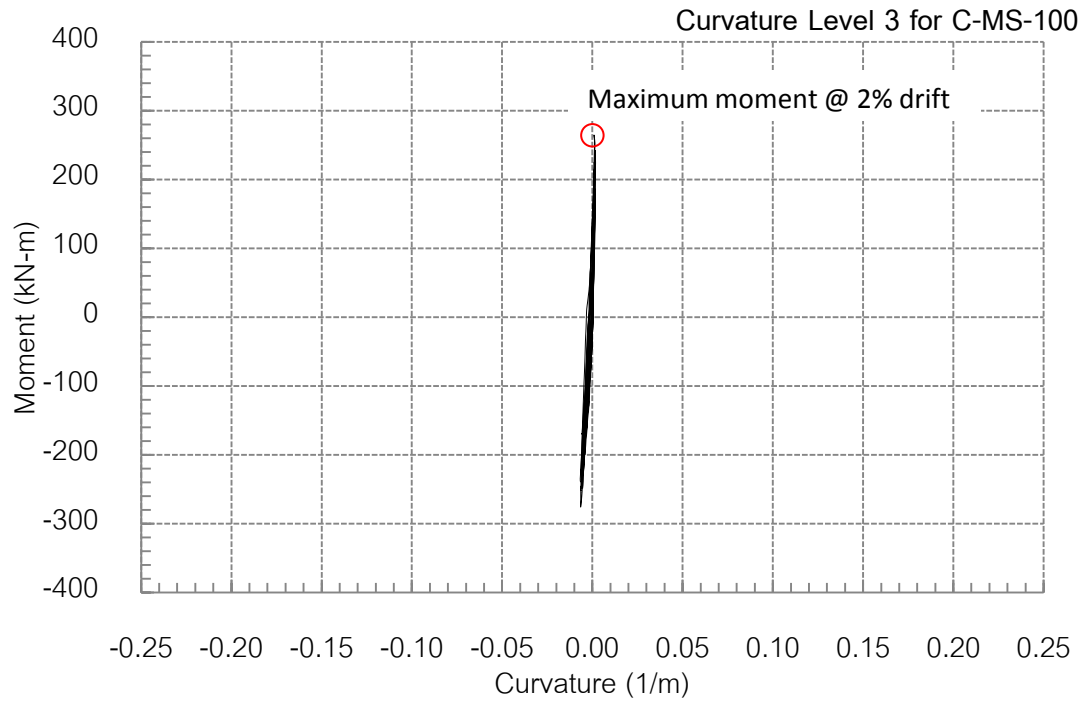
สำหรับตัวอย่างเสา C-MS-100 เป็นเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลที่บริเวณโคนเสา ซึ่งมีตำแหน่งการต่อทาบสูงจากฐาน 15 ซม. โดยเมื่อเสารับแรงกระทำทางด้านข้างจะเกิดการบิดตัวของหน้าตัดบริเวณโคนเสาซึ่งสามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 1 ของตัวอย่าง C-MS-100 ที่ค่าโมเมนต์สูงสุดที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.4% drift จะเกิดค่าความโค้งเท่ากับ  $0.0947 \text{ m}^{-1}$  ซึ่งพฤติกรรมของค่าความโค้งที่ระดับ 2 ก็จะเป็นเช่นเดียวกันคือไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีค่าความโค้งที่ค่าโมเมนต์สูงสุดที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.4% drift เท่ากับ  $0.0233 \text{ m}^{-1}$  และเมื่อความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างลดลงจะเห็นได้ว่าค่าความโค้งมีแนวโน้มที่มีค่าความโค้งมากขึ้นที่ค่าโมเมนต์ลดลง แต่สำหรับรูปที่ 5.40 และ รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 3 ของตัวอย่าง C-MS-100 ลักษณะเป็นเชิงเส้นตลอดการทดสอบโดยที่ค่าโมเมนต์สูงสุดที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2% drift จะเกิดค่าความโค้งเท่ากับ  $0.0134 \text{ m}^{-1}$  และ  $0.0125 \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายการบิดตัวของหน้าตัดเสาส่งผลให้รูปแบบการเสียรูปเป็นเส้นโค้ง



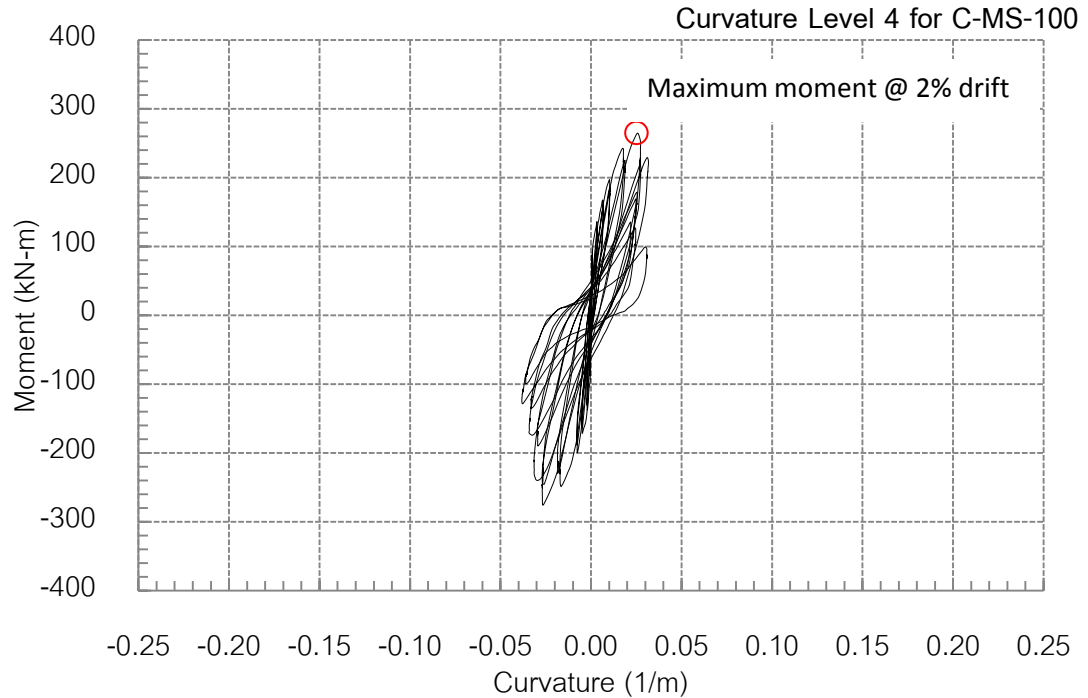
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 1 ของตัวอย่าง C-SP-100



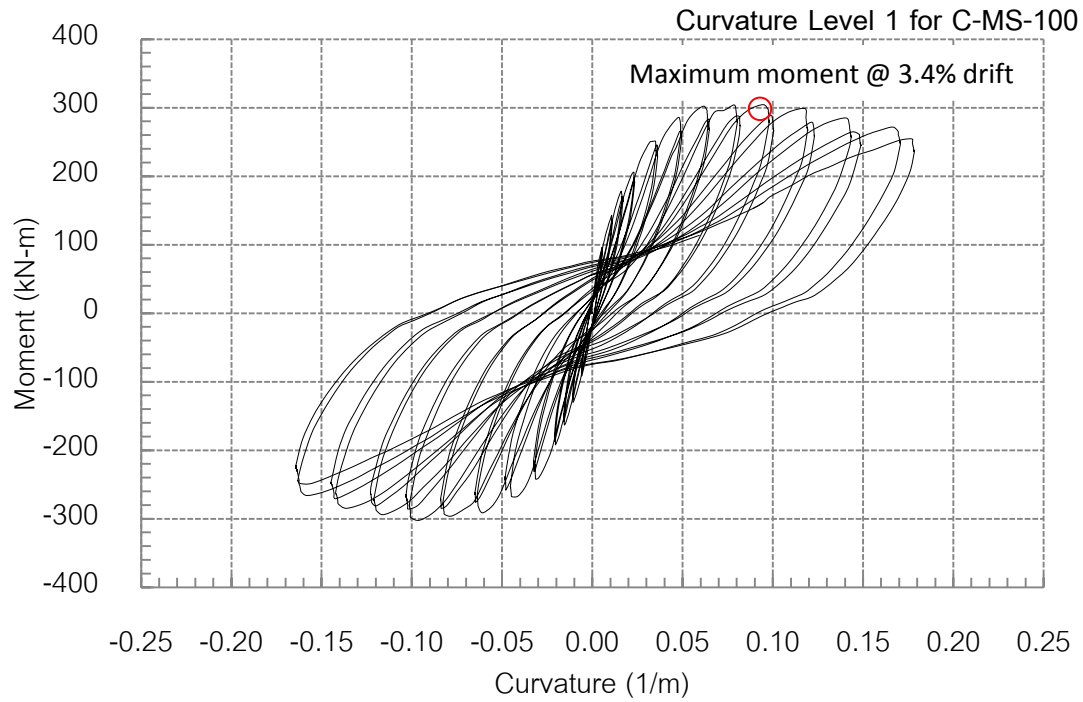
รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 2 ของตัวอย่าง C-SP-100



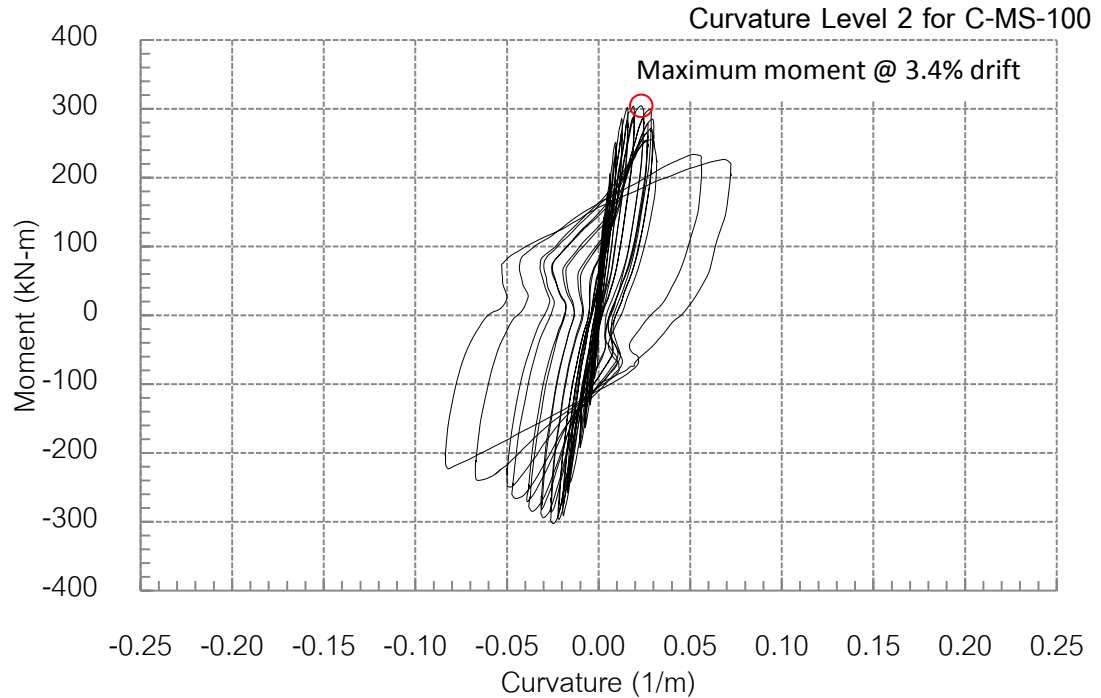
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 3 ของตัวอย่าง C- SP -100



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 4 ของตัวอย่าง C- SP -100

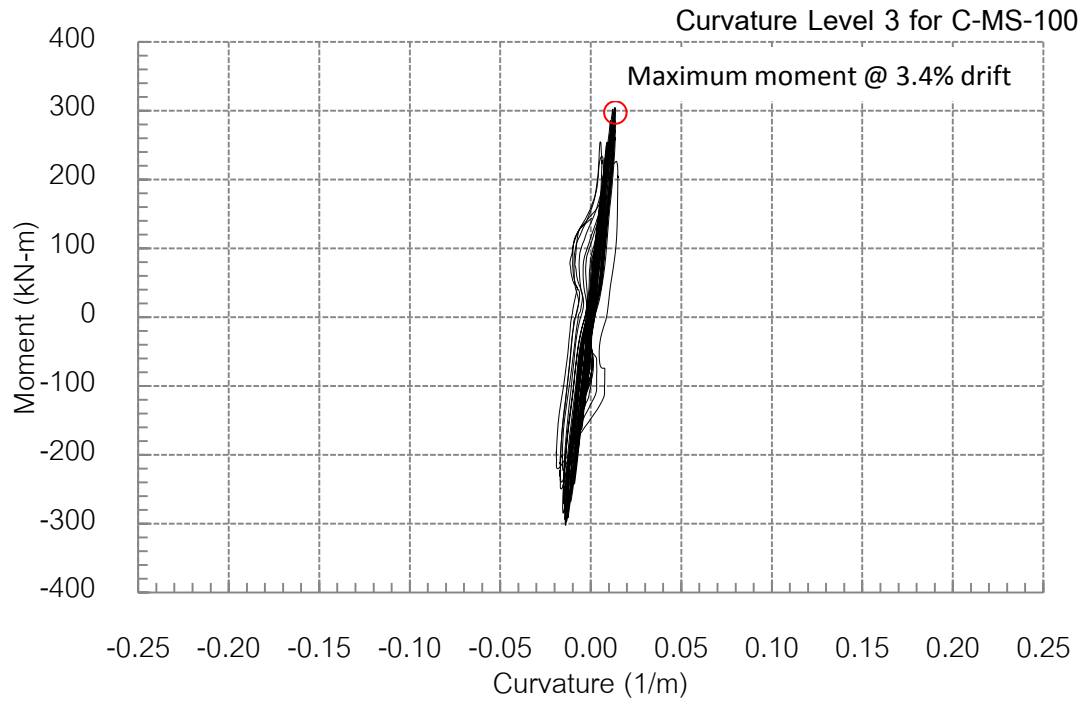


รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 1 ของตัวอย่าง C-MS-100

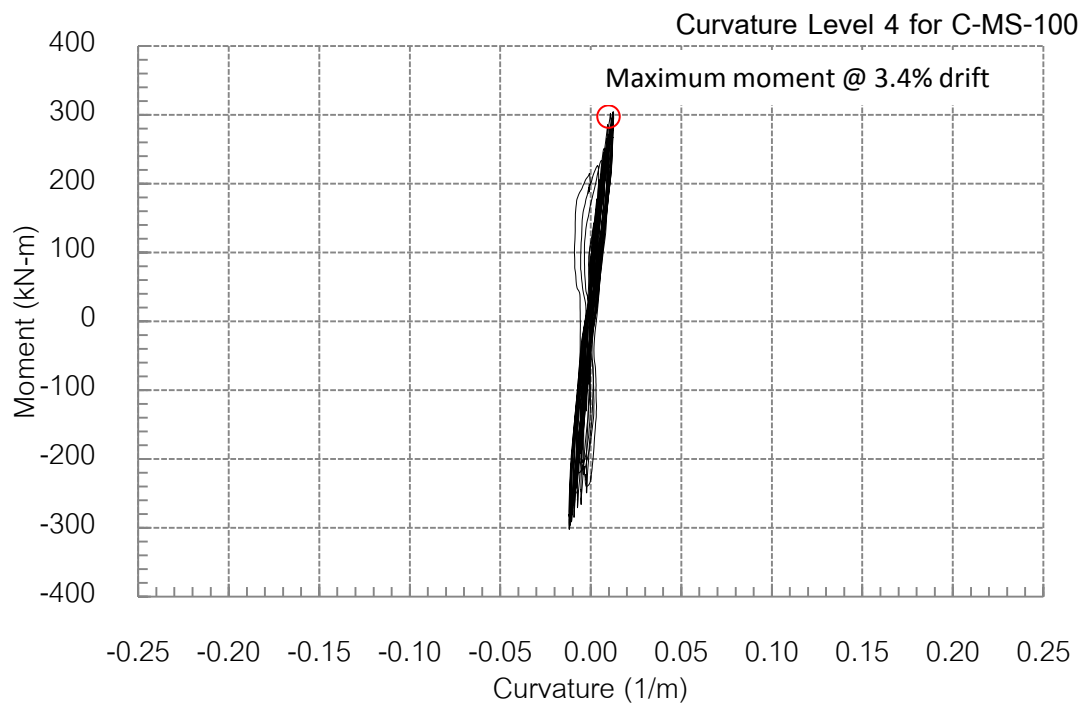


รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 2 ของตัวอย่าง C-MS-100





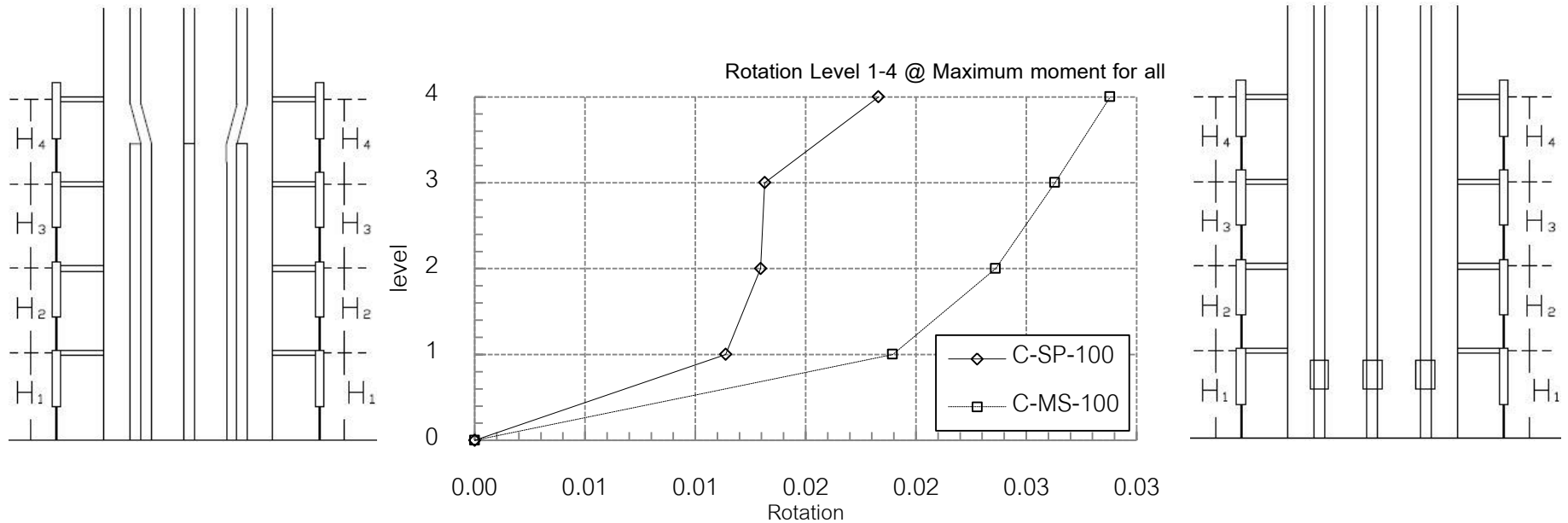
รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 3 ของตัวอย่าง C-MS-100



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งระดับที่ 4 ของตัวอย่าง C-MS-100

ตารางที่ 5.6 ค่าความโค้งและค่ามูมของตัวอย่างเสาทดสอบ

Specimens	M <sub>max</sub> (kN)	Disp@M <sub>max</sub> (mm)	Drift@M <sub>max</sub> (%)	Curvature (1/m)				Rotation				
				Level 1	Level 2	Level 3	Level 4		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
C-SP-100	262.60	42.33	2	0.0569	0.0079	0.0009	0.0258	แต่ละระดับ	0.0113	0.0015	0.0002	0.005
								สะสม	0.0013	0.0129	0.0131	0.0183
C-MS-100	304.40	75.46	3.4	0.0947	0.0233	0.0134	0.0125	แต่ละระดับ	0.0189	0.0046	0.0027	0.0025
								สะสม	0.00189	0.0236	0.0263	0.0287



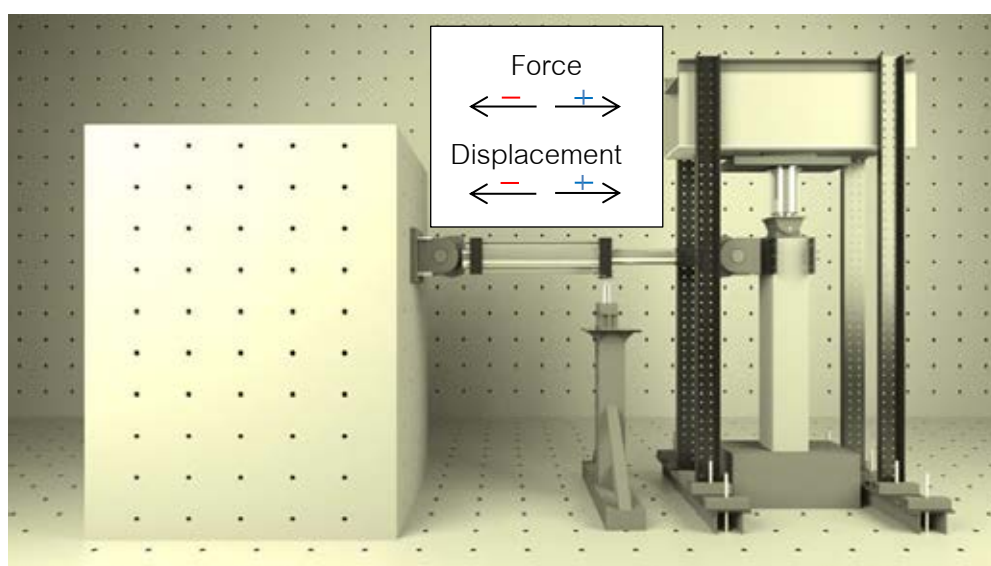
รูปที่ 5.43 มูมหมุนสะสมของหน้าตัดเสาแต่ละระดับ



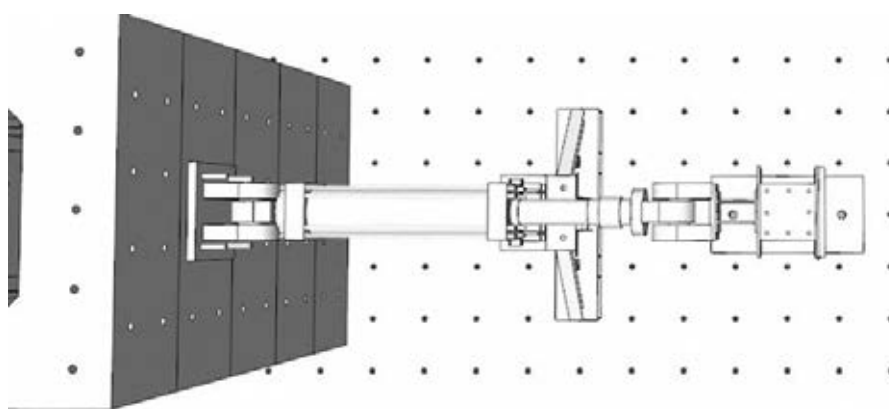
พฤติกรรมของเสาที่มีค่าความโค้งที่ระดับต่าง ๆ ณ จุดที่ค่าโมเมนต์สูงสุดแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเสียรูปของเสาได้อย่างชัดเจน ซึ่งตารางที่ 5.6 ได้แสดงให้เห็นถึงผลทดสอบที่แสดงถึงค่าความโค้งและค่ามูมหมุนของในแต่ระดับขณะที่เสาทดสอบสามารถรับโมเมนต์สูงสุด โดยเมื่อนำค่ามูมหมุนสะสมมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับของหน้าตัดเสากับมูมหมุนสะสมของเสา จะเห็นถึงรูปแบบการเสียรูปของเสา คือตัวอย่างเสา C-SP-100 มีรูปแบบการเสียรูปของเสาระหว่างทำการทดสอบจะเห็นว่าเสามีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) โดยมีความเสียหายที่โคนเสามากจากนั้นถัดขึ้นมาในระดับที่ 2 และระดับที่ 3 จะมีค่ามูมหมุนที่เปลี่ยนไปจากเดิมน้อยมาก แต่เมื่อพ้นระยะต่อทาบซึ่งเป็นระดับที่ 4 จะเกิดค่ามูมหมุนมากกว่าที่ระดับ 2 และระดับที่ 3 แต่มีค่าน้อยกว่าระดับที่ 1 ซึ่งเห็นได้ถึงลักษณะการเสียรูปของเสาดังรูปที่ 5.43 และสำหรับตัวอย่างเสา C-MS-100 มีรูปแบบการเสียรูปในลักษณะกระจายการบิดตัวของหน้าตัดเสาส่งผลให้รูปแบบการเสียรูปเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากค่ามูมหมุนสะสมในแต่ละระดับจะมีลักษณะมีค่ามากที่ระดับที่ 1 และจะน้อยลงในระดับที่สูงขึ้น

## 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริม

จากการเตรียมตัวอย่างได้มีการติดตั้งเกจวัดความเครียดดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 โดยจากการติดตั้งเครื่องมือทดสอบดังรูปที่ จะแสดงให้เห็นถึงทิศทางการให้แรงและการแสดงค่าเครื่องหมายในทิศทางนั้นๆ สำหรับเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเครียดในเหล็กเสริม โดยจะทำการแสดงกราฟในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริม เพื่อพิจารณาถึงความเครียดที่เกิดขึ้น ณ อัตราการเคลื่อนตัวต่างๆ รวมถึงรูปแบบการรับแรงแบบวิถัจกรของเสาตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 5.44 เครื่องหมายแสดงค่าของการให้แรงและการเคลื่อนที่ของเครื่องให้แรง



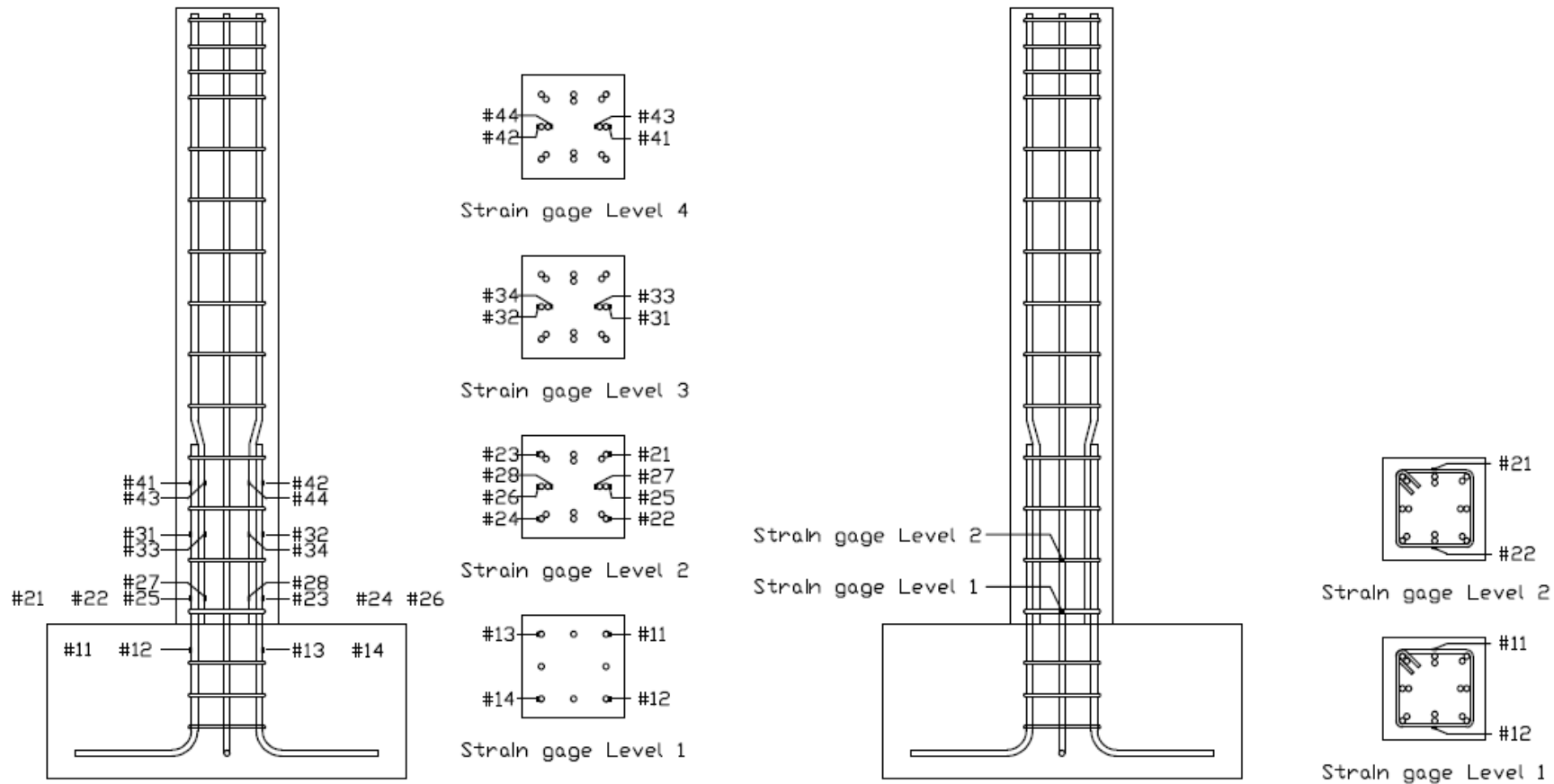
รูปที่ 5.45 ตำแหน่งของเหล็กเสริมในเสาทดสอบขณะทำการทดสอบ

### 5.6.1 ความเครียดในเหล็กเสริมของเสาตัวอย่างทดสอบ C-SP-100

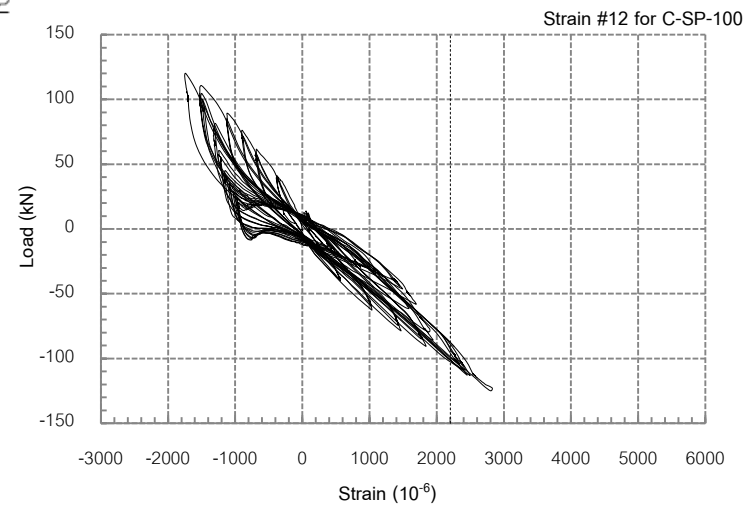
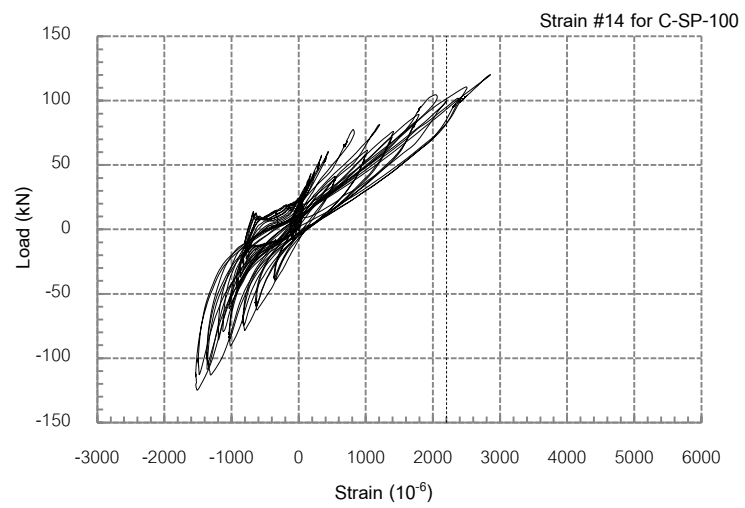
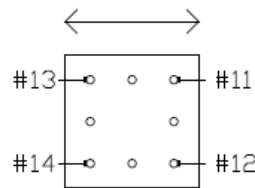
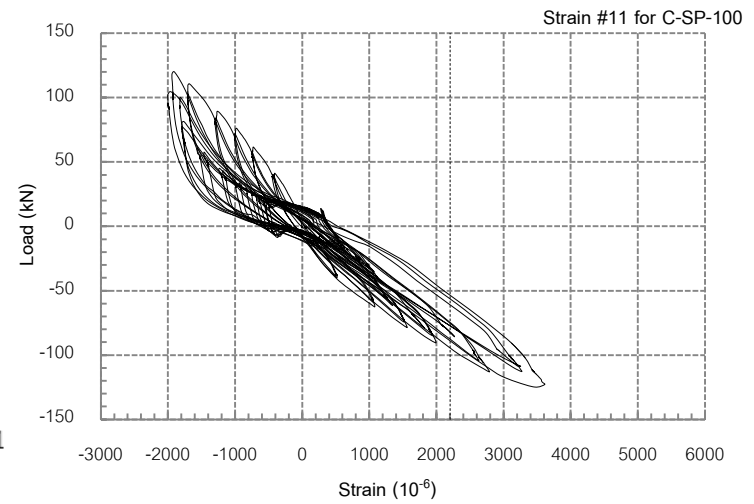
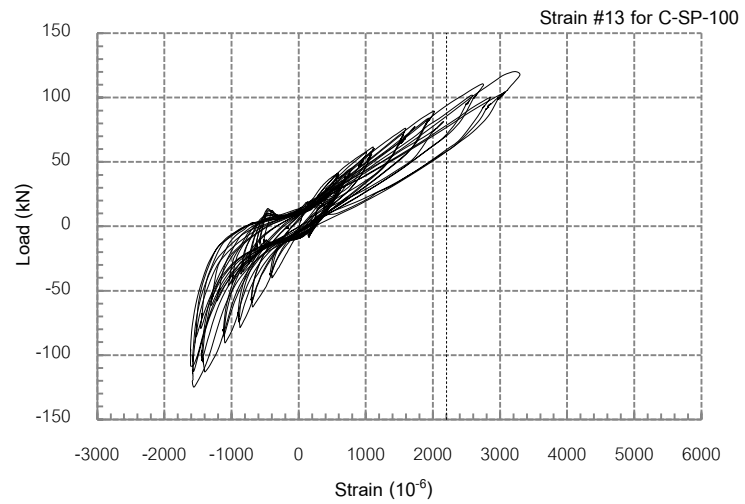
สำหรับเสาทดสอบที่มีการต่อทาบแบบปกติมีรูปแบบของความเครียดที่เกิดในเหล็กเสริมตามยาวในระดับที่ 1 บริเวณใต้ผิวฐานรากลงไป 10 ซม. ในลักษณะอยู่ในช่วงอิลาสติกเนื่องจากการสลับไปมาของแรงยังคงอยู่ในแนวโน้มเดิมโดยจะมีเกจวัดทุกตัว ที่ได้รับแรงถึงค่าความเครียดที่จุดครากที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 2% drift และที่เกจวัดความเครียดระดับที่ 2 มีลักษณะแบบเดียวกับระดับที่ 1 เพียงแต่ขนาดความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากการถ่ายแรงจากการต่อทาบเหล็กเสริมเป็นแบบแปรผันตรงการระยะการต่อทาบ และค่าความเครียดที่ติดกับเหล็กเสริมตามยาวที่ต่อทาบจากเหล็กด้านล่างมีค่าความเครียดที่เกิดขึ้นน้อยมากและยังอยู่ในช่วงอิลาสติกสำหรับเกจวัดความเครียดในระดับที่ 3 และ 4 ที่เหล็กเสริมล่างและเหล็กเสริมที่ต่อทาบมีลักษณะของความเครียดที่ยังอยู่ในช่วงอิลาสติกและมีแนวโน้มของค่าความเครียดที่น้อยลงจากระดับที่ต่ำกว่า และที่เหล็กปลอกได้มีการติดเกจวัดความเครียดที่ระดับ 2 และ 3 ของระดับเหล็กปลอกพบว่าตลอดการทดสอบเหล็กปลอกยังคงรับแรงไม่ถึงค่าความเครียดที่จุดครากและไม่เกิดความเสียหาย

### 5.6.2 ความเครียดในเหล็กเสริมของเสาตัวอย่างทดสอบ C-MS-100

สำหรับเสาทดสอบที่มีการต่อทาบด้วยข้อต่อเชิงกลมีรูปแบบของความเครียดที่เกิดในเหล็กเสริมตามยาวในระดับที่ 1 ในลักษณะของการรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากเหล็กเสริมได้รับแรงจนเกิดความเครียดที่มากกว่าความเครียดที่จุดครากที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 1.5% drift แต่ยังคงพัฒนากำลังต่อไปได้อีก สังเกตจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมจะมีขนาดใหญ่ และที่เกจวัดความเครียดระดับที่ 2 มีลักษณะที่เหล็กเสริมทุกเส้นรับแรงจนเกิดความเครียดสูงกว่าความเครียดที่จุดครากขณะให้แรงกระทำไปที่อัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 1.5% drift โดยเมื่อเหล็กเสริมที่เส้นรับแรงหลังจากอัตราการเคลื่อนตัวเท่ากับ 1% drift มีลักษณะเกิดความเครียดตึงค้ำจิ้งสันนิฐานว่าอาจเกิดจากการเสียรูปในลักษณะการโก่งเดาะของเหล็กเสริมซึ่งส่งผลให้ผิวด้านนอกที่ติดเกจวัดความเครียดมีการเสียรูปจากการโก่งเดาะรวมอยู่ด้วย ซึ่งเกจวัดความเครียดที่ติดบนข้อต่อเชิงกลก็มีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับเกจวัดความเครียดระดับที่ 3 และ 4 มีรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมเช่นเดียวกับระดับที่ 1 แต่ขนาดความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากอยู่บริเวณที่อยู่เหนือจุดหมุนพลาสติกกว่า และที่เหล็กปลอกได้มีการติดเกจวัดความเครียดที่ระดับ 2 และ 3 ของระดับเหล็กปลอกพบว่าตลอดการทดสอบเหล็กปลอกยังคงรับแรงไม่ถึงค่าความเครียดที่จุดครากและไม่เกิดความเสียหาย

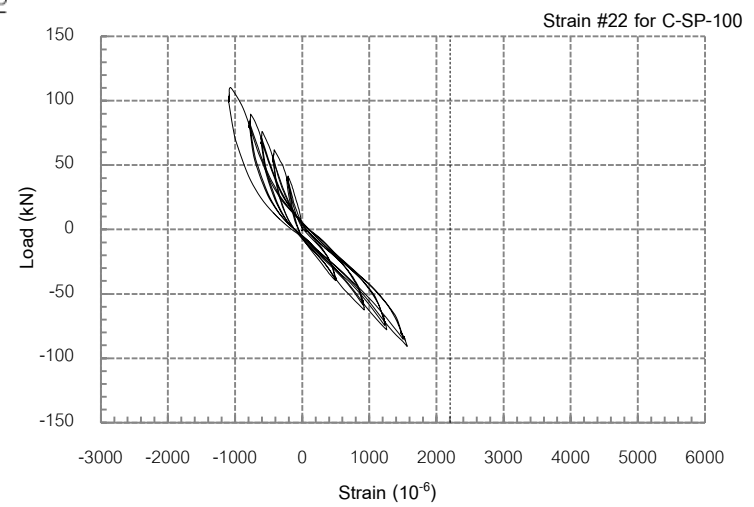
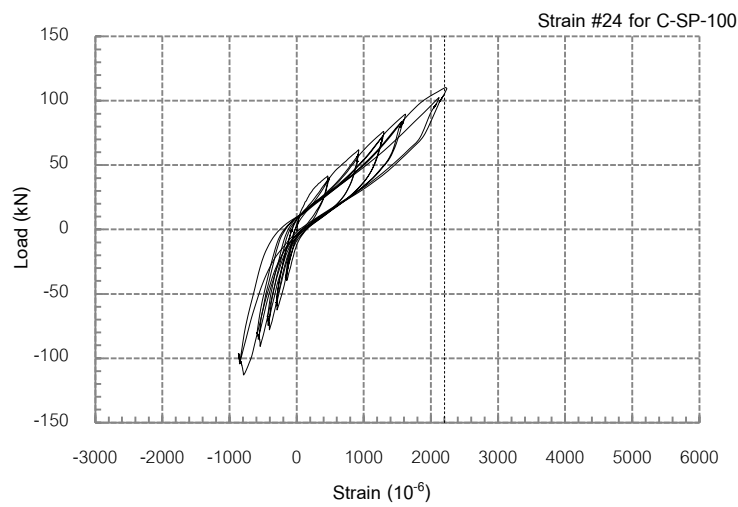
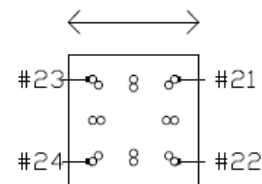
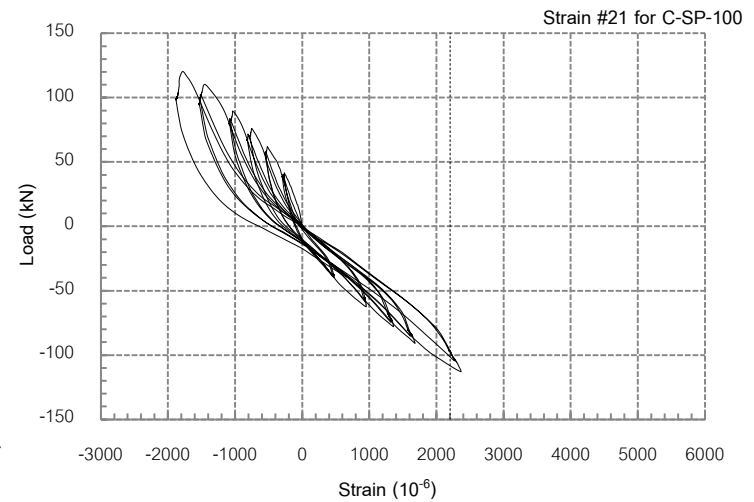
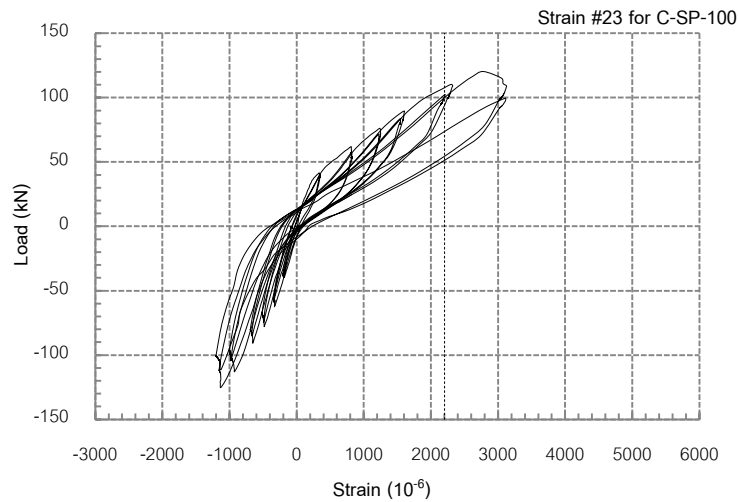


รูปที่ 5.46 ตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-SP-100

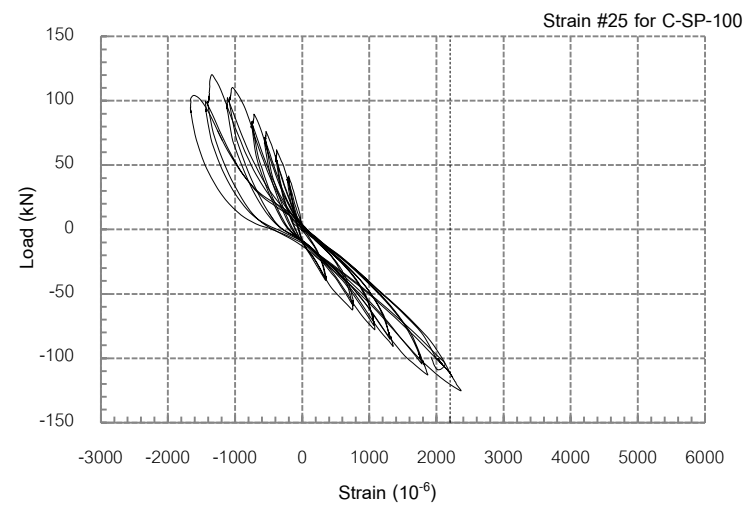
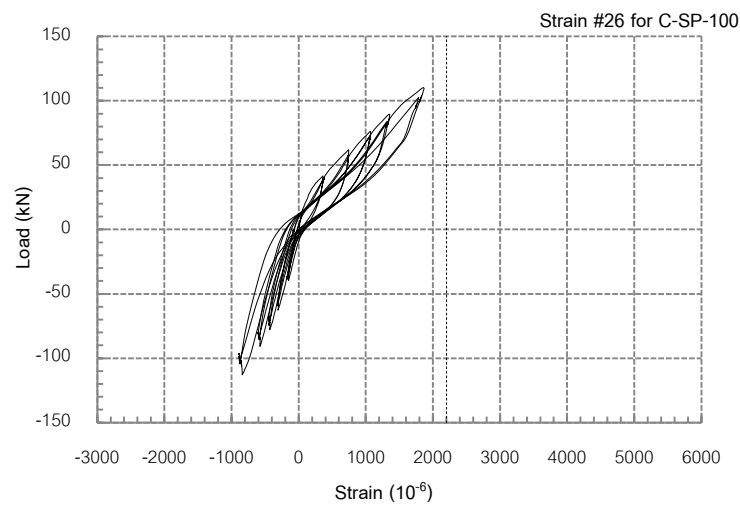
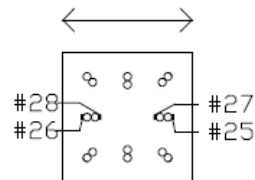
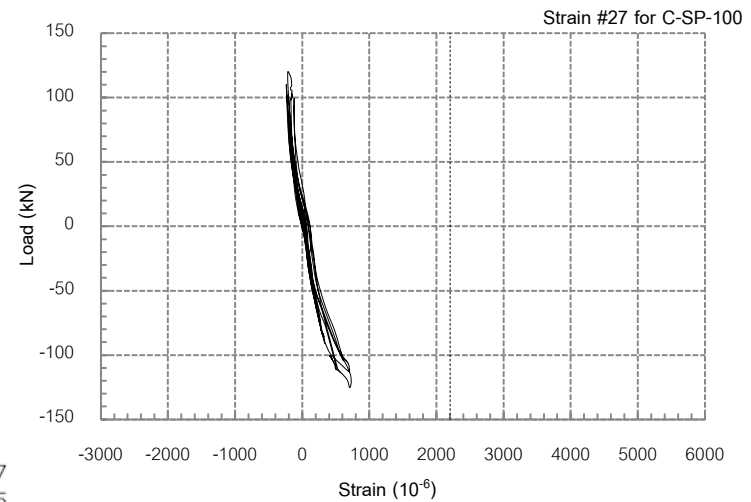
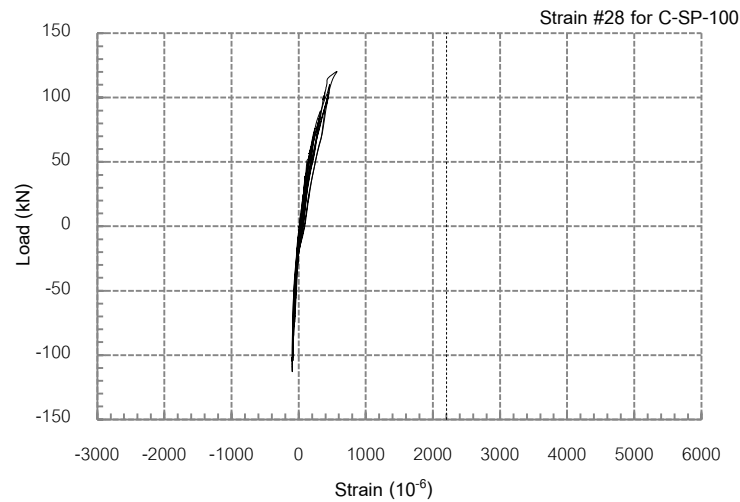


รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 1

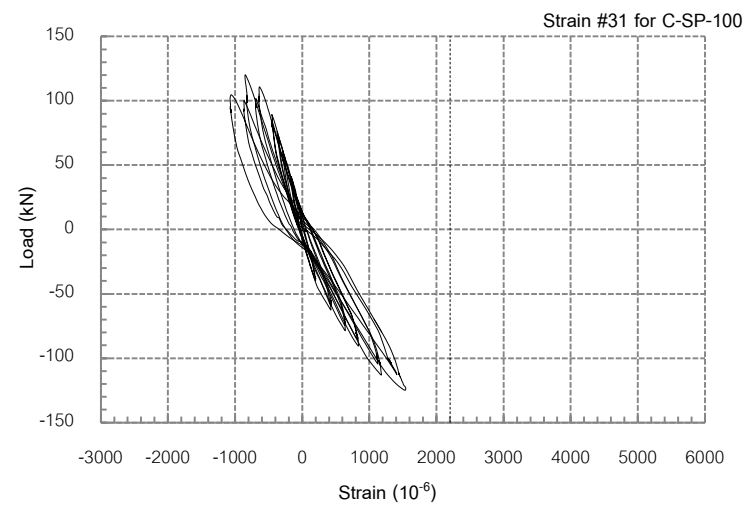
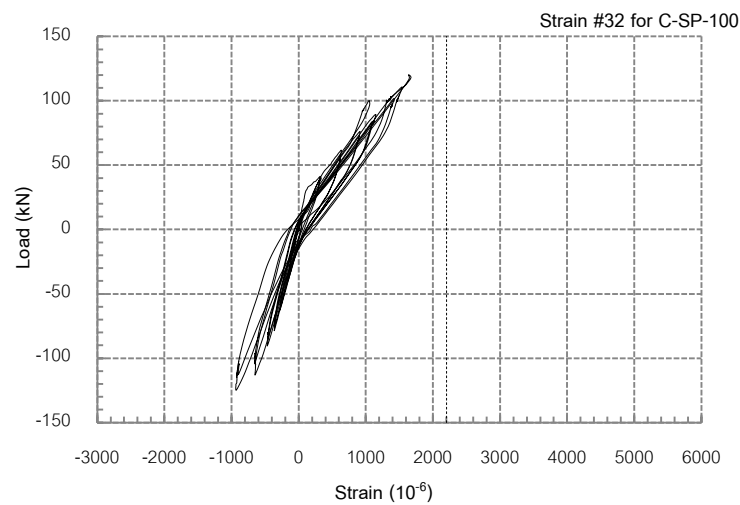
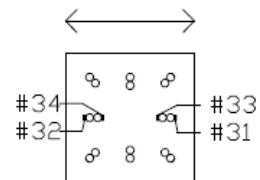
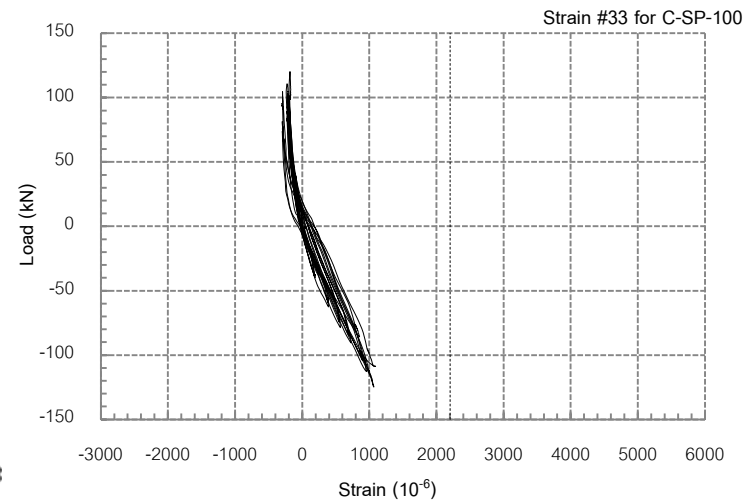
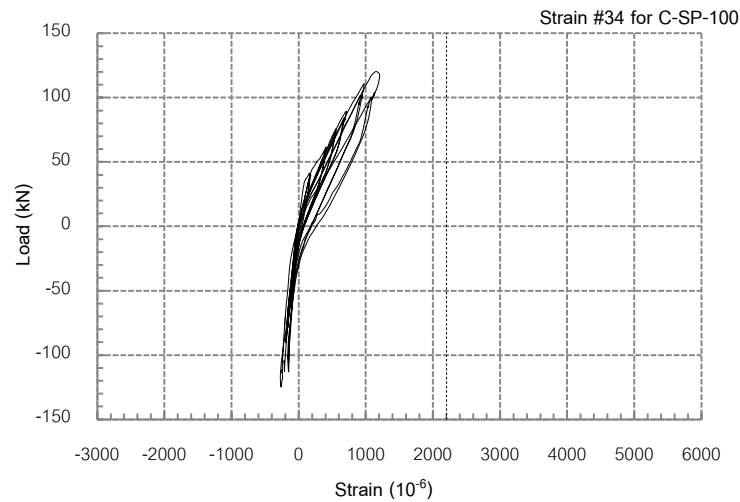




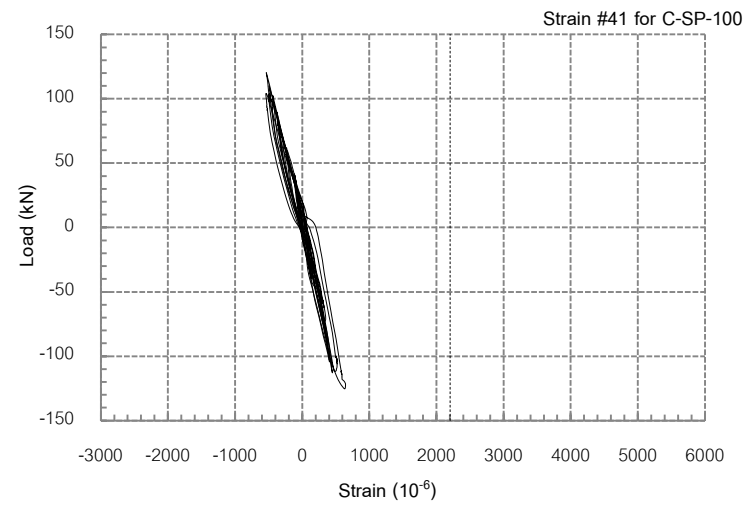
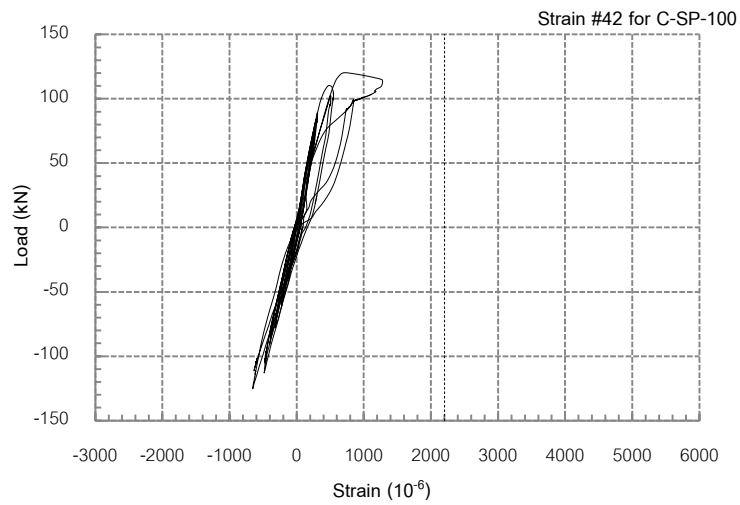
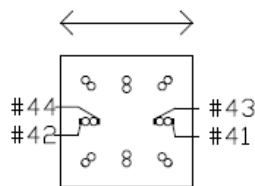
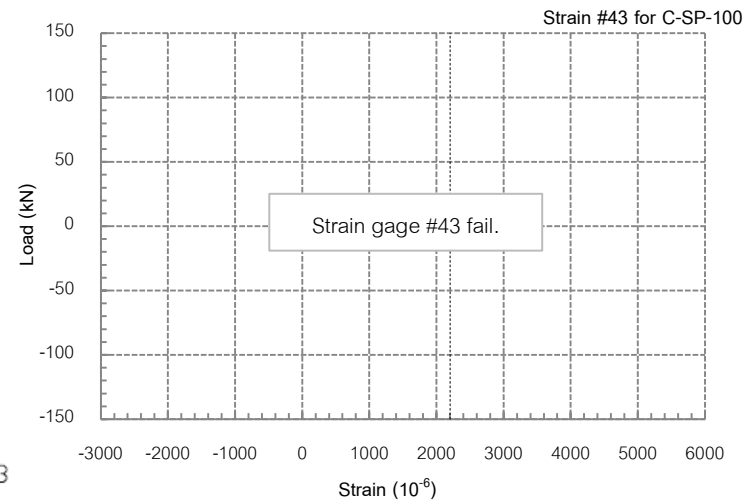
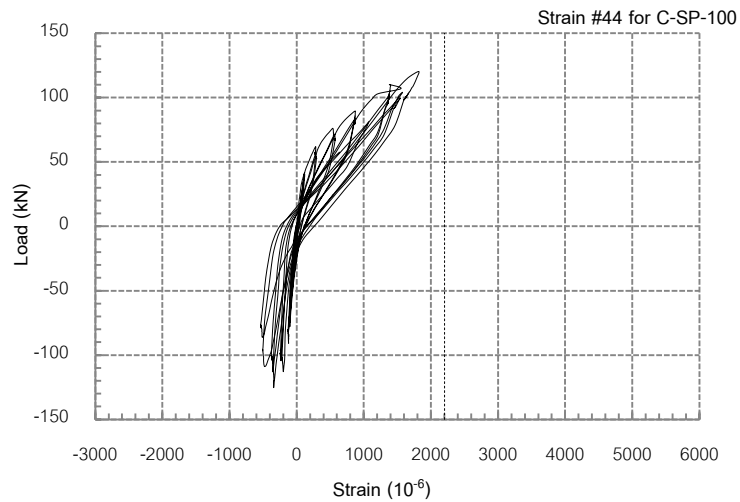
รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 2



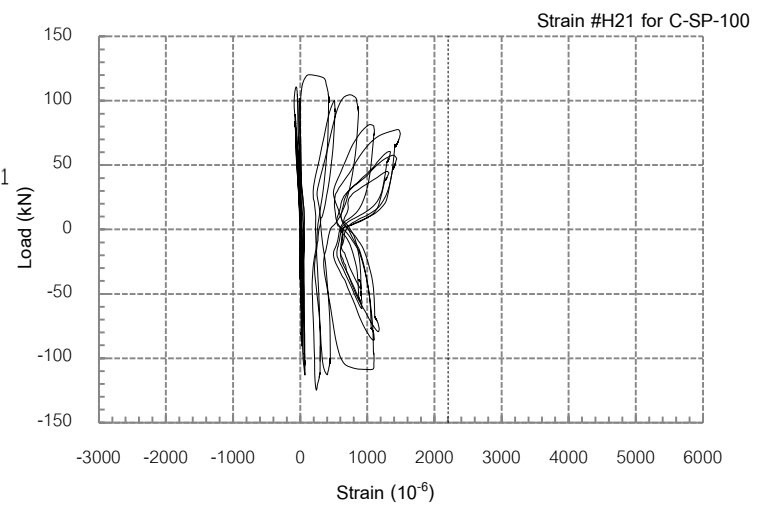
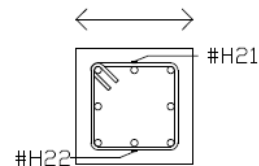
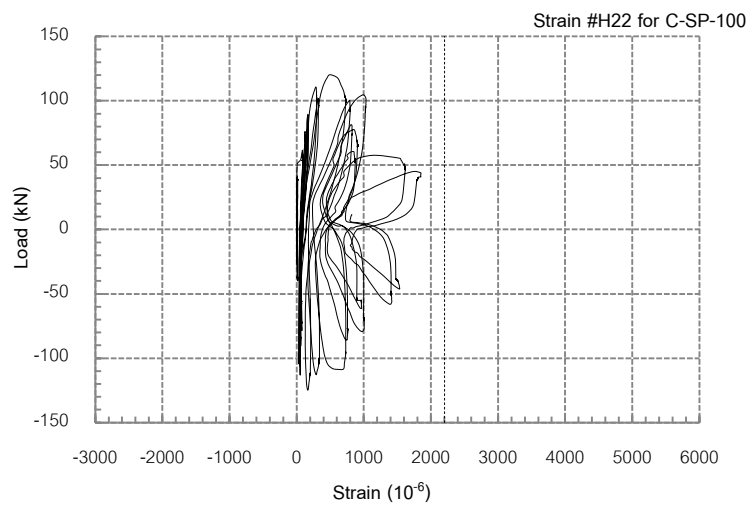
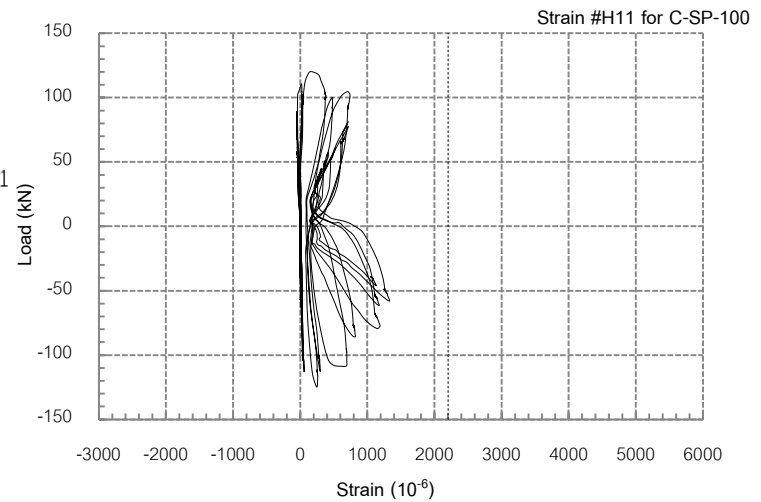
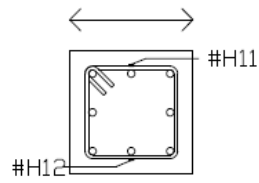
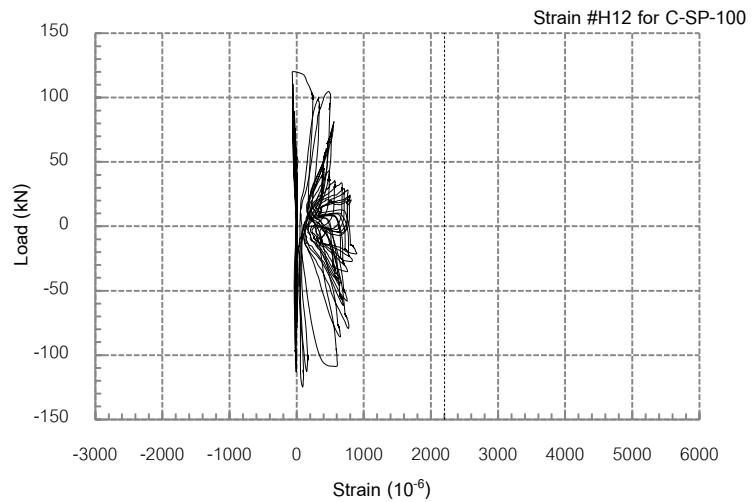
รูปที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 2



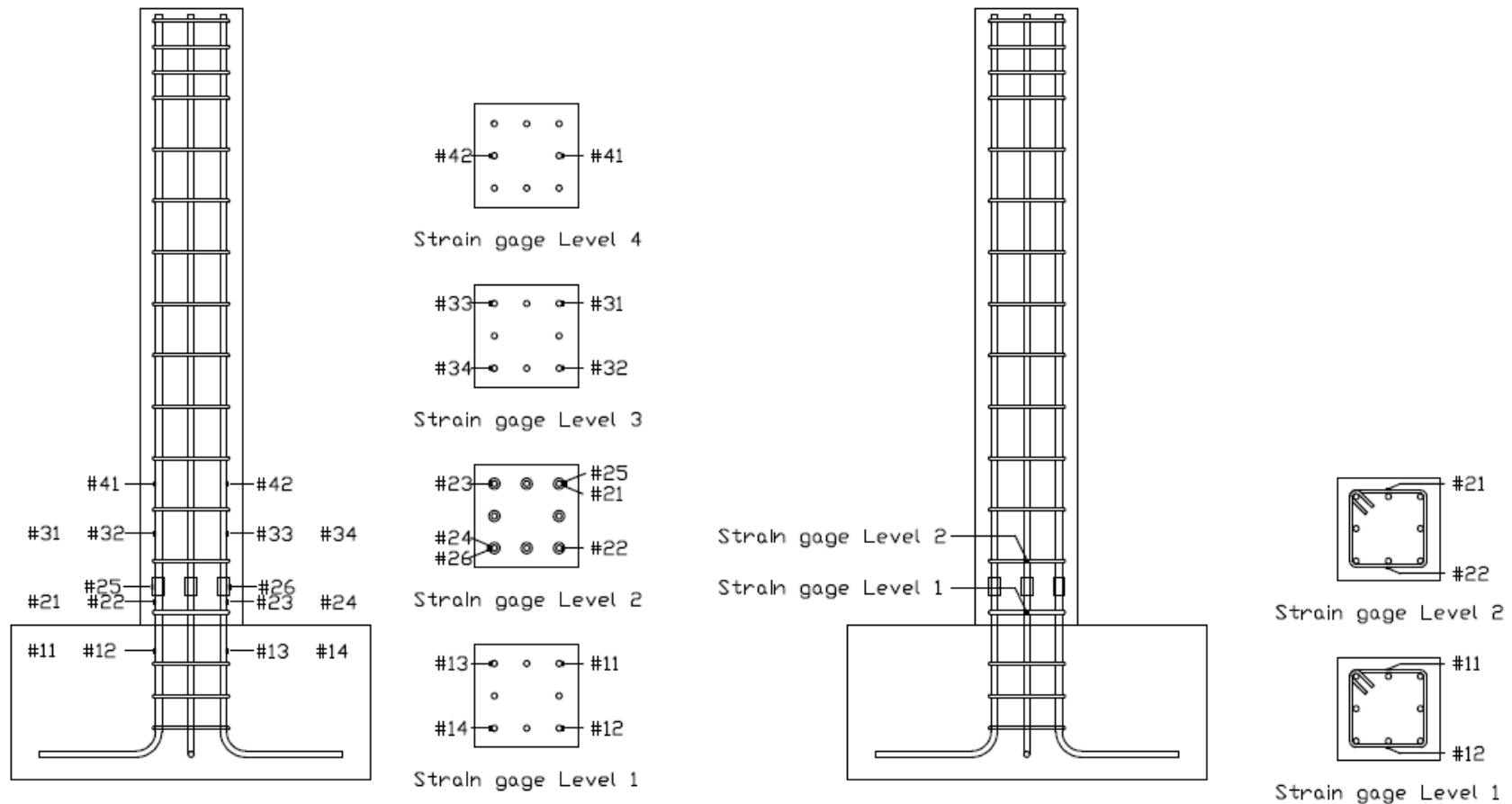
รูปที่ 5.50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 3



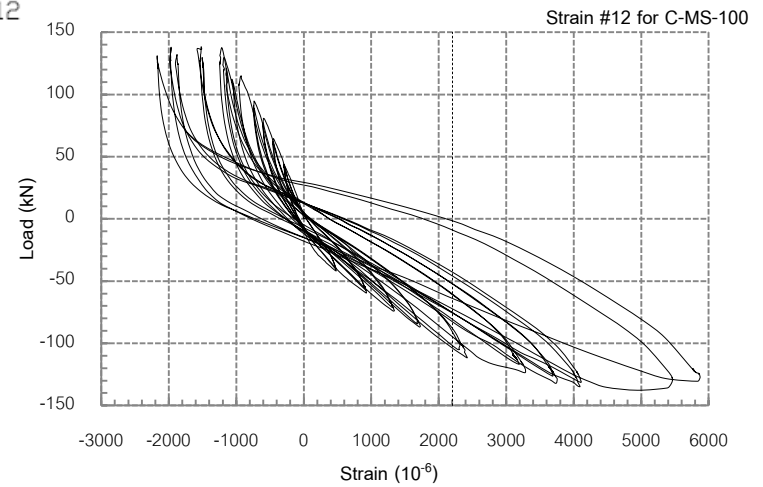
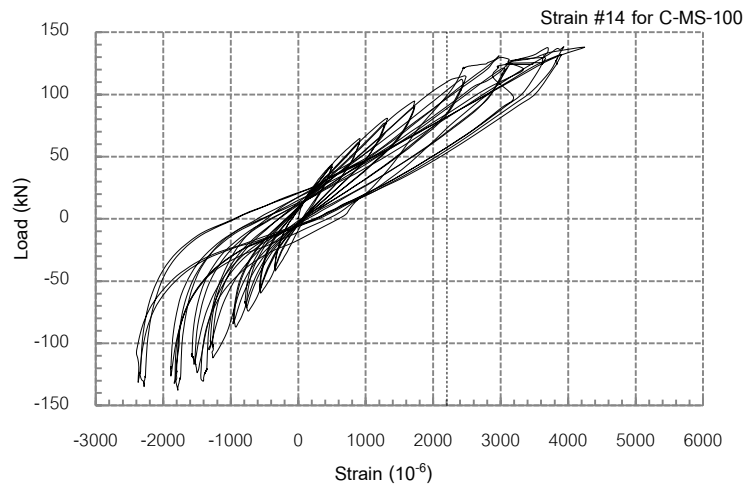
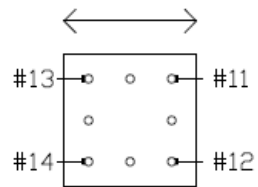
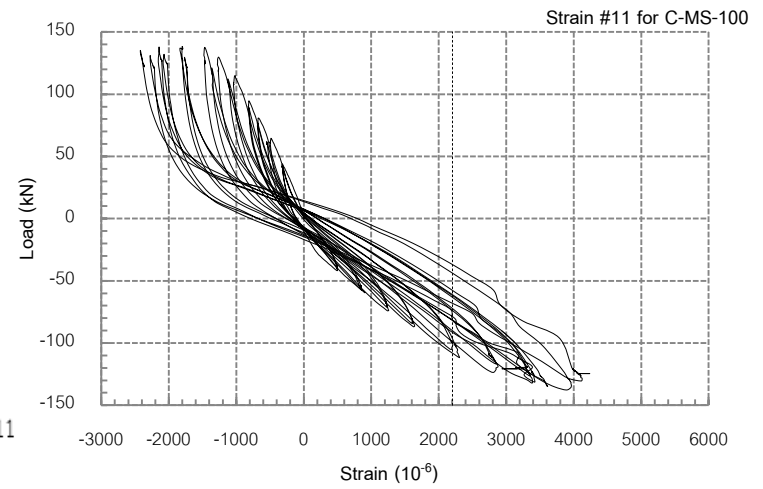
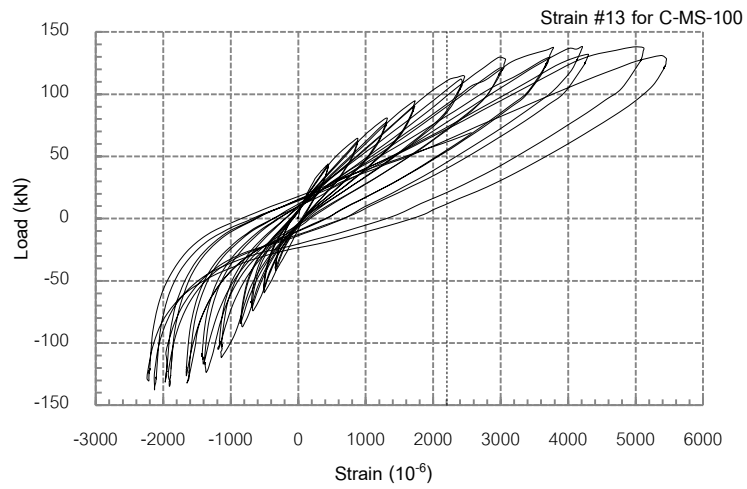
รูปที่ 5.51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 4



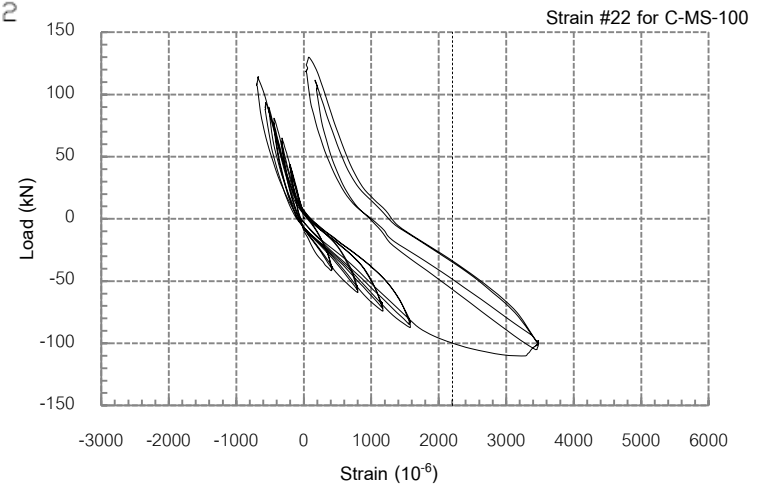
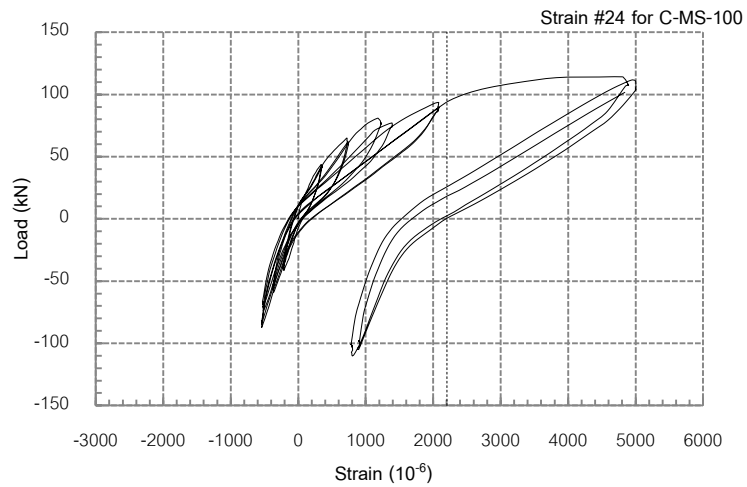
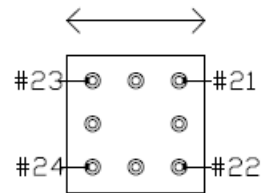
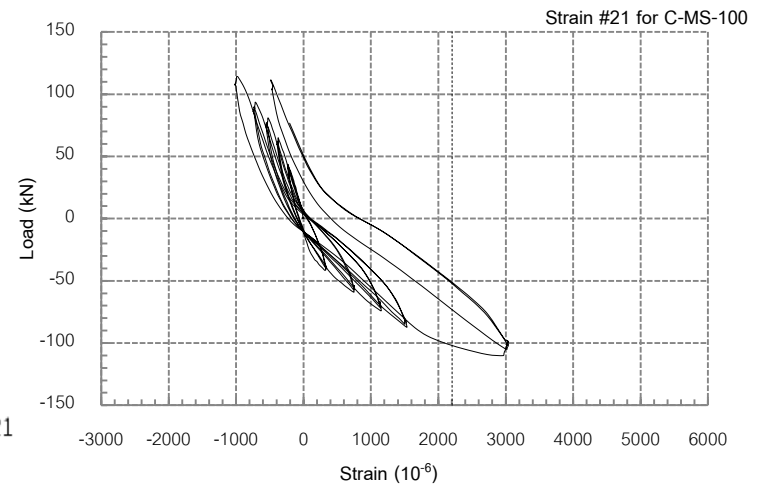
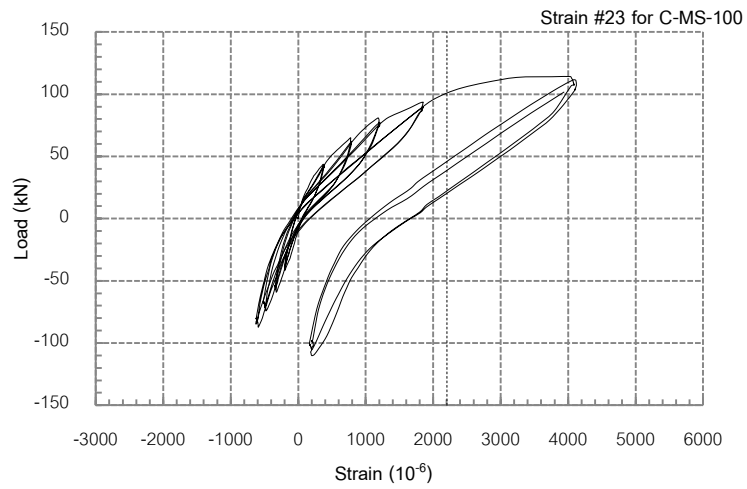
รูปที่ 5.52 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างเสา C-SP-100 ในระดับที่ 1 และ 2



รูปที่ 5.53 ตำแหน่งในการติดเกจวัดความเครียด (Strain gages) ของตัวอย่างทดสอบ C-MS-100

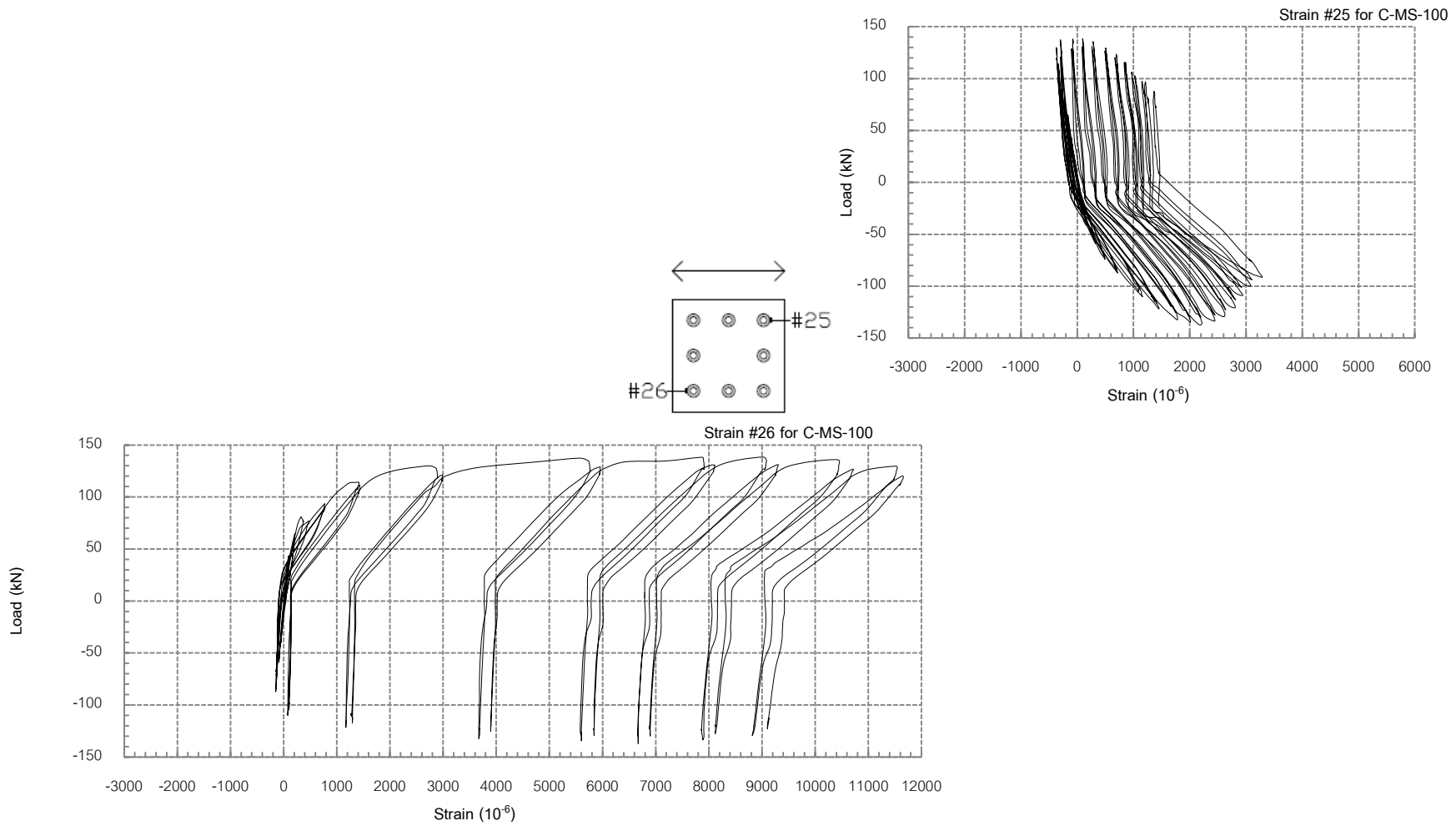


รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 1

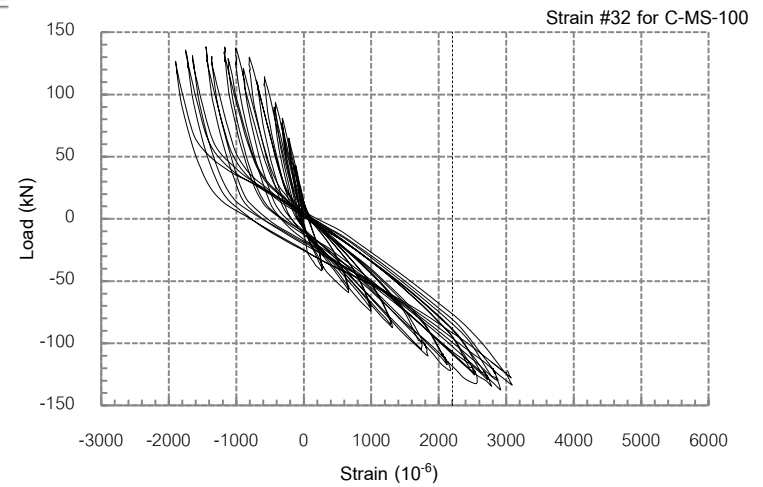
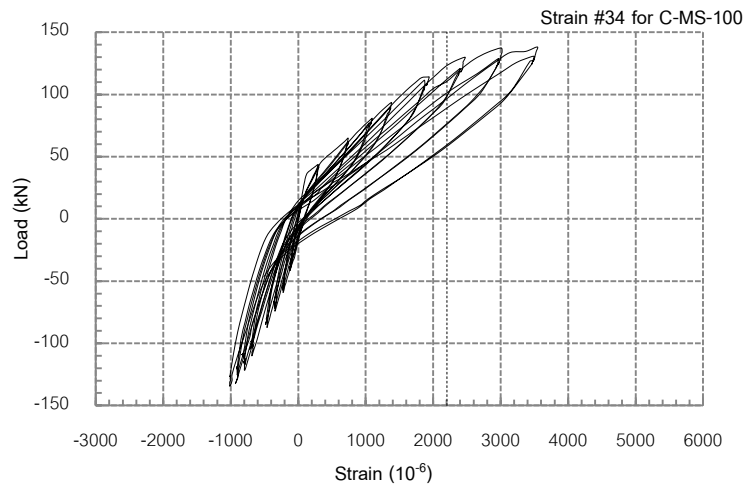
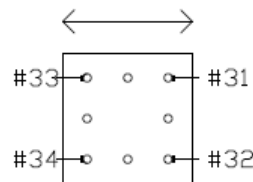
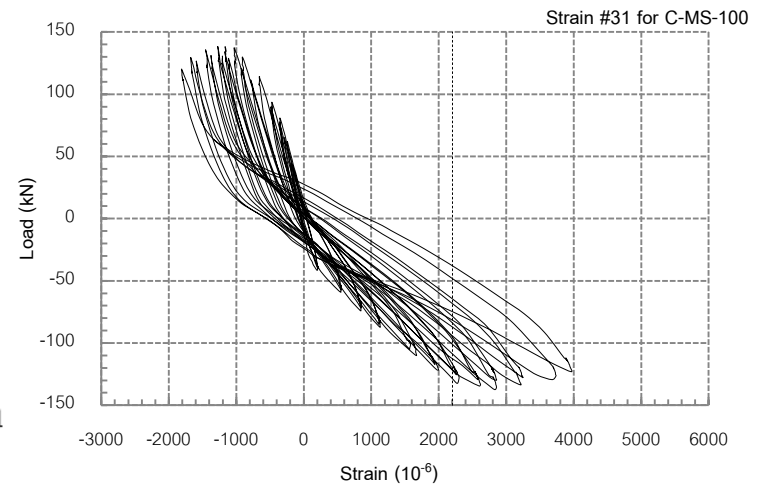
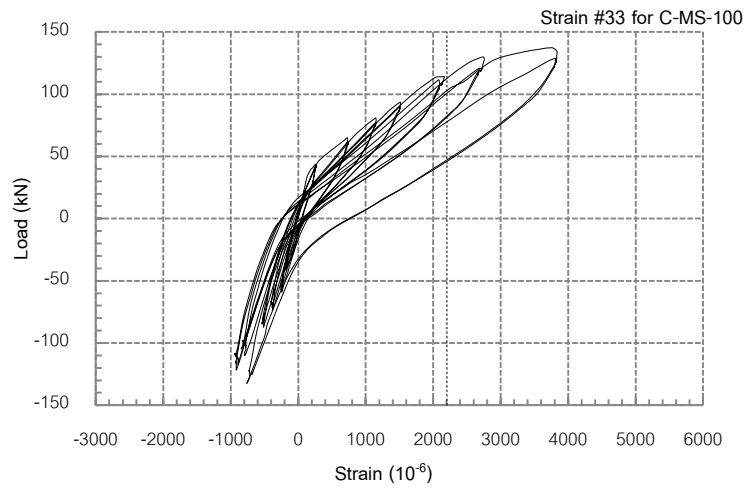


รูปที่ 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 2

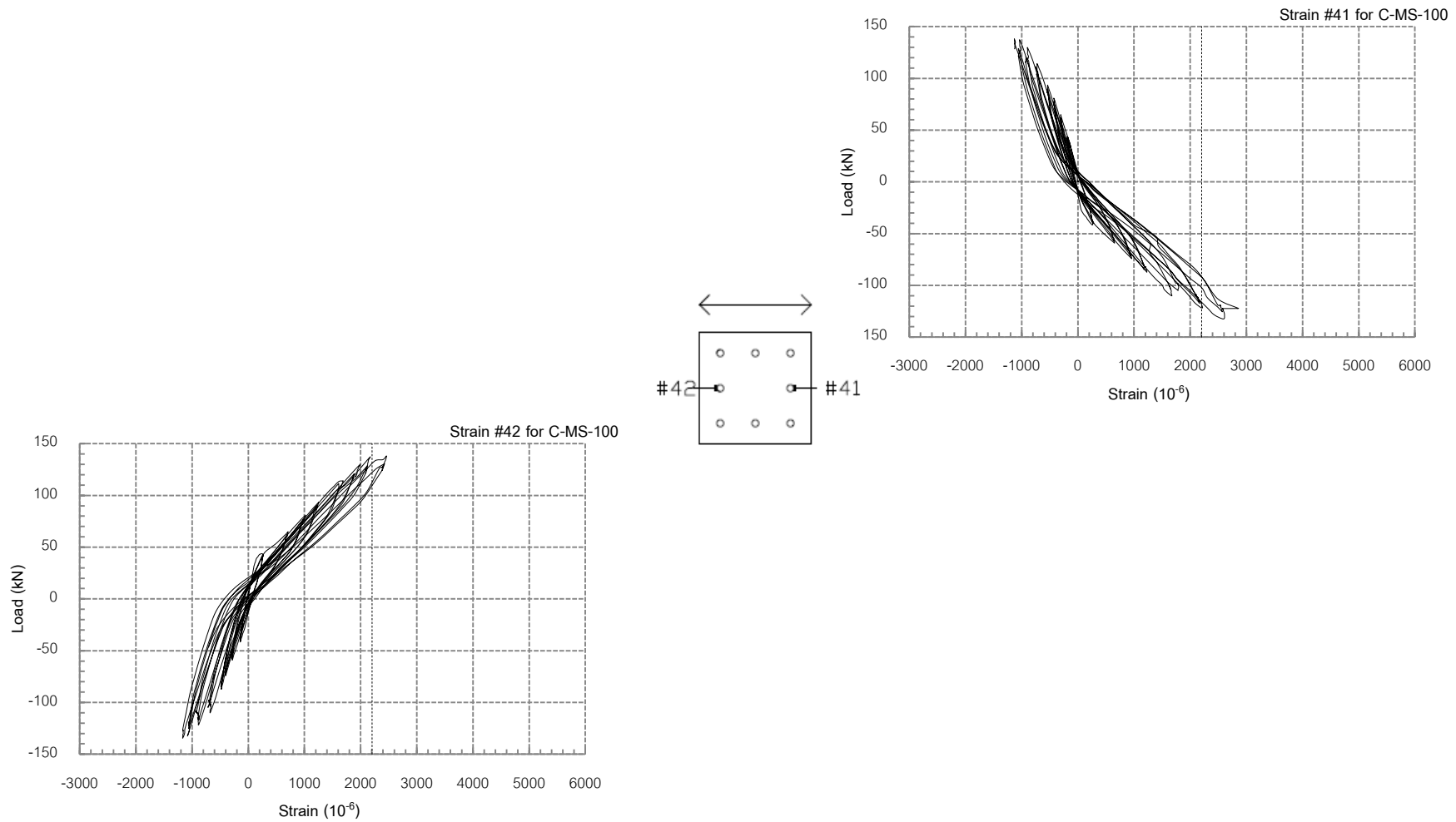




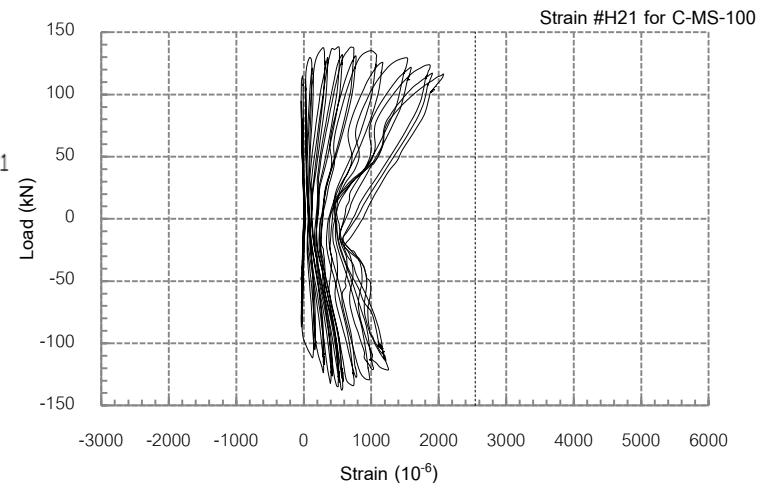
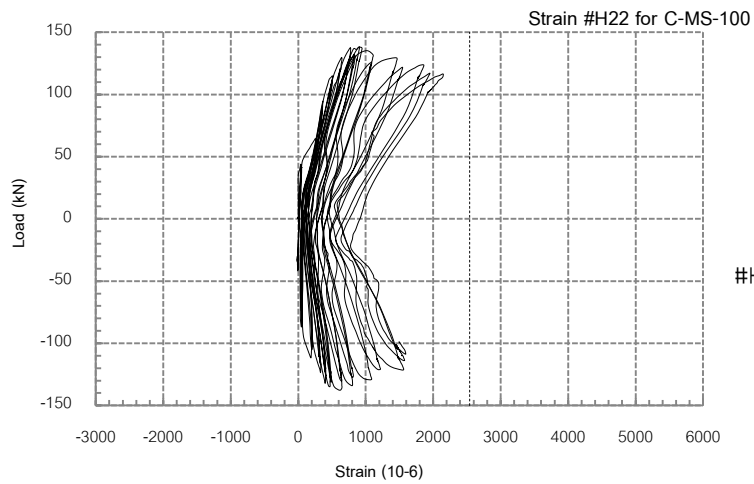
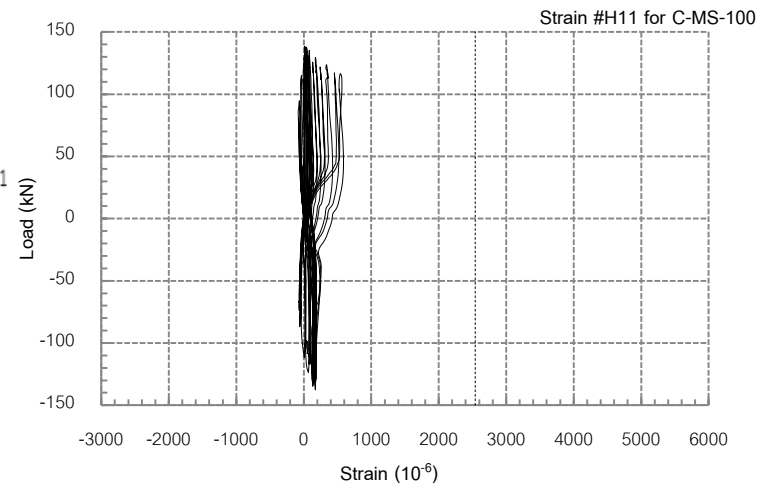
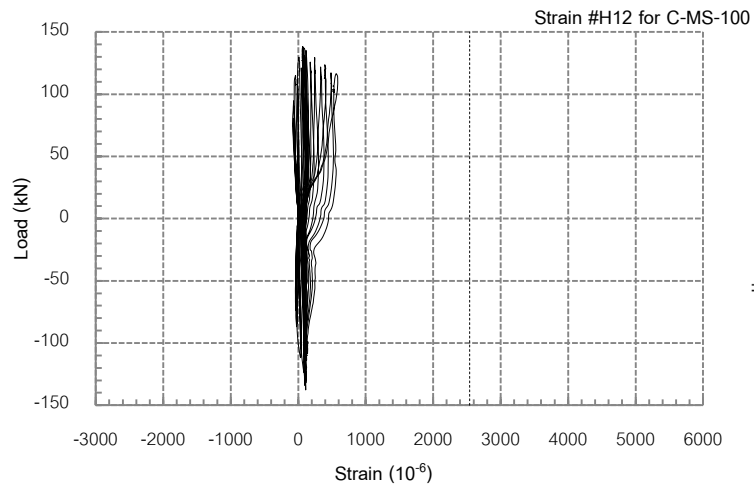
รูปที่ 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 2



รูปที่ 5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 3



รูปที่ 5.58 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 4



รูปที่ 5.59 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างเสา C-MS-100 ในระดับที่ 1 และ 2

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

สำหรับการทดสอบเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำแบบวิฎจักรพบว่า

- พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนแบบดึงพบว่าเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีการเสียรูปมากกว่าเหล็กเสริมปกติ
- พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนแบบอัดพบว่าเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลสามารถชะลอการโก่งเดาะได้โดยที่อัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 12 และ 16 มีแนวโน้มการโก่งเดาะใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่อัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10 และ 12 ตามลำดับ รวมถึงความสามารถในการสลายพลังงานก็มีแนวโน้มเดียวกัน
- สำหรับพฤติกรรมแบบวิฎจักรพบว่า มีแนวโน้มเดียวกับพฤติกรรมเมื่อรับแรงกระทำแบบดึงและรับแรงกระทำแบบอัด โดยสำหรับเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลมีพฤติกรรมในช่วงรับแรงกระทำแบบดึงก่อนถึงจุดครากจะมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดไม่เป็นเส้นตรง และสำหรับพฤติกรรมในช่วงรับแรงกระทำแบบอัด สามารถชะลอการโก่งเดาะได้ช้ากว่าเหล็กเสริมควบคุมซึ่งแสดงถึงความสามารถในการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าเมื่อแรงกระทำเปลี่ยนจากการให้แรงดึงเป็นแรงอัดจะเกิดการเคลื่อนตัวอย่างกะทันหัน (Pinching) เนื่องจากการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลที่ใช้เป็นระบบเกลียวเมื่อมีการรับแรงในลักษณะสลับไปมาส่งผลให้เกิดการเสียรูปของเกลียวภายใน โดยแนวโน้มของการสลายพลังงานสำหรับอัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 10 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุกๆรอบการเพิ่มขึ้นของความเครียด และที่อัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 16 มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับเหล็กเสริมควบคุมโดยมีค่าการสลายพลังงานที่มากกว่า

สำหรับการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมที่ต่อด้วยข้อต่อเชิงกลภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรพบว่า

- ตัวอย่าง C-SP-100 เป็นเสาที่มีการต่อแบบปกติสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด 122.21 kN ที่อัตราการเคลื่อนตัว 2% drift ซึ่งเมื่อรับแรงกระทำไปที่อัตราการเคลื่อนตัวมากๆ คอนกรีตจะเกิดความเสียหายและมีการกะเทาะออกมาส่งผลให้เหล็กเสริมสูญเสียกำลังรับแรงดัดเหนียวของเหล็กที่ต่อแบบ ทำให้ความสามารถในการรับแรงลดลงอย่างกระทันหัน แสดงให้เห็นว่าไม่มีความเหนียว
- ตัวอย่าง C-MS-100 เป็นเสาที่มีการต่อด้วยข้อต่อเชิงกลสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด 137.76 kN ที่อัตราการเคลื่อนที่ 3.4% drift ซึ่งเมื่อรับแรงกระทำไปที่อัตราการเคลื่อนตัวสูง คอนกรีตเกิดการบ่งตัวออกและมีการหลุดร่อนออกของคอนกรีต ส่งผลให้เสาสูญเสียกำลังรับแรงดัด จึงทำให้เหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะซึ่งตำแหน่งการโก่งเดาะเกิดขึ้นที่บริเวณต่อด้วยข้อต่อเชิงกล ส่งผลให้เหล็กเสริมทางขวางเกิดการเสียรูปและเสาเกิดการวิบัติจากการแอ่นออกของเหล็กเสริมทางขวางบริเวณของอทำให้เหล็กเสริมตามยาวไม่สามารถรับแรงตามแนวแกนได้
- จากการวิเคราะห์หาค่าความเหนียวด้วยวิธี การหาระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ณ จุดครากจากจุดที่เหล็กยื่นรับแรงดัดเส้นแรกเริ่มคราก พบว่าเสา C-MS-100 มีความเหนียวมากกว่าเสา C-SP-100 ถึง 2.77 เท่า และเมื่อหาค่าความเหนียวด้วยวิธี การหาระยะการเคลื่อนที่ที่จุดคราก โดยการหาจากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นมาตัดผ่านจุดที่แรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 75 % ของแรงกระทำสูงสุด พบว่าเสา C-MS-100 มีความเหนียวมากกว่าเสา C-SP-100 ถึง 1.61 เท่า
- ความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่าง มีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกันในช่วง (0%-2% drift) ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับลักษณะความเสียหายและเส้นโค้งขอบนอก ที่เห็นได้ชัดหลังจากอัตราการเคลื่อนที่ที่ 2% drift ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างมีความสามารถในการรับแรงที่ต่างกัน โดยเสา C-SP-100 มีค่าการสลายพลังงานสะสมที่อัตราการเคลื่อนที่ที่ 2% เท่ากับ 13503 kN-mm ซึ่งเป็นอัตราการเคลื่อนที่ที่สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงที่สุด จากนั้นสามารถสลายพลังงานได้อีก 65017 kN-mm สำหรับช่วงการลดลงของกำลังรับแรงจนเกิดการวิบัติ และสำหรับเสา C-MS-100 มีค่าการสลายพลังงานสะสมที่อัตราการเคลื่อนที่ที่ 3.4% เท่ากับ 40296 kN-mm ซึ่งเป็นอัตราการเคลื่อนที่ที่สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงที่สุด จากนั้นสามารถสลายพลังงานได้

อีก 194737 kN-mm จนเกิดการวิบัติ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดลงของกำลังรับแรงโดยหลังจากเสาได้รับแรงกระทำสูงสุดแล้วเริ่มมีการสูญเสียความสามารถรับแรงทางด้านข้างโดยนำมาพิจารณาเป็นค่าสลายพลังงานพบว่าเสา C-MS-100 สามารถสลายพลังงานหลังได้รับแรงกระทำสูงสุดมากกว่าเสา C-SP-100 เท่ากับ 4.83 เท่า ซึ่งเป็นผลจากความเหนียวของตัวอย่างเสาทดสอบที่แตกต่างกัน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

- ณ ปัจจุบันมีรูปแบบการต่อทาบเหล็กเสริมหลากหลายวิธี โดยงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาข้อต่อเชิงกลประเภทเกลียวขนาน ซึ่งพิจารณาถึงพฤติกรรมภายใต้แรงตามแนวแกนและแรงแบบวัฏจักร ซึ่งเป็นพฤติกรรมกรรับแรงของโครงสร้างเมื่อได้รับแรงแผ่นดินไหว จึงไม่ได้มีการพิจารณาถึงพฤติกรรมในลักษณะอื่น อาทิเช่น พฤติกรรมความล้าเนื่องจากแรงลักษณะสลับไปมา ดังนั้นสำหรับโครงสร้างบางประเภทที่มีลักษณะการรับแรงที่มีรูปแบบนอกเหนืองานวิจัยนี้ ควรที่จะมีการศึกษาพฤติกรรมกรรับในรูปแบบต่างๆ เพิ่มเติม
- ข้อต่อเชิงกลที่ทำการศึกษามีคุณสมบัติเชิงวัสดุจัดอยู่ในข้อต่อเชิงกลประเภทที่ 2 ซึ่งได้รับการรับรองจากหน่วยงาน International Code Council ถึงคุณสมบัติที่เป็นไปตามข้อกำหนด ACI318 (American Concrete Institute) และ IBC (International Building Code) ซึ่งจัดเป็นข้อต่อเชิงกลประเภทที่ 2 จึงไม่มีการทดสอบเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติในด้านนี้ แต่ถ้าต้องศึกษาถึงพฤติกรรมการทำงานโดยละเอียดของข้อต่อเชิงกลควรมีการศึกษาเพิ่มเติมตั้งแต่ กระบวนการผลิตวัสดุ กระบวนการขึ้นรูป การเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุเนื่องการจะเสียรูปและอุณหภูมิ การทำเกลียว การถ่ายแรงผ่านเกลียว เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลมาพิจารณาถึงคุณสมบัติที่ทางมาตรฐานกล่าวไว้
- สำหรับการทดสอบเสาได้มีการต่อทาบบริเวณโคนเสาเนื่องจากต้องการให้เห็นถึงพฤติกรรมการต่อทาบอย่างชัดเจนเนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดความเสียหายมาก ถึงแม้มาตรฐานการก่อสร้างจะไม่อนุญาตให้มีต่อทาบในกรณีนี้ในการทำงานจริง ดังนั้นลักษณะความเสียหายที่ได้บรรยายไว้อาจไม่เกิดขึ้นสำหรับโครงสร้างที่มีการต่อทาบตามมาตรฐานการก่อสร้าง

- ที่มาของตัวอย่างเสาทดสอบมาจากแบบมาตรฐานเสาสะพานกรมทางหลวงชนบท ซึ่งมีอัตราส่วนแรงในแนวแกน (Axial force ratio) เพียง  $0.082f_c A_g$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่น้อยกว่าเสาอาคาร ส่งผลให้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงพฤติกรรมการต่อทาบภายใต้ ค่าพารามิเตอร์ และดัชนีต่างที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 โดยมีค่า อัตราส่วนความสูงต่อความลึกหน้าตัด, อัตราส่วนโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือน, อัตราส่วนแรงในแนวแกน, ดัชนีเหล็กเสริมตามยาว, ดัชนีเหล็กเสริมตามขวาง



## รายการอ้างอิง

### ภาษาอังกฤษ

- ACI 318M-08. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary  
An ACI StandardISO 19338:2007(E)
- ASTM 2005. ASTM A1034-05b Standard Test Methods for Testing Mechanical Splices  
for Steel Reinforcing Bars. ASTM International, West Conshohocken PA
- Bae, S. Mises A.M. and Bayrak O. 2005. Inelastic Buckling of Reinforcing Bar. ASCE  
Journal of Structural Engineering. 131(2) : 314-321
- Mo, Y. L. and Wang .S. J. 2000. Seismic Behavior of RC Columns with Various Tie  
Configurations. ACI Structural Journal. 126(10) : 1122-1130
- Mounnarath, P. 2006 Seismic Performance of a Precast Concrete Column with Threaded  
Mechanical Splices. Report 2006. Degree of Master of Engineering, Civil  
Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
- Monti, G. and Nuti, C. 1992. Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including  
buckling. ASCE Journal of Structural Engineering. 118(12) : 3268-3284
- Ongsupankul, S., Kanchanalai, T. and Kawashima, K. 2007. Behavior of Reinforced to  
Moderate Seismic Load. Science Asia 33. : 175-185
- Ozcebe, G., and Saatcioglu, M. 1987. Confinement of Concrete Columns for Seismic  
Loading. ACI Structural Journal. 84(4) : 308-315
- Rowell, P. and Gray, E. 2009 High Strain-Rate Testing of Mechanical Couplers U.S. Army  
Engineer Research and Development Center. ERDC TR-09-8
- Sawaroj, A. 2010. Ductility Enhancement of Reinforced-Concrete Columns by Rebar-  
Restraining Collars. Report 2010. Degree of Master of Engineering, Civil  
Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
- Sezen, H. and Moehle, J. P. 2006. Seismic Tests of Concrete Columns with Light  
Transverse Reinforcement ACI Structural Journal. 103(6) : 842-849
- Wehbe, N. I., Saiidi, M. S., and Sanders, D. H. 1999. Seismic Performance of  
Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement. ACI Structural Journal.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ที่มาของพารามิเตอร์ตัวอย่างเสาทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 2 ต้น ซึ่งอ้างอิงจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทที่ไม่ได้มีการคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหว โดยทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาวด้วยข้อต่อเชิงกลเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

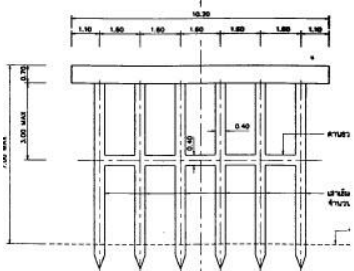
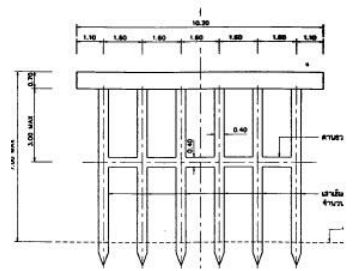
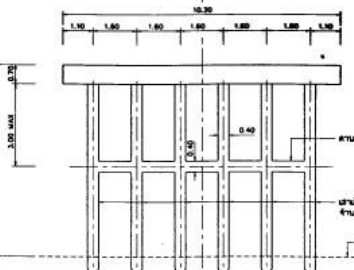
### ลักษณะทั่วไปของสะพานตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท

สะพานที่ถูกออกแบบตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทนั้นไม่ได้คำนึงถึงผลของแผ่นดินไหว โดยได้ออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO โดยมีลักษณะต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

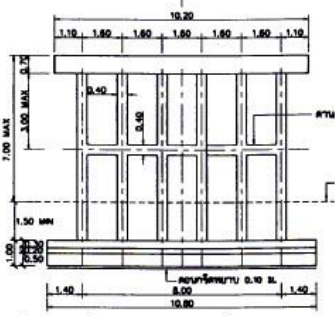
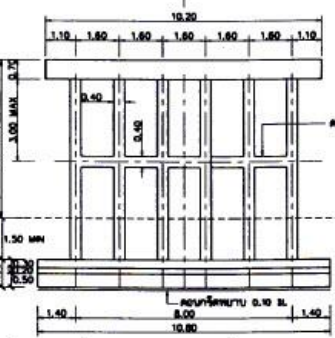
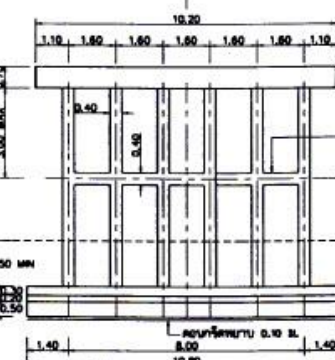
- เสาตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาด 0.40x0.40 เมตร
- เสาตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กรูปทรงกลมซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.8 เมตร ถึง 1.5 เมตร
- ความยาวช่วงสะพาน มีความยาวตั้งแต่ 5-10ม.สำหรับเสาสะพานหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีความยาวตั้งแต่ 10-30 ม.สำหรับเสาสะพานขนาดหน้าตัดรูปทรงกลม
- ฐานรากมีทั้งแบบเสาเข็มและฐานรากแผ่
- ระยะเวลาคุ้มครอง (covering) มีค่าเท่ากับ 0.05 เมตร
- เหล็กเสริมตามยาวมีขนาด 25 มิลลิเมตร โดยกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว มีค่าไม่น้อยกว่า 4000 กก/ชม.2
- เหล็กเสริมทางขวางมีขนาด 9 มิลลิเมตรและ 12 มิลลิเมตร โดยกำลังที่จุดครากของ
- เหล็กเสริมตามขวางมีค่าไม่น้อยกว่า 2400 กก/ชม.2 และ 4000 กก/ชม.2 ตามลำดับ
- กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 250 กก/ชม.2

โดยลักษณะและรายละเอียดที่ได้กล่าวถึงความยาวของช่วงสะพาน, ความหนาและชนิดพื้นสะพาน, ขนาดและจำนวนเสาในแต่ละช่วงความยาวของสะพานที่ตอม่อเป็นแบบเสาเข็มได้แสดงดังตารางที่ ก.1 และสำหรับตอม่อที่มีลักษณะเป็นฐานแผ่ได้แสดงดังตารางที่ ก.2 สำหรับรายละเอียดของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง, อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง และอัตราส่วนแรงในแนวแกนได้แสดงดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.1 ตอม่อกลางชนิดเสาเข็ม

ลักษณะตอม่อกลาง	ช่วงสะพาน (ม.)	ขนาดเสา (ม.)	จำนวน เสา	ความหนา พื้นหล่อในที่ (ม.)
	5	0.40x0.40	6	0.32
	6	0.40x0.40	6	0.36
	7	0.40x0.40	6	0.39
	8	0.40x0.40	6	0.43
	9	0.40x0.40	6	0.47
	10	0.40x0.40	6	0.53

ตารางที่ ก.2 ตอม่อกลางชนิดฐานแผ่

ลักษณะตอม่อกลาง	ช่วงสะพาน (ม.)	ขนาดเสา (ม.)	จำนวน เสา	ความหนา พื้นหล่อในที่ (ม.)
	5	0.40x0.40	6	0.32
	6	0.40x0.40	6	0.36
	7	0.40x0.40	6	0.39
	8	0.40x0.40	6	0.43
	9	0.40x0.40	6	0.47
	10	0.40x0.40	6	0.53

ตารางที่ ก.3 เสาสะพานภูมิภาคในเขตชุมชนขนาดเล็กช่วง 5-10 เมตร

ความยาวช่วง (เมตร)	ชนิดพื้น	ขนาดตอม่อ (เมตร)	เหล็กเสริม ตามยาว	อัตราส่วน เหล็กเสริม ตามยาว	เหล็กปลอก	อัตราส่วนเหล็ก เสริมตามขวาง
5	หล่อในที่	0.40x0.40	8-DB25	0.0245	DB12@200 มม.	0.00753
6	หล่อในที่	0.40x0.40	8-DB25	0.0245	DB12@200 มม.	0.00753
7	หล่อในที่	0.40x0.40	8-DB25	0.0245	DB12@200 มม.	0.00753
8	หล่อในที่	0.40x0.40	8-DB25	0.0245	DB12@200 มม.	0.00753
9	หล่อในที่	0.40x0.40	8-DB25	0.0245	DB12@200 มม.	0.00753
10	หล่อในที่	0.40x0.40	8-DB25	0.0245	DB12@200 มม.	0.00753

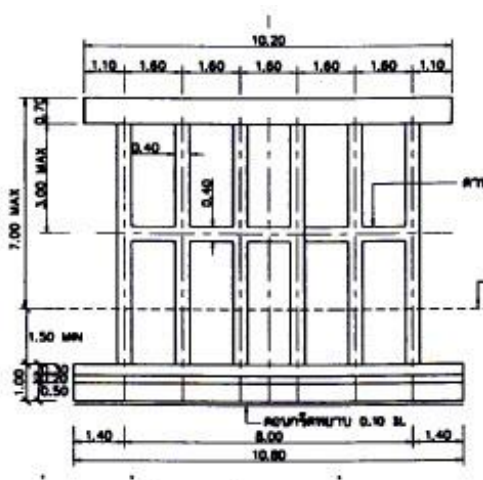




รายละเอียดแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ปี 2553 (สะพานภูมิภาคในเขตชุมชน  
ขนาดเล็กช่วง 10 เมตร)

ความยาว ช่วง (เมตร)	ความกว้าง พื้นสะพาน (เมตร)	ชนิด พื้น	ความหนา พื้น (เมตร)	ขนาดคาน หัวเสา (เมตร)	ความยาวคาน หัวเสา (เมตร)	ขนาดคาน ขวาง (เมตร)	ความยาวคาน ขวาง (เมตร)	ขนาด ตอม่อ (เมตร)	จำนวน เสา
10	10	หล่อ ในที่	0.53	0.7 x 0.5	10.2	0.4 x 0.4	9	0.40 x 0.40	6

ความหนา ทางเท้า (เมตร)	ความกว้าง ทางเท้า (เมตร)	ขนาดเสา ระวาง (เมตร)	ความสูงเสา ระวาง (เมตร)	จำนวนเสา ระวาง	ขนาด ระวาง (เมตร)	จำนวน ระวาง	ความยาว ระวาง (เมตร)
0.2	1.75	0.2 x 0.325	0.8	6	0.2 x 0.15 0.3 x 0.15	2	10



สะพานที่ใช้ในการคำนวณเป็นสะพานขนาดเล็กชนิดตอม่อฐานแผ่ ช่วงสะพานยาว 10 เมตร  
ในตอม่อกลางของสะพานนั้นมีเสาสะพานจำนวน 6 เสา โดยจะคำนวณหาน้ำหนักที่กระทำกับเสา  
แต่ละต้นดังต่อไปนี้

- น้ำหนักพื้นสะพาน (พื้นหล่อในที่)  
พื้นหล่อในที่มีความหนา 0.53 เมตร  
ช่วงสะพานยาว 10 เมตร  
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
น้ำหนักพื้นสะพาน =  $0.53 \times 10 \times 2400 = 12720$  กิโลกรัมต่อเมตร

- **น้ำนักคานหัวเสา**

ขนาดคานหัวเสา		0.7 x 0.5 เมตร
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก	2400	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
น้ำนักคานหัวเสา	$= 0.7 \times 0.5 \times 2400 =$	840 กิโลกรัมต่อเมตร
- **น้ำนักตอม่อ**

ขนาดตอม่อ		0.4 x 0.4 เมตร
ความสูงของเสาตอม่อ	7.8	เมตร
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก	2400	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
น้ำนักคานหัวเสา	$= 0.4 \times 0.4 \times 7.8 \times 2400 =$	2995.2 กิโลกรัมต่อเสาตอม่อ
- **น้ำนักคานขวาง**

ขนาดคานขวาง		0.4 x 0.4 เมตร
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก	2400	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
น้ำนักคานขวาง	$= 0.4 \times 0.4 \times 2400 =$	384 กิโลกรัมต่อเมตร
- **น้ำนักทางเท้า**

ทางเท้าความกว้างด้านละ	1.75	เมตร
ความหนาของทางเท้า	0.20	เมตร
ความยาวทางเท้า	10	เมตร
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก	2400	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ระยะของทางเท้าที่วางบนคานหัวเสาด้านละ	0.6	เมตร
น้ำนักทางเท้า	$= 1.75 \times 0.20 \times 10 \times 2400 / 0.6 =$	14000 กิโลกรัมต่อเมตร
- **น้ำนักเสาราวสะพาน**

ขนาดเสาราวสะพาน		0.2 x 0.325 ตารางเมตร
ความสูงเสาราวสะพาน	0.8	เมตร
จำนวนเสาราวสะพาน	12	ต้น
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก	2400	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
น้ำนักเสาราวสะพาน	$= 0.2 \times 0.325 \times 0.8 \times 6 \times 2400 =$	1497.6 กิโลกรัม

- น้ำหนักราวสะพาน

ขนาดราวสะพาน 0.2 x 0.15 ตารางเมตร

ขนาดราวสะพาน 0.3 x 0.15 ตารางเมตร

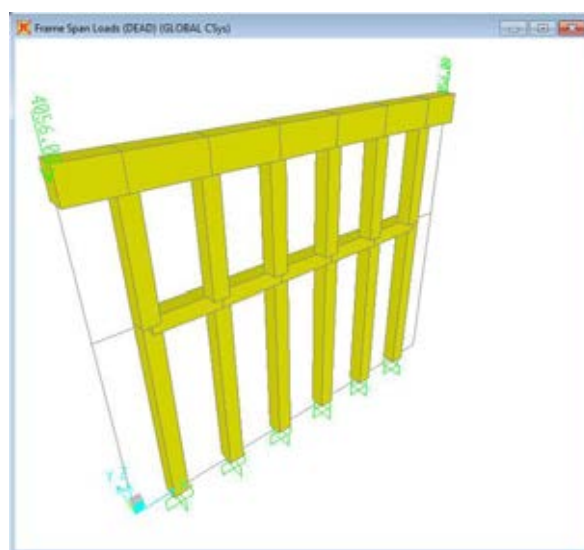
ความยาวราวสะพาน 10 เมตร

หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักราวสะพาน =  $((0.2 \times 0.15) + (0.3 \times 0.15)) \times 10 \times 2400 = 1800$  กิโลกรัม

ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000 V.14.2.2 เพื่อคำนวณแรงกระทำตามแนวกั้นกับเสาตอม่อสะพาน โดยจำลองโครงสร้างสะพานตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท และระบุน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างดังที่แสดงไว้ข้างต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถหาค่าแรงกระทำของแต่ละเสาตอม่อกลางได้ดังนี้

เสา	น้ำหนักที่กระทำกับเสาตอม่อ (ตัน)
1	35.45
2	28.77
3	27.45
4	27.45
5	28.77
6	35.45
sum	183.34
avg	30.56



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเพชร เครือวิทย์ เกิดวันพฤหัสบดีที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนบุญวาทวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2554t