การเพิ่มความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

นายอาชวิน สวโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DUCTILITY ENHANCEMENT OF REINFORCED-CONCRETE COLUMNS
BY REBAR-RESTRAINING COLLARS

MR. ARCHAWIN SAWAROJ

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 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
โดย	นายอาชวิน สวโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสณฑ์ อุดมวรรัตน์)

อาชวิน สวโรจน์ : การเพิ่มความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม. (DUCTILITY ENHANCEMENT OF REINFORCED-CONCRETE COLUMNS BY REBAR-RESTRAINING COLLARS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. อาณัติ เรืองรัศมี, 190 หน้า.

เมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร จะส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงเนื่องจากเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะบริเวณจุดหมุนพลาสติก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพื่อชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรจำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 0.40 เมตร x0.40 เมตร สูง 2.15 เมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งทั้ง 2 ตัวอย่างมีอัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 0.0123 และมีอัตราส่วนปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 0.00424 จากผลการทดสอบเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนพบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถเพิ่มกำลังหลังจุดครากของเหล็กเสริมตามยาวให้ดีขึ้นและมีการสลายพลังงานที่ดี

จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร พบว่าตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้เป็นอย่างดี โดยตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นประมาณ 27% เสาที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีระยะจุดหมุนพลาสติกน้อยกว่าเสาที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

สุดท้ายได้วิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองไฟเบอร์กับผลการทดสอบเสาจริง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ พารามิเตอร์ของแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวมีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่

ภาควิชา......วิศวกรรมโยธา...... ลายมือชื่อนิสิต...

สาขาวิชา......วิศวกรรมโยธา...... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..............................

ปีการศึกษา.......2552.......................

5070520921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEYWORDS : REBAR-RESTRAINING COLLARS / CYCLIC LOAD / REINFORCED-CONCRETE COLUMN / FIBER MODEL

ARCHAWIN SAWOROJ : DUCTILITY ENHANCEMENT OF REINFORCED-CONCRETE COLUMNS BY REBAR-RESTRAINING COLLARS.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ANAT RUANGRUSSAMEE, Ph.D., 190 pp.

When reinforced-concrete columns are subjected to lateral cyclic loading, columns usually suffers failures at plastic hinges. If the buckling of longitudinal reinforcements at plastic hinges can be prevented or delayed, columns are expected to carry gravity loads and to have higher ductility. In this study, rebar-restraining collars are developed to delay buckling of longitudinal reinforcement and are investigated under monotonic loading tests of the reinforcement with the rebar-restraining collars and the cyclic loading tests of two reinforced-concrete columns with and without rebar-restraining collars. From the monotonic loading test, it is found that the rebar-restraining collars significantly improve the post-yielding behavior of the longitudinal reinforcement. Energy dissipation of the longitudinal reinforcement with rebar-restraining collars is higher than the bare bar.

Then, cyclic loading tests of two reinforced-concrete columns are conducted. The cross section of columns is 0.4m x 0.4m, and columns height is 2.15m. The ratio of longitudinal reinforcement is 0.0123, and the volumetric ratio of transverse reinforcement is 0.00424. The column with rebar-restraining collars does not show buckling of longitudinal reinforcement and has the ductility enhancement about 27%, comparing to the column without rebar-restraining collars. The plastic hinge zone of the column with rebar-restraining collars is smaller than that without rebar-restraining collars.

Finally, the behaviors of columns are analyzed using the fiber model. The relationships of lateral force and deformation agree to a certain level with the investigated results. It is found that parameters of the longitudinal reinforcement model significantly affect to the lateral force and deformation relationships of columns.

Department : Civil Engineering Student's Signature ....
Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature ....
Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี ซึ่งได้ให้คำปรึกษา จัดหาข้อมูลที่สำคัญ ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างเพื่อที่ผู้เขียนนำมาใช้ในการเรียบเรียงเนื้อหาในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ทุกท่านคือ ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสณฑ์ อุดมวรรัตน์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้ให้คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยตรวจแก้ไขในส่วนที่บกพร่องต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้น จนกระทั่งเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จเป็นรูปเล่ม

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจจนสามารถทำการค้นคว้าอิสระฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ

กิตติกรรมประกาศ...ฉ

สารบัญ ....ช

สารบัญตาราง... ญ

สารบัญรูปภาพ .... ฎ

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสาภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร 5

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะในการทดสอบเสริมเหล็กรับแรงกดและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร...16

2.2 คุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว..............................17

2.2.1 สติฟเนส (stiffness) 17

2.2.2 กำลังของโครงสร้าง (strength) 18

2.2.3 ความเหนียวโครงสร้าง (ductility) 18

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่.............................21

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์...23

2.5 แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย 28

2.5.1 แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด 28

2.5.2 แบบจำลองของคอนกรีตมีมีการโอบรัด...29

2.5.3 แบบจำลองเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร 32

บทที่ 3 การทดสอบปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม..34

3.1 คุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม...34

3.2 การเตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสำหรับทดสอบ....35
3.3 การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม....37
3.4 ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม....38
บทที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมเสาตัวอย่างและการทดสอบ....41
4.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ....41
4.2 คุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบ....44
4.2.1 คอนกรีต....44
4.2.2 เหล็กเสริม....45
4.2.3 เกจวัดความเครียด....46
4.3 การเตรียมตัวอย่างเสา....47
4.4 การเตรียมการทดสอบ....53
4.4.1 การติดตั้งตัวอย่าง....53
4.4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำกับตัวอย่างเสา....55
4.4.3 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่....58
4.4.4 หน่วยรวบรวมข้อมูล....61
4.5 ขั้นตอนการทดสอบ....61
4.6 การปรับแก้ผลการทดสอบ....63
4.6.1 การปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง..63
4.6.2 การปรับแก้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงเนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก....69
บทที่ 5 ผลการทดสอบ....73
5.1 พฤติกรรมของตัวอย่างเสาที่สังเกตระหว่างการทดสอบ....73
5.1.1 ตัวอย่างเสา C-09-200....73
5.1.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200....74
5.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมในระหว่างการทดสอบ....81
5.2.1 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200....81
5.2.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200....83
5.2.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200....84
5.2.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200....86
5.2.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200....87
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง....88

5.3.1 ตัวอย่างเสา C-09-200 89
5.3.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200 91
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง (moment-curvature relation) 94
5.4.1 ตัวอย่างเสา C-09-200 94
5.4.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200 96
5.5 ค่าความเหนียว...97
5.6 ความสามารถในการสลายพลังงาน 103
5.7 ค่าสติฟเนส (stiffness) 105
บทที่ 6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์...107
6.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ 107
6.2 พารามิเตอร์ที่ศึกษา 108
6.2.1 ความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์...108
6.2.2 พารามิเตอร์ในแบบจำลองเหล็กเสริม 110
6.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์ 115
6.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่...............................115
6.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง...115
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ...118
7.1 สรุปผลการวิจัย 118
7.2 ข้อเสนอแนะ...119
รายการอ้างอิง..120
ภาคผนวก ก 123
ภาคผนวก ข 131
ภาคผนวก ค 136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์...190

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา (Park และคณะ, 1982) 6
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา (Ozcebe และ Staatcioglu, 1987) 8
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเสา (Wehbe และคณะ,1999) 11
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา Lukkunaprasit และ Sittipunt (2003) 12
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา Ongsupankul และคณะ (2006)....14
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเกรด SS400 ที่ใช้ทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม 35
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดขนาดปลอกยึดยั้งเหล็กเสริม 36
ตารางที่ 4.1 สรุปการออกแบบของตัวอย่างเสา 42
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต....44
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริม DB25 45
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริม RB9 45
ตารางที่ 4.5 ค่าก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง 65
ตารางที่ 4.6 ค่าก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง 71
ตารางที่ 5.1 ค่าความเหนียวจากวิธีที่ได้มีการเสนอในแบบต่างๆ....103
ตารางที่ 5.2 การสะลายพลังงานของตัวอย่างเสาแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 104
ตารางที่ 5.3 ค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสาในแต่ละรอบการทดสอบ....106
ตารางที่ 6.1 ระยะจุดหมุนพลาสติกของนักวิจัยที่ได้เสนอในอดีต 109

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน 2
รูปที่ 2.1 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Park และคณะ, 1982)...............................5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Park และคณะ, 1982)..................6
รูปที่ 2.3 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Ozceve และ Staacioglu, 1987)...............8
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างและสภาพเสาหลังการทดสอบ
(Ozcebe และ Staacioglu, 1987) 9
รูปที่ 2.5 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Wehbe และคณะ,1999) 10
รูปที่ 2.6 ผลของแรงตามแนวแกนที่มีต่อความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (Wehbe และคณะ,
1999) 11
รูปที่ 2.7 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003)........12
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา
(Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003) 13
รูปที่ 2.9 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Ongsupankul และคณะ, 2006) 14
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา
(Ongsupankul และคณะ, 2006)...15
รูปที่ 2.11 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Priestley และ Park (1897)....19
รูปที่ 2.12 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Sheikh และ Khoury (1993) ..19
รูปที่ 2.13 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Paultre และคณะ (2001).......20
รูปที่ 2.14 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Legeron และ Pualtre (2002)20
รูปที่ 2.15 แบบจำลองไฟเบอร์...24
รูปที่ 2.16 ดีกรีความอิสระสำหรับชิ้นส่วนย่อยของเสา...25
รูปที่ 2.17 รายละเอียดหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ 26
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของ Kent และ Park (1971) 29
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ
Hoshikuma และคณะ (1997) 30
รูปที่ 2.20 แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม
ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรของ Menegotto และ Pinto (1973) 32
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเกรด SS400 35
รูปที่ 3.2 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความยาว 36

รูปที่ 3.3 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรความหนา 37
รูปที่ 3.4 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม 38
รูปที่ 3.5 การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม 38
รูปที่ 3.6 ผลทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความยาว 39
รูปที่ 3.7 ผลทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความหนา 39
รูปที่ 3.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งแปรผันขนาดความยาว 40
รูปที่ 3.9 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งแปรผันขนาดความหนา 40
รูปที่ 4.1 รายละเอียดเหล็กเสริมของหน้าตัดของเสาตามขวางของตัวอย่างเสา 42
รูปที่ 4.2 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา 43
รูปที่ 4.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมและปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมบริเวณจุดหมุนพลาสติก 43
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม DB25 45
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม RB9 46
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา C-09-200 47
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา CC-09-200 47
รูปที่ 4.8 การประกอบของเหล็กเสริมตามยาวและฐานรากเข้าด้วยกัน 49
รูปที่ 4.9 การวางตำแหน่งของเหล็กเสริมตามยาวและท่อพีวีซี 50
รูปที่ 4.10 ลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา CC-09-200 50
รูปที่ 4.11 ลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา C-09-200 51
รูปที่ 4.12 การยึดรั้งแบบหล่อตัวอย่างเสา 51
รูปที่ 4.13 การเก็บตัวอย่างคอนกรีต 52
รูปที่ 4.14 การใช้กระสอบเปียกบ่มตัวอย่างเสา 52
รูปที่ 4.15 รูปแบบติดตั้งเสาทดสอบทางด้านข้าง 54
รูปที่ 4.16 รูปแบบการติดตั้งเสาทางด้านหน้า 54
รูปที่ 4.17 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ 55
รูปที่ 4.18 การติดตั้งเหล็กสำหรับจับยึดเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ 56
รูปที่ 4.19 การใช้อุปกรณ์ยึดติดฐานรากด้วยวิธีอัดแรง 56
รูปที่ 4.20 การติดตั้งคานเหล็กให้แรงในแนวดิ่ง 57
รูปที่ 4.21 การติดตั้งเครื่องให้แรงแบบใช้มือควบคุม 57
รูปที่ 4.22 การติดตั้งแผ่นเหล็กยึดติดกับเหล็กส่วนหน้าของเครื่องให้แรงในแนวราบ 58

รูปที่ 4.23 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ 59
รูปที่ 4.24 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา 60
รูปที่ 4.25 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ใช้วัดการหมุนบริเวณโคนเสา 60
รูปที่ 4.26 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ใช้วัดการหมุนของฐานราก 60
รูปที่ 4.27 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ของฐานราก 61
รูปที่ 4.28 เครื่องเก็บข้อมูลและลักษณะการต่อสายอุปกรณ์ 61
รูปที่ 4.29 ประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ 62
รูปที่ 4.30 การปรับแก้เนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนที่ไม่อยู่ในแนวดิ่ง 64
รูปที่ 4.31 วงรอบฮิซเทียรีซีซก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ C-09-200 66
รูปที่ 4.32 วงรอบฮิซเทียรีซีซหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ C-09-200 66
รูปที่ 4.33 ผลต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ C-09-200........67
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของเครื่องมือที่ใช้วัดระยะเคลื่อนที่ในฮิซเทียรีซีซของ C-09-200..........67
รูปที่ 4.35 วงรอบฮิซเทียรีซีซก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ CC-09-200 68
รูปที่ 4.36 วงรอบฮิซเทียรีซีซหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ CC-09-200 68
รูปที่ 4.37 ผลต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ CC-09-200 69
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ของเครื่องมือที่ใช้วัดระยะเคลื่อนที่ในฮิซเทียรีซีซของ CC-09-200 69
รูปที่ 4.39 การปรับแก้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงเนื่องจากการหมุนและไถลของ
ฐานราก 70
รูปที่ 4.40 ระยะที่ใช้ปรับแก้เนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากของ C-09-200 72
รูปที่ 4.41 ระยะที่ใช้ปรับแก้เนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากของ CC-09-200..72
รูปที่ 5.1 รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ 75
รูปที่ 5.2 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200 79
รูปที่ 5.3 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200............80
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในที่
ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200 82
รูปที่ 5.5 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200 82
รูปที่ 5.6 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนของตัวอย่างเสา C-09-200 82
รูปที่ 5.7 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200..............83
รูปที่ 5.8 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบนของตัวอย่างเสา C-09-200...............84
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านใน
ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200 85

รูปที่ 5.10 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200...........85
รูปที่ 5.11 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนของตัวอย่างเสา CC-09-200............86
รูปที่ 5.12 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200 87
รูปที่ 5.13 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบนของตัวอย่างเสา CC-09-200 87
รูปที่ 5.14 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200 88
รูปที่ 5.15 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200 88
รูปที่ 5.16 วงรอบฮิซเทียรีซีซของตัวอย่างเสา C-09-200..90
รูปที่ 5.17 เส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างเสา C-09-200..90
รูปที่ 5.18 เส้นโค้งขอบนอกแรงกระทำสูงสุดและแรงที่เกิดการวิบัติตัวอย่างเสา C-09-200 91
รูปที่ 5.19 วงรอบฮิซเทียรีซีซของตัวอย่างเสา CC-09-200 92
รูปที่ 5.20 เส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างเสา CC-09-200 92
รูปที่ 5.21 เส้นโค้งขอบนอกแรงกระทำสูงสุดและแรงที่เกิดการวิบัติตัวอย่างเสา CC-09-200.....93
รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบวงรอบฮิซเทียรีซีซของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 93
รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบจากกราฟเส้นโค้งขอบนอก 94
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา C-09-200 95
รูปที่ 5.25 การหลุดร่อนของกระจกรองเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่...96
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200 ที่ 96
รูปที่ 5.27 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Priestley และ Park (1987) 98
รูปที่ 5.28 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury (1993).......................................99
รูปที่ 5.29 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Paultre และคณะ (2001) 100
รูปที่ 5.30 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury (2002).....................................101
รูปที่ 5.31 ค่าความเหนียวที่จุดครากแรกของเหล็กเสริม 102
รูปที่ 5.32 การสลายพลังงานสะสมของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ..105
รูปที่ 5.33 ค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ...105
รูปที่ 6.1 รูปแบบของแบบจำลองไฟเบอร์ 108
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์แรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ของตัวอย่างเสาซึ่งมีผลของ
เหล็กเสริมเหล็กตามยาวเป็นหลัก 111
รูปที่ 6.3 ความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ
ด้านข้างกับอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 109
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่เมื่อใช้พารามิเตอร์ที่
เสนอโดย Menegotto และ Pinto (1973) 111

รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า R_0 ต่างๆ 112
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า a_1 ต่างๆ 113
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า a_2 ต่างๆ 114
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ตัวอย่างเสา CC-09-200 .115
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแบบจำลองไฟเบอร์ 116
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความโค้งกับโมเมนต์ดัดของตัวอย่างเสา C-12-090 117

บทที่ 1

บทนำ

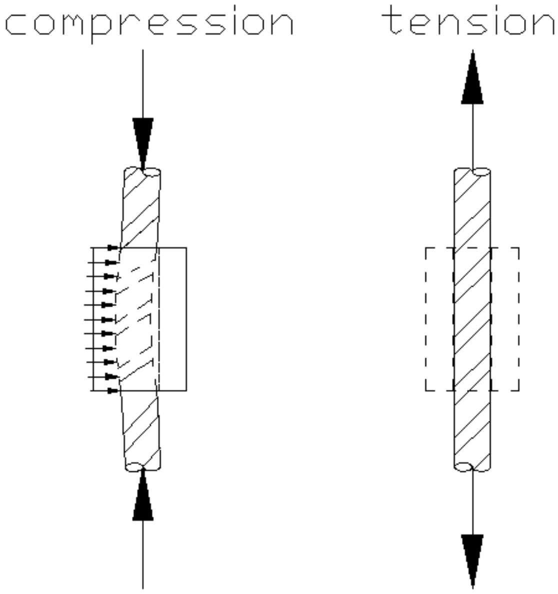
1.1 ความเป็นมา

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ยากแก่การพยากรณ์ไม่ว่าจะเป็นขนาดความแรงและเวลาที่เกิดของแผ่นดินไหว การเกิดแผ่นดินไหวทำให้โครงสร้างเกิดการเสียหายอาจถึงขั้นเกิดการพังทลายซึ่งทำลายทั้งชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในอดีตได้คร่าชีวิตประชากรเป็นจำนวนมาก สาเหตุสำคัญของโครงสร้างเกิดการเสียหายและพังทลายเกิดจากโครงสร้างมีความสามารถในการรับแรงน้ำหนักลดลงเมื่อโครงสร้างเกิดการสั่นไหวเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว และเกิดการวิบัติโดยสิ้นเชิง

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้าง พบว่าเสาที่มีการเสริมเหล็กเสริมตามขวางไม่เพียงพอบริเวณจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge length) ทำให้เหล็กเสริมตามยาวขาดการยึดรั้งที่เพียงพอจากทางด้านข้าง ส่งผลให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ (buckling) และทำให้สูญเสียกำลังรับน้ำหนักและเกิดการวิบัติโดยสิ้นเชิง งานวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงสมรรถนะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพัฒนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (rebar-restraining collars) ติดตั้งโดยสวมกับเหล็กเสริมตามยาวบริเวณจุดหมุนพลาสติก เพื่อเพิ่มการยึดรั้งทางด้านข้างของเหล็กเสริมป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ, เพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเมื่อเสาได้รับแรงด้านข้างแบบวัฏจักรมากระทำเหล็กเสริมตามยาวจะทำหน้าที่รับแรงดึงและแรงอัดหนึ่งสลับไปมา ซึ่งเมื่อเหล็กเสริมตามยาวภายในเสาได้รับแรงอัดอาจส่งผลให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพื่อชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจะทำงานก็ต่อเมื่อชิ้นส่วนของเหล็กเสริมนั้นทำหน้าที่รับแรงอัด ในทางกลับกันเมื่อชิ้นส่วนของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไม่ได้ช่วยรับแรงโดยยอมให้เหล็กเสริมยืดได้ตามความยาว หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 1.1 การเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเป็นการเพิ่มหน้าตัดขวางในการรับแรงอัดให้กับเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งส่งผลให้มีเหล็กเสริมมีกำลังและความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน พฤติกรรมของเสาเมื่อเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถช่วยชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณจุดหมุนพลาสติก เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะช้าลง จึงทำให้บริเวณจุดหมุนพลาสติกนั้นเกิด

เกิดความเสียหายลดลง ซึ่งส่งผลให้สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังเป็นการเพิ่มค่าความเหนียวให้กับเสาอีกด้วย



รูปที่ 1.1 หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยที่ศึกษามีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. พัฒนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. ศึกษาพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน
3. ศึกษาพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
4. ศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างเสาที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมกับเสาที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยที่ศึกษามีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. เหล็กที่ใช้ทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมนั้นเป็นเหล็กเกรด SS400
2. เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบขนาดหน้าตัดตามขวาง 0.40 ม.×0.40 ม. ซึ่งตัวอย่างเสาทดสอบเป็นเสาที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเสาที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยกำหนดตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักเสาดังต่อไปนี้

ก. กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วันมีค่าประมาณ 34.3 เมกกะปาสคาล (350 กก./ซม.^{2}) และมีแรงอัดตามแนวแกน (axial load ratio) มีค่า 0.057 $f_c^{'}A_g$

ข. อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวมีค่าเท่ากับ 1.23%

ค. ตัวอย่างเสาทดสอบพิจารณาเสาเดี่ยว

3. แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ใช้ในแบบจำลองไฟเบอร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด ซึ่งใช้แบบจำลองของ Kent และ Park (1971)

ข. แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ซึ่งใช้แบบจำลองของ Hoshikuma และคณะ (1997)

ค. แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงวัฏจักร ซึ่งใช้แบบจำลองของ Menegotto และ Pinto (1973)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดจะได้รับจากงานวิจัยนี้ในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. เข้าใจพฤติกรรมและปัจจัยที่มีผลต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงอัดในแนวแกน

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยที่ศึกษามีขั้นตอนดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่มีลักษณะเกี่ยวของกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ งานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงอัด, งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสาภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร, แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด, แบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร
2. เตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งเป็นเหล็กเสริมตามยาวขนาดเดียวกับตัวอย่างเสาที่ทดสอบโดยมีการติดตั้งปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งเป็นเหล็กเกรด SS400 โดยพิจารณาความหนาและความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

3. ทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสม เพื่อที่จะติดตั้งในเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
4. เตรียมตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดหน้าตัด 0.40 ม.x0.40 ม. จำนวน 2 ต้น ซึ่งอ้างอิงจากแบบเสาสะพานของกรมทางหลวงชนบท โดยเสาต้นแรกได้เตรียมตัวอย่างตามแบบเสาสะพานของกรมทางหลวงชนบท และเสาต้นที่สองได้มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพิ่มในเสาบริเวณจุดหมุนพลาสติก
5. ทดสอบเสาในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบเสาภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร ซึ่งการทดสอบแบบควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement control) และแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ และได้เก็บข้อมูลจากเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ไฟฟ้า, เกจวัดความเครียด และข้อมูลที่ได้จากเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง (actuator) ได้แก่ แรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ของเครื่องให้แรงทางด้านข้าง
6. วิเคราะห์ผลของเสาที่ได้ทดสอบ โดยวิเคราะห์จากข้อมูลต่างๆที่เก็บในการทดสอบ และเปรียบเทียบผลระหว่างเสาคอนกรีตที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมกับเสาคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
7. ศึกษาพฤติกรรมของเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
8. สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์เสาที่ทดสอบ ซึ่งใช้แบบจำลองไฟเบอร์เพื่อจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม TDAP3 ในการวิเคราะห์
9. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์โปรแกรม
10. สรุปผลการวิจัย
11. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

งานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

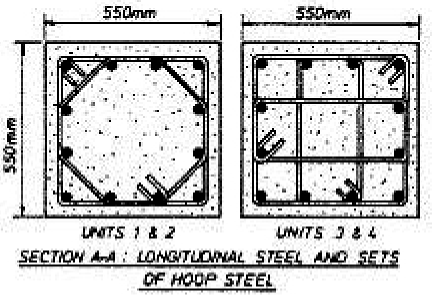
ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวของกับงานวิจัยนี้ และคุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว, การวิเคราะห์โครงสร้างพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการวิเคราะห์ รวมถึงแบบจำลอง ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาค้นคว้าเพื่อเป็นแนวทางและแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ได้ความรู้ความเข้าใจจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลจากแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร และพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวเมื่อรับแรงอัดและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสาภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

Park และคณะ (1982) ได้ทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.55 ม.x0.55 ม. สูง 3.30 ม. จำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลแรงกระทำตามแนวแกนและปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง โดยปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของนิวซีแลนด์ (New Zealand Code) ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้ดังในแสดงรูปที่ 2.1 และคุณสมบัติต่างๆของเสาแสดงในตารางที่ 2.1



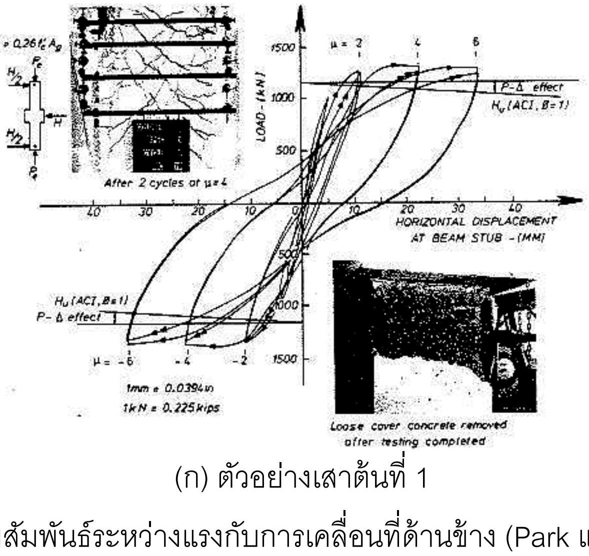
รูปที่ 2.1 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Park และคณะ, 1982)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา (Park และคณะ, 1982)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load		Reinforcement			
		Force (kN)	Ratio P/fc'Ag	Longitudinal		Transverse	
				f_{yl} (MPa)	ρ_l	f_{yt} (MPa)	ρ_s
1	23.1	1815	0.26	375	0.0179	455	0.015
2	41.1	2680	0.214	375	0.0179	455	0.023
3	21.4	2719	0.42	375	0.0179	455	0.020
4	23.5	4265	0.60	375	0.0179	455	0.048

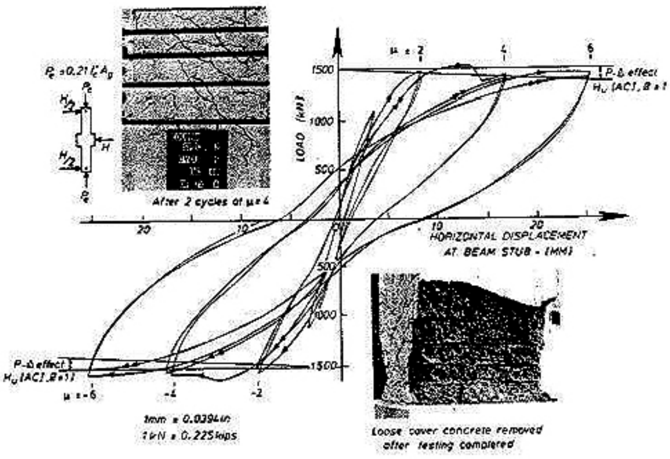
f_{yl} คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว, f_{yt} คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างเสาที่ทดสอบมีค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (displacement ductility factor) มีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 6 และมีค่าสูงสุดประมาณ 10 ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตในแกนคอนกรีตมีค่าระหว่าง 0.016-0.026 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หลังจากคอนกรีตหุ้มเกิดการหลุดล่อนออก นอกจากนั้นยังพบว่าค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่แท้จริง จะมีค่ามากกว่าค่าต้านทานโมเมนต์ดัดตามทฤษฎี โดยเฉพาะในกรณีที่แรงอัดตามแนวแกนมีค่ามากและมีประสิทธิภาพการโอบรัดที่ดี เหล็กเสริมตามขวางมีค่าความเครียดถึงจุดคราก แต่ไม่ส่งผลต่อเสาเนื่องจากค่าความเครียดถึงจุดคราก แต่ยังไม่ถึงช่วงของการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (hardening) ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าปริมาณเหล็กเสริมตามขวางตามมาตรฐาน SEAOC (สมาคมวิศวกรโครงสร้างแห่งรัฐแคริฟอร์เนีย) มีค่ามากพอที่จะรับได้สำหรับแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ที่ระดับต่ำ แต่ไม่เป็นที่เหมาะสมสำหรับแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ที่ระดับสูง

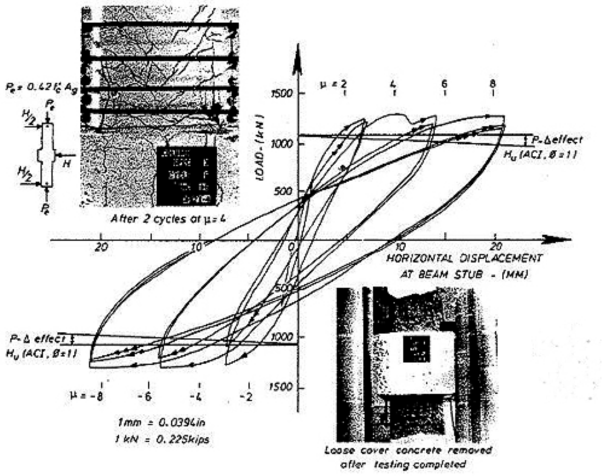


(ก) ตัวอย่างเสาต้นที่ 1

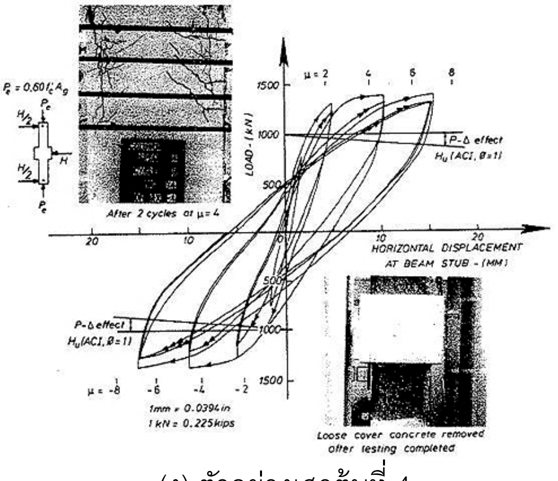
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Park และคณะ, 1982)



(ข) ตัวอย่างเสาต้นที่ 2



(ค) ตัวอย่างเสาต้นที่ 3

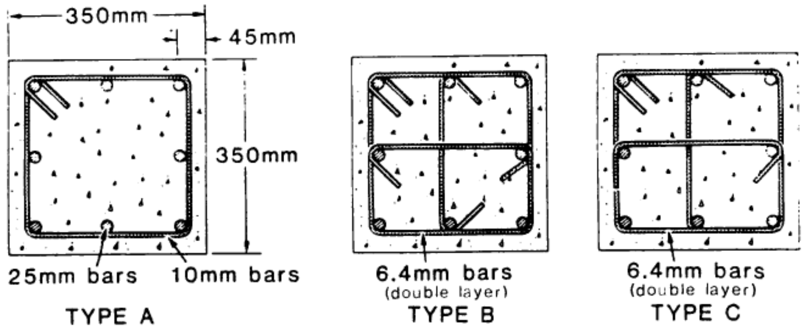


(ง) ตัวอย่างเสาต้นที่ 4

รูปที่ 2.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Park และคณะ, 1982)

Ozcebe และ Staatcioglu (1987) ได้ทดสอบเสาขนาด 0.35ม.x0.35 ม. สูง 0.90 ม. จำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผล

ของระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวาง และคอนกรีตที่มีการโอบรัดคำนึงถึงรายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมตามขวาง หน้าตัดขวางของรายละเอียดของการเสริมเหล็กเสริมตามขวางแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ แบบแรกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318-83 เป็นการเสริมปลอกรัดรอบ (hoop ties) เพียงอย่างเดียว รูปแบบที่ 2 และ 3 มีการเพิ่มเหล็กยึดทางขวาง (crossties) จะมีผลต่อพฤติกรรมของเสาที่ดีกว่าการเสริมเหล็กเสริมตามขวางรัดรอบเพียงอย่างเดียว รูปแบบที่ 2 เหล็กยึดทางขวางใช้ของงอขนาด 135 องศาปลายทั้ง 2 ส่วนรูปแบบที่ 3 เหล็กยึดทางขวางปลายข้างหนึ่งงอขอขนาด 135 องศา อีกข้างหนึ่ง 90 องศา ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้แสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

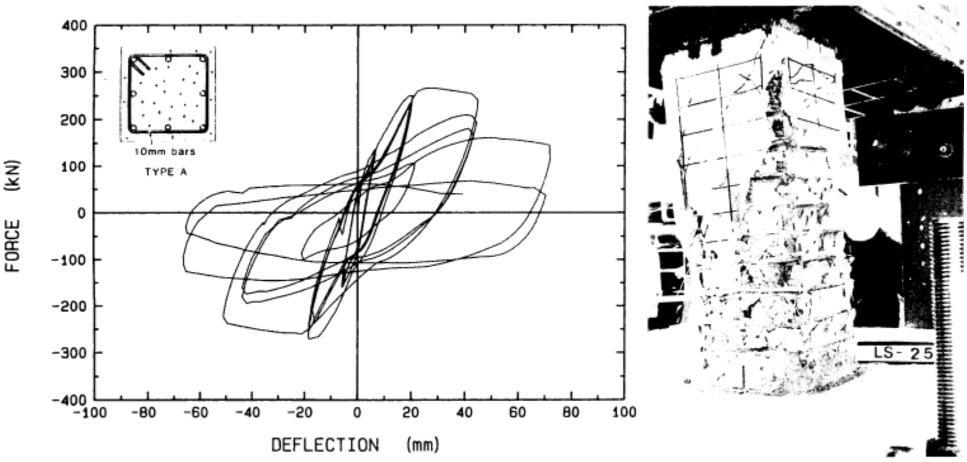


รูปที่ 2.3 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Ozceve และ Staacioglu, 1987)

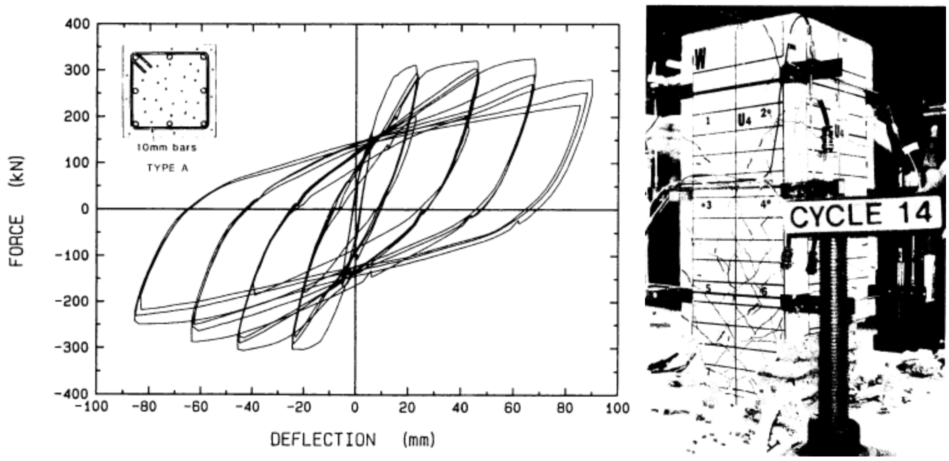
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา (Ozcebe และ Staatcioglu, 1987)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load Ratio P/fc'Ag	Reinforcement					
			Longitudinal		Transverse			
			f_{yl} (MPa)	ρ_l	f_{yt} (MPa)	ρ_s	S (mm)	Type
U3	34.8	12	438	0.0327	470	0.0169	75	A
U4	32.0	12	438	0.0327	470	0.0254	50	A
U6	37.3	12	437	0.0327	425	0.0195	65	B
U7	39.0	12	437	0.0327	425	0.0195	65	C

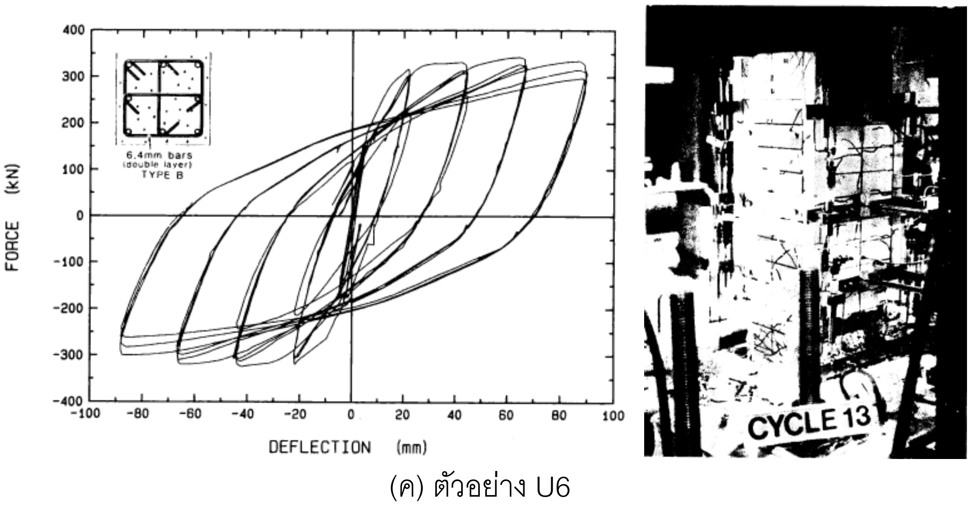
ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวางน้อยกว่า มีความสามารถในการรับแรงด้านข้างและมีความเหนียวมากกว่าตัวอย่างตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318-83 สำหรับเสาที่มีการโอบรัดที่ดีกว่าโดยการเพิ่มเหล็กยึดทางขวาง (crossties) มีความสามารถในการรับแรงด้านแรงและมีความเหนียวมากกว่าแม้ว่าปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กยึดทางขวางก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กยึดทางขวางของอ 135 องศาปลายทั้ง 2 มีประสิทธิภาพเหมือนเหล็กยึดทางขวางของอ 135 องศา อีกข้างหนึ่ง 90 องศา ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างได้แสดงในดังรูปที่ 2.4



(ก) ตัวอย่าง U4



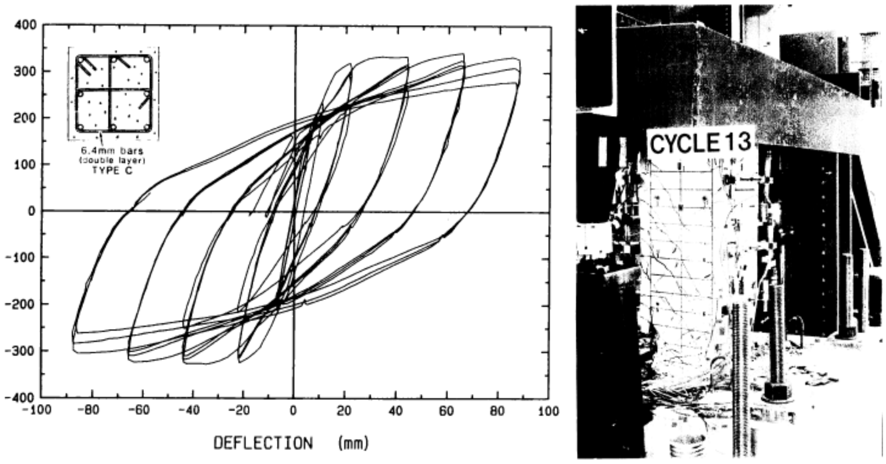
(ข) ตัวอย่าง U3



(ค) ตัวอย่าง U6

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างและสภาพเสาหลังการทดสอบ

(Ozcebe และ Staacioglu, 1987)

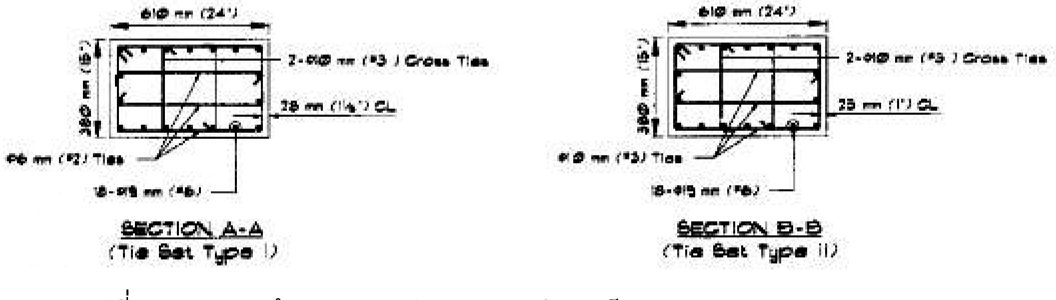


(ง) ตัวอย่าง U7

รูปที่ 2.4 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างและสภาพเสาหลังการทดสอบ (Ozcebe และ Staacioglu, 1987)

Wehbe และคณะ (1999) ได้ทดสอบเสาขนาด 0.38ม.x0.61 ม. สูง 2.05 ม. จำนวน 4 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางซึ่งมีปริมาณการโอบรัดในระดับปานกลางและแรงอัดตามแนวแกน ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางที่พิจารณามีค่า 46 %และ 60 %ของปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางมาตรฐานการออกแบบ AASHTO และแรงอัดตามแนวแกนมีค่า 0.1 ถึง 0.25 $f_c^{'}A_g$ รายละเอียดการเสริมเหล็กตามขวางได้แสดงในรูปที่ 2.5 และคุณสมบัติของเสาได้แสดงในตารางที่ 2.3

ผลการทดสอบพบว่าค่าความเหนียวของเสามีค่าประมาณ 5 เมื่อเสริมเหล็กเสริมตามขวางประมาณ 50 %ของมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามขวางเท่ากันค่าความเหนียวของเสาจะลดลงเมื่อแรงอัดในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเมื่อแรงอัดในแนวแกนมีค่าเท่ากันค่าความเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง การวิบัติในเสานั้นจะเกิดจากโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวเนื่องจากการอ้าออกของของอ 90 องศา

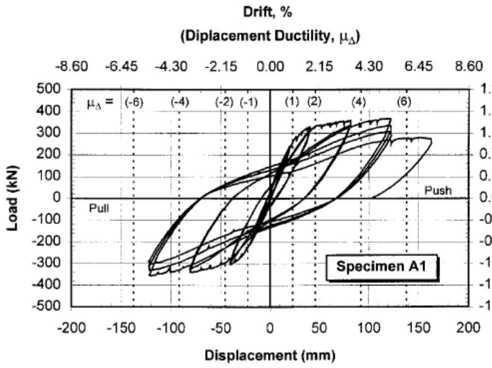


รูปที่ 2.5 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Wehbe และคณะ,1999)

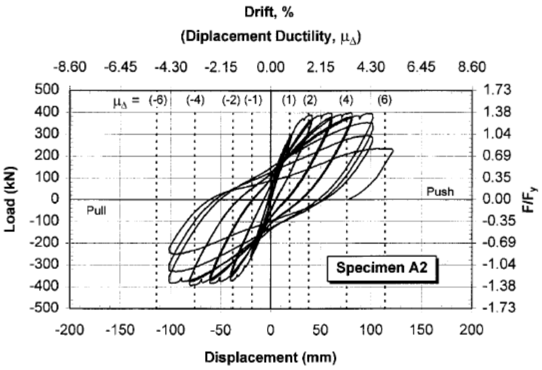
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเสา (Wehbe และคณะ,1999)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load		Longitudinal		Transverse reinforcement			
		Force (kN)	Ratio *P/fc'Ag*	f_{yl} (MPa)	ρ_l	f_{yt} (MPa) Ø6mm	f_{yt} (MPa) Ø10mm	$\rho_{s(d)}$	$\rho_{s(b)}$
A1	31.7	615	0.10	414	0.022	455	428	0.37	0.35
A2	27.2	1505	0.24	414	0.022	455	428	0.37	0.35
B1	29.7	601	0.09	414	0.022	455	428	0.48	0.46
B2	28.1	1514	0.23	414	0.022	455	428	0.48	0.46

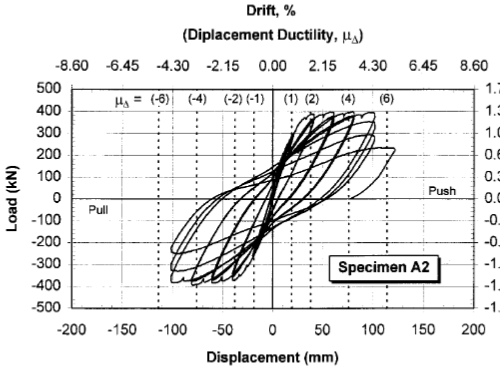
$\rho_{s(d)}$ และ $\rho_{s(b)}$ คืออัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางความลึกและทางความหนาของหน้าตัด



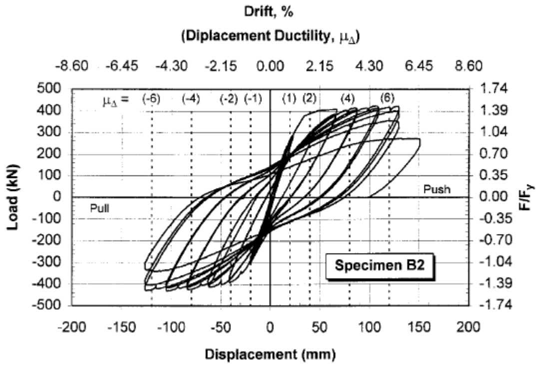
(ก) ตัวอย่าง A1



(ข) ตัวอย่าง A2



(ค) ตัวอย่าง A2

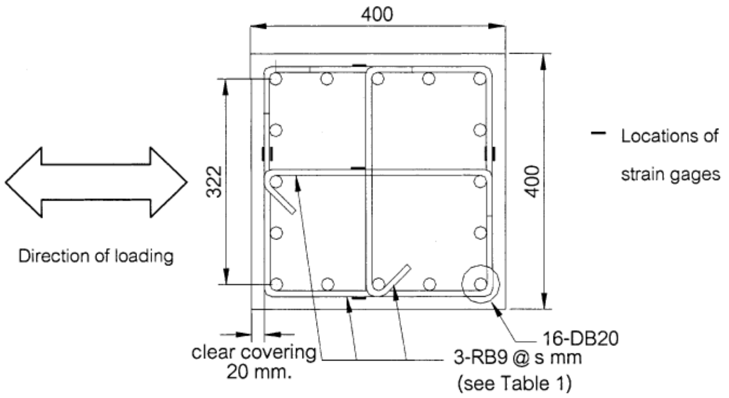


(ง) ตัวอย่าง B2

รูปที่ 2.6 ผลของแรงตามแนวแกนที่มีต่อความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (Wehbe และคณะ, 1999)

Lukkunaprasit และ Sittipunt (2003) ได้ทดเสาขนาด 0.40ม.x0.40ม. สูง 1.5 ม. จำนวน 5 ต้น ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงตามแนวแกนคงที่ โดยพิจารณาผลของระยะห่างของเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางมีปริมาณการโอบรัดในระดับปานกลางตามข้อกำหนดโดยมาตรฐานการออกแบบ ACI และเพิ่มคลิปยึดของงอ 90 องศา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการโอบรัดเสาของเสาคอนกรีต เนื่องจากของงอ 90 องศา จะเกิดการเปิดแยก

ออกจากกันเมื่อมีระยะเคลื่อนที่ของเสาที่ทำให้คอนกรีตหุ้มเกิดการหลุดร่อน (spalling) ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างเสาที่ไม่มีคลิปยึดของอกับตัวอย่างเสาที่มีคลิปยึดของอ ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คุณสมบัติของตัวอย่างเสาได้แสดงในตารางที่ 2.4



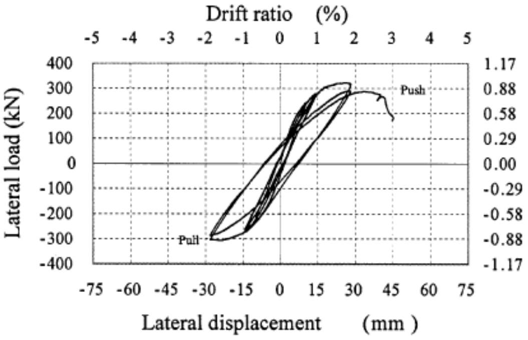
รูปที่ 2.7 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003)

ผลการทดสอบพบว่าการเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนส่งผลให้ค่าความเหนียวและการสลายพลังงานสะสมมีค่าน้อยลง และยังพบอีกว่าตัวอย่างเสาที่มีการเพิ่มคลิปยึดของอ 90 องศา มีความสามารถในการรับแรงด้านแรงและมีความเหนียวมากกว่าเสาที่มีของอ 135 องศา และยังมีการสลายพลังงานที่ดีกว่าอีกด้วย เนื่องจากตัวอย่างเสาที่มีการเพิ่มคลิปยึดของอ 90 องศา จะมีการโอบรัดของคอนกรีตที่ดีกว่าเสาที่มีของอ 135 องศา ประสิทธิภาพของคลิปยึดของอทำให้ความเครียดของเหล็กยึดทางขวาง (crossties) มีค่ามากขึ้นในบริเวณจุดหมุนพลาสติก และยังพบอีกว่ารูปแบบประวัติการรับน้ำหนัก (loading history) ที่แตกต่างกันมีผลทำให้ค่าความเหนียวและค่าการสลายพลังงานแตกต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสาได้แสดงในรูปที่ 2.8

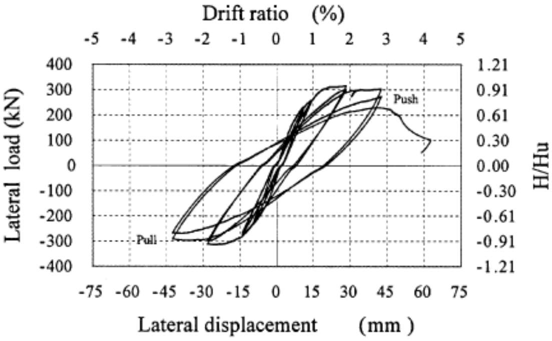
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา Lukkunaprasit และ Sittipunt (2003)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load Ratio *P/fc'Ag*	Reinforcement				
			Longitudinal		Transverse		
			f_{yl} (MPa)	ρ_l	f_{yt} (MPa)	f_y/sh_c(%)	Hook configuration
1	38.9	0.30	471	0.0314	305	0.453	90 deg; no clips
2	35.7	0.30	471	0.0314	305	0.453	135 deg; no clips
3	31.7	0.30	471	0.0314	305	0.453	90 deg; with clips
4	30.5	0.37	471	0.0314	305	0.453	135 deg; no clips
5	32.4	0.37	471	0.0314	305	0.453	90 deg; with clips

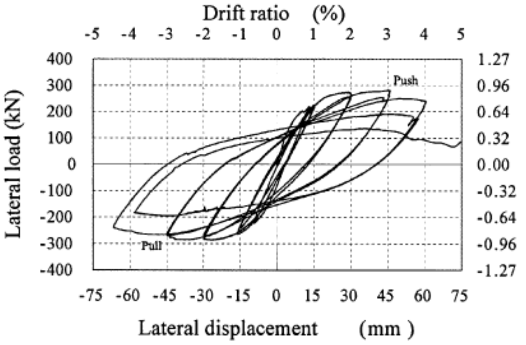
h_c คือระยะความยาวของหน้าตัดตามขวางโดยวัดจากกึ่งกลางกึ่งกลางของเหล็กเสริมถึงกึ่งกลางของเหล็กเสริม



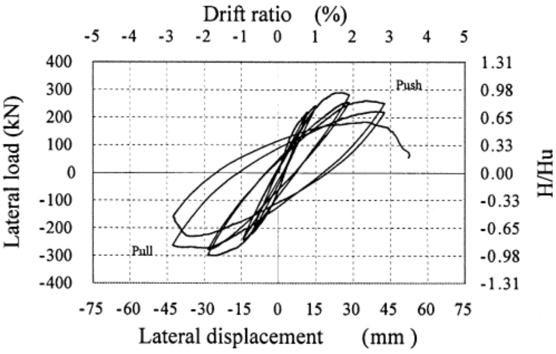
(ก) ตัวอย่างเสาต้นที่ 1



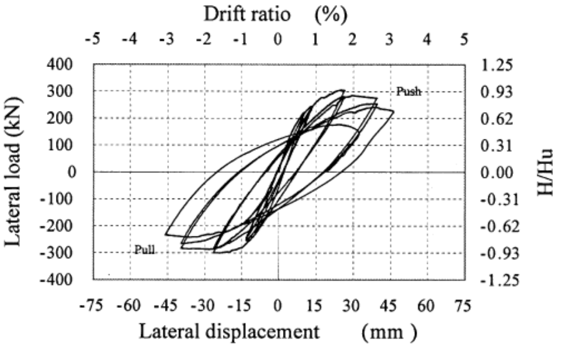
(ข) ตัวอย่างเสาต้นที่ 2



(ค) ตัวอย่างเสาต้นที่ 3



(ง) ตัวอย่างเสาต้นที่ 4

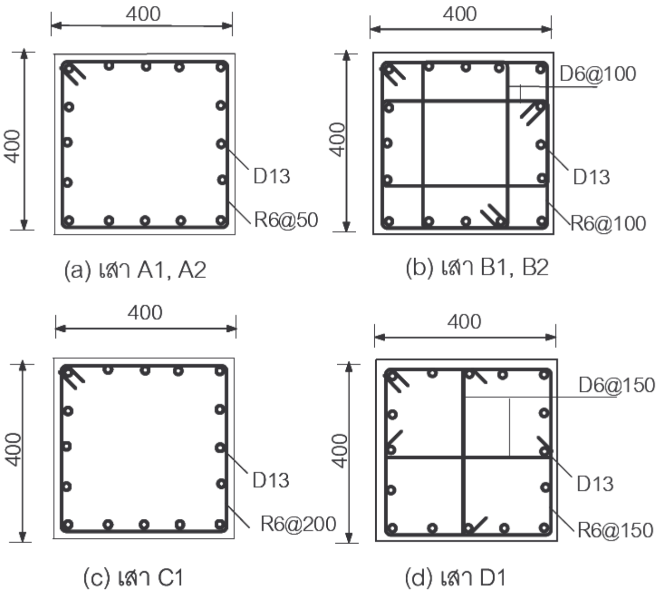


(จ) ตัวอย่างเสาต้นที่ 5

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา (Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003)

Ongsupankul และคณะ (2006) ทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.40ม.x0.40ม. สูง 1.55 ม. จำนวน 6 ต้นภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรทางด้านข้างและให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่กระทำแบบเยื้องศูนย์และแบบศูนย์กลางเสา โดยพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมตามขวางและการจัดเรียงเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเสริมตามขวางมีปริมาณ 25% ของข้อกำหนดของมาตรฐาน AASHTO(1992) ที่คำนึงถึงผลแผ่นดินไหวและเสริมเหล็กตามข้อกำหนดของมาตรฐาน AASHTO(1992) ที่ไม่คำนึงถึงผลแผ่นดินไหว จากนั้นผู้วิจัยได้เปรียบผลการทดสอบกับ

แบบจำลองไฟเบอร์ (fiber model) ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คุณสมบัติของเสาได้แสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.9 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Ongsupankul และคณะ, 2006)

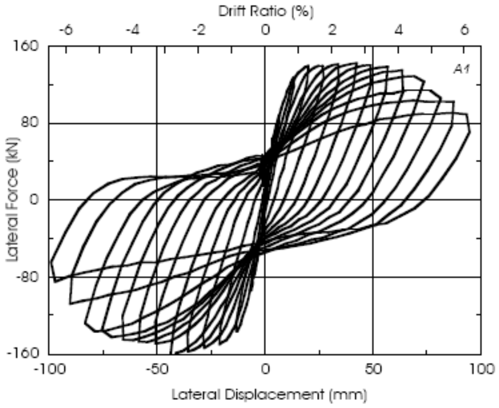
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของตัวอย่างเสา Ongsupankul และคณะ (2006)

Test specimen	Concrete Strength (MPa)	Axial load Ratio *P/fc'Ag*	*e/h*	Longitudinal		Transverse reinforcement		
				f_{yl} (MPa)	ρ_l	f_{yt} (MPa)	ρ_s	Configuration
A1	32.4	0.074	0	390	0.0127	235	0.0075	25% AASHTO; Seismic
A2	32.4	0.074	0.15	390	0.0127	235	0.0075	25% AASHTO; Seismic
B1	29.6	0.081	0	390	0.0127	235	0.0126	25% AASHTO; Seismic
B2	29.6	0.081	0.15	390	0.0127	235	0.0126	25% AASHTO; Seismic
C1	32.4	0.07	0	390	0.0127	235	0.019	AASHTO; Non-Seismic
D1	29.6	0.08	0	390	0.0127	235	0.005	AASHTO; Non-Seismic

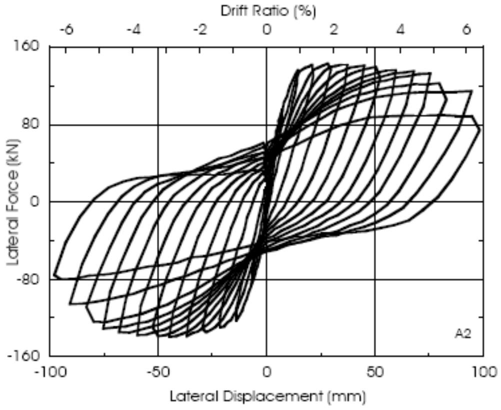
e คือระยะเยื้องศูนย์ของแรงกระทำในแนวดิ่ง

ผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาซึ่งให้แรงอัดตามแนวแกนที่กระทำเยื้องศูนย์ที่ระยะ 0.15 ของขนาดเสากับเสาที่ให้แรงอัดกระทำแบบตรงศูนย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเสายังคงมีพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างกันมาก การใช้เหล็กยึดทางขวาง (crossties) เพิ่มเข้ามานั้นจะมีผลต่อพฤติกรรมของเสาที่ดีกว่าการเสริมเหล็กเสริมตามขวางรัดรอบเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าความเหนียวและการสลายพลังงานที่ดีกว่า แต่ปริมาณอัตราส่วนของเหล็กเสริมตามขวางไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างทั้งแรงสูงสุด การใช้เหล็กยึดทางขวางยังจะช่วยไม่ให้เหล็กเสริมปลอกรัดรอบโก่งงอและยังช่วยยึดรั้งเหล็กเสริมตามยาวและลด

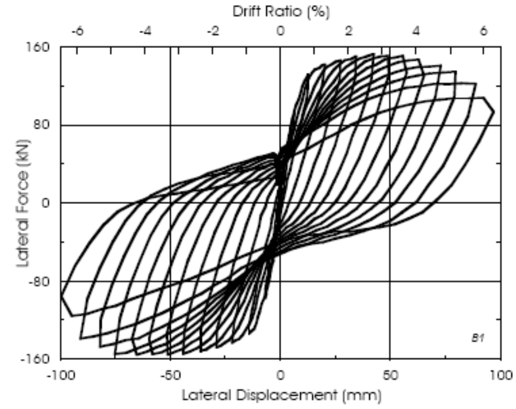
การถูกอัดจนแตกของแกนคอนกรีต รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา



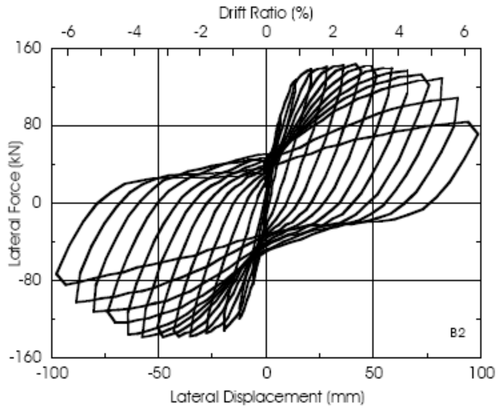
(ก) ตัวอย่างเสาต้นที่ A1



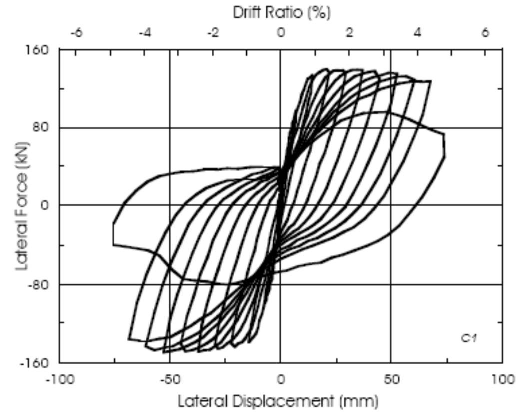
(ข) ตัวอย่างเสาต้นที่ A2



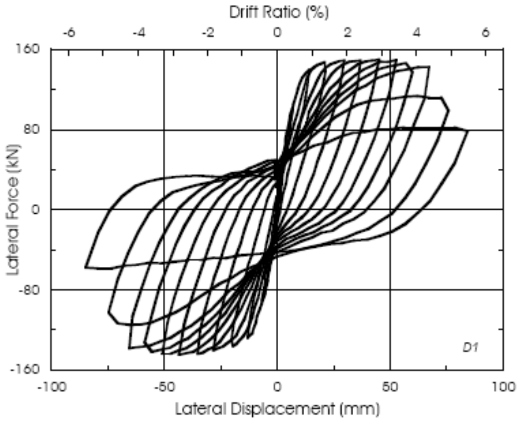
(ค) ตัวอย่างเสาต้นที่ B1



(ง) ตัวอย่างเสาต้นที่ B2



(จ) ตัวอย่างเสาต้นที่ C1



(ฉ) ตัวอย่างเสาต้นที่ D2

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างเสา (Ongsupankul และคณะ, 2006)

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะในการทดสอบเสริมเหล็กรับแรงกดและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

Gomes และ Appleton (1996) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมโดยพิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม แบบจำลองนี้ได้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Menegotto และ Pinto(1973) ซึ่งเดิมที่ไม่ได้พิจารณาผลของการโก่งเดาะของเหล็ก ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองโดยพิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ซึ่งอาศัยหลักการความสมดุลของพฤติกรรมพลาสติก (equilibrium of a plastic mechanism) เมื่อเหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะ แบบจำลองของการโก่งเดาะจะพิจารณาหลังคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการหลุดล่อน โดยในช่วงของการถอนแรงกระทำ (unload) ได้พิจารณาผลของการโก่งเดาะเข้าไปด้วย ผู้วิจัยได้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรจำนวน 9 ผลของค่าโมเมนต์ดัดกับความโค้งของหน้าตัดเสาคอนกรีตได้นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟเบอร์ (fiber model) และได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองให้ความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์

Bae และคณะ (2005) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง และความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ด้านข้างกับความเครียดตามแนวแกนเนื่องจากผลของการโก่งเดาะ ซึ่งได้จากการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดจำนวน 162 ตัวอย่าง โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และอัตราส่วนระหว่างระยะแรงกระทำเยื้องศูนย์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง ทดสอบโดยใช้เครื่องให้แรงและติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 2 เครื่อง เพื่อวัดระยะเคลื่อนที่ทั้งแนวดิ่งและแนวราบ แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ได้เสนอ มีค่าความเค้นสูงสุดที่ความเครียดเท่ากับ 0.04 หลังจากนั้นความเค้นจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการโก่งเดาะของตัวอย่าง หลังจากผ่านจุดครากแล้วค่าความเค้นจะลดลงโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรงจนถึงค่าที่ความเครียดมีค่าเท่ากับ 0.2

Berry และ Eberhard (2005) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อหาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่สอดคล้องเมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมี 3 ความสัมพันธ์ที่นำมาพิจารณา คือ การหมุนแบบพลาสติก (plastic rotation), อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (drift ratio) และค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องเมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ โดยผู้วิจัยได้ทดสอบเสาที่มีเหล็กเสริมตามขวางรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 62 ต้น เสากลมที่มีการเสริมเป็นเหล็กเสริมตามขวางเกลียวจำนวน 42 ต้น วิธีที่ใช้วิเคราะห์คือ การวิเคราะห์จุดหมุนพลาสติก (plastic-hinge analysis), ค่าการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดกับความโค้ง (moment-curvature analysis) และการคาดคะเนผลของการโอบรัดทางด้านข้างของเหล็กเสริม

ตามขวาง ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนระหว่างระยะที่วัดได้เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะกับระยะที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ได้เสนอนั้นมีค่าเท่ากับ 1.01 และ 0.97 สำหรับเสาที่มีเหล็กเสริมตามขวางรูปสี่เหลี่ยม และเสากลมที่มีการเสริมเป็นเหล็กเสริมตามขวางเกลียวตามลำดับ

Mounnarath (2006) ได้ศึกษาและพัฒนาการต่อทาบของเหล็กเสริมระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยปลอกต่อทาบ (coupler) ทดสอบเหล็กเสริมที่มีปลอกต่อทาบได้ทดสอบภายใต้แรงดึง, ภายใต้แรงอัดและแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน ซึ่งกำลังของปลอกต่อทาบต้องมีกำลังที่จุดครากมากกว่า 1.25 เท่าของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมเหล็กเสริมตามมาตรฐานของ UBC(1997) โดยพิจารณาความหนาของปลอกต่อทาบ ,ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทั้ง 2 ด้านภายในปลอกต่อทาบ และความยาวของปลอกต่อทาบ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของกำลัง, ความเหนียว และการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการต่อทาบด้วยปลอกต่อทาบ ผลการทดสอบเหล็กเสริมที่มีการต่อทาบภายใต้แรงดึงพบว่าความหนาของปลอกต่อทาบมีผลต่อกำลังของเหล็กเสริม ความหนาและระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทั้ง 2 ด้านในปลอกต่อทาบมีผลต่อค่าความเหนียว อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อตัวอย่างเหล็กเสริมมีกำลังสูงจะส่งผลให้ค่าความเหนียวและการสลายพลังงานลดลง การทดสอบภายใต้แรงอัดพบว่าตัวอย่างเหล็กเสริมที่มีปลอกต่อทาบสามารถรับแรงกระทำได้ซึ่งมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกันและเมื่อเกิดการโก่งเดาะส่งผลให้ความสามารถความในการรับแรงจะลดลง ตัวอย่างเหล็กเสริมที่มีปลอกต่อทาบมีค่าความเหนียวและการสลายพลังงานที่ดี ส่วนการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกนมีการเลื่อนไถลระหว่างตัวอย่างของเหล็กเสริมและหัวจับของเครื่องให้แรงจึง ให้ผลการทดสอบที่ไม่สมบูรณ์

2.2 คุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว

คุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว จาก Paulay และ Priestly (1992) ได้เสนอคุณสมบัติที่จำเป็น 3 คุณสมบัติ คือ สติฟเนส, กำลังของโครงสร้าง และความเหนียวโครงสร้าง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 **สติฟเนส** (stiffness)

สติฟเนส คือ ความสามารถในการต้านทานแรงของโครงสร้างเมื่อกระทำให้โครงสร้างเกิดการโก่งตัว โดยสติฟเนสเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะโก่งตัวของโครงสร้าง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของโครงสร้างที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ความสัมพันธ์ของระหว่างแรงกระทำกับระยะโก่งตัวของโครงสร้างภายแรงกระทำแบบวัฏจักรในช่วงเชิงเส้น คือ $K = P_y / \Delta_y$

ขั้นตอนการออกแบบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรต้องตรวจสอบระยะเคลื่อนที่ของแต่ละชั้น โดยที่ผลตอบสนองของโครงสร้างต้องอยู่ในช่วงที่ยอมให้โครงสร้างพังทลายได้บางส่วนแต่ยังไม่วิบัติและสามารถซ่อมแซมได้ (serviceability limit state)

2.2.2 **กำลังของโครงสร้าง** (strength)

กำลังของโครงสร้างเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ซึ่งหมายถึงโครงสร้างต้องมีกำลังที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงกระทำต่อภายในของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวในช่วงยืดหยุ่นได้ โดยกำลังของโครงสร้างจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสติฟเนส

2.2.3 **ความเหนียวโครงสร้าง** (ductility)

ความเหนียวโครงสร้าง คือ ระยะการโก่งตัวของโครงสร้างหลังจากเลยช่วงยืดหยุ่นไปแล้ว โดยความเหนียวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในโครงสร้าง เพื่อที่จะให้โครงสร้างเกิดการวิบัติด้วยความเหนียวพังพลายที่น้อยที่สุดและยังคงสภาพอยู่ได้ภายใต้แรงกระทำด้านทางจากแผ่นดินไหวระดับปานกลาง ค่าความเหนียวของโครงสร้างมีผลต่อการดูดซับพลังงานในพฤติกรรมแบบฮิซเทียรีซีซ คำจำกัดความของความเหนียวได้แสดงในสมการที่ 2.1

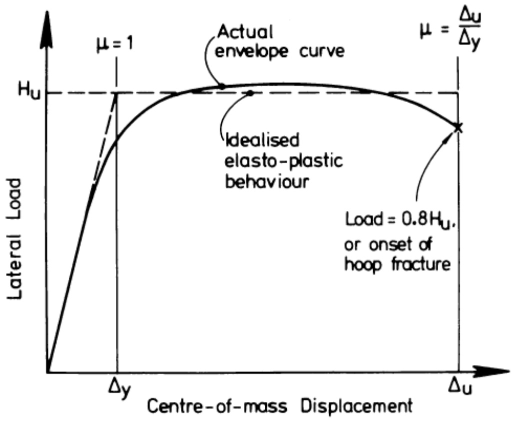
$$\mu = \Delta / \Delta_y > 1 \qquad (2.1)$$

โดยที่ Δ คือ ระยะเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งใดๆ หลังจากจุคราก

Δ_y คือ ระยะเคลื่อนที่ ณ จุดคราก

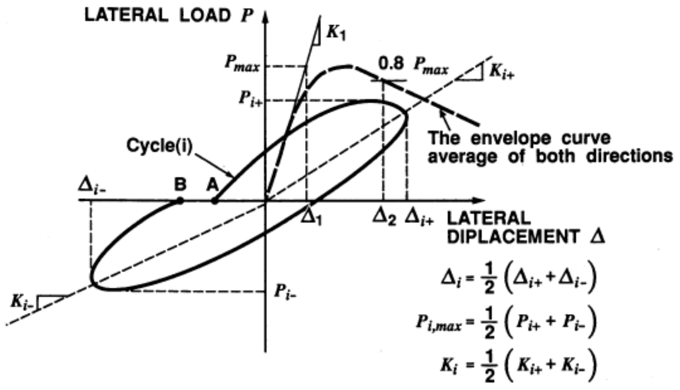
ความเหนียวที่ได้นิยามเมื่อโครงสร้างใกล้จะเกิดการวิบัติได้ว่า $\mu_u = \Delta_u / \Delta_y$ ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาวิธีการหาระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดที่ได้มีการเสนอมาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Priestley และ Park (1897) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้างโดยการเปลี่ยนเส้นโค้งขอบนอก (envelope curve) ที่ได้จากการทดสอบเป็นเส้นโค้งในอุดมคติซึ่งมีพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งในอุดมคติมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้งขอบนอกจากการทดสอบ ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้จากเส้นที่เปลี่ยนความชันจากเส้นโค้งในอุดมคติ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำของเส้นโค้งในอุดมคติสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.11



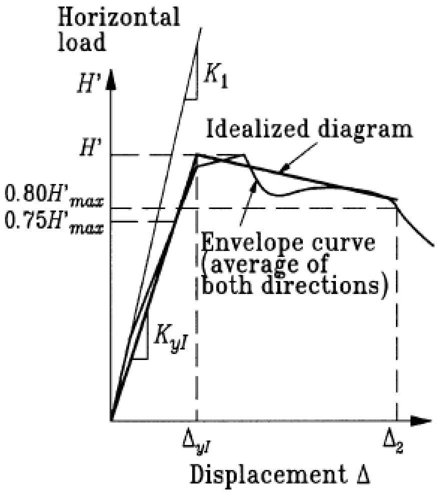
รูปที่ 2.11 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Priestley และ Park (1897)

Sheikh และ Khoury (1993) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้าง ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้สติฟเนสเริ่มต้น (initial stiffness) ไปบรรจบที่ระดับเดียวกับแรงกระทำสูงสุด ซึ่งจากตำแหน่งนี้สามารถหาค่าระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากได้ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.12



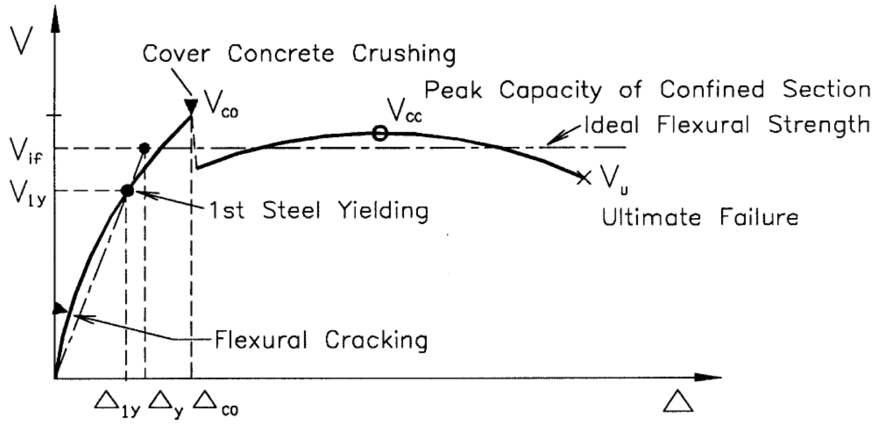
รูปที่ 2.12 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Sheikh และ Khoury (1993)

Paultre และคณะ (2001) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้าง ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้การลากความชันในช่วงยืดหยุ่นผ่านค่า 75%ของแรงกระทำสูงสุดไปบรรจบที่ระดับเดียวกับแรงกระทำสูงสุด ซึ่งจากตำแหน่งนี้สามารถหาค่าระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากได้ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Paultre และคณะ (2001)

Legeron และ Pualtre (2002) ได้เสนอวิธีการหาความเหนียวของโครงสร้างโดยการเปลี่ยนเส้นโค้งขอบนอกได้จากการทดสอบเป็นเส้นโค้งในอุดมคติซึ่งลากความชันในช่วงยืดหยุ่นผ่านตำแหน่งของแรงกระทำที่เหล็กเสริมเกิดการคราก ซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้จากเส้นที่เปลี่ยนความชันจากเส้นโค้งในอุดมคติ โดยเส้นโค้งในอุดมคติมีพื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้งขอบนอกจากการทดสอบ และระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำของเส้นโค้งในอุดมคติสูงสุดคงเหลือ 80% รูปแบบการหาความเหนียวได้แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของ Legeron และ Pualtre (2002)

วิธีการหาความเหนียวของโครงสร้างวิธีสุดท้ายเป็นการหาความเหนียวของโครงสร้างซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากหาได้จากระยะเคลื่อนที่ขณะที่เหล็กเสริมเกิดการครากครั้งแรกซึ่งทราบได้จากเกดวัดความเครียดจากการทดสอบและระยะเคลื่อนที่สูงสุดหาได้จากระยะเคลื่อนที่มีแรงกระทำสูงสุดคงเหลือ 80%

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่

สำหรับเสาที่มีลักษณะคานยื่นจากความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (curvature-displacement ductility relation) ที่ได้เสนอโดย Paulay และ Priestly (1992) สามารถหาค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ได้จากการปริพันธ์ความโค้งตลอดความยาวเสาดังสมการที่ 2.2

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = \frac{\int \phi(x) x dx}{\int \phi_e(x) x dx} \tag{2.2}$$

โดยที่ $\phi(x)$ คือ ค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าสูงสุด

$\phi_e(x)$ คือ ค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าจุดคราก

ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากสามารถหาค่าได้โดยตรงจากค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าจุดคราก, $\phi_e(x)$ ซึ่งเริ่มเข้าสู่สภาวะไม่เชิงเส้น ระยะเคลื่อนที่ที่จุดครากสามารถประมาณค่าเท่ากับสมการที่ 2.3 และระยะเคลื่อนที่สูงสุดซึ่งต้องคิดผลของการเกิดจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยระยะเคลื่อนที่ทั้งหมดหาได้จาก $\Delta_m = \Delta_y + \Delta_p$ สามารถประมาณค่าเท่ากับสมการที่ 2.4

$$\Delta_y = \phi_y l^2 / 3 \tag{2.3}$$

$$\Delta_m = \Delta_y + (\phi_p) l_p (l - 0.5 l_p) \tag{2.4}$$

โดยที่ ϕ_p คือ ค่าการกระจายตัวของความโค้งที่ค่าจุดหมุนพลาสติกมีค่าเท่ากับ $\phi_m - \phi_y$

l_p คือ ระยะพลาสติกของเสาลักษณะคานยื่น

ระยะจุดหมุนพลาสติกที่ได้มีการศึกษามาซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Barker และ Amarakone (1964) ได้เสนอระยะจุดหมุนพลาสติก ซึ่งมีระยะจุดหมุนพลาสติกอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 2.4 เท่าของระยะความลึกประสิทธิผล (effective dept) และได้เสนอสมการระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.5

$$l_p = 0.8 k_1 k_3 \left(\frac{z}{d} \right) c \tag{2.5}$$

โดยที่ d คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดเสาหรือคาน

z คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามยาว

c คือ ระยะที่วัดจากบริเวณที่เกิดแรงอัดมากที่สุดถึงแกนสะเทิน

k_1 คือ ค่าคงที่มีค่า 0.7 สำหรับเหล็กรีดร้อน และ 0.9 สำหรับเหล็กรีดเย็น

k_3 คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.6 สำหรับ fc’ =5100 psi และ 0.9 สำหรับ fc’ = 1700 psi

Corley (1966) ได้ทดสอบคานคอนกรีตจำนวน 40 ตัวอย่าง เป็นคานที่มีฐานรองรับอย่างง่าย (simple beam) กระทำด้วยแรงแบบจุด (point loads) โดยพิจารณาการโอบรัดของคอนกรีตและขนาดของตัวอย่างเป็นหลัก ได้เสนอว่าระยะจุดหมุนพลาสติกขึ้นอยู่กับลักษณะเรขาคณิตของคานคอนกรีตเป็นหลัก และได้เสนอสมการระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.6

$$l_p = \frac{d}{2} + 0.2\frac{z}{\sqrt{d}} \qquad (2.6)$$

โดยที่ d คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดเสาหรือคาน (นิ้ว)

z คือ ระยะระหว่างหน้าตัดวิกฤตถึงจุดให้แรง (นิ้ว)

Mattock (1967) ได้ปรับปรุงสมการของตนเองให้ง่ายขึ้นที่เคยได้เสนอในอดีต ซึ่งได้ทดสอบคานจำนวน 37 ต้น และได้เสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.7

$$l_p = \frac{d}{2} + 0.05z \qquad (2.7)$$

โดยที่ d คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดเสาหรือคาน

z คือ ระยะระหว่างหน้าตัดวิกฤตถึงจุดให้แรง

Park และคณะ (1982) ได้ทดสอบเสาคอนกรีตขนาด 0.55 ม. x 0.55 ม. จำนวน 4 ต้น จากผลการทดสอบผู้วิจัยได้เสนอระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.8

$$l_p = 0.4h \qquad (2.8)$$

โดยที่ h คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

Priestley และ Park (1987) ได้เสนอสมการระยะจุดหมุนพลาสติกโดยคิดผลของการโมเมนต์ดัดของเสาและการครากของเหล็กเสริมภายในฐานราก ได้เสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.9

$$l_p = 0.08L + 6d_b \qquad (2.9)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของเสา (ม.)

d_b คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามยาว (ม.)

Paulay และ Priestley (1992) ได้แก้ไขสมการที่ 2.9 ได้ที่เสนอโดย Priestley และ Park (1987) โดยได้แบ่งระดับของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งเสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.10

$$l_p = 0.08L + 0.022 f_y d_b \qquad (2.10)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของเสา (ม.)

d_b คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามยาว (ม.)

f_y คือ กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (เมกกะปาสคาล)

Sheikn และ Khaoury (1993) ได้ทดสอบเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำในแนวดิ่งที่สูง ซึ่งเสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.10 โดยเสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.11

$$l_p = 1.0h \tag{2.11}$$

โดยที่ h คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

Bae และ Bayrak (2008) ได้ทดสอบเสาจำนวน 4 ต้น พบว่าระดับของแรงกระทำในแนวแกนมีผลต่อระยะจุดหมุนพลาสติก โดยได้เสนอสมการการหาระยะจุดหมุนพลาสติกดังสมการที่ 2.12

$$\frac{l_p}{h} = \left[0.3\left(\frac{P}{P_o}\right) + 3\left(\frac{A_s}{A_g}\right) - 0.1\right]\left(\frac{L}{h}\right) + 0.25 \geq 0.25 \tag{2.12}$$

โดยที่ P_o คือ แรงกระทำตามแนวแกนสูงสุดตามข้อกำหนด ACI 318-05 โดยที่มีค่าเท่ากับ

$0.85f_c^{'}\left(A_g - A_s\right) + f_y A_s$

P คือ แรงกระทำตามแกน

A_s คือ พื้นที่รับแรงดึงของเหล็กเสริม

A_g คือ พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีต

L คือ ความยาวของเสา

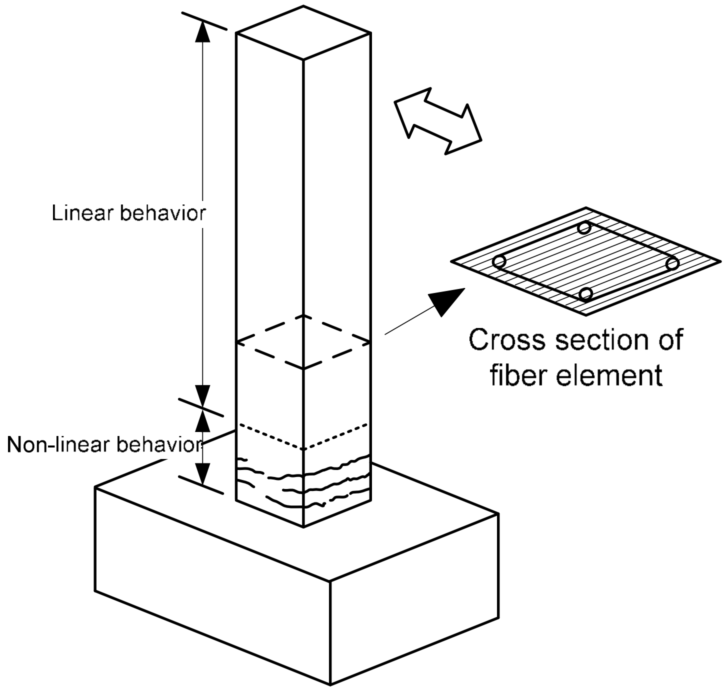
h คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์พฤติกรรมไม่เชิงเส้นมีความยากและซับซ้อนมากกว่าเชิงเส้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม TDAP3 ในการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงยืดหยุ่นทั้งการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และการวิเคราะห์การผลักด้านข้าง รวมถึงการใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นได้ดี

การวิเคราะห์ในแบบจำลองไฟเบอร์โดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม TDAP3 ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูลของจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ใช้ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งได้แก่ แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด, แบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ซึ่งแบบจำลองได้กล่าวในส่วนถัดไป

พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นเกิดขึ้นในระยะจุดหมุนพลาสติกเท่านั้น (plastic hinge length) สำหรับเสาที่มีลักษณะเป็นเสาคานยื่น (cantilever column) ระยะจุดหมุนพลาสติกอยู่บริเวณโคนเสาเหนือฐานราก กำหนดให้ชิ้นส่วนของเสาทั้งหมดเป็นแบบจำลองไฟเบอร์เพื่อที่จะได้สังเกตและศึกษาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น การจำลองแบบจำลองไฟเบอร์นั้นได้แบ่งหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นชิ้นส่วนที่มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นออกเป็นชิ้นส่วนย่อย คือ แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด, แบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร รูปการแบบจำลองไฟเบอร์ได้แสดงในรูปที่ 2.15



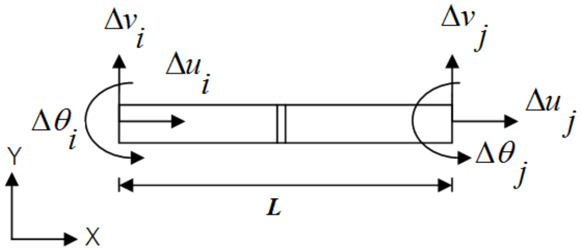
รูปที่ 2.15 แบบจำลองไฟเบอร์

การวิเคราะห์หาแรงต้านทานภายใน และสติฟเนสของแต่ละชิ้นส่วนไฟเบอร์ย่อยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีเฟลกซิบิลิตี้ (flexibility method) ที่ได้จากความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของวัสดุที่ได้กำหนดในแบบจำลองไฟเบอร์ โดยการรวมสติฟเนต $(k(x))$ ของไฟเบอร์ย่อยเพื่อที่จะหาเฟลกซิบิลิตีของหน้าตัด $(f(x))$ จากความสัมพันธ์ จากนั้นคำนวณหาเฟลกซิบิลิตีของชิ้นส่วนย่อย (F) จากหลักการของแรงสมมติดังสมการที่ 2.11

$$F = \int_0^L b^T(x) \cdot f(x) \cdot b(x) \cdot dx \tag{2.11}$$

โดยการสร้างสติฟเนสเมตริกซ์ของชิ้นส่วนย่อยโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ชิ้นส่วนย่อยขององค์อาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีดีกรีของความอิสระต่อด้านเท่ากับ 3 ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2.16 ได้แก่

1. การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการเฉือน
2. การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากแรงตามแนวแกน
3. การหมุนของชิ้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการดัด



รูปที่ 2.16 ดีกรีความอิสระสำหรับชิ้นส่วนย่อยของแบบจำลองไฟเบอร์

คำนวณหาความโค้ง (curvature) ที่เปลี่ยนไปเกิดขึ้นที่แกนสะเทินของหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและความเครียดที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ที่จุดกึ่งกลางของหน้าตัดดังสมการ 2.12 และ 2.13 เมื่อจากได้ความเครียดที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ที่จุดกึ่งกลางของหน้าตัดขวางก็สามารถหาความเครียดของไฟเบอร์ที่เปลี่ยนไปจากขั้นต่อหน้านี้ที่ตำแหน่งของไฟเบอร์ย่อยต่างๆ

$$\Delta\varepsilon_c = \frac{\Delta u_j - \Delta u_i}{L} \tag{2.12}$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\theta_j - \Delta\theta_i}{L} \tag{2.13}$$

โดยที่ $\Delta u_i, \Delta u_j$ คือ การเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i และ j ตามลำดับ

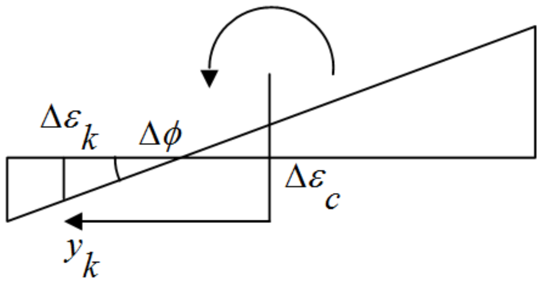
$\Delta\theta_i, \Delta\theta_j$ คือ มุมหมุนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i และ j ตามลำดับ

L คือ ความยาวของชิ้นส่วนย่อย

ความเครียดของไฟเบอร์ (fiber strain) ที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ที่ตำแหน่งใดๆ สามารถหาค่าได้โดยจากสมมติฐานที่ว่าระนาบหน้าตัดขององค์อาคารยังคงเป็นเส้นตรงภายหลัง

เกิดการเปลี่ยนรูปและตั้งฉากกับแกนตามยาว (longitudinal axis) ขององค์อาคาร ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.17 ได้ดังสมการ 2.14

$$\Delta\varepsilon_k = \Delta\varepsilon_c - y_k \cdot \Delta\phi \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.17 รายละเอียดหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

การคำนวณหาความเค้นของไฟเบอร์ (fiber stress) ในแต่ละไฟเบอร์ย่อย สามารถหาค่าได้จากความเครียดที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม จากนั้นแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ของหน้าตัดสามารถหาได้จากการปริพันธ์ความเค้นที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ของไฟเบอร์ย่อยทุกไฟเบอร์บนหน้าตัดดังสมการ 2.15

$$\Delta N = \int_A \Delta\sigma dA = \sum_{n=1}^{k} (\Delta\varepsilon_k E_{kt} A_k) = EA_t^* \Delta\varepsilon_c - EG_t^* \Delta\phi \tag{2.15}$$

$$\Delta M = -\int_A \Delta\sigma y dA = -\sum_{n=1}^{k} (\Delta\varepsilon_k E_{kt} A_k y_k) = -EG_t^* \Delta\varepsilon_c + EI_t^* \Delta\phi \tag{2.16}$$

โดยที่

$$EA_t^* = EA_{ct}^* + EA_{st}^* = \sum_{k=1}^{NFC} (E_{kct} A_{kc}) + \sum_{k=1}^{NFS} (E_{kst} A_{ks}) \tag{2.17}$$

$$EG_t^* = EG_{ct}^* + EG_{st}^* = \sum_{k=1}^{NFC} (E_{kct} A_{kc} y_{kc}) + \sum_{k=1}^{NFS} (E_{kst} A_{ks} y_{ks}) \tag{2.18}$$

$$EI_t^* = EI_{ct}^* + EI_{st}^* = \sum_{k=1}^{NFC} (E_{kct} A_{kc} y_{kc}^2) + \sum_{k=1}^{NFS} (E_{kst} A_{ks} y_{ks}^2) \tag{2.19}$$

โดยที่ k คือ จำนวนไฟเบอร์ทั้งหมดของหน้าตัด

NFC คือ จำนวนไฟเบอร์ทั้งหมดของคอนกรีต

NFS คือ จำนวนไฟเบอร์ทั้งหมดของเหล็กเสริม

A_{kc} คือ พื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์คอนกรีต

A_{ks} คือ พื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์เหล็กเสริม

E_{kct} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

E_{kst} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

y_{kc} คือ ระยะห่างของไฟเบอร์คอนกรีตที่วัดจากแนวแกนสะเทิน

y_{ks} คือ ระยะห่างของไฟเบอร์เหล็กเสริมที่วัดจากแนวแกนสะเทิน

แรงเฉือนที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้หาได้จากสมการ 2.20

$$\Delta Q = -\frac{d\Delta M}{dx} \tag{2.20}$$

โดยที่ $\Delta N_i = -\Delta N$ คือ แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i

$\Delta N_j = \Delta N$ คือ แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย j

$\Delta Q_i = -\Delta Q$ คือ แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i

$\Delta Q_j = \Delta Q$ คือ แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย j

$\Delta M_i = -\Delta Q \cdot \frac{L}{2} - \Delta M$ คือ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i

$\Delta M_j = -\Delta Q \cdot \frac{L}{2} + \Delta M$ คือ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย j

เมื่อรวมสมการทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ของชิ้นส่วนย่อย ทำให้สามารถหาสติฟเนสเมตริกซ์ของชิ้นส่วนย่อยได้สมการที่ 2.21

เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ค่าสติฟเนสเมตริกซ์ $\left[k_t\right]$ จะมีค่าไม่คงที่โดยค่าของสติฟเนสจะแปรเปลี่ยนตามแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดต่างๆ ของคอนกรีตและเหล็กเสริมของชิ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\{\Delta f\} = \left[k_t\right]\{\Delta u\} \tag{2.21}$$

โดยที่

$$\{\Delta u\} = \{\Delta u_i \quad \Delta v_i \quad \Delta\theta_i \quad \Delta u_j \quad \Delta v_j \quad \Delta\theta_j\}^T$$

$$\{\Delta f\} = \{\Delta N_i \quad \Delta Q_i \quad \Delta M_i \quad \Delta N_j \quad \Delta Q_j \quad \Delta M_j\}^T$$

และ

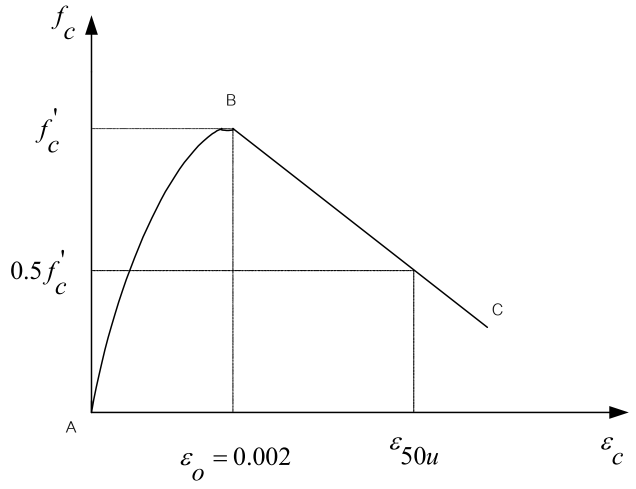
$$
\left[k_t\right]=\begin{bmatrix}
\frac{EA_t^*}{L} & 0 & -\frac{EG_t^*}{L} & -\frac{EA_t^*}{L} & 0 & \frac{EG_t^*}{L} \\
0 & \frac{12EI_t^*}{L^3} & \frac{6EI_t^*}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_t^*}{L^3} & \frac{6EI_t^*}{L^2} \\
-\frac{EG_t^*}{L} & \frac{6EI_t^*}{L^2} & \frac{4EI_t^*}{L} & \frac{EG_t^*}{L} & -\frac{6EI_t^*}{L^2} & \frac{2EI_t^*}{L} \\
-\frac{EA_t^*}{L} & 0 & \frac{EG_t^*}{L} & \frac{EA_t^*}{L} & 0 & -\frac{EG_t^*}{L} \\
0 & -\frac{12EI_t^*}{L^3} & -\frac{6EI_t^*}{L^2} & 0 & \frac{12EI_t^*}{L^3} & -\frac{6EI_t^*}{L^2} \\
\frac{EG_t^*}{L} & \frac{6EI_t^*}{L^2} & \frac{2EI_t^*}{L} & -\frac{EG_t^*}{L} & -\frac{6EI_t^*}{L^2} & \frac{4EI_t^*}{L}
\end{bmatrix}
$$

2.5 แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลองไฟเบอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถจำแนกออกเป็นแบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด, แบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด

Kent และ Park (1971) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด โดยทดสอบการโอบรัดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกนกระทำแบบศูนย์กลางเสา ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดจะมีกำลังลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากค่าความเครียดมีค่าประมาณ 0.002 ทั้งนี้เพราะการที่ไม่มีการโอบรัดของการเสริมเหล็กตามขวาง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเหนียว (ductility) ของคอนกรีตนั้นมีค่าจำกัดเนื่องจากค่าความเครียดของคอนกรีตที่จุดประลัยมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังแสดงรูปที่ 2.18 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ดังสมการ 2.22 ถึง 2.24



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของ Kent และ Park (1971)

ช่วง AB ($\varepsilon_c \le \varepsilon_o$)
$$f_c = f_c'\left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)^2\right] \quad (2.22)$$

ช่วง BC ($\varepsilon_c > \varepsilon_o$)
$$f_c = f_c' - Z_l\left(\varepsilon_c - \varepsilon_o\right) \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_c < 0.004 \quad (2.23)$$

$$f_c = 0 \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_c \ge 0.004 \quad (2.24)$$

โดยที่ $Z_l = \dfrac{f_c' - 0.5f_c'}{\varepsilon_{50u} - 0.002}$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.002f_c'}{f_c' - 1000}$$

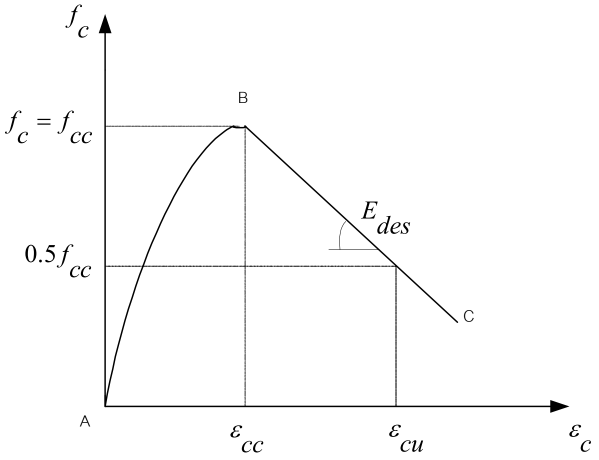
f_c' คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)

ε_o คือ ความเครียดของคอนกรีตที่กำลังสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.002

2.5.2 แบบจำลองของคอนกรีตมีมีการโอบรัด

Hoshikuma และคณะ (1997) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด โดยทดสอบตัวอย่าง 31 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่ทดสอบนั้นไม่คิดผลของคอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด (cover concrete) ตัวอย่างที่ทดสอบมีเพียงแค่คอนกรีตที่มีการโอบอัดของเหล็กเสริมตามขวางทั้งสิ้น โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนของปริมาตรเหล็กเสริมทางขวางต่อปริมาณคอนกรีต ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวาง ลักษณะของของอและลักษณะหน้าตัดขวาง ทดสอบภายใต้แรงอัด ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ความสัมพันธ์ที่ได้มานั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ช่วงที่ความเค้นเพิ่มขึ้น, ความเค้นลดลงและความเค้นคงที่ จากนั้นได้เปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้เสนอกับผลการวิเคราะห์จากการวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งผลปรากฏว่าแบบจำลองที่เสนอมีความถูกต้องและใกล้เคียงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ

ความเครียดแสดงในรูปที่ 2.19 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ดังสมการที่ 2.25 ถึง 2.26



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ Hoshikuma และคณะ (1997)

ช่วง AB $\left(\varepsilon_c \le \varepsilon_{cc}\right)$ $$f_c = E_c\varepsilon_c\left[1-\frac{1}{n}\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^{n-1}\right] \quad (2.25)$$

ช่วง BC $\left(\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \le \varepsilon_{cu}\right)$ $$f_c = f_c + E_{des}\left(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}\right) \quad (2.26)$$

โดยที่ $$n = \frac{E_c\varepsilon_{cc}}{E_c\varepsilon_{cc} - f_{cc}}$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{2E_{des}}$$

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.8\alpha\frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}}$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta\frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}}$$

$$E_{des} = 11.2\frac{f_{co}^2}{\rho_s f_{yh}}$$

f_c คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)

ε_{cc} คือ ความเครียดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด

f_{cc} คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)

f_{co} คือ กำลังของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด (เมกกะปาสคาล)

E_c คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (เมกกะปาสคาล)

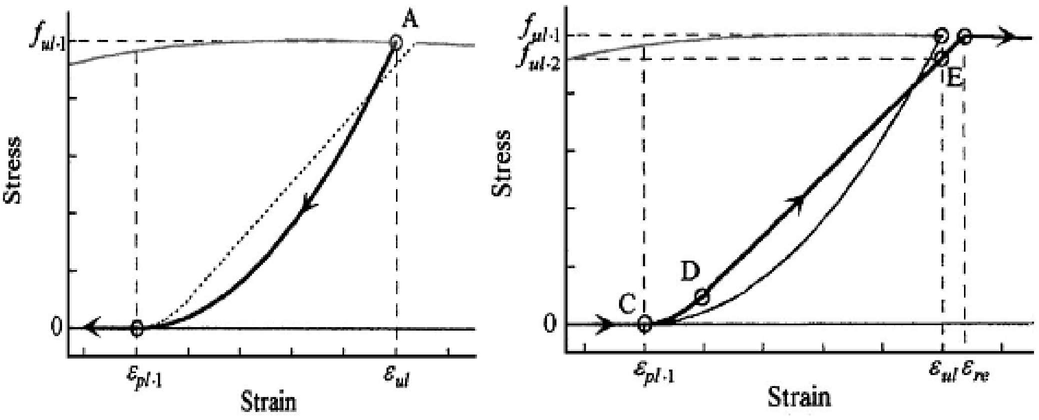
E_{des} คือ อัตราการลดลงของกราฟในช่วง $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \le \varepsilon_{cu}$

ρ_s คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดโดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กเสริมทางขวาง

f_{yh} คือ กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมทางขวาง

α, β คือ พารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของหน้าตัดโดยหน้าตัดรูปวงกลมจะมีค่า $\alpha = 1$ และ $\beta = 1$ หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจะมีค่า $\alpha = 0.2$ และ $\beta = 0.4$

Sakai และ Kawashima (2006) ได้เสนอแบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัดสำหรับการถอนแรงกระทำ (Unloading) และการให้แรงกระทำอีกครั้ง (Reloading) รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดง ได้เสนอแบบจำลองการถอนแรงกระทำดังสมการที่ 2.27และสมการของการให้แรงอีกครั้งดังสมการที่ 2.28 ซึ่งแบบจำลองที่เสนอมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ให้แรงอัดกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่พิจาณาเหล็กเสริมตามขวางในปริมาณที่แตกต่างกัน



(ก) การถอนแรงกระทำ (ข) การให้แรงอีกครั้ง

รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Sakai และ Kawashima, 2006)

การถอนแรงกระทำ

$$f_c = f_{ul\cdot1}\left[\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ul}} - \frac{\varepsilon_{pl\cdot1}}{\varepsilon_{pl\cdot1}}\right]^2 \quad (2.27)$$

การให้แรงอีกครั้ง

$$f_c = \begin{cases} 2.5 f_{ul\cdot n}\left(\dfrac{\varepsilon_c - \varepsilon_{pl\cdot n}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl\cdot n}}\right)^2 & 0 \le \left(\dfrac{\varepsilon_c - \varepsilon_{pl\cdot n}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl\cdot n}}\right) < 0.2 \\ E_{c\cdot rl}\left(\varepsilon_c - \varepsilon_{ul}\right) + f_{ul\cdot n+1} & 0.2 \le \left(\dfrac{\varepsilon_c - \varepsilon_{pl\cdot n}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl\cdot n}}\right) \le \left(\dfrac{\varepsilon_{re} - \varepsilon_{pl\cdot n}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl\cdot n}}\right) \end{cases} \quad (2.28)$$

โดยที่ $f_{ul\cdot1}$ คือ กำลังคอนกรีตที่ตำแหน่งการถอนแรงกระทำจากเส้นโค้งขอบเขต

$f_{ul\cdot n+1}$ คือ ความเค้นคอนกรีตที่จุด ε_{ul} หลังจากการให้แรงอีกเป็นครั้งที่ n

$\varepsilon_{pl\cdot1}$ คือ ความเครียดพลาสติกของคอนกรีตหลังจากถอนแรงกระทำจากเส้นโค้งขอบเขต

$\varepsilon_{ul\cdot1}$ คือ ความเครียดของคอนกรีตที่ตำแหน่งถอนแรงกระทำจากเส้นโค้งขอบเขต

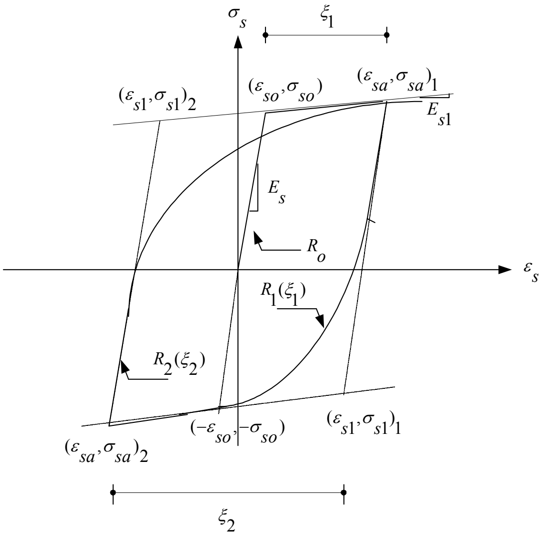
$\varepsilon_{pl\cdot n}$ คือ ความเครียดพลาสติกคอนกรีตหลังจากถอนแรงกระทำครั้งที่ n

ε_{re} คือ ความเครียดคอนกรีตที่จุดตัดของเส้นโค้งขอบเขตและเส้นการให้แรงกระทำอีกครั้ง

ε_{ul} คือ ความเครียดคอนกรีตที่จุดถอนแรงกระทำจากเส้นโค้งขอบเขต

2.5.3 แบบจำลองเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

Menegotto และ Pinto (1973) ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมโดยไม่พิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 2.21 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงของการให้แรงอีกครั้ง (reloading) และถอนแรงกระทำ (unloading) แสดงได้ดังสมการ 2.30



รูปที่ 2.21 แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรของ Menegotto และ Pinto (1973)

$$\sigma_s^* = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{\left(1+\left(\varepsilon_s^*\right)^R\right)^{\frac{1}{R}}} \tag{2.30}$$

โดยที่ $\varepsilon_s^* = \dfrac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sa}}{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{sa}}$, $\sigma_s^* = \dfrac{\sigma_s - \sigma_{sa}}{\sigma_{s1} - \sigma_{sa}}$

$\sigma_{s1}, \varepsilon_{s1}$ คือ ความเค้นและความเครียดที่จุดตัดของเส้นโค้งขอบนอกในช่วงอิลาสติก

$\sigma_{sa}, \varepsilon_{sa}$ คือ ความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งเมื่อให้แรงกระทำกลับข้าง

$b = \frac{E_{s1}}{E_s}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสติฟเนสในช่วงของการแข็งตัวเพิ่มขึ้นต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสัมผัสในช่วงอิลาสติก

R คือ ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อส่วนโค้งของเส้นกราฟ (bauschinger effect) มีค่าเท่ากับ $R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$

ξ คือ ค่าความเครียดพลาสติก

R_0, a_1, a_2 คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

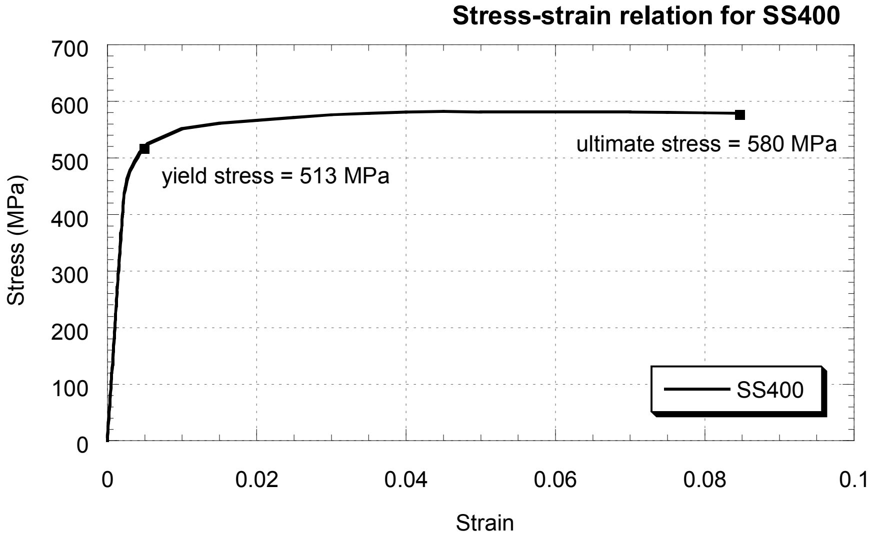
บทที่ 3

การทดสอบปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเสาคอนกรีตที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมตามยาว และศึกษาพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ได้แก่ คุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, การเตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

3.1 คุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากเหล็กเกรด SS400 ซึ่งเป็นเหล็กที่ไม่มีผลของสเตรนฮาร์เดนนิ่ง (strain hardening) มีกำลังที่จุดคราก (yield strength) ต้องไม่น้อยกว่า 392 เมกกะปาสคาล (4000 กก./ซม.^{2}) ใช้เสริมในตัวอย่างเสาโดยทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติก่อนที่นำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไปเสริมในตัวอย่างเสา ซึ่งคุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่สำคัญสามารถหาได้จากทดสอบรับแรงดึงในห้องปฏิบัติ ผลการทดสอบจากรูปที่ 3.1 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 199173 เมกกะปาสคาล, กำลังรับแรงดึงที่จุดครากมีค่าเท่ากับ 513 เมกกะปาสคาล และกำลังรับแรงดึงประลัยค่าเท่ากับ 580 เมกกะปาสคาล ซึ่งพบว่าเหล็กเกรด SS400 มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ในการทดสอบรับแรงดึงพบว่าหลังจุดครากขณะที่ความเครียดเพิ่มแต่ความเค้นค่อนข้างคงที่จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดได้แสดงในดังรูปที่ 3.1และตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเกรด SS400 ที่ใช้ทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเกรด SS400

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเกรด SS400 ที่ใช้ทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

คุณสมบัติ	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (เมกกะปาสคาล)	กำลังรับแรงดึงประลัย, f_{su} (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_s (เมกกะปาสคาล)
SS400	513	580	199173

3.2 การเตรียมตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสำหรับทดสอบ

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. (DB25) เหล็กขนาดเดียวกับเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสาสวมด้วยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม การทำปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมทำจากเหล็กเพลาเกรด SS400 กลึงให้ได้ขนาดตามกำหนดโดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 27 มม. ทั้งหมด 5 ขนาด รวม 6 ตัวอย่าง ลักษณะการให้รายละเอียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งได้แปรผันตามความยาวและความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.3

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทดสอบรวมทั้งหมด 6 ตัวอย่าง กำหนดชื่อตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งให้ง่ายต่อการเข้าใจได้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

L150-T6 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 150 มม. มีความหนา 6 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มม.)

L100-T9 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 100 มม. มีความหนา 9 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 36 มม.)

L100-T6 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 100 มม. มีความหนา 6 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มม.)

L100-T3 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 100 มม. มีความหนา 3 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 30 มม.)

L50-T6 หมายถึง ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งขนาดความยาว 50 มม. มีความหนา 6 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มม.)

No-collar หมายถึง เหล็กเสริมที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดขนาดปลอกยึดยั้งเหล็กเสริม

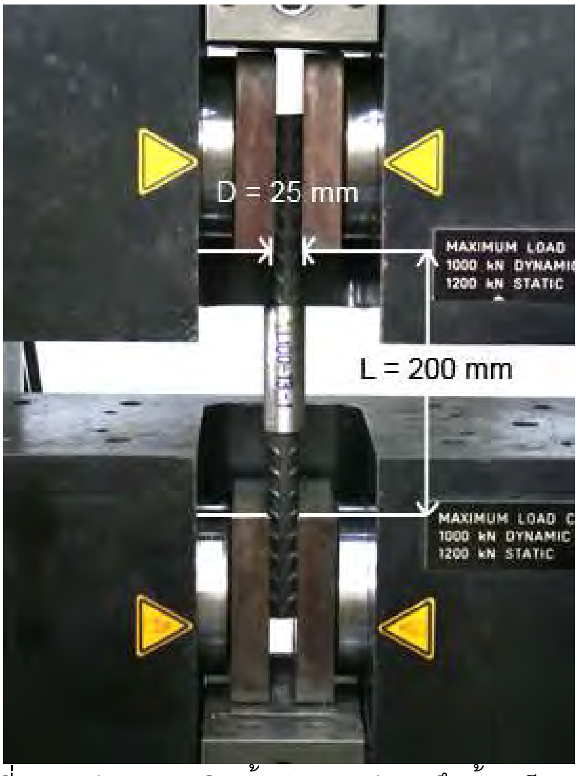
ความยาว (มม.)	ความหนา (มม.)		
	9	6	3
150	-	L150-T6	-
100	L100-T9	L100-T6	L100-T3
50	-	L50-T6	-

รูปที่ 3.2 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความยาว

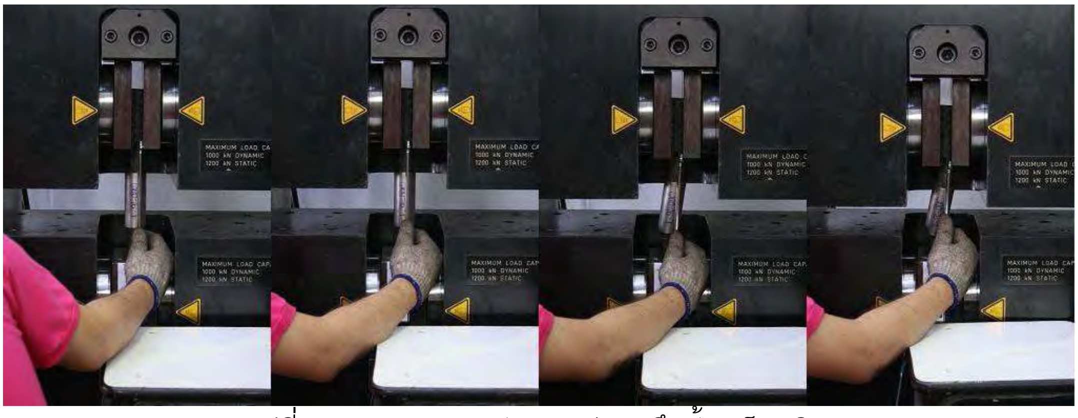
รูปที่ 3.3 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรความหนา

3.3 การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแต่ละตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งได้ทดสอบด้วยเครื่องให้แรงตามแนวแกนโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) ซึ่งได้กำหนดอัตราความเครียดอย่างช้า (slow strain rate) การทดสอบได้ติดตั้งตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมให้อยู่กึ่งกลางของหัวจับทั้งสองของเครื่องให้แรงตามแนวแกน โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างหัวจับทั้งสองเท่ากับ 200 มม. หรือมีอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่ได้สวมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (L/D) 8 เท่า ซึ่งการเลือกระยะห่างระหว่างหัวจับทั้งสองเท่ากับ 200 มม. เปรียบเสมือนปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสอบเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200 โดยมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 200 มม. เหล็กเสริมตามขวางทำหน้าที่ยึดรั้งทางด้านข้างเปรียบเสมือนหัวจับของเครื่องให้แรงตามแนวแกน เพื่อที่จะหาขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมที่สามารถใช้กับตัวอย่างเสาจริงได้ ซึ่งรูปแบบการติดตั้งและการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



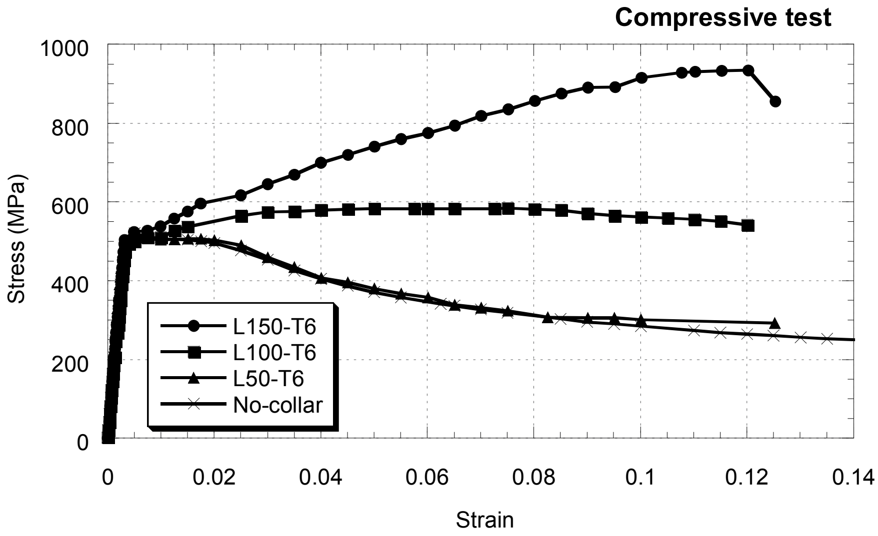
รูปที่ 3.5 การทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

3.4 ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

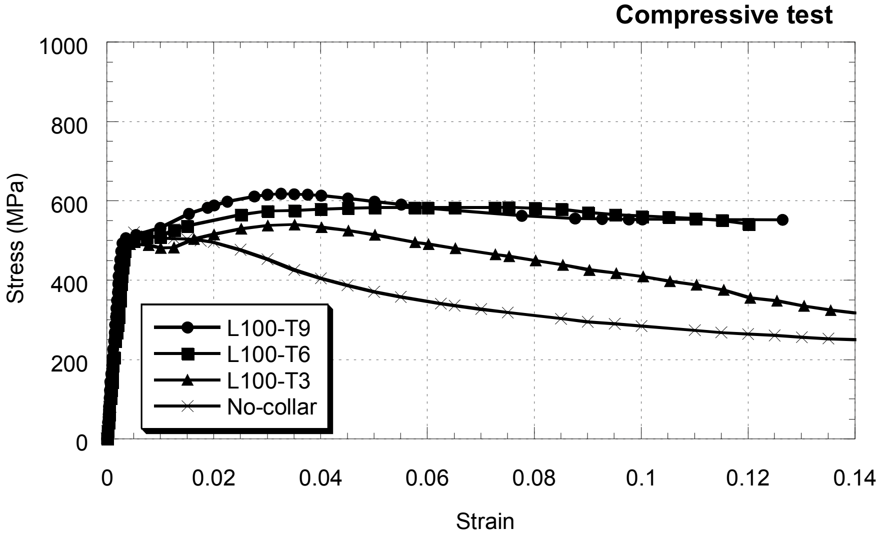
ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน พบว่าทุกตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้และค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดครากใกล้เคียงกัน โดยมีค่าแตกต่างกันหลังจุดคราก และพบว่าตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L50-T6 และเหล็กเสริมที่ไม่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ใกล้เคียงกัน ทั้ง 2 ตัวอย่าง ไม่มีความสามารถในการรับแรงด้านข้างที่เกิดจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริม มีค่าสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน คือ 4.38 กิโลนิวตัน-เมตร และ 4.23 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L150-T6 สามารถรับแรงอัดกระทำตามตามแนวแกนเพิ่มขึ้นหลังจุดครากจนถึงจุดวิบัติ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถรับแรงด้านข้างที่เกิดจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมได้มากที่สุด โดยมีค่าสลายพลังงานสูงสุดเท่ากับ 8.80 กิโลนิวตัน-เมตร

ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมสามารถรับแรงอัดกระทำตามตามแนวแกนได้ค่อนข้างคงที่หลังจุดคราก และมีการสลายพลังงานที่เหมาะสมซึ่งมี 2 ขนาด คือ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T9 และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T6 มีค่าสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน คือ 6.64 และ 6.49 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ เพราะฉะนั้นจึงเลือกตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 6 มม. ผลการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความยาวและความหนาดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ตามลำดับ

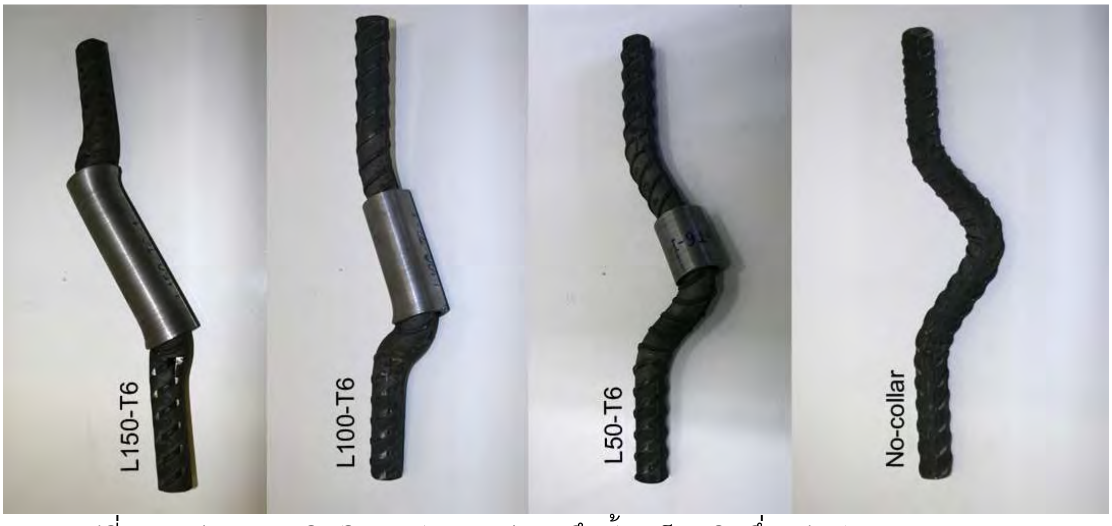


รูปที่ 3.6 ผลทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความยาว



รูปที่ 3.7 ผลทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนแปรผันขนาดความหนา

รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหลังการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนซึ่งแปรผันขนาดตามความยาว พบว่าจากรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L50-T6 ไม่ได้ช่วยยึดรั้งการโก่งเดาะ และตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L150-T6 มีการยึดรั้งทางด้านข้างดีที่สุด และรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหลังการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนซึ่งแปรผันความหนาตามลำดับ พบว่าการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T9 และ L100-T6 มีรูปแบบที่คล้ายกันคือมีระยะการโก่งเดาะทางด้านข้างมีใกล้เคียงกันและมีลักษณะการโก่งเดาะที่คล้ายกัน ตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม L100-T3 พบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีการฉีกขาดเนื่องจากมีความหนาที่ไม่เพียงพอต่อการยึดรั้งการโก่งเดาะ



รูปที่ 3.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งแปรผันขนาดความยาว

รูปที่ 3.9 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมซึ่งแปรผันขนาดความหนา

บทที่ 4

ขั้นตอนการเตรียมเสาตัวอย่างและการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาจำนวน 2 ต้น ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดตามขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40 ม. x0.40 ม. งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาเพื่อหาสมรรถนะของตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในบริเวณจุดหมุนพลาสติก ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ, รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างเสา, คุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบ และขั้นตอนการเตรียมการทดสอบและการปรับแก้ผลการทดสอบ

4.1 ตัวอย่างเสาทดสอบ

ขนาดและรายละเอียดของตัวอย่างเสาได้เลือกเสาที่มีหน้าตัดตามขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40 ม.x0.40 ม. เป็นขนาดของเสาสะพานตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับสะพานชุมชนที่มีช่วงยาว 10 ม. ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ในการก่อสร้างสะพานในสายทางในปัจจุบันถูกซึ่งออกแบบโดยไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว โดยที่มาของตัวอย่างเสาในการทดสอบได้กล่าวในภาคผนวก ก

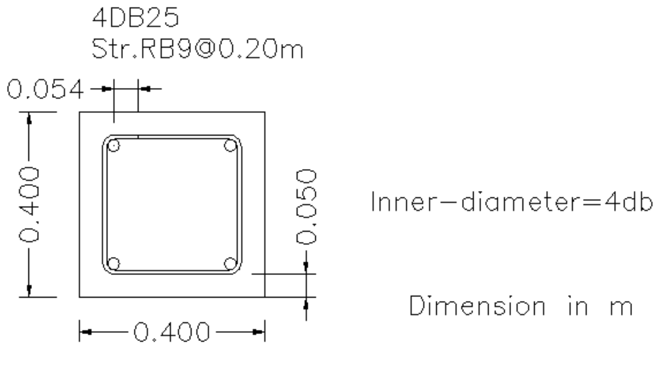
ตัวอย่างเสาในงานวิจัยนี้เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างได้มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งมีลักษณะการเสริมเหล็กและการให้รายละเอียดของตัวอย่างเสาแสดงในตารางที่ 4.1 หน้าตัดตามขวางของตัวอย่างเสาแสดงรายละเอียดเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีขนาดและรายละเอียดของการเสริมเหล็กเหมือนกันซึ่งได้แสดงขนาดของตัวอย่างเสาในรูปที่ 4.2 และรายละเอียดการเสริมเหล็กบริเวณจุดหมุนพลาสติกได้แสดงในรูปที่ 4.3 โดยตัวอย่างทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ เหล็กเสริมตามยาวใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 25 มม. (DB25) จำนวน 4 เส้น กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y) ไม่น้อยกว่า 392 เมกกะปาสคาล (4000 กก./ซม.^{2}) เหล็กเสริมตามขวางใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. (RB9) กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง (f_{yh}) ไม่น้อยกว่า 235 เมกกะปาสคาล (2400 กก./ซม.^{2}) ความยาวปลายของงอของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าไม่น้อยกว่า 54 มม. โดยสลับวนปลายขอในแต่ละชั้นระดับความสูงของการติดตั้งเหล็กเสริมตามขวาง ตัวอย่างเสาอีกต้นได้เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพิ่มเติมระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง 2 ปลอกแรกจากฐานรากซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 39 มม. และมีความหนา 6 มม. ที่มาของขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้ทดสอบได้กล่าวในบทที่ 3 โดยตัวอย่างเสาได้ถูกกำหนดชื่อ ซึ่งประกอบด้วยตัวอักษรและตัวเลขสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

C-09-200 หมายถึง เสาที่ไม่มีเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, ใช้เหล็กกลมเป็นเหล็กเสริมตามขวางซึ่งมีขนาด 9 มม. (RB9) และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง 200 มม.

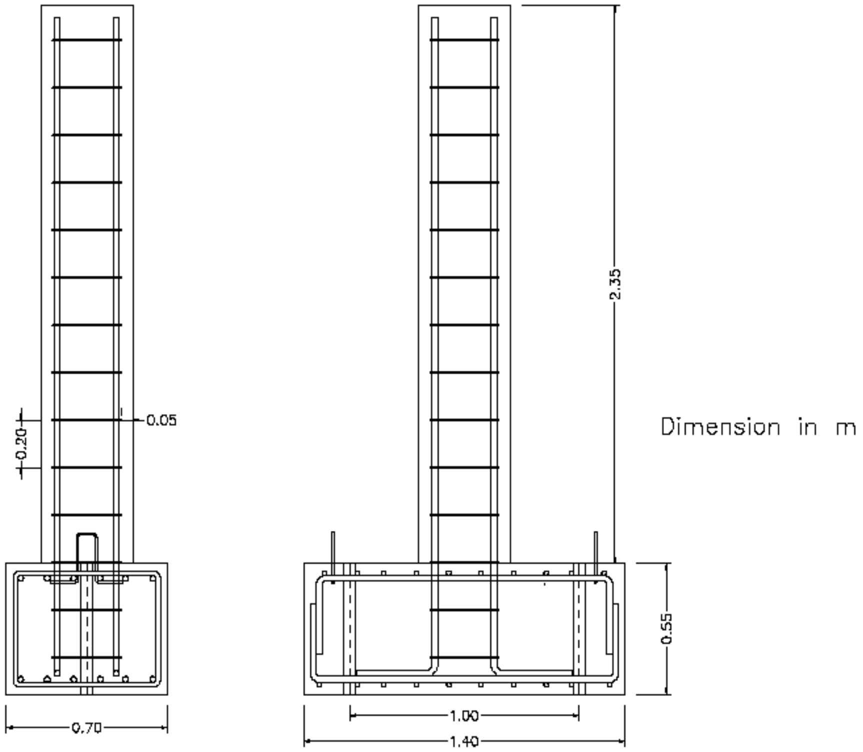
CC-09-200 หมายถึง เสาที่มีเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, ใช้เหล็กกลมเป็นเหล็กเสริมตามขวางซึ่งมีขนาด 9 มม. (RB9) และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง 200 มม.

ตารางที่ 4.1 สรุปการออกแบบของตัวอย่างเสา

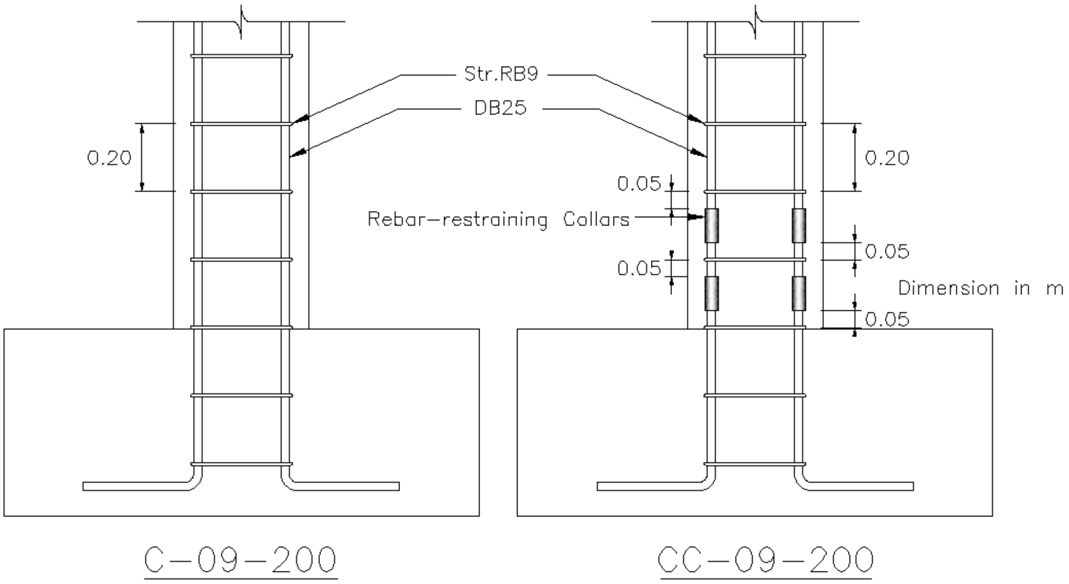
รายละเอียดของตัวอย่างเสา	C-09-200	CC-09-200
ขนาดหน้าตัด (ม.)	0.40x0.40	
ความสูงประสิทธิภาพ (ม.)	2.15	
ความสูงต่อความลึกหน้าตัด (aspect ratio)	5.4	
อัตราส่วนของเหล็กเสริมตามยาว	0.0123	
อัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวาง (volumetric ratio)	0.00424	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)	34.3	
ชนิดของเหล็กเสริมตามยาว	4-DB25	
ชนิดของเหล็กเสริมตามขวาง	RB9@200	
ชนิดของเหล็กของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม	-	SS400
แรงอัดตามแนวแกน (กิโลนิวตัน)	314	
อัตราส่วนแรงในแนวแกน P/fc’Ag (%)	5.7	



รูปที่ 4.1 รายละเอียดเหล็กเสริมของหน้าตัดของเสาตามขวางของตัวอย่างเสา



รูปที่ 4.2 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา



รูปที่ 4.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมและปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมบริเวณจุดหมุนพลาสติก

4.2 คุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบ

4.2.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นคอนกรีตที่ผสมเสร็จซึ่งมีหน่วยน้ำหนักปกติ โดยใช้คอนกรีตรูปทรงกระบอกในการออกแบบมีค่ากำลังอัดประลัย (f'_c) เท่ากับ 34.3 เมกกะปาสคาล (350 กก./ซม.^{2}) ซึ่งเป็นกำลังอัดของคอนกรีตที่พบในเสาสะพานที่ตรวจสอบภาคสนามเป็นส่วนใหญ่ โดยการตรวจสอบค่าการยุบตัว (slump) เท่ากับ 15±2.5 ซม. การหล่อตัวอย่างเสาได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 12 ตัวอย่าง ทดสอบหาค่ากำลังอัดทุกสัปดาห์ของการบ่มคอนกรีต ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

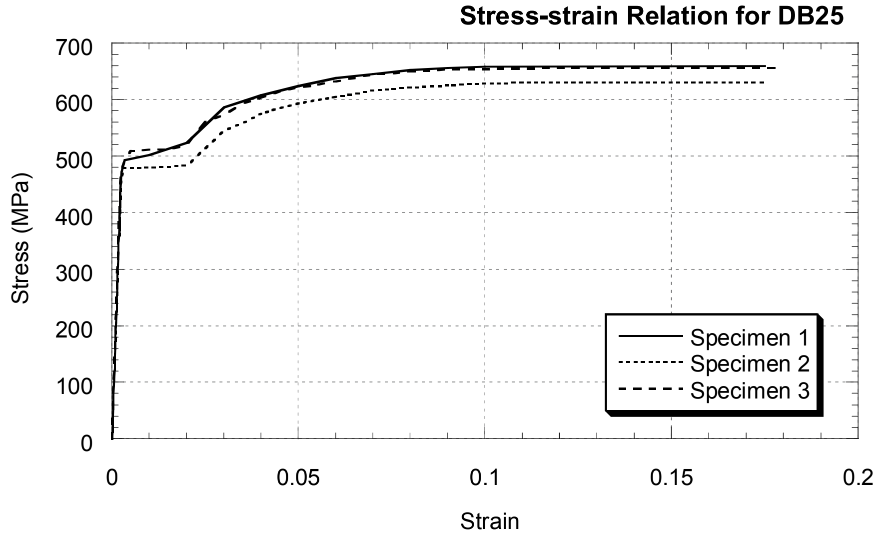
อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	แรงกด (กิโลนิวตัน)	ค่ากำลังอัดประลัย, f'_c (เมกกะปาสคาล)	หมายเหตุ
7	1	149.7	513.3	29.1	
	2	150.4	376.0	21.2	
	3	149.9	443.7	25.1	
	เฉลี่ย	-	-	25.1	
14	1	150.9	466.1	26.1	
	2	149.3	530.2	30.3	
	3	149.5	519.0	29.6	
	เฉลี่ย	-	-	28.6	
21	1	150.0	517.7	29.3	
	2	150.4	527.5	30.0	
	3	150.8	524.4	29.4	
	เฉลี่ย	-	-	29.4	
28	1	150.6	612.8	34.4	
	2	151.2	289.5	-	ยกเว้น
	3	151.5	599.5	33.2	
	เฉลี่ย	-	-	33.8	

4.2.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 ขนาด ซึ่งประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. (DB25) เป็นเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมในฐานรากมีกำลังที่จุดคราก (f_y) ไม่น้อยกว่า 392 เมกกะปาสคาล (4000 กก./ซม.^{2}) และเหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. (RB9) เป็นเหล็กเสริมตามขวางมีกำลังที่จุดคราก (f_{yh}) ไม่น้อยกว่า 235 เมกกะปาสคาล (2400 กก./ซม.^{2}) โดยในแต่ละขนาดได้สุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบโดยค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กเสริม เช่น ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y), ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_{su}) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (E_s) ของทั้งเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมได้แสดงใน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริม DB25

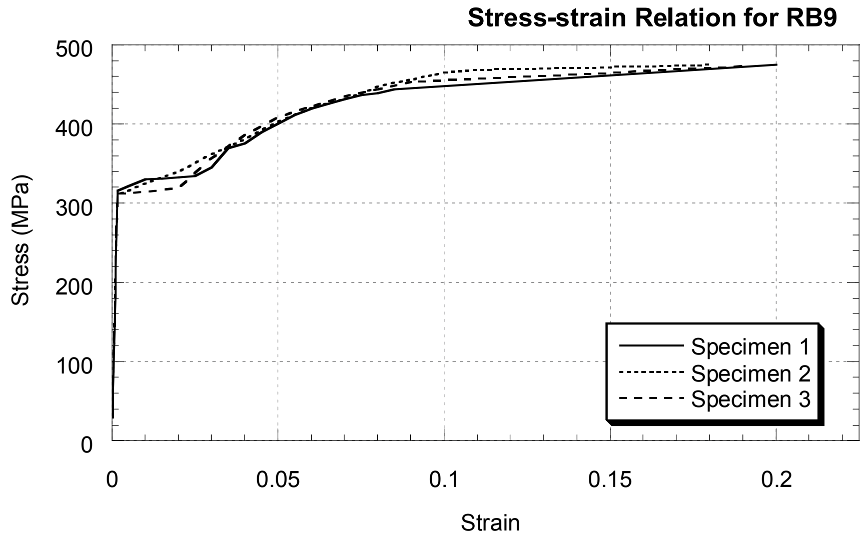
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (เมกกะปาสคาล)	กำลังรับแรงดึงประลัย, f_{su} (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_s (เมกกะปาสคาล)
1	495	658	194238
2	479	630	189333
3	503	656	197181
เฉลี่ย	492	648	193584



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม DB25

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริม RB9

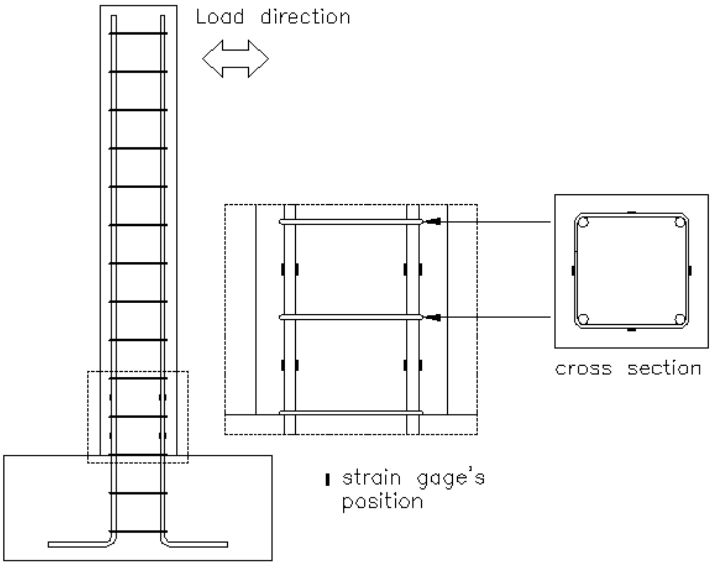
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (เมกกะปาสคาล)	กำลังรับแรงดึงประลัย, f_{su} (เมกกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_s (เมกกะปาสคาล)
1	316	444	203067
2	311	469	199143
3	313	453	205029
เฉลี่ย	313	455	202413



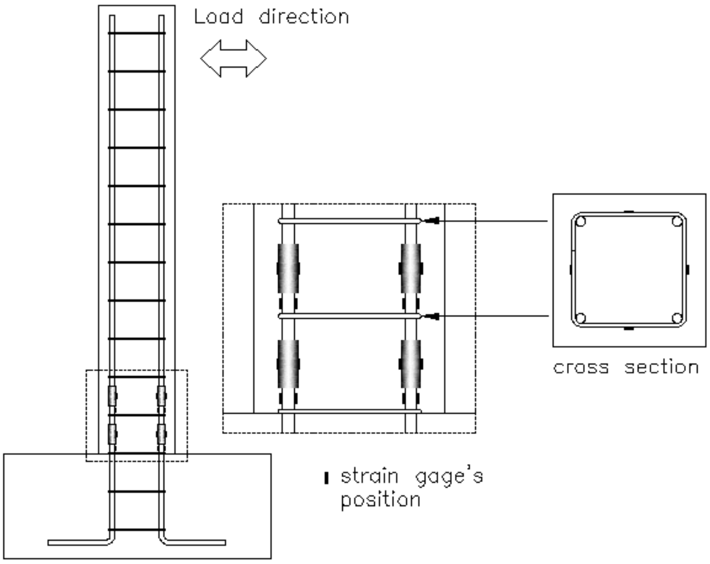
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริม RB9

4.2.3 เกจวัดความเครียด

เกจวัดความเครียด (strain gage) ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเกจวัดความเครียดสำหรับวัดความเครียดในเหล็กเสริมยี่ห้อ Kyowa ชนิด KFG-10-120-C1-11 มีขนาดความยาวเกจ 10 มม. ความยาวของสายสัญญาณ 10 ม. มีค่าความต้านทานเท่ากับ 119.8±0.2 โอห์ม มีค่าปรับแก้ของเกจ (gage factor) เท่ากับ 2.11 ในงานวิจัยนี้ใช้เกจวัดความเครียดที่ใช้จำนวน 64 ตัว ซึ่งแบ่งออกเป็นเกจวัดความเครียดในตัวอย่างเสา C-09-200 จำนวน 24 ตัวและในตัวอย่างเสา CC-09-200 จำนวน 40 ตัว รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา C-09-200 และ CC-09-200 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา C-09-200



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของตัวอย่างเสา CC-09-200

4.3 การเตรียมตัวอย่างเสา

การเตรียมตัวอย่างเสาในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการตัดเหล็กข้ออ้อยขนาด 25 มม. (DB25) จำนวน 4 เส้นยาวเส้นละ 3.50 ม. เพื่อเตรียมใช้เป็นเหล็กเสริมตามยาวและอีกส่วนหนึ่งเป็นเหล็กเสริมในฐานราก และเหล็กกลมขนาด 9 มม. (RB9) เพื่อเตรียมเป็นเหล็กเสริมตามขวาง จากนั้นดัดเหล็กขนาด 25 มม. ประกอบเข้าด้วยกันโดยการใช้ลวดผูกเหล็กผูกยึดตามรูปแบบการเสริมเหล็กที่ได้เตรียมไว้ ซึ่งลักษณะการผูกและประกอบได้แสดงในรูปที่ 4.8 ต่อจากนั้นติดตั้งแบบหล่อฐานราก

ใช้แบบหล่ออลูมิเนียมประกอบเข้าด้วยกัน นำลูกปูนมาหนุนใต้เหล็กเสริมฐานรากและจัดวางตำแหน่งของเหล็กเสริมของฐานรากให้ได้ตามแบบที่ได้เตรียมไว้ จากนั้นทาน้ำมันที่ผิวด้านในของแบบหล่อเพื่อง่ายต่อการถอดแบบหล่อ หลังจากนั้นวางตำแหน่งของท่อพีวีซีเพื่อใช้สำหรับสอดท่อนเหล็กกำลังสูงยึดฐานรากให้ติดแน่นกับพื้นในห้องปฏิบัติการ รูปที่ 4.9 แสดงการวางตำแหน่งของเหล็กเสริมตามยาวและท่อพีวีซี หลังจากนั้นเทคอนกรีตผสมเสร็จลงในแบบหล่อที่ได้เตรียมไว้และตรวจเช็คระดับความสูงของคอนกรีตให้มีขนาดของฐานรากตามแบบที่ได้กำหนดไว้

การเตรียมตัวอย่างหลังจากคอนกรีตแข็งตัวได้ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gage) ที่เหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง นอกจากนั้นยังได้ติดตั้งเกจวัดความเครียดบนปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200 ซึ่งรายละเอียดการติดตั้งเกจวัดความเครียดจะกล่าวถึงการติดตั้งบนเหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กที่มีผิวไม่เรียบจึงมีการติดตั้งที่ยากกว่าเหล็กกลม โดยขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การติดตั้งเกจวัดความเครียดโดยเจียรส่วนที่เป็นบั้งหรือครีบของเหล็กข้ออ้อยตรงตำแหน่งที่จะติดตั้งเกจวัดความเครียด
2. ใช้กระดาษทรายชนิดหยาบขัดผิวเหล็กเสริมบริเวณที่ได้เจียรให้เรียบ และตามด้วยกระดาษทรายชนิดละเอียดขัดผิวเหล็กเสริมให้เรียบเงา
3. ทำความสะอาดเหล็กเสริมบริเวณที่จะติดตั้งเกจวัดความเครียดด้วยสารอะซิโตน (acetone) ซึ่งมีคุณสมบัติขจัดคราบสกปรกและสลายประจุไฟฟ้า
4. ติดเกจวัดความเครียดโดยใช้กาวไซยาโนอะครีเลท (Cyano-Acrylate adhesive) ยี่ห้อ Kyowa ชนิด CC-33A ทาลงบนเกจวัดความเครียดติดลงบนผิวเหล็กเสริมที่เรียบเงาที่ตำแหน่งที่จะติดตั้ง จากนั้นกดเกจวัดความเครียดด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกทันทีกดไว้ประมาณ 20-30 วินาที ซึ่งแผ่นฟิล์มพลาสติกเป็นอุปกรณ์ในการติดเกจวัดความเครียด
5. หุ้มเกจวัดความเครียดที่ติดเรียบร้อยแล้วด้วยเทป Vinyl-Mastic (VM tape) ซึ่งเป็นเทปที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นสูงสามารถกันน้ำและกันกระแทกได้เป็นอย่างดี เพื่อป้องกันการเสียหายของเกจวัดความเครียด

รูปแบบการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา CC-09-200 และตัวอย่างเสา C-09-200 ได้แสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ เมื่อเสร็จสิ้นการติดตั้งเกจวัดความเครียด, การติดตั้งเหล็กเสริมตามขวาง และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม จากนั้นติดตั้งแบบหล่อตัวอย่างเสาซึ่งใช้แบบหล่อไม้อัดดำประกอบแบบหล่อเข้าด้วยกันรวบสายสัญญาณของเกจวัดความเครียดทั้งหมดสอดออกทางแบบหล่อที่ได้เจาะรูไว้ และได้เจาะรูเพื่อติดตั้งแกนเหล็กขนาด 10 มม. สอดผ่านแบบหล่อตัวอย่างเสาที่ระดับความสูงจากผิวบนฐานราก 3 ระดับ คือ 200, 400 และ 600 มม. จากนั้นตรวจสอบระดับฉากและแนวดิ่ง แล้วจึงใช้ลูกปูนหนุนเผื่อให้เหล็กเสริมตามยาวอยู่ในลักษณะสมมาตรและ

ค้ำยันป้องกันไม่ให้แบบหล่อตัวอย่างเสาเกิดการเคลื่อนตัวขณะเทคอนกรีต การตั้งแบบเสาและการค้ำยันได้แสดงในรูปที่ 4.12 จากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อที่ได้เตรียมไว้ โดยเทคอนกรีตแบ่งออกเป็นชั้นและจี้คอนกรีตเพื่อไม่ให้คอนกรีตมีรูโพรงอากาศ โดยในระหว่างการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากอาจจะมีผลกระทบต่อเกจวัดความเครียด และได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. การเก็บตัวอย่างคอนกรีตได้แสดงรูปที่ 4.13 หลังจากคอนกรีตเริ่มแข็งตัวได้นำกระสอบเปียกซึ่งได้แช่น้ำไว้คลุมนอกแบบหล่อเพื่อลดการศูนย์เสียน้ำของคอนกรีตและเป็นการบ่มเพื่อเพิ่มกำลังของคอนกรีต

หลังจากเทคอนกรีตเป็นระยะเวลา 3 วัน ได้ถอดแบบหล่อออกแต่ยังคงใช้กระสอบเปียกในการบ่มคอนกรีตซึ่งกระสอบเปียกได้มีการลดน้ำเพื่อให้มีความชุ่มชื้นอยู่เสมอ การใช้กระสอบเปียกบ่มตัวอย่างเสาแสดงในรูปที่ 4.14 บ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ในช่วงระยะเวลาที่บ่มคอนกรีตจะทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตทุกสัปดาห์

รูปที่ 4.8 การประกอบของเหล็กเสริมตามยาวและฐานรากเข้าด้วยกัน

รูปที่ 4.9 การวางตำแหน่งของเหล็กเสริมตามยาวและท่อพีวีซี

รูปที่ 4.10 ลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 4.11 ลักษณะการเสริมเหล็กของตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 4.12 การยึดรั้งแบบหล่อตัวอย่างเสา

รูปที่ 4.13 การเก็บตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4.14 การใช้กระสอบเปียกบ่มตัวอย่างเสา

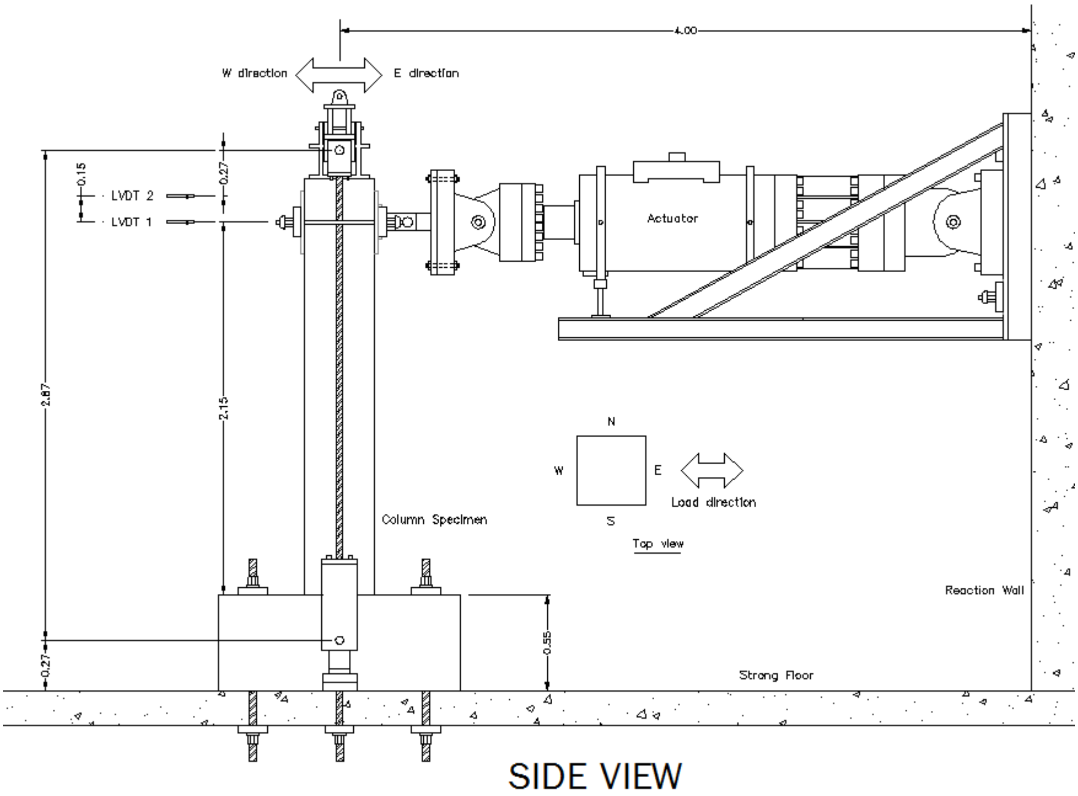
4.4 การเตรียมการทดสอบ

4.4.1 การติดตั้งตัวอย่าง

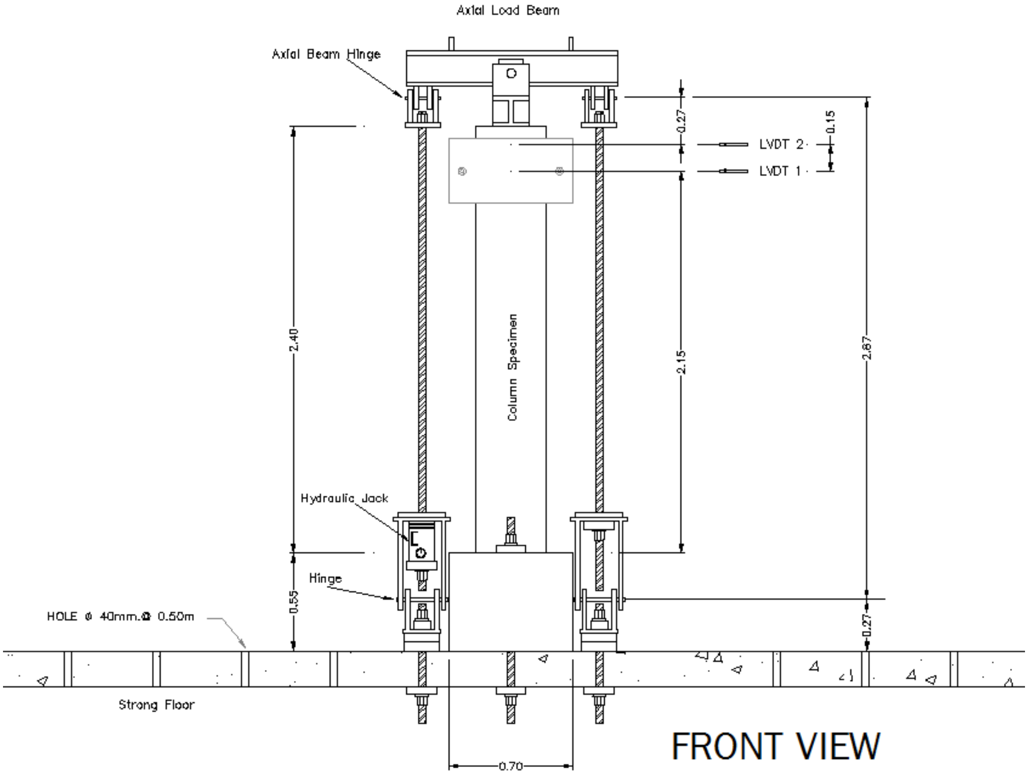
ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างเริ่มจากทาสีตัวอย่างเสาด้วยสีขาวเพื่อที่จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้ง่ายและชัดเจนขณะทดสอบ และตีเส้นตารางเพื่อที่จะง่ายต่อการสังเกตและสะดวกต่อการบันทึกรอยแตกร้าวที่สังเกตได้ระหว่างการทดสอบ โดยแต่ละระดับจะห่างกันระดับละ 10 ซม. จากนั้นใช้เครนยกตัวอย่างเสาโดยยกหูหิ้วซึ่งได้ออกแบบไว้บริเวณฐานราก หย่อนตัวอย่างเสาลงบนตำแหน่งที่จะทดสอบโดยพื้นของฐานรากสัมผัสกับพื้นในห้องปฏิบัติการแต่ยังพอสามารถเคลื่อนย้ายได้เล็กน้อย จากนั้นนำท่อนเหล็กกำลังสูงสอดผ่านท่อพีวีซีที่ฐานรากของตัวอย่างเสาและสอดผ่านพื้นในห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบให้ระนาบของตัวอย่างเสาตั้งฉากกับแนวการให้แรงของเครื่องให้แรงทางด้านข้างและตรวจสอบตัวอย่างเสาให้อยู่ในแนวดิ่ง เมื่อตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้วใช้เครนวางตัวอย่างเสาลงกับพื้นห้องปฏิบัติการ รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบติดตั้งเสาทดสอบทางด้านข้างและด้านหน้า และรูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบติดตั้งเสาทดสอบในการทดสอบ

หลังจากได้วางตัวอย่างเสาในตำแหน่งที่เหมาะสมแล้ว ติดตั้งเหล็กฉากกับแกนเหล็กขนาด 10 มม. ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการจับยึดเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่เพื่อวัดการหมุนตัวของตัวอย่างเสาโดยติดตั้งทุกช่วง 200 มม. จำนวน 3 ช่วงจากผิวบนของฐานราก รูปแบบการติดตั้งเหล็กฉากได้แสดงในรูปที่ 4.18

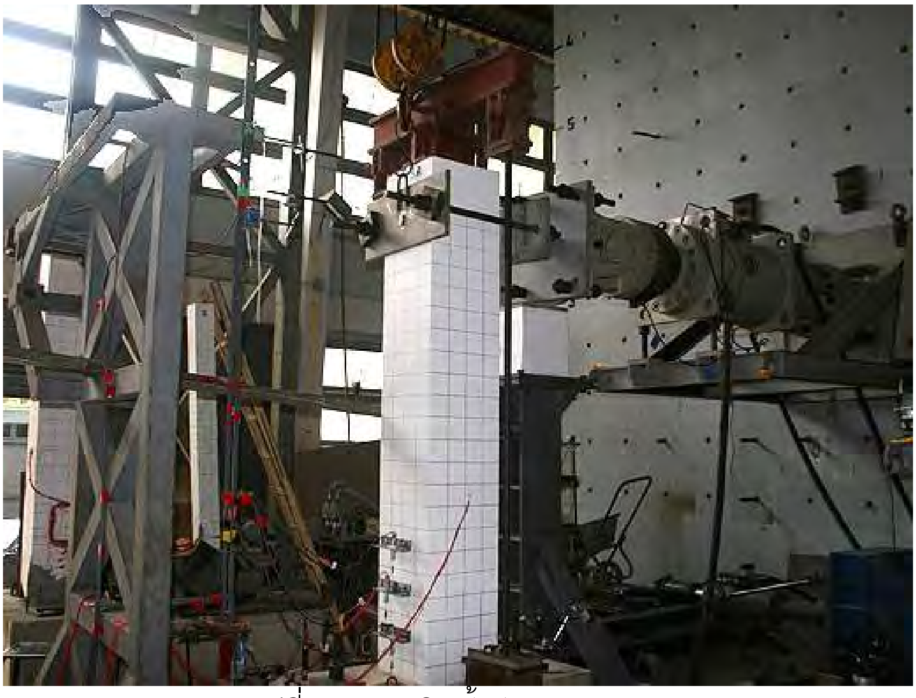
การยึดระหว่างฐานรากของตัวอย่างเสาและพื้นห้องปฏิบัติการได้ ยึดด้วยวิธีอัดแรง (prestress) ยึดติดเพื่อไม่ให้ฐานรากของตัวอย่างเสาเกิดการเคลื่อนที่หรือให้เกิดการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อให้แรงกระทำทางด้านข้างโดยเครื่องให้แรงด้านข้าง (hydraulic jack) ซึ่งการใช้อุปกรณ์ยึดติดฐานรากด้วยวิธีอัดแรงแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.15 รูปแบบติดตั้งเสาทดสอบทางด้านข้าง



รูปที่ 4.16 รูปแบบการติดตั้งเสาทางด้านหน้า



รูปที่ 4.17 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

4.4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำกับตัวอย่างเสา

การทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาโดยให้แรงกระทำในแนวดิ่งและแรงกระทำในแนวราบ ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้แรง ซึ่งอุปกรณ์ให้แรงแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ อุปกรณ์ให้แรงกระทำในแนวดิ่งและอุปกรณ์ให้แรงกระทำทางด้านข้างซึ่งอธิบายวิธีการติดตั้งโดยละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำในแนวดิ่ง

การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำในแนวดิ่งนั้นประกอบด้วยคานเหล็ก, จุดหมุนสำหรับติดตั้งเครื่องให้แรงแบบใช้มือควบคุมและท่อนเหล็กกำลังสูงโดยติดตั้งโดยใช้เครนยกคานเหล็กขึ้นไปวางบนหัวเสาของตัวอย่างเสาโดยใช้แผ่นไม้อัดที่มีขนาดเท่าหน้าตัดตามขวางของตัวอย่างเสารองใต้คานเหล็กเพื่อที่จะใช้เป็นตัวกระจายแรงลงตัวอย่างเสาได้เต็มหน้าตัด จากนั้นติดตั้งท่อนเหล็กกำลังสูงสอดผ่านคานได้แสดงในรูปที่ 4.20 และสอดผ่านจุดหมุนสำหรับติดตั้งเครื่องให้แรงแบบใช้มือควบคุม จากนั้นติดตั้งเครื่องให้แรงแบบใช้มือควบคุม (manual hydraulic jack) ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.21 ในงานวิจัยนี้ได้สอบเทียบเครื่องให้แรงในแนวดิ่งเพื่อให้มีความถูกต้อง ซึ่งผลการสอบเทียบเครื่องให้แรงในแนวดิ่งได้แสดงในภาคผนวก ข.1

รูปที่ 4.18 การติดตั้งเหล็กสำหรับจับยึดเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 4.19 การใช้อุปกรณ์ยึดติดฐานรากด้วยวิธีอัดแรง

รูปที่ 4.20 การติดตั้งคานเหล็กให้แรงในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.21 การติดตั้งเครื่องให้แรงแบบใช้มือควบคุม

4.4.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำทางด้านข้าง

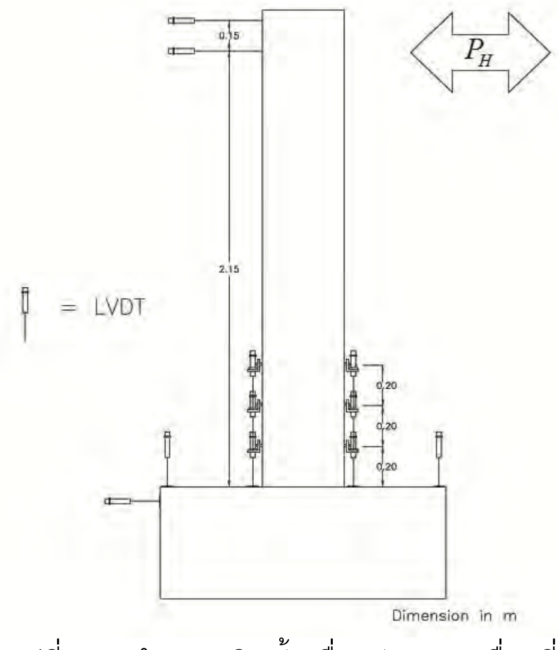
การติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้แรงกระทำทางด้านข้าง คือ เครื่องให้แรง (hydraulic jack) ซึ่งได้ติดตั้งบนผนังในห้องปฏิบัติการ เครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้างในห้องปฏิบัติการนี้สามารถให้แรงสูงสุดเท่ากับ 100 ตัน มีช่วงระยะของการเคลื่อนที่ ±150 มม. เริ่มติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำด้านข้างโดยติดตั้งแผ่นเหล็กซึ่งมีความหนา 30 มม. ติดตั้งโดยประกบกับตัวอย่างเสาโดยใช้ท่อนเหล็กกำลังสูงเป็นตัวยึดติดกับเหล็กส่วนหน้าของเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4.22 งานวิจัยนี้ได้สอบเทียบเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งผลการทดสอบเทียบเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้างได้แสดงในภาคผนวก ข.2

รูปที่ 4.22 การติดตั้งแผ่นเหล็กยึดติดกับเหล็กส่วนหน้าของเครื่องให้แรงในแนวราบ

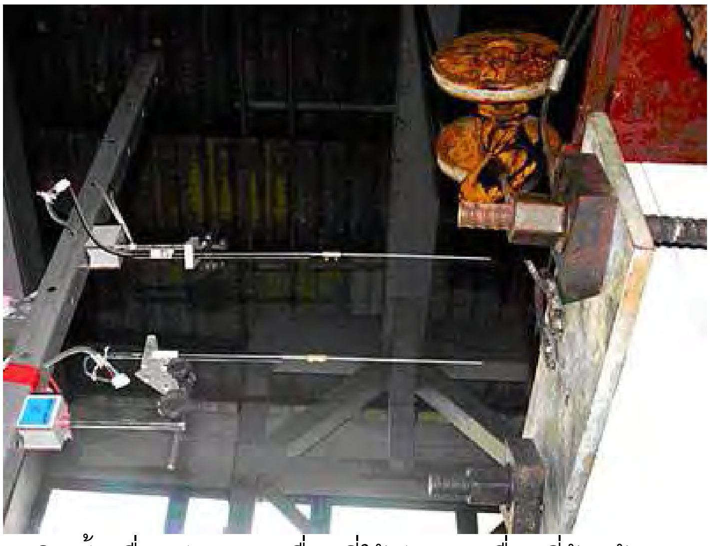
4.4.3 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่

การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ (Displacement transducer) จำนวน 11 ตัว โดยมีความสามารถในการอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 มม. สามารถเก็บค่าระยะเคลื่อนที่ผ่านคอมพิวเตอร์โปรแกรม โดยหลักการทำงานของเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จะวัดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเคลื่อนที่ โดยแปลงความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นระยะเคลื่อนที่โดยแต่ละตัวจะใช้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเท่ากับ 20 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ในงานวิจัยนี้ได้สอบเทียบเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่เพื่อที่แสดงผลของค่าที่วัดได้อย่างถูกต้อง ซึ่งผลการทดสอบเทียบเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ได้แสดงในภาคผนวก ข.3 โดยติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ตามตำแหน่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.23 โดยเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 11 ตัว จำแนกออกได้ดังนี้

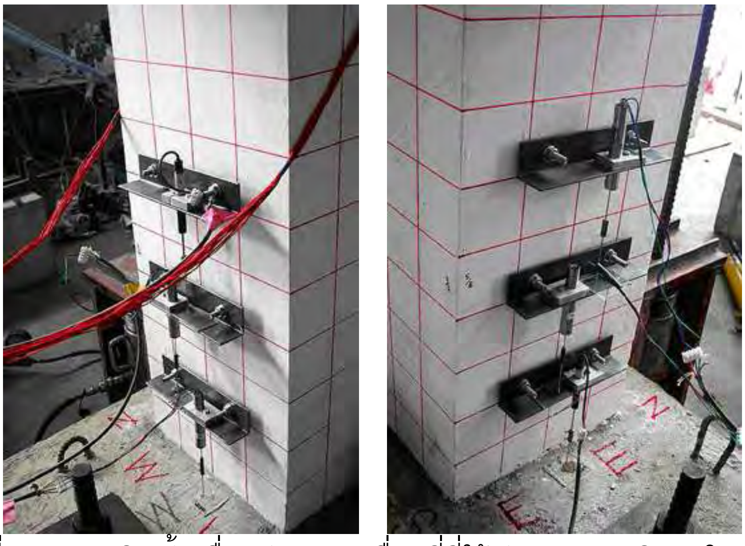
1. เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 2 ตัว สำหรับวัดการเคลื่อนที่ด้านข้างขณะทดสอบ โดยติดตั้งอยู่ที่ระดับ 2.15 และ 2.30 ม. จากระดับผิวบนของฐานราก การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่สำหรับใช้วัดการเคลื่อนที่ด้านข้างได้แสดงในรูปที่ 4.24
2. เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 6 ตัว สำหรับวัดการหมุนของตัวอย่างเสาบริเวณโคนเสา โดยแบ่งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ออกเป็นทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ด้านละ 3 ตัว ติดตั้งที่ 3 ระดับความสูงทุกช่วง 200 มม. จำนวน 3 ช่วงจากผิวบนของฐานราก โดยติดตั้งบนเหล็กฉากซึ่งยึดติดกับแท่งเหล็กขนาด 10 มม. การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่สำหรับใช้วัดการหมุนของตัวอย่างเสาบริเวณโคนเสาได้แสดงในรูปที่ 4.25
3. เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 2 ตัว สำหรับวัดการหมุนของฐานรากของตัวอย่างเสา โดยติดตั้งที่ขอบด้านบนของฐานรากทั้งทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ข้อมูลจากเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 2 ตัวนี้จะนำไปใช้ในการปรับแก้ผลของการหมุนของฐานรากตามหัวข้อที่ 3.6.2 เพื่อปรับแก้ให้ได้ค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างที่หัวเสาที่ถูกต้อง การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่สำหรับวัดการหมุนของฐานรากของตัวอย่างเสาได้แสดงในรูปที่ 4.26
4. เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวน 1 ตัว สำหรับใช้วัดการเคลื่อนที่ของฐานรากของตัวอย่างเสา โดยติดตั้งที่ขอบด้านข้างของฐานรากทางด้านทิศตะวันตก ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่จำนวนตัวนี้จะนำใช้ในการปรับแก้ผลของการไถลของฐานราก เพื่อปรับแก้ให้ได้ค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ถูกต้อง การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่สำหรับใช้วัดการเคลื่อนที่ของฐานรากของตัวอย่างเสาได้แสดงในรูปที่ 4.27



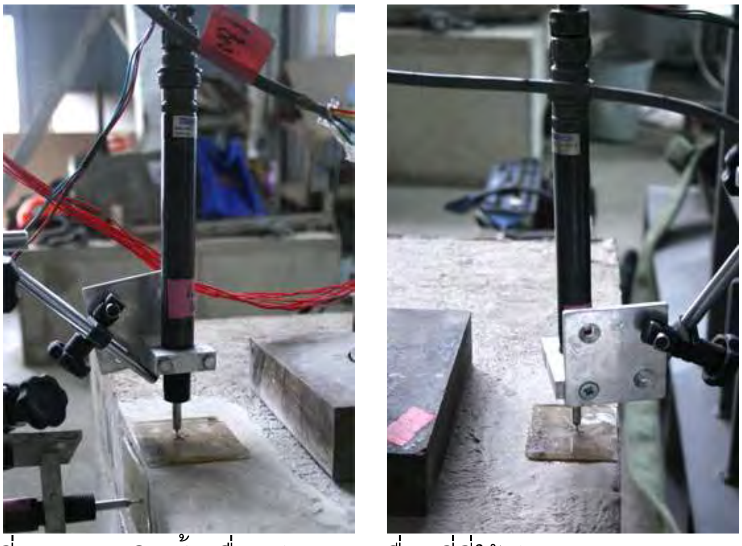
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่



รูปที่ 4.24 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา



รูปที่ 4.25 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ใช้วัดการหมุนบริเวณโคนเสา



รูปที่ 4.26 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ใช้วัดการหมุนของฐานราก

รูปที่ 4.27 การติดตั้งเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ของฐานราก

4.4.4 หน่วยรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลจากอุปกรณ์ทั้งหมดซึ่งได้แก่ แรงกระทำด้านข้าง, ระยะช่วงของการยืด-หดของเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง, เกจวัดความเครียด และเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ YOGOKAWA ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โปรแกรม Darwin โดยคอมพิวเตอร์โปรแกรมเก็บข้อมูลที่ได้ทุก 2 วินาที

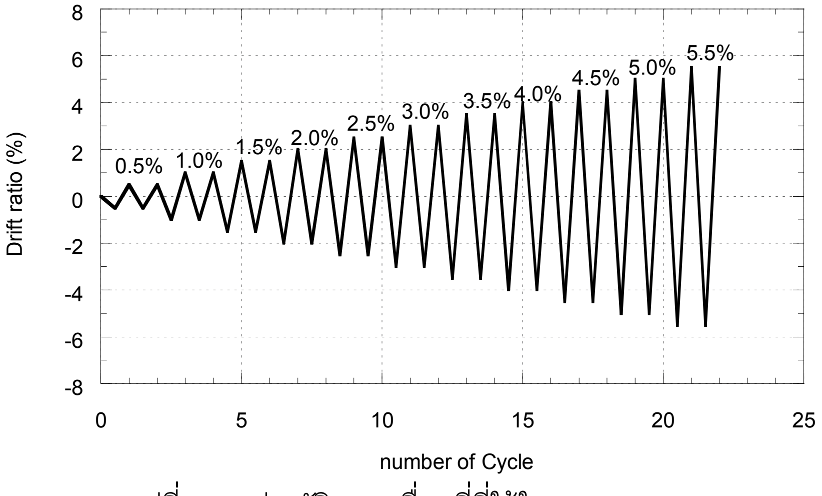
รูปที่ 4.28 เครื่องเก็บข้อมูลและลักษณะการต่อสายอุปกรณ์

4.5 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทดสอบ ซึ่งต้องจดบันทึกค่าต่างๆ เช่น ค่าความเครียดของเหล็กเสริม, ระยะเคลื่อนที่ทางด้านข้าง, ระยะช่วงการยืด-หดของเครื่องให้แรง

กระทำทางด้านข้าง และพฤติกรรมของเสาที่สังเกตได้ ทดสอบโดยการควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement control) ขั้นตอนการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เครื่องให้แรงในแนวดิ่งให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่ซึ่งกำหนดแรงอัดตามแนวแกนไว้ที่ 314 กิโลนิวตัน (32 ตัน) ซึ่งต้องตรวจสอบแรงอัดตามแนวแกนให้มีแรงตามแนวแกนคงที่ตลอดเวลาขณะทดสอบ
2. กำหนดทิศการเคลื่อนที่โดยให้เครื่องหมายลบ(-) หมายถึงแรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างเสาเกิดแรงอัดจากเครื่องให้แรงทำให้เสาเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศตะวันตก และเครื่องหมายบวก(+) หมายถึงแรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างเสาเกิดแรงดึงจากเครื่องให้แรงทำให้เสาเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศตะวันออก ในการทดสอบได้กำหนดให้แรงกระทำต่อตัวอย่างเสาให้เคลื่อนที่ไปทางลบ(-) ก่อน
3. เก็บค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียด, ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ และแรงกระทำด้านข้างโดยการเก็บข้อมูลโดยเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) เริ่มต้นตั้งยังไม่ได้ให้แรงกระทำ ซึ่งขั้นตอนการเก็บบันทึกค่าจะสิ้นสุดการทดสอบ
4. การให้แรงจากเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง โดยให้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร ควบคุมเครื่องให้แรงโดยควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement control) ทดสอบ 2 รอบแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่โดยได้กำหนดประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.29 ขณะทดสอบเมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างถึงอัตราการเคลื่อนที่ที่กำหนดจะหยุดเพื่อบันทึกข้อมูลค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียด, ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ และบันทึกผลรายละเอียดต่างๆที่สังเกตจากภายนอกซึ่งได้แก่พฤติกรรมของเสาที่เกิดขึ้นและรอยแตกร้าวของแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่
5. ทดสอบตามประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบที่ได้กำหนดไว้หรือทดสอบถึงตัวอย่างเสาเกิดการวิบัติก่อนจนไม่สามารถทดสอบต่อไปได้



รูปที่ 4.29 ประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ

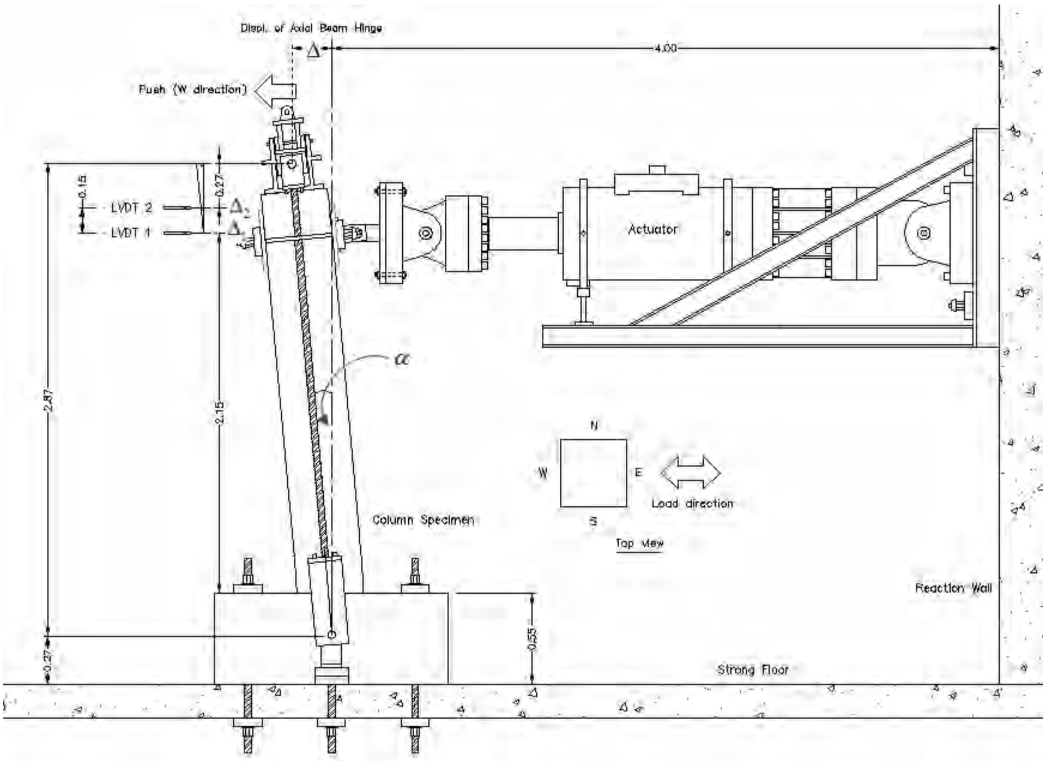
4.6 การปรับแก้ผลการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างเสานั้นเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้างกระทำให้ตัวอย่างเสามีการเคลื่อนที่ด้านข้างส่งผลให้แรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง เมื่อตัวอย่างเสาได้รับแรงกระทำทางด้านข้างถึงแม้ว่ามีการยึดฐานรากกับพื้นในห้องปฏิบัติการแบบอัดแรง แต่ฐานรากของตัวอย่างเสาอาจเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งการเคลื่อนที่ของฐานรากมี 2 กรณี คือ การหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก โดยการปรับแก้ผลการทดสอบทำเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีค่าถูกต้องซึ่งปรับแก้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ซึ่งได้ปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง และการปรับแก้การเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก

4.6.1 การปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง

แรงกระทำทางด้านข้างที่บันทึกค่าจากอุปกรณ์เก็บข้อมูลเป็นค่าที่ได้จากเครื่องให้แรงด้านข้างซึ่งมีแรงต้านจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง ขณะที่มีการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสาทำให้แรงอัดตามแนวแกนทำมุมเอียงกระทำในแนวท่อนเหล็กกำลังสูงซึ่งเป็นจุดหมุนสำหรับติดตั้งเครื่องให้แรงแบบใช้มือ รูปที่ 4.30 แสดงรูปแบบการปรับแก้ได้ใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต เพื่อที่จะปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างให้มีค่าถูกต้อง

ในระหว่างการทดสอบตัวอย่างเสามีการเคลื่อนที่ด้านข้างเป็นไปตามอัตราส่วนที่การเคลื่อนที่ตามประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถทราบมุมหมุนของปลายตัวอย่างเสาได้จากระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรง (Δ_1) และระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงที่ปลายเสา (Δ_2) จากการบันทึกค่าจากเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ จากนั้นสามารถทราบระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดหมุนที่คานที่ให้แรงกระทำในแนวแกน (Δ) จากความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมคล้ายดังสมการที่ 1 เมื่อทราบค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดหมุนที่คานที่ให้แรงกระทำในแนวแกน (Δ) สามารถทราบค่ามุมที่เปลี่ยนไปจากแนวดิ่งของแรงอัดตามแนว α ได้ดังสมการที่ 2 หลังจากนั้นสามารถหาแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่งได้ดังสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.30 การปรับแก้เนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนที่ไม่อยู่ในแนวดิ่ง

$$\Delta = \left[\frac{(\Delta_2 - \Delta_1)}{0.15} \times 0.27 \right] + \Delta_1 \tag{4.1}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta}{2.870} \right) \tag{4.2}$$

$$P_H^{'} = P_H - P_A \sin(\alpha) \tag{4.3}$$

โดยที่ $P_H^{'}$ คือ แรงกระทำด้านข้างที่ปรับแก้ผลของแรงอัดตามแนวแกน

P_H คือ แรงกระทำด้านข้างที่บันทึกค่าได้จากการทดสอบ

P_A คือ แรงอัดตามแนวแกน

Δ_1 คือ ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรง

Δ_2 คือ ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของปลายเสา

Δ คือ ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดหมุนของคานเหล็กที่ให้แรงกระทำในแนวแกน

α คือ มุมที่เปลี่ยนไปจากแนวดิ่งของแรงอัดตามแนวแกน

ตัวอย่างการคำนวณการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่งซึ่งได้ยกตัวอย่างข้อมูลและการปรับแก้ของตัวอย่างเสา C-09-200 ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +3.0% ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยมีแรงตามแนวแกน P_A = 314 กิโลนิวตัน

ตารางที่ 4.5 ค่าก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนไม่อยู่ในแนวดิ่ง

อัตราส่วน	ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง		แรงกระทำด้านข้าง	
ระยะเคลื่อนที่ (%)	ที่ระดับให้แรง Δ_1 (มม.)	ที่ปลายเสา Δ_2 (มม.)	ก่อนปรับแก้ P_H (กิโลนิวตัน)	หลังปรับแก้ $P_H^{'}$ (กิโลนิวตัน)
0.0	0	0	0	0
+3.0	65.04	71.57	81.03	72.64

เมื่อทราบระยะเคลื่อนที่ Δ_1 และ Δ_2 สามารถหาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดหมุนที่คานบนหัวเสา Δ ได้โดยสมการที่ 4.1 ดังตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\Delta = \left[\frac{(71.57-65.04)}{0.15}\times 0.27\right]+65.04 \qquad = 76.79 \text{ มม.}$$

จากนั้นเมื่อทราบระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดหมุนที่คานบนหัวเสา Δ สามารถหาค่ามุมที่เปลี่ยนไปจากแนวดิ่งของแรงอัดตามแนว α ได้ดังสมการที่ 4.2 ดังตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta}{2870}\right) \qquad = \tan^{-1}\left(\frac{76.79}{2870}\right) \qquad = 1.53 \text{ องศา}$$

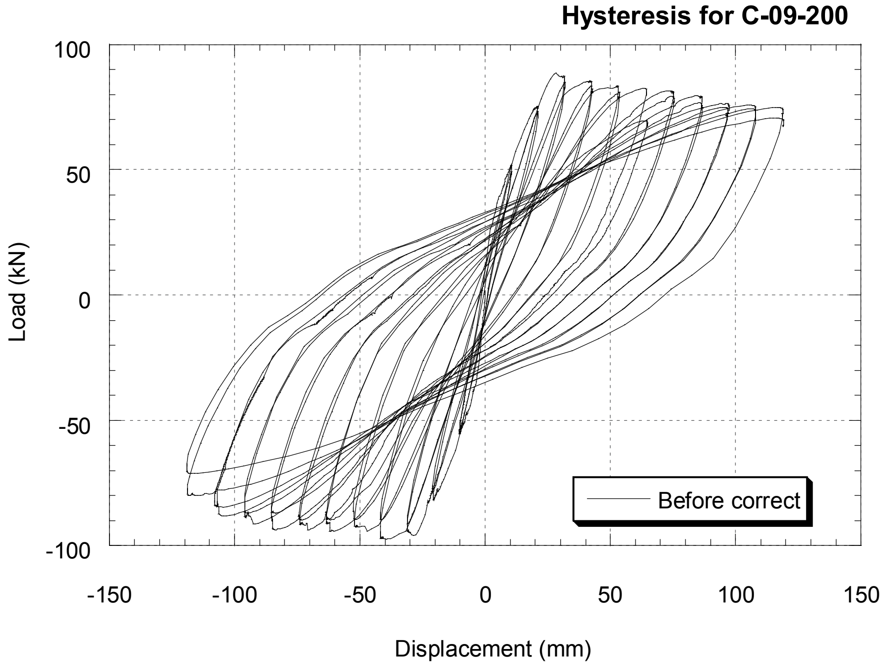
สุดท้ายเมื่อทราบค่ามุมที่เปลี่ยนไปจากแนวดิ่งของแรงอัดตามแนว α ก็สามารถหาค่าแรงกระทำด้านข้างที่ปรับแก้ผลของแรงอัดตามแนวแกน

$$P_H^{'} = P_H - P_A\sin(\alpha) \quad = 81.03 - 314\sin(1.53) \qquad = 72.64 \text{ กิโลนิวตัน}$$

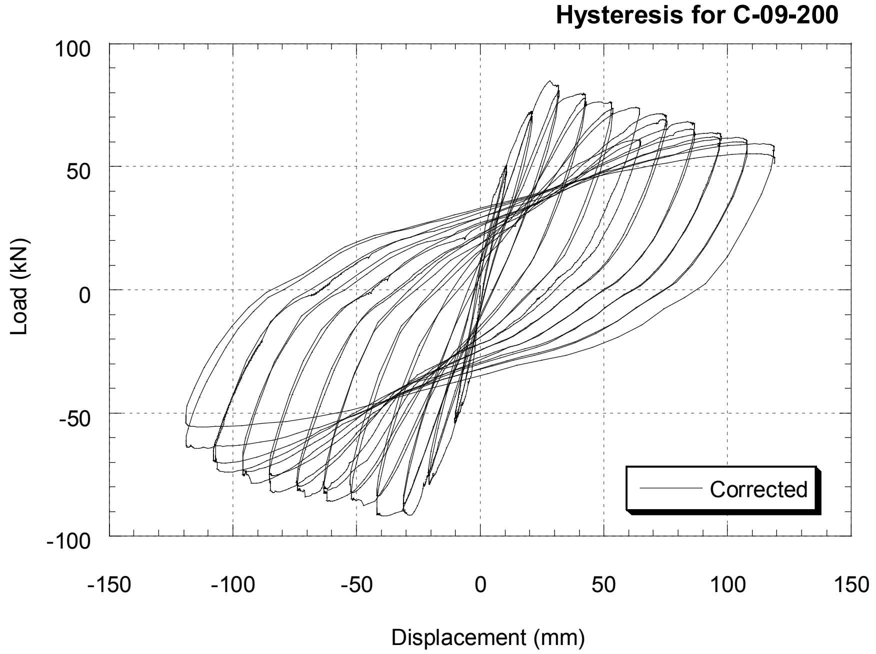
รูปที่ 4.31และรูปที่ 4.32 แสดงวงรอบฮิซเทียรีซีซก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง C-09-200 และรูปที่ 4.33 แสดงผลต่างระหว่างฮิซเทียรีซีซก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง C-09-200 รูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 แสดงวงรอบฮิซเทียรีซีซก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง CC-09-200 และรูปที่ 4.37 แสดงผลต่างระหว่างฮิซเทียรีซีซก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของเสาตัวอย่าง C-09-200

รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ Δ_2 กับ Δ_1 ของตัวอย่างเสา C-09-200 ซึ่งจะใช้ความสัมพันธ์นี้เมื่อถอดเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ Δ_2 โดยสมมติว่าระยะการเคลื่อนที่หลังการถอดเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ Δ_2 มีค่าเท่ากับความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องวัดระยะ

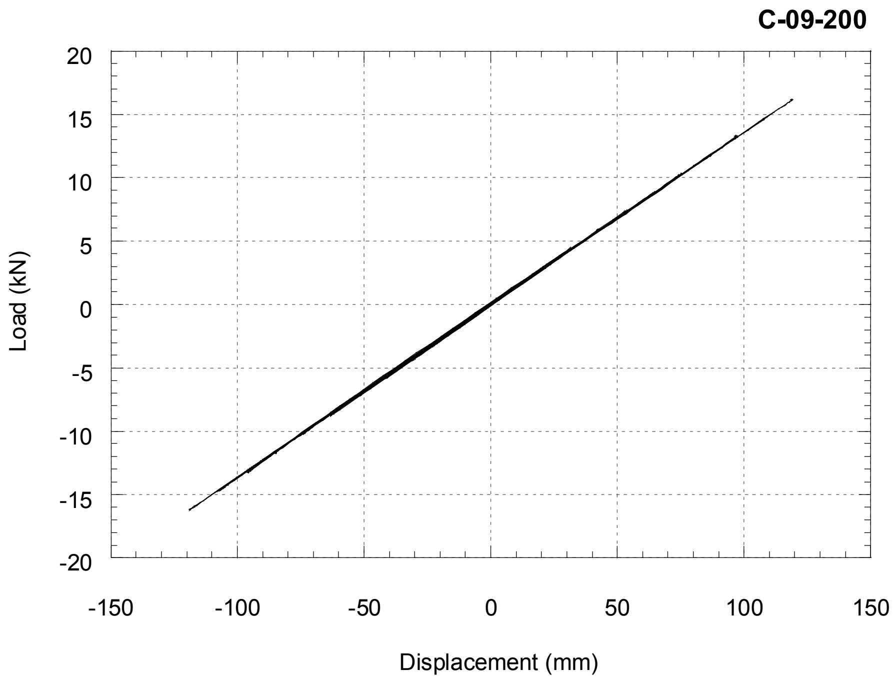
เคลื่อนที่ Δ_2 กับ Δ_1 และความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ Δ_1 กับระยะยืดหดของเครื่องให้แรงทางด้านข้างโดยใช้ความสัมพันธ์นี้เมื่อถอดเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ Δ_1 และรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ของตัวอย่างเสา CC-09-200



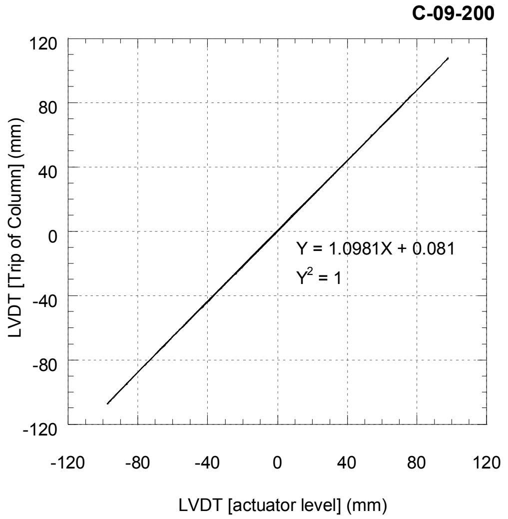
รูปที่ 4.31 วงรอบฮิซเทียรีซีซก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ C-09-200



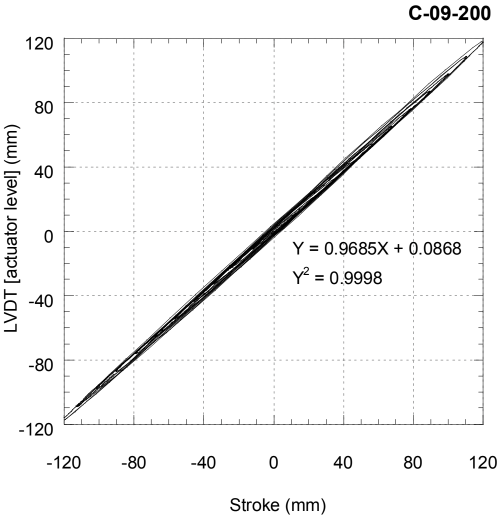
รูปที่ 4.32 วงรอบฮิซเทียรีซีซหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ C-09-200



รูปที่ 4.33 ผลต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ C-09-200

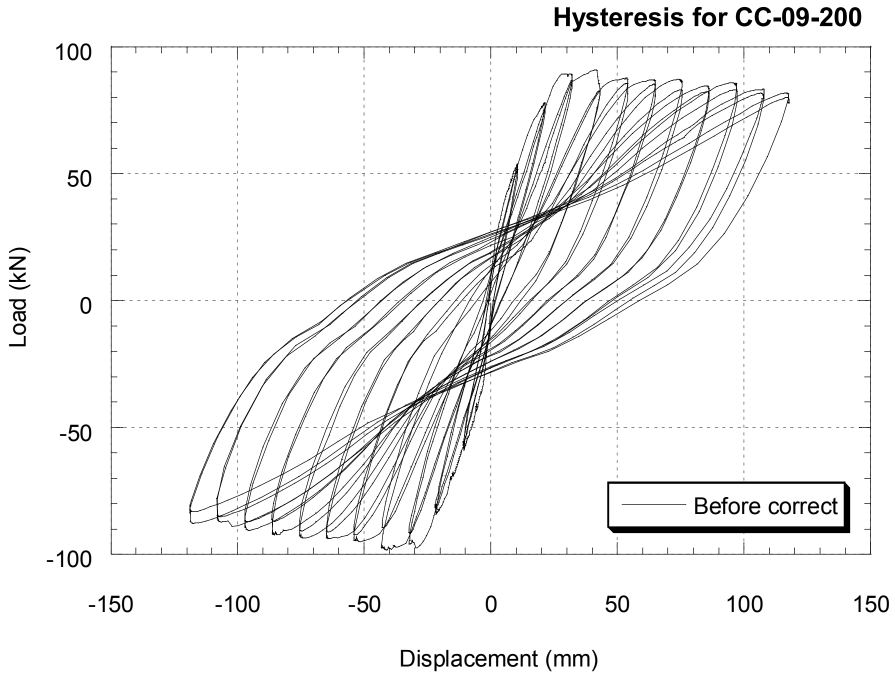


ก) ระยะเคลื่อนที่ที่ปลายเสากับที่ระดับให้แรง

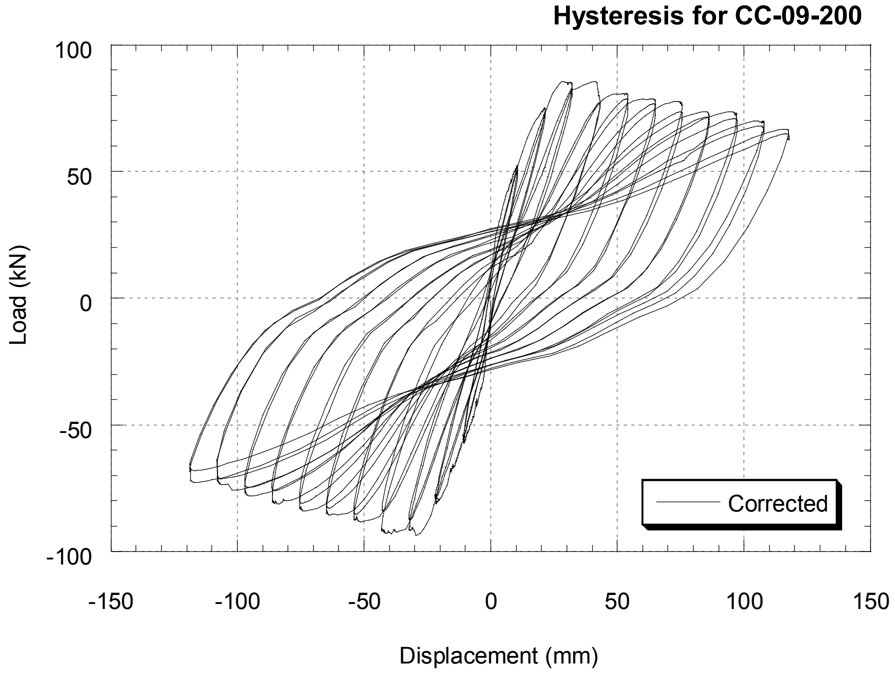


ข) ระยะเคลื่อนที่ที่ระดับให้แรงกับระยะยืดหดของเครื่องให้แรง

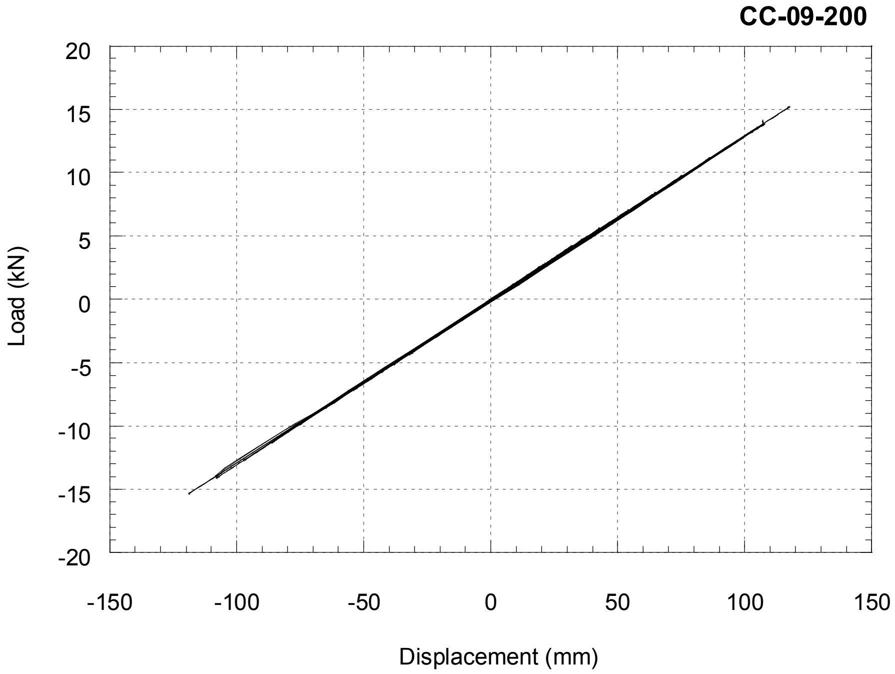
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของเครื่องมือที่ใช้วัดระยะเคลื่อนที่ในฮิซเทียรีซีซของ C-09-200



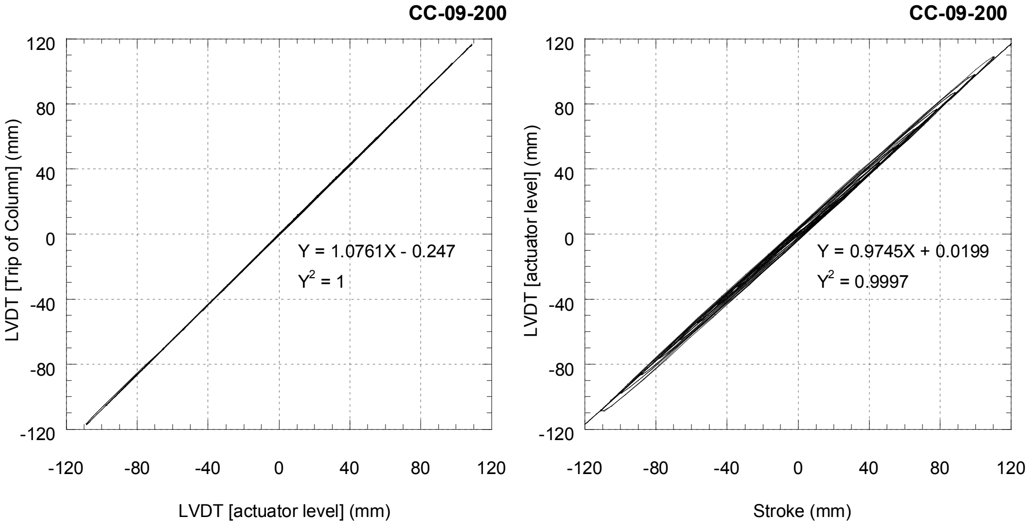
รูปที่ 4.35 วงรอบฮิซเทียรีซีซก่อนการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ CC-09-200



รูปที่ 4.36 วงรอบฮิซเทียรีซีซหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ CC-09-200



รูปที่ 4.37 ผลต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างของ CC-09-200



ก) ระยะเคลื่อนที่ที่ปลายเสากับที่ระดับให้แรง ข) ระยะเคลื่อนที่ที่ระดับให้แรงกับระยะยืดหดของเครื่องให้แรง

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ของเครื่องมือที่ใช้วัดระยะเคลื่อนที่ในฮิซเทียรีซีซของ CC-09-200

4.6.2 การปรับแก้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงเนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก

การทดสอบตัวอย่างเสาเมื่อเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้างกระทำให้ตัวอย่างเสามีการเคลื่อนที่ด้านข้าง ซึ่งผลจากการให้แรงกระทำทางด้านข้างก่อให้เกิดการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก โดยการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากสามารถวัดระยะเคลื่อนที่ได้จากเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ที่ได้ติดตั้งบริเวณฐานราก เมื่อทราบการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากก็

สามารถนำค่าที่ได้จากบันทึกมาปรับแก้จากระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง รูปที่ 4.39 แสดงการปรับแก้ระยะเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากโดยใช้ความสัมพันธ์เรขาคณิตในการปรับแก้ ซึ่งค่าที่ปรับแก้ได้แสดงในรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 ของตัวอย่างเสา C-09-200 และ CC-09-200 ตามลำดับ

$$\Delta_{corrected} = \Delta_1 - \Delta_T - \Delta_R \quad (4.4)$$

$$\Delta_R = \frac{\Delta_{R2} - \Delta_{R1}}{L} \cdot H \quad (4.5)$$

โดยที่ Δ_R คือ ระยะปรับแก้เคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงจากการหมุนของฐานราก

Δ_T คือ ระยะปรับแก้การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงจากการไถลของฐานราก

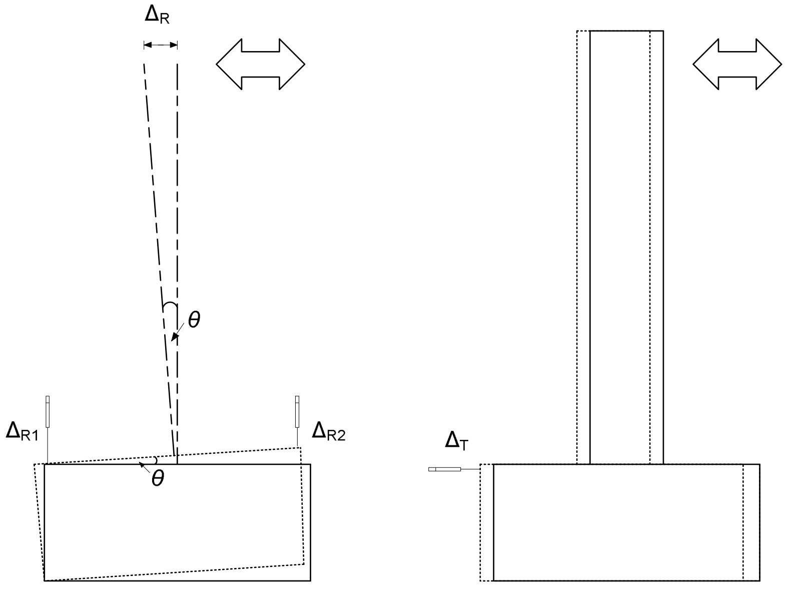
Δ_1 คือ ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ตำแหน่งให้แรงที่บันทึกได้ก่อนปรับแก้

Δ_{R1} คือ การหมุนเอียงของฐานรากด้านทิศตะวันตก

Δ_{R2} คือ การหมุนเอียงของฐานรากด้านทิศตะวันออก

H คือ ระยะจากจุดหมุนของเสาถึงจุดที่ให้แรงกระทำทางด้านข้าง

L คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องวัดระยะการหมุนฐานราก



รูปที่ 4.39 การปรับแก้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงเนื่องจากการหมุนและไถลของฐานราก

ตัวอย่างการคำนวณการปรับแก้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก ซึ่งได้ยกตัวอย่างข้อมูลและแสดงการปรับแก้ได้แสดงในตารางที่ 4.6 โดยมีค่าของ

ตัวแปรในการทดสอบ คือ H = 2150 มม. และ L = 1340 มม. ซึ่งตัวอย่างการคำนวณการปรับแก้แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ค่าก่อนการปรับแก้แรงระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานราก

อัตราการเคลื่อนที่ (%)	ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรง, Δ_1 (มม.)	การเคลื่อนที่ของฐานราก		
		ระยะจากการหมุน, Δ_{R1} (มม.)	ระยะจากการหมุน, Δ_{R2} (มม.)	ระยะเลื่อนไถล, Δ_T (มม.)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+3.00	65.39	-0.41	0.10	0.23

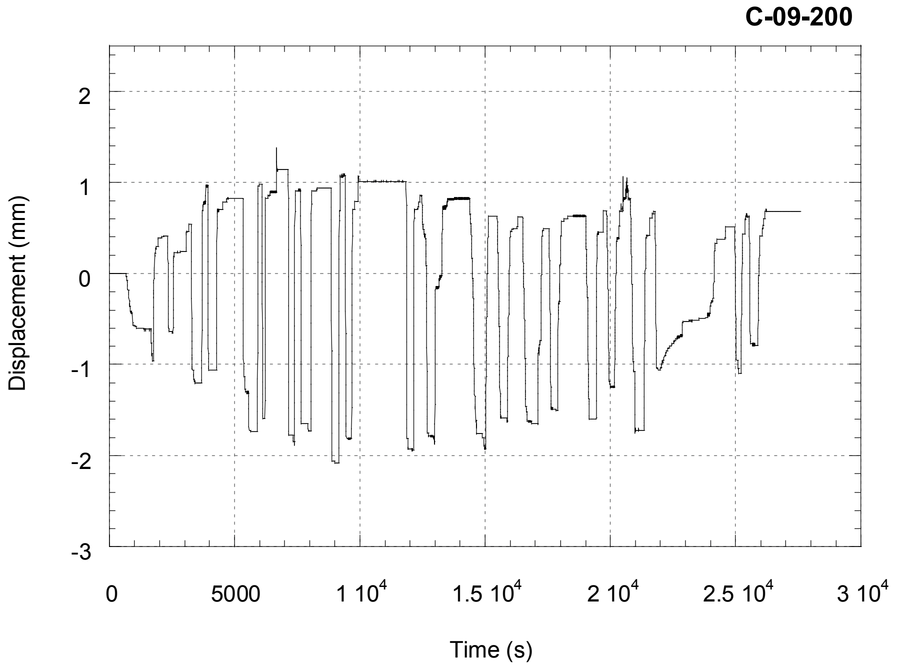
จากข้อมูลการเคลื่อนที่ที่ได้จากเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ไฟฟ้าในการทดสอบ เห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของการไถลของฐานรากในตัวอย่างเสานี้มีค่าเท่ากับ 0.23 มม.

หลังจากนั้นคำนวณหาค่าปรับแก้ระยะเนื่องจากผลของการหมุนของฐานราก Δ_R ซึ่งใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตดังสมการ 4.5

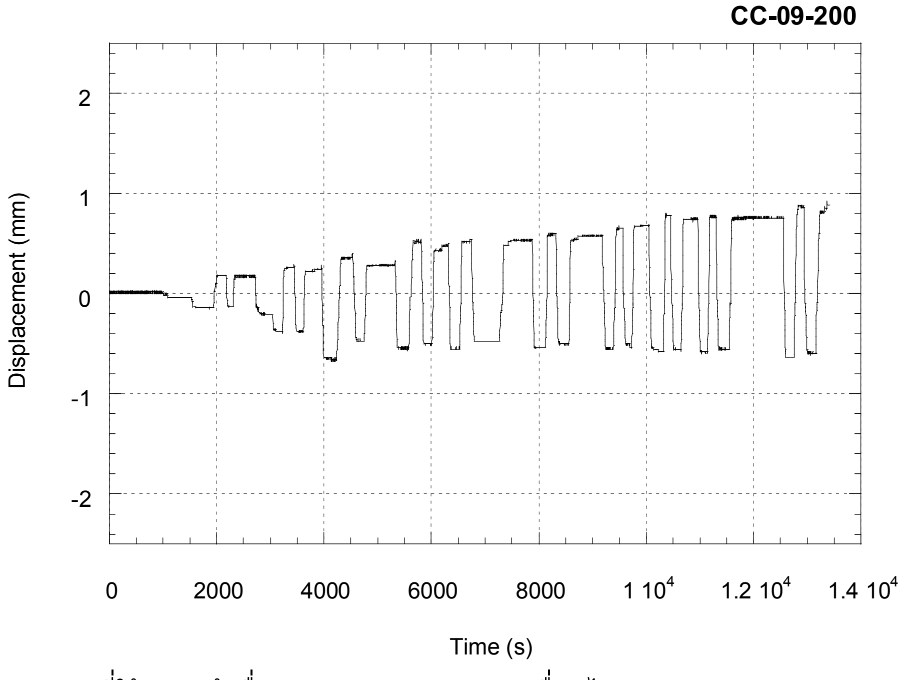
$$\Delta_R = \frac{\Delta_{R2} - \Delta_{R1}}{L} \cdot H \quad = \frac{(0.10) - (-0.41)}{1340} \cdot 2150 \quad = 0.82 \text{ มม.}$$

เพราะฉะนั้นค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรงมีค่าที่ถูกต้องคือ

$$\Delta_{corrected} = 65.39 - 0.23 - 0.82$$
$$= 64.34 \text{ มม.}$$



รูปที่ 4.40 ระยะที่ใช้ปรับแก้เนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากของ C-09-200



รูปที่ 4.41 ระยะที่ใช้ปรับแก้เนื่องจากการหมุนและการเลื่อนไถลของฐานรากของ CC-09-200

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงคำอธิบายพฤติกรรมและผลการทดสอบของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ ซึ่งได้บรรยายเหตุการณ์และพฤติกรรมต่างๆ ระหว่างการทดสอบได้แก่ พฤติกรรมของเหล็กเสริมและรอยแตกร้าวที่สังเกตได้ ในส่วนของผลทดสอบได้บรรยายในรูปแบบของความสัมพันธ์ต่างๆ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ระดับให้แรง, ค่าความเหนียว, ความสามารถในการสลายพลังงาน และค่าสติฟเนสซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 พฤติกรรมของตัวอย่างเสาที่สังเกตระหว่างการทดสอบ

5.1.1 ตัวอย่างเสา C-09-200

พฤติกรรมภายนอกของตัวอย่างเสา C-09-200 ที่สังเกตระหว่างการทดสอบเมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสากระทำให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ต่างๆ พบว่า

ก. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% พบว่าตัวอย่างเสาที่ทดสอบทุกด้านเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนที่ระดับความสูง 20, 40, 60, 80 และ 100 ซม. ซึ่งวัดจากผิวบนของฐานราก จากนั้นตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นตามรอยแตกร้าวเดิมซึ่งขยายเปิดกว้างมากขึ้นจนกระทั่งการเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5%

ข. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% ตัวอย่างเสามีรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นบริเวณโคนเสาทั้งด้านทิศตะวันออกและตะวันตก

ค. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% ผิวคอนกรีตหลุดร่อน (spalling) บริเวณมุมโคนเสาเนื่องจากแรงอัด จากนั้นพบรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นตามรอยแตกร้าวเดิมขยายเปิดกว้างมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งการเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5%

ง. ซึ่งระหว่างการทดสอบที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +3.0% รอบการทดสอบที่ 2 เครื่องให้แรงทางด้านข้างลดลงเนื่องจากน้ำที่ใช้หล่อเย็นในระบบท่อลดลงทำให้เครื่องมีความร้อนมากเกินไป ส่งผลให้แรงกระทำทางด้านข้างลดลง

จ. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5% พบว่าตัวอย่างเสาบริเวณมุมเสาหลุดร่อนมากขึ้นและสังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเสาและฐานรากซึ่งมีขนาดค่อนข้างกว้าง

ฉ. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.0% ตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งมีความยาวประมาณ 15-20 ซม. บริเวณโคนเสาเหนือบริเวณรอยแยกระหว่างเสาและฐานราก เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.5%

ช. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.5% ตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตขนาดใหญ่บริเวณโคนเสาซึ่งสามารถเห็นเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับของผิวฐานรากได้ในทางด้านทิศเหนือของตัวอย่างเสา

ซ. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.0% พบว่าผิวคอนกรีตหลุดร่อนของขนาดใหญ่ทั้งบริเวณโคนเสาและมุมเสาทั้ง 4 มุม สามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาว

ฌ. และที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5% พบว่าคอนกรีตบริเวณโคนเสาส่วนใหญ่เกิดการหลุดร่อนออกทั้งหมดสามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ได้อย่างชัดเจน

การวิบัติของตัวอย่างเสา C-09-200 เห็นได้ว่าเป็นการวิบัติแบบการดัด (flexure failure) ซึ่งสังเกตได้จากรอยแตกร้าวได้แสดงในรูปที่ 5.1 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200 บริเวณโคนเสาได้แสดงรูปที่ 5.2

5.1.2 ตัวอย่างเสา CC-09-200

พฤติกรรมภายนอกของตัวอย่างเสา CC-09-200 ที่สังเกตระหว่างการทดสอบเมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสากระทำให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ต่างๆ พบว่า

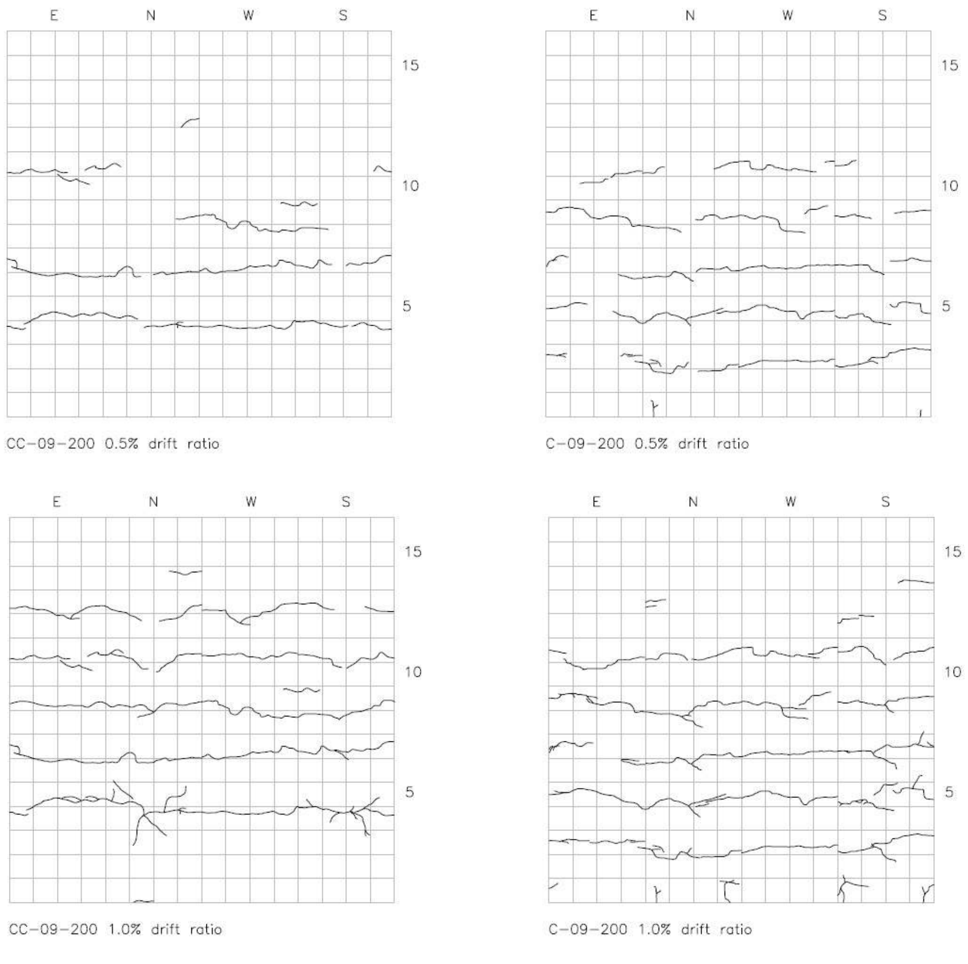
ก. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% พบว่าตัวอย่างเสาทางด้านทิศตะวันออกและตะวันตกเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนที่ระดับความสูง 40, 60, 80, และ 100 ซม. ซึ่งวัดผิวบนของฐานราก ส่วนด้านทิศเหนือและใต้เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อยในแนวนอนที่ระดับความสูง 40, 60, 80 และ 100 ซม. จากนั้นตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากรอยแตกร้าวเดิมซึ่งขยายเปิดกว้างมากขึ้นจนกระทั่งการเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0%

ข. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% ตัวอย่างเสาเกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนที่ระดับความสูง 10 ซม. และเกิดรอยแยกระหว่างเสาและฐานราก เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5%

ค. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.5% พบว่าผิวคอนกรีตหลุดร่อนที่โคนเสาบริเวณทั้ง 4 มุม เนื่องจากแรงอัดและรอยแยกระหว่างเสาและฐานรากเปิดขยายกว้างขึ้น

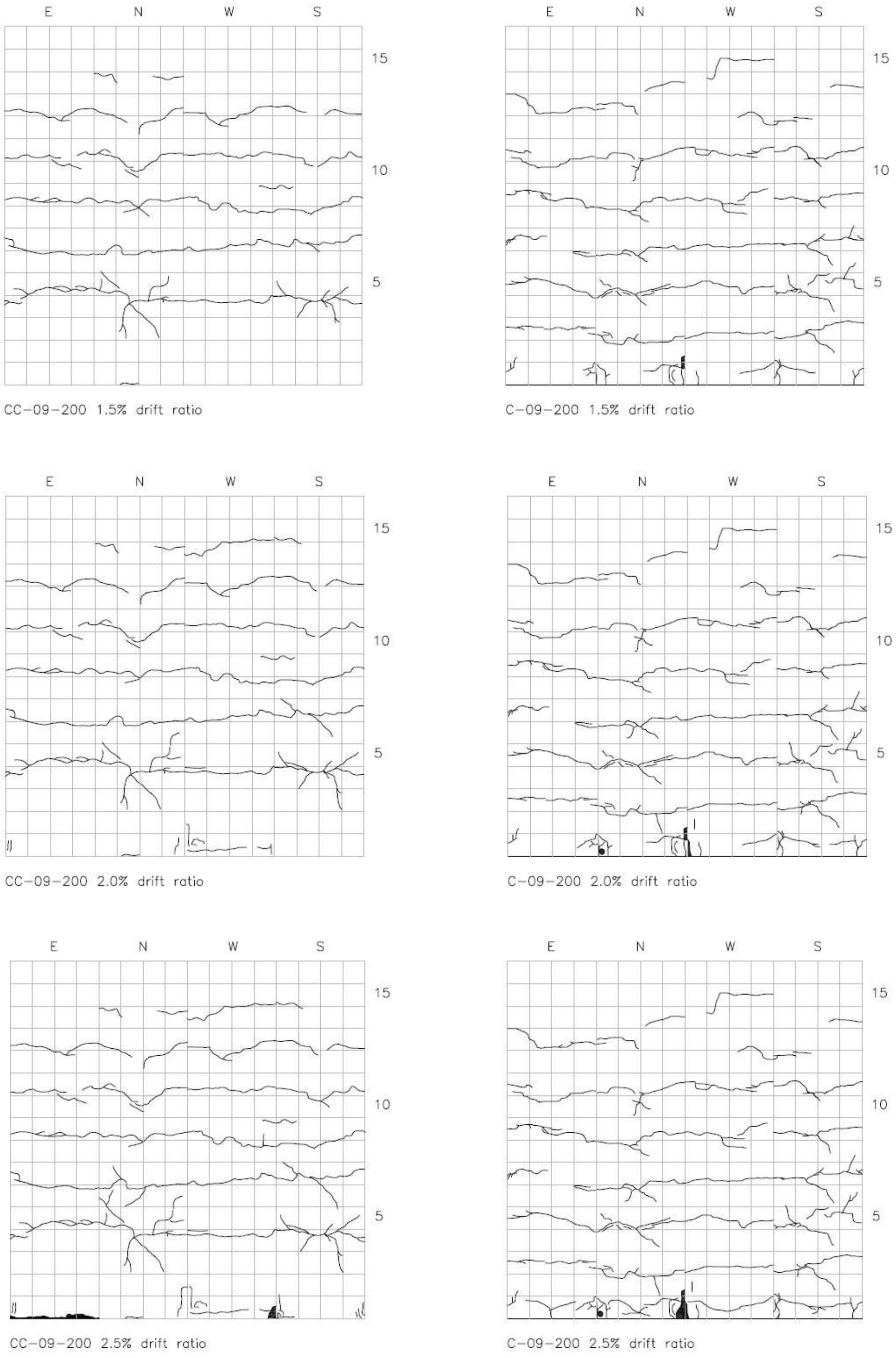
ง. ที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.5% พบว่าผิวคอนกรีตหลุดร่อนของบริเวณโคนเสาขยายลึกลงไปในตัวเสา รอยแตกร้าวขยายเปิดกว้างมากและการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตบริเวณโคนเสาขยายลึกลงไปในตัวเสามากขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5%

การวิบัติของตัวอย่างเสา CC-09-200 เห็นได้ว่าเป็นการวิบัติของตัวอย่างเสา CC-09-200 เป็นการวิบัติแบบการดัด ซึ่งสังเกตได้จากรอยแตกร้าวที่มีลักษณะแตกร้าวในแนวนอนดังแสดงแสดงในรูปที่ 5.1 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200 บริเวณโคนเสาได้แสดงในรูปที่ 5.3



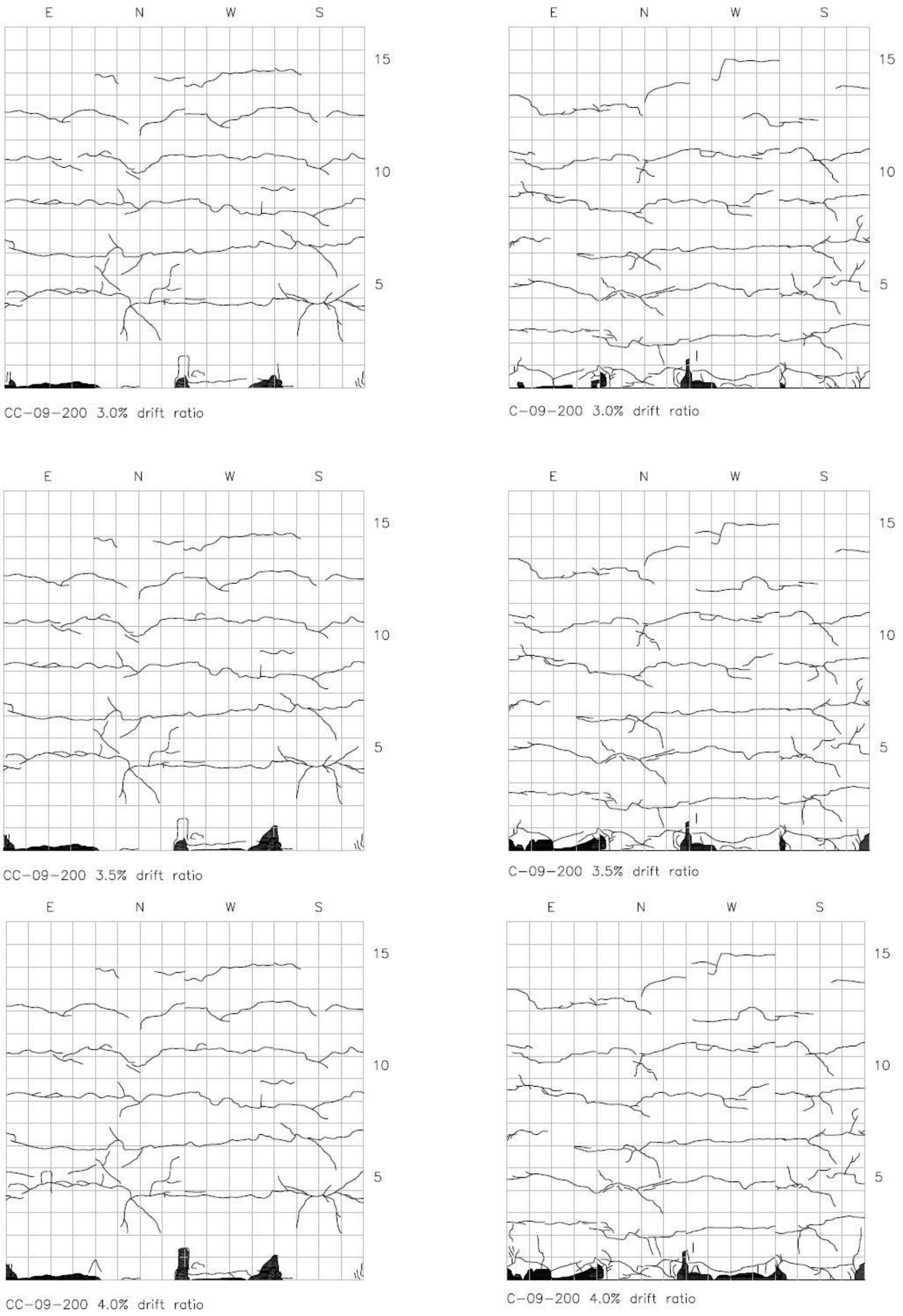
ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200 ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.1 รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ



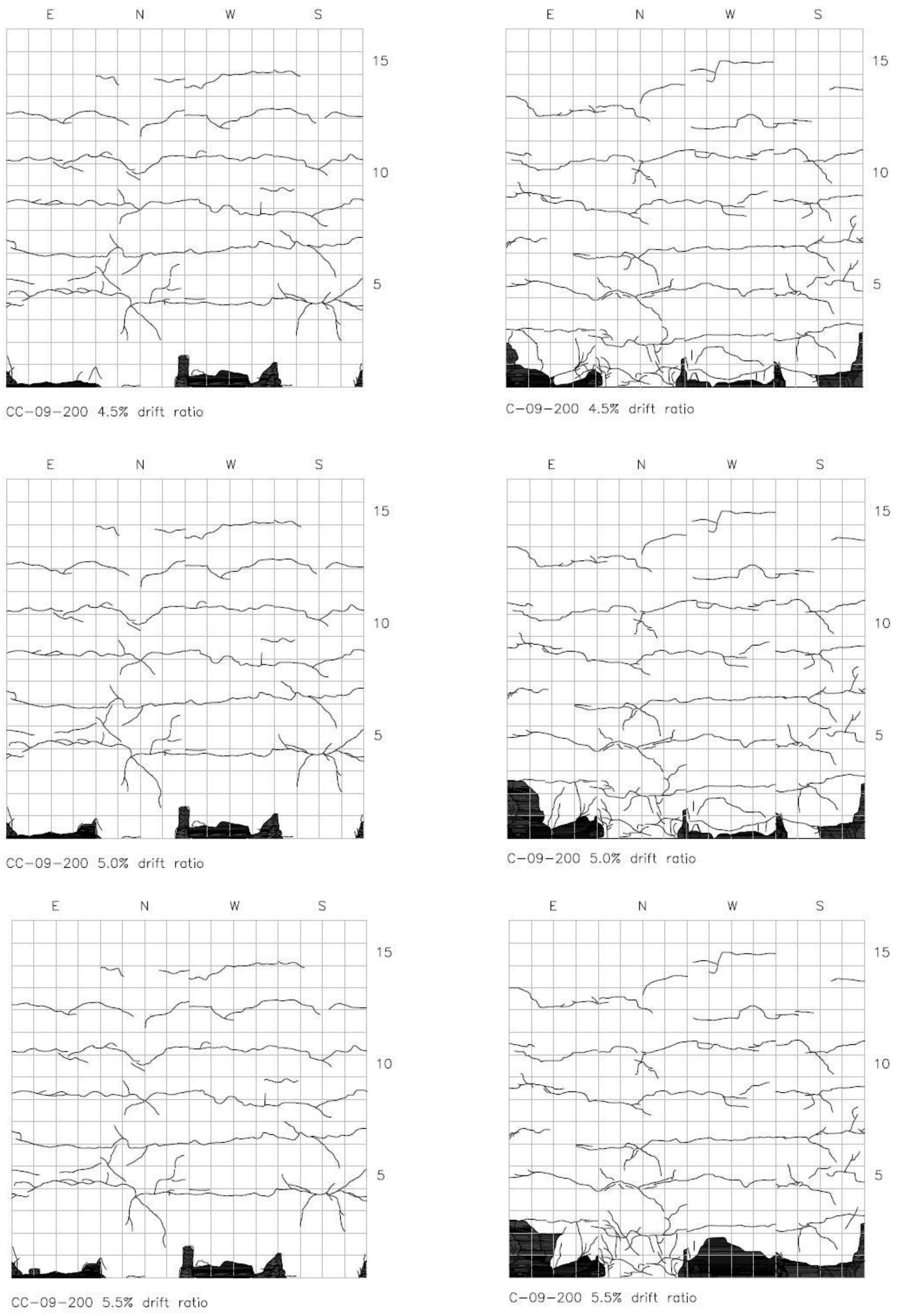
ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200 ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ



ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200 ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ



ก) ตัวอย่างเสา CC-09-200 ข) ตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ

(ก) ทิศตะวันออก-ทิศใต้

(ข) ทิศตะวันตก-ทิศใต้

(ค) ทิศตะวันตก-ทิศเหนือ

รูปที่ 5.2 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200

(ก) ทิศตะวันออก-ทิศใต้

(ข) ทิศตะวันตก-ทิศใต้

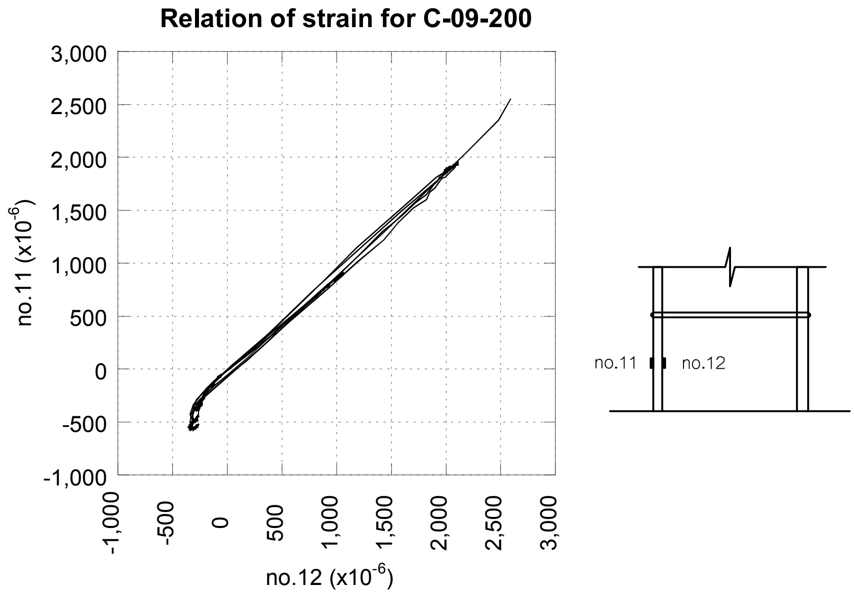
(ค) ทิศตะวันตก-ทิศเหนือ

รูปที่ 5.3 การวิบัติและรอยแตกร้าวหลังสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200

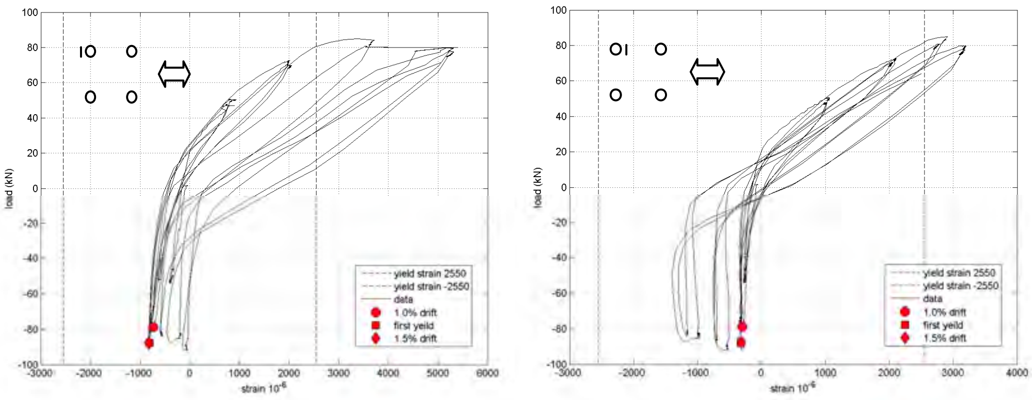
5.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมในระหว่างการทดสอบ

5.2.1 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง C-09-200 ที่สังเกตได้พบว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดที่ตำแหน่งเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมตามยาวระดับล่างคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในที่ระดับล่างมีค่าใกล้เคียงกันทั้งทางด้านรับแรงอัดและแรงดึง เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านลบ เหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกได้รับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกเหล็กเสริมตามยาวได้รับแรงดึง ซึ่งในการกลับกันเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านบวก เหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกได้รับแรงดึง ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกได้รับแรงอัด ซึ่งได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.4 โดยที่ no.11 คือเกจวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ด้านนอก และ no.12 คือเกจความความเครียดที่อยู่ด้านในของเหล็กเสริมตามยาว รูปที่ 5.5 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่าง พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวระดับแรงเป็นเช่นนี้ในช่วงที่กระทำให้ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.0% ถึง 1.5% และพบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.20 % ส่วนพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวระดับบนมีลักษณะเดียวกับเหล็กเสริมตามยาวระดับล่างเพิ่มขึ้นพฤติกรรมเป็นแบบนี้จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ แต่พบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนไม่เกิดการคราก รูปที่ 5.6 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบน ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนมีความเครียดมากกว่าที่สุดเท่ากับ 2200 ไมโครเสตรน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5% รายละเอียดของพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-09-200 ได้บรรยายในภาคผนวก ค.3

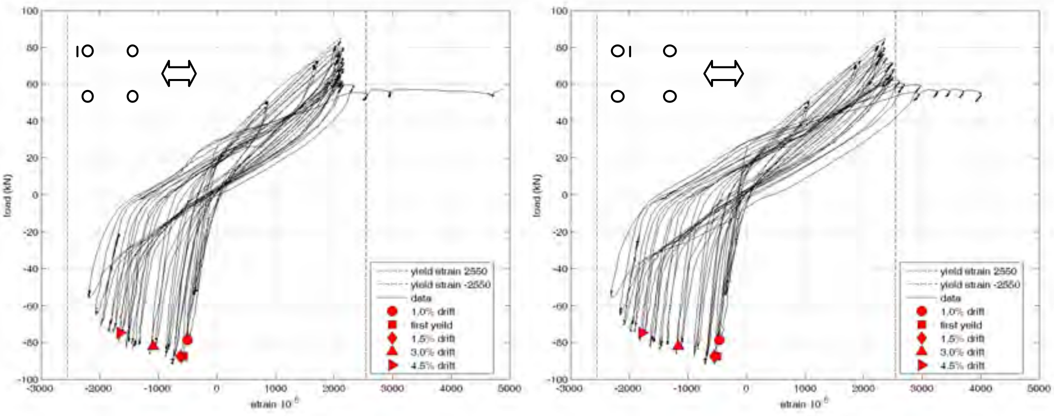


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในที่ระดับล่าง ของตัวอย่างเสา C-09-200



ก) ด้านนอก ข) ด้านนอก

รูปที่ 5.5 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200

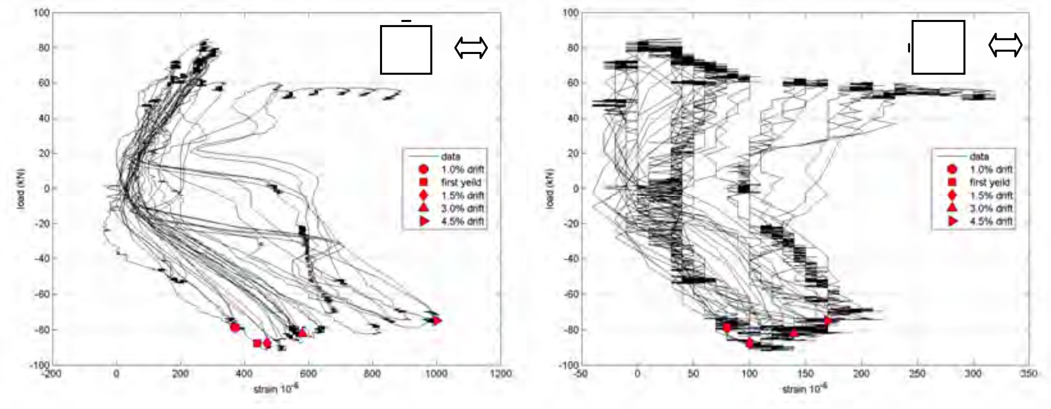


ก) ด้านนอก ข) ด้านใน

รูปที่ 5.6 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนของตัวอย่างเสา C-09-200

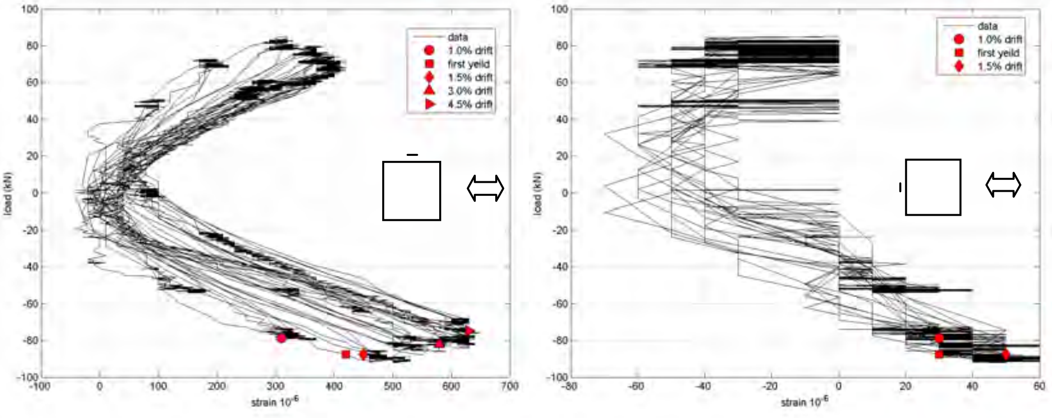
5.2.2 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสา C-09-200 ให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% รูปที่ 5.7 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่าง พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% เป็นสองเท่า แต่เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมาก รูปที่ 5.8 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบน พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองมีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกคือเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% เป็นสองเท่าแต่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าความเครียดประมาณ 500 ไมโครสเตรน แต่เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมาก ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกคือเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกทางด้านทิศเหนือและทิศเหนือมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นแต่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าใกล้เคียงกับส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรก ซึ่งเหล็กเสริมตามขวางมีความเครียดเพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5% รายละเอียดของพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างเสา C-09-200 ได้บรรยายในภาคผนวก ค.3



ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.7 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา C-09-200



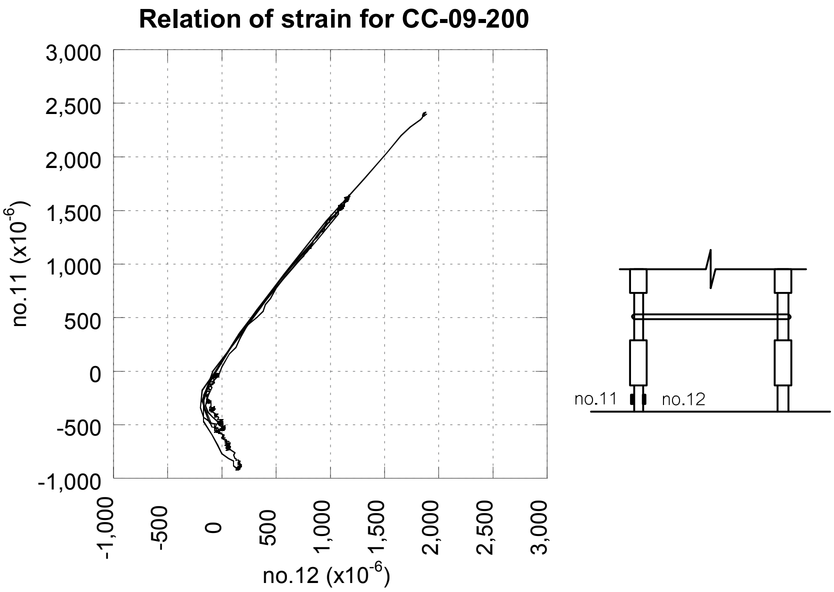
ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.8 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบนของตัวอย่างเสา C-09-200

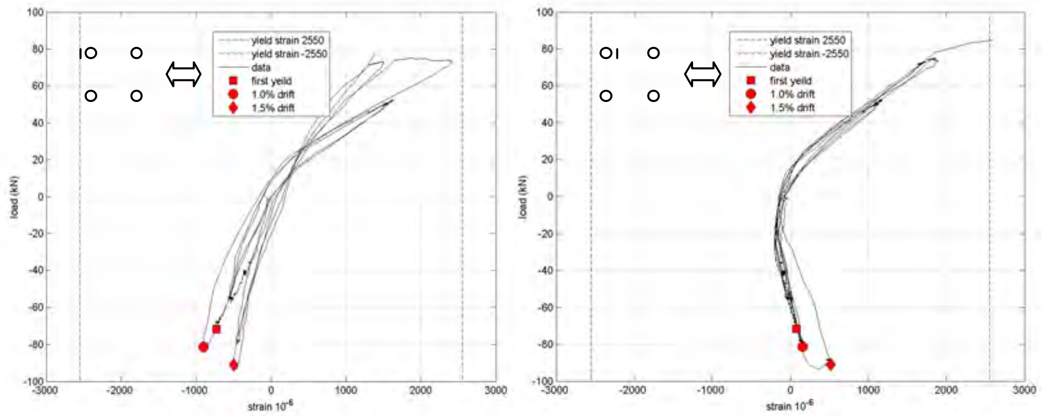
5.2.3 **พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา** CC-09-200

พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา C-09-200 ที่สังเกตได้เมื่อมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม พบว่าเกิดจุดหมุนของเสาที่ระดับความสูง 10 ซม. ณ ตำแหน่งเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมตามยาวระดับล่าง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมด้านนอกกับความเครียดของเหล็กเสริมด้านในระดับล่าง เมื่อเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงเหล็กเสริมด้านนอกจะรับแรงดึงมากกว่า และเมื่อเหล็กเสริมตามยาวรับแรงอัดพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมด้านนอกกับความเครียดของเหล็กเสริมด้านในไม่เป็นเส้นตรง คือ เหล็กเสริมด้านนอกรับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมด้านในตามยาวรับแรงดึง ซึ่งได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.9 โดยที่ no.11 คือเกจวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ด้านนอก และ no.12 คือเกจความความเครียดที่อยู่ด้านในของเหล็กเสริมตามยาว รูปที่ 5.10 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่าง พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวมีพฤติกรรมเป็นเช่นนี้ในช่วงมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.0% ถึง 1.5% ช่วงหลังการอัตราการเคลื่อนที่ 1.5% ไม่สามารถวัดค่าความเครียดของเหล็กเสริมได้ และพบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.78 % ส่วนพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวระดับบนเป็นไปโดยปกติคือเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านลบ เหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกจะได้รับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกได้รับแรงดึง ซึ่งในการกลับกันเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านบวก เหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกจะได้รับแรงดึง รูปที่ 5.11 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบน ส่วนเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกได้รับแรงอัด พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.5% ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนจะมีความเครียดเพิ่มขึ้น พฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการ

ทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5% รายละเอียดของพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างเสา CC-09-200 ได้บรรยายในภาคผนวก ค.2

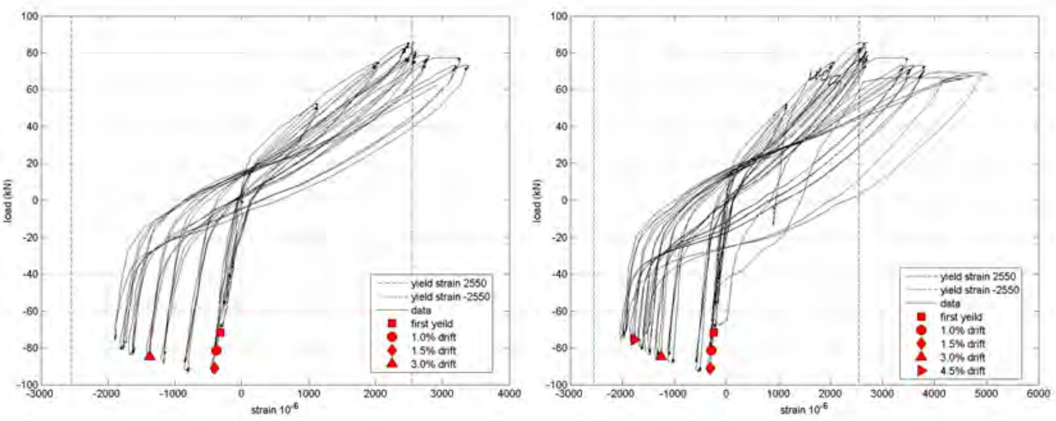


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกกับด้านในระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200



ก) ด้านนอก ข) ด้านใน

รูปที่ 5.10 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200

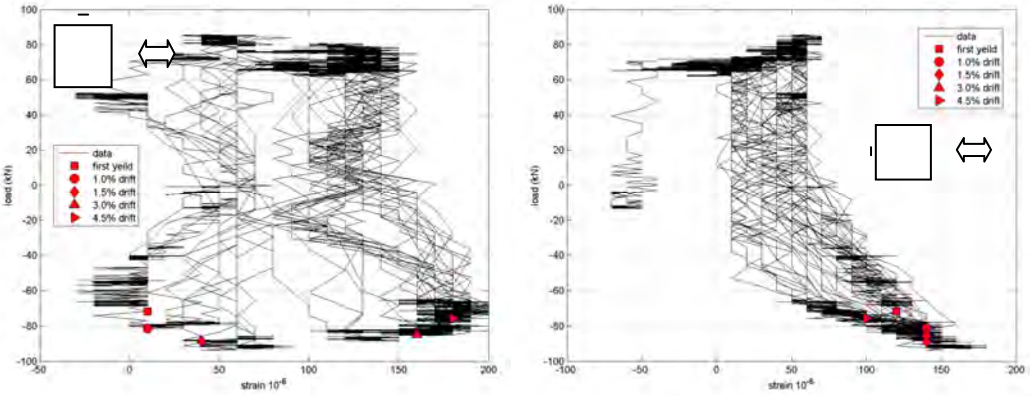


ก) ด้านนอก ข) ด้านใน

รูปที่ 5.11 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระดับบนของตัวอย่างเสา CC-09-200

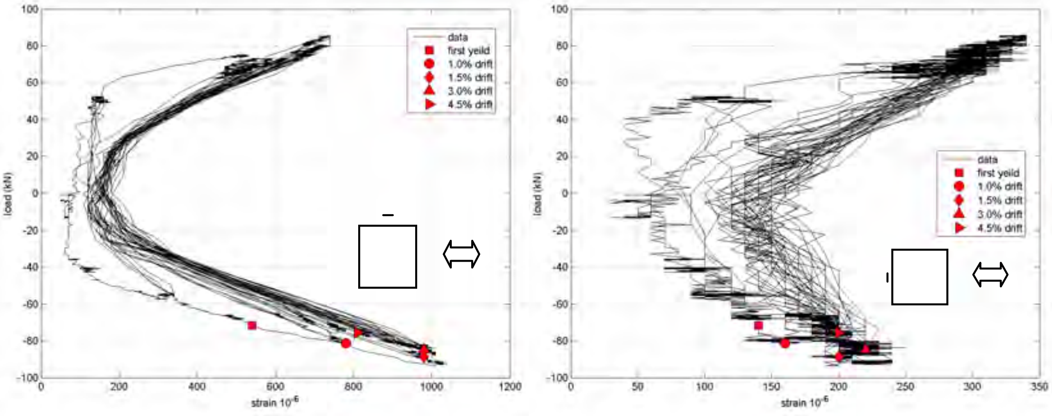
5.2.4 **พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200**

เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อเสาตัวอย่าง C-09-200 ให้มีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% รูปที่ 5.12 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่าง พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยแต่ค่อนข้างน้อยมาก เพราะเป็นปลอกที่อยู่ระหว่างการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้นมีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรก เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะเหล็กเสริมตามขวางด้านทิศเหนือและใต้มีค่าความเครียดประมาณ 700 ไมโครสเตรน เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน รูปที่ 5.13 แสดงความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบน เหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะเหล็กเสริมตามขวางด้านทิศเหนือและใต้มีค่าความเครียดประมาณ 800 ไมโครสเตรน และ 1000 ไมโครสเตรน ตามลำดับ ซึ่งเหล็กเสริมตามขวางมีความเครียดเพิ่มขึ้นพฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.0% พบว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางปลอกแรกยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ส่วนเหล็กเสริมตามขวางปลอกที่สองความเครียดจากที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเรื่อยๆ อย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและใต้มีค่าความเครียดลดลงเหลือประมาณ 500 ไมโครสเตรน รายละเอียดของพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างเสา CC-09-200 ได้บรรยายในภาคผนวก ค.2



ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.12 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200



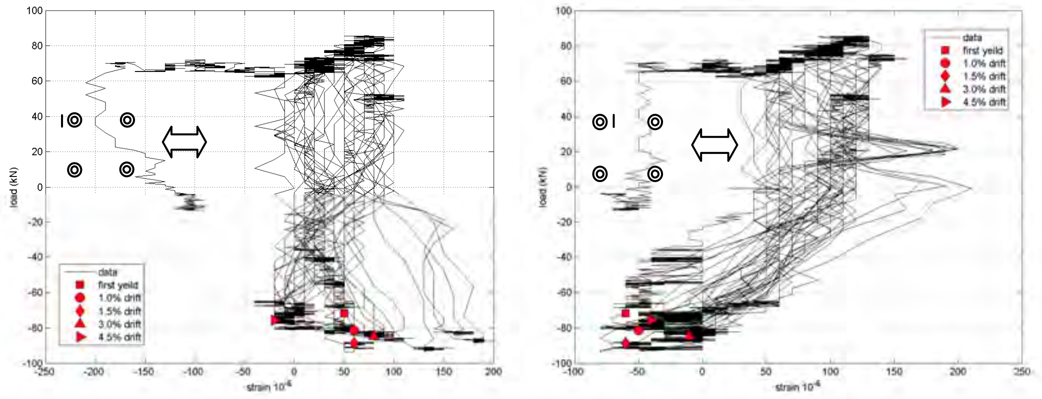
ก) ด้านขนานกับแรงกระทำ ข) ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ

รูปที่ 5.13 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางที่ระดับบนของตัวอย่างเสา CC-09-200

5.2.5 **พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา** CC-09-200

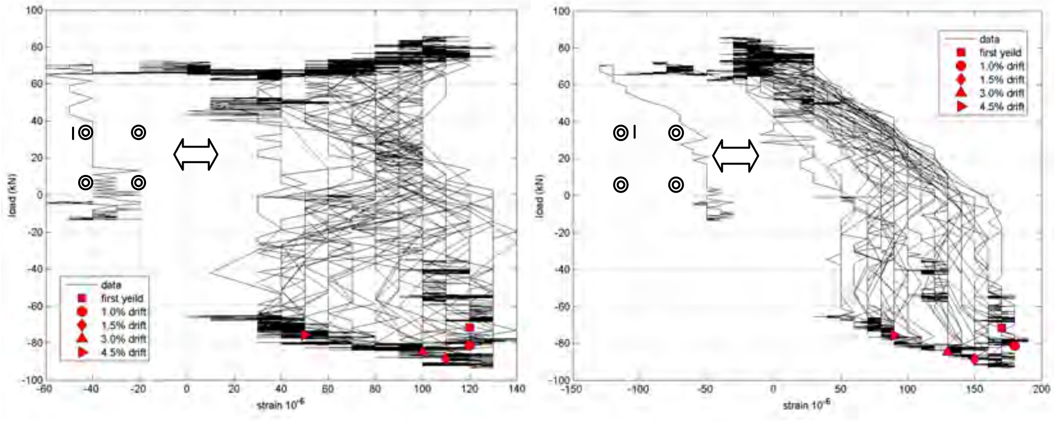
เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อตัวอย่างเสา CC -09-200 กระทำให้ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% ซึ่งแยกออกเป็นการเคลื่อนทางด้านลบทางทิศตะวันตกและทางด้านบวกทางทิศตะวันออก พบว่าเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านลบคือมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -0.5% ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลงพฤติกรรมเหมือนกันทั้ง 2 ระดับของตำแหน่งที่วัดค่าความเครียด และเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้านข้างไปทางด้านบวกคือมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +0.5% มีพฤติกรรมในทางตรงกันข้าม คือ ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวมีความเครียดเพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.5%

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความเครียดมีค่าน้อยมากตั้งแต่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% จนถึง 5.5% รายละเอียดของพฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200 ได้บรรยายในภาคผนวก ค.2



ก) ด้านนอก ข) ด้านใน

รูปที่ 5.14 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200



ก) ด้านนอก ข) ด้านใน

รูปที่ 5.15 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ระดับล่างของตัวอย่างเสา CC-09-200

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง

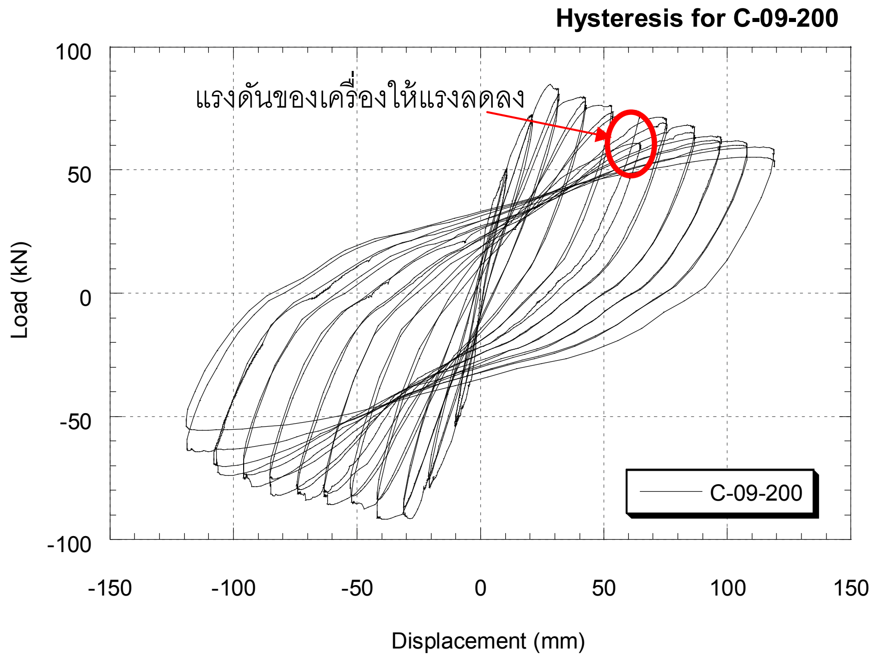
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของ CC-09-200 และ C-09-200 เห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์เป็นรูปแบบของวงรอบฮิซเทียรีซีซ ซึ่งเป็นการเคลื่อนแบบกลับไปกลับมา โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ได้จากการทดสอบมีผลของการไถลของฐานรากและการหมุนของฐานรากรวมอยู่ด้วย จึงต้องการปรับแก้ค่าผลเนื่องจากผลของแรงอัดตามแนวแกนที่ไม่อยู่ในแนวดิ่งตามหัวข้อที่ 3.6.1 และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างนั้นได้ปรับแก้ผลของการไถลของฐานรากและการหมุนของฐานรากตามหัวข้อ

ที่ 3.6.2 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 มีดังต่อไปนี้

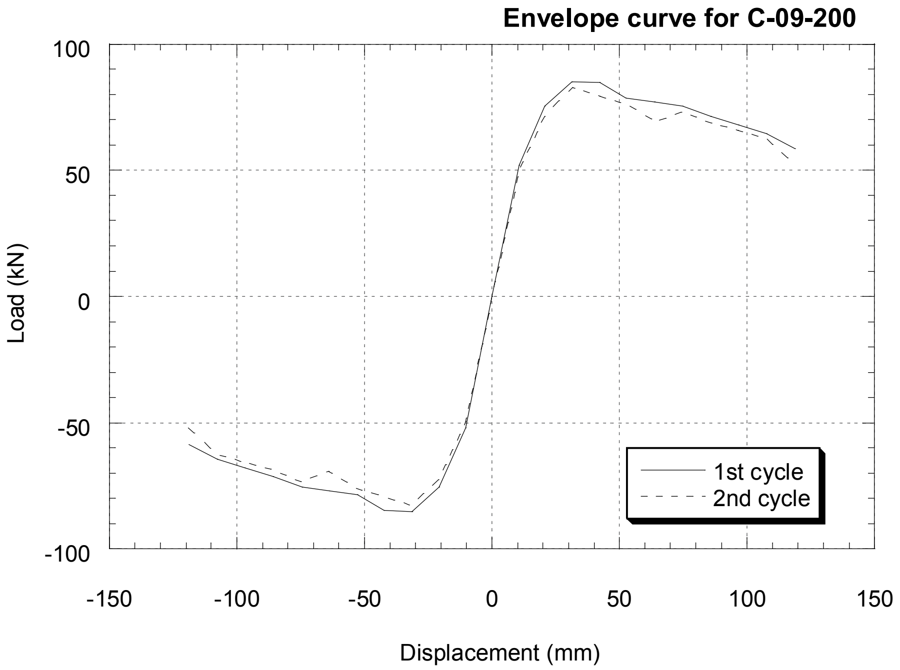
5.3.1 ตัวอย่างเสา C-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา C-09-200 ได้แสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งพบว่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ +81.6 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -31.7 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -1.47%) และมีแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -91.0 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -41.8 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -1.94%) ในระหว่างการทดสอบเกิดเหตุการณ์แรงดันของเครื่องให้แรงทางด้านข้างลดลงที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +3.0% รอบการทดสอบรอบที่ 2 จึงส่งผลให้แรงกระทำทางด้านข้างลดลง เนื่องจากน้ำที่ใช้หล่อเย็นในระบบท่อลดลงทำให้เครื่องมีความร้อนมากเกินไปซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.16

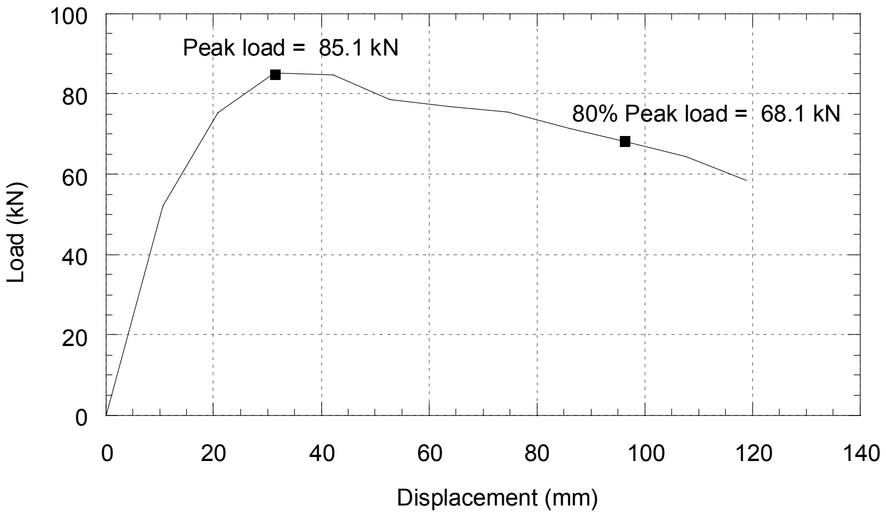
เมื่อทราบแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดทั้ง 2 รอบการทดสอบแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่แล้ว โดยแยกแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดของแต่ละรอบการทดสอบนำมาเฉลี่ยเพื่อเขียนเป็นเส้นโค้งขอบนอกดังแสดงในรูปที่ 5.17 ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 85.1 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 31.4 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.46%) เสาเกิดวิบัติที่แรงกระทำทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% ค่าเฉลี่ยแรงกระทำด้านข้างคงเหลือ 68.4 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยเท่ากับ 96.4 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.59%) และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างคงเหลือเท่ากับ 58.5 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ย 118.8 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.53%) ซึ่งแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลงเหลือ 68.7%



รูปที่ 5.16 วงรอบฮิซเทียรีซีสของตัวอย่างเสา C-09-200



รูปที่ 5.17 เส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างเสา C-09-200

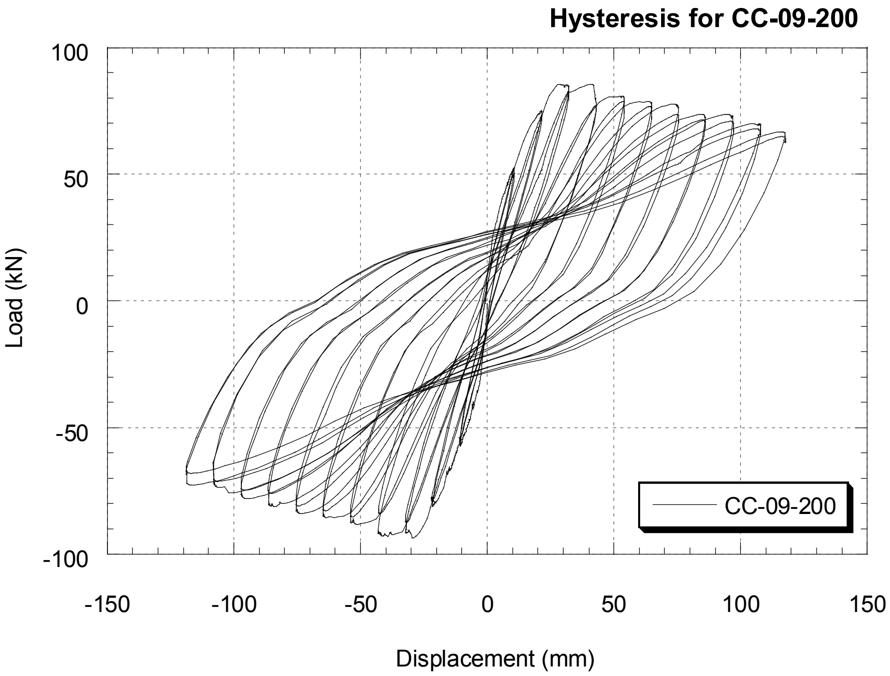


รูปที่ 5.18 เส้นโค้งขอบนอกแสดงแรงกระทำสูงสุดและแรงที่เกิดการวิบัติตัวอย่างเสา C-09-200

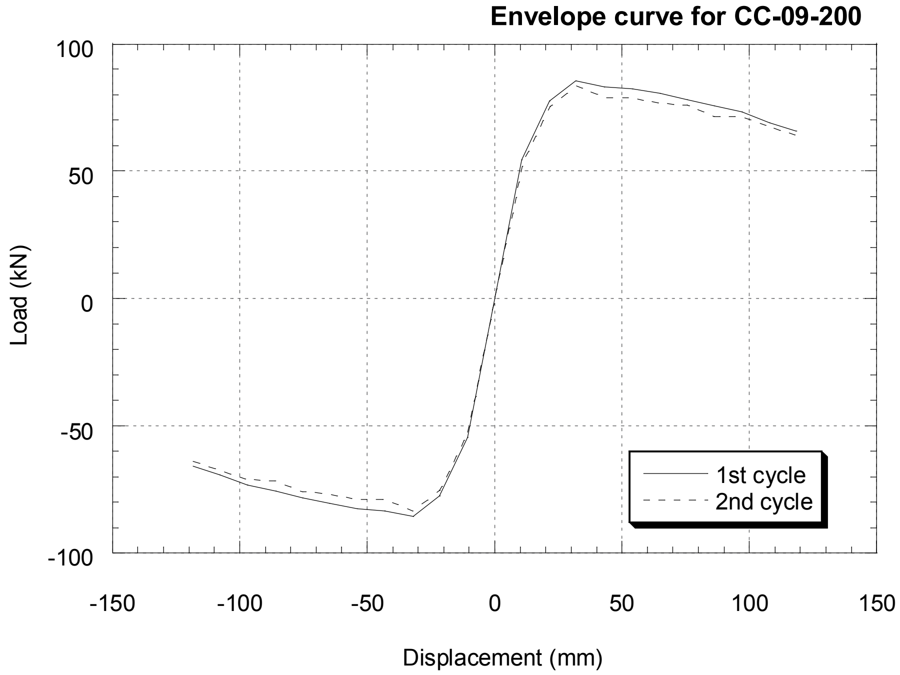
5.3.2 **ตัวอย่างเสา** CC-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ซึ่งพบว่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ +83.1 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ +32.1 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ +1.49%) และมีแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -91.1 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -43.1 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ -2.00%)

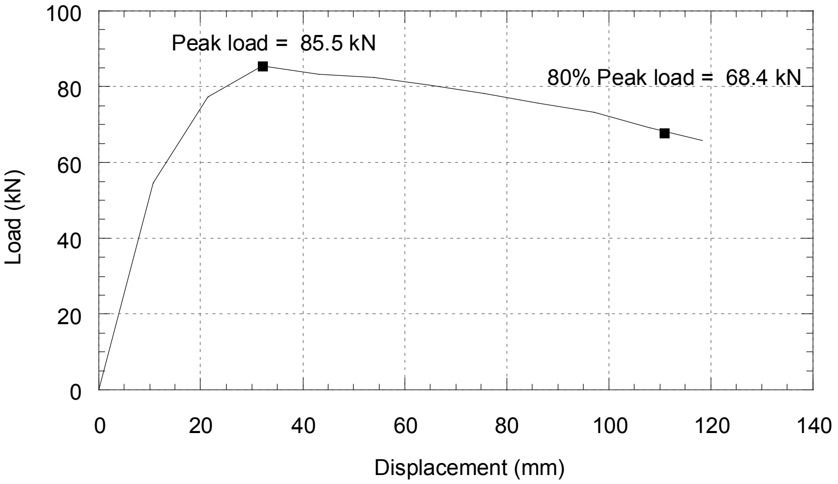
เมื่อทราบแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดทั้ง 2 รอบการทดสอบแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่แล้ว โดยแยกแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและแรงกระทำด้านข้างต่ำสุดของแต่ละรอบการทดสอบนำมาเฉลี่ยเพื่อเขียนเป็นเส้นโค้งขอบนอกดังแสดงในรูปที่ 5.20 ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 85.5 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 32.2 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.50%) เสาเกิดวิบัติที่แรงกระทำทางด้านข้างลดลงเหลือ 80% ค่าเฉลี่ยแรงกระทำด้านข้างคงเหลือเท่ากับ 68.1 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยเท่ากับ 110.2 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.25%) เมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกระทำด้านข้างคงเหลือเท่ากับ 65.8 กิโลนิวตัน ที่ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยเท่ากับ 117.9 มม. (อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 5.48%) ซึ่งแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลงเหลือ 77%



รูปที่ 5.19 วงรอบฮิซเทียรีซีซของตัวอย่างเสา CC-09-200

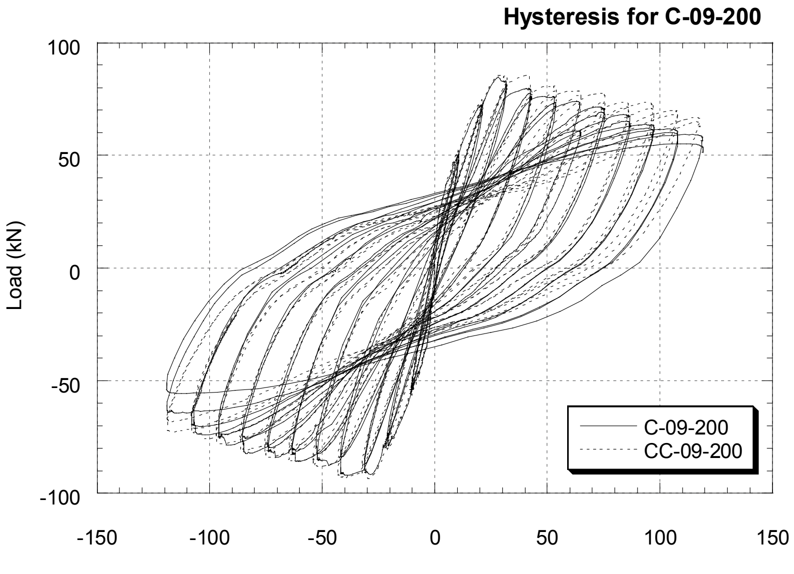


รูปที่ 5.20 เส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างเสา CC-09-200

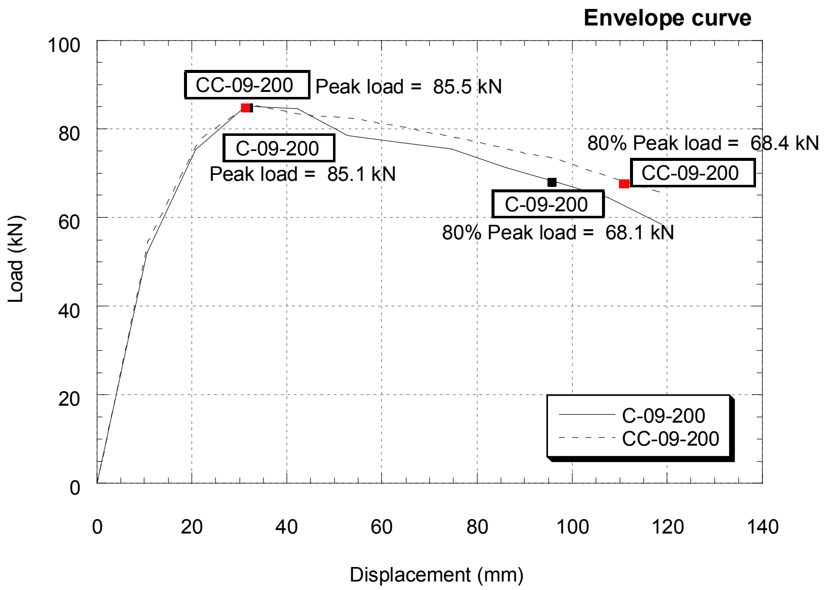


รูปที่ 5.21 เส้นโค้งขอบนอกแสดงแรงกระทำสูงสุดและแรงที่เกิดการวิบัติตัวอย่างเสา CC-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 ซึ่งได้เปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.23 พบว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 มีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ -93.5 กิโลนิวตัน และ -92 กิโลนิวตันตามลำดับ ได้เสนอเป็นกราฟเส้นโค้งขอบนอกดังแสดงรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบผลของแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นค่าที่เฉลี่ยแล้ว พบว่าแรงกระทำด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 มีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 84.5 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 มีค่าเท่ากับ 84 กิโลนิวตัน และที่เห็นได้ชัดคือ ตัวอย่างเสา CC-09-200 มีการลดของแรงกระทำด้านข้างในแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ที่มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 เนื่องจากตัวอย่างเสา C-09-200 มีการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มและเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งงอ



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบวงรอบฮิซเทียรีซีซของตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200



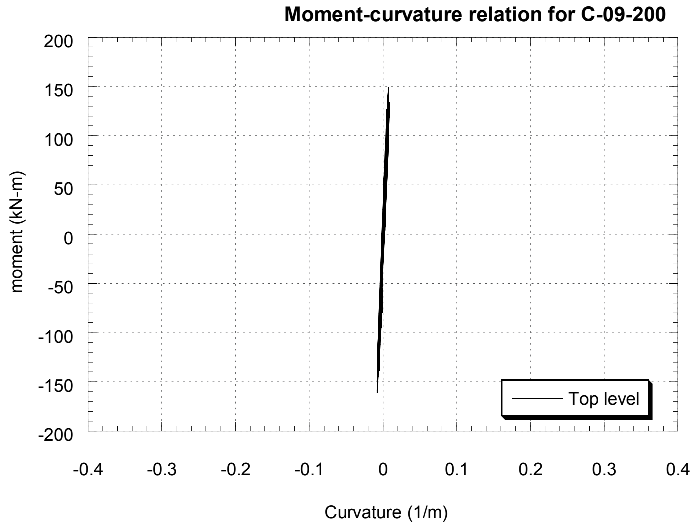
รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบจากกราฟเส้นโค้งขอบนอก

5.4 **ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง** (moment-curvature relation)

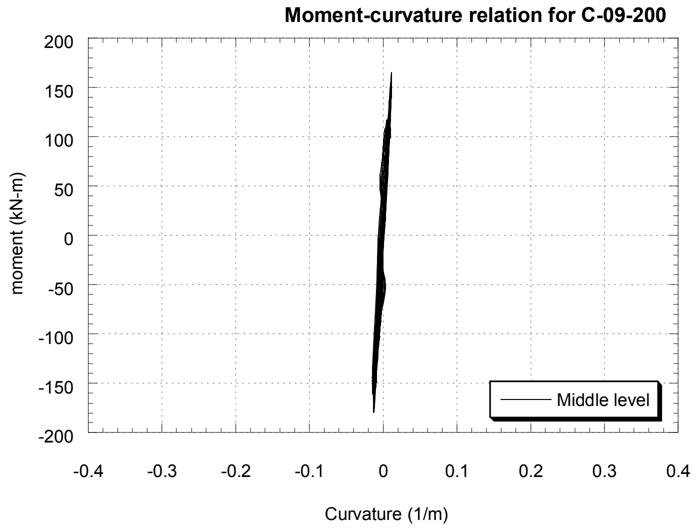
ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง ซึ่งความโค้งมีความสัมพันธ์กับระยะเคลื่อนที่ที่ระยะให้แรง โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง คือ $\phi = \dfrac{M}{EI}$ ซึ่งสามารถหาค่า IE ได้จากความความชันจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง ความโค้งสามารถหาได้จากทดสอบโดยวัดระยะการหมุนของตำแหน่งของตัวอย่างเสา 3 ช่วง ช่วงละ 0.20 ม. จากระดับความสูงจากผิวบนฐานราก ซึ่งผลของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.1 **ตัวอย่างเสา** C-09-200

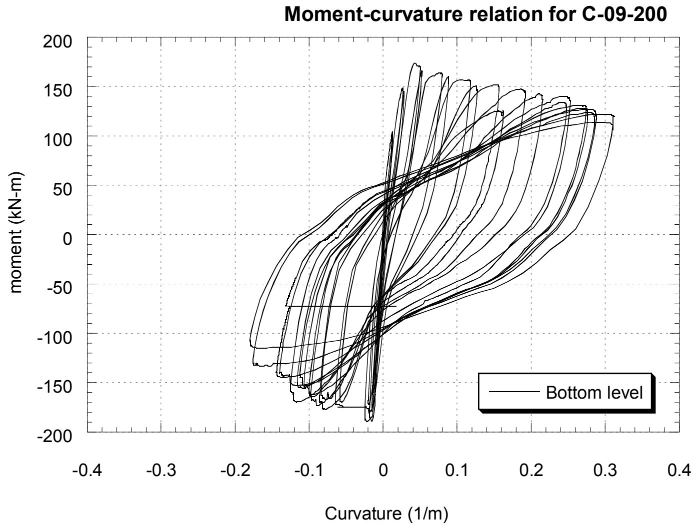
ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่พบได้ในตัวอย่างเสา พบว่าความโค้งช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.และช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. จากผิวบนฐานราก ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับตัวอย่างเสา CC-09-200 และความโค้งที่ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. พบว่าลักษณะความสัมพันธ์เป็นลักษณะฮิซเทียรีซีซ ซึ่งจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. สามารถทราบได้ว่าระยะจุดหมุดพลาสติกอยู่ในช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. แต่ในการทดสอบเกิดเหตุสุดวิสัยไม่สามารถหาความโค้งที่ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. เนื่องจากกระจกรองเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่หลุดระหว่างการทดสอบสามารถอ่านค่าได้ถึงอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา C-09-200 โดยช่วงความสูงจากเรียงจากบนลงล่าง การหลุดร่อนของกระจกรองเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ได้แสดงในรูปที่ 5.25



(ก) ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.



(ข) ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม.



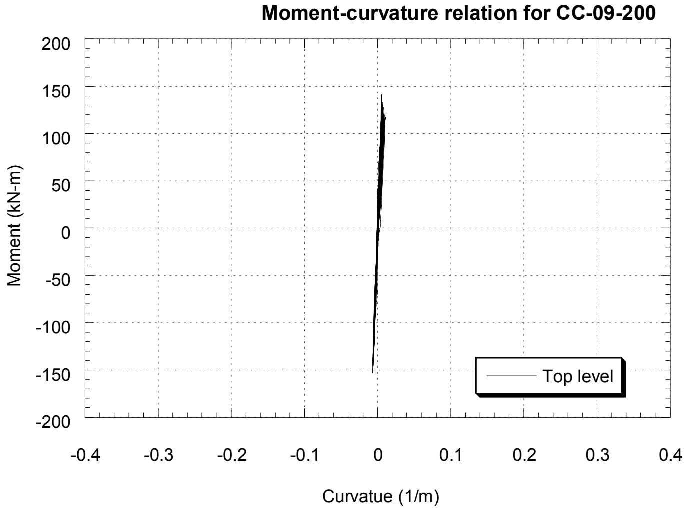
(ค) ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม.

รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา C-09-200

รูปที่ 5.25 การหลุดร่อนของกระจกรองเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่

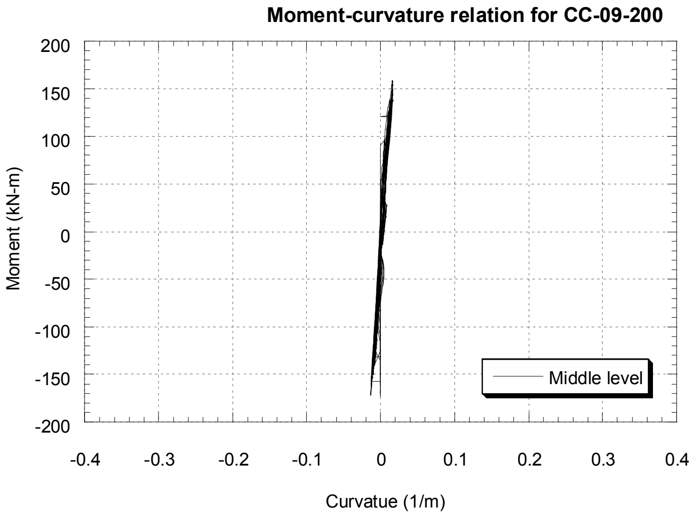
5.4.2 **ตัวอย่างเสา** CC-09-200

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่พบได้ในตัวอย่างเสา พบว่าความโค้งช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.และช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. จากผิวบนฐานรากมีความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และความโค้งที่ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม. พบว่าลักษณะความสัมพันธ์เป็นลักษณะฮิซเทียรีซีซ ซึ่งจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งที่ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. สามารถทราบได้ว่าระยะจุดหมุดพลาสติกอยู่ในภายในระยะความสูงช่วงล่าง รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200 โดยช่วงความสูงจากเรียงจากบนลงล่างตามลำดับ

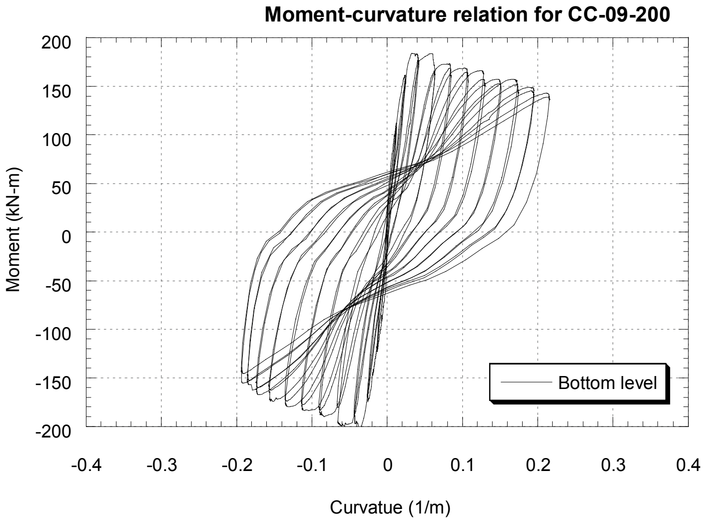


(ก) ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.

รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200



(ข) ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม.

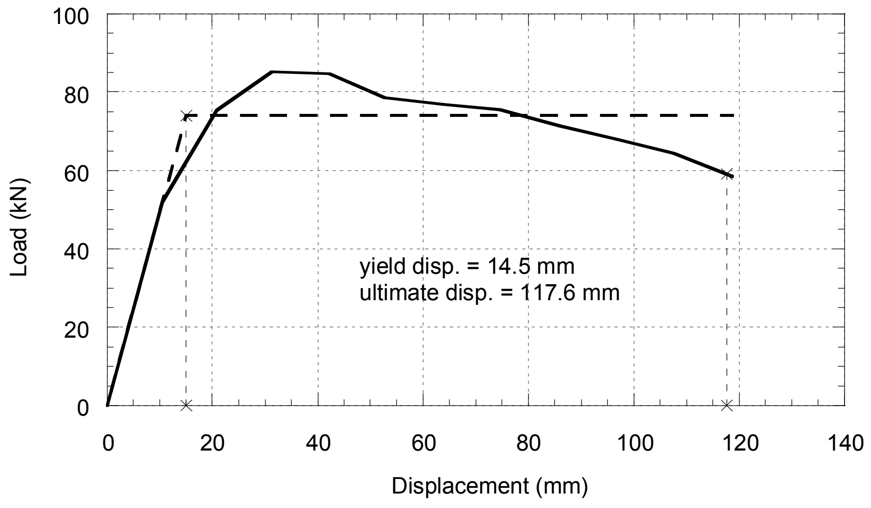


(ค) ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม.

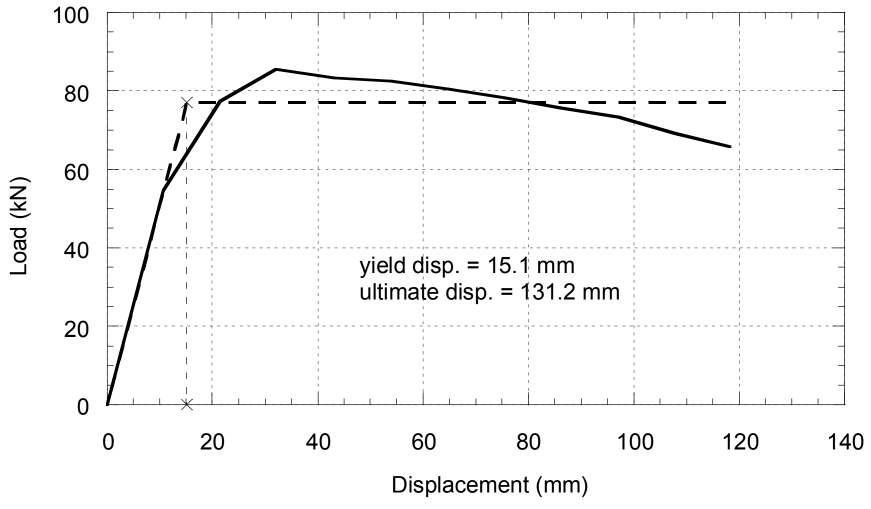
รูปที่ 5.26 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งในตัวอย่างเสา CC-09-200

5.5 ค่าความเหนียว

ค่าความเหนียวของตัวอย่างเสา (μ) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด (Δ_u) และระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก (Δ_y) สามารถหาได้จากเส้นโค้งขอบนอก (envelope curve) ที่พล็อตระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดของแต่ละอัตราดารเคลื่อนที่ของการทดสอบ ซึ่งวิธีการหาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดครากมีการหาที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการหาค่าความเหนียว 5 วิธี ซึ่งมีวิธีการหาความเหนียวดังตารางที่ 5.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.27 ถึงรูปที่ 5.31

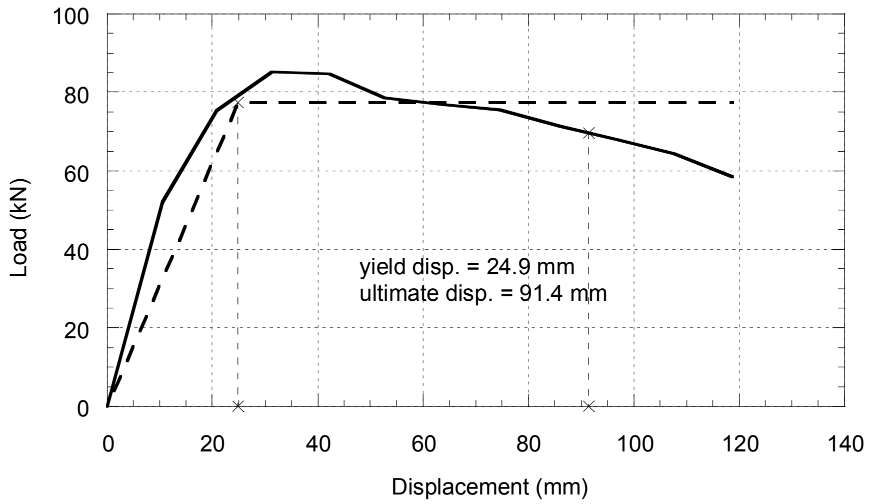


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

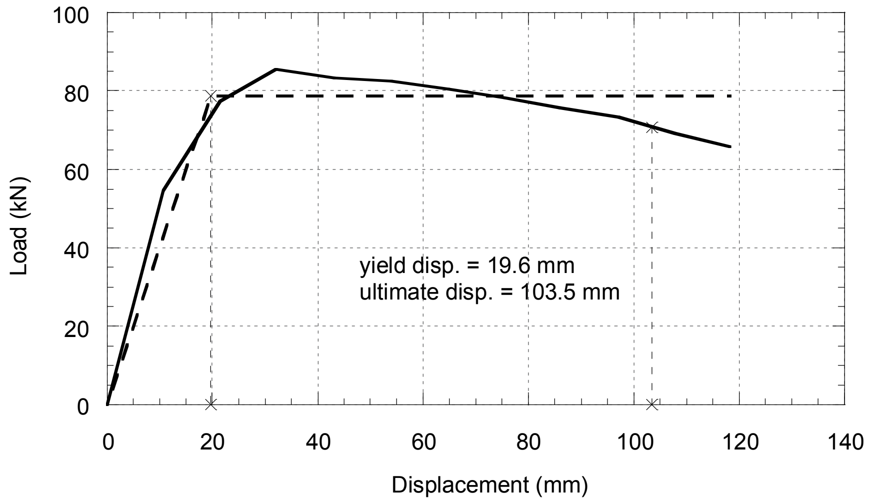


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.27 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Priestley และ Park (1987)

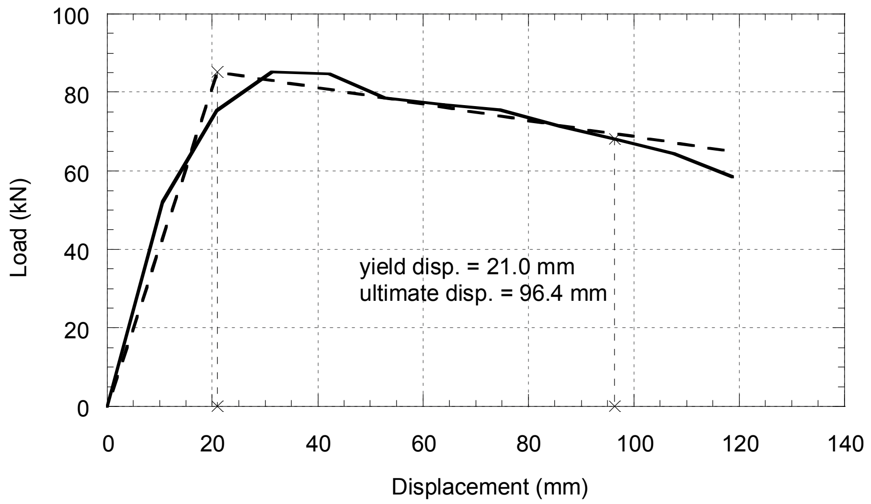


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

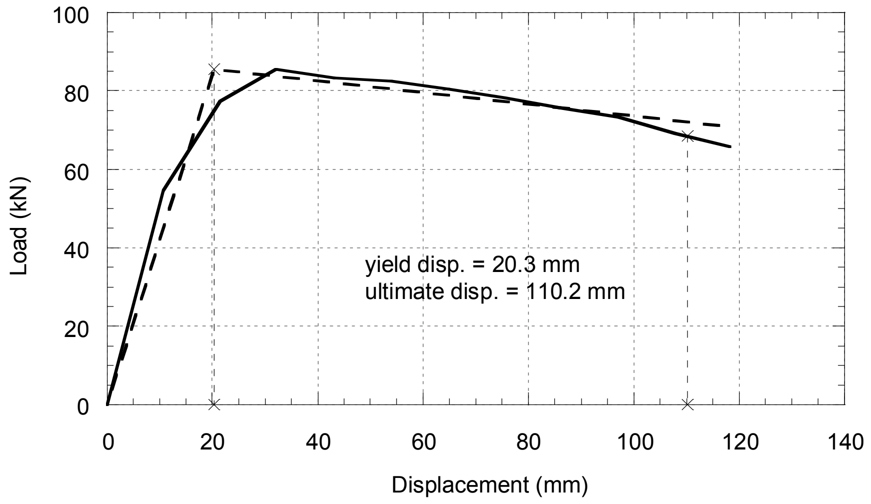


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.28 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury (1993)

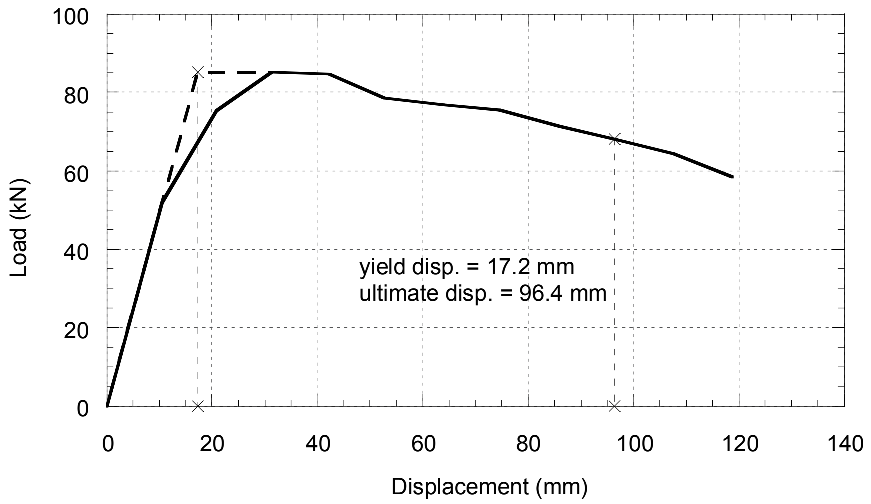


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

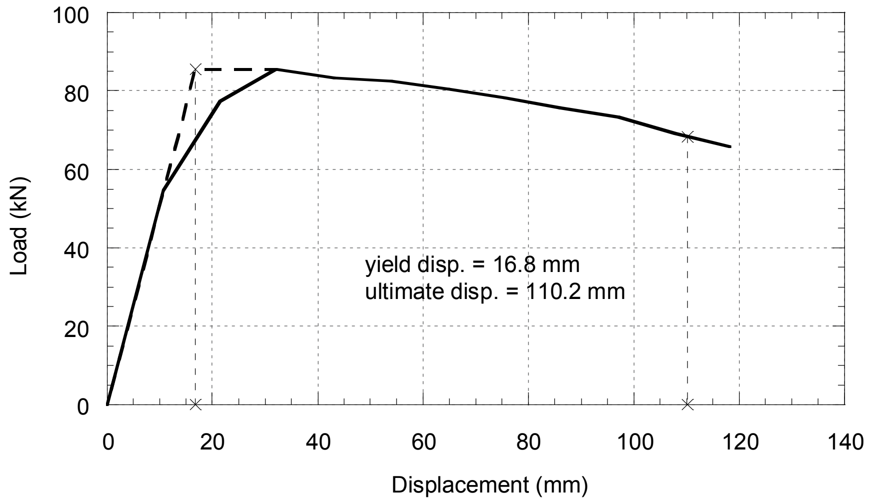


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.29 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Paultre และคณะ (2001)

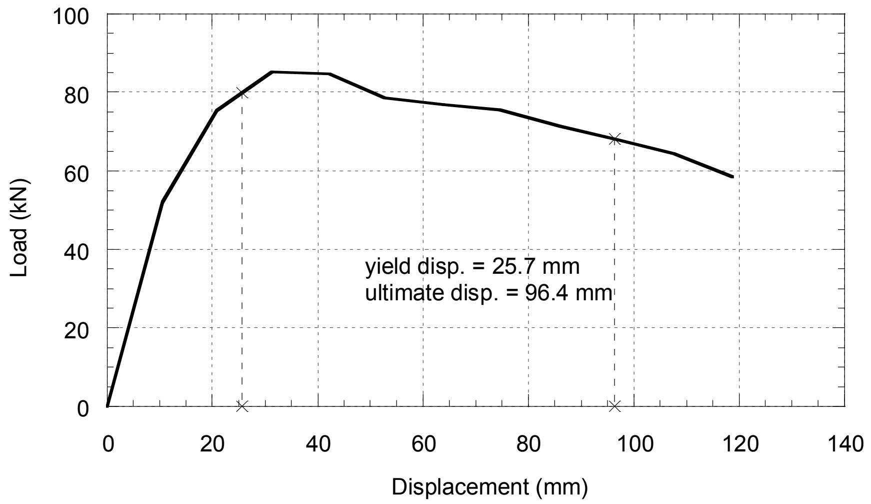


(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200

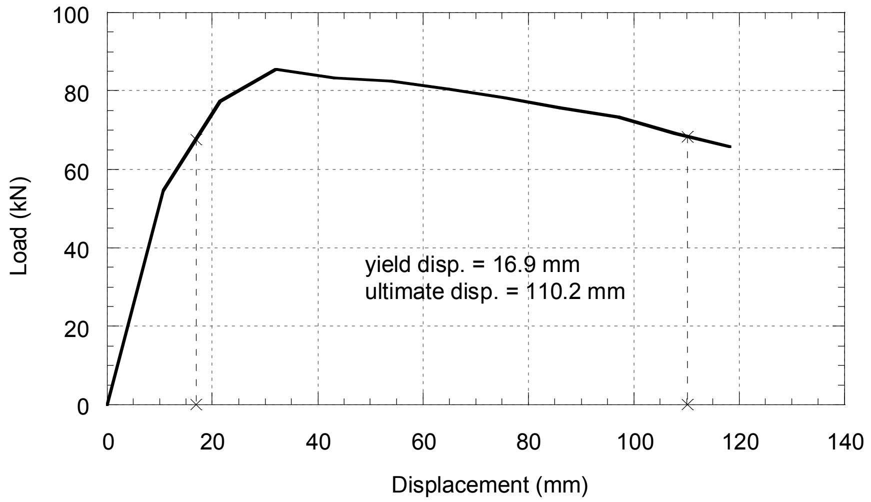


(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.30 ค่าความเหนียวที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury (2002)



(ก) ตัวอย่างเสา C-09-200



(ข) ตัวอย่างเสา CC-09-200

รูปที่ 5.31 ค่าความเหนียวที่จุดครากแรกของเหล็กเสริม

ตารางที่ 5.1 ค่าความเหนียวจากวิธีที่ได้มีการเสนอในแบบต่างๆ

วิธีหาค่าความเหนียวเสนอโดย	ระยะเคลื่อนที่ทางด้านข้าง		ค่าความเหนียว, μ
	ที่จุดคราก, Δ_u (มม.)	สูงสุด, Δ_y (มม.)	
Priestley และ Park (1897)			
C-09-200	14.5	117.6	8.1
CC-09-200	15.1	มากกว่า131.8	มากกว่า8.7
Sheikh และ Khoury (1993)			
C-09-200	24.9	91.4	3.7
CC-09-200	19.6	103.5	5.3
Paultre และคณะ (2001)			
C-09-200	21.0	96.4	4.6
CC-09-200	20.3	110.2	7.6
Legeron และ Pualtre (2002)			
C-09-200	17.2	96.4	5.6
CC-09-200	16.8	110.2	6.6
First yield			
C-09-200	25.7	96.4	3.8
CC-09-200	16.9	110.2	6.5

5.6 **ความสามารถในการสลายพลังงาน**

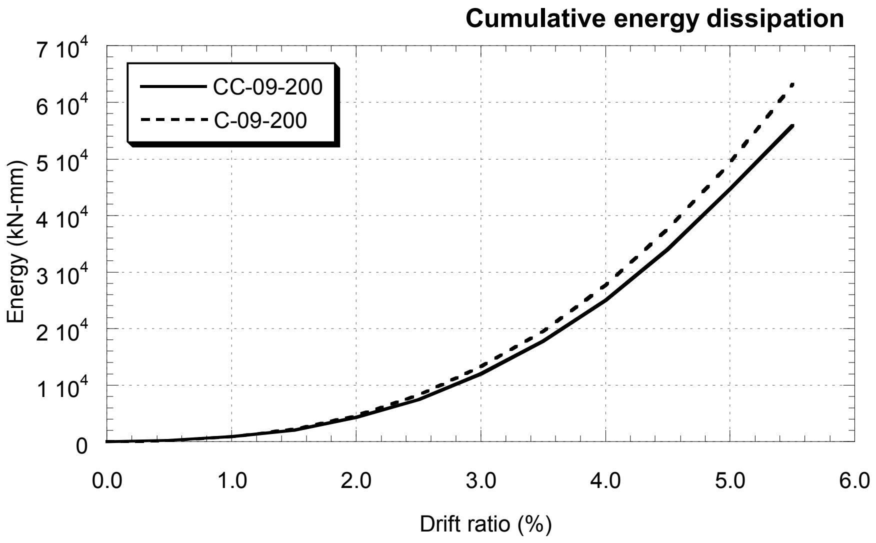
วิธีการคำนวณการสลายพลังงาน (energy dissipation) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ ซึ่งตัวแทนของพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างในแต่ละรอบที่คำนวณนั้นเริ่มคำนวณจากการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับศูนย์ จากนั้นเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศทางลบและเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศทางบวก ของแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในประวัติการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นเคลื่อนที่กลับมาที่การเคลื่อนที่เท่ากับศูนย์ ถือว่าเป็นการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ

ค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างเสา CC-09-200 และตัวอย่างเสา C-09-200 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการสลายพลังงานกับอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ ในช่วงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างยังเป็นเส้นตรงนั้นคือ ในช่วงอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับ

0.00% ถึง 1.00% ค่าการสลายพลังงานมีค่าใกล้เคียงกันมาก พบว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 และ C-09-200 มีค่าการสลายพลังงานสะสมมีค่าเท่ากับ 893 และ 884 กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร ตามลำดับ ในช่วงอัตราการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.50% ถึง 5.50% ค่าการสลายพลังงานของแต่ละรอบของตัวอย่างเสา C-09-200 มากกว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกันในแต่ละอัตราการเคลื่อนที่ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่อัตราการเคลื่อนที่ 5.50% พบว่ามีค่าการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่างเสา C-09-200 เท่ากับ 63131 กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 ซึ่งมีค่าการสลายพลังงานสะสมเท่ากับ 55947 กิโลนิวตัน-มิลลิเมตร ตัวอย่างเสา C-09-200 มีค่าการสลายพลังงานสะสมที่มากกว่าตัวอย่างเสา CC-09-200

ตารางที่ 5.2 การสะลายพลังงานของตัวอย่างเสาแต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

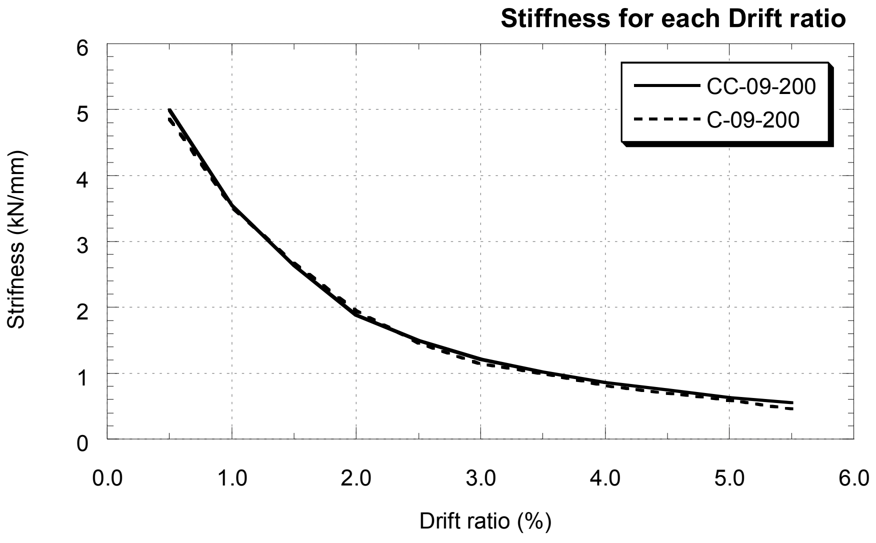
อัตราการเคลื่อนที่ (%)	ค่าการสลายพลังงาน (กิโลนิตัน-มิลลิเมตร)			
	C-09-200		CC-09-200	
	แต่ละรอบทดสอบ	สะสม	แต่ละรอบทดสอบ	สะสม
0.0	0	0	0	0
0.5	235	235	255	255
1.0	647	882	638	893
1.5	1315	2197	1187	2080
2.0	2433	4630	2246	4326
2.5	3650	8280	3139	7465
3.0	5033	11313	4513	11978
3.5	6200	19513	5739	17717
4.0	8152	27665	7328	25045
4.5	9898	37563	8996	34041
5.0	11743	49306	10605	44646
5.5	13832	63138	11301	55947



รูปที่ 5.32 การสลายพลังงานสะสมของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ

5.7 **ค่าสติฟเนส** (stiffness)

ค่าสติฟเนสซึ่งหาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของแต่ละรอบอัตราการเคลื่อนที่ ซึ่งพล็อตเปรียบเทียบค่าสติฟเนสของแต่ละตัวอย่างเสาที่ทดสอบ พบว่าค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสา CC-09-200 มีค่ามากกว่า C-09-200 ซึ่งมากกว่าเล็กน้อยทุกอัตราการเคลื่อนที่ยกเว้นที่อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% ซึ่งมีค่าสติฟเนสน้อยกว่า และจากรูปที่ 5.33 เห็นได้ว่าค่าสติฟเนสมีใกล้เคียงกันมาก แต่ตัวอย่างเสา C-09-200 มีแนวโน้มว่าค่าสติฟเนสลดลงเมื่อการเคลื่อนที่ของเสามีค่าอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า 5.0% ซึ่งถ้ามีการเคลื่อนที่ของตัวอย่างเสาในการทดสอบมากกว่า 5.5% สามารถเห็นค่าสติฟเนสที่แตกต่างได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.33 ค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสาที่ทดสอบ

ตารางที่ 5.3 ค่าสติฟเนสของตัวอย่างเสาในแต่ละรอบการทดสอบ

อัตราการเคลื่อนที่ (%)	รอบทดสอบ	ค่าสติฟเนส, K (กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร)					
		C-09-200			CC-09-200		
		ทิศลบ (-)	ทิศบวก (+)	เฉลี่ย	ทิศลบ (-)	ทิศบวก (+)	เฉลี่ย
0.0	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	1	-5.16	4.73	4.86	-5.31	4.89	5.00
	2	-5.12	4.41		-5.09	4.70	
1.0	1	-3.77	3.47	3.53	-3.76	3.45	3.55
	2	-3.58	3.28		-3.63	3.33	
1.5	1	-2.86	2.57	2.67	-2.75	2.59	2.63
	2	-2.74	2.51		-2.70	2.49	
2.0	1	-2.18	1.837	1.943	-2.11	1.752	1.883
	2	-1.977	1.781		-1.912	1.767	
2.5	1	-1.573	1.408	1.460	-1.594	1.462	1.493
	2	-1.498	1.360		-1.541	1.385	
3.0	1	-1.292	1.119	1.144	-1.235	1.182	1.211
	2	-1.248	0.916		-1.245	1.122	
3.5	1	-1.095	0.929	0.996	-1.087	0.984	1.020
	2	-1.054	0.905		-1.054	0.957	
4.0	1	-0.900	0.761	0.816	-0.932	0.826	0.854
	2	-0.871	0.729		-0.863	0.797	
4.5	1	-0.779	0.628	0.693	-0.779	0.729	0.742
	2	-0.735	0.631		-0.753	0.708	
5.0	1	-0.653	0.545	0.588	-0.653	0.628	0.633
	2	-0.633	0.522		-0.642	0.610	
5.5	1	-0.503	0.483	0.473	-0.564	0.550	0.554
	2	0.433	0.440		-0.548	0.554	

บทที่ 6

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม TDAP3 ซึ่งสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ใช้ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งได้แก่ แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด, แบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

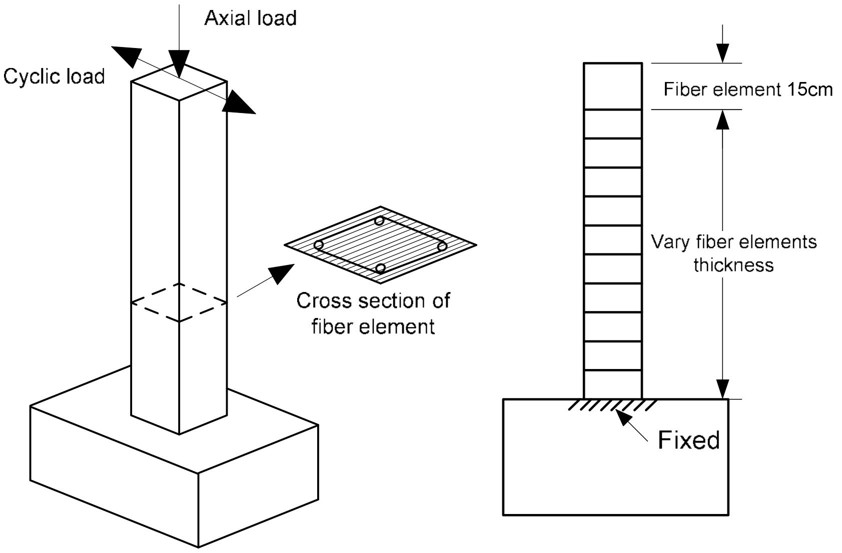
ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์จำลองตัวอย่างเสา CC-09-200 เนื่องจากตัวอย่างเสา CC-09-200 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์ได้พิจารณาผลของความยาวชิ้นส่วนไฟเบอร์ และพารามิเตอร์ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่เกี่ยวข้องกับผลของเบาชิงเกอร์ (Bausinger effect) ได้แก่พารามิเตอร์ R_0, a_1 และ a_2 โดยเปรียบเทียบระหว่างการผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ สติฟเนสในช่วงยืดหยุ่น, แรงกระทำด้านข้างสูงสุด, ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ที่ระยะให้แรง, ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง

6.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสา C-09-200 ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดที่ได้เสนอโดย Kent และ Park (1971), แบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัดที่เสนอโดย Hoshikuma และคณะ (1997) และแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่เสนอโดย Menegotto และ Pinto (1973) รูปที่ 6.1แสดงรูปแบบการจำลองชิ้นส่วนของแบบจำลองไฟเบอร์ รูปแบบของแบบจำลองและสมการได้แสดงในหัวข้อ 2.5.1 ถึง 2.5.3 โดยมีการตั้งสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองไฟเบอร์มีดังนี้

1. ระนาบหน้าตัดขององค์อาคารยังคงเป็นระนาบเดิมหลังเกิดการเปลี่ยนรูปและตั้งฉากกับแกนตามยาว (longitudinal axis) ขององค์อาคาร
2. การเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือนมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา
3. การเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนถือว่ามีค่าน้อย (small deformation) สำหรับวัสดุชนิดเดียวกัน และมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดความยาวชิ้นส่วน
4. ไม่พิจารณาผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (bond-slip)
5. ไม่พิจารณาผลของกำลังดึงของคอนกรีตภายหลังการแตกร้าว

6. ไม่พิจารณาเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเกิดการโก่งเดาะ โดยในแบบจำลองไม่คำนึงถึงปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
7. ไม่พิจารณาผลของการครากของเหล็กเสริมภายในฐานราก (yield penetration)



ก) ลักษณะแบบจำลองไฟเบอร์ ข) แบบจำลอง

รูปที่ 6.1 รูปแบบของแบบจำลองไฟเบอร์

6.2 พารามิเตอร์ที่ศึกษา

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์ได้พิจารณาผลของความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์ จากงานวิจัยในอดีตได้ศึกษาระยะจุดหมุนพลาสติกโดยได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 จากตารางทราบได้ว่าระยะจุดหมุนพลาสติกอยู่ในช่วง 0.45 ถึง 0.10 ม. การวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์เมื่อลดความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์ถึงค่าค่าหนึ่งผลการสอบสนองของแบบจำลองไฟเบอร์จะให้ค่าแรงกระทำด้านข้างที่ไม่ต่างกัน ในการศึกษาความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์จึงได้แปรผันส่วนของความยาวเสาทั้งหมดให้มีความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์ 0.40, 0.20, 0.10 และ 0.075 ม.

จึงได้ศึกษาแปรผันพารามิเตอร์ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่เหมาะสมซึ่งได้แก่พารามิเตอร์ R_0, a_1 และ a_2

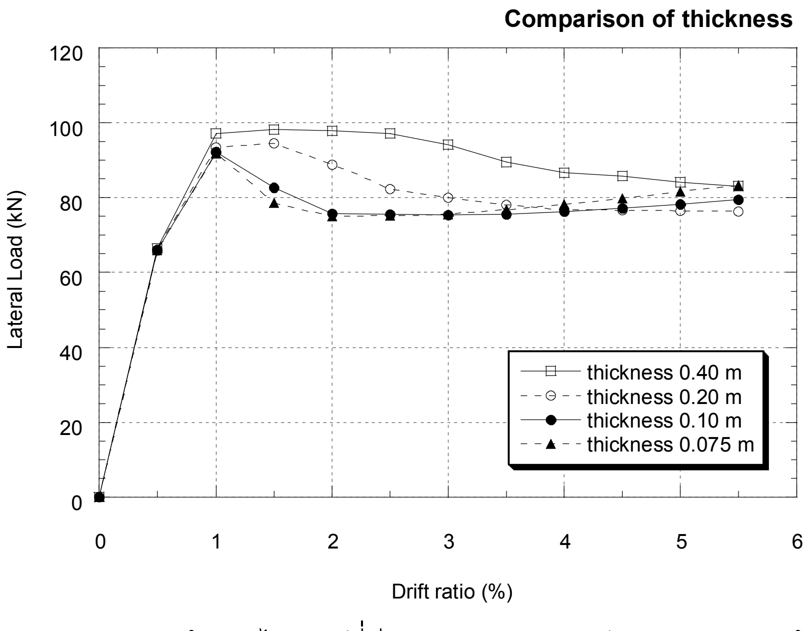
6.2.1 ความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์ที่เหมาะสมโดยแปรผันความยาวมีค่าเท่ากับ 0.40, 0.20, 0.10 และ 0.075 ม. โดยใช้พารามิเตอร์ที่ Menegotto และ Pinto (1973) ได้เสนอมาคือ R_0, a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 20, 18.5 และ 0.15 ตามลำดับ พบว่าความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์มีผลอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อลดความความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์ทำให้แรง

กระทำด้านข้างลดลง รูปที่ 6.2 แสดงความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่มีค่าลดลงเมื่อลดความยาวของไฟเบอร์ลง ผลของแรงกระทำด้านข้างจากแบบจำลองไฟเบอร์ระหว่างความยาว 0.10 ม. และ 0.075 ม. มีค่าแรงกระทำด้านข้างต่างกัน 5.0% ซึ่งให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ไม่ต่างกันมากนัก จึงเลือกใช้ความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์เท่ากับ 0.10 ม.

ตารางที่ 6.1 ระยะจุดหมุนพลาสติกของนักวิจัยที่ได้เสนอในอดีต

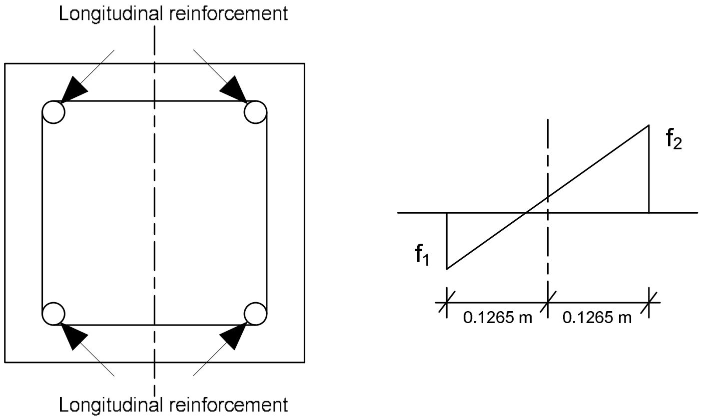
นักวิจัย	ระยะจุดหมุนพลาสติก (ม.)
Baker และ Amarakone (1964)	0.41
Corley (1966)	0.18
Mattock (1967)	0.28
Park และคณะ (1982)	0.16
Priestley และ Park (1987)	0.32
Pauley และ Priestley (1992)	0.44
Shiekh และ Khaoury (1993)	0.40
Bae และ Bayrak (2008)	0.10



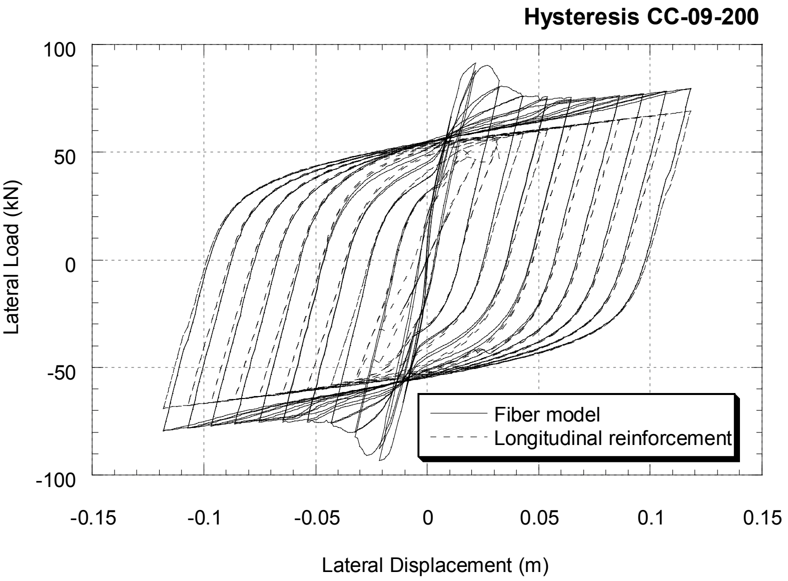
รูปที่ 6.2 ความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

6.2.2 พารามิเตอร์ในแบบจำลองเหล็กเสริม

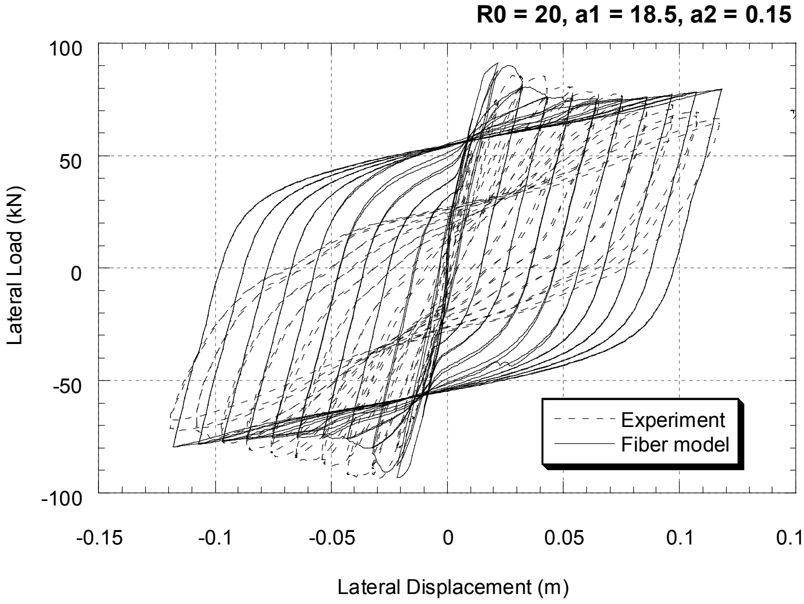
เมื่อได้ความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์ที่เหมาะสมแล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาพารามิเตอร์ของแบบจำลองเหล็กเสริมโดยใช้ความยาวแบบจำลองไฟเบอร์เท่ากับ 0.10 ม. พบว่าแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรเป็นตัวควบคุมเสาที่ได้จากการวิเคราะห์ รูปที่ 6.3 แสดงหน้าตัดขวางของตัวอย่างเสาซึ่งสามารถหาแรงของเหล็กเสริมได้จากแบบจำลองไฟเบอร์ ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่ที่ได้จากเหล็กเสริมเหล็กตามยาวจากสมการสมดุลสามารถทราบโมเมนต์ของหน้าตัดตามขวางของตัวอย่างเสา และทราบแรงกระทำด้านข้างที่ระดับให้แรงโดยนำโมเมนต์ของหน้าตัดตามขวางในหารด้วยความสูงประสิทธิผล จากรูปที่ 6.4 ได้ใช้พารามิเตอร์ของเหล็กเสริมตามยาวที่เสนอโดย Menegotto และ Pinto (1973) ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์ของเหล็กเสริมตามยาวเป็นตัวควบคุมรูปแบบของวงรอบฮิซเทียรีซีซเป็นหลัก ผู้วิจัยได้ศึกษาพารามิเตอร์แปรผันพารามิเตอร์ต่างๆ และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่กับผลทดสอบจริง โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับพารามิเตอร์ที่ได้เสนอโดย Menegotto และ Pinto (1973) ได้แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.3 หน้าตัดขวางของตัวอย่างเสาซึ่งสามารถหาแรงของเหล็กเสริมได้จากแบบจำลองไฟเบอร์



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์แรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ของตัวอย่างเสาซึ่งมีผลของเหล็กเสริมเหล็กตามยาวเป็นหลัก

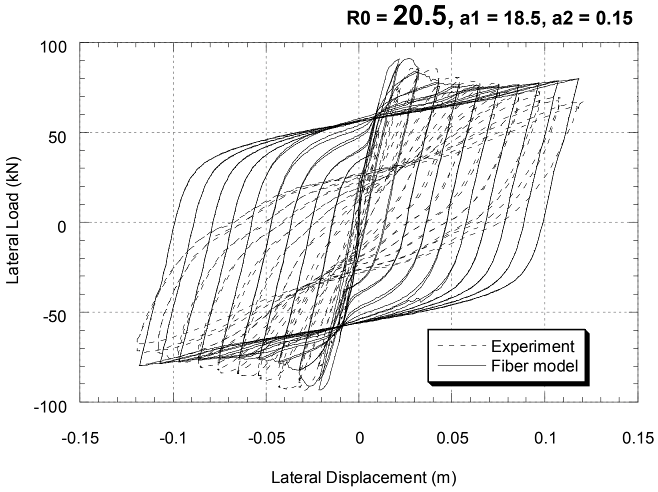


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่เมื่อใช้พารามิเตอร์ที่เสนอโดย Menegotto และ Pinto (1973)

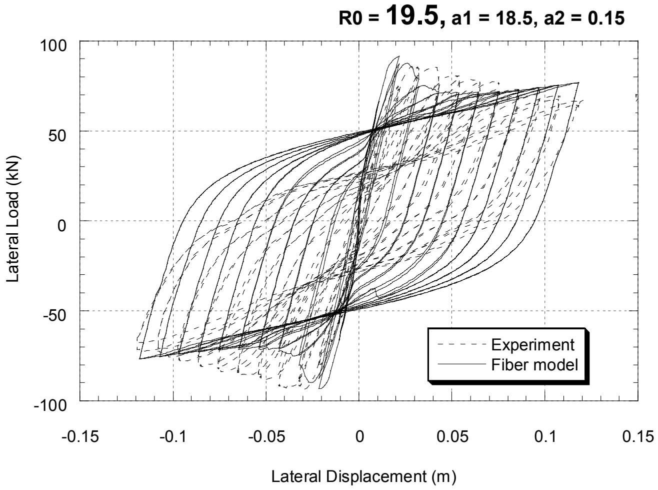
6.2.2.1 **พารามิเตอร์** R_0

การเพิ่มค่าพารามิเตอร์ R_0 ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ขณะลดแรงกระทำมีลักษณะวงรอบกว้างขึ้น และการลดค่าพารามิเตอร์ R_0 ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ขณะลดแรงกระทำมีลักษณะวงรอบ

แคบลง รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า R_0 ต่างๆ



(ก) R_0 มีค่าเท่ากับ 20.5

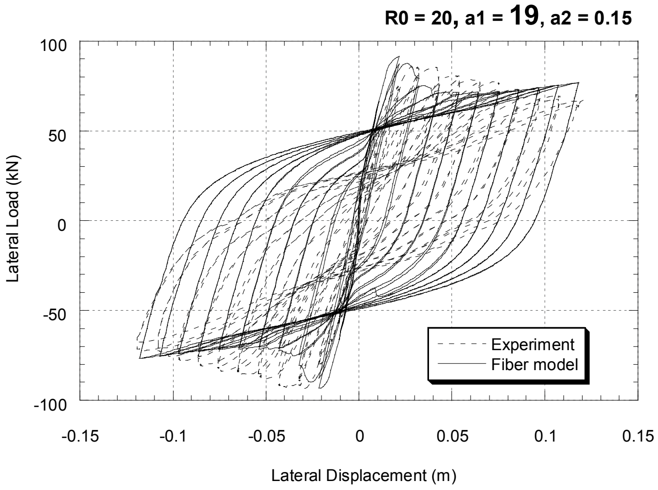


(ข) R_0 มีค่าเท่ากับ 19.5

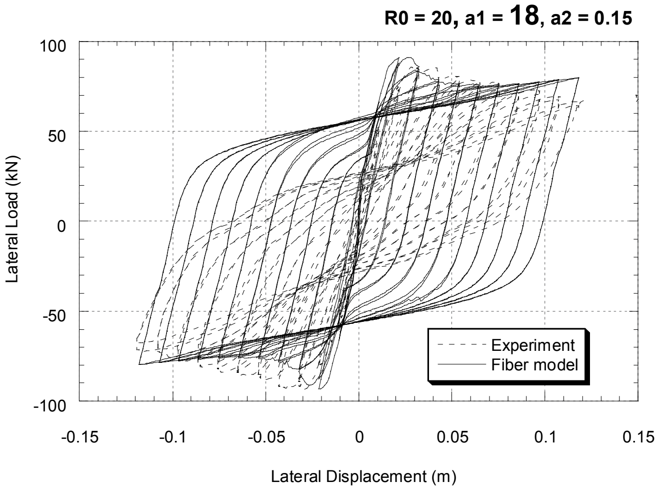
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า R_0 ต่างๆ

6.2.2.2 **พารามิเตอร์** a_1

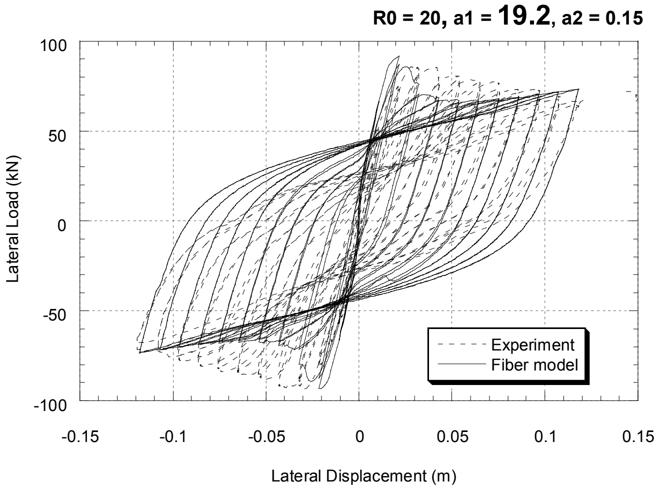
การเพิ่มค่าพารามิเตอร์ a_1 ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ขณะลดแรงกระทำมีวงรอบลักษณะวงรอบแคบลง และการลดค่าพารามิเตอร์ a_1 ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ขณะลดแรงกระทำมีวงรอบลักษณะวงรอบกว้างขึ้น รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า a_1 ต่างๆ



(ก) a_1 มีค่าเท่ากับ 19



(ข) a_1 มีค่าเท่ากับ 18



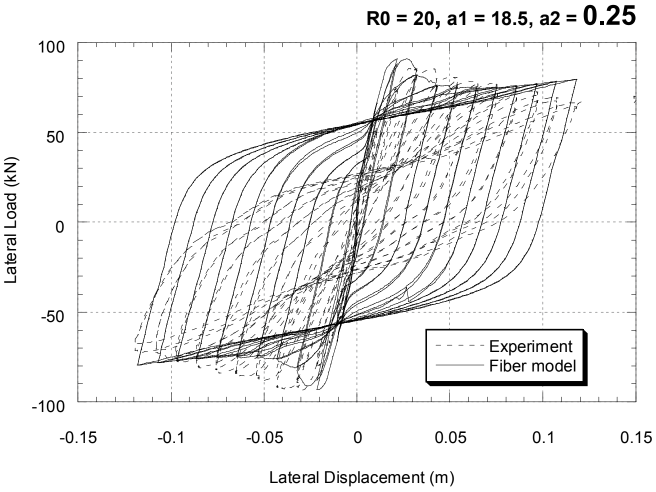
(ค) a_1 มีค่าเท่ากับ 19.2

รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า a_1 ต่างๆ

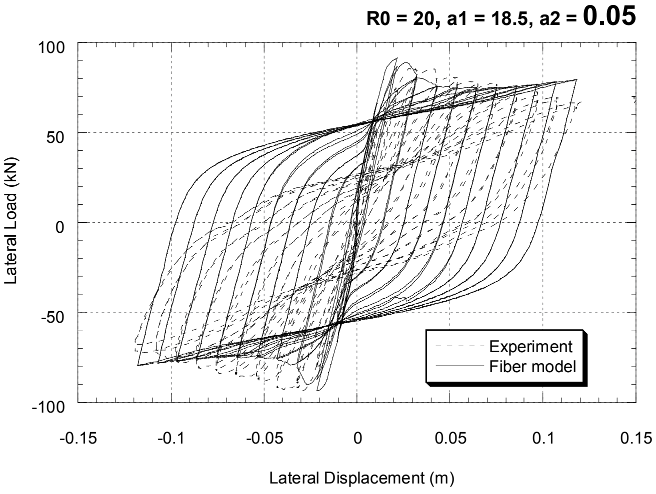
6.2.2.3 พารามิเตอร์ a_2

พารามิเตอร์ a_2 ไม่ส่งผลชัดเจนต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า a_2 ต่างๆ

จากการศึกษาพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร พบว่าเมื่อเพิ่มค่า a_1 ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ขณะลดแรงกระทำมีลักษณะวงรอบแคบลงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากที่สุด จึงเลือกใช้ค่า a_1 เท่ากับ 19.2 เพราะฉะนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ R_0, a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 20, 19.2 และ 0.15 ตามลำดับ และความยาวของแบบจำลองไฟเบอร์เท่ากับ 10 ซม.



(ก) a_2 มีค่าเท่ากับ 0.25



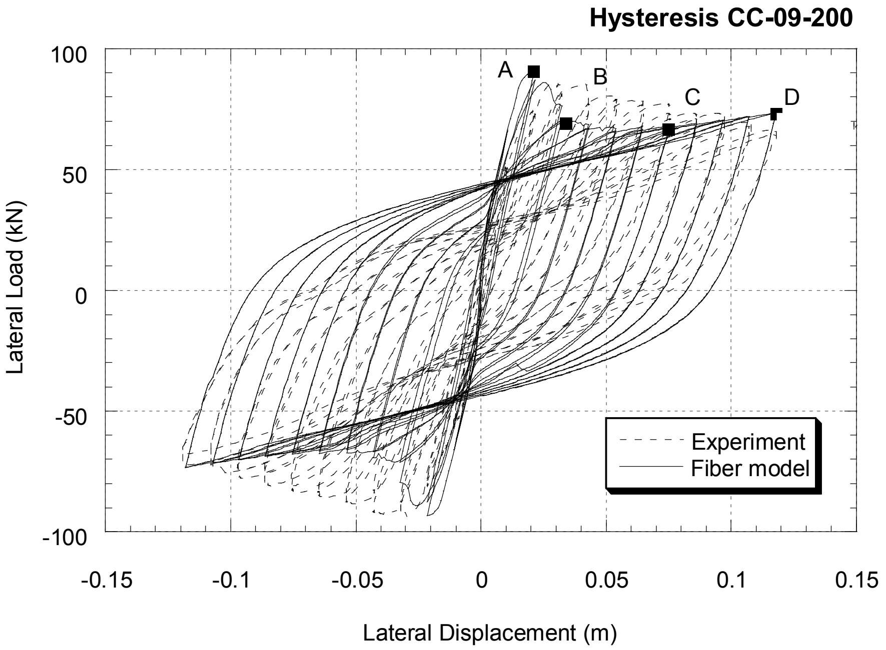
(ข) a_2 มีค่าเท่ากับ 0.05

รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่สำหรับค่า a_2 ต่างๆ

6.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์

6.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่

จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์พบว่าตัวอย่างเสา CC-09-200 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่พบว่าแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 91.8 kN ที่จุด A ดังแสดงในรูปที่ 6.9 จากผลการทดสอบจริงแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 93.5 kN ซึ่งผลการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าผลทดสอบจริง 1.85% ผลการวิเคราะห์มีสติฟเนสในช่วงเริ่มต้น (initial stiffness) มากกว่าผลการทดสอบจริง 19% หลังจากนั้นแรงกระทำด้านข้างลดลงที่จุด B เนื่องจากความสามารถในการรับแรงดึงของเหล็กเสริมลดลงและความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 6.10

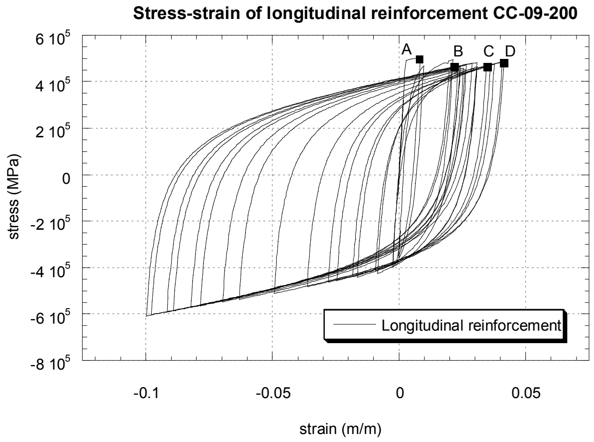


รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ของแบบจำลองไฟเบอร์

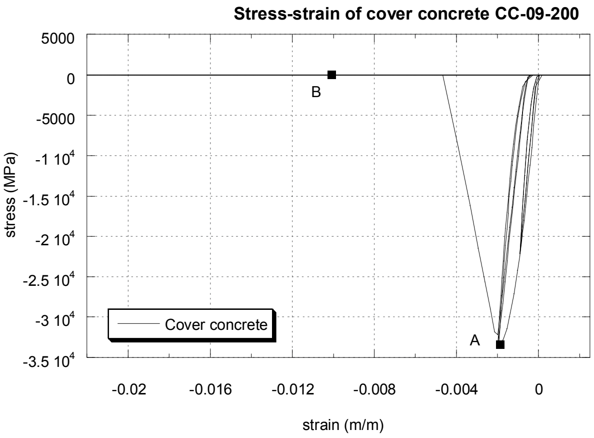
6.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าความโค้งมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบจริง รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งของผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบจริงของตัวอย่างเสา CC-09-200 การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์กับผลทดสอบจริงของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งได้เปรียบเทียบช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม.และช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งช่วงความสูง 0.00 ถึง

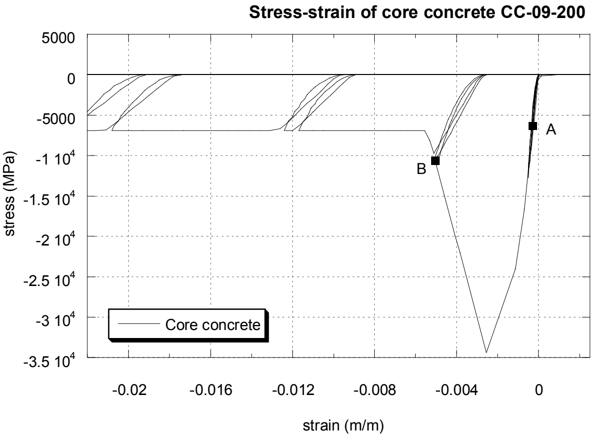
0.20 ม. มีลักษณะคล้ายกับวงรอบฮิซเทียรีซีซ จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้งพบว่าจุดหมุนพลาสติกของเสาตัวอย่าง CC-09-200 อยู่ในช่วงเดียวกับผลการทดสอบจริง โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดมีค่าใกล้เคียงกับผลการผดสอบจริง



(ก) เหล็กเสริมตามยาว

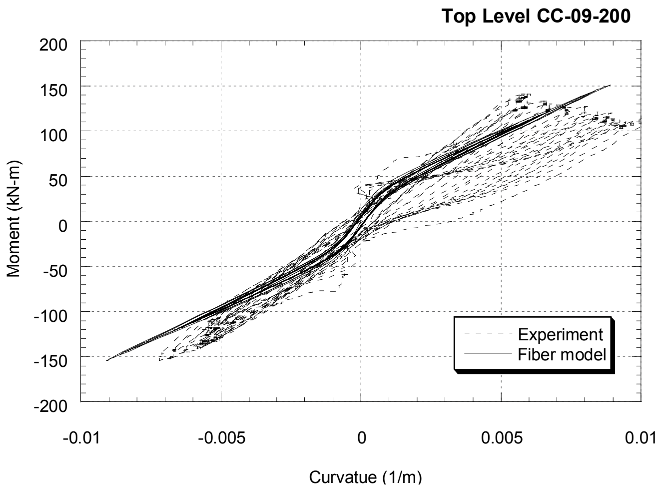


(ข) คอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด

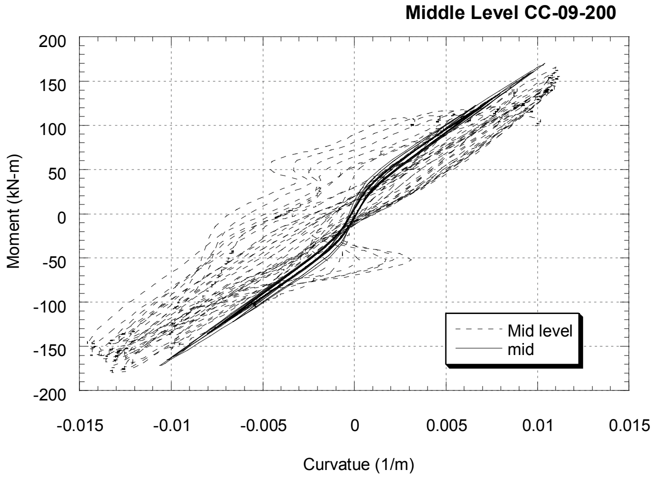


(ค) คอนกรีตที่มีการโอบรัด

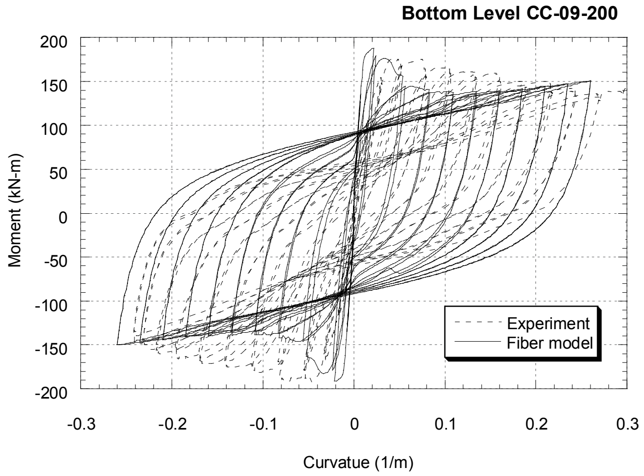
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแบบจำลองไฟเบอร์



(ก) ช่วงความสูง 0.40 ถึง 0.60 ม. จากฐานราก



(ข) ช่วงความสูง 0.20 ถึง 0.40 ม. จากฐานราก



(ค) ช่วงความสูง 0.00 ถึง 0.20 ม. จากฐานราก

รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความโค้งกับโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองไฟเบอร์

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. จากการทดสอบเหล็กเสริมแรงกระทำภายใต้แรงอัดพบว่าเหล็กเสริมที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 9 มม. และขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 6 มม. สามารถรับแรงกระทำตามแนวแกนหลังจุดครากได้คงที่ และมีค่าการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกันคือ 6.64 และ 6.49 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ จึงเลือกใช้ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดที่มีความยาว 100 มม. และมีความหนา 6 มม. เป็นปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีขนาดเหมาะสมและใช้เสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร
2. ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถต้านทานการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณระยะพลาสติกได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม CC-09-200 ไม่พบรอยแตกร้าวและการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มมากบริเวณโคนเสา ซึ่งแตกต่างกับตัวอย่างเสา C-09-200 ที่พบรอยแตกร้าวที่มากกว่าและการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มบริเวณโคนเสาซึ่งเห็นการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้อย่างชัดเจน
3. จากเส้นโค้งขอบนอกพบว่าตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม CC-09-200 และตัวอย่างเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม C-09-200 โดยมีค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 85.5 kN และ 85.1 kN ตามลำดับและจากผลการทดสอบสามารถหาค่าความเหนียวจากวิธีการหาค่าความเหนียวที่ได้เสนอในอดีตทั้งหมด 5 วิธี ซึ่งตัวอย่างเสา CC-09-200 มีค่าความเหนียวมากกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 เฉลี่ยมากกว่า 27%
4. ตัวอย่างเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม CC-09-200 มีค่าการสลายพลังงานที่น้อยกว่าตัวอย่างเสา C-09-200 เห็นได้จากวงรอบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างเสา CC-09-200 แต่ละอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่มีวงรอบแคบกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากตัวอย่างเสามีการลดลงของระยะจุดหมุนพลาสติก
5. จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าความยาวของชิ้นส่วนไฟเบอร์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1/4 ของความกว้างหน้าตัดเสา ซึ่งมีขนาดความยาวเท่ากับ 0.10 ม.

และพบว่าแบบจำลองของเหล็กเสริมและแบบจำลองของคอนกรีตที่มีการโอบรัดมีผลต่อพฤติกรรมของเสาหลังรับแรงกระทำสูงสุด พบว่าแบบจำลองไฟเบอร์ให้แรงกระทำด้านข้างสูงสุดน้อยกว่าผลการทดสอบจริง 1.85% และค่าสติฟเนสในช่วงเริ่มต้น (initial stiffness) มีค่ามากกว่าผลการทดสอบจริง 19%

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตัวอย่างเสาที่มีแรงกระทำตามแนวแกนเท่ากับ 0.057fc’/Ag เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆในอดีตที่ได้ศึกษามาพบว่าแรงกระทำตามแนวแกนมีค่าน้อยมาก จึงควรมีการศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเพิ่มเติมในกรณีของแรงกระทำตามแนวแกนมีค่าค่อนข้างสูงเล่นในเสาอาคาร
2. แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้พิจารณาว่าเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตไม่เกิดการโก่งเดาะโดยไม่คำนึงถึงแบบจำลองของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงควรมีการศึกษาแบบจำลองของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมให้มีพฤติกรรมได้อย่างถูกต้อง

รายการอ้างอิง

Bae, S. and Bayrak O. 2008. Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns. ACI Structural Journal. 105(3) : 290-300

Bae, S., Mieses, A. M.; and Bayrak, O. 2005. Inelasic Bucking of Reinforcing Bar. ASCE Journal of Structural Engineering. 131(2) : 314-321

Baker, A. L. L., and Amarakane, A. M. N. 1964. Inelastic Hyperstatic Frame Analysis. Flexure Mechanics of Reinforced Concrete, American Concrete Institute. Farmington Hills, MI. SP-12 : 85-142

Bayrak, O., and Sheikh, S. A. 1998. Confinement Reinforcement Design Consideration for HSC Columns. Journal of Structural Engineering. 124(9) : 999-1010.

Berry, P. B. and Eberhard, M. O. 2005. Practical Performance Model for Bar Buckling. ACSE Journal of Structural Engineering. 131(7) : 1060-1070

Corley, W. G. 1966. Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams. Journal of the Structure Division, ASCE. 92(ST5) : 121-146

Gomes, A. and Appleton, J. 1997. Nonlinear Cyclic Stress-Strain Relation of Reinforcing Bars Including Buckling, Elsevier Engineering Structural Division. 19(10) : 822-826

Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A.W. 1997. Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers. ASCE Journal of Structural Engineering. 123(5) : 624-633

Kent, D. C. and Park, R. 1971. Flexural members with confined concrete. ASCE Journal of Structural Engineering. 97(7) : 1969-1990

Legeron, F. and Pualtre, P. 2000. Behavior of High-Strength Concrete Columns under Cyclic Flexure and Constant Axial Load. ACI Structural Journal. 97(4) : 591-601

Lukknapasit, P. and Sittipunt, C. 2003. Ductility Enhancement of Moderate Confined Concrete Tied Columns with Hook-Clips. ACI Structural Journal. 100(4) : 422-429

Mattock, A. H., 1967. Discussion of Rotation Capacity of Hinging Region in Reinforced Concrete Beams. Journal of the Structure Division, ASCE. 93(ST2) : 519-522

Menegoto, M. and Pinto, P.E. 1973. Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending”, Proc. of IABSE Symposium on

Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. pp. 15-22. Lisbon, Protugal.

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, Chulalongkon University

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

Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W.D. 1982. Ductility of Square-Confined Concrete Columns. Journal of the Structure Division, ASCE. 108(ST4) : 929-950

Paulay, T. and Priestly, M. J. N. 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, New York.

Paultre, P., Legeron, F. and Mongeau, D. 2001. Influence of Concrete Strength and Transverse Reinforcement Yield Strength on Behavior of High-Strength Concrete Column. ACI Structural Journal. 98(4) : 490-501

Priestley, M. J. N., and Park, R. 1987. Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading. ACI Structural Journal. 84(1) : 61-76

Sakai, J and Kawashima K. 2006. Unloading and Reloading Stress-strain Model for Confine Concrete. Journal of the Structure Division, ASCE. 132(1) : 112-122

Sheikh, S. A., and Khoury, S. S. 1993. Confined Concrete Columns with Stubs. ACI Structural Journal. 90(4) : 414-431

Wehbe, N. I., Saiidi, M. S., and Sanders, D. H. 1999. Seismic Performance of Rectangular Brigde Columns with Moderate Confinement. ACI Structural Journal. 96(2) : 284-259

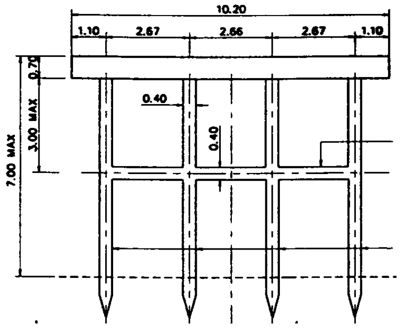
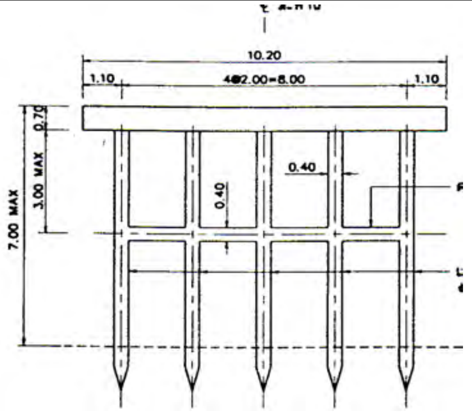
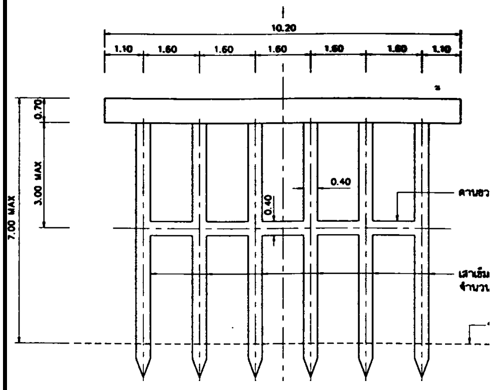
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

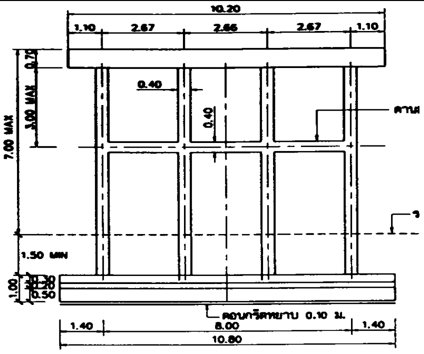
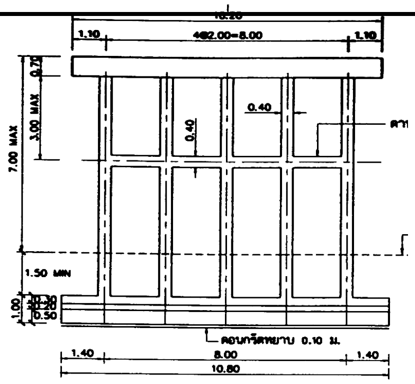
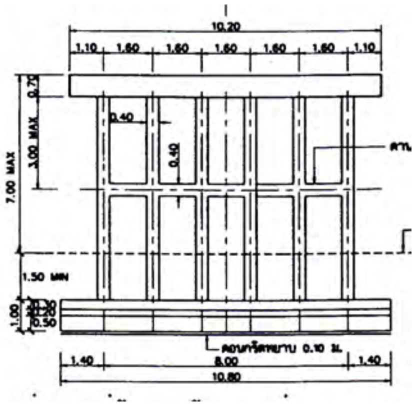
ที่มาของพารามิเตอร์ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงที่มาของพารามิเตอร์ของตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งได้เตรียมตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งอ้างอิงจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท เป็นเสาหน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40x0.40 ม. ซึ่งเป็นเสาสะพานภูมิภาคในเขตชุมชนในเขตชุมชนขนาดเล็กช่วง 5-10 เมตร และการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหว สะพานซึ่ง พื้นผิวจราจร 2 จราจร มีความกว้าง 8 เมตร ลักษณะตอม่อของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กมีทั้งลักษณะเสาเข็มและฐานแผ่ ลักษณะและรายละเอียดซึ่งได้กล่าวถึงความยาวของช่วงสะพาน, ความหนาและชนิดของคอนกรีตของพื้นสะพาน, ขนาดและจำนวนของเสาสะพานแต่ละช่วงความยาวของสะพานของสะพานที่ตอม่อเป็นลักษณะเสาเข็มได้แสดงในตารางที่ ก.1, ตอม่อที่มีลักษณะฐานแผ่ได้แสดงในตารางที่ ก.2 ส่วนตารางที่ ก.3 ได้กล่าวถึงรายละเอียดของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง, อัตราส่วนของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง และอัตราส่วนแรงในแนวแกน

ตารางที่ ก.1 ตอม่อกลางชนิดเสาเข็ม

ลักษณะตอม่อกลาง	ช่วงสะพาน (ม.)	ความหนาของพื้นหล่อในที่ (ม.)	ความหนาพื้นคอนกรีตอัดแรง+ทับหน้า (ม.)	ขนาดตอม่อ (ม.)	จำนวนเสา
	5	0.32	0.26	0.40x0.40	4
	6	0.36	0.29	0.40x0.40	4
	7	0.39	0.32	0.40x0.40	5
	8	0.43	0.35	0.40x0.40	5
	9	0.47	0.41	0.40x0.40	6
	10	0.53	0.45	0.40x0.40	6

ตารางที่ ก.2 ตอม่อกลางชนิดฐานแผ่

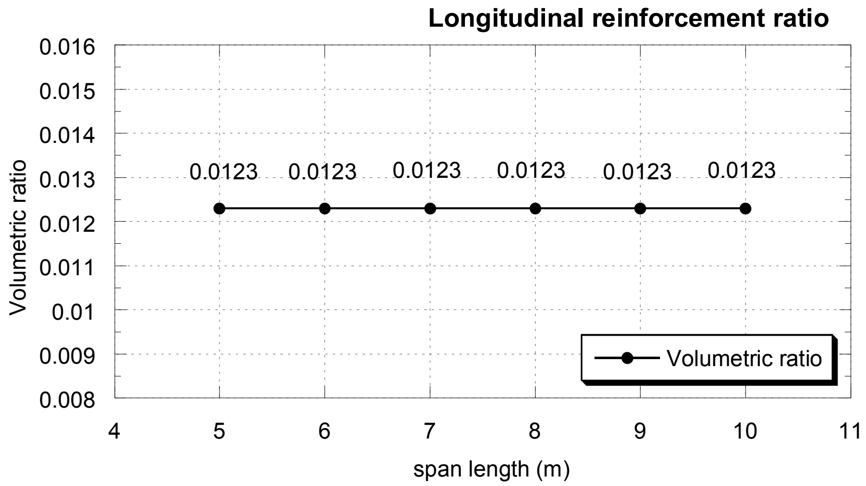
ลักษณะตอม่อกลาง	ช่วงสะพาน (ม.)	ความหนาของพื้นหล่อในที่ (ม.)	ความหนาพื้นคอนกรีตอัดแรง+ทับหน้า (ม.)	ขนาดตอม่อ (ม.)	จำนวนเสา
	5	0.32	0.26	0.40x0.40	4
	6	0.36	0.29	0.40x0.40	4
	7	0.39	0.32	0.40x0.40	5
	8	0.43	0.35	0.40x0.40	5
	9	0.47	0.41	0.40x0.40	6
	10	0.53	0.45	0.40x0.40	6

ตารางที่ ก.3 เสาสะพานภูมิภาคในเขตชุมชนในเขตชุมชนขนาดเล็กช่วง 5-10 เมตร

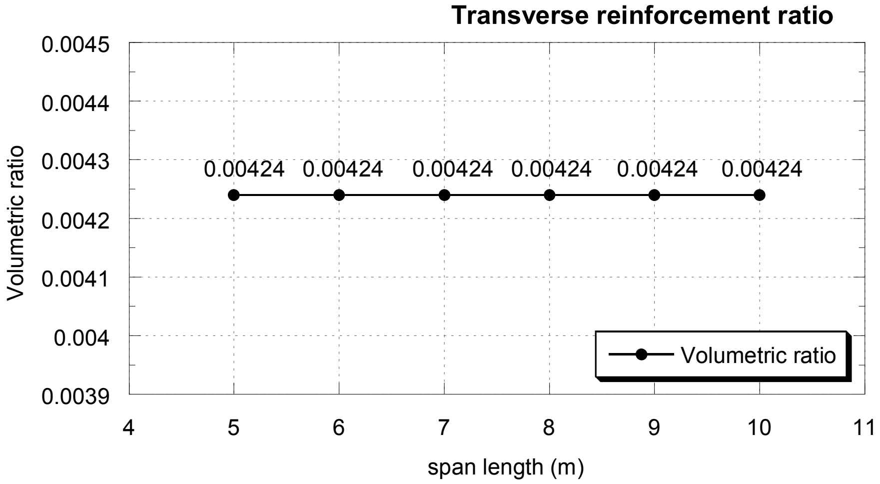
ความยาวช่วง (ม.)	ชนิดพื้น	เหล็กเสริมตามยาว	อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว (ρ_l)	เหล็กปลอก	อัตราส่วนเหล็กปลอก (ρ_s)	ขนาดตอม่อ (ม.)	น้ำหนักลเสา (ตัน)	P / fc'Ag (%)
5	หล่อในที่	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	21.979	3.925
	คอนกรีตอัดแรง	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	20.210	3.609
6	หล่อในที่	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	26.584	4.747
	คอนกรีตอัดแรง	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	24.108	4.305
7	หล่อในที่	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	29.226	5.219
	คอนกรีตอัดแรง	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	26.656	4.76
8	หล่อในที่	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	34.243	6.115
	คอนกรีตอัดแรง	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	30.890	5.516
9	หล่อในที่	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	37.342	6.669
	คอนกรีตอัดแรง	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	34.752	6.206
10	หล่อในที่	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	43.725	7.795
	คอนกรีตอัดแรง	4-DB25	0.0123	RB9@20 ซม.	0.00424	0.40 x 0.40	39.896	7.124

จากข้อมูลในตารางที่ ก.3 สามารถนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมตามยาว และตามขวางกับความยาวช่วงสะพาน ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ส่วนความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักกับความยาวช่วงสะพาน ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.10

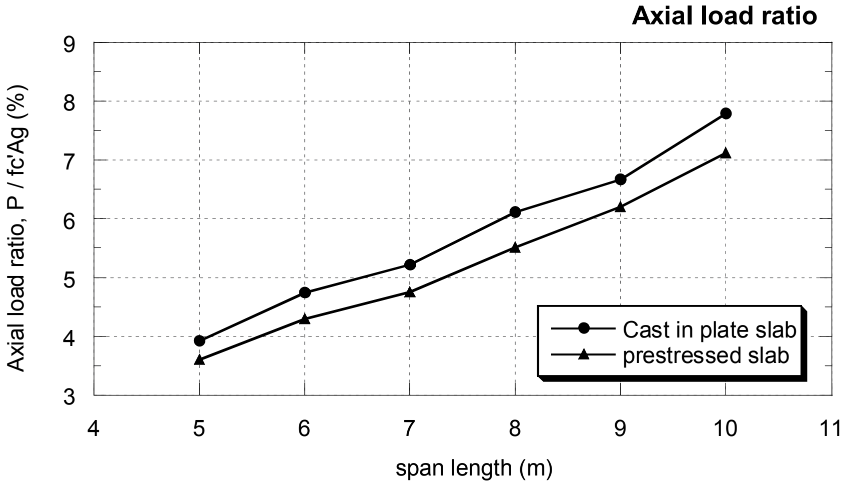
จากรูปที่ ก.1 และ ก.2 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวและตามขวาง มีค่าคงที่ เนื่องจากมีการเสริมเหล็กที่เหมือนกัน แม้ว่าจีมีการเพิ่มความความของช่วงสะพานแต่ได้มีการเพิ่มจำนวนเสาเพื่อรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาแทน



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมตามยาวกับความยาวช่วงสะพาน



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมตามขวางกับความยาวช่วงสะพาน



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักกับความยาวช่วงสะพาน

จากรูปที่ ก.3 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนน้ำหนัก (P/fc'Ag) มีค่าประมาณร้อยละ 3.6 ถึง 7.8 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนน้ำหนักที่ถ่ายลงเสาแต่ละต้นน จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของช่วงสะพานมากขึ้น เนื่องจากการรับน้ำหนักจากช่วงสะพานที่ยาวกว่าต้องรับน้ำหนักที่มากขึ้น โดยได้ออกแบบเสาที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นใช้ค่าอัตราส่วนน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5.4 เหตุผลที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำหนักที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.4 เพราะมีค่าครอบคลุมทุกค่าอัตราส่วนน้ำหนักของทุกช่วงสะพาน

การคำนวณน้ำหนักสะพานที่กระทำต่อเสาสะพาน ซึ่งเป็นการหาน้ำหนักที่กระทำต่อเสาแต่ละต้นของเสาสะพาน ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักที่กระทำต่อเสาสะพาน ซึ่งได้ยกตัวอย่างตอม่อกลางของสะพานในเขตชุมชนภูมิภาค ซึ่งเป็นสะพานขนาดเล็กชนิดตอม่อฐานแผ่ ช่วงสะพานยาว 7 เมตร ในตอม่อกลางของสะพานนั้นมีเสาสะพานจำนวน 5 เสา การหาค่าน้ำหนักสะพานมีดังต่อไปนี้

- น้ำหนักพื้นสะพาน (พื้นหล่อในที่)

  พื้นหล่อในที่มีความหนา 0.39 เมตร

  ช่วงสะพานยาว 7 เมตร

  หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

  น้ำหนักพื้นสะพาน = 0.39 x 7 x 2400 = 6552 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

- น้ำหนักทางเท้า

  ทางเท้ามีความกว้างด้านละ 1.75 เมตร

  ความหนาของทางเท้า 0.20 เมตร

  น้ำหนักทางเท้ากระทำแบบจุด = 1.75 x 0.20 x 7 x 2400 = 5880 กิโลกรัม

- น้ำหนักราวสะพาน

  ปริมาตรราวสะพานด้านละ 0.49 ลูกบาศก์เมตร

  ปริมาตรเสาราวสะพานด้านละ 0.45 ลูกบาศก์เมตร

  ปริมาณคอนกรีตทั้งราวและเสาสะพาน = 0.49 + 0.45 = 0.94 ลูกบาศก์เมตร

  น้ำหนักราวและเสาสะพานกระทำแบบจุด = 0.94 x 2400 = 2256 กิโลกรัม

จากนั้นได้วิเคราะห์หาแรงกระทำตามแนวแกนของเสาสะพานคอนกรีตโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม SAP2000 version12 ลำลองโครงสร้างของตอม่อตามแบบมาตรฐานของทางหลวงชนบทโดยใช้น้ำหนักที่ได้คำนวณมาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นมากระทำต่อโครงสร้าง ซึ่งค่าน้ำที่กระทำของแต่ละเสาในตอม่อกลางได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 ค่าน้ำหนักที่กระทำของแต่ละเสาสะพาน

เสาต้นที่	น้ำหนักที่กระทำต่อเสาสะพานที่คำนวณได้จาก SAP2000 (ตัน)	น้ำหนักที่กระทำต่อเสาสะพานที่คำนวณได้จาก SAP2000 (กิโลนิวตัน)
1	29.58	290.2
2	16.52	162.1
3	15.99	156.9
4	16.52	162.1
5	29.58	290.2

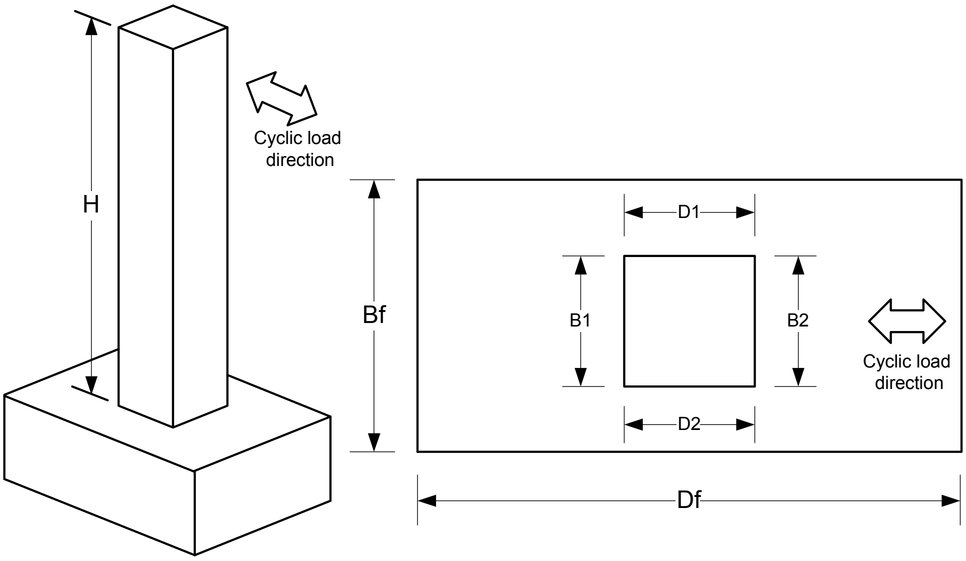
จากตารางที่ ก.4 จะได้ค่าน้ำหนักที่กระทำของแต่ละเสาสะพาน ซึ่งน้ำหนักที่กระทำต่อเสาตอม่อสะพานจะเห็นได้ว่าเสาริมทั้ง 2 ข้างจะค่าสูงสุดเนื่องจากมีการรับน้ำหนักของทางเท้าและราวสะพานด้วย จากตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักที่กระทำต่อเสาสะพานขนาดเล็กชนิดตอม่อฐานแผ่ ช่วงสะพานยาว 7 เมตร ในตอม่อกลางของสะพานนั้นมีเสาสะพานจำนวน 5 เสา มีค่าน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 290.2 กิโลนิวตัน (29.58 ตัน)

ภาคผนวก ข

ขนาดตัวอย่างทดสอบและผลการสอบเทียบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ ข.1 ขนาดของตัวอย่างเสาทดสอบ

ตัวอย่างเสา	ครั้งที่	B1	B2	Bf	D1	D2	Df	H
CC-09-200	1	40.1	40.0	70.3	40.1	40.2	140.9	239.0
	2	40.3	40.2	70.0	40.4	40.3	142.0	240.2
	Avg.	40.2	40.1	70.15	40.25	40.25	141.45	239.6
C-09-200	1	40.3	40.7	70.0	40.4	40.1	140.2	240.3
	2	40.4	40.5	70.2	40.4	40.3	140.5	240.5
	Avg.	40.35	40.6	70.2	40.4	40.2	140.35	240.4



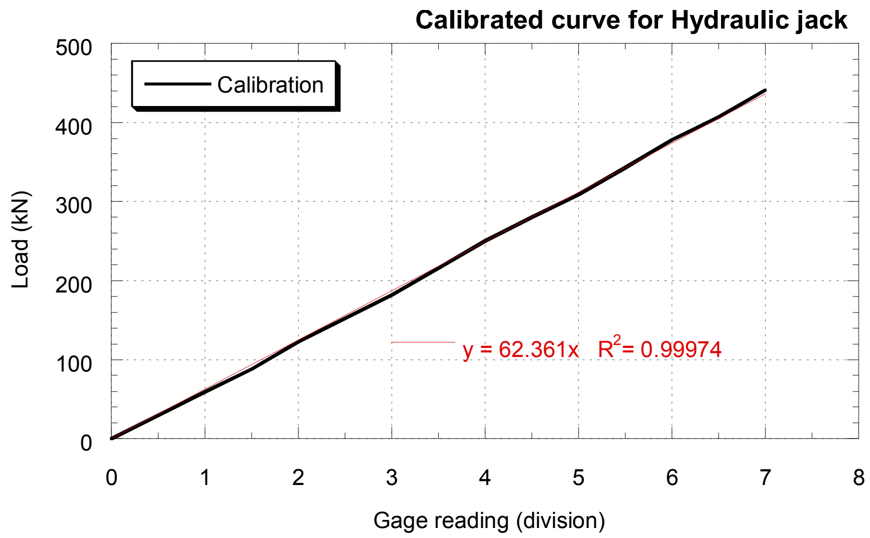
รูปที่ ข.1 ขนาดของตัวอย่างเสา

ตารางที่ ข.2 ผลการสอบเทียบเครื่องให้แรงกระทำทางด้านข้าง

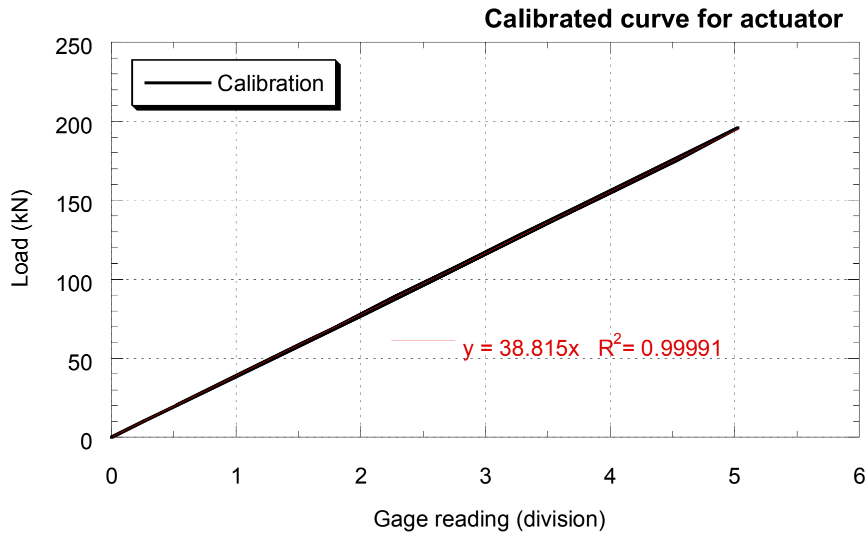
การสอบเทียบจาก Proving ring			ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
ค่าที่อ่านได้จาก Proving ring	แรงกระทำ (กิโลกรัม)	แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	
0.0	0.0	0.0	0.000
13.00	1053	10.33	0.264
38.0	3078	30.20	0.785
62.0	5022	49.27	1.282
98.5	7979	78.27	2.038
123.0	9963	97.73	2.539
147.5	11948	117.2	3.036
172.0	13932	136.7	3.533
196.0	15876	155.7	4.033
220.5	17861	175.2	4.532
246.5	19967	195.9	5.025
210.0	17010	166.9	4.280
185.5	15026	147.4	3.782
161.0	13041	127.9	3.277
136.5	11057	108.5	2.784
112.0	9072	89.00	2.278
87.0	7047	69.13	1.787
75.0	6075	59.60	1.529
50.0	4050	39.73	1.023
25.5	2066	20.27	0.527

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบเทียบเครื่องให้แรงด้วยมือ 60 ตัน

ค่าที่อ่านได้จาก Proving ring	แรงกระทำ					
	รอบที่ 1		รอบที่ 2		เฉลี่ย	
	ขาขึ้น	ขาลง	ขาขึ้น	ขาลง	(ตัน)	(กิโลนิวตัน)
0.0	0	0	0	0	0	0
0.5	3	3	3	3	3	29.4
1.0	6	6	6	6	6	58.9
1.5	10	9	10	9	9	88.3
2.0	13	12	13	12	12.5	122.6
2.5	16	15	16	15	15.5	152.1
3.0	19	18	19	18	18.5	181.5
3.5	23	21	23	21	22	216
4.0	26	25	26	25	25.5	250
4.5	29	28	29	28	28.5	280
5.0	32	31	32	31	31.5	309
5.5	36	34	36	34	35	343
6.0	39	38	39	37	38.5	378
6.5	42	41	42	41	41.5	407
7.0	45	45	45	45	45	441



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเครื่องให้แรงทางด้านข้าง



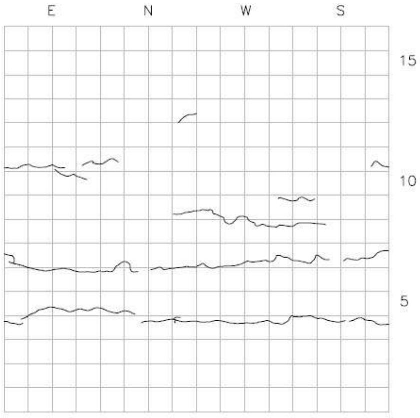
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความต่างศักดิ์ไฟฟ้าของเครื่องให้แรงในแนวดิ่ง

ตารางที่ ข.4 ผลการสอบเทียบเครื่องวัดระยะเคลื่อนที่

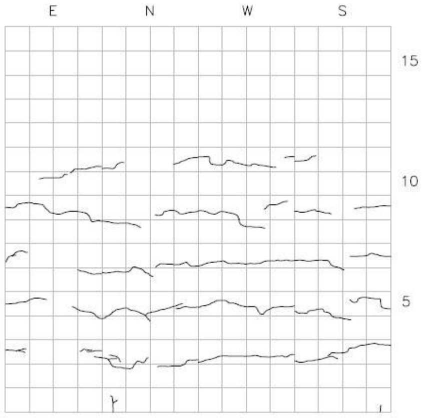
เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่	C-09-200		CC-09-200	
	ชื่อป้ายหมายเลข	เฟคเตอร์ตัวคูณ (มม./โวลต์)	ชื่อป้ายหมายเลข	เฟคเตอร์ตัวคูณ (มม./โวลต์)
1	12	12.657	12	12.657
2	13	12.701	13	12.701
3	3	1.611	3	1.611
4	4	1.608	14	3.809
5	5	1.557	8	1.662
6	6	1.574	7	1.751
7	7	1.751	15	3.780
8	8	1.662	5	1.611
9	19	1.001	19	1.001
10	17	1.004	17	1.004
11	20	1.039	20	1.039

ภาคผนวก ค

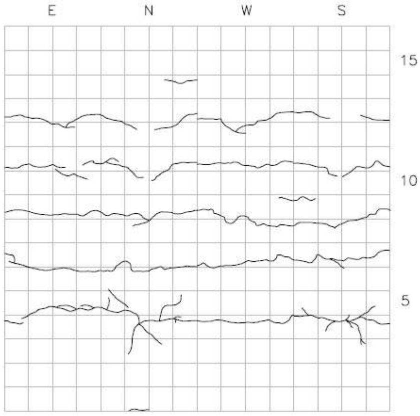
พฤติกรรมระหว่างทดสอบและรอยแตกร้าวของตัวอย่างเสาในการทดสอบ



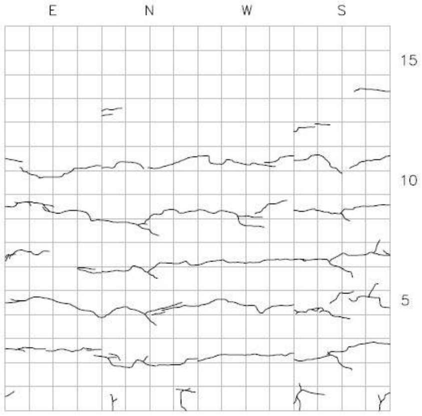
CC-09-200 0.5% drift ratio



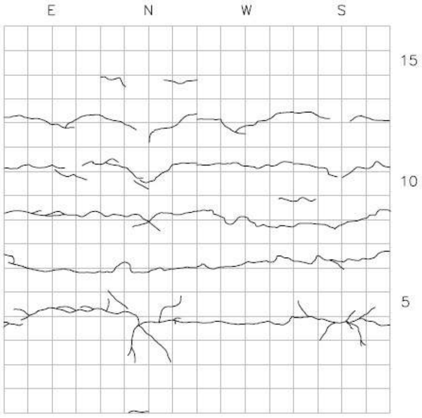
C-09-200 0.5% drift ratio



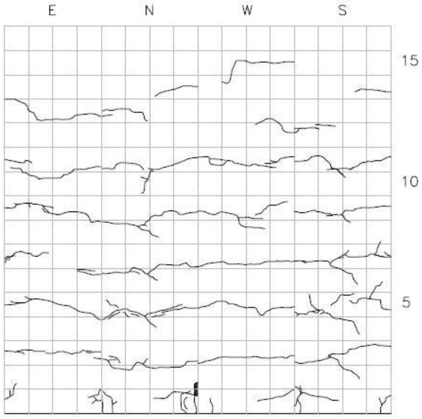
CC-09-200 1.0% drift ratio



C-09-200 1.0% drift ratio

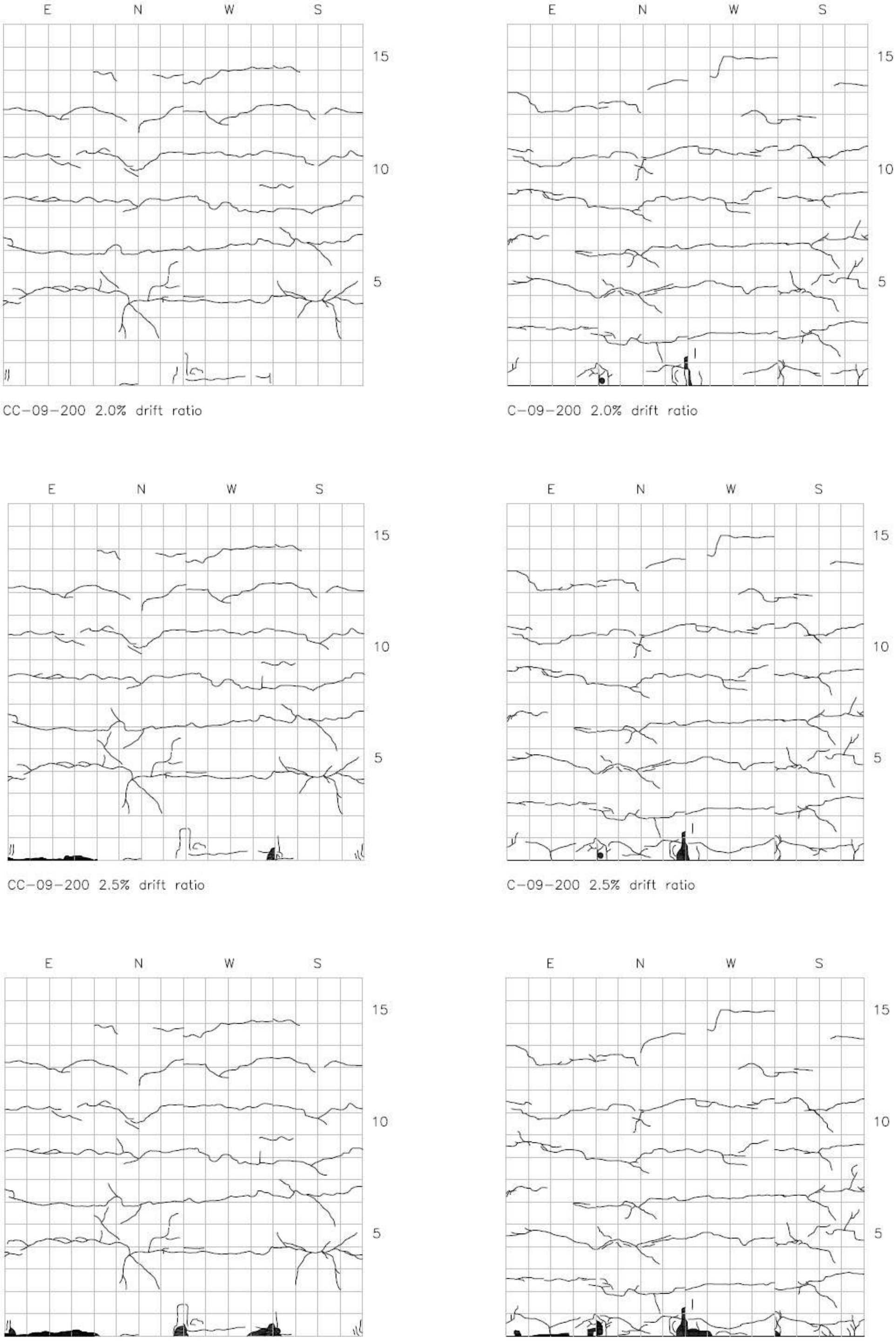


CC-09-200 1.5% drift ratio



C-09-200 1.5% drift ratio

รูปที่ ค.1 รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ



CC-09-200 2.0% drift ratio

C-09-200 2.0% drift ratio

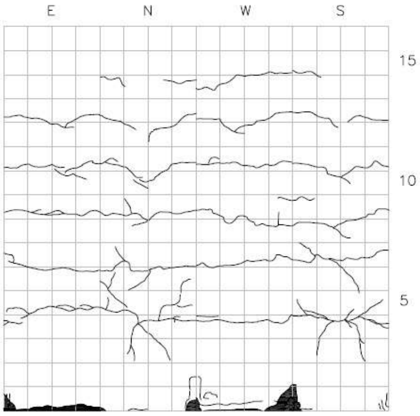
CC-09-200 2.5% drift ratio

C-09-200 2.5% drift ratio

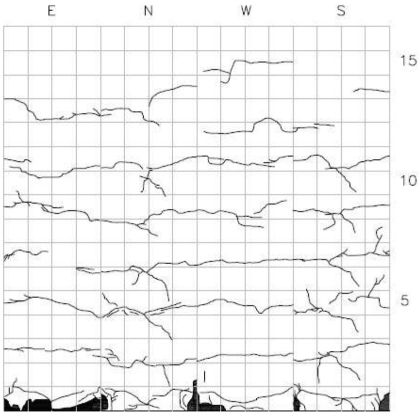
CC-09-200 3.0% drift ratio

C-09-200 3.0% drift ratio

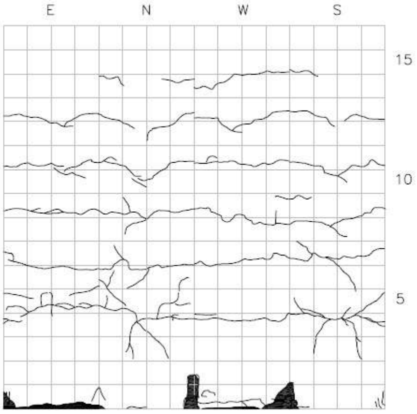
รูปที่ ค.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ



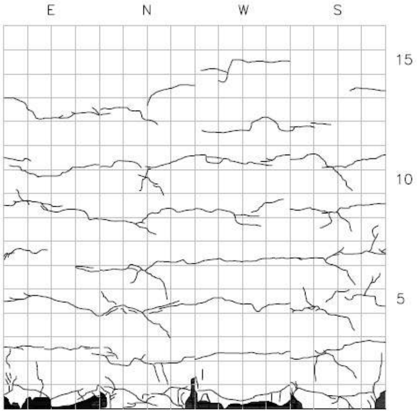
CC-09-200 3.5% drift ratio



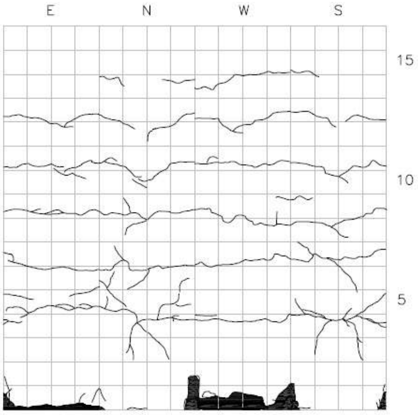
C-09-200 3.5% drift ratio



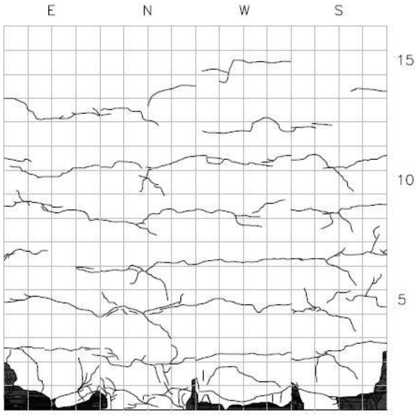
CC-09-200 4.0% drift ratio



C-09-200 4.0% drift ratio

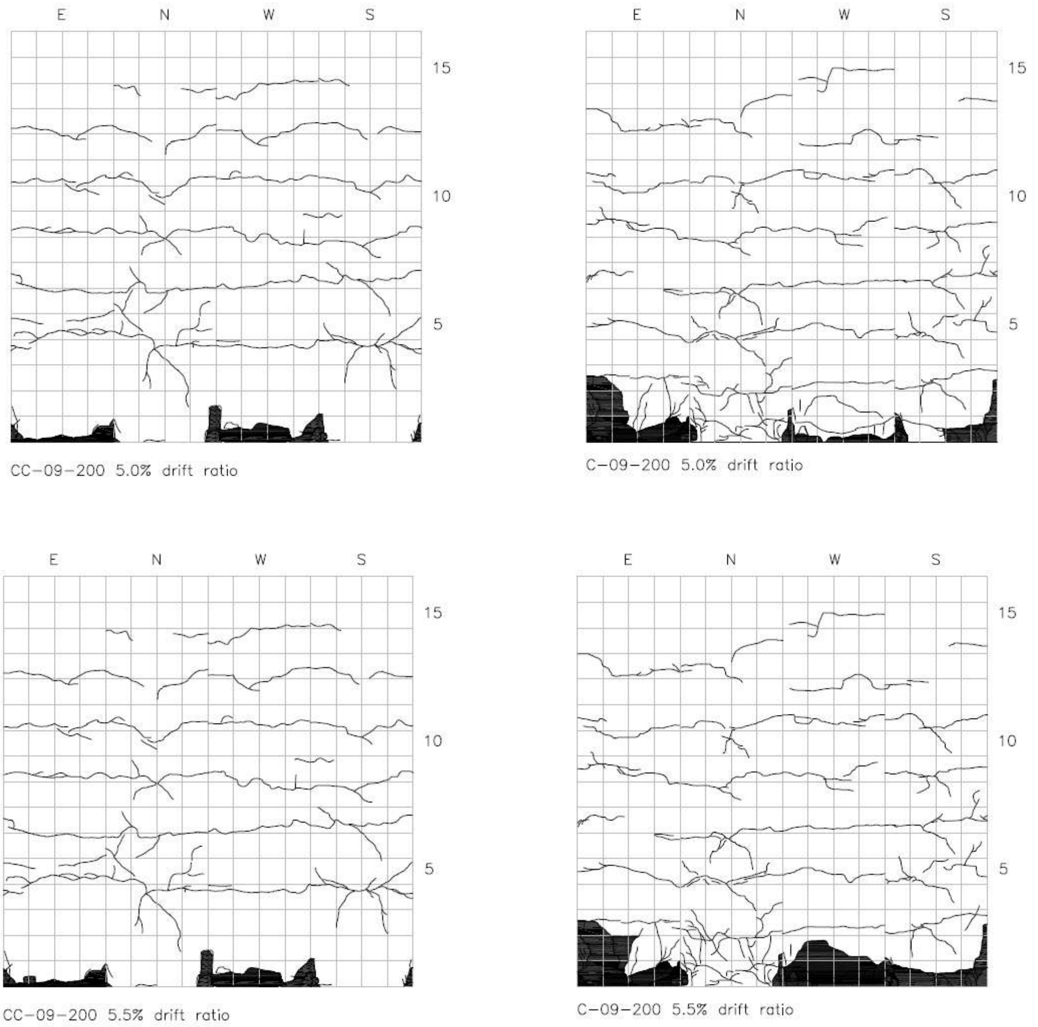


CC-09-200 4.5% drift ratio



C-09-200 4.5% drift ratio

รูปที่ ค.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ

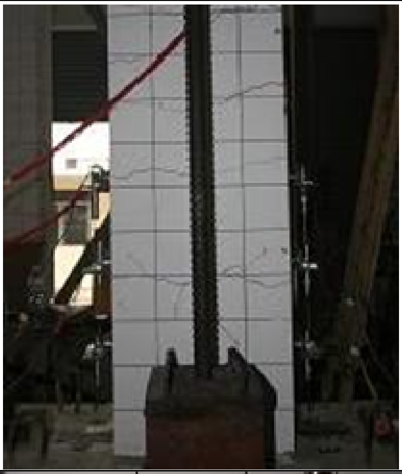


รูปที่ ค.1 (ต่อ) รอยการแตกร้าวได้ได้บันทึกระหว่างการทดสอบ

ตารางที่ ค.1 พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
0	0.0	เริ่มต้น	
1	0.5	เกิดรอยแตกร้าวยาวตลอดในแนวนอนทางด้านทิศตะวันตกที่ระดับความสูง 40, 70, 90 ซม. และทางด้านทิศตะวันออกที่ระดับความสูง 50, 70, 110 ซม. ส่วนรอยแตกร้าวทางด้านทิศเหนือและทิศใต้เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อยในแนวนอนที่ระดับความสูง 40, 70, 90, 110 ซม.	
2	1.0	เกิดรอยแตกร้าวแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% เดิมเล็กน้อยจากรอยแตกร้าวเดิม	

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
3	1.5	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากรอยแตกร้าวเดิมเล็กน้อยจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% และเกิดรอยแตกร้าวแนวนอนทางด้านทิศตะวันตกทีระดับความสูง 10 ซม. และเกิดรอยแยกบริเวณโคนเสาทางด้านทิศตะวันออก	
4	2.0	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% จากเดิมเล็กน้อยและเกิดรอยแตกร้าวแนวนอนทางด้านทิศตะวันตกที่ระดับความสูง 10 ซม. และเกิดรอยแยกบริเวณโคนเสาทางด้านทิศตะวันออก	
5	2.5	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราการเคลื่อนที่ที่ 1.5% จากเดิมเล็กน้อยและเกิดรอยแยกกว้างขึ้นบริเวณโคนเสาทางด้านทิศตะวันออก สังเกตว่ามีรอยแยกระหว่างเสาและฐานราก	

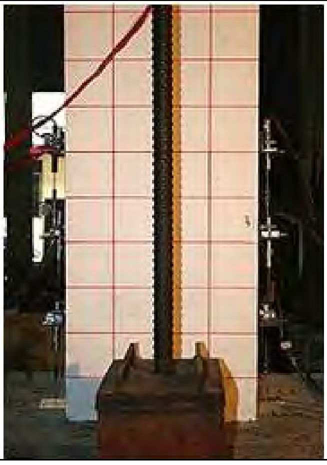
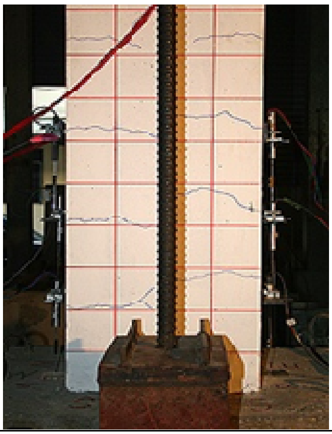
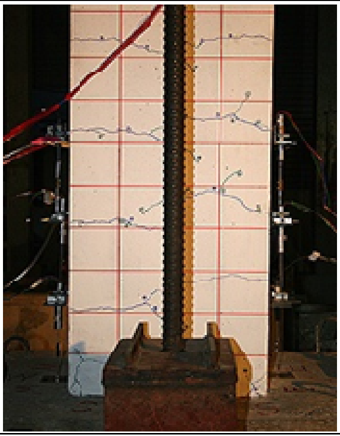
ตารางที่ ค.1 (ต่อ) พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
6	3.0	มีรอยแยกระหว่างเสาและฐานราก ทางด้านทิศตะวันออกมีขนาดเพิ่มขึ้น	
7	3.5	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.0% และเกิดการหลุดร่อนที่มุมโคนเสาทั้ง 4 มุม	
8	4.0	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 3.0% และรอยแตกร้าวขยายตัวกว้างขึ้นบริเวณโคนเสา มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก	

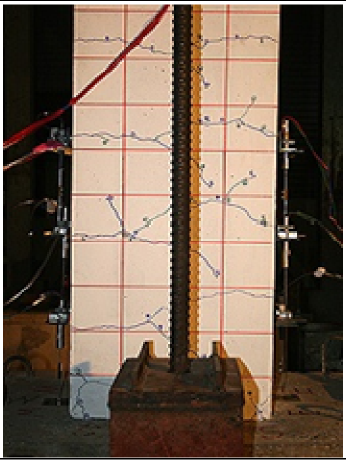
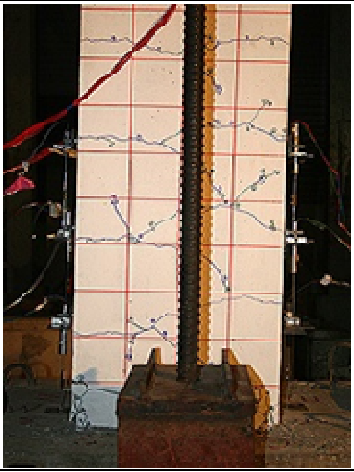
ตารางที่ ค.1 (ต่อ) พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา CC-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
9	4.5	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 4.0% และรอยแตกร้าวระหว่างเสาและฐานรากขยายตัวกว้างขึ้นบริเวณโคนเสา	
10	5.0	เกิดรอยแตกร้าวลึกขึ้นจากรอยแตกร้าวเดิมบริเวณโคนเสา เกิดการแยกตัวระหว่างเสามากขึ้น	
11	5.5	สามารถมองเห็นว่าบริเวณโคนเสาเกิดรอบแยกได้อย่างชัดเจน	

ตารางที่ ค.2 พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
0	0.0	เริ่มต้น	
1	0.5	เกิดรอยแตกร้าวในแนวนอนแนวทางด้านทิศตะวันตกและตะวันออกที่ระดับความสูง 30, 50, 70, 90, 110 ซม.	
2	1.0	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 0.5% และเกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณโคนเสาทั้งทางด้านซ้ายและขวาทางด้านทิศใต้	

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
3	1.5	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.0% และเกิด สังเกตเห็นรอยแตกร้าวบริเวณโคนเสาทางด้านทิศเหนือ, ทิศตะวันออกและทิศตะวันตก	
4	2.0	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 1.5% ทางด้านทิศใต้เชื่อมต่อกับรอยแตกร้าวทางด้านทิศตะวันตก เกิดการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตทางมุมซ้ายของด้านทิศตะวันตกในระดับความสูง 10 ซม.	
5	2.5	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.0% เล็กน้อยและเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณโคนเสา	

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
6	3.0	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 2.5% เกิดการหลุดร่อนคอนกรีตบริเวณมุมเสาด้านทิศตะวันตกและทิศเหนือ	
7	3.5	เกิดการหลุดร่อนมากขึ้นบริเวณมุมทั้ง 4 ด้านที่โคนเสา สังเกตได้ชัดเจนว่าเกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณโคนเสามีขนาดใหญ่ขึ้นและมีรอยแยกระหว่างเสาและฐานรากได้อย่างชัดเจน	
8	4.0	เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งทางด้านทิศตะวันออกในระดับความสูง 10-30 ซม. เกิดรอยหลุดร่อนของคอนกรีตที่โคนเสาทางด้านทิศใต้และมีรอยแตกร้าวในแนวตั้งที่บริเวณโคนเสา	
9	4.5	เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตขนาดใหญ่ตลอดโคนเสาทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกในระดับความสูง 10 ซม. และทางด้านทิศเหนือสามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามขวาง	

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) พฤติกรรมระหว่างการทดสอบของตัวอย่างเสา C-09-200

ลำดับ	เคลื่อนที่ด้านข้าง (%)	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพประกอบ
10	5.0	เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตทางด้านซ้ายของทางด้านทิศตะวันออกที่ระดับความสูง 20 และ 30 ขนาดใหญ่ และสามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาวได้และเหล็กเสริมตามขวางที่ตำแหน่งฐานรากได้อย่างชัดเจน	
11	5.5	สามารถมองเห็นเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะได้อย่างชัดเจน คอนกรีตบริเวณโคนเสาส่วนใหญ่หลุดร่อนออกจนหมดทุกด้านของเสาตลอดความสูง 10 ซม.	

ตารางที่ ค.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
เริ่มต้น	-	0.00	0.00	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด
0.5%drift	รอบที่ 1	-10.36	-53.41	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก ด้านนอกคือด้านใกล้กับผิวคอนกรีตลดลง แต่ด้านในอีกด้านของเหล็กเสริมตามยาวเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง
		10.69	50.58	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก ด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตมีค่าลดลง แต่ด้านในอีกด้านของเหล็กเสริมตามยาวเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง
	รอบที่ 2	10.17	52.13	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		10.65	46.84	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.0%drift	รอบที่ 1	-20.73	-78.21	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก ด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตมีค่าลดลง แต่ด้านในอีกด้านของเหล็กเสริมตามยาวเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่ม ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง
		20.88	72.48	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตมีค่าลดลง แต่ด้านในอีกด้านของเหล็กเสริมตามยาวเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่ม ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง
	รอบที่ 2	-21.09	25.59	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		21.09	69.16	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
1.5%drift	รอบที่ 1	-30.90	-88.67	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นความเครียดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงจุดคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		31.75	81.60	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-31.18	-85.48	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		31.93	80.07	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
2.0%drift	รอบที่ 1	-41.82	-91.00	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นความเครียดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงจุดครากไม่ต่างจาก1.5%drift ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		42.61	78.29	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการครากและมีค่าใกล้เคียงไม่ต่างจาก 1.5%drift ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-41.92	-82.88	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		42.70	76.04	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
2.5%drift	รอบที่ 1	-52.22	-82.16	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		53.19	74.87	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการครากและมีค่าใกล้เคียงไม่ต่างจาก 2.0%drift ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลงเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-52.63	-78.85	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		53.67	72.97	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
3.0%drift	รอบที่ 1	-63.36	-81.89	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการครากและมีค่าใกล้เคียงไม่ต่างจาก 2.5%drift ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลงเล็กน้อย
		64.38	72.02	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการครากและมีค่าใกล้เคียงไม่ต่างจาก 2.5%drift ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลงเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-63.38	-79.19	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		64.84	-72.97	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
3.5%drift	รอบที่ 1	-73.95	-80.98	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทั้ง2ด้าน ทั้งด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตและด้านคือด้านตรงข้ามเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		75.24	69.90	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทั้ง2ด้าน ทั้งด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตและด้านคือด้านตรงข้ามเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-74.38	-78.36	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		75.42	68.24	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
4.0%drift	รอบที่ 1	-85.33	-76.24	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทั้ง 2ด้าน ทั้งด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตและด้านคือด้านตรงข้ามเกิดการครากมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		86.62	65.94	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทั้ง 2ด้าน ทั้งด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตและด้านคือด้านตรงข้ามเกิดการครากมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง
	รอบที่ 2	86.29	-74.34	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		86.80	63.31	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
4.5%drift	รอบที่ 1	-95.99	-74.80	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านในที่วัดได้มีค่าเพิ่มกว่าจุดครากมากกว่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ผ่านๆมาและมากกว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีต ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		97.48	61.21	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านในที่วัดได้มีค่าเพิ่มกว่าจุดครากมากกว่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ผ่านๆมาและมากกว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีต ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-96.08	-70.59	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		96.99	61.17	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
5.0%drift	รอบที่ 1	118.75	-70.59	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า4.5%drift ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		118.78	58.88	เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า4.5%drift ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-119.24	-68.34	เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		119.08	56.42	เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.3 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
5.5%drift	รอบที่ 1	-118.75	-59.73	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านในที่วัดได้มีค่าเพิ่มกว่าจุดครากมากกว่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ผ่านๆมาและมากกว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีต ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		118.78	57.35	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านในที่วัดได้มีค่าเพิ่มกว่าจุดครากมากกว่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ผ่านๆมาและมากกว่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านนอกด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีต ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-119.24	-51.59	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		119.08	52.37	หลังจากเหล็กเสริมครากแล้ว เกจวัดความเครียดไม่สามารถวัดความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
เริ่มต้น	-	0.00	0.00	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด
0.5%drift	รอบที่ 1	-10.36	-53.41	ความเครียดของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ความเครียดของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย
		10.69	50.58	ความเครียดของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ความเครียดของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	10.17	52.13	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		10.65	46.84	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.0%drift	รอบที่ 1	-20.73	-78.21	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะด้านที่เหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ ความความเครียดที่วัดได้โดยเฉลี่ย 700 ไมโครสเตรน ทั้ง 2ทิศทาง
		20.88	72.48	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมาก	ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะด้านที่เหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้
	รอบที่ 2	-21.09	25.59	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		21.09	69.16	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.5%drift	รอบที่ 1	-30.90	-88.67	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 1.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะด้านที่เหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ ความความเครียดที่วัดได้โดยเฉลี่ย 700 ไมโครสเตรน ทั้ง 2ทิศทาง
		31.75	81.60	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 1.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะด้านที่เหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ ความความเครียดที่วัดได้โดยเฉลี่ย 800และ1000 ไมโครสเตรน ตามลำดับ
	รอบที่ 2	-31.18	-85.48	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		31.93	80.07	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
2.0%drift	รอบที่ 1	-41.82	-91.00	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 1.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าสูง มีค่าใกล้เคียงกับ 1.5%drift
		42.61	78.29	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 1.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าสูง มีค่าใกล้เคียงกับ 1.5%drift
	รอบที่ 2	-41.92	-82.88	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		42.70	76.04	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
2.5%drift	รอบที่ 1	-52.22	-82.16	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าสูง มีค่าใกล้เคียงกับ 2.0%drift
		53.19	74.87	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้มีค่าสูง มีค่าใกล้เคียงกับ 2.0%drift
	รอบที่ 2	-52.63	-78.85	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		53.67	72.97	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
3.0%drift	รอบที่ 1	-63.36	-81.89	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมาก	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงจาก 2.5%drift
		64.38	72.02	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงจาก 2.5%drift
	รอบที่ 2	-63.38	-79.19	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		64.84	-72.97	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
3.5%drift	รอบที่ 1	-73.95	-80.98	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 3.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงจาก 3.0%drift
		75.24	69.90	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 3.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงจาก 3.0%drift
	รอบที่ 2	-74.38	-78.36	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		75.42	68.24	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
4.0%drift	รอบที่ 1	-85.33	-76.24	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 3.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงจาก 3.5%drift
		86.62	65.94	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 3.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงจาก 3.5%drift
	รอบที่ 2	86.29	-74.34	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		86.80	63.31	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
4.5%drift	รอบที่ 1	-95.99	-74.80	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 4.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมาก	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 4.0%drift
		97.48	61.21	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 4.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 4.0%drift
	รอบที่ 2	-96.08	-70.59	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		96.99	61.17	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.4 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
5.0%drift	รอบที่ 1	-107.96	-70.50	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 4.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงเหลือ 500 ไมโครสเตรน
		107.98	67.87	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 4.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าลดลงเหลือ 500 ไมโครสเตรน
	รอบที่ 2	-107.97	-69.33	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		107.70	65.70	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
5.5%drift	รอบที่ 1	-118.83	-66.99	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 5.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 5.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้
		117.62	64.70	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 5.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 5.0%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ค่อนข้างน้อยมากเพราะมีปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเหล็กเสริมบริเวณนี้
	รอบที่ 2	-118.90	-65.12	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		117.90	62.90	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา	
				ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับล่าง	ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับบน
เริ่มต้น	-	0.00	0.00	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด
0.5%drift	รอบที่ 1	-10.36	-53.41	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		10.69	50.58	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันต มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	10.17	52.13	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		10.65	46.84	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.0%drift	รอบที่ 1	-20.73	-78.21	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		20.88	72.48	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-21.09	25.59	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		21.09	69.16	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา	
				ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับล่าง	ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับบน
1.5%drift	รอบที่ 1	-30.90	-88.67	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		31.75	81.60	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความเครียดเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง
	รอบที่ 2	-31.18	-85.48	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		31.93	80.07	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
2.0%drift	รอบที่ 1	-41.82	-91.00	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		42.61	78.29	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-41.92	-82.88	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		42.70	76.04	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
2.5%drift	รอบที่ 1	-52.22	-82.16	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		53.19	74.87	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลงความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-52.63	-78.85	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		53.67	72.97	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา	
				ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับล่าง	ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับบน
3.0%drift	รอบที่ 1	-63.36	-81.89	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศ	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง
		64.38	72.02	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-63.38	-79.19	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		64.84	-72.97	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
3.5%drift	รอบที่ 1	-73.95	-80.98	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		75.24	69.90	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-74.38	-78.36	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		75.42	68.24	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
4.0%drift	รอบที่ 1	-85.33	-76.24	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		86.62	65.94	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	86.29	-74.34	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		86.80	63.31	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา CC-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา	
				ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับล่าง	ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ระดับบน
4.5%drift	รอบที่ 1	-95.99	-74.80	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความเครียดเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง
		97.48	61.21	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-96.08	-70.59	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		96.99	61.17	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
5.0%drift	รอบที่ 1	118.75	-70.59	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		118.78	58.88	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-119.24	-68.34	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		119.08	56.42	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
5.5%drift	รอบที่ 1	-118.75	-59.73	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
		118.78	57.35	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงของน้อยมาก
	รอบที่ 2	-119.24	-51.59	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		119.08	52.37	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
เริ่มต้น	-	0.00	0.00	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด
0.5%drift	รอบที่ 1	-10.76	-53.41	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง
		10.69	51.94	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง
	รอบที่ 2	-10.91	-55.53	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		10.66	50.07	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.0%drift	รอบที่ 1	-21.49	-80.88	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.5%drift ประมาณ2เท่า ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศ
		21.42	73.94	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.5%drift ประมาณ2เท่า ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง มีค่าลดลงกว่า 1.5%drift เล็กน้อย
	รอบที่ 2	-21.70	-78.80	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		21.57	71.87	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.5%drift	รอบที่ 1	-31.96	-88.00	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กทิศตะวันออกเฉียงใต้ เกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		32,10	83.11	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวด้านในคือที่ตรงข้ามด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-32.08	-86.53	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		32.24	80.36	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
2.0%drift	รอบที่ 1	-43.15	-91.14	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1.5%drift เล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นกว่า1.5%drift แต่เหล็กเสริมตามยาวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ยังไม่เกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		43.08	75.46	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1.5%drift เล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก1.5%drift และเหล็กเสริมตามยาวด้านในคือที่ตรงข้ามด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-42.91	-82.05	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		43.18	75.85	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
2.5%drift	รอบที่ 1	-53.96	-85.99	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0%drift เล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		53.97	78.92	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0%drift เล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-54.03	-83.24	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		54.09	74.39	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
3.0%drift	รอบที่ 1	-64.96	-84.14	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทิศตะวันออกเฉียงเหนือด้านในคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		64.79	76.60	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก2.5%drift เล็กน้อย ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-64.93	-80.81	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		64.92	72.86	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
3.5%drift	รอบที่ 1	-75.55	-80.08	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทิศEเฉียงเหนือ ด้านนอกคือด้านที่ใกล้กับผิวคอนกรีตเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		75.42	71.11	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-75.61	-74.54	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		75.59	68.57	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
4.0%drift	รอบที่ 1	-85.96	-75.57	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		86.09	70.83	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เหล็กเสริมตามยาวทิศตะวันตกเฉียงเหนือยังไม่เกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-86.35	-73.21	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		86.05	68.86	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
4.5%drift	รอบที่ 1	-97.06	-75.57	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		97.12	70.83	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เหล็กเสริมตามยาวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ก็ยังไม่เกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-97.19	-73.21	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		97.23	68.86	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามยาว ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามยาว ระดับบน
5.0%drift	รอบที่ 1	-107.96	-70.50	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
		107.98	67.87	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทิศตะวันออกเฉียงเหนือเกิดการคราก ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-107.97	-69.33	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		107.70	65.70	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
5.5%drift	รอบที่ 1	-118.83	-66.99	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันตกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อยแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย
		117.62	64.70	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มขึ้นและเหล็กเสริมตามยาวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ เกิดการครากส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามยาทางด้านทิศตะวันตก มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อยแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย
	รอบที่ 2	-118.90	-65.12	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		117.90	62.90	เหล็กเสริมเกิดการครากและไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
เริ่มต้น	-	0.00	0.00	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด	ยังไม่เปลี่ยนแปลงของความเครียด
0.5%drift	รอบที่ 1	-10.76	-53.41	ความเครียดของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
		10.69	51.94	ความเครียดของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
	รอบที่ 2	-10.91	-55.53	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		10.66	50.07	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
1.0%drift	รอบที่ 1	-21.49	-80.88	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า0.5%driftประมาณ2เท่า ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า0.5%driftประมาณ2เท่า ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		21.42	73.94	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า0.5%driftประมาณ2เท่า ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า0.5%driftประมาณ2เท่า ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-21.70	-78.80	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		21.57	71.87	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
1.5%drift	รอบที่ 1	-31.96	-88.00	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความเครียดเฉลี่ย500 ไมโครสเตรน ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความเครียดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับเหล็กเสริมตามขวางแรก
		32,10	83.11	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความเครียดเฉลี่ย500 ไมโครสเตรน ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความเครียดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับเหล็กเสริมตามขวางแรก
	รอบที่ 2	-32.08	-86.53	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		32.24	80.36	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
2.0%drift	รอบที่ 1	-43.15	-91.14	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 1.5%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความเครียดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับเหล็กเสริมตามขวางแรก
		43.08	75.46	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 1.5%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความเครียดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับเหล็กเสริมตามขวางแรก
	รอบที่ 2	-42.91	-82.05	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		43.18	75.85	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
2.5%drift	รอบที่ 1	-53.96	-85.99	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ2.0%drift	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใกล้เคียงกับ 2.0%drift
		53.97	78.92	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.0%drift	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใกล้เคียงกับ 2.0%drift
	รอบที่ 2	-54.03	-83.24	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		54.09	74.39	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
3.0%drift	รอบที่ 1	-64.96	-84.14	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจาก 2.5%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		64.79	76.60	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 2.5%drift ยังไม่การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจาก 2.5%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-64.93	-80.81	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		64.92	72.86	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

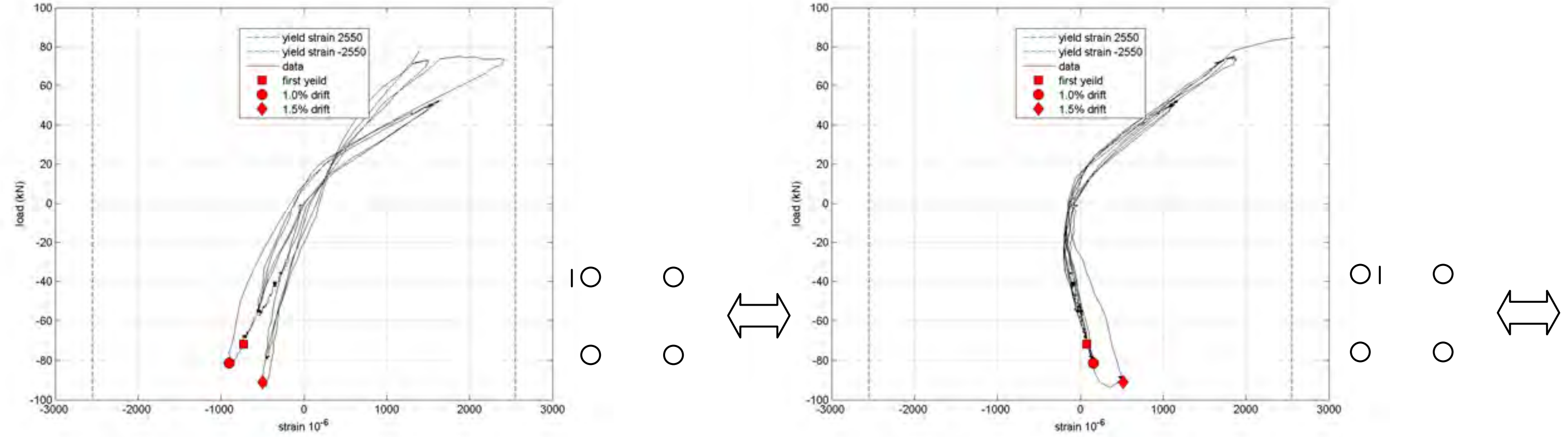
อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
3.5%drift	รอบที่ 1	-75.55	-80.08	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.0%drift เล็กน้อย เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.0%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		75.42	71.11	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นจาก3.0%drift เล็กน้อย เหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.0%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-75.61	-74.54	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		75.59	68.57	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
4.0%drift	รอบที่ 1	-85.96	-75.57	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นที่เห็นเด่นชัดคือเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือ ส่วนตำแหน่งอื่นความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 3.5%drift	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.5%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		86.09	70.83	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นที่เห็นเด่นชัดคือเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือ ส่วนตำแหน่งอื่นความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 3.5%drift	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.5%drift ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-86.35	-73.21	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		86.05	68.86	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

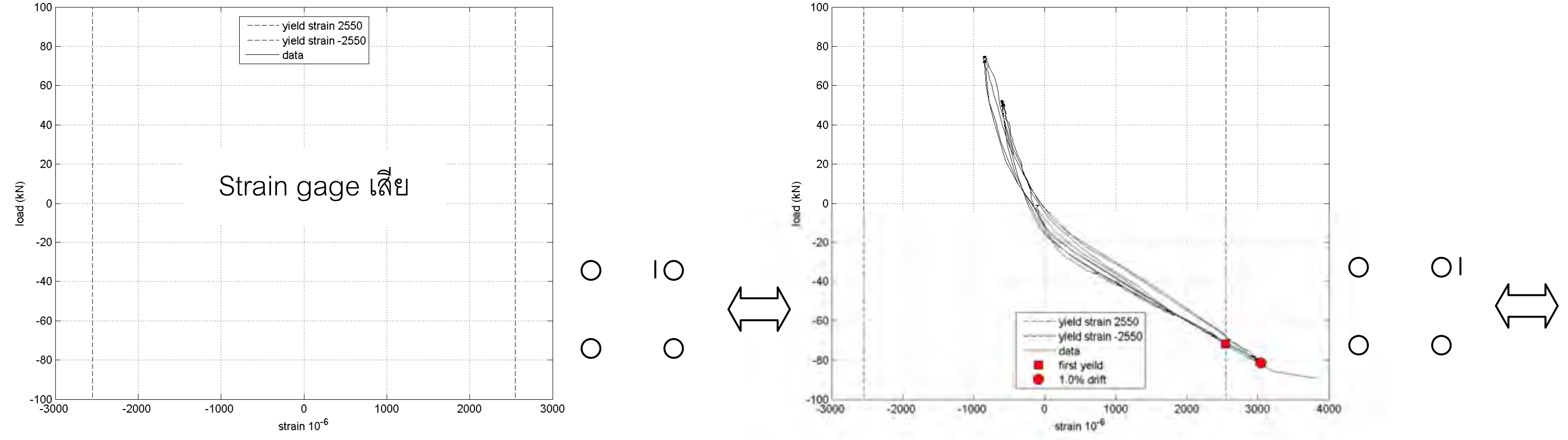
อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
4.5%drift	รอบที่ 1	-97.06	-75.57	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นที่เห็นเด่นชัดคือเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือ และเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนตำแหน่งอื่นความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 4.0%drift	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าต่ำกว่า 4.0%driftเล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		97.12	70.83	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นที่เห็นเด่นชัดคือเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือ และเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนตำแหน่งอื่นความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ 4.0%drift	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าต่ำกว่า 4.0%drift เล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-97.19	-73.21	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		97.23	68.86	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
5.0%drift	รอบที่ 1	-107.96	-70.50	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าลดลงจาก4.5%driftเล็กน้อย	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าต่ำกว่า 4.5%drift เล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		107.98	67.87	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าลดลงจาก 4.5%drif tเล็กน้อย	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าต่ำกว่า 4.5%drift เล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-107.97	-69.33	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		107.70	65.70	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1

ตารางที่ ค.6 พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา C-09-200

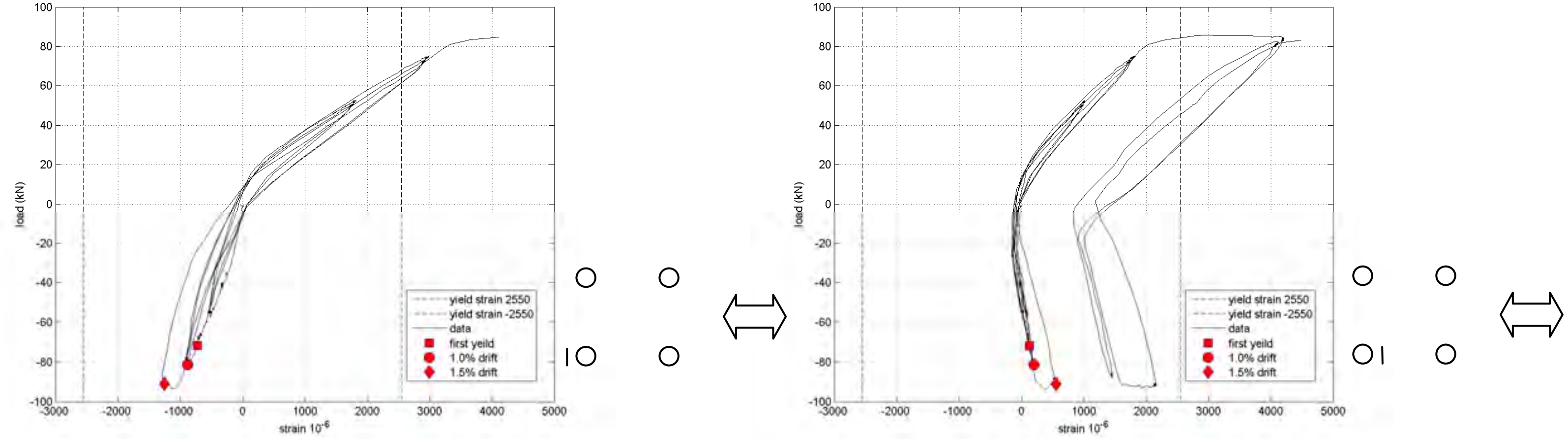
อัตราการเคลื่อนที่ระบุ	รอบการทดสอบ	การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ (มม.)	แรงกระทำด้านข้าง (kN)	พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางในตัวอย่างเสา	
				เหล็กเสริมตามขวาง ระดับล่าง	เหล็กเสริมตามขวาง ระดับบน
5.5%drift	รอบที่ 1	-118.83	-66.99	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าลดลงจาก 5.0%drift เล็กน้อย	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าต่ำกว่า 5.0%drift เล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
		117.62	64.70	ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ ส่วนความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทิศเหนือและทิศใต้ มีค่าลดลงจาก 5.0%drift เล็กน้อย	ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ ยังคงมีค่าสูง แต่มีค่าต่ำกว่า 5.0%drift เล็กน้อย ส่วนเหล็กเสริมตามขวางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกมีค่าความเครียดค่อนข้างคงที่
	รอบที่ 2	-118.90	-65.12	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1
		117.90	62.90	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1	การเปลี่ยนแปลงของความเครียดเหมือนกับในรอบที่1



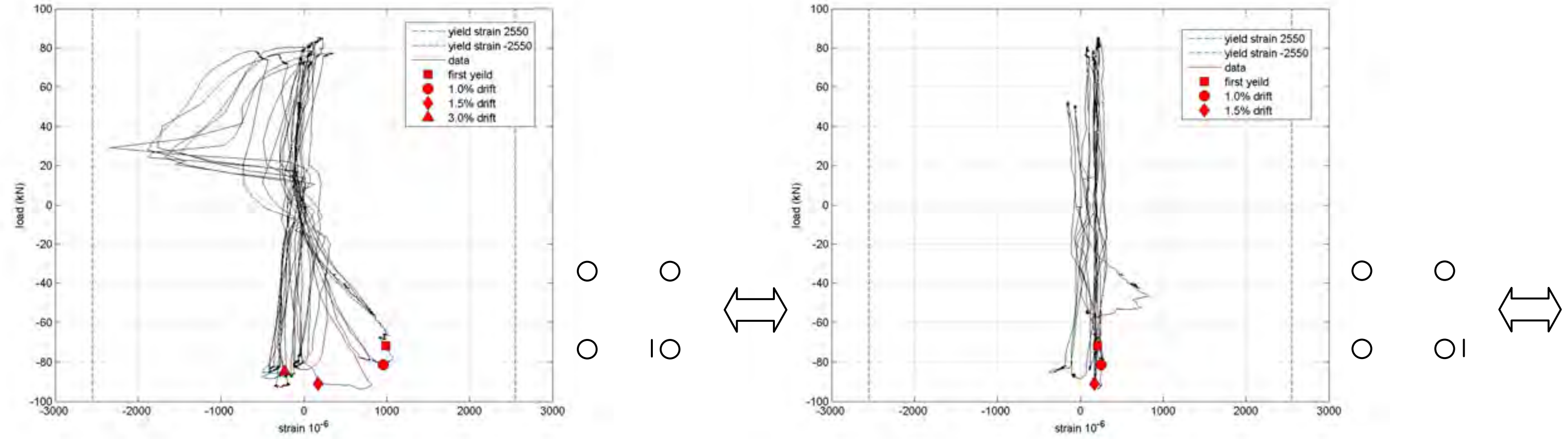
เหล็กเสริมตามยาวระดับล่าง



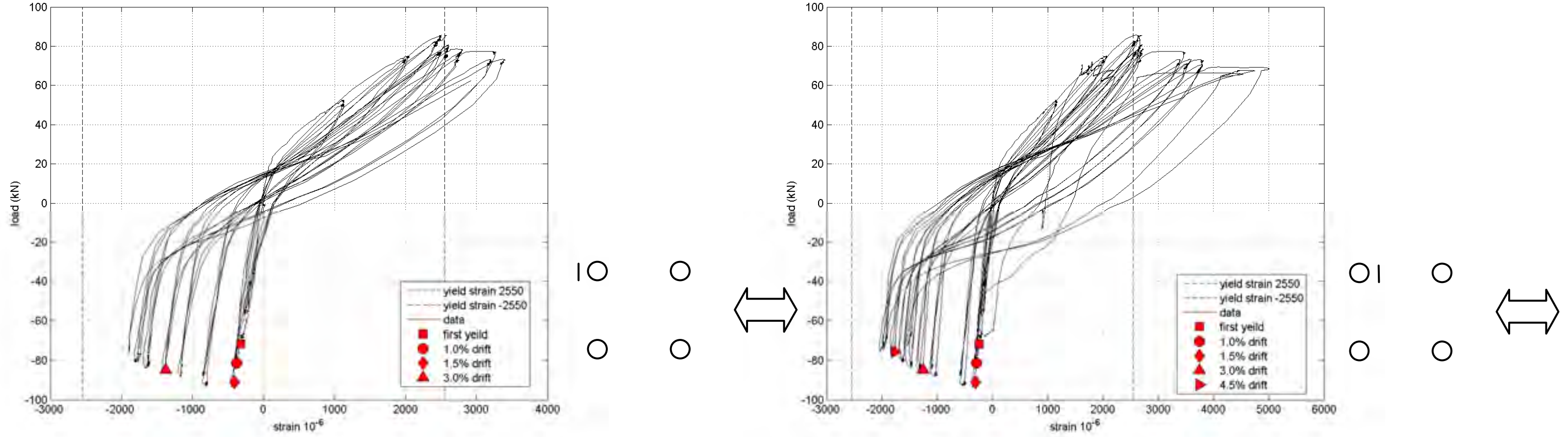
รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



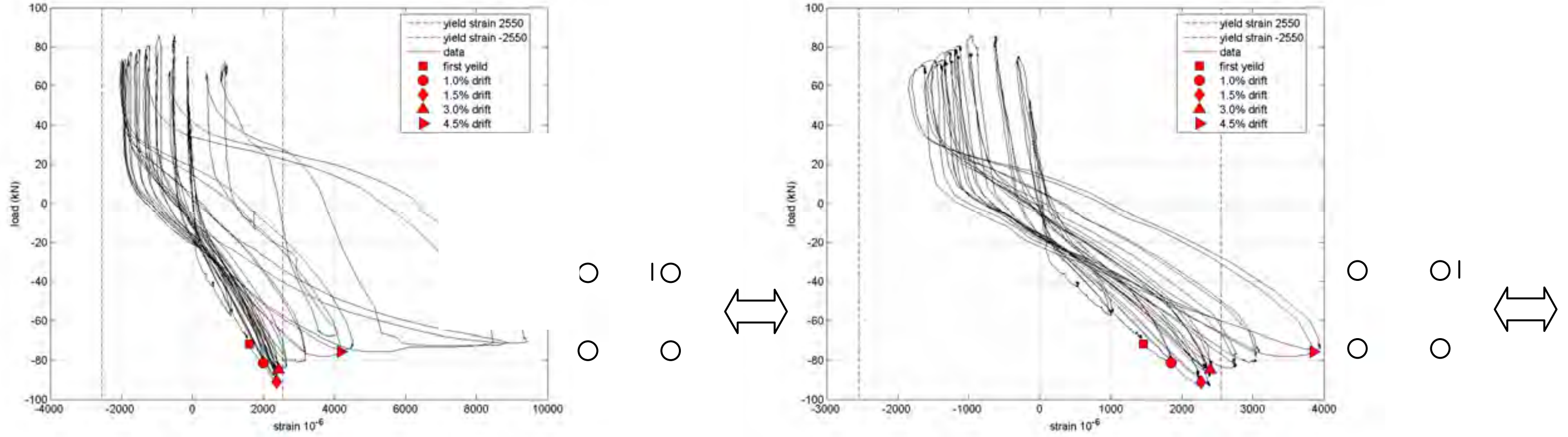
เหล็กเสริมตามยาวระดับล่าง



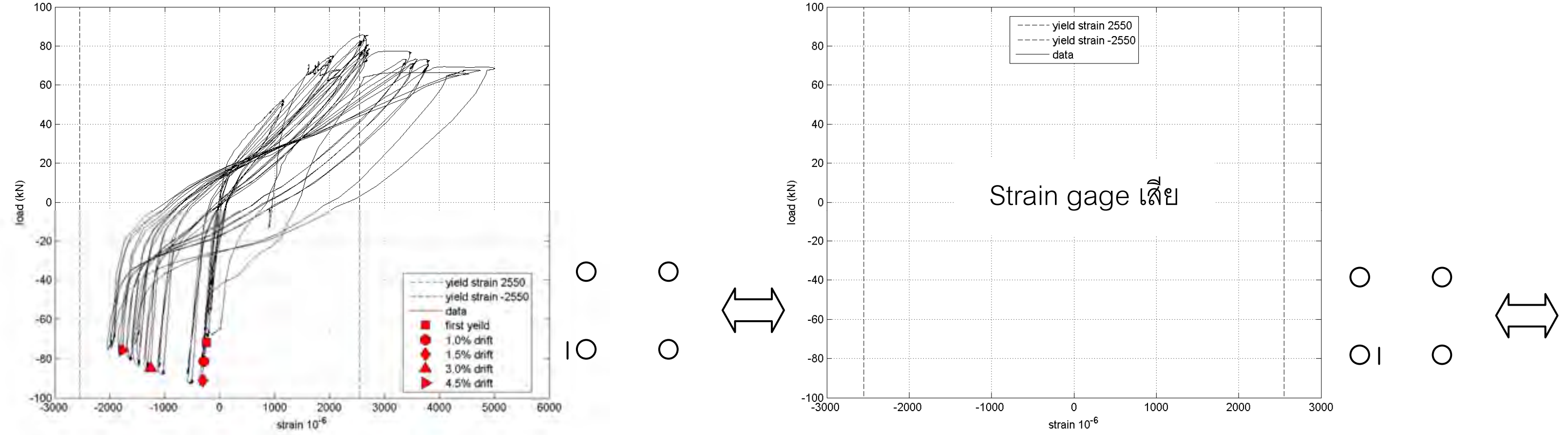
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



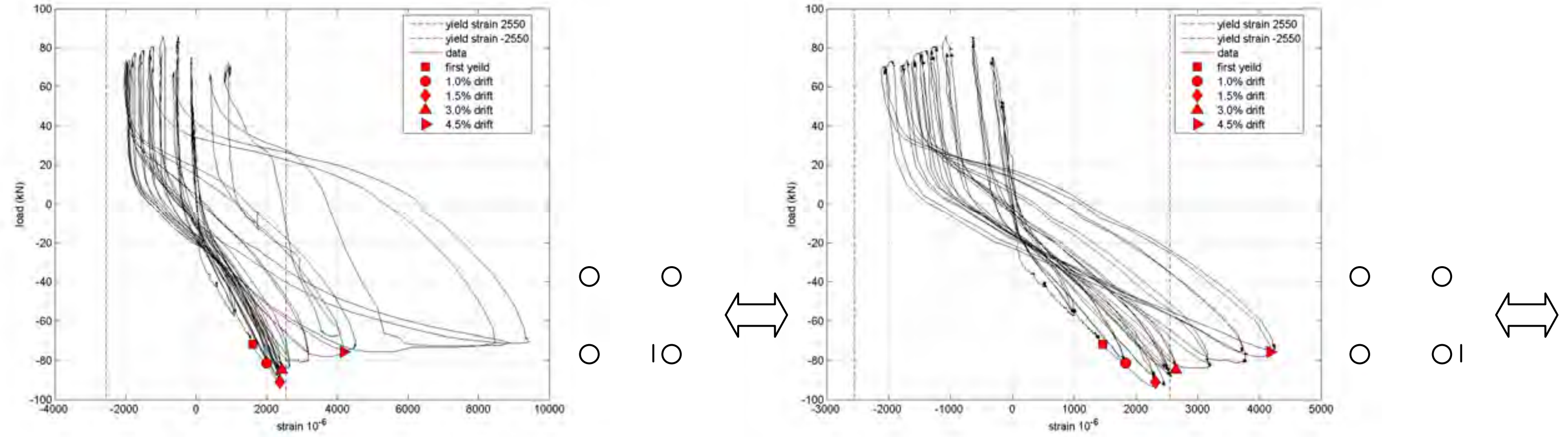
เหล็กเสริมตามยาวระดับบน



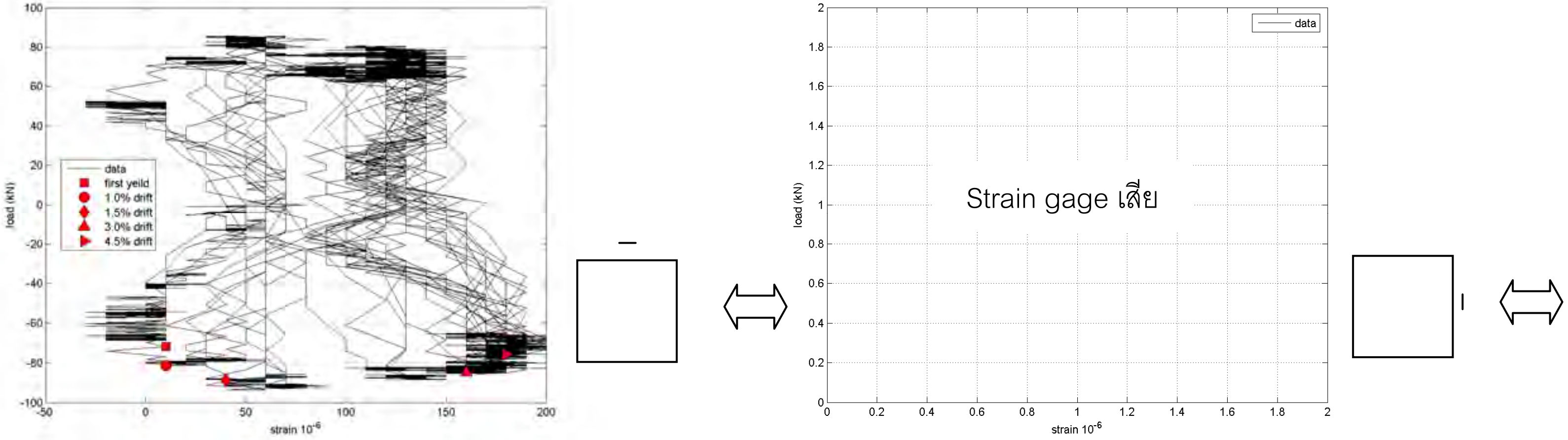
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



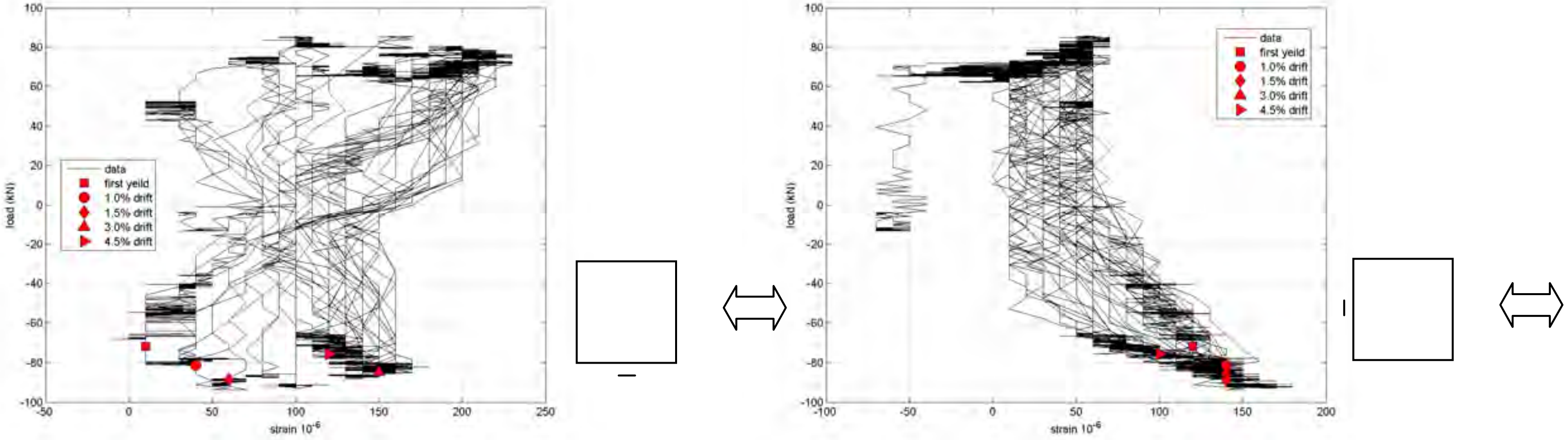
เหล็กเสริมตามยาวระดับบน



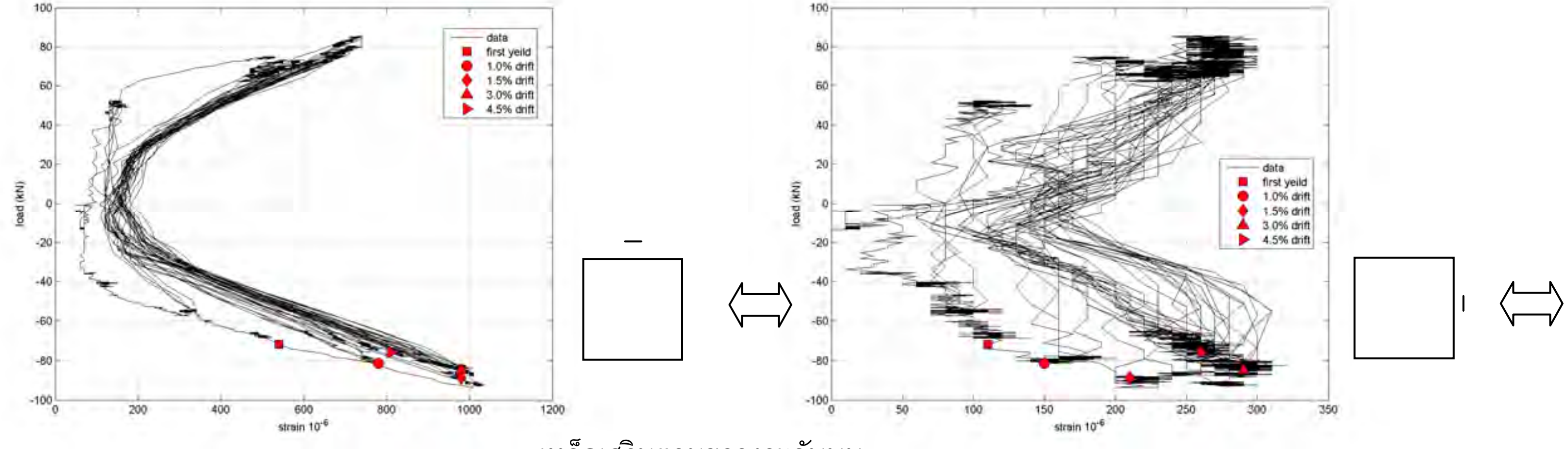
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



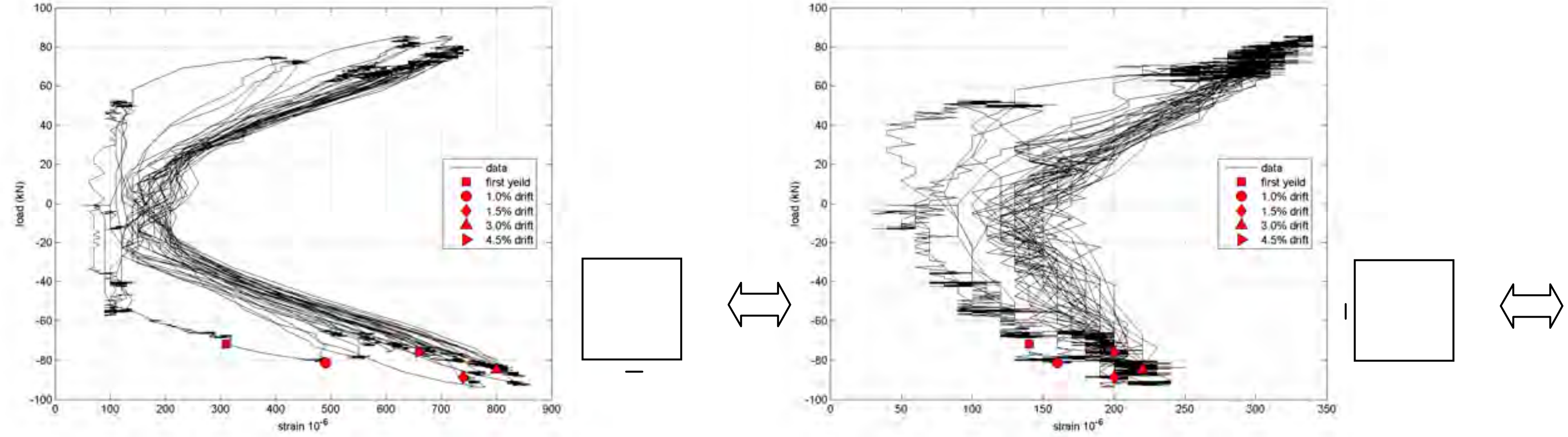
เหล็กเสริมตามขวางระดับล่าง



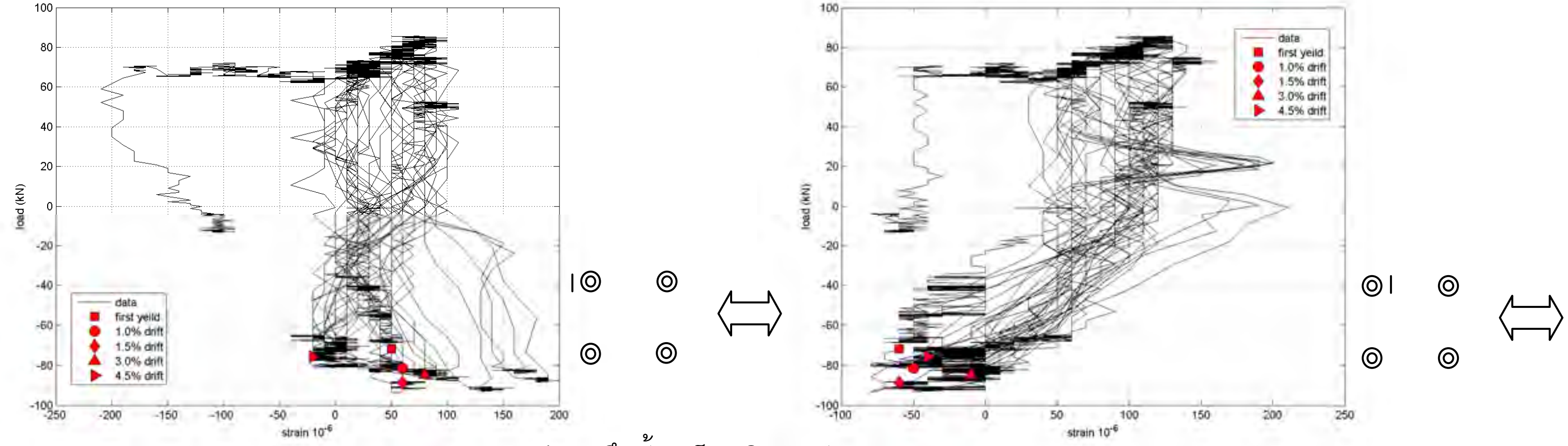
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



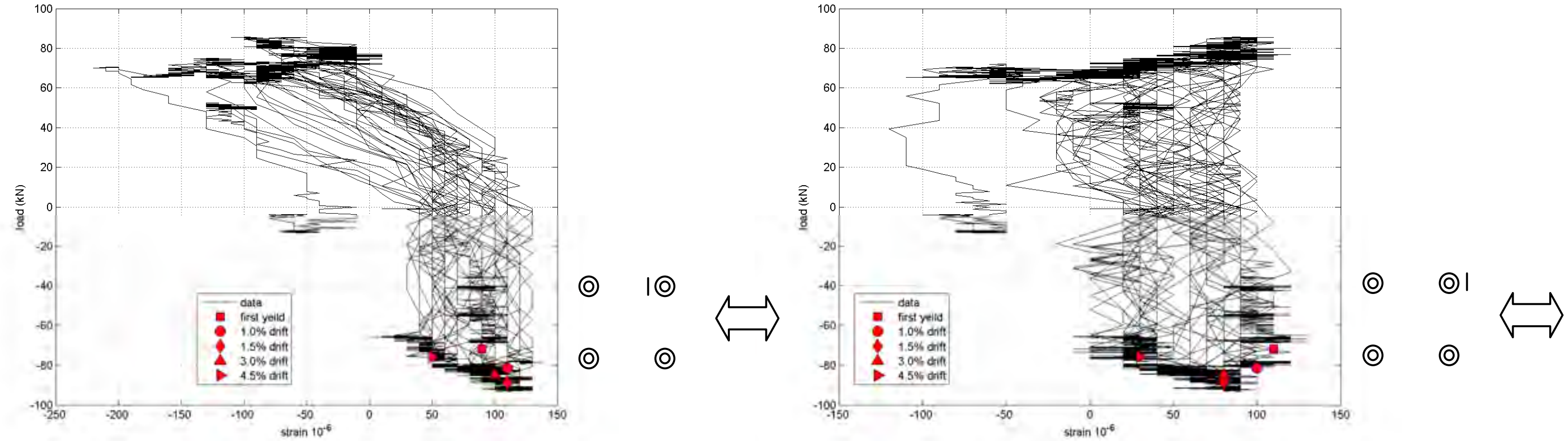
เหล็กเสริมตามขวางระดับบน



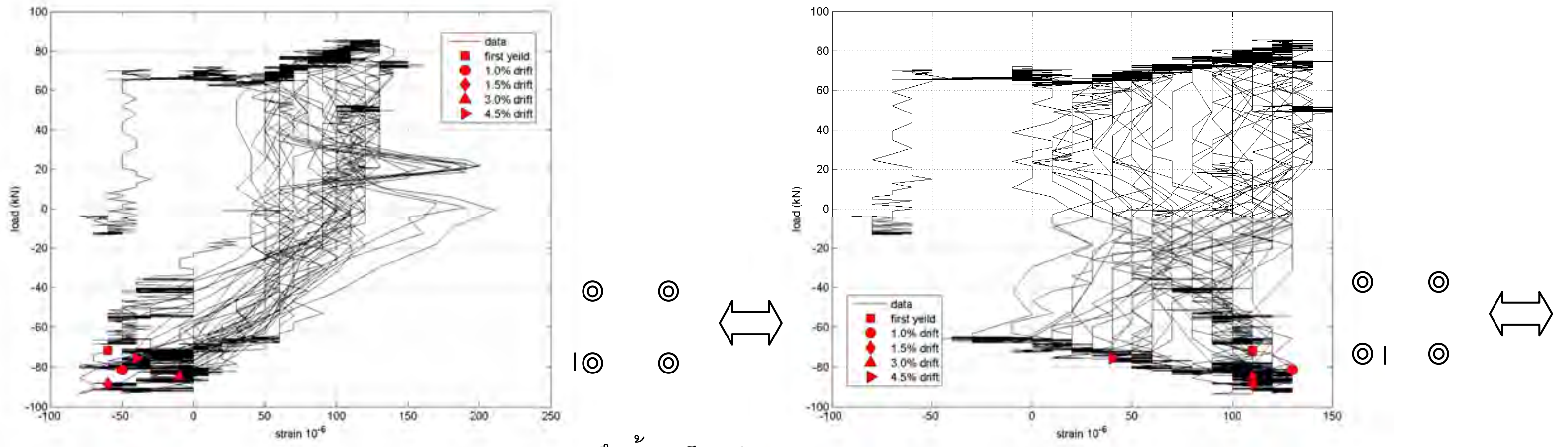
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



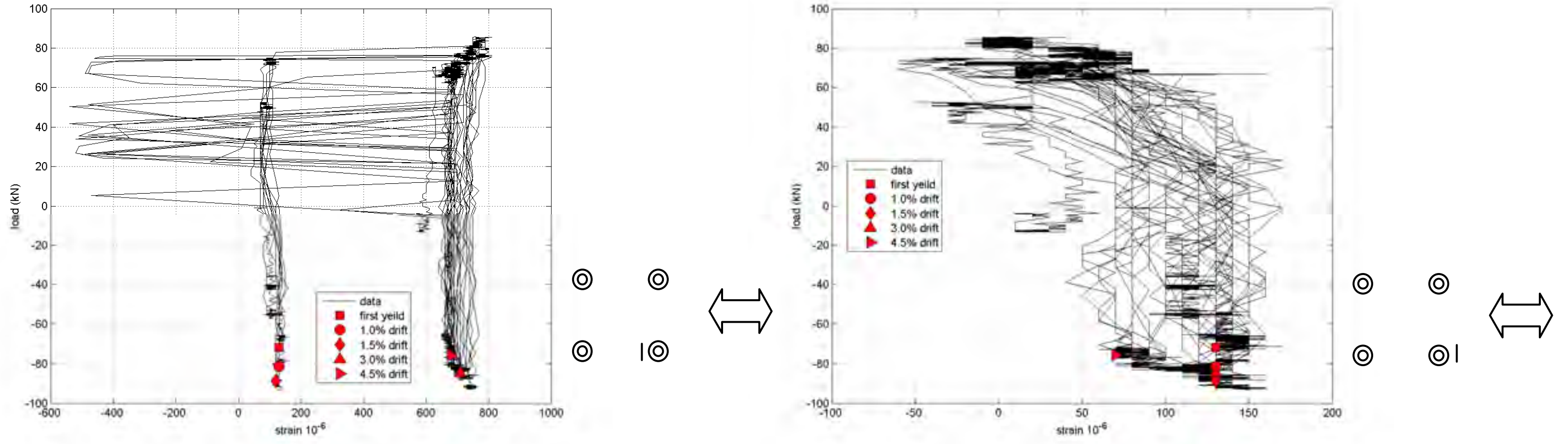
ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมระดับล่าง



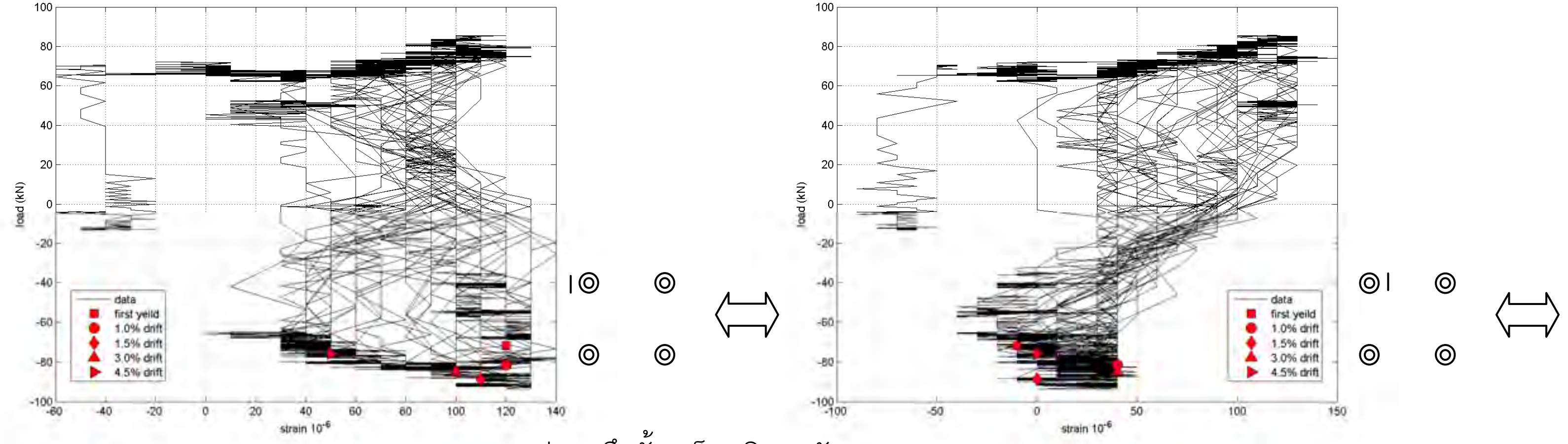
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



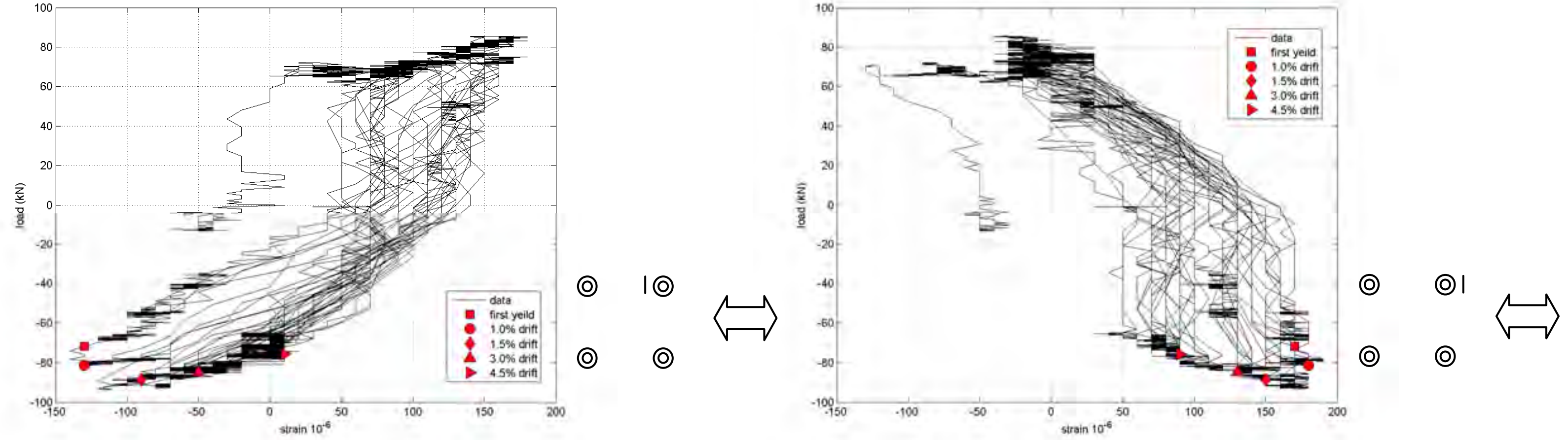
ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมระดับล่าง



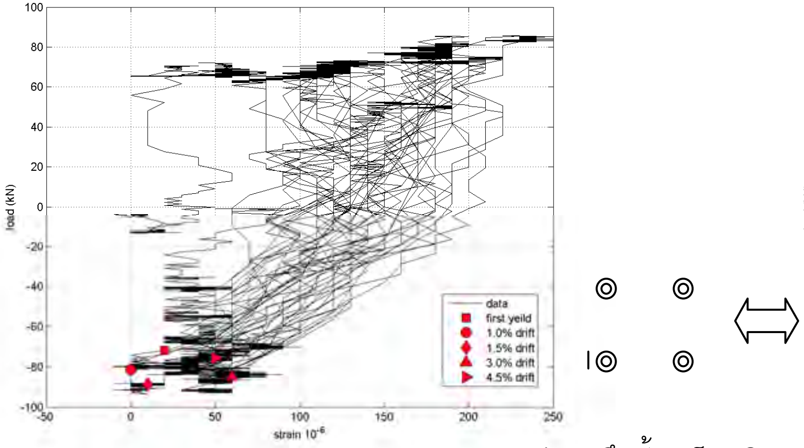
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200

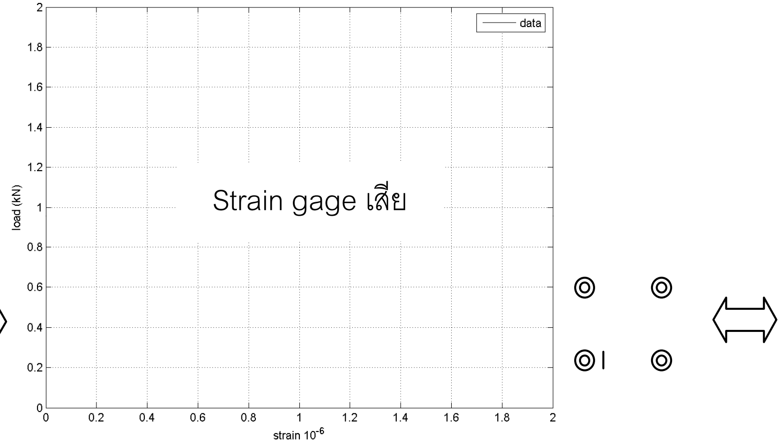


ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมระดับบน

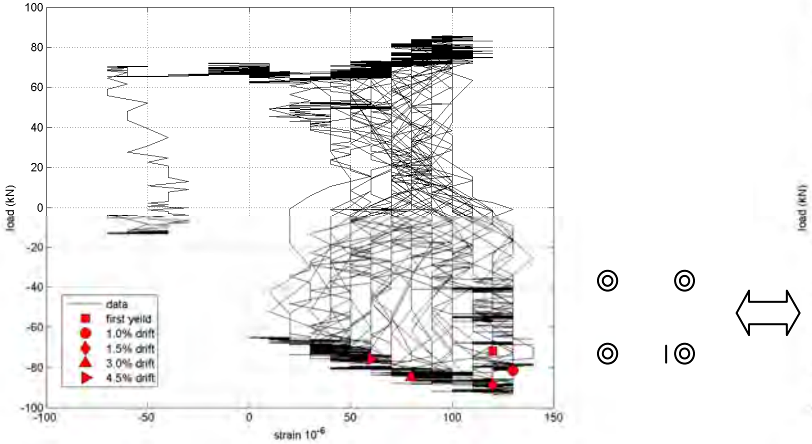


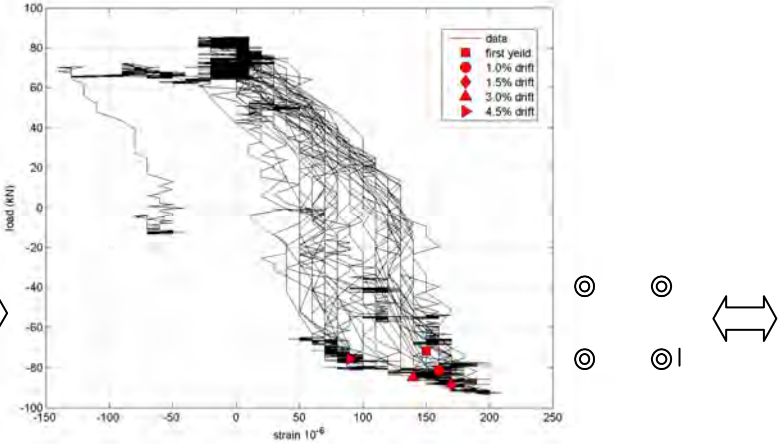
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



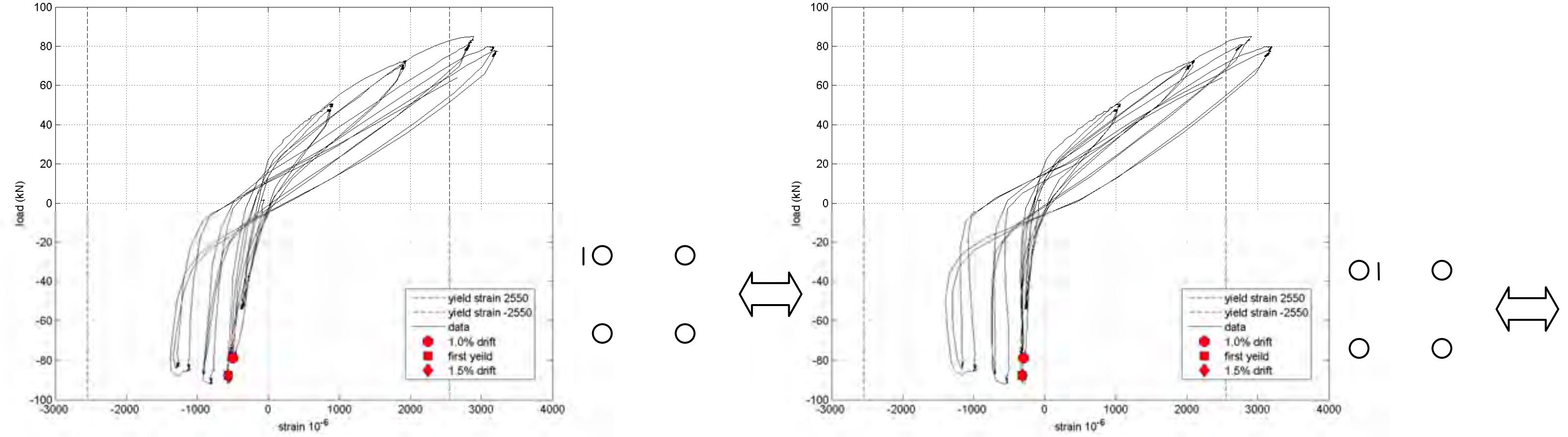


ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมระดับบน

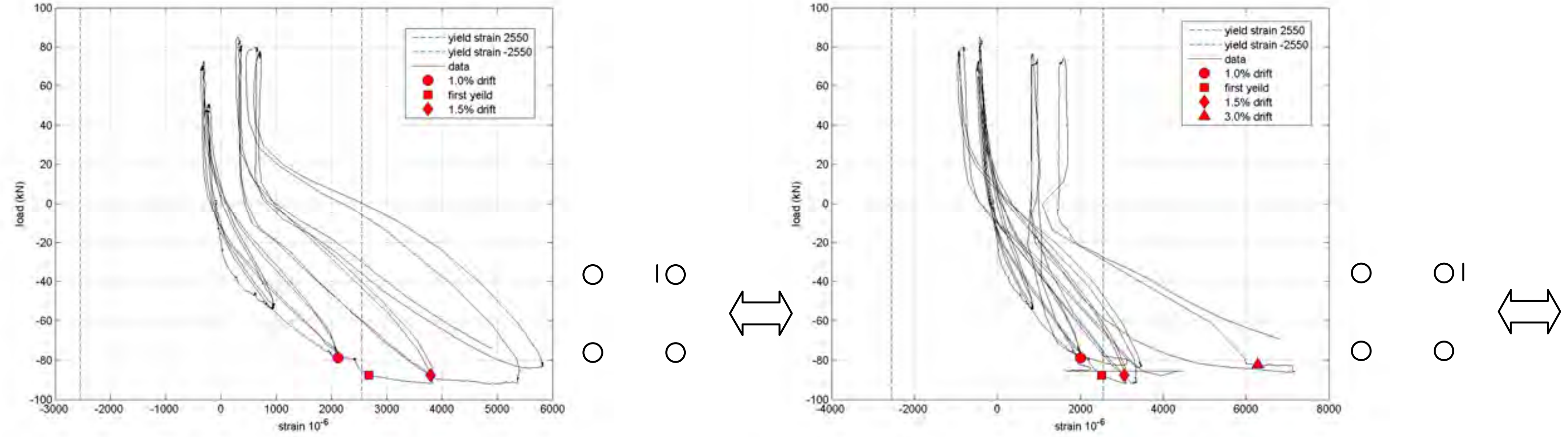




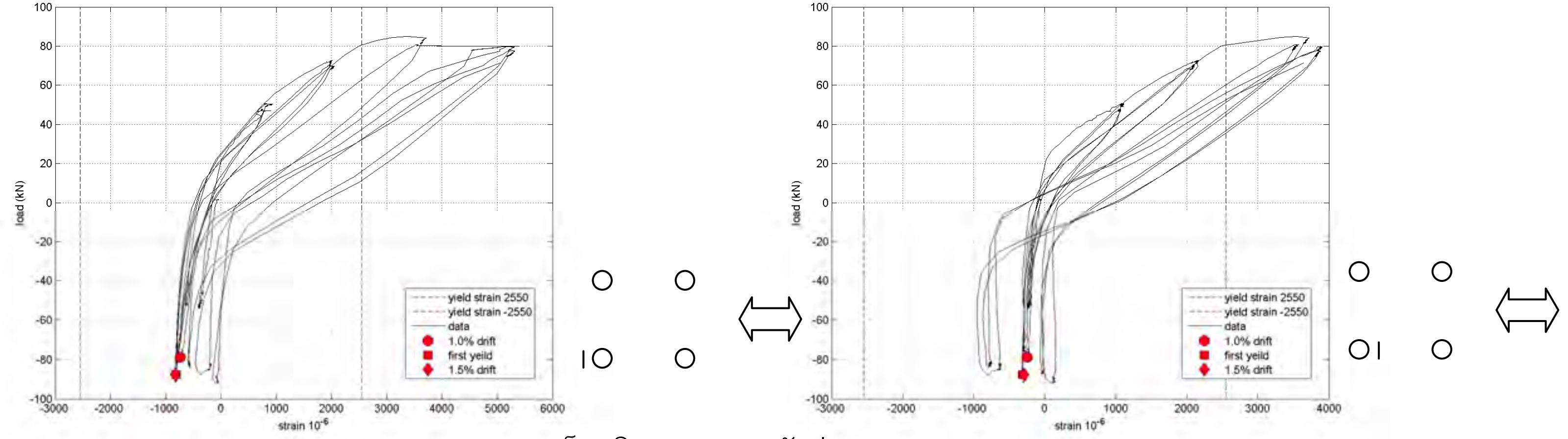
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา CC-09-200



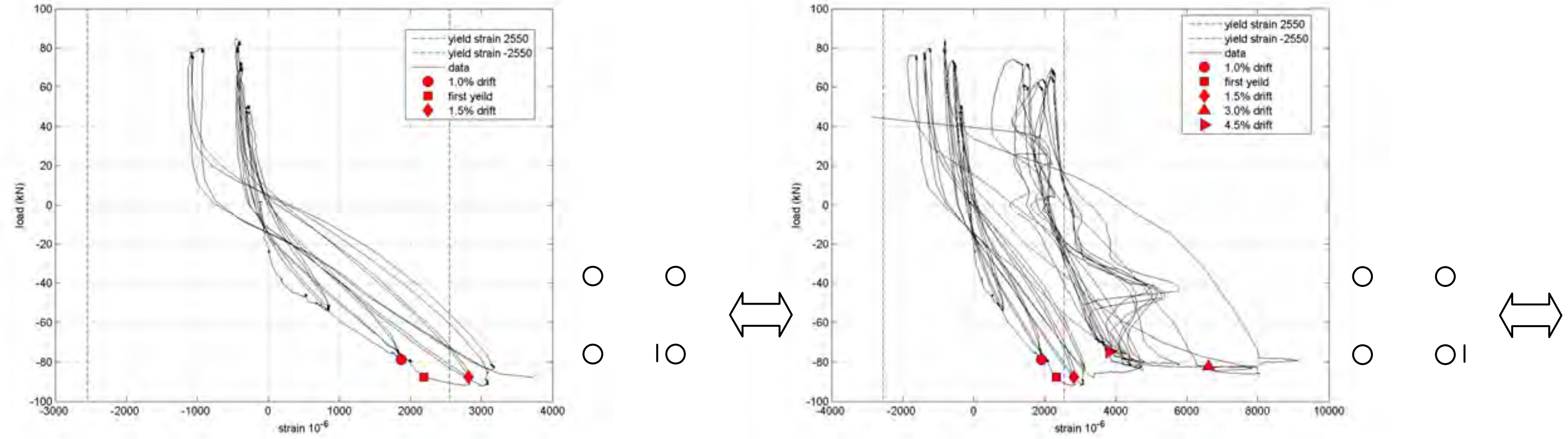
เหล็กเสริมตามยาวระดับล่าง



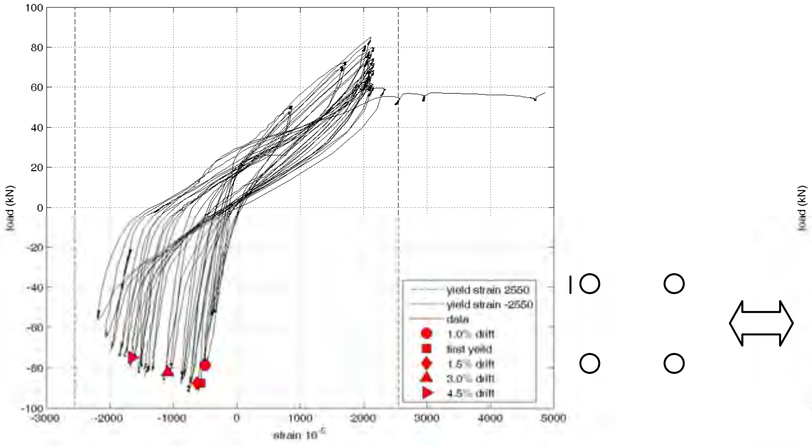
รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา C-09-200

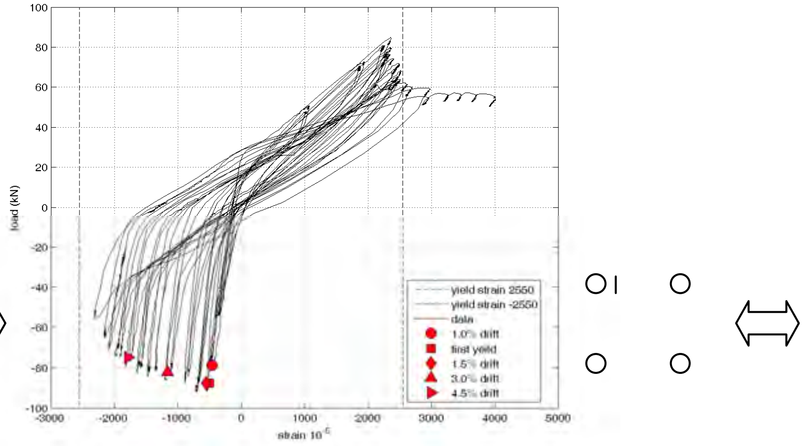


เหล็กเสริมตามยาวระดับล่าง

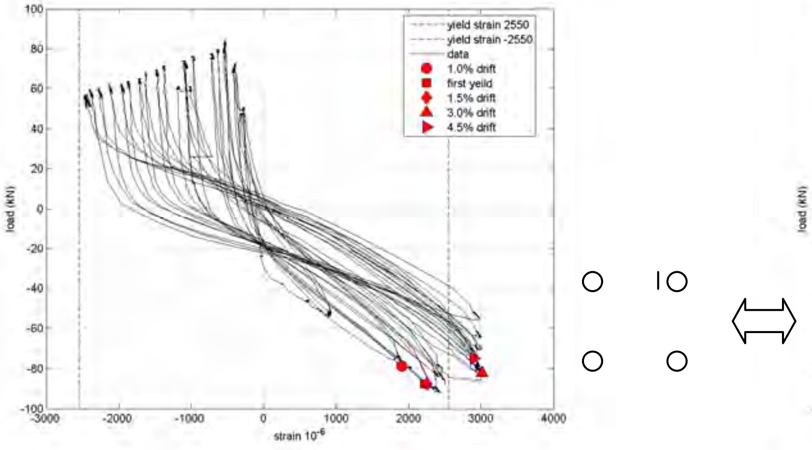


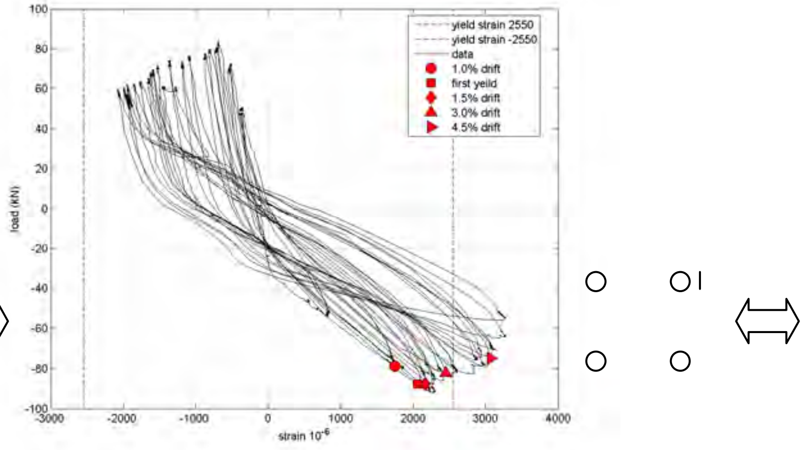
รูปที่ ค.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา C-09-200



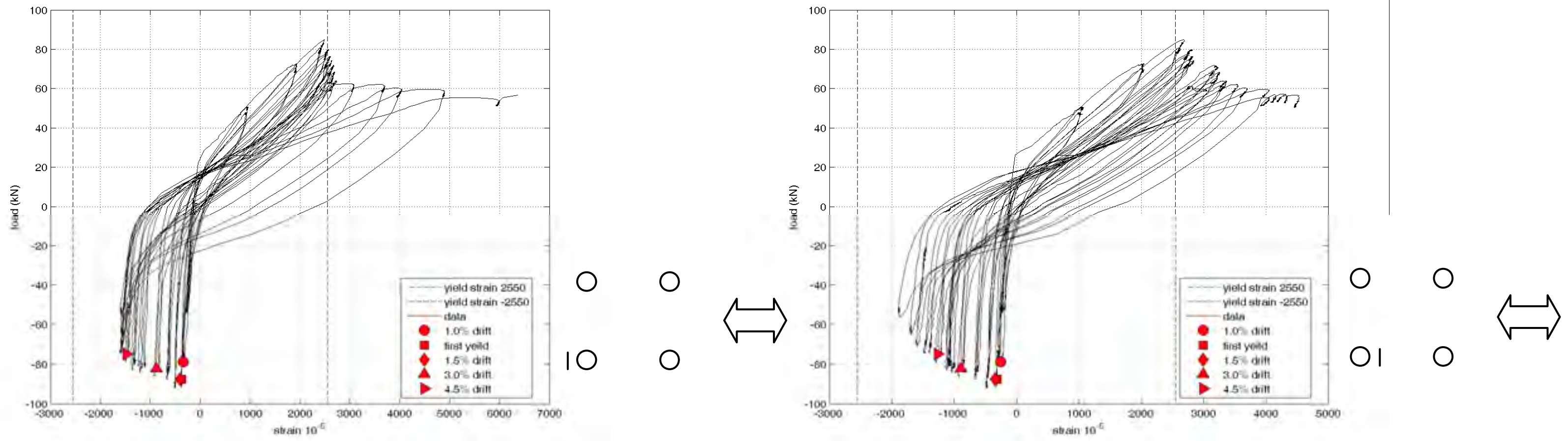


เหล็กเสริมตามยาวระดับบน

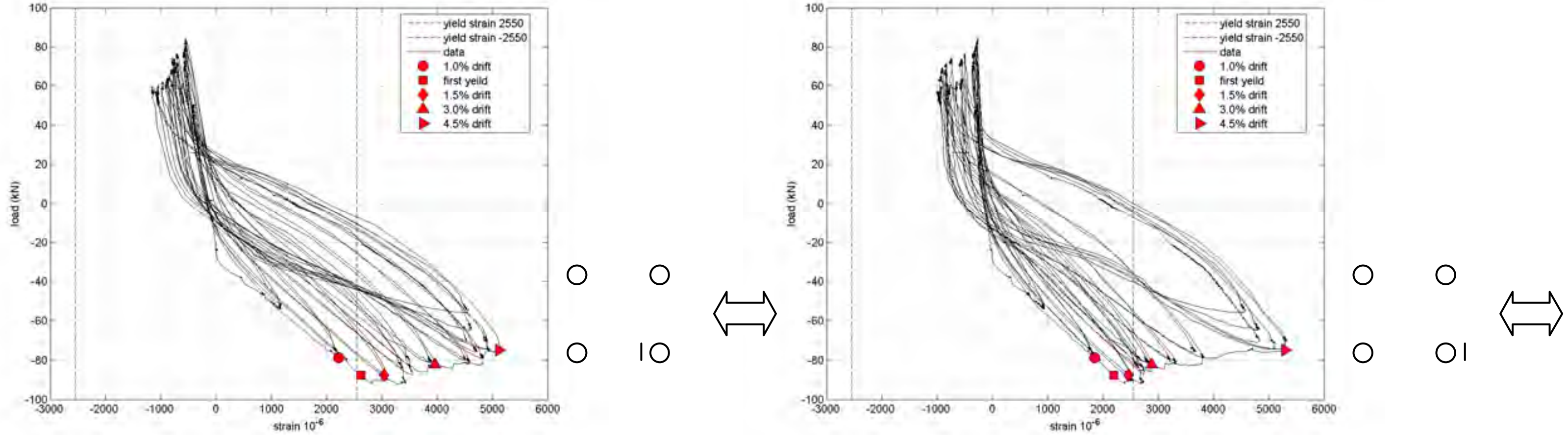




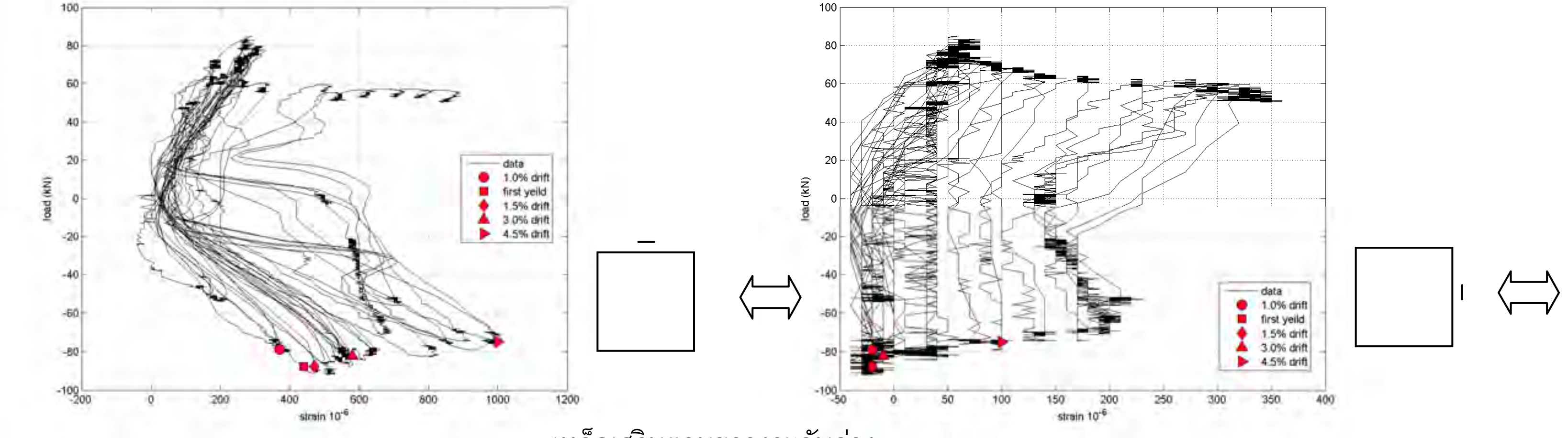
รูปที่ ค.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา C-09-200



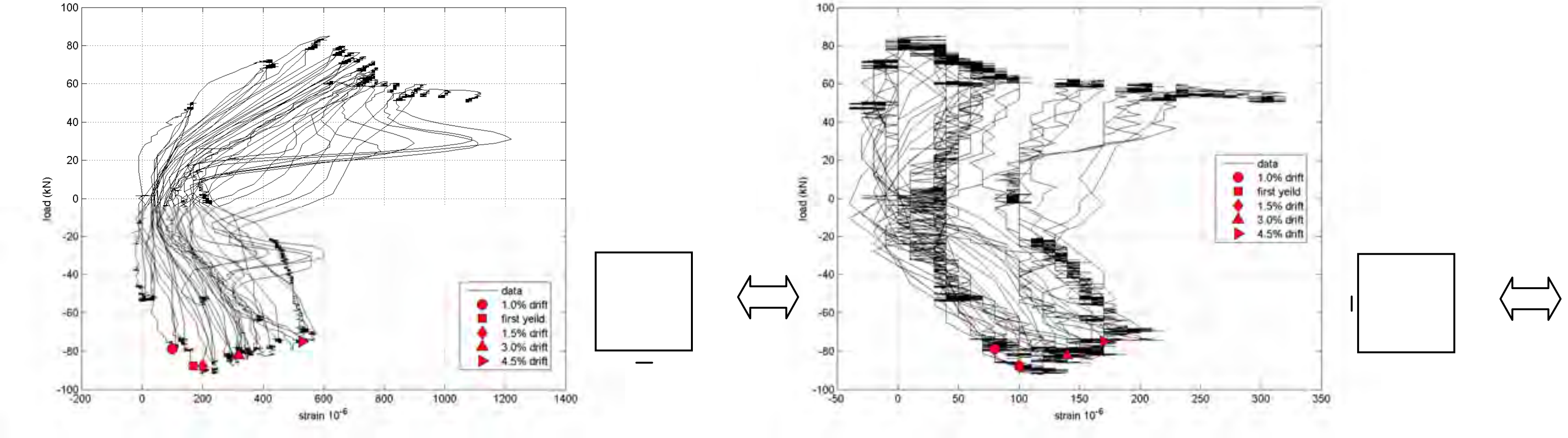
เหล็กเสริมตามยาวระดับบน



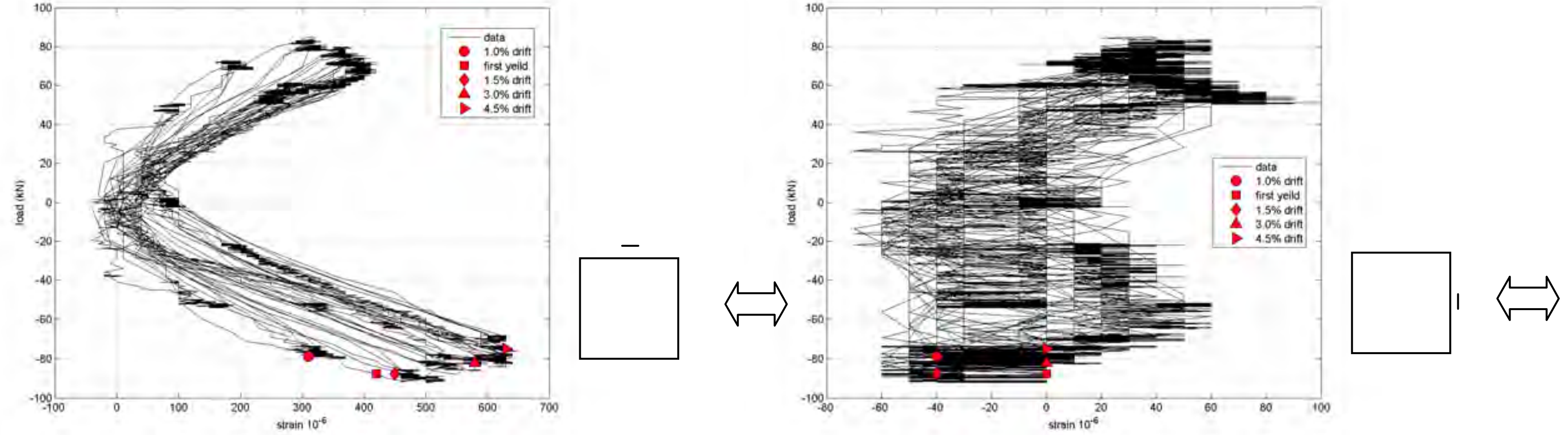
รูปที่ ค.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา C-09-200



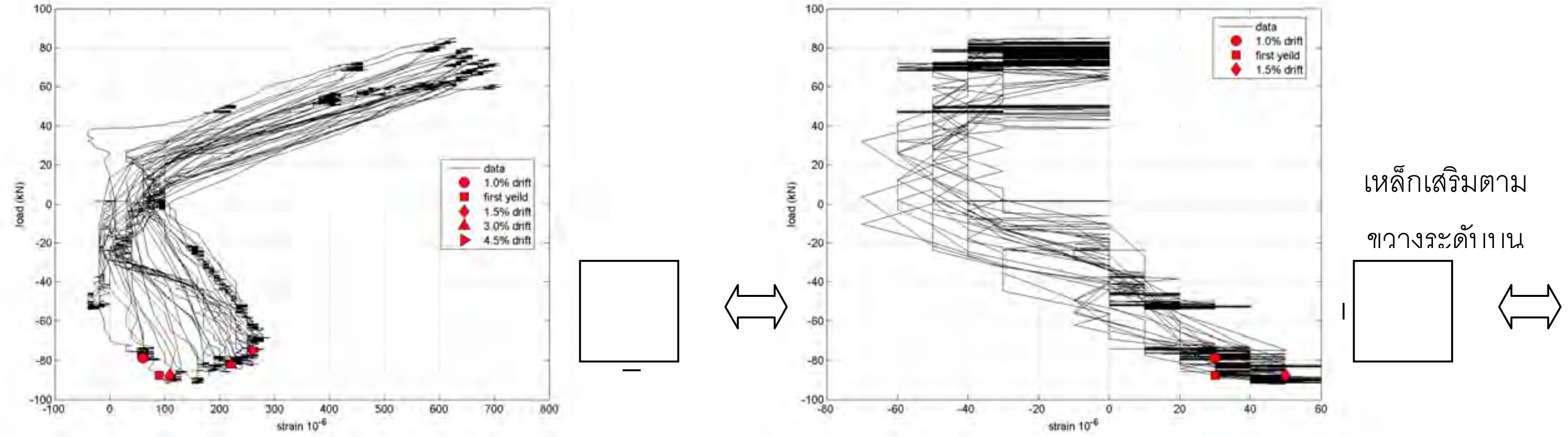
เหล็กเสริมตามขวางระดับล่าง



รูปที่ ค.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา C-09-200



เหล็กเสริมตามขวางระดับบน



รูปที่ ค.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมของตัวอย่างเสา C-09-200

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอาชวิน สวโรจน์ เกิดในวันเสาร์ที่ 16 มีนาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัดยะลา ภูมิลำเนาจังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสุราษฎร์ธานี ในปีการศึกษา 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550