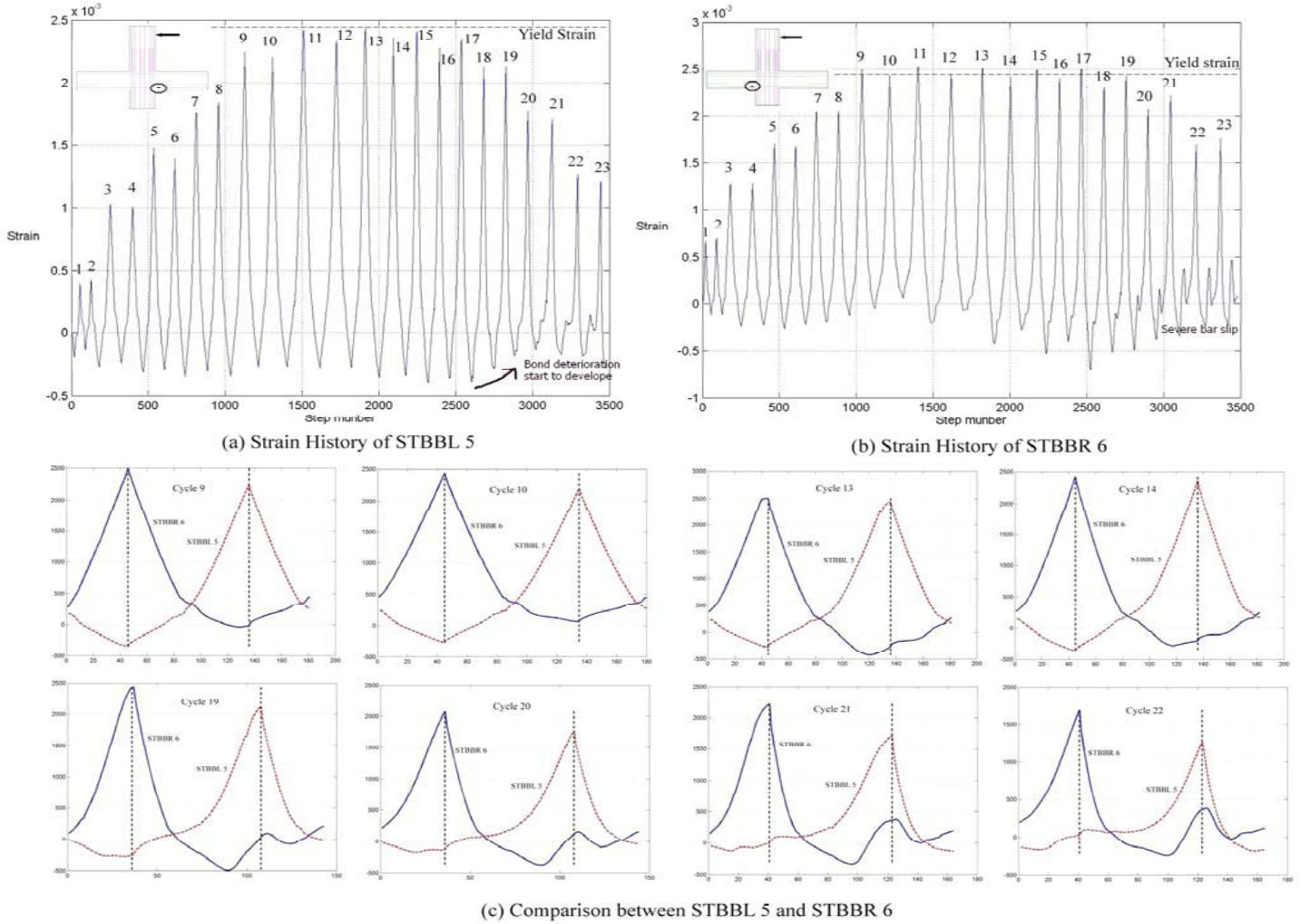
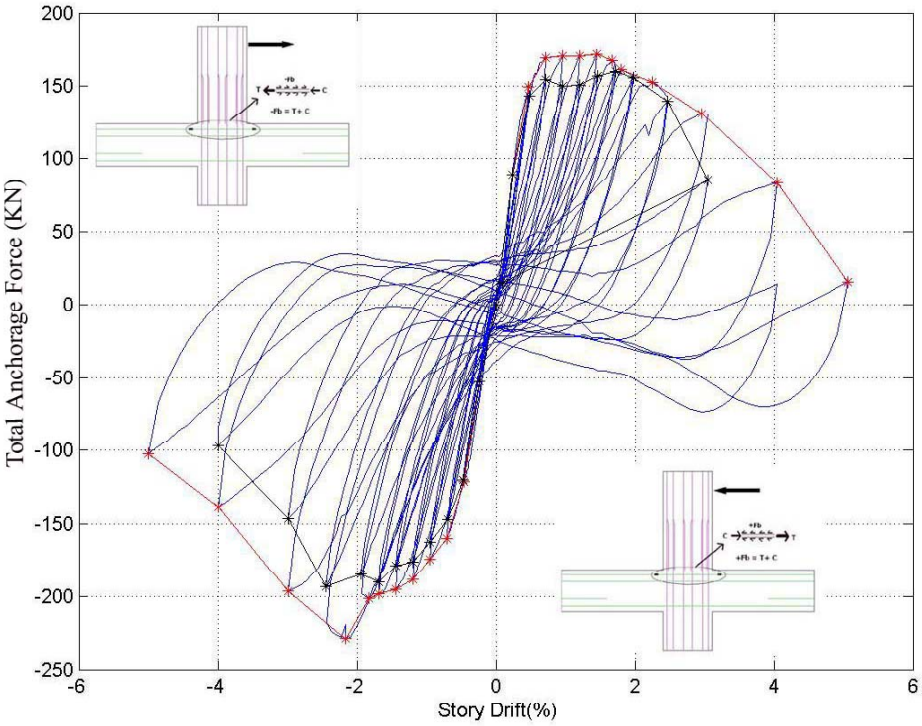
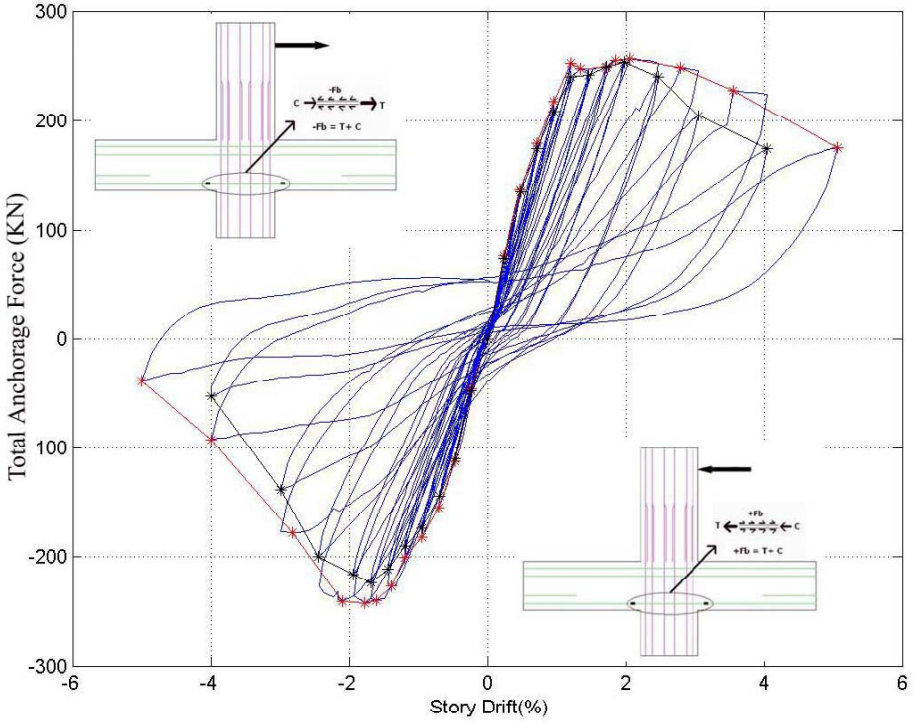


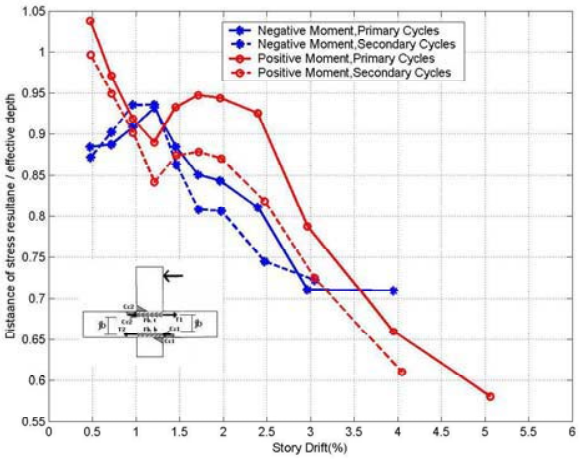

รูป 2.19 การรูดไถลของเหล็กนอนในชิ้นทดสอบที่ 2 (เหล็กล่าง)



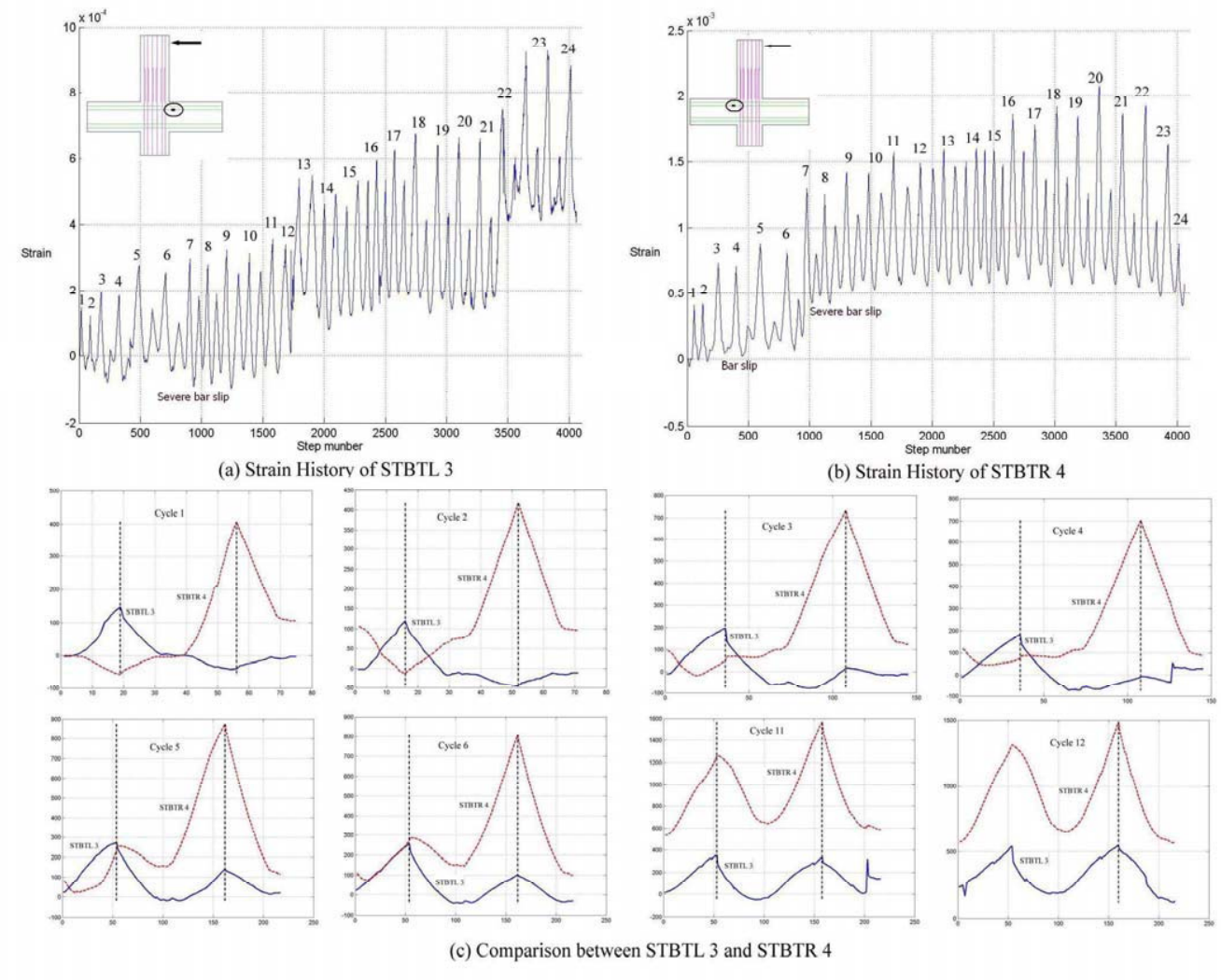

รูป 2.20 แรงยึดหน่วงทั้งหมดของเหล็กบนในคานชิ้นทดสอบที่ 2



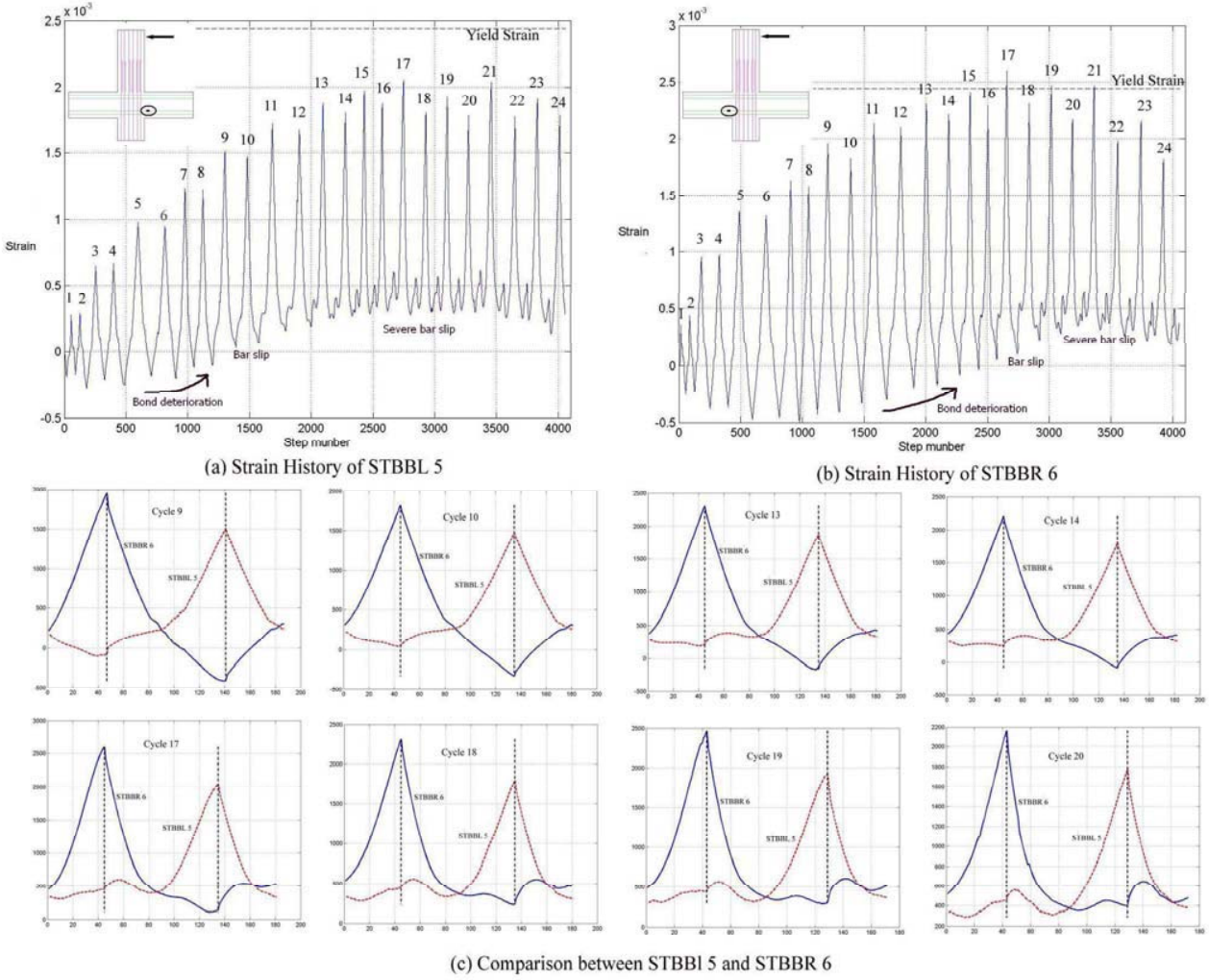
รูป 2.21 แรงยึดหน่วงทั้งหมดของเหล็กล่างในชิ้นทดสอบที่ 2



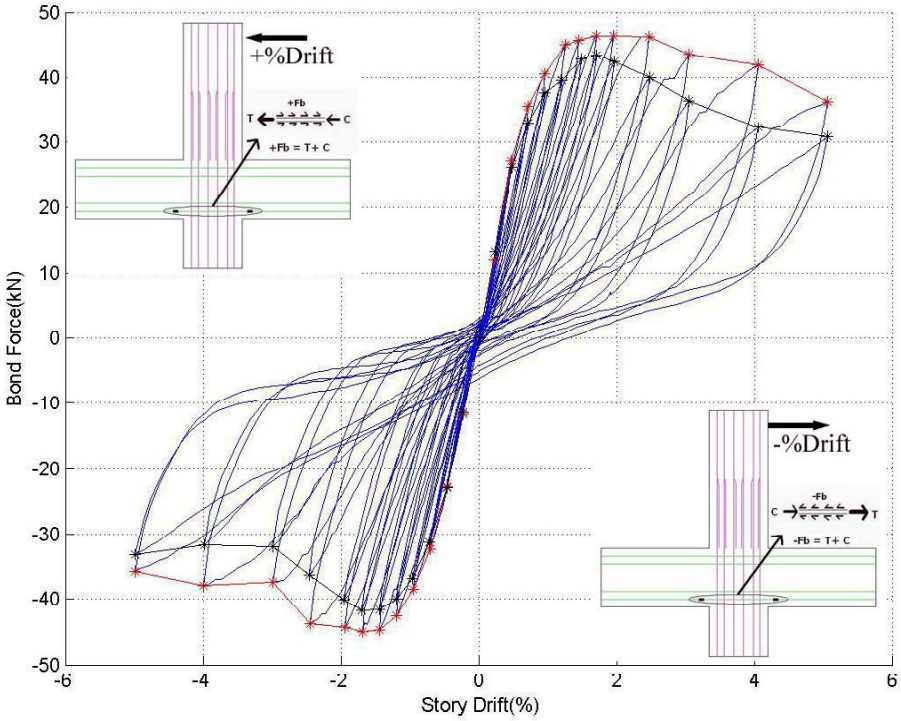

รูป 2.22 การเปลี่ยนแปลงความยาวแขนโมเมนต์ในชิ้นทดสอบที่ 2



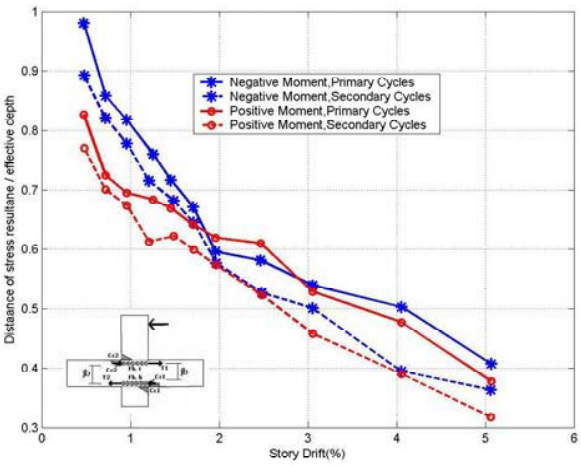

รูป 2.23 การรูดไถลของเหล็กบนในชิ้นทดสอบที่ 3



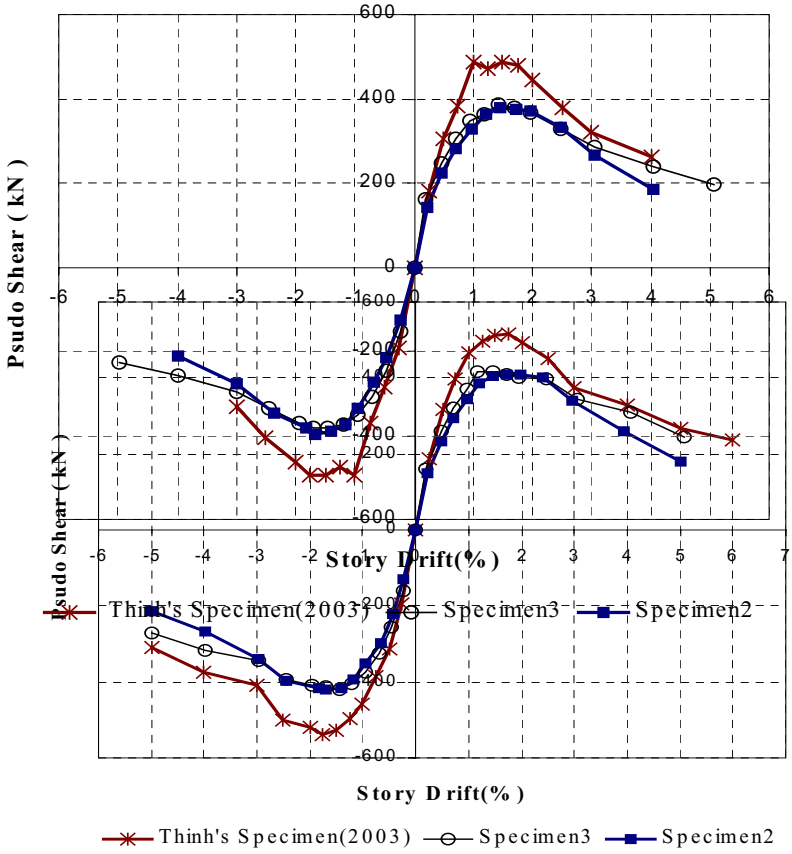

รูป 2.24 การรูดไถลของเหล็กล่างในชิ้นทดสอบที่ 3




รูป 2.25 แรงยึดหน่วงของเหล็กล่างในชิ้นทดสอบที่ 3 (เหล็ก 1 เส้น)



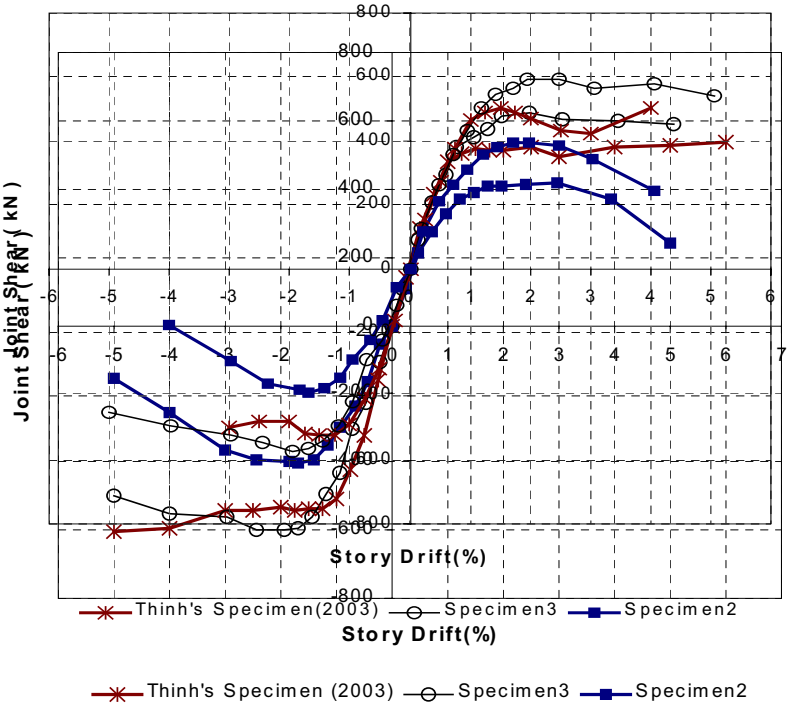

รูป 2.26 การเปลี่ยนแปลงความยาวแขนโมเมนต์ของชิ้นทดสอบที่ 3




(a) Primary cycles

(b) Secondary cycles

รูป 2.27 แรงเฉือนเทียมที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ




(a) Primary cycles

(b) Secondary cycles

รูป 2.28 แรงเฉือนจุดที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ

# บทที่ 3

# การทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงยึดหน่วง และหาแนวทางการซ่อมแซมจุดต่อคาน-เสา

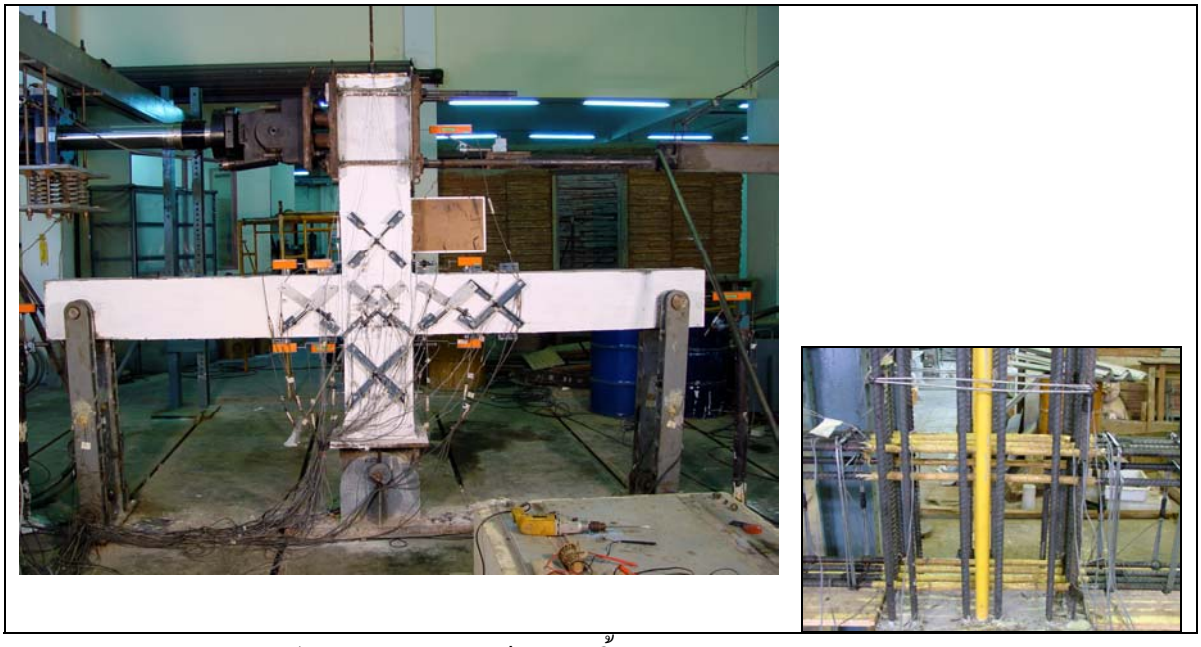
## 3.1 ที่มา

สืบเนื่องจากการทดลองในงานวิจัยย่อยที่ 2 ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การวิบัติของจุดต่อคาน-เสาเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดหน่วงระหว่างเหล็กนอนกับคอนกรีตในบริเวณจุดต่อ จากการศึกษาพบว่า การวิบัติที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะค่อยเป็นค่อยไป กำลังรับน้ำหนักบรรทุกไม่ตกลงอย่างทันทีทันใด เป็นการชี้ให้เห็นว่าการวิบัติเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดหน่วงไม่ใช่การวิบัติแบบเฉียบพลัน เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดหน่วงโดยละเอียด ผู้วิจัยได้ออกแบบชิ้นทดลองขนาด ½ ของขนาดจริง มีรายละเอียด และ ปริมาณการเสริมเหล็กเท่ากับชิ้นทดสอบที่ 2 (ที่เป็นตัวแทนของจุดต่อในอาคารที่มีพื้นที่อาณาเขตเสาปานกลาง) ในงานวิจัยย่อยที่ 2 ทุกประการ แต่ได้ทำการตัดแรงยึดหน่วงระหว่างเหล็กนอนและคอนกรีตในบริเวณรอยต่อ เพื่อเป็นการศึกษากรณีการวิบัติแบบแรงยึดหน่วงในกรณีที่ไม่มีแรงยึดหน่วงตั้งแต่ต้น ภายหลังจากที่ได้ทำการทดสอบชิ้นทดสอบนี้ แล้ว ได้ทำการซ่อมแซม โดยใช้วัสดุเกราท์แบบไม่หดตัวและใช้ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เพื่อศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการซ่อมแซมและเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาที่ได้รับความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหว ในการทดลองในงานวิจัยย่อยใช้น้ำหนักบรรทุกแนวราบกึ่งสถิตแบบเป็นวัฏจักร โดยมีรูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุก (load pattern) และสภาพที่รองรับ (boundary condition) เช่นเดียวกับการทดลองในงานวิจัยย่อยที่สอง นอกจากนี้ การติดตั้งชิ้นทดสอบ อุปกรณ์วัด และหัวผลักไฮโดรลิกส์ (Hydraulic actuator) ข้อมูลที่ทำการบันทึกก็เป็นเช่นเดียวกับการทดลองในงานวิจัยย่อยที่สอง

## 3.2 ชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยย่อยที่ 2 นี้ประกอบด้วย 2 ชิ้นทดสอบดังนี้

1. Debond specimen เป็นชิ้นทดสอบ ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารที่มีพื้นที่อาณาเขตเสาปานกลางที่ได้มีการปรับรายละเอียดการเสริมเหล็กภายในรอยต่อคาน-เสา โดยการตัดแรงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ที่จุดต่อคาน-เสา



รูป 3.1 แสดงรายละเอียดของชิ้นทดสอบ Debond specimen

2. Retrofit specimen ชิ้นทดสอบนี้เป็นชิ้นทดสอบที่ได้จากการซ่อมแซมชิ้นทดสอบ Debond specimen ด้วยวัสดุเกราท์ประเภทไม่หดตัว และห่อหุ้มด้วยแผ่นคารบอนไฟเบอร์ (FRP) ภายหลังถูกแรงกระทำจนตัวอย่างเกิดความเสียหายอย่างมาก

รูป 3.2 แสดงรายละเอียดของชิ้นทดสอบ Retrofit specimen

## 3.3 กำลังของวัสดุ

ทางด้านกำลังของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นทดสอบ คอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างชิ้นทดสอบกำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดระบุ 23.5 MPa (หรือ 240 kg/cm$^2$) โดยเป็นคอนกรีตที่ผสมเองในห้องปฏิบัติการ โดยผ่านการทำการทดสอบหาสัดส่วนผสมคอนกรีต เหล็กที่ใช้เป็นเหล็กยืนในเสาและเหล็กนอนในคานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ชั้นคุณภาพ SD40 ส่วนเหล็กปลอกมีขนาด 3 มม. และมีค่าหน่วยแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 306 MPa (หรือ 3120 kg/cm$^2$)

ตาราง 3.1 Concrete properties of specimen

| Compressive strength, $f_c^{'}$ | Debond Specimen | Retrofit Specimen |
|---|---|---|
| Top column (Ksc) | 268 | 286 |
| Beam (Ksc) | 217 | 569* |
| Bottom Column (Ksc) | 250 | 250 |
| The modulus of elasticity, $E_c$ (Ksc) | $2.293 \times 10^5$ | $2.293 \times 10^5$ |

Beam strength of retrofit specimen fc'* is non-shrink grout

ตาราง 3.2 Steel bar properties of each specimen

| **Longitudinal Reinforcement ( DB12 SD40 )** | **Debond Specimen** | **Retrofit Specimen** |
|---|---|---|
| Average Yield Strength (Ksc) | 4887 | 4887 |
| Average Tensile Strength (Ksc) | 6568 | 6568 |
| The modulus of elasticity $E_s$ (Ksc) | $2.04 \times 10^6$ | $2.04 \times 10^6$ |
| **Transverse Reinforcement ( Plain Mild Steel 3-mm Diameter )** | **Debond Specimen** | **Retrofit Specimen** |
| Average Yield Strength (Ksc) | 3120 | 2847 |

| | | |
|---|---|---|
| Average Tensile Strength (Ksc) | 3950 | 3593 |
| The modulus of elasticity $E_s$ (Ksc) | $2.04 \times 10^6$ | $2.04 \times 10^6$ |

ตาราง 3.3 FRP sheet properties (MBrace CF 130)

| | |
|---|---|
| Thickness, mm | 0.165 |
| Tensile strength, ksc | 35,000 |
| Tensile modulus of elasticity, GPa | $2.35 \times 10^6$ |
| Tensile Elongation Ultimate % | 1.5 |

## 3.4 ผลการทดลอง

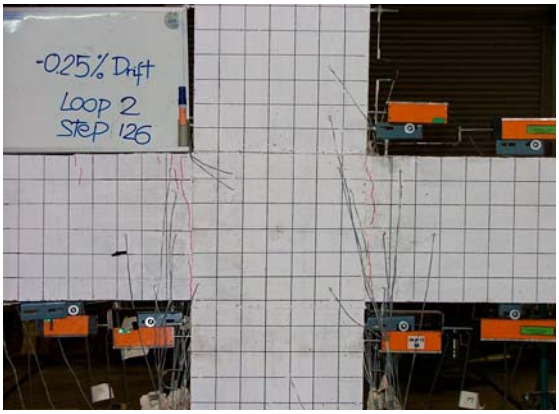
### 3.4.1. การสังเกตุรอยร้าวจากการทดลอง

การเกิดรอยร้าวตามการให้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นสรุปไว้ในตารางข้างล่าง และ ภาพถ่ายแสดงการเกิดรอยร้าวและความเสียหายในแต่ละรอบการเคลื่อนตัว

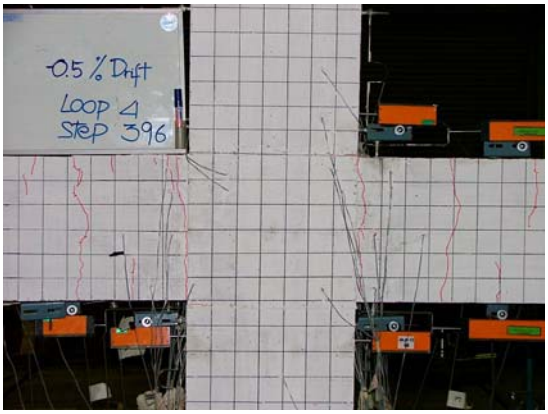
(1) Debond specimen

| **ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ** | **การสังเกตุรอยร้าว** |
|---|---|
| (±0.25%) ในรอบที่ 1-2 | รอยร้าวแรกที่เริ่มสังเกตได้เป็นรอยร้าวดัดด้านบนของคานเกิดที่หน้าเสา ความยาวของรอยร้าวได้วิ่งมาถึงกลางคาน เมื่อให้แรงสลับทิศรอยร้าวจะปรากฏในทิศทางตรงกันข้ามดังแสดงในรูป |
| (±0.5%) ในรอบที่ 3-4 | เกิดรอยร้าวดิ่งมากขึ้นที่หลังคาน และท้องคานอีกฝั่งหนึ่ง เมื่อออกแรงกระทำมากขึ้นจะพบว่ารอยร้าวขยายยาวมากขึ้นตามแรงที่มากกระทำ แต่ไม่พบรอยร้าวทแยงในจุดต่อดังแสดงในรูป |
| (±0.75%) ในรอบที่ 5-6 | รอยร้าวดิ่งเดิมขยายตัวยาวต่อเนื่องตลอดความลึกคาน รอยร้าวใหม่ปรากฏไม่มาก |
| (±1.0 %) ในรอบที่ 7-8 | เกิดรอยร้าวทแยงแรกที่บริเวณจุดต่อในรอบที่ 7 ดังแสดงในรูป และเริ่มปรากฏรอยร้าวปริในแนวนอนขนานกับเหล็กคานบริเวณมุมคาน |
| (±1.25 %) ในรอบที่ 9-10 | เกิดรอยร้าวทแยงเส้นที่สองในทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรกที่บริเวณจุดต่อในรอบที่ 7 และรอยร้าวดิ่งที่เกิดในรอบแรกเปิดกว้างขึ้นมาก และรอยร้าวปริในแนวนอนขนานกับเหล็ก |

| | |
|---|---|
| | คานเกิดที่บริเวณมุมคานทั้ง4 มุม ดังแสดงในรูป |
| (±1.50 %) ในรอบที่ 11 | และเกิดรอยร้าวตามแนวนอนขึ้นจำนวนมากที่บริเวณมุมคานหน้าเสาทั้ง 4 ด้าน ขณะที่รอยร้าวดิ่งใหม่ไม่เกิดเพิ่มเพียงแต่รอยร้าวที่ได้เกิดในรอบต้นๆเปิดกว้างขึ้นมากๆ |
| (±1.75 %) ในรอบที่ 13-14 | ที่หลังคานปรากฏรอยร้าวปริตามแนวนอน คอนกรีตที่บริเวณมุมคานหน้าเสาเริ่มกระเทาะหลุดออกมาเรื่อยๆตามแรงที่มากระทำ ในรอบที่ 2ของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ ± 1.75% เกิดรอยร้าวทแยงใหม่แต่มีจำนวนไม่มากนัก |
| (±2.00 %) ในรอบที่ 15-16 | พบว่ารอยแตกร้าวปริตามแนวนอนเด่นชัดมากขึ้นเรื่อยๆ ตามขนาดของแรงที่มากระทำ |
| (±2.25 %) ในรอบที่ 17-18 | รอยแตกร้าวปริตามแนวนอนได้กระเทาะออกมา จนทำให้หน้าตัดคานเหลือพื้นที่รับแรงอัดน้อยลง |
| (±3.00 %) ในรอบที่ 21-22 | ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ = ±3.0 % ไม่พบว่ามีรอยร้าวทแยงเกิดขึ้นใหม่ แต่ในขณะที่รอยแตกร้าวปริแนวนอนปรากฏให้เห็นอย่างมาก และหลุดกระเทาะออกมาจำนวนมากขึ้นๆ |
| (±3.5 %) ในรอบที่ 23-24 | พบว่ามีรอยแตกร้าวแนวนอนใหม่เกิดขึ้นที่กลางคาน การหลุดกระเทาะคอนกรีตแนวนอนที่มุมคานบนและล่างทั้ง 2 ฝั่งยังมีให้เห็นออกมาอย่างต่อเนื่อง เมื่อครบรอบที่ 24 |
| (±4.0 %) ในรอบที่ 25-26 | พบว่าเกิดการหลุดกระเทาะคอนกรีตแนวนอนที่มุมคานบนและล่าง จนสามารถเห็นเหล็กเสริมคานได้อย่างชัดเจน ในขณะที่รอยร้าวทแยงไม่มีการเปลี่ยนแปลง |
| (±5.0 %) ในรอบที่ 27-28 | มีความเสียหายเป็นบริเวณกว้างโดยคอนกรีตได้กระเทาะออกมาอย่างมากที่มุมคานบนและล่าง จนสามารถเห็นเหล็กเสริมคานทั้งมุมคานบนและล่างได้อย่างชัดเจน ขณะที่รอยร้าวทแยงไม่สร้างความเสียหายใหม่ |
| (±6.0 %) ในรอบที่ 29 | การทดสอบเสร็จสิ้นที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = ±6.0% รูปแสดงภาพถ่ายชิ้นทดสอบหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ*เสร็จสิ้นการทดสอบ* |



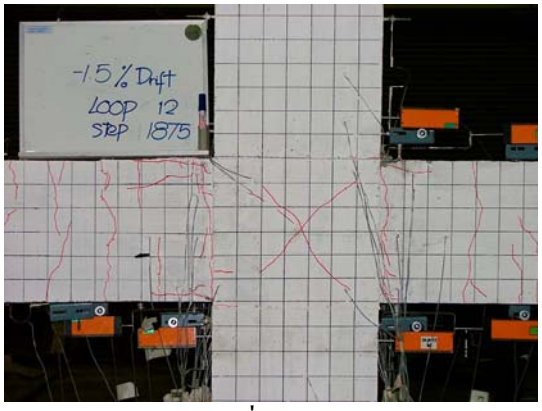

รอบการเคลื่อนตัว ±0.25%



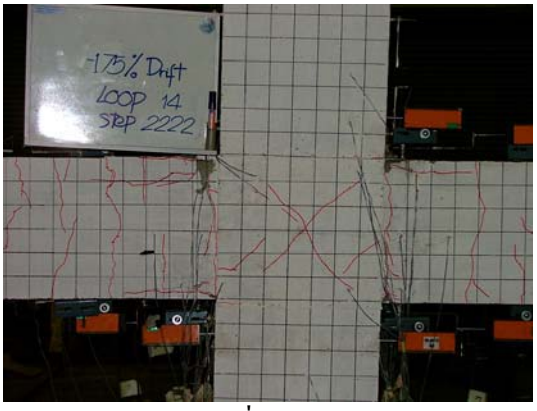

รอบการเคลื่อนตัว ±0.50%

รอบการเคลื่อนตัว ±1.0%

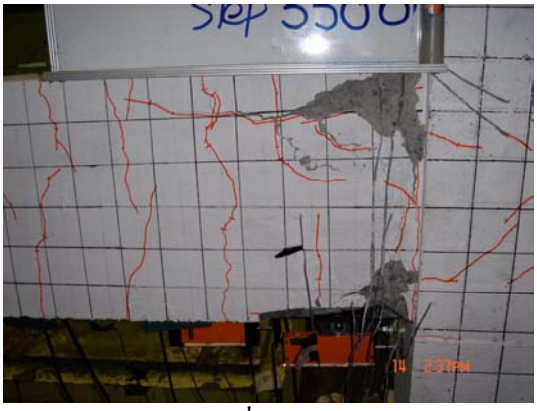
รอบการเคลื่อนตัว ±1.25%




รอบการเคลื่อนตัว ±1.50%



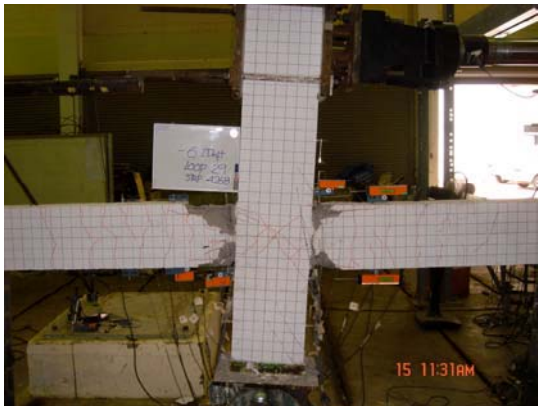

รอบการเคลื่อนตัว ±1.75%



รอบการเคลื่อนตัว ±3.00%

รอบการเคลื่อนตัว ±4.00%

รอบการเคลื่อนตัว ±5.00%

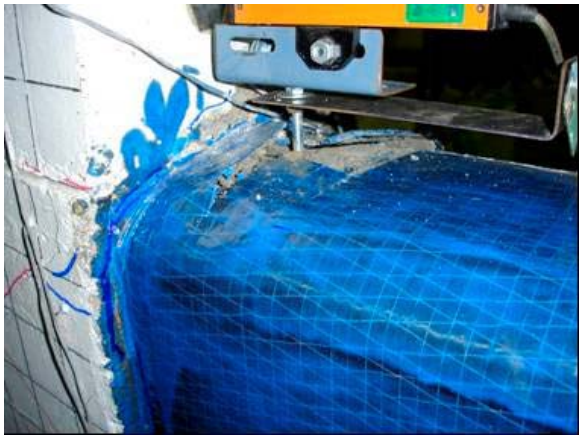


รอบการเคลื่อนตัว ±6.00%

(2) ชิ้นทดสอบ Retrofit specimen

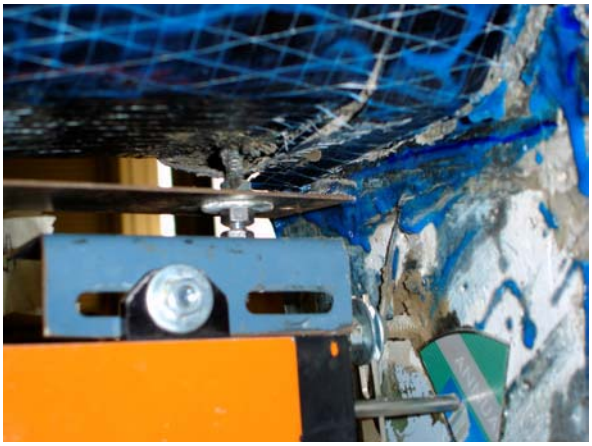
| **ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ** | **การสังเกตุรอยร้าว** |
|---|---|
| ( 0 - ±0.5 %)<br>ในรอบที่ 1- 4 | การสังเกตุรอยร้าวทำได้ยากเนื่องจากแผ่น FRP พันรอบตัวคาน ที่ -0. 5 % drift ของรอบแรก พบรอยร้าวดิ่งที่เสาบนบริเวณรอยต่อด้านข้างระหว่างเสาบนกับหลังคาน |
| ( ±0.75%)<br>ในรอบที่ 5-6 | ที่ - 0.75 % drift ของรอบแรก พบรอยร้าวดิ่งเนื่องจากการดัดบริเวณคานด้านขวา<br>ที่ - 0.75 % drift ของรอบซ้ำ พบรอยร้าวดิ่งที่มุมเสาบนด้านซ้ายคานด้านขวาเสาบนบริเวณรอยต่อด้านข้างระหว่างเสาบนกับหลังคาน |
| (±1.0 %)<br>ในรอบที่ 7-8 | ที่ - 1.0 % drift ของรอบแรก พบรอยฉีกหลังคานด้านซ้าย และท้องคานด้านขวาที่ เปอร์เซนต์ ±1.0 % การเคลื่อนตัวนี้ยังไม่พบรอยร้าวทแยงที่เกิดขึ้นใหม่<br>ที่ +1.0 % drift ของรอบซ้ำ พบรอยร้าวทแยงใหม่เล็กๆภายในรอยต่อ และรอยร้าว(pull out crack) ที่เคยเปิดอยู่เดิม หลังคานขวาหน้าเสา และท้องคานซ้ายหน้าเสา ขยายตัวเพิ่มขึ้น |
| (±1.25%)<br>ในรอบที่ 9-10 | ที่ -1.25 % drift ในรอบแรก เกิดการฉีกขาดของกาว Epoxy ใกล้หน้าเสา<br>ที่ 1.25 % drift ในรอบซ้ำ เกิดการฉีกขาดของกาว Epoxy ทั้ง 2 ด้านที่ขอบหน้าเสา |
| (±2.5 %)<br>ในรอบที่ 17-18 | ที่ -2.5 % drift ในรอบแรก เริ่มปรากฏรอยขาดของ FRP ที่ Bolt ยึด rocking transducer หลังคาน |
| (±3.5 %)<br>ในรอบที่ 23-24 | ที่ -3.5 % drift ในรอบแรก FRP ขาดบริเวณหลังคานเมื่อ ACCUATOR โยกเข้าในด้านเข้าหารอยแตกนั้น |
| ( ±4.0 %)<br>ในรอบที่ 25-26 | ที่ +4.0 % drift ของรอบแรก พบว่ามีรอยร้าวทแยงเกิดขึ้นใหม่ *พร้อมเกิดรอยร้าวดิ่งหน้าเสาด้านซ้าย*<br>ที่ -4.0 % drift ของรอบแรก พบว่ามีรอยร้าวทแยงเริ่มชัดเจนมากขึ้น และพบรอยกระ |

| | |
|---|---|
| | เทาะบริเวณรอยต่อเสา-คาน ซึ่งน่าจะเกิดจากการบดอัด<br>ที่ +4.0 % drift ในรอบสอง มีรอยร้าวทแยงเริ่มกว้างขึ้น<br>ที่ -4.0 % drift ในรอบสอง มีรอยร้าวทแยงเกิดขึ้นมาใหม่หลายแนว รอยร้าวทแยงกว้างมากขึ้นด้วย |
| (±5.0 %)<br>ในรอบที่ 27-28 | ที่ +5.0 % drift ในรอบสอง เกิดความเสียหายขึ้นหลายอย่าง<br>1. แผ่น FRP ที่อยู่บริเวณคานด้านขวา ฉีกขาดลงมาจนเห็นคอนกรีต Non-shrink ที่ฉีกแยกออกจากกัน (pull out crack) ในขณะที่เนื้อคานคอนกรีตแน่นอยู่<br>2. และแผ่น FRP ฉีกขาดท้องคานด้านซ้ายมือ<br>3. แผ่น FRP ฉีกขาดหลังคานด้านซ้ายมือ<br>4. รอย Crack ทแยงมุมใน joint กว้างมากขึ้น เด่นชัดขึ้น<br>ที่ -5.0 % drift ในรอบแรก คอนกรีตที่คานเริ่มกระเทาะหลุดออกมากขึ้นแต่การกระเทาะหลุดออกมีลักษณะเหมือนการบดอัดมากกว่า ยังไม่สามารถสังเกตุได้ว่าคอนกรีตที่อยู่แกนกลางรอยต่อถูกบดอัดหรือไม่<br>ที่ +5.0 % drift ในรอบสอง รอยร้าวทแยงเด่นมากขึ้นมาและได้ล่ามเข้าไปในเสา นอกจากนี้ที่ขอบเสาเกิดการกระเทาะมากด้วย<br>ที่ -5.0 % drift ในรอบสอง คอนกรีตกระเทาะตามแนวรอยร้าวทแยงมาก และในคานคอนกรีตก็ร่อนออกมาแต่ยังไม่น่าเป็นรอยร้าวเนื่องจาก Splitting crack |
| (= ±6.0 %)<br>ในรอบที่ 29 | ที่ +6.0 % drift ในรอบแรก คอนกรีตภายใน รอยต่อถูกบดอัด กระเทาะออกมาจนเห็นเหล็กยืนของเสา ในขณะที่คานคอนกรีตยังไม่ปรากฏรอยร้าวเนื่องจาก Splitting Crack การทดสอบเสร็จสิ้นที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = ±6.0% |

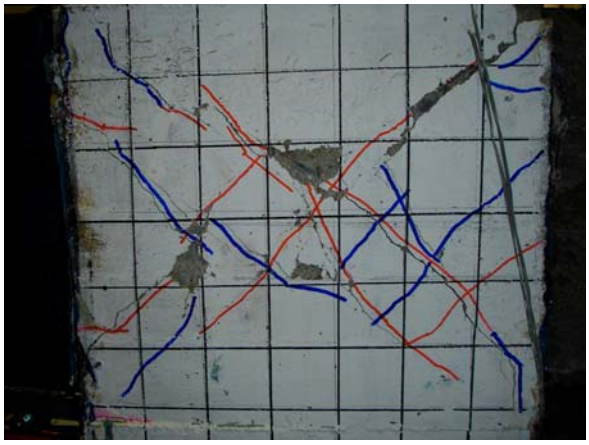


รอบการเคลื่อนตัว ±3.0%

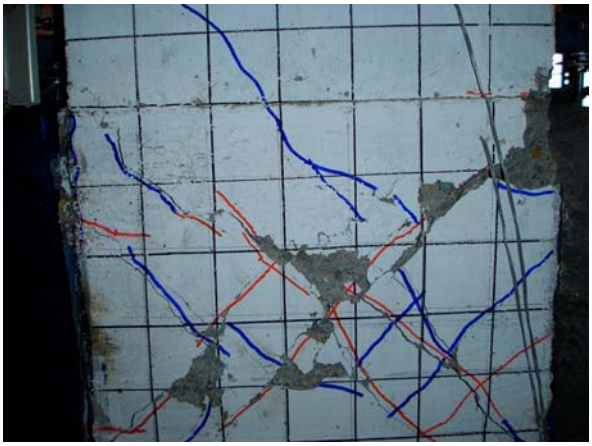
รอบการเคลื่อนตัว ±5.00% (แผ่น FRP ด้านบน ขาด)



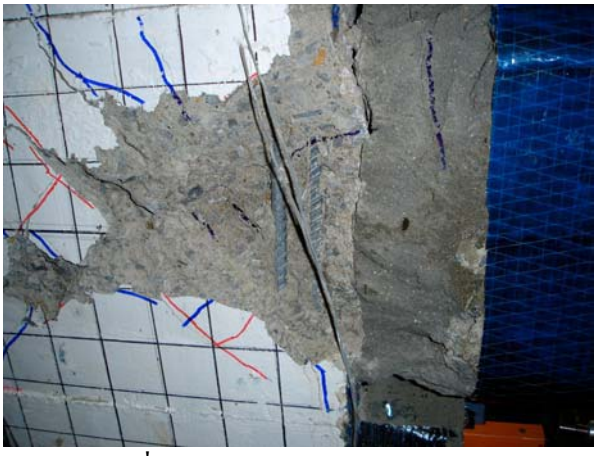
รอบการเคลื่อนตัว ±5.00% (แผ่น FRP ด้านล่าง ขาด)



รอบการเคลื่อนตัว ±5.00% (คอนกรีตบริเวณจุดต่อกะเทาะ)



รอบการเคลื่อนตัว ±5.00% (คอนกรีตบริเวณจุดต่อกะเทาะ)



รอบการเคลื่อนตัว ±6.00% (คอนกรีตบริเวณจุดต่อกะเทาะ)

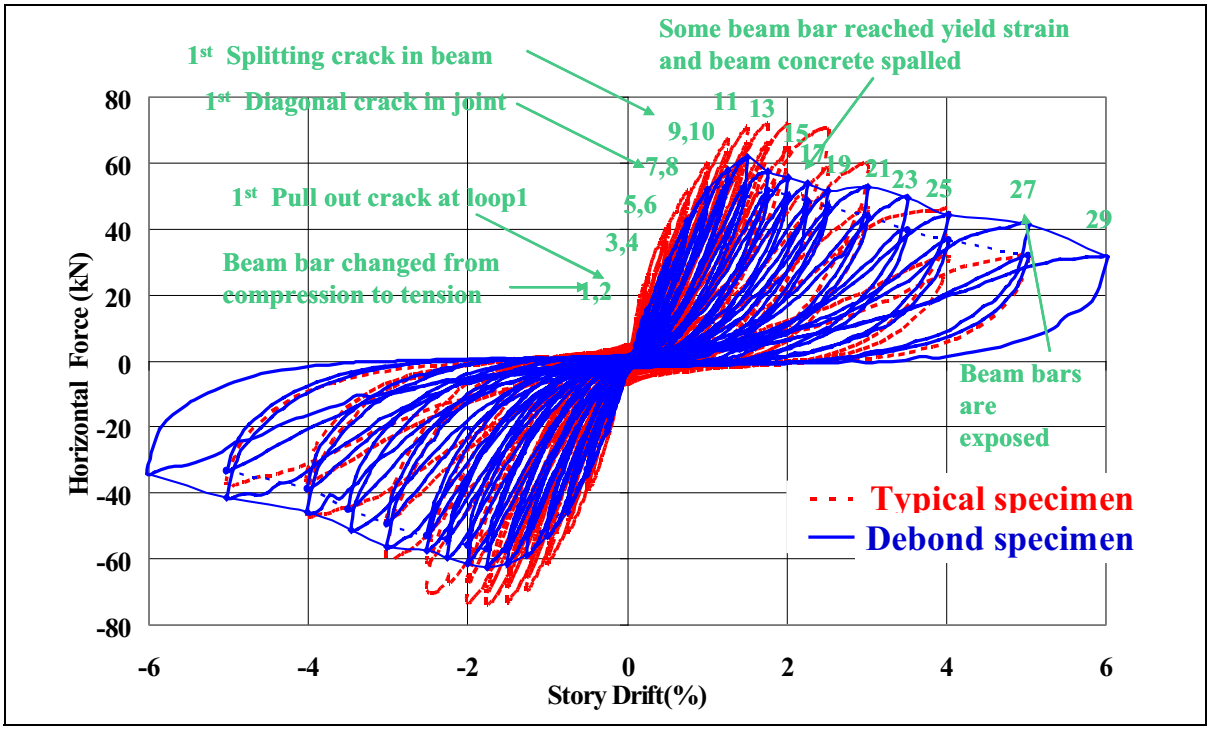
### 3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธของรอยต่อคาน-เสา

(1) ชิ้นทดสอบ Debond specimen

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธของชิ้นทดสอบ debond specimen แสดงใน รูป 3.3 จากรูปจะเห็นว่าชิ้นทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) ในรอบการเคลื่อนตัวที่ 1 ถึง 4 นับตั้งแต่รอบที่ 5 (ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = $\pm$0.75%) จะเห็นว่าเส้นโค้งวนรอบ hysteretic มีลักษณะแคบ มีพื้นที่ภายในลูปน้อย แสดงให้เห็นว่ามีการสลายพลังงานในรอบการเคลื่อนตัวน้อย และ โค้งแนบหาจุดศูนย์กลาง (pinched) ลักษณะความโค้งเข้าหาศูนย์ในลักษณะนี้เกิดจากไถลตัวและการเปิดของรอยร้าวทแยงในบริเวณรอยต่อดังได้อธิบายไว้แล้ว นอกจากนั้นค่าความแข็งเกร็งลดลง หลังชิ้นทดสอบสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด (ในรอบการเคลื่อนตัวที่ 11 ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = 1.50%) เท่ากับ 62 kN

เมื่อผลักชิ้นทดสอบต่อไปอีก พบว่ากำลังรับน้ำหนักค่อยๆลดลงซึ่งแตกต่างจากชิ้นทดสอบ Typical specimen แสดงว่าชิ้นทดสอบยังคงรักษากำลังต้านทานไว้ได้ไม่ลดลงอย่างทันทีทันใด โดยไม่เกิดการวิบัติแบบเปราะ อย่างไรก็ตามในช่วงที่เลยจากกำลังรับน้ำหนักสูงสุด ชิ้นทดสอบมีความแข็งเกร็ง (stiffness) ลดลงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะนับตั้งแต่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = ±2.5% พฤติกรรม hysteretic ของชิ้นทดสอบมีลักษณะแคบคือมีพื้นที่ภายในลูปน้อยและโค้งเข้าหาจุดศูนย์กลาง (มีลักษณะ pinched )

นอกจากนี้เมื่อทำการวนรอบการเคลื่อนตัวซ้ำของชิ้นทดสอบครั้งที่ 2 พบว่าทั้งกำลังและความเกร็งของชิ้นทดสอบมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไร้เสถียรภาพของชิ้นทดสอบในรอบการเคลื่อนตัว เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีทางโครงสร้าง ของชิ้นทดสอบ Debond specimen กับพฤติกรรมและการวิบัติพอจะสรุปได้ดังนี้ ชิ้นทดสอบ Debond specimen มีอัตราส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์ระบุของเสาต่อคานเท่ากับชิ้นทดสอบ Typical specimen คือ 1.63 และหากเปรียบค่าดัชนีความยืดหน่วง (BI) และค่าอัตราส่วน $h_c/d_b$ ของ Debond specimen มีค่าเท่ากับ 5.09 และ 29 ตามลำดับ ดังนั้นจุดหมุนพลาสติกจึงควรจะเกิดขึ้นในคาน แม้ว่าอัตราส่วน V/Vn ของชิ้นทดสอบมีค่ามากกว่า 1.0 ซึ่งเป็นดัชนีแสดงถึงการวิบัติจะเกิดขึ้นที่รอยต่อ และการทดลองพบว่ารอยต่อปรากฏความเสียหายน้อยมาก ในขณะที่ปลายคานหน้าเสาเกิดความเสียหายอย่างมาก คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดการกระเทาะหลุดออกมาตามแนวเหล็กเสริมนอนของคานเป็นระยะทางกว่า 20 ซม.

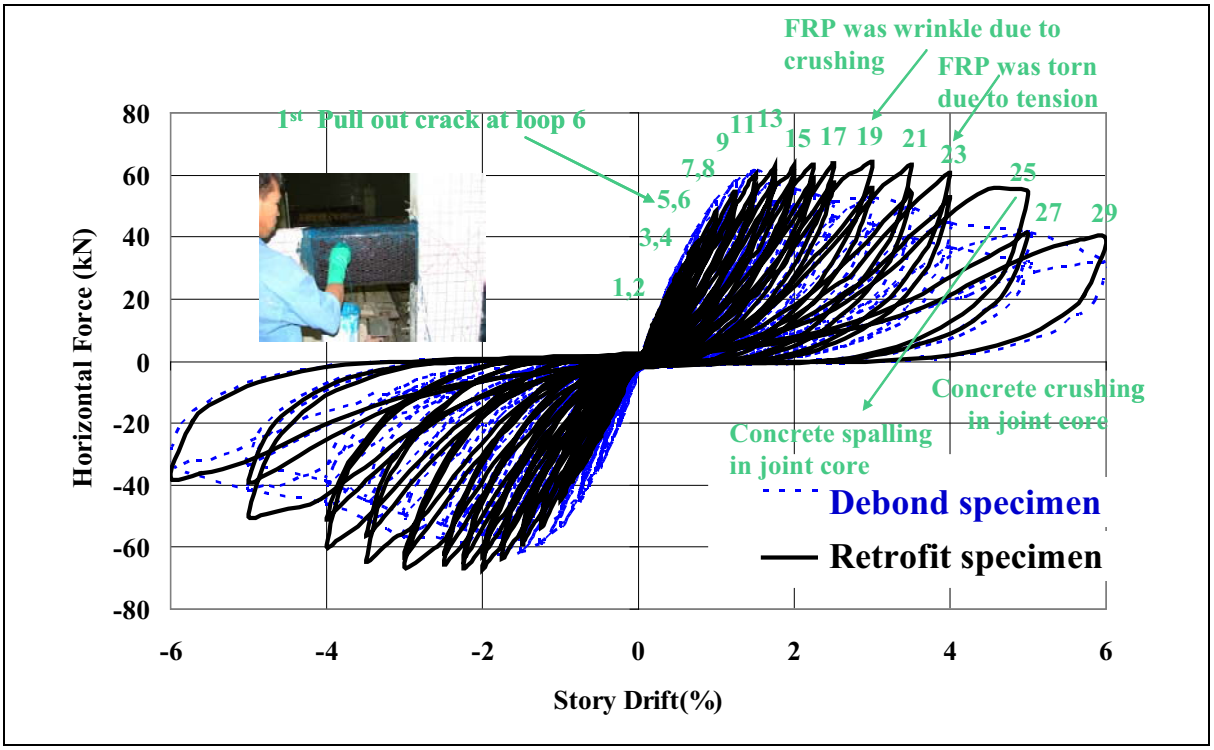



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธของ Debond specimen

(2) ชิ้นทดสอบ Retrofit specimen

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธของชิ้นทดสอบ Retrofit specimen แสดงใน รูป 3.4 จากรูปจะเห็นว่าชิ้นทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) ในรอบการเคลื่อนตัวที่ 1 ถึง 4 และนับตั้งแต่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = ±0.75% เส้นโค้งวนรอบ hysteretic มีลักษณะแคบ มีพื้นที่ภายในลูปน้อย คุณลักษณะดังกล่าวแสดงเหมือนเช่นเดียวกับชิ้นทดสอบ Debond specimen โดยต้านทานแรงสูงสุดได้เท่ากับ 64 kN ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ = 3.0% เนื่องจากชิ้นทดสอบไม่สามารถรักษาแรงต้านทานแรงกระทำสูงสุดไว้ได้ จึงถือว่าจุดนี้เป็นจุดที่ชิ้นทดสอบเกิดการวิบัติ

จากกราฟจะเห็นว่าจุดสูงสุดของเส้นโค้งวนรอบ hysteretic ในแต่ละระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธยังคงให้ค่าสูงต่อไปได้อีก นั่นเป็นผลมาจากการคราดของเหล็กนอนในคานและคานคอนกรีตถูกโอบรัดแน่น (confined) ด้วยแผ่นFRP ทำให้ชิ้นทดสอบสามารถต้านทานแรงภายนอกไว้ได้ แม้ว่าจะเกิดการเคลื่อนที่เป็นระยะถึง 4% โดยกำลังลดลงน้อยมาก นั่นแสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบมีความเหนียวมากเมื่อเทียบกับ debond และ Typical specimen (ชิ้นทดสอบที่ 2 ในงานวิจัยย่อยที่ 2) อย่างไรก็ตามเส้นโค้งวนรอบ hysteretic มีลักษณะแคบ มีพื้นที่ภายในลูปน้อย แสดงว่าชิ้นทดสอบมีความสามารถในการสลายพลังงานในรอบการเคลื่อนตัวได้น้อย เมื่อรอบการเคลื่อนตัวสัมพัทธมีค่า 4% กำลังของชิ้นทดสอบเริ่มลดลง และจะลดลงเหลือ 54 kN หรือ 84% ของกำลังต้านทานสูงสุด จากการสังเกตรอยร้าว และความเสียหายที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นการวิบัติแบบบดอัดเนื่องจากแรงเฉือนภายในรอยต่อ ( Joint shear failure) ซึ่งคอนกรีตภายในรอยต่อเกิดการกะเทาะหลุดออกมา สามารถเห็นเหล็กยืนในเสา




รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธของ Retrofit specimen

ถึงแม้ว่า ชิ้นทดสอบจะมีความเหนียวสูง แต่การวิบัติก็เกิดขึ้นในจุดต่อ และ เป็นการวิบัติแบบเฉียบพลัน การวิบัติที่เกิดขึ้นกับจุดต่อนั้นเป็นสิ่งที่ไม่พึงปราถนาเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากอาจนำไปสู่การวิบัติอย่างสิ้นเชิงของอาคาร เนื่องจากจุดต่อเป็นส่วนหนึ่งของเสา การซ่อมแซมโดยทำให้คานมีความแข็งแรงสูงมาก อาจไม่ก่อให้เกิดผลดีต่อในแง่ของการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

## 3.5 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยย่อยที่ 3 นี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจุดต่อคาน-เสา 2 ตัวอย่าง มีขนาด และ รายละเอียดการเสริมเหล็กเช่นเดียวกับชิ้นทดสอบที่ 2 ในงานวิจัยย่อยที่ 2 โดยในตัวอย่างแรกนั้น ได้ทำการตัดแรงยึดหน่วงระหว่างเหล็กกับคอนกรีตออกไป เพื่อศึกษากลไกการวิบัติเนื่องจากแรงยึดหน่วง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การสูญเสียแรงยึดหน่วงอย่างสิ้นเชิงไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของจุดต่อคาน-เสามากนัก ชิ้นทดสอบรับกำลังได้น้อยกว่าเพียงเล็กน้อย แต่ การลดลงของกำลังรับน้ำหนักเป็นไปอย่างช้าๆมากกว่าชิ้นทดสอบที่ 2 ของงานวิจัยย่อยที่ 2 ในการทดลองพบว่า ความเสียหายเกิดขึ้นที่จุดต่อน้อยมาก แต่ ความเสียหายส่วนใหญ่จะกระจุกตัวอยู่ที่ปลายคานแทน ในชิ้นทดสอบที่ 2 นั้น ผู้วิจัยได้ทำการซ่อมแซมชิ้นทดสอบนี้ โดยสกัดคอนกรีตที่เสียหายที่ปลายคานออกไป แล้วซ่อมโดยการใช้เกราท์ประเภทไม่หดตัว แล้วพันรอบปลายคานด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (FRP) ผลการทดลองแสดให้เห็นว่า จุดต่อมีความเหนียวสูงขึ้นมาก แต่การวิบัติกลับไปเกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อแทน

# บทที่ 4
# การทดสอบจุดต่อพื้นอัดแรง-เสาขนาดย่อส่วน

## 4.1 ความเป็นมา

การก่อสร้างโดยใช้ระบบแผ่นพื้นไร้คานชนิดอัดแรงทีหลัง เป็นที่ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย โดยมักใช้สำหรับการก่อสร้างอาคารที่มีความสูงปานกลางจนถึงอาคารสูง เช่น อาคารที่จอดรถ อาคารที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงานและโรงพยาบาล การออกแบบแผ่นพื้นไร้คานชนิดอัดแรงทีหลังในประเทศไทยมักคิดเฉพาะแรงแนวดิ่งเท่านั้น ส่วนแรงลมมักออกแบบให้ผนังเฉือนรับแทน โดยการออกแบบไม่ได้คิดผลของแรงแผ่นดินไหวแต่อย่างใด

การออกแบบโดยไม่คิดผลของแผ่นดินไหวทำให้ได้รายละเอียดการเสริมเหล็กมีลักษณะดังนี้

1. ไม่มีการใส่เหล็กปลอกที่รอยต่อพื้น-เสา
2. มีการจัดเหล็กนอนที่ผิวล่างของแผ่นพื้น โดยปริมาณเหล็กนอนเป็นไปตามข้อกำหนดเรื่องการต้านทานผลของอุณหภูมิและการหดตัวของคอนกรีต
3. ไม่วางแนวลวดอัดแรงผ่านเสา เนื่องจากในการก่อสร้างจริงทำได้ลำบากมากเพราะมีเหล็กเสริมอยู่ในเสาเป็นจำนวนมาก แต่ตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI กำหนดให้ต้องมีการวางลวดอัดแรงผ่านเสาอย่างน้อย 2 เส้น

เมื่ออาคารได้รับแรงแผ่นดินไหว จุดต่อพื้น-เสา เป็นบริเวณที่มีการถ่ายแรงจำนวนมาก ซึ่งได้แก่ทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ซึ่งอาจทำให้เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนทะลุ (Punching shear) วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อพื้น-เสา ภายใต้แรงกระทำสลับทิศ โดยจุดต่อที่เลือกมานี้เป็นจุดต่อภายใน

## 4.2 ดัชนีทางโครงสร้างของอาคารแผ่นพื้นไร้คานชนิดอัดแรงทีหลัง

ชิ้นทดสอบจุดต่อควรจะมีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับอาคารจริงที่ได้มีการก่อสร้างในประเทศไทยให้มากที่สุด แต่เนื่องจากอาคารแต่ละอาคารมีความแตกต่างกันทั้งในด้านลักษณะทางโครงสร้าง และ สภาวะการใช้งาน ดังนั้นในขั้นตอนแรกของงานวิจัย จึงได้รวบรวมและศึกษาข้อมูลทางโครงสร้างของอาคารแผ่นพื้นไร้คานชนิดอัดแรงทีหลังในเขตกรุงเทพมหานครจำนวน 5 อาคาร มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 15-30 ชั้น ซึ่งจัดเป็นอาคารสูงปานกลาง จนถึงอาคารสูง และได้กำหนดดัชนีเชิงโครงสร้างของ เสา คาน และ จุดต่อพื้น-เสา เพื่อใช้แสดงพฤติกรรมและการวิบัติของโครงสร้างดังนี้ 1) อัตราส่วนแรงเฉือน $V_g / V_0$ 2) อัตราส่วนความยาวหน้าตัดวิกฤติต่อความลึก $b_0 / d$ , 3) อัตราส่วนความยาวด้าน $b_1 / b_2$ , 4) อัตราส่วนแรงเฉือนโน้มถ่วงต่อโมเมนต์โน้มถ่วง $e_r V_g / M_g$ , 5) อัตราส่วนการอัดแรง $f_{pc} / \sqrt{f_c}$ , 6) อัตราส่วนเหล็กเสริมต้านทานโมเมนต์ลบ $\rho_s$ , 7)อัตราส่วนโมเมนต์ $M_g / M_n$ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของดัชนีเชิงโครงสร้างเหล่านี้ซึ่งรวบรวมได้จากอาคาร 5 อาคารได้สรุปไว้ใน**ตารางที่ 4.1**

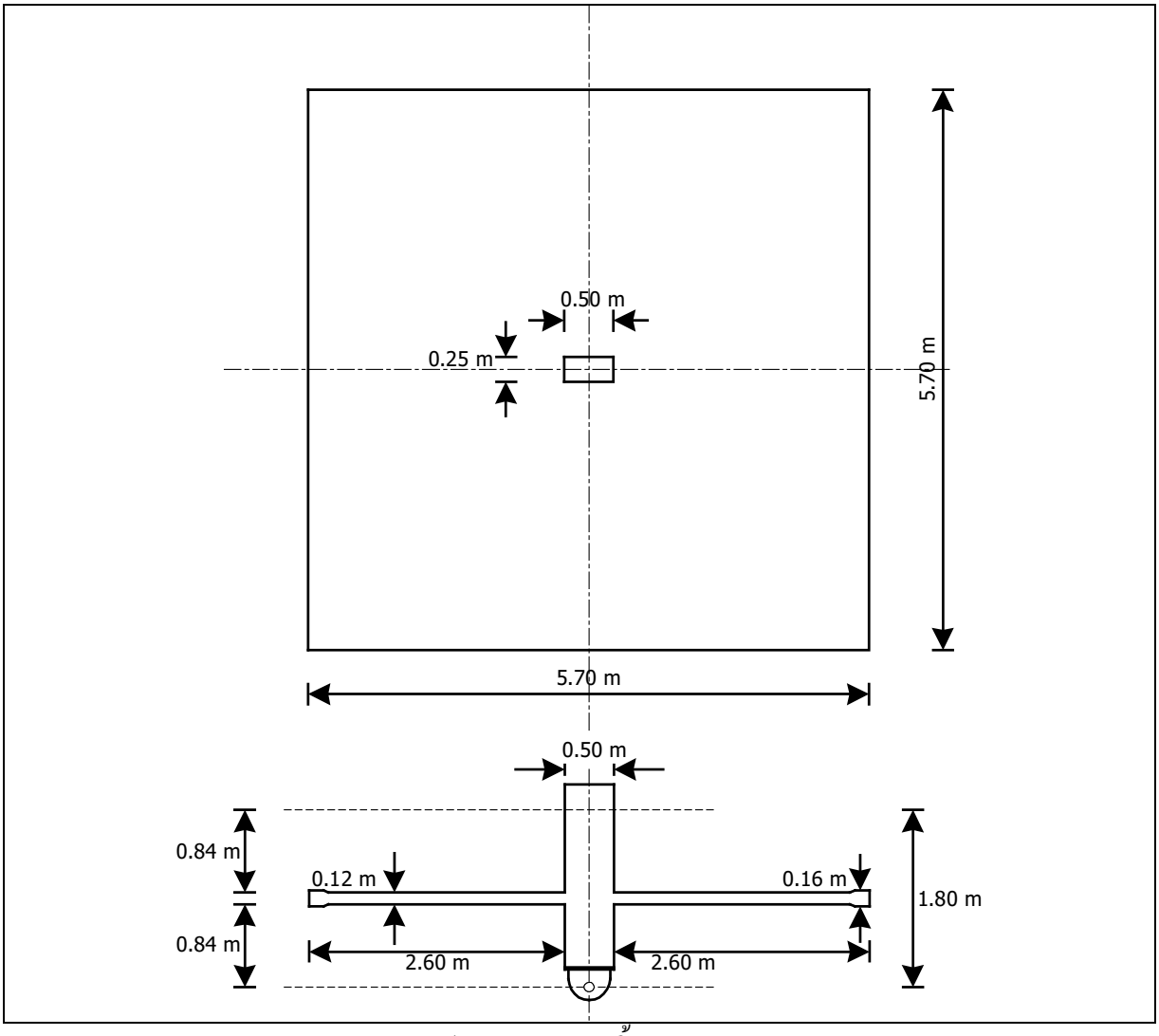
ตาราง 4.1 ค่าทางสถิติของดัชนีทางโครงสร้างของอาคาร

| ค่าทางสถิติ | $V_g / V_0$ | $b_0 / d$ | $b_1 / b_2$ | $e_r V_g / M_g$ | $f_{pc} / \sqrt{f_c}$ | $\rho_s$ | $M_g / M_n$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ค่าสูงสุด | 0.366 | 21.50 | 2.07 | 1.718 | 1.040 | 0.0143 | 0.159 |
| ค่าต่ำสุด | 0.231 | 18.29 | 1.30 | 1.210 | 0.837 | 0.0075 | 0.106 |
| ค่าเฉลี่ย | 0.289 | 19.31 | 1.65 | 1.505 | 0.918 | 0.0103 | 0.131 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.050 | 1.26 | 0.30 | 0.205 | 0.099 | 0.0027 | 0.023 |

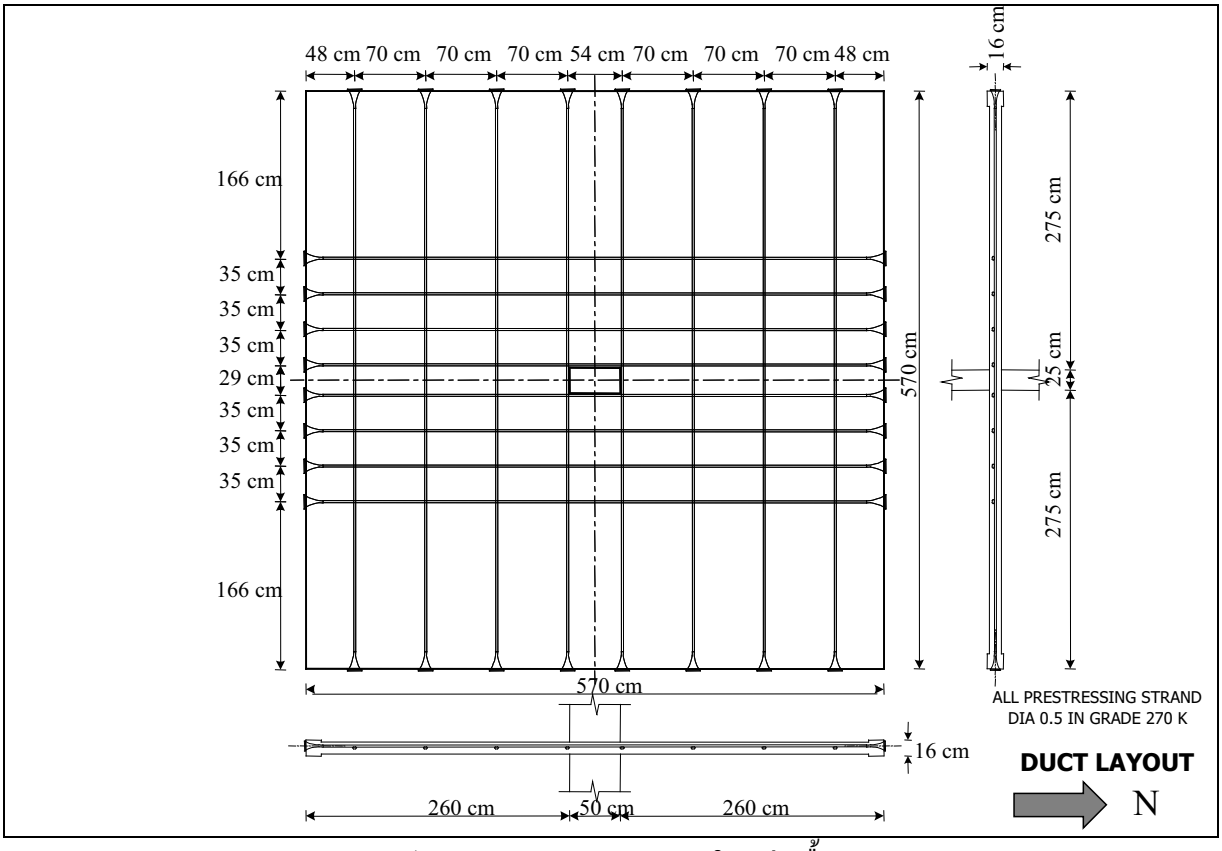
อาคารทั้ง 5 อาคารที่ได้รวบรวมนี้มีความยาวช่วงว่าง (Clear span) อยู่ระหว่าง 7.0-8.4 ม. อัตราส่วนแรงเฉือน $V_g / V_0$ เป็นดัชนีที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุ การศึกษาในอดีตได้แสดงให้เห็นว่าจุดต่อพื้น-เสาที่มีอัตราส่วน $V_g / V_0$ สูงมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุมาก

## 4.3 ชิ้นทดสอบ

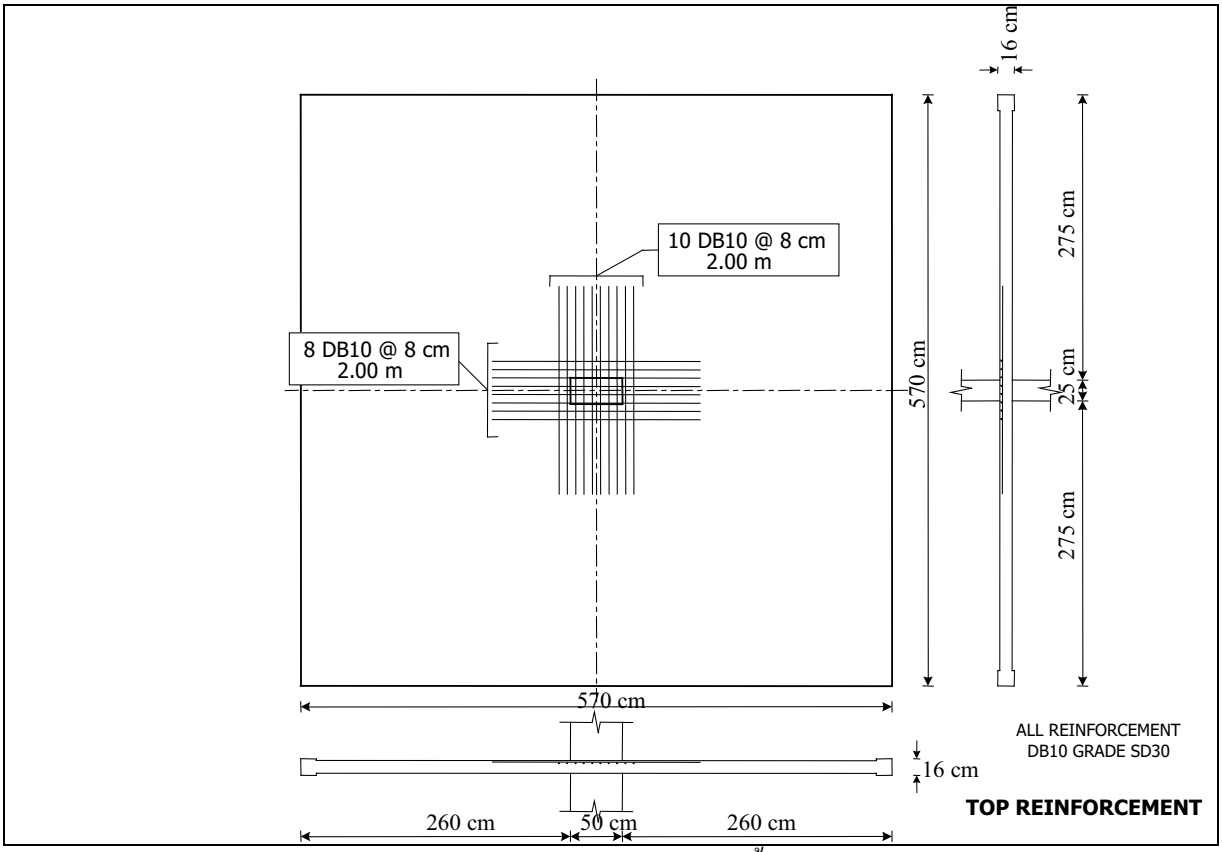
ชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นแบบจำลองจุดต่อพื้น-เสาภายในมีขนาด3/5เท่าของขนาดจริงดังแสดงใน รูป 4.1 แบบจำลองจุดต่อทดสอบมีส่วนที่เป็นแผ่นพื้นความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวจริงทั้งสองด้านของจุดต่อ และ เสาความยาวครึ่งหนึ่งของเสาจริงทางด้านบนและด้านล่าง โดยถือว่าตำแหน่งของจุดดัดกลับเกิดขึ้นที่กลางช่วงพื้นและกลางช่วงเสา การออกแบบจุดต่อจำลองสำหรับการทดสอบได้พยายามออกแบบให้มีค่าดัชนีทางโครงสร้างใกล้เคียงกับของโครงสร้างจริงมากที่สุดโดยมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวางลวดอัดแรงจะวางให้กระจุกตัวในแถบเสาในทิศทางด้านยาว และ วางกระจายตัวตลอดความกว้างพื้นในทิศทางขวาง ดังแสดงในรูป 4.2 นอกจากลวดอัดแรงยังวางเหล็กข้ออ้อยเป็นตะแกรงที่ผิวบนและผิวล่างของพื้นดังแสดงในรูป 4.3 และ 4.4 โดยเหล็กตะแกรงที่ผิวบนจะกระจุกตัวที่บริเวณรอยต่อเสา-พื้นเท่านั้น ส่วนเหล็กตะแกรงที่ผิวล่างวางตลอดความยาวและความกว้างของพื้น ส่วนสภาพขอบเขตของชิ้นทดสอบนั้น กำหนดให้ปลายด้านล่างของเสาเป็นแบบยึดหมุน ปลายด้านบนปล่อยอิสระโดยให้เป็นจุดที่ใช้ผลักชิ้นทดสอบในแนวราบ ขอบของแผ่นพื้นตามแนวขวางให้เป็นแบบยึดหมุน และ ขอบของแผ่นพื้นตามแนวยาวได้ปล่อยให้เป็นอิสระ



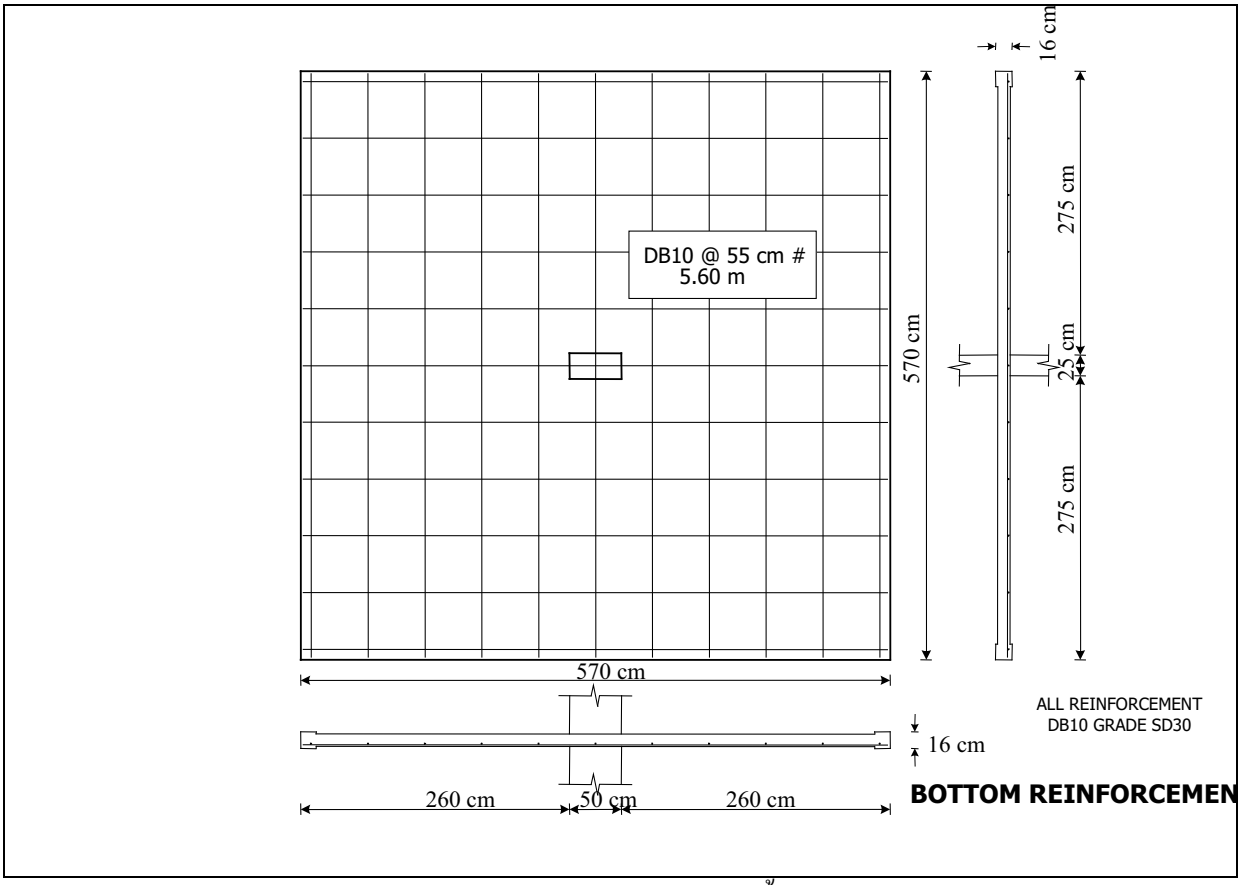

รูป 4.1 ขนาดของชิ้นทดสอบ




รูป 4.2 การจัดวางลวดอัดแรงในแผ่นพื้น




รูป 4.3 การวางเหล็กบนในพื้น



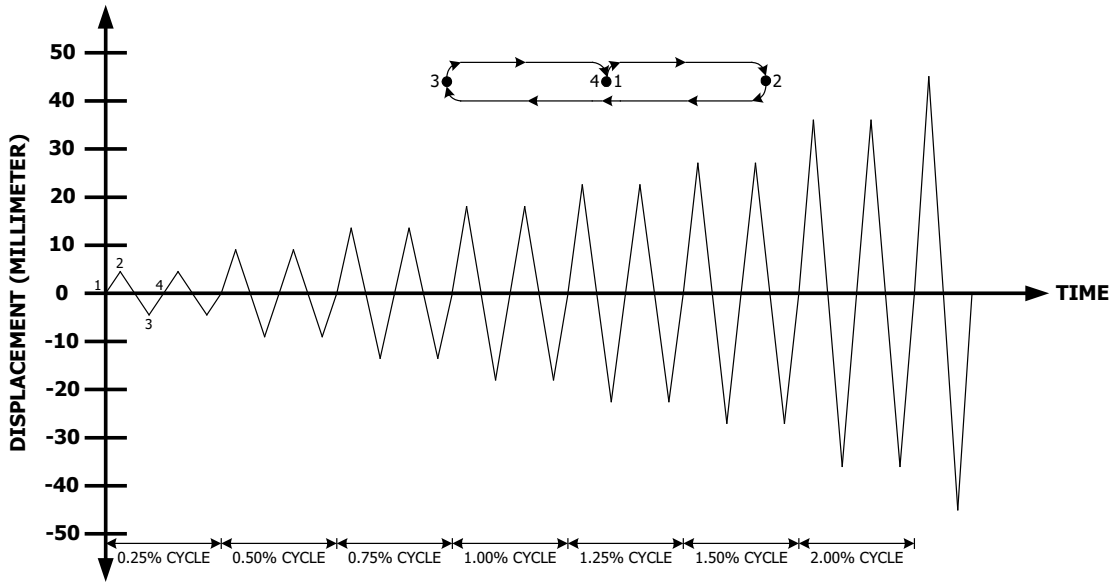

รูป 4.4 การวางเหล็กล่างในพื้น

## 4.4 การให้น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับชิ้นทดสอบประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งเพิ่มเติม และ แรงกระทำแนวราบแบบสลับทิศ โดยจะให้น้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งกระทำต่อแผ่นพื้นในขั้นตอนแรกเพื่อเป็นการจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกจร การให้น้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งนี้ทำได้โดย การใช้ถุงทรายวางบนแผ่นพื้น โดยตำแหน่งและจำนวนถุงทรายที่วางบนแผ่นพื้นได้มาจากการวิเคราะห์แบบจำลองจุดต่อโดยวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ในคอมพิวเตอร์ โดยพยายามให้มีอัตราส่วนแรงเฉือน $V_g / V_0$ ใกล้เคียงกับของโครงสร้างจริงให้มากที่สุด จากนั้นเป็นการให้แรงกระทำในแนวราบที่ปลายบนของเสา โดยใช้การผลักปลายบนของเสาไปข้างหน้าและย้อนกลับเป็นวงรอบ โดยมีระยะเคลื่อนตัวเป้าหมายในแต่ละรอบการเคลื่อนตัวเท่ากับ 4.50 มม., 9 มม., 13.50 มม., 18.00 มม., 22.50 มม., 27.00 มม., 36 มม., และ 45 มม. ซึ่งคิดเป็นระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธเท่ากับ 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, 1.50%, 2.00% และ 2.5% โดยทำการวนรอบ 2 รอบที่แต่ละระยะเคลื่อนตัวเป้าหมายเพื่อดูเสถียรภาพของรอบการเคลื่อนตัว รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกที่ได้อธิบายมานี้แสดงใน รูป 4.5 เพื่อให้เกิดความเข้าใจตรงกัน จึงกำหนดให้ทิศทางการให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ และให้ทิศทางขวางอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก

## 4.5 ข้อมูลที่ทำการวัดและบันทึก

ข้อมูลที่ทำการวัดและบันทึกในระหว่างการทดสอบได้แก่ แรงกระทำแนวราบ การเคลื่อนตัวแนวราบที่ปลายด้านบนของเสา การเคลื่อนตัวและการบิดของแผ่นพื้น มุมหมุนของจุดต่อพื้น-เสา การเปลี่ยนรูปเฉือน ความโค้งของแผ่นพื้น ความเครียดรอบๆเสา ความเครียดในเหล็กข้ออ้อย และ ลวดอัดแรง การติดตั้งชิ้นทดสอบ อุปกรณ์วัด และหัวผลักไฮโดรลิกส์ (Hydraulic actuator) สำหรับให้แรงผลักแสดงดังในรูป 4.6-4.7 หัวผลักไฮโดรลิกส์ติดตั้งอยู่บนผนังปฏิกริยาซึ่งยึดติดแน่นอยู่กับพื้น โดยผนังปฏิกริยาที่ใช้เป็นตัวยันกับหัวผลักไฮโดรลิกส์นี้สามารถออกแรงต้านในแนวราบได้ไม่น้อยกว่า 50 ตัน




รูป 4.5 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกแก่ชิ้นทดสอบ

## 4.6 ผลการทดลอง

พัฒนาการเกิดรอยร้าวที่สังเกตได้ที่ผิวบนของแผ่นพื้นรอบๆเสาแสดงใน รูป 4.8-4.24 รอยร้าวแรกๆที่สังเกตได้คือรอยร้าวตามแนวยาวขนานกับทิศทางการเคลื่อนตัวของเสาโดยเกิดขึ้นที่ข้างเสาทั้งสองด้านที่ระดับการเคลื่อนตัว 0.25% (รูป 4.9) รอยร้าวตามยาวนี้มีสาเหตุมาจากการยึดรั้งของสภาวะขอบเขตของแผ่นพื้นซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ในทิศทางขวาง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นรอยร้าวในแนวขวางที่หน้าเสาซึ่งเกิดจากโมเมนต์ตามแนวยาวของแผ่นพื้น โดยรอยร้าวตามแนวขวางเกิดขึ้นที่แผ่นพื้นด้านตรงข้ามกับทิศที่ปลายเสาเคลื่อนที่ ที่ระดับการเคลื่อนตัว 0.50% (รูป 4.11) รอยร้าวทแยงเริ่มปรากฏขึ้น โดยเริ่มเกิดขึ้นที่หน้าเสาและเคลื่อนที่ในแนวทแยงเข้าหาแนวศูนย์กลางของแผ่นพื้น รอยร้าวทแยงนี้มีสาเหตุมาจากแรงบิดที่เกิดขึ้นในแถบพื้นตามแนวขวางที่ติดกับเสา ในการทดลองสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าว่าการหมุนของแถบแผ่นพื้นตามแนวเหนือ-ใต้มีค่าไม่เท่ากัน โดยแผ่นพื้นที่อยู่ติดกับเสามีการหมุนตัวมากสุด จากผลการหมุนตัวที่ไม่เท่า

กันของแผ่นพื้นทำให้แถบแผ่นพื้นทางขวาง (แนวตะวันตก-ตะวันออก) เกิดการบิดตัว และทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผิวบนของแถบพื้นทางขวาง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร้าวเอียงที่ด้านบนของแผ่นพื้น

เมื่อผลักเสาให้เคลื่อนที่ต่อไป รอยร้าวตามแนวขวางมีขนาดโตขึ้น รอยร้าวทแยงมีขนาดและจำนวนเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งที่ระดับการเคลื่อนตัว +2.5% แผ่นพื้นเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใดเนื่องจากแรงเฉือนเจาะทะลุ (Punching shear) จึงหยุดทำการทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบและระยะเคลื่อนตัวแนวราบแสดงดังในรูป 4.26 จากกราฟจะสังเกตได้ว่า ชิ้นทดสอบมีพฤติกรรมยืดหยุ่นเมื่อระยะเคลื่อนตัวแนวราบมีค่าอยู่ในช่วง $\pm$0.25% ที่ระดับการเคลื่อนตัว 0.5% กำลังและความเกร็งของชิ้นทดสอบในรอบที่ 2 ของการเคลื่อนที่มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของรอยร้าวเมื่อมีการวนรอบ เส้นโค้งวนรอบมีลักษณะแคบและมีพื้นที่ภายในน้อย แสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบสามารถสลายพลังงานได้น้อย แรงแนวราบสูงสุดที่ชิ้นทดสอบต้านทานได้มีค่าประมาณ 10.5 ตัน ที่ระดับการเคลื่อนตัว 2.0%

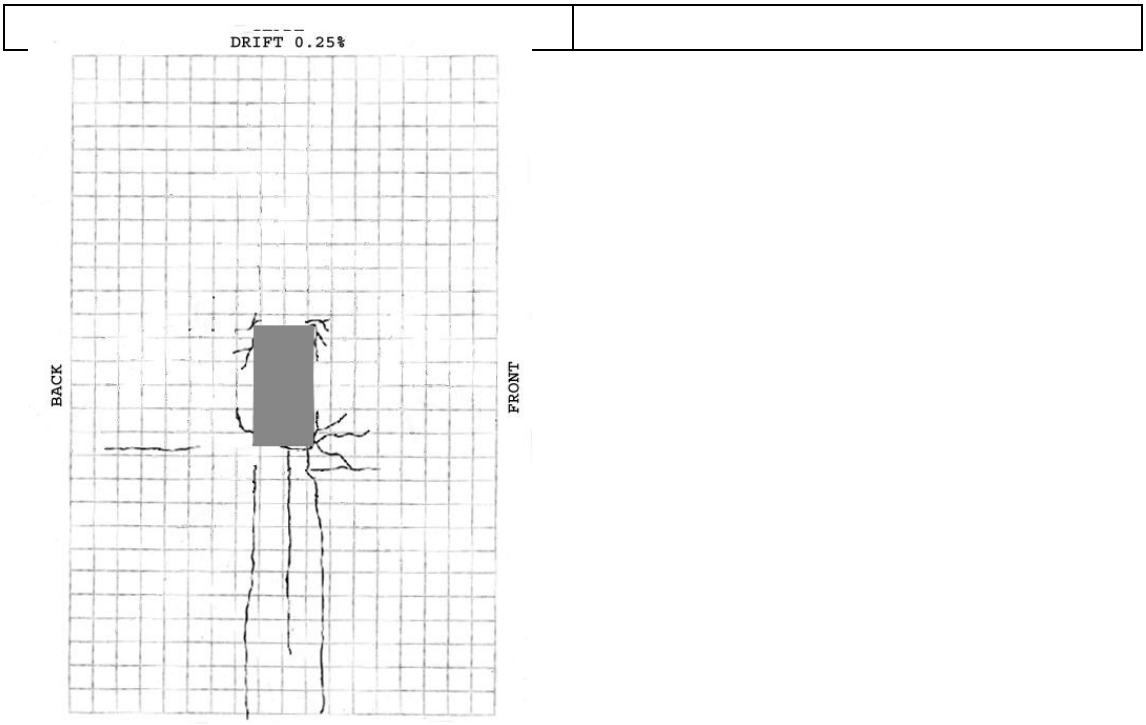
อัตราส่วนความเหนียว โดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวตอนวิบัติต่อระยะเคลื่อนตัวตอนที่เหล็กเสริมเริ่มคราก แต่ชิ้นทดสอบนี้ไม่แสดงจุดครากชัดเจน จึงได้กำหนดจุดคราก โดยลากเส้นตรงจากจุดกำเนิดผ่านกราฟแรง-ระยะเคลื่อนตัวที่ 75% ของแรงสูงสุด ไปตัดเส้นตรงราบที่ค่าแรงสูงสุด โดยกำหนดให้ค่าระยะเคลื่อนตัว ณ จุดตัดนี้เป็นระยะเคลื่อนตัวที่จุดคราก (ดู**รูป 4.27**) หากใช้นิยามตามนี้จะคำนวณอัตราส่วนความเหนียวได้เท่ากับ 1.75

จากการศึกษาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และการหมุนของแผ่นพื้นพบว่ามุมหมุนของเสามีค่าใกล้เคียงกับมุมหมุนของแผ่นพื้น แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวที่ปลายบนของเสามีผลมาจากการหมุนของแผ่นพื้นเป็นส่วนใหญ่ จากข้อมูลความเครียดของเหล็กเสริมข้ออ้อยและลวดอัดแรงพบว่า ที่ระดับการเคลื่อนตัว 2% เหล็กที่อยู่ด้านบนของแผ่นพื้นส่วนใหญ่เข้าสู่จุดคราก การเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนทะลุเกือบจะทันทีที่เหล็กบนครากแสดงให้เห็นว่า การครากของเหล็กบนอาจมีผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนทะลุลดลงซึ่งนำไปสู่การวิบัติแบบฉับพลัน

รูป 4.26 และ 4.27 แสดงการกระจายความเครียดของเหล็กบนในแนวเหนือ-ใต้ จะสังเกตได้ว่าความเครียดมีค่าสูงสุดในเหล็กบนซึ่งอยู่บริเวณเสา และ ลดลงไปในเหล็กบนซึ่งอยู่ห่างจากเสาออกไป จากรูป 5.38 จะสังเกตได้ว่าความเครียดในเหล็กบนเป็นแบบความเครียดอัดที่ด้านหนึ่งของพื้นและความเครียดดึงที่ปลายอีกด้านหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าการหมุนของเสาจะงัดแผ่นพื้นขึ้นมาทางด้านหนึ่งและกดแผ่นพื้นอีกด้านหนึ่งลง แต่ขนาดความเครียดของเหล็กแต่ละด้านไม่เท่ากัน โดยความเครียดของเหล็กที่รับแรงดึงมีค่าสูงกว่าความเครียดของเหล็กที่รับแรงอัด ซึ่งเป็นเพราะในด้านที่รับแรงอัดคอนกรีตช่วยรับแรงอัดได้ส่วนหนึ่ง รูป 4.28 และ 4.29 แสดงการกระจายความเครียดของลวดอัดแรงในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งสังเกตได้ว่าความเครียดมีค่าสูงสุดในเหล็กบนที่อยู่บริเวณเสา และความเครียดในลวดอัดแรงมีค่าเพิ่มขึ้นได้มากถึง 10% การคำนวณโมเมนต์สูงสุดที่ถ่ายระหว่างเสาและพื้น โดยใช้สมการตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI ได้ค่าเท่ากับ 18.06 ตัน-เมตร เทียบกับโมเมนต์ที่จากการทดสอบซึ่งได้เท่ากับ 20 ตัน-เมตร แสดงให้เห็นว่าสมการการออกแบบของ ACI ให้ค่าที่ปลอดภัย

## 4.7 สรุปผลการทดลอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจุดต่อแผ่นพื้นไร้คาน-เสาขนาด 60% ของขนาดจริง โดยจุดต่อดังกล่าวจำลองรอยต่อระหว่างเสาและแผ่นพื้นในอาคารแผ่นพื้นไร้คานชนิดอัดแรงทีหลัง การออกแบบชิ้นทดสอบได้พยายามให้ใกล้เคียงกับอาคารจริงให้มากที่สุด โดยได้ทำการรวบรวมแบบโครงสร้าง แบบสถาปัตย์ ของอาคารจำนวน 5 อาคาร และได้นิยามดัชนีเชิงโครงสร้างของอาคารเหล่านี้ เพื่อใช้เป็นตัวชี้พฤติกรรมทางโครงสร้างและการวิบัติ ชิ้นทดสอบได้รับการออกแบบให้มีดัชนีเชิงโครงสร้างใกล้เคียงกับอาคารจริงมากที่สุด การทดสอบจุดต่อพื้น-เสาใช้แรงแนวราบกระทำที่ปลายบนของเสาในทิศทางไปกลับครบรอบ โดยเพิ่มระยะเคลื่อนตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ในทุก 2 รอบ การให้น้ำหนักบรรทุกเป็นการจำลองน้ำหนักบรรทุกจากแรงแผ่นดินไหว ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จุดต่อเกิดการวิบัติแบบฉับพลันเนื่องจากแรงเฉือนทะลุที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ 2% ซึ่งเป็นจุดที่เหล็กบนเกิดการคราก็เป็นส่วนใหญ่ ภายหลังจากเกิดแรงเฉือนทะลุแล้ว จุดต่อเกิดการวิบัติและสูญเสียกำลังรับแรงทางข้างอย่างรวดเร็ว
2. การเปลี่ยนรูป รอยร้าว และ ความเสียหายเกิดขึ้นรอบๆ เสาเป็นส่วนใหญ่
3. เสามีการเปลี่ยนรูปน้อยมาก โดยการหมุนของเสามีค่าใกล้เคียงกับการหมุนของแผ่นพื้น
4. ตามมาตรฐานเรื่องรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นและเสาของคณะกรรมการ ACI ชุดที่ 352 ได้กำหนดให้ระยะเคลื่อนตัวสูงสุดของจุดต่อมีค่าไม่เกิน 1.5% แต่ชิ้นทดสอบในการทดลองนี้สามารถต้านทานน้ำหนักได้จนระยะเคลื่อนตัวมีค่า 2.0%

รูป 4.7 ภาพถ่ายการเตรียมชิ้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ