# การเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที

นายศรประสิทธิ์ ลำภา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558

# STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING T-SHAPED STEEL HOOPS

Mr. Sornprasit Lumpha



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที |
| โดย | นายศรประสิทธิ์ ลำภา |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.หทัยรัตน์ มณีเทศ)

ศรประสิทธิ์ ลำภา : การเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING T-SHAPED STEEL HOOPS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อาณัติ เรืองรัศมี, 137 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการโอบรัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ซึ่งคุณสมบัติเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีสามารถรับแรงดัดได้อย่างดีทำให้มีประสิทธิภาพในการโอบรัด ตัวอย่างเสาสั้นทดสอบทั้งหมด 21 ตัวอย่างภายใต้แรงอัดตามแนวแกน ตัวอย่างเสาสั้นกลุ่มแรกจำนวน 12 ตัวอย่าง ขนาดหน้าตัด 0.25 เมตร x 0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร เหล็กเสริมตามแนวแกนจำนวน 4 เส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เหล็กเสริมทางขวางเสาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ระยะห่าง 0.10 เมตร ตัวอย่างเสาสั้นกลุ่มที่สอง จำนวน 9 ตัวอย่าง ขนาดหน้าตัด 0.30 เมตร x 0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริมตามแนวแกนจำนวน 4 เส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร มีทั้งแบบที่ต่อทาบและไม่ต่อทาบเหล็กตามแนว เหล็กเสริมทางขวางเสาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ระยะห่าง 0.20 เมตร โดยเสาสั้นทั้งสองกลุ่มทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกน ระหว่างเสาที่ไม่เสริมกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที กับเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที หลังทำการทดสอบเสาสั้นกลุ่มแรกพบว่ากำลังรับน้ำหนักเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที มีค่า มากกว่าเสาที่ไม่เสริมกรอบเหล็กรูปตัวที 48 เปอร์เซ็นต์ ในกลุ่มที่สองเปรียบเทียบกำลังระหว่างเสาที่เสริมกำลังด้วยเหล็กแผ่นหนา 8 มิลลิเมตร กับเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีที่มีความหนา 8 มิลลิเมตรเท่ากัน ผลเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ และในการทดสอบเสาสะพานที่มีการต่อทาบเหล็กตามแนวแกนและได้เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจัตร พบว่าเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีรับแรงกระทำด้านข้างได้เพิ่มขึ้น 13.4เปอร์เซ็นต์ และความเหนียวการเคลื่อนที่ด้านข้างมีค่า 3.1 เพิ่มขึ้น 65 เปอร์เซ็นต์

| | | |
|---|---|---|
| ภาควิชา | วิศวกรรมโยธา | ลายมือชื่อนิสิต ..... |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ..... |
| ปีการศึกษา | 2558 | |

# # 5570387221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEYWORDS: STRENGTHENING / T-SHARPE / LAP SPLICE

SORNPRASIT LUMPHA: STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING T-SHAPED STEEL HOOPS. ADVISOR: ASSOC. PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, Ph.D., 137 pp.

The experimental investigation of columns strengthened by T-shaped section steel is conducted. Totally twenty-one columns are tested under axial compression. In the first group of specimens, twelve short column specimens with a cross section of 0.25 m x 0.25 m and 0.75 m in height are tested. Four longitudinal reinforcement bars with a diameter of 20 mm are used. The transverse reinforcement diameter is 10 mm with a spacing of 100 mm. In the second group of the specimens, nine short column specimens with the cross section of 0.3 m x 0.3m and the height of 0.9m are also tested. Four longitudinal reinforcement bars with a dimeter of 25 mm are used. The transverse reinforcement diameter is 12 mm with a spacing of 200 mm. Columns with and without strengthening by T-shaped section steel are compared. It is found that the axial compressive strength of the specimen with T-shaped section steel is increased by about 48% than that of unstrengthened reinforced concrete specimens. And it is found that the axial compressive strength of reinforced concrete columns strengthened with T-shaped section steel is increased 18% when compared to the reinforced concrete specimens strengthened with flat bars. In addition, the compressive strength of the reinforced column with lap splice strengthened with T shaped section is better than that strengthened with flat bar and its strength is increased by about 16%. For a full-scale bridge column with lap splice and strengthened by T shaped section steel, the lateral load capacity is increased by 13.4% and the displacement ductility increases 65 %

| | | | |
|---|---|---|---|
| Department: | Civil Engineering | Student's Signature | ..... |
| Field of Study: | Civil Engineering | Advisor's Signature | ..... |
| Academic Year: | 2015 | | |

# กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ ให้รู้จักคิดวิเคราะห์ หาเหตุผลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งคอยดูแลและตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข และ ดร.หทัยรัตน์ มณีเทศ ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจทาน แนะนำ ให้คำชี้แนะ แก้ไขวิทยานิพนธ์ และตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง คุณกฎษดา ภูมี คุณสิริ ใจซื่อ คุณอุดมศักดิ์ เกตุบุตร

คุณพชร เครือวิทย์ คุณอาทิตย์ อุ่นคำ คุณอภิชาต วงศ์ดี คุณศุภกรณ์ ติระพัตร คุณณัฐดนัย อมรปฏิเวธ ที่ให้ความช่วยเหลือหลายๆเรื่อง

ขอขอบคุณ บริษัทวนะเกียรติพัฒนาจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในสถานที่การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

และอีกหลายๆเรื่อง โดยเฉพาะ คุณเพลิน ไพรเขียว และคุณ สัมฤทธิ์ อุบลม่วง

ขอขอบคุณ คุณเพ็ญพักตร์ เวียงนาค ภรรยาของข้าพเจ้าที่คอยดูแลเป็นอย่างดีตลอดมา

ข้าพเจ้าขอบขอบคุณ บิดา มารดา ตา ยาย ที่เป็นแบบอย่างที่ดีคอยอบรบสั่งสอนมาตั้งแต่เด็ก ที่ขาดไม่ได้เลย

พี่สาวทั้งสองคน น้องสาวอีกสองคนที่ร่วมทุกข์ร่วมสุขมาตลอด และขาดไม่ได้เลยคุณป้าละออ เฉลยสาร ที่คอยช่วยเหลือทุกๆเรื่อง

# สารบัญ

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

หน้า

# สารบัญตาราง

หน้า

หน้า

# บทที่ 1
# บทนำ

ในอดีตพบว่าเป็นจำนวนมากเสาจะมีการต่อทาบเหล็กเสริมที่บริเวณโคนเสา 100 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็กตามแนวแกน ซึ่งเพราะสะดวกในการก่อสร้าง แต่พบว่าเมื่อต้องรับแรงด้านข้างกระทำแบบวัตจักรอันเกิดจากแรงแผ่นดินไหว ทำให้พบเห็นเป็นส่วนใหญ่ว่าเสาเหล่านี้เกิดการแตกร้าวเสียหายสูงมากกว่าเสาที่ไม่มีการต่อทาบเหล็กตามแนวแกน ทั้งที่เป็นเสาของอาคารและเสาของสะพาน ดังนั้นเพื่อทำการปรับปรุงเสาสะพานที่มีการก่อสร้างไปแล้ว จำต้องทำการเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีกำลังสามารถรองรับแรงจากแผ่นดินไหวได้ดีขึ้นกว่าเดิม ในอดีตที่ผ่านมาพบว่ามีการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกเสาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้แผ่นเหล็กบางห่อหุ้มเสาตั้งแต่โคนเสา จนถึงปลายเสาและ มีการใช้แผ่นเหล็กมีทั้งการใช้เหล็กฉากประกบเข้าที่มุมเสาตามแนวยาวเสา หลังจากนั้นใช้แผ่นเหล็กเชื่อมประกอบเข้ากับเหล็กฉากในแนวนอนรอบเสา มีระยะห่างเป็นช่วงๆและยังมีการเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้แผ่น FRP(Fiber-Reinforced Polymer) พันรอบเสา ทั้งแบบพันรอบเฉพาะโคนเสา หรือพันเป็นช่วงๆ ไปจนถึงพันเสาทั้งต้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา พฤติกรรมการใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดตัวทีโอบรัดเสาในช่วงที่มีการต่อทาบเหล็กเสริม โดยโอบรัดเป็นช่วงๆ เพื่อต้องการเพิ่มกำลังการยึดเหนียวระหว่างเหล็กแกนเสากับคอนกรีตไม่ให้หลุดออกจากกันได้ เมื่อมีแรงกระทำต่อเสาตามแนวแกนและแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร เหตุผลที่เลือกใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดตัวทีมาโอบรัดเสาเพราะเมื่อเสาจะขยายตัวออกด้านข้างต้องใช้แรงอย่างมากเนื่องจากเหล็กตัวทีจะมีค่าโมเมนต์อินเนอเชียสูง และอีกเหตุผลที่ต้องโอบรัดเสาเป็นช่วงๆก็เพื่อที่จะทำให้เสาสามารถโยกตัวด้านข้างได้ดี และวิธีการประกอบติดตั้งก็ทำได้โดยง่ายไม่ยุ่งยาก ราคาวัสดุก็ถูกเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ผลที่คาดว่าจะได้รับเมื่อเทียบระหว่างราคาที่ลงทุนกับ กำลังรับแรงด้านข้าง รวมถึงการที่เสามีความสามารถในการเคลื่อนที่ด้านข้างได้สูงกว่าเดิม


รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเสาทดสอบโอบรัดด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที

## 1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ของเสาขนาดหน้าตัด 0.25X0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร จำนวน 12 ตัวอย่าง

2 เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบที่โคนเสา100 เปอร์เซ็นต์ โดยการเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวที โอบรัดเสาเป็นช่วงๆ ในช่วงที่มีการต่อทาบเหล็กแกนเสา ภายใต้แรงกระทำภายนอกตามแนวแกนและแรงด้านข้างกระทำแบบวัฏจักร

## 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1 เหล็กเสริมคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40

2 เหล็กรูปพรรณหน้าตัดตัวที ใช้ตามมาตรฐาน TIS 1227:2539 SM400

3 ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.40 เมตร. X 0.40 เมตร. ซึ่งเป็นตัวแทนของสะพานทางหลวงชนบทช่วงความยาว 10 เมตร. โดยกำหนดตัวแปรควบคุมดังนี้

ก.กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มีค่าประมาณเท่ากับ 250 กก./ซม.2

ข.อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาวกับพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 0.0245

ค.อัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กเสริมทางขวาง (Volumetric Ratio ) มีค่าเท่ากับ 0.004738

ง.ระหว่างการทดสอบมีการให้แรงอัดตามแนวแกนคงที่ (Axial Load Ratio) เท่ากับ

0.075 f'cAg

จ.รายละเอียดการดัดเหล็กเสริม การงอขอ การต่อทาบเหล็กเสริมเป็นไปตามมาตรฐานของ ACI (American Concrete Institute) และตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

4 ทำการทดสอบเสาเดี่ยว ที่ไม่ได้อยู่ในโครงเฟรมข้อแข็ง

5 ทดสอบเสาตัวอย่างโดยการให้แรงกระทำแบบสถิตทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Quasi-Static Cyclic Lateral Loading)

6 ทดสอบเสาขนาดหน้าตัด 0.25X0.25เมตร สูง 0.75 เมตร และเสาขนาดหน้าตัด 0.30X0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ที่โอบรัดด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ

1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของเสาที่มีการต่อทาบเหล็กตามแนวแกน โอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน และ แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

2 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการโอบรัดของกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที เมื่อมีแรงกระทำตามแนวแกน และแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

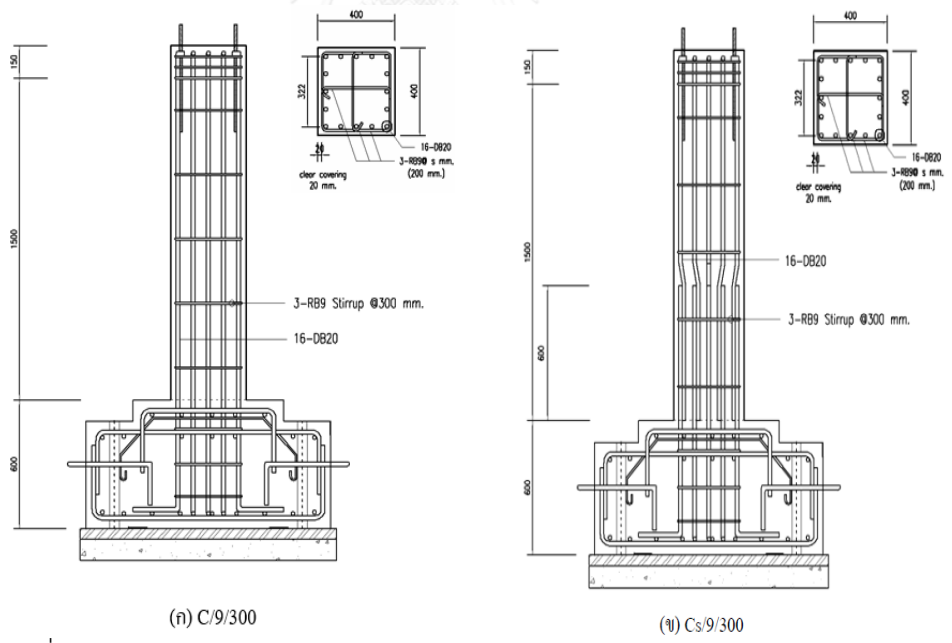
3 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของเสาขนาดหน้าตัด 0.25X0.25เมตร สูง 0.75 เมตร ที่โอบรัดด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาด 50x50x5x7มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน และสามารถนำสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไปออกแบบวิเคราะห์กำลังของเสา

4 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของเสาขนาดหน้าตัด 0.30X0.30เมตร สูง 0.90 เมตร ที่โอบรัดด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาด 100x100x5.5x8 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน

# บทที่ 2
# ผลการศึกษางานวิจัยในอดีต และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 การทดสอบเสาที่ต่อทาบเหล็กเสริมที่โคนเสา

ครรชนะ รัตนพงศ์ (พ.ศ. 2553) ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรเพื่อเปรียบเทียบกำลังการรับแรงด้านข้าง และ การเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาที่ไม่มีการต่อทาบเหล็กเสริม (C/9/300) กับ เสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริม(Cs/9/300) จากผลการทดสอบเสาทั้ง 2 ตัวอย่างมีโหมดการวิบัติเป็นแบบแรงเฉือนเป็นหลัก เสาC/9/300รับแรงด้านข้างที่จุดคราก (Py) 24.81 ตัน ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก (Uy) 15.44 มิลลิเมตร รับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด(Pm) 28.94 ตัน ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด(Um) 63.31 มิลลิเมตร เสา Cs/9/300รับแรงด้านข้างที่จุดคราก (Py) 18.96 ตัน ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่จุดคราก (Uy) 15.29 มิลลิเมตร รับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด(Pm) 21.21 ตัน ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด (Um) 52.62 มิลลิเมตร



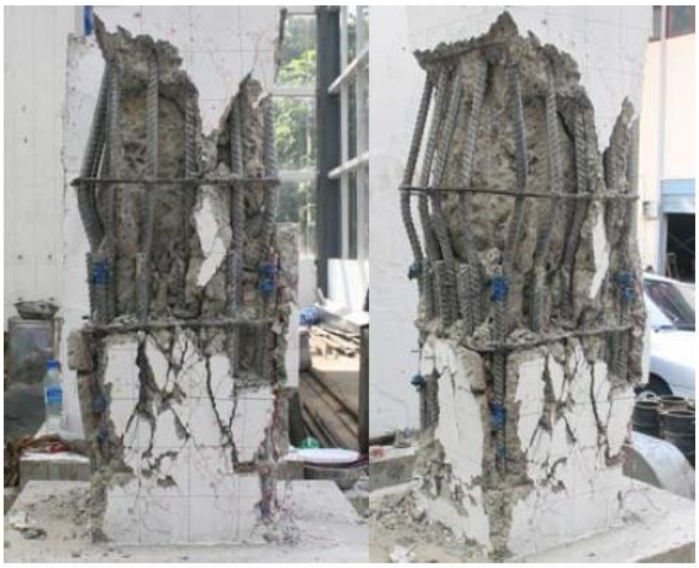

รูปที่ 2.1 (ก) เสาไม่มีการต่อทาบ (C/9/300)และ (ข) เสามีการต่อทาบ (Cs/9/300)
(ครรชนะ รัตนพงศ์ พ.ศ. 2553)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติวัสดุ (ครรชนะ รัตนพงศ์ พ.ศ. 2553)

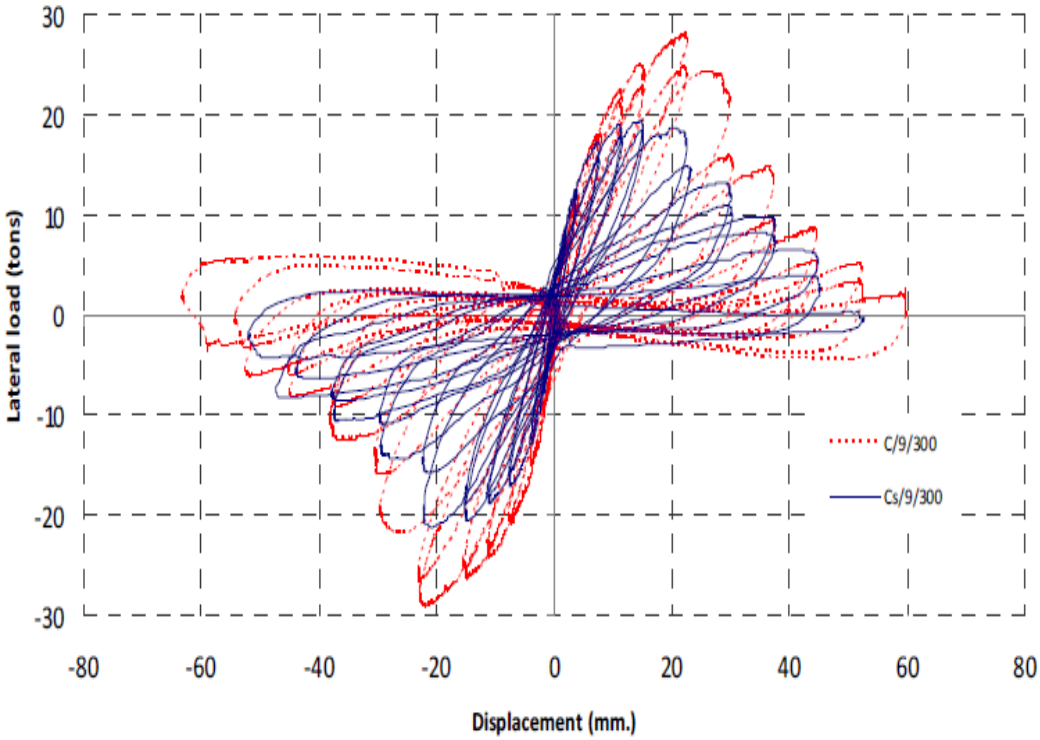
| ชื่อตัวอย่างเสาทดสอบ | | C/9/300 | Cs/9/300 |
|---|---|---|---|
| กำลังประลัยคอนกรีต (กก./ตร.ซม.) | | 350 | 210 |
| ขนาดตัวอย่างเสา | ความกว้าง (ม.) | 0.40 | 0.40 |
| | ความลึก (ม.) | 0.40 | 0.40 |
| | ความสูงประสิทธิผล (ม.) | 1.50 | 1.50 |
| ความสูงต่อความลึกหน้าตัด | | 3.75 | 3.75 |
| เหล็กเสริมตามยาว | ขนาดเหล็ก | 16-DB20 | 16-DB20 |
| | ปริมาณเหล็ก (%) | 3.14 | 3.14 |
| | กำลังเหล็กเสริมที่จุดคราก (กก./ตร.ซม.) | 5250 | 5250 |
| เหล็กเสริมตามขวาง | ขนาดเหล็ก | 3-RB9 | 3-RB9 |
| | ปริมาณเหล็ก (%) | 0.181 | 0.181 |
| | กำลังเหล็กเสริมที่จุดคราก (กก./ตร.ซม.) | 3050 | 3050 |
| แรงอัดในแนวแกน (ตัน) | | 80 | 80 |
| มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามยาว | | ไม่มี | มี |
| รูปแบบการวิบัติ | | วิบัติแบบเฉือน | วิบัติแบบเฉือน |



รูปที่ 2.2 การวิบัติของเสาที่ไม่มีการต่อทาบ (C/9/300) (ครรชนะ รัตนพงศ์ พ.ศ. 2553)



รูปที่ 2.3 การวิบัติของเสาที่มีการต่อทาบ (Cs/9/300) (ครรชนะ รัตนพงศ์ พ.ศ. 2553)




รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงด้านข้าง และการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา C/9/300 กับ Cs/9/300 (ครรชนะ รัตนพงศ์ พ.ศ. 2553)

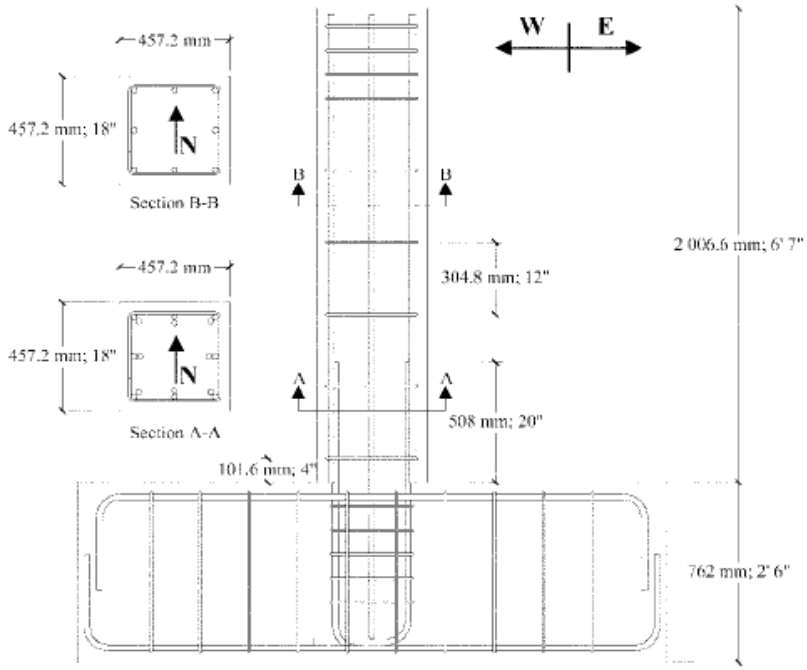
Melek และ Wallace (2004) ได้ทำการทดสอบจำนวน 6 ตัวอย่าง ภายใต้แรงกระด้านข้างแบบวัฏจักร แต่ให้เสาตัวอย่างมีค่าน้ำหนักกระทำตามแนวแกนที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบทำให้ทราบว่าแรงกดที่หัวเสาจะส่งผลอย่างมากต่อการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง และการวิบัตรของเสา

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเสา และวิธีการทดสอบ (Melek และ Wallace 2004)

| Speci-men | $P$, $\%A_g f'_c$ | $\frac{l_{s\_provided}}{l_{s\_required*}}$ | $V_c$, kN | $V_n$, kN | $\frac{V_u@M_{EXP}}{V_n}$ | Column height, mm | Displace-ment history |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2S10M | 10 | 0.65 | 212 | 301 | 0.67 | 1829 | STD |
| 2S20M | 20 | 0.65 | 245 | 334 | 0.70 | 1829 | STD |
| 2S30M | 30 | 0.65 | 278 | 367 | 0.78 | 1829 | STD |
| 2S20H | 20 | 0.64 | 242 | 331 | 0.81 | 1676 | STD |
| 2S20HN | 20 | 0.64 | 242 | 331 | 0.81 | 1676 | Near fault |
| 2S30X | 30 | 0.64 | 275 | 363 | 0.93 | 1524 | STD |

*ACI 318-02 Eq. (12-1).

to: 2 = 2% longitudinal steel ratio (eight No. 8); S = Spliced; 20 = $0.20A_g f'_c$; H = High shear demand; N = Near fault lateral displacement history.




รูปที่ 2.5 ขนาดและหน้าตัดเสา (Melek และ Wallace 2004)

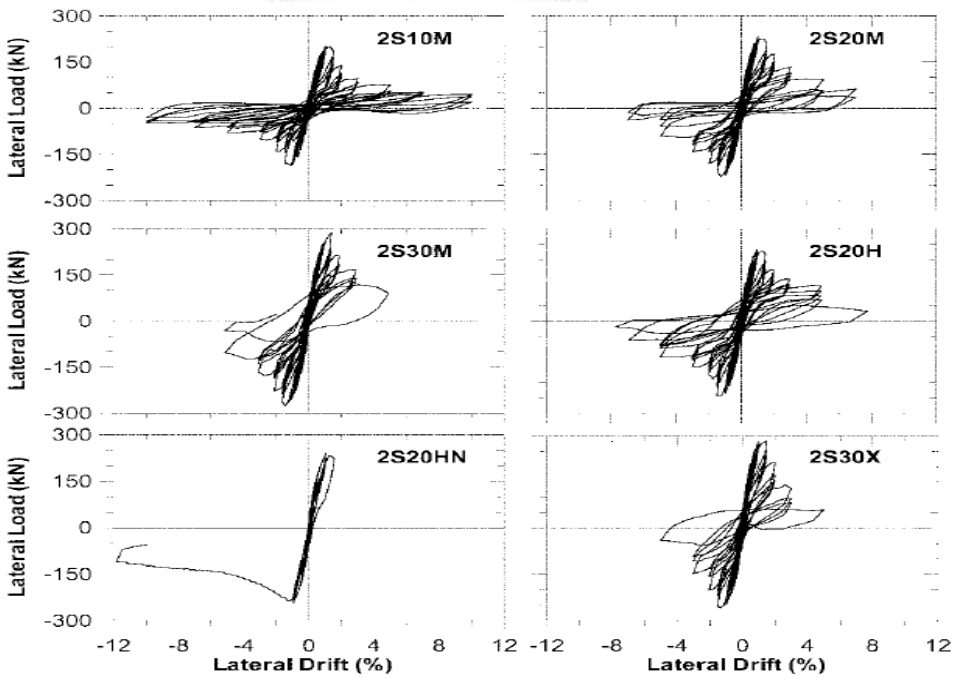
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบ

| Material | 2S10M-2S20M-2S30M | | | 2S20H-2S20HN-2S30X | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Concrete | $f_c'$, MPa | $f_{ct}$, MPa | $f_r$, MPa | $f_c'$, MPa | $f_{ct}$, MPa | $f_r$, MPa |
| | 36 | 3.4 | 3.8 | 35 | — | 3.7 |
| Steel | $d_b$, mm | $f_y$, MPa | $f_u$, MPa | $d_b$, mm | $f_y$, MPa | $f_u$, MPa |
| (column) | 25.4 | 510 | 818 | 25.4 | 510 | 818 |
| (starter) | 25.4 | 521 | 746 | 25.4 | 507 | 807 |
| (ties) | 9.5 | 481 | 750 | 9.5 | 481 | 750 |

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบ (Melek และ Wallace 2004)

| Specimen | Maximum lateral load | | Normalized lateral load, kN | Analytical yield moment, kN-m | Maximum base moment $M_{EXP}$, kN-m | $M_{EXP}/M_y$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | kN | @ drift, % | | | | |
| 2S10M | 202.7 | 1.50 | 202.7 | 381.3 | 370.7 | 0.97 |
| 2S20M | 233.5 | 1.28 | 233.5 | 450.4 | 427.0 | 0.95 |
| 2S30M | 285.3 | 1.45 | 285.3 | 509.0 | 521.8 | 1.03 |
| 2S20H | 269.5 | 1.33 | 247.0 | 441.5 | 451.8 | 1.02 |
| 2S20HN | 267.4 | 1.00 | 245.1 | 441.5 | 448.3 | 1.02 |
| 2S30X | 340.7 | 1.50 | 283.9 | 499.5 | 519.2 | 1.04 |

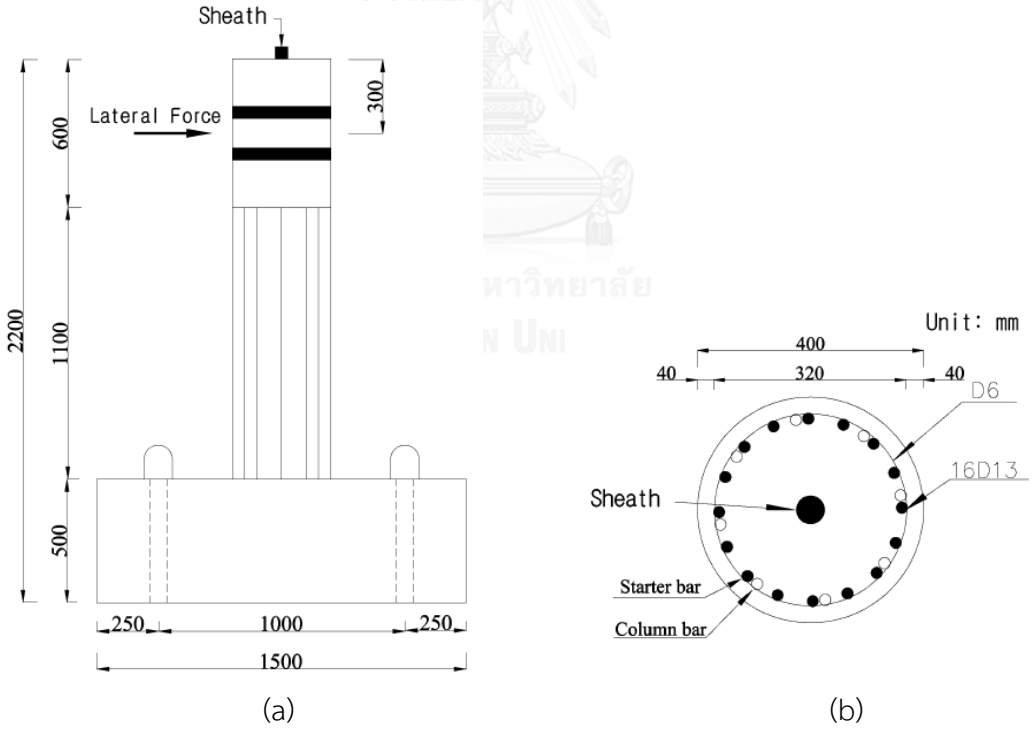
*Normalized ($F_{normalized} = F_{measured} \times h_{column}/h_{2S10M}$)




รูปที่ 2.6 แรงด้านข้างที่หัวเสา กับอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Melek และ Wallace 2004)

## 2.2 การเสริมกำลังของเสาด้วยแผ่นเหล็กบางหุ้มรอบของเสาที่ต่อทาบเหล็กตามแนวแกน

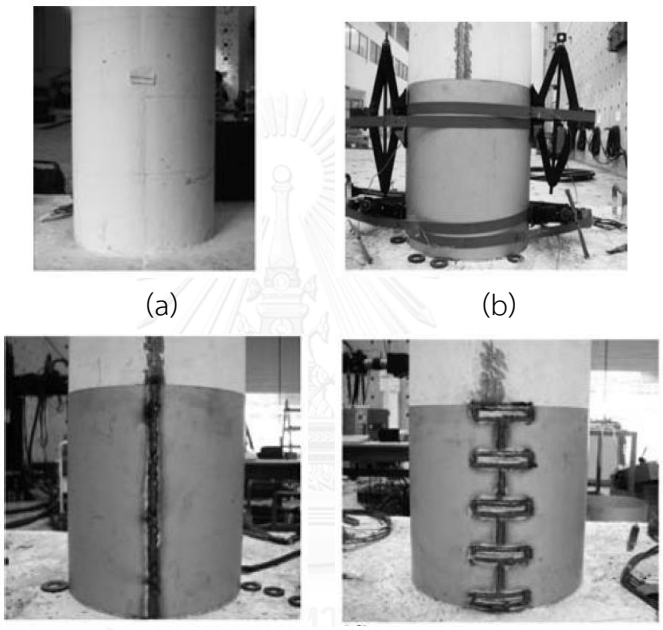
Choi และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ต้นRC-N-SP00-NUB คือเสาที่ไม่มีการต่อทาบและไม่หุ้มด้วยแผ่นเหล็ก RC-N-SP50-NUBคือเสาที่มีการต่อทาบ50%และไม่หุ้มด้วยแผ่นเหล็ก RC-N-SP50-UB1 คือเสาที่มีการต่อทาบ50%และหุ้มด้วยแผ่นเหล็กหนา 1 มิลลิเมตร RC-N-SP50-UB2 คือเสาที่มีการต่อทาบ50%และหุ้มด้วยแผ่นเหล็กหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้น โดยมีความสูงของแผ่นเหล็กที่หุ้มเสา 400 มิลลิเมตร หุ้มรอบเสาแล้วทำการให้แรงกับแผ่นเหล็กก่อนทดสอบ เพื่อให้แผ่นเหล็กเกิดการโอบรัดเสาก่อนการให้แรงกระทำ ดังรูปที่ 2.8 (b) เสามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร เหล็กเสริมตามแนวแกน 16 D 13 เหล็กปลอก D6 ระยะห่าง 130 มิลลิเมตร ระดับให้แรงกระทำด้านข้างที่ความสูง 1400 มิลลิเมตร จากฐานราก ผลจากการทดสอบเสา RC-N-SP00-NUB รับแรงกระทำด้านข้างได้สูงสุด 112.4 kN ได้ค่ามากกว่าเสาทดสอบทุกต้น สำหรับเสา RC-N-SP50-UB2 สามารถรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุด 93.5 kN เสา RC-N-SP50-UB1 รับแรงกระทำด้านข้างสูงสุด88.4 kN และเสา RC-N-SP50-NUB รับแรงด้านข้างได้สูงสุด 91.6 kN ซึ่งผลการทดสอบค่าของเส้นโค้งขอบนอก ของเสาที่มีการต่อทาบทั้งสามตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันมาก



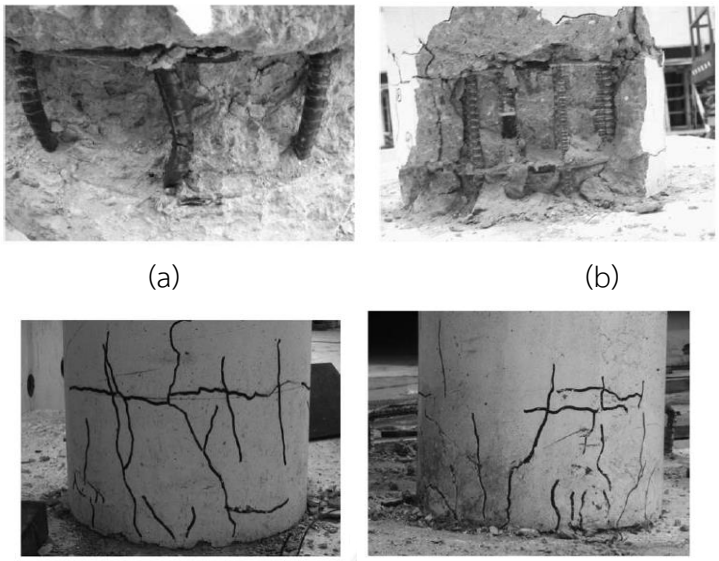

รูปที่ 2.7 (a) แสดงขนาดเสาตัวอย่าง, (b) หน้าตัดเสา (Choi และคณะ 2010)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเสา (Choi และคณะ 2010)

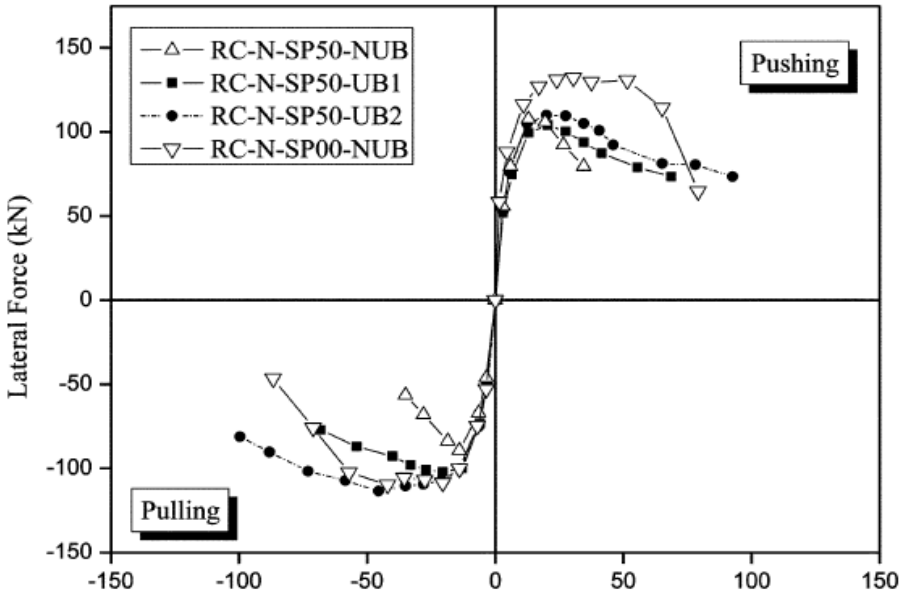
| Specimen | Diameter/ height, mm | Longitudinal reinforcement | | Transverse reinforcement | | Steel jacket |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | No. of bars/ volumetric steel ratio | Lap splice, % | Volumetric confinement steel ratio | Space, mm | |
| RC-N-SP00-NUB | $D = 400$ $H = 1400$ | No. 16-D13 $\rho_s = 1.61\%$ | 0 | $\rho_s = 0.27\%$ | 130/130 | — |
| RC-N-SP50-NUB | | | 50 | | | — |
| RC-N-SP50-UB1 | | | 50 | | | 1 mm |
| RC-N-SP50-UB2 | | | 50 | | | 1 mm x 2 |




รูปที่ 2.8 วิธีติดตั้งแผ่นเหล็กหุ้มเสา (a)เสาต้นแบบ, (b)การให้แรงเริ่มต้นแก่แผ่นเหล็ก, (c)แสดงรอยเชื่อมต่อทาบ, (d)การเชื่อมเสริมเป็นแผ่นเล็กๆในแนวนอน (Choi และคณะ 2010)

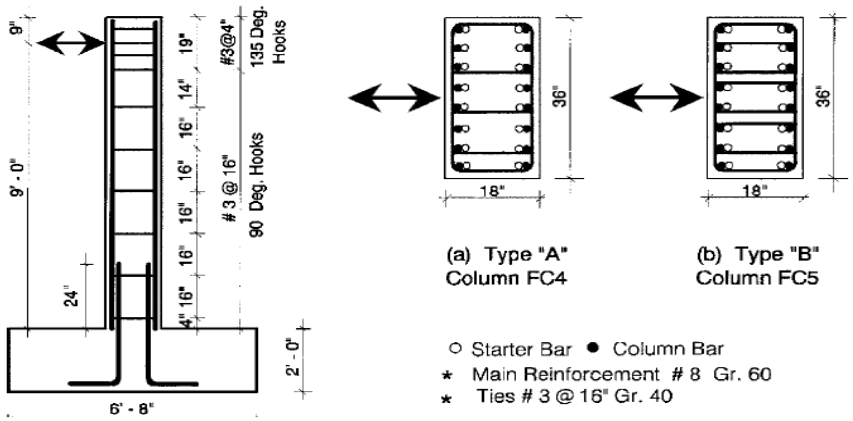



รูปที่ 2.9 แสดงโหมดการเสียหาย และรอยแตกร้าวของเสาตัวอย่างทดสอบ (a) เหล็กเสาไม่มีการต่อทาบ RC-N-SPOO-NUB (b) เหล็กเสาต่อทาบ50% RC-N-SP50-NUB (c) เหล็กเสาต่อทาบ50%และหุ้มแผ่นเหล็กหนา 1 มม. RC-N-SP50-UB1(d) เหล็กเสาต่อทาบ50%และหุ้มแผ่นเหล็กหนา 1 มม. สองชั้น(1mmX2) RC-N-SP50-UB2 (Choi และคณะ 2010)

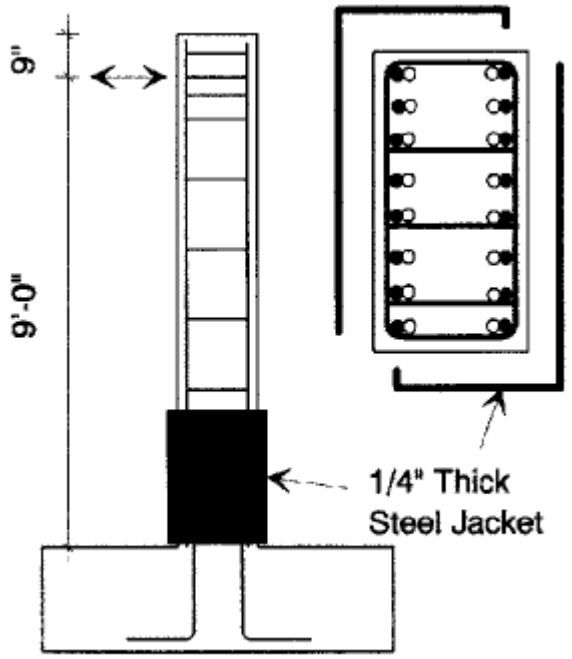



รูปที่ 2.10 แสดง Evelopes ของแรงกระทำด้านข้าง และระยะเคลื่อนที ของเสาทดสอบ (Choi และคณะ 2010)

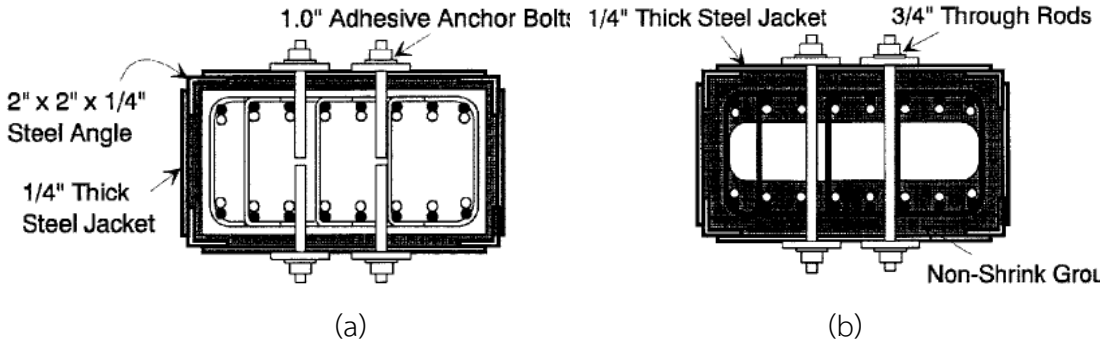
Aboutaha และคณะ (1999) ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบที่โคนเสา ระยะต่อทาบเหล็กยาว 24 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กแกนเสา โดยแบ่งเสาทดสอบเป็นแบบชนิดA และ ชนิดB ความแตกต่างอยู่ที่การเสริมเหล็กปลอกที่ไม่เท่ากัน (ดูรูปที่2.2) ได้เริ่มการทดสอบโดย ใช้เสาFC4 เป็นเสาต้นแบบชนิดA เมื่อทำการทดสอบแล้วเสร็จก็ทำการเก็บข้อมูลไว้ หลังจากนั้นก็ทำการปรับปรุงเสา โดยการสกัดเอาคอนกรีตที่เสียหายออก แล้วใช้เหล็กฉากประกบเข้าที่ข้างเสาทั้งสี่มุม หลังจากนั้นใช้แผ่นเหล็กประกับเข้าทั้งสี่ด้าน และมีการเสริมสลักเกลียวในแนวดิ่งจำนวนหนึ่งแถวทั้งหมดห้าชั้นเพียงด้านเดียว(ดูรูปที่2.3) ได้เสาใหม่เป็น FC6 หลังจากนั้นเก็บข้อมูล แล้วทำการซ่อมเสาโดยการสกัดเอาคอนกรีตที่เสียหายออก แล้วใช้เหล็กฉากประกบเข้าที่ข้างเสาทั้งสี่มุม หลังจากนั้นใช้แผ่นเหล็กประกับเข้าทั้งสี่ด้าน และมีการเสริมสลักเกลียวในแนวดิ่งจำนวนสองแถว (ดูรูปที่ 2.4) หลังจากนั้นเก็บข้อมูล แล้วทำการซ่อมเสาโดยการสกัดเอาคอนกรีตที่เสียหายออก แล้วใช้เหล็กฉากประกบเข้าที่ข้างเสาทั้งสี่มุม หลังจากนั้นใช้แผ่นเหล็กประกับเข้าทั้งสี่ด้าน และมีการเสริมสลักเกลียวชนิดยาวตลอดในแนวดิ่งจำนวนสองแถว (ดูรูปที่ 2.4) สำหรับเสาต้นแบบ FC5 ชนิดB เมื่อทำการทดสอบแล้วเก็บข้อมูล หลังจากนั้นทำการซ่อมเสาโดยการสกัดคอนกรีตในส่วนที่เสียหายออก แล้วทำการยึดเหล็กแกนเสาเข้าด้วยกันโดยการเชื่อม(Weld) แล้วเกล้าปูนปิดช่องว่าง ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังแบบ FC6 และ FC10 จะช่วยเพิ่มกำลังการรับแรงด้านข้างและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างได้สูงกว่าเสาต้นแบบ สำหรับเสาFC13จะสามารถรับแรงด้านข้างทั้งการเคลื่อนที่ด้านข้างสูงกว่าเสาต้นแบบอย่างมาก ทั้งนี้เกิดจากการที่เมื่อสกัดคอนกรีตในส่วนที่เสียหายออกแล้ว ได้ทำการยึดสลักเกลียวยาวตลอดแล้วเทคอนกรีต ทำให้เกิดการโอบรัดที่สมบูรณ์มากกว่าเสาFC6 และ FC10 และที่น่าสนใจอย่างยิ่งเสาFC7 ที่เสริมกำลังโดยการเชื่อมเหล็กเข้าด้วยกันให้กำลังสูงกว่าเสาต้นแบบ(FC7)อย่างมาก




รูปที่ 2.11 แสดงขนาดหน้าตัดเสาต้นแบบ ชนิดA และ ชนิดB) (Aboutaha และคณะ 1999)




รูปที่ 2.12 แสดงการเสริมกำลังของเสาต้นแบบ (Typical Repair Column)
(Aboutaha และคณะ 1999)




รูปที่ 2.13 (a) แสดงการยึดแผ่นเหล็กเข้ากับเสาโดยใช้สลักเกลียว (b) แสดงการยึดแผ่นเหล็กเข้ากับเสาโดยใช้สลักเกลียวยาวตลอด) (Aboutaha และคณะ 1999)

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติเสาทดสอบ (Aboutaha และคณะ 1999)

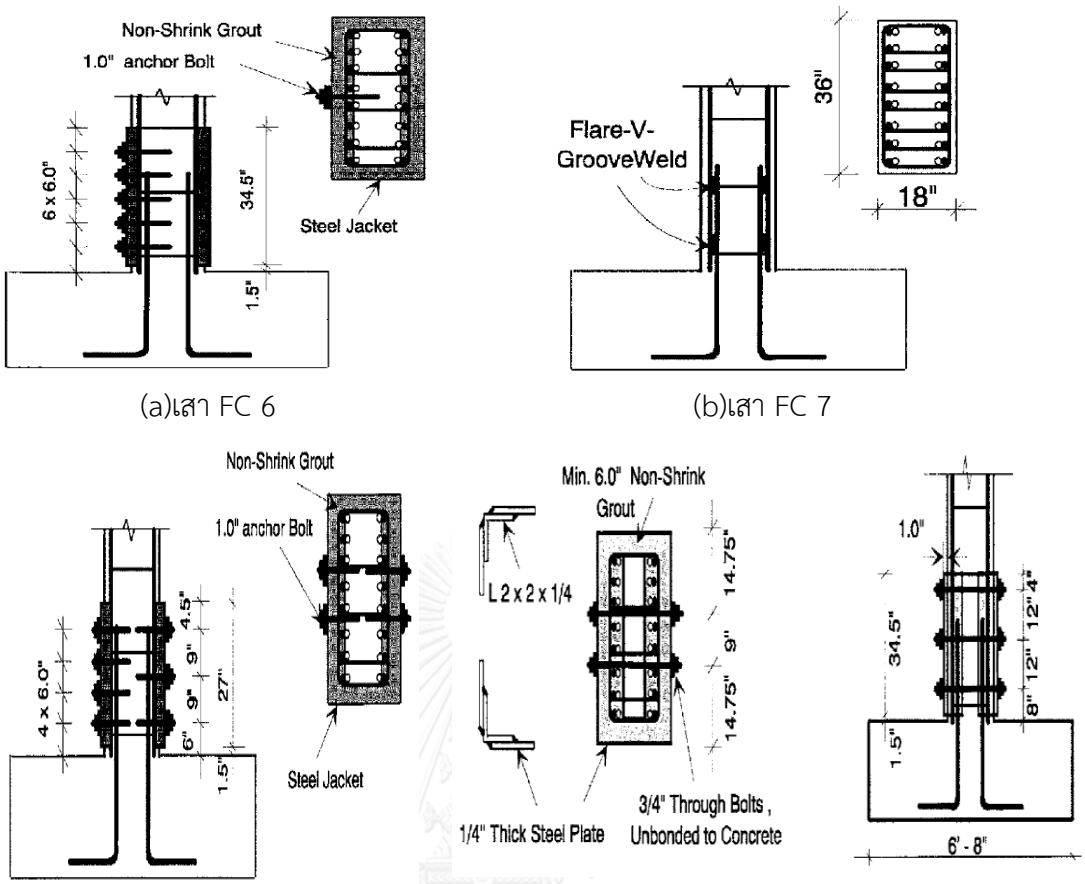
| Column no. | Type | Cross section | Retrofit | Bolts/rods | Bolts/rods | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FC4 | Basic | A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| FC5 | Basic | B | N/A | N/A | N/A | N/A |
| FC6 | Repaired | B | LSJ/B | 1L5B | None | FC4 |
| FC7 | Repaired | A | Welded | N/A | N/A | FC5 |
| FC10 | Repaired | A | SSJ/B | 2L3B | 2L2B | FC4 |
| FC13 | Repaired | A | LSJ/R | 2L3 rods | 2L3 rods | FC4 |

Note: LSJ = long steel jacket (34.5 in. high); SSJ = short steel jacket (27 in. high), /B = with adhesive anchor belts; R = 3/4-in. diameter through rods; L = vertical line; B = adhesive anchor bolt; 2L3B = two vertical lines of bolts, with three bolts in each line.

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติวัสดุ (Aboutaha และคณะ 1999)

| Column no. | Concrete,*† $f_c$, psi | Concrete,‡ $f_c'$, psi | Water-cement ratio | Grout,§ $f_c$, psi |
|---|---|---|---|---|
| FC4 | 2850 | 3170 | 0.385 | N/A |
| FC5 | 2980 | 3170 | 0.385 | N/A |
| FC6 | 2850 | 3170 | 0.385 | 6745 |
| FC7 | 2980 | 3170 | 0.385 | 6745 |
| FC10 | 2595 | 2800 | 0.36 | 7195 |
| FC13 | 3265 | 3225 | 0.34 | 5910 |

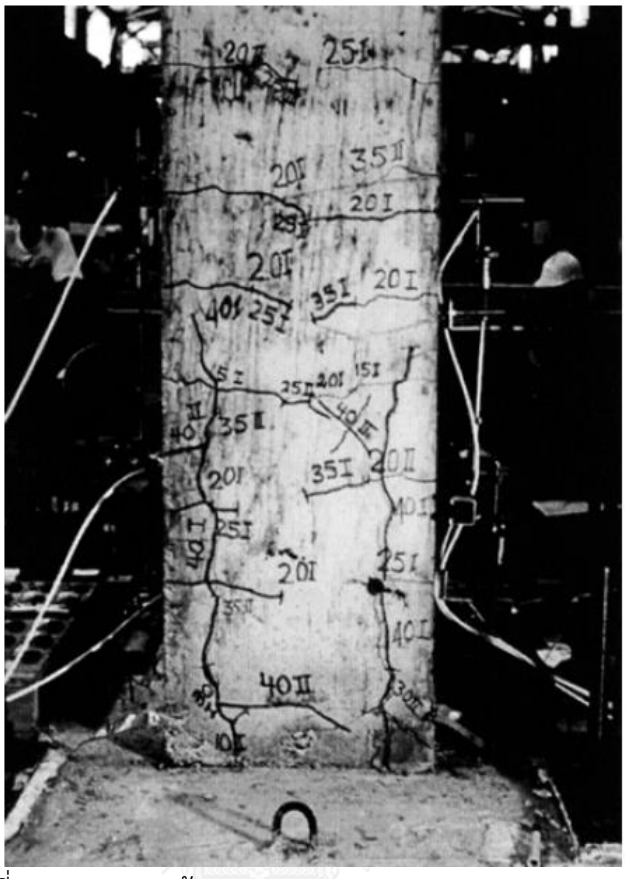
*Uniaxial compressive strength of 6 x 12 in. cylinder at day of testing.
†Maximum size of aggregate was 3/4 in.
‡Uniaxial compressive strength of 6 x 12 in. cylinder at 28 days.
§Uniaxial compressive strength of 2 in. cube at day of testing.



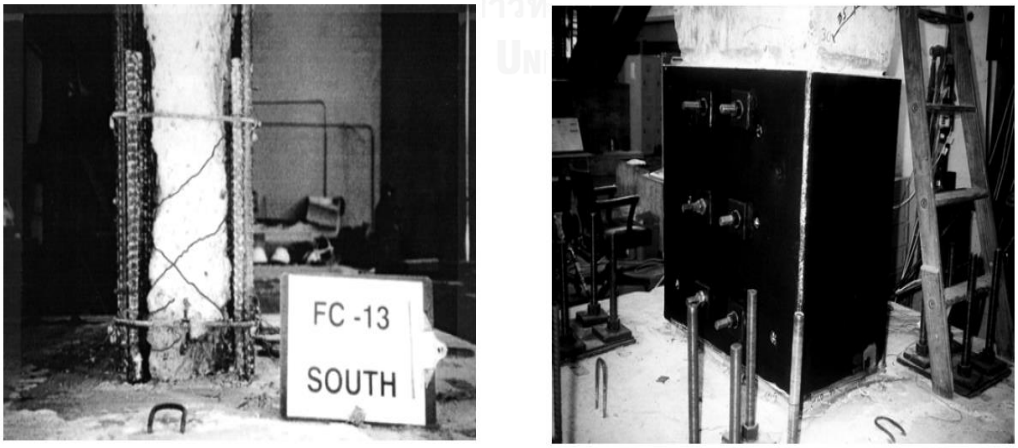

(a)เสา FC 6 (b)เสา FC 7

(c)เสา FC 10 (d)เสา FC 13

รูปที่ 2.14 แสดงการปรับปรุงเสา (Aboutaha และคณะ 1999)

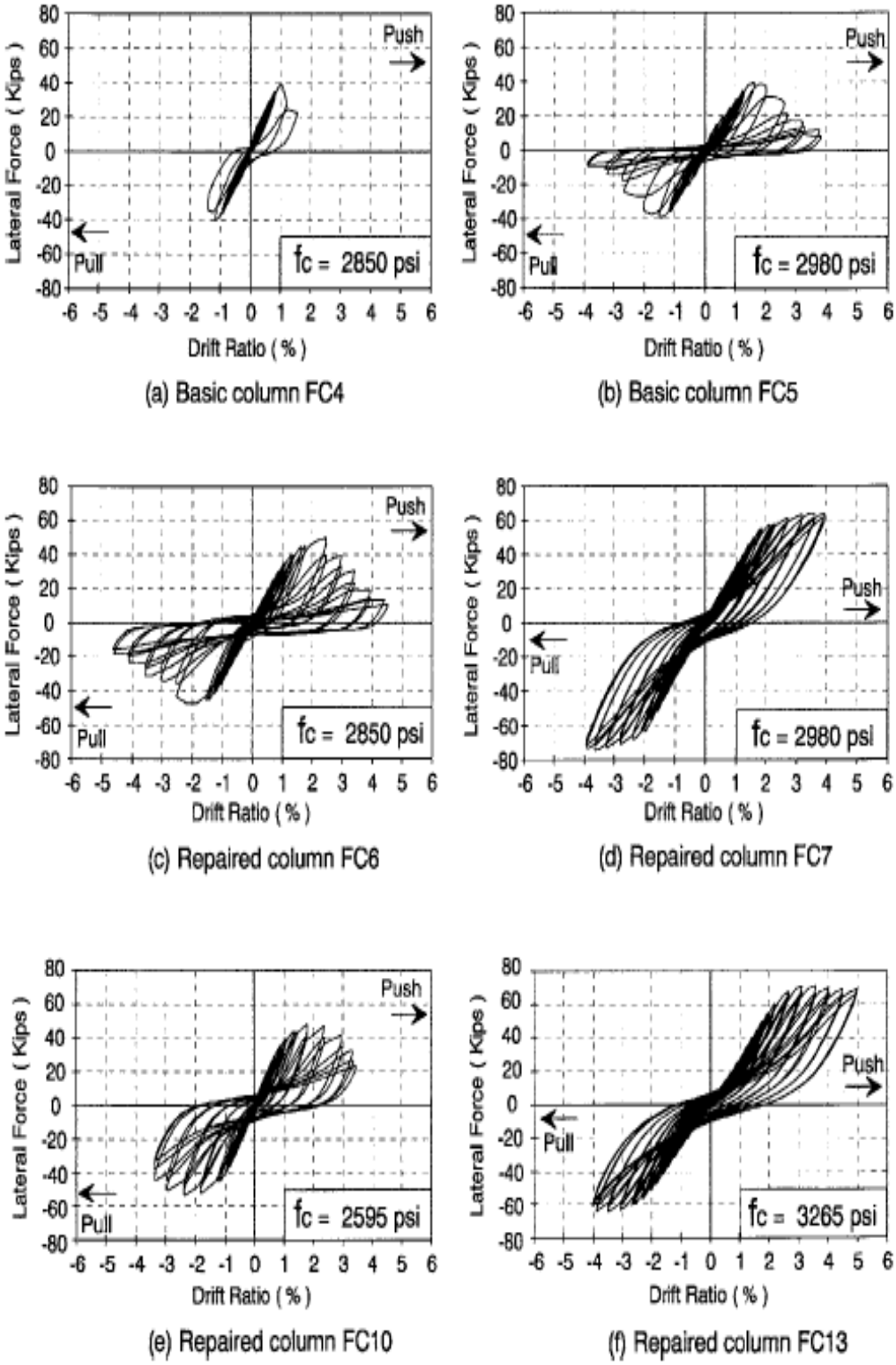


รูปที่ 2.15 รอยแตกร้าวเสา FC 4 (Aboutaha และคณะ 1999)

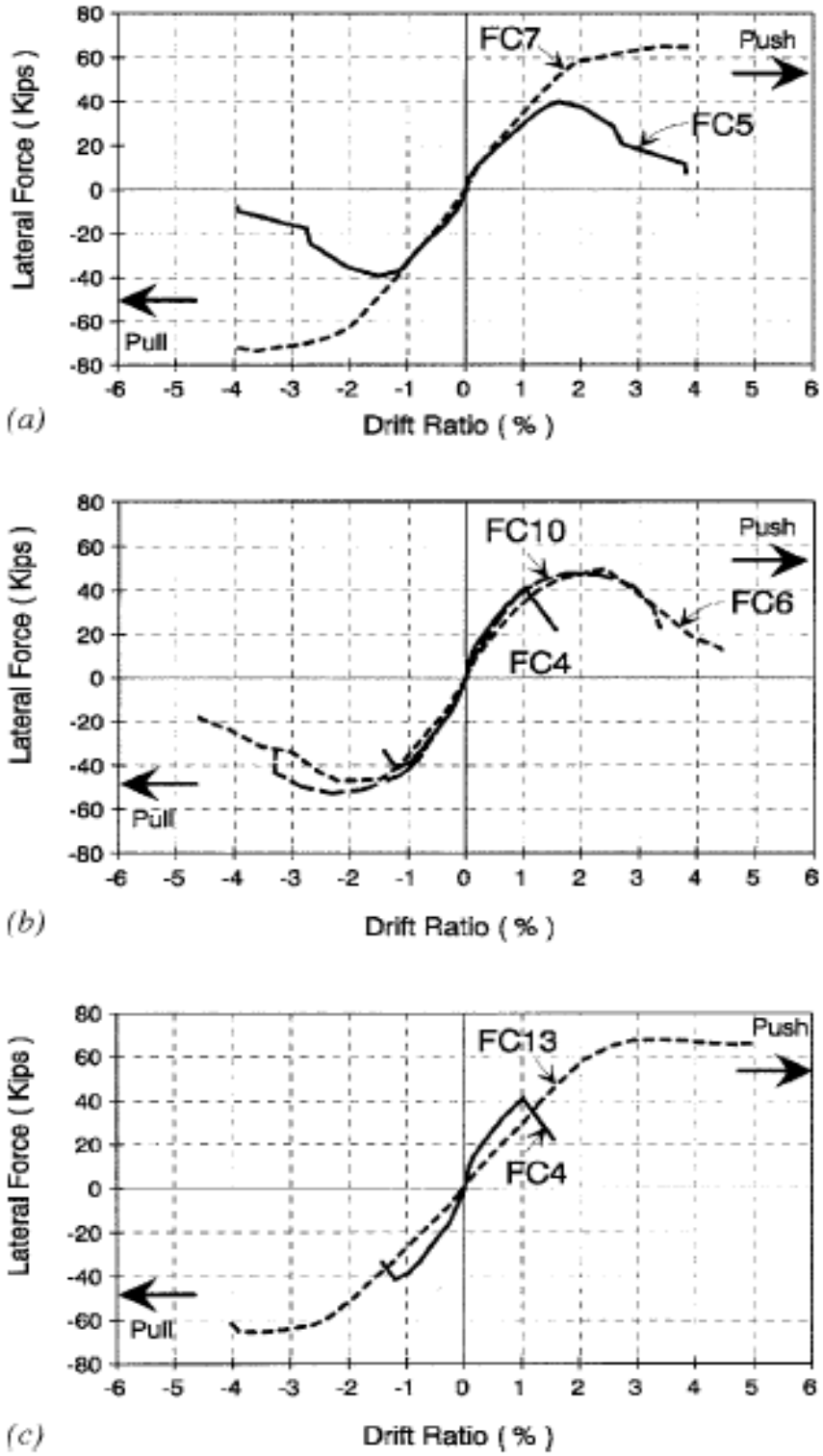



(a)การปรับปรุงเสาก่อนการยึดแผ่นเหล็ก (b) การปรับปรุงเสาหลังการยึดแผ่นเหล็ก

รูปที่ 2.16 แสดงการปรับปรุงเสา FC 13 (Aboutaha และคณะ 1999)



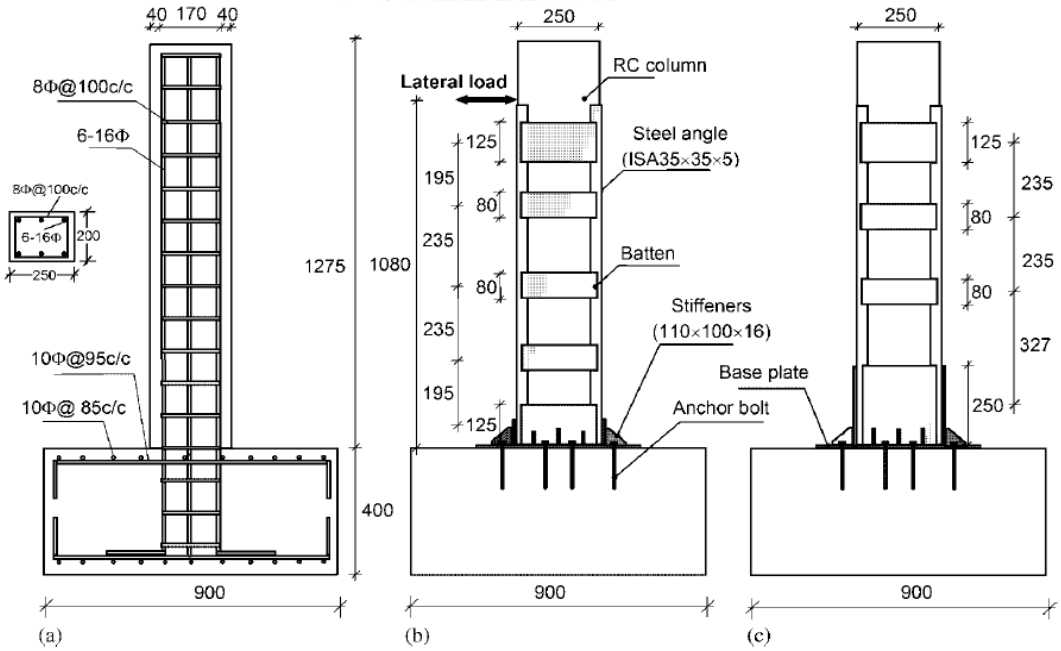

รูปที่ 2.17 แสดงแรงกระทำด้านข้างกับเปอร์เซ็นต์อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาทดสอบ (Aboutaha และคณะ 1999)




รูปที่ 2.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าเส้นโค้งขอบนอก (Envelop) ของเสาทดสอบ (Aboutaha และคณะ 1999)

## 2.3 การเสริมกำลังของเสาด้วยเหล็กฉากที่มุมเสา มีแผ่นเหล็กเชื่อมเป็นช่วงๆ

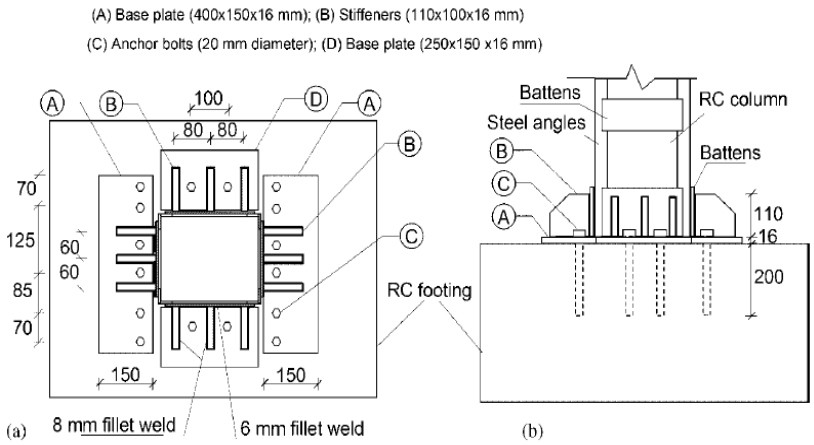
Nagaprasad และคณะ (2009) ทำการทดสอบเสาจำนวน3ต้น เสาขนาดหน้าตัด 200X250 มิลลิเมตร สูง1275 มิลลิเมตร เหล็กเสริมแกนเสาจำนวน 6เส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง16 มิลลิเมตร เหล็กปลอกเสาเส้นผ่าศูนย์ 8มิลลิเมตร ระยะห่างของปลอก100 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วย RCO เป็นเสาต้นแบบ RCS1 เป็นเสาที่ทำการเสริมกำลังโดยใช้เหล็กฉากขนาด35x35x5มิลลิเมตรประกบที่มุมเสา แล้วนำแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร มาเชื่อมรัดเป็นช่วงๆ และที่ฐานยึดแผ่นเหล็กหนา16 มิลลิเมตรด้วยสลักเกลียว (ดูรูปที่1และ2) ส่วน เสา RCS2 มีรูปแบบการเสริมกำลังเช่นเดียวกับเสาRCS1 แต่จะแตกต่างกันตรง แผ่นเหล็กที่โคนเสามีความสูง 250 มิลลิเมตร( ดูรูปที่19 (c))ผลจากการทดสอบสรุปได้ว่าค่าแรงกระทำด้านข้างของเสา RCS2 สามารถรับแรงกระทำด้านข้าง และ ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างได้มากกว่าเสา RCS1 ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แผ่นเหล็กโอบรัดที่โคนเสามีความสูงมากกว่า ทำให้เกิดการโอบรับคอนกรีตได้ดี



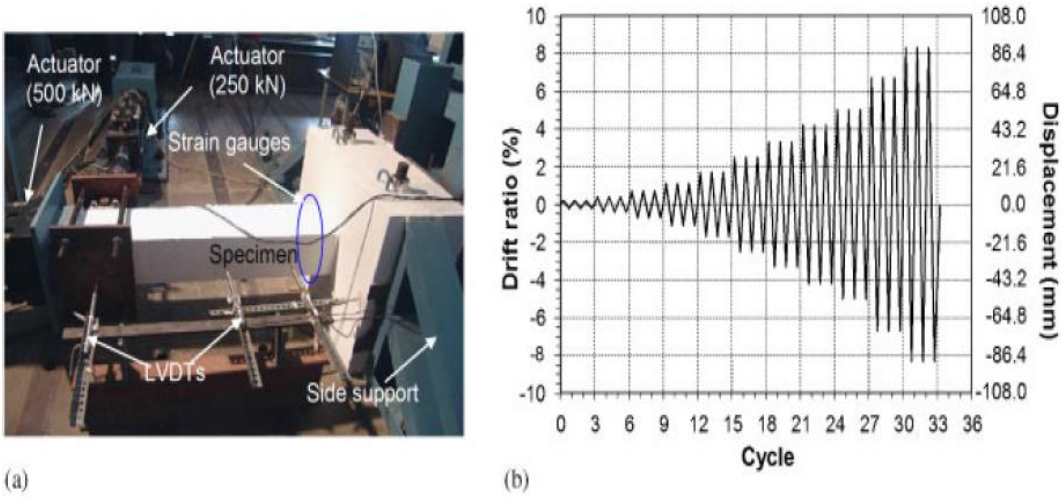

รูปที่ 2.19 ขนาดหน้าตัดและการเสริมกำลังของเสาทดสอบ (a) แสดงขนาดหน้าตัด และ เหล็กเสริมเสา RCO (b) เสาที่เสริมกำลัง RCS1 (c) เสาที่เสริมกำลัง RCS2 (Nagaprasad และคณะ 2009)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริม (Nagaprasad และคณะ 2009)

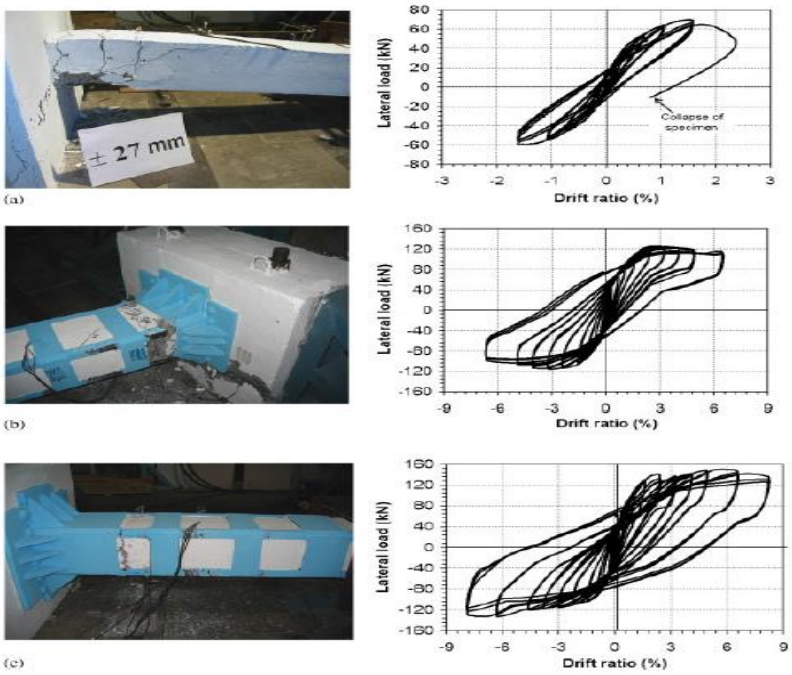
| Concrete | | Cube compressive strength (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 7 days | 28 days | Day of testing |
| Specimen | RCO | 20.6 | 32.5 | 38.0 |
| | RCS1 | 25.8 | 37.7 | 45.5 |
| | RCS2 | 25.6 | 34.7 | 39.9 |
| Size of rebars | | Yield strength (MPa) | | Tensile strength (MPa) |
| 8 mm | | 438.5 | | 542.0 |
| 10 mm | | 489.0 | | 668.0 |
| 16 mm | | 468.4 | | 623.2 |
| Angle section | | 353.0 | | 498.0 |
| Batten plate | | 330.0 | | 518.0 |



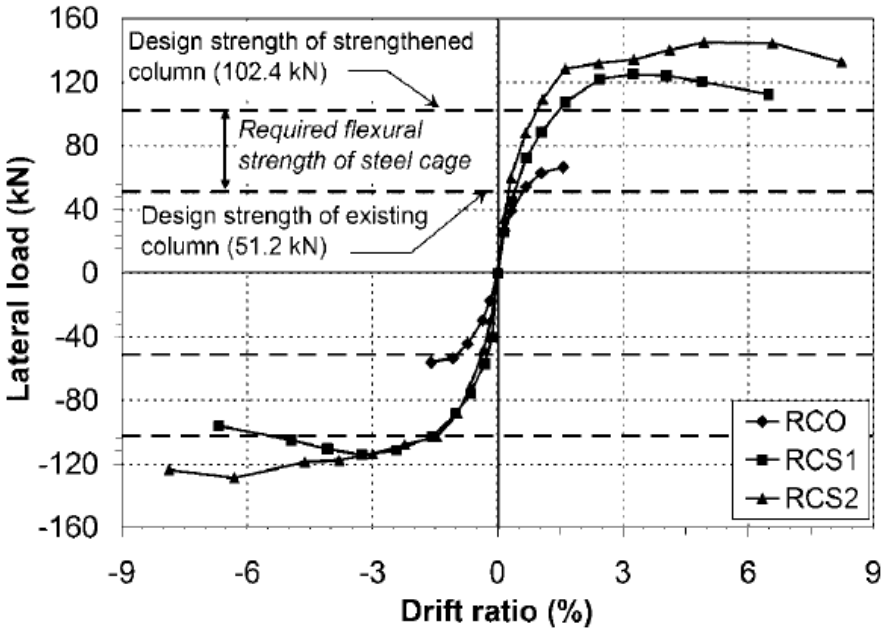

รูปที่ 2.20 แสดงการเชื่อมยึด (a) รูปด้านบน (b) รูปด้านข้าง (Nagaprasad และคณะ 2009)




รูปที่ 2.21 แสดงการติดตั้งทดสอบเสา RCO(a)ติดตั้งเสา RCO (b) อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Nagaprasad และคณะ 2009)

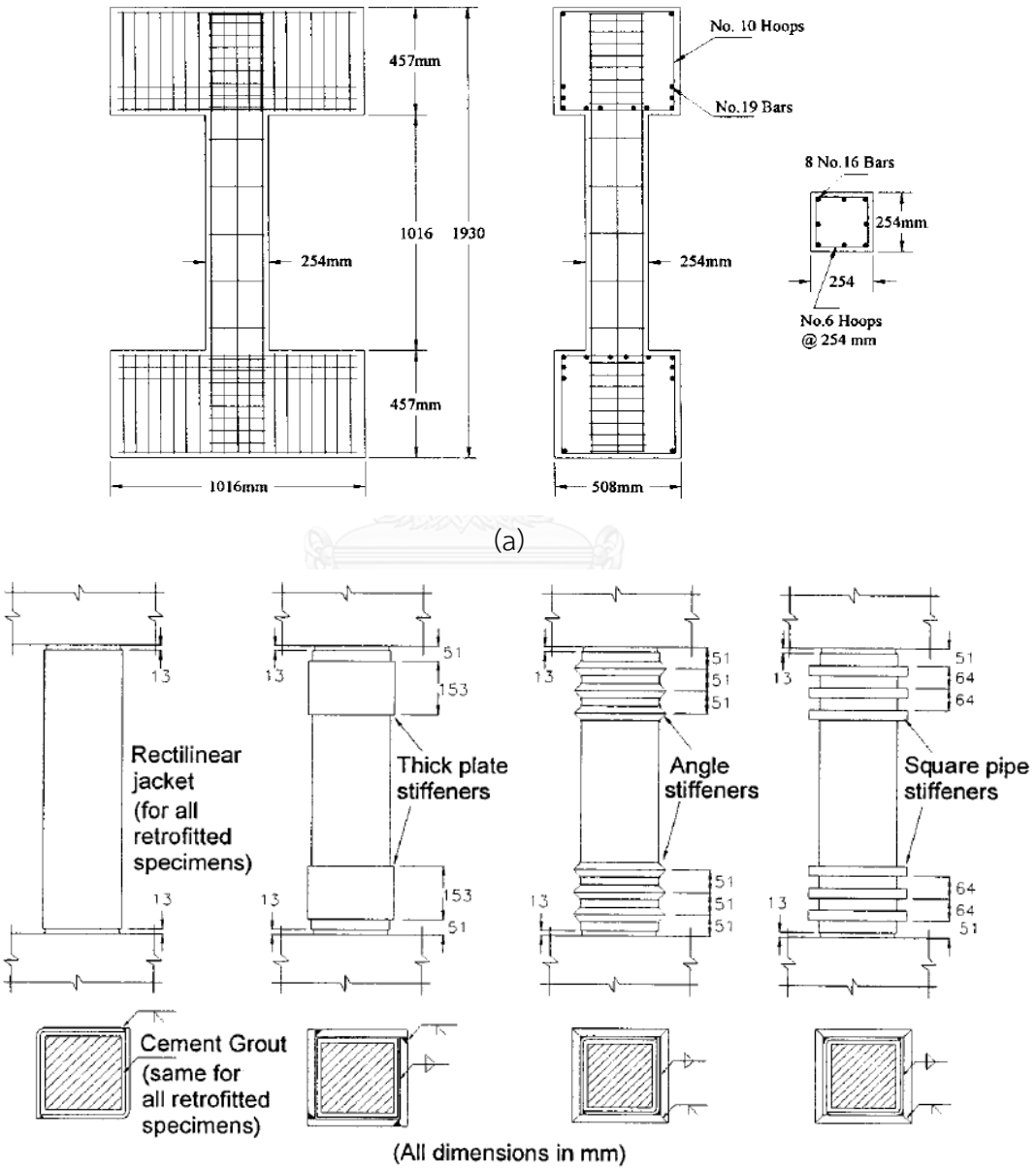



รูปที่ 2.22 แสดงความเสียหายหลังทดสอบ และ แสดงแรงกระทำด้านข้างกับเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ด้านข้าง (a) เสาทดสอบRCO (b) เสาทดสอบRCS1 (d) เสาทดสอบ RCS2 (Nagaprasad และคณะ 2009)

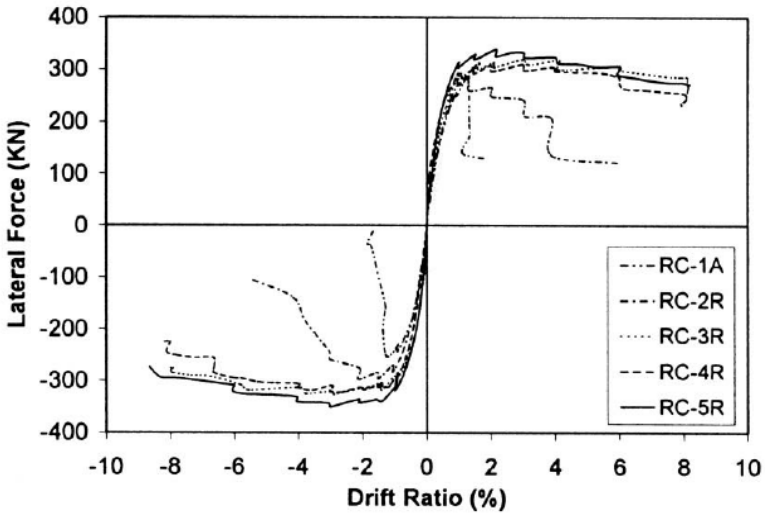



รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าเส้นโค้งขอบนอก(Envelop)ของเสาทดสอบ (Nagaprasad และคณะ 2009)

Xiao และ Wu (2003) ได้ทำการทดสอบเสาโดยการหุ้มรอบเสาด้วยแผ่นเหล็กบาง ช่องว่างระหว่างเสาและแผ่นเหล็กใช้ Cement Grout โดยทดสอบเสาทั้งหมด4 ต้น ส่วนที่แตกต่างกันคือในช่วงโคนเสา และหัวเสาใช้แผ่นเหล็กทับอีกชั้น อีกตัวอย่างใช้เหล็กฉากทับ และอีกตัวอย่างใช้เหล็กกล่องทับ ผลจากการทดสอบได้ค่าแรงกระทำด้านข้างและอัตราการ การเคลื่อนที่ด้านข้างมีค่าใกล้เคียงกันมากของตัวอย่าง RC-3R, RC-4R, RC-5R

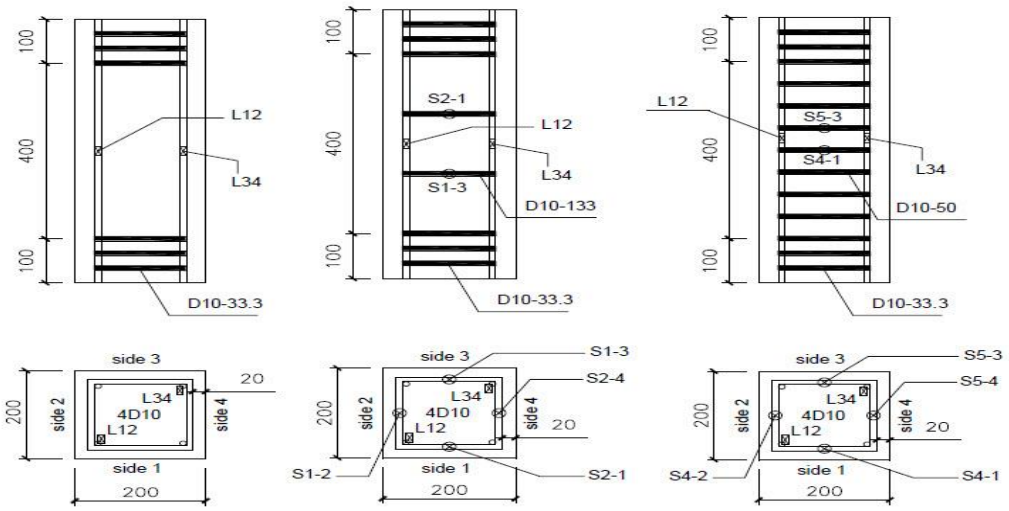



รูปที่ 2.24 (a)ขนาดหน้าตัดเสา (b)การเสริมกำลัง (Xiao และ Wu 2003)



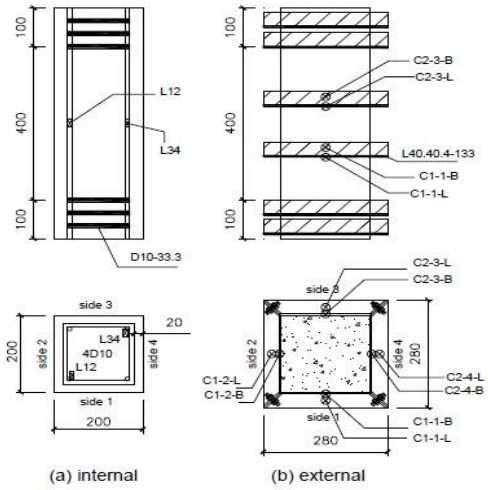

รูปที่ 2.25 แสดงเส้นโค้งขอบนอกเปรียบเทียบของตัวอย่างแต่ละชนิด(Xiao และ Wu 2003)

Pudjisuryadi และ Suprobo (2016) การศึกษาการโอบรัดภายนอกด้วยเหล็กฉากของเสาขนาดหน้าตัด 0.20 เมตร x 0.20 เมตร สูง 0.60 เมตรจำนวนทั้งหมด 8 ต้น ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนเสา โดยแยกออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือภายในเสากำหนดระยะห่างเหล็กปลอก และภายนอกเสากำหนดระยะห่างของปลอกเหล็กฉาก และในมุมเสาภายนอกทั้งสี่ด้านของปลอกเหล็กฉาก ใช้สลักเกลียวเป็นตัวยึดให้แน่น จากการทดสอบพบว่าการใช้ปลอกเหล็กฉากภายนอก ในเสาต้นที่ใช้จำนวนปลอกเหล็กฉาก 5 ปลอกเหล็กฉากรับแรงกระทำตามแนวแกนเสาได้ดีที่สุด การวิบัติของเสาทดสอบส่วนมากเกิดจาก คอนกรีตแตกร้าวในส่วนที่ไม่มีการโอบรัด เหล็กตามแนวแกนโก่งเดาะ และที่มุมเหล็กฉากเกิดการฉีกขาดของเหล็กฉาก

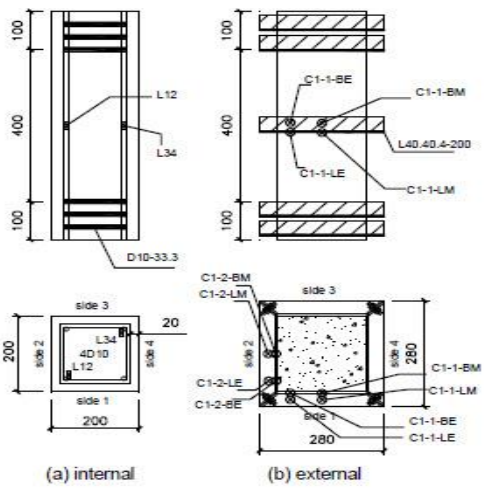



(ก) CS01 (ข) CS02a (ค) CS03a

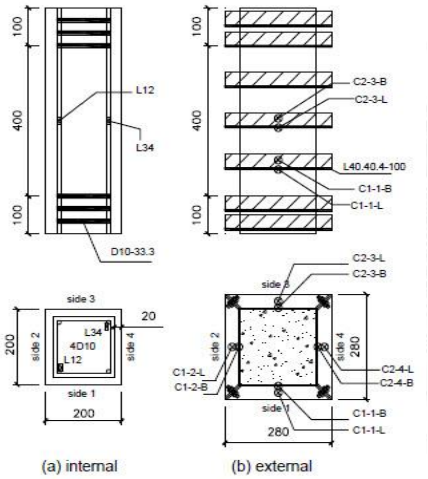
รูปที่ 2.26 ตัวอย่างเสาควบคุม (Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)



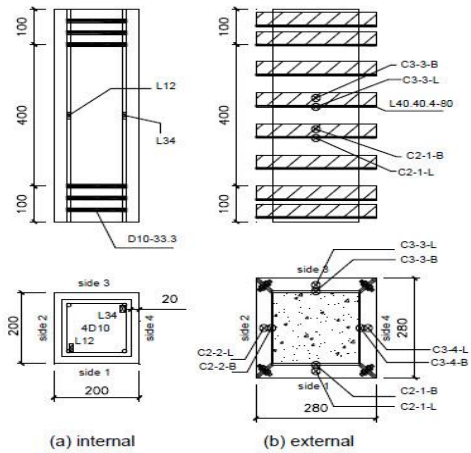

(ก) เสาทดสอบ S01



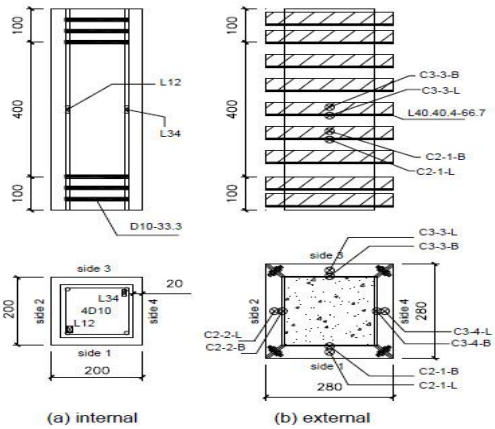

(ข) เสาทดสอบ S02




(ค) เสาทดสอบ S03




(ง) เสาทดสอบ S04

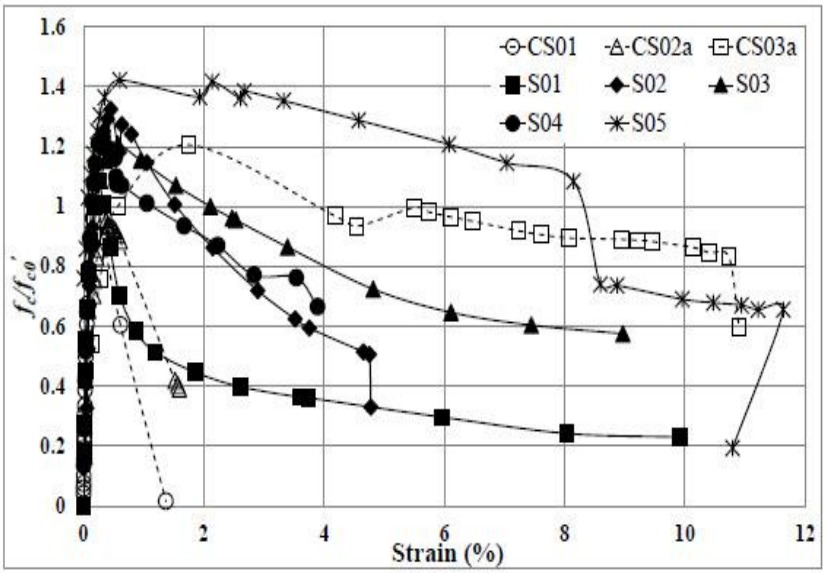



(จ) เสาทดสอบ S05

รูปที่ 2.27 หน้าตัดภายในและภายนอกของเสาตัวอย่างทดสอบ S01, S02, S03, S04, S05 (Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)

ตารางที่ 2.9 แสดงเหล็กเสริมภายในเสา และปริมาตรปลอกเหล็กฉากภายนอกเสา (Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)

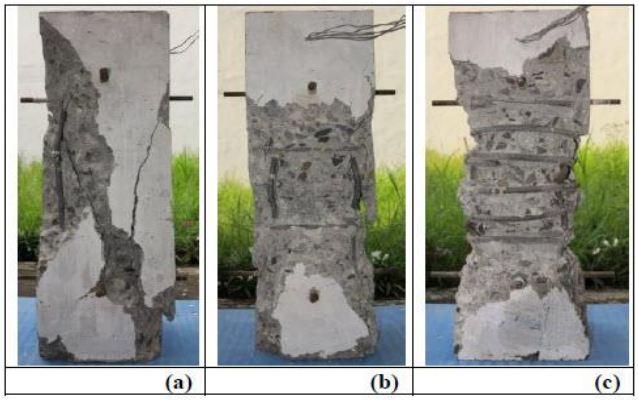
| Label | Long Bars | Confinement Elements |
|---|---|---|
| CS01 | 4 D10 | None |
| CS02a | 4 D10 | D10-133 (vol. ratio = 0.89%) |
| CS03a | 4 D10 | D10-50 (vol. ratio = 2.36%) |
| S01 | 4 D10 | L40.40.4-200 (vol. ratio = 3.84%) |
| S02 | 4 D10 | L40.40.4-133 (vol. ratio = 5.77%) |
| S03 | 4 D10 | L40.40.4-100 (vol. ratio = 7.68%) |
| S04 | 4 D10 | L40.40.4-80 (vol. ratio = 9.60%) |
| S05 | 4 D10 | L40.40.4-67 (vol. ratio = 11.34%) |




รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเสาตัวอย่างทดสอบ (Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)

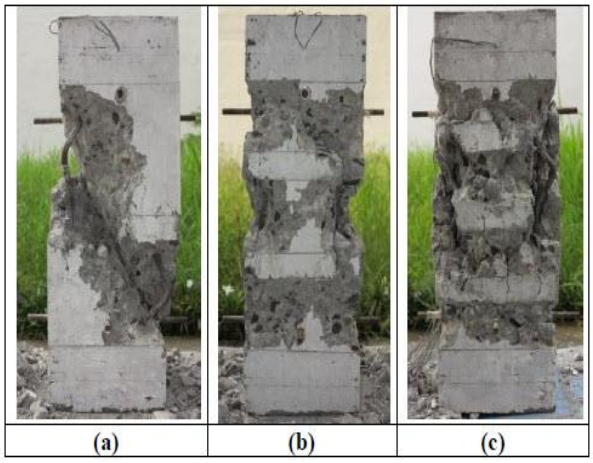
ตารางที่ 2.10 ผลทดสอบเสาภายใต้แรงอัดตามแนวแกน (Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)

| Parameter | CS01 | CS02a | Cs03a | S01 | S02 | S03 | S04 | S05 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_{cmax}$-kN | 676 | 645 | 815 | 733 | 896 | 817 | 833 | 961 |
| $\varepsilon_{cc}$ (%) | 0.23 | 0.38 | 1.75 | 0.26 | 0.45 | 0.57 | 0.33 | 1.83 |
| $\varepsilon_{f85}$ (%) | 0.38 | 0.76 | 3.61 | 0.53 | 1.12 | 1.89 | 0.80 | 6.07 |
| $\varepsilon_{f50}$ (%) | 1.37 | 1.57 | 10.9 | 1.86 | 3.76 | 8.97 | 3.89 | 10.8 |
| $\mu_\varepsilon = \varepsilon_{f85}/\varepsilon_{01}$ | 1.63 | 3.27 | 15.6 | 2.30 | 4.84 | 8.15 | 3.46 | 26.2 |
| $f'_{cc}$ (MPa) | 17.0 | 16.2 | 20.5 | 18.5 | 22.6 | 20.6 | 21.0 | 24.2 |
| $f'_{cc}/f'_{c0}$ | 1.00 | 0.95 | 1.21 | 1.08 | 1.32 | 1.21 | 1.23 | 1.42 |



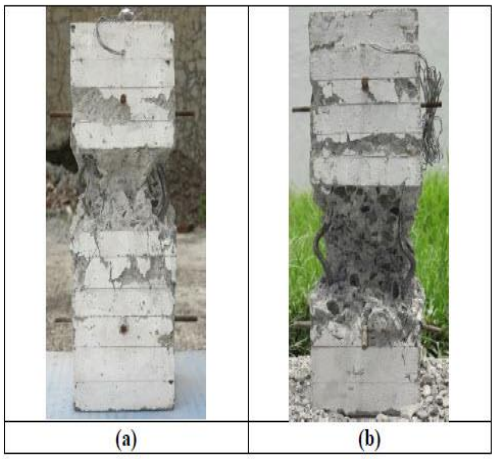

รูปที่ 2.29 ความเสียหายหลังทดสอบ (a) CSO1, (b) CS02a, (c) CS03a

(Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)



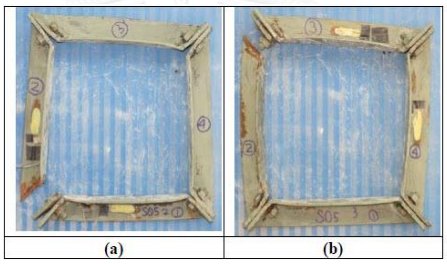

รูปที่ 2.30 ความเสียหายหลังทดสอบ (a) SO1, (b) S02a, (c) S03a

(Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)




รูปที่ 2.31 ความเสียหายหลังทดสอบ (a) SO4, (b) S05

(Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)



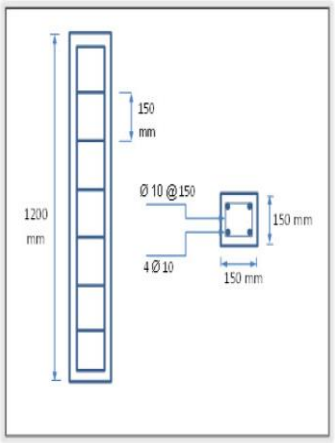

รูปที่ 2.32 ความเสียหายหลังทดสอบปลอกเหล็กฉาก (Pudjisuryadi และ Suprobo 2016)

Mosheer (2016) ทำการศึกษาการเสริมกำลังของเสาหน้าตัด 0.15เมตร x 0.15 เมตร สูง 1.20 เมตร เหล็กเสริมตามแนวแกน 4RB10 และเหล็กเสริมทางขวาง RB10 ระยะห่าง0.10 เมตร เหมือนกันทุกต้น โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มแรกทำการเสริมกำลังด้วยปลอกเหล็กฉาก และกลุ่มที่สองทำการซ่อมแซมเสาที่เสียหายจากการทดสอบแล้วเสริมกำลังด้วยปลอกเหล็กฉาก โดยตัวอย่างทดสอบทั้งทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนเสา

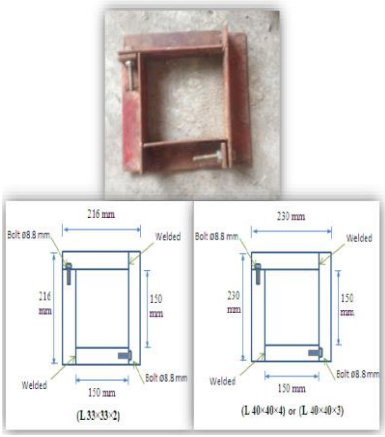
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติคอนกรีต และ เหล็กฉาก (Mosheer 2016)

| Mixing ratio | $f'c$, MPa | $fr$, MPa |
|---|---|---|
| 1:2:4 | 22.2 | 2.89 |
| 1:1.5:3 | 26.5 | 3.15 |
| 1:1.25:2.5 | 29.4 | 3.30 |

| Material type | $f_y$ | $f_u$ |
|---|---|---|
| Ø 10 | 437 | 690 |
| L33×33×2 | 440 | 663 |
| L40×40×3 | 435 | 674 |
| L40×40×4 | 422 | 636 |

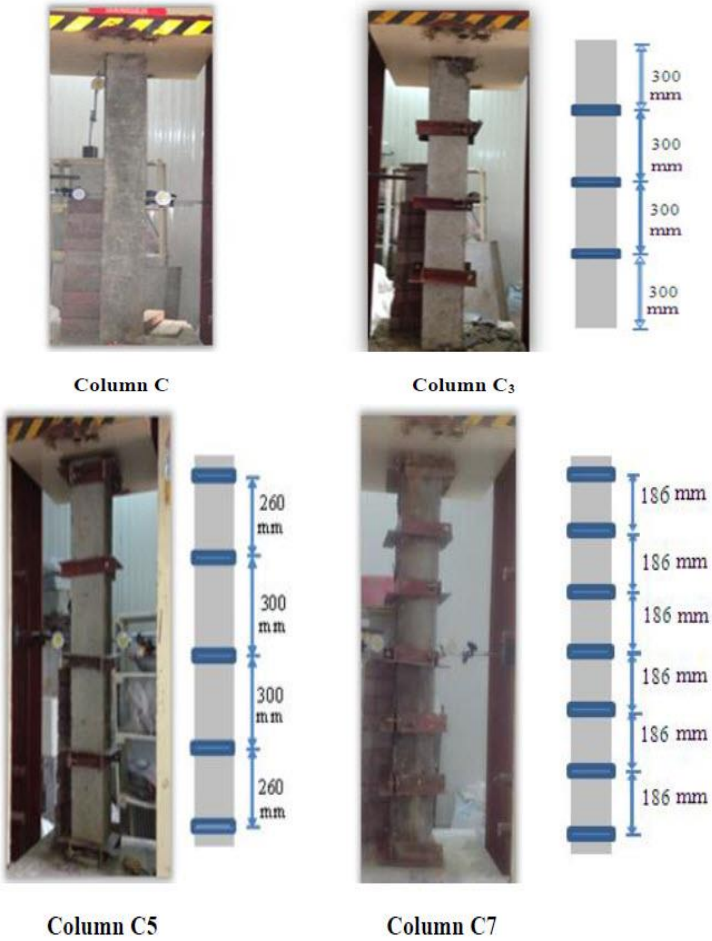



(ก) หน้าตัดตัวอย่างทดสอบ

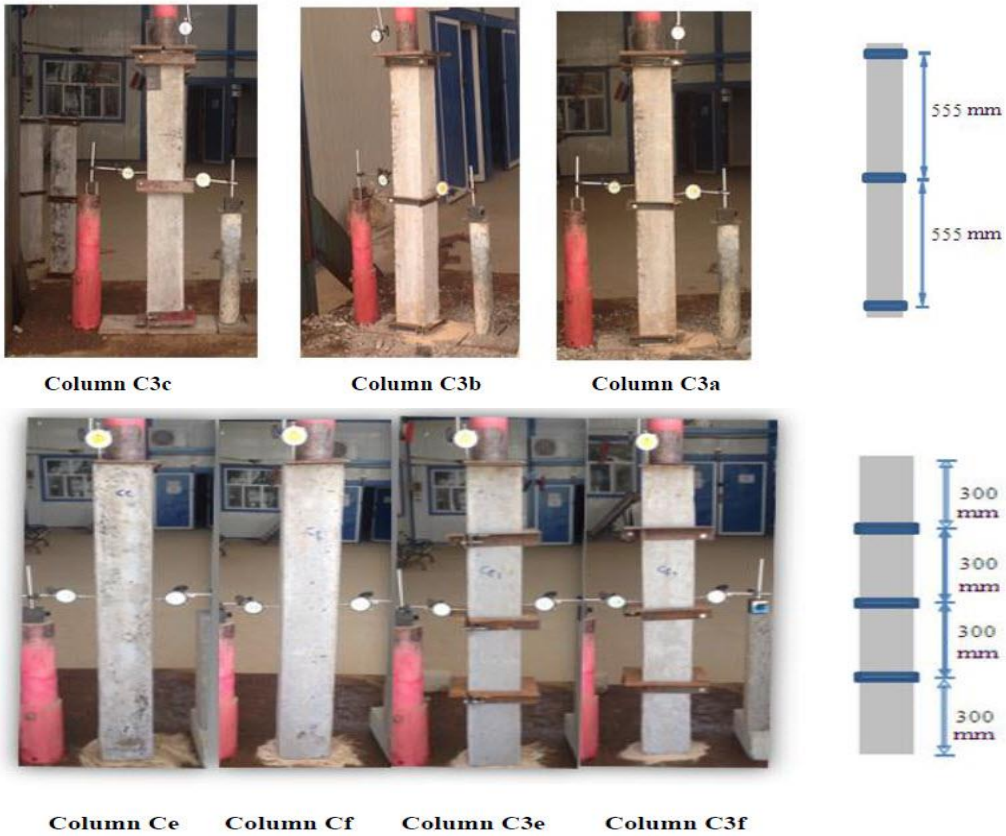



(ข) ขนาดหน้าตัดปลอกเหล็กฉาก

รูปที่ 2.33 (ก) หน้าตัดตัวอย่างทดสอบ (ข) ขนาดหน้าตัดปลอกเหล็กฉาก (Mosheer 2016)




รูปที่ 2.34 การเสริมปลอกเหล็กฉากของเสาทดสอบ (Mosheer 2016)



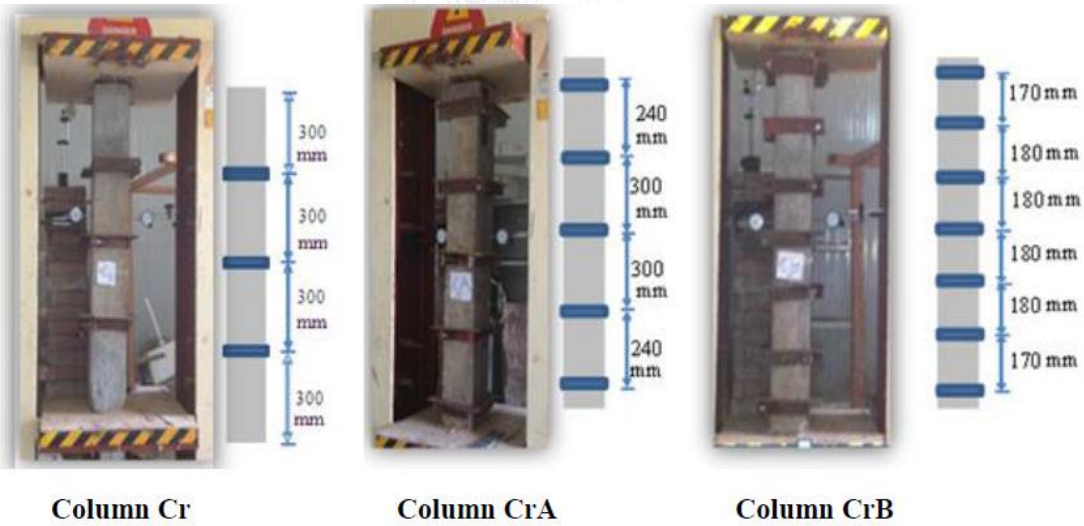

รูปที่ 2.35 ตัวอย่างทดสอบ C3c, C3b, C3a, Ce, Cr, C3e, C3f (Mosheer 2016)

ตารางที่ 2.12 ผลการทดสอบ (Mosheer 2016)

| Ref. non-collar column symbol | Column symbol | Steel angle dimension (mm) $b_c \times h_c \times t$ | $f_c'$ (MPa) | No. of collar in column | $\rho_{collar}$ * | ultimate axial load for Ref. columns (P) kN | ultimate axial load for strengthening olumns (Ps) kN | Increasing rate in axial strength for strengthening columns $\frac{P_S - P}{P}$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | C | - | 26.5 | 0 | 0 | 364 | - | - |
| | C3 | 40×40×4 | 26.5 | 3 | 0.100 | - | 409 | + 12.36 |
| | C5 | 40×40×4 | 26.5 | 5 | 0.166 | - | 467 | + 28.29 |
| | C7 | 40×40×4 | 26.5 | 7 | 0.233 | - | 568 | + 56.04 |
| C | $C_3a$ | 33×33×2 | 26.5 | 3 | 0.0825 | - | 410 | + 12.60 |
| | $C_3b$ | 40×40×3 | 26.5 | 3 | 0.100 | - | 422 | + 15.93 |
| | $C_3c$ | 40×40×4 | 26.5 | 3 | 0.100 | - | 432 | + 18.68 |
| Ce | Ce | - | 22.2 | 0 | 0 | 321 | | - |
| | C3e | 40×40×4 | 22.2 | 3 | 0.100 | - | 363 | + 13.0 |
| Cf | Cf | - | 29.4 | 0 | 0 | 402 | | - |
| | C3f | 40×40×4 | 29.4 | 3 | 0.100 | - | 431 | +7.20 |

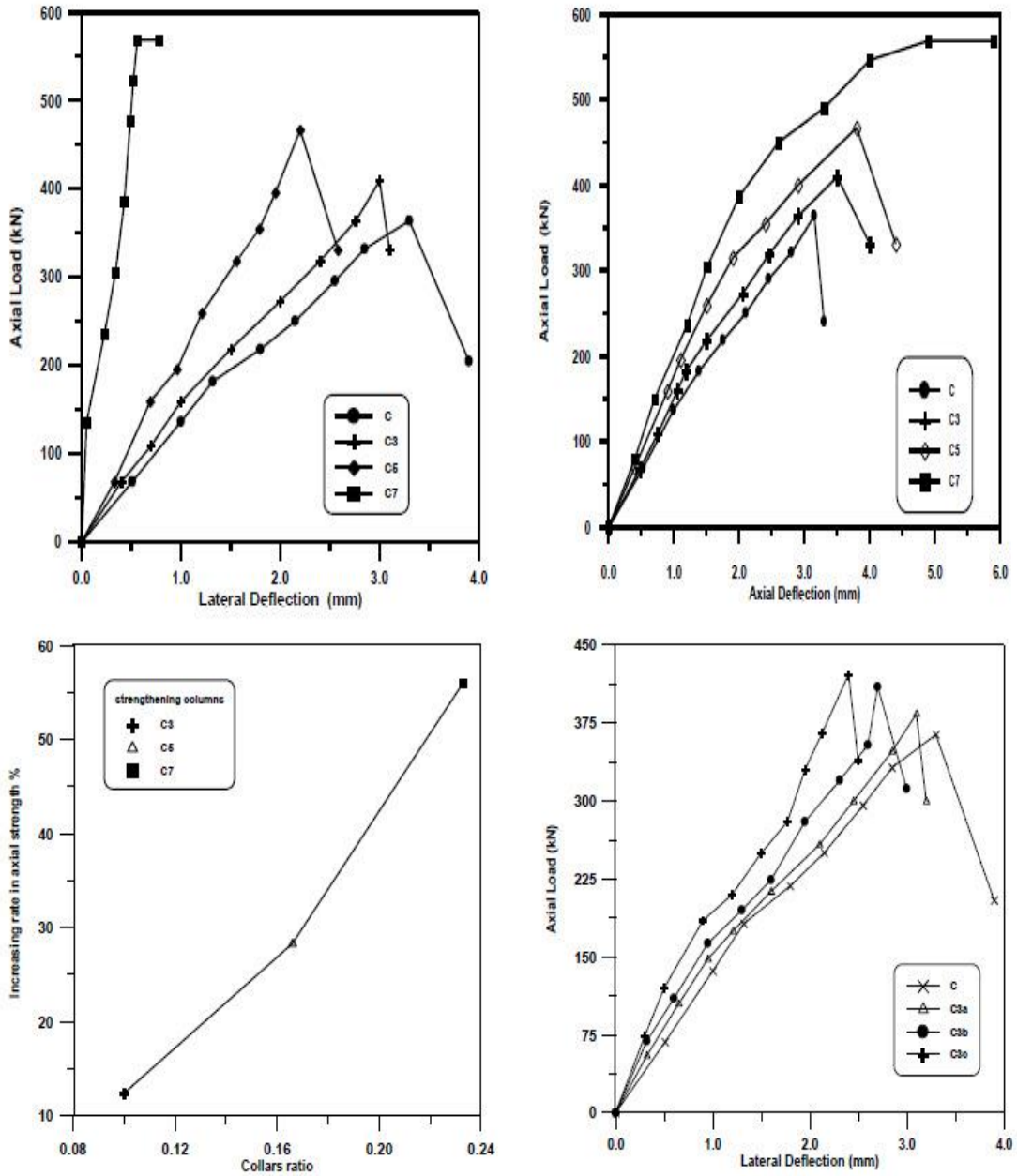
นำเสา C, CA, CB ไปทดสอบ หลังจากนั้นสกัดคอนกรีตที่เสียหายออก แล้วทำการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ผสมทรายและน้ำ หลังจากซ่อมแซมเสร็จก็เสริมกำลังด้วยปลอกเหล็กฉาก แล้วนำกลับไปทดสอบอีกครั้ง (Cr, CrA, CrB )


(ก) เสาทดสอบC, CA, CB

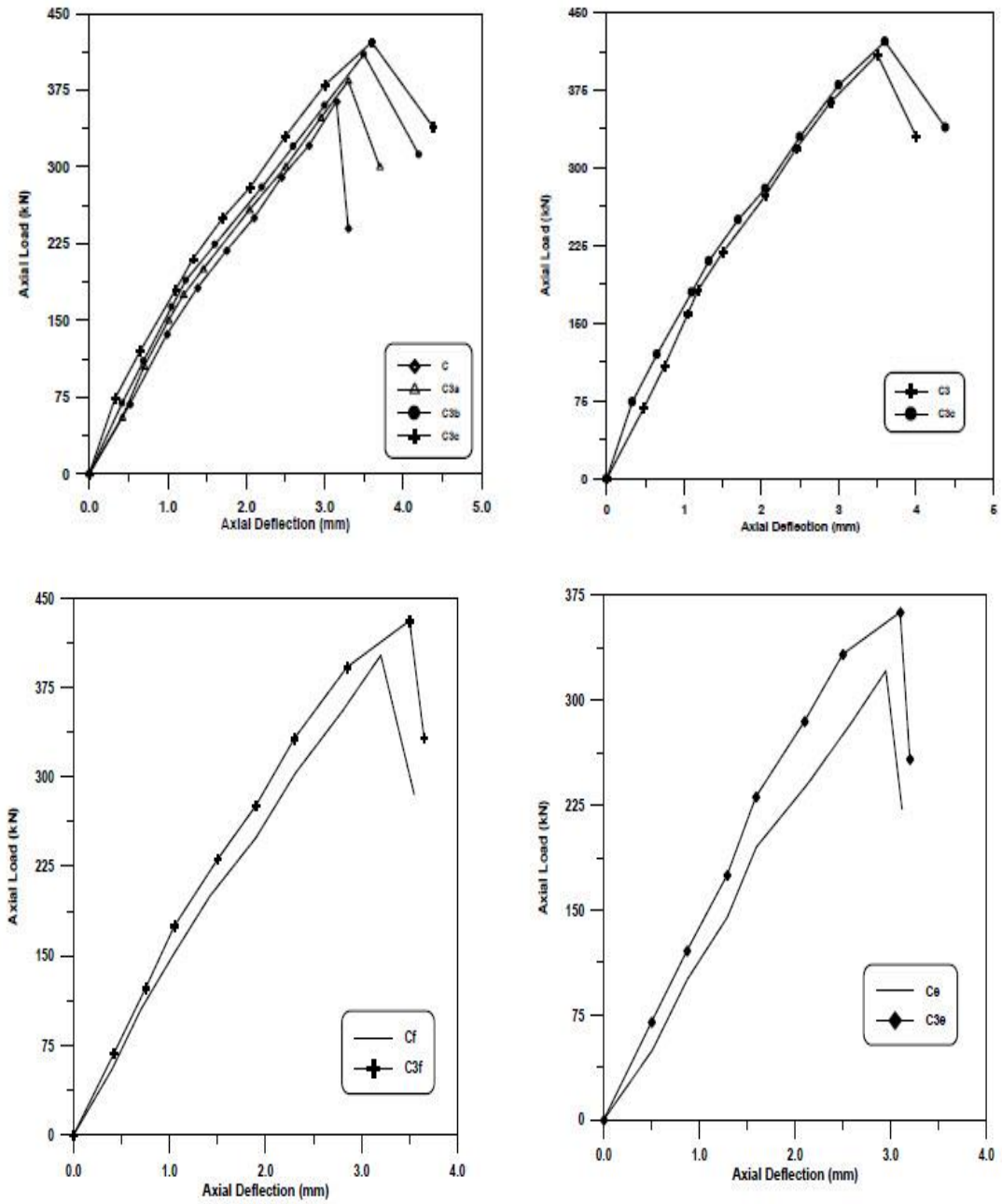



(ข) เสาที่ซ่อมแซมแล้ว

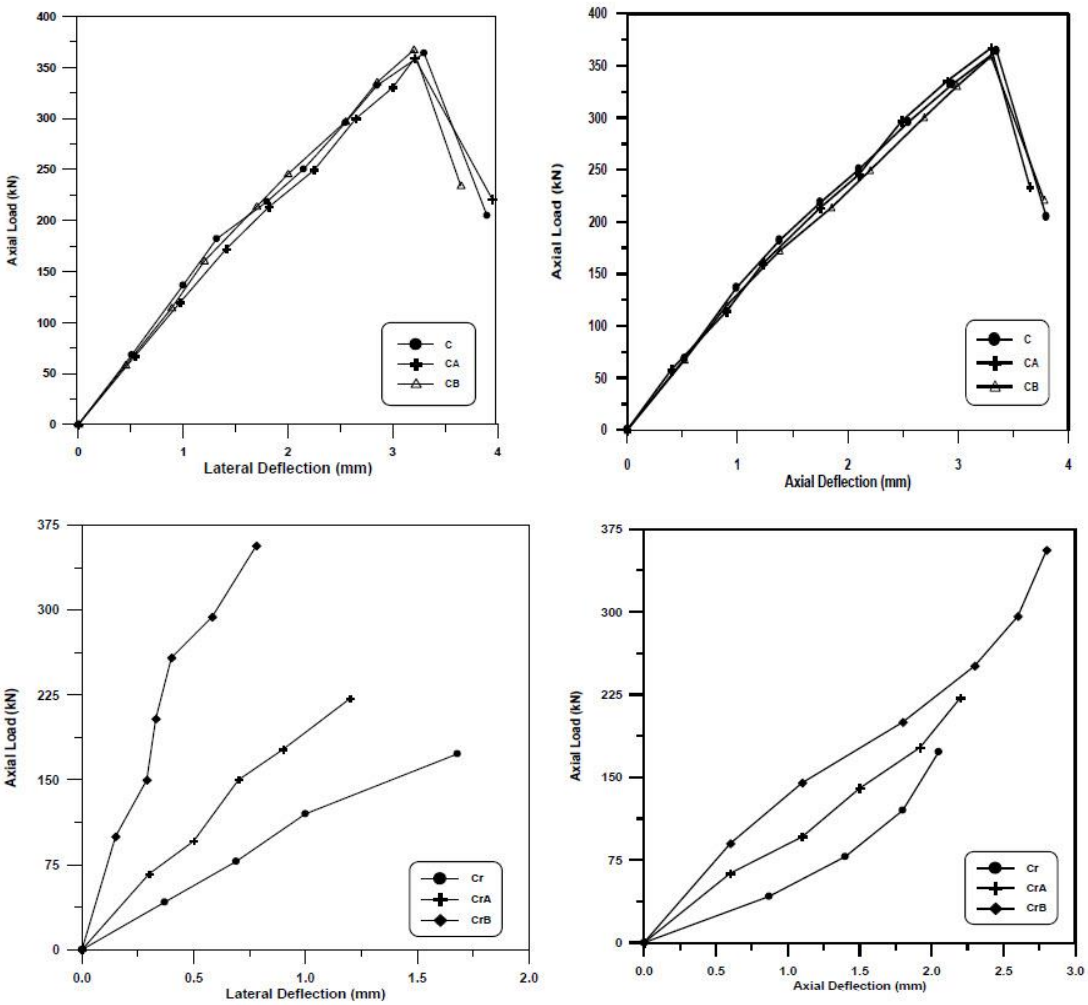
รูปที่ 2.36 (ก) เสาทดสอบC, CA, CB (ข) เสาที่ซ่อมแซมแล้ว (Mosheer 2016)




รูปที่ 2.37 ผลการทดสอบเสา C, C3, C5, C7, C3a, C3b, C3c (Mosheer 2016)




รูปที่ 2.38 ผลกการทดสอบเสา C, C3a, C3b, C3c, C3, Ce, C3f (Mosheer 2016)



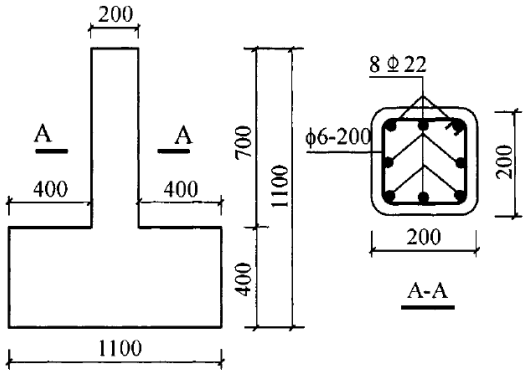

รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับ ระยะการเคลื่อนที่แนวดิ่ง และระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาทดสอบ (Mosheer 2016)

ตารางที่ 2.13 สรุปผลการทดสอบC, CA, CB, Cr, CrA, CrB (Mosheer 2016)

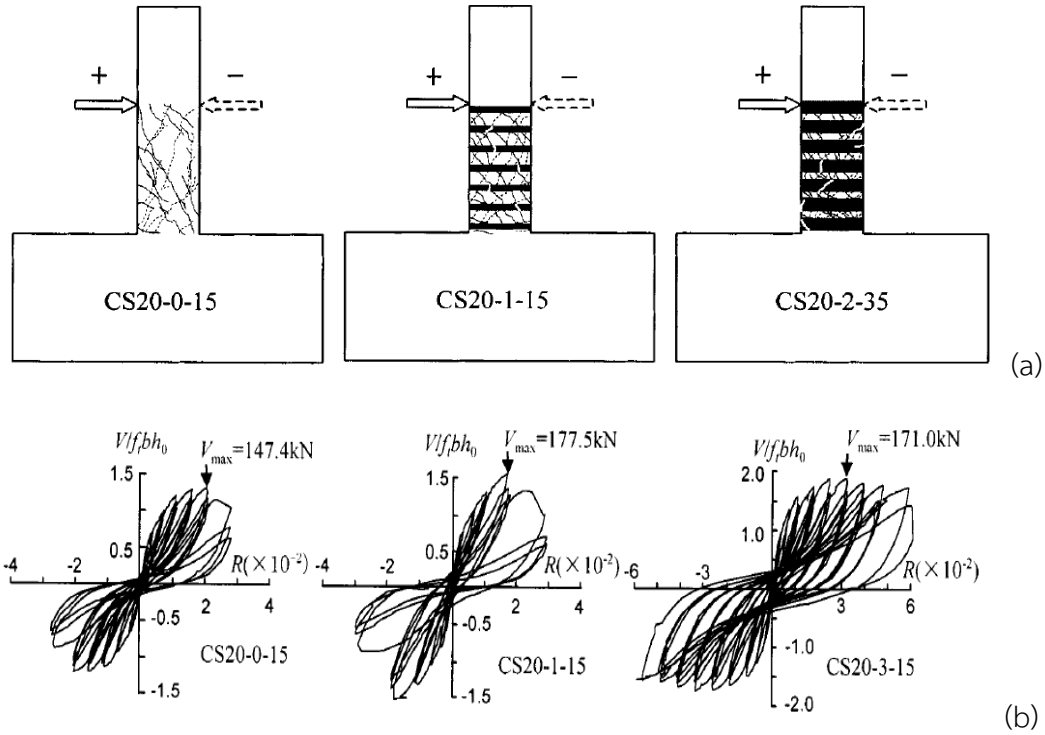
| Column symbol | Ultimate Axial load (P) kN | $f_c'$ (MPa) | Column symbol after repairing | Steel angle dimension (mm) $b_c \times h_c \times t$ | No. of collar in repairing column | $\rho_{collar}$ | Ultimate Axial load after repairing ($P_R$) kN | Inceasing rate in axial load after repairing $\frac{P_R}{P}$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 364 | 26.5 | Cr | 40×40×4 | 3 | 0.100 | 173 | + 47.5 |
| CA | 358 | 26.5 | CrA | 40×40×4 | 5 | 0.166 | 222 | + 62.0 |
| CB | 367 | 26.5 | CrB | 40×40×4 | 7 | 0.233 | 355 | + 96.7 |

## 2.4 การเสริมกำลังของเสาด้วย Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Sheet

Ye และคณะ (2002) ได้ทำการทดสอบเสาโดยการใช้ CFRP พันรอบเสาเป็นช่วงๆ แล้วทำการให้แรงกระทำตามแนวแกนคงที่ แรงด้านข้างเป็นแบบวัฏจักร โดยกำหนดให้ค่าความกว้างของแผ่นแตกต่างกัน ซึ่งพบว่า เมื่อให้ค่าช่องว่างที่ไม่ทีแผ่นCFRP น้อยจะให้ค่ากำลังได้มากกว่า ระยะช่องว่างมาก




รูปที่ 2.40 แสดงตัวอย่างหน้าตัดเสา (Ye และคณะ 2002)

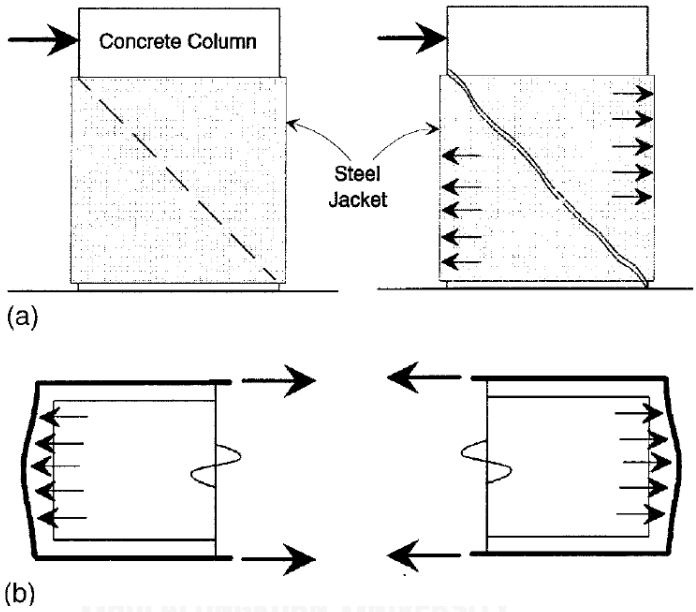



รูปที่ 2.41 (a)รอยแตกร้าวหลังทดสอบ (b)แรงกระทำด้านข้างกับอัตราการเคลื่อนที่เชิงมุม (Ye และคณะ 2002)

## 2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การหาค่าหน่วยแรงในแผ่นเหล็ก

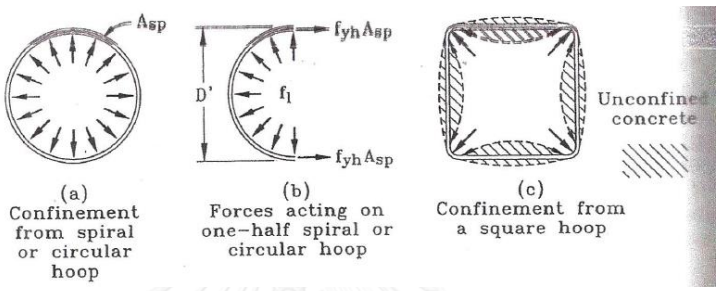
สำหรับเสาสั้นการวิบัติจะเป็นแบบแรงเฉือน ดังนั้นเมื่อนำแผ่นเหล็กมาโอบรัด ก็จะช่วยในการรับแรงขึ้น โดยแผ่นเหล็กต้องแนบสนิทกับเสาจึงจะทำให้แผ่นเหล็กทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีแรงมากระทำกับเสาสั้น แรงภายนอกจะพยายามดันให้เสาขยับไปตาม แต่เมื่อมีแผ่นเหล็กโอบรัดไว้ แผ่นเหล็กจะเป็นตัวช่วยรับแรงภายนอก โดยด้านที่ปะทะกับแรงภายนอก ภายในแผ่นเหล็กจะเกิดความเค้นอัด ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นดึงในแผ่นเหล็กทีผิวข้างของเสาสั้น



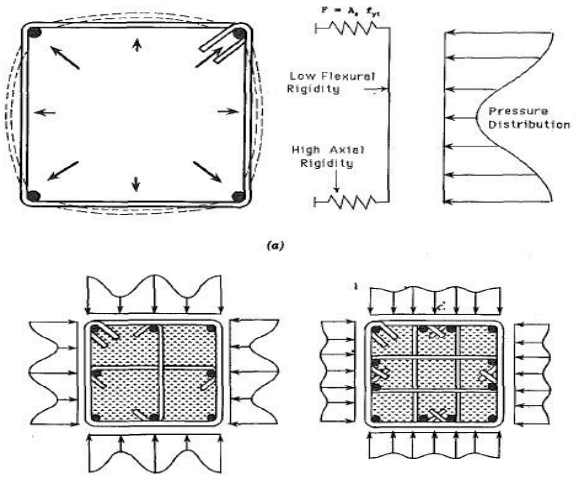

รูปที่ 2.42 แสดงแรงภายนอกกระทำกับเสา แล้วเกิดแรงปฏิกิริยา (a)ด้านข้าง (b)ด้านบน (Aboutaha และคณะ 1999)

2.5.2 คอนกรีตภายใต้การโอบรัด (Confined Concrete)

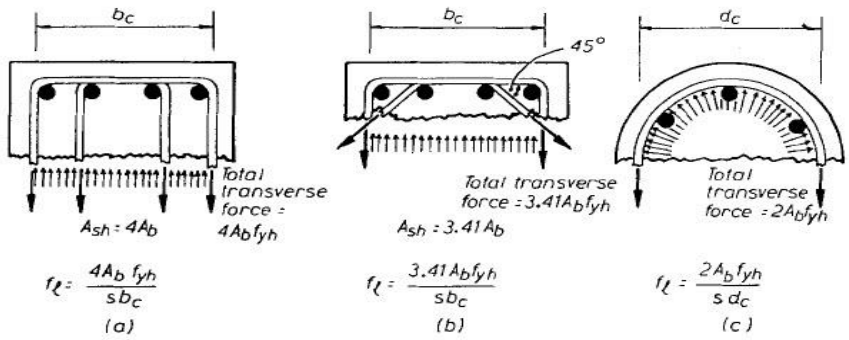
เสาหน้าตัดกลมจะมีพื้นที่หน้าตัดการโอบรัดภายนอก มากกว่าเสาสี่เหลี่ยมแม้เสาทั้งสองประเภทจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันก็ตาม เพราะเสาสี่เหลี่ยมจะพื้นที่หน้าตัดบางส่วนไม่ถูกโอบรัด ที่มุมเสาที่มีเหล็กตามแนวแกน จะเป็นจุดยึดรั้งทำให้เหล็กปลอกทำหน้าที่โอบรัดได้ดี ค่าความเค้นจะมากที่สุดที่มุมเสา บริเวณจุดใดที่มีเหล็กปลอก หน่วยแรงจุดนั้นจะมีค่ามากกว่าบริเวณที่ไม่มีเหล็กปลอก หน่วยแรงในเหล็กปลอกนั้นจะให้มีค่าสูงสุดเท่ากับกำลังครากของเหล็กปลอก



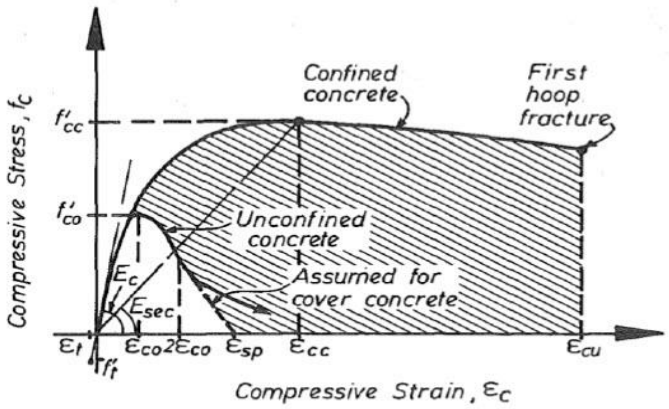

รูปที่ 2.43 พฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตในเหล็กปลอกเกลียว และ เหล็กปลอกสี่เหลี่ยม (Park และ Paulay 1975)




รูปที่ 2.44 พฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตในหน้าตัดเสา ของเหล็กเสริมทางขวาง และทางยาว (Saatcioglu และ Razvi 1992)




รูปที่ 2.45 พฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตในหน้าตัดเสา ของเหล็กเสริมทางขวาง ที่แตกต่างกัน (S. Watson และคณะ 1992)



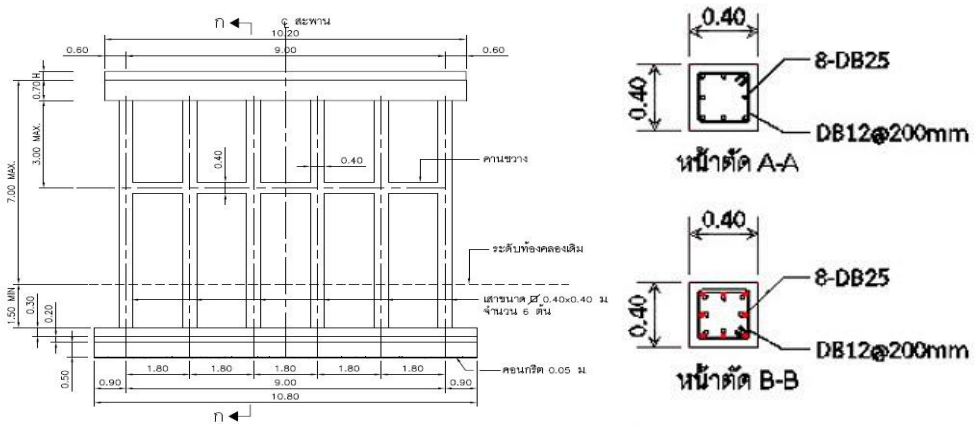

รูปที่ 2.46 หน่วยแรง-ความเครียด ของคอนกรีตภายใต้แรงอัด (Mander และคณะ 1988)

# บทที่ 3
# เตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ที่มีการวิบัติด้วยแรงยึดเหนียวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต โดยจะใช้วิธีการโอบรัดเสาไม่ให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวออกด้านข้างด้วยการใช้กรอบเหล็กภายนอกรูปตัวที เพื่อทำให้เสามีความสามารถรับแรงกระทำด้านข้าง และการเคลื่อนที่ด้านข้างให้ได้มากขึ้นกว่าเดิม พร้อมทั้งเปลี่ยนโหมดกการวิบัติแบบแรงยึดเหนียวของเหล็กเสริมตามแนวแกนที่ต่อทาบที่โคลนเสา เปลี่ยนเป็นรูปแบบการวิบัติแบบแรงดัดแทน โดยบทนี้จะทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบออกเป็น สามประเภท ประเภทแรกจะศึกษาเสาสั้นถึงพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที โดยให้แรงกระทำตามแนวแกน ประเภทที่สองเตรียมตัวอย่างเสาสั้น ทั้งที่มีการต่อทาบเหล็กตามแนวแกน และไม่ต่อทาบเหล็กตามแนวแกน ด้วยการโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที และเหล็กแผ่นบาง ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน และ ประเภทที่สามใช้เสาที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับเสาสะพานต้นแบบ

## 3.1 เสาสะพานต้นแบบ

จากแบบก่อสร้างสะพานของกรมทางหลวงชนบท ในช่วงความยาว 10 เมตร ใช้ขนาดเสาหน้าตัดขนาด 0.40X0.40 เมตร เหล็กเสริมตามแนวแกน เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร จำนวน 8 เส้น เหล็กปลอกเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรงอขอ 135 องศา ทั้งสองข้าง ระยะห่าง 0.20 เมตร




(ก) (ข)

รูปที่ 3.1 (ก) ตอม่อตับกลางแบบเสาเรียงฐานรากแผ่ (ข)หน้าตัดเสาสะพานที่ไม่ต่อทาบ(A-A) และต่อทาบ (B-B)

## 3.2 เตรียมตัวอย่างเสาสั้น

จำนวนสองกลุ่ม โดยมีข้อกำหนดให้ปริมาณเหล็กเสริมตามแนวแกนต่อพื้นที่หน้าตัดเสาและปริมาตรเหล็กปลอกเสาต่อปริมาตรคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับเสาสะพานที่สุด กลุ่มที่หนึ่งมีขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง0.75 เมตร เหล็กตามแนวแกน 4 DB 20 mm SD 40 เหล็กปลอก DB10 mm SD40 ระยะห่าง 0.10 เมตร และกลุ่มที่สอง เสาตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กตามแนวแกน 4 DB 25 mm SD 40 เหล็กปลอก DB12 mm SD40 ระยะห่าง 0.20 เมตร โดยที่มีการต่อทาบเหล็กและไม่ต่อทาบ เหล็กเสริมตามแนวแกน

ตารางที่ 3.1 ชนิดของเสา อัตราส่วนเหล็กเสริมตามแนวแกน และ อัตราส่วนเหล็กปลอก

| ชนิด | อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว | อัตราส่วนเหล็กปลอก |
|---|---|---|
| เสาสะพานหน้าตัด 0.40x0.40 เมตร | | |
| ไม่มีการต่อทาบ | 0.02455 | 0.00473 |
| มีการต่อทาบ | 0.04910 | 0.00473 |
| เสาหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร | 0.02009 | 0.01305 |
| เสาหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร | | |
| ไม่มีการต่อทาบ | 0.02182 | 0.00591 |
| มีการต่อทาบ | 0.04364 | 0.00591 |



3.2.1 เตรียมตัวอย่างเสาคอนกรีตสั้นขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร

ตัวอย่างทดสอบจำนวน 11 ตัวอย่าง สำหรับเสาที่เสริมกำลังจะใช้เหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาด 50x50x5x7mm โอบรัดภายนอก ประกอบไปด้วยเสาตัวทดสอบตามรายละเอียดดังนี้

U1, U2, U3 เสาคอนกรีตล้วน (มีเหล็กปลอกรัดบนและล่าง เสา) ตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2

U-T เสาคอนกรีตล้วนที่โอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที จำนวน 1 ตัวอย่าง

L เสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กแกนตามยาวจำนวน 1 ตัวอย่าง

L-T เสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กแกนตามยาว โอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที จำนวน 1 ตัวอย่าง

tie เสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กปลอกจำนวน 1 ตัวอย่าง

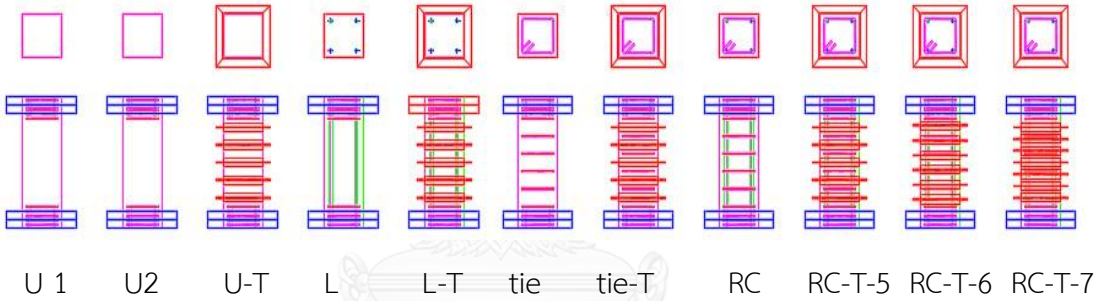
tie-T เสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กปลอกและโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที จำนวน 1 ตัวอย่าง

RC เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 1 ตัวอย่าง

RC-T-0.10 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวทีโดยมีระยะห่าง 0.10 เมตร จำนวน 1 ตัวอย่าง

RC-T-0.083 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวทีโดยมีระยะห่าง 0.083 เมตร (เหล็กรูปตัวทีจำนวน 6 ชั้น) จำนวน 1 ตัวอย่าง

RC-T-0.067 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กรูปตัวทีโดยมีระยะห่าง 0.067 เมตร (เหล็กรูปตัวทีจำนวน 7 ชั้น) จำนวน 1 ตัวอย่าง



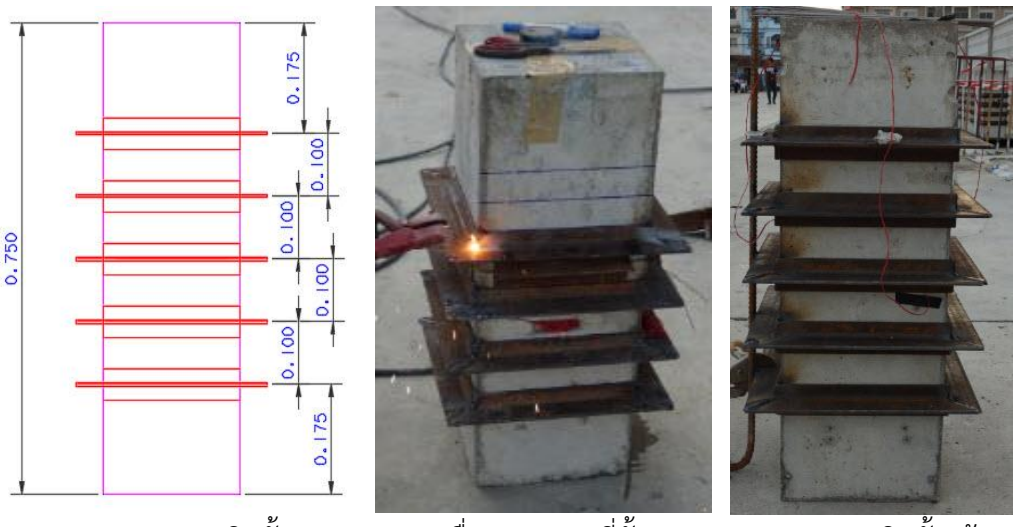

รูปที่ 3.2 หน้าตัดเหล็กภายในเสาตัวอย่างทดสอบจำนวน 11 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเหล็กเสริมเสาตัวอย่างทดสอบ

| ลำดับ | ชนิดเสา | หน้าตัด (เมตร xเมตร) | สูง (เมตร) | อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว | ระยะห่างเหล็กปลอก (เมตร) | อัตราส่วนเหล็กปลอก |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | U1 | 0.25x0.25 | 0.75 | | | |
| 2 | U2 | 0.25x0.25 | 0.75 | | | |
| 3 | U3 | 0.25x0.25 | 0.75 | | | |
| 4 | U-T | 0.25x0.25 | 0.75 | | | |
| 5 | L | 0.25x0.25 | 0.75 | 0.020 | | |
| 6 | L-T | 0.25x0.25 | 0.75 | 0.020 | | |
| 7 | tie | 0.25x0.25 | 0.75 | | 0.10 | 0.01305 |
| 8 | tie-T | 0.25x0.25 | 0.75 | | 0.10 | 0.01305 |
| 9 | RC | 0.25x0.25 | 0.75 | 0.020 | 0.10 | 0.01305 |
| 10 | RC-T-0.10 | 0.25x0.25 | 0.75 | 0.020 | 0.10 | 0.01305 |
| 11 | RC-T-0.083 | 0.25x0.25 | 0.75 | 0.020 | 0.10 | 0.01305 |
| 12 | RC-T-0.067 | 0.25x0.25 | 0.75 | 0.020 | 0.10 | 0.01305 |

3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งเหล็กหน้าตัดรูปตัวที

วัดตำแหน่งติดตั้งแล้วตัดเหล็กตัวทีเข้ามุมสี่สิบห้าองศา ที่มุมเสาทั้งสี่ด้าน และที่มุมที่เหล็กมาชนกัน กำหนดให้มีระยะห่างโดยประมาณ3 มิลลิเมตร เมื่อจับเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีแนบกับหน้าเสาทั้งสี่ด้านแล้ว เชื่อมที่แต่ละมุมเสาโดยเชื่อมแบบจุดก่อน เพื่อให้เกิดการรัดที่แต่ละมุมเสาเท่าๆกันหลังจากเชื่อมครบทั้งสี่มุมเสาแล้ว จึงทำการเชื่อมเติม




(ก) ระยะติดตั้ง (ข) เชื่อมประกอบที่ชั้น4 (ค) ประกอบติดตั้งแล้ว

รูปที่ 3.3 ประกอบติดตั้งเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาด 50x50x5x7 mm

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเสาทดสอบหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร จำนวน 11 ตัวอย่าง

### 3.3 เสาคอนกรีตขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง

ประกอบด้วยเสาที่มีเฉพาะคอนกรีตล้วน มีเหล็กเสริมตามแนวแกน ทั้งที่มีการต่อทาบและไม่ต่อทาบ และโอบรัดเสาภายนอกด้วยเหล็กรูปตัวที และเหล็กแผ่นตามรายละเอียดดังนี้

PC1 เสาคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ตัวอย่างทดสอบที่1

PC2 เสาคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ตัวอย่างทดสอบที่2

PC3 เสาคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัดเสา0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ตัวอย่างทดสอบที่3

RC เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริม 4DB25 เหล็กปลอกขนาด DB12 ระยะห่างปลอก 0.20 เมตร

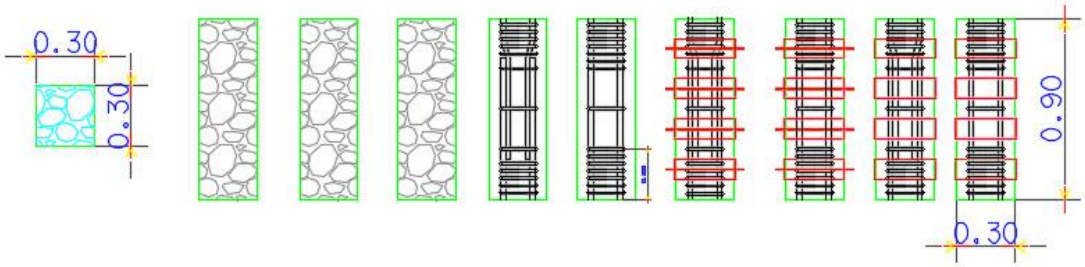
RC-LS เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริม 4DB25 (8DB25 บริเวณต่อทาบเหล็ก) ปลอกขนาด DB12 ระยะห่างปลอก 0.20 เมตร

S-RC-F เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริม 4DB25 เหล็กปลอกขนาด DB12 ระยะห่างปลอก 0.20 เมตร เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กแบนกว้าง0.10 เมตร หนา 8 มิลลิเมตร

S-RC-T เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตรเหล็กเสริม 4DB25 เหล็กปลอกขนาด DB12 ระยะห่างปลอก 0.20 เมตร เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาด 100x100x5.5x8 มิลลิเมตร

S-RC-LS-F เสาคอนกรีตต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริม 4DB25 (8DB25 บริเวณต่อทาบเหล็ก) ปลอกขนาด DB12 ระยะห่างปลอก 0.20 เมตร เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กแบนกว้าง 0.10 เมตร หนา 8 มิลลิเมตร

S-RC-LS-T เสาคอนกรีตต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริม 4DB25 (8DB25 บริเวณต่อทาบเหล็ก) ปลอกขนาด DB12 ระยะห่างปลอก 0.20 เมตร เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาด 100x100x5.5x8 มิลลิเมตร




รูปที่ 3.5 ขนาดหน้าตัด และ ความสูงเสาทดสอบ

รูปที่ 3.6 เหล็กเสริมของเสาแต่ละประเภท

(ก) RC (ข) RC-LS

รูปที่ 3.7 เหล็กเสริมของเสาภายในแบบหล่อคอนกรีต


รูปที่ 3.8 เสา RC-LS ติดตั้งเหล็กรูปตัวทีขนาด100x100x5.5x8 mm

รูปที่ 3.9 ใช้ซีเมนต์เกราท์อุดช่องว่างระหว่างเสากับ เหล็กรูปตัวที (RC-LS)

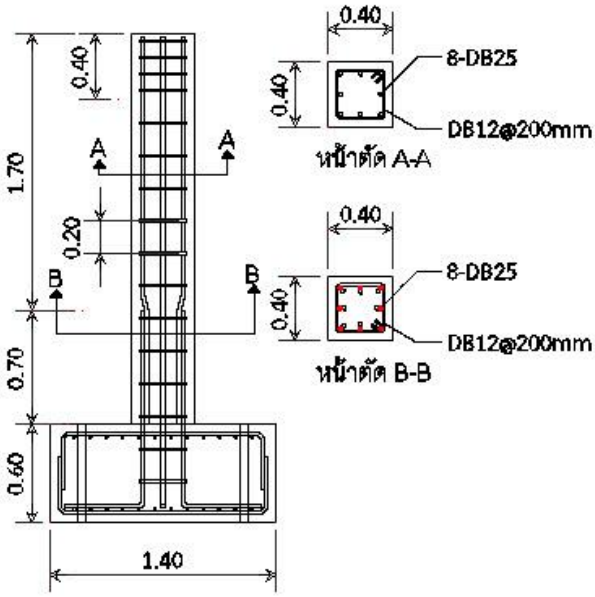

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างเสาทดสอบ PC1 PC2 PC3 RC RC-LS S-RC-F S-RC-T S-RC-LS-F

### 3.4 ซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ต่อทาบเหล็กในแนวแกน

แล้วโอบรัดด้วยกรงเหล็กหน้าตัดตัวที 1 ตัวอย่าง สกัดคอนกรีตที่เสียหายออกทิ้ง ให้เหลือไว้แต่คอนกรีตที่มีคุณภาพ ตรวจสอบสภาพเหล็กเสริมสามารถใช้งานได้ แล้วทำความสะอาดเสาด้วยน้ำสะอาด หลังจากนั้นเข้าแบบเสา ผสมเทคอนกรีต

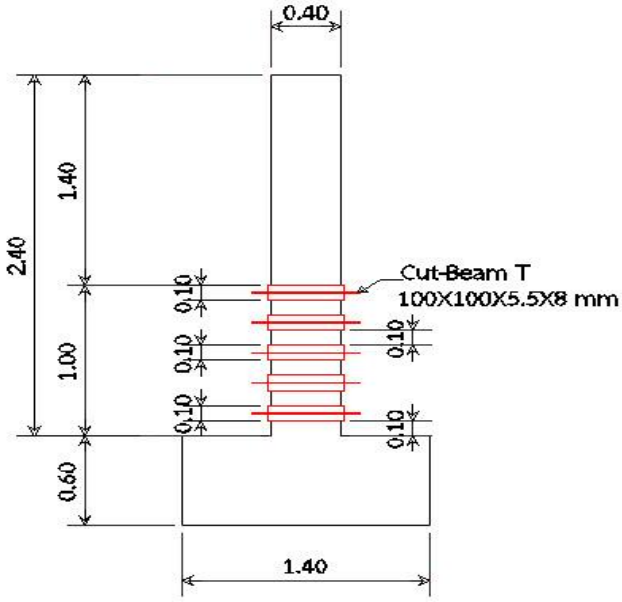

(ก) สกัดคอนกรีตไม่ดีออก (ข) เข้าแบบหล่อเทคอนกรีต (ค) หลังซ่อมแซม

รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการซ่อมแซม เสาคอนกรีตที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน




(ก) ขนาดหน้าตัด และรายละเอียดเหล็กเสริม (ข) เหล็กเสริมเสาสะพาน

รูปที่ 3.12 รายละเอียดเหล็กเสริมเสาที่ซ่อมแซม




(ก) ขนาดเหล็กรูปตัวที (ข) เสาที่เสริมกำลังแล้ว

รูปที่ 3.13 การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที

## 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเสา

ประกอบไปด้วยสองประเภท ประเภทแรกใช้ในการทดสอบเสาสั้น และในส่วนที่สอง ใช้ทดสอบเสาสะพานที่ทำการปรับปรุงซ่อมแซมแล้ว ประกอบด้วยเครื่องมือดังนี้

1. Universal Testing Machine ใช้สำหรับให้แรงกดตามแนวแกน ในทดสอบเสาสั้น ขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75เมตร และเสาขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร


รูปที่ 3.14 Universal Testing Machine (แรงกดสูงสุด 500 ตัน)

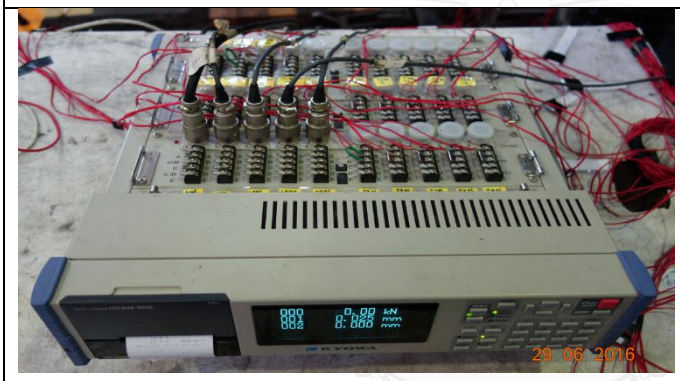
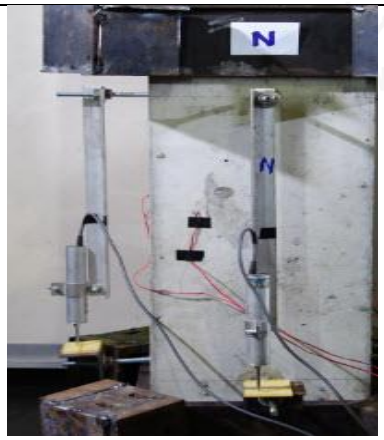
2. เครื่องมือสำหรับใช้ติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบ ประกอบด้วยเครื่องแรงดัน (รูปที่3.20 a) หัวจับท่อนเหล็ก (รูปที่3.20b) ทำหน้าที่ขันแท่งเหล็กกลมกำลังสูงให้ฐานตัวอย่างทดสอบยึดติดกับพื้น เพื่อป้องกันไม่ให้ฐานตัวอย่างทดสอบเคลื่อนตัวได้ ปั๊มแรงดันอัด (รูปที่3.20 c) ทำหน้าที่ส่งแรงดันไปทำให้ Hydraulic ที่หัวเสา สร้างแรงกดที่หัวเสาตัวอย่างทดสอบ ในที่นี้ใช้แรงกดหัวเสาคงที่ตลอดการทดสอบ

| | |
|---|---|
|  <br>(ก) | เครื่องแรงดัน(Pump) เป็นตัวกำเนิดแรงดันแก่หัวจับ ให้แรงดันแบบทั้งอัดและ คลาย |
|  <br>(ข) | หัวจับท่อนเหล็ก ทำหน้าที่เป็นตัวอัดให้แท่งเหล็กหดตัวเข้า และทำหน้าที่ให้แท่งเหล็กคลายตัวสู่สภาพปกติ ใช้สำหรับยึดฐานตัวอย่างทดสอบเข้ากับพื้นไม่ให้มีการขยับตัวของเสาทดสอบ |
|  <br><br>(ค) | ปั้มแรงดัน ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแรงอัดให้แรงดันอัดไฮดรอลิค (Hydraulic) ใช้สำหรับสร้างแรงอัดที่หัวเสาตัวอย่างทดสอบ |

รูปที่ 3.15 (ก) เครื่องแรงดัน(Pump) (ข) หัวจับท่อนเหล็ก (ค) ปั้มแรงดัน

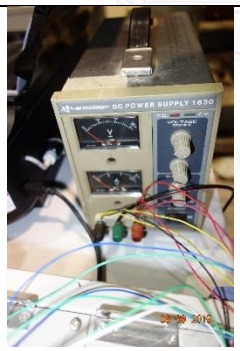
3. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดค่า ในระหว่างการทดสอบ เกจวัดความเครียด (Strain gage) ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรง และความเครียด จะติดตั้งไว้ในตำแหน่งเหล็กแกนเสาทดสอบ และเหล็กปลอก เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่ ในการทดสอบนี้จะติดตั้งไว้ข้างเสาเพื่อวัดการเคลื่อนที่ของเสา และติดตั้งที่หัว

เสาเพื่อวัดค่าการเคลื่อนที่ด้านข้าง และติดไว้ที่ผนังเพื่อวัดการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.10 และ เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ทำหน้าที่ประมวลผลและบันทึกข้อมูลแล้วส่งต่อไปที่คอมพิวเตอร์

| | |
|---|---|
|  <br>(ก) | เกจวัดความเครียด(Strain Gage) ทำหน้าที่วัดความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม ติดตั้งตำแหน่งที่สนใจหน่วยแรงที่สำคัญ |
|  <br>(ข) | เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ทำหน้าที่ประมวลผลและบันทึกข้อมูล ทั้งแรงและระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ แล้วส่งข้อมูลไปเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์ |
|  <br>(ค) | เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่(LVDT) วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและราบ ใช้ติดตั้งโดยใช้แท่งเหล็กเป็นตัวยึดติดเข้ากับเสาให้แน่นเพื่อ วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเสาตัวอย่างทดสอบ |

| | |
|---|---|
|  <br>(ง) | เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่(LVDT Voltage base) เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่<br>ใช้ติดตั้งวัดการหมุนของฐานราก |
|  <br>(จ) | เครื่องวัดแรง(Load Cell) ทำหน้าที่แปลงแรงที่กระทำส่งต่อข้อมูลไปที่เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) |

รูปที่ 3.16 (ก) เกจวัดความเครียด (ข) เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) (ค)เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ (ง)เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่( LVDT Voltage base ) (จ) เครื่องวัดแรง

| | |
|---|---|
|  <br>(ก) | เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Volt Meter) ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้า |
|  <br>(ข) | เครื่องควบคุมการทำงาน (Hydraulic Actuator) ทำหน้าที่สั่งให้เครื่องให้แรง (Hydraulic Actuator ) ทำงาน แบบใช้ระยะเคลื่อนที่เป็นตัวควบคุม |

| | |
|---|---|
|  <br>(ค) | คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่เก็บบันทึกข้อมูล จากการส่งข้อมูลมาจากเครื่องประมวลผล(Data Logger) |

รูปที่ 3.17 (ก)เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (ข) เครื่องให้แรง(Hydraulic Actuator) (ค) คอมพิวเตอร์

## 3.6 ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ประกอบด้วยเสาสั้น และเสาสะพาน

สำหรับเสาสั้นการติดตั้งไม่ค่อยยุ่งยากมากนักเพียงกำหนดให้ได้ศูนย์กลางแรงกระทำและอยู่ในแนวดิ่ง สำหรับเสาสะพานจะต้องระมัดระวังอย่างมากเพราะทั้งสูงและน้ำหนักมากต้องควบคุมให้ได้ทั้งแนวดิ่งและแนวราบ และต้องตรงตำแหน่งของเครื่องให้แรงกระทำ

1. ขั้นตอนการทดสอบเสาสั้น เริ่มจากประกอบแผ่นเพลทที่หัวเสาและที่ฐานเสา แล้วอัดแรงด้วยประแจให้กำลังด้วยแรงอัด 100 ปอนด์ฟุต ที่สลักเกลียวทั้งหัวเสาและฐานเสา หลังจากนั้นเคลื่อนตัวอย่างทดสอบเข้าไปในตำแหน่งให้แรงจากเครื่องให้แรงเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

2. ติดตั้งเครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ (LVDT) เครื่องวัดความเครียด (Strain Gage) เครื่องให้แรง (Load Cell) เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) และเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล เพื่อเก็บข้อมูลในระหว่างการทดสอบ

3.ให้แรงแก่เสาตัวอย่างทดสอบโดยเครื่องให้แรงเอนกประสงค์ แก่สาทดสอบ ในอัตราตามมาตรฐานไปจนกว่าเสาตัวอย่างจะวิบัติ

4.บันทึกการเปลี่ยนแปลงของเสาตัวอย่างทดสอบ ด้วยกล้องวิดีโอ และ กล้องถ่ายภาพ

(ก) การให้แรงที่สลักเกลียว

(ข) การติดตั้งเสาทดสอบ

รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบเสาสั้น


รูปที่ 3.19 เสาตัวอย่างติดตั้งพร้อมทำการทดสอบ

## 3.7 ขั้นตอนการติดตั้งเสาทดสอบ (เสาสะพาน)

1.ทำการปรับระดับพื้นให้ได้ระดับ

2.เคลื่อนเสาเข้าไปในตำแหน่งทดสอบ

3.ตรวจสอบระดับแนวดิ่ง แล้วยึดฐานตัวอย่างทดสอบให้แน่น แล้วยึดเครื่องให้แรงที่หัวเสา

4.ทำการติดตั้ง LVDT ที่ข้างเสาทั้งสองข้าง ข้างละ 4 ชุด ติดตั้งที่ฐานทั้งสองข้าง ข้างละชุด ติดตั้งวัดการเคลื่อนที่ของฐาน 1ชุด ติดตั้งการเคลื่อนที่หัวเสา 1ชุด และติดตั้งการเคลื่อนที่ของกำแพง 1 ชุด

5.ยึดข้างหัวเสาทดสอบเข้ากับแผ่นเหล็กของเครื่องให้แรง (Hydraulic Actuator)

### 3.8 ขั้นตอนการทดสอบเสาสะพาน

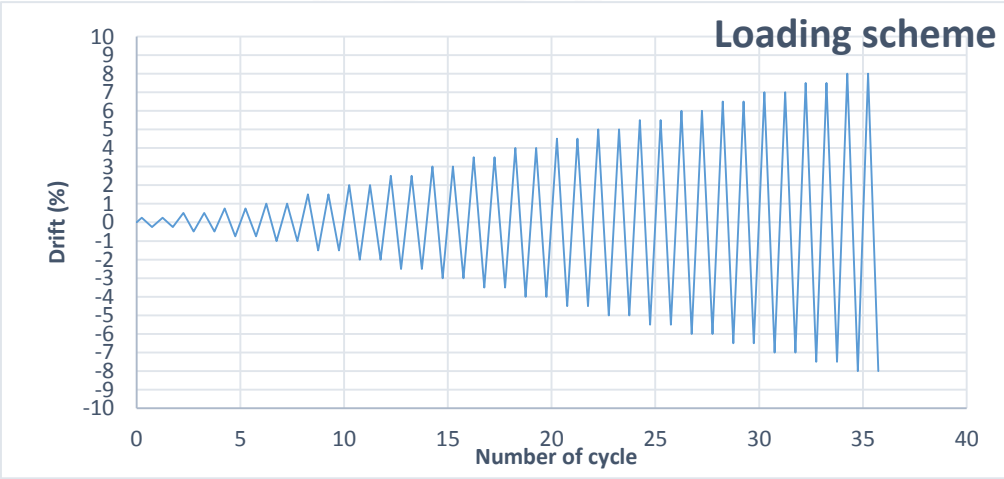
เสาทดสอบต้องอยู่ในแนวทิศทางเดียวกับเครื่องให้แรง อีกทั้งเสาทดสอบต้องอยู่ในแนวดิ่งและแนวราบ ตำแหน่งของหัวเสาทดสอบ ศูนย์กลางแรงที่เครื่องให้แรงกระทำต้องอยู่ในแนวราบที่ระดับเดียวกัน

1.ทำการเชื่อมต่อเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (LVDT) เครื่องวัดความเครียด (Strain Gage) เครื่องให้แรง (Hydraulic Actuator) เข้ากับเครื่องประมวลผล (Data Logger) แล้วเชื่อมเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล

2. ทำการเปิดเครื่องทำความเย็น แล้ว เปิดปั้ม (Pump) เครื่องให้แรง (Hydraulic Actuator)

3.เริ่มขยับให้หัวเครื่องให้แรง (Hydraulic Actuator) เคลื่อนที่ แล้วทำการกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ ให้แรงเริ่มต้น และระยะการเคลื่อนที่เริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์

4. เริ่มการทดสอบโดยการกำหนดให้ระยะการเคลื่อนที่ เป็นตัวควบคุม โดยเริ่มจากอัตราการเคลื่อนที่ (ดูรูปที่3.24) 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.5%, 2.0%, 2.50%, 3.00%, 3.50%, 4.00% ไปเรื่อยจนกว่าเสาจะวิบัติ ในระหว่างการทดสอบต้อง ทำการเขียนรอยแตกร้าวลงบนเสาตัวอย่างทดสอบ บันทึกลักษณะการเสียหายที่สำคัญ และถ่ายรูปความเสียหายของเสาทดสอบแต่ละอัตราการเคลื่อนที่




รูปที่ 3.20 รูปแบบการให้แรงกระทำ

# บทที่ 4
# ผลการทดสอบเสาสั้น

พิจารณาผลการทดสอบวัสดุ คอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน เหล็กเสริม และ เหล็กรูปพรรณ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร จำนวน 12 ตัวอย่าง และ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง

## 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของ คอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เหล็กเสริมคอนกรีต และ เหล็กรูปพรรณ

1. ผลการทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร (ของตัวอย่างเสาขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร) จำนวนทั้งหมด 12 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดสูงสุด ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน

| ตัวอย่าง | วันที่หล่อ | วันที่ทดสอบ | น้ำหนัก(kg.) | น้ำหนักกดสูงสุด(kN) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 31/6/59 | 14/6/59 | 12.07 | 405.4 |
| 2 | 31/6/59 | 14/6/59 | 12.15 | 384.2 |
| 3 | 31/6/59 | 14/6/59 | 12.02 | 363.3 |
| 4 | 31/6/59 | 28/6/59 | 12.05 | 464.9 |
| 5 | 31/6/59 | 28/6/59 | 12.07 | 421.8 |
| 6 | 31/6/59 | 28/6/59 | 12.12 | 439.3 |
| 7 | 31/6/59 | 3/7/59 | 12.03 | 472.2 |
| 8 | 31/6/59 | 3/7/59 | 12.15 | 504.1 |
| 9 | 31/6/59 | 3/7/59 | 12.08 | 492.8 |
| 10 | 31/6/59 | 19/7/59 | 12.02 | 440.8 |
| 11 | 31/6/59 | 19/7/59 | 12.06 | 479.2 |
| 12 | 31/6/59 | 19/7/59 | 12.00 | 484.5 |

2 เหล็กเสริม ที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วยเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD 40 กำหนดกำลังที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4000 กก/ ซม.2 จึงทำการเก็บตัวอย่าเหล็กเสริมเพื่อมาทดสอบกำลังดึงที่มีอยู่จริง อย่างละ 3 ตัวอย่าง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

| ตัวอย่างทดสอบ | กำลังที่จุดคราก (MPa) | กำลังที่จุดประลัย (MPa) |
|---|---|---|
| 1 | 630.5 | 636.6 |
| 2 | 547.4 | 626.4 |
| 3 | 556.4 | 637.8 |
| ค่าเฉลี่ย | 578.1 | 633.6 |

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

| ตัวอย่างทดสอบ | กำลังที่จุดคราก (MPa) | กำลังที่จุดประลัย (MPa) |
|---|---|---|
| 1 | 499.7 | 633.4 |
| 2 | 499.7 | 639.8 |
| 3 | 483.8 | 627.0 |
| ค่าเฉลี่ย | 494.4 | 633.4 |

3. ผลการทดสอบเหล็กรูปพรรณ ในการทดสอบนี้ใช้เหล็กแผ่นบางขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ความหนา 8 มิลลิเมตร ความเค้นจุดคราก 343 MPa ความเค้นสูงสุด 464 MPa และใช้เหล็กรูปตัวทีขนาดหน้าตัด 50x50x5x7 มิลลิเมตร ความเค้นที่จุดคราก 343.97 MPa ความเค้นสูงสุด 469.62 MPa เหล็กรูปตัวที 100x100x6x8 mm กำลังที่จุด คราก 323.24 MPa กำลังประลัยสูงสุด 466.63 MPa

4. คุณสมบัติของลวดเชื่อม ใช้ลวดเชื่อมแบบแท่งเป็นลวดเชื่อมชนิด E60 มีกำลังประลัย 4200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (เหล็กรูปตัวทีเป็นชนิด A36 ความหนาน้อยกว่า 19 มิลลิเมตร)

## 4.2 ผลการทดสอบเสาหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร จำนวนทั้งหมด 12 ตัวอย่าง

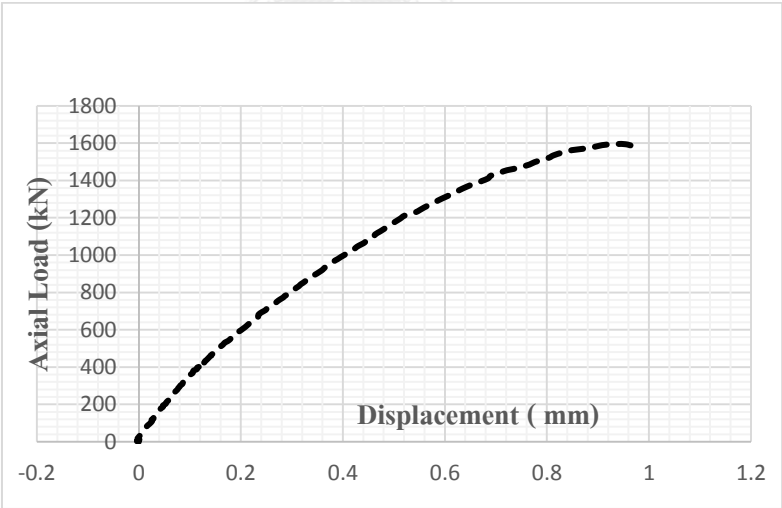
โดยแบ่งออกเป็นการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตล้วน การเสริมกำลังคอนกรีตล้วน เสาตัวอย่างมีเฉพาะเหล็กตามแนวแกน เสริมกำลังเสาตัวอย่างมีเหล็กตามแนวแกน เสาตัวอย่างมีเฉพาะเหล็กปลอก เสริมกำลังเสาที่มีเฉพาะเหล็กปลอก เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และ เสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการเพิ่มจำนวนเหล็กรูปตัวที จากจำนวน 5 ชั้น เพิ่มเป็น 6 ชั้น และเพิ่มเป็น 7 ชั้นตามลำดับ

4.2.1 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตล้วน (U-1)

เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น เมื่อเสารับแรงตามแนวแกนสูงสุด1594 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 0.95425 มิลลิเมตร เสาจะวิบัติทันทีทันใด รูปแบบการวิบัติของเสาเป็นแบบแรงเฉือน


(ก) เสาก่อนทดสอบ (ข) หลงทำการทดสอบด้าน N (ค) หลังทำการทดสอบด้าน NE

รูปที่ 4.1 เสา U-1 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา U-1

4.2.2 ผลการทดสอบเสาคอนกรีต (U-2)

เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงส้น เมื่อเสารับแรงตามแนวแกนสูงสุด 1770 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 2.56มิลลิเมตร เสาจะวิบัติทันทีทันใด รูปแบบการวิบัติของเสาเป็นแบบแรงเฉือน

(ก) ก่อนทดสอบ

(ข) หลังทดสอบด้าน N

(ค) หลังทดสอบด้าน E


(ง) หลังทดสอบด้าน E-N

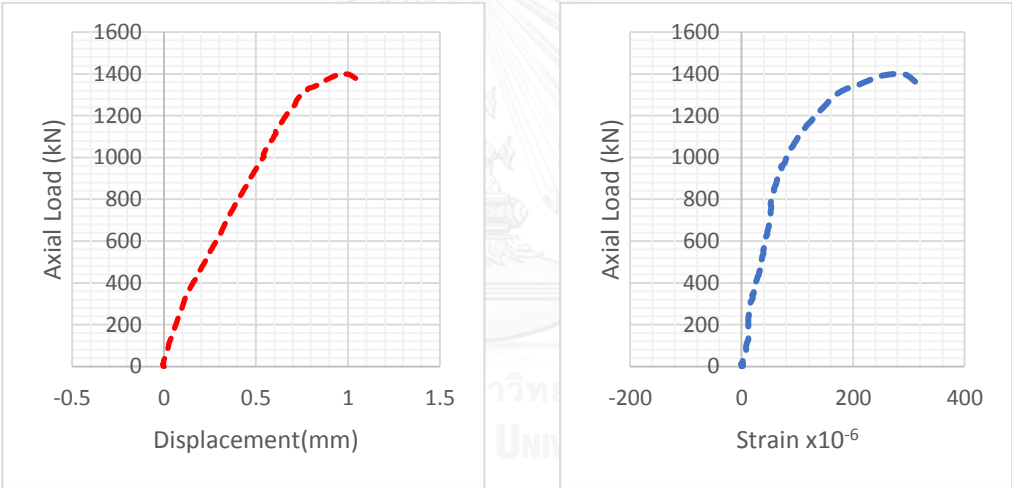
รูปที่ 4.3 เสา U-2 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ

4.2.3 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตล้วน (U3)

เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนทีเป็นเป็นแบบเชิงเส้น เมื่อเสารับแรงตามแนวแกนสูงสุด 1339.36 kN และระยะการเคลื่อนทีมีค่า 0.9865 มิลลิเมตร เสาจะวิบัติทันทีทันใด รูปแบบการวิบัติของเสาเป็นแบบแรงเฉือน และเหล็กปลอกชั้นที่สามมีความเครียด 0.000296 เหล็กปลอกไม่คราก (หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกน้อยมากๆ เพราะถูกโอบรัดไว้ด้วยแผ่น เหล็กด้านนอกที่มีความหนา 20 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กถูกอัดด้วยแรงอัดที่เกิดจากสลักเกลียว)


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N (ค) หลังทดสอบ S-E

รูปที่ 4.4 เสา U-3 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 (ก) แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ (ข) แรงตามแนวแกนกับความเครียดเหล็กปลอกชั้นที่3 ของเสา (U3)

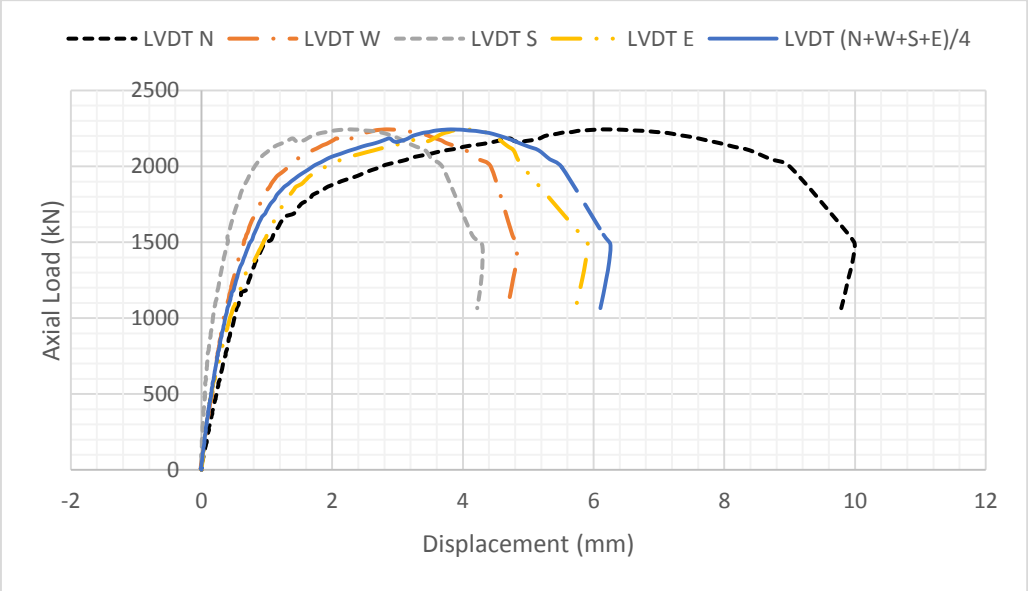
4.2.4 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตล้วน ภายนอกโอบรัดด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที (U-T)

เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนถึงค่า 1480.26 kN ความชันลดลงอย่างมากในที่สุดค่าแรงสูงสุด 2243.78 และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 3.81 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะการเคลื่อนที่ก็ยังคงเพิ่มขึ้นอีก และเสาวิบัติเมื่อเหล็กรูปตัวที ที่ชั้นสี่ที่มุมรอยเชื่อมฉีกขาดออกและคอนกรีตบริเวณนี้ก็เกิดการระเบิดออก จากกราฟแรงกับระยะการเคลื่อนที่แสดงให้เห็นถึงความเหนียวของเสาก่อนการวิบัติ ที่สำคัญเหล็กรูปตัวที

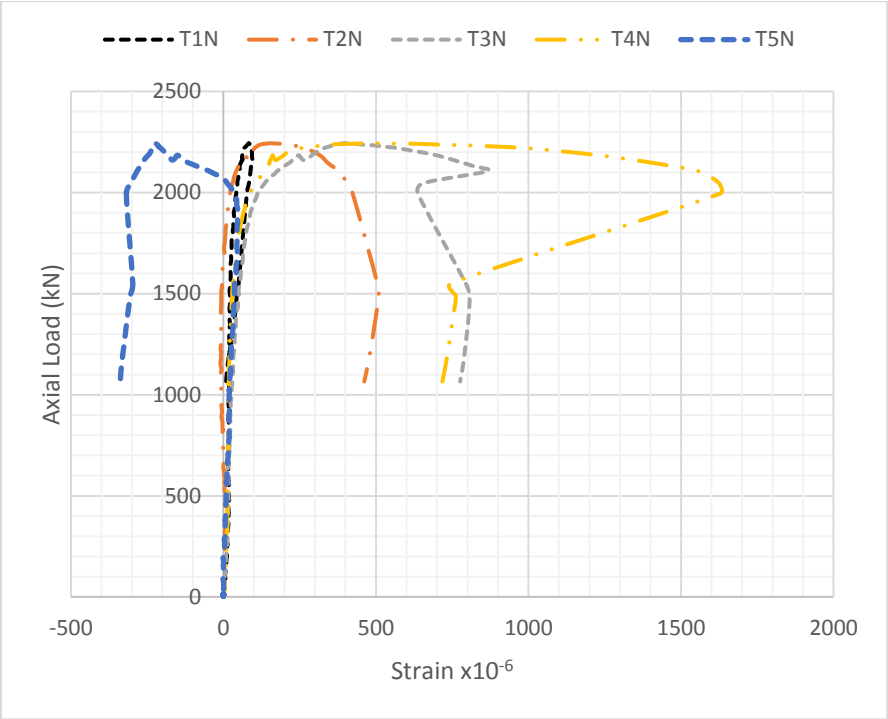
ที่มุมเสา yield แสดงให้เห็นว่าเหล็กรูปตัวทีได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพแล้ว แต่บริเวณช่วงกลางเสาเหล็กรูปตัวทีไม่ yield ซึ่งทำให้ทราบว่าความเค้นที่มุมเสาจะมากกว่า บริเวณกลางเสา


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ S E (ค) หลังทดสอบ N

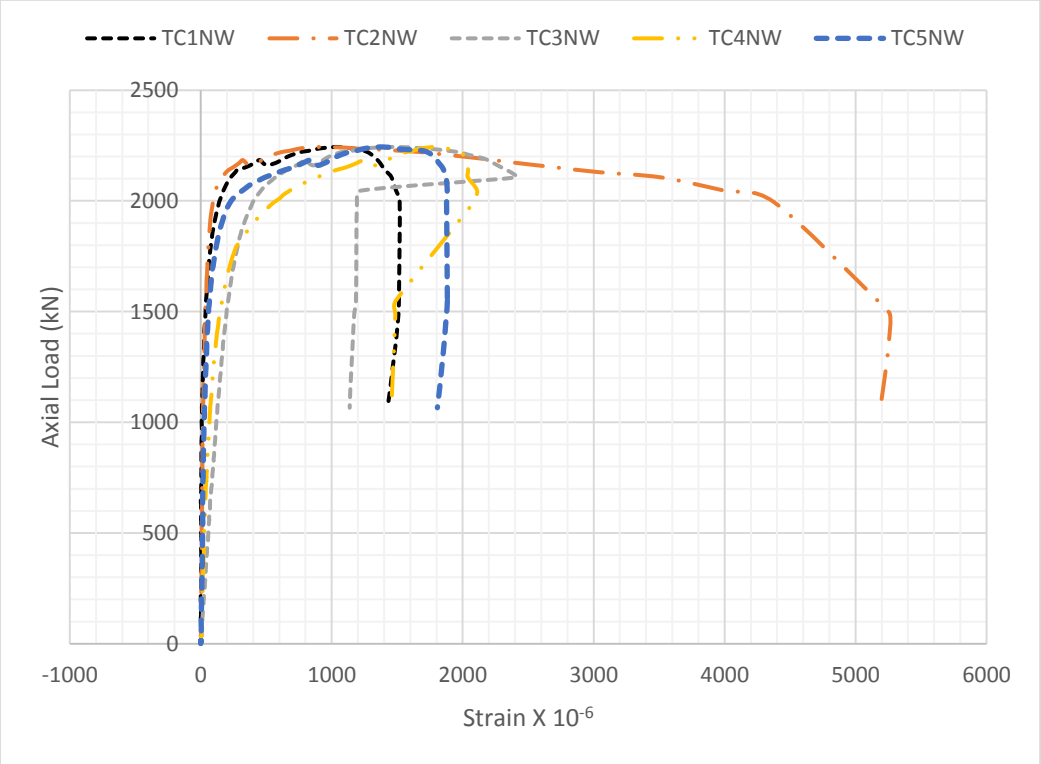
รูปที่ 4.6 เสา U-T เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนของเสา U-T




รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสาด้าน N (U-T)



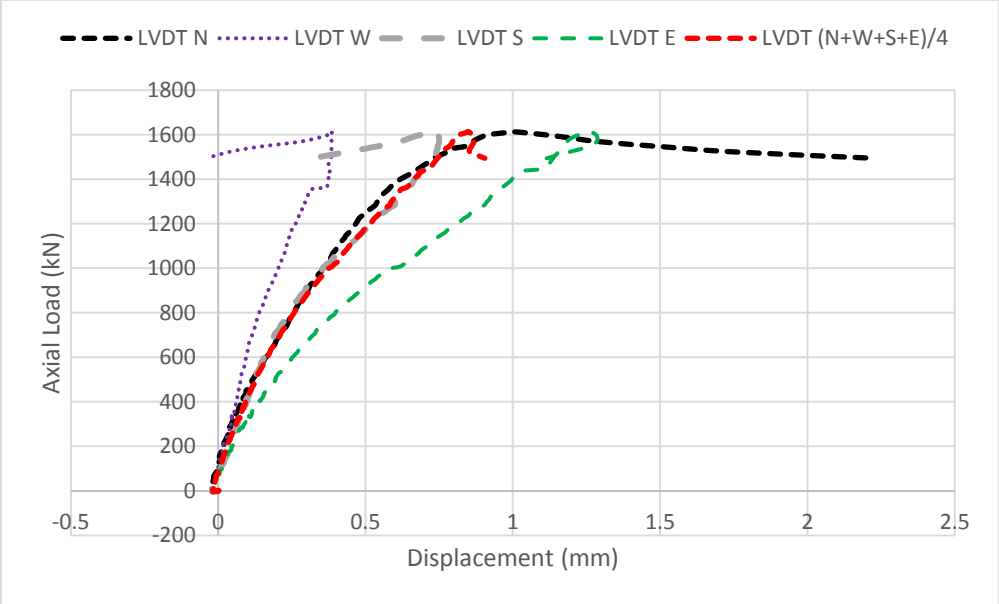

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีมุมเสา NW (U-T)

4.2.5 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กตามแนวแกนไม่มีเหล็กปลอก (L)

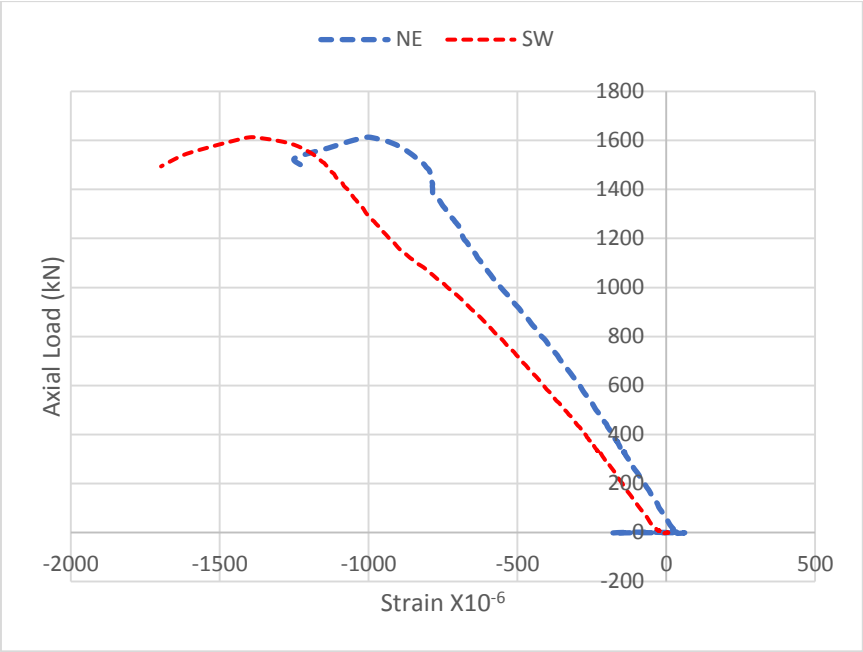
เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนถึงค่าแรงสูงสุด 1612.99 kN และระยะการเคลื่อนที่ 0.8495 มิลลิเมตร หลังจากนั้นแรงในเสาจะลดลงอย่างทันทีทันใด เนื่องจากเหล็กแนวแกนที่อยู่ในเสาถูกอัดลงตามแนวแกนทำให้เกิดการโก่งตัวของเหล็กแกน ขณะเดียวกันเหล็กแกนก็พยายามเบ่งออกด้านข้าง จึงทำให้คอนกรีตแตกออกทันทีทันใด รูปแบบการวิบัติเสาเป็นแบบแรงเฉือน และจากรูปที่4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเครียดพบว่าเหล็กเสริมเสาตามแนวแกนไม่คราก บ่งบอกว่าเหล็กเสริมตามแนวแกนทำงานไม่เต็มกำลังระบุ


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N (ค) หลังทดสอบ W-S

รูปที่ 4.10 เสา L เปรียบเทียบ ก่อนทดสอบกับหลังทดสอบ




รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะเคลื่อนที่ตามแนวแกน ของเสา L



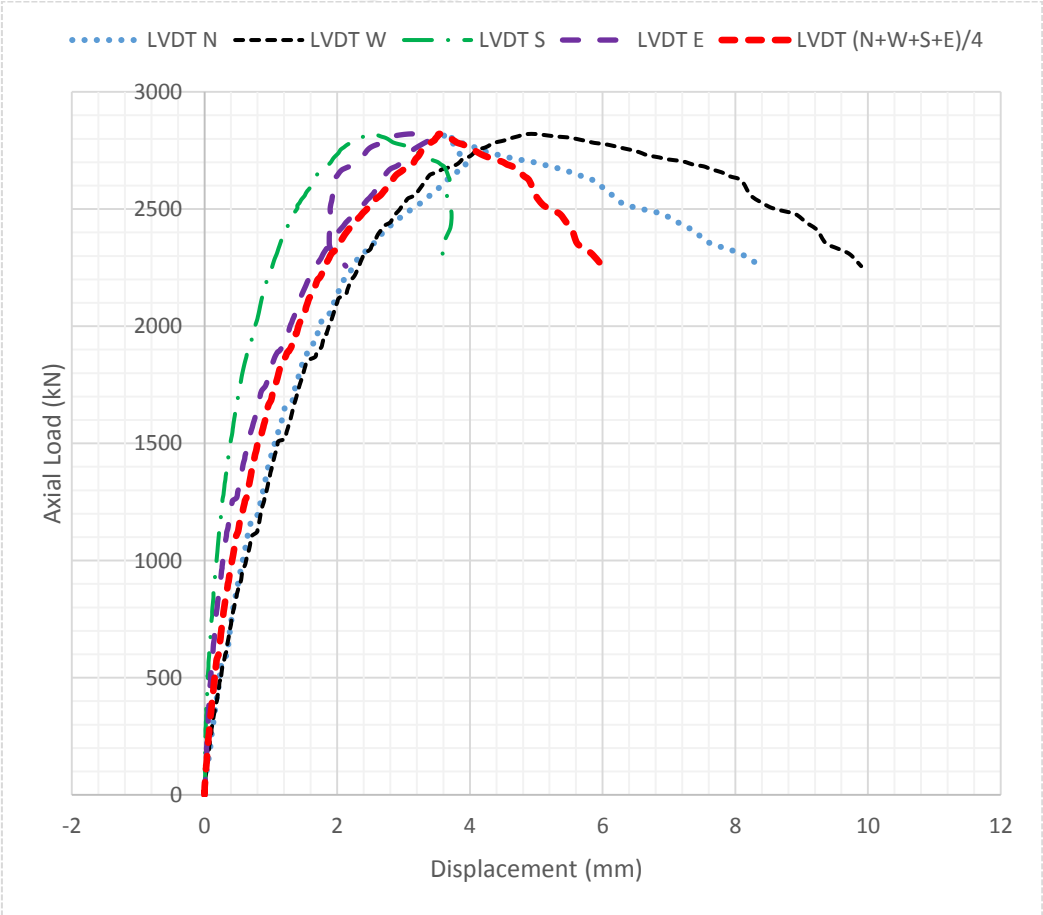

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนเสากับความเครียดของเหล็กเสริมตามแนวแกนของเสา L

4.2.6 ผลการทดสอบการเสริมกำลังของเสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กตามแนวแกนไม่มีเหล็กปลอก ด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที (L-T)

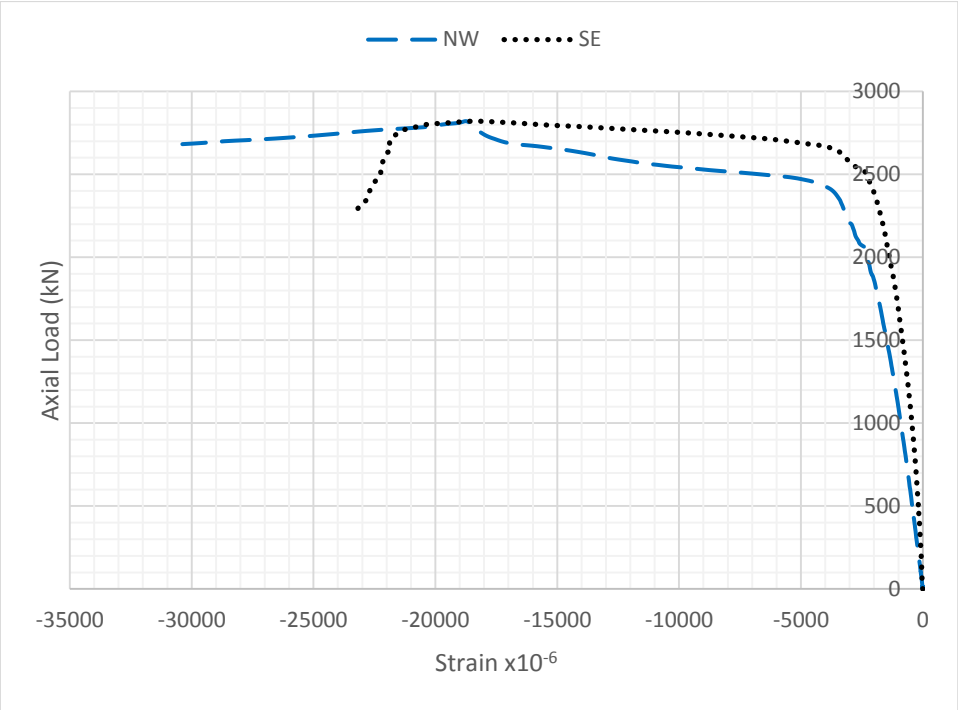
เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกนเป็นแบบเชิงเส้น จนถึงค่าแรง 2390.41 kN ความชันลดลงเล็กน้อยในที่สุดค่าแรงสูงสุด 2820.21 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 3.552 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะการเคลื่อนที่ก็ยังคงเพิ่มขึ้นอีก และเสาวิบัติเมื่อคอนกรีตบริเวณใกล้กึ่งกลางเสาเกิดระเบิดออก จากกราฟแรงกับระยะการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นถึงความเหนียวของเสาก่อนการวิบัติ ที่สำคัญเหล็กรูปตัวที ที่มุมเสาคราก แสดงให้เห็นว่าเหล็กรูปตัวทีได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพแล้ว แต่บริเวณช่วงกลางเสา เหล็กรูปตัวทีไม่ คราก พร้อมทั้งเหล็กเสริมตามแนวแกนเสาคราก จึงกล่าวได้ว่าเหล็กเสริมตามแนวแกนและเหล็กรูปตัวทีทำงานเต็มประสิทธิภาพ โหมดการวิบัติ เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำ มีค่าสูงกว่า กำลังต้านทานที่เสาคอนกรีตสามารับได้ เมื่อพิจารณาความเหนียวของเสา จะเห็นผลจากการเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที เสามีความเหนียวเพิ่มขึ้น


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N (ค) หลังทดสอบ W-S

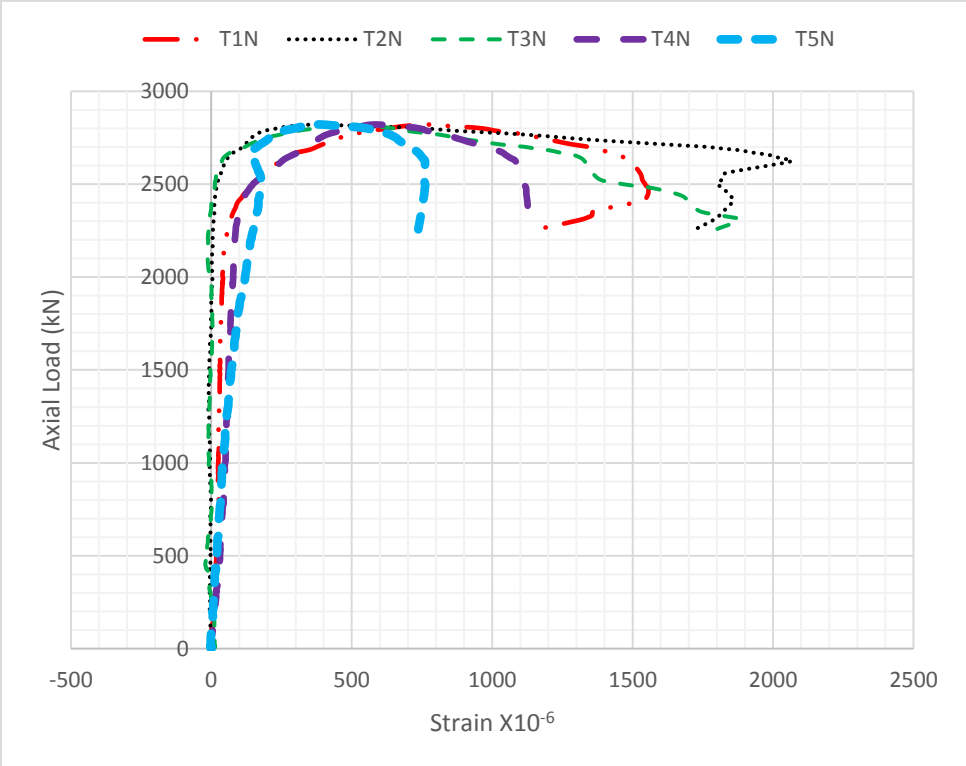
รูปที่ 4.13 เสา L-T เปรียบเทียบ ก่อนทดสอบกับหลังทดสอบ



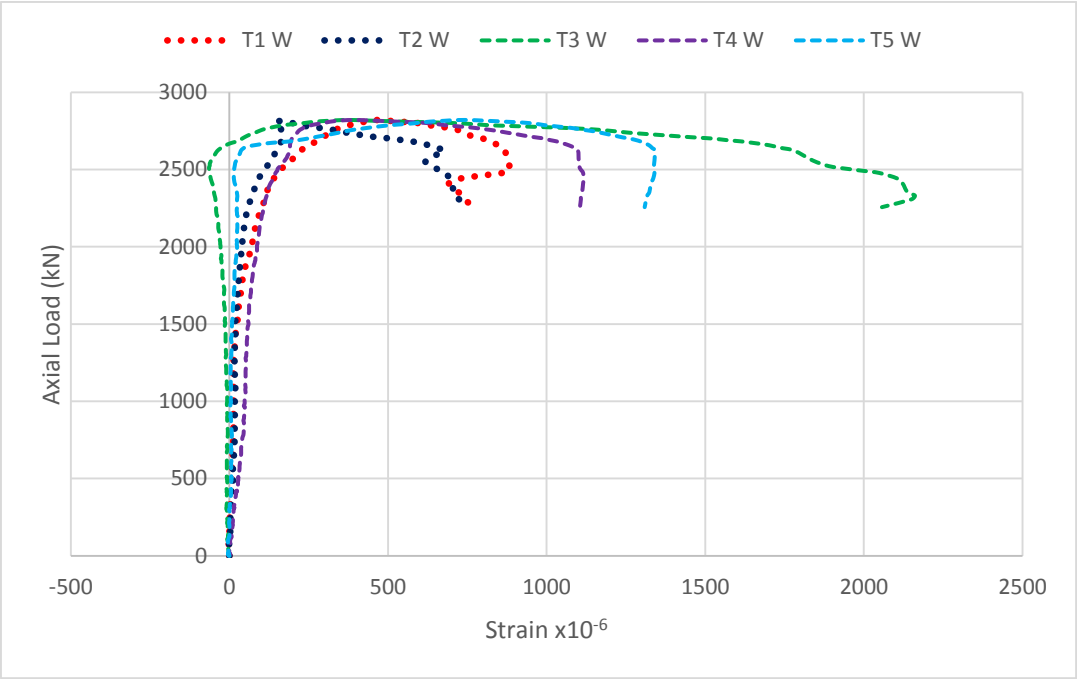

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเสา L-T



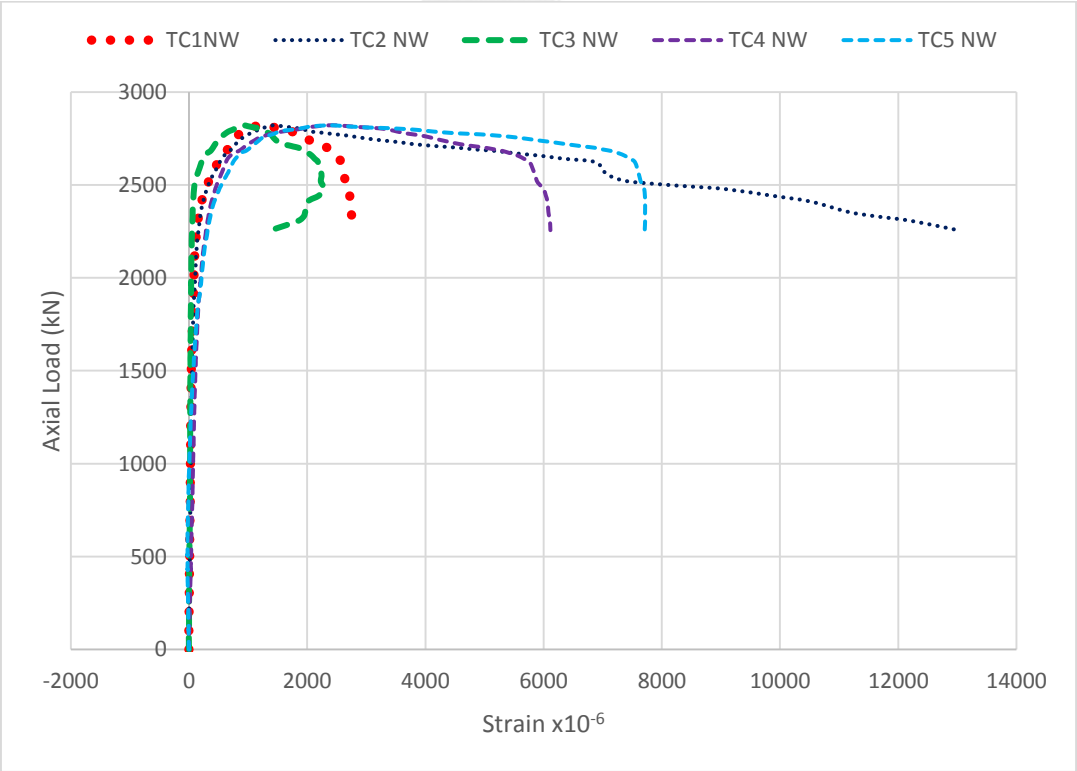

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนของเสากับความเครียดเหล็กเสริมตามแนวแกนเสา L-T




รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสา N ( L-T)



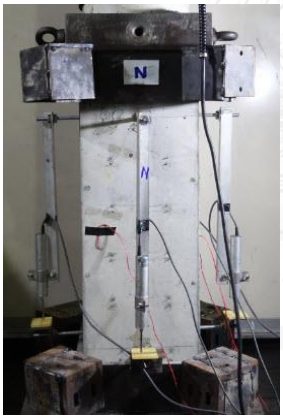

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสา W (L-T)




รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีจุดมุมเสา NW (L-T)

4.2.7 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กปลอกไม่มีเหล็กตามแนวแกน (tie)

เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนถึงค่าแรง 1183 kN ความชันลดลงเล็กน้อยในที่สุดค่าแรงสูงสุด 1513.13 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 0.633 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะการเคลื่อนที่ก็ยังคงเพิ่มขึ้นอีก และเสาวิบัติทันทีทันใดที่ค่าแรง 1513.13 kN ค่าระยะการเคลื่อนที่ 1.162 มิลลิเมตร รูปแบบการวิบัติแบบแรงเฉือน พฤติกรรมของเสาไม่มีความเหนียวด้านกำลังเกิดขึ้น ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่เจ็ดด้านทิศเหนือเกิดการคราก แต่ด้านทิศตะวันตกไม่เกิดการการครากของเหล็กปลอก ทั้งนี้เกิดจากเสาไม่มีเหล็กเสริมตามแนวแกนทำให้เหล็กปลอกสามารถเคลื่อนตัวไปได้ง่าย ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่แปดเกิดการคราก แต่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงของเสากับความเครียดของเหล็กปลอกช่วงเสาได้รับแรงไม่มีรูปแบบเชิงเส้น มีรูปแบบความสัมพันธ์ไม่แน่นอน ซึ่งก็เกิดจากเสาไม่มีเหล็กเสริมตามแนวแกนไม่สามารถยึดรั้งเหล็กปลอกไว้

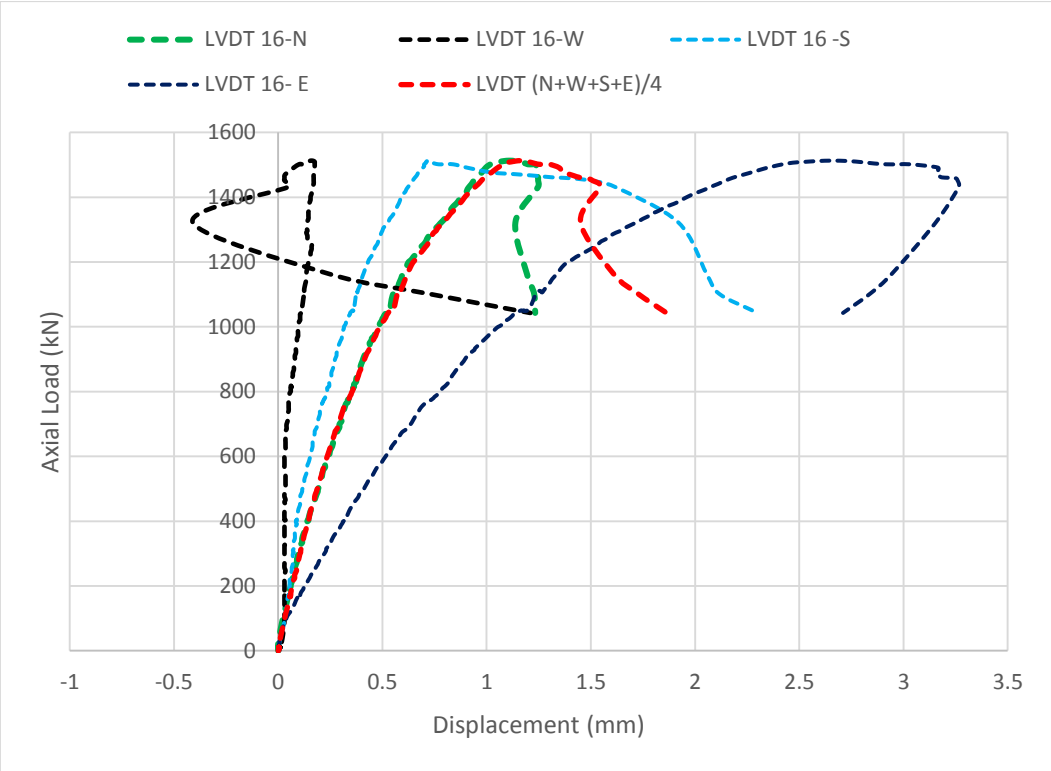



(ก) ก่อนทดสอบ

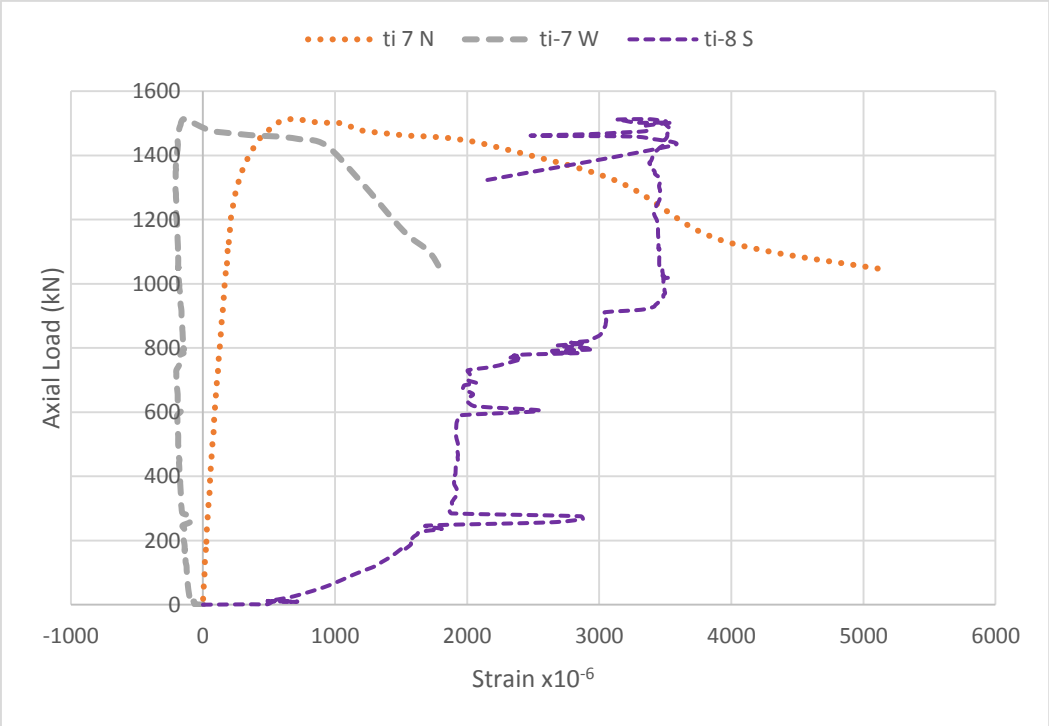

(ข) หลังทดสอบ N


(ค) หลังทดสอบ S-E

รูปที่ 4.19 เสา tie เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา tie



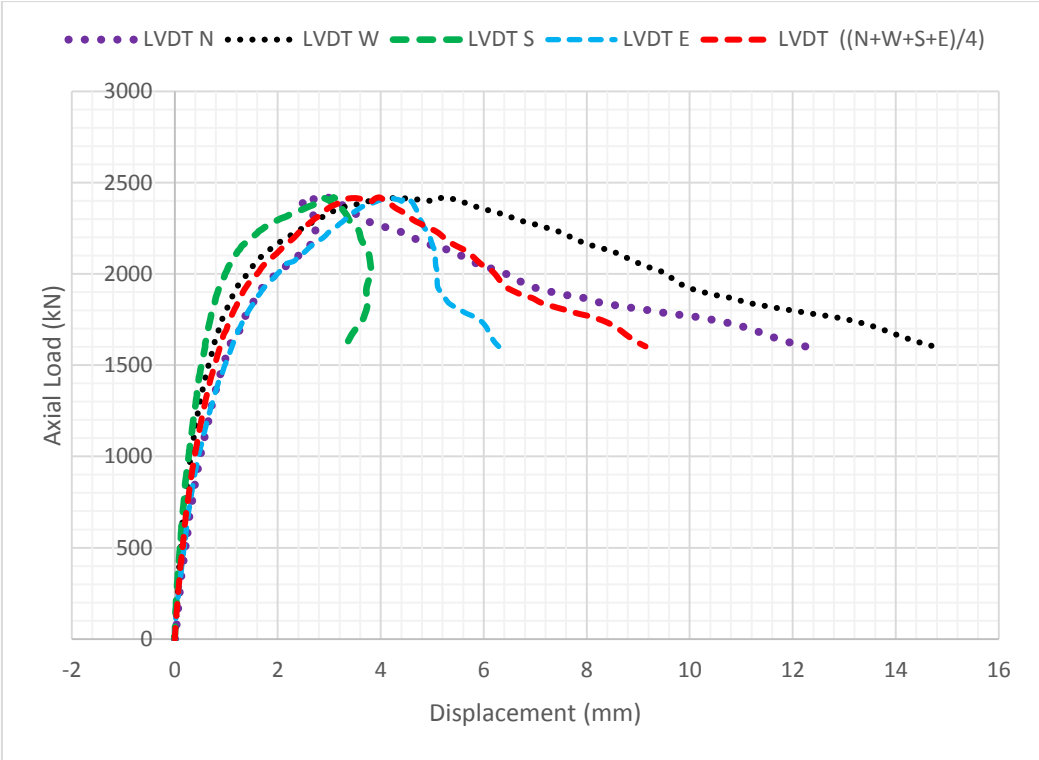

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอกเสา tie

4.2.8 ผลการทดสอบการเสริมกำลังเสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กปลอกไม่มีเหล็กตามแนวแกนด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที (tie-T)

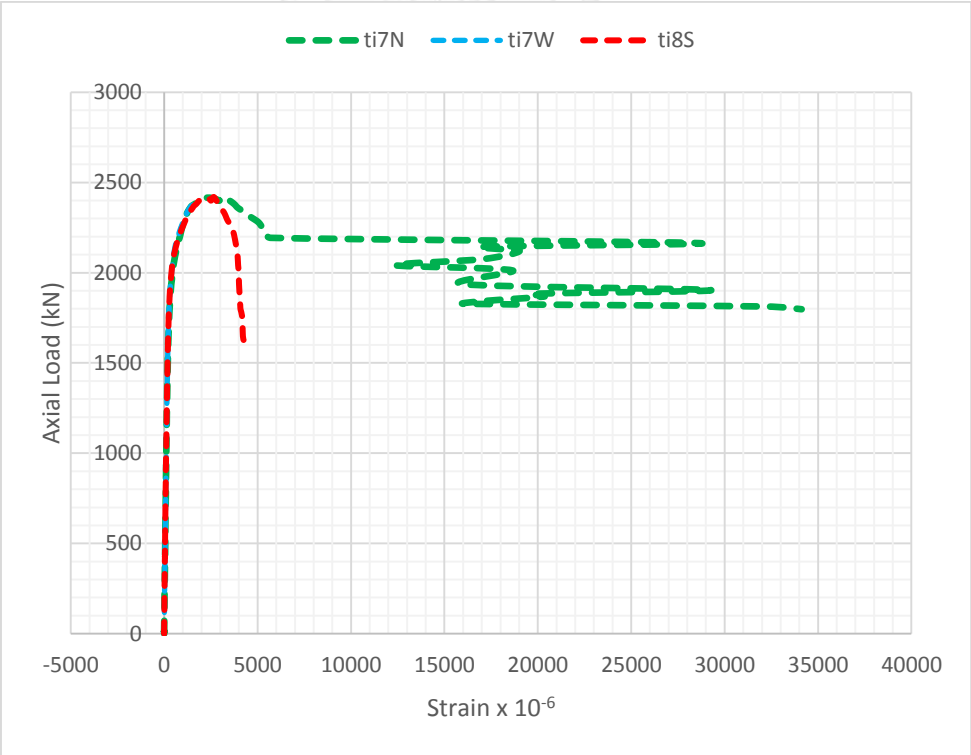
เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนถึงค่าแรงที่ 1582.65 kN ความชันลดลงเล็กน้อยในที่สุดค่าแรงสูงสุด 2419.49 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 3.9735 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะการเคลื่อนที่ก็ยังคงขยับเพิ่มไปได้เรื่อยๆ และแรงค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆเป็นแบบเชิงเส้น เมื่อค่าแรง 1602.5 kN ระยะการเคลื่อนที่ 9.14 มิลลิเมตร คอนกรีตเกิดการระเบิดออกที่กลางเสา เสาเกิดการวิบัติ พฤติกรรมของเสามีความเหนียวที่ชัดเจน ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่เจ็ดและชั้นที่แปดที่ติดตั้งค่าวัดความเครียด แสดงผลออกมาเห็นอย่างชัดเจนว่าเหล็กปลอกเกิดการคราก แม้ว่าจะไม่มีเหล็กเสริมตามแนวแกนเสา ทั้งนี้เกิดจากเสามีเหล็กรูปตัวทีมาโอบรัดภายนอก ทำให้เพิ่มค่า Stiffness ขึ้นแก่เสาได้อย่างมาก เหล็กรูปตัวทีที่มุมเสาตั้งแต่ชั้นหนึ่ง ถึงชั้นห้า คราก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กรูปตัวทีได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพแล้ว แล้วยังช่วยไม่ให้เกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนได้อย่างดี


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N (ค) หลังทดสอบ S-E

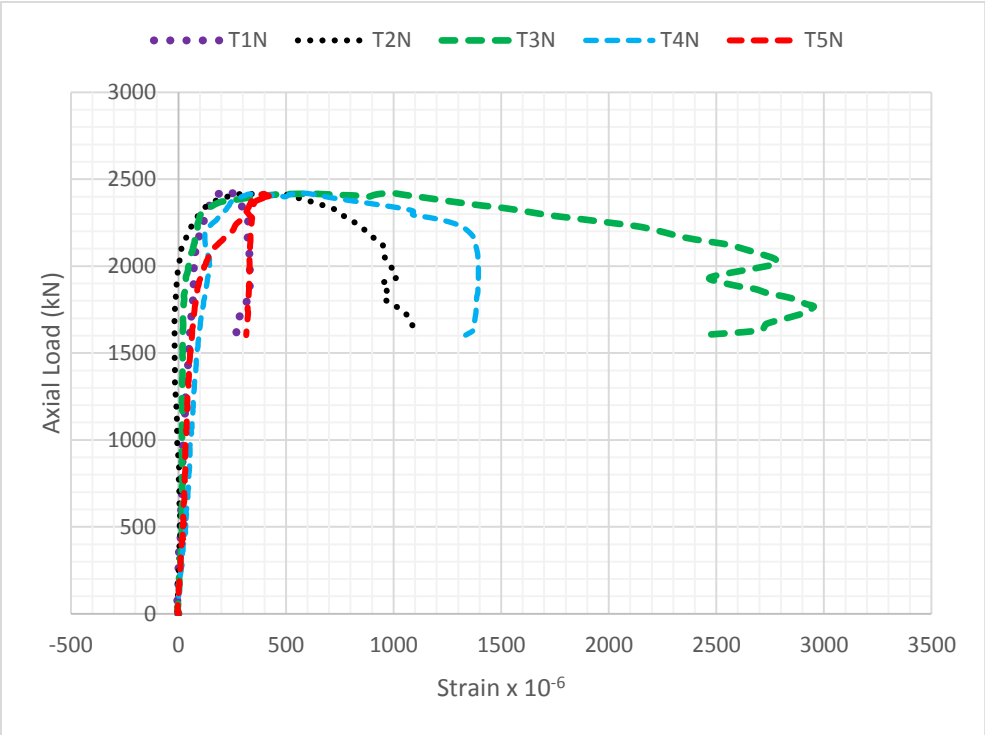
รูปที่ 4.22 เสา tie-T เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



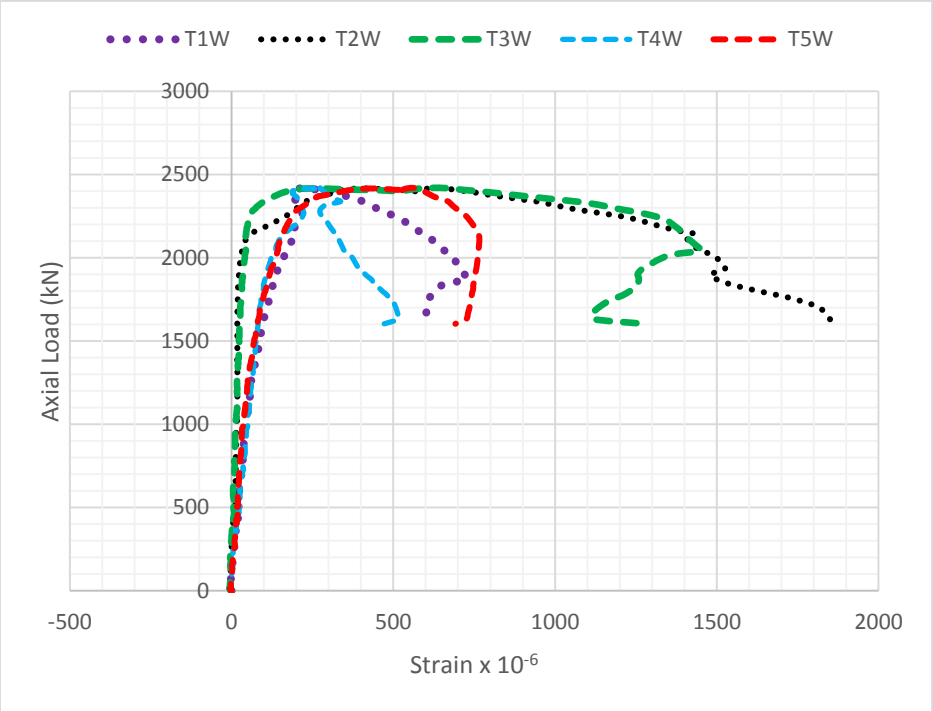

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา tie-T



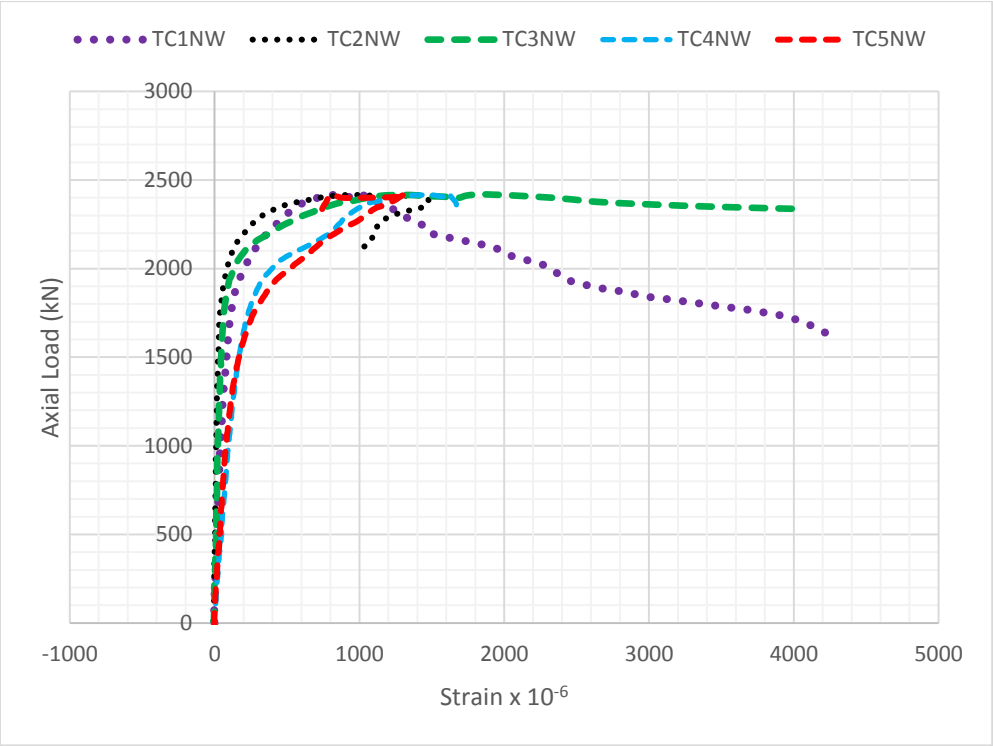

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนเสากับความเครียดของเหล็กปลอกของเสา tie-T




รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสา N (tie-T)



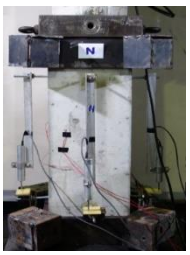

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสา W (tie-T)




รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีจุดมุมเสา NW (tie-T)

4.2.9 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)

เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงจะเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับ ระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนถึงค่าแรงที่ 1562.5 kN ความชันลดลงเล็กน้อยในที่สุดค่าแรงสูงสุด 1972 kN และความเครียดมีค่า 1.297 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะการเคลื่อนทีก็ยังคงขยับเพิ่มไปได้เรื่อยๆ และแรงค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อค่า 1577.5 kN ค่าระยะการเคลื่อนที 3.89 มิลลิเมตร เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือน พฤติกรรมของเสามีความเหนียวที่ชัดเจน ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่เจ็ด ชั้นที่แปดและเหล็กเสริมตามแนวแกนเสา ที่ติดตั้งวัดค่าความเครียด แสดงผล อย่างชัดเจนว่าเหล็กเสริมดังกล่าวเกิดการคราก

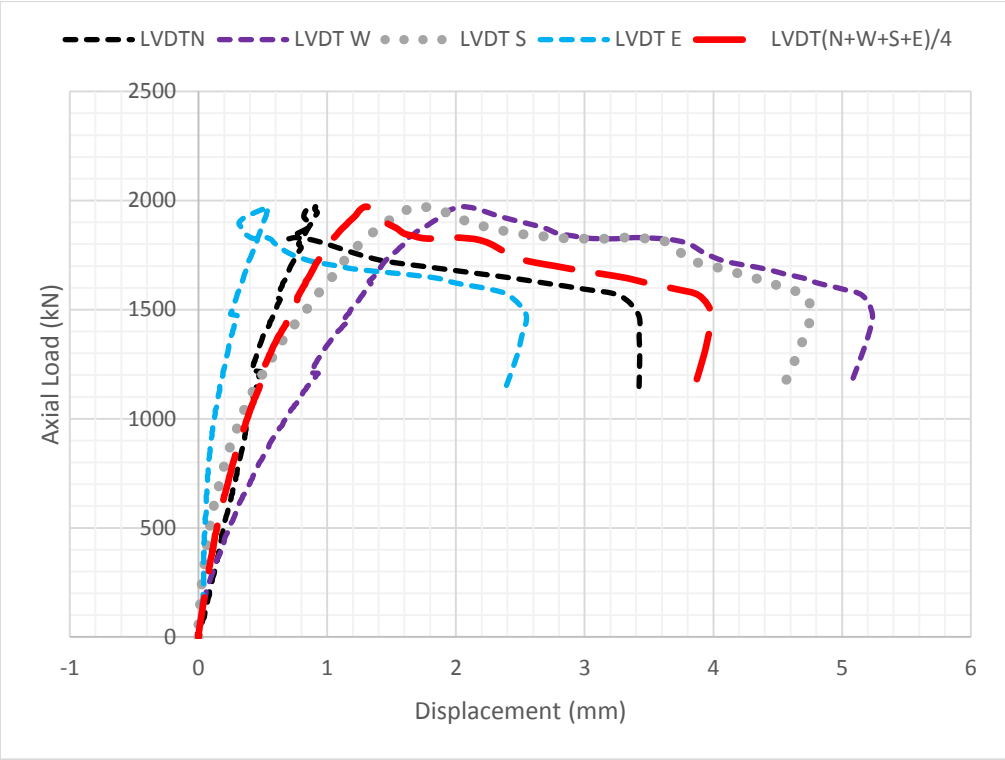


(ก) ก่อนทดสอบ

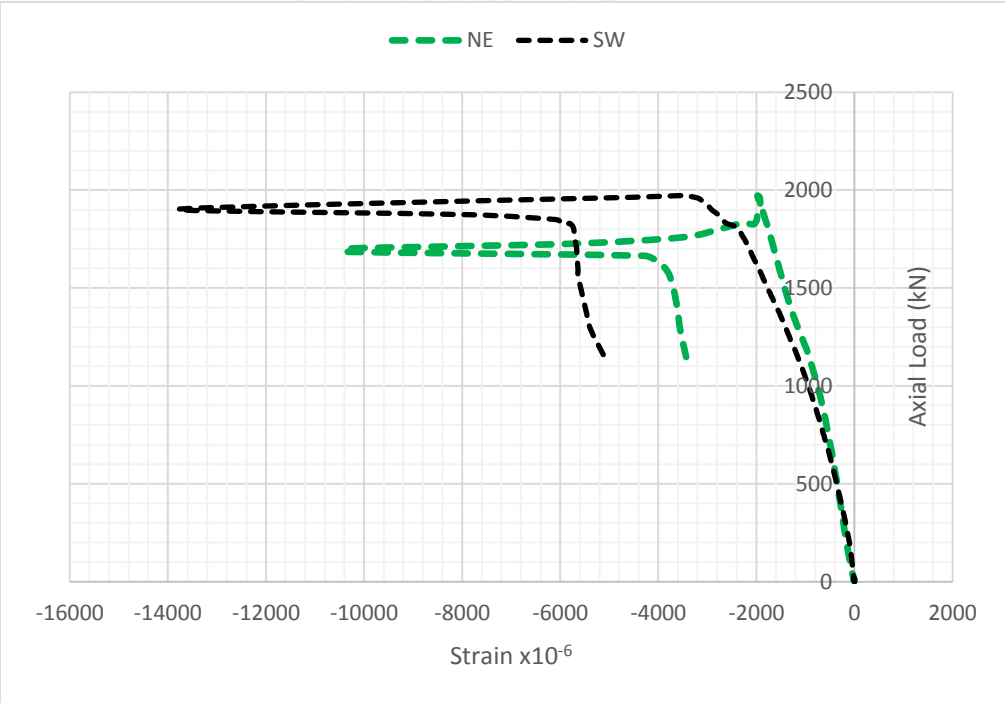

(ข) หลังทดสอบ N


(ค) หลังทดสอบ E

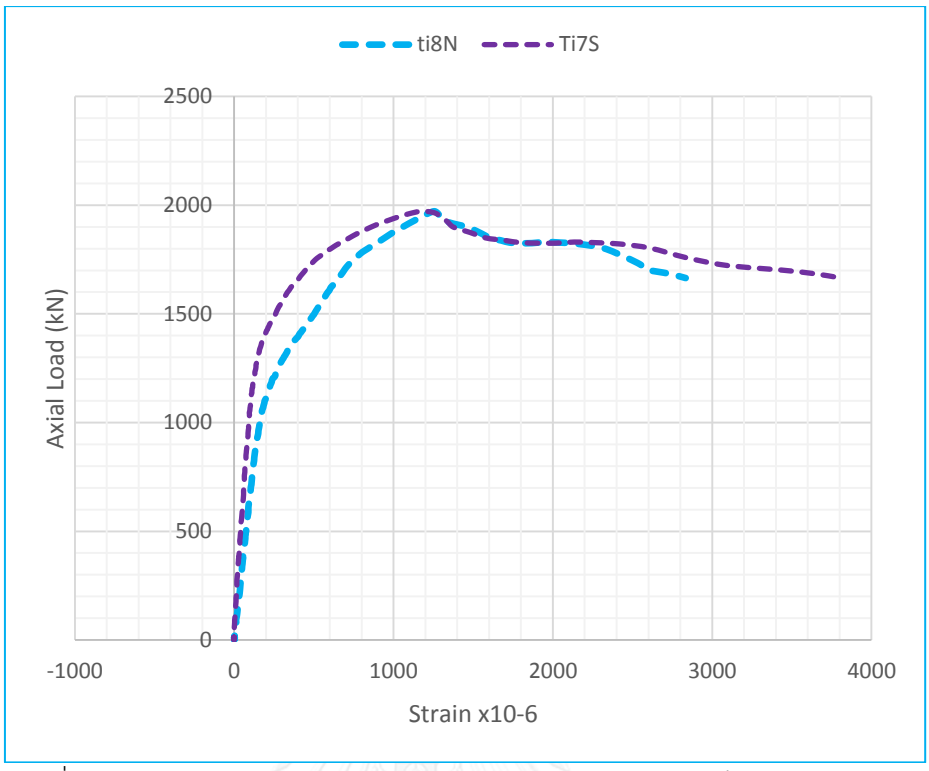
รูปที่ 4.28 เสา RC เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา RC




รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์แรงกับความเครียดของเหล็กตามแนวแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)



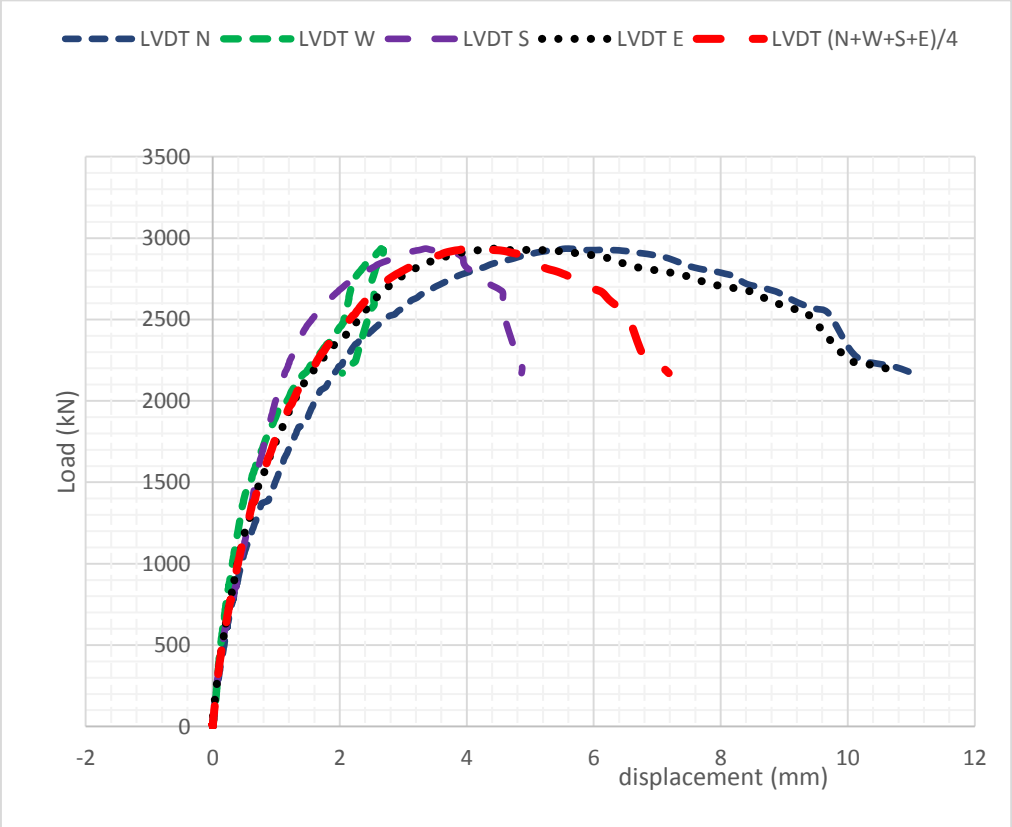

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอกเสา (RC)

4.2.10 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที 5ชั้น (RC-T-5)

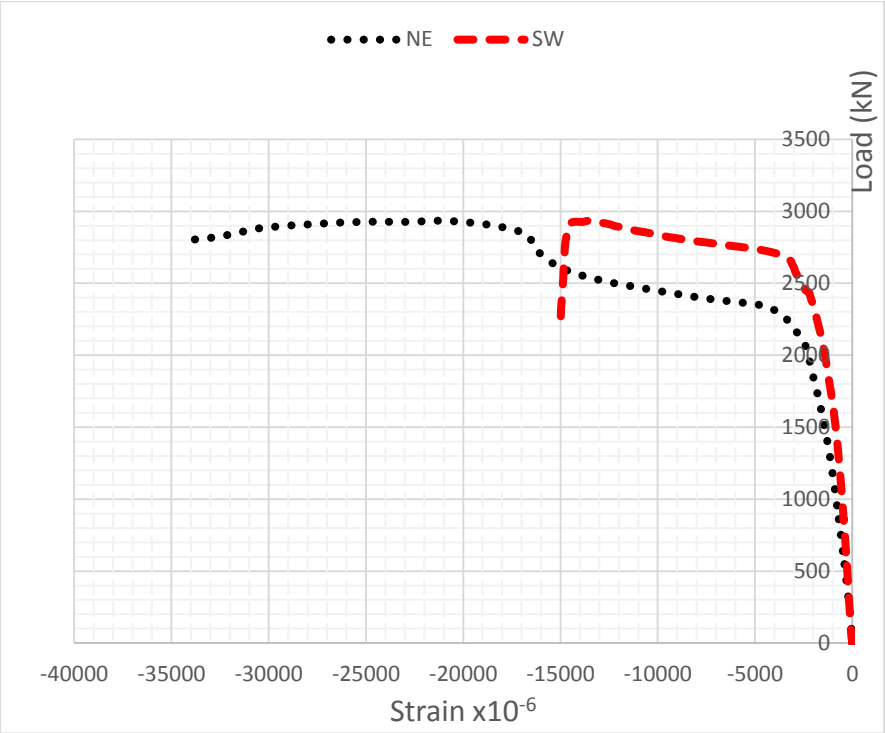
เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนแรงมีค่า1862 kN ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกน 1.1 มิลลิเมตร ความชันลดลงเล็กน้อยในที่สุดค่าแรงสูงสุด 2935.24 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 3.97 มิลลิเมตร หลังจากนั้นแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะในแนวดิ่งก็ยังคงขยับเพิ่มขึ้นได้เรื่อยๆ และแรงค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อแรงมีค่า 2170.46 kN ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 7.1 มิลลิเมตร คอนกรีตเกิดการระเบิดออกที่กลางเสา และรอยเชื่อมของกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ที่มุมเสาฉีกขาดออกที่ชั้น 2, 3 ด้าน NE พฤติกรรมของเสามีความเหนียวที่ชัดเจน ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่เจ็ดและชั้นที่แปดที่ติดตั้งค่าวัดความเครียด แสดงผลออกมาเห็นอย่างชัดเจนว่าเหล็กปลอกเกิดการคราก และเหล็กเสริมตามแนวแกนเสาคราก ทั้งนี้เกิดจากเสามีเหล็กรูปตัวทีมาโอบรัดภายนอก ทำให้เพิ่มค่า Stiffness ขึ้นแก่เสาได้อย่างมาก เหล็กรูปตัวทีที่มุมเสาตั้งแต่ชั้นหนึ่ง ถึงชั้นห้า คราก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กรูปตัวทีได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพแล้ว แล้วยังช่วยไม่ให้เกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนได้อย่างดี


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N (ค) หลังทดสอบ E-N

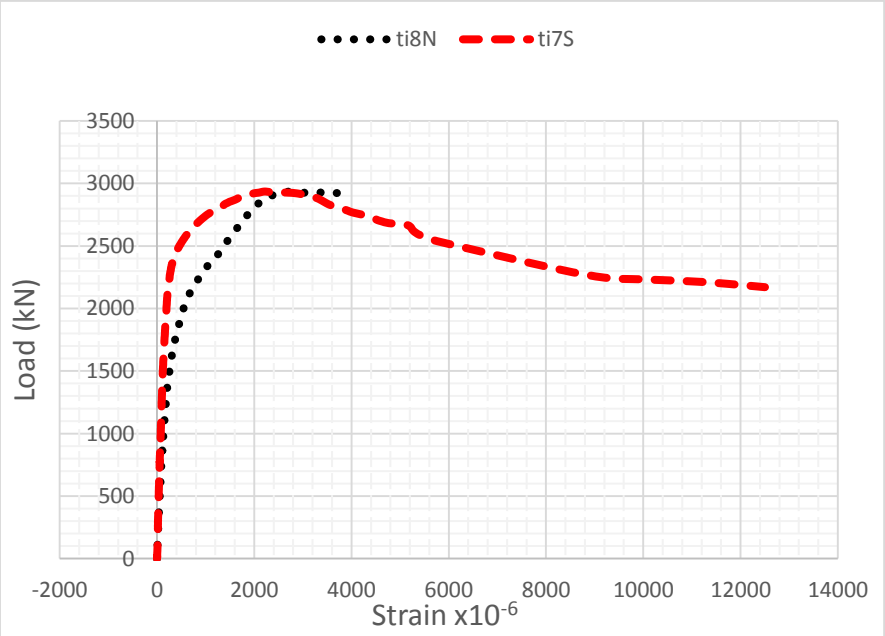
รูปที่ 4.32 เสา RC-T-5 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



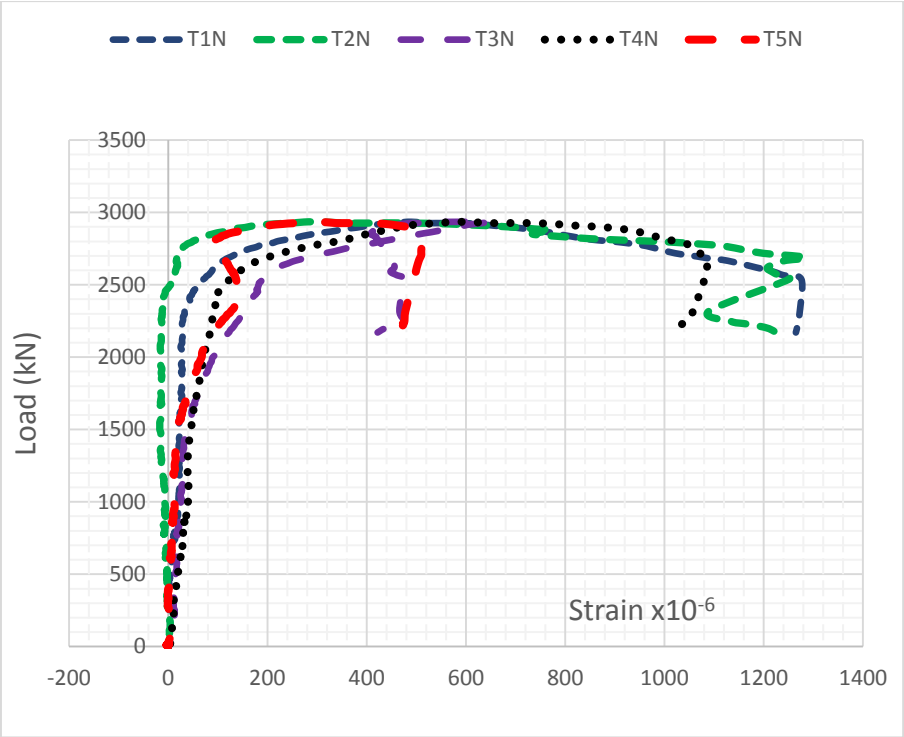

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ RC-T-5



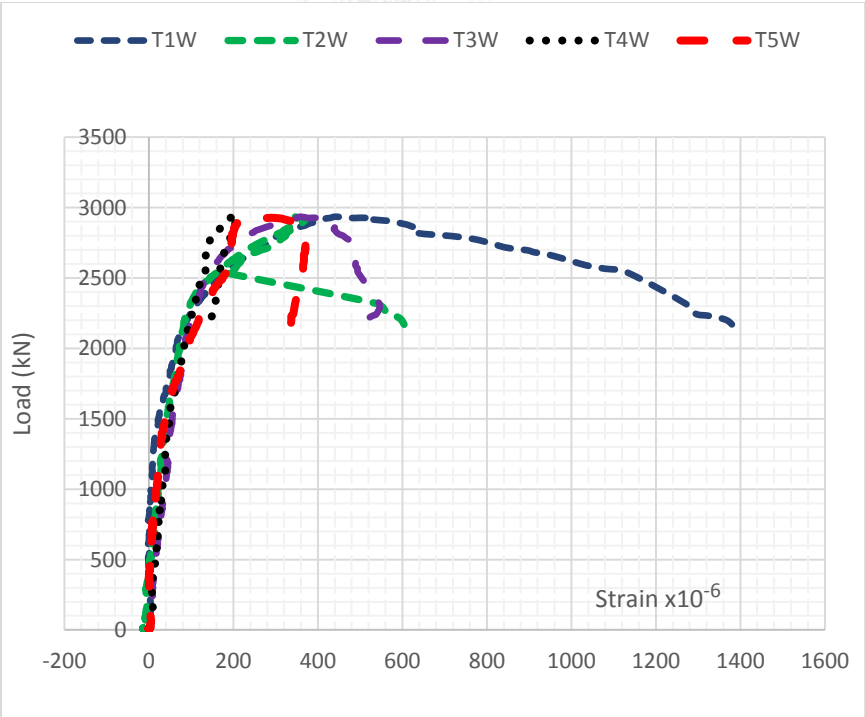

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กเสริมตามแนวแกนเสา RC-T-5



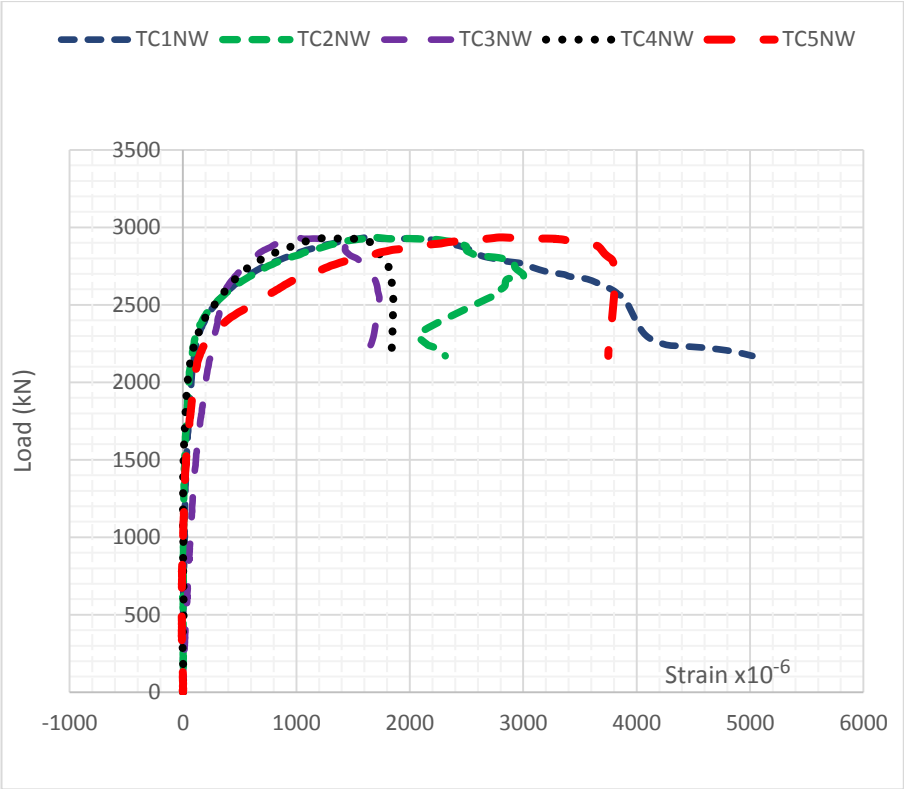

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอกของเสา (RC-T-5)




รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสา N (RC-T-5)




รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์แรงกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีกลางเสา W (RC-T-5)

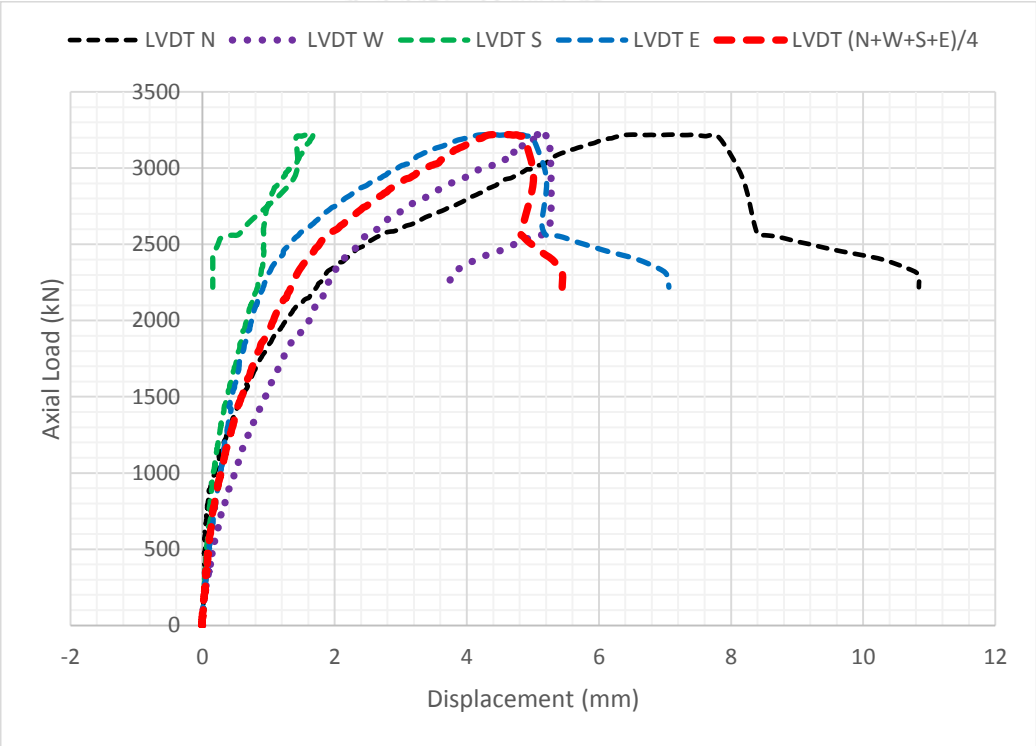



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์แรงกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีจุดมุมเสา NW (RC-T-5)

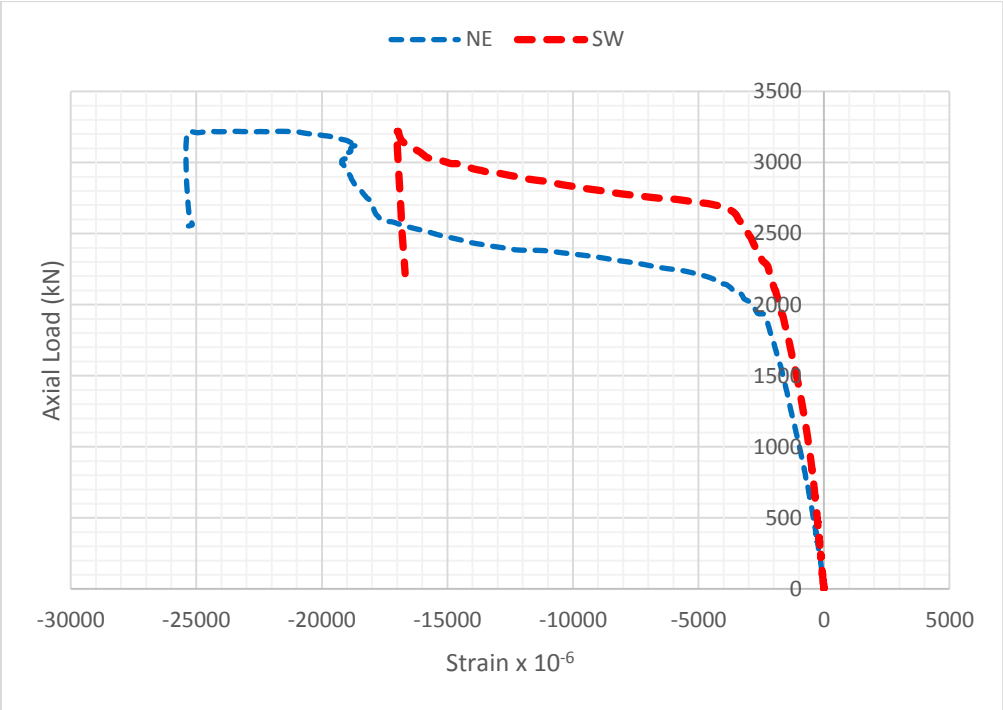
4.2.11 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (RC-T-6) เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนแรงมีค่า 2456 kN ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกน 1.65 มิลลิเมตร ความชันลดลงในที่สุดค่าแรงสูงสุด 3209 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 4.86 มิลลิเมตร หลังจากนั้นแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะในแนวดิ่งก็ยังคงขยับเพิ่มขึ้นได้ไม่มาก และแรงค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อแรงมีค่า 2301 kN ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 5.44 มิลลิเมตร คอนกรีตเกิดการระเบิดออกที่กลางเสา และรอยเชื่อมของกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ที่มุมเสาฉีกขาดออกที่ชั้น 1, 2 ด้าน NW พฤติกรรมของเสามีความเหนียวที่ชัดเจน ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่เจ็ดและชั้นที่แปดที่ติดตั้งค่าวัดความเครียด แสดงผลออกมาเห็นอย่างชัดเจนว่าเหล็กปลอกเกิดการคราก และเหล็กเสริมตามแนวแกนเสาคราก ทั้งนี้เกิดจากเสามีเหล็กรูปตัวทีมาโอบรัดภายนอก ทำให้เพิ่มค่า Stiffness ขึ้นแก่เสาได้อย่างมาก เหล็กรูปตัวทีที่มุมเสาตั้งแต่ชั้นหนึ่ง ถึงชั้นห้า คราก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กรูปตัวทีได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพแล้ว (เหล็กหน้าตัดรูปตัวทีเกิดการครากที่สมบูรณ์ทั้งในส่วนของปีกและส่วนของเอว)


(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N (ค) หลังทดสอบ N-W

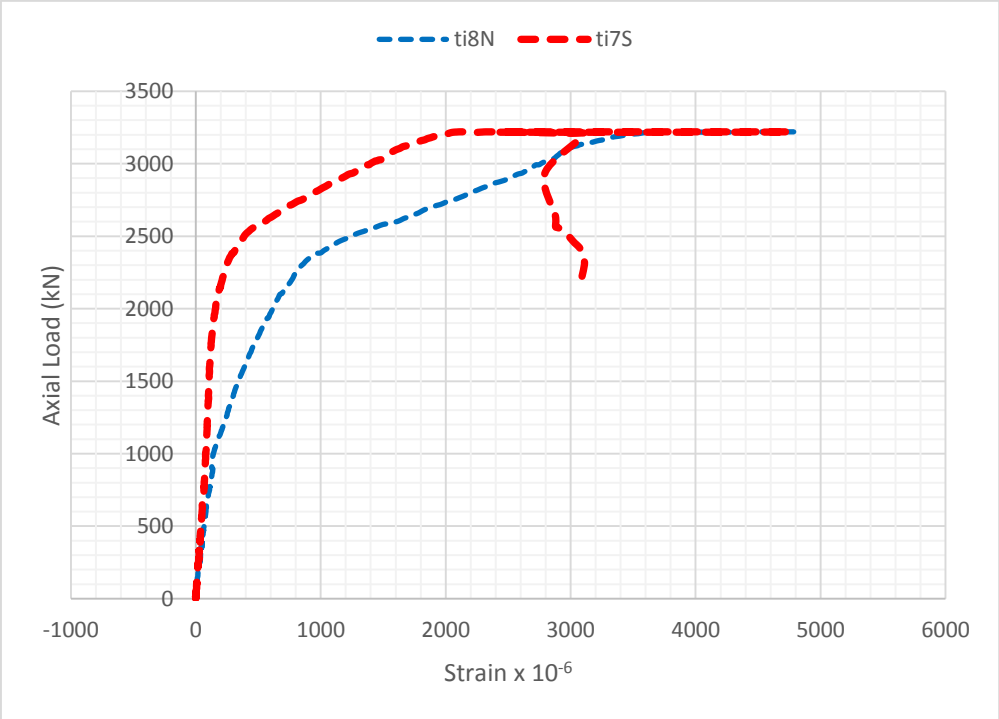
รูปที่ 4.39 เสา RC-T-6 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



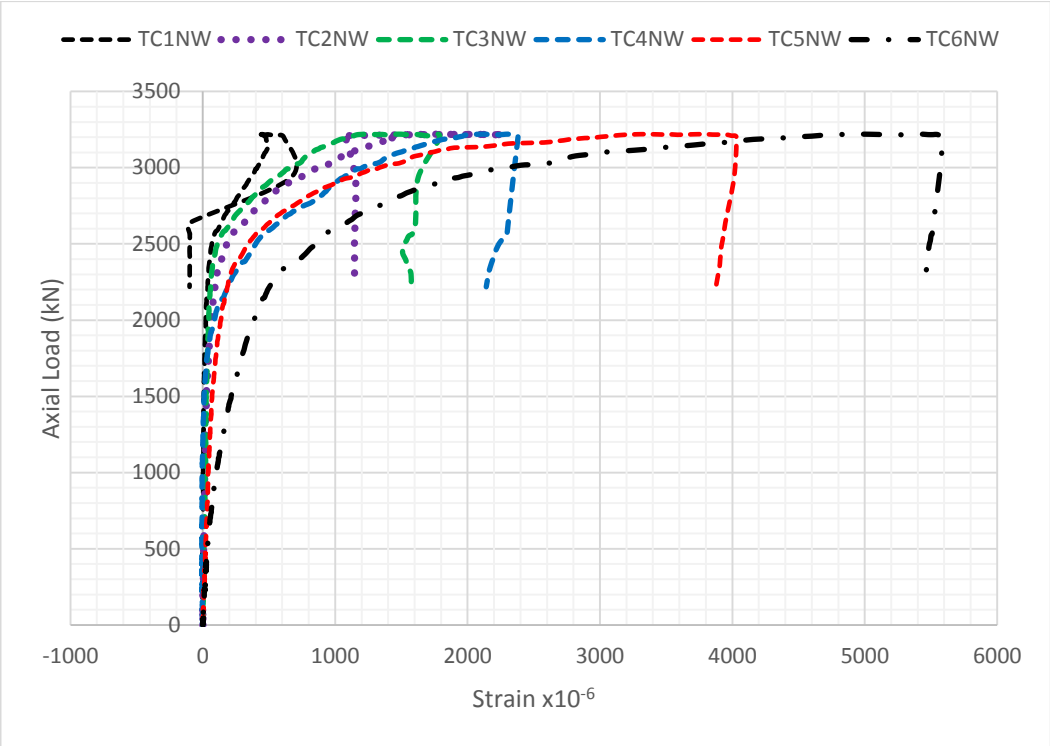

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่(RC-T-6)



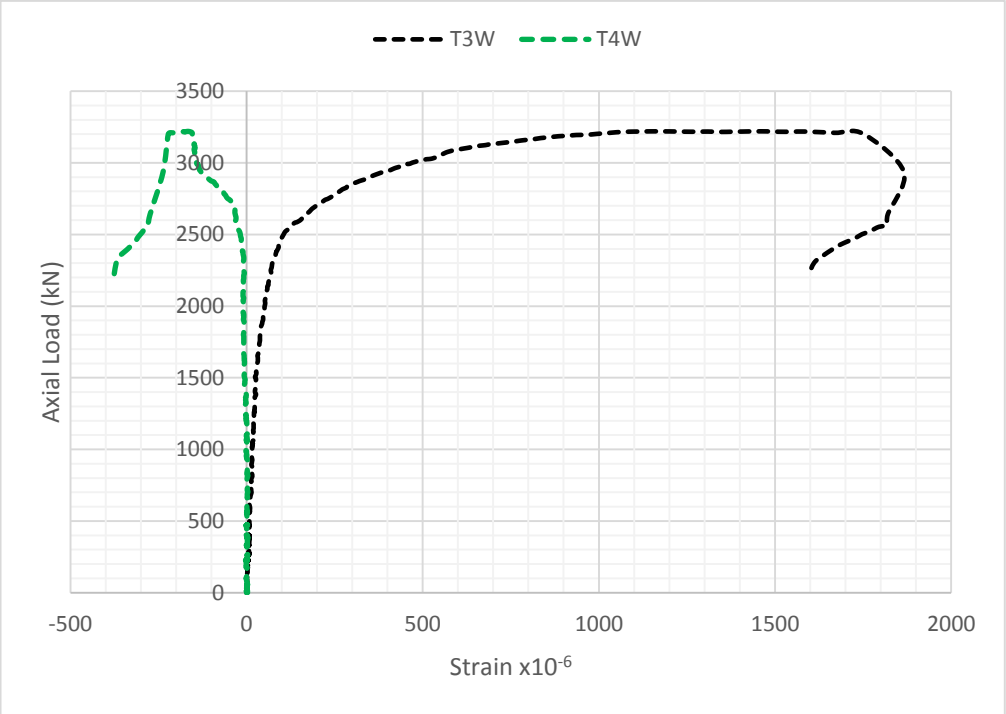

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดในเหล็กตามยาว (RC-T-6)



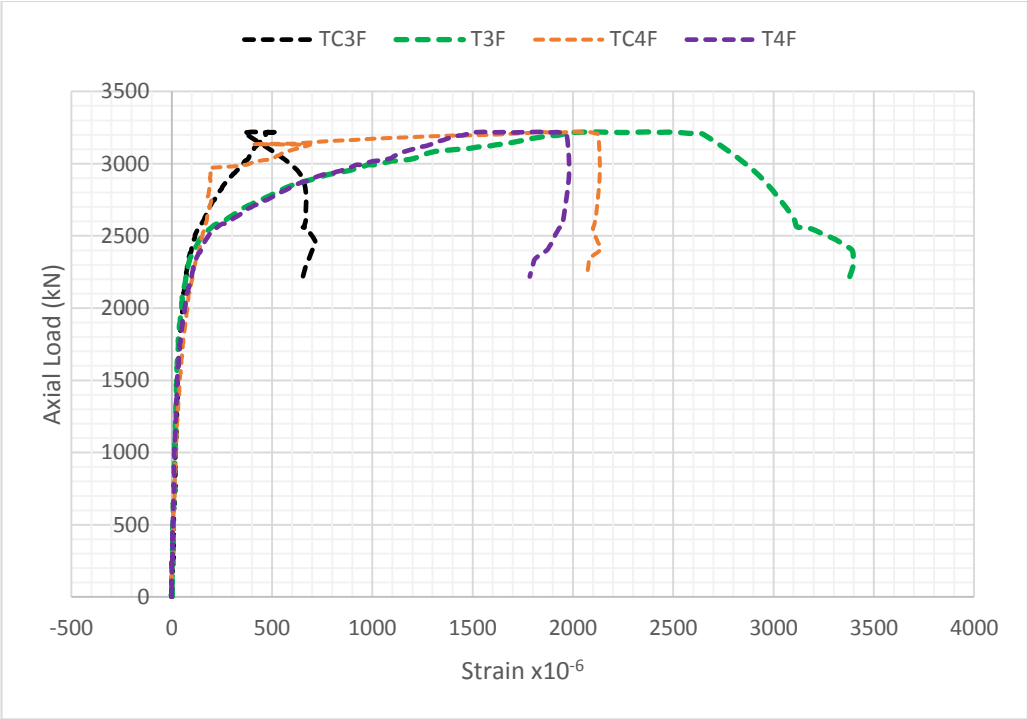

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดในเหล็กปลอก (RC-T-6)




รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีจุดมุมNW (RC-T-6)




รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีด้าน W (RC-T-6)

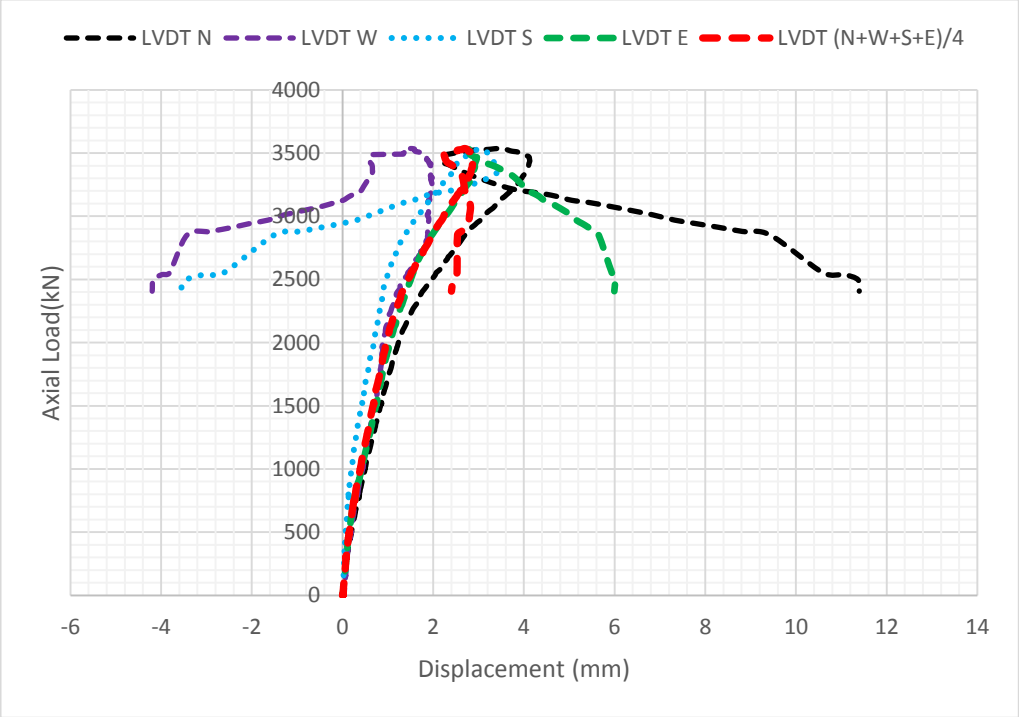



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีด้านในส่วนของปีก (RC-T-6)

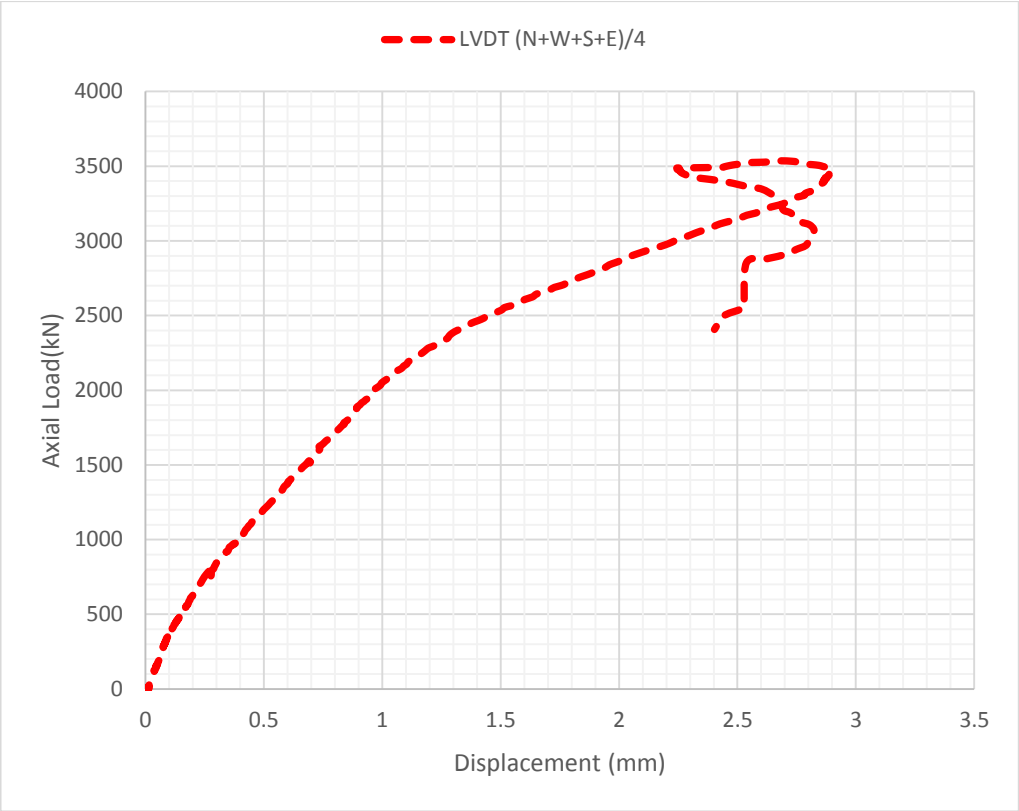
4.2.12 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (RC-T-7) เมื่อเริ่มให้แรงกดที่หัวเสา แรงเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น จนแรงมีค่า 2482 kN ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกน 1.49 มิลลิเมตร ความชันลดลงในที่สุดค่าแรงสูงสุด 3518 kN และระยะการเคลื่อนที่มีค่า 2.85 มิลลิเมตร หลังจากนั้นแรงในเสาจะลดลงแต่ระยะในแนวดิ่งก็ยังคงขยับเพิ่มขึ้นได้ไม่มาก และแรงค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อแรงมีค่า 2406 kN ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 6 มิลลิเมตร คอนกรีตเกิดการระเบิดออกที่หัวเสาช่องว่างระหว่างเหล็กแผ่นกับเหล็กรูปตัวทีเพราะช่องว่าที่ไม่ถูกโอบรัดมีค่ามากที่สุด และรอยเชื่อมของกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ที่มุมเสาฉีกขาดออกที่ชั้น 3 ด้าน NW แล้วคอนกรีตก็ระเบิดออกทันที พฤติกรรมของเสามีความเหนียวที่ชัดเจน ส่วนเหล็กปลอกชั้นที่เจ็ดและชั้นที่แปดที่ติดตั้งค่าวัดความเครียด แสดงผลออกมาเห็นอย่างชัดเจนว่าเหล็กปลอกเกิดการคราก และเหล็กเสริมตามแนวแกนเสาคราก ทั้งนี้เกิดจากเสามีเหล็กรูปตัวทีมาโอบรัดภายนอก (ทำให้ช่องว่างการโอบรัดน้อย) ทำให้เพิ่มค่า Stiffness ขึ้นแก่เสาได้อย่างมาก เหล็กรูปตัวทีที่มุมเสาตั้งแต่ชั้นหนึ่ง ถึงชั้นห้า คราก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กรูปตัวทีได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพแล้ว (เหล็กหน้าตัดรูปตัวทีเกิดการครากที่สมบูรณ์ทั้งในส่วนของปีกและส่วนของเอว)

(ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ N-W (ค) หลังทดสอบ S-E

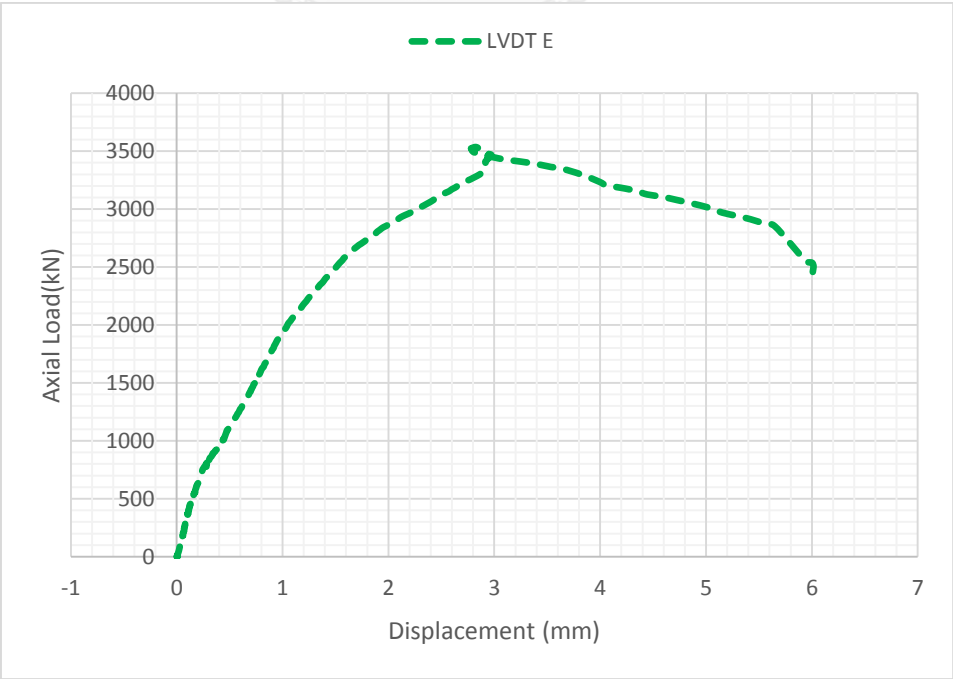
รูปที่ 4.46 เสา RC-T-7 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



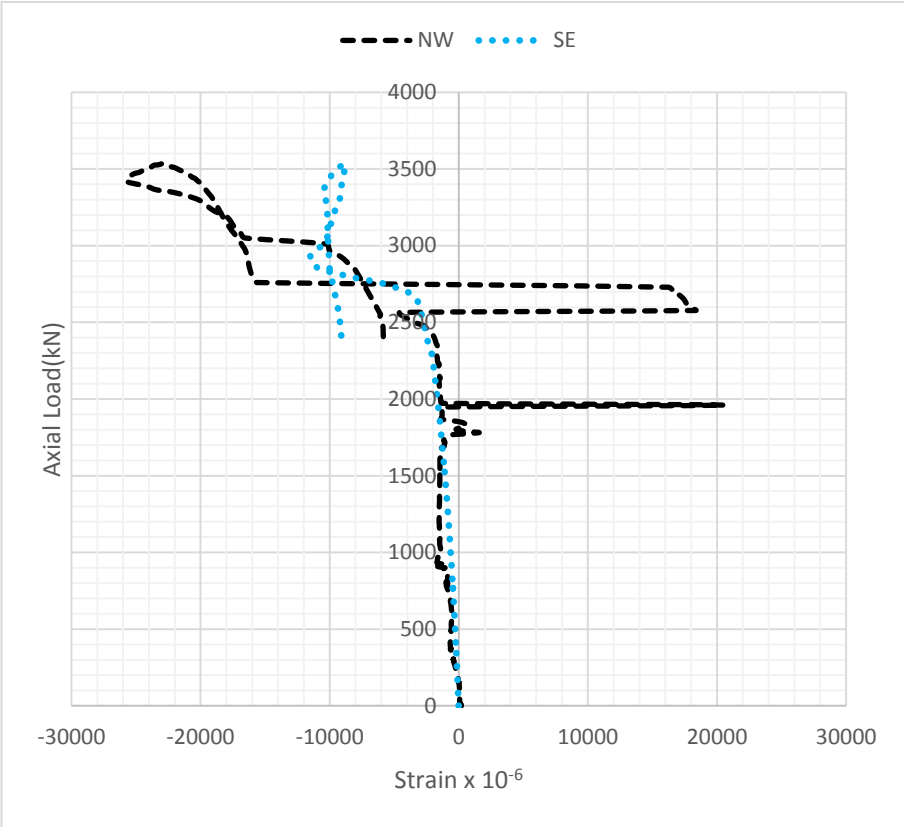

รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่(RC-T-7)



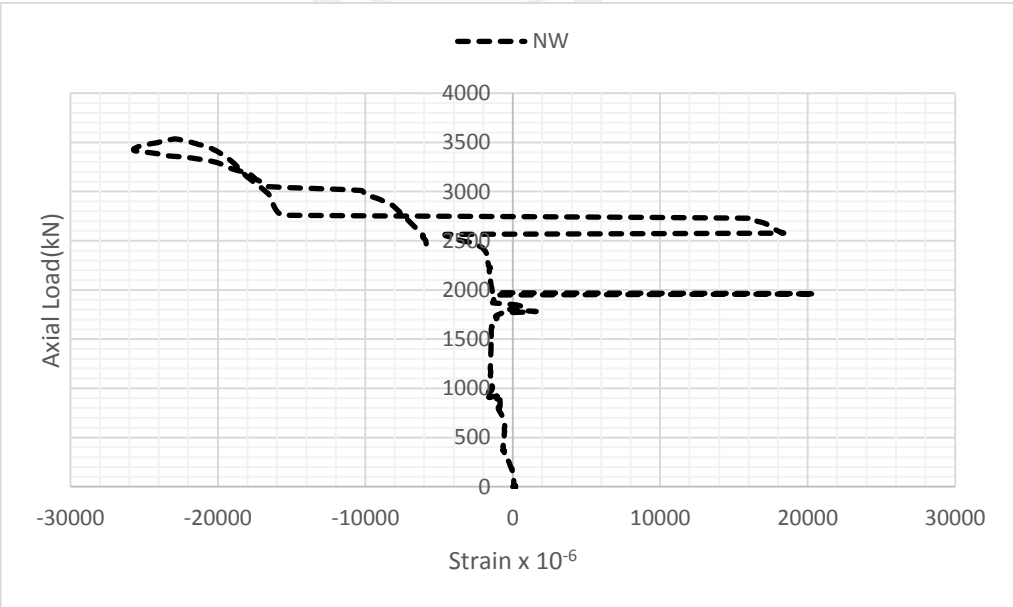

รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ย (RC-T-7)



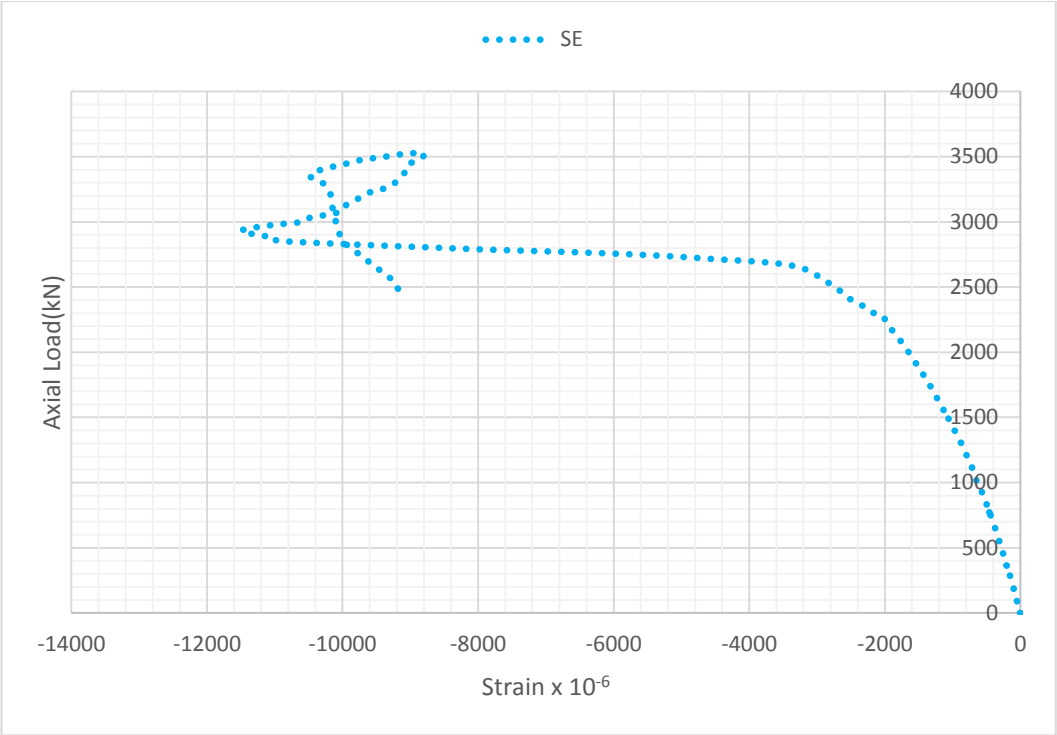

รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ด้านE (RC-T-7)



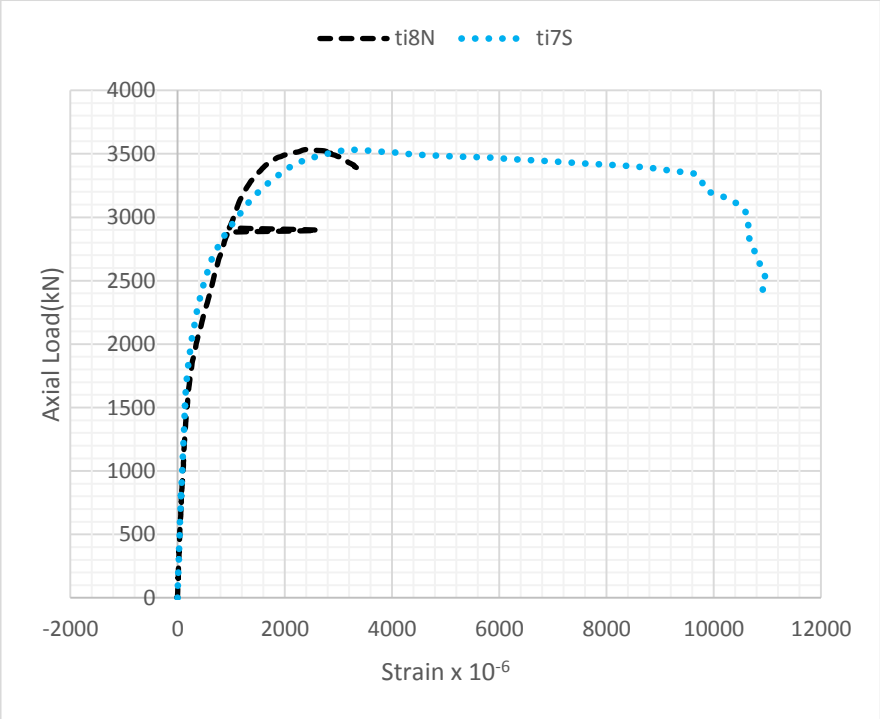

รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กตามแนวแกน (RC-T-7)



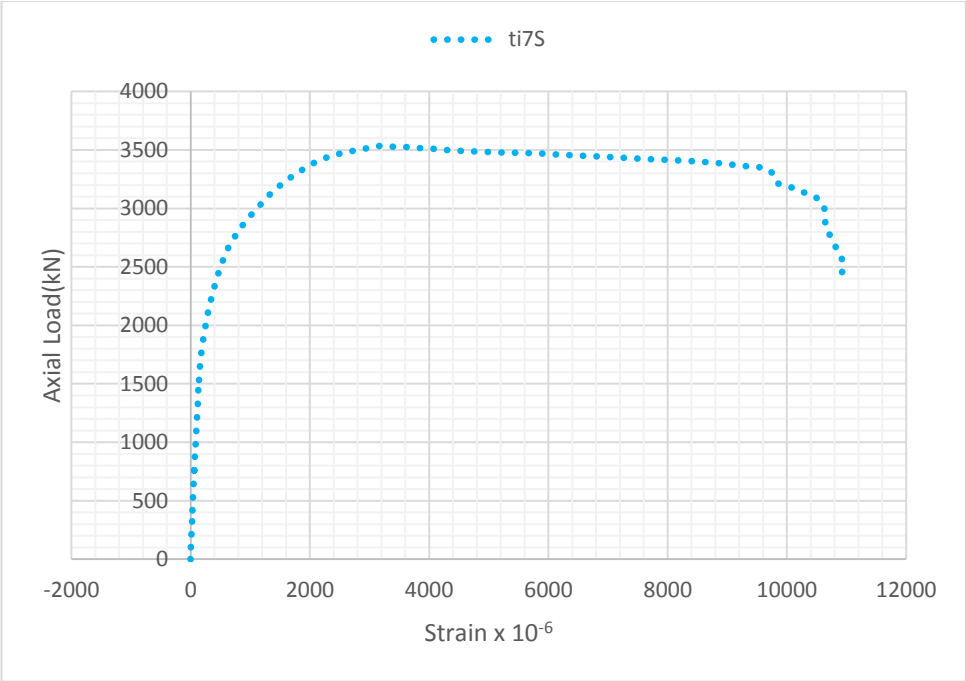

รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กตามแนวแกนNW (RC-T-7)



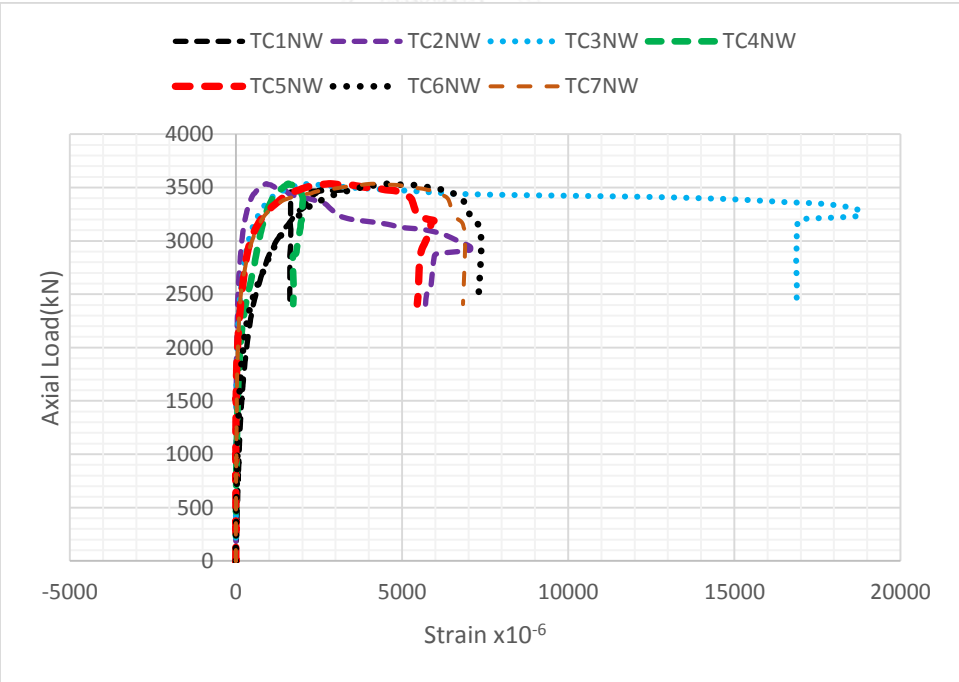

รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กตามแนวแกน SE (RC-T-7)



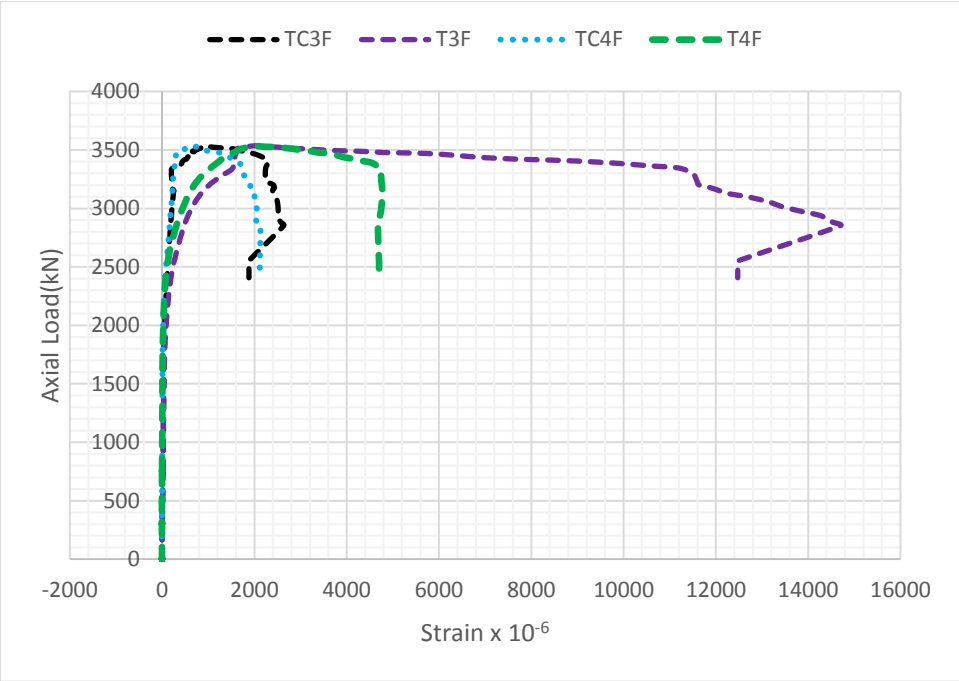

รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอก (RC-T-7)



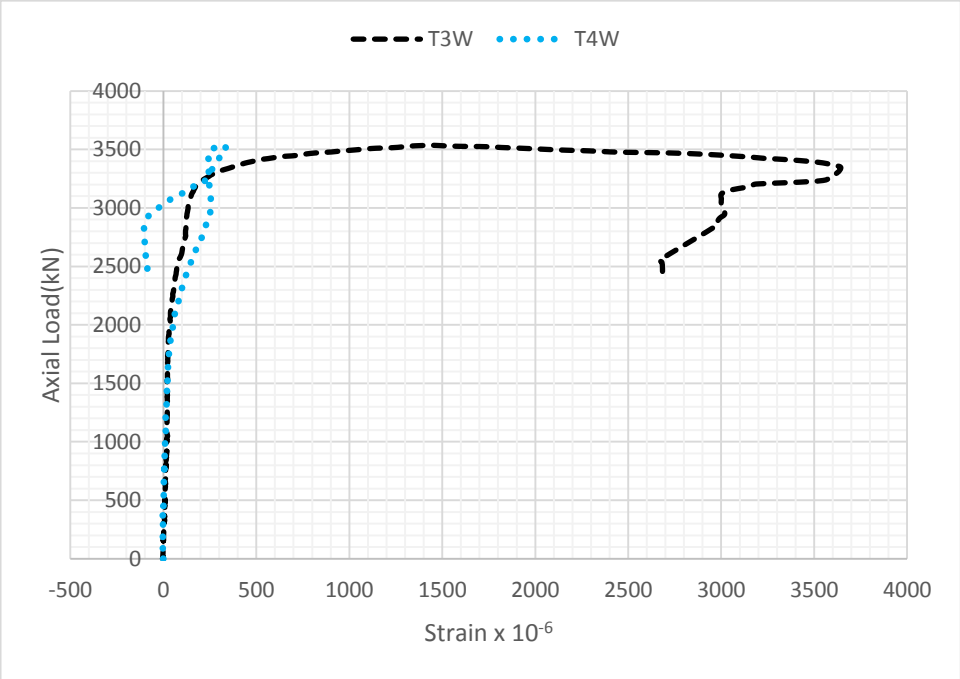

รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอกti7S(RC-T-7)




รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีจุดมุมNW (RC-T-7)




รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีบริเวณปีกด้าน W (RC-T-7)




รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กรูปตัวทีด้าน W (RC-T-7)

4.2.13 เปรียบเทียบค่า แรงตามแนวแกนเสา และ ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกน ของเสาแต่ละประเภท

1 เสาคอนกรีตล้วนเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (U-T) กำลังเพิ่มเป็น 60เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตล้วน (U)

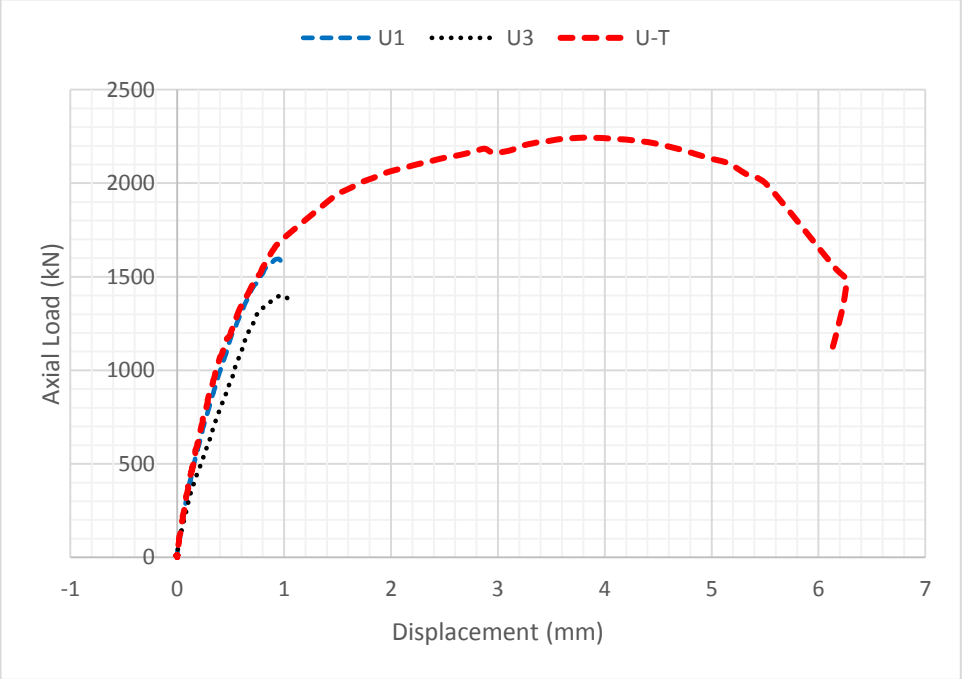
2 เสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กตามแนวแกนเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (L-T) กำลังเพิ่มขึ้น 74 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กตามแนวแกน (L)

3 เสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กตามแนวขวางเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (tie-T) กำลังเพิ่มขึ้น 59 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตมีเฉพาะเหล็กตามแนวขวาง (tie)

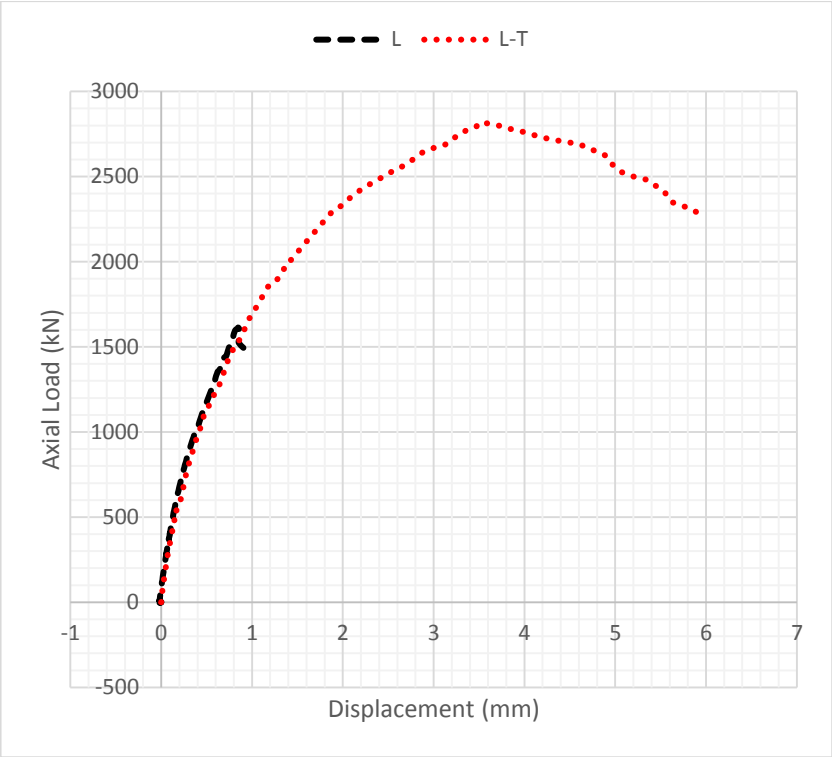
4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีจำนวน 5ชั้น (RC-T-5) กำลังเพิ่มขึ้น 48.8 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)

5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีจำนวน 6ชั้น (RC-T-6) กำลังเพิ่มขึ้น 63 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)

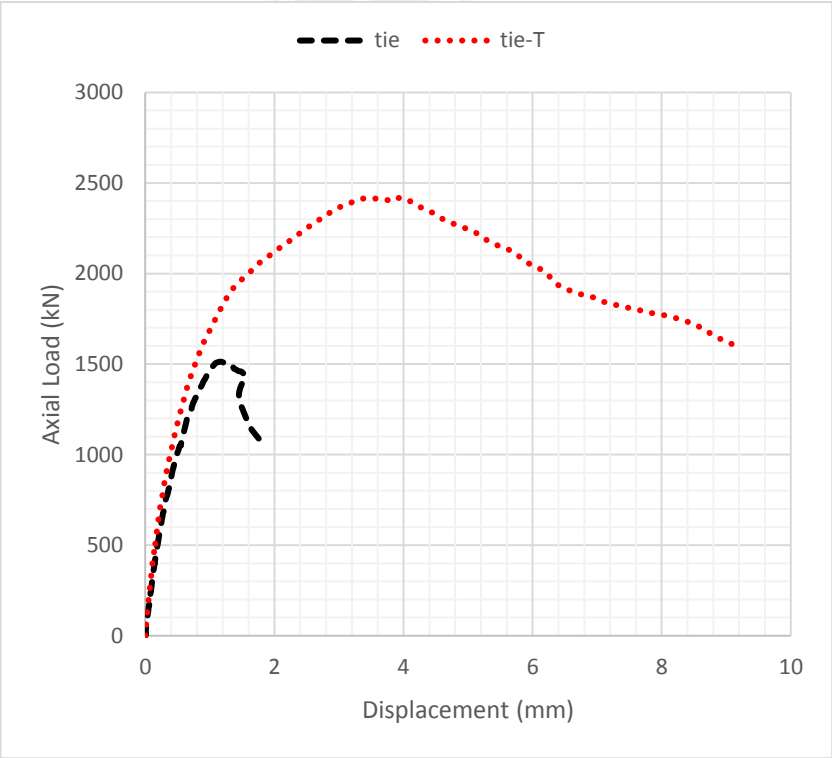
6 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีจำนวน 7ชั้น (RC-T-7) กำลังเพิ่มขึ้น 79 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)



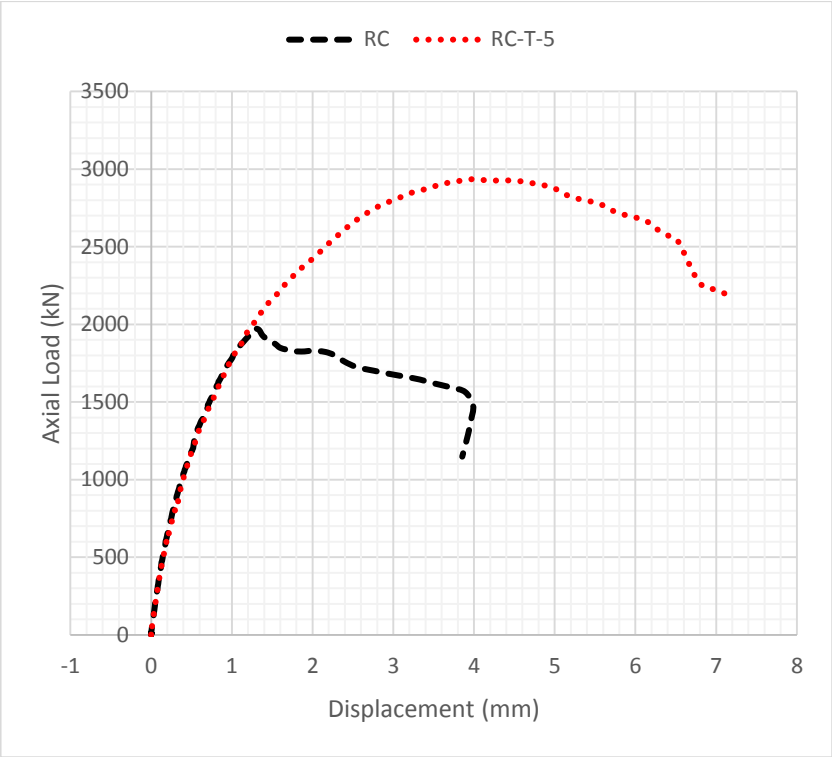

รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา U1, U3, UT



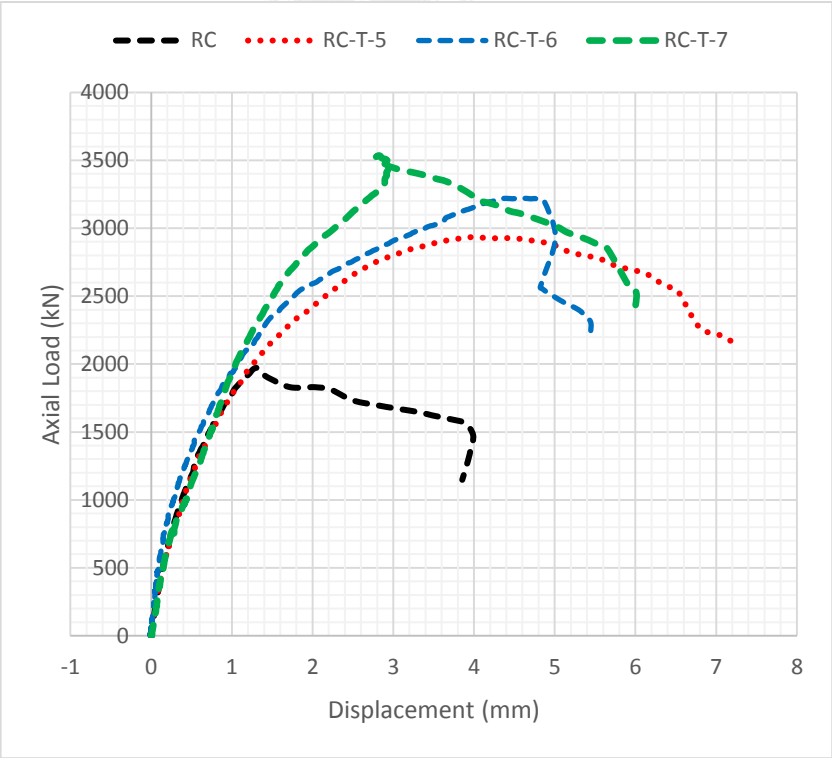

รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา L, L-T



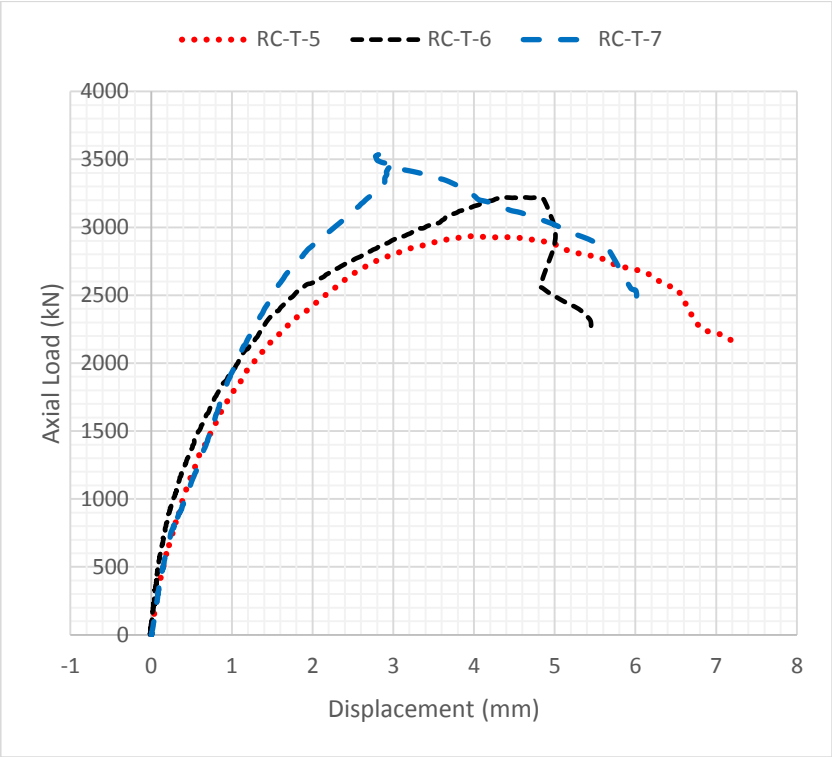

รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา tie ,tie-T



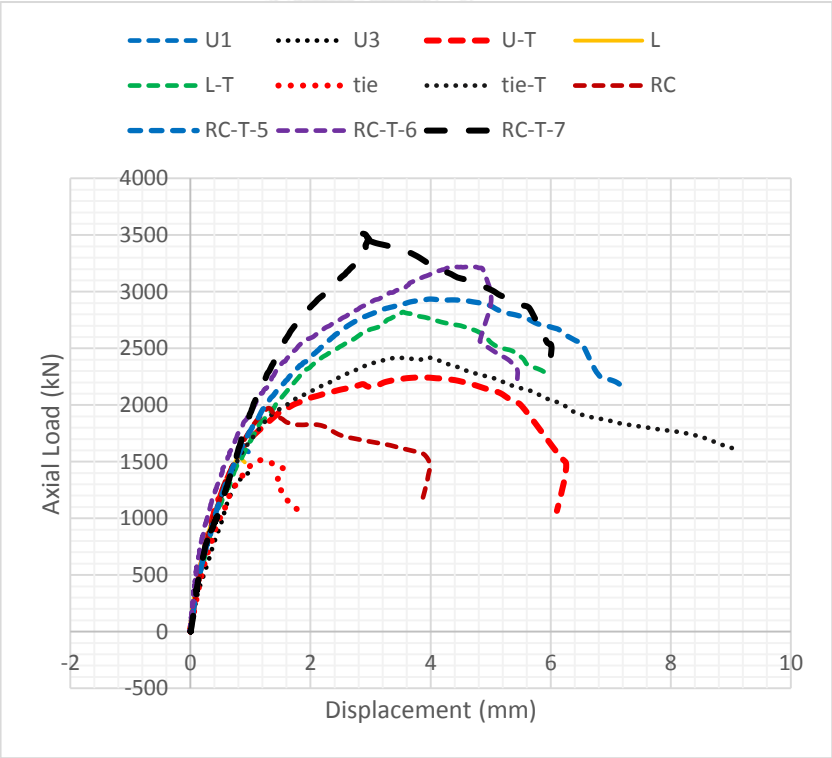

รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา RC, RC-T-5




รูปที่ 4.62 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา RC, RC-T-5, RC-T-6, RC-T-7



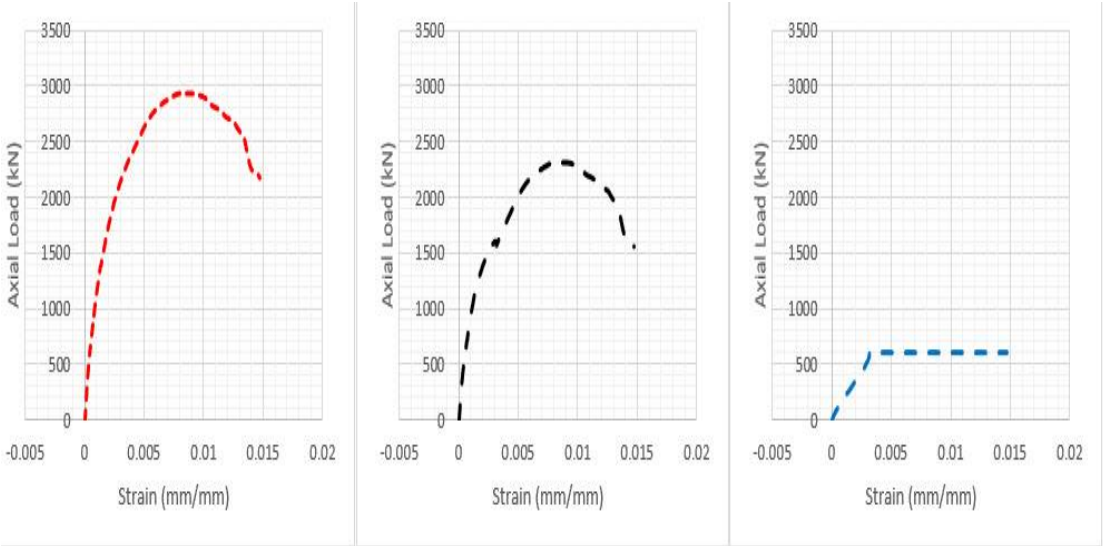

รูปที่ 4.63 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา RC-T-5, RC-T-6, RC-T-7




รูปที่ 4.64 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา U1, U3, U-T, L, L-T, tie, tie-T, RC, RC-T-5, RC-T-6, RC-T-7

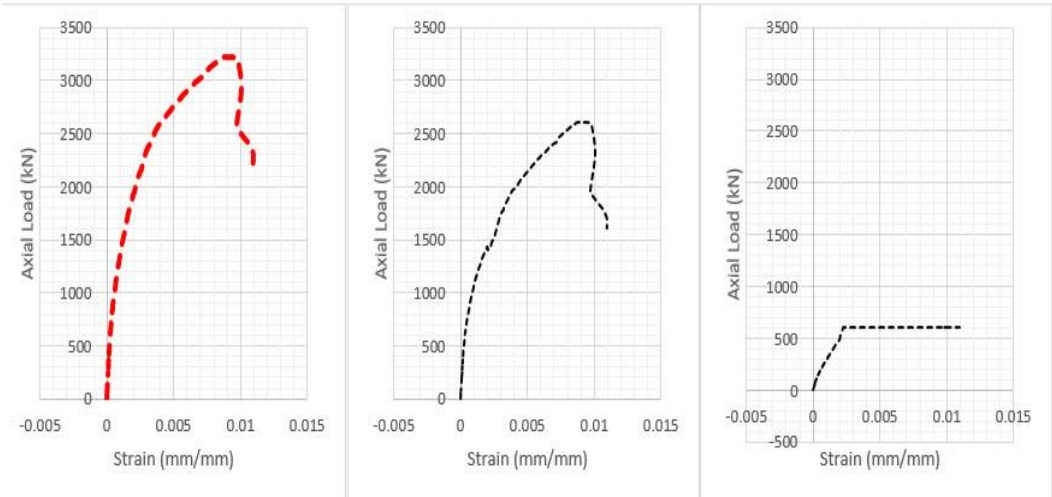
4.2.14 สมการกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที

เสาทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที มีแรงภายในเสาประกอบด้วยแรงที่เกิดจากแรงเนื่องจากเหล็กตามแนวแกน รวม แรงของคอนกรีต เมื่อต้องการแยกแรงของเหล็กออกจากเสาคอนกรีต จึงได้กราฟดังรูปที่ 4.65, 4.66 และ 4.67



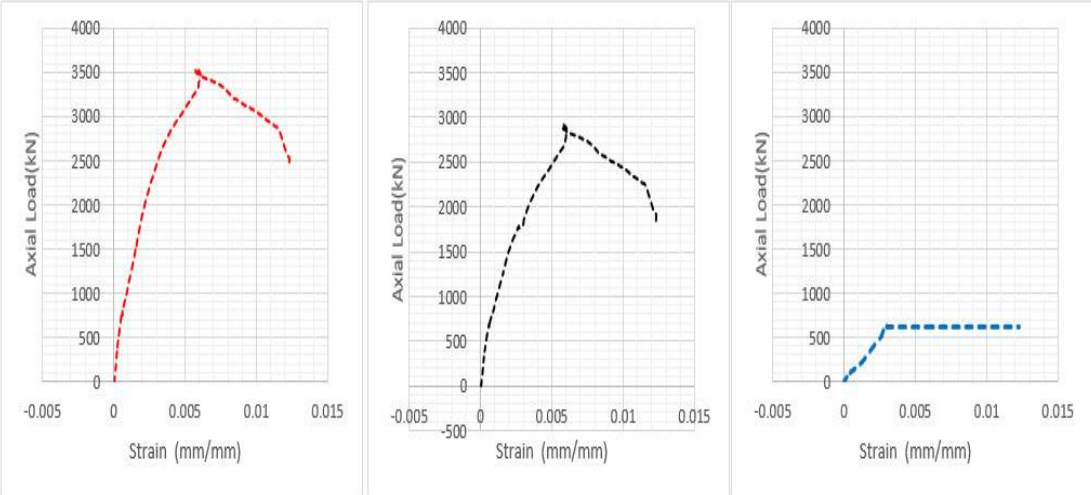

(ก) แรงรวมทั้งหมด (ข) แรงของคอนกรีต (ค) แรงของเหล็ก

รูปที่ 4.65 เปรียบเทียบ แรงรวมทั้งหมด แรงของคอนกรีต แรงของเหล็ก ของเสา RC-T-5




(ก) แรงรวมทั้งหมด (ข) แรงของคอนกรีต (ค) แรงของเหล็ก

รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบ แรงรวมทั้งหมด แรงของคอนกรีต แรงของเหล็ก ของเสา RC-T-6




(ก) แรงรวมทั้งหมด (ข) แรงของคอนกรีต (ค) แรงของเหล็ก

รูปที่ 4.67 เปรียบเทียบ แรงรวมทั้งหมด แรงของคอนกรีต แรงของเหล็ก ของเสา RC-T-7

เมื่อ $f_{cc} = f_{co} + k1\, f_l'$ (1)

$f_l' = k_s f_l$ (2)

$K_1$ คือ ประสิทธิภาพการโอบรัด (confinement effectiveness)

$K_s$ คือ ค่าตัวประกอบรูปร่าง (shape factor)

$f_l$ คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นภายในเสา

$f_l = 2\, f_T A_T / (bxs)$ (3)

เมื่อ b คือ ความกว้างของเสาคอนกรีต

S คือ ระยะห่างของหน้าตัดเหล็กรูปตัวที

$f_T$ คือ ความเค้นที่จุดครากของหน้าตัดเหล็กรูปตัวที

$A_T$ คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปตัวที

เมื่อรวมสมการที่ (1) กับ (2) จึงได้

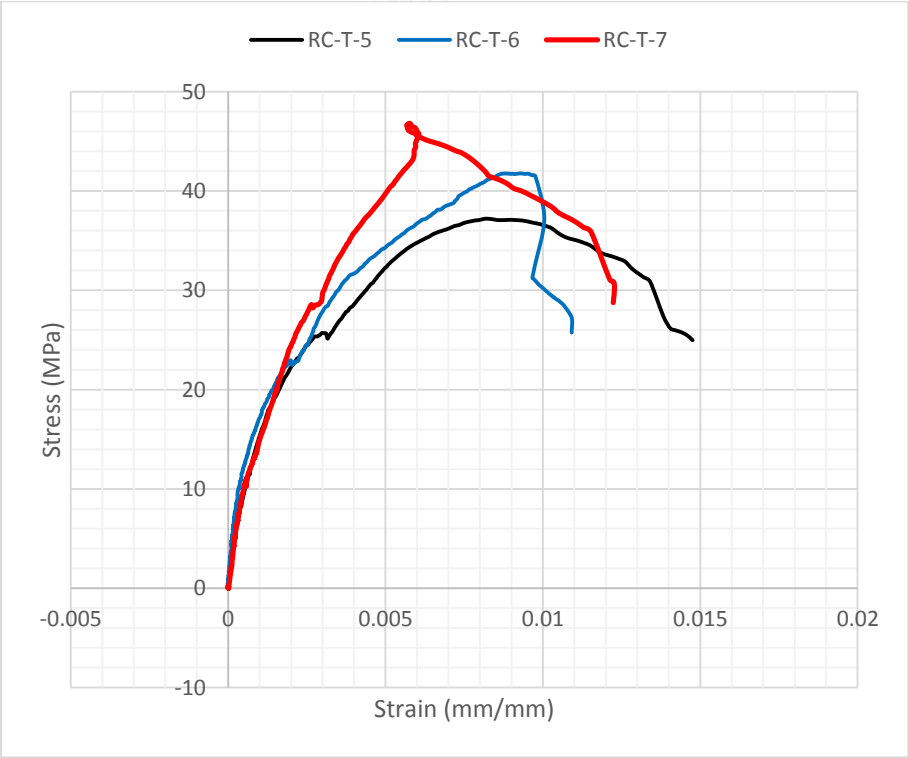
$f_{cc} = f_{co} + k_1\, k_s\, f_l$ (4)

ผลการทดสอบเสา RC-T-5, RC-T-6, RC-T-7

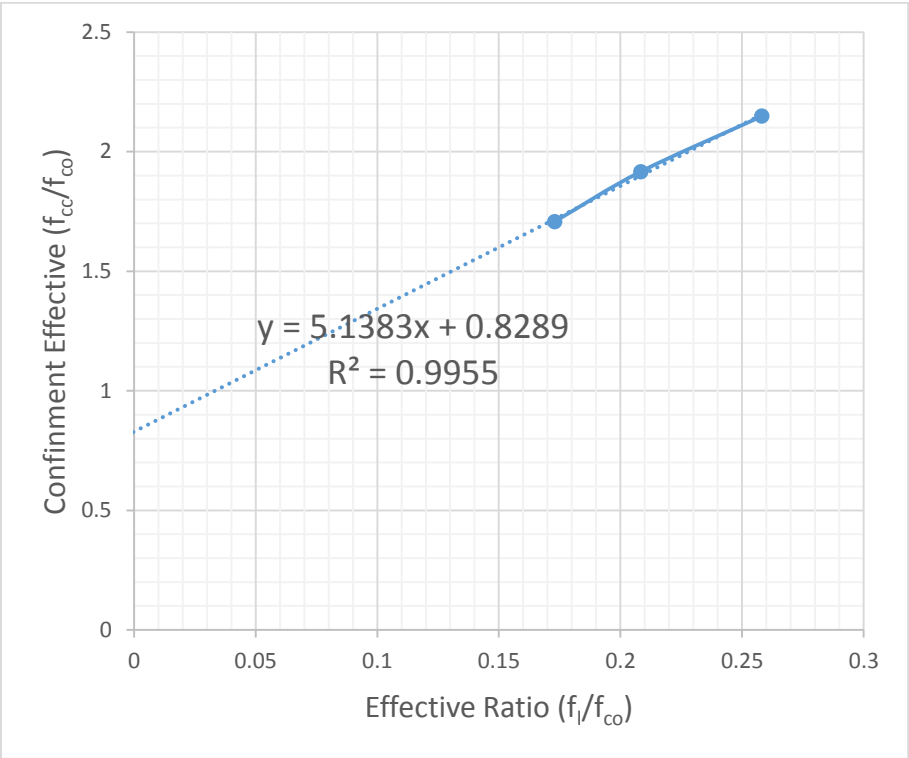
เมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) มีค่า $f_{co}$= 21.79 MPa

ตารางที่ 4.4 ค่าประสิทธิภาพการโอบรัด และ ค่าอัตราส่วนการโอบรัด

| ตัวอย่างทดสอบ | $f_{cc}$ (MPa) | $f_l$ (MPa) | $f_{cc}/f_{co}$ (MPa) | $f_l/f_{co}$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| RC-T-5 | 37.21 | 3.76 | 1.707 | 0.172 |
| RC-T-6 | 41.76 | 4.54 | 1.916 | 0.208 |
| RC-T-7 | 46.81 | 5.62 | 2.148 | 0.258 |




รูปที่ 4.68 ความเค้นกับความเครียดของเสา RC-T-5, RC-T-6, RC-T-7




รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการโอบรัดกับอัตราส่วนการโอบรัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที

ดังนั้นจึงได้สมการทำนายความต้านทานกำลังรับความเค้นอัดสูงสุด ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที

$$f_{cc} = 0.8289\ f_{co} + 5.1383\ f_l$$

## 4.3 ผลการทดสอบเสาหน้าตัด 30x30 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 9 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็นแต่ละกรณีดังนี้

PC1 เสาคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ตัวอย่างทดสอบที่1

PC2 เสาคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ตัวอย่างทดสอบที่2

PC3 เสาคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัดเสา0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร ตัวอย่างทดสอบที่3

RC เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

RC-LS เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

S-RC-F เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กแบน ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

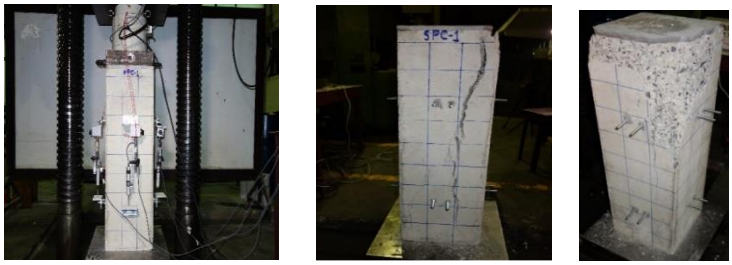
S-RC-T เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

S-RC-LS-F เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กแบนขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

S-RC-LS-T เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

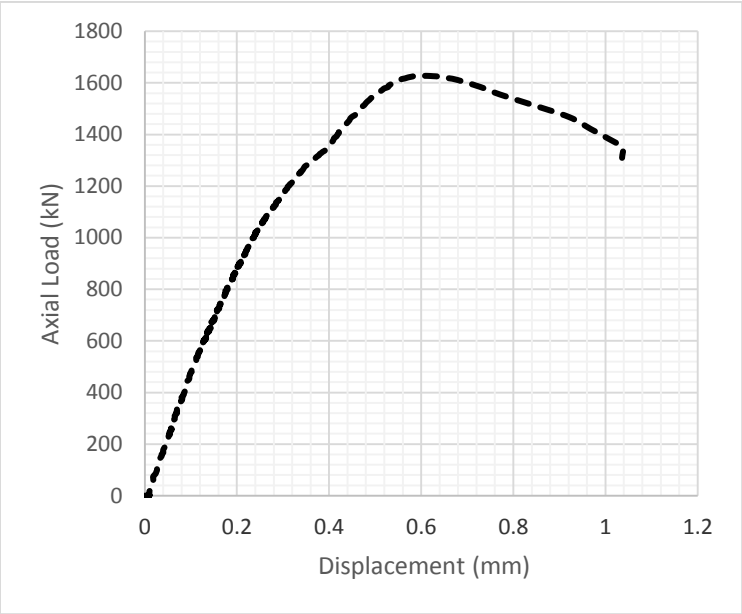
### 4.3.1 เสาคอนกรีตล้วน ขนาดหน้าตัด 30x30 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 3 ตัวอย่าง

1.เสาคอนกรีตล้วน (PC-1) หน้าตัด 30x30 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ตัวอย่างที่ 1 แรงอัดสูงสุดมีค่า 1627.20 kN ระยะการเคลื่อนที่ 0.599 มิลลิเมตร เสาคอนกรีตล้วนจะเสียหายแบบขนานกับแนวแกนเสา



(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

รูปที่ 4.70 เสา PC-1 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ

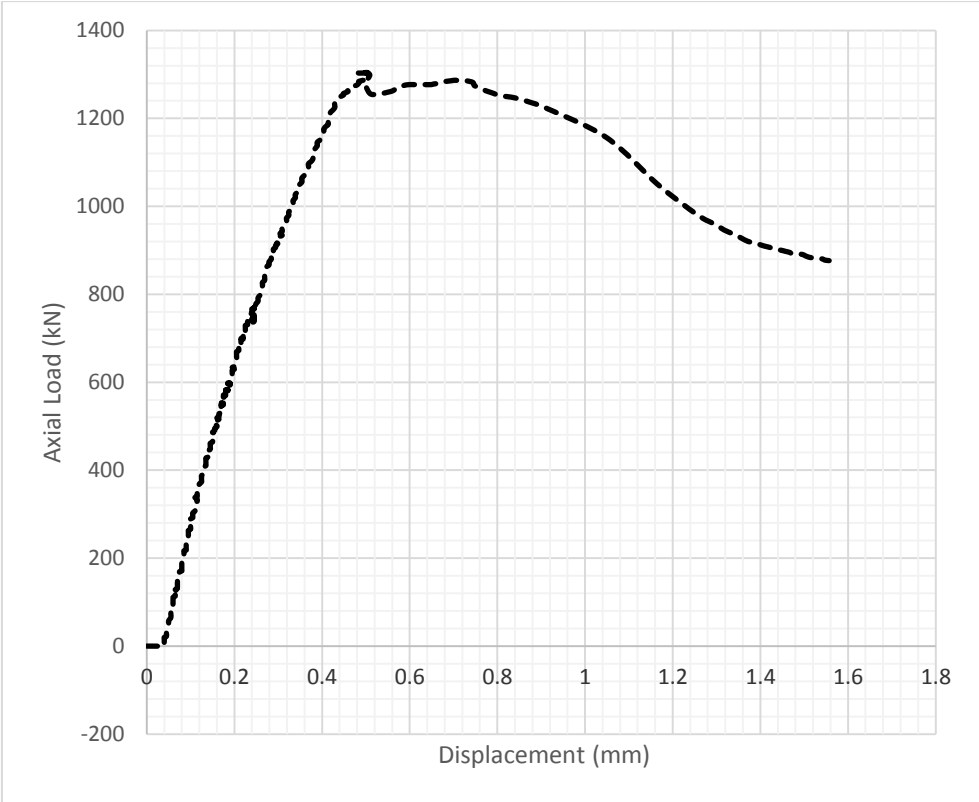



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาคอนกรีตล้วน PC-1

2.เสาคอนกรีตล้วน (PC-2) หน้าตัด 30x30 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ตัวอย่างที่2 แรงอัดสูงสุดมีค่า 1304.26 kN ระยะการเคลื่อนที่ 0.504 มิลลิเมตร รูปแบบการวิบัติของเสาเป็นแบบขนานกับแนวแกน

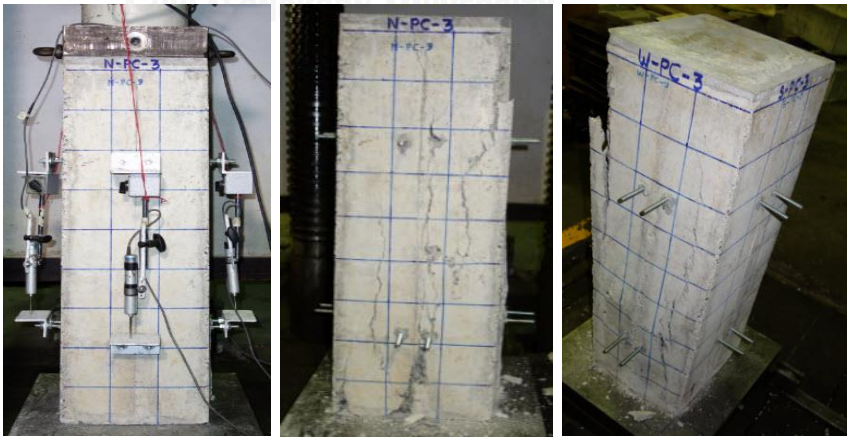

(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

รูปที่ 4.72 เสา PC-2 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



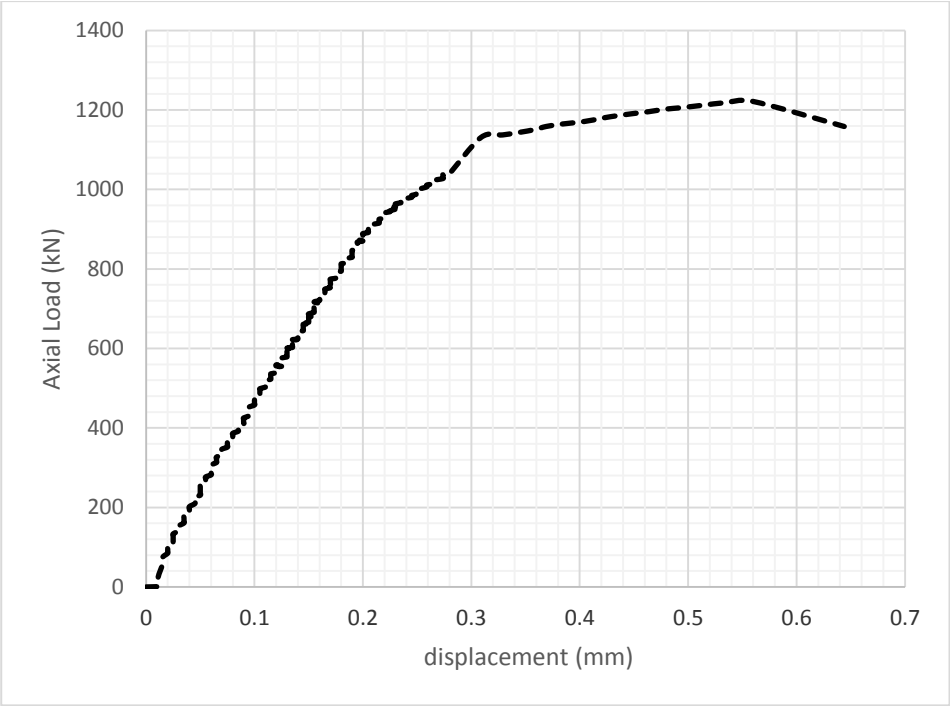

รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาคอนกรีตล้วน PC-2

3 เสาคอนกรีตล้วน (PC-3) หน้าตัด 30x30 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ตัวอย่างที่3 แรงอัดสูงสุดมีค่า 1221.96 kN ระยะการเคลื่อนที่ 0.559 มิลลิเมตร รูปแบบการวิบัติของเสาเป็นแบบขนานกับแนวแกน




(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

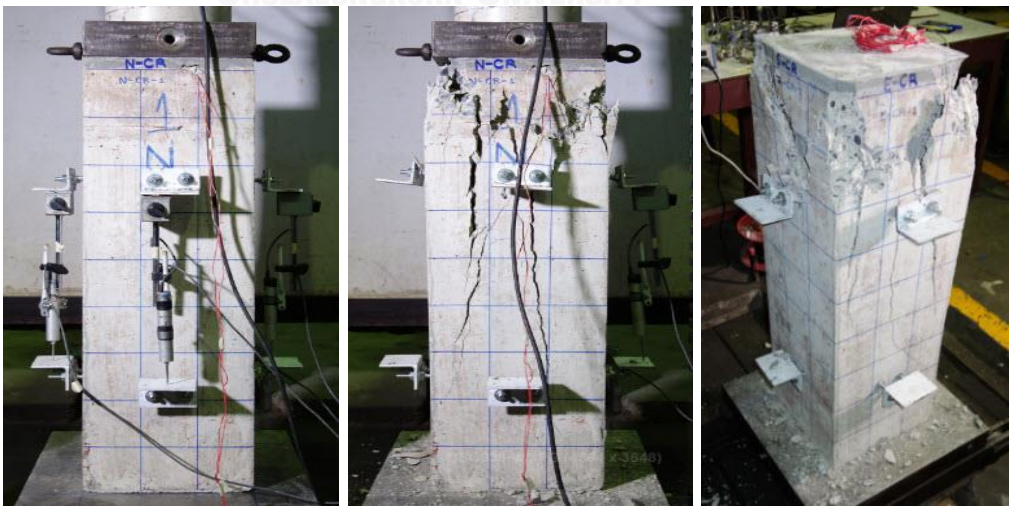
รูปที่ 4.74 เสา PC-3 เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.75 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาคอนกรีตล้วน PC-3

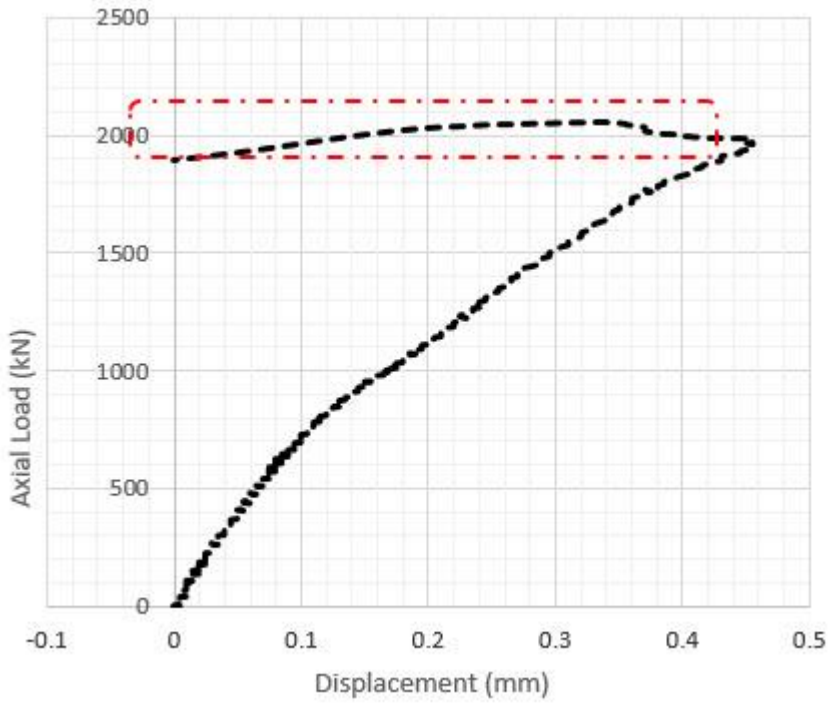
4.3.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) ขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร

กำลังแรงอัดสูงสุดมีค่า 2054.89 kN (แรงที่ได้เป็นค่าที่ถูกต้อง แต่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกนไม่ถูกต้อง เชื่อถือไม่ได้ แต่นำมาอ้างอิงเพื่อให้สามารถเกิดการเปรียบเทียบได้บ้าง) การวิบัติเป็นรูปโคลนหงายขึ้นเนื่องจากที่หัวเสามีการเสริมเหล็กปลอกที่มากแต่ ระยะหุ้มคอนกรีตก็มีค่าสูง (5 เซนติเมตร)




(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

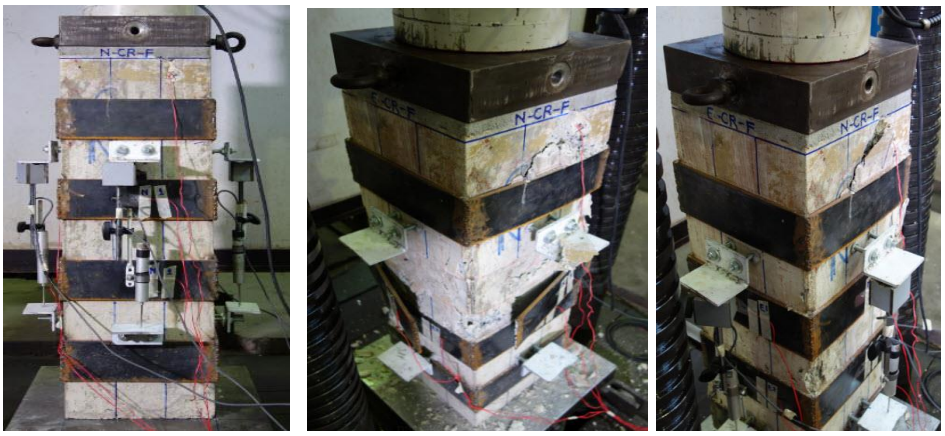
รูปที่ 4.76 เสา RC เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาคอนกรีตเสริม ( RC)

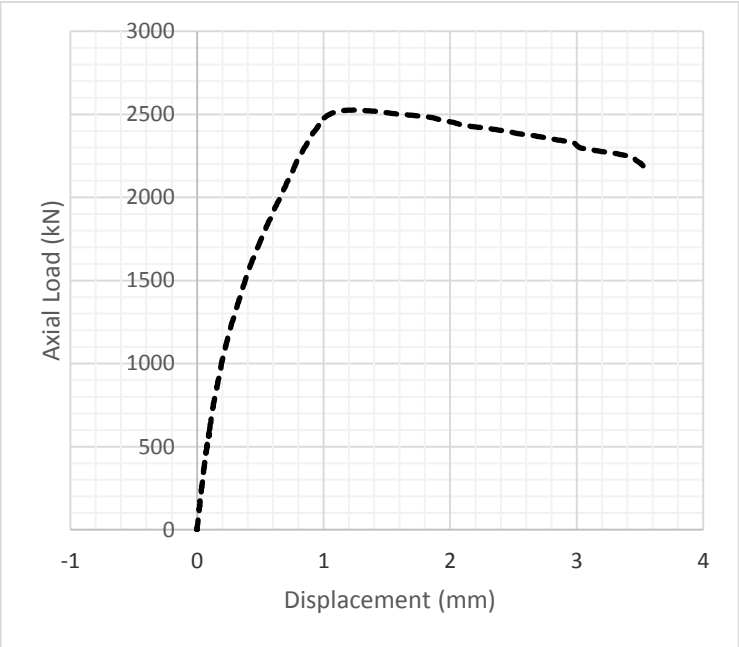
4.3.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังภายนอกด้วยกรอบเหล็กแบน(S-RC-F)

ขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร กำลังแรงอัดสูงสุดมีค่า 2515 kN ระยะการเคลื่อนที่มีค่า 1.10 มิลลิเมตร เหล็กแผ่นบางวิบัติที่มุมเสาที่ชั้นสาม ที่ชั้นสี่เหล็กแผ่นบางจะโก่งตัวเห็นได้ชัดเจน เหล็กแผ่นบางคราก (ทำงานเต็มประสิทธิภาพ) การโอบรัดช่วยให้เสาไม่วิบัติแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)

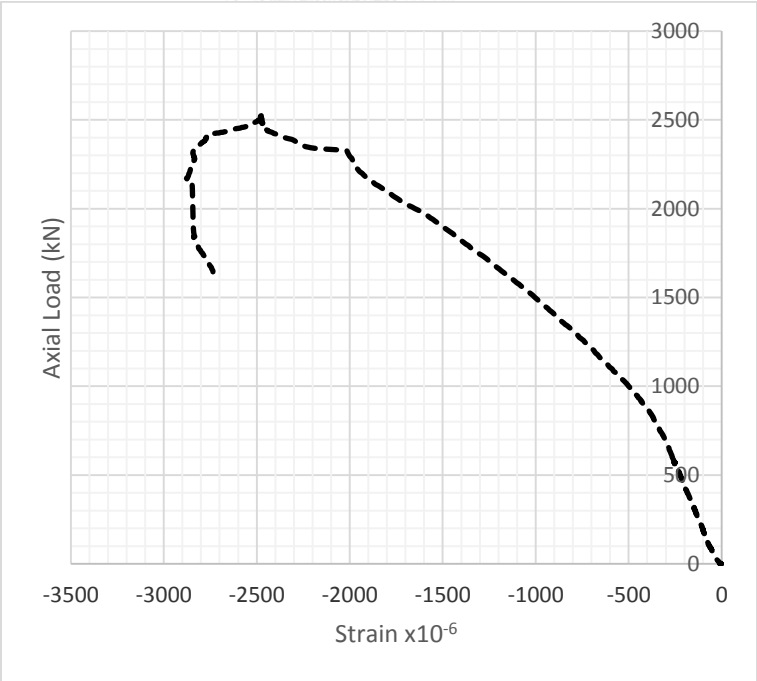



(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

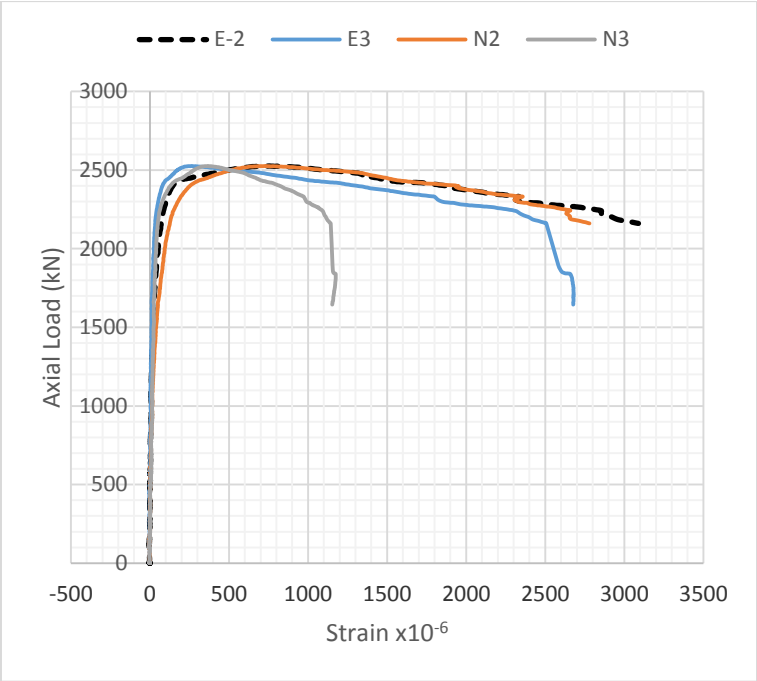
รูปที่ 4.78 เสา S-RC-F เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนเสากับระยะการเคลื่อนที่ของเสา S-RC-F




รูปที่ 4.80 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กเสริมตามแนวแกนเสา S-RC-F

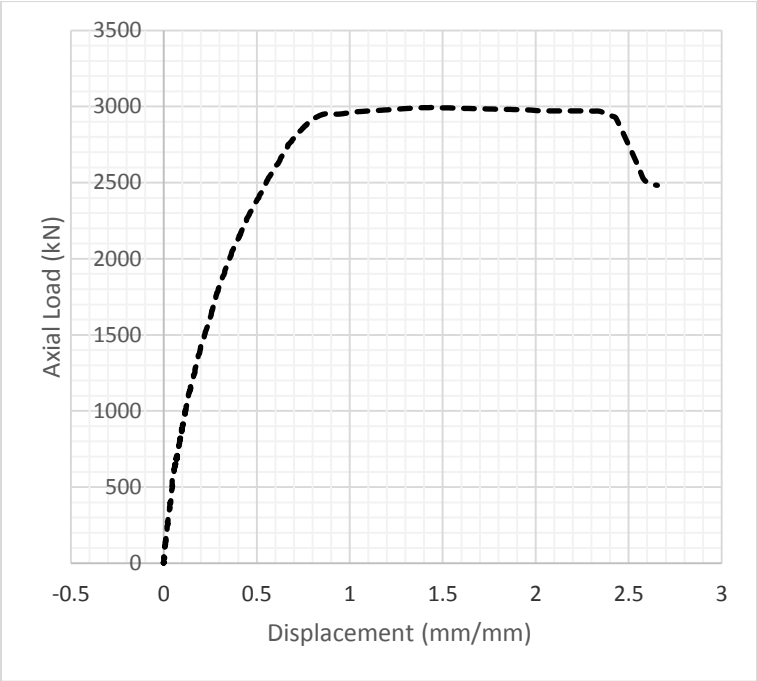



รูปที่ 4.81 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ด้าน E ,N ของเสา S-RC-F

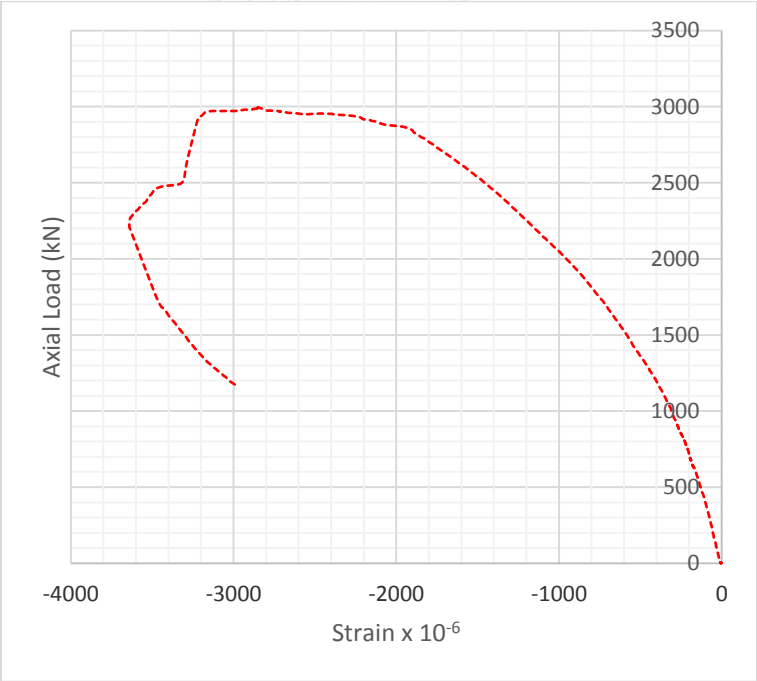
4.3.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (S-RC-T) ขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร กำลังแรงอัดสูงสุดมีค่า 2993.81 kN ที่ระยะการเคลื่อนที่ 1.533 มิลลิเมตร เสามีความเสียหายที่กึ่งกลางเสาโดยคอนกรีตแตกออก และเหล็กกรอบรูปตัวทีฉีกขาดที่รอยเชื่อมมุมเสาที่ชั้นที่ 3, 4 และพบว่าเหล็กตามแนวแกนเสา และเหล็กปลอกเกิดการคราก แต่เหล็กหน้าตัดรูปตัวทีไม่คราก

(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

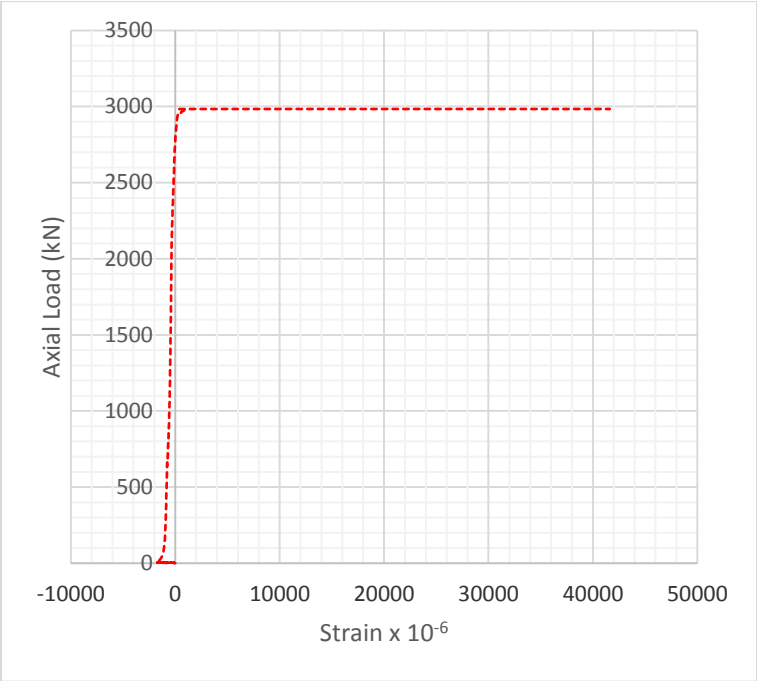
รูปที่ 4.82 เสา S-RC-T เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



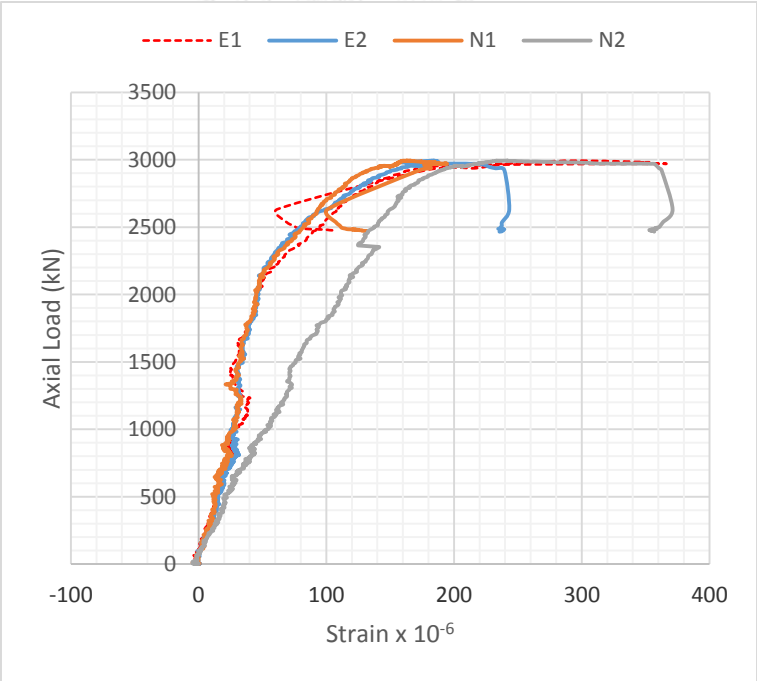

รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา S-RC-T




รูปที่ 4.84 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอกของเสา S-RC-T



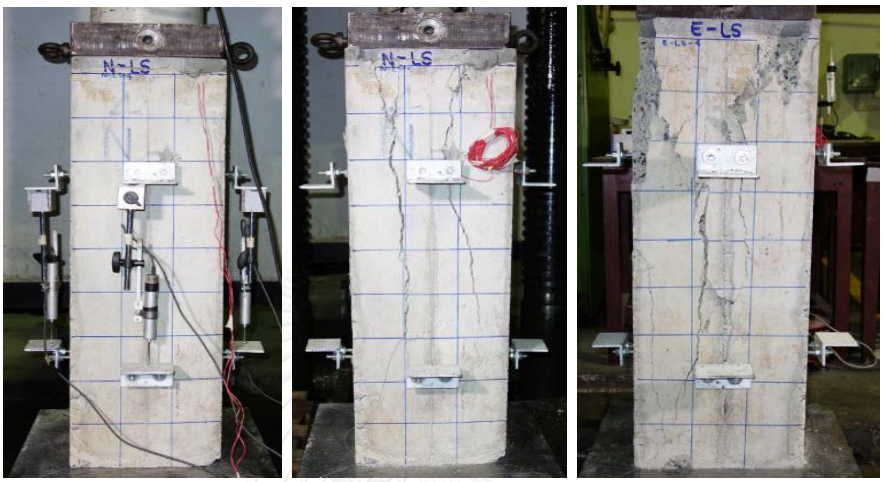

รูปที่ 4.85 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลองของเสา S-RC-T




รูปที่ 4.86 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ด้าน E , N ของเสา S-RC-T

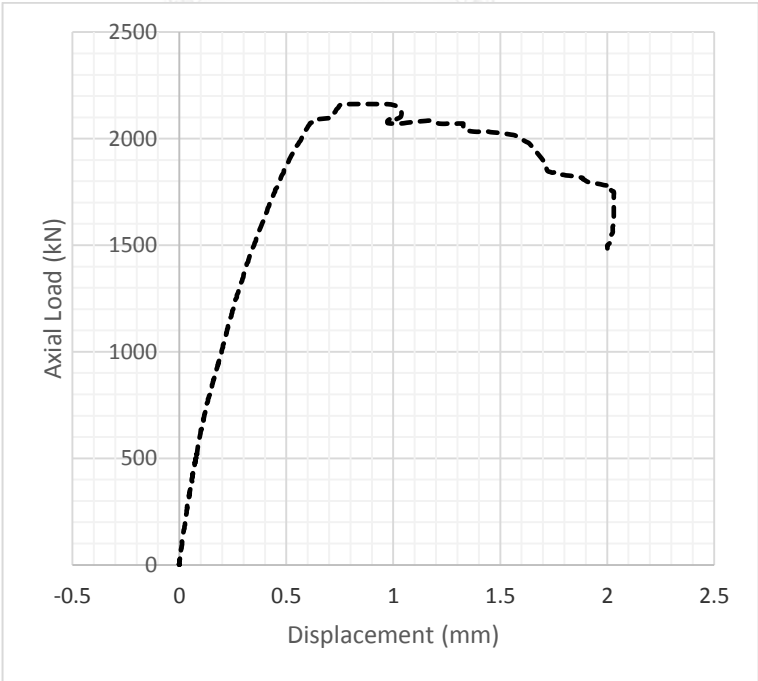
4.3.5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน (RC-LS)

ขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร กำลังรับแรงอัดสูงสุดมีค่า 2159.63 kN ที่ระยะการเคลื่อนที่ 0.7543 มิลลิเมตร การวิบัติของเสาเป็นแบบขนาน และมีลักษณะคล้ายกรวยหงายบริเวณหัวเสา เนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวเสริมเหล็กปลอกมากกว่าบริเวณช่วงวัดค่า เหล็กปลอกเสาคราก

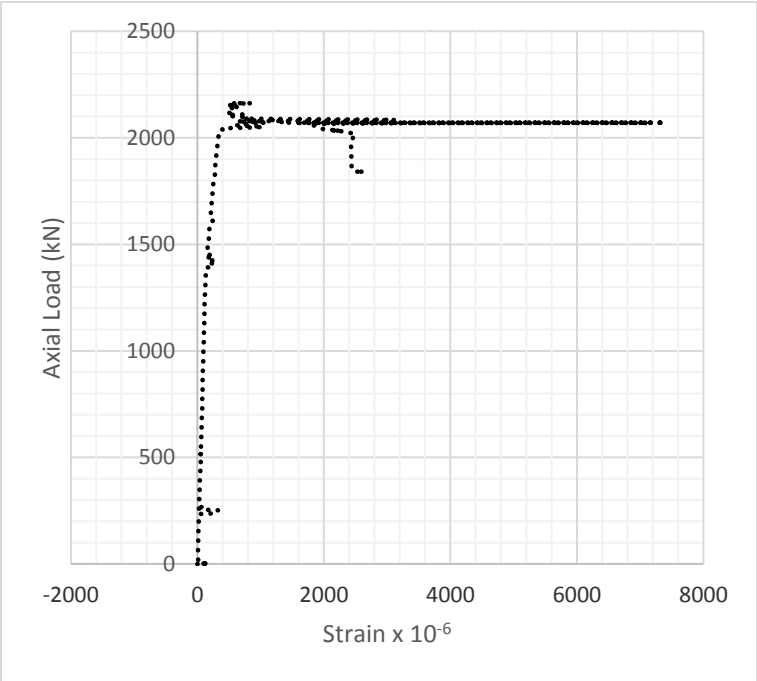



(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

รูปที่ 4.87 เสา RC-LS เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ



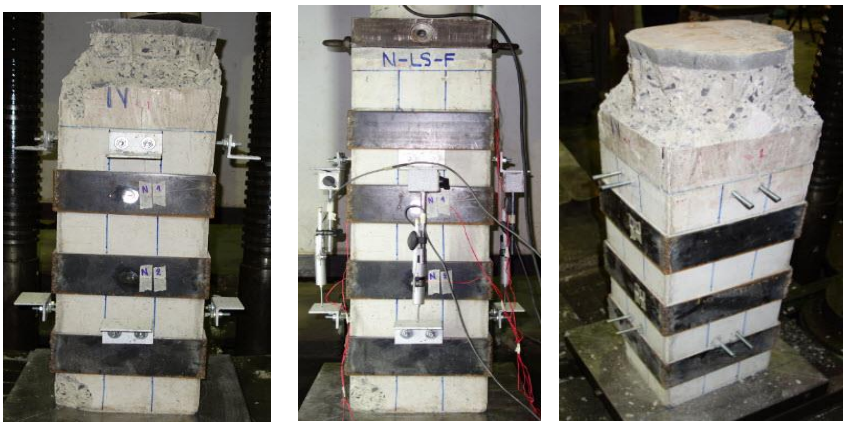

รูปที่ 4.88 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา RC-LS




รูปที่ 4.89 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอก RC-LS

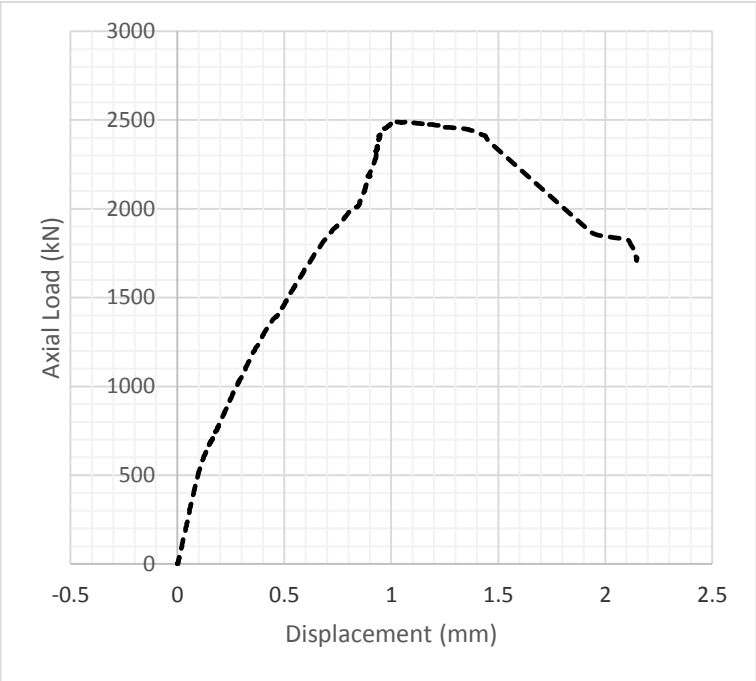
4.3.6 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กแบน(S-RC-LS-F)

ขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร กำลังแรงอัดสูงสุดมี 2487.57 kN ที่ระยะการเคลื่อนที่1.01 มิลลิเมตร รูปแบบการวิบัติเกิดนอกช่วงพิจารณา เกิดที่หัวเสาก่อน และ แผ่นเหล็กบางที่ชั้นที่ 4 เกิดฉีกขาดก่อน ทำให้หัวเสาวิบัติเร็วขึ้น

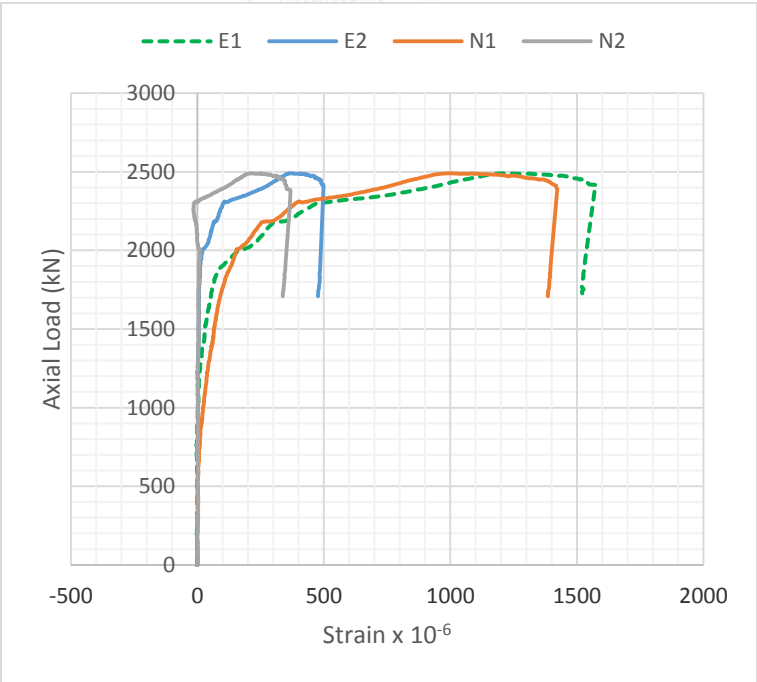



(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

รูปที่ 4.90 เสา S-RC-LS-F เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.91 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนทีของเสา S-RC-LS-F



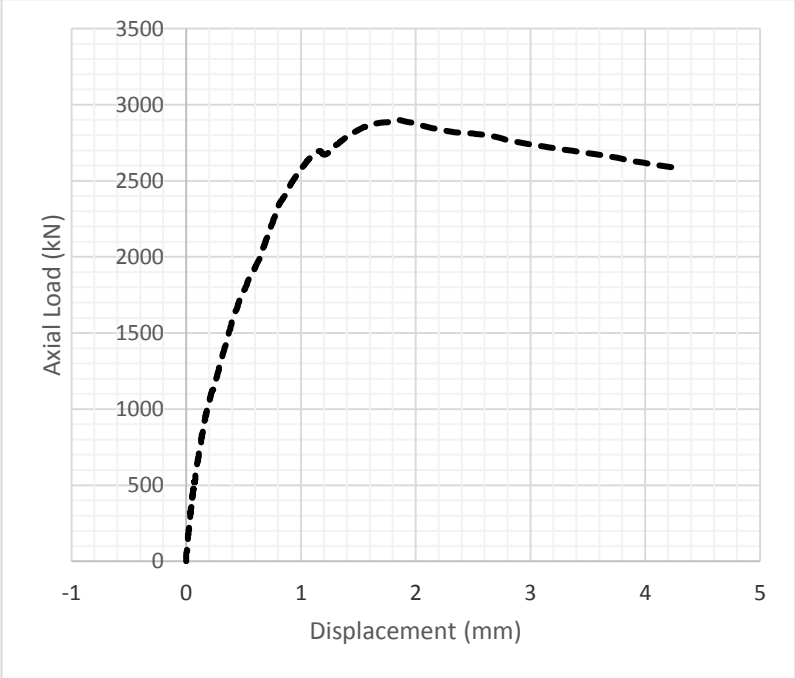

รูปที่ 4.92 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กแผ่นบาง ด้าน E , N ของเสา S-RC-LS-F

4.3.7 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน เสริมกำลังโอบรัดภายนอกด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที(S-RC-LS-T)

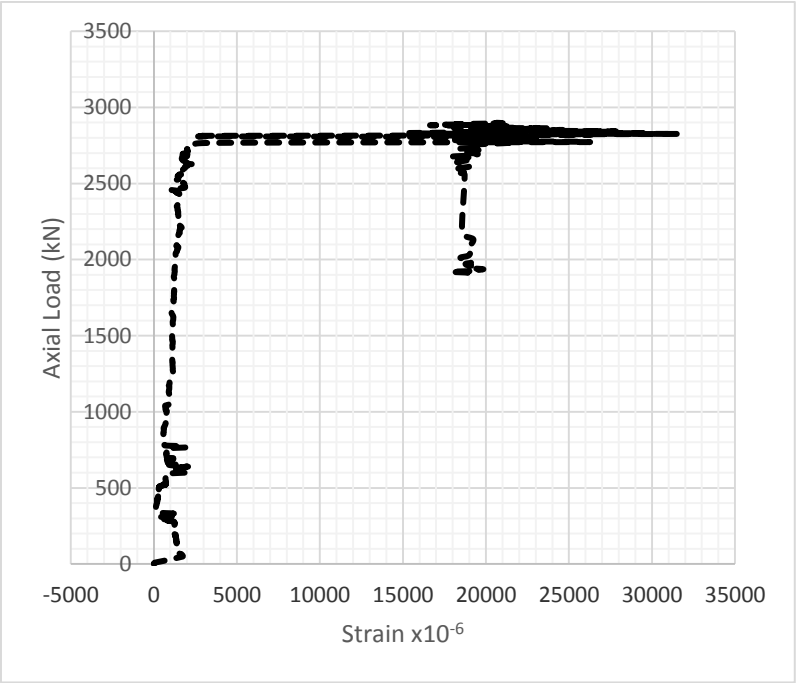
ขนาดหน้าตัดเสา 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร กำลังแรงอัดสูงสุดมีค่า 2897.80 kN มีค่าระยะการเคลื่อนที่ 1.87 มิลิเมตร เหล็กปลอกเสาเกิดการคราก เหล็กกรอบรูปตัวทีไม่คราก ความเสียหายเกิดที่หัวเสาเกิดนอกช่วงบริเวณพิจารณา ( บริเวณใกล้หัวเสา และ โคลนเสาควรต้องมีเหล็กรูปตัวทีรัดรอบไว้เช่นกัน เพื่อป้องกันการเสียหายบริเวณนี้)


(ก) ก่อนการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบ

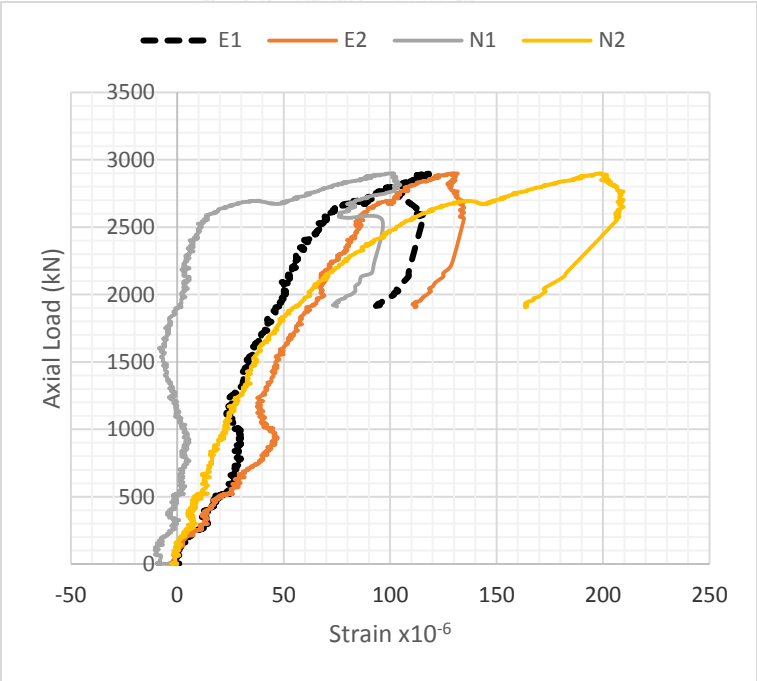
รูปที่ 4.93 เสา S-RC-LS-T เปรียบเทียบก่อนทดสอบ กับ หลังทดสอบ




รูปที่ 4.94 ความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา S-RC-LS-T



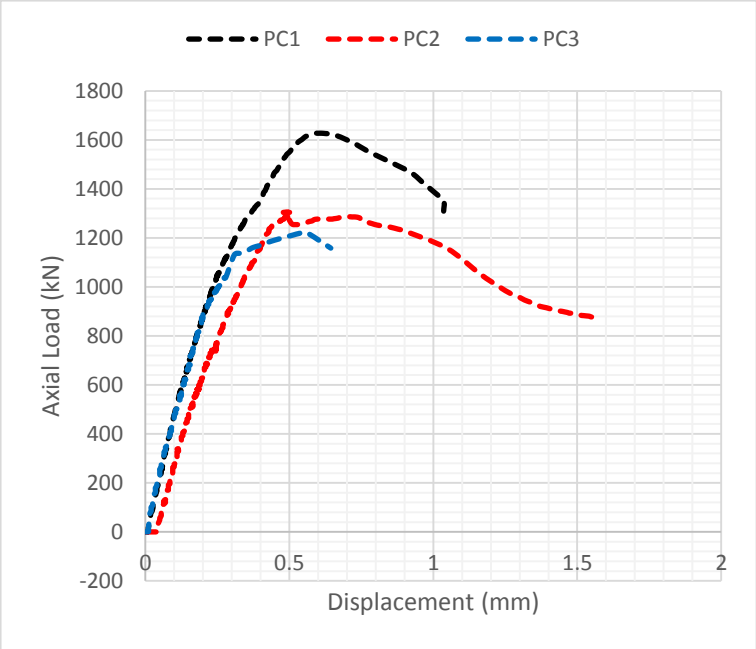

รูปที่ 4.95แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กปลอกของเสา S-RC-LS-T




รูปที่ 4.96 แรงตามแนวแกนกับความเครียดของเหล็กหน้าตัดรูปตัวที ด้าน E ,Nของเสา S-RC-LS-T

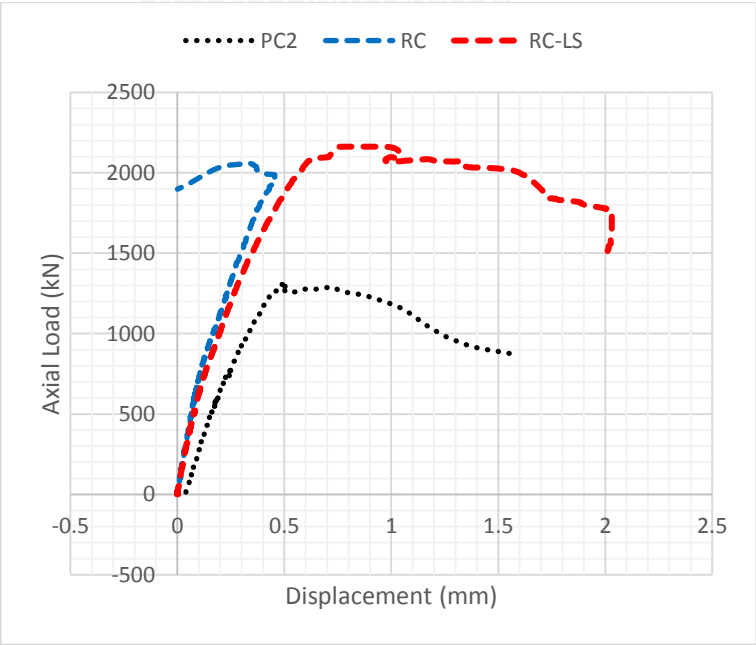
4.3.8 เปรียบผลการทดสอบเสาแต่ละประเภท

เสาคอนกรีตล้วนทั้งสามตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ 2 และ 3 มีค่าแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกัน แต่ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกนค่อนข้างแตกต่างกัน



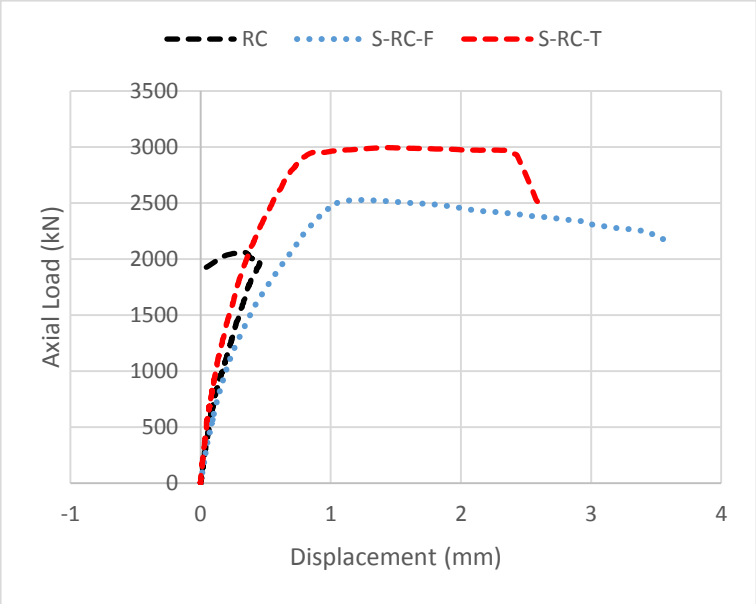

รูปที่ 4.97 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา PC1, PC2, PC3

สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) มีค่ากำลังอัดตามแนวแกนเสาต่ำกว่าเสาที่มีการต่อทาบเหล็กตามแนวแกน เพียงเล็กน้อยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (RC-LS)



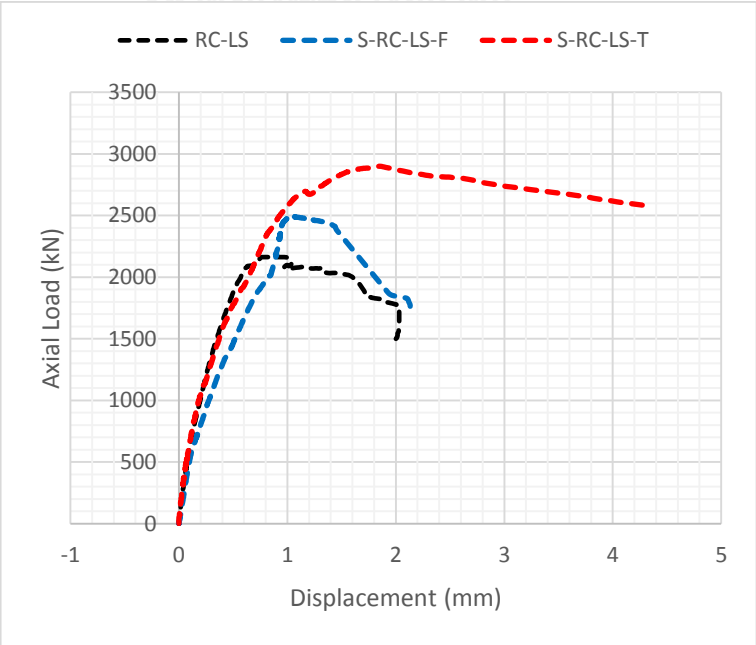

รูปที่ 4.98 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา PC2, RC, RC-LS

เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (S-RC-T) กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนมากกว่า เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (S-RC-F) 18.5 เปอร์เซ็นต์

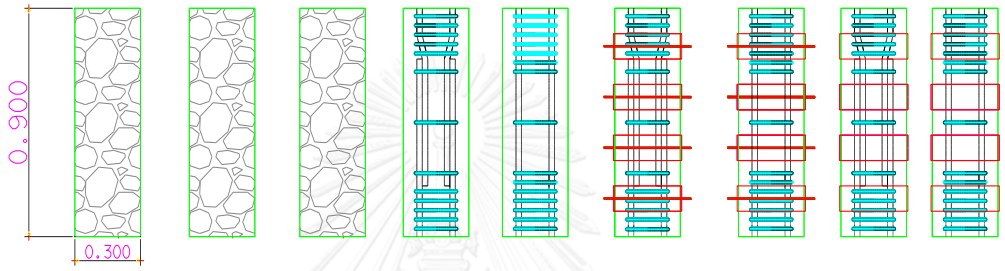



รูปที่ 4.99 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา RC, S-RC-F, S-RC-T

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีการต่อทาบเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (S-RC-LS-T) กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน สูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีการต่อทาบ เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (S-RC-LS-F) 16 เปอร์เซ็นต์

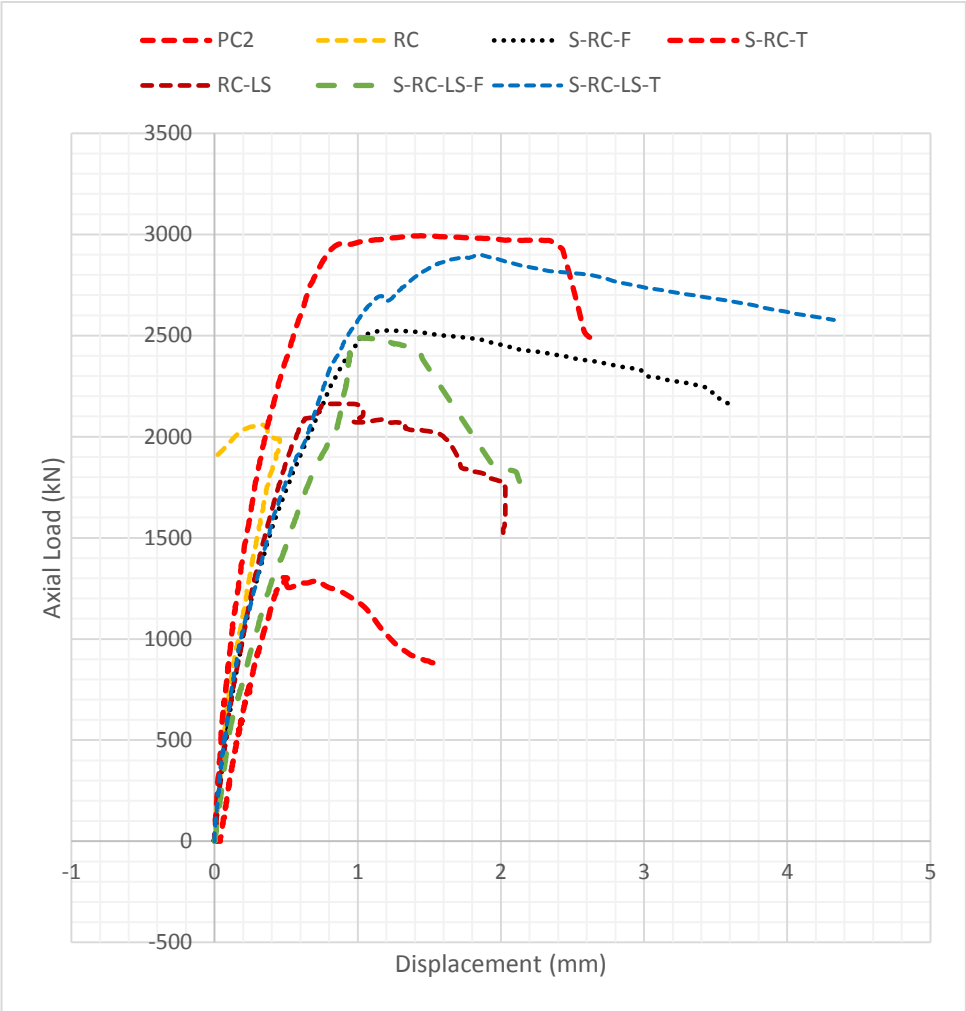



รูปที่ 4.100 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่เสา RC-LS, S-RC-LS-F, S-RC-LS-T


รูปที่ 4.101 ตัวอย่างเสาก่อนทดสอบ

จากผลการทดสอบ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีให้กำลังสูงสุด พบว่าเสาทีมีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวแกน จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว จึงทำให้ค่าแรงอัดต่ำกว่าเสาคอนกรีตที่ไม่มีการต่อทาบ ถึงแม้จะมีปริมาณเหล็กตามแนวแกนมากกว่าถึง สองเท่าก็ตาม




รูปที่ 4.102 เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะการเคลื่อนที่ของเสา ทั้งกลุ่มทดสอบ

# บทที่ 5 ผลการทดสอบเสาสะพาน

จะทำการทดสอบเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีเปรียบเทียบกับค่าต่างๆ จากการทดสอบเสาที่มีการต่อทาบเหล็กที่โคนเสา 100 เปอร์เซ็นต์ พชร เครือวิทย์ (พ.ศ. 2555)

## 5.1 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (LS-T)

จะกล่าวถึงพฤติกรรมและผลการทดสอบของเสาตัวอย่าง เพื่ออธิบายให้เห็นถึงพฤติกรรมภายใต้การรับแรงแบบวัฏจักรของเสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมที่บริเวณโคนเสา แล้ว เสริมเหล็กรูปพรรณรูปตัวที โดยโอบรัดรอบเสาภายนอกเป็นช่วงๆ ที่มีการต่อทาบเหล็กแกนเสา เพื่อทำการปรับปรุงให้เสามีความสามารถในการรับแรงแบบวัตจักรเพิ่มขึ้น และ มีความสามารถในการเคลื่อนตัวด้านข้างให้มีค่ามากขึ้น โดยจะอธิบายถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบเสาตัวอย่าง ซึ่งจะแสดงด้วยคำอธิบายและรูปภาพที่แสดงถึง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น รูปแบบการแตกร้าวที่อัตราการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ตำแหน่งต่างๆ และแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง และยังได้แสดงผลเปรียบเทียบค่า Hysteresis , ค่าความเหนียวระหว่าง เสาที่เสริมกำลังโดยการรัดด้วยกรงเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (LS-T) กับ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต่อทาบเหล็กเสริมที่โคนเสา (C-SP-100)

1 ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (LS-T)

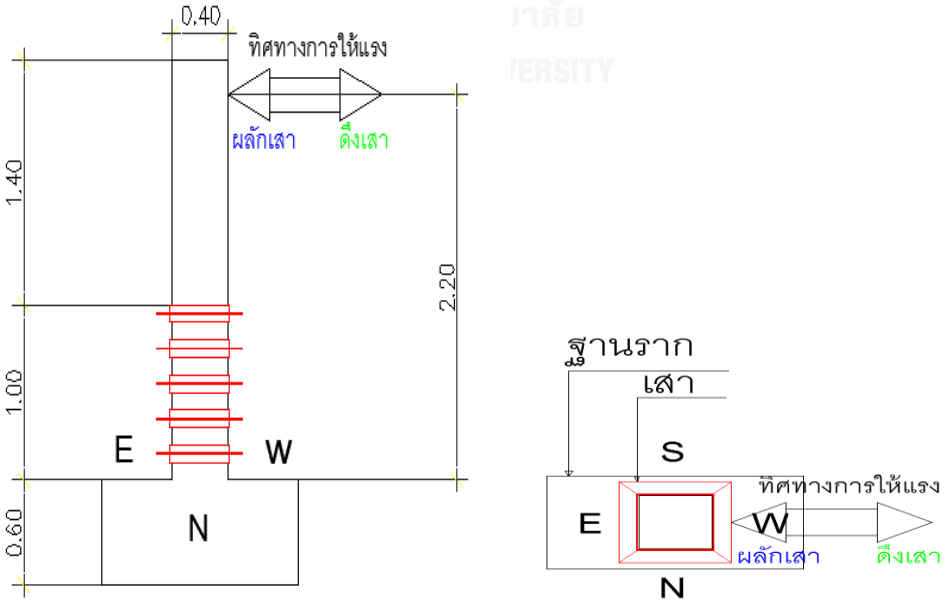
พฤติกรรมของเสาตัวอย่างเมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแก่เสาโดยการใช้ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเป็นตัวควบคุม(%Drift Ratio) เสาจะเกิดการตอบสนองเนื่องจากแรงที่กระทำในช่วงแรก(0.25%Drift ถึง 3.0% Drift) เสามีพฤติกรรมเป็นแบบแรงดัด และเมื่อเพิ่มการเคลื่อนที่ ที่หัวเสามีค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างในช่วง 3.5%Drift ถึง 4.5%Drift หน้าเสาด้านทิศตะวันออกและหน้าเสาด้านทิศตะวันตก ที่โคนเสาทั้งสองหน้าเสาคอนกรีตถูกทั้งแรงแรงดึงและแรงอัดกระทำ ทำให้คอนกรีตบริเวณนี้แตกหลุดออกจากเสา ช่วงเปอร์เซ็นต์ Drift นี้เสาจะมีพฤติกรรมจุดหมุนพลาสติกที่จุดศูนย์กลางโคนเสาแต่จุดหมุนพลาสติกยังไม่เด่นชัด เมื่อเพิ่มค่าเป็น 5.0%Drift พฤติกรรมจุดหมุนพลาสติกจะเห็นเด่นชัดมาก โดยจุดหมุนพลาสติกจะขยับขึ้นมาที่ระดับความสูง 0.20เมตรจากฐานราก ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตในช่วง+0.20 เมตร ถึง +0.30 เมตรเกิดการแตกร้าวที่หน้าเสาด้านตะวันออกและหน้าเสาด้านทิศตะวันตกทำให้เสาที่ระดับดังกล่าว มีสภาพเป็นจุดอ่อนและยังต้องมารับแรงโมเมนต์ที่มากด้วยจึงทำให้กลายเป็นจุดหมุนพลาสติก โดยทีโคนเสาถึงระดับ+0.10 เมตรมีพฤติกรรมแข็งถือขยับตัวไปตามทิศทางของแรงน้อยกว่ามาก จากแรงด้านข้างที่กระทำ ส่วนตัวเสาความสูงตั้งแต่+0.20 เมตรจะมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบดัดโค้ง โดยมีจุดหมุนพลาสติกที่ระดับ+0.20เมตร เมื่อเพิ่มค่าเป็น

5.5%Drift , 6.0%Drift , 6.5%Drift, 7.0%Drift, 7.5%Drift จนถึง 8.0%Drift เสาตัวอย่างทดสอบมีความเสียหายที่สำคัญๆ ได้แก่ด้านหน้าเสาทิศตะวันออก เริ่มจากโคนเสาไปถึงระดับ+0.08 เมตร และช่วงจากระดับ+0.20เมตรไปถึงระดับ+0.30เมตร คอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกด้านนอกจะหลุดออกทั้งสองช่วง ด้านหน้าเสาด้านทิศตะวันตก เริ่มจากโคนเสาไปถึงระดับ+0.07 เมตร และช่วงจากระดับ+0.20เมตรไปถึงระดับ+0.28เมตร คอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกด้านนอกจะหลุดออกทั้งสองช่วง และที่น่าสนใจอย่างยิ่งคอนกรีตเสาที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กรูปพรรณตัวที ที่ระดับความสูง+0.10 เมตร ถึงระดับ+0.20เมตรที่หน้าเสาด้านทิศตะวันออก และ หน้าเสาทิศตะวันตกไม่มีการหลุดออกของคอนกรีตจากตัวเสา(ย่อมมีการแตกร้าวภายในของคอนกรีตเห็นได้ชัดเจนเมื่อถอดเหล็กรูปพรรณรัดรอบตัวทีออก)โดยจะได้แสดงพฤติกรรมของเสา เมื่อถูกแรงด้านข้างแบบวัตจักรกระทำอย่างละเอียดดังนี้ รูปที่5.1 แสดงตัวอย่างเสาพร้อมติดตั้งเครื่องมือทดสอบ ก่อนเริ่มการทดสอบเพื่อจะได้ดูเปรียบเทียบความเสียหายของเสา ก่อนทดสอบ และหลังทำการทดสอบ รูปที่5.2 แสดงทิศทางการให้แรงแก่เสาทดสอบ โดยที่ถ้าเป็นโยกเสาไปทางทิศตะวันออก(E) จะเรียกว่าเป็นการผลักเสา และในทางกลับกันเมื่อโยกเสามาทางทิศตะวันตก(W) จะเรียกว่าเป็นการดึงเสา


รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างเสาก่อนทำการทดสอบ

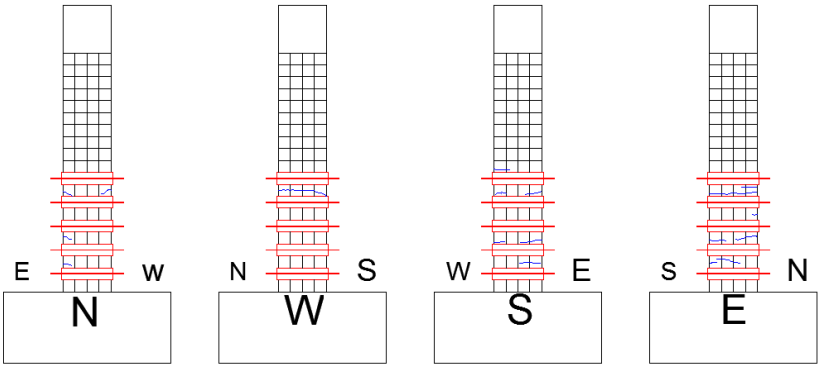
N แทนสัญญาลักษณ์ หน้าเสาด้านทิศเหนือ (North), S แทนสัญญาลักษณ์ หน้าเสาด้านทิศใต้ (South)

E แทนสัญญาลักษณ์ หน้าเสาด้านทิศตะวันออก (East) ,W แทนสัญญาลักษณ์ หน้าเสาด้านทิศตะวันตก (West)




รูปที่ 5.2 รูปด้านข้างและรูปแปลน แสดงทิศทางการให้แรงแก่เสาทดสอบ

5.1.1 ช่วงอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา ±0.25%,±0.50% และ ±0.75%

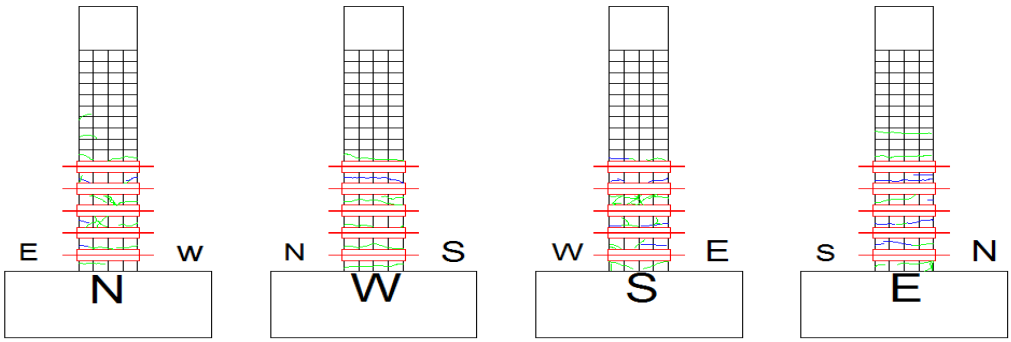



รูปที่ 5.3 การเกิดรอยร้าวที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±0.75%

ตารางที่ 5.1 ลักษณะความเสียหายระหว่างการทดสอบที่ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±0.75%

| % Drift | North | West | South | East |
|---|---|---|---|---|
| ±0.75 | เกิดรอยร้าวเล็กๆที่ระดับ+0.85 เมตร จากฐานราก ทั้งฝั่งด้านทิศตะวันออก และทิศตะวันตก เป็นรอยร้าวเล็กๆตั้งฉากกับแนวแกนเสา และเพิ่มรอยร้าวเล็กตั้งกับแกนเสาที่ระดับ+0.25 เมตร และ +0.45เมตร ทางฝั่งด้านทิศตะวันออก | เกิดรอยร้าวเล็กๆยาวตลอดที่ระดับ+0.85 เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา | เกิดรอยร้าวเล็กๆที่ระดับ+1.02 เมตร, +0.82เมตร, +0.42 เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา ทางฝั่งด้านทิศตะวันตก และเกิดรอยร้าวเล็กๆที่ระดับ+0.83 เมตร, +0.43เมตร, +0.25 เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา ทางฝั่งด้านทิศตะวันออก | เกิดรอยร้าวเล็กๆยาวตลอดที่ระดับ+0.82 เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา<br>เกิดรอยร้าวเล็กๆที่ระดับ+0.45เมตร ทางฝั่งด้านทิศตะวันเหนือ และเกิดรอยร้าวเล็กๆที่ระดับ+0.43เมตร, +0.25เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา ทางฝั่งด้านทิศใต้ |

5.1.2 ช่วงอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา ±1.00%, ±1.50%และ ±2.00%

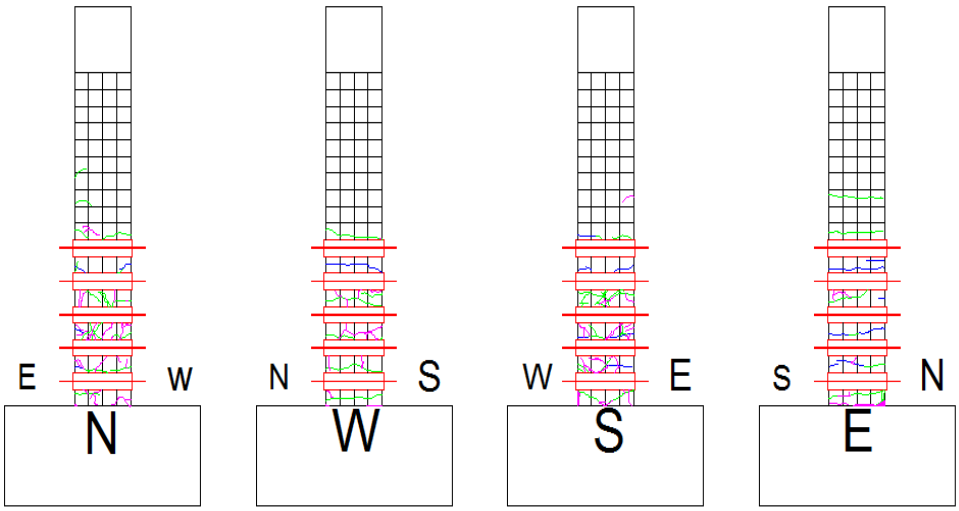



รูปที่ 5.4 แสดงการเกิดรอยร้าวที่อัตราการเคลื่อนที่ ด้านข้าง±2.00%

ตารางที่ 5.2 แสดงลักษณะความเสียหายระหว่างทดสอบที่ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±2.0%

| %Drift | North | West | South | East |
|---|---|---|---|---|
| ±2.0 | เกิดรอยร้าวเล็กๆ เพิ่มขึ้นที่ระดับ+0.08 เมตร จากฐานราก ทางฝั่งด้านทิศ ตะวันออกรอยร้าว ยาวเข้าไปในเสา 0.18 เมตร และ ทิศ ตะวันตกมีรอยร้าว เล็กๆตั้งฉากกับ แนวแกนเสา ที่ ระดับ+0.23 เมตร , +0.43เมตร , +0.63 เมตร และ+1.03เมตร และที่ระดับ+0.65 เมตร เกิดรอยร้าว เอียงทำมุมกับแกน เสา | เกิดรอยร้าว เล็กๆเพิ่มขึ้น ยาวตลอดที่ ระดับ+1.02 เมตร,+0.85 เมตร,+0.23 เมตร และ ที่ ระดับ+0.05 เมตร ตั้งฉาก กับแกนเสา | เกิดรอยร้าวเล็กๆ เพิ่มขึ้นที่ ระดับ+0.65 เมตร, +0.23 เมตร, +0.10 เมตร ตั้งฉากกับ แกนเสา ทางฝั่ง ด้านทิศตะวันตก และเกิดรอยร้าว เล็กๆที่ ระดับ+1.02 เมตร, +0.68 เมตร, +0.10 เมตร ตั้งฉากกับ แกนเสา ทางฝั่ง ด้านทิศ ตะวันออก | เกิดรอยร้าวเล็กๆยาว ตลอดที่ระดับ+1.25 เมตร,+1.05เมตร ตั้งฉาก กับแกนเสา เกิดรอยร้าว เล็กๆที่ระดับ+0.25 เมตร,+0.08เมตร ทางฝั่ง ด้านทิศตะวันเหนือ และ เกิดรอยร้าวเล็กๆที่ ระดับ+0.05เมตร ,เกิด รอยร้าวยาวประมาณ 0.25เมตรที่ระดับ+0.65 เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา ทางฝั่งด้านทิศใต้ ซึ่งเป็น รอยร้าวชนิดเกิดจากแรง ดัด |

5.1.3 ช่วงอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา±2.5%, ±3.0%และ±3.5%

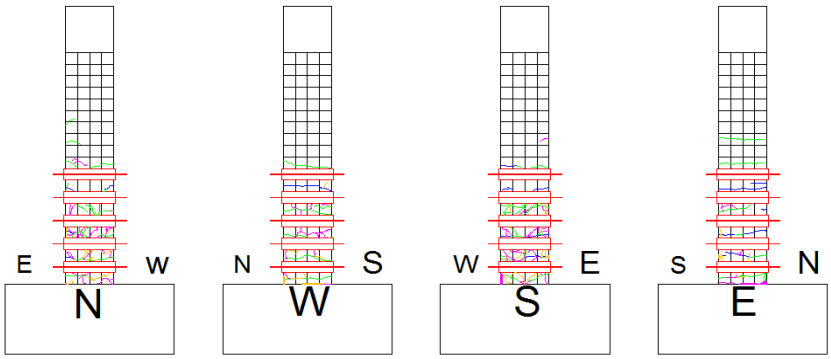



รูปที่ 5.5 แสดงการเกิดรอยร้าวที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±3.50%

ตารางที่ 5.3 แสดงลักษณะความเสียหายระหว่างทดสอบที่ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±3.50%

| %Drift | North | West | South | East |
|---|---|---|---|---|
| ±3.5 | เกิดรอยร้าวเล็กๆ เอียงทำมุมกับแกนเสาเพิ่มขึ้นที่ระดับ+0.45 เมตร จากฐานราก และทิศตะวันตกมีรอยร้าวเล็กๆบริเวณโคนเสาตั้งฉากกับแนวแกนเสา ที่ระดับ+0.05 เมตร ลึกเข้ามาในเสาประมาณ 0.10 เมตร | เกิดรอยร้าวเล็กๆแต่ยาวประมาณ0.10 เมตรเพิ่มขึ้นที่ระดับ+0.45เมตร ตั้งฉากกับแกนเสา และที่โคนเสาคอนกรีตเริ่มถูกแรงดึง แรงอัด ทำให้คอนกรีตแตกหลุดออกเล็กน้อยที่มุมเสาด้านทิศตะวันตกเชื่อมกับด้านทิศเหนือ | เกิดรอยร้าวเล็กๆ เพิ่มขึ้นที่ระดับ+0.45 เมตร และ0.25 เมตร และโคนเสาที่มุมเชื่อมระหว่างทิศใต้กับทิศตะวันตก คอนกรีตเริ่มถูกอัดแตกออกเล็กน้อย | ที่บริเวณโคนเสาจนถึง+0.02เมตร จากฐานราก คอนกรีตเริ่มถูกอัดแตกหลุดออกจากเสา |

5.1.4 ช่วงอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา ±4.0%, ±4.5%และ±5.0%

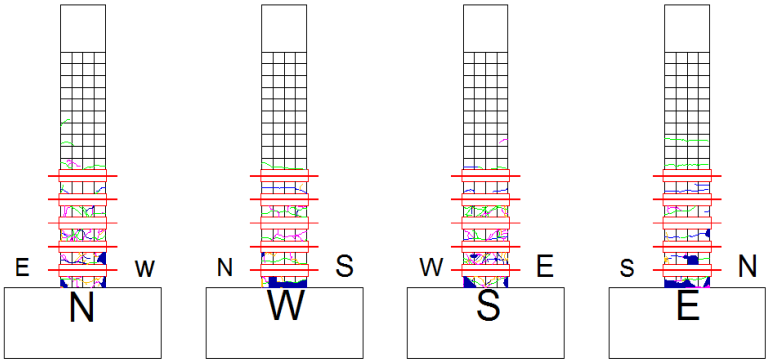



รูปที่ 5.6 เกิดรอยร้าวที่อัตราการเคลื่อนที่ ± 5.00%

ตารางที่ 5.4 แสดงลักษณะความเสียหายระหว่างทดสอบที่ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง±5.0%

| %Drift | North | West | South | East |
|---|---|---|---|---|
| ±5.0 | ที่±4.5%Driftที่ระดับ+0.22 เมตรจากฐานราก เกิดรอยแยกกว้างประมาณ8 มิลลิเมตรลึกเข้าไปในเสา0.10เมตรตั้งฉากกับแกนเสา (ดูรูป ค. -4.5%Drift North รูปที่3.3.10) | ที่โคนเสาคอนกรีตถูกแรงดึง แรงอัดเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตที่โคนเสาแตกหลุดออกจากเสาเพิ่มขึ้นอีก | เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นที่ระดับ+0.25 เมตร เอียงทำมุมกับแกนเสาบ้างขนานกับแกนเสา และที่ระดับ+0.07 เมตรเกิดรอยร้าวเอียงทำมุมกับแกนเสา | ที่บริเวณโคนเสาจนถึง+0.03เมตรจากฐานรากคอนกรีตถูกอัดแตกหลุดออกจากเสาเพิ่มขึ้น |

5.1.5 ช่วงอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา ±5.50%, ±6.00% และ±6.50%

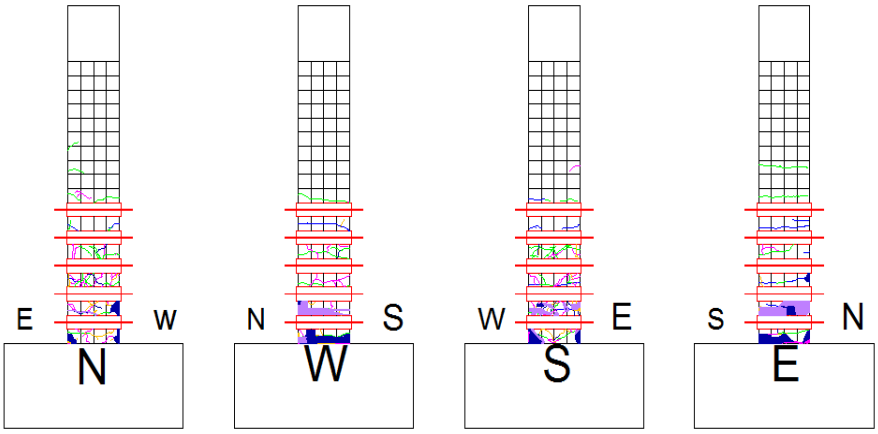



รูปที่ 5.7 แสดงการเกิดรอยร้าวที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±6.5%

ตารางที่ 5.5 แสดงลักษณะความเสียหายระหว่างทดสอบที่ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±6.5%

| %Drift | North | West | South | East |
|---|---|---|---|---|
| ±6.5 | ที่+0.22 เมตร จากฐานราก เกิดรอยแยกกว้างประมาณ10 มิลลิเมตร ลึกเข้าไปในเสา0.20 เมตรตั้งฉากกับแกนเสา **และ** ที่±5.50%Drift ที่มุมเสาทิศเหนือกับทิศตะวันตก ที่ระดับความสูง+0.25 เมตร คอนกรีตที่มุมเสาดังกล่าวหลุดล่อนออก (รูป ฆ. -5.5%Drift North ) | ที่โคนเสาจนถึง+0.07 เมตร คอนกรีตถูกแรงดึง แรงอัดเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตที่โคนเสาแตกหลุดออกจากเสา เพิ่มขึ้นอีก | คอนกรีตจากโคนเสาจนถึงระดับ+0.10เมตรที่มุมเสาระหว่างด้านทิศใต้กับทิศตะวันออก ถูกแรงดึงแรงอัด ทำให้คอนกรีตที่โคนเสา แตกหลุดออกจากโคนเสา และ คอนกรีตจากโคนเสาจนถึงระดับ+0.10เมตรที่มุมเสาระหว่างด้านทิศใต้กับทิศตะวันตกถูก แรงดึงแรงอัด ทำให้คอนกรีตที่โคนเสา แตกหลุดออกจากโคนเสาเช่นกันแต่มีขนาดใหญ่กว่ามุมเสาด้านทิศใต้ตะวันออก | ที่โคนเสาจนถึง+0.08 เมตรจากฐานราก คอนกรีตหลุดออกจากเสาเพิ่มมากขึ้น และที่ระดับความสูง+0.25 เมตร คอนกรีตถูกอัดแตก |

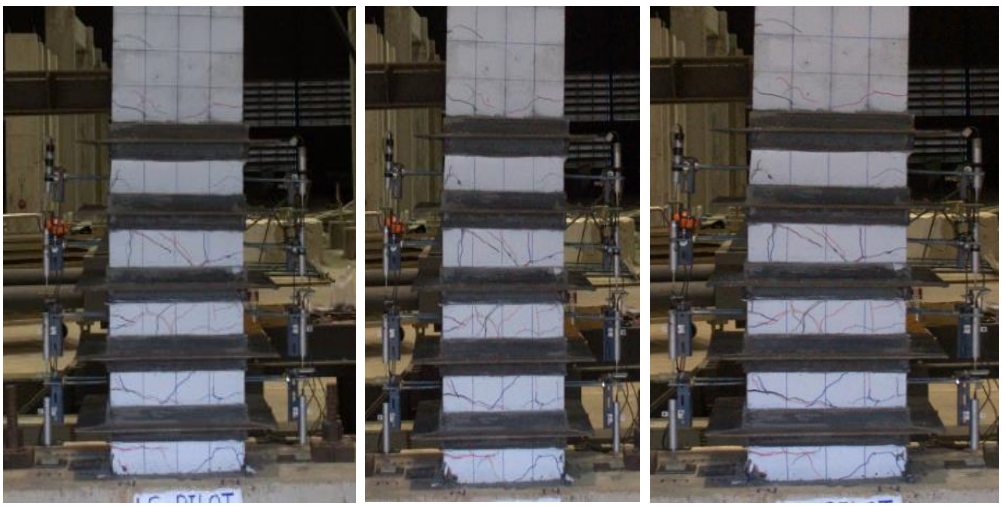
5.1.6 ช่วงอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา ±7.0%, ±7.5% และ±8.0%




รูปที่ 5.8 แสดงการเกิดรอยร้าวที่อัตราการเคลื่อนที่ ±8.0%

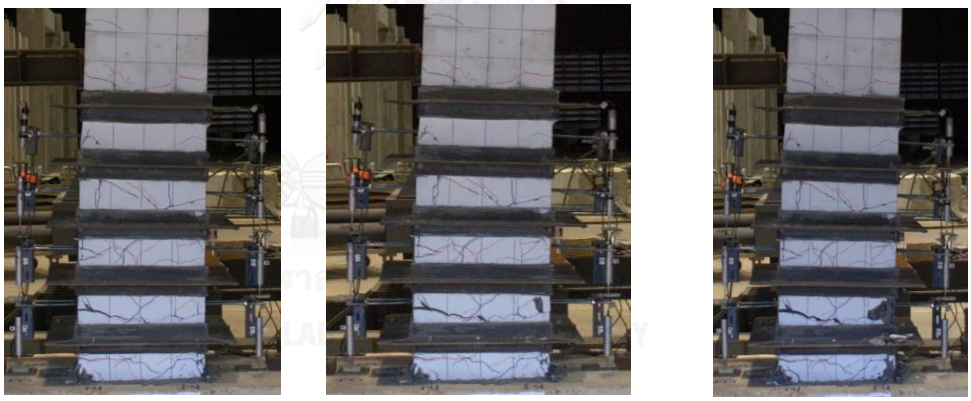
ตารางที่ 5.6 แสดงลักษณะความเสียหายระหว่างทดสอบที่ อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ±8.00%

| %Drift | North | West | South | East |
|---|---|---|---|---|
| ±8.0 | +0.22เมตร จากฐานราก เกิดรอยแยกกว้างประมาณ10 มิลลิเมตร ลึกเข้าไปในเสา0.22 เมตรตั้งฉากกับแกนเสา และ ที่มุมเสาทิศเหนือกับทิศตะวันตก ที่ระดับความสูง+0.25 เมตร คอนกรีตที่มุมเสาดังกล่าวหลุดล่อนออก ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่เชื่อมต่อกัน | ที่ระดับความสูง+0.20 เมตร จนถึง +0.30เมตร จากฐานราก คอนกรีตถูกอัดแตกเกือบทั้งหมด | ที่ระดับ+0.20เมตร ถึง ระดับ+0.30เมตร จากฐานราก คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขนาดใหญ่เชื่อมต่อกันทางด้านทิศตะวันออกและตะวันตกในแนวตั้งฉากกับแกนเสาและคอนกรีตบางส่วนหลุดออกจากเสา | ที่ระดับความสูง+0.20 เมตร จนถึง +0.30 เมตร จากฐานราก คอนกรีตถูกอัดแตก |



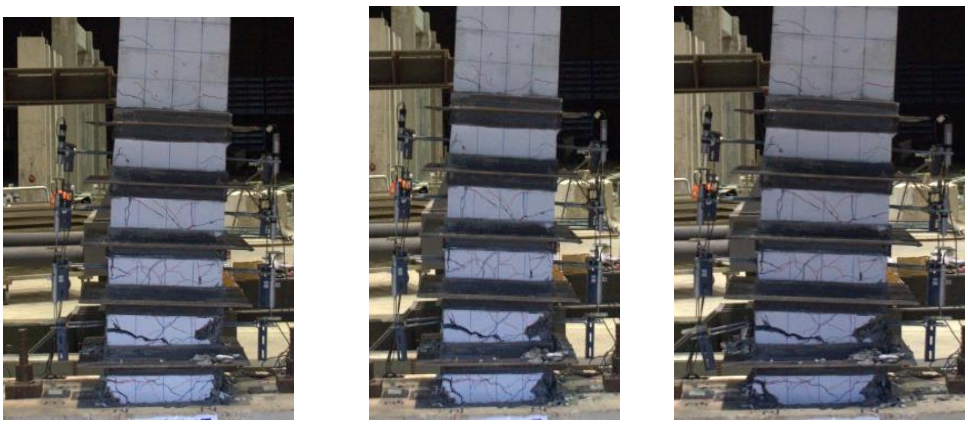
(ก) -3.0%Drift North (ข) -3.5% Drift North (ค) -4.0%Drift North

รูปที่ 5.9 แสดงการเกิดรอยร้าวในเสาตัวอย่างทดสอบด้าน North ที่ -3.00%Drift , -3.50%Drift, -4.00%Drift



(ก) -4.5%Drift North (ข)-5.0%Drift North (ค)-5.5%Drift North

รูปที่ 5.10 แสดงการเกิดรอยร้าวในเสาตัวอย่างทดสอบด้าน North ที่ -4.5%Drift, -5.0%Drift, -5.5%Drift

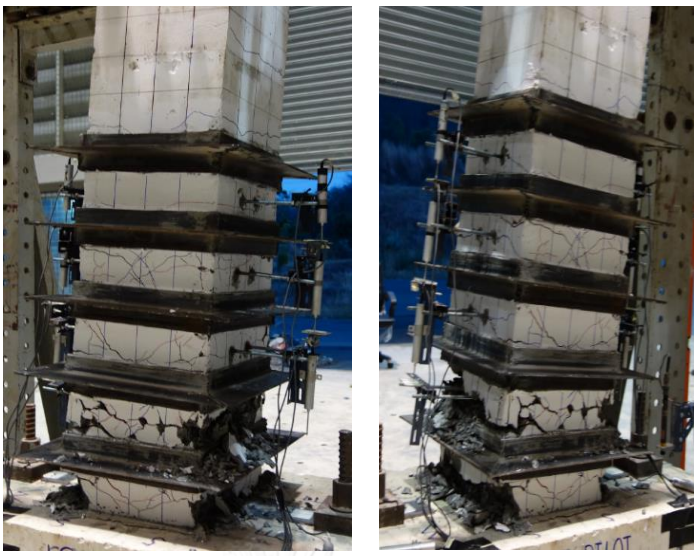


(ก) - 6.0%Drift North (ข) - 6.5%Drift North (ค) -7.0%Drift North

รูปที่ 5.11 แสดงการเกิดรอยร้าวในเสาตัวอย่างทดสอบด้าน North ที่ -6.0%Drift, -6.5%Drift, -7.0%Drift

(ก) +8.0% Drift North (ข) +8.0%Drift South (ค) +8.0%Drift East (ง)+8.0%Drift West

รูปที่ 5.12 แสดงการเกิดรอยร้าวในเสาตัวอย่างทดสอบด้าน North , South, East , West ที่ +8.0%Drift



(ก). +8%Drift South-East (ข) +8%Drift South-West

รูปที่ 5.13 แสดงการเกิดรอยร้าวในเสาตัวอย่างทดสอบด้าน South-East , South-West ช่วง +8.0%Drift

North South East West

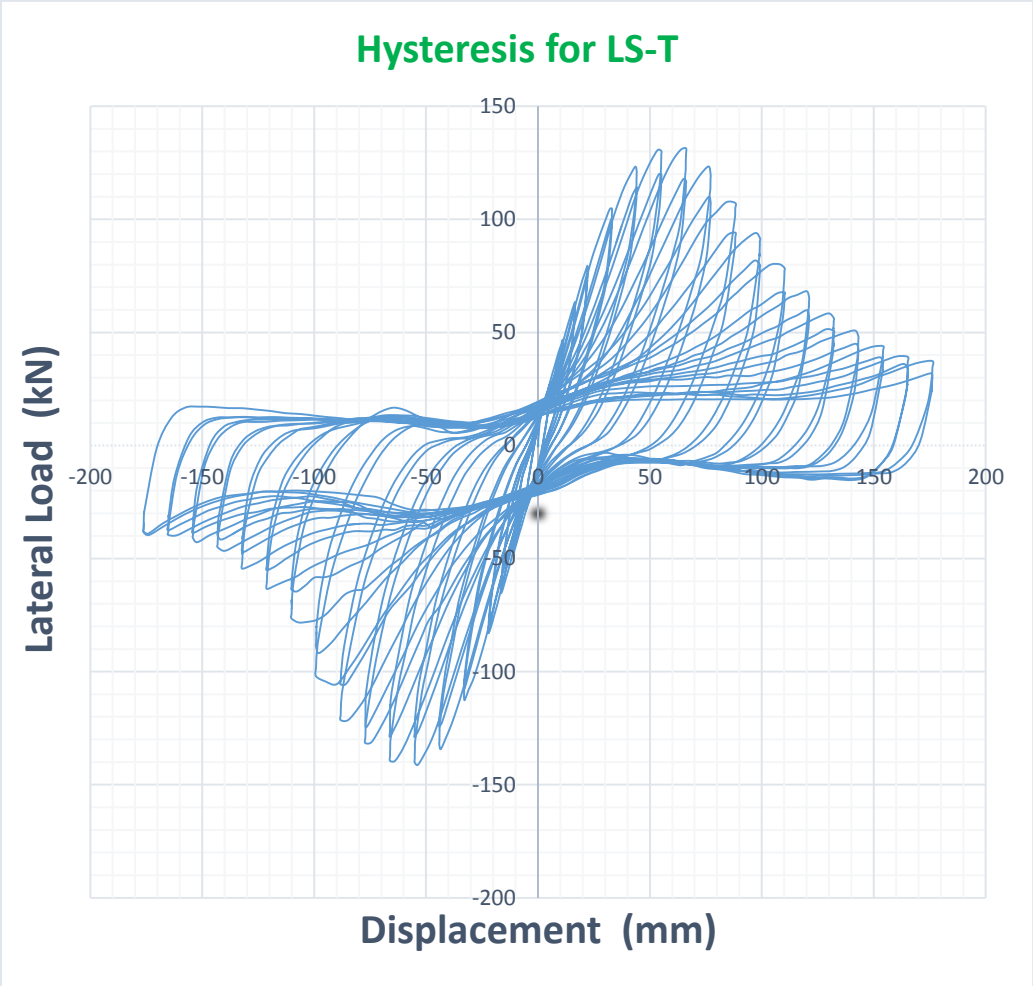
รูปที่ 5.14 แสดงการเกิดรอยร้าวในเสาตัวอย่างทดสอบด้าน North , South , East , West หลังทำการทดสอบและถอดเหล็กรัดรอบรูปตัวที ที่ชั้นแรกออก

## 5.2 ผลจากการทดสอบ เสาเสริมกำลังโดยการรัดด้วยกรงเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (LS-T)

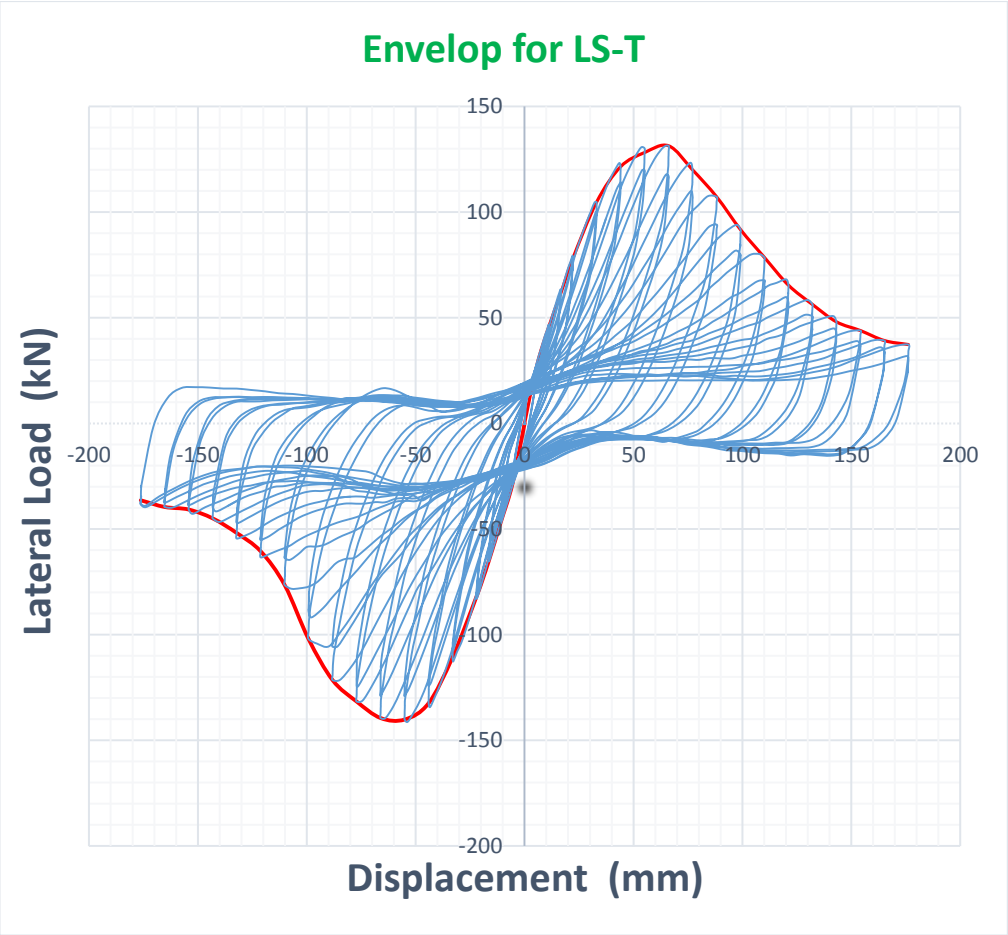
จากรูปที่ 5.1.17 แสดงการหาค่าระยะการเคลื่อนที่เพื่อนำค่า ไปคำนวณความเหนียวของเสา Pmax=135.42 kN, $\Delta$1 =66.13 mm, 0.80Pmax =108.33 kN, $\Delta$2 = 91.96 mm, 0.75Pmax = -101.56 kN, $\Delta$y1( 75% Secant) = -30.00 mm, $\Delta$y2 (First yield) = -40.00 mm

ดังนั้นค่าความเหนียวที่เหล็กครากมีค่า (91.957/40) = 2.30

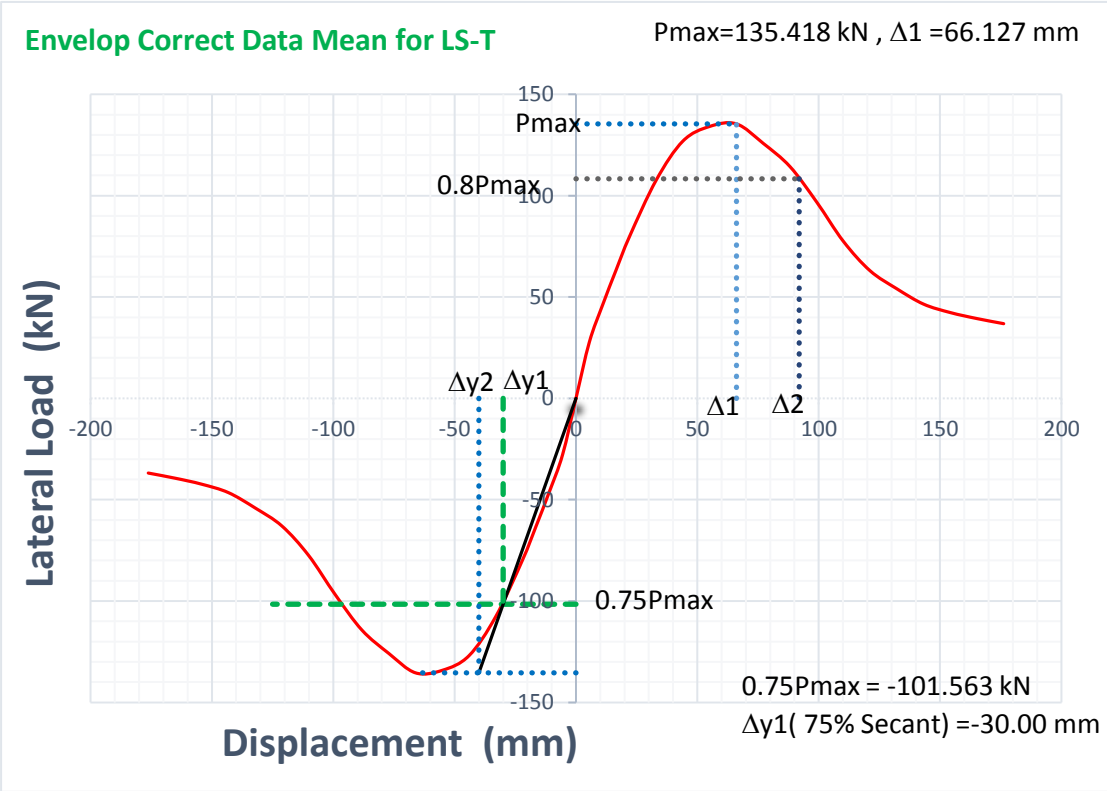
ดังนั้นค่าความเหนียวที่ 75%เหล็กครากมีค่า (91.957/30) = 3.06




รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง กับ การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสา LS-T




รูปที่ 5.16 เส้นโค้งขอบนอก(Envelop Curve)ของเสา LS-T




รูปที่ 5.17 การหาค่าระยะการเคลื่อนที่เพื่อนำค่า ไปคำนวณความเหนียวของเสา LS-T

## 5.3 การเปรียบเทียบค่าผลจากการทดสอบ เสาเสริมกำลังโดยการรัดด้วยกรงเหล็กหน้าตัดรูปตัวที(LS-T) กับ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต่อทาบเหล็กเสริมที่โคนเสา ( C-SP-100 )

1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Hysteresisระหว่างเสา LS-T กับ เสา C-SP-100 จากรูปที่ 5.3.18 ในช่วงค่า 0.25%Drift ,0.50%Drift , .75%Drift ,1.00%Drift ,1.50%Drift ,2.00%Drift ค่าแรงกระทำด้านข้าง กับระยะการเคลื่อนที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากค่า 2.00%Drift สำหรับเสา C-SP-100 แรงกระทำด้านข้างจะตกลงอย่างรวดเร็ว จากค่าแรงด้านข้างกระทำสูงสุด119.36 kN ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง 42.33 มิลลิเมตร ลดลงมีค่าแรงกระทำด้านข้าง 104.63 kN ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง 53.11 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าแรงด้านข้างก็ลดต่ำลงมาอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เกิดจากการที่เมื่อแรงด้านข้างกระทำกับเสาในช่วงการให้แรงแรกๆ การเสียรูปของเสามีโหมดเป็นแรงดัด คือ การแตกร้าวจะเริ่มที่ผิวด้านนอกของเสาโดยตั้งฉากกับแกนเสา แล้วจะค่อยๆขยับลึกเข้ามาด้านในเสา เมื่อเพิ่มแรงด้านข้างต่อไปอีก รอยร้าวที่เป็นโหมดแรงดัดก็ขยายตัวในแนวดิ่งและขยับลึกเข้ามาจนถึงเหล็กแกนเสาที่ริมนอก เมื่อให้แรงด้านข้างไปเรื่อยๆ คอนกรีตในส่วนที่หุ้มเสา(Covering) ก็เริ่มกะเทาะหลุดออก เมื่อผิวนอกของเหล็กแกนไม่มีคอนกรีตห่อหุ้ม ส่งผลให้การยึดเหนียว(Bonding)ระหว่างเหล็ก

เสริมและคอนกรีตลดต่ำลงไปเรื่อยๆ และ เมื่อให้แรงด้านข้างต่อไปอีก ทำให้กำลังที่สามารถรับได้ของค่าการยึดเหนียวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต มีค่าน้อยกว่า แรงภายนอกที่กระทำ จึงทำให้เหล็กแกนเสาลื่นไถลหลุดออกจากการต่อทาบกัน ทำให้เสาเกิดการพังทลายก่อนที่จะได้ใช้กำลังทั้งหมดของเสาที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับเสา LS-T หลังจาก 2.00%Drift ค่าแรงกระทำด้านข้างยังมีค่าเพิ่มขึ้นไปได้135.42kN ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง 66.13 มิลลิเมตร ที่3.00%Drift หลังจากนั้นค่าแรงกระทำด้านข้างก็ค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ทั้งนี้เพราะการใช้เหล็กรูปพรรณตัวที ช่วยในการโอบรัดเป็นช่วงๆ บริเวณที่เหล็กแกนเสามีการต่อทาบ เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวด้านข้างได้ เมื่อคอนกรีตไม่สามารถขยายตัวด้านข้างได้ จึงทำให้ค่ายึดเหนียวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตมีค่าลดลงน้อยมากๆ เสมือนมีค่าการยึดเหนียวที่สมบูรณ์ ทำให้สามารถใช้กำลังของเสาได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

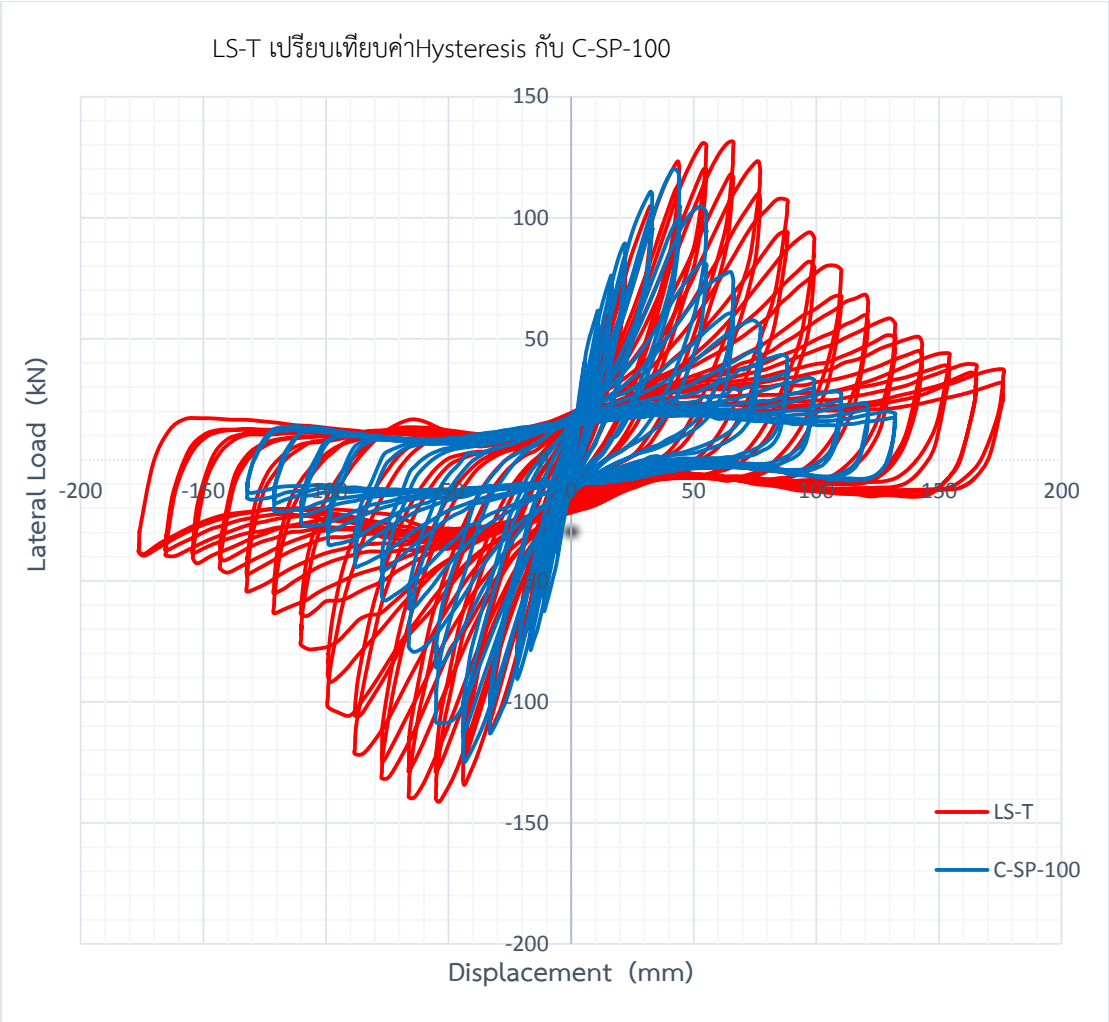
2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Envelopesระหว่างเสา LS-T กับ เสา C-SP-100 จากรูปที่ 5.3.19 ในช่วง 0.25%Drift ,0.50%Drift , .75%Drift ,1.00%Drift ,1.50%Drift ,2.00%Drift ค่า Envelopes มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากนี้ค่าของ LS-T มีค่าสูงกว่า เสา C-SP-100 ทุกค่า

3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนียวระหว่างเสา LS-T กับ เสา C-SP-100 แสดงดังตารางที่ 5.3.7

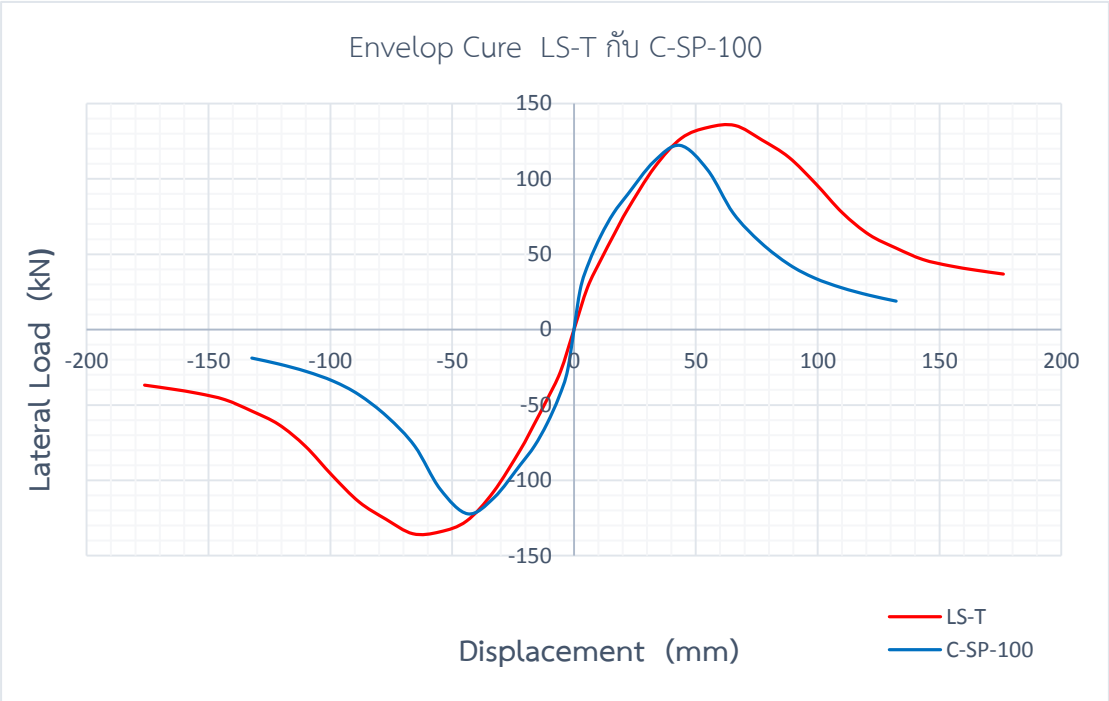
ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนียวระหว่างเสา LS-T กับ เสา C-SP-100

ตัวอย่างเสา LS-T C-SP-100

| ตัวอย่างเสา | | LS-T | C-SP-100 |
|---|---|---|---|
| แรงด้านข้างสูงสุดPmax | (kN) | 135.42 | 119.36 |
| 0.8xแรงด้านข้างสูงสุด(0.8Pmax) | (kN) | 108.33 | 95.48 |
| ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเมื่อแรงด้านข้างสูงสุด | (mm) | 66.13 | 42.33 |
| ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเมื่อแรงด้านข้างที่ 0.8Pmax | (mm) | 91.96 | 58.11 |
| ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเมื่อเหล็กคราก | (mm) | 40.00 | 32.98 |
| ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเมื่อเหล็กคราก 75% Secant | (mm) | 30.00 | 31.44 |
| ค่าความเหนียวที่จุดคราก (Ductility) | | 2.30 | 1.76 |
| ค่าความเหนียวที่จุดคราก 75% Secant (Ductility) | | 3.07 | 1.85 |




รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบค่า Hysteresisระหว่างเสา LS-T กับ เสา C-SP-100




รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าเส้นโครงขอบนอก(Envelop Curve) ระหว่างเสา LS-T กับ เสา C-SP-100

# บทที่ 6
# สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการทดสอบ

6.1.1 จากการทดสอบ เสาคอนกรีตขนาดหน้าตัด 0.25เมตรx0.25เมตร สูง 0.75 เมตร พบว่า เสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที หลังทำการทดสอบเสาพบว่ากำลังรับน้ำหนักเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที มีค่า มากกว่าเสาที่ไม่เสริมกรอบเหล็กรูปตัวที 48 เปอร์เซ็นต์ การโอบรัดด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีขนาดหน้าตัด 50x50x5x7 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการโอบรัดเต็มกำลัง (เหล็กหน้าตัดรูปตัวทีคราก) เหล็กตามแนวแกนและตามแนวขวางคราก สามารถเปลี่ยนโหมดการวิบัติแบบแรงเฉือน เป็นแบบมีความเหนียว โดยเสาไม่วิบัติทันทีทันใด สามารถสร้างสมการประสิทธิภาพการโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม 0.25x0.25 เมตรสูง 0.75 เมตร มีค่า $f_{cc} = 0.8289\ f_{co} + 5.1383\ f_l$

6.1.2 จากการทดสอบ เสาคอนกรีตขนาดหน้าตัด 0.30 เมตรx0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร พบว่า เปรียบเทียบกำลังระหว่างเสาที่เสริมกำลังด้วยเหล็กแผ่นหนา 8 มิลลิเมตร กับเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีที่มีความหนา 8 มิลลิเมตรเท่ากัน ผลเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ การโอบรัดด้วยกรอบเหล็กรูปตัวทีขนาดหน้าตัด 100x100x5.5x8 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพดี แต่ใช้กำลังไม่ถึงจุดคราก สามารถเปลี่ยนโหมดการวิบัติแบบแรงเฉือน เป็นแบบมีความเหนียว โดยเสาไม่วิบัติทันทีทันใด

6.1.3 จากการทดสอบ เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวที (LS-T) พบว่า การโอบรัดด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที เป็นช่วงๆช่วยเพิ่มการรับแรงทางด้านข้างของเสา และเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของเสาจากการสูญเสียการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กที่ต่อทาบ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยวโดยการโอบรัดด้านนอก ให้เสามีรูปแบบการวิบัติแบบแรงดัด พบว่าเสาที่เสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีรับแรงกระทำด้านข้างได้เพิ่มขึ้น 13.4เปอร์เซ็นต์ และความเหนียวการเคลื่อนที่ด้านข้างมีค่า 3.1 เพิ่มขึ้น 65 เปอร์เซ็นต์

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

เสาทดสอบตัวอย่างเสาสั้นขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร ให้ใช้เหล็กตามแนวแกนเท่าเดิม ระยะหุ้มคอนกรีตเท่าเดิม แต่เปลี่ยนระยะห่างของปลอกเสาจากเดิม 0.10 เมตร เป็น 0.20 เมตร แล้วนำไปทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน เดิมเสาสั้นขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 เมตร สูง 0.75 เมตร ใช้เหล็กเสริมตามแนวแกน และเหล็กปลอกขนาดเดิม แต่ให้เพิ่มความสูง เป็น 2.80 เมตร แล้ว

ทำการเสริมกำลังด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที ระยะห่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง 0.10 เมตร แล้วนำไปทดสอบแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว ไปเปรียบเทียบกับ การนำเสาดังกล่าวไปทดสอบภายใต้แรงตามแนวแกนกับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร เสาขนาดหน้าตัด 0.30x0.30 เมตร สูง 0.90 เมตร เหล็กเสริมตามแนวแกนให้มีขนาดเท่าเดิมแต่เปลี่ยน ระยะหุ้มของคอนกรีตจากเดิม 0.05 เมตร เป็น 0.025 เมตร แทน และเปลี่ยนขนาดหน้าตัดเหล็กรูปตัวทีให้มีขนาดเล็กลงกว่าขนาดหน้าตัดเดิม เสาที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมขนาดหน้าตัด 0.40x0.40 เมตร สูง 2.40 เมตร ระยะต่อทาบเหล็กตามแนวแกน 0.70 เมตร แล้วโอบรัดด้วยกรอบเหล็กรูปตัวที ในช่วงโคลนเสา สูงไปจนถึงที่ระดับ 1.00 เมตร ควรโอบรัดในช่วงที่มีการต่อทาบเหล็กเท่านั้น หรือใกล้เคียงที่สุด

# รายการอ้างอิง


Aboutaha, R. S., M. D. Engelhardt, J. O. Jirsa and M. E. Kreger. 1999. Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets. Structural Journal 96.68-78.

Choi, E., Young-Soo. Chung, J. Park and Baik-Soon. Cho. 2010. behavior of reinforced concrete columns confined by new steel-jacketing method. ACI Structural Journal 107.654.

Mander, J. B., M. J. N. Priestley and R. Park. 1988. Obsered stress-strain behavior of confined concrete. Structural Engineering 114.1827-49.

Melek, M. and John W. Wallace. 2004. cyclic behavior of columns with short lap splices. Structural Journal 101.802-11.

Mosheer, Khamail Abdul-Mahdi. 2016. STRENGTHENING AND REHABILITATION OF REINFORCEMENT CONCRETE SQUARE COLUMNS CONFINED WITH EXTERNAL STEEL COLLARS. مجلة الكوفة الهندسية| Kufa journal of Engineering 7.

Nagaprasad, P., D. Sahoo and Durgesh C. Rai. 2009. seismic strengthening of RC columns using external steel cage. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 38.1563-86.

Park, R. and T. Paulay. 1975. Reinforced concrete structures. New York: John Wiley & Sons.

Pudjisuryadi, P. and P. Suprobo. 2016. axial compressive behavior of square concrete columns externally collared by light structural steel angle sections. International Journal of Applied Engineering Research 11.4655-66.

S. Watson, F. A. Zahn and R. Park. 1992. Confining reinforcement for concrete columns. Structural Engineering 120.

Saatcioglu, M. and S. R. Razvi. 1992. Strength and ductility of confined concrete. Structural Engineering 118.

Xiao, Y. and H. Wu. 2003. retrofit of reinforced concrete columns using partially stiffened steel jackets. Journal of structural engineering 129.725-32.

Ye, L., Q. Yue, S. Zhao and Q. Li. 2002. shear strength of reinforced concrete columns strengthened with carbon-fiber-reinforced plastic sheet. Journal of structural engineering 128.1527-34.

ครรชนะ รัตนพงศ์. พ.ศ. 2553. ขีดจำกัดระยะเคลื่อนตัวที่สภาวะการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบเหล็กตามแนวยาว: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พชร เครื่อวิทย์. พ.ศ. 2555. พฤติกรรมแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบด้วยข้อต่อเชิงกล: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศรประสิทธิ์ ลำภา สย 10658

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านโพนข่าวินิตวิทยาคาร

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย (เรียนจนถึงมัธยมศึกษาปีที่ 6 จนครบหลักสูตรแต่ไม่ สำเร็จการศึกษา)

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ปัจจุบัน มหาวิทยาลัยราชมงคลอิสานนครราชสีมา)

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยขอนแก่น