

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการรับแรงกระทำแบบวิถัจกรของจุดต่อภายในของโครงสร้างคอนกรีตเสริมซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง แบ่งเป็นตัวอย่างจุดต่อแบบหล่อในที่ 2 ตัวอย่างและตัวอย่างจุดต่อระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูป 2 ตัวอย่าง โดยมีผลการทดสอบดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติวัสดุ

##### 4.1.1 คอนกรีต

ในคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยมีอยู่หลายส่วนเนื่องจากตัวอย่างขึ้นส่วนสำเร็จรูปประกอบไปด้วยขึ้นส่วนหลายชิ้นส่วน ฉะนั้นคอนกรีตที่ใช้เทหล่อตัวอย่างจึงประกอบด้วยคอนกรีตหลายชุด โดยกำลังของคอนกรีตในตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 เนื่องจากต้องการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนคือ แบบหล่อในที่และแบบขึ้นส่วนสำเร็จรูป ในตัวอย่างแบบหล่อในที่นั้นการเทคอนกรีตจะเทเป็นเนื้อเดียวกันทั้งตัวอย่าง ฉะนั้นกำลังของคอนกรีตจึงเท่ากันทั้งตัวอย่าง แต่ในส่วน of ตัวอย่างแบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นคอนกรีตที่ใช้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือคอนกรีตที่ใช้เทขึ้นส่วนเสา คอนกรีตที่ใช้เทขึ้นส่วนคาน และคอนกรีตที่ใช้เทบริเวณจุดต่อคาน-เสา

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในตัวอย่างแบบหล่อในที่

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังอัดประลัย (MPa)
M1	44.03
M2	44.03

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของตัวอย่างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป

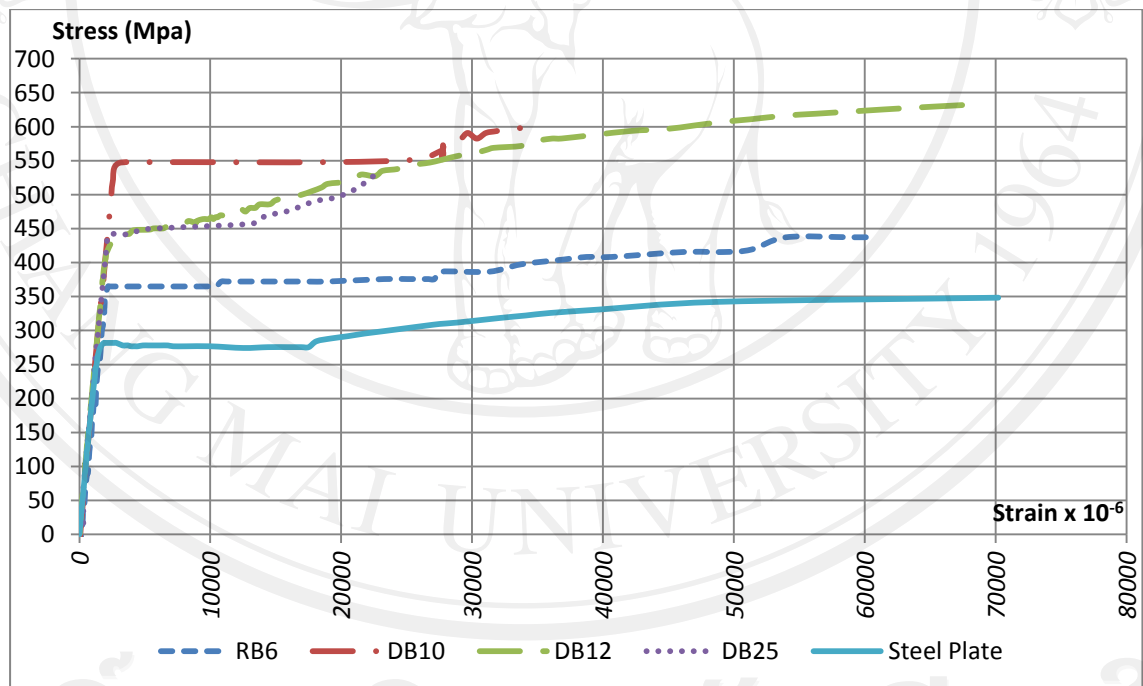
ตัวอย่างทดสอบ	ชิ้นส่วนของโครงสร้าง	กำลังอัดประลัย (MPa)
P1	คาน	43.00
	เสา	45.38
	จุดต่อ	57.34
P2	คาน	43.00
	เสา	45.38
	จุดต่อ	46.11

#### 4.1.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเหล็กทั้งหมด 4 ขนาด คือ เหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มม. (DB10) เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มม. (DB12) เหล็กข้ออ้อยขนาด 25 มม. (DB25) และเหล็กกลมขนาด 6 มม. โดยเหล็กข้ออ้อยใช้สำหรับเป็นเหล็กเสริมตามยาว ส่วนเหล็กกลมนั้นใช้สำหรับเหล็กเหล็กรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอก โดยข้ออ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในเกรดชนิดที่มีกำลังครากไม่น้อยกว่า 4,000 กก/ซม<sup>2</sup> (392 MPa) และเหล็กกลมอยู่ในเกรดที่มีกำลังครากไม่น้อยกว่า 2,400 กก/ซม<sup>2</sup> (236 MPa) และในส่วนของเหล็กแผ่นที่นำมาประกอบเป็นเหล็กหน้าตัวรูปตัว T นั้นอยู่ในเกรด A36 โดยมีกำลังครากไม่น้อยกว่า 2500 กก/ซม<sup>2</sup> (245MPa) ซึ่งเกรดเหล็กที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงเกรดของเหล็กที่ระบุในตลาดสำหรับกำลังของเหล็กจริงที่ใช้ในการทดสอบนั้นได้จากการดึงเหล็กเพื่อหาค่าหน่วยแรงดึงคราก ( $f_y$ ) และหน่วยแรงดึงประลัย ( $f_u$ ) ผลจากการทดสอบดึงเหล็กได้ค่ากำลังรับแรงดึงเหล็กดังตารางที่ 4.3 และจากการทดสอบได้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษา

	พื้นที่หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	แรงดึงคราก (kN)	หน่วยแรงดึง คราก (MPa)	แรงดึงประลัย (kN)	หน่วยแรงดึง ประลัย (MPa)
RB6	0.29	10.57	364.7	15.72	542.1
DB10	0.75	40.98	546.5	57.69	769.2
DB12	1.13	47.20	417.7	64.65	572.2
DB25	4.88	216.28	443.2	334.91	686.3
Steel plate	2.36	66.67	282.5	90.84	384.9



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึง (stress) กับความเครียด (strain) ของเหล็กเสริม

#### 4.2 พัฒนาการของการเกิดรอยร้าวและการวิบัติ

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายของพัฒนาการของรอยร้าวที่เกิดเนื่องจากการให้แรงกระทำด้านข้างแก่ตัวอย่างรวมถึงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ สำหรับรูปที่แสดงพัฒนาการของรอยร้าวที่ drift ratio ต่างๆในตัวอย่างทดสอบขนาดของกริดที่ติดตั้งในรูปนั้นมีขนาดของช่องแต่ละด้านกว้างด้านละ 5 เซนติเมตร และรอยร้าวที่เป็นเส้นจุดประเกิดขึ้นเมื่อผลักตัวอย่างไปในทิศทางและรอยร้าวที่เป็นเส้นทึบเกิดเมื่อผลักตัวอย่างไปในทิศลบ

##### 1. ตัวอย่าง M1

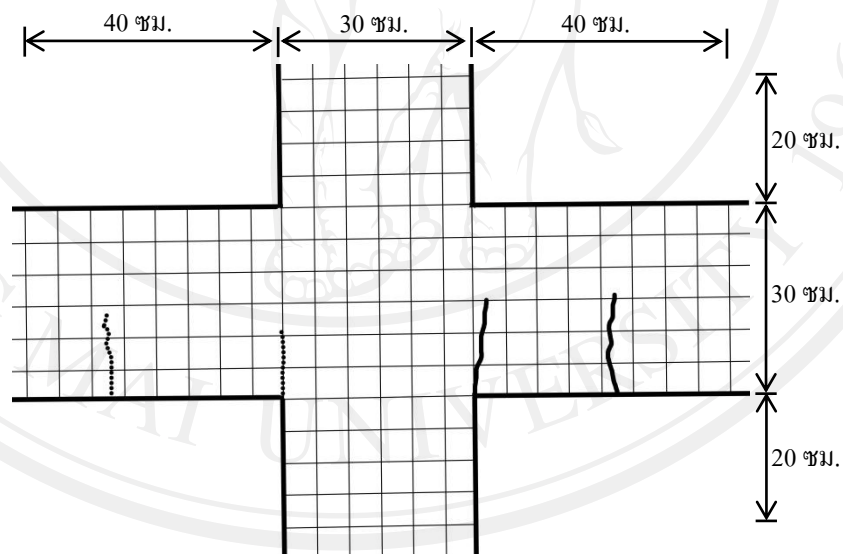
พัฒนาการของรอยร้าวสามารถดูได้จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถดูทิศทางได้จากรูปที่ 3.27 ในส่วนของลักษณะการวิบัติของตัวอย่างนี้เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดัด โดยจุดที่วิบัติคือบริเวณหน้าเสาซึ่งเป็นจุดที่เสียหายมากที่สุดเมื่อดูจากรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 พัฒนาการของรอยร้าวของตัวอย่าง M1

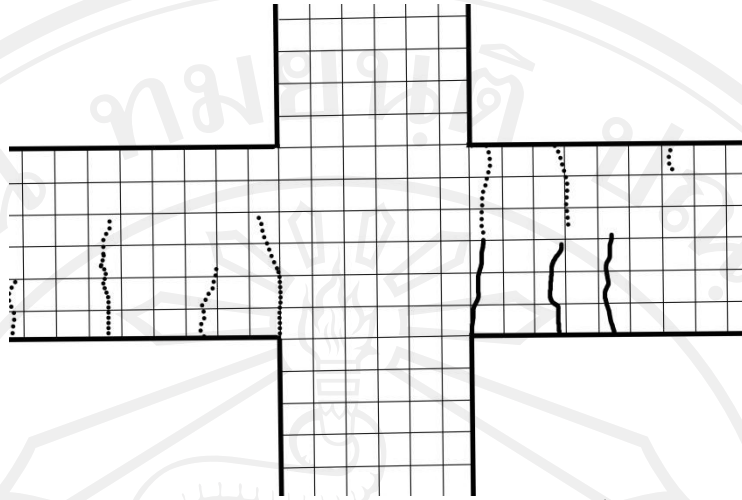
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
0.15	เกิดรอยร้าวแนวตั้งเนื่องจากแรงดัดบริเวณท้องคานและหน้าเสาเล็กน้อย
0.20	เกิดรอยร้าวที่ท้องคานเพิ่มเติมและเกิดรอยร้าวที่หลังคานซึ่งรอยร้าวได้เข้ามาเชื่อมกัน
0.25	เกิดรอยร้าวแนวตั้งเพิ่มเติมเล็กน้อยที่ท้องคานและหลังคาน
0.35	รอยร้าวเกิดต่อจากรอยร้าวเดิมเล็กน้อย
0.50	เกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อเมื่อผลักตัวอย่างในทิศทางบวก และเกิดรอยร้าวบริเวณมุมของจุดต่อซึ่งเป็นรูปแบบของการถลอกบริเวณจุดต่อ รวมถึงเกิดรอยร้าวเนื่องแรงดัดที่คานเพิ่มมากขึ้นจนเชื่อมต่อกันในหลายจุด
0.75	เกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อเพิ่มมากขึ้นรวมถึงรอยร้าวเดิมมีความยาวมากขึ้น และรอยร้าวในแนวนอนบริเวณมุมของจุดต่อมีความยาวมากขึ้น
1.00	รอยร้าวเดิมเปิดอ้าเมื่อทำการโยกตัวอย่าง จึงเกิดรอยร้าวเพิ่มเพียงเล็กน้อย
1.40	เกิดเช่นเดียวกับระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นก่อนหน้านี้นี้ โดยความกว้างของรอยร้าวที่อ้าออกเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง M1

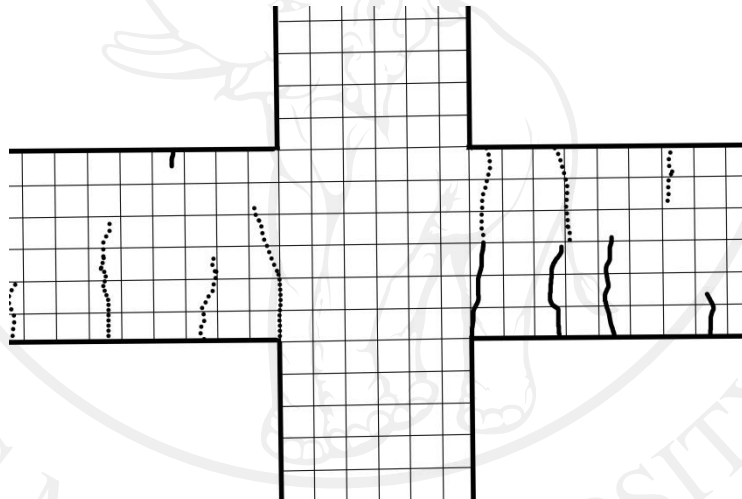
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
2.00	เริ่มเกิดรอยร้าวในแนวราบบริเวณปลายคาน และรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อมีความยาวมากขึ้น
2.50	เกิดรอยร้าวในแนวราบบริเวณคานเพิ่มเติมซึ่งเป็นลักษณะของการรูดไถลของเหล็กเสริมภายในคาน
3.50	เกิดรอยร้าวเพิ่มหนาแน่นบริเวณปลายคานโดยเป็นรอยร้าวเอียงที่เกิดจากผลของแรงเฉือนที่กระทำต่อคาน
4.00	คอนกรีตบริเวณหน้าเสาด้านล่างเกิดการหลุดออกเนื่องจากความเสียหายอย่างมากและเกิดการกะเทาะออก (spalling) เนื่องจากการบดอัดกันของคอนกรีตบริเวณรอยร้าว



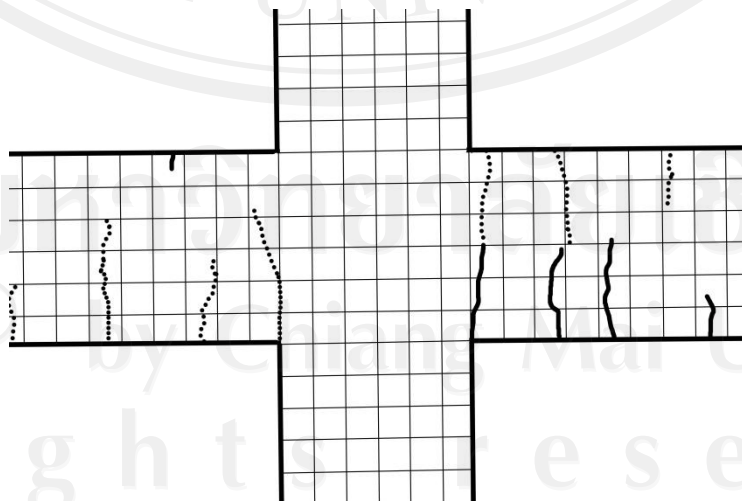
(ก) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.15 %



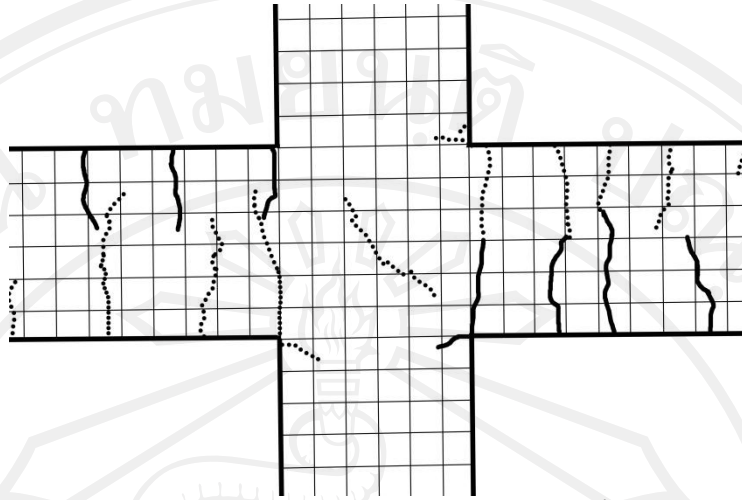
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.20 %



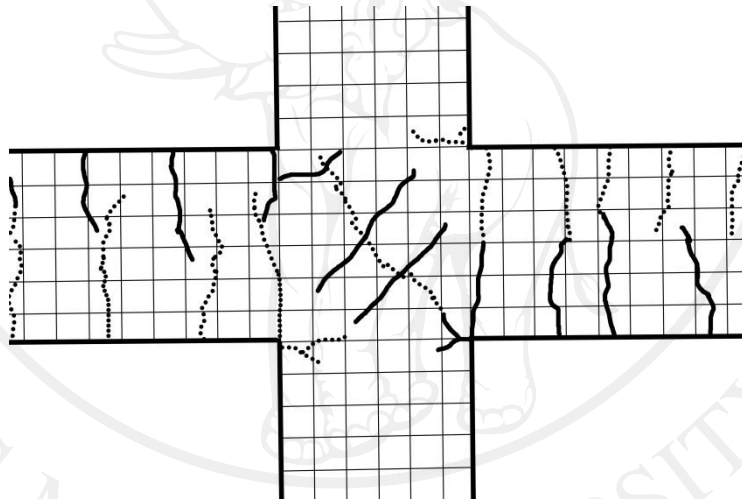
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.25 %



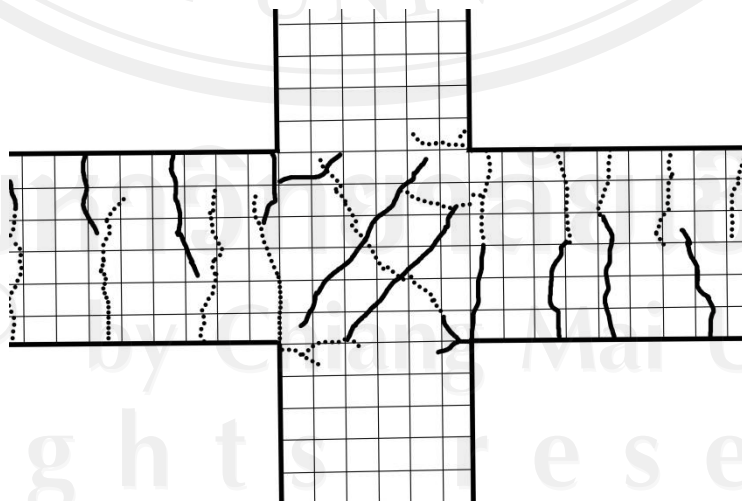
(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.35 %



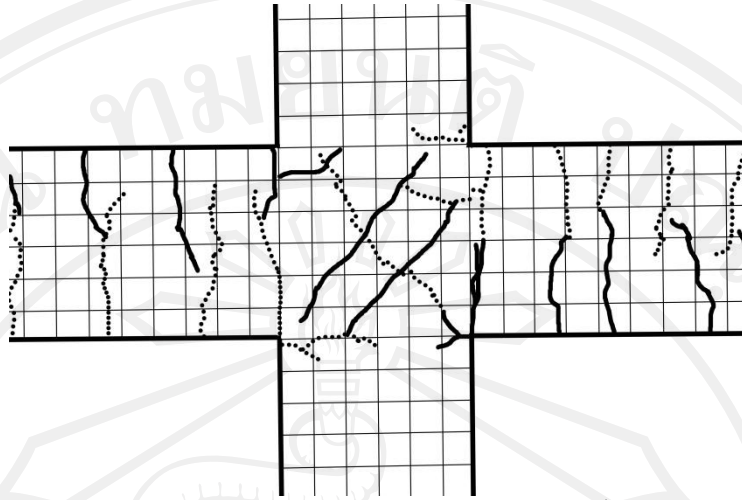
(จ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.50 %



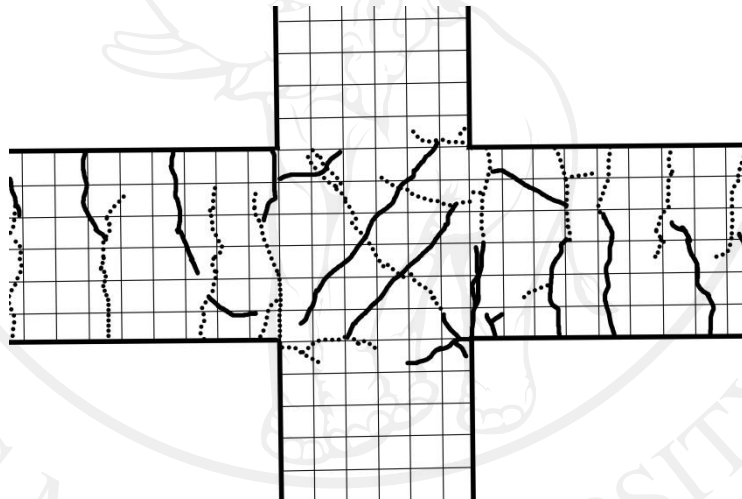
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.75 %



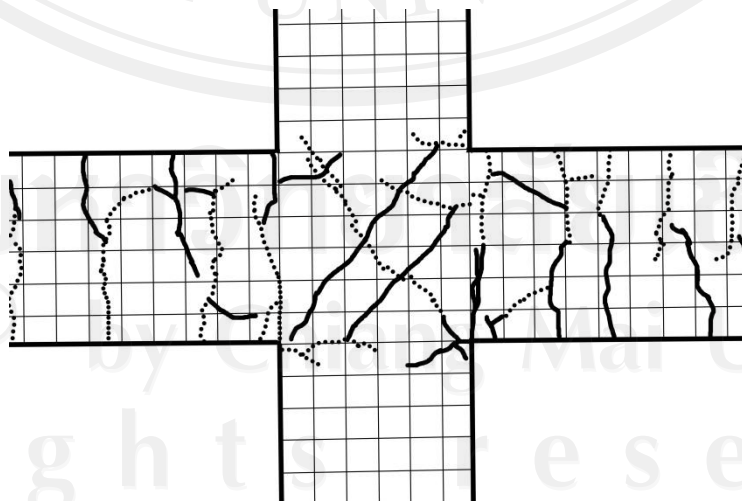
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.00 %



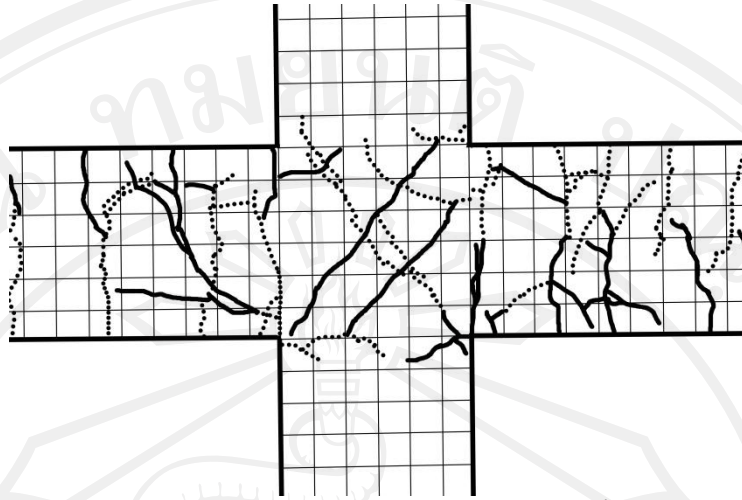
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 %



(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 %



(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.50 %

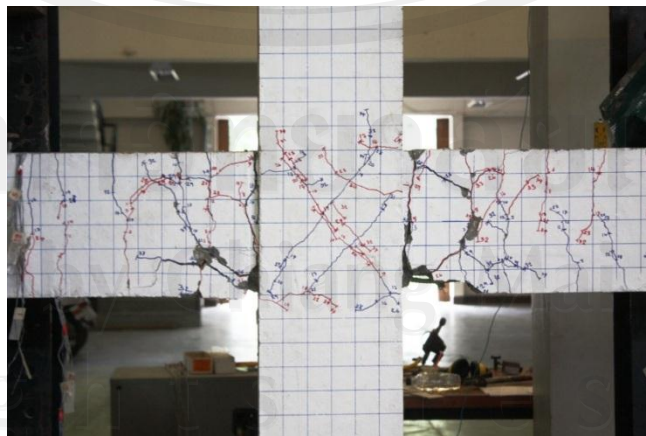


(ก) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 3.50 %



(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 4.00 %

รูปที่ 4.2 การพัฒนาของรอยร้าวในตัวอย่าง M1



รูปที่ 4.3 การวิบัติของตัวอย่าง M1

## 2. ตัวอย่าง M2

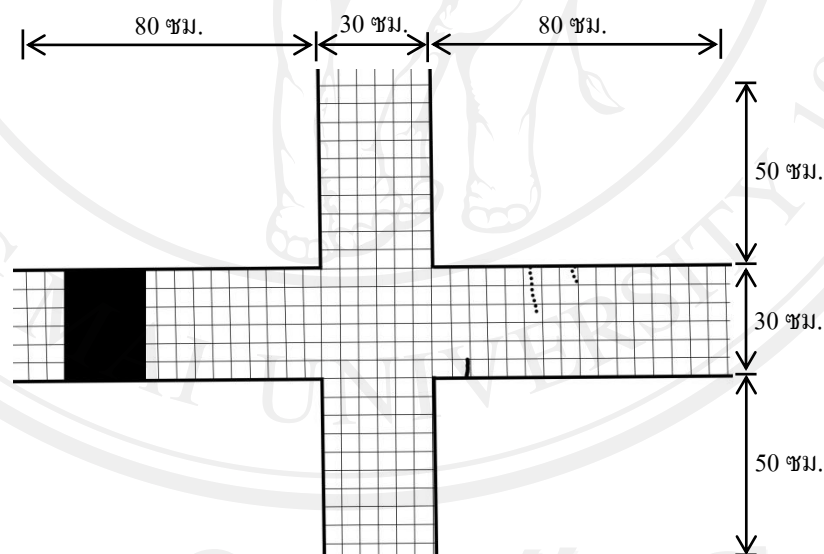
พัฒนาการของรอยร้าวดูได้จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 ในส่วนของลักษณะการวิบัติของตัวอย่างนี้จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเกิดจุดหมุนพลาสติกที่บริเวณคานโดยจุดดังกล่าวคอนกรีตเกิดการหลุดออกเป็นรูปลิ้มเนื่องจากแรงค้ำและแรงเฉือนกระทำร่วมกันแบบซ้ำ อีกทั้งจุดดังกล่าวเป็นจุดที่สิ้นสุดระยะการเสริมเหล็กเสริมระดับกลางทำให้เป็นจุดที่อ่อนแอส่งผลให้จุดที่เกิดการเสียหายเกิดขึ้นที่จุดดังกล่าวซึ่งตรงตามเป้าหมายที่ต้องการขยับจุดหมุนพลาสติกให้เกิดห่างออกจากบริเวณหน้าเสา

ตารางที่ 4.5 พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง M2

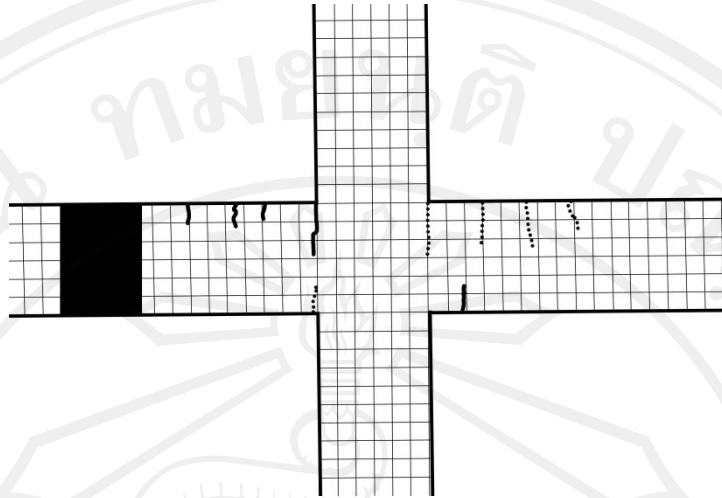
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
0.15	เกิดรอยร้าวในแนวตั้งเล็กน้อยเนื่องจากแรงค้ำบริเวณคาน
0.20	เกิดรอยร้าวที่หน้าเสาเนื่องจากแรงค้ำ และเกิดรอยร้าวเพิ่มบริเวณหลังคานเป็นส่วนใหญ่
0.25	แนวโน้มการเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมยังคงเหมือนกับระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นก่อนหน้า
0.35	เกิดรอยร้าวแนวตั้งเพิ่มขึ้นจำนวนมากทั้งส่วนของท้องคานและหลังคาน โดยสาเหตุเนื่องจากแรงค้ำที่เพิ่มขึ้นบริเวณคาน
0.50	เกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อเนื่องแรงเฉือนภายในจุดต่อ และรอยร้าวเดิมมีความยาวมากขึ้น
0.75	รอยร้าวบริเวณจุดต่อเกิดเพิ่มมากขึ้นและยังเกิดรอยร้าวในแนวราบที่มุมของบริเวณจุดต่อ ในส่วนของรอยร้าวใหม่เนื่องจากแรงค้ำในคานก็เกิดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน
1.00	บริเวณจุดต่อเกิดรอยร้าวทั้งแนวทแยงและแนวราบที่มุมเพิ่มมากขึ้น และในส่วนของคานยังคงเกิดรอยร้าวแนวตั้งรอยใหม่เพิ่มเติม
1.40	เกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณเสาเนื่องจากแรงค้ำ และบริเวณจุดต่อยังคงเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมในรูปแบบเดียวกับระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นก่อนหน้า
2.00	แนวโน้มการเกิดรอยร้าวยังคงเหมือนกับระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นก่อนหน้านี้ เพียงแต่รอยร้าวที่เสาไม่เกิดเพิ่มเติม

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง M2

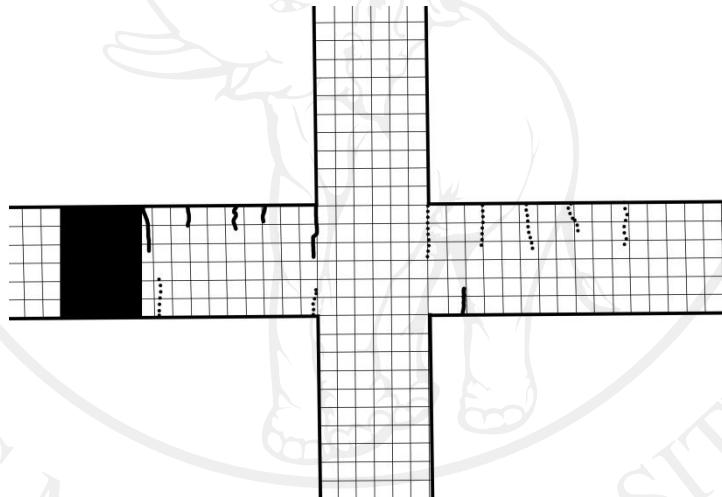
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
2.50	รอยร้าวที่เกิดขึ้นส่วนมากเกิดที่บริเวณคาน โดยจะเห็นว่าคอนกรีตเริ่มแตกออกเป็นชิ้นละเอียดบริเวณที่สิ้นสุดระยะเสริมเหล็กเสริมระดับกลาง และที่เสายังเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดเพิ่มเติม
3.50	คอนกรีตที่คานด้านซ้ายหลุดออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมเห็นเหล็กเสริมอย่างชัดเจน โดยเป็นผลจากการให้แรงแบบสลับทิศทางซ้ำๆ เสมือนแรงแผ่นดินไหว โดยจุดที่เสียหายนี้เป็นจุดที่สิ้นสุดระยะเสริมเหล็กเสริมระดับกลาง
4.00	การหลุดออกของคอนกรีตเกิดเพิ่มเติมที่จุดเดิมและที่คานด้านขวา คอนกรีตก็เกิดการหลุดออกเช่นกันจนสามารถเห็นเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเกิดจุดที่เสียหายหนักส่งผลให้รอยร้าวในจุดอื่นไม่เกิดเพิ่มเติม



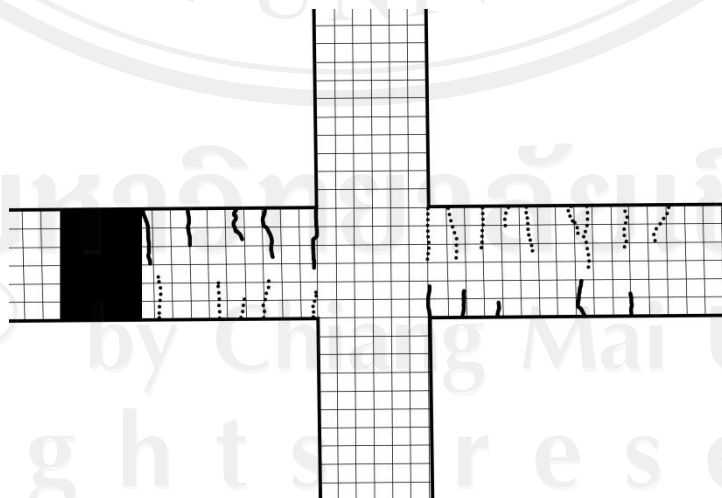
(ก) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.15 %



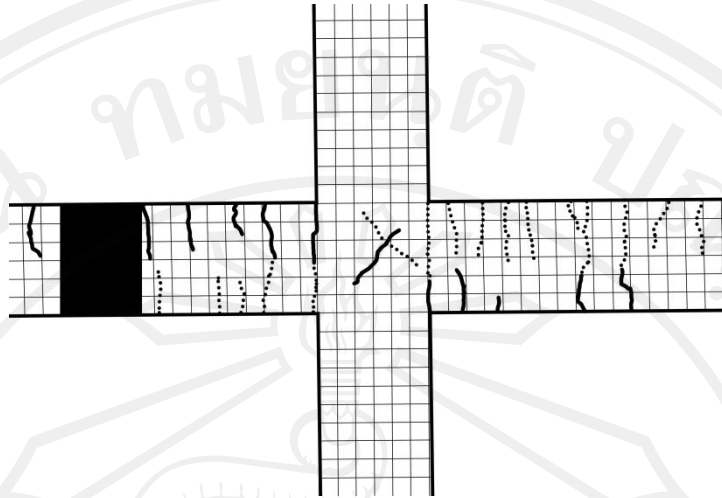
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมผัสระหว่างชั้น 0.20 %



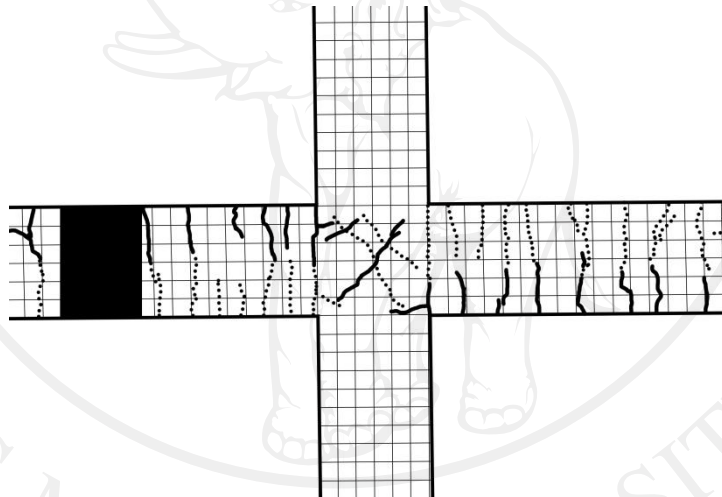
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมผัสระหว่างชั้น 0.25 %



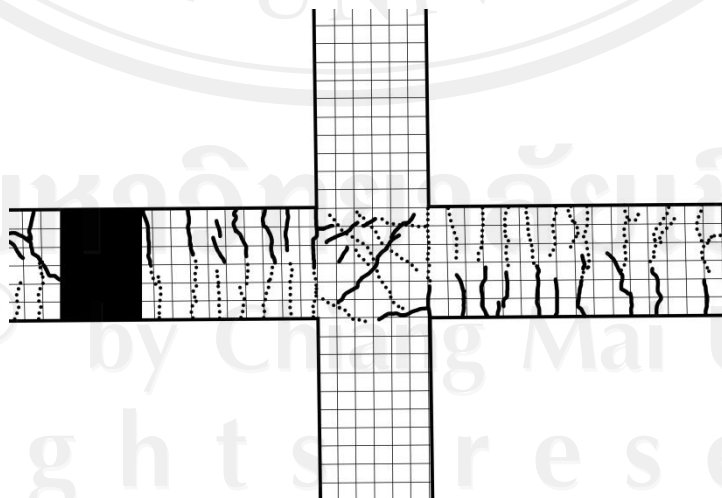
(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมผัสระหว่างชั้น 0.35 %



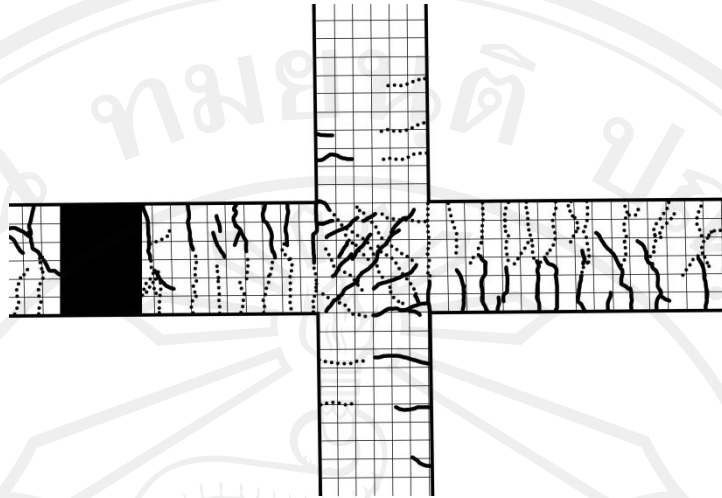
(จ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมผัสระหว่างชั้น 0.50 %



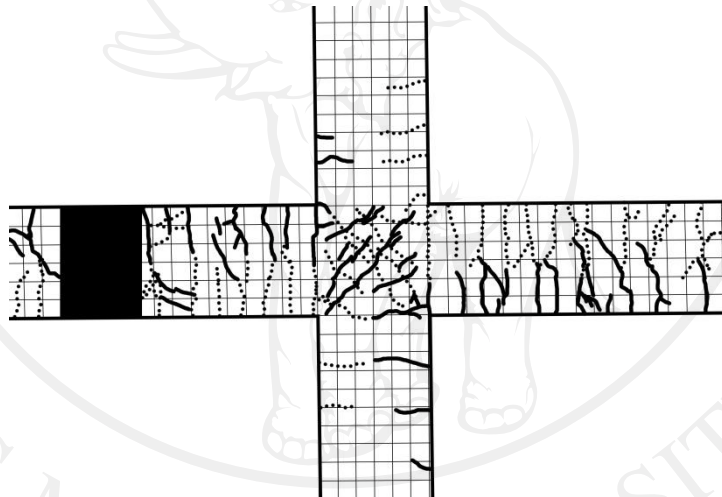
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมผัสระหว่างชั้น 0.75 %



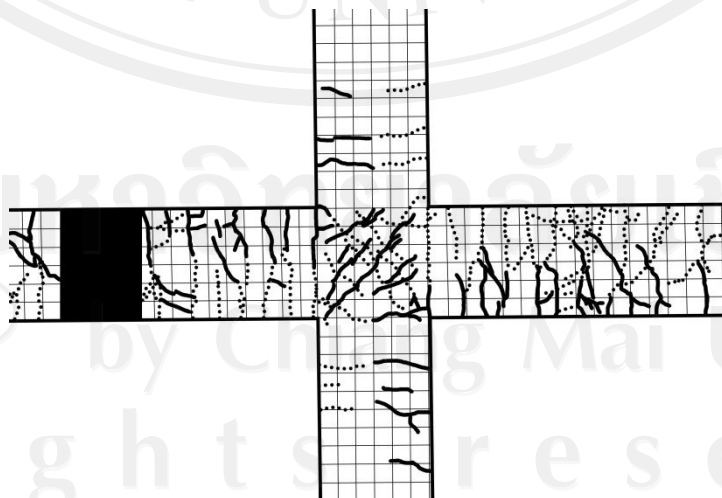
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมผัสระหว่างชั้น 1.00 %



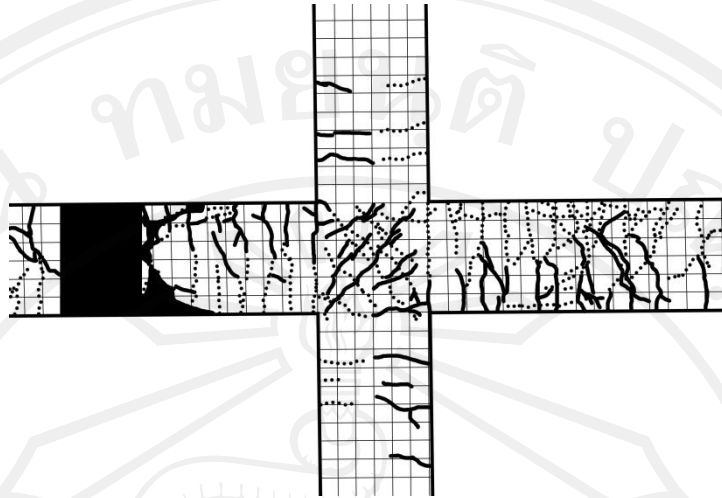
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 %



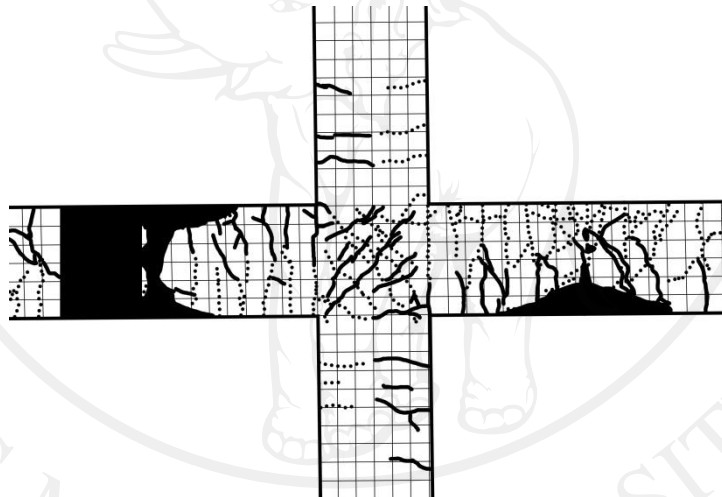
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 %



(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.50 %

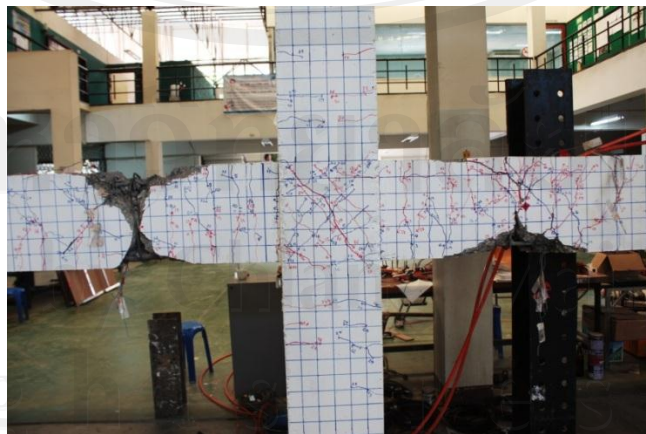


(ก) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 3.50 %



(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 4.00 %

รูปที่ 4.4 การพัฒนาของรอยร้าวในตัวอย่าง M2



รูปที่ 4.5 การวิบัติของตัวอย่าง M2

## 3. ตัวอย่าง P1

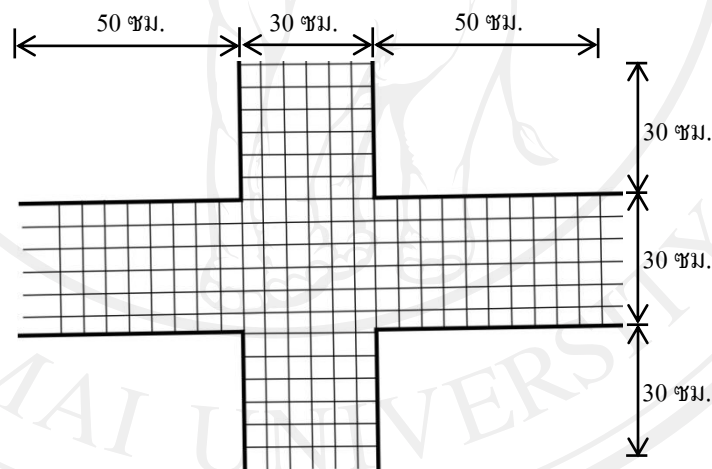
พัฒนาการของรอยร้าวของตัวอย่างนี้สามารถดูได้จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 ใน ส่วนของรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างนี้ดูได้จากรูปที่ 4.7 โดยจะเห็นว่าเป็นการกระทำระหว่างแรงเฉือนและการรูดไถลของเหล็กเสริมที่หลังคานที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการวิบัติ จะเห็นว่ารอยร้าวที่หลังคานซึ่งเป็นรอยร้าวแนวราบและเป็นตำแหน่งที่วางเหล็กเสริมตามยาวของคานมีการเปิดอ้าออกเมื่อ โยคตัวอย่างให้มีระยะเคลื่อนที่มาก

ตารางที่ 4.6 พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง P1

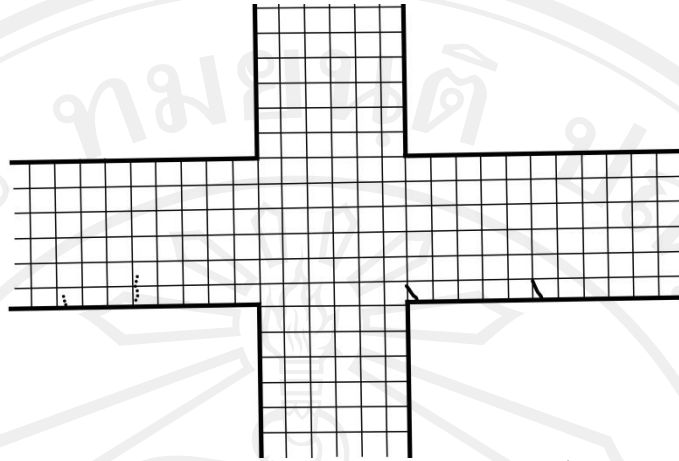
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
0.15	ไม่เกิดรอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้
0.20	เกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่ท้องคาน โดยเป็นรอยร้าวในแนวตั้ง
0.25	เกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อในทิศลบของการเคลื่อนที่
0.35	เกิดรอยร้าวในแนวทแยงเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อ โดยเกิดในทิศบวกของการเคลื่อนที่ และเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมบริเวณคานเล็กน้อย โดยเป็นรอยร้าวในแนวตั้ง
0.50	ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยรอยร้าวเกิดกระจายตัวออกไปทั้งบริเวณคานที่เกิดรอยร้าวแนวทแยงเพิ่มเล็กน้อย และเกิดรอยร้าวแนวตั้งกระจายตัวในคานทั้งท้องคานและหลังคาน
0.75	รอยร้าวที่เกิดขึ้นส่วนมากเกิดที่บริเวณจุดต่อ โดยเป็นรอยร้าวในแนวทแยง และที่หน้าเสาเกิดรอยร้าวต่อจากรอยร้าวเดิมแต่มีลักษณะเอียงเพิ่มมากขึ้น โดยมีสาเหตุจากแรงเฉือนที่กระทำต่อคาน
1.00	ที่ระยะเคลื่อนที่นี้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นมาก โดยเกิดเพิ่มขึ้นทั้งรอยร้าวแนวทแยงที่จุดต่อและรอยร้าวในแนวตั้งที่คาน
1.40	ที่ระยะเคลื่อนที่นี้ยังเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อ และสิ่งที่เกิดขึ้นครั้งแรกคือรอยร้าวแนวราบที่เริ่มเกิดที่หลังคานซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าเริ่มเกิดการรูดไถลของเหล็กเสริมภายในคาน

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง P1

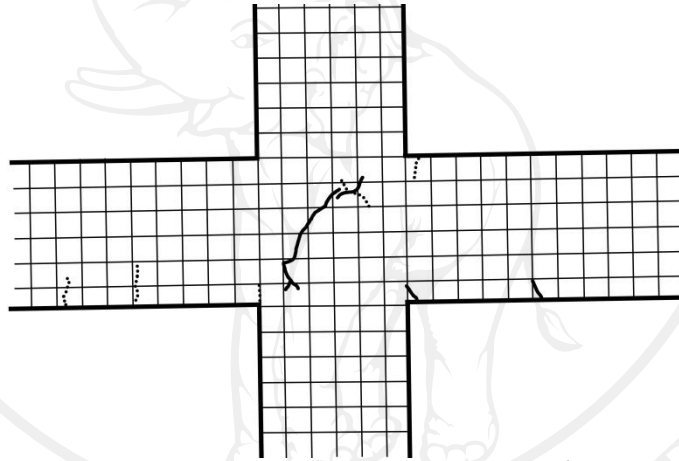
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
2.00	แนวโน้มของรอยร้าวที่เกิดในระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้นั้นเหมือนกับก่อนหน้านี้โดยมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้นทั้งรอยร้าวแนวราบที่เกิดเพิ่มอย่างมากที่บริเวณหลังคานรวมถึงรอยร้าวแนวเอียงที่เกิดในคานเนื่องจากแรงเฉือน แต่บริเวณจุดต่อไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มเติม
2.50	ที่ระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้นั้นไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมแต่สิ่งที่เกิดขึ้นคือการเปิดอ้าออกของรอยร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งตำแหน่งที่รอยร้าวเปิดอ้าออกมากคือรอยร้าวแนวราบที่หลังคานทั้งสองด้านเมื่อให้แรงกระทำแบบสลับทิศและเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการบดอัดกันของคอนกรีต



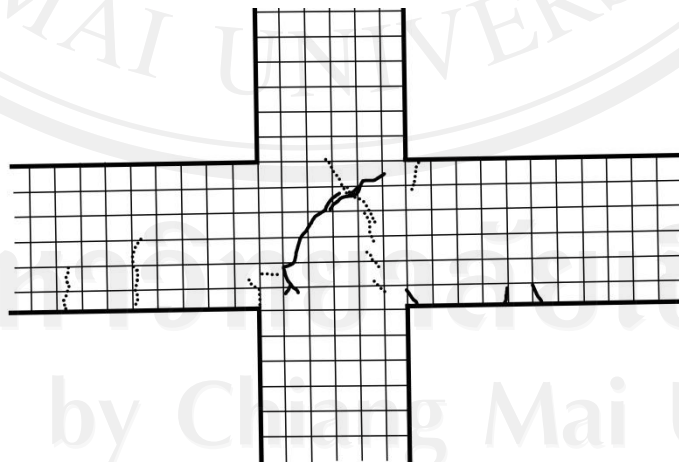
(ก) รอยร้าวที่ระหว่างการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.15 %



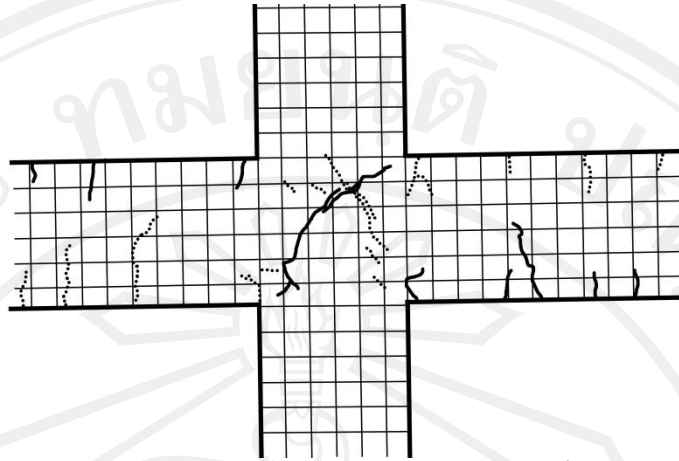
(จ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.20 %



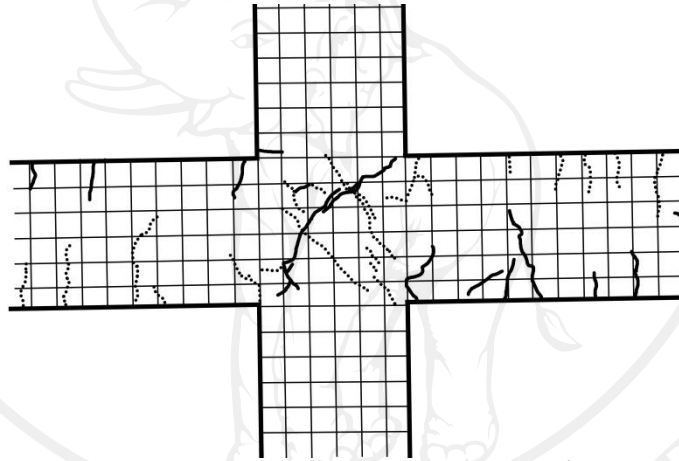
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.25 %



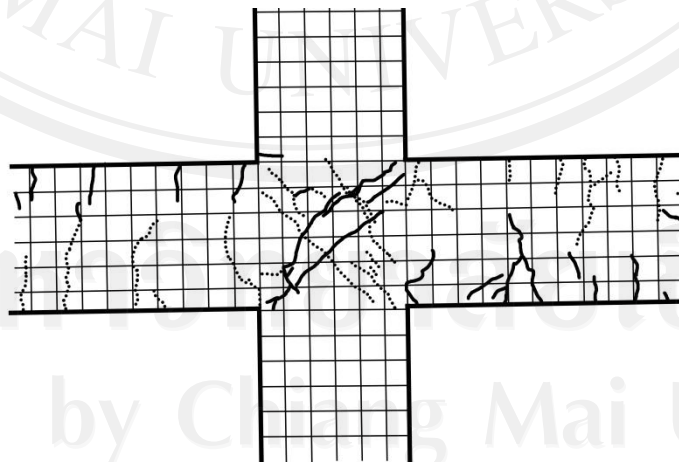
(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.35 %



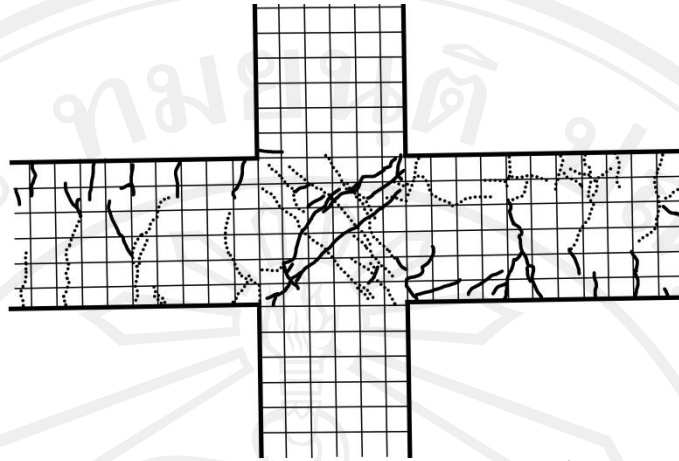
(จ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.50 %



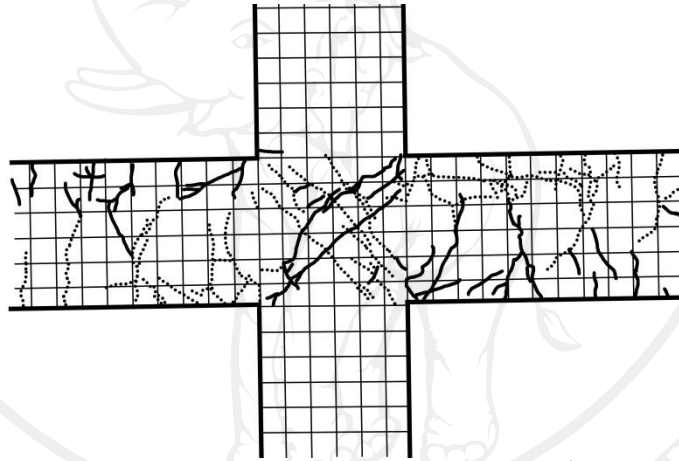
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.75 %



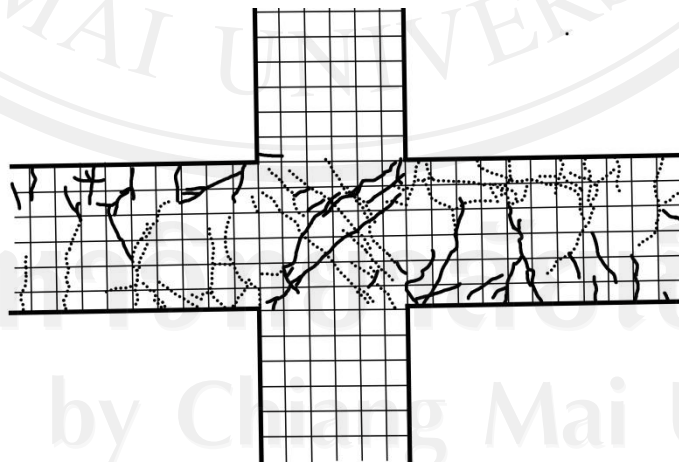
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.00 %



(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 %

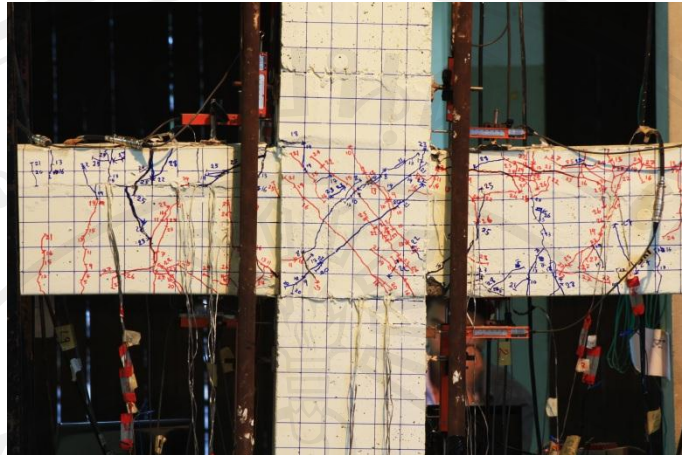


(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 %



(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.50 %

รูปที่ 4.6 การพัฒนาของรอยร้าวในตัวอย่าง P1



รูปที่ 4.7 การวัดการบิดของตัวอย่าง P1

#### 4. ตัวอย่าง P2

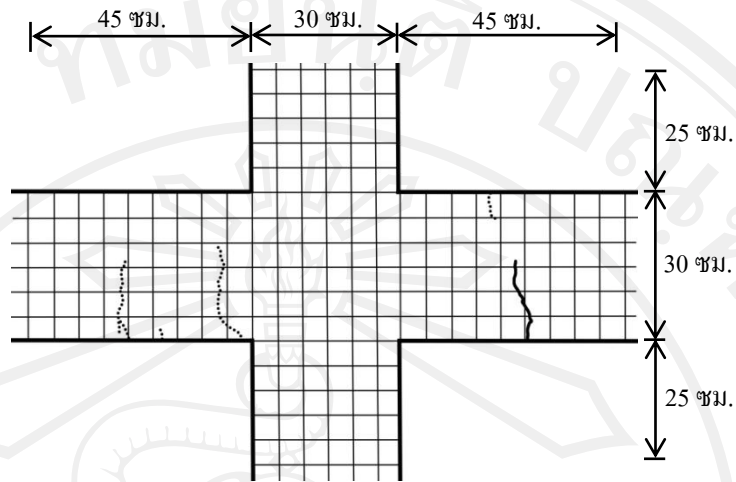
พัฒนาการของรอยร้าวของตัวอย่างนี้ดูได้จากตารางที่ 4.7 ในส่วนของลักษณะการวัดการบิดของตัวอย่างนี้นั้นจะเห็นว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นจุดที่เสียหายอย่างหนักคือที่บริเวณปลายคานแต่ไม่ใช่ที่หน้าเสาซึ่งจะเห็นลักษณะของรอยร้าวว่าเป็นการวัดการบิดที่เกิดผสมกันระหว่างแรงเฉือนแรงคัต รวมถึงการรูดไถลของเหล็กเสริมด้วย และสิ่งที่ตรงกับเป้าหมายของการทดสอบคือการเกิดจุดหมุนพลาสติกห่างจากหน้าเสาออกมาถึงแม้ว่าลักษณะความเสียหายจะไม่แสดงอย่างชัดเจนถึงรูปแบบของจุดหมุนพลาสติกดังเช่นตัวอย่าง M2 แต่ก็สามารถป้องกันบริเวณหน้าเสาไม่ให้เกิดการวัดการบิดได้

ตารางที่ 4.7 พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง P2

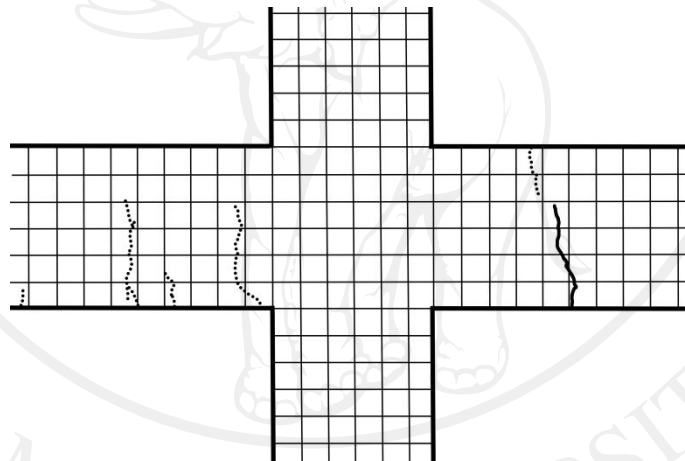
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
0.15	รอยร้าวที่เกิดขึ้นเกิดที่บริเวณคาน โดยเป็นรอยร้าวในแนวตั้งเนื่องจากแรงคัต ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นส่วนมากเกิดที่ท้องคานทั้งสองด้าน
0.20	รอยร้าวที่เกิดขึ้นเกิดต่อจากรอยร้าวเดิมที่เกิดก่อนหน้านี้
0.25	เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมที่ท้องคานแต่ไม่เกิดที่หน้าเสาเลย
0.35	เริ่มเกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อโดยเกิดเฉพาะในการโยกตัวอย่างเคลื่อนที่ไปในทิศทางกเท่านั้น และยังเกิดรอยร้าวแนวตั้งที่คานซึ่งเกิดทั้งส่วนของท้องคานและหลังคาน
0.50	เกิดรอยร้าวในแนวทแยงเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อและเกิดรอยร้าวที่คานเพิ่มอีกเล็กน้อย

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) พัฒนาการของรอยร้าวในตัวอย่าง P2

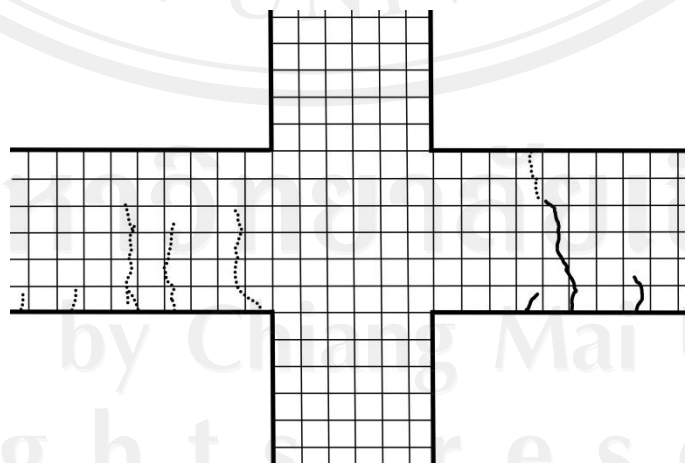
Drift ratio (%)	พัฒนาการของรอยร้าว
0.75	เกิดรอยร้าวที่มุมของจุดต่อและที่ท้องคานด้านซ้ายเริ่มเกิดรอยร้าวแนวเอียงที่เป็นผลจากแรงเฉือนที่กระทำ และยังคงเกิดรอยร้าวแนวตั้งเพิ่มเติมที่หลังคาน
1.00	เริ่มเกิดรอยร้าวที่บ่งบอกถึงการรูดไถลของเหล็กเสริมที่หลังคานด้านขวาที่เป็นลักษณะของรอยร้าวแนวราบ และที่บริเวณจุดต่อเกิดรอยร้าวแนวทแยงเพิ่มเติม บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างเสาและจุดต่อนั้นเกิดรอยร้าวแนวราบที่มีสาเหตุจากแรงค้ำ
1.40	เกิดรอยร้าวกระจายตัวทั้งบริเวณจุดต่อและคาน โดยที่จุดต่อเกิดรอยร้าวแนวทแยงเพิ่มและที่บริเวณคานนั้นรอยร้าวที่เกิดเป็นรอยร้าวแนวเอียงที่เป็นผลจากแรงเฉือนที่กระทำต่อคานซึ่งรอยร้าวเริ่มเกิดถี่มากขึ้นซึ่งมีผลของความเสียหายอื่นร่วมด้วยเช่นการอัดแตกของคอนกรีต การรูดไถลของเหล็กเสริมภายใน
2.00	ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้รอยร้าวที่เกิดกระจุกตัวอยู่บริเวณคานที่ห่างจากหน้าเสาออกมาซึ่งรอยร้าวที่เกิดทั้งแนวราบและแนวเอียงแสดงให้เห็นจุดที่มีความเสียหายอย่างมากคือบริเวณคานซึ่งห่างจากหน้าเสาออกมา
2.50	รอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้นั้นเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากการเปิดอัดออกของรอยร้าวเดิม และยังพบการบดอัดกันของคอนกรีตบริเวณรอยร้าวจนแตกละเอียด



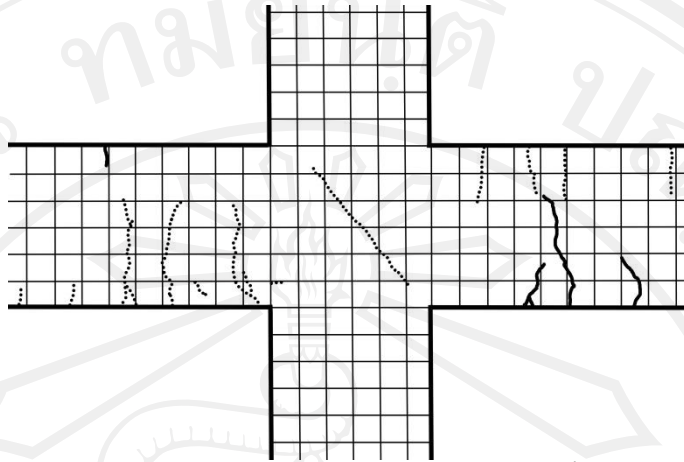
(ก) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.15 %



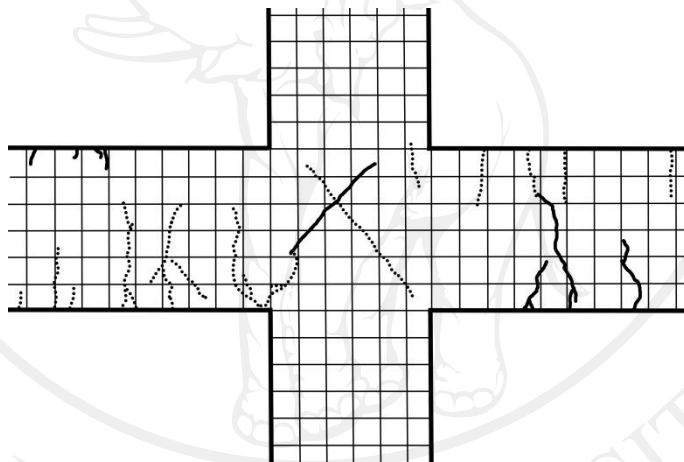
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.20 %



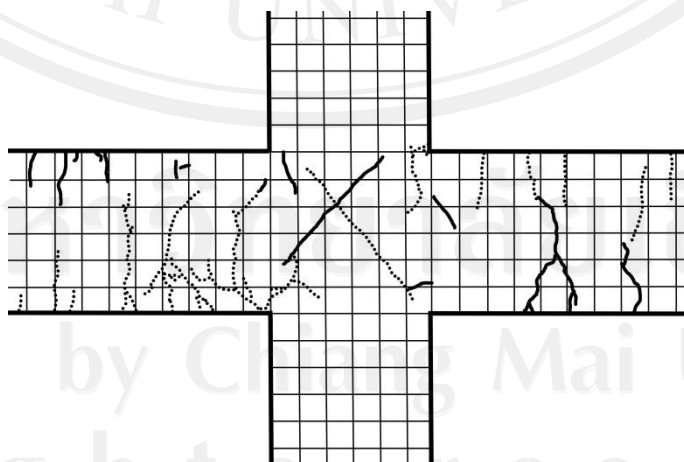
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.25 %



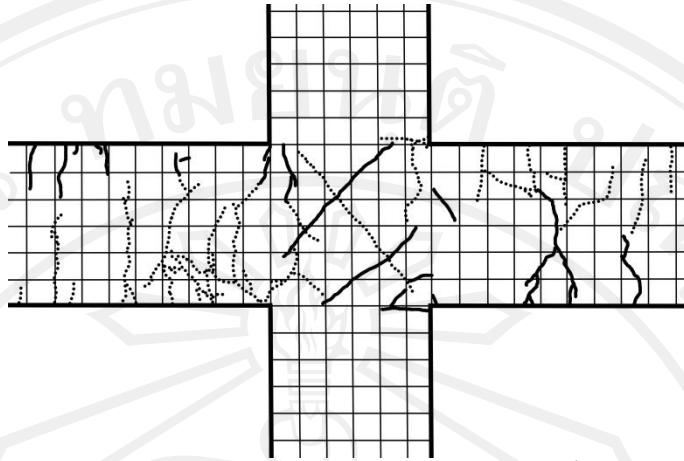
(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.35 %



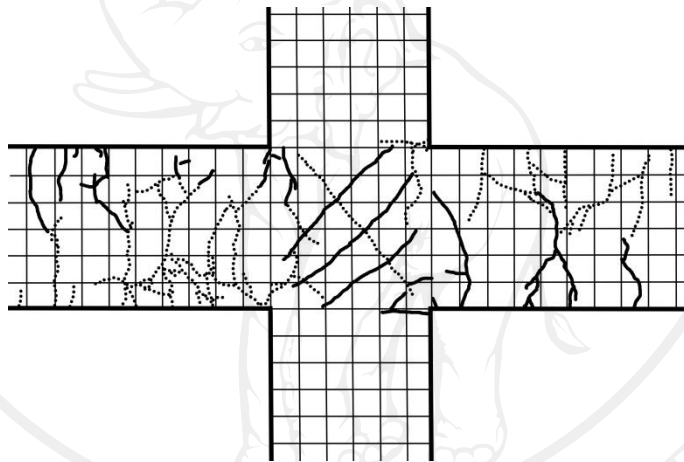
(จ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.50 %



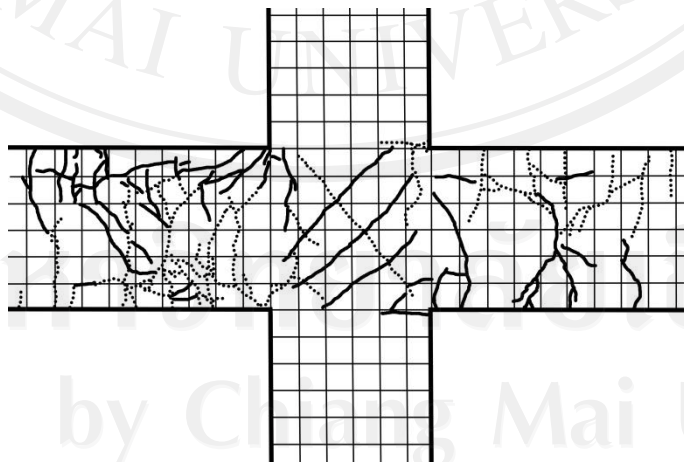
(ฉ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.75 %



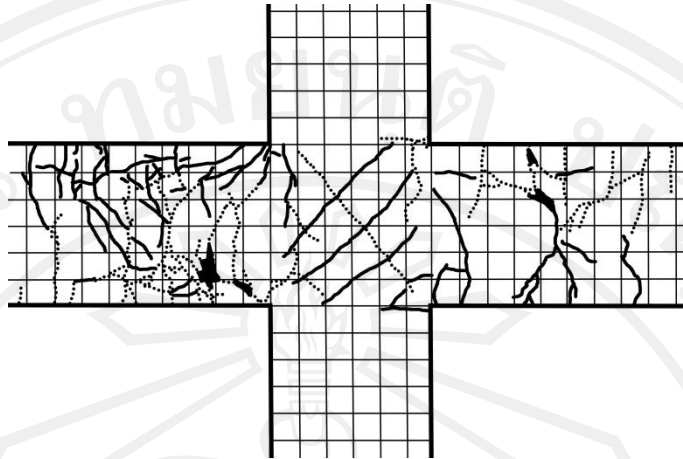
(ข) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.00 %



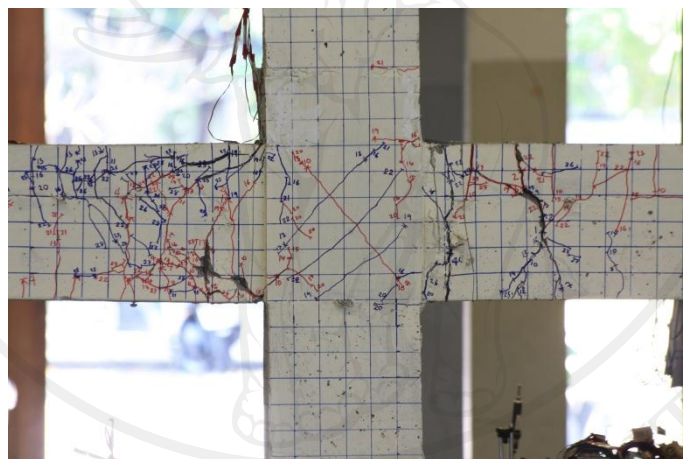
(ค) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 %



(ง) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 %



(ญ) รอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.50 %  
รูปที่ 4.8 การพัฒนาของรอยร้าวในตัวอย่าง P2



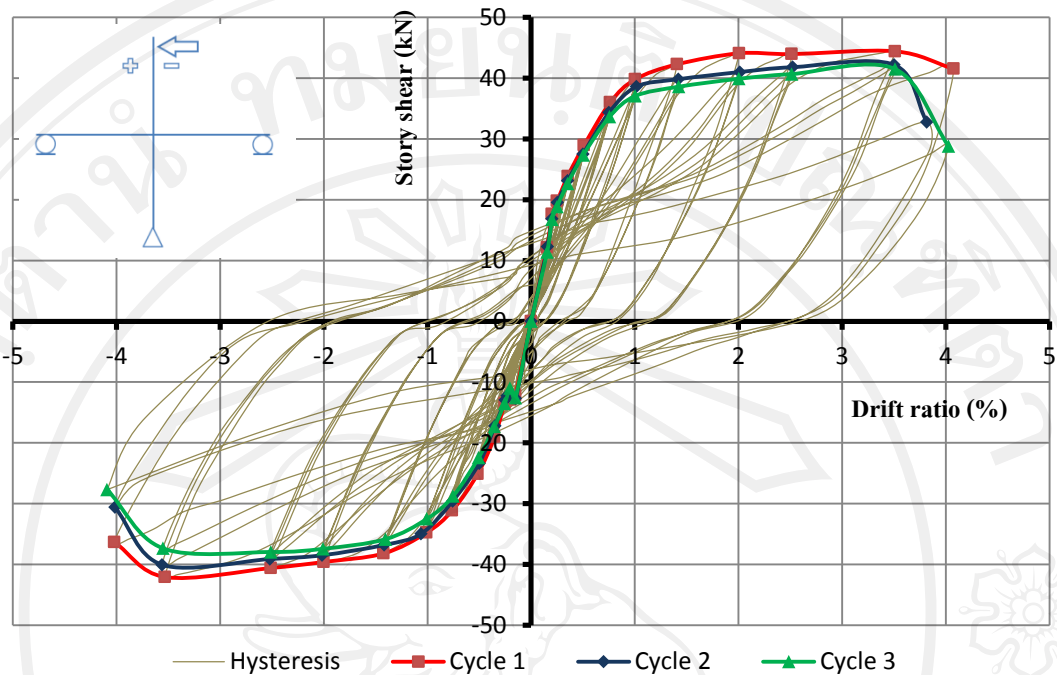
รูปที่ 4.9 การวิบัติของตัวอย่าง P2

#### 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

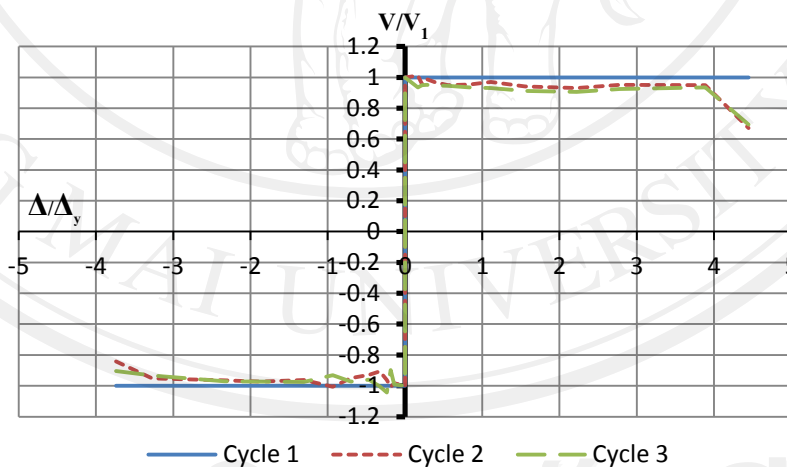
การทดสอบการรับกระทำแบบวัฏจักรของตัวอย่างจุดต่อภายใน สิ่งที่จะเห็นในทุกๆ งานวิจัยคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนตัว ซึ่งกราฟตัวนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงกำลังต้านทานของตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นต่างๆ ได้อย่างชัดเจน อีกทั้งกราฟความสัมพันธ์นี้ยังแสดงถึงผลอื่นได้อีกหลายค่า เช่น ค่าการสลายพลังงานจากการดูพื้นที่เส้นกราฟวนรอบโดยรวม (hysteresis) โดยค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องนั้นจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวนั้นจะทำการแสดงให้เห็นผลการทดสอบในแต่ละตัวอย่างดังนี้

### 1. ตัวอย่าง M1

ตัวอย่างนี้เป็นตัวอย่างที่ใช้สำหรับเป็นตัวอย่างอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นที่ทำการเพิ่มเติมรายละเอียดการเสริมเหล็ก สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นจะเห็นว่าจากรูปที่ 4.10 ในช่วงแรกนั้นกำลังของตัวอย่างยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากยังไม่ถึงจุดครากของตัวอย่าง เมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นต่อไปจะเห็นว่าความชันของกราฟเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัดอีกทั้งเกิดการลู่ออกจากจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟวนรอบ โดยรวม (hysteresis) เนื่องจากเกิดรอยร้าวรวมถึงการการค้ำงของค่าความเครียดในเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดลักษณะของเส้นกราฟแนบเข้าหาจุดศูนย์กลาง (pinching) และค่าแรงเฉือนระหว่างชั้นมากที่สุดของตัวอย่างในทิศทางคือ 44.43 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 3.50 % ในทิศทางคือ 42.08 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 3.50 % เช่นกัน และจากการให้แรงกระทำแบบวนซ้ำในทุกๆระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่กำหนดจำนวน 3 รอบแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพในการรับแรงแบบวัฏจักรของตัวอย่าง M1 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยรูปนี้เป็นการแสดงค่ากำลังต้านทานปกติ (normalized story shear ( $\frac{V}{V_1}$ )) ของตัวอย่างในแต่ละรอบการเคลื่อนที่เทียบกับรอบแรกของการเคลื่อนที่ในแกนตั้ง และแกนนอนนั้นแสดงค่าที่ระยะเคลื่อนที่ต่างๆเทียบกับระยะเคลื่อนที่ ณ จุดคราก (normalized drift ( $\frac{\Delta}{\Delta_y}$ )) ซึ่งจะเห็นว่ากำลังของตัวอย่างเมื่อกระทำแบบวนซ้ำต่างกันเล็กน้อย และเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่มากกว่าจุดครากแล้วซึ่งคือค่า 1 ในแกนนอนในกราฟพบว่ากำลังของตัวอย่างยังไม่ลดลงแต่กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงหลังผ่านจุดครากของตัวอย่างไปแล้ว



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ตัวอย่าง M1

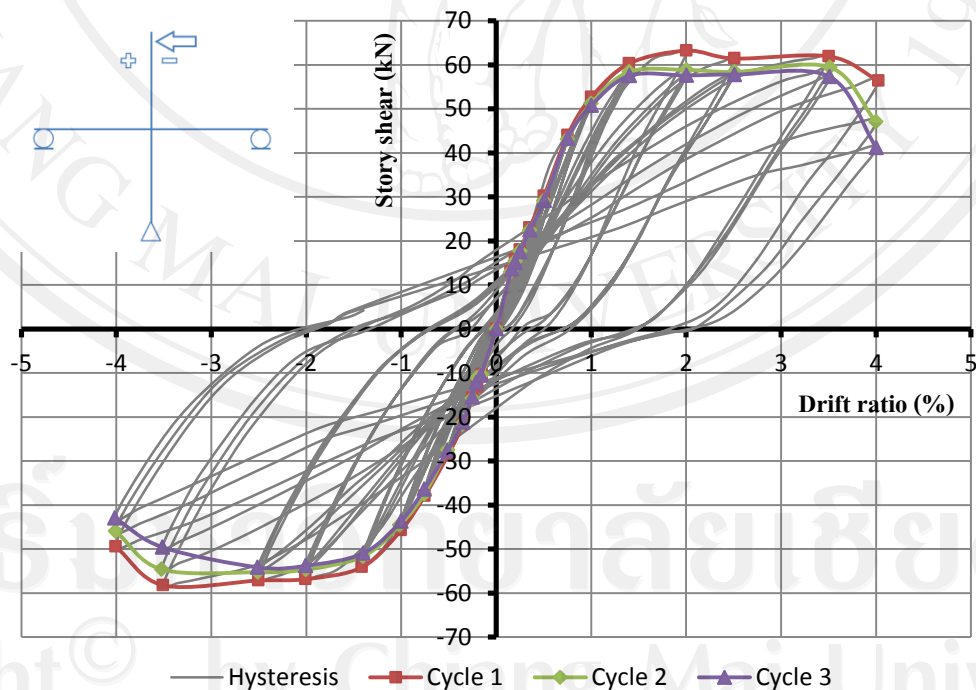


รูปที่ 4.11 การลดลงของกำลังเทียบกับรอบแรกในตัวอย่าง M1

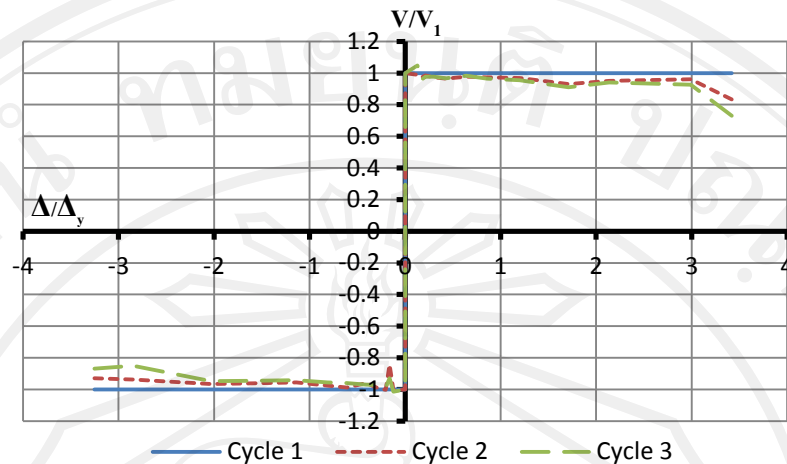
## 2. ตัวอย่าง M2

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปที่ 4.12 นั้นจะเห็นว่าเมื่อตัวอย่าง M2 รับแรงกระทำสูงสุดแล้วนั้นการลดลงของกำลังไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดแต่ยังคงมีกำลังต้านทานการเคลื่อนที่เท่าเดิมแม้จะมีระยะการ

เคลื่อนที่ที่มากขึ้นแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติหลังจากภาวะเชิงเส้นที่ดี ในส่วนของเสถียรภาพการรับแรงกระทำแบบวนซ้ำของตัวอย่างนี้ถือได้ว่าดีเยี่ยมเนื่องจากการเสื่อมถอยของค่ากำลังเกิดขึ้นน้อยกำลังของตัวอย่างในช่วงระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นแรกๆในรอบแรกและรอบที่ 3 มีกำลังใกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 4.13 และจะเห็นว่าเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนมากกว่าจุดครากแล้วกำลังการเคลื่อนที่แบบวนซ้ำของตัวอย่างต่างกันเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่มากๆย่อมเกิดความเสียหายสะสมในตัวอย่างส่งผลให้กำลังในรอบแรกและรอบที่ 3 แตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งไม่ถือว่าไร้เสถียรภาพเสียทีเดียว และเมื่อพิจารณาดูในส่วนของเส้นกราฟวนรอบโดยรวม (hysteresis) พบว่าในช่วงแรกที่ตัวอย่างยังเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่มากๆความเสียหายที่เกิดแก่ตัวอย่างก็เกิดสะสมมาจากก่อนหน้านี้ส่งผลให้เมื่อตัวอย่างเคลื่อนที่กลับสู่จุดเริ่มต้นของเส้นกราฟวนรอบมีการลู่ออกจากจุดเริ่มต้นและยังมีลักษณะของการแนบเข้าจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟ (pinching) รวมด้วยเล็กน้อย โดยค่า shear story สูงสุดของตัวอย่างนี้ในทิศการเคลื่อนที่บวกนั้นมีค่าเท่ากับ 63.23 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 % และการเคลื่อนที่ในทิศลบนั้นมีค่ากำลังสูงสุดเท่ากับ 58.22 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 3.50 %



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น  
ตัวอย่าง M2

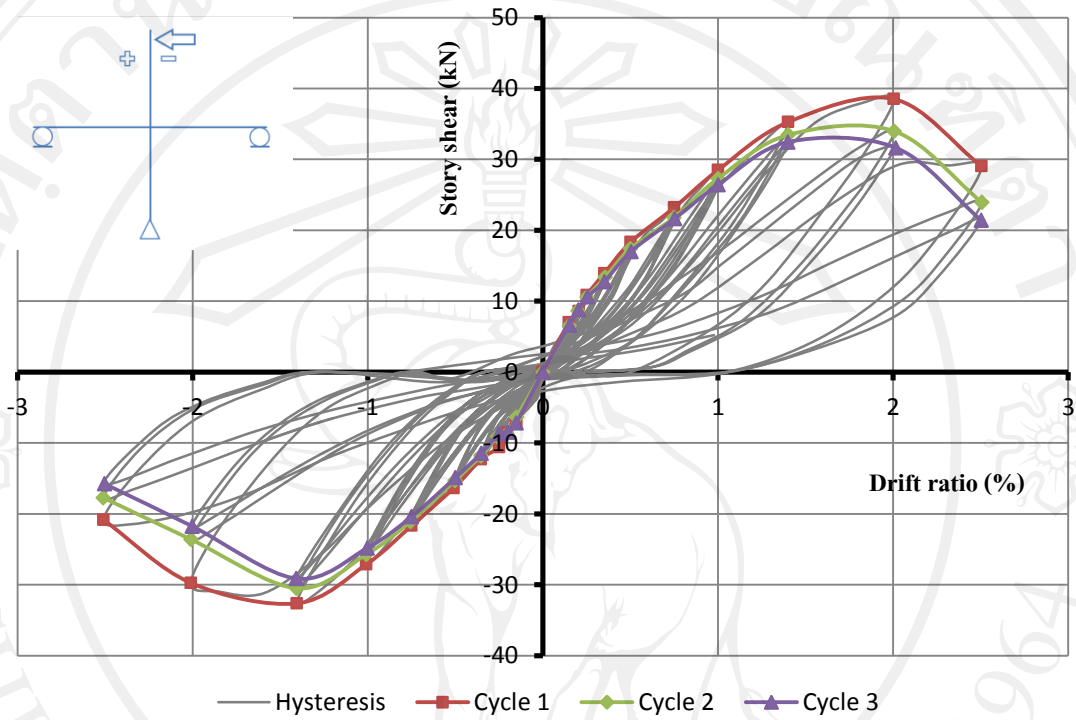


รูปที่ 4.13 การลดลงของกำลังเทียบกับรอบแรกในตัวอย่าง M2

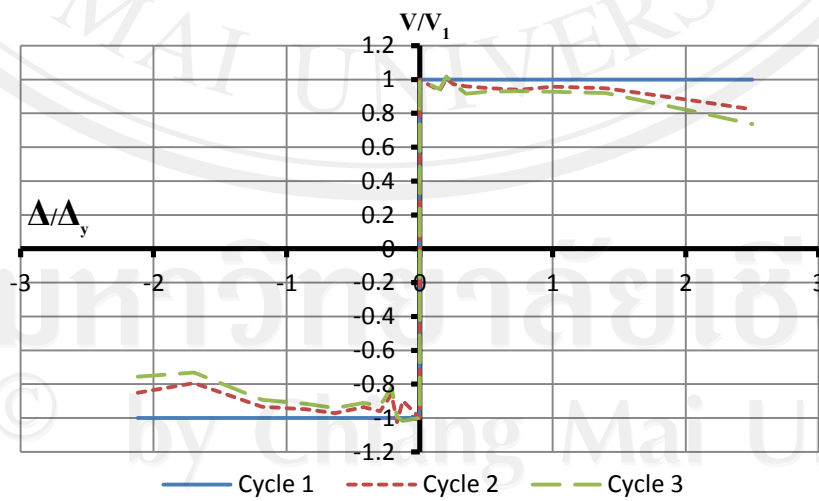
### 3. ตัวอย่าง P1

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปที่ 4.14 จากพฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่งนั้นจะเห็นว่าเมื่อตัวอย่งนี้รับแรงสูงสุดแล้วกำลังของตัวอย่งนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่ค่อยดีนักเนื่องจากหากกรณีที่โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวแล้วโครงสร้างต้องรับแรงจนถึงภาวะสุดขีดของกำลังโครงสร้างอาจล้มพังลงมาได้เนื่องจากกำลังของตัวอย่งทดสอบลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่ผ่านจุดที่มีกำลังสูงสุด ในส่วนของเสถียรภาพของตัวอย่งเมื่อดูจากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการทดสอบตัวอย่งยังคงมีเสถียรภาพอยู่โดยดูได้จากกราฟให้แรงกระทำแบบวนซ้ำแก่ตัวอย่งซึ่งในรอบที่ 3 ของการเคลื่อนที่กำลังไม่แตกต่างจากรอบแรกแต่เมื่อตัวอย่งเข้าสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดแล้วกำลังของตัวอย่งเมื่อให้แรงกระทำแบบวนซ้ำแล้วในรอบที่ 2 กำลังลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อกระทำในรอบที่ 3 แล้วยังพบว่ากำลังของตัวอย่งยังคงลดลง ซึ่งนับว่าที่จุดนี้ตัวอย่งเริ่มไร้เสถียรภาพในการรับแรงกระทำแบบวนซ้ำแล้วและหากยังให้ระยะเคลื่อนที่แก่ตัวอย่งเพิ่มมากขึ้นแล้วการให้แรงกระทำแบบวนซ้ำจะทำให้ตัวอย่งเสียหายเพิ่มมากขึ้นจนกำลังของตัวอย่งสูญเสียบไป และเมื่อดูจากรูปที่ 4.15 ยังพบว่าหลังจากตัวอย่งมีระยะเคลื่อนที่มากกว่าระยะครากของตัวอย่งแล้วกำลังของตัวอย่งเริ่มลดลงและเมื่อระยะเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นพบว่ากำลังในรอบแรกในรอบที่สอง และรอบที่สามนั้นเริ่มต่างกันเพิ่มมากขึ้นรวมถึงระยะที่เกิดการวิบัติของตัวอย่งนี้มากกว่าระยะครากไม่มากเมื่อเทียบกับตัวอย่งแบบหล่อในที่ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารภที่ไม่เป็นที่พอใจในการรับแรงกระทำแบบวัฏจักรของตัวอย่งนี้ ค่าแรงเฉือนในชั้น (story shear) สูงสุด

ของตัวอย่างนี้ที่การเคลื่อนที่ในทิศบวกมีค่า 38.52 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 % และในทิศลบมีค่า 32.63 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 %



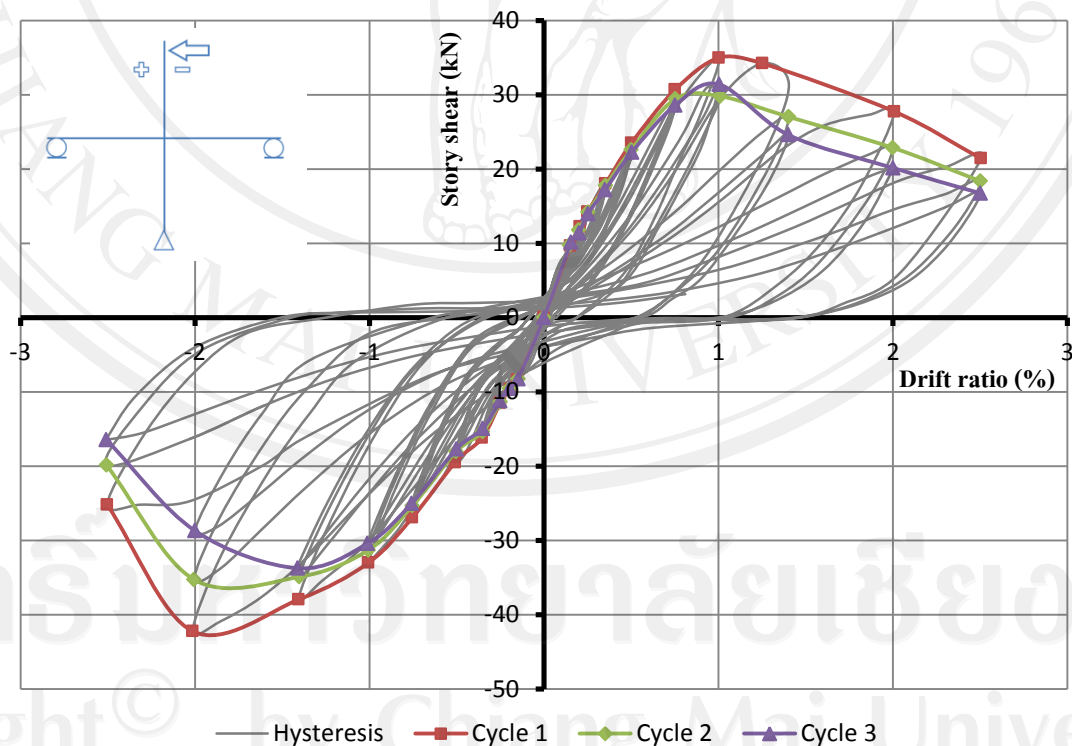
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ตัวอย่าง P1



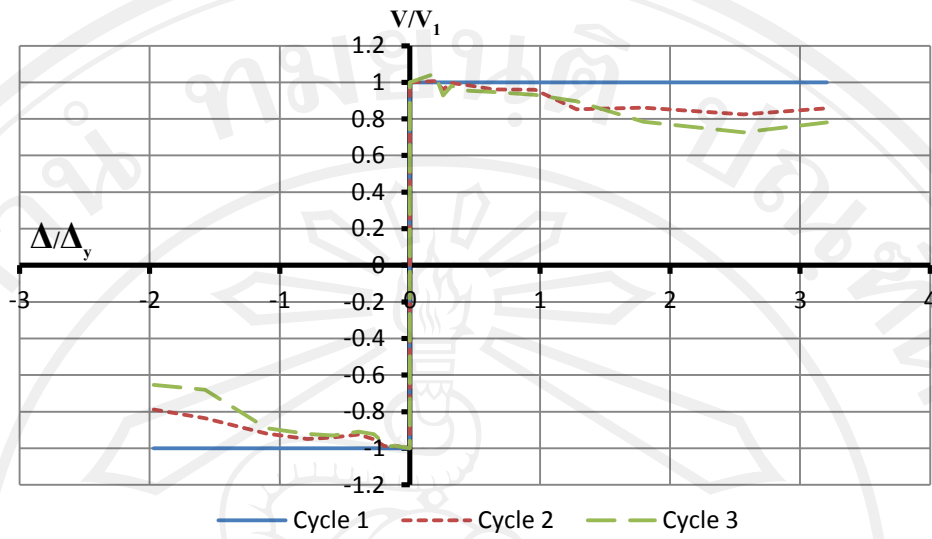
รูปที่ 4.15 การลดลงของกำลังเทียบกับรอบแรกในตัวอย่าง P1

## 4. ตัวอย่าง P2

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าพฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างคล้ายคลึงกับตัวอย่างก่อนหน้า โดยจะเห็นว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบมีกำลังสูงสุดแล้วกำลังของตัวอย่างจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในส่วนของเสถียรภาพในการรับแรงกระทำแบบวนซ้ำของตัวอย่างนั้นยังคงเหมือนกับตัวอย่างก่อนหน้า โดยในช่วงที่ตัวอย่างยังมีแรงกระทำไม่ถึงจุดสูงสุดนั้นพบว่าทำให้แรงกระทำแบบวนซ้ำทั้ง 3 รอบกำลังของตัวอย่างไม่ต่างกันหรือต่างกันเล็กน้อย แต่เมื่อตัวอย่างมีแรงกระทำที่จุดสูงสุดแล้วนั้นเสถียรภาพของตัวอย่างก็สูญเสียไปเนื่องจากเมื่อให้แรงกระทำแบบวนซ้ำแล้วส่งผลให้กำลังของตัวอย่างลดลงและในรูปที่ 4.17 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่มากกว่าระยะครากแล้วพบว่ากำลังของตัวอย่างลดลงจากรอบแรกมากขึ้นตามระยะเคลื่อนที่ที่เพิ่มมากขึ้น ในด้านกำลังของตัวอย่างนั้นค่าแรงเฉือนในชั้นสูงสุดของตัวอย่างนั้นในการเคลื่อนที่ที่สิบหกนั้นมีค่า 34.98 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.00 % และในการเคลื่อนที่ที่สิบหกนั้นมีค่า 44.23 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.00 %



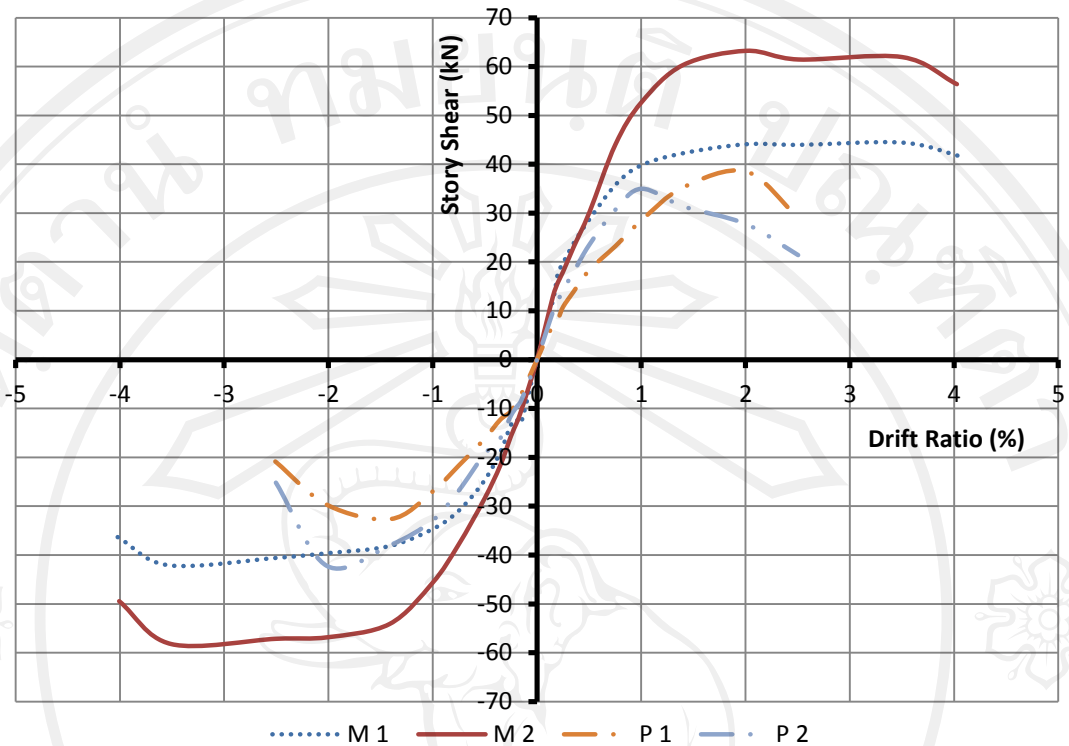
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ตัวอย่าง P2



รูปที่ 4.17 การลดลงของกำลังเทียบกับรอบแรกในตัวอย่าง P2

#### 4.3.1 เปรียบเทียบกำลัง

หัวข้อนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบถึงกำลังต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบโดยการนำค่าเส้นโค้งขอบนอก (envelope curve) ของตัวอย่างมาวางลงในกราฟเดียวกันดังรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าตัวอย่าง M2 เป็นตัวอย่างที่มีกำลังมากที่สุดแต่ในกราฟสิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือการเสื่อมถอยของค่ากำลังของตัวอย่างทดสอบระหว่างตัวอย่างแบบเทไนทีและตัวอย่างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยตัวอย่างแบบเทไนทีนั้นเมื่อตัวอย่างรับแรงสูงสุดแล้วการลดลงของค่ากำลังของตัวอย่างเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไปแต่ในตัวอย่างของรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นเมื่อตัวอย่างรับแรงสูงสุดแล้วกำลังของตัวอย่างจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นรูปแบบของการเสื่อมถอยของค่ากำลังที่ไม่ดีนัก และในส่วนกำลังการต้านทานแรงสูงสุดของตัวอย่างแต่ละตัวนั้นแสดงในตารางที่ 4.8 โดยจะเห็นว่าตัวอย่าง M2 เป็นตัวอย่างที่มีกำลังสูงที่สุดซึ่งเป็นการเสริมเหล็กเสริมระดับกลางบริเวณจุดต่อและปลายเสา และในส่วน of ตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นทั้ง 2 ตัวอย่างมีกำลังไม่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 4.18 ค่ากำลังจากเส้นโครงขอบนอก (envelope curve)

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงเฉือนในชั้น (story shear) สูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

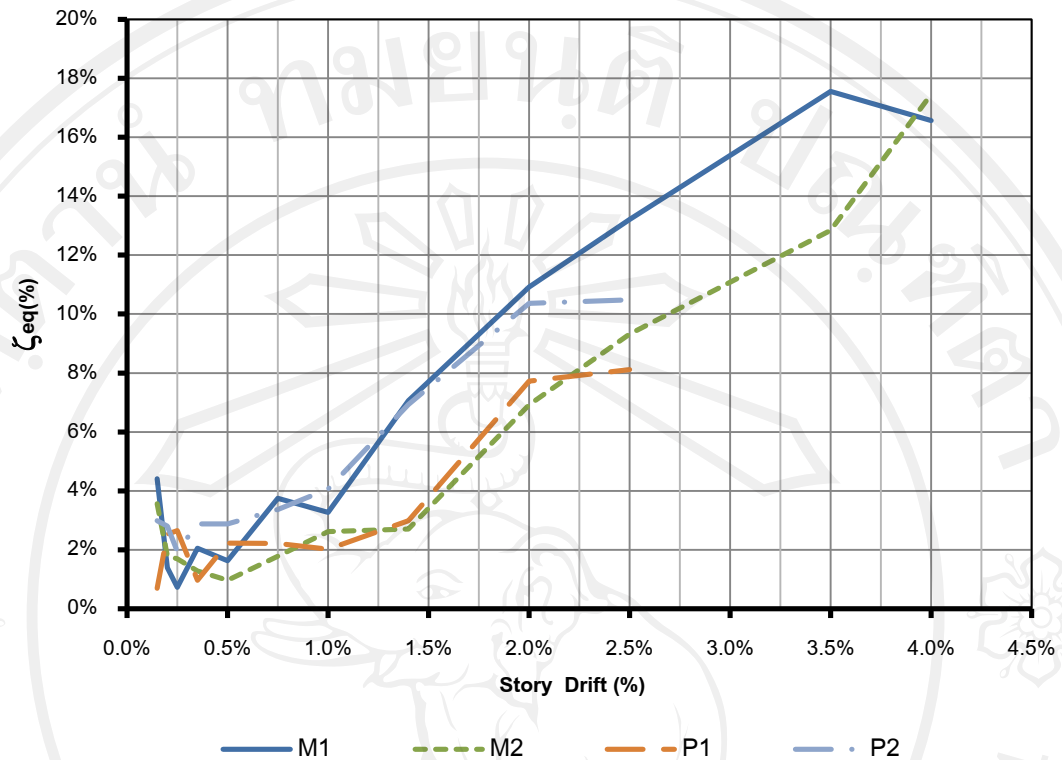
Specimen	Story shear (kN)	
	Positive	Negative
M1	44.4	-42.1
M2	61.9	-58.2
P1	38.5	-32.6
P2	35.0	-42.2

#### 4.4 การสลายพลังงาน (Energy dissipation)

ในการรับแรงกระทำแบบวนซ้ำของตัวอย่างทดสอบพลังงานที่ตัวอย่างได้ทำการสลายไปคือแรงกระทำที่กระทำแก่โครงสร้างซึ่งหากโครงสร้างไม่มีการสลายพลังงานแล้วนั้นอาจส่งผลให้การสั่นไหวมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการสั่นไหวสะสมจากเดิมที่แรงกระทำน้อยและเมื่อมีแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การสั่นไหวสะสมเพิ่มมากขึ้นตามจนสุดท้ายโครงสร้างจึงเกิด

การพังทลายอย่างรุนแรง หัวข้อการสลายพลังงานนี้เป็นหัวข้อที่กล่าวถึงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างแต่ละตัว โดยวิธีที่ใช้ในการหาค่าการสลายพลังงานในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหาค่าอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (equivalent viscous damping ratio,  $\zeta_{eq}$ ) (Chopra, 2000) ซึ่งวิธีการหาค่านั้นได้กล่าวในส่วนของทฤษฎีแล้วก่อนหน้านี้ โดยผลการวิจัยค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 4.19 จากรูปจะเห็นว่าในช่วงระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นแรกๆค่าการสลายพลังงานของทุกตัวอย่างยังเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากความเสียหายที่เกิดเนื่องจากการให้แรงกระทำแบบวนซ้ำยังเกิดขึ้นน้อยส่งผลให้พื้นที่ภายในเส้นกราฟวนรอบมีค่าน้อยโดยดูรูปได้จากหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งเส้นวนรอบขณะให้แรงและถอนแรงกลับเกือบจะเป็นเส้นเดียวกันแต่เมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นจะเห็นว่าเริ่มเกิดความเสียหายแก่ตัวอย่างทดสอบส่งผลให้ลักษณะของเส้นกราฟวนรอบโดยรวมมีวงกว้างมากขึ้นส่งผลให้พื้นที่ภายในเพิ่มมากขึ้นซึ่งแสดงถึงค่าการสลายพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อดูจากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าโดยส่วนมากแล้วค่าการสลายพลังงานของทุกตัวอย่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจากที่ผ่านระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.00 - 1.40 % เป็นต้นไป แต่ไม่ใช่ว่าค่าการสลายพลังงานจะเพิ่มขึ้นตลอดจนตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยจะเห็นว่าเมื่อค่าการสลายพลังงานเพิ่มขึ้นแล้วในช่วงปลายก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการวิบัตินั้นค่าการสลายพลังงานเริ่มลดลงเนื่องจากตัวอย่างมีความเสียหายมากจนไม่สามารถต้านทานแรงที่กระทำหรือมีพฤติกรรมคล้ายกับ pin ที่ยอมให้มีการหมุนอย่างอิสระส่งผลให้ไม่สามารถสลายพลังงานได้อีก

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการสลายพลังงานของแต่ละตัวอย่างนั้นผลที่ได้คือ ตัวอย่างที่ใช้การเทินที่นั้นช่วงของการเพิ่มขึ้นของค่าการสลายพลังงานมีมากกว่าตัวอย่างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปซึ่งสาเหตุที่ตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีค่าการสลายพลังงานน้อยเนื่องจากการวิบัติเกิดขึ้นหลังจากตัวอย่างผ่านจุดครากไม่นานแสดงให้เห็นถึงความเปราะต่างจากตัวอย่างแบบเทินที่ซึ่งกว่าที่ตัวอย่างเกิดการวิบัตินั้นมีระยะห่างจากจุดครากของตัวอย่างพอสมควรส่งผลให้การวิบัติของตัวอย่างเกิดอย่างทันทีทันใดซึ่งจากหัวข้อพัฒนาการของรอยร้าวนั้นจะเห็นว่าความเสียหายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วต่างจากตัวอย่างแบบเทินที่ซึ่งความเสียหายค่อยๆเกิดส่งผลให้ตัวอย่างไม่วิบัติอย่างทันทีทันใดหรือที่เรียกกันว่าเป็นการวิบัติแบบเปราะ สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุให้การเพิ่มขึ้นของค่าการสลายพลังงานเกิดขึ้นน้อย



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดหนีคเทียบกับค่าระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น

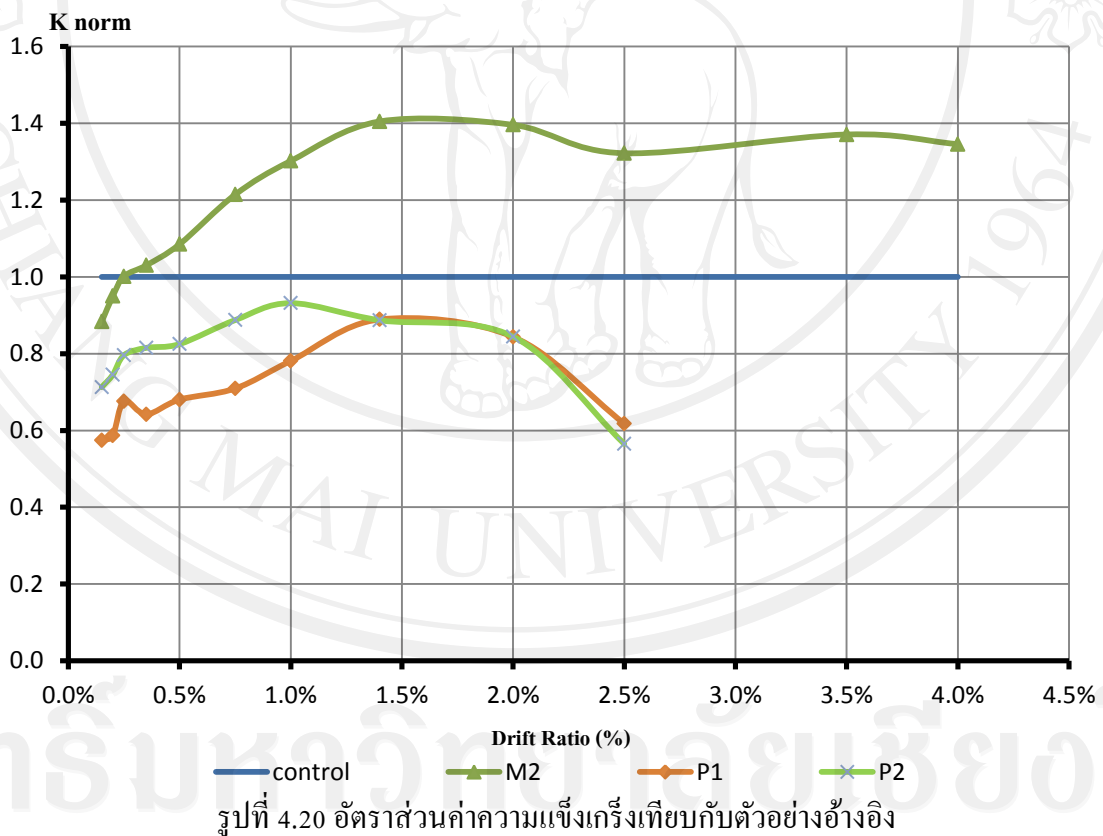
#### 4.5 ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness)

สำหรับในหัวข้อนี้แบ่งรายละเอียดของผลการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย การเปรียบเทียบค่าความแข็งเกร็งของตัวอย่างทดสอบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงซึ่งก็คือตัวอย่าง M1 และการเชื่อมรอยของค่าความแข็งเกร็ง ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

##### 4.5.1 ค่าความแข็งเกร็ง

ค่าความแข็งเกร็งของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยแยกเป็นตัวอย่างอ้างอิง 1 ตัวอย่างคือตัวอย่าง M1 ซึ่งผลของอัตราส่วนของค่าความแข็งเกร็งที่แสดงในรูปที่ 4.20 นั้นเป็นค่าความแข็งเกร็ง ( $K_{norm}$ ) ของตัวอย่างทดสอบใดๆ เทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (M1) ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นต่างๆ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีเพียงตัวอย่าง M2 เท่านั้นที่มีค่าความแข็งเกร็งมากกว่าตัวอย่างอ้างอิงส่วนค่าความแข็งเกร็งของตัวอย่างอื่นนั้นพบว่ามีค่าความแข็งเกร็งน้อยกว่าตัวอย่างอ้างอิงทั้งสิ้น เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นพบว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นแรกๆ นั้นตัวอย่าง P2 มีค่าความแข็งเกร็งมากกว่าตัวอย่าง P1 เนื่องจากสิ่งที่แตกต่างระหว่าง 2 ตัวอย่างคือ

ตัวอย่าง P2 ได้มีการเสริมเหล็กเสริมในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสาและเมื่อดูจากค่าแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมแนวทแยงจากค่าความเครียดในเหล็กเสริมที่กล่าวต่อไปแสดงให้เห็นว่าเหล็กแนวทแยงนี้มีส่วนช่วยในการรับแรง ส่งผลให้บริเวณจุดต่อของตัวอย่าง P2 นี้มีความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่าง P1 และจากผลของเหล็กเสริมแนวทแยงที่ช่วยในการลดการรูดไถลของเห็นหน้าตัดตัวที่ในหัวข้อที่ 4.11 ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตัวอย่าง P2 มีค่าความแข็งแรงมากกว่า แต่จะเห็นว่าเมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากกว่า 1.00 % นั้นค่าความแข็งแรงของตัวอย่างลดลงเนื่องจากเมื่อดูจากเส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างจะพบว่าการเคลื่อนที่ในทิศทางนั้นตัวอย่าง P2 มีกำลังลดลงหลังจากมีระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 1.00 % ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างลดลงตามเนื่องจากการหาค่าความแข็งแรงนั้นอาศัยค่ากำลังของตัวอย่างทดสอบในการหาค่าความแข็งแรง

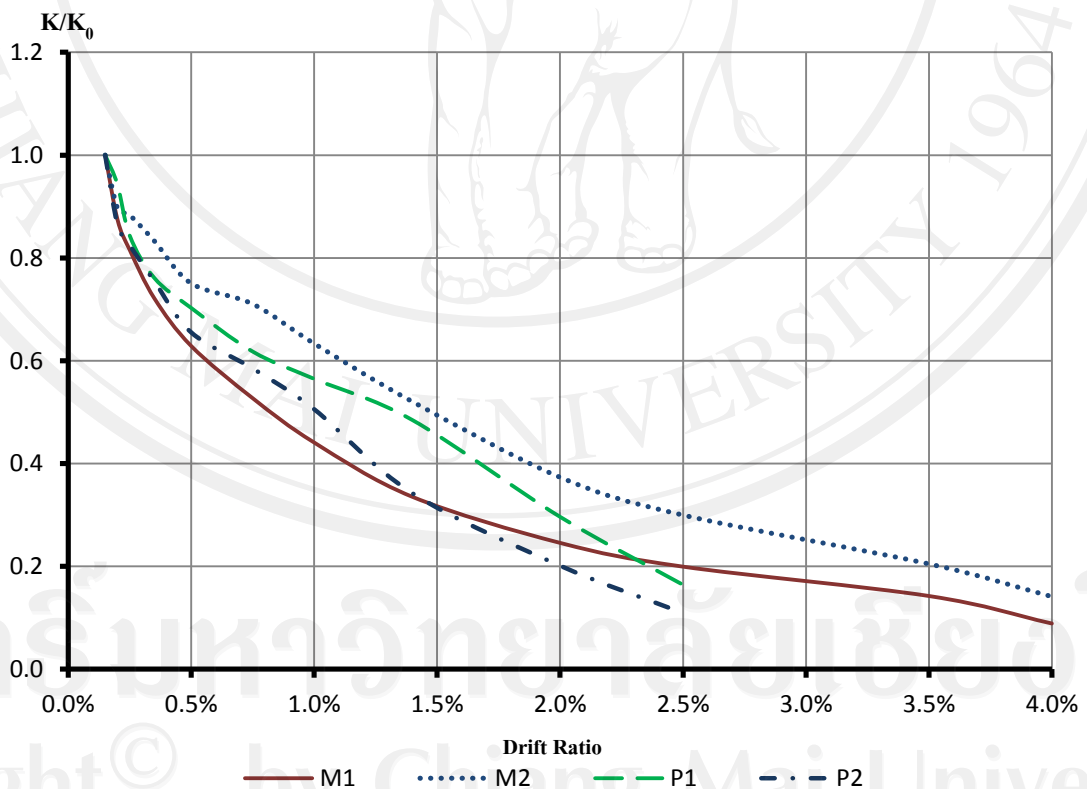


รูปที่ 4.20 อัตราส่วนค่าความแข็งแรงเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง

#### 4.5.2 การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรง

สำหรับการเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบนั้นผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการแสดงค่าความแข็งแรงที่ระยะเคลื่อนที่ต่างๆเทียบกับค่าความแข็งแรง

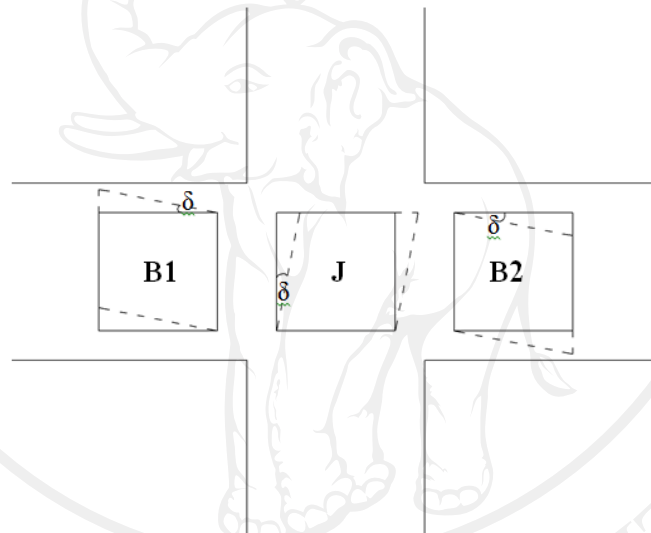
เกร็งเริ่มต้น ( $K/K_0$ ) ของตัวอย่างนั้น สำหรับแนวโน้มการเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็งของตัวอย่าง M1 นั้นค่าการเสื่อมถอยในช่วงระยะเคลื่อนที่แรกๆนั้นมีค่ามากแต่เมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นค่าการเสื่อมถอยลดน้อยลง สำหรับตัวอย่าง M2 นั้นในช่วงแรกของการทดสอบการเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็งเกิดน้อยเนื่องจากการเสริมเหล็กเสริมระดับกลาง แต่เมื่อตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็งใกล้เคียงกับตัวอย่าง M1 เมื่อดูจากความชันของกราฟ สำหรับตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นแนวโน้มการเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็งนั้นมีทิศทางเดียวกัน โดยจะเห็นว่าพฤติกรรมการเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็งนั้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอต่างจากตัวอย่างแบบเทินที่ที่ในช่วงแรกค่าการเสื่อมถอยมีค่ามากแต่เมื่อระยะเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นความชันของกราฟลดน้อยลงแต่ในตัวอย่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะเห็นว่าถึงแม้ตัวอย่างจะมีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นแต่ความชันของกราฟกลับเปลี่ยนแปลงไม่มาก



รูปที่ 4.21 การเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็ง

#### 4.6 การเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือน

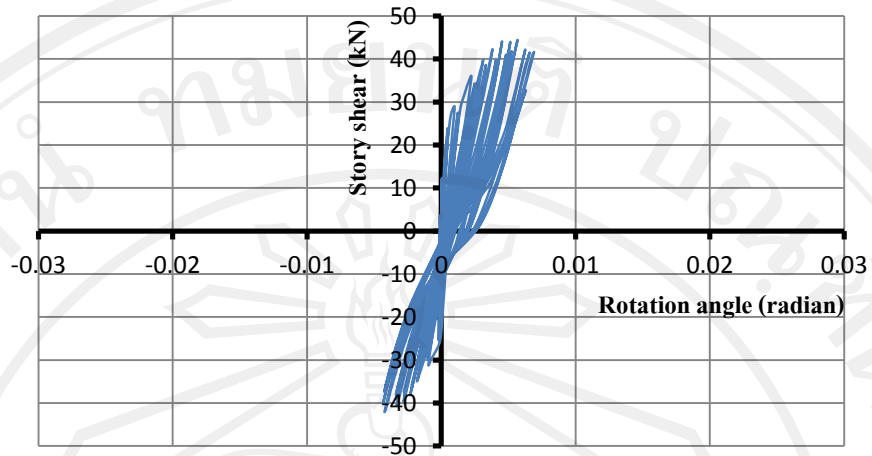
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการเสีรูปของบริเวณจุดต่อและปลายคาน ซึ่งการเสีรูปที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้เป็นการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือน ฉะนั้นรูปแบบที่เสีรูปคือการเอียงกันของแรงทำให้รูปทรงที่พิจารณานั้นเอียงทำมุมเท่าไร โดยทำการวัดเป็นมุมเรเดียนและทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวกโดยวิธีการวัดนั้นได้กล่าวในหัวข้อวิธีการทดสอบ ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดการเสีรูปแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งตำแหน่ง B1 และ B2 นั้นเป็นการวัดการเสีรูปที่ปลายคานและตำแหน่ง J คือตำแหน่งที่วัดการเสีรูปบริเวณจุดต่อ โดยการแสดงค่าการเสีรูปนั้นจะแสดงค่าแยกเป็นแต่ละตัวอย่าง



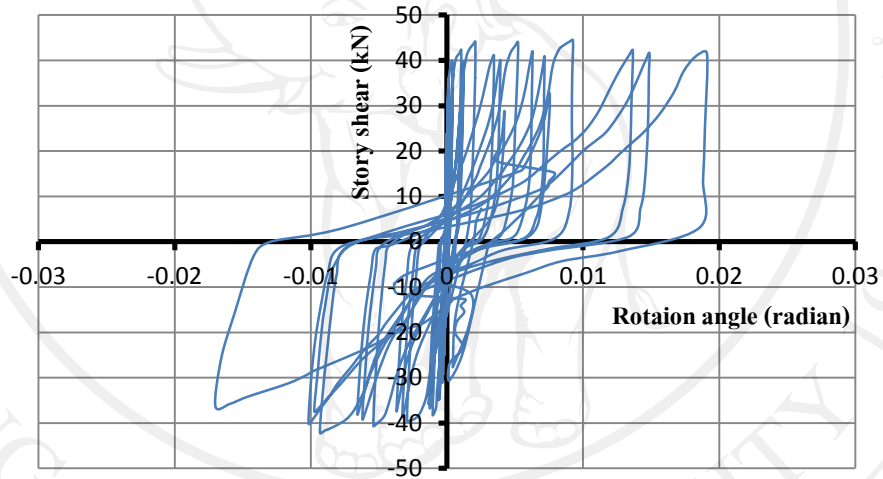
รูปที่ 4.22 ตำแหน่งที่วัดการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือน

##### 1. ตัวอย่าง M1

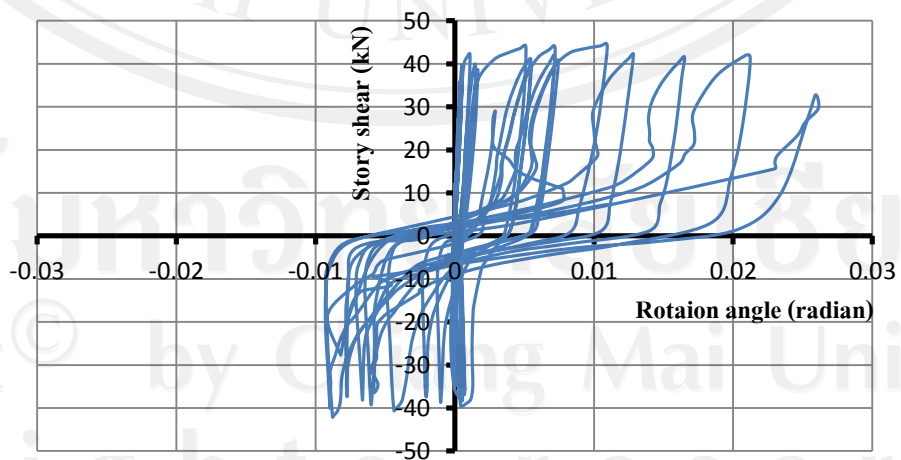
จากผลการทดสอบจะเห็นว่า การเสีรูปบริเวณจุดต่อเนื่องจากแรงเฉือนเกิดขึ้นน้อยซึ่งเกิดมากที่สุดเพียง 0.0065 เรเดียนเนื่องจากบริเวณจุดต่อมีความแข็งแรงจึงมีการเสีรูปน้อย ในส่วนของพื้นที่ B1 และ B2 เกิดการเสีรูปมากกว่าบริเวณจุดต่อแสดงให้เห็นถึงความอ่อนแอของคานมีมากกว่าจุดต่อ และพื้นที่ B1 การเสีรูปในทิศลบและทิศบวกมีค่าใกล้เคียงกันแต่ในพื้นที่ B2 นั้นจะเห็นว่ามีการเสีรูปในทิศบวกมากกว่าเนื่องจากในการวัดของตัวอย่าง M1 นี้เริ่มเกิดการแอ่อกของรอยร้าวที่หน้าเสาส่งผลให้แรงเฉือนที่ส่งผ่านไปยังคานนั้นเกิดน้อยลง ค่าการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือนนี้สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงโดยจะเห็นว่าคานมีค่าการเสีรูปมากและเกิดความเสียหายมากเช่นกัน โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้สามารถดูได้ในส่วนของภาพผนวก



รูปที่ 4.23 ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง J ตัวอย่าง M1



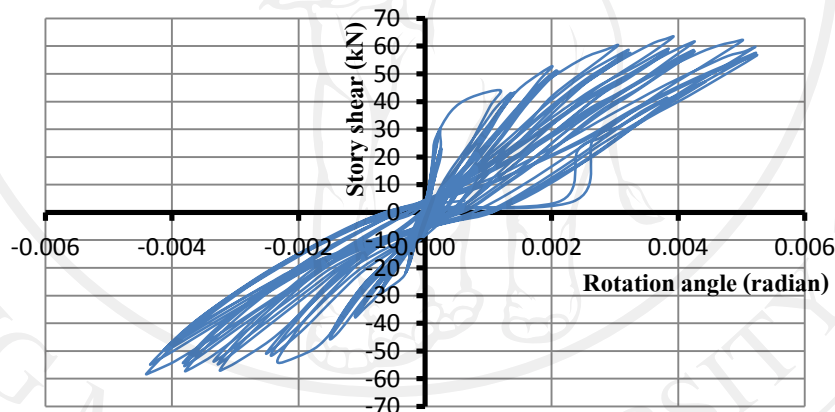
รูปที่ 4.24 ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B1 ตัวอย่าง M1



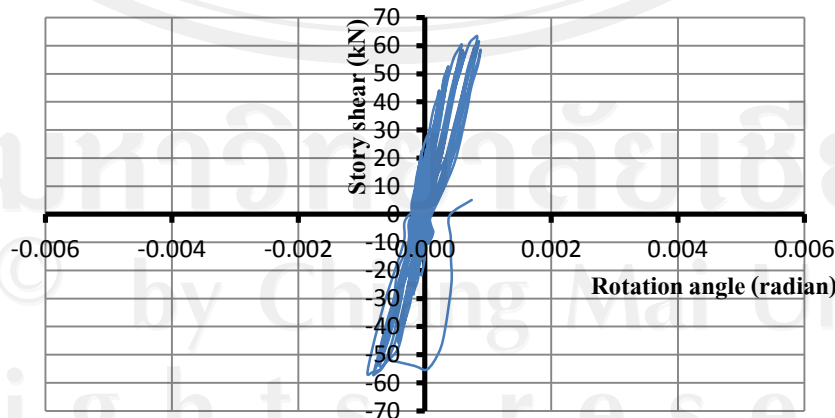
รูปที่ 4.25 ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B2 ตัวอย่าง M1

## 2. ตัวอย่าง M2

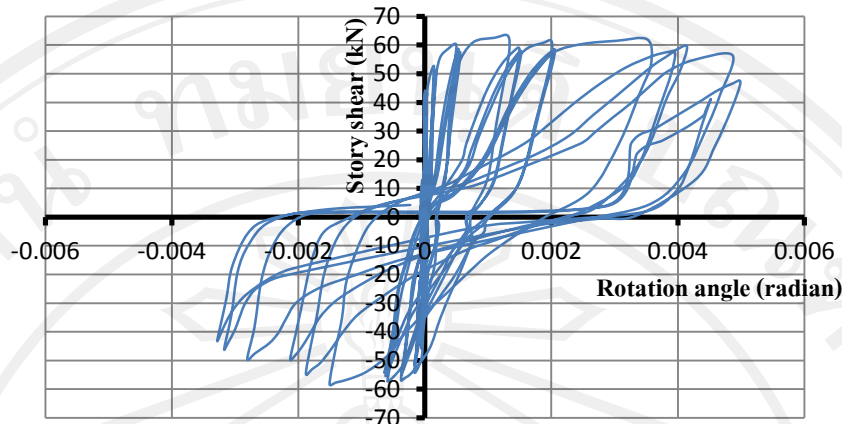
ตัวอย่างนี้เป็นเป็นตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กระดับกลางบริเวณจุดต่อและปลายคานส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความแข็งแรงเป็นพิเศษจากผลการทดสอบจะเห็นว่าการเสีรูปบริเวณจุดต่อมีค่ามากเมื่อเทียบกับการเสีรูปที่คาน ซึ่งการเสีรูปที่จุดต่อนั้นมีค่ามากที่สุด 0.0052 เรเดียน ในส่วนของคานด้านขวาในพื้นที่ B2 ในช่วงแรกค่าการเสีรูปยังเกิดขึ้นน้อยแต่เมื่อความเสียหายเริ่มเกิดขึ้นส่งผลให้ค่าการเสีรูปที่คานมีค่ามากขึ้นตาม ในส่วนของคานด้านซ้ายในพื้นที่ B1 มีค่าการเสีรูปน้อยเนื่องจากมีความเสียหายจากแรงเฉือนร่วมกับแรงดัดจนทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นนอกพื้นที่ B1 และ B2 ส่งผลให้ค่าแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นที่ B1 มีค่าน้อยจึงเป็นผลให้ค่าการเสีรูปเกิดน้อยตาม และจะเห็นว่าในตัวอย่าง M2 นั้นมีค่าการเสีรูปจากแรงเฉือนน้อย โดยมิสาเหตุเนื่องจากตำแหน่งที่เกิดจุดหมุนพลาสติกนั้นเกิดนอกพื้นที่ B1 และ B2 ทำให้ค่าการเสีรูปมีค่าน้อย



รูปที่ 4.26 ค่าการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง J ตัวอย่าง M2



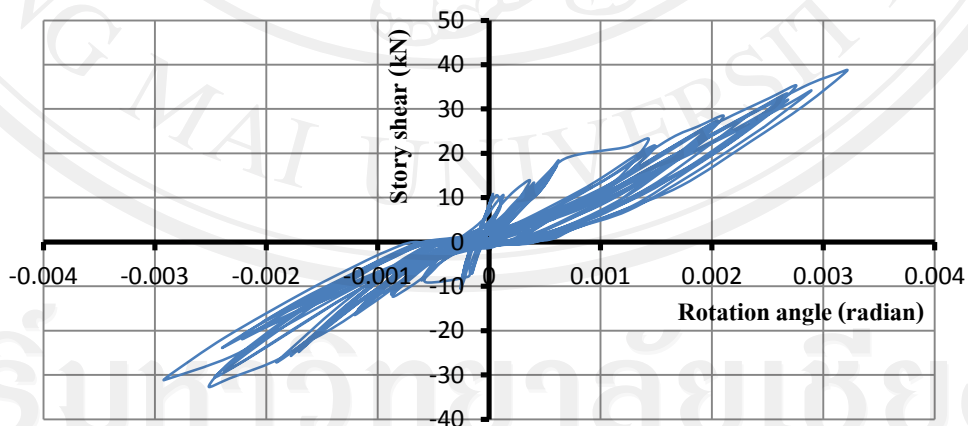
รูปที่ 4.27 ค่าการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B1 ตัวอย่าง M2



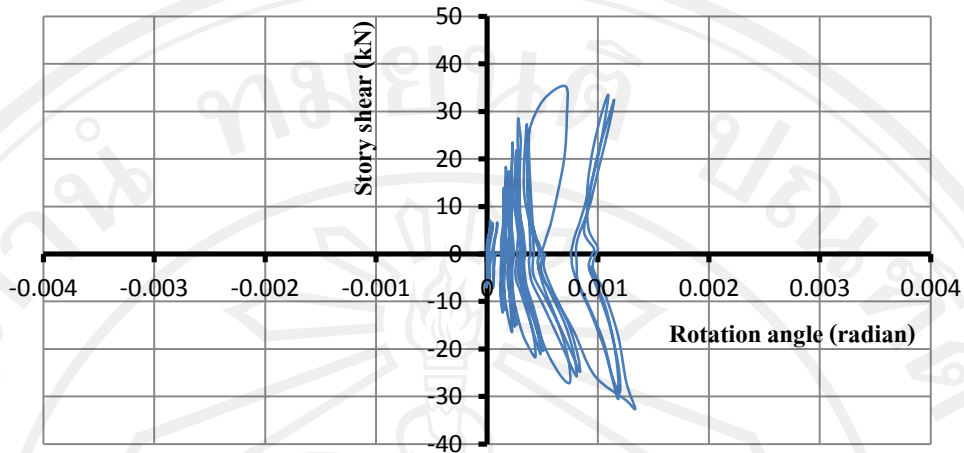
รูปที่ 4.28 ค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B2 ตัวอย่าง M2

### 3. ตัวอย่าง P1

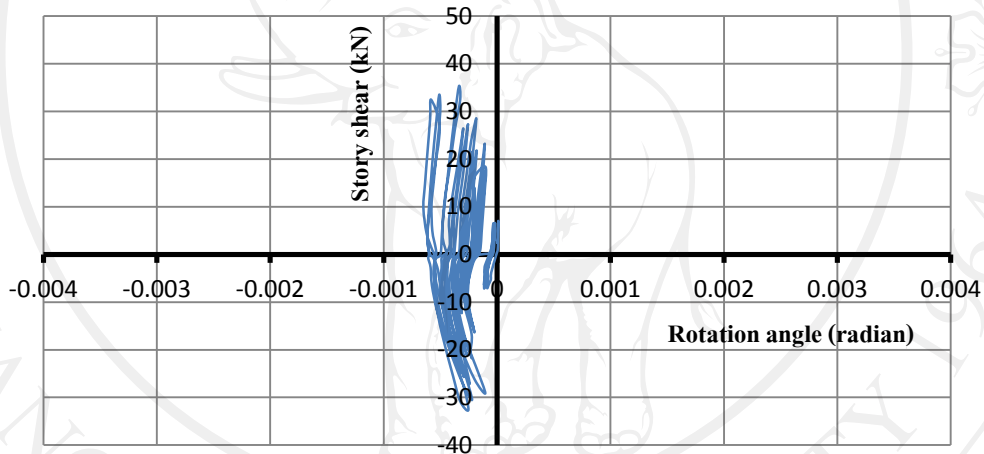
สำหรับตัวอย่างเป็นตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยจุดที่มีการเสยรูปมากที่สุดคือบริเวณจุดต่อหรือพื้นที่ J โดยมีค่าการเสยรูป 0.0032 เรเดียนเนื่องจากจุดต่อเป็นจุดที่ทำหน้าที่ถ่ายแรงจากชิ้นส่วนที่เข้ามาเชื่อมต่อส่งผลให้บริเวณจุดต่อหรือพื้นที่ J มีค่าการเสยรูปมาก และในส่วนของคานทั้งสองด้านหรือพื้นที่ B1 และ B2 ที่มีค่าการเสยรูปน้อยเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นที่คานเกิดห่างจากหน้าเสาออกไป และความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นอยู่นอกพื้นที่ B1 และ B2 ส่งผลให้บริเวณคานที่ทำการวัดค่าการเสยรูปได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนน้อย



รูปที่ 4.29 ค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง J ตัวอย่าง P1



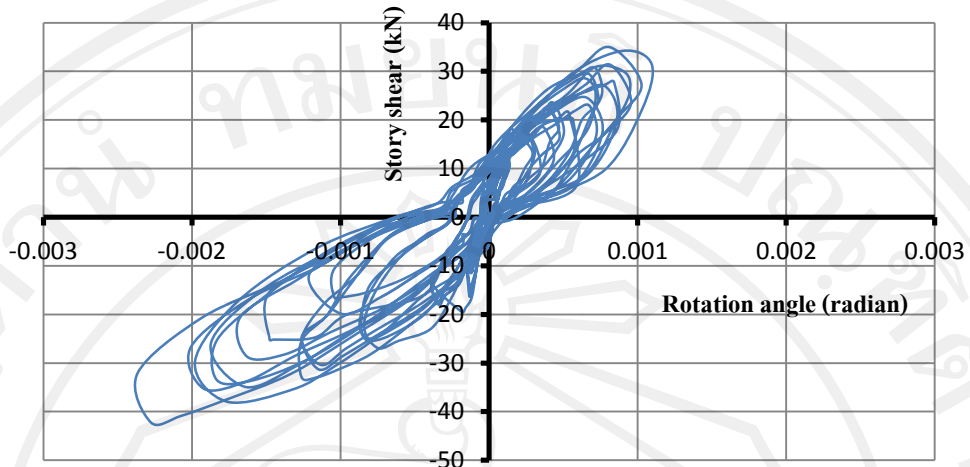
รูปที่ 4.30 ค่าการเสียดรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B1 ตัวอย่าง P1



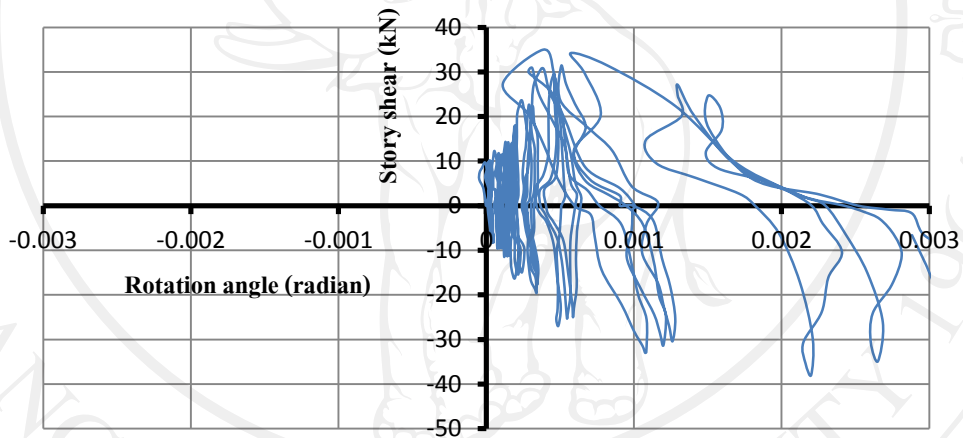
รูปที่ 4.31 ค่าการเสียดรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B2 ตัวอย่าง P1

#### 4. ตัวอย่าง P2

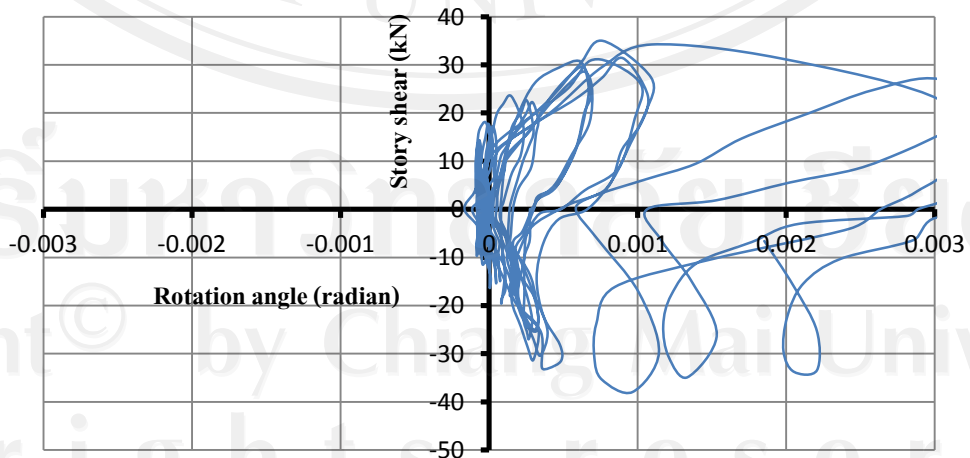
จะเห็นว่ารูปแบบการเสียดรูปของตัวอย่างนี้คล้ายคลึงกับตัวอย่างก่อนหน้านี้แต่บริเวณจุดต่อมีค่าการเสียดรูปน้อยกว่าเนื่องจากตัวอย่างนี้มีการเสริมเหล็กเสริมแนวทแยงบริเวณจุดต่อซึ่งเหล็กนี้มีส่วนช่วยในการรับแรงที่เกิดขึ้นภายในบริเวณจุดต่อซึ่งสามารถดูได้จากผลของความเครียดในเหล็กเสริมที่กล่าวต่อไปทำให้ช่วยลดการเสียดรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณจุดต่อได้ และในส่วนของคานค่าการเสียดรูปในพื้นที่ B1 และ B2 นั้นมีค่ามากขึ้นอย่างกะทันหันและมีความแปรปรวนมีสาเหตุจากมีรอยแตกเกิดขึ้นภายในพื้นที่ B1 และ B2 ซึ่งเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างแล้วนั้นส่งผลให้รอยร้าวเปิดอ้าออกซึ่งรอยแตกที่เปิดอ้าออกนี้ดึงให้เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่นั้นยืดออกมากขึ้นซึ่งต่างจากการเสียดรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่มีระยะยึดหดตัวเพียงเล็กน้อยทำให้ค่าการเสียดรูปที่วัดได้ในพื้นที่ B หรือบริเวณคานนั้นมีค่ามากและแปรปรวนผิดปกติ



รูปที่ 4.32 ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง J ตัวอย่าง P2



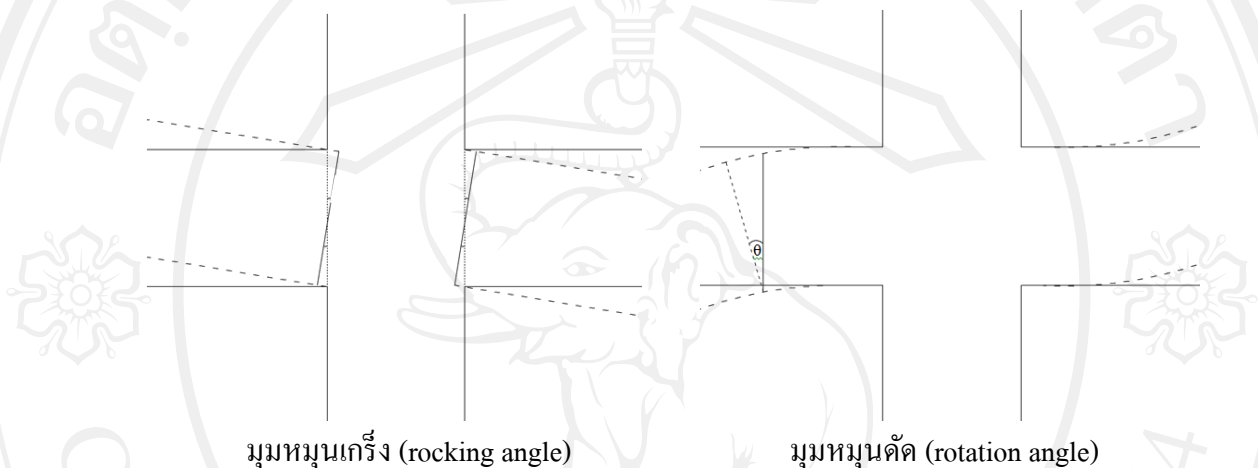
รูปที่ 4.33 ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B1 ตัวอย่าง P2



รูปที่ 4.34 ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่ง B2 ตัวอย่าง P2

#### 4.7 ค่ามุมหมุนเกร็งและมุมหมุนดัดที่คาน (Rocking angle and Flexural rotation)

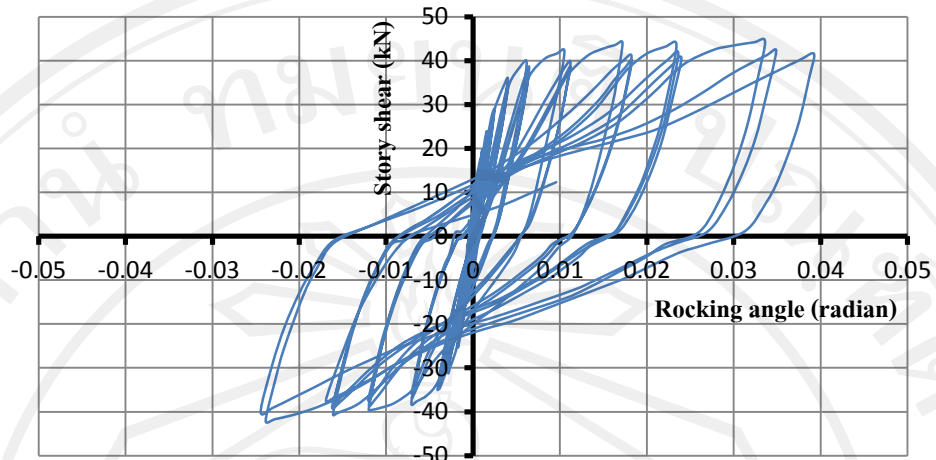
สำหรับค่ามุมหมุนเกร็งนั้นเป็นการวัดค่ามุมที่เกิดการหมุนเนื่องจากแรงดัดที่บริเวณหน้าเสาโดยใช้ LVDT ในการวัดค่าการเคลื่อนที่ และในส่วนของค่ามุมหมุนดัดที่คานจุดที่ทำกรวัดค่าห่างจากหน้าเสาออกมาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของค่าความลึกประสิทธิภาพของคานซึ่งลักษณะของมุมหมุนแต่ละชนิดนั้นแสดงในรูปที่ 4.35 โดยผลการทดสอบมีดังนี้



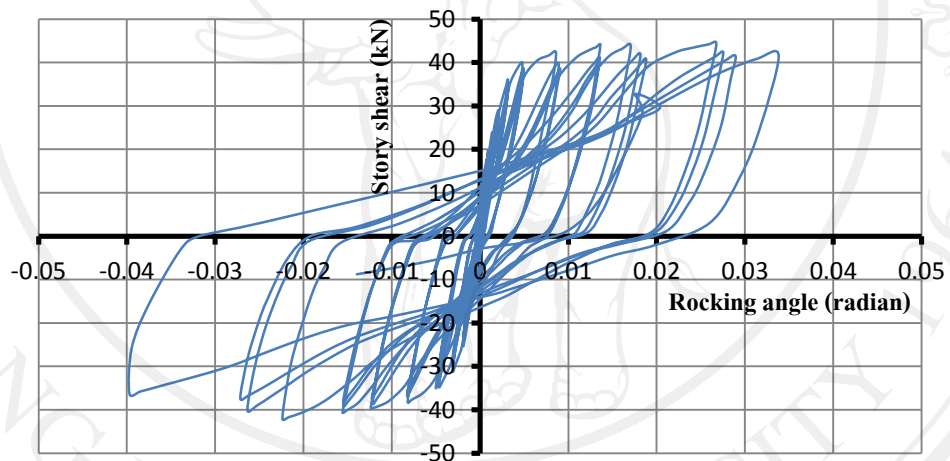
รูปที่ 4.35 ค่ามุมหมุนที่คาน

##### 1. ตัวอย่าง M1

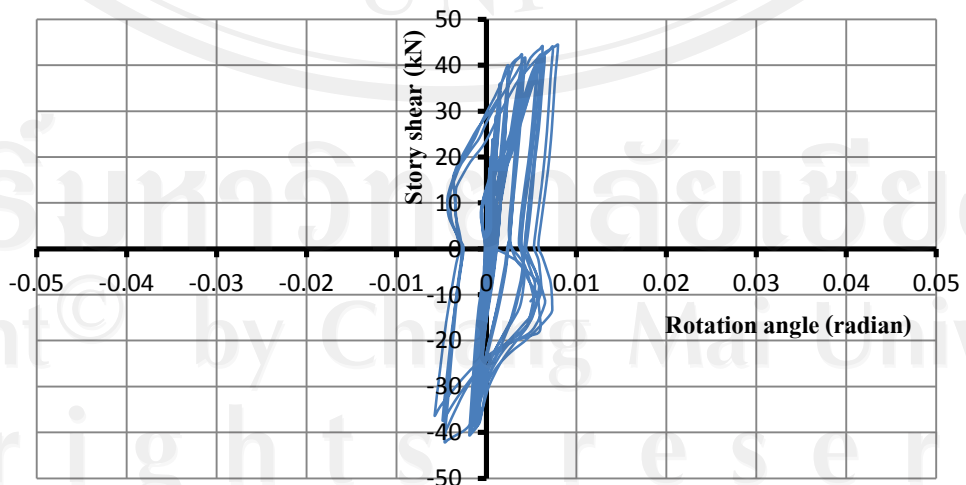
จากผลการทดสอบพบว่าค่ามุมที่เกิดขึ้นนั้นเกิดที่บริเวณหน้าเสามากกว่าบริเวณคานภายในแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างเกิดความเสียหายที่บริเวณหน้าเสามากกว่าคานภายใน สำหรับพฤติกรรมของมุมเกร็งที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นว่าในช่วงแรกที่มีแรงกระทำต่อตัวอย่างน้อยนั้นความเสียหายยังเกิดเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเสียหายที่เกิดที่บริเวณหน้าเสาเล็กน้อยและจากค่ามุมเกร็งที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าที่หน้าเสาด้านซ้ายเกิดมุมบวกมากกว่าและที่หน้าเสาด้านขวาเกิดมุมลบมากกว่าเมื่อมาเปรียบกับตัวอย่างพบว่าที่หน้าเสามีบริเวณที่องคานเกิดการเสียรูปมากกว่าหลังคานสอดคล้องกับรายละเอียดการเสริมเหล็กที่เหล็กบนมีปริมาณมากกว่า และเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่มากขึ้นพบว่าค่าของมุมเกร็งเพิ่มขึ้นตามอย่างชัดเจนต่างจากค่ามุมดัดที่คานภายในที่พบว่าเกิดมุมที่เปลี่ยนแปลงน้อยถึงแม้จะมีแรงกระทำต่อตัวอย่างมากขึ้นหรือเกิดความเสียหายต่อคานน้อย สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นที่พบว่าจุดหมุนพลาสติกเกิดที่หน้าเสา



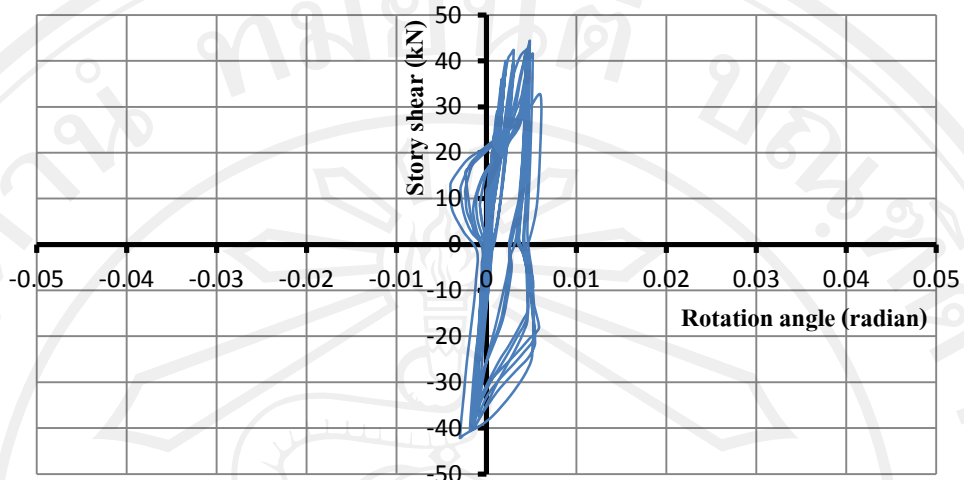
รูปที่ 4.36 ค่ามูมหมุนเกร็งที่หน้าเสาต้นซ้าย ตัวอย่าง M1



รูปที่ 4.37 ค่ามูมหมุนเกร็งที่หน้าเสาต้นขวา ตัวอย่าง M1



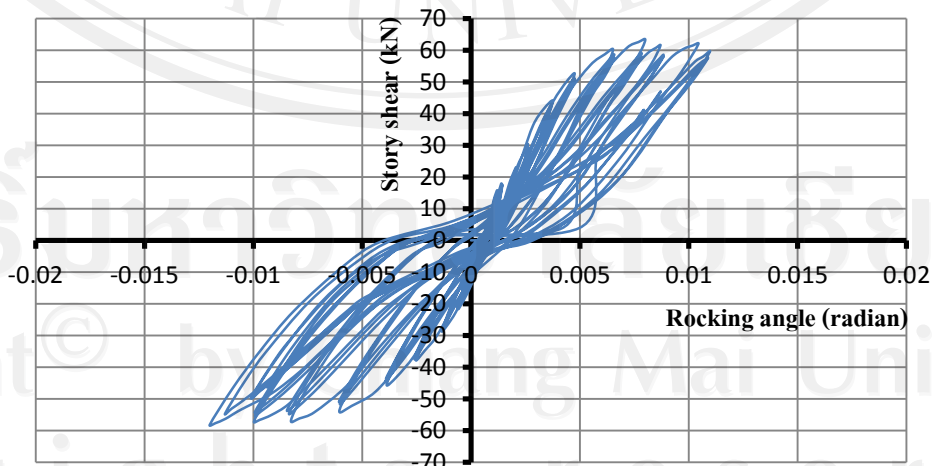
รูปที่ 4.38 ค่ามูมหมุนคดที่คานต้นซ้าย ตัวอย่าง M1



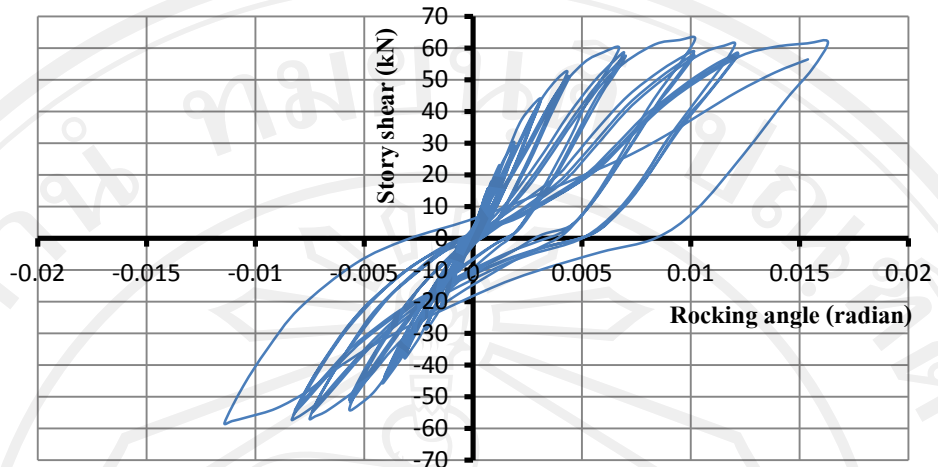
รูปที่ 4.39 ค่ามูมหมุนคัตที่คานด้านขวา ตัวอย่าง M1

## 2. ตัวอย่าง M2

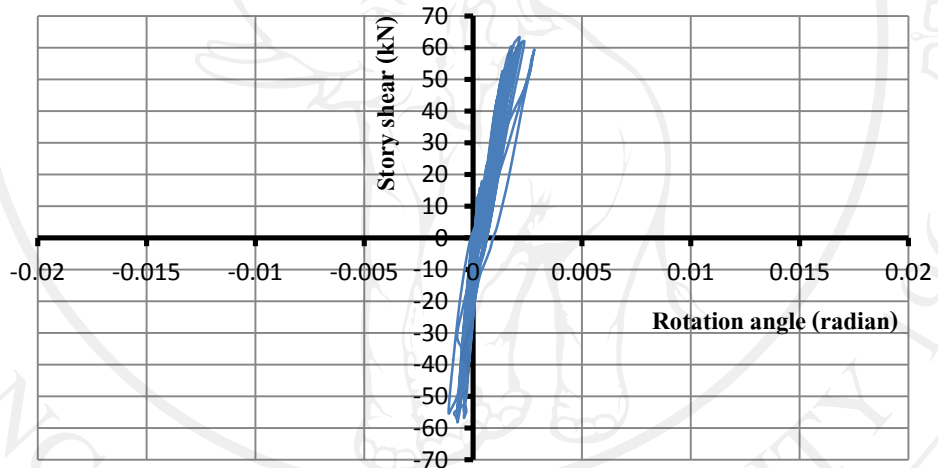
ค่ามูมหมุนที่เกิดในตัวอย่างนี้พบว่าค่ามูมเกร็งที่หน้าเสาในตัวอย่างนี้มีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง M1 อย่างชัดเจน โดยมีสาเหตุจากการเสริมเหล็กเสริมระดับกลางบริเวณจุดต่อและปลายคานที่ช่วยให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรงบริเวณจุดต่อของตัวอย่างนี้ดีขึ้นสังเกตได้จากค่ามูมเกร็งที่น้อยลง และในส่วนของมูมคัตในตัวอย่างนี้ที่พบว่ามีค่าน้อยซึ่งค่าที่วัดได้นี้ไม่ได้บ่งบอกว่าคานเสียหายเพียงเล็กน้อยเนื่องจากจุดที่เกิดความเสียหายในตัวอย่างนี้เกิดนอกพื้นที่วัดมูมคัตในคานส่งผลให้ค่าที่วัดได้นั้นไม่ใช่ค่าที่เกิดขึ้นจริงในคานของตัวอย่างนี้ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเสียรูปจากแรงเฉือนบริเวณคานที่แสดงก่อนหน้าที่มีค่าน้อยเช่นกันเนื่องจากระยะที่วัดค่าทั้งสองค่านี้นั้นมีระยะเดียวกันส่งผลให้ค่าทั้งสองมีค่าน้อย



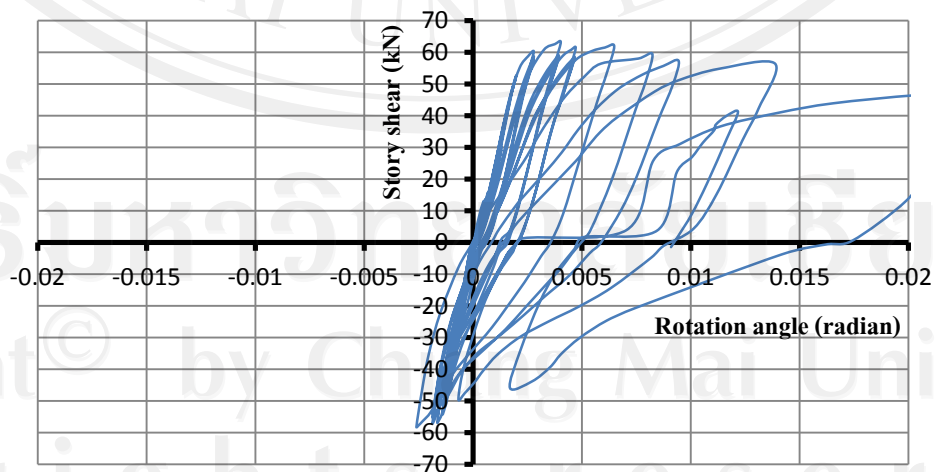
รูปที่ 4.40 ค่ามูมหมุนเกร็งที่หน้าเสาต้านซ้าย ตัวอย่าง M2



รูปที่ 4.41 ค่ามูมหมุนเกร็งที่หน้าเสาต้านขวา ตัวอย่าง M2



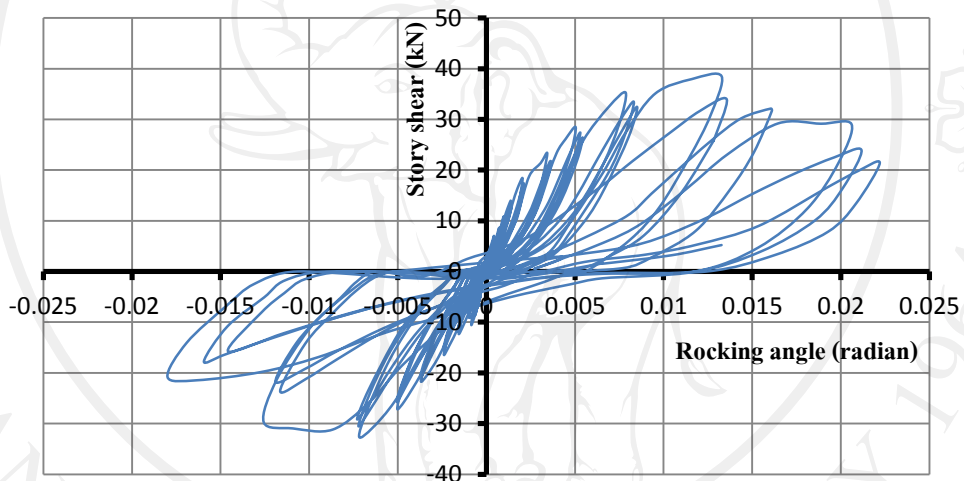
รูปที่ 4.42 ค่ามูมหมุนดัดที่คานด้านซ้าย ตัวอย่าง M2



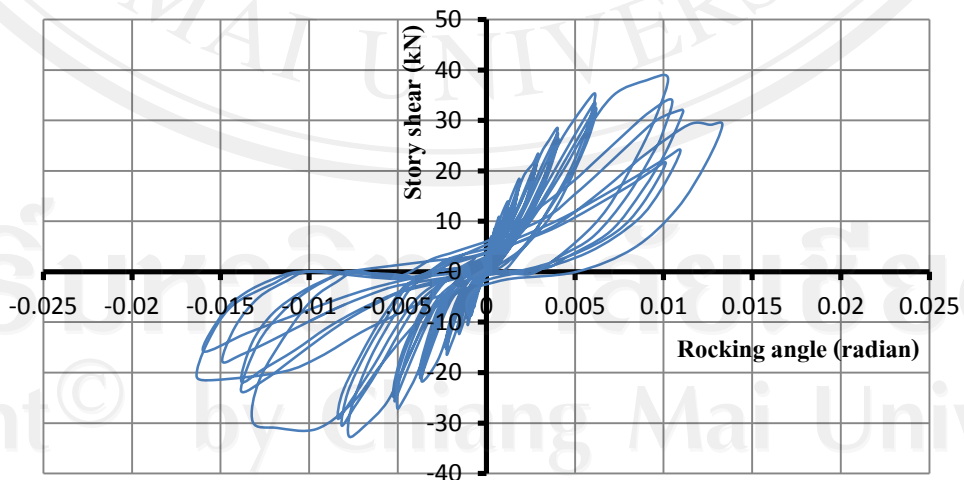
รูปที่ 4.43 ค่ามูมหมุนดัดที่คานด้านขวา ตัวอย่าง M2

### 3. ตัวอย่าง P1

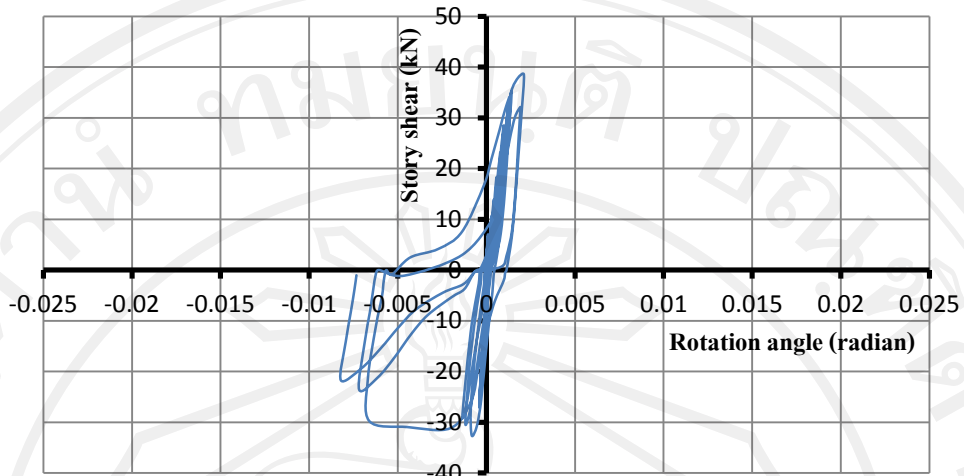
ตัวอย่างนี้เป็นตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปตัวแรกซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนถึงความอ่อนแอของจุดต่อเนื่องจากจะเห็นว่าในช่วงท้ายของการทดสอบในตัวอย่างนี้มีพบว่ามีมุมหมุนเกร็งมีค่าเพิ่มมากขึ้นในขณะที่แรงกระทำมีค่าลดลงแสดงถึงการวิบัติของตัวอย่างเนื่องจากสูญเสียแรงต้านทานการเคลื่อนที่ไป และพฤติกรรมของค่ามุมเกร็งยังคงสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ในส่วนของค่ามุมหมุนตัดที่คานภายในนั้นพบว่ามีค่าน้อยเนื่องจากจุดที่อ่อนแอเกิดขึ้นที่บริเวณปลายเสาส่งผลให้การเสียรูปที่คานภายในมีค่าน้อยทำให้ค่ามุมหมุนตัดมีค่าน้อยตาม



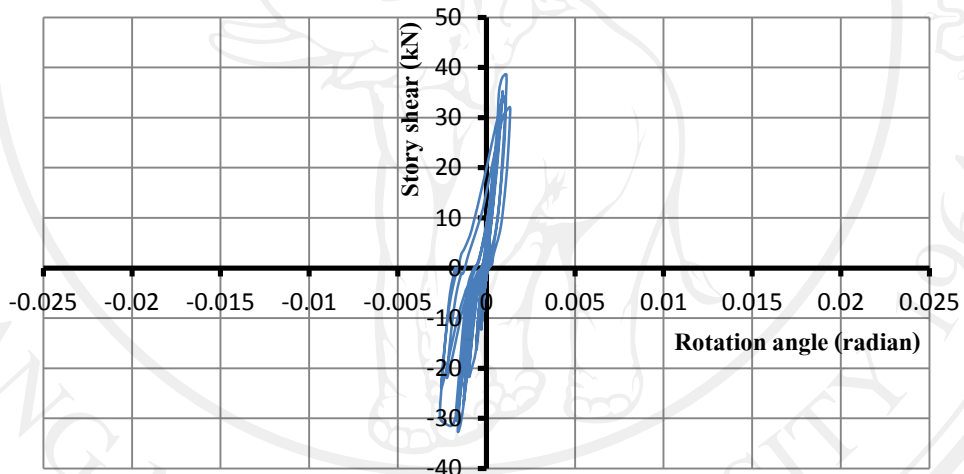
รูปที่ 4.44 ค่ามุมหมุนเกร็งที่หน้าเสาด้านซ้าย ตัวอย่าง P1



รูปที่ 4.45 ค่ามุมหมุนเกร็งที่หน้าเสาด้านขวา ตัวอย่าง P1



รูปที่ 4.46 ค่ามูมหมุนดัดที่คานด้านซ้าย ตัวอย่าง P1

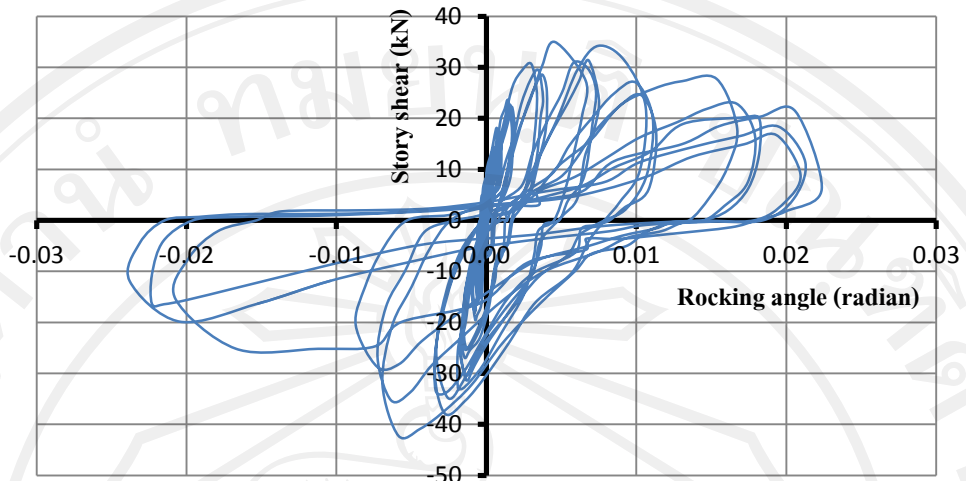


รูปที่ 4.47 ค่ามูมหมุนดัดที่คานด้านขวา ตัวอย่าง P1

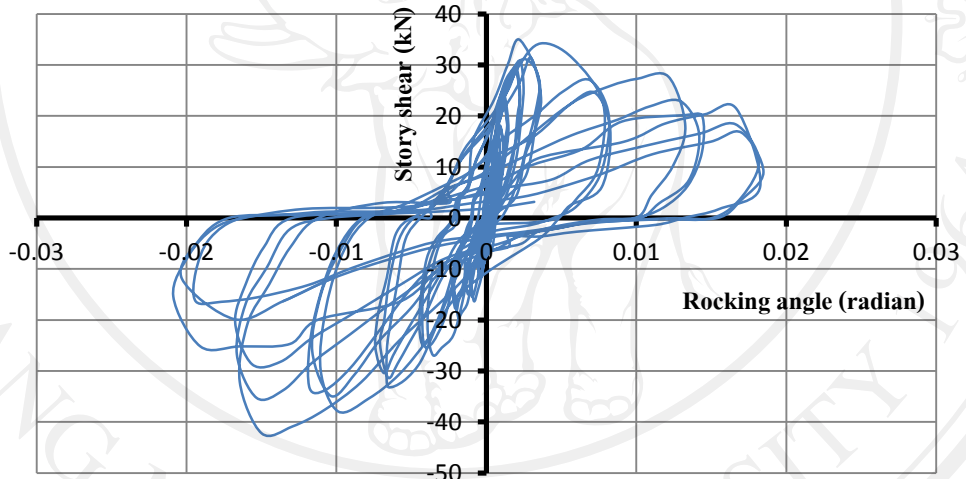
#### 4. ตัวอย่าง P2

สำหรับตัวอย่าง P2 นี้เป็นการเสริมเหล็กเสริมในแนวทแยงบริเวณจุดต่อซึ่งผลของการเสริมเหล็กนี้ลักษณะพฤติกรรมของค่ามูมหมุนเกร็งที่แตกต่างจากตัวอย่าง P1 โดยจะเห็นว่าการคงค้างของค่ามูมเกร็งที่หน้าเสาทั้งสองด้านซึ่งมีสาเหตุจากการเกิดการรูดไถลของเหล็กเสริมบนของคานและยังมีการแตกร้าวของคอนกรีตที่หลังคานส่งผลให้เมื่อทำการดันกลับจึงมีค่ามูมเกร็งคงค้าง และในช่วงท้ายของการทดสอบจะเห็นว่าเกิดลักษณะของ pinching อย่างชัดเจน สำหรับค่ามูมหมุนดัดนั้นจะเห็นว่าช่วงมีค่ามากเนื่องจากมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่ช่วงดังกล่าวส่งผลให้ค่าการเสียรูปเกิด

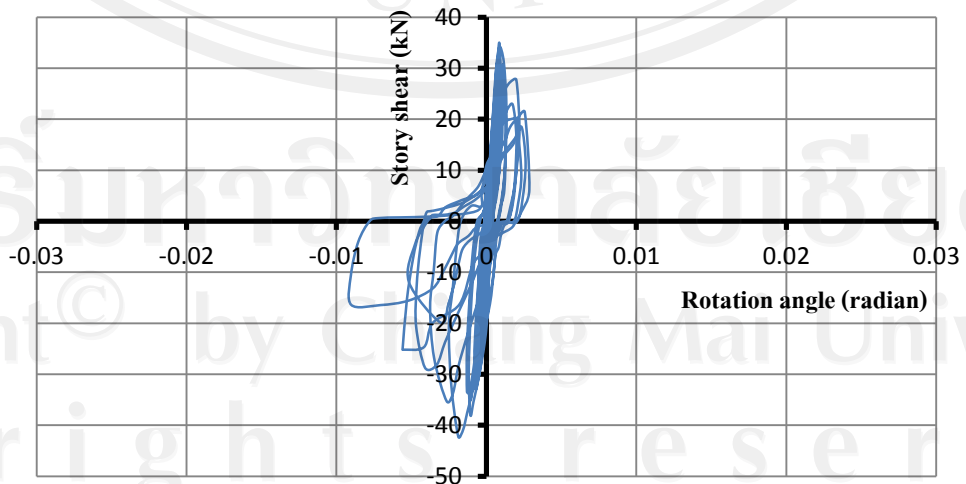
มาก



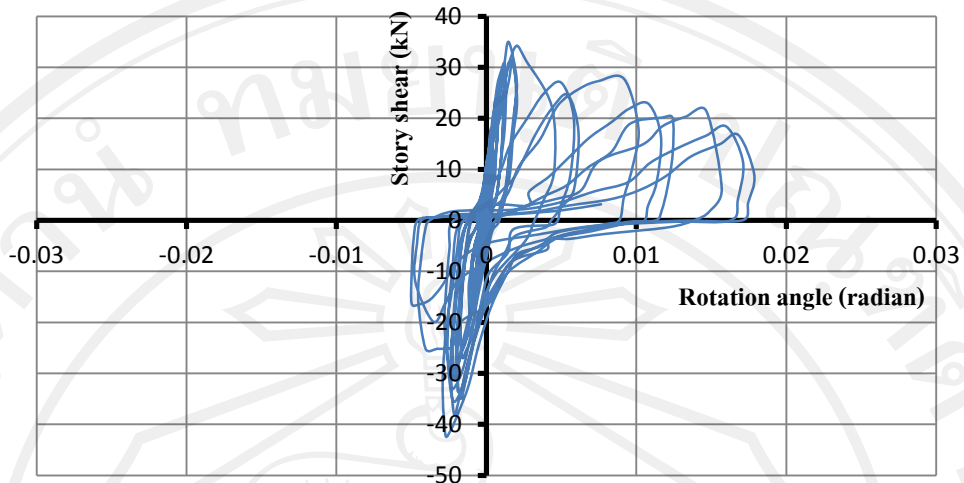
รูปที่ 4.48 ค่ามูมหมุนเกร็งที่หน้าเสาต้านซ้าย ตัวอย่าง P2



รูปที่ 4.49 ค่ามูมหมุนเกร็งที่หน้าเสาต้านขวา ตัวอย่าง P2



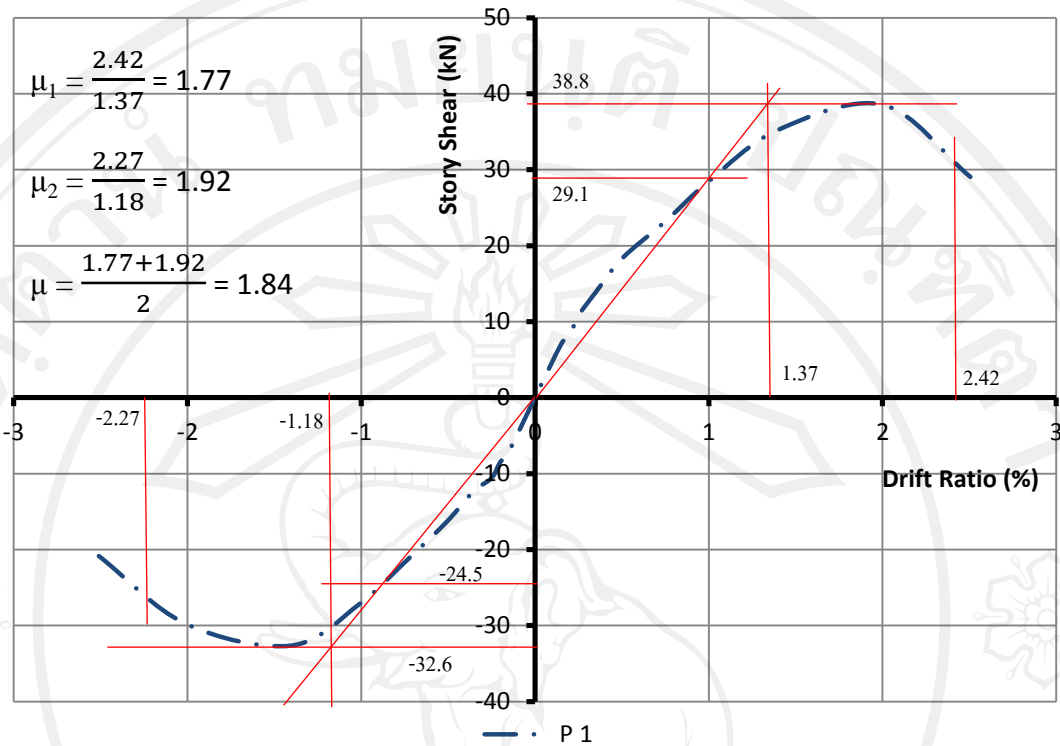
รูปที่ 4.50 ค่ามูมหมุนคัตที่คานต้านซ้าย ตัวอย่าง P2



รูปที่ 4.51 ค่ามอดูลค้ำที่คานด้านขวา ตัวอย่าง P2

#### 4.8 ความเหนียว (Ductility)

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาค่าความเหนียวโดยที่เสนอโดย Park (1989) ซึ่งได้เสนอการหาตำแหน่งที่ตัวอย่างเกิดการครากโดยใช้วิธี Secant และตำแหน่งที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติคือตำแหน่งที่ตัวอย่างมีกำลังต่ำกว่าค่าแรงสูงสุด 15-20 % ซึ่งค่าความเหนียวนี้กล่าวในหัวข้อนี้เป็นการบอกถึงความสามารถในการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างใดที่มีค่าความเหนียวมากจะเปรียบเสมือนยางที่สามารถบิดงอได้แต่ในตัวอย่างที่มีค่าความเหนือน้อยนั้นเปรียบเสมือนพลาสติกที่มีความเปราะเมื่อค้ำงอได้นิดหน่อยก็เกิดการแตกหักและในรูปที่ 4.52 เป็นตัวอย่างการหาค่าความเหนียวของตัวอย่าง P1 สำหรับผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยค่าความเหนียวที่แสดงนั้นประกอบด้วยค่าความเหนียวในการเคลื่อนที่ในทิศบวก การเคลื่อนที่ในทิศลบ และค่าเฉลี่ยของค่าความเหนียว โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวอย่างที่เป็นรูปแบบการเทในที่นั้นมีค่าความเหนียวมากกว่าตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเสียรูปของตัวอย่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีค่าน้อยกว่า โดยมีสาเหตุเนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างแบบเทที่แต่ในตัวอย่างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นความเป็นเนื้อเดียวกันบริเวณจุดเชื่อมต่อชิ้นส่วนต่างๆมีค่าน้อยกว่าส่งผลให้ความสามารถในการเสียรูปของตัวอย่างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.52 การหาค่าความเหนียวในตัวอย่าง P1

สำหรับตัวอย่างที่เป็นรูปแบบการเทในที่นี้พบว่าตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างที่ความเหนียวมากที่สุดคือตัวอย่าง M1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ออกแบบตามมาตรฐานของ ACI สำหรับการออกแบบโครงสร้างรับมือแผ่นดินไหวโดยความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นคือเกิดจุดหมุนพลาสติกที่หน้าเสาซึ่งเป็นจุดที่คาดการไว้ก่อนหน้านั้น และตัวอย่างที่มีค่าความเหนียวรองลงมาคือ M2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเสริมระดับกลางบริเวณจุดต่อและปลายเสาซึ่งสาเหตุที่ทำให้ตัวอย่างนี้มีค่าน้อยเนื่องจากตำแหน่งที่เกิดการครากของตัวอย่งนี้นั้นมีค่ามากแต่ตำแหน่งที่เกิดการวิบัตินั้นมีค่าใกล้เคียงกันส่งผลให้เมื่อนำค่าระยะเคลื่อนที่ ณ จุดครากไปเป็นตัวหารในการหาค่าความเหนียวส่งผลให้ค่าความเหนียวมีค่าน้อย

ตารางที่ 4.9 ค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	ค่าความเหนียว		
	ด้านบวก	ด้านลบ	ค่าเฉลี่ย
M1	4.44	4.08	4.26
M2	3.46	-	3.46
P1	1.77	1.92	1.84
P2	2.51	1.8	2.15

การเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นพบว่าทั้ง 2 ตัวอย่างมีค่าความเหนียวเท่าๆกันเนื่องจากตัวอย่างรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นเมื่อดูจากค่า envelope curve พบว่าในตัวอย่าง P1 และ P2 เมื่อผ่านจุดที่มีกำลังสูงสุดแล้วนั้นการลดลงของกำลังเกิดอย่างทันทีทันใดส่งผลให้ค่าความเหนียวมีค่าน้อย แสดงให้เห็นว่าการเสริมเหล็กในแนวทแยงบริเวณจุดต่อนั้นไม่มีผลทำให้ค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น

#### 4.9 ความเครียดในเหล็กเสริม (Strain )

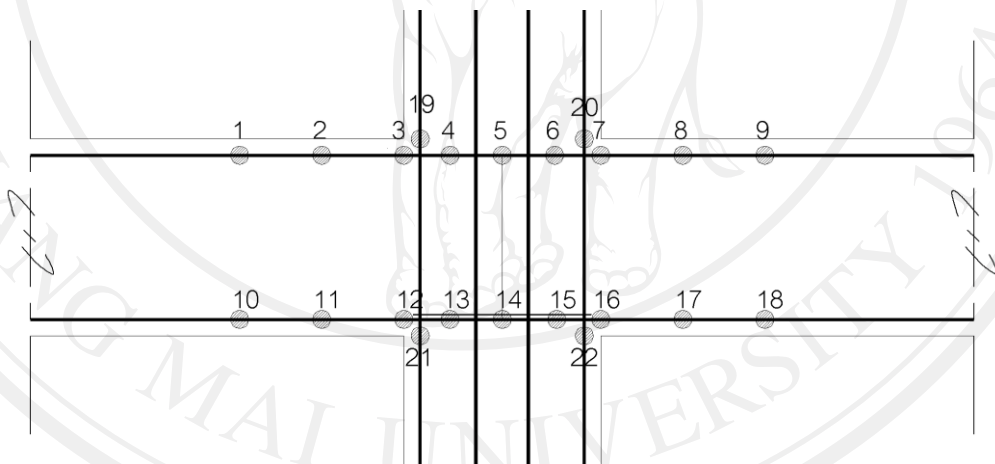
สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายการทำงานของเหล็กเสริมภายในโดยอ้างอิงจากค่าของความเครียดในเหล็กเสริม สำหรับตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องมืออ่านค่าความเครียดในเหล็กเสริม นั้นจะมีรูปร่างตำแหน่งแสดงในแต่ละตัวอย่างทดสอบโดยผลการทดสอบมีดังนี้

##### 1. ตัวอย่าง M1

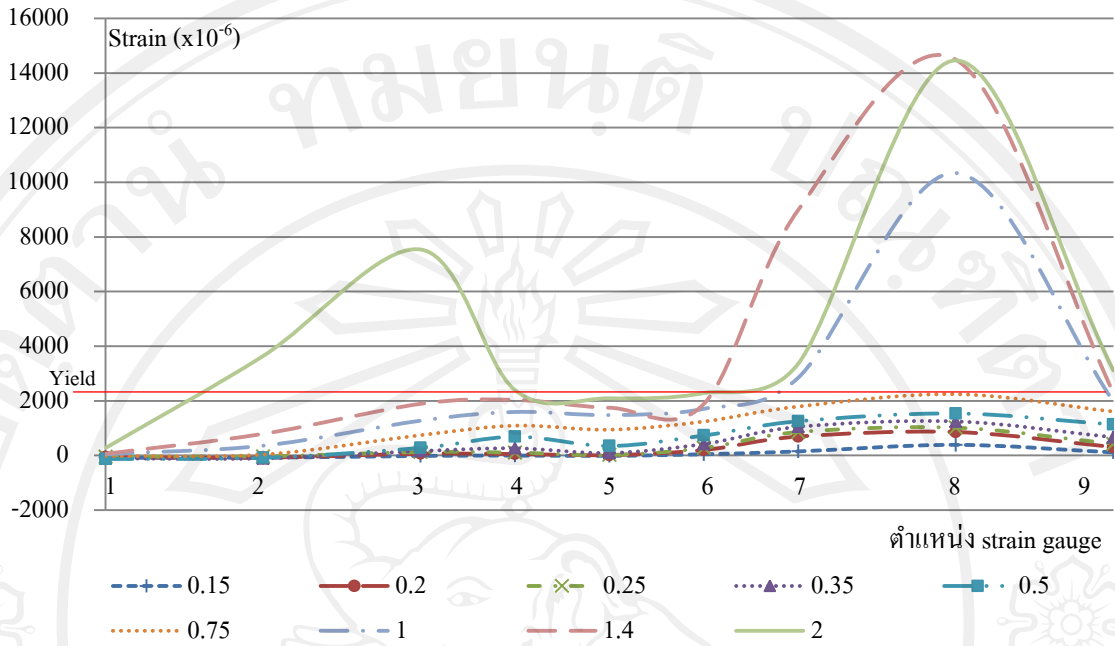
ตัวอย่างนี้เป็นตัวอย่างแบบเทในที่ซึ่งการวางเหล็กเสริมของคานานั้นประกอบด้วยเหล็กบนและเหล็กล่างเท่านั้น โดยเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กเสริมนั้นเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความยาวโดยไม่มี การต่อทาบเหล็กซึ่งตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง Strain gauge นั้นแสดงในรูปที่ 4.53 และค่าความเครียดของเหล็กเสริมบนของคานแสดงในรูปที่ 4.54 และ 4.55 โดยจากผลการทดสอบพบว่าในช่วงแรกของการทดสอบการทำงานของเหล็กเสริมยังคงเป็นไปตามทฤษฎีการรับแรงดัดของหน้าตัด โดยในช่วงของการผลัดตัวอย่างในทิศลบนั้นเหล็กบนของคานจะช่วยรับแรงกดแต่เมื่อตำแหน่งของเหล็กเสริมเข้าใกล้หน้าเสาด้านซ้ายแล้วพบว่ามีความเครียดเกิดขึ้นในเหล็กเสริมแสดงให้เห็นว่าแรงดัดในเหล็กเสริมบนของคานอีกฝั่งสามารถส่งผ่านจุดต่อได้สำหรับพฤติกรรมรับแรงของเหล็กเสริมนั้นพบว่าตำแหน่งที่เหล็กทำงานหนักคือหมายเลข 8 โดยจะเห็นว่าเมื่อตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 0.75 % นั้นค่าความเครียดในเหล็กเสริมที่ตำแหน่ง 8 นั้นมีค่าเท่ากับจุดครากและเมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากกว่า 2.00 % แล้วค่าแอมพลิจูด

ความเครียดเกิดความเสียหายจนไม่สามารถวัดค่าได้ เมื่อดูจากค่าความเครียดที่อ่านได้พบว่า ตำแหน่งที่เกิดจุดหมุนพลาสติกที่คานด้านขวาเกิดห่างจากหน้าเสาออกมาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของ ความลึกประสิทธิภาพของคานสอดคล้องกับความเสียหายภายนอก และในการเคลื่อนที่ในทิศลบนั้น พฤติกรรมการรับแรงเหมือนกับในทิศบวกโดยจะเห็นว่าในคานด้านซ้ายยังมีค่าความเครียดอยู่ซึ่งค่า เหล่านี้เกิดจากการคงค้างของค่าความเครียดในเหล็กเสริม (residual strain) เนื่องจากคุณสมบัติของ เหล็กผ่านจุดยืดหยุ่นไปแล้ว และในช่วงท้ายที่ค่าความเครียดของเหล็กเสริมลดลงนั้นเนื่องจากจุดที่ เสียหยมักมีคุณสมบัติเป็นจุดหมุน

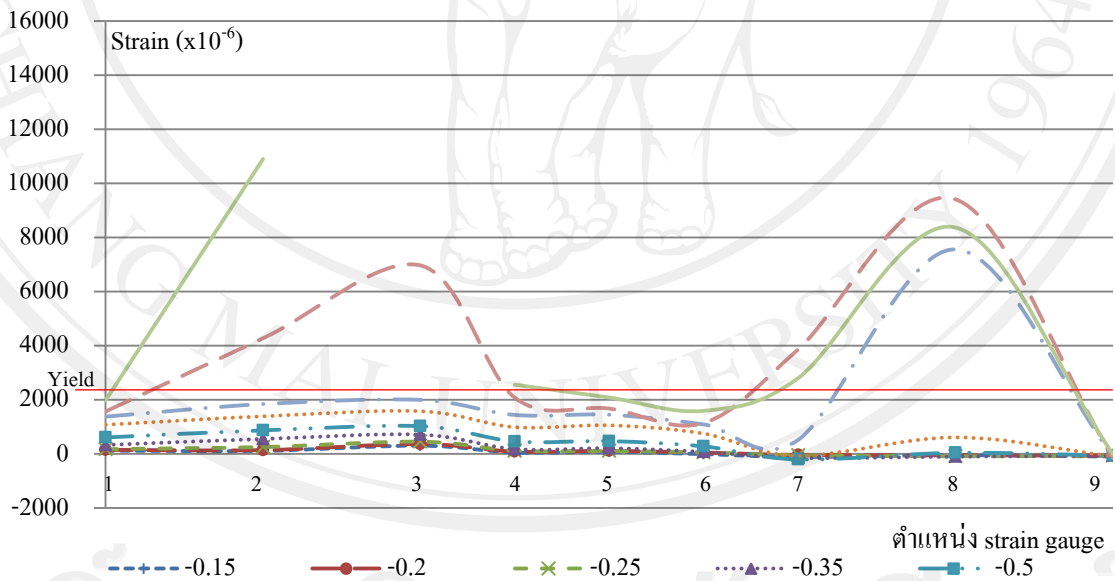
สำหรับการทำงานของเหล็กเสริมล่างของคานนั้นพฤติกรรมการเกิดความเครียดในเหล็ก เสริมนั้นคล้ายคลึงกับเหล็กบนทั้งตำแหน่งที่เกิดความเสียหายจนกลายเป็นจุดหมุนพลาสติกและ เห็นว่าที่ค่าระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากมายนั้นค่าความเครียดที่ตำแหน่งนอกสุดทั้ง 10 และ 18 มีค่ามากเนื่องจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นไปถึงตำแหน่งที่อ่านค่าส่งผลให้เหล็กต้องทำหน้าที่ รับแรงมากขึ้นเนื่องจากคอนกรีตสูญเสียความสามารถในการรับแรงไป



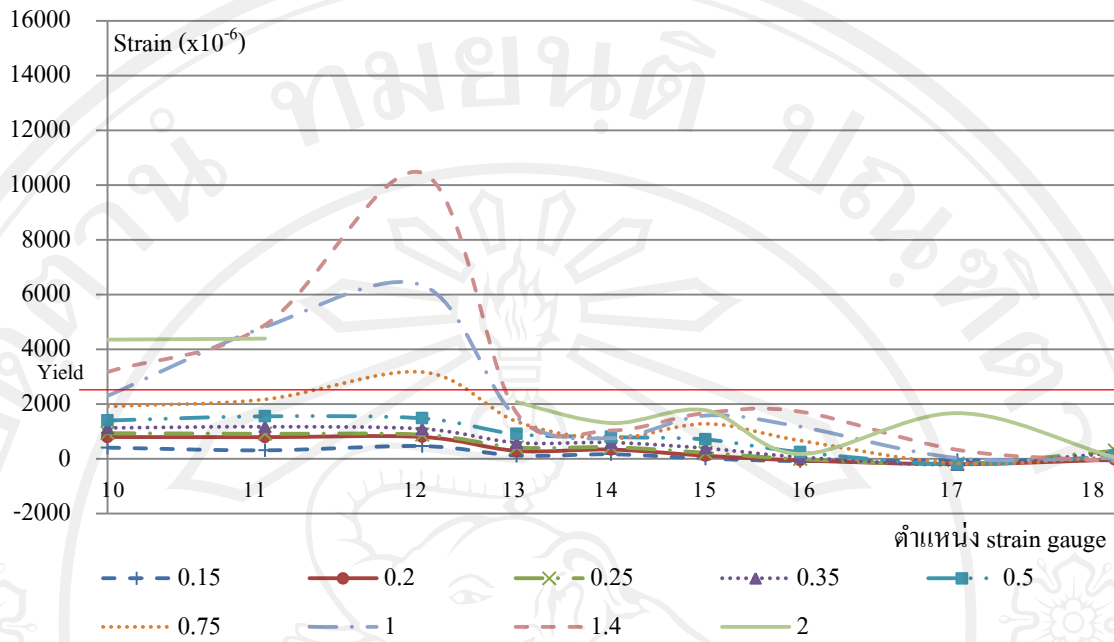
รูปที่ 4.53 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauge ตัวอย่าง M1



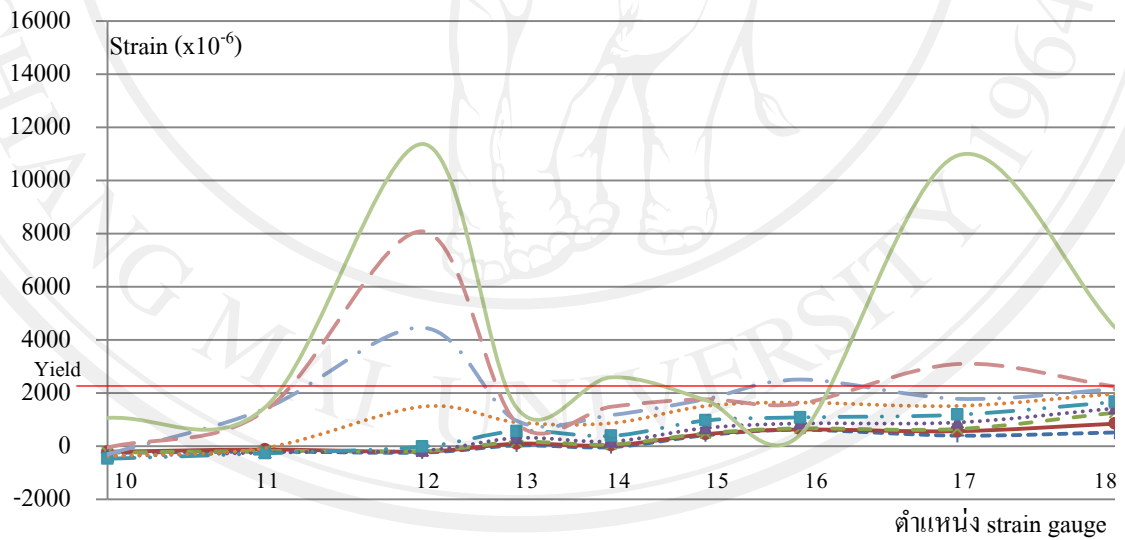
รูปที่ 4.54 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)



รูปที่ 4.55 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)



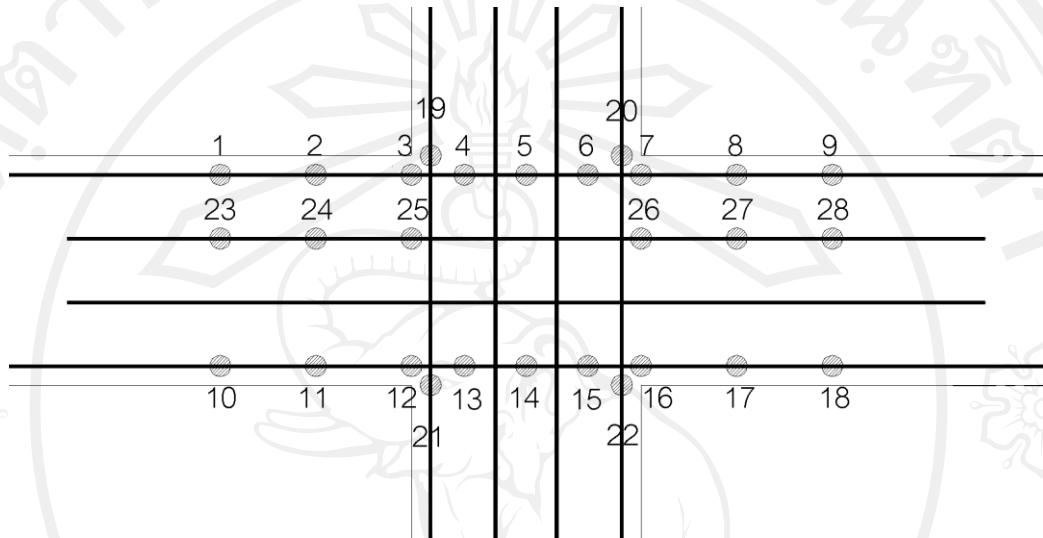
รูปที่ 4.56 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมล่างของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)



รูปที่ 4.57 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมล่างของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

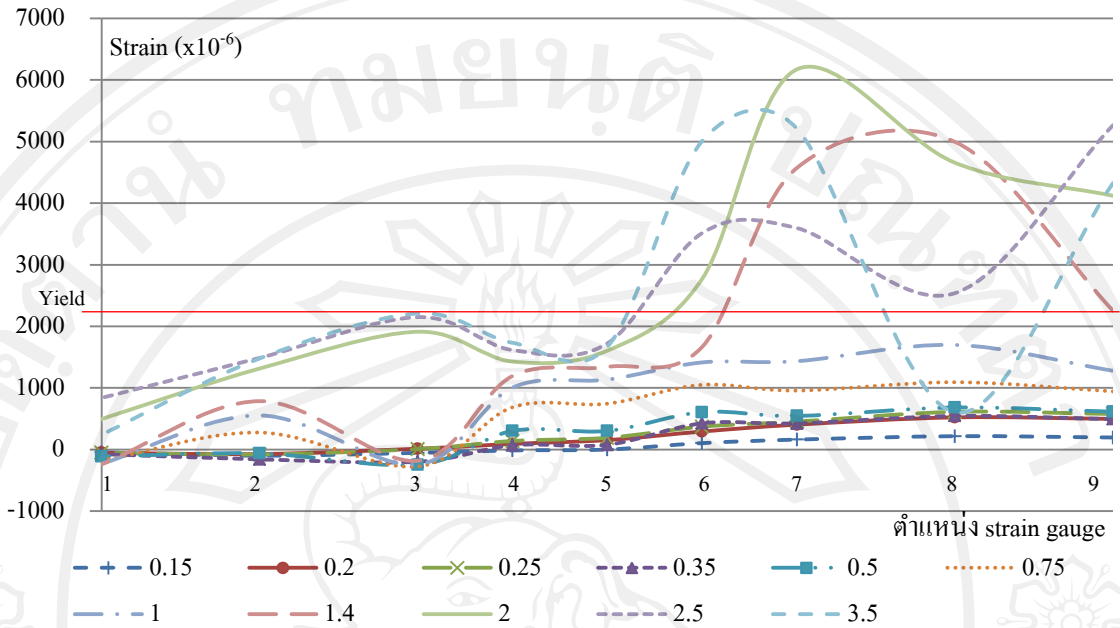
## 2. ตัวอย่าง M2

ในตัวอย่างนี้มีการเพิ่มเติมเหล็กเสริมระดับกลางที่บริเวณจุดต่อและปลายคานซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความเครียดของเหล็กเสริมนั้นแสดงในรูปที่ 4.58

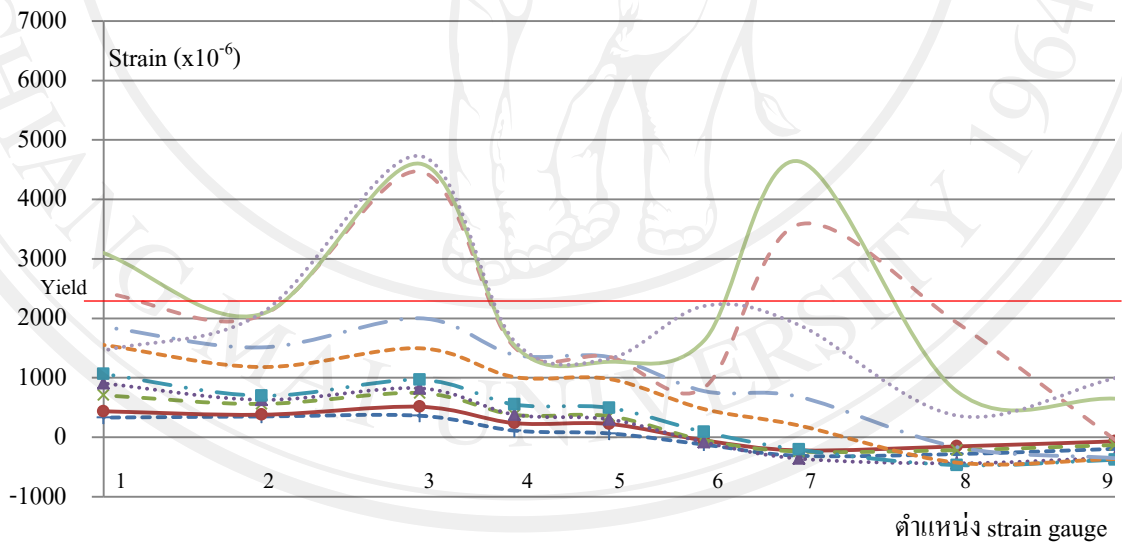


รูปที่ 4.58 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauge ตัวอย่าง M2

ค่าความเครียดของเหล็กเสริมบนของคานนั้นจากรูปที่ 4.59 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งที่ 7 เป็นจุดที่มีค่าความเครียดมากที่สุดโดยจะเห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 % นั้นค่าความเครียดของเหล็กเสริมเกินจุดครากส่งผลให้บริเวณหน้าเสาด้านขวาเกิดการเสีรูแบบพลาสติกสอดคล้องกับกราฟ envelope curve ของตัวอย่างนี้ที่ผ่านจุดครากที่ระยะเคลื่อนที่ดังกล่าว และเมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในทิศบวกมากขึ้นค่าความเครียดของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นไม่มากเนื่องจากอยู่ในช่วงที่ค่าแรงเฉือนในชั้นคงที่และในส่วน of ค่าความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อผลักตัวอย่างในทิศลบนั้นแสดงในรูปที่ 4.60 จะเห็นว่าค่าความเครียดของเหล็กเสริมมีค่าน้อยกว่าด้านบวกเนื่องจากที่คานด้านซ้ายนี้เกิดการวิบัติที่ระยะสิ้นสุดของเหล็กเสริมระดับกลางจนกลายเป็นจุดหมุนพลาสติกที่ตำแหน่งนั้นส่งผลให้แรงที่เข้ามาสู่หน้าเสามีค่าน้อยลงจึงเป็นสาเหตุให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความเครียดน้อย สำหรับที่หน้าเสาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการคงค้างของค่าความเครียดในเหล็กเสริมซึ่งสิ่งนี้เป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดลักษณะการแนบเข้าหาจุดศูนย์กลางของเส้นกราฟ (pinching) และการลู่ออกจากจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟวนรอบโดยรวม (hysteresis)



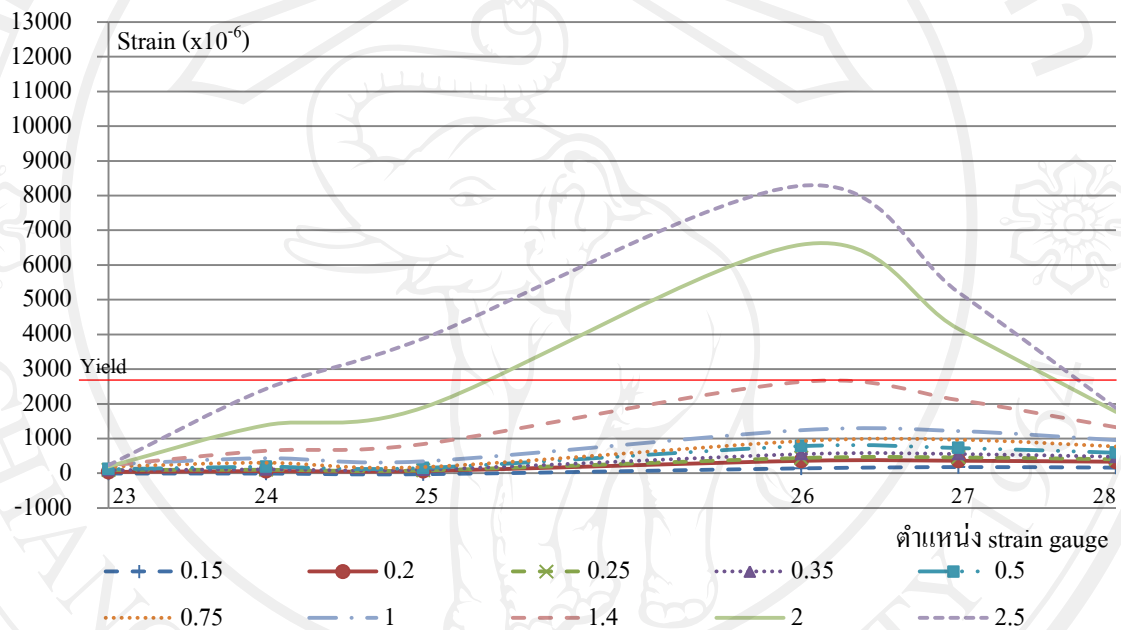
รูปที่ 4.59 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)



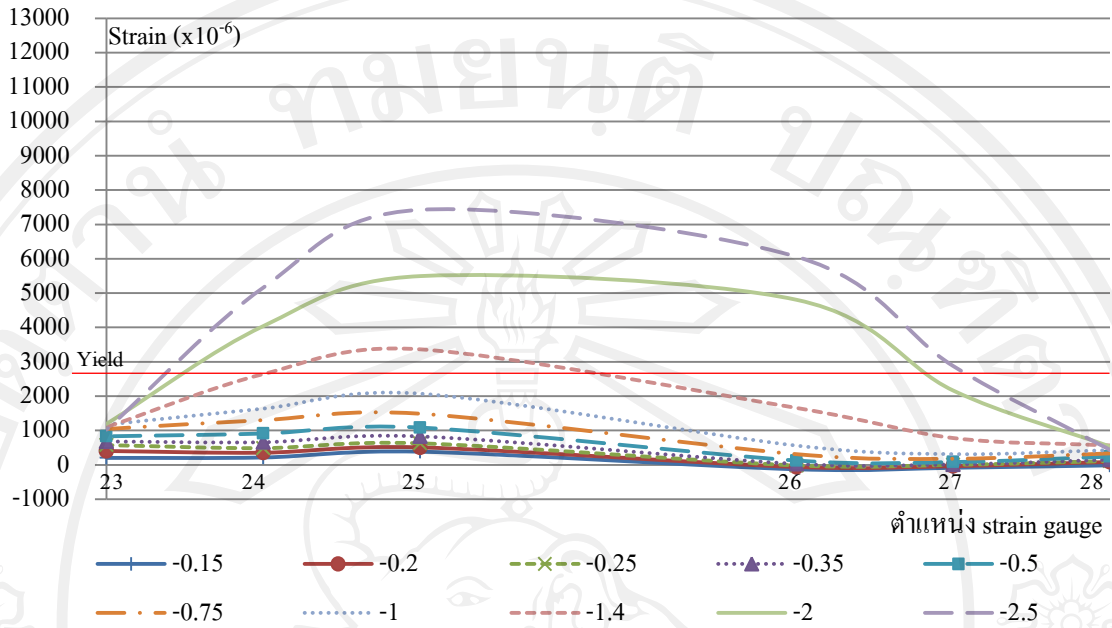
รูปที่ 4.60 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

สำหรับเหล็กเสริมระดับกลางที่ทำการเสริมเพิ่มเติมเข้าไปบริเวณจุดต่อและปลายคานนั้นสามารถทำให้จุดหมุนพลาสติกย้ายไปเกิดที่ภายในคานได้โดยพฤติกรรมการรับแรงนั้นจะทำการอธิบายในรูปแบบของค่าความเครียดในเหล็ก ซึ่งค่าความเครียดในเหล็กเสริมระดับกลางนี้แสดงใน

รูปที่ 4.61 และ 4.62 โดยจะเห็นว่าจุดที่เหล็กเสริมมีค่าความเครียดมากที่สุดคือที่บริเวณหน้าเสาทั้งกรณีของการผลักในทิศทางบวกและทิศลบ ระยะที่เหล็กเสริมระดับกลางเกิดการร้าวคือที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 % สอดคล้องกับค่า envelope curve ที่เกิดจุดร้าวก่อนระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นนี้เช่นกันแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันระหว่างเหล็กเสริมหลักและเหล็กเสริมระดับกลางที่ช่วยทำหน้าที่ในการต้านทานการเคลื่อนที่เมื่อตัวอย่างมีแรงกระทำด้านส่งผลให้ตัวอย่างนี้มีค่าแรงเฉือนในชั้นมากที่สุด



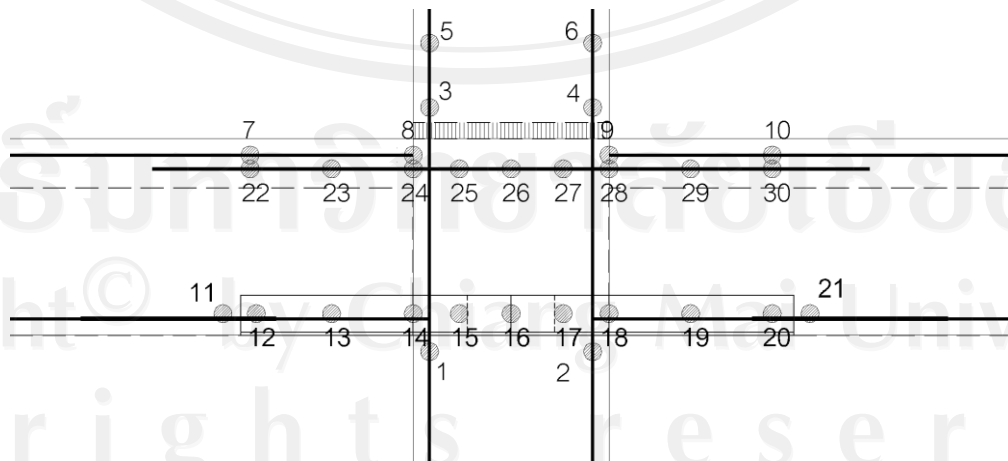
รูปที่ 4.61 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมระดับกลางที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)



รูปที่ 4.62 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมระดับกลางที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

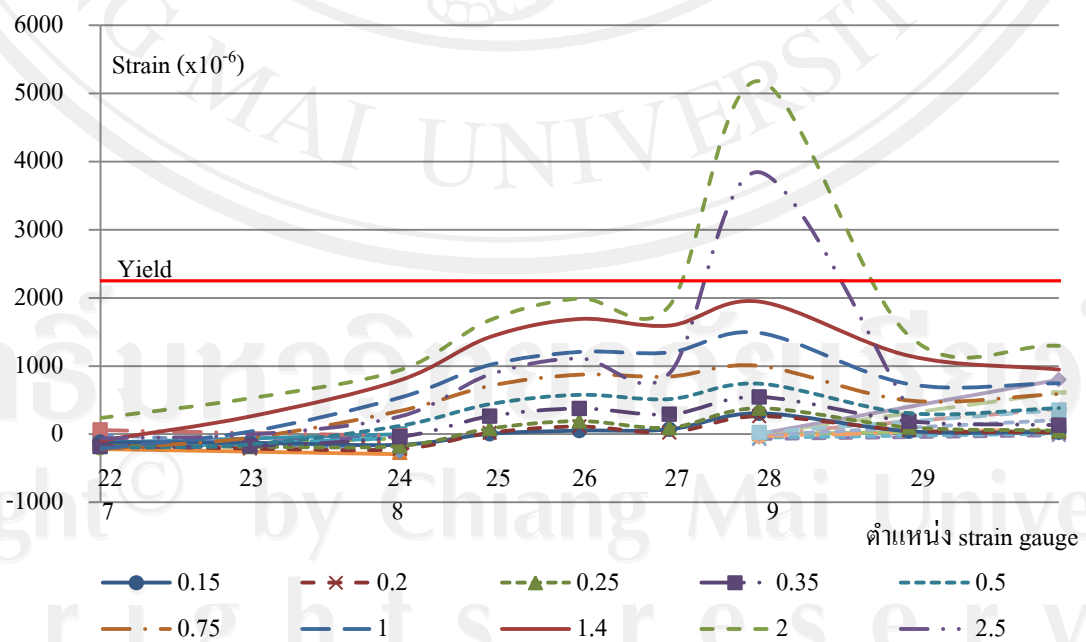
3. ตัวอย่าง P1

ตัวอย่างนี้เป็นรูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยเป็นการนำชิ้นส่วนเสาคอนกรีตเข้ากับชิ้นส่วนคานตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ซึ่งในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนคานนั้นจะต้องมีการทาเหล็กเพื่อให้สามารถถ่ายแรงระหว่างกันได้ โดยในตัวอย่างนี้ตำแหน่งที่ติดตั้ง strain gauge แสดงในรูปที่ 4.63 ซึ่งจะเห็นว่าการติด strain gauge ทั้งเหล็กข้ออ้อยและเหล็กหน้าตัดตัว T ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นมาเชื่อมต่อกัน และยังมี การติด strain gauge เปรียบเทียบระหว่างแรงที่เกิดในเหล็กต่อทาบและเหล็กเสริมในชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปที่ตำแหน่งเดียวกัน

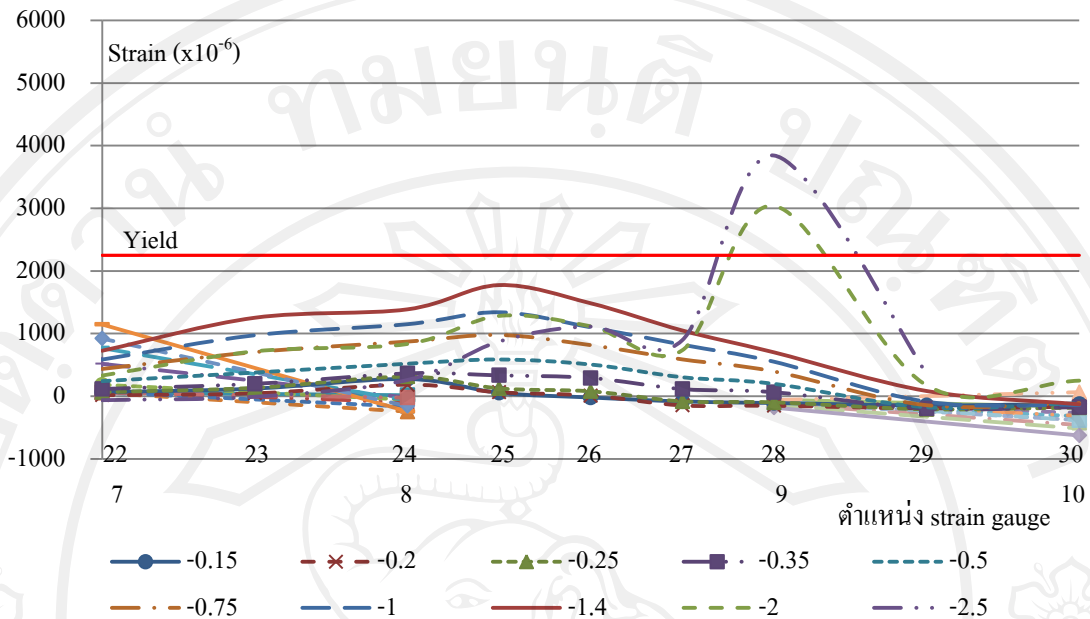


รูปที่ 4.63 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauge ตัวอย่าง P1

ค่าความเครียดของเหล็กเสริมบนของตัวอย่างนี้จะเห็นว่าการทำงานของเหล็กเสริมภายในนั้นจะเห็นว่าการยึดตัวของเหล็กเสริมบนในตัวอย่างนี้เกิดขึ้นน้อยและส่วนใหญ่ยึดตัวไม่ถึงจุดคราก และเมื่อดูจากความเสียหายที่เกิดกับตัวอย่างนี้ในภาคผนวกแล้วพบว่าลักษณะของรอยร้าวที่เกิดที่หลังคานนั้นเป็นลักษณะของการเกิดการรูดไถลของเหล็กเสริมเมื่อประกอบกับค่าความเครียดของเหล็กเสริมแล้วแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของผลการทดสอบ และผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เหล็กเสริมรับแรงมากคือบริเวณภายในจุดต่อคาน-เสา การเชื่อมต่อชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปเหล็กบนของตัวอย่างนี้ใช้วิธีการเชื่อมต่อโดยการทาเหล็กโดยกราฟในรูปที่ 4.64 และ 4.65 นั้นได้ทำการแสดงค่าของการถ่ายแรงบริเวณต่อทาเหล็กระหว่างเหล็กทาและเหล็กเสริมของชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปโดยอ้างอิงตำแหน่งของ strain gauge จากรูปที่ 4.63 จะเห็นว่าตำแหน่งที่เปรียบเทียบการถ่ายแรงของการทาเหล็กคือตำแหน่ง 7 , 8 , 9 , 10 เทียบกับ 22 , 24 , 28 , 30 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันผลที่ได้พบว่าการถ่ายแรงที่ตำแหน่ง 8 และ 9 นั้นเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากค่าความเครียดของเหล็กมีค่าน้อยต่างจากค่าที่ได้จากเหล็กทาที่มีค่ามาก โดยมีสาเหตุเนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณปลายของชิ้นส่วนคานส่งผลให้ระยะที่เหล็กมีการทากันนั้นมีน้อยจึงทำให้การถ่ายแรงเกิดไม่สมบูรณ์ แต่ที่ตำแหน่งห่างจากหน้าเสาออกมาพบว่าการถ่ายแรงระหว่างกันเกิดได้อย่างดีเมื่อดูจากค่าความเครียดของเหล็กเสริมในชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปและเหล็กที่ทามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และจุดที่มีการเสีรูปร่างมากเมื่อมีแรงกระทำด้านข้างคือบริเวณหน้าเสาเนื่องจากค่าความเครียดของเหล็กเสริมที่บริเวณดังกล่าวมีค่ามากที่สุดและที่หน้าเสาด้านขวาเหล็กเสริมบนเกิดการคราก

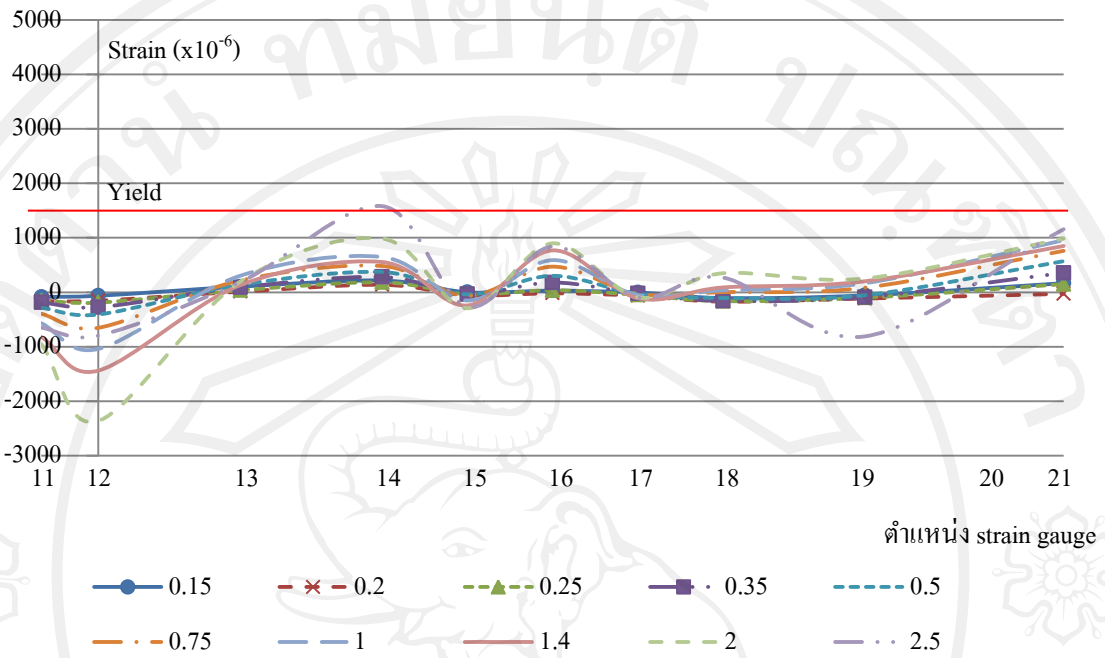


รูปที่ 4.64 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)

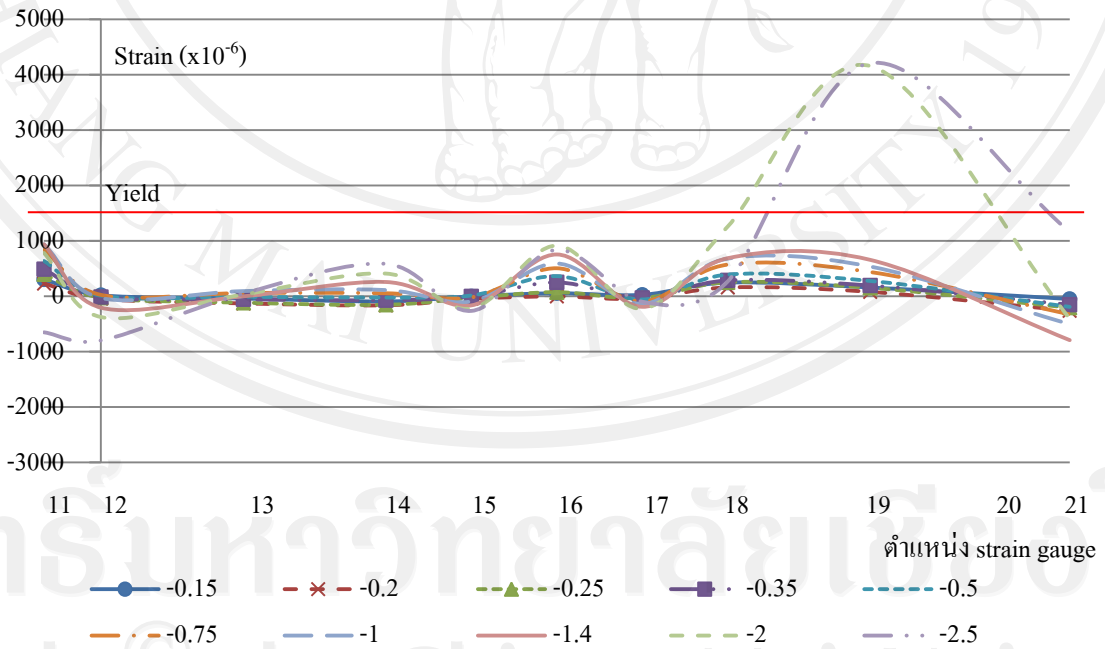


รูปที่ 4.65 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

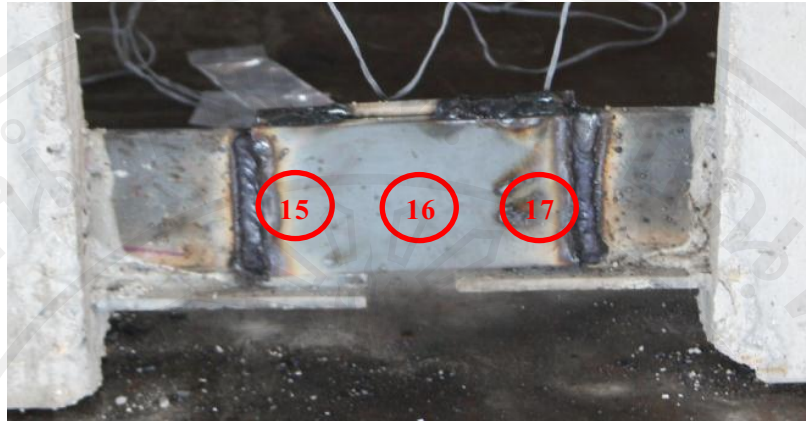
ผลของค่าความเครียดในเหล็กของเหล็กเสริมล่างในตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าการทำงานของเหล็กเสริมล่างนั้นมีค่าน้อยเนื่องจากค่าความเครียดของเหล็กเกิดขึ้นน้อยแต่เมื่อดูจากค่าความเครียดในเหล็กนั้นที่ตำแหน่ง 15 และ 17 นั้นมีค่าน้อยเนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าวบริเวณที่เป็นรอยเชื่อมระหว่างแผ่นประทับดังแสดงในรูปที่ 4.68 ทำให้เหล็กบริเวณดังกล่าวแข็งเนื่องจากรอยเชื่อมส่งผลให้ค่าความเครียดที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าน้อย สำหรับค่าความเครียดในเหล็กหน้าตัดตัว T นั้นจะเห็นว่ามีค่าแปรปรวนไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยมีสาเหตุเนื่องจากเหล็กหน้าตัดตัว T นั้นมีความหนาแน่นจึงมีทั้งส่วนที่รับแรงอัดและแรงดึงเมื่อมีแรงดัดกระทำโดยทางผู้วิจัยได้ติดตั้ง strain gauge ที่ตำแหน่งแกนสะเทินของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 4.69 แต่เมื่อทำการทดสอบจริงแรงที่กระทำต่อเหล็กหน้าตัดตัว T ไม่ได้กระทำผ่านแกนสะเทินของหน้าตัดส่งผลให้ค่าความเครียดที่ได้มีความแปรปรวนแต่ค่าที่แสดงพฤติกรรมการรับแรงจริงของหน้าตัดคือที่ตำแหน่งหน้าเสาโดยจะเห็นว่าเมื่อทำการโยกตัวอย่างในทิศบวกนั้นที่ตำแหน่งหน้าเสาด้านซ้ายแรงในเหล็กเป็นแรงดึงและที่หน้าเสาด้านขวามีแรงดึงเล็กน้อยโดยแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีระยะโยกมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าเหล็กหน้าตัดตัว T ที่อยู่ในจุดต่อนั้นสามารถรับได้ส่งผลให้แรงดึงจากฝั่งซ้ายสามารถส่งผ่านมาถึงฝั่งขวาได้และจะเห็นว่าการยึดตัวของเหล็กนั้นส่วนใหญ่ยังไม่ถึงจุดคราก ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.0 % ซึ่งเป็นระยะก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการวิบัติจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ในทิศลบนั้นค่าความเครียดในเหล็กที่ตำแหน่ง 19 มีค่ามากแสดงให้เห็นถึงการยึดตัวอย่างรุนแรงที่ตำแหน่งดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงจุดที่เกิดการวิบัติร่วมกับการรูดไหลของเหล็กบนของคาน



รูปที่ 4.66 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมล่างของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)



รูปที่ 4.67 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมล่างของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)



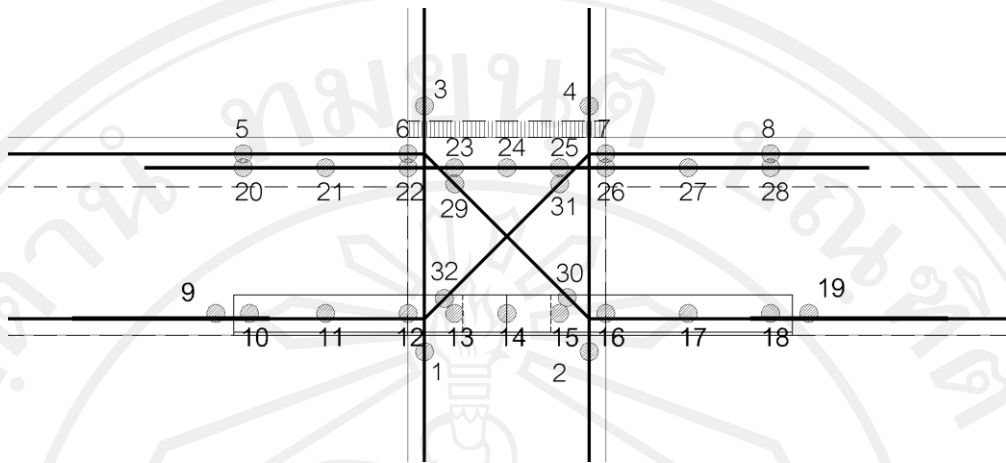
รูปที่ 4.68 ตำแหน่ง strain gauge หมายเลข 15 และ 17



รูปที่ 4.69 การติด strain gauge ที่แกนสะเทินของเหล็กหน้าตัดตัว T

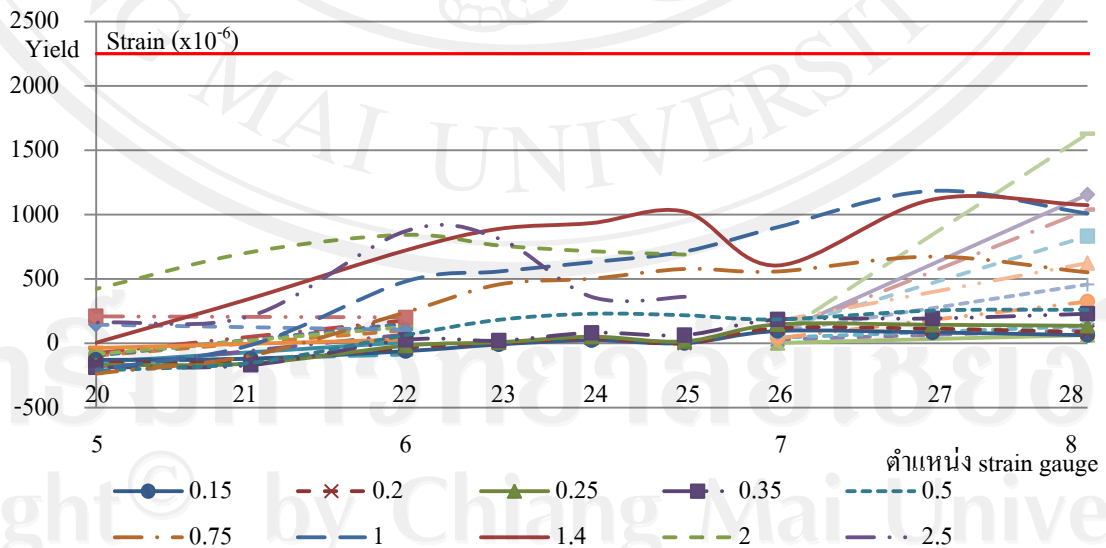
#### 4. ตัวอย่าง P2

สำหรับตัวอย่างนี้เป็นตัวอย่างที่มีการเพิ่มเติมรายละเอียดของการเสริมเหล็กบริเวณจุดต่อเพิ่มเติมจากตัวอย่าง P1 ซึ่งสิ่งที่มีการเพิ่มเติมสำหรับตัวอย่งนี้นั้นเป็นการเพิ่มเติมเหล็กเสริมในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยตำแหน่งที่มีการติดตั้ง strain gauge นั้นแสดงในรูปที่ 4.70

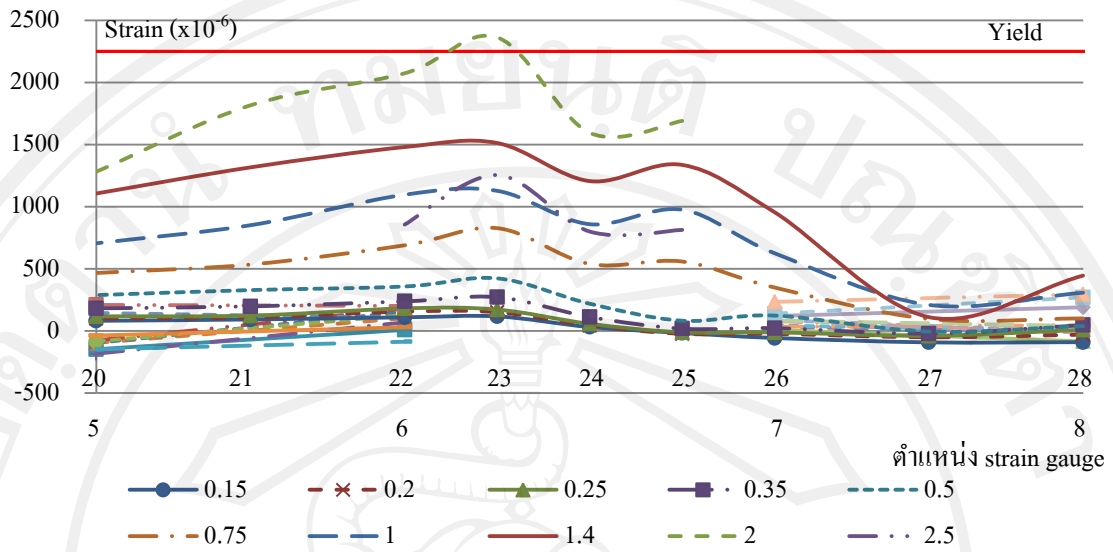


รูปที่ 4.70 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauge ตัวอย่าง P2

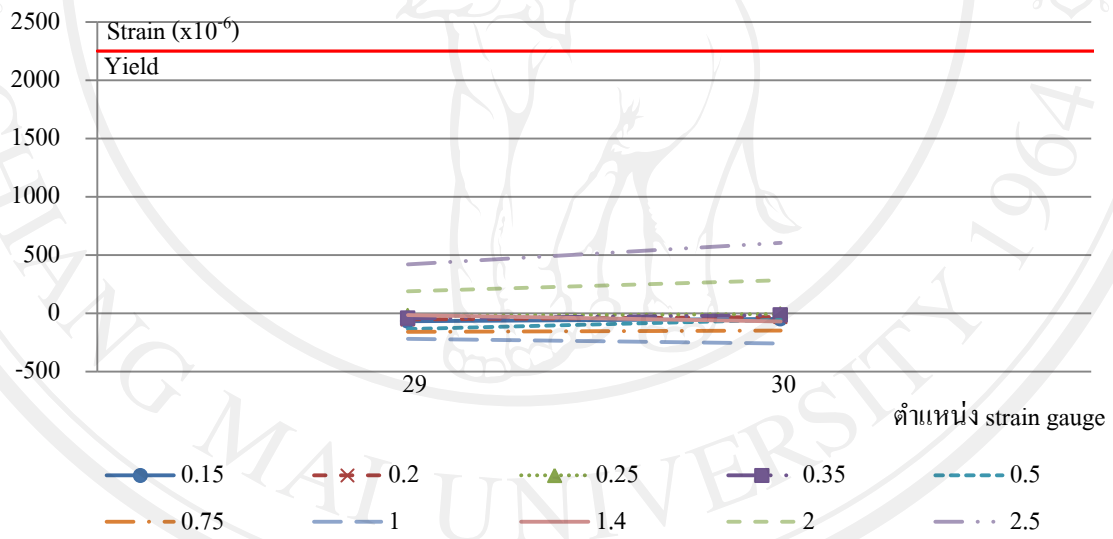
สำหรับค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของตัวอย่างนี้มีแนวโน้มของพฤติกรรมของค่าความเครียดในเหล็กเสริมสอดคล้องกับตัวอย่าง P1 แต่ในตัวอย่าง P2 นี้เหล็กทาบระหว่างชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปที่อยู่บริเวณจุดต่อนั้นมีค่าความเครียดน้อยกว่าตัวอย่าง P1 เนื่องจากเหล็กเสริมในแนวทแยงที่เพิ่มเติมมีส่วนช่วยในการรับแรงที่เกิดขึ้นซึ่งรูปที่ 4.73 และ 4.74 แสดงให้เห็นถึงค่าความเครียดของเหล็กเสริมแนวทแยงที่ช่วยในการรับแรงจะเห็นได้จากค่าความเครียดที่มีค่ามากและใกล้เคียงจุดคราก เมื่อดูจากผลที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมแนวทแยงบริเวณจุดต่อมีส่วนช่วยในการรับแรงที่เกิดภายในบริเวณจุดต่อ



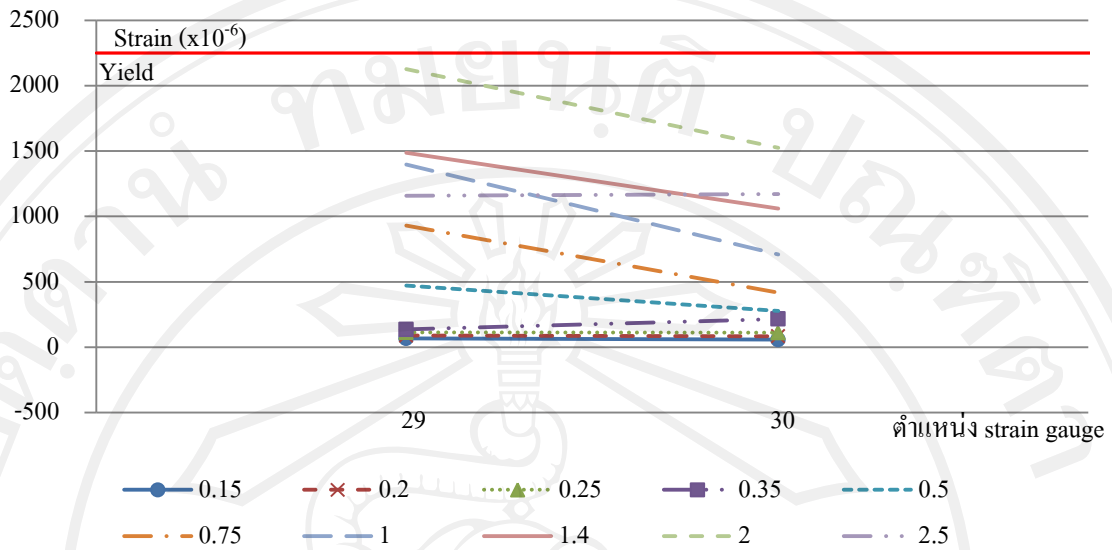
รูปที่ 4.71 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศทาง)



รูปที่ 4.72 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมบนของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

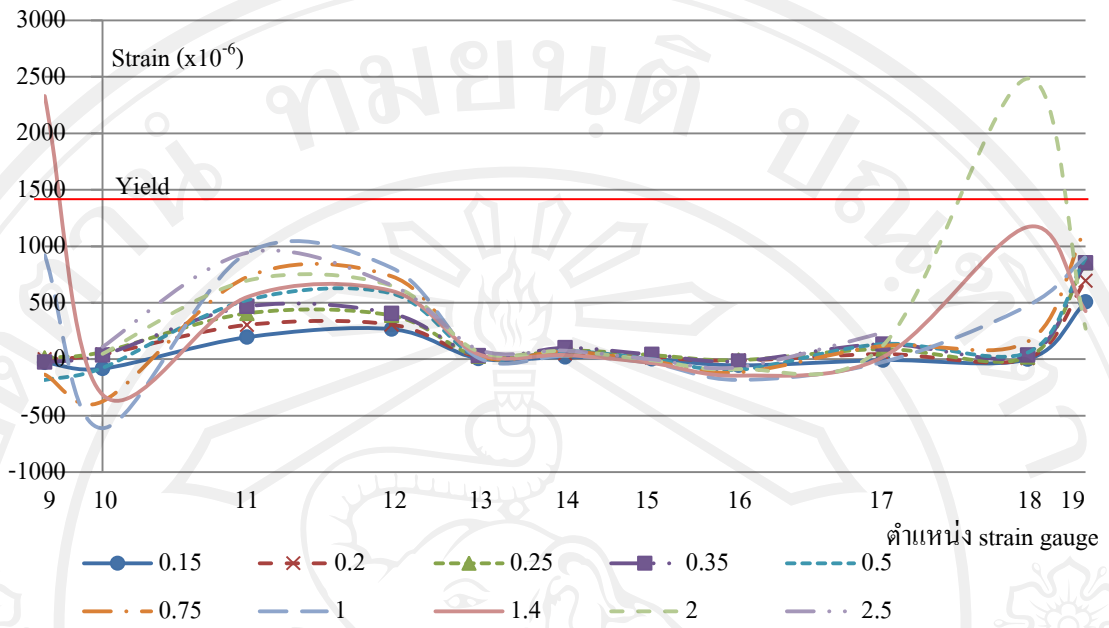


รูปที่ 4.73 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมแนวทแยงที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)

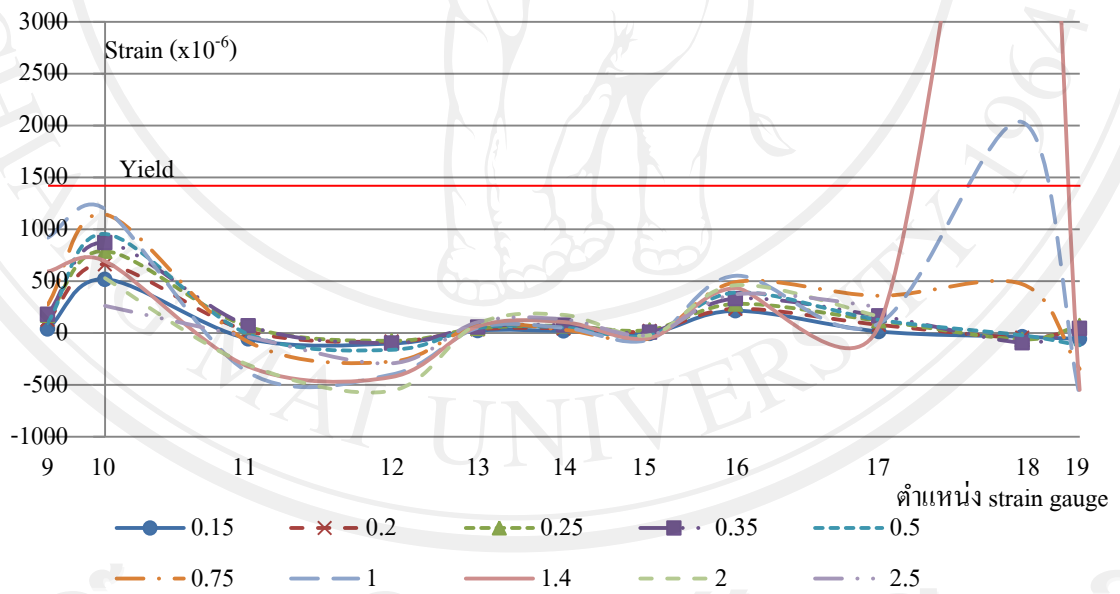


รูปที่ 4.74 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมแนวทแยงที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

ในส่วนของค่าความเครียดของเหล็กหน้าตัดตัว T พบว่าการยึดตัวของเหล็กหน้าตัดตัว T นั้นมีค่าน้อย และพฤติกรรมการรับแรงนั้นสอดคล้องกับความเป็นจริงและค่าความเครียดของเหล็กประกับที่เชื่อมต่อกันนั้นมีค่าน้อยเนื่องจากมีเหล็กเสริมแนวทแยงช่วยรับแรงที่เกิดภายในจุดต่อ แต่จุดที่น่าสนใจของตัวอย่างทั้งสองตัวนี้คือค่าความเครียดของเหล็กหน้าตัดตัว T ที่ปลายนอกสุดและเหล็กข้ออ้อยที่เข้าเชื่อมต่อกับเหล็กหน้าตัดตัว T ที่มีค่าความเครียดสลับทิศกับพฤติกรรมการรับแรง โดยจะเห็นว่าในรูปที่ 4.75 ที่ตำแหน่ง 18 นั้นค่าความเครียดมีค่ามากตั้งแต่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 % และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถอ่านค่าได้เมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากกว่า 2.00 % แต่ที่ตำแหน่ง 19 นั้นเป็นเหล็กข้ออ้อยที่เข้ามาเชื่อมต่อกลับมีค่าความเครียดเล็กน้อย



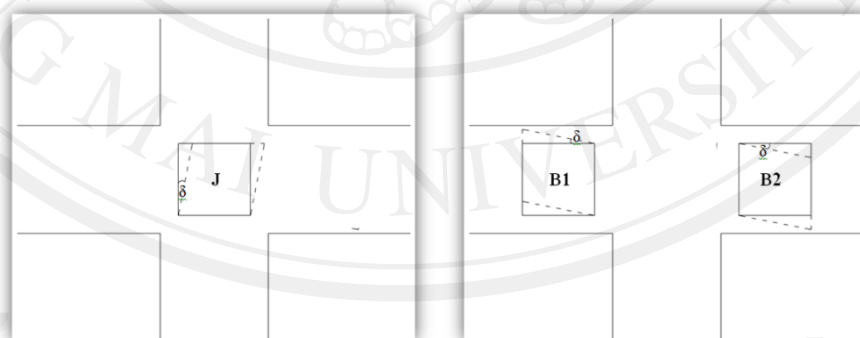
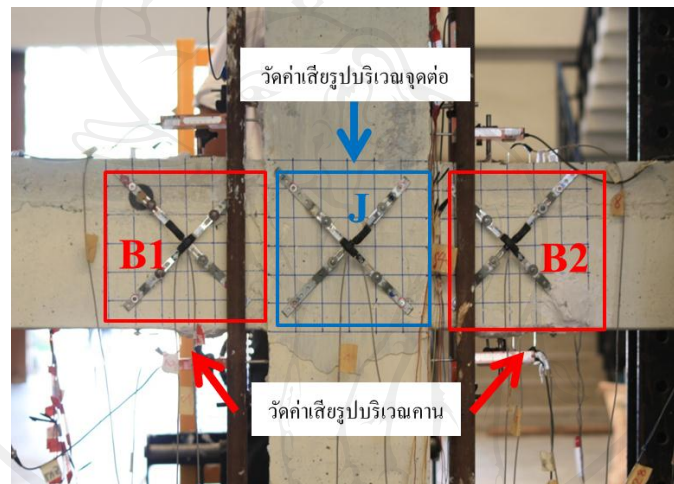
รูปที่ 4.75 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมล่างของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศบวก)



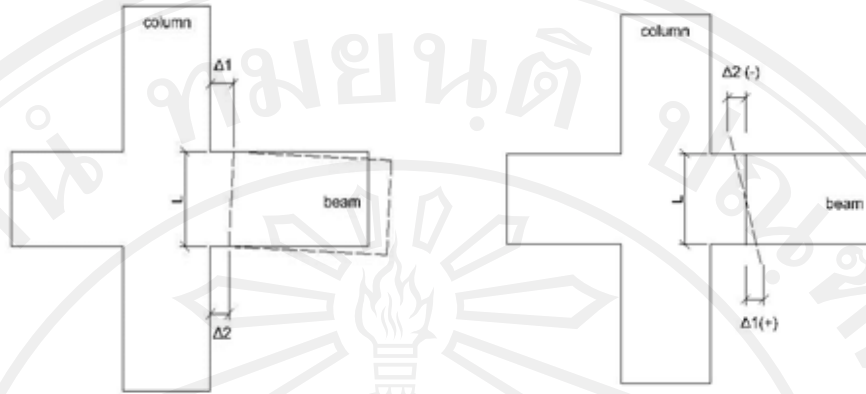
รูปที่ 4.76 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมล่างของคานที่ drift ratio ต่างๆ (เคลื่อนที่ในทิศลบ)

#### 4.10 วิเคราะห์การเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบถึงปริมาณการเสียรูปที่ตำแหน่งต่างๆในตัวอย่างทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ถึงจุดที่เป็นจุดอ่อนแอของตัวอย่างทดสอบ สำหรับการอ้างอิงถึงจุดต่างๆที่ได้กล่าวในหัวข้อนี้สามารถดูได้จากรูป 4.77 และ 4.78 ซึ่งประกอบด้วยโซน J เป็นการวัดการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณพื้นที่จุดต่อ และโซน B2 เป็นการวัดการเสียรูปที่เนื่องจากแรงเฉือนบริเวณปลายคานด้านขวา ในส่วนของการวัดการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดนั้นประกอบด้วยค่า มุมเกร็งซึ่งเป็นค่าการเสียรูปที่บริเวณหน้าเสา และมุมมดัดซึ่งเป็นการวัดการเสียรูปที่เกิดภายในคาน โดยผลการทดสอบที่ได้มีดังนี้



รูปที่ 4.77 การวัดการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน

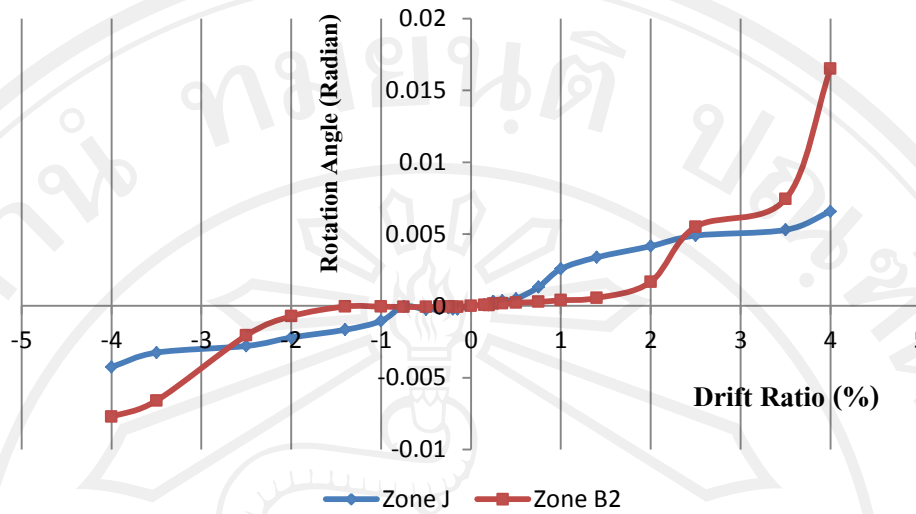


รูปที่ 4.78 การวัดการเสียรูปเนื่องจากแรงคด

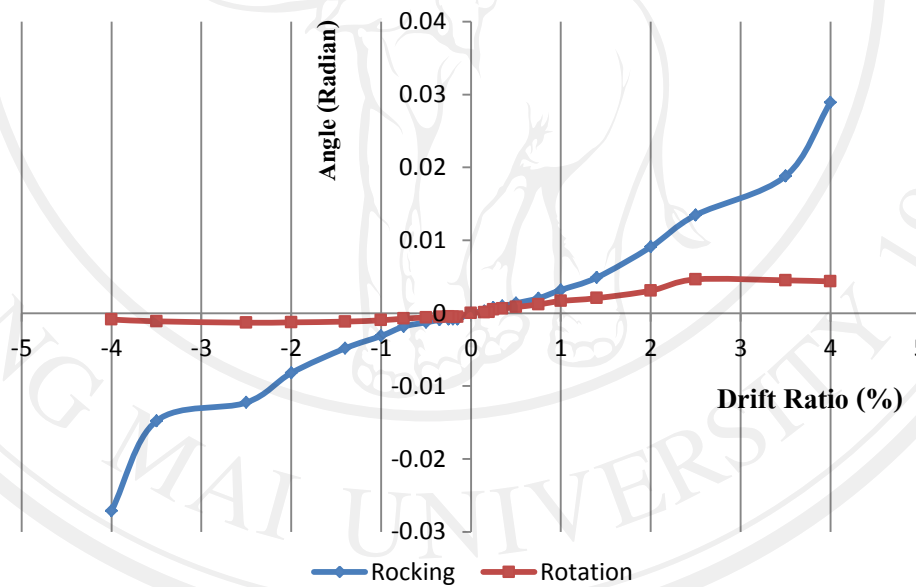
#### ตัวอย่าง M1

สำหรับการเสียรูปเนื่องจากเมื่อนั้นจุดที่ทำการวัดค่าคือบริเวณจุดต่อคาน-เสา และบริเวณปลายคานดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้โดยจากกราฟในรูปที่ 4.79 ที่แสดงค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเมื่อนั้นจะเห็นว่าในช่วงแรกของการให้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างแก่ตัวอย่างนั้นพบว่าค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเมื่อนั้นบริเวณจุดต่อเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณปลายคานซึ่งบริเวณปลายคานในช่วงแรกนั้นการเสียรูปเกิดขึ้นน้อย และเมื่อดูจากอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการเสียรูปบริเวณจุดต่อนั้นเพิ่มขึ้นในอัตราที่เกือบจะคงที่ แต่สำหรับการเสียรูปบริเวณปลายคานนั้นจะเห็นว่าในช่วงแรกที่เกิดขึ้นน้อยแต่ที่การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.50 % จะเห็นว่าค่าการเสียรูปเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีอัตราการเสียรูปเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการทดสอบนั้นจุดที่เสียหายจากแรงเมื่อนั้นเกิดภายในบริเวณจุดต่อคาน-เสามากกว่าแต่เมื่อระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพิ่มมากขึ้นแล้วกลับพบว่าความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคานมากกว่าแทน โดยมีสาเหตุเนื่องจากการก้ำกักรับแรงเมื่อนั้นของคานมีค่าน้อยกว่าบริเวณจุดต่อเมื่อเหล็กเสริมภายในคานเกิดการครากแล้วส่งผลให้การเสียรูปเกิดขึ้นอย่างมาก

ในส่วนของค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงคดที่เกิดขึ้นที่บริเวณหน้าเสาและภายในคานดูได้จากรูปที่ 4.80 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าการเสียรูปที่บริเวณหน้าเสาเกิดมากกว่าอย่างชัดเจนโดยจะเห็นว่าค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงคดที่เกิดขึ้นภายในคานนั้นเกิดขึ้นน้อยมากแตกต่างจากการเสียรูปที่บริเวณหน้าเสาที่มีอัตราเพิ่มขึ้นตามระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเสียหายภายนอกที่ปรากฏที่เห็นว่าความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณปลายคานอีกทั้งจุดหมุนพลาสติกของตัวอย่างนี้ยังอยู่ที่บริเวณปลายคานเช่นกัน



รูปที่ 4.79 เปรียบเทียบการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง M1



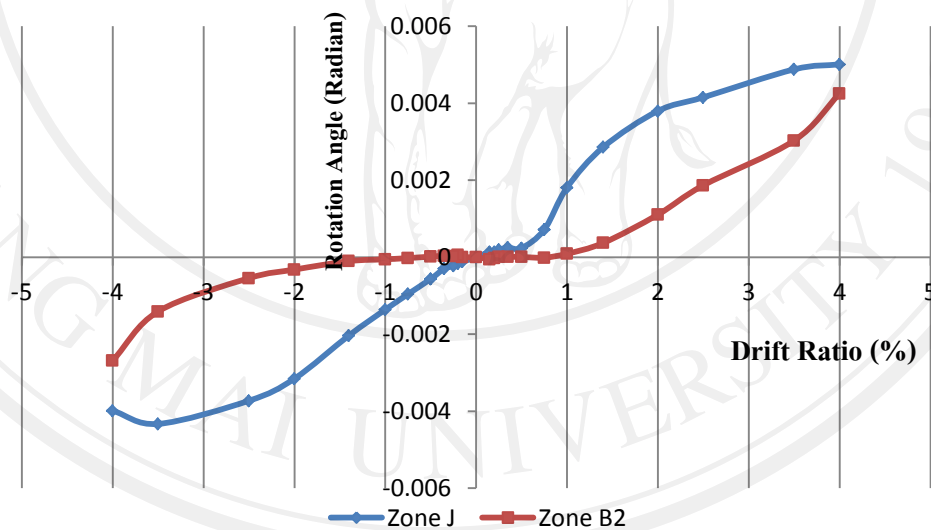
รูปที่ 4.80 เปรียบเทียบการเสยรูปเนื่องจากแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง M1

ตัวอย่าง M2

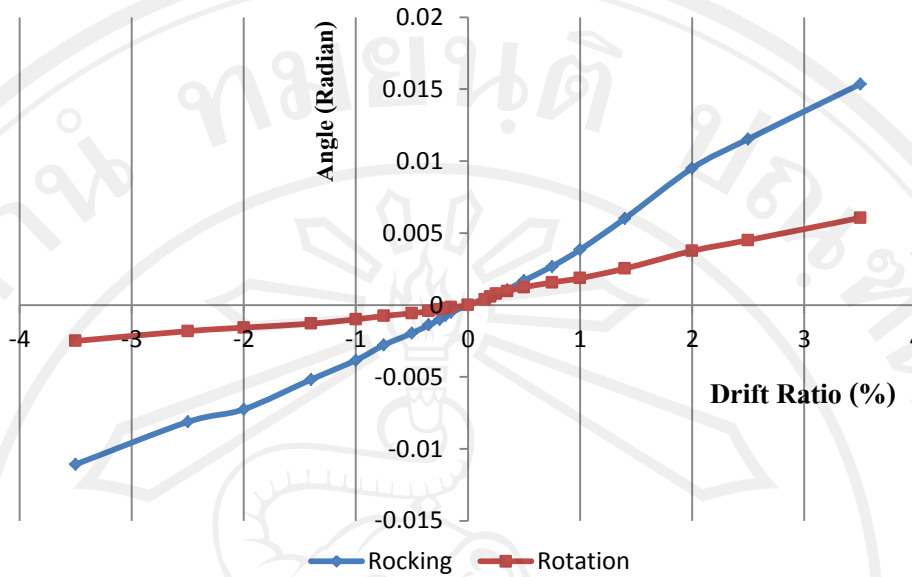
การเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนของตัวอย่าง M2 นี้ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.81 โดยจะเห็นว่าค่าการเสยรูปที่บริเวณจุดต่อ-เสาของตัวอย่างไม่ีค่ามากกว่าการเสยรูปที่บริเวณปลายคานเนื่องจากในตัวนี้ได้มีการเสริมเหล็กเสริมระดับกลางที่บริเวณจุดต่อและปลายคานจึงส่งผลให้บริเวณปลายคานมีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้สามารถส่งผ่านแรงเฉือนที่เกิดขึ้นผ่านไปยังบริเวณจุดต่อได้ดีมากขึ้นส่งผลให้ค่าการเสยรูปที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลายคานมีค่าน้อยกว่าการเสย

รูปที่เกิดขึ้นภายในจุดต่อคาน-เสา แต่ก็เห็นว่าในช่วงที่ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมากกว่าค่าอัตราการเสียรูปที่เกิดที่ปลายคานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นสวนทางกับการเสียรูปบริเวณจุดที่มีแนวโน้มลดลง

ในส่วนของการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดนั้นก่อนอื่นต้องขอกกล่าวถึงจุดที่เกิดการวิบัติในตัวอย่างนี้ว่าเกิดขึ้นภายในคานที่อยู่นอกพื้นที่ที่ได้ทำการวัดค่าการเสียรูปโดยเกิดในลักษณะของการวิบัติเนื่องจากแรงดัด โดยจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.82 จะเห็นว่าค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดนั้นเกิดที่บริเวณหน้าเสามากกว่าภายในคาน เนื่องจากบริเวณหน้าเสานั้นเป็นจุดที่มีแรงดัดกระทำมากที่สุดแต่ก็จะเห็นว่าค่าการเสียรูปภายในคานนั้นก็ยังมีอัตราการเพิ่มขึ้นพร้อมกับอัตราการเสียรูปที่หน้าเสาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงดัดของคานบริเวณหน้าเสาและปลายคานจากการเสริมเหล็กเสริมระดับกลางอีกทั้งอัตราการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปทั้งสองตำแหน่งนั้นยังมีค่าคงที่ไม่เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดแสดงให้เห็นถึงการวิบัตินั้นอยู่นอกพื้นที่ทำการวัดการเสียรูป



รูปที่ 4.81 เปรียบเทียบการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง M2



รูปที่ 4.82 เปรียบการเสยรูปเนื่องจากแรงค้ำที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง M2

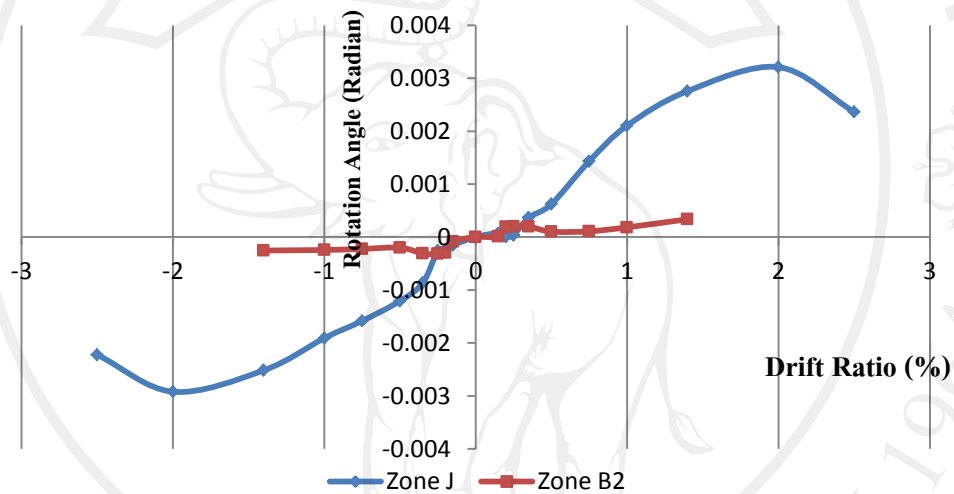
#### ตัวอย่าง P1

ค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนของตัวอย่าง P1 นี้แสดงในรูปที่ 4.83 โดยจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนนั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในบริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยจะเห็นได้จากกราฟว่าค่าการเสยรูปบริเวณปลายคานนั้นเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการเสยรูปที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสา และในช่วงท้ายที่เกิดการวิบัติในตัวอย่างนี้พบว่าค่าการเสยรูปลดลงอย่างทันทีทันใดสอดคล้องกับค่ากำลังของตัวอย่างที่ลดลงเช่นกัน

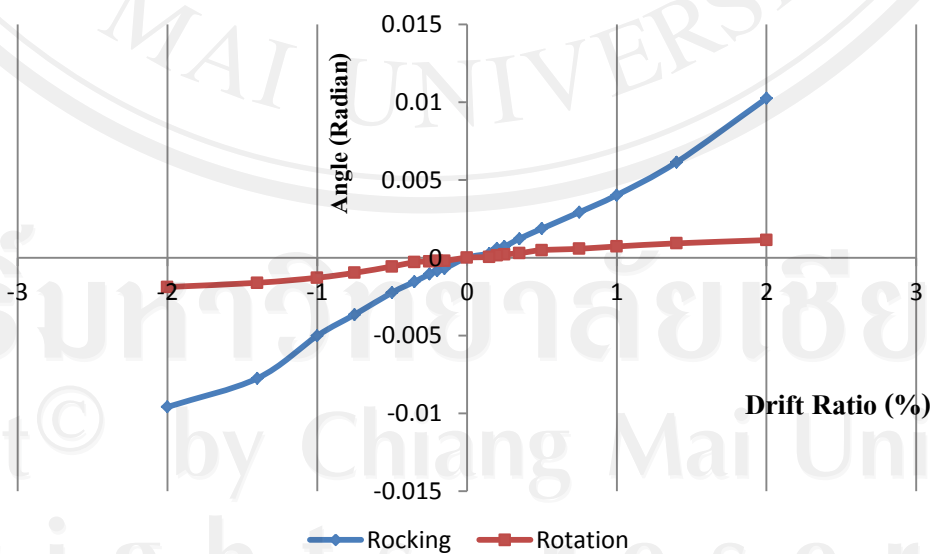
ในส่วนของ การเสยรูปเนื่องจากแรงค้ำที่บริเวณหน้าเสาและภายในคานนั้นพบว่าค่าการเสยรูปเกิดขึ้นมากบริเวณหน้าเสาแตกต่างจากค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงค้ำที่เกิดภายในคาน โดยดูได้จากกราฟรูปที่ 4.84 ที่จะเห็นว่าค่า rocking angle มีค่ามากกว่าค่า rotation angle อีกทั้งอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงค้ำนั้นคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นเช่นเดียวกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการเสยรูปภายในคาน

เมื่อนำผลของการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนประกอบกับค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงค้ำจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงค้ำที่บริเวณหน้าเสานั้นไม่ทำให้ค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณปลายคานเพิ่มขึ้นตามซึ่งเมื่อนำผลของทั้งสองส่วนนี้มารวมกันก็จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้แรงผลักตัวอย่างให้เกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างแล้วก็จะเกิดแรงภายในโครงสร้างขึ้นซึ่งแรงดังกล่าวนี้สามารถส่งผ่านไปยังชิ้นส่วนต่างๆผ่านบริเวณจุดต่อคาน-เสาได้ โดยดูได้จากค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในจุดต่อแต่กลับพบว่าค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณปลายคานนั้นเกิดขึ้นน้อยมากหรืออาจกล่าวได้ว่าแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย จึงอธิบาย

สาเหตุของเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ว่าเกิดจากความสามารถในการเปิดอ้าออกของบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างคานและจุดต่อหรือที่เรียกว่าบริเวณหน้าเสาซึ่งมีสาเหตุจากการที่ผิวของเหล็กหน้าตัดตัวที่ใช้เชื่อมต่อชิ้นส่วนคานสำเร็จรูป ซึ่งผิวของเหล็กหน้าตัดตัวนี้มีลักษณะเรียบส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตมีน้อยจึงทำให้สามารถเกิดการรูดไถลได้เมื่อมีแรงดึงกระทำต่อเหล็กดังกล่าว ซึ่งเมื่อดูจากผลของการเสีรูปที่กล่าวมาก่อนหน้านี้จึงสามารถสรุปได้ว่าเหล็กหน้าตัดตัวที่อยู่ภายในจุดต่อนี้มีการรูดไถลเกิดขึ้นเนื่องจากการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ปลายคานนั้นเกิดขึ้นน้อยต่างจากค่าการเสีรูปจากแรงดัดที่หน้าเสาเกิดขึ้นมาก



รูปที่ 4.83 เปรียบเทียบการเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง P1



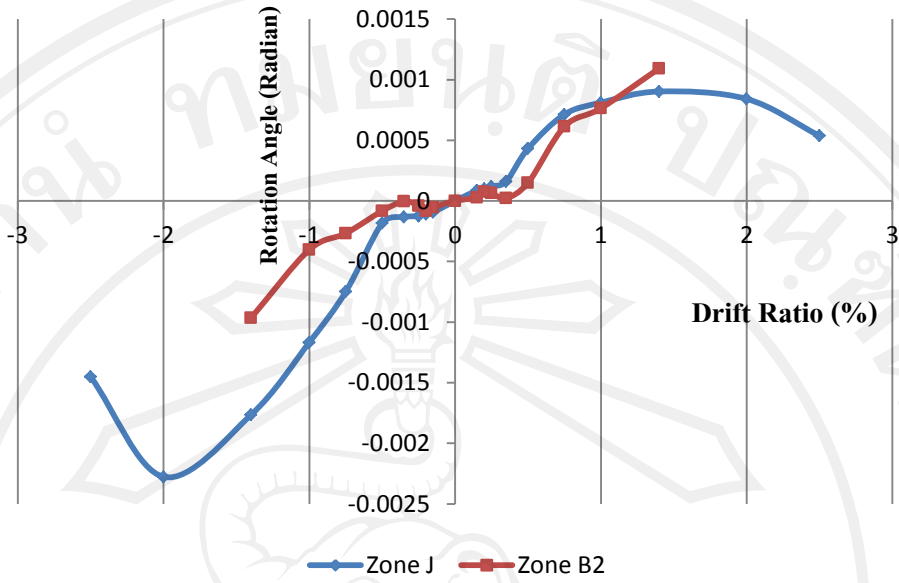
รูปที่ 4.84 เปรียบเทียบการเสีรูปเนื่องจากแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง P1

## ตัวอย่าง P2

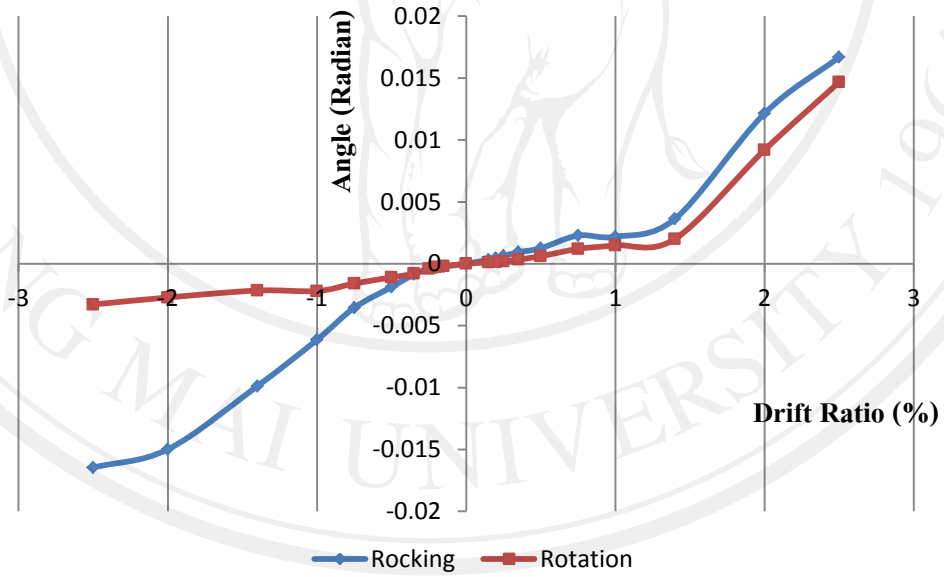
ในตัวอย่างนี้เป็นตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเสริมแนวทแยงบริเวณจุดต่อเพิ่มเติมจากรายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่าง P1 ซึ่งการเสริมเหล็กแนวทแยงเพิ่มเติมนี้ส่งผลให้พฤติกรรมด้านการเสยรูปของตัวอย่างทดสอบนี้นั้นเปลี่ยนแปลงไปจากตัวอย่าง P1 โดยมีผลดังนี้

สำหรับค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างนี้แสดงในรูปที่ 4.85 โดยในตัวอย่างนี้นั้นจะเห็นว่าค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณปลายคานานั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเคลื่อนที่ด้านข้างซึ่งต่างจากตัวอย่าง P1 ที่ค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณปลายคานานั้นมีค่าน้อยมาก ในช่วงระยะแรกๆของการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่างทดสอบนี้นั้นพบว่าค่าการเสยรูปเกิดขึ้นน้อยจนถึงระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากกว่า 5 % แล้วค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนทั้งบริเวณจุดต่อและปลายคานาจึงเริ่มเพิ่มขึ้น แต่ในการเคลื่อนที่ในทิศทางที่จะเห็นว่าค่าการเสยรูปบริเวณจุดต่อที่เริ่มลดลงที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.00 % นั้นเมื่อดูจากกราฟเส้นโค้งขอบนอก (envelop curve) ก็จะเห็นว่ากำลังของตัวอย่างทดสอบนี้ลดลงอย่างชัดเจนที่ระยะเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ในทิศทางที่จะเห็นว่าเมื่อตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 2.50 % ค่าการเสยรูปของตัวอย่างนี้ลดลงรวดเร็วเนื่องจากเป็นจุดที่เกิดการวิบัติทำให้กำลังของตัวอย่างลดลงอย่างมากส่งผลให้แรงเฉือนที่เกิดภายในจุดต่อมีค่าน้อยตามจึงทำให้ค่าการเสยรูปลดลง

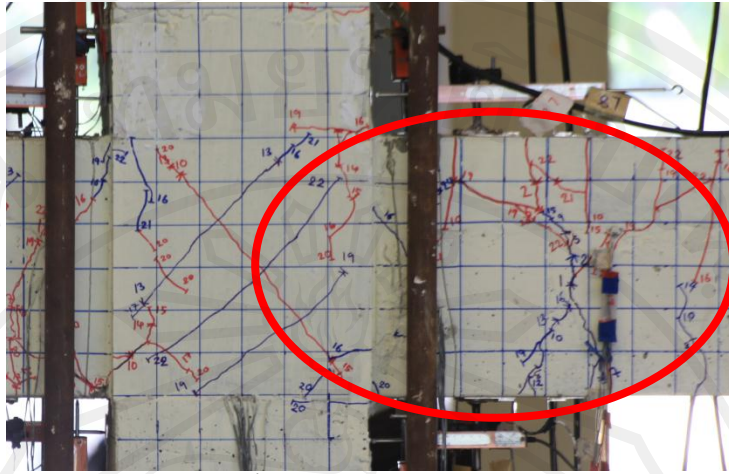
สำหรับค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงคดนั้นพบว่าสำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทางก้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่นั้นค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงคดที่บริเวณหน้าเสาเกิดขึ้นเล็กน้อยแต่เมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากกว่า 1.00 % แล้วพบว่าอัตราค่าการเสยรูปเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการเสยรูปเนื่องจากแรงคดบริเวณภายในคานาที่จะเห็นว่าในช่วงแรกก็มีค่าน้อยและเมื่อระยะเคลื่อนที่มากกว่า 1.00 % แล้วค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมองในส่วนของการเคลื่อนที่ในทิศทางแล้วพบว่าค่าการเสยรูปที่บริเวณหน้าเสานั้นเกิดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงแรกของการทดสอบต่างกับการเสยรูปภายในคานาที่จะเห็นว่ามีค่าน้อยเมื่อดูจากรูปที่ 4.86 โดยสำหรับสาเหตุที่การเคลื่อนที่ในทิศทางก้นค่าการเสยรูปเพิ่มหลังจากที่มีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากกว่า 1.00 % นั้นเนื่องจากเมื่อดูจากค่าเส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่างนี้ในการเคลื่อนที่ทิศทางก้นกำลังของตัวอย่างนี้ลดลงที่ระยะเคลื่อนที่มากกว่า 1.00 % แสดงให้เห็นถึงการวิบัติที่เกิดขึ้นและเมื่อดูจากความเสียหายภายนอกที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 % ในรูปที่ 4.87 นั้นพบว่าเกิดการเปิดอ้าออกของรอยร้าวที่บริเวณปลายคานาส่งผลให้ค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงคดเกิดเพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 4.85 เปรียบเทียบการเสี้ยวรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง P2



รูปที่ 4.86 เปรียบเทียบการเสี้ยวรูปเนื่องจากแรงคดที่ตำแหน่งต่างๆของตัวอย่าง P2



รูปที่ 4.87 ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ปลายคานด้านขวาที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น 1.40 %

#### 4.11 เปรียบเทียบปริมาณการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าปริมาณการเสียรูปของแต่ละตัวอย่างทดสอบซึ่งค่าที่ทำการเปรียบเทียบกันนั้นประกอบไปด้วยค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาและที่ปลายคาน ค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดที่ปลายคานและภายในคาน ซึ่งทำการเปรียบเทียบกันทั้งในรูปแบบของค่าระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นและแรงเฉือนระหว่างชั้น

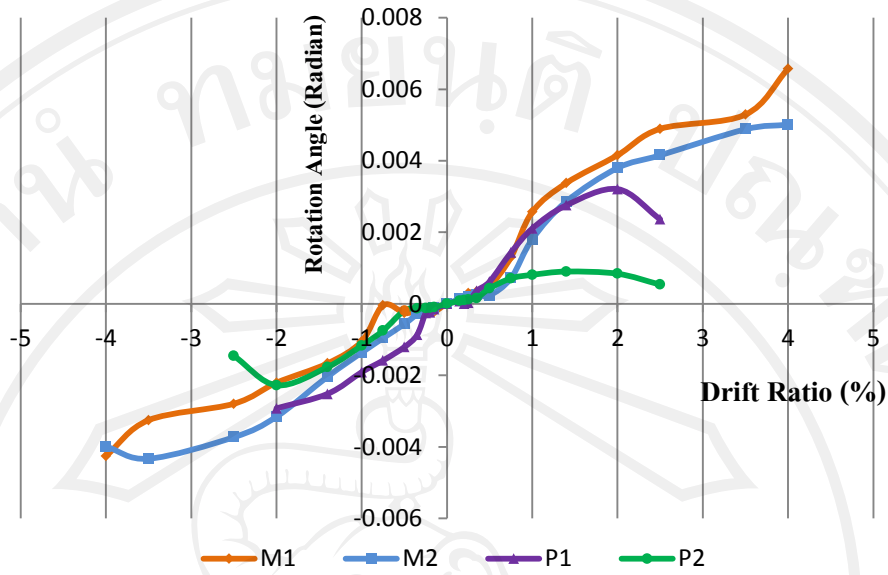
สำหรับค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณจุดต่อคาน-เสาเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบแต่ละตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนที่เดียวกันนั้นพบว่าค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนไม่แตกต่างกันแต่จะมีตัวอย่าง P2 ในการเคลื่อนที่ในทิศทางที่จะเห็นว่าค่าน้อยกว่าตัวอย่างอื่นดังแสดงในรูปที่ 4.88 แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน โดยทำการเปรียบเทียบด้วยแรงที่เท่ากันนั้น ในรูปที่ 4.89 พบว่าในช่วงแรกนั้นค่าการเสียรูปยังต่างกันและเมื่อให้แรงกระทำต่อตัวอย่างมากขึ้นจะพบว่าค่าการเสียรูปของตัวอย่าง P1 นั้นมีเริ่มค่ามากกว่าตัวอย่างอื่น โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ในทิศทางที่จะเห็นว่าค่าการเสียรูปของ P1 นั้นมีค่าเด่นชัดขึ้นมาอย่างชัดเจน จากนั้นเมื่อให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าค่าการเสียรูปของตัวอย่าง M1 เริ่มเกิดเพิ่มมากขึ้นตามมา และตัวอย่างที่มีค่าการเสียรูปน้อยที่สุดคือตัวอย่าง M2

สำหรับค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณปลายคานนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบแต่ละตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนที่เดียวกันนั้น จากกราฟในรูปที่ 4.90 แสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปที่ปลายคานในช่วงแรกของการเคลื่อนที่นั้นพบว่าตัวอย่าง P2 เป็นตัวอย่างที่มีค่าการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่ปลายคานมากที่สุดแต่ค่าที่มากกว่านี้มากกว่าตัวอย่างอื่นเล็กน้อยในส่วนของตัวอย่างอื่นนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และที่ระยะการเคลื่อนที่มากที่สุดซึ่งเป็นระยะเคลื่อนที่หลังจากตัวอย่าง

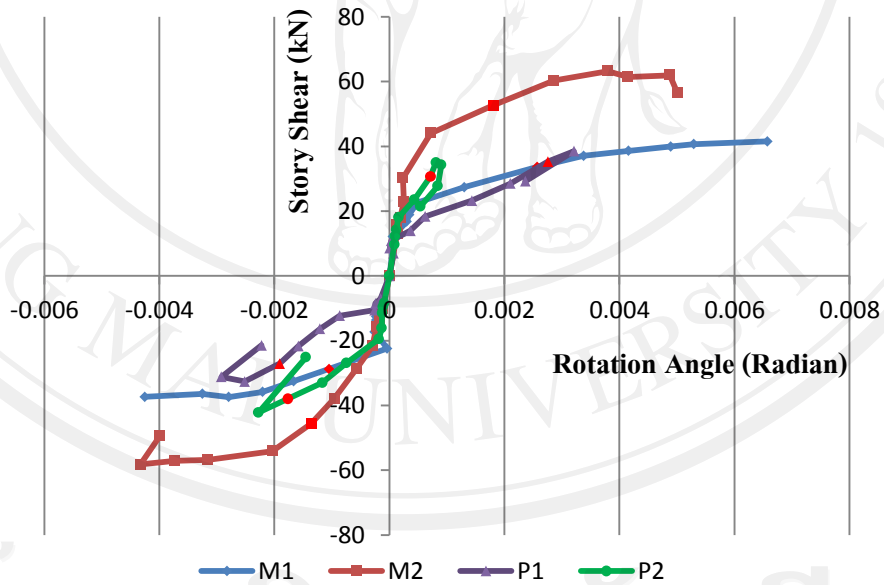
Precast เกิดการวิบัติไปแล้วนั้นพบว่าค่าการเสยรูปของตัวอย่าง M1 มีค่ามากที่สุดเนื่องจากจุดที่เกิดความเสียหายของตัวอย่าง M1 นั้นเกิดที่บริเวณปลายคานส่งผลให้ค่าการเสยรูปเกิดขึ้นมาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเสยรูปจากแรงเฉือนที่ปลายคานที่แรงเท่ากันนั้นพบว่าจากกราฟในรูปที่ 4.91 ค่าการเสยรูปของตัวอย่าง P1 นั้นเริ่มเกิดมากกว่าตัวอย่างอื่นก่อนตั้งแต่ในช่วงแรกแต่เกิดมากกว่าตัวอย่างอื่นไม่มาก และเมื่อให้แรงกระทำเพิ่มอีกจะเห็นว่าตัวอย่าง P2 เริ่มมีค่าการเสยรูปมากขึ้นตามมาแต่เมื่อเพิ่มกระทำอีกเล็กน้อยกลับพบว่าค่าการเสยรูปของตัวอย่าง M1 นั้นเกิดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้ตัวอย่าง M2 เป็นตัวอย่างที่มีค่าการเสยรูปน้อยที่สุด

สำหรับค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงคัตที่บริเวณหน้าเสา จากรูปที่ 4.92 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าการเสยรูปจากแรงคัตที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเท่าๆกันจะเห็นว่าค่าการเสยรูปที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเสยรูปที่แรงกระทำเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.93 โดยการเคลื่อนที่ในทิศทางนั้นค่าการเสยรูปไม่แตกต่างกันในช่วงที่กำลังของตัวอย่างยังไม่ลดลง แต่ในส่วนของ การเคลื่อนที่ในทิศลบนั้นตัวอย่าง P1 เริ่มมีค่าการเสยรูปเพิ่มขึ้นก่อนตัวอย่างอื่นและในส่วนของตัวอย่าง M1 และ P2 นั้นค่าการเสยรูปเกิดขึ้นใกล้เคียงกันและตัวอย่าง M2 เป็นตัวอย่างที่มีค่าการเสยรูปน้อยที่สุด

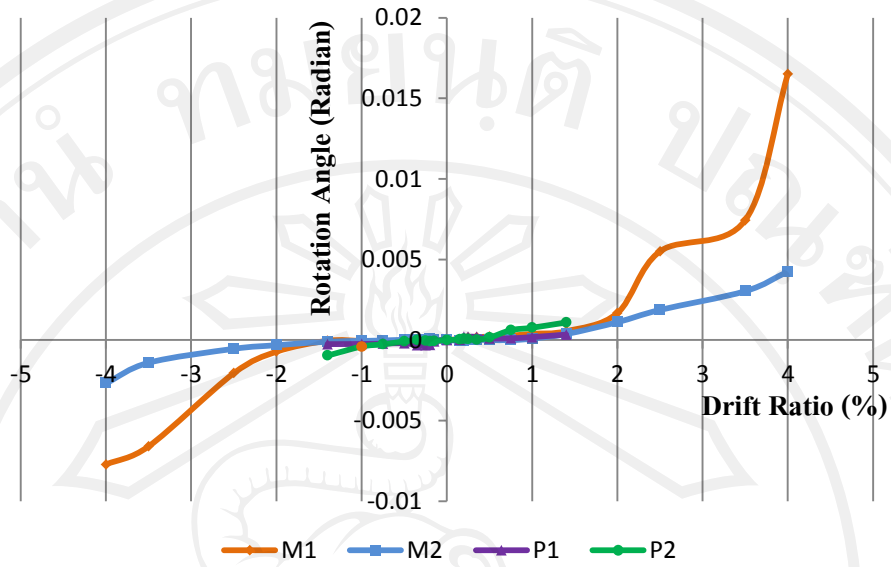
สำหรับค่าการเสยรูปเนื่องจากแรงคัตบริเวณภายในคานนั้นเมื่อเทียบกันที่ระยะเคลื่อนที่เท่ากันนั้นจากรูปที่ 4.94 พบว่าค่าการเสยรูปเกาะกลุ่มกันแต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างไหนมีค่ามากที่สุดเนื่องจากการเคลื่อนที่ในทิศทางและลบนั้นค่าไม่สอดคล้องกันสำหรับค่าการเสยรูปของตัวอย่าง P2 ที่เพิ่มขึ้นมานั้นเกิดจากมีการเปิดอ้าออกของรอยร้าวในบริเวณที่ทำการวัดค่าส่งผลให้ค่าการเสยรูปเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเสยรูปที่แรงกระทำเท่ากันนั้นพบว่าค่าการเสยรูปยังคงเกิดไม่ต่างกันมากนักในช่วงแรกโดยตัวอย่าง P1 เป็นตัวอย่างที่มีค่าการเสยรูปน้อยตลอดการทดสอบ และตัวอย่าง P2 ก็มีค่าการเสยรูปมากกว่าเล็กน้อย เมื่อดูค่าการเสยรูปของตัวอย่างแบบเทินที่นั้นพบว่าในช่วงที่อัตราการเพิ่มจึงกำลังยังคงที่นั้นค่าการเสยรูปไม่ต่างกันนัก แต่เมื่อตัวอย่างทั้ง M1 และ M2 มีกำลังลดลงแล้วนั้นค่าการเสยรูปเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้น



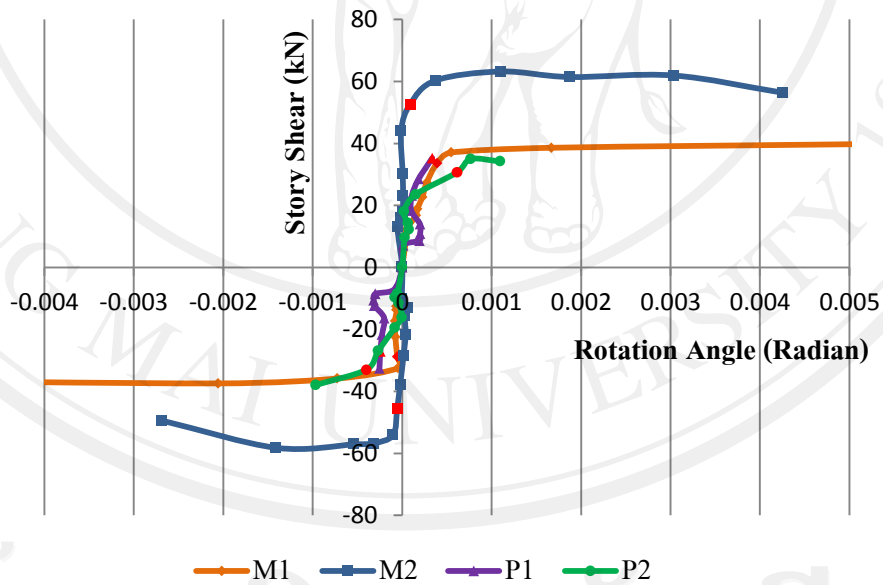
รูปที่ 4.88 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณจุดต่อและระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น



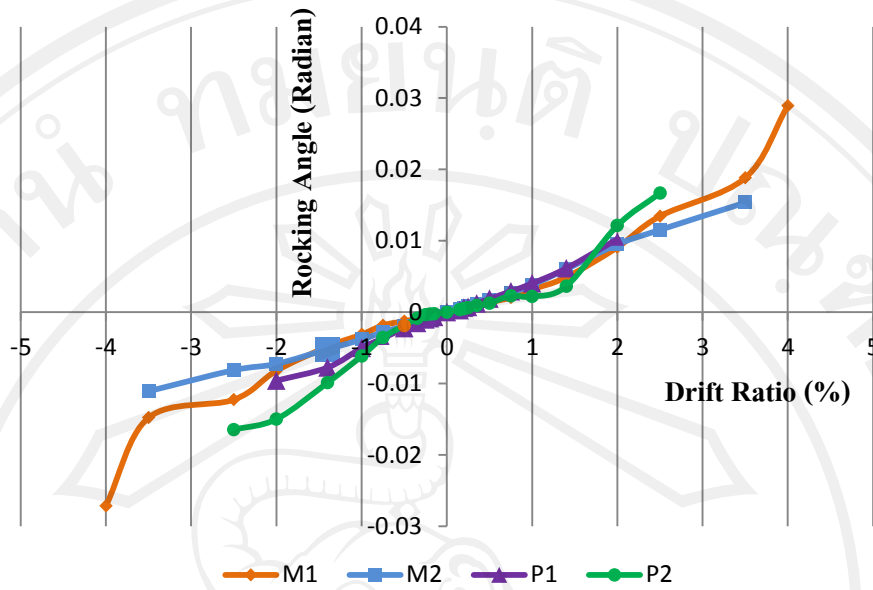
รูปที่ 4.89 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณจุดต่อและแรงเฉือนระหว่างชั้น



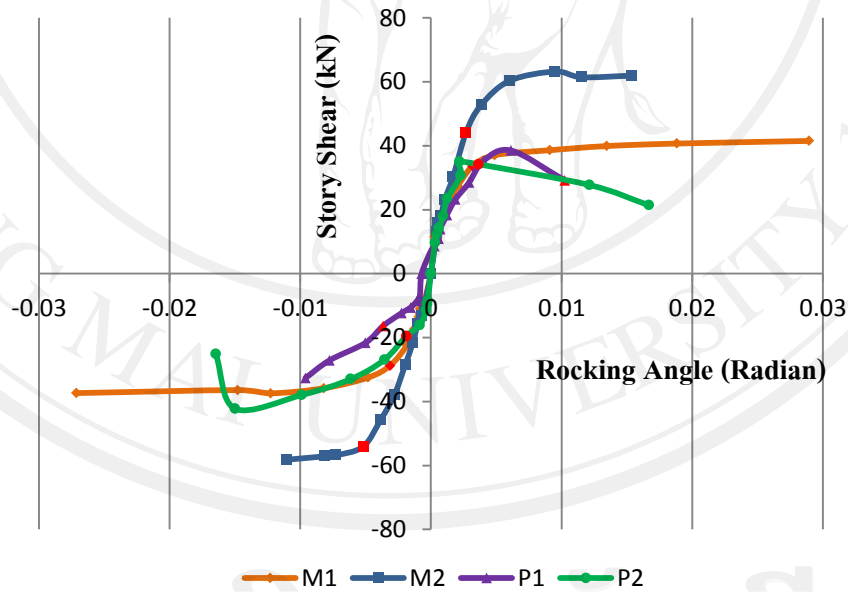
รูปที่ 4.90 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณปลายคานและระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น



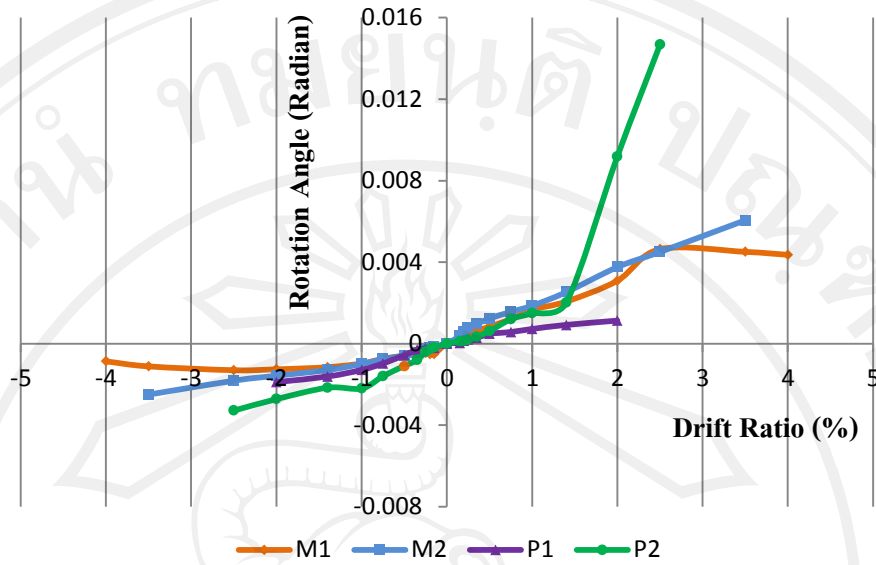
รูปที่ 4.91 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสยรูปเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณปลายคานและแรงเฉือนระหว่างชั้น



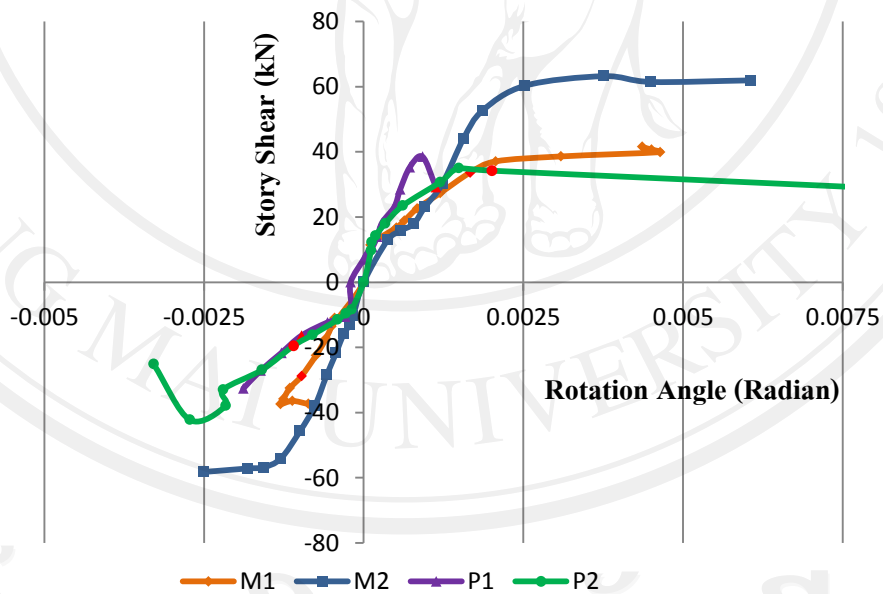
รูปที่ 4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสยรูปเนื่องจากแรงดัดบริเวณหน้าเสาและระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น



รูปที่ 4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสยรูปเนื่องจากแรงดัดบริเวณหน้าเสาและแรงเฉือนในชั้น



รูปที่ 4.94 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดภายในคานและระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น



รูปที่ 4.95 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดภายในคานและแรงเฉือนในชั้น