

จุดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือ
และผลกระทบกับโครงสร้างต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม

CONNECTIONS OF PRECAST CONCRETE STRUCTURE UNDER
EARTHQUAKE IN NORTHERN THAILAND AND IMPACTS ON
ARCHITECTURAL DEMANDS

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ตามมติคณะรัฐมนตรี
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โดย

ผศ.ดร.ชยานนท์ หรรษภิญโญ¹
ผศ.ดร.ธำมภ์ วรณกุล²

หน่วยวิจัยผลิตภัณฑ์วัสดุและเทคโนโลยีการก่อสร้าง
เพื่อการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

และ

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
²คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

31 ธันวาคม 2555

(ปกใน)

จุดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือ
และผลกระทบกับโครงสร้างต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม

CONNECTIONS OF PRECAST CONCRETE STRUCTURE UNDER
EARTHQUAKE IN NORTHERN THAILAND AND IMPACTS ON
ARCHITECTURAL DEMANDS

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ตามมติคณะรัฐมนตรี
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โดย

ผศ.ดร.ชยานนท์ หารัชภิญโญ¹

ผศ.ดร.ธำมภ์ วรณกุล²

หน่วยวิจัยผลิตภัณฑ์วัสดุและเทคโนโลยีการก่อสร้าง
เพื่อการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

และ

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

31 ธันวาคม 2555

คำนำ

โครงการจัดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปด้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือ และผลกระทบกับโครงสร้างต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม เป็นโครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ตามมติคณะรัฐมนตรี สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เนื่องจาก พื้นที่ภาคเหนือรวมทั้งเมืองเชียงใหม่ เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหว แม้ว่าเหตุแผ่นดินไหวที่รุนแรงมากจะมีโอกาสในการเกิดต่ำ แต่หากอาคารที่ก่อสร้างโดยที่ไม่ได้มีการออกแบบรองรับที่ดี การสั่นสะเทือนในระดับปานกลางที่มีศูนย์กลางใกล้กับเมืองก็อาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงได้

สำหรับกลุ่มประเภทสิ่งก่อสร้างที่ได้ทำการศึกษาเป็น โครงสร้างประเภทคอนกรีตชั้นส่วนสำเร็จรูป ทั้งนี้เนื่องจากการก่อสร้างในปัจจุบัน และแนวโน้มในอนาคตจะเป็นการก่อสร้างโดยการใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมากขึ้น ทั้งจากปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพ และแรงงาน รวมทั้ง ความต้องการเร่งรัดเพื่อให้การก่อสร้างสามารถดำเนินการแล้วเสร็จในระยะเวลาอันสั้น แต่การก่อสร้างโดยเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ ยังคงต้องมีการพิสูจน์และรับรองความปลอดภัยหากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นในตัวเมือง และหากก่อสร้างโดยปราศจากระเบียบวิธีที่เหมาะสม ก็มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายร้ายแรงหรือพังทลาย

โครงการศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาเพื่อ พัฒนาระบบการก่อสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีความเหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความต้องการด้านสถาปัตยกรรม ผลการศึกษาจากงานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยให้การพัฒนาชิ้นส่วนรูปแบบใหม่ ๆ ได้อย่างสะดวกและใช้เวลาน้อยกว่าปัจจุบัน เป็นการเพิ่มศักยภาพการแข่งขันให้สูงขึ้น อีกทั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาในโครงการนี้ได้รับความเชื่อถือจากผลการยืนยันที่เป็นงานวิจัยโดยเฉพาะในเขตภาคเหนือซึ่งมีความเสี่ยงกับแผ่นดินไหว

ผศ.ดร.ชยานนท์ หรรษภิญโญ¹

ผศ.ดร.ธานี วรณกุล²

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และ

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

²คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ “จุดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือ และผลกระทบกับโครงสร้างต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม” เป็นโครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญของการเตรียมพร้อมรับมือภัยแผ่นดินไหว และได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานในครั้งนี้

งานหลายๆ ส่วนที่ผู้วิจัยสามารถทำได้โดยลำพัง หรือ กล่าวได้ว่าหากปราศจากคนกลุ่มนี้ งานวิจัยชิ้นนี้คงไม่สำเร็จลงได้ ขอขอบคุณ คุณทศพล พัฒนเรืองกุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสำรวจข้อมูลความต้องการด้านสถาปัตยกรรม และคุณปิยะพงษ์วงศ์เมธา ที่ได้ช่วยเหลืองานด้านการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วน ส่วนงานจัดการด้านธุรการ ขอขอบคุณ คุณศิริพันธ์ นาคศรี และสุดท้ายที่ขาดมิได้คือ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้ดำเนินงานที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอให้ทุกท่านที่เกี่ยวข้องทั้งโดยตรงและโดยอ้อมมีความสุขตลอดไป

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาระบบการก่อสร้างขึ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีความเหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความต้องการด้านสถาปัตยกรรม ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย การศึกษาประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

1. การทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จ
2. การคัดเลือกรูปแบบจุดต่อ คาน - เสา ของโครงสร้างสำเร็จรูป พิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเลือกนำไปใช้งาน

การดำเนินการทั้ง 2 ส่วนนั้น สามารถกล่าวสรุปโดยย่อได้ดังนี้

ส่วนที่ 1: การทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตหล่อสำเร็จนี้เป็นการทดสอบเพื่อให้แน่ใจถึงความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้นในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยของตัวจุดต่อขึ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป โดยจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กระดับกลางบริเวณจุดต่อคาน-เสา และปลายคานนั้นเป็นตัวอย่างที่มีกำลังในการต้านทานการเคลื่อนที่มากที่สุดอีกทั้งยังสามารถยับยั้งบริเวณที่เกิดความเสียหายจากการรับแรงกระทำแบบวนซ้ำไปเกิดที่บริเวณภายในคานได้ส่งผลให้ตัวอย่างนี้มีรูปแบบความเสียหายตามที่ประสงค์ ในรูปแบบที่เรียกว่า “เสาแข็งคานอ่อน”

ส่วนที่ 2: การศึกษาเริ่มต้นจากการนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการตัดสินใจคัดเลือกและจัดทำแบบสอบถามกับผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างที่ใช้ขึ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป และวิเคราะห์ประเมินปัจจัยเพื่อการตัดสินใจโดยวิธี AHP สามารถสรุป ปัจจัยที่มีความสำคัญได้ ดังนี้

ปัจจัยที่มีความสำคัญเรียงตามลำดับจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ

1. ความปลอดภัยในการติดตั้ง
2. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ
3. ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม
4. ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม
5. ความง่ายในการเทคอนกรีต
6. ความรวดเร็วในการติดตั้ง
7. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ
8. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง
9. ความง่ายในการเก็บน้ำปิดจุดเชื่อมต่อ
10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ
11. ความสวยงาม

จากความสำคัญของปัจจัยที่ได้ข้างต้น จะเห็นว่า ความปลอดภัยในงานก่อสร้างถือเป็นเรื่องที่สำคัญอันดับแรก ส่วนความต้องการทางสถาปัตยกรรมนั้น ถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญน้อยที่สุด และเมื่อได้นำมาคัดเลือกรูปแบบจุดต่อพบว่า รูปแบบจุดเชื่อมต่อกาน-เสาที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงมากที่สุดคือรูปแบบจุดเชื่อมต่อที่ใช้วิธีการเชื่อมในการเชื่อมต่อนั้นส่วน

Abstract

This research is mainly aimed to develop a construction system using precast structural elements considering factors including aesthetic needs associated with seismic intensity in the northern area of Thailand. The study is composed of 2 parts as

1. Test of precast concrete beam–column subframes under cyclic loading
2. Study of decision making on which type of precast beam–column elements considering factors affecting construction implementation

The results of the studies can be concluded as follow

Part 1: The tests of precast concrete beam–column subframes under cyclic loading were conducted to confirm the seismic capacity of the system under future possible earthquake events in the northern Thailand. The test results show that having intermediate longitudinal bars in the joint and beam ends possessed the highest capacity. The failure section can be relocated to a beam section away from the column. This leads to the preferred failure pattern, the so–called “Strong column–weak beam” mechanism.

Part 2: The study firstly studied affecting factors on decision making on which preferred precast characteristics and developed questionnaire which then distributed to precast concerned people. Next, collective information obtained from the questionnaires were systematically analyzed using the AHP method. The following conclusions can be drawn.

The highest rated effective factors on the decision can be orderly listed below

1. Safety on erection process
2. Capacity of the joint
3. Time of rebar prefabrication
4. Complication in rebar prefabrication
5. Comfortable casting process
6. Fast on–site erection
7. Capacity of joint on loading transfer
8. Flexible erection work
9. Easy on grouting process
10. Easy to control and readjustment
11. Aesthetic

From the factor rating above, safety in construction is the most important factor and the aesthetic need is the less one. The implement of the rating model shows that the appropriate connection type of the precast concrete beam–column frame is welding connection type.

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
บทคัดย่อ	จ
Abstract	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ทวีป	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	2
1.3 วัตถุประสงค์การศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 การศึกษาด้านกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงเพรม6	4
2.1.2 รูปแบบและการตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้างสำเร็จรูป	11
2.2 ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป	24
2.3 จุดต่อของโครงสร้างชั้นส่วนคาน-เสาสำเร็จรูป	28
2.4 กลไกการรับแรงจุดต่อระหว่างคาน-เสาในโครงสร้างคอนกรีตชั้นเดียว	36
2.5 ค่าความเหนียว	39
2.6 การเสื่อมลดของค่าความแข็งแรง	40
2.7 การสลายพลังงาน	40
2.8 ทฤษฎีAHP เพื่อการตัดสินใจ	41
2.8.1 หลักการของAHP	41
2.8.2 ขั้นตอนการประยุกต์ทฤษฎีAHP	41
2.8.3 กระบวนการวิเคราะห์ของAHP	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 การทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสาโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป	54
3.1.1 ตัวอย่างทดสอบ	57
3.2 ลำดับความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อระหว่างคาน-เสา	64

บทที่ 4 ผลการทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสา

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ	67
4.2 พฤติกรรมและพัฒนาการของการเกิดรอยร้าวความเสียหายและการวิบัติ	68
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์	104
4.4 การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรง	111
4.5 อัตราส่วนค่าความแข็งแรงเทียบกับตัวอย่างควบคุม	113
4.6 การสลายพลังงาน	115
4.7 ความเหนียว	115
4.8 กำลังของตัวอย่างทดสอบ	116

บทที่ 5 ลำดับความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อระหว่างคาน-เสา

5.1 ลำดับความสำคัญของปัจจัยในมุมมองของผู้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง	119
5.2 ลำดับความสำคัญของปัจจัยในมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ	120
5.3 เปรียบเทียบรูปแบบจุดต่อคาน-เสา	121

บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษา

6.1 ผลของรูปแบบจุดต่อ	124
6.2 เปรียบเทียบการเสื่อมถอยและค่าความแข็งแรง	124
6.3 รูปแบบการวิบัติ	125
6.4 ปัจจัยที่สำคัญสำหรับจุดเชื่อมต่อคาน-เสา	128
6.5 ผลกระทบต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม	129

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม	130
ภาคผนวก	133

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ทัวไป

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการพัฒนาประเทศดังแสดงให้เห็นในอัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นตามการเติบโตประเทศในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา โดยประเทศไทยได้มีมาตรการกระตุ้นระบบเศรษฐกิจโดยรัฐบาลซึ่งหลายโครงการเป็นโครงการที่กระตุ้นภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น โครงการบ้านเอื้ออาทร ซึ่งการก่อสร้างมีลักษณะอาคารคล้ายๆกันจำนวนมากประกอบกับความต้องการที่จะตอบสนองผู้ที่มีรายได้ต่ำถึงปานกลางที่เป็นคนกลุ่มใหญ่ของประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมก่อสร้างจำเป็นต้องมีการเสริมกลยุทธ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการบริหารต้นทุนของงานก่อสร้างด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการก่อสร้างในปัจจุบัน ในขณะที่เดียวกับปัญหาการขาดแคลนแรงงานและคุณภาพแรงงานในธุรกิจการก่อสร้าง ทำให้ระบบโครงสร้างสำเร็จรูปได้ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างของโครงการหลายๆแห่ง เนื่องจากสามารถลดการสูญเสียวัสดุรวมถึงความต้องการด้านแรงงาน ทำให้การบริหารโครงการที่ดีสามารถควบคุมต้นทุนงานก่อสร้างให้อยู่ในวงเงินที่กำหนดได้ ในส่วนของผู้ประกอบการเอกชนได้มีการเปลี่ยนแปลงระบบการก่อสร้างโครงสร้างจากรูปแบบเดิมที่ใช้วิธีการหล่อในที่ที่เป็นระบบก่อสร้างโดยโครงสร้างสำเร็จรูปมากขึ้น ส่งผลให้ในภาวะปัจจุบันนี้ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปได้รับความนิยมมากขึ้น

ในภาวะความเร่งด่วนของความต้องการในการใช้ประโยชน์อาคารทั้งจากเจ้าของอาคารเองและเจ้าของโครงการโดยเฉพาะโครงการบ้านจัดสรรที่ต้องการสนองตอบแนวคิดบ้านสร้างเสร็จก่อนขาย ดังนั้นในแต่ละโครงการจึงจำเป็นต้องมีการสรรหาเทคนิคด้านต่างๆมาเสริมให้การก่อสร้างมีความรวดเร็วควบคู่ไปกับคุณภาพของงานที่จะต้องเทียบเท่ากับระบบก่อสร้างเดิม ปัจจัยด้านราคาของค่าก่อสร้างเองนั้นไม่ได้ถูกมองว่าเป็นปัจจัยหลักเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการก่อสร้างที่สั้นลง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถด้านการแข่งขันในตลาดบ้านจัดสรรมีมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ต้นทุนในด้านต่างๆลดลง ตัวอย่างเช่น ต้นทุนในด้านแรงงาน อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ต้นทุนในด้านไม้แบบและนั่งร้าน โดยสิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นต้นทุนในการทำการก่อสร้างทั้งสิ้นโดยหากเมื่อเทียบมูลค่าโครงการทั้งหมดแล้วอาจพบว่าการก่อสร้างโดยใช้รูปแบบเดิมคือวิธีการเทในที่เทียบกับวิธีการก่อสร้างโดยใช้ระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปมีมูลค่าพอๆกัน

ปัจจุบันพบเจอเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นบ่อยครั้งมากขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตของเมืองเทียบกับในอดีต รวมทั้งอาคารที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อต้านทานแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวซึ่งพฤติกรรมของแรงกระทำที่เกิดจากแผ่นดินไหวนั้นแตกต่างจากแรงกระทำที่เกิดจากน้ำหนักของตัวอาคารเองคือแรงกระทำจากน้ำหนักของตัวอาคารนั้นจะกระทำต่อโครงสร้าง

ในแนวตั้งส่วนแรงจากแผ่นดินไหวนั้นจะกระทำต่อโครงสร้างในแนวด้านข้างและเป็นการกระทำแบบสลับทิศไปมาโดยแรงกระทำในลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้จุดต่อของโครงสร้างบริเวณคาน-เสานั้นต้องรับภาระอย่างหนักและเกิดความเสียหายอย่างมาก และเมื่อจุดต่อของโครงสร้างเกิดความเสียหายจนไม่สามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้แล้วนั้นย่อมส่งผลให้อาคารทั้งหลายเกิดความไม่ปลอดภัย หากเป็นกรณีที่โครงสร้างอ่อนแอก็อาจทำให้อาคารทั้งหลายพังถล่มลงมาได้ และย่อมส่งผลให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก

1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นที่แสดงถึงความจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาระบบการก่อสร้างโดยอาศัยชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้น อย่างไรก็ตาม การนำระบบดังกล่าวมาใช้งานย่อมจำเป็นต้องมีการพิสูจน์ความสามารถในการนำมาใช้ทั้งในด้านของความแข็งแรง และความเหมาะสมต่อเทคโนโลยีในส่วนของผู้ใช้ ดังนั้น ที่มาของการศึกษา สามารถกล่าวได้โดยสรุปเป็น 2 ประเด็นหลักที่สำคัญดังนี้

1. ความแข็งแรงของจุดต่อ: การก่อสร้างโดยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นบริเวณจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปนับว่าเป็นจุดที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากจุดเชื่อมต่อนี้จะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของโครงสร้างในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว การศึกษาในส่วนนี้เป็นการพิสูจน์สมบัติด้านความแข็งแรงโดยได้มีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจำลองแรงกระทำเป็นลักษณะเลียนแบบแรงแผ่นดินไหว

2. ความเหมาะสมในการนำมาใช้งาน: จุดเชื่อมต่อจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามการออกแบบที่ผู้ออกแบบเองเป็นผู้กำหนด ซึ่งจุดเชื่อมต่อแต่ละรูปแบบนั้นจะมีทั้งจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกันออกไป ได้แก่ ราคา ความยากง่ายในการก่อสร้าง รูปลักษณะทางสถาปัตยกรรม เป็นต้น ทำให้การตัดสินใจเลือกใช้จุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่สุดนั้นทำได้ยากลำบากส่งผลให้เกิดความจำเป็นที่จะต้องมีการระดมความคิดเห็นที่จะช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบจุดเชื่อมต่อที่มีความเหมาะสมมากที่สุด รูปแบบกระบวนการที่ช่วยในการตัดสินใจในการเลือกรูปแบบจุดต่อที่มีอยู่มากมาย ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกกระบวนการในการตัดสินใจด้วยวิธี AHP

1.3 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้างคอนกรีตแบบหล่อในที่เปรียบเทียบกับจุดต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปคานอัดแรง-เสากายใต้แรงกระทำแบบสลับทิศโดยรูปแบบของจุดต่อเป็นชนิดฝังเหล็กตัวที่พัฒนาจากรูปแบบที่มีการใช้อยู่ในการก่อสร้างจริง

2. เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่ใช้ตัดสินว่าจุดเชื่อมต่อแบบใดมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างสำเร็จรูป

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้ แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาความสามารถในการรับแรง และการศึกษาปัจจัยเพื่อการตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบของจุดต่อ โดยในแต่ละส่วนมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

ส่วนที่ 1: การศึกษาความแข็งแรงของจุดต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นมีขอบเขตคือ

1. เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการก่อสร้างระหว่าง 2 ระบบคือ แบบหล่อคอนกรีตในที่และแบบใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหวความรุนแรงในเขตภาคเหนือของประเทศไทย
2. รูปแบบของจุดต่อเป็นแบบชนิดฝังเหล็กหน้าตัดตัว T ซึ่งเป็นแบบที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบัน
3. ตัวอย่างทดสอบที่มีการพัฒนาปรับปรุงการวางตำแหน่งของเหล็กตัว T และรายละเอียดของการเสริมเหล็กโดยตัวอย่างทดสอบมีทั้งหมด 4 ตัวอย่างแบ่งเป็นตัวอย่างแบบหล่อคอนกรีตในที่ 3 ตัวอย่างและตัวอย่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป 1 ตัวอย่าง

ส่วนที่ 2: ส่วนการศึกษาทางด้านของปัจจัยของการจุดเชื่อมต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปที่ทำการศึกษาปัจจัยดังนี้คือ

- 1.ผลกระทบต่อด้านสถาปัตยกรรม
- 2.การติดตั้ง
- 3.ความทนทาน
- 4.การเกร้าท์ปิดจุดเชื่อมต่อ
- 5.ความเสี่ยงในการเสียหายและความต้องการการซ่อมแซม
- 6.ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ
- 7.ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

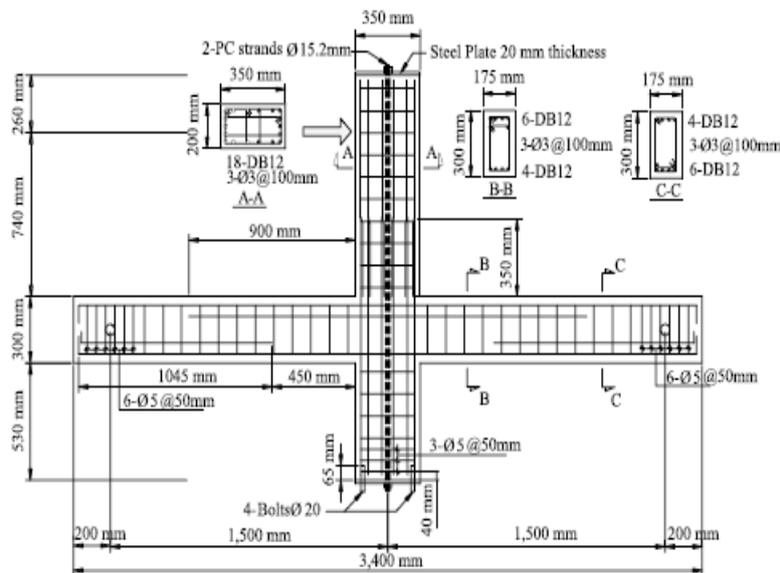
บทที่ 2

การทบทวนเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

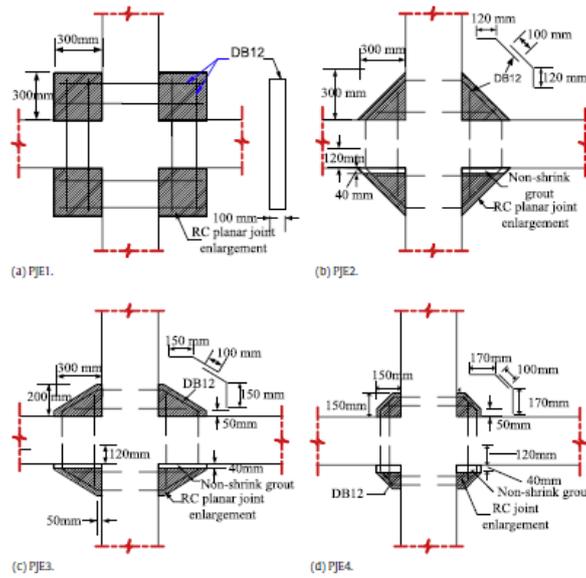
2.1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การศึกษาด้านกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงเฟรม

Pimanmas and Chaimahawan (2010) ได้ทดสอบตัวอย่างจุดต่อบริเวณคาน-เสา เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของจุดต่อบริเวณคาน-เสา โดยตัวอย่างทดสอบนั้นประกอบด้วยจุดต่อที่ออกแบบตามมาตรฐานของ ACI318 โดยไม่ได้พิจารณาถึงผลของแรงแผ่นดินไหว และตัวอย่างที่มีการขยายพื้นที่บริเวณจุดต่อโดยมีรูปแบบการขยายพื้นที่จุดต่ออยู่ทั้งสิ้น 4 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1



ก) ตัวอย่างที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI318 โดยไม่พิจารณาถึงผลของแรงแผ่นดินไหว

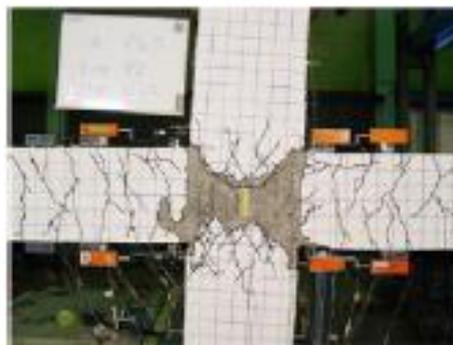


ข) ตัวอย่างที่มีการขยายพื้นที่บริเวณจุดต่อทั้งหมด 4 รูปแบบ

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติ

(Pimanmas. and Chaimahawan ,2010)

การทดสอบนี้ได้ให้รูปแบบแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนแบบแรงกระทำวนซ้ำ (cyclic load) โดยพบว่าตัวอย่างที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI318 โดยไม่พิจารณาแรงของแผ่นดินไหวนั้นมีรูปแบบความเสียหายเมื่อรับแรงกระทำแบบวนซ้ำที่บริเวณจุดต่อโดยความเสียหายเกิดจากการวิบัติด้วยแรงเฉือนบริเวณพื้นที่จุดต่อตามรูปที่ 2.2 โดยสาเหตุที่บริเวณจุดต่อเกิดรูปแบบความเสียหายดังนี้เนื่องจากเมื่อคานและเสาได้รับแรงดัด (moment) ชิ้นส่วนจะส่งแรงผ่านบริเวณจุดต่อซึ่งแรงดังกล่าวจะทำให้จุดต่อเกิดรอยแตกแนวทแยง (diagonal crack) และคอนกรีตบริเวณจุดต่อหลุดออกเนื่องจากการอัดแตกในที่สุดจุดต่อดังกล่าวก็จะสูญเสียแรงต้านทาน

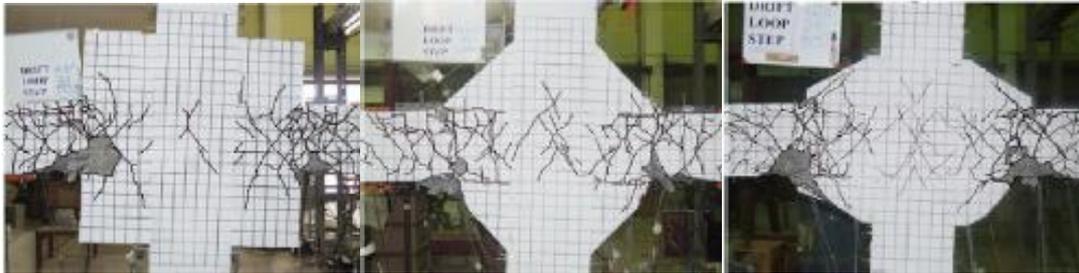


รูปที่ 2.2 รูปแบบความเสียหายของจุดต่อที่ออกแบบตาม ACI318

(Pimanmas. and Chaimahawan ,2010)

ในส่วนของตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังบริเวณจุดต่อจากทั้งหมด 4 ตัวอย่างนั้นพบว่า 3 ตัวอย่างนั้นสามารถช่วยให้ลักษณะการวิบัติจากเดิมที่เกิดบริเวณจุดต่อนั้นสามารถย้ายไปเกิดที่บริเวณคานดัง

รูปที่ 2.3 และยังส่งผลให้จุดต่อมีกำลังรับแรงมากขึ้น โดยสาเหตุที่ความเสียหายย้ายไปเกิดที่บริเวณคานนั้นเนื่องจากการเสริมกำลังนั้นทำให้แรงที่ส่งผ่านจากชิ้นส่วนคาน และ เสา นั้นกระจายไปยังจุดที่มีการเสริมกำลังแทนที่จะผ่านไปยังจุดต่อโดยตรงทำให้จุดต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 2.3 รูปแบบความเสียหายของจุดต่อที่มีการเสริมกำลัง
(Pimanmas. and Chaimahawan ,2010)

และในส่วนของตัวอย่างสุดท้ายที่มีการเสริมพื้นที่บริเวณจุดต่ออย่างน้อยที่สุดพบว่ารูปแบบความเสียหายยังคงเกิดที่บริเวณจุดต่อดังรูปที่ 2.4 เนื่องการเสริมพื้นที่บริเวณจุดต่ออย่างน้อยเกินไปทำให้แรงที่ส่งผ่านจุดต่อนั้นไม่สามารถกระจายไปบริเวณที่มีการเสริมกำลังได้อย่างเพียงพอ

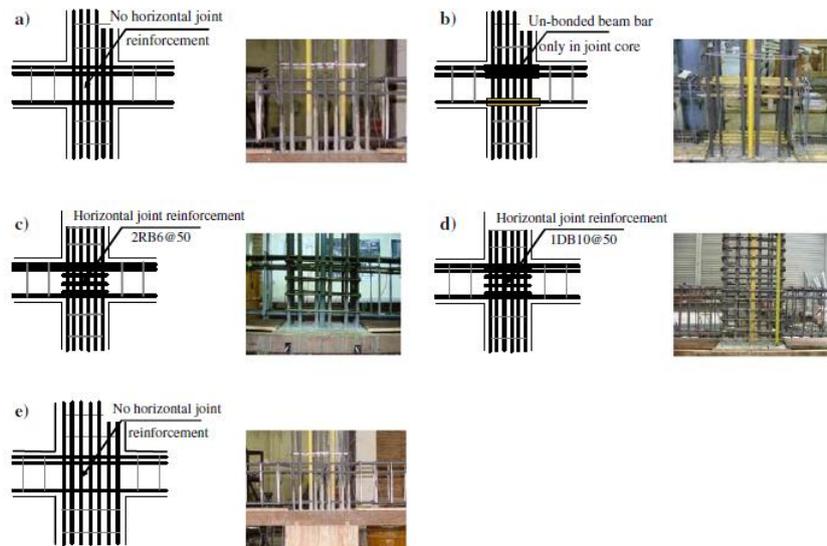


รูปที่ 2.4 การวิบัติของจุดต่อที่มีการเสริมกำลังบริเวณจุดต่อ
(Pimanmas. and Chaimahawan ,2010)

อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงความเหนียว (ductility) ของจุดต่อพบว่าเมื่อเสริมพื้นที่รับแรงบริเวณจุดต่อส่งผลให้จุดต่อนั้นมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งยังส่งผลไปถึงการสลายพลังงานที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และ Drift ratio ทำได้ดีขึ้นอีกด้วย

Supaviriyakit and Pimanmas (2008) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของจุดต่อของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณคาน-เสาที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI เทียบกับจุดต่อที่มีรายละเอียดเหล็กเสริมที่ต่างกันออกไปโดยตัวอย่างที่ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพนั้นมีทั้งหมด 5 ตัวอย่างซึ่งมีรายละเอียดที่แตกต่างกันดังนี้ a) จุดต่อที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI b) เหล็กตามยาว

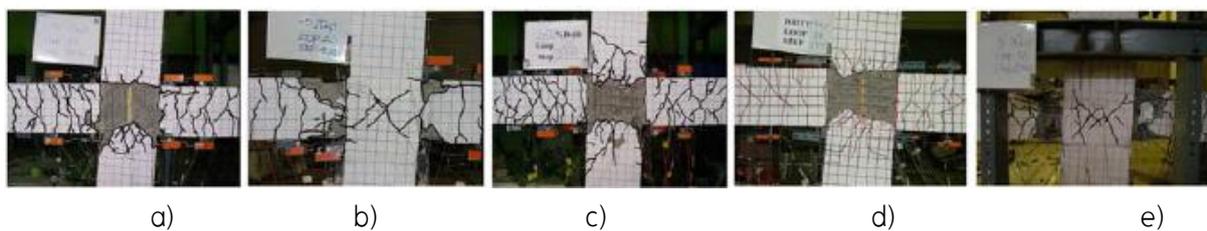
ของคานที่ผ่านจุดต่อถูกทำให้ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กตามยาว (un-bonded beam bar)c,d) เพิ่มเติมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อให้มากกว่าที่แนะนำโดยมาตรฐาน ACI e) ขยายขนาดของเสาให้โตกว่าตัวอย่าง a โดยรายละเอียดของเหล็กเสริมในจุดต่อเหมือนกัน ซึ่งรูปแบบการวางเหล็กเสริมในตัวอย่างต่างๆได้จากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รายละเอียดเหล็กเสริมในจุดต่อของตัวอย่าง

(Supaviriyakit. and Pimanmas. ,2008)

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง a , c , d เกิดความเสียหายที่บริเวณจุดต่อเป็นหลักโดยความเสียหายที่เกิดเนื่องจากการวิบัติด้วยแรงเฉือน ในส่วนของตัวอย่าง b นั้นเกิดความเสียหายที่บริเวณคานเป็นหลักโดยความเสียหายที่บริเวณจุดต่อเกิดน้อย ตัวอย่าง e นั้นความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณคานก่อนและเมื่อระยะ drift ratio มากๆจึงเกิด crack ที่บริเวณจุดต่อแต่ไม่ส่งผลถึงกำลังของจุดต่อโดยรูปแบบความเสียหายดูได้จากรูปที่ 2.6



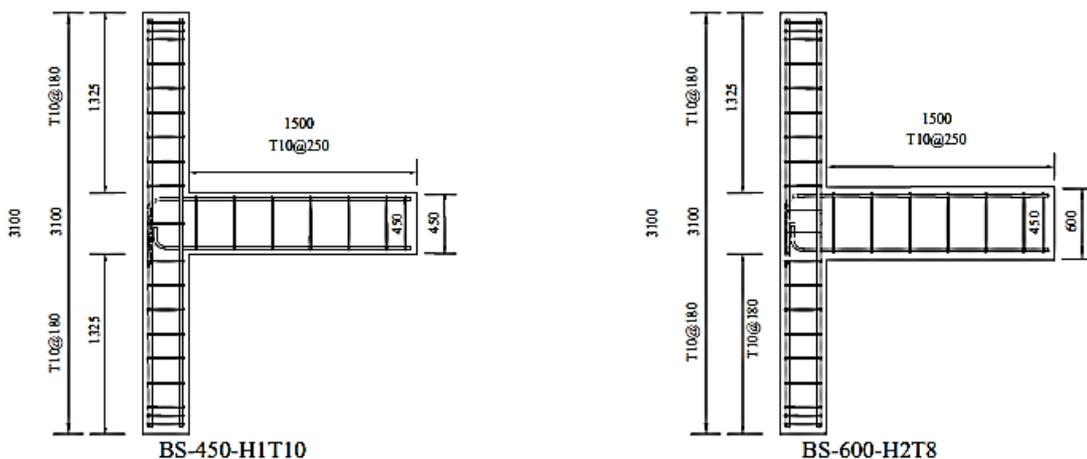
รูปที่ 2.6 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง

(Supaviriyakit. and Pimanmas. ,2008)

และเมื่อดูผลที่แสดงถึงผลของความเหนียวของตัวอย่างพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อไม่ส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นแต่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่กรณีของการทำให้เหล็กตามยาวของคานไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตนั้นทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นมากแต่กลับทำให้กำลังของจุดต่อลดลง และตัวอย่างที่เพิ่มขนาดของเสานั้นทำให้ความเสียหายไปเกิดที่คานแต่เนื่องจากไม่ได้ออกแบบให้คานมีความเหนียวจึงทำให้ความเหนียวของตัวอย่างมีน้อยมาก

เมื่อพิจารณาถึงผลของค่าความเครียด (strain) ของเหล็กเสริมบริเวณริมหน้าเสาเทียบกับรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างพบว่าการเกิดความเสียหายแบบ joint shear failure นั้นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับเหล็กตามยาวนั้นมีค่าน้อยกว่ากรณีของความเสียหายที่เกิดเนื่องจากคานถูกัดจนเสียหายซึ่งความเสียหายแบบนี้ทำให้ค่าความเครียดเกิดกับเหล็กเสริมบริเวณหน้าเสาอย่างมาก และ จากค่าการเปลี่ยนรูปของจุดต่อเนื่องจากแรงเฉือน (joint shear deformation) พบว่าถึงแม้ว่าตัวอย่าง a , c , d จะเกิดการเปลี่ยนรูปของจุดต่อเนื่องจากแรงเฉือนมากก็ไม่สามารถลดความเสียหายที่เกิดกับจุดต่อ แต่ มีจุดสังเกตที่ว่ากรณีตัวอย่างที่เป็นแบบ un-bonded beam bar นั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับจุดต่อมีน้อยและยังทำให้ความเหนียวเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

Kaung and Wong (2011) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเหล็กปลอกในจุดต่อคาน-เสารายนอกอาคาร โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 6 ตัวอย่างที่มีการแปรผันจำนวนเหล็กปลอกและแปรผันขนาดความลึกของคานตามรูปที่ 2.7



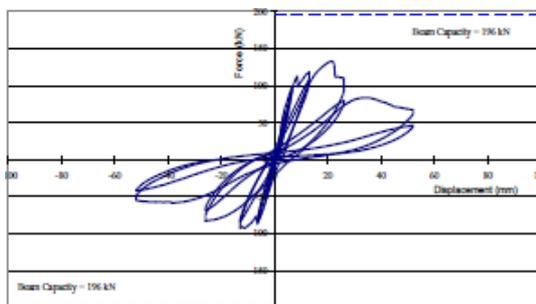
Notes

- (1) Columns: 300 × 300 mm; main steel: 4T25; stirrups: T10.
- (2) Beams: width = 260 mm; main steel: 3T20 each side; stirrups: T10.
- (3) Beam-column depth ratio: 1.5 for BS-450 series; 2.0 for BS-600 series.

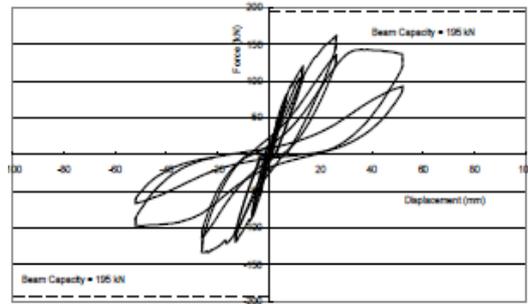
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างทดสอบที่มีการแปรผันจำนวนเหล็กปลอกและความลึกคาน

(Kaung. and Wong. ,2011)

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทุกตัววิบัติด้วยแรงเฉือนที่บริเวณจุดต่อ และเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจะส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อคาน-เสาเพิ่มขึ้น ในส่วนของพฤติกรรมแบบ hysteretic ภายในแรงกระทำแบบสลับทิศพบว่าตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อหลังจากผ่านจุดที่มีกำลังสูงสุดแล้วและเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดต่อแล้วความแข็งแรงและกำลังของจุดต่อลดลงอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกระจายพลังงานที่แย่มาก เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อสิ่งที่มีผลอย่างชัดเจนคือกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อเพิ่มขึ้น ความเหนียวรวมถึงความสามารถในการกระจายพลังงานดีขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อนั้นช่วยปรับปรุงพฤติกรรมแบบ hysteretic เล็กน้อยเมื่อดูจากรูปที่ 2.8



(ก)

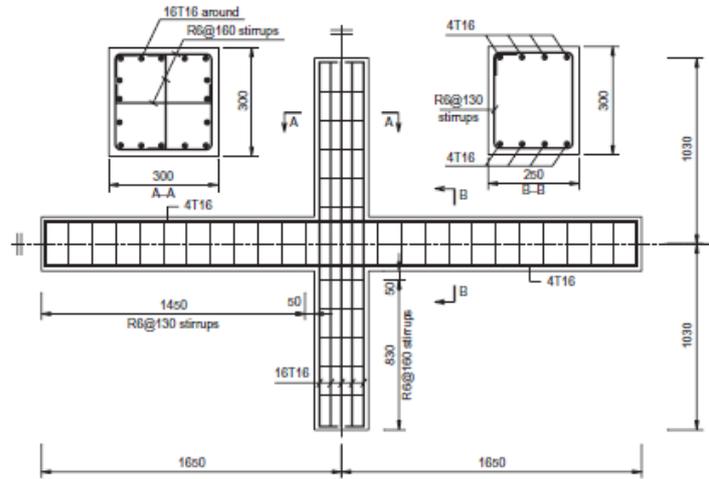


(ข)

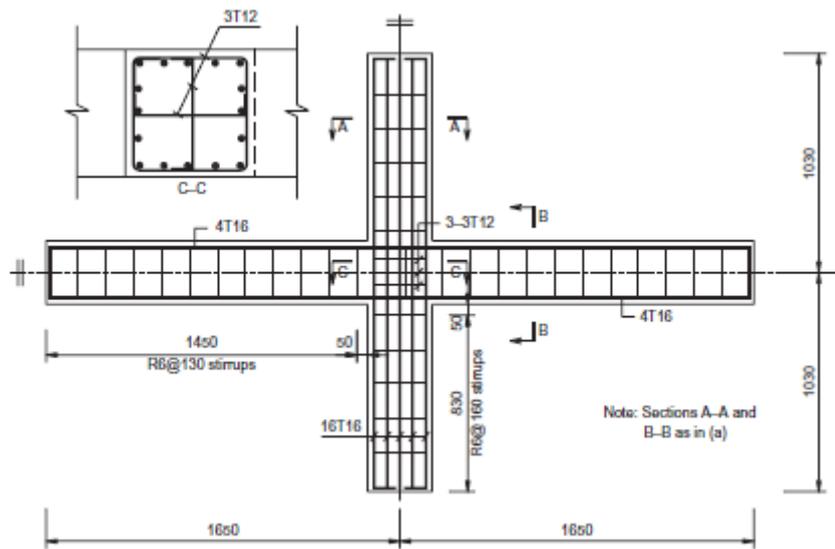
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนที่ (ก) ไม่มีเหล็กปลอก (ข) มีเหล็กปลอก

(Kaung. and Wong. ,2011)

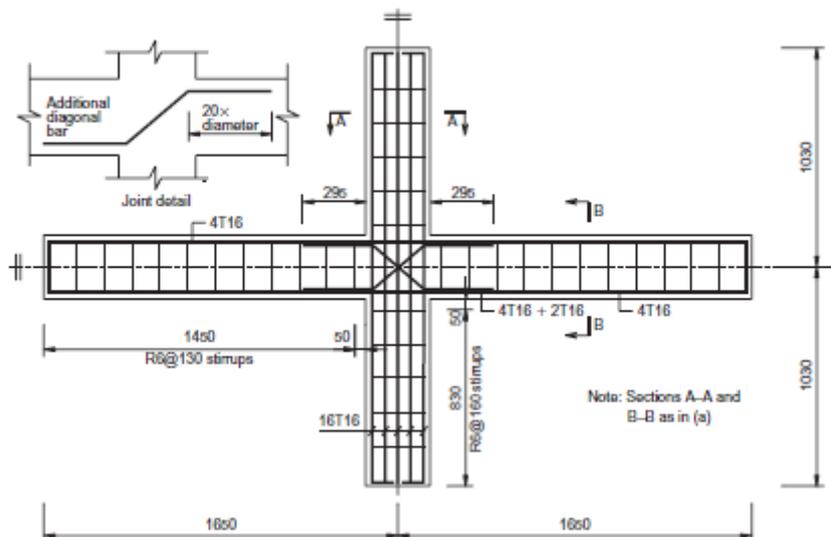
Au , Huang and Pam (2005) ได้ศึกษาผลของเหล็กเสริมในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสา ที่รับแรงกระทำแบบสลับทิศ โดยทำการศึกษาตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดการเสริมเหล็กบริเวณจุดต่อที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.9 โดยตัวอย่างแรกไม่มีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อคาน-เสา ตัวอย่างที่สองนั้นมีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อ ตัวอย่างสุดท้ายเป็นการเสริมเหล็กแนวทแยงในจุดต่อ และทั้งสามตัวอย่างจะทำการทดสอบสองรูปแบบคือมีการให้แรงในแนวแกนกระทำต่อเสาและไม่มีแรงในแนวแกนกระทำกับเสา



(ก) ไม่มีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อคาน-เสา



(ข) มีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อคาน-เสา



(ค) มีการเสริมเหล็กแนวทแยง (Diagonal bar) บริเวณจุดต่อคาน-เสา
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างทดสอบ (Au., Huang, and Pam., 2005)

การทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างเกิดรอยแตกแนวทแยง (Diagonal crack) โดยตัวอย่างที่เกิดความเสียหายอย่างมากคือตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อ ซึ่งบริเวณจุดต่อของตัวอย่างนี้เกิดรอยแตกและการหลุดร่อนของคอนกรีต ส่วนตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อพบว่ารูปแบบความเสียหายเหมือนกับตัวอย่างก่อนหน้าแต่ความรุนแรงน้อยกว่า และตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กแนวทแยง(Diagonal bar) บริเวณจุดต่อนั้นในช่วงแรกของการให้แรงกระทำพฤติกรรมจะเหมือนกับตัวอย่างที่ผ่านมาและเมื่อเพิ่มแรงกระทำพบว่าไม่มีการหลุดร่อนของคอนกรีตบริเวณจุดต่อและการเสริมเหล็กแบบนี้ยังช่วยส่งผลให้จุดต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น จากนั้นทำการทดสอบโดยให้เสามีแรงในแนวแกนกระทำพบว่าช่วยให้กำลังของจุดต่อเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่มีผลน้อยที่สุดคือตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กปลอกที่จุดต่อส่วนตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กแนวทแยงนั้นพบว่าทำให้กำลังเพิ่มขึ้นถึง 7% ของกำลังปกติ

เมื่อกล่าวถึงความเหนียวของตัวอย่างทดสอบพบว่าตัวอย่างที่เสริมเหล็กปลอกบริเวณจุดต่อเป็นตัวอย่างที่มีความเหนียวมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อกลับพบว่าการเสริมเหล็กในแนวทแยงนั้นส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อมีมากที่สุดอีกทั้งความเหนียวของจุดต่อรูปแบบนี้อยู่ในช่วงปานกลาง

2.1.2 รูปแบบและการตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบจุดต่อคาน- เสาของโครงสร้างสำเร็จรูป

Daniel Camarena (2006) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเสาคานสำเร็จรูปชนิดอัดแรงในโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวโดยได้มีการคัดเลือกรูปแบบของจุดเชื่อมต่อระหว่างคานและเสามา 10 ชนิด จากนั้นจึงทำการคัดเลือกจุดเชื่อมต่อที่ดีที่สุด ด้วยการให้คะแนนในคุณสมบัติต่าง ๆ 8 คุณสมบัติ ดังนี้

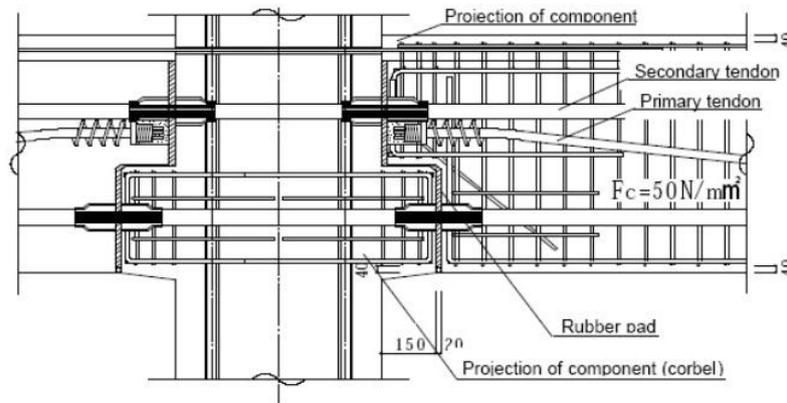
1. รูปแบบของจุดเชื่อมต่อ

รูปแบบที่ 1

รูปแบบนี้ถูกใช้ในญี่ปุ่นนำเสนอโดย Nakano et al (2001)ขึ้นส่วนโครงสร้างเสาคานที่ใช้เป็นชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป การประกอบเข้าด้วยกันทำโดยการใช้กลุ่มลวดอัดแรงโครงสร้างถูกออกแบบให้รับแรงในแนวตั้งและรับแรงแผ่นดินไหวได้ปานกลาง จุดเชื่อมต่อเป็นจุดเชื่อมต่อแบบยึดแน่นและจุดเชื่อมต่ออยู่ในสภาพรับกำลังอัด ภายใต้แผ่นดินไหวที่รุนแรงขึ้น ความยืดหยุ่นได้ของชิ้นส่วนต่าง ๆ จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย อาจจะมีการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการดูดซับพลังงานการสั่นสะเทือนเข้าไปเพิ่มเติมหากต้องการ

มีการใช้งานลวดในสองรูปแบบ รูปแบบแรกมีการดึงลวดจนถึง 85% ของจุดคานและมียึดที่ปลายแต่ละด้านของชิ้นส่วน การใช้งานรูปแบบที่สอง จะถูวางผ่านไปยังชิ้นส่วนที่อยู่ติดกันเพื่อทำหน้าที่ยึดชิ้นส่วนโครงสร้างเข้าด้วยกัน โดยจะทำการดึงลวดในส่วนนี้ 50% ของจุดคาน แรง

เมื่อจุดเชื่อมต่อจะถูกรับโดยบาคอนกรีตและถ่ายทอดแรงลงไปยังเสา คานที่ใช้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10

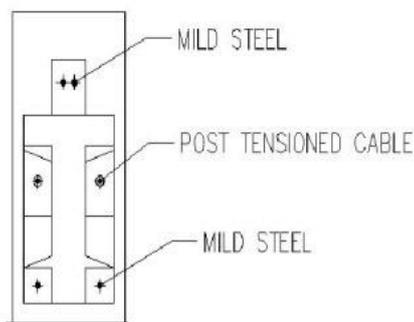


รูป 2.10 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 1 [Nakano et al (2001)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 2

รูปแบบนี้ได้มีการนำเสนอในการค้นคว้าที่ตุรกี ในเอกสารของ Özdil et al (2002) จุดเชื่อมต่อในรูปแบบนี้จะทำการเชื่อมต่อด้วย โพลสเทนชั้นชนิดไร้แรงยึดเหนี่ยว ลวดอัดแรงจะวิ่งผ่านชั้นส่วนในบริเวณใกล้กึ่งกลางคาน คานที่ใช้จะเป็นคานหน้าตัดรูปไอ จุดเชื่อมต่อรูปแบบนี้จะใช้ลวดอัดแรงความยาวน้อย ในการเชื่อมต่อ

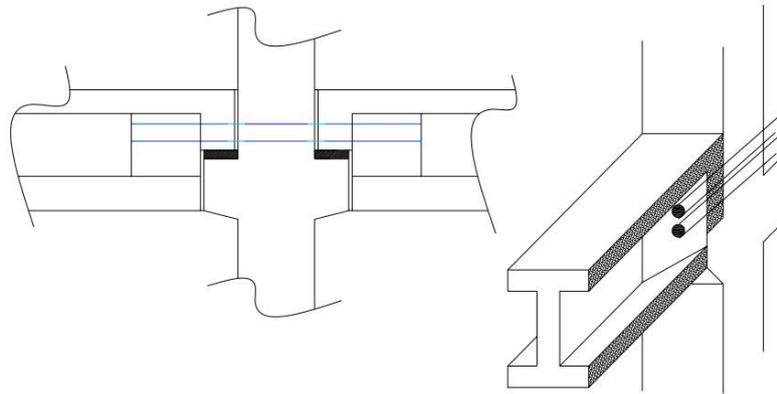


รูป 2.11 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 2 [Özdil et al (2002)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 3

รูปแบบที่ 3 นี้เป็นการปรับปรุงเปลี่ยนจากรูปแบบที่ 2 โดยจะมีปาดคอนกรีตยื่นออกมา รับคานและจะมีลวดอัดแรงที่ใช้ยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันเพิ่มขึ้นเป็น 2 ชั้น ซึ่งลวดที่ใช้จะมีความยาว เท่ากันทุกเส้น คานคอนกรีตที่ใช้จะเป็นชนิดอัดแรงเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นโดยจะมีลิมยึดอยู่ที่ปลายแต่ละ ด้านของคาน

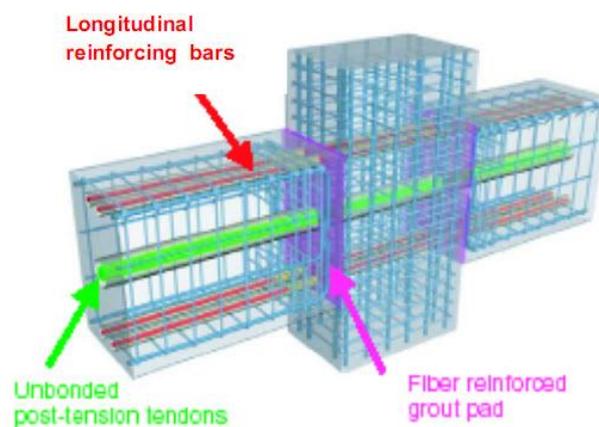


รูป 2.12 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 3

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 4

รูปแบบนี้จัดอยู่ในประเภทจุดเชื่อมต่อแบบผสม คานและเสาที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะถูกเชื่อมต่อกันกันด้วย โฟสเทนชั้นแบบไร้แรงยึดเหนี่ยว และยังได้เพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้างเข้าไปด้วยเหล็กเสริมที่วิ่งผ่านท่อนที่ผิวเป็นลอน ในคาน – เสา และทำการเกร้าท์

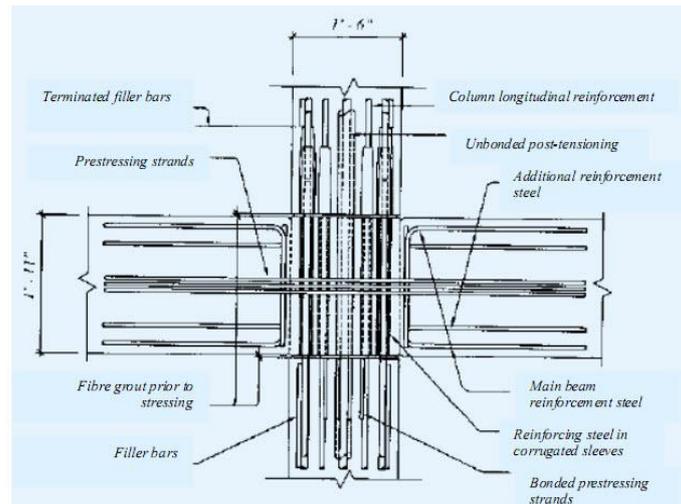


รูป 2.13 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 4 [Pampanin (2003)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 5

รูปแบบที่ 5 ประกอบไปด้วยคานต่อเนื่องที่มีการอัดแรงที่ปลายคานที่อยู่ด้านนอกสุด แต่มีการสลายแรงยึดเหนี่ยวบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่าง คาน – เสา ไม่มีการเสริมเหล็กรับแรงในคานข้ามผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่าง คาน – เสา คานจะถูกวางให้ทะลุผ่านแนวเหล็กเสริมในเสาโดยการเสริมเหล็กที่จะทำให้เหล็กเสริมในเสาต่อเนื่องกัน จุดเชื่อมต่อในรูปแบบนี้ถูกนำเสนอโดย Priestley et al (1999)

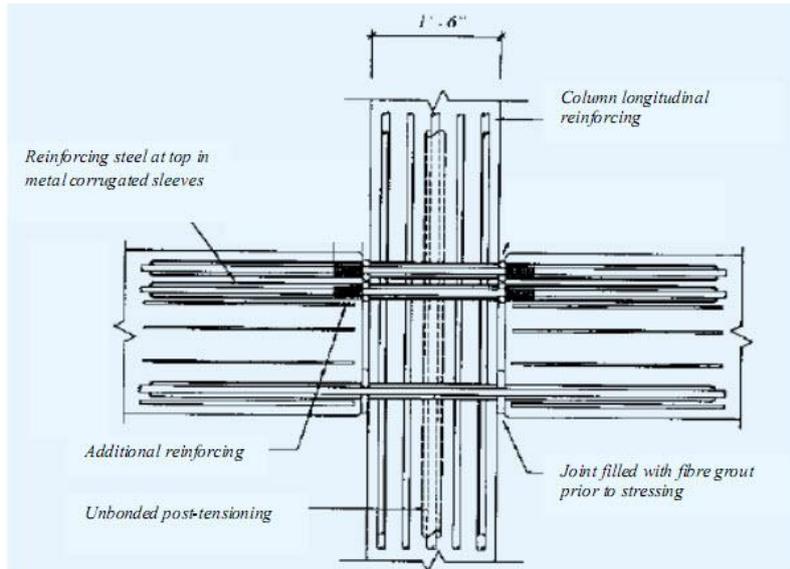


รูป 2.14 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 5 [Priestley et al (1999)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 6

รูปแบบนี้จะมีจุดเชื่อมต่อที่เรียกว่า TCY-gap ดังแสดงในรูปที่ 2.15 บริเวณด้านล่างของจุดเชื่อมต่อนี้ติดกับเสาโดย ลวดที่ดึงแบบโพสเทนชันชนิดไร้แรงยึดเหนี่ยวที่ทะลุผ่านแผ่นไฟเบอร์ยาแนวที่มีอยู่เฉพาะด้านล่าง ประมาณ 2 ใน 3 ของจุดเชื่อมต่อ จะมีช่องว่างระหว่างจุดเชื่อมต่อ 25 มม. เหล็กเสริมจะถูกสอดผ่านท่อลอนและจะถูกเก็บไว้ในคานและเสา รูปแบบของจุดเชื่อมต่อนี้ถูกนำเสนอโดย Priestley et al (1999)

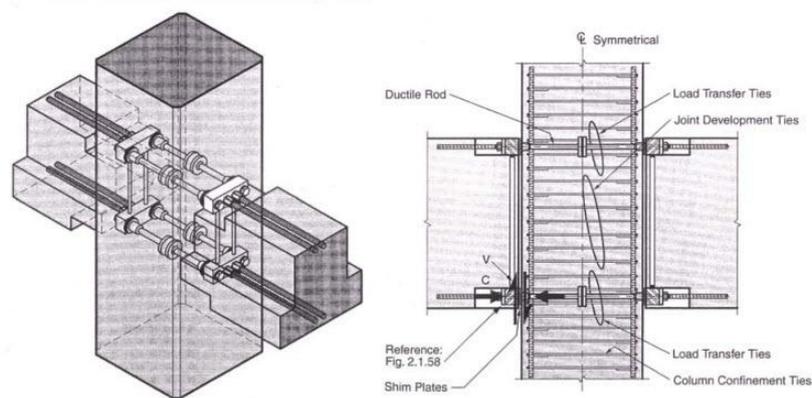


รูป 2.15 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 6 [Priestley et al (1999)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 7

รูปแบบนี้ใช้การรวมกันของ ระบบ DYWIDAG โปสเทนชั่นลวดตีเกลียวประเภทไร้แรงยึดเหนี่ยว และเหล็กเสริมที่ทำการเกร้าที่ปิด เพื่อที่จะเชื่อมต่อดาน – เสาคู่เข้าด้วยกัน ลวดอัดแรงจะถูกสอดเข้าไปในท่อที่อยู่ในคาน และลิมยึดจะถูกวางไว้ที่เสาคู่การอัดแรงจะถูกทำขึ้นที่นี้ รูปแบบของจุดเชื่อมต่อนี้ถูกนำเสนอโดย Englekirk (2002)

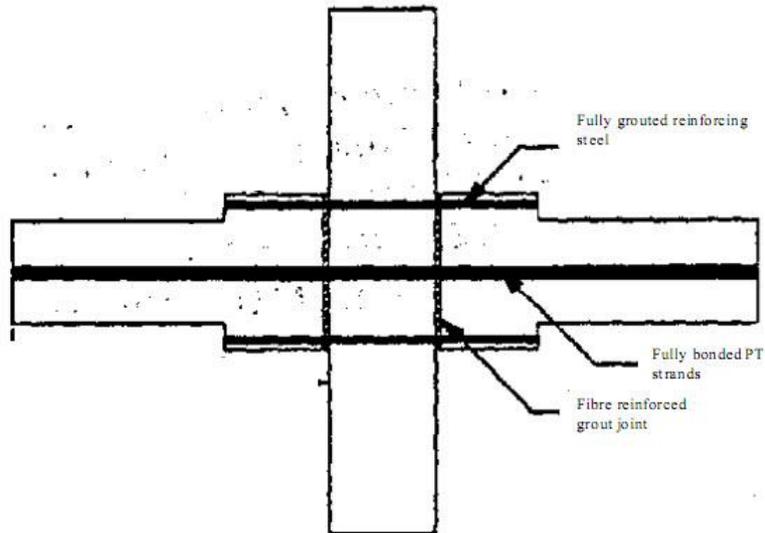


รูป 2.16 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 7 [Englekirk (2002)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 8

รูปแบบนี้จะประกอบไปด้วยเหล็กเสริมประเภทมีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ด้านบนและด้านล่างของคาน และมีลวดอัดแรงประเภทมีแรงยึดเหนี่ยวอยู่บริเวณกึ่งกลางคาน และจะวางอยู่บริเวณขอบของคาน รูปแบบนี้จะใช้การดึงลวดแบบโพสเทนชั่น ซึ่งจะทำให้การร้อยลวดตลอดความยาวของโครงสร้าง รูปแบบนี้ถูกนำเสนอโดย stone et al (1995)

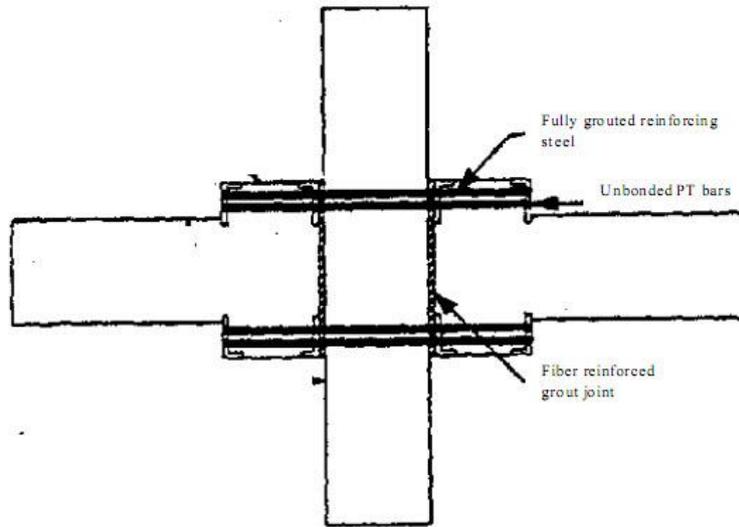


รูป 2.17 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 8 [Stone et al (1995)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 9

จุดเชื่อมต่อนี้ใช้เหล็กเสริมประเภทมีแรงยึดเหนี่ยว และ ระบบโพสเทนชั่นประเภทไร้แรงยึดเหนี่ยวเข้าไว้ด้วยกัน ทั้งคู่จะถูกวางไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของคาน รูปแบบนี้ได้นำเสนอโดย Stone et al (1995)

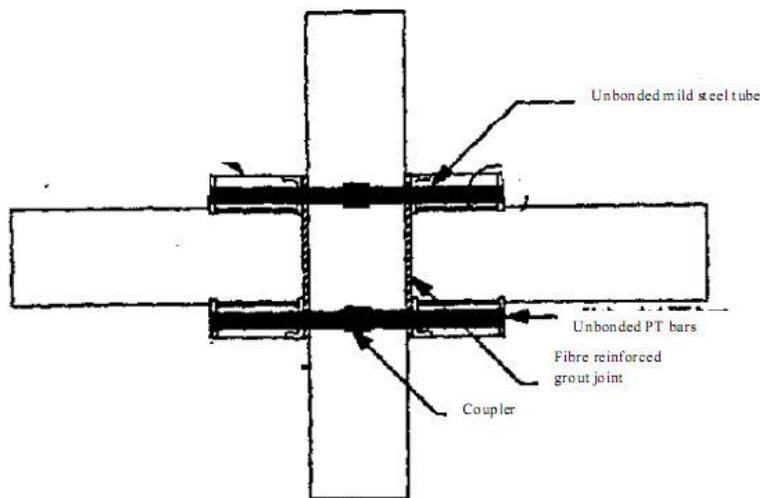


รูป 2.18 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 9 [Stone et al (1995)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

รูปแบบที่ 10

รูปแบบนี้ใช้เหล็กเหล็วโดยไม่มีแรงยึดเหนี่ยวและ ระบบโพสเทนชั่นประเภทไร้แรงยึดเหนี่ยวถูกวางไว้ที่ด้านบนและด้านล่างของคาน รูปแบบนี้ได้นำเสนอโดย Stone et al (1995)



รูป 2.19 แสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อแบบที่ 10 [Stone et al (1995)]

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

2 คุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อ

2.1 ประสิทธิภาพ

หนึ่งในข้อดีหลักของโครงสร้างสำเร็จรูปก็คือสามารถผลิตโดยกระบวนการผลิตในโรงงานได้ ดังนั้นวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นข้อจำกัดในการเลือกรูปแบบของจุดเชื่อมต่อ การวางแนวของเส้นลวดเป็นแนวตรงจะง่ายและเร็วกว่าการวางแนวลวดเป็นเส้นโค้ง การมีหน้าตัดคานรูปร่างแปลกจากปกติจะทำให้การประกอบแบบและการถอดออกจากแบบทำได้ยากขึ้น ในบางรูปแบบของจุดเชื่อมต่อต้องการคนงานที่มีฝีมือในการผลิตสูง ซึ่งเป็นปัญหาในบางประเทศและเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้นทุนมีราคาสูงไปด้วย

2.2 การติดตั้ง

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของโครงสร้างสำเร็จรูปคือการติดตั้งที่รวดเร็ว สำหรับรูปแบบของจุดเชื่อมต่อที่มีคานปีกยื่นจากชิ้นส่วนเสาหรือจตุรรองรับจากเสาเพื่อรองรับคานสำหรับการติดตั้ง จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตั้งและมีความปลอดภัยสูง จุดเชื่อมต่อที่ไม่มีจตุรรับจากชิ้นส่วนเสา จะต้องการค้ำยันชั่วคราวในการติดตั้ง

2.3 การเกร้าท์และการดิ่งลวด

กระบวนการเกร้าท์และกระบวนการการดิ่งลวดเป็นกระบวนการที่ยากและละเอียดอ่อน หากมีบางส่วนของท่านลวดที่ไม่ถูกเกร้าท์ จะทำให้กระบวนการแพงและซบซ้นมากยิ่งขึ้นเนื่องจากต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการแก้ไข

วิธีการดิ่งลวดแบบดิ่งที่หลังเป็นหนึ่งในทางเลือกที่มีวิธีการที่ซบซ้นมากชนิดหนึ่ง การก่อสร้างอาคาร พาราเม้าท์ในซานฟรานซิสโก แสดงให้เห็นถึงจุดเชื่อมต่อแบบผสมซึ่งต้องการเทคนิคแบบพิเศษสำหรับการดิ่งลวดที่หลัง ซึ่งทำให้โครงสร้างมีราคาแพง

2.4 ความทนทาน

ส่วนประกอบของโครงสร้างถูกผลิตในโรงงานโดยใช้คอนกรีตที่มีคุณภาพสูงมีการควบคุมคุณภาพที่เข้มงวดจึงรับประกันได้ว่าจะมีความคงทนที่ดีกว่า ยิ่งกว่านั้นชิ้นส่วนอัดแรงจากโรงงานจะมีรอยแตกที่คอนกรีตน้อยมาก ภายใต้แรงสั่นสะเทือนที่สูงจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนอาจจะมีรอยแตกได้ รอยแตกเหล่านี้จะพยายามที่จะปิดตัวลงเองถ้าเป็นจุดเชื่อมต่อชนิดไร้แรงยึดเหนี่ยวของโพลีเทนชั่น

2.5 ความเสี่ยงในการเสียหายและความต้องการการซ่อมแซม

ความกังวลหลักของเจ้าของอาคารคืออาคารของเขานั้นสามารถใช้ได้อยู่หรือไม่ หลังจากเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ข้อมูลความเป็นไปได้ในเรื่องราคาและเวลาสำหรับการซ่อมแซมจะเป็นความกังวลอย่างมากสำหรับผู้ที่ต้องการซ่อมแซม

บางชนิดของจุดเชื่อมต่อถูกออกแบบมาอย่างดีในหัวข้อนี้ โดยการออกแบบให้ความเสียหายของโครงสร้างถูกจำกัดอยู่เพียงแค่จุดเชื่อมต่อและพลังงานนั้นจะถูกสลายไป การทำนายความเสียหายที่จะเกิดขึ้นทำได้ง่ายและนั่นก็หมายความว่าเราสามารถประมาณค่าใช้จ่ายและเวลาในการซ่อมแซมด้วยความแม่นยำสูง จุดเชื่อมต่ออีกชนิดหนึ่งมีการใช้เหล็กชนิดพิเศษวางไว้ด้านในเสาซึ่งมีคุณสมบัติที่จะตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวได้ดี โดยปราศจากความเสียหายของคอนกรีตโดยรอบ

2.6 ความยาวของกลุ่มลวดและการจัดเตรียม

ความยาวของกลุ่มลวดขึ้นอยู่กับระบบของการอัดแรงและการจัดเตรียมกลุ่มลวด กลุ่มลวดจะถูกวางในแนวโค้งหรือตรงขึ้นอยู่กับรูปแบบ บางชนิดของจุดเชื่อมต่อแสดงให้เห็นถึงความไม่ประหยัดถ้าหากพิจารณาเกี่ยวกับการเลือกใช้กลุ่มลวดและความยาวของมัน

2.7 การไร้แรงยึดเหนี่ยวกับความสามารถในการกลับสู่จุดศูนย์กลาง

การเลือกใช้โพสเทนชั่นระบบไร้แรงยึดเหนี่ยวจะมีการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพสูงกับความสามารถในการกลับคืนสู่จุดศูนย์กลางด้วยตนเอง ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการปล่อยไหลจากการหมุนที่ไม่เป็นเส้นตรง คานนั้นจะสามารถกลับมาสู่จุดเริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างถาวรเพียงเล็กน้อย ความสามารถในการกลับสู่จุดศูนย์กลางจะหมายถึงเมื่อมีแรงหมุนมากระทำแล้วเกิดความเสียหายเล็กน้อยขึ้นกับคาน การอัดแรงของเส้นลวดจะเพียงพอที่จะปิดช่องว่างเมื่อไม่มีแรงมากระทำแล้วได้ นอกจากนี้ลวดที่ไร้แรงยึดเหนี่ยวยังช่วยชะลอความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กอีกด้วย

2.8 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

ความสามารถในการดูดซับพลังงานการสั่นสะเทือนของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง มักจะถูกพิจารณาว่าน้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็ก สำหรับการเพิ่มความสามารถนั้นใช้การออกแบบที่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ภายใต้แรงแผ่นดินไหว ในการออกแบบในระบบผสมจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานโดยใช้เหล็กเสริมชนิดพิเศษ หรืออาจจะมีการใส่อุปกรณ์เพื่อทำการกระจายพลังงานออกไป

เมื่อได้ทำการให้คะแนนในปัจจุบันต่าง ๆ แล้วก็จะสามารถสรุปได้ว่าชนิดของจุดเชื่อมต่อแบบใดที่มีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาต่อไปโดยมีคะแนนในหัวข้อต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1

คุณสมบัติ \ รูปแบบ	1	3	2	5	4	7	9	10	6	8
ประดิษฐ์กรรม	3	1	2	3	2	1	3	2	0	3
การติดตั้ง	4	4	1	2	1	0	0	1	0	1
การเก็รภัทและการดิ่งลวด	2	4	4	3	1	1	2	1	1	1
ความทนทาน	4	3	2	3	3	4	3	3	3	2
ความเสี่ยงในการเสียหายและความต้องการการซ่อมแซม	4	3	3	3	4	4	2	2	1	2
ความยาวของกลุ่มลวดและการจัดเตรียม	1	4	4	2	2	4	3	4	4	2
การไร้แรงยึดเหนี่ยวกับความสามารถในการกลับสู่จุดศูนย์กลาง	4	3	3	4	4	3	3	2	1	1
ความสามารถในการดูดซับพลังงาน	3	2	2	1	3	3	2	2	4	2
รวม	25	24	21	21	20	20	18	17	14	14

ตารางที่ 2.1 แสดงการให้คะแนนและจัดอันดับทางเลือก

ที่มา: Daniel Camarena (2006)

อภิสิทธิ์ นิ่มสกุล (2547) ได้ทำการสำรวจความคิดเห็นของคน 3 กลุ่ม ประกอบด้วย บุคคลทั่วไป, วิศวกรโยธา , ผู้ประกอบการเกี่ยวกับธุรกิจสร้างบ้าน ต่อการใช้ระบบโครงสร้างสำเร็จรูปในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยในจังหวัดเชียงใหม่พบว่าการใช้ระบบโครงสร้างสำเร็จรูปจะทำให้การก่อสร้างมีโอกาสประสบความสำเร็จมากกว่าการใช้ระบบโครงสร้างแบบหล่อในที่ เนื่องจากสามารถควบคุมปัจจัยด้าน ระยะเวลา , คุณภาพ , ต้นทุน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มว่าจะเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในอนาคต

วรากร วราห์ไพฑูรย์ และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบราคาก่อสร้างและแผนงานก่อสร้างบ้านเอื้ออาทรระหว่างการใช้โครงสร้างแบบหล่อในที่และโครงสร้างแบบหล่อสำเร็จ พบว่าราคาค่าก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จมีราคาถูกกว่าค่าก่อสร้างแบบหล่อในที่ ประมาณ 7% และระยะเวลาในการก่อสร้างโดยใช้ระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จมีระยะเวลาน้อยกว่าแบบหล่อในที่ ประมาณ 14%

สุทธิพล วิวัฒน์ทีปะ (2540) ได้ทำการกำหนดการพิจารณาขบวนการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปและรอยต่อ นอกจากนี้ยังได้กำหนดการพิจารณาการขนส่ง และการติดตั้งชิ้นส่วนไว้ดังนี้

1. การพิจารณาขบวนการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปและรอยต่อ

1.1 ชิ้นส่วนสำเร็จรูปควรจะมีรูปแบบเรียบง่าย และมีรูปแบบที่ซ้ำกันมากที่สุดเพื่อสะดวกในการลดจำนวนแบบที่ใช้ในการผลิตได้

1.2 หลีกเลี่ยงการใช้เหล็กเสริมที่แน่นเกินไป เพราะจะทำให้การเทคอนกรีตและการทำงานทำได้ยาก

1.3 หลีกเลี่ยงวิธีที่มีการเจาะทะลุแบบมากเกินไปเนื่องจากจะทำให้ทำงานยากและอาจทำให้แบบได้รับความเสียหายมาก

1.4 ใช้รายละเอียดที่มีชิ้นส่วนฝังอยู่ในคอนกรีต เช่น ตัวต่อเชื่อม ให้น้อยที่สุดเนื่องจากความยุ่งยากในการยึดชิ้นส่วนต่าง ๆ ให้เข้าที่ และไม่มีการขยับในขณะที่เทคอนกรีตนั้นจะทำให้ได้ยากและเสียเวลา

1.5 การใช้วัสดุ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นมาตรฐาน และหาได้ทั่วไป จะเป็นการลดต้นทุนและลดวัสดุที่จะต้องกองเก็บไว้

1.6 หลีกเลี่ยงการใช้รอยต่อที่ต้องใช้เครื่องมือหนักในการขนส่งและติดตั้ง เพื่อความคล่องตัวในการทำงาน

2. กำหนดการพิจารณาการขนส่ง และการติดตั้งชิ้นส่วน

2.1 ชิ้นส่วนมีขนาดและรูปร่างที่สามารถขนส่งจากโรงงานผลิตไปยังสถานที่ก่อสร้างโดยใช้รถขนส่งวัสดุทั่วไปได้

- 2.2 หลีกเลี้ยงชิ้นส่วนที่มีส่วนที่ยื่นออกมา ซึ่งทำให้การขนส่งทำได้ยาก
- 2.3 ใช้รอยต่อที่ทำงานภายในสนาม เพื่อความรวดเร็วและป้องกันความผิดพลาด
- 2.4 ควรจะออกแบบให้ป็นจัน และเครื่องมือหนักในการติดตั้งน้อยที่สุด ชิ้นส่วนที่หนักมากควร จะออกแบบให้สามารถแขวนกับอุปกรณ์ยกได้ เพื่อการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนเข้าที่ได้เร็วเพราะจะ ประหยัดเวลาในการใช้ป็นจัน
- 2.5 ต้องมีระยะเผื่อ สำหรับความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่จะต่อกัน เพื่อหลีกเลี้ยงการตัด เจาะหรือขยายรอยต่อใหม่
- 2.6 หลีกเลี้ยงการเก็บชิ้นส่วนสำเร็จรูป ถ้าเป็นไปได้ควรจะมีการวางแผนให้ชิ้นส่วนที่มาจาก โรงงานสามารถนำขึ้นติดตั้งได้ในทันทีโดยไม่ต้องทำการกองเก็บไว้ที่หน้างาน

มามี โตบาร์มิกุล (2540) ได้ทำการแบ่งประเภทของจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปออกเป็น 3 ประเภท และการส่งผ่านแรงที่กระทำระหว่างจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปดังนี้ คือ

1. ประเภทของจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป

1.1 จุดเชื่อมต่อแบบเปียก เป็นลักษณะของจุดเชื่อมต่อที่เกิดขึ้นจากการอุดจุดเชื่อมต่อ โดยจุด เชื่อมต่อนี้จะไม่สามารถรับแรงต่าง ๆ ได้ทันที ต้องรอจนกว่าวัสดุมีความแข็งแรงตามข้อกำหนด จุด เชื่อมต่อแบบนี้ได้แก่ จุดเชื่อมต่อแบบการใช้เหล็กเดือย-อุด เป็นต้น

1.2 จุดเชื่อมต่อแบบแห้ง เป็นลักษณะของจุดเชื่อมต่อที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของวัสดุที่ สามารถรับแรงต่าง ๆ ได้ทันที จุดเชื่อมต่อแบบนี้ ได้แก่แบบการใช้สลักเกลียว เป็นต้น แบบการเชื่อมต่อ แบบนี้ หลังจากทำงานเสร็จแล้วจะทำการปิดรอยต่อด้วยมอร์ต้า อีพอกซี วัสดุกันซึมหรือวัสดุกันสนิม อย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับกรออกแบบ

1.3 จุดเชื่อมต่อแบบอัดแรงภายหลัง เป็นลักษณะของจุดรอยต่อที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนสำเร็จรูป แต่ละชิ้น หรือระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยจะใช้ลวดอัดแรง เป็นวัสดุที่ใช้ดึง และยึดปลายของลวดอัด แรงไว้ที่ชิ้นส่วนสำเร็จรูป การดึงจะกระทำหลังจากหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสร็จแล้วหรือหลังจากติดตั้ง ชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสร็จแล้ว

2. การส่งผ่านแรงที่กระทำระหว่างจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

ตามพื้นฐานของการประกอบจุดรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปของโครงสร้างอาคาร ที่ใช้ในการ ก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป ต้องสามารถส่งผ่านแรงที่กระทำระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปของ โครงสร้างได้ตามที่ออกแบบ ซึ่งแรงดังกล่าวประกอบด้วย

2.1 แรงอัด การส่งผ่านแรงอัดระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะใช้วิธีดังนี้

2.1.1 การส่งผ่านแรงโดยตรง เป็นการถ่ายแรงอัดของชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่สัมผัสกันโดยตรง จะไม่มีวัสดุใก้กันระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป เหมาะกับจุดที่มีแรงอัดหรือแรงกดไม่มากนัก

2.1.2 การส่งผ่านแรงโดยผ่านวัสดุ เป็นการส่งผ่านแรงอัดของชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยมีวัสดุมารองระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป และไม่ทำให้ผิวสัมผัสของชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสียหาย

2.2 แรงดึง การส่งผ่านแรงดึงระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปสามารถใช้วิธีดังนี้

2.2.1 การทาบทเหล็ก เป็นลักษณะที่ใช้กันมาก เป็นการเว้นส่วนที่มีการทาบทของเหล็กโครงสร้างที่รับแรงดึงและจะหล่อคอนกรีตในทีหลังจากติดตั้งเสร็จ จำนวนและปริมาณจะขึ้นอยู่กับการออกแบบ

2.2.2 การใช้สลักเกลียว สามารถใช้ส่งผ่านแรงดึงหรือแรงเฉือน ลักษณะของสลักเกลียวมีลักษณะเป็นแบบเกลียว แบบสมอ เป็นต้น

2.2.3 การเชื่อม ลักษณะเหมือนการทาบทเหล็ก แต่ใช้ระยะทาบทน้อยกว่า โดยใช้รอยเชื่อมแทน

2.2.4 การรับแรงดึงภายหลัง เป็นลักษณะจุดเชื่อมต่อที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนสำเร็จรูปในแต่ละชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยจะใช้ลวดอัดแรง เป็นวัสดุที่ใช้ดึงและยึดปลายของลวดอัดแรง ไว้ที่ชิ้นส่วนสำเร็จรูป การดึงจะกระทำหลังจากหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปแล้ว หรือหลังจากติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสร็จแล้ว

2.3 แรงเฉือน การส่งผ่านแรงเฉือนระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปสามารถใช้วิธีดังนี้

2.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ เป็นแรงที่เกิดจากผิวของวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปที่ประกบหรือแนบกัน แล้วก่อให้เกิดความฝืด ความฝืดดังกล่าวนี้จะช่วยให้เกิดแรงต้านในทิศทางตรงข้ามกับแรงเฉือนได้ แรงดังกล่าวจะมากหรือน้อยมักขึ้นอยู่กับวัสดุทั้งสอง มีพื้นผิวที่ฝืดมากน้อยเพียงใด

2.3.2 สลักรับแรงเฉือน คือ องค์ประกอบในชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นรอยหยักที่เพิ่มเข้าไปในบริเวณขอบรอยต่อของชิ้นส่วน ช่วยเพิ่มผลในด้าน การเพิ่มแรงเสียดทานให้กับชิ้นส่วนโครงสร้าง และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างนั้น ๆ อีกด้วย และยังทำหน้าที่ในการเพิ่มจุดยึดเหนี่ยวและกำลังในการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับวัสดุ ทำให้การยึดเหนี่ยวมีความแข็งแรงมากกว่าปกติ

2.3.3 การใช้สลักเกลียว เป็นการทำให้รอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีความแข็งแรงได้อีกวิธีหนึ่ง บางวิธีในการออกแบบรอยต่อการใช้สลักเกลียวนั้น จะช่วยทำให้การก่อสร้างนั้นง่ายและสะดวก สวยงามมากขึ้น ในบางครั้งการใช้สลักเกลียวอาจทำให้รอยต่อดังกล่าวแข็งแรงหรือการเป็นรอยต่อแบบอิสระก็ได้

2.3.4 การเชื่อม เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปในประเทศไทย วิธีนี้นิยมใช้เนื่องจากมีความแข็งแรงของโครงสร้าง ทำงานง่าย สะดวกในการก่อสร้างและที่สำคัญคือ ทำให้ราคาค่าก่อสร้างลดลงด้วย

2.2 ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการรับน้ำหนักของโครงสร้างสามารถแยกรูปแบบของชั้นส่วนสำเร็จรูปออกเป็นหมวดหมู่ได้ดังนี้

- ระบบเป็นช่องแผ่นขนาดกว้าง (Large – panel systems)
- ระบบโครงเฟรม (Frame systems)
- ระบบพื้นต่อกับเสาพร้อมกับผนังอาคาร (Slab – column system with walls)
- ระบบผสมของแต่ละระบบ (Mixed systems)

อย่างไรก็ตาม รูปแบบที่ได้รับความนิยมจะเป็น 2 รูปแบบแรก หรือ รูปแบบที่ผสมกันระหว่าง 2 รูปแบบแรกทั้งนี้ข้อมูลรายละเอียดทั้ง 2 รูปแบบแรกมีดังนี้

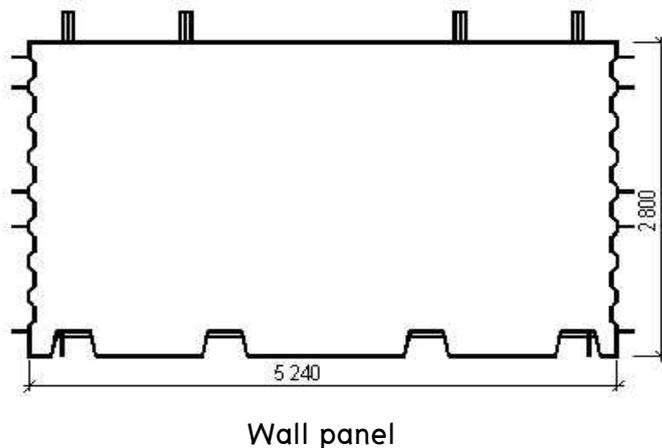
1) ระบบเป็นช่องแผ่นขนาดกว้าง (Large – panel systems)

การออกแบบระบบ large – panel systems เหมาะสำหรับอาคารที่มีจำนวนชั้นมากๆ โดยอาคารดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วยกำแพงขนาดใหญ่ และ แผ่นพื้นคอนกรีตเชื่อมต่อตัวอย่างการก่อสร้างโดยใช้ระบบเป็นช่องแผ่นขนาดกว้างนั้นแสดงดังรูปที่ 2.20 โดยรูปร่างของอาคารมีลักษณะคล้ายกล่องที่ประกอบด้วยกำแพงและแผ่นพื้น ซึ่งชั้นส่วนเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการต้านทานแรงในแนวตั้ง ชั้นส่วนสำเร็จรูปที่เป็นกำแพงนั้นจะมีความสูงเท่ากับความสูงของอาคาร 1 ชั้น และชั้นส่วนที่เป็นแผ่นพื้นนั้นจะเป็นพื้นแบบทางเดียวหรือพื้นสองทางก็ได้ กรณีของแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างนั้นชั้นส่วนพื้นจะทำหน้าที่เป็น Diaphragm และกำแพงทำหน้าที่รับแรงทางด้านข้าง ความหนาของกำแพงนั้นโดยทั่วไปสำหรับกำแพงภายในอาคารจะมีความหนาประมาณ 120 mm. ส่วนกำแพงภายนอกนั้นจะหนาประมาณ 300 mm. ในส่วนของแผ่นพื้นคอนกรีตนั้นมีความหนาประมาณ 60 mm.หรือมากกว่า ขึ้นกับระยะช่วงพาด ความยาวของชั้นส่วนกำแพงจะเท่ากับความยาวของห้อง 1 ห้องซึ่งโดยทั่วไปประมาณ 2.7 – 3.6 m.



รูปที่ 2.20 การก่อสร้างอาคารโดยระบบ Large - panel systems
(WHE Report 55, Russian Federation)

ระบบการเชื่อมต่อของชั้นส่วนสำเร็จรูปสามารถจำแนกจุดต่อออกเป็น 2 ประเภทคือ จุดต่อในแนวตั้ง และจุดต่อในแนวราบตามรูปที่ 2.21 โดยจุดต่อในแนวตั้งนั้นจะอยู่บริเวณขอบของชั้นส่วนกำแพงทำหน้าที่เชื่อมต่อกับชั้นส่วนกำแพงถัดไป ซึ่งจุดเชื่อมต่อนี้จะเป็นส่วนหลักในการต้านทานแรงเฉือนในแนวตั้ง ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวจุดเชื่อมต่อในแนวราบซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นส่วนกำแพงและชั้นส่วนแผ่นพื้นจะทำหน้าที่ต้านทานแรงในแนวราบที่เกิดจากแผ่นดินไหวรวมถึงแรงกดในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักของตัวชั้นส่วนเอง

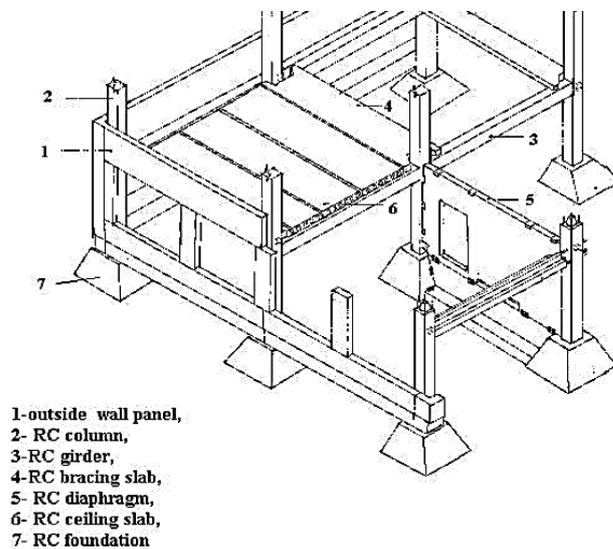


รูปที่ 2.21 ชั้นส่วนแผ่นกว้างสำเร็จรูปแบบมีเหล็กเดือยและร่องสำหรับเชื่อมต่อ
(WHE Report 38, Kyrgyzstan)

วิธีการก่อสร้างจุดต่อนั้นสามารถทำได้ทั้งจุดต่อแบบเป็ยกและจุดต่อแบบแห้ง จุดต่อแบบเป็ยกคือจุดต่อที่ใช้วิธีการเทในที่โดยมีเหล็กเสริมของชิ้นส่วนสำเร็จเชื่อมต่อกันเพื่อให้สามารถถ่ายแรงได้ ส่วนจุดต่อแบบแห้งนั้นคือจุดต่อที่ใช้วิธีการเชื่อมชิ้นส่วนติดกันด้วยแผ่นเหล็ก หรือจะใช้วิธีการยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันด้วยน๊อต ซึ่งรูปแบบการเทในที่นั้นจะสามารถปิดช่องว่างในการเชื่อมต่อได้ดีกว่าวิธีอื่น แต่การถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างนั้นวิธีการเชื่อมหรือใช้น๊อตจะสามารถถ่ายแรงได้ดีกว่า

2) ระบบโครงเฟรม (Frame systems)

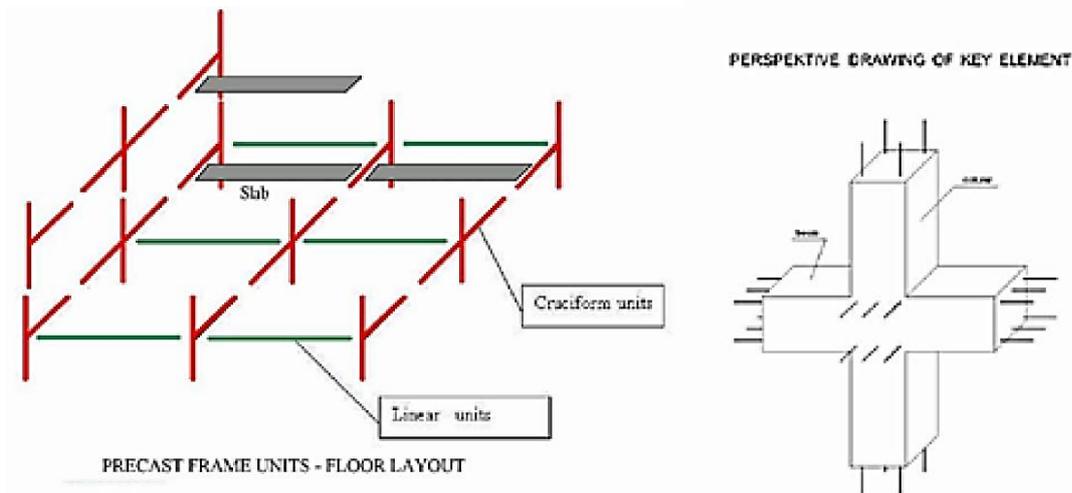
ลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วนเฟรมสำเร็จรูปนั้นมีทั้งแบบที่เป็นแท่งยาว หรือแบบชิ้นส่วนคาน - เสาคงต่อเป็นรูปร่างแบบไม้กางเขนตามรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 ชิ้นส่วนประกอบของโครงสร้างระบบโครงเฟรม

(WHE Report 66, Uzbekistan)

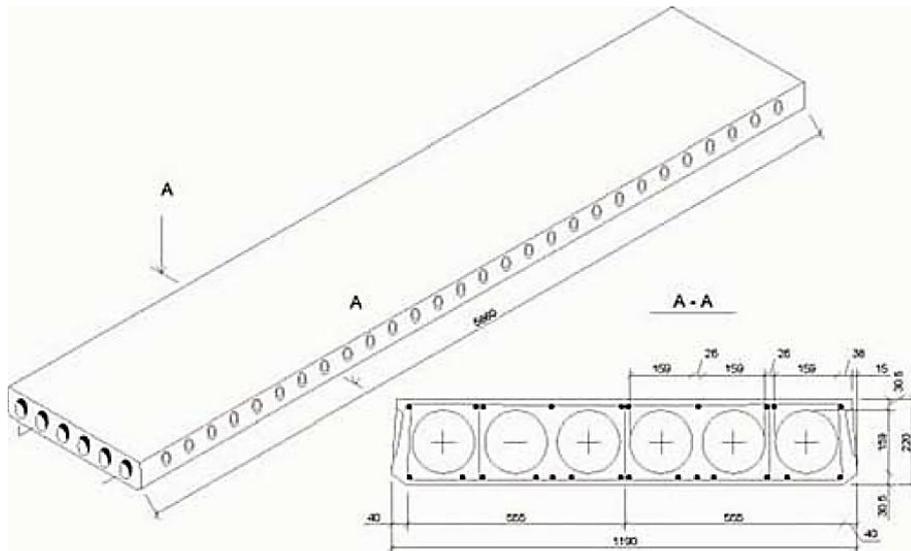
อย่างไรก็ตามรูปแบบชิ้นส่วนเฟรมที่มีลักษณะแบบแท่งยาวนั้นเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากวิธีการหล่อชิ้นส่วนและการยกไปติดตั้งที่หน้างานสามารถทำได้ง่ายกว่า การใช้งานชิ้นส่วนเฟรมแบบแท่งยาวนั้นจะต้องทำการเทปิดรอยเชื่อมบริเวณคาน - เสาคงโดยชิ้นส่วนที่เป็นคานนั้นจะวางบนแท่นรองรับของเสาคง แท่นนี้จะทำหน้าที่ถ่ายแรงเฉือนจากคานสู่เสาคง โดยการเชื่อมต่อแบบนี้พฤติกรรมของการเชื่อมต่อของคานจะเป็นแบบ Hinge อย่างไรก็ตามบริเวณจุดต่อคาน - เสาคงสามารถทำให้เป็นการเชื่อมต่อแบบยึดแน่นได้โดยการให้เหล็กเสริมตามยาวของชิ้นส่วนคานทั้ง 2 ปลายเชื่อมต่อกันผ่านจุดต่อคาน - เสาคง เพื่อให้การถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนทำได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.23 ชั้นส่วนเฟรมสำเร็จรูปแบบแท่งยาว และ ชั้นส่วนคานเสาซึ่งต่อแบบรูปแบบไม้กางเขน
(WHE Report 33, Kyrgyzstan)

ชั้นส่วนเฟรมสำเร็จรูปที่มีรูปร่างแบบไม้กางเขนหรือชั้นส่วนคานสำเร็จรูปเป็นตัวอย่างของโครงสร้างเฟรมที่ใช้ระบบจุดต่อคาน - เสา โดยระบบนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในบางประเทศตั้งแต่ปี 1975 โดยระบบการรับน้ำหนักของโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแบบ space frame และ แผ่นพื้นสำเร็จ

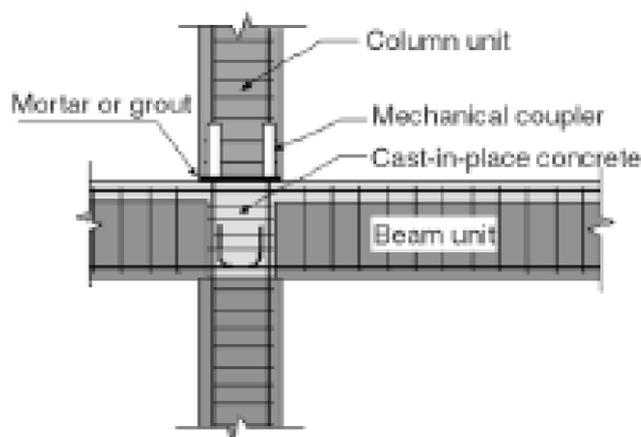
โครงเฟรมอาคารประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ชั้นส่วนสำเร็จรูปไม้กางเขน และชั้นส่วนคานสำเร็จรูป ชั้นส่วนสำเร็จรูปกางเขนประกอบไปด้วยจุดต่อที่มีส่วนของคานและเสาต่อกันโดยทำมุมตั้งฉากกัน ความยาวของคานและเสาในชั้นส่วนนี้มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของช่วง พาดซึ่งการเชื่อมต่อชั้นส่วนเข้าด้วยกันจะใช้วิธีการเชื่อมเหล็กเสริมของชั้นส่วนที่มาประกอบกันและทำการเทคอนกรีตปิดบริเวณที่เชื่อมต่อ ตำแหน่งที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นส่วนสำเร็จรูปกางเขนนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่วงเสา สำหรับพื้นอาจใช้ชั้นส่วนสำเร็จรูปดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.24 นั้นเมื่อนำมาเชื่อมต่อจะทำหน้าที่เป็นพื้นและเพดานของอาคาร



รูปที่ 2.24 ชั้นส่วนแผ่นพื้นสำเร็จ
(WHE Report 33, Kyrgyzstan)

2.3 จุดต่อของโครงสร้างชั้นส่วนคาน-เสาสำเร็จรูป

เมื่อกล่าวถึงจุดต่อของโครงสร้างอาคารซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างโดยการใช้ชั้นส่วนสำเร็จรูป พฤติกรรมของโครงสร้างชั้นส่วนสำเร็จรูปนั้นจะขึ้นกับพฤติกรรมของจุดต่อซึ่งการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารนั้นจะส่งผ่านแรงที่กระทำไปยังส่วนอื่นๆของโครงสร้างผ่านทางจุดเชื่อมต่อ ซึ่งรูปแบบของจุดเชื่อมต่ออาคารโครงเฟรมต้านแรงคัต(moment resisting frame) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1) เสมือนหล่อเป็นชิ้นเดียวกัน (Equivalent monolithic system) 2) แบบมีจุดต่อ (Jointed system) โดยในแต่ละแบบนี้มีรายละเอียดดังนี้



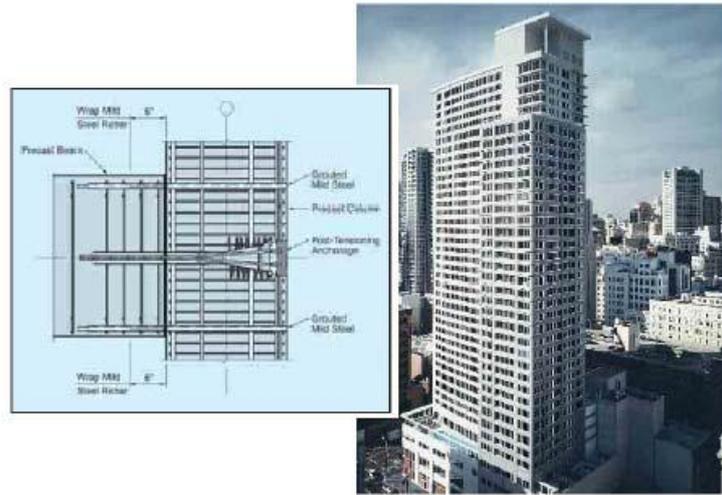
รูปที่ 2.25 จุดเชื่อมต่อนาน-เสาที่ใช้ระบบ equivalent monolithic
(Camarena. ,2006)

1) Equivalent monolithic systems หรือเป็นการเทในที่ตามรูปที่ 2.25 โดยสามารถแบ่งเป็นลักษณะย่อยได้อีก 2 แบบ คือ จุดต่อแบบแข็งที่มีความเหนียวจำกัด (Connections of limited ductility) และ จุดต่อที่มีความเหนียว (Ductile connections) โดยการออกแบบจุดต่อที่มีความเหนียวจำกัดนั้นจะออกแบบให้จุดต่อมีความแข็งแรงพอเพื่อให้เกิด yield เท่านั้น แต่จุดต่อแบบที่มีความเหนียวนั้นเป็นแบบที่ต้องการให้เกิด plastic hinge ขึ้นที่บริเวณคานตำแหน่งบริเวณหน้าเสาขณะที่โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวมากๆ และให้บริเวณจุดเชื่อมต่อเกิดเพียง yield เท่านั้น

2) Jointed systems ระบบนี้บริเวณจุดต่อจะมีความอ่อนแอกว่าชิ้นส่วนที่อยู่ติดกันโดยระบบ jointed นั้นประสิทธิภาพจะต่างจากระบบการเทในที่ โดยแบ่งย่อยออกได้เป็น จุดต่อที่มีความเหนียวจำกัด และ จุดต่อที่มีความเหนียว

จุดต่อที่มีความเหนียวจำกัดนั้นโดยทั่วไปจะเป็นจุดต่อแบบแห้ง (Dry joint) ที่ใช้วิธีการเชื่อมต่อโดยการเชื่อมหรือเชื่อมต่อนั้นส่วนโดยน็อต ซึ่งพฤติกรรมของจุดต่อแบบนี้ไม่เหมือนกับจุดต่อของวิธีการเทในที่ ในส่วนของจุดต่อแบบมีความเหนียวการยึดชิ้นส่วนจะใช้การเชื่อมหรือใช้น็อตเช่นเดียวกันแต่จะเพิ่มเติมการใช้การอัดแรงไว้การยึดเหนียว(Unbonded post-tensioned tendons) ซึ่งจุดต่อแบบนี้จะเป็นจุดต่อแบบแห้ง โดยเมื่อชิ้นส่วนเกิดการเสียรูปจนผ่านจุดยึดหยุ่นไปแล้วจะทำให้รอยต่อบริเวณหน้าเสาที่ติดกับคานเกิดการเปิดออก แต่ก็จะปิดกลับที่เดิมหลังจากแรงที่กระทำลดลงเนื่องจากลวดอัดแรงทำหน้าที่ดึงชิ้นส่วนให้เชื่อมติดกันนั้นยังคงอยู่ในช่วงยืดหยุ่นอยู่

พัฒนาการของโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปสำหรับต้านทานแผ่นดินไหวภายใต้ PRESS program (Precast Seismic Structural Systems) จากการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของจุดต่อคาน - เสาแบบที่มีความเหนียวในหลายๆรูปแบบพบว่ารูปแบบที่เหมาะสมในการใช้งานคือระบบ unbounded และการเพิ่มเหล็กเสริมเพื่อช่วยในการกระจายพลังงานเป็นวิธีที่นิยมออกแบบใช้งาน เนื่องจากวิธีจะช่วยลดความเสียหายหลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยระบบผสมนี้ได้ถูกใช้ในอาคาร Paramount ใน San Francisco ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งอาคารนี้สร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่สูงที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่อยู่ในส่วนที่มีความเสี่ยงการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง



รูปที่ 2.26 อาคาร Paramount และรูปแบบจุดต่อที่ใช้
(Englekirk. ,2002)

สำหรับโครงสร้างเฟรมต้านแรงคัตที่ใช้วิธีการเชื่อมต่อชิ้นส่วนแบบเสมือนหล่อเป็นชิ้นเดียวกัน (Equivalent monolithic systems) วิธีการที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่นและนิวซีแลนด์นั้นมีรูปแบบดังนี้

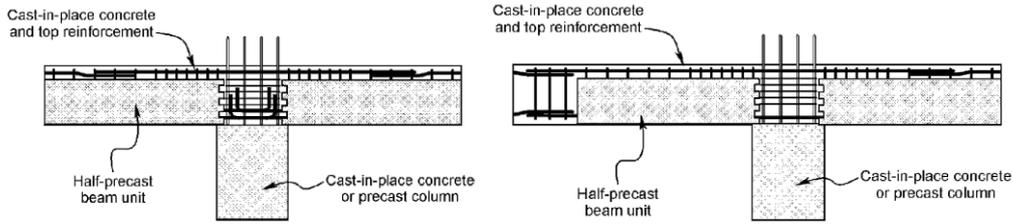
1) ระบบจุดต่อชิ้นส่วนสำเร็จ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระบบ

ระบบ 1. ชิ้นส่วนคานสำเร็จจะวางไว้บนแท่นวางของเสาโดยเหล็กกลางของคานนั้นจะยื่นและงอเข้าไปในบริเวณจุดต่อ และทำการเทคอนกรีตในที่บริเวณส่วนบนของคานรวมถึงบริเวณที่เป็นจุดต่อตามรูปที่ 2.27(ก) หรือจะให้เหล็กกลางของชิ้นส่วนคานเชื่อมต่อกันผ่านบริเวณจุดต่อตามรูปที่ 2.27(ข) ก็ สามารถทำได้

ระบบ 2. เตรียมรูในชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปเพื่อให้เหล็กตามยาวของเสาสามารถสอดผ่านได้ จากนั้นจึงทำการเทราท์บริเวณรูที่เหล็กผ่านจากนั้นจึงทำเชื่อมต่อกานบริเวณกึ่งกลางช่วงเสาโดยการเทในที่ดังแสดงในรูปที่ 2.27

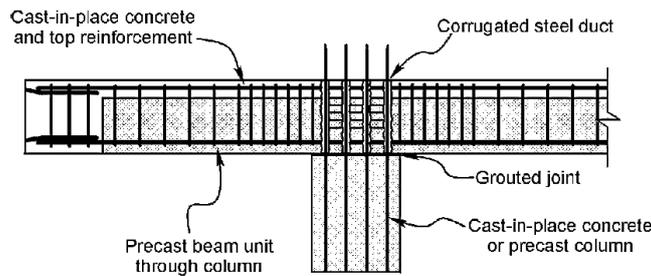
ระบบ 3. ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปตัวทึหรือรูปไม้กางเขน เชื่อมต่อในแนวตั้งผ่านทางเหล็กในเสาและทำการเชื่อมต่อในแนวราบโดยการเทในที่บริเวณกึ่งกลางช่วงเสา ดังแสดงในรูปที่ 2.27

ระบบ 4. ในประเทศนิวซีแลนด์นั้นนิยมใช้คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวยู และใช้วิธีการเทในที่ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.27

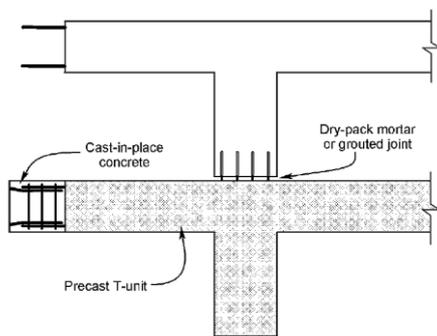


(ก) Approach using hooked bottom bar anchorage(ข) Approach using straight bottom bars

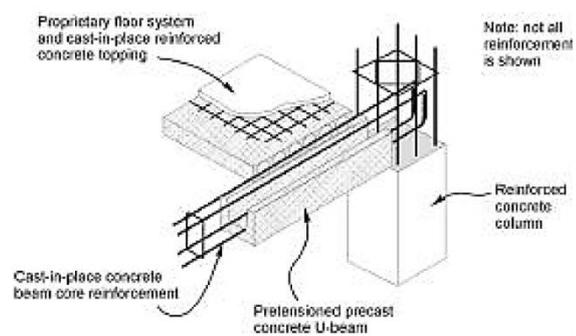
ระบบที่ 1



ระบบที่ 2



ระบบที่ 3



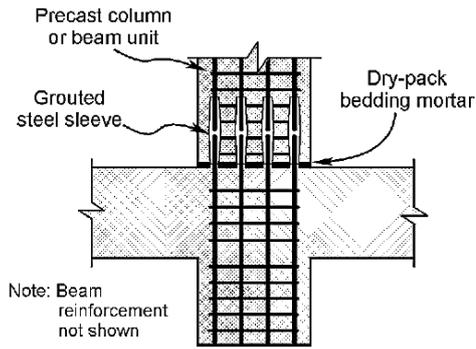
ระบบที่ 4

รูปที่ 2.27 จุดต่อชิ้นส่วนสำเร็จแบบมีความเหนียวโดยวิธี equivalent monolithic systems

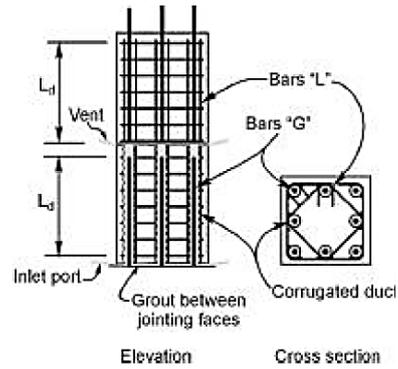
(Park, 2003)

2) การเชื่อมต่อเสา และ คาน

ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้การเชื่อมต่อระบบที่ 2 และ 3 นั้นตำแหน่งที่เชื่อมต่อชิ้นส่วนเสานั้นมีทั้งจุดที่อยู่เหนือคานหรือกึ่งกลางความสูงของเสา การเชื่อมต่อนั้นมีทั้งรูปแบบที่มีการฝังท่อเหล็กสำหรับต่อเหล็กจากนั้นจึงทำการเกรทตามรูป 2.28(ก) และรูปแบบการเชื่อมต่อโดยการใช้เหล็กทาบซึ่งตามรูปคือ Bar-L ส่วนเหล็กที่ยื่นมาจากส่วนเสามาเพื่อสอดเข้าไปยังเสาส่วนที่มาเชื่อมต่อคือ Bar-G ตามรูปที่ 2.28(ข) และทำการเกรทเพื่อปิดช่องว่างอีกทั้งเพื่อให้การถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนสามารถทำได้



(ก) Grouted steel sleeves

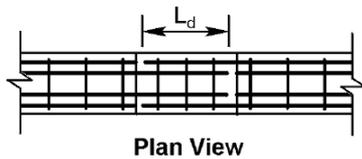


(ข) Non-contract lap bar splices

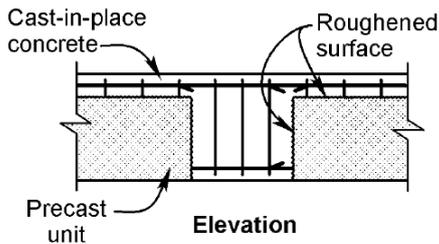
รูปที่ 2.28 การเชื่อมต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

(Park. ,2003)

ในส่วนของการเชื่อมต่อบริเวณกึ่งกลางช่วงคานนั้นใช้วิธีการเทในที่โดยในประเทศนิวซีแลนด์เป็นที่นิยมมาก โดยส่วนมากจะใช้เหล็กเสริมตรงในการเชื่อมต่อหากความยาวของจุดต่อเพียงพอตามรูปที่ 2.29(ก) และ (ข) สำหรับจุดต่อที่มีพื้นที่น้อยที่ทำการเทในที่นั้นจะใช้วิธีการ double hooked ในการเชื่อมต่อตามรูปที่ 2.29(ค) วิธีการที่ง่ายในการประกอบขึ้นส่วนสำเร็จระหว่างการก่อสร้างในประเทศญี่ปุ่นนั้นนิยมใช้การเชื่อมเหล็กเสริมให้ติดกันหรือใช้ coupler ในการเชื่อมต่อเหล็กเสริมตามรูปที่ 2.29(ง) และ (จ)

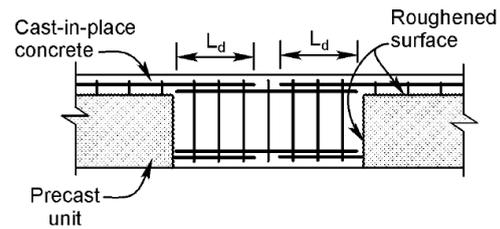


Plan View

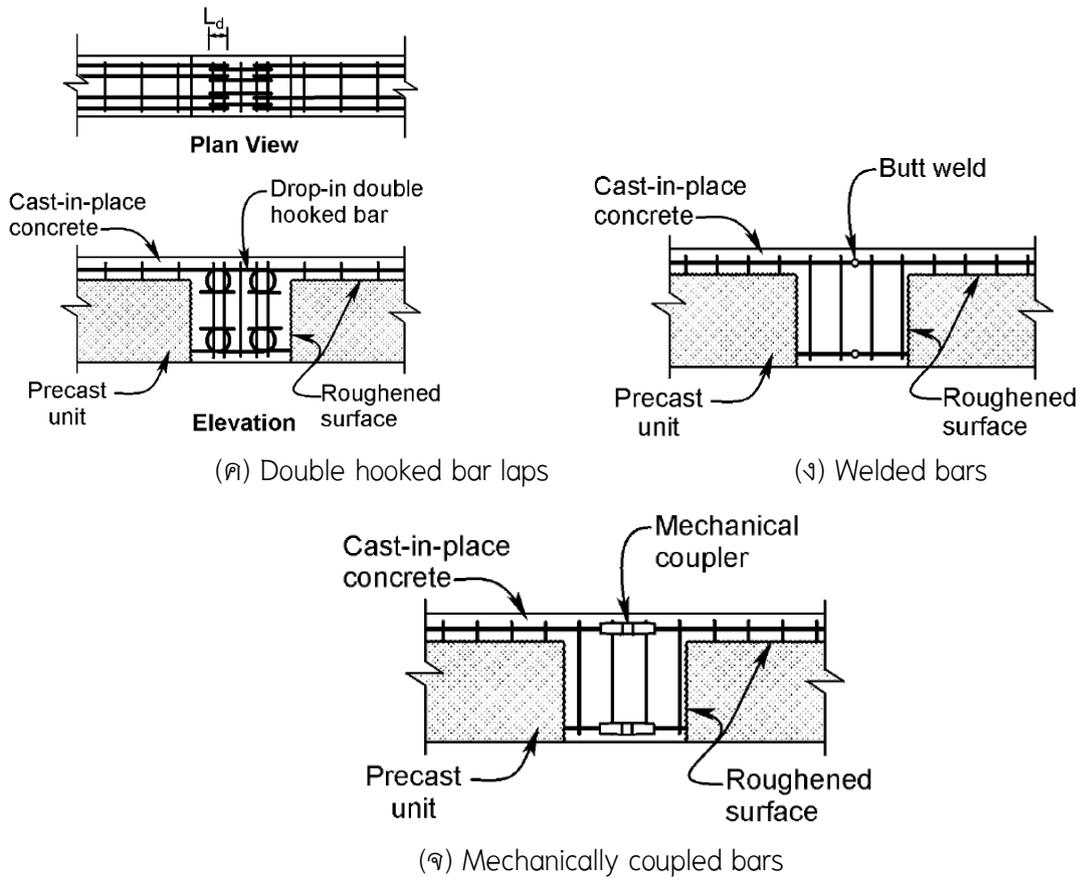


Elevation

(ก) Straight bar laps



(ข) Double straight bar laps



รูปที่ 2.29 การเชื่อมต่อกานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Park. ,2003)

3) จุดต่อที่มีการใช้ระบบลวดอัดแรงร่วมด้วย

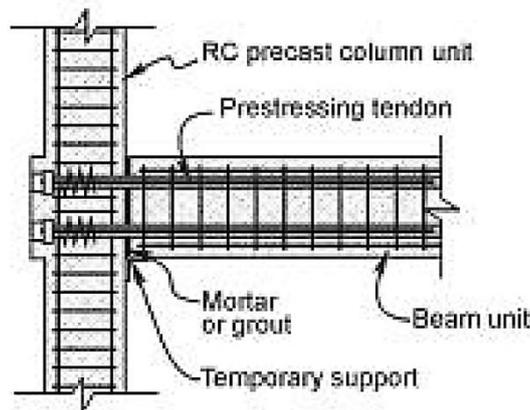
โดยทั่วไปนั้นจุดต่อที่มีการใช้ลวดอัดแรงร่วมด้วยนั้นจะเป็นจุดต่อแบบ Equivalent monolithic systems และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดกับคอนกรีตซึ่งระบบนี้จะทำให้จุดต่อมีความเหนียวและระบบลวดอัดแรงที่ใช้ร่วมกันในจุดต่อนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1) การเชื่อมต่อด้วยระบบคานอัดแรงชนิดดึงลวดที่หลัง (Post-tensioned beam)

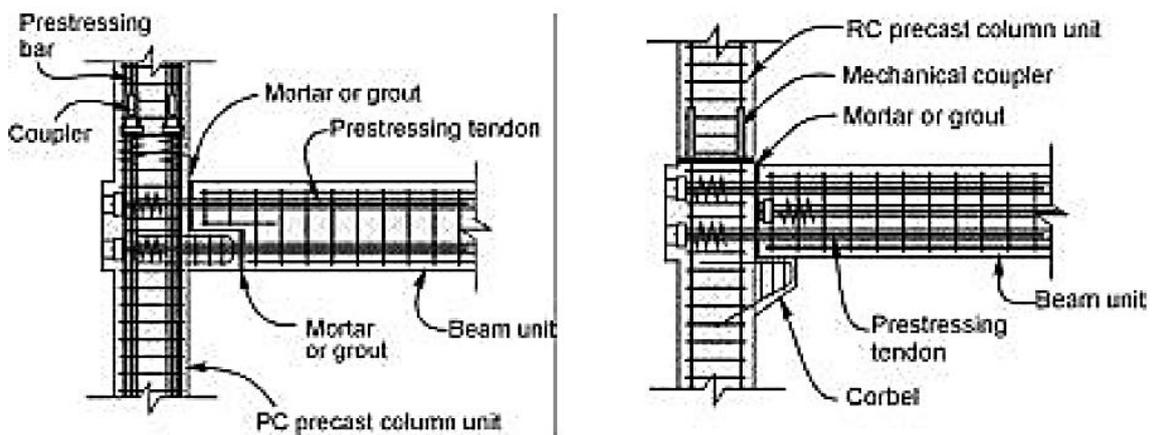
การก่อสร้างโดยระบบนี้เป็นที่นิยมในประเทศญี่ปุ่นและนิวซีแลนด์ตั้งแต่ปี 1960 โดยระบบนี้ได้รับการทดสอบแล้วว่าสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี ระบบนี้จะมีวิธีหลักๆในการเชื่อมต่ออยู่ 2 วิธีตามรูปที่ 2.30

- วิธีที่ 1 คานคอนกรีตสำเร็จรูปจะวางอยู่บนที่รองรับชั่วคราวของเสาจากนั้นทำการเกรทท์รอยต่อ และสุดท้ายจึงทำการดึงลวดอัดแรงและทำการเกรทท์ลวดอัดแรงเป็นขั้นตอนสุดท้าย

- วิธีที่ 2 คานคอนกรีตสำเร็จรูปวางอยู่บนแท่นรองรับของเสา หลังจากนั้นจะเหมือนกับวิธีที่ 1



วิธีที่ 1



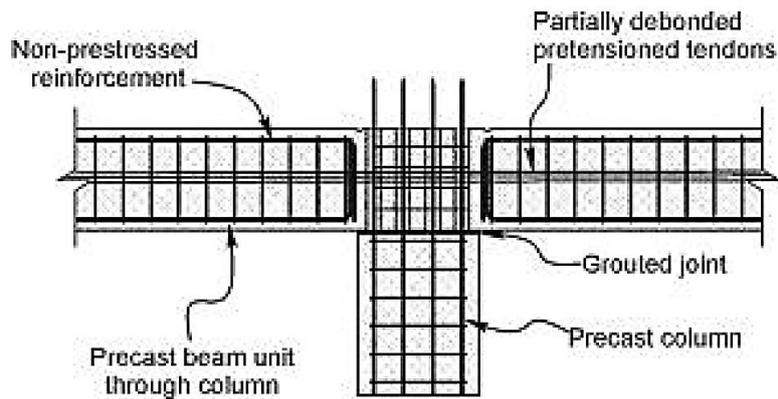
วิธีที่ 2

รูปที่ 2.30 การเชื่อมต่อโดยวิธี equivalent monolithic systems ชนิดตั้งเหล็กที่หลัง

วิธีที่ 1 และ 2 (Park. ,2003)

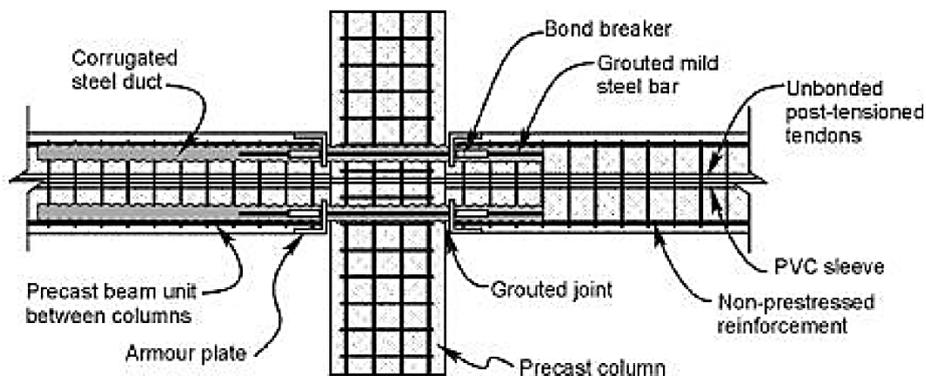
2) การเชื่อมต่อด้วยระบบคานอัดแรงชนิดตั้งลวดก่อน (Pretensioned beam)

ระบบนี้จะทำการตั้งลวดเตรียมไว้ก่อนครั้งละหลายๆช่วงพาด ตามรูปที่ 2.34 โดยการใช้ระบบ debonded ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดและคอนกรีต จากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อกันกับเสาเข้าด้วยกันตามระบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.31 ระบบคาน Pretensioned ที่ทำการดึงลวดผ่านเสาด้วยระบบ debond
(Park. ,2003)

ยังมีวิธีการเชื่อมต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปโดยใช้การดึงเหล็กที่หลังแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดอัดแรงกับคอนกรีตซึ่งการเชื่อมต่อรูปแบบทำให้จุดต่อที่ได้เป็นจุดต่อแบบเหนียว แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้ระบบจุดต่อผสมที่ร่วมกันระหว่างระบบลวดอัดแรงแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตและเหล็กเสริมตามรูปที่ 2.32 ระบบจุดต่อแบบผสมนี้เป็นที่นิยมใช้ในประเทศอังกฤษวิธีการที่ชิ้นส่วนคานคอนกรีตอัดแรงเชื่อมต่อกับเสานั้นโดยการใช้ระบบลวดอัดแรงดึงเหล็กที่หลังแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยว โดยลวดอัดแรงนั้นจะวิ่งผ่านท่อ PVC ที่จุดกึ่งกลางของคาน ในส่วนของช่องว่างระหว่างคานกับเสานั้นจะทำการเกราะที่ด้วยเส้นใยเสริมแรง และในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวนั้นจะต้องมั่นใจว่าแรงที่เกิดในลวดอัดแรงจะต้องไม่เกินจุด Proportional limit การเสริมเหล็กธรรมชาติบริเวณจุดต่อนั้นจะต้องเตรียมท่อสำหรับสอดเหล็กดังก้าวผ่านระหว่างคานและเสาโดยท่อที่เตรียมไว้นี้จะต้องมีผิวขรุขระเพื่อที่เวลาทำการเกราะที่แล้วจะได้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวท่อกับน้ำยาที่เกราะที่ได้ดี ซึ่งเหล็กที่ทำการเสริมเข้าไปนี้จะทำให้การกระจายพลังงานไปยังจุดต่ออื่นๆเพื่อไม่ให้เกิดการครากของเหล็กหรือแรงอัดที่เกิดมากเกินไป

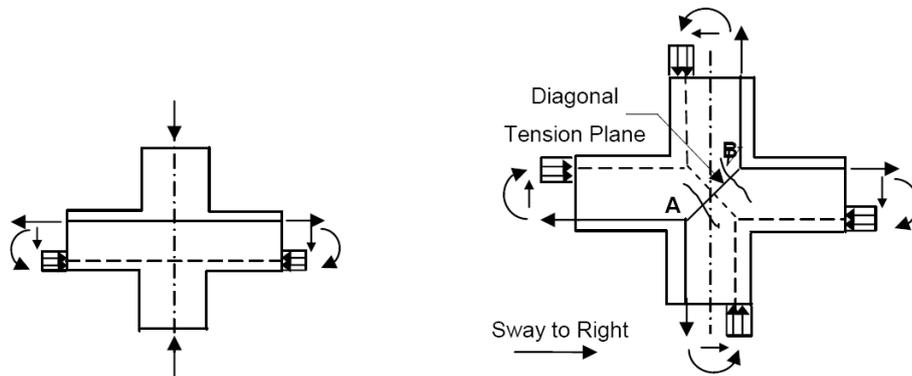


รูปที่ 2.32 รายละเอียดการเสริมเหล็กของจุดต่อระบบผสม
(Park. ,2003)

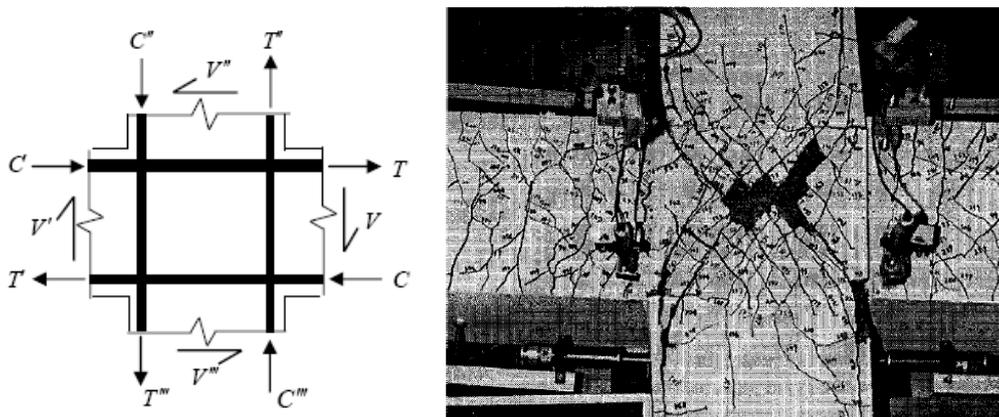
เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวและมีการเสียรูปจนเข้าสู่พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นแล้วนั้นจะเกิดรอย crack ที่เปิดออกแต่เนื่องจากมีแรงของลวดอัดแรงดึงไว้เมื่อแรงกระทำลดลงรอย crack ดังกล่าวก็จะปิดลงทำให้ระบบนี้มีประโยชน์ในการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

2.4 กลไกการรับแรงจุดต่อระหว่างคาน-เสาในโครงสร้างคอนกรีตชั้นเดียว

ในกรณีที่โครงข้อแข็งรับแรงแนวตั้งจะเกิดแรงภายในกระทำกับจุดต่อคาน - เสาดังในรูปที่ 2.33(ก) ซึ่งจะไม่เกิดแรงเฉือนขึ้นภายในจุดต่อหรือเกิดขึ้นน้อย ต่างกับการรับแรงแนวราบดังในรูป 2.33(ข) ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นภายในจุดต่อขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะเมื่อต้องรับแรงแนวราบที่มีขนาดใหญ่เช่น แผ่นดินไหว แรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในจุดต่อเกิดจาก แรงและโมเมนต์ที่ส่งผ่านจากเสาและคาน ทำให้เกิดแรงกระทำกับจุดต่อดังในรูปที่ 2.33(ค) จากผลของแรงดังกล่าวจะทำให้จุดต่อคาน-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงดังในรูปที่ 2.33(ง)



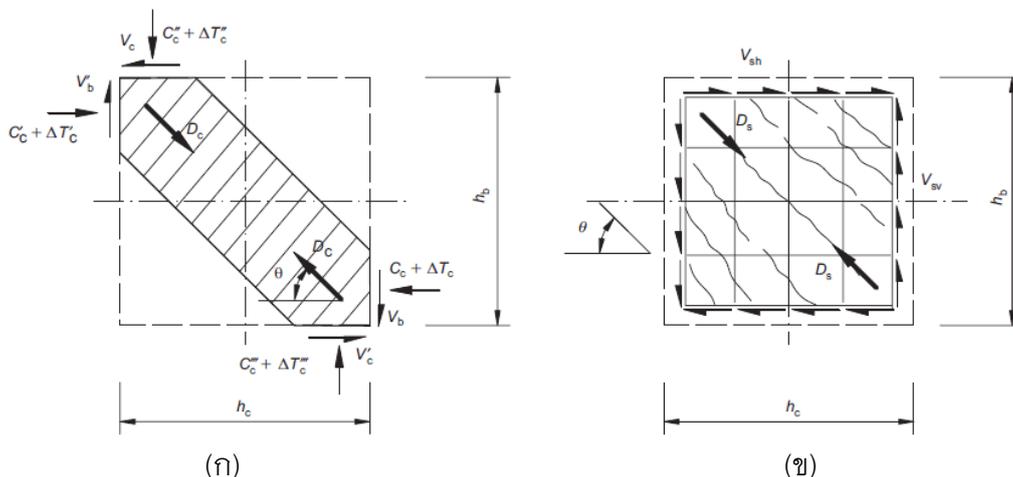
(ก) แรงภายในเสาและคานกรณีรับแรงแนวตั้ง (ข) แรงภายในเสาและคานกรณีรับแรงแนวราบ



(ค) แรงที่กระทำกับจุดต่อกรณีรับแรงแนวราบ (ง) รอยแตกร้าวในแนวทแยงรูปที่ 2.33 แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับโครงสร้างคาน - เสา

มีทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการต้านทานแรงและโมเมนต์ของจุดต่อคาน – เสาอยู่เมื่อต้องรับแรงแนวราบอยู่ 3 ทฤษฎี คือ 1) strut mechanism 2) truss mechanism และ 3) bond failure mechanism ทฤษฎี strut mechanism และ truss mechanism เป็นทฤษฎีที่อธิบายการรับแรงเฉือนของจุดต่อ ส่วนทฤษฎี bond failure อธิบายการรับโมเมนต์ของจุดต่อ ทฤษฎี strut mechanism มีสมมุติฐานว่าทิศทางการรับแรงอัดจากคานและเสาที่ผ่านทางคอนกรีตนั้น อยู่ในแนวทแยงดังแสดงรูปที่ 2.34(ก)

ทฤษฎี truss mechanism มีสมมุติฐานอยู่ว่าบริเวณจุดต่อมีแรงกระทำในแนวตั้งและแนวราบเท่ากันโดยแรงในแนวตั้งเกิดจากในเหล็กเสริมตามยาวของเสา ส่วนแรงในแนวราบเกิดจากแรงในเหล็กเสริมตามยาวของคานซึ่งทิศทางของแรงลัพธ์จะอยู่ในแนวทแยง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.34(ข)

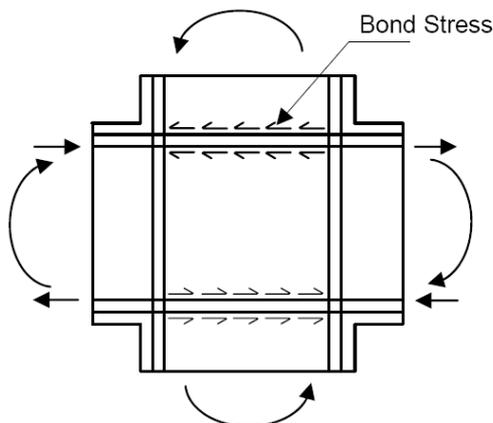


รูปที่ 2.34 กลไกการรับแรงเฉือนของจุดต่อคาน – เสา(ก) strut mechanism (ข) truss mechanism

(Au. ,Huang and Pam ,2002)

กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อนั้นอาศัยทั้งหลักการของstrut mechanism และ truss mechanism แต่เมื่อจุดต่อสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมแล้วกำลังของจุดต่อจะขึ้นกับ strut mechanism เพียงอย่างเดียว

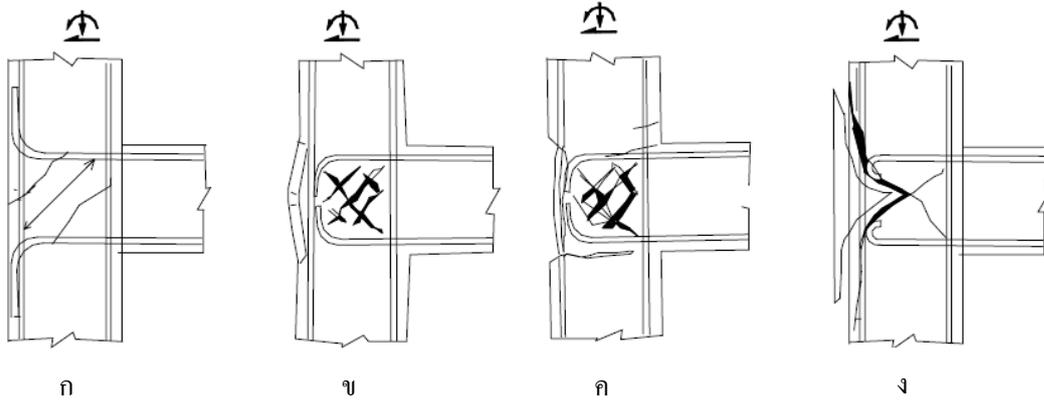
ทฤษฎี bond failure mechanism เมื่อโครงข้อแข็งรับแรงแนวราบจะเกิดแรงและโมเมนต์กระทำกับจุดต่อดังในรูปที่ 2.33 (ค)แรงอัดและแรงดึงในเหล็กเสริมจะทำให้เกิด bond stress ขึ้นดังแสดงรูปที่ 2.35 การเสียแรงยึดเหนี่ยวจะทำให้หน้าตัดเสียกำลังและ rigidity ในการต้านโมเมนต์



รูปที่ 2.35 หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond stress) ที่เกิดกับเหล็กเสริมของคานภายในจุดต่อ

ภายใต้แรงจากแผ่นดินไหวกำลังยึดเหนี่ยว (Bond strength) ของเหล็กเสริมคานกับคอนกรีตภายในจุดต่อจะลดลงหรือหายไป เริ่มแรก truss mechanism ซึ่งต้องอาศัย bonding จะลดลงทำให้ strut mechanism ต้องเป็นตัวรับแรงเฉือนส่วนใหญ่ และหากเกิด bond failure ขึ้นกับเหล็กเสริมรับแรงดึงของคาน แล้วจะทำให้แรงดึงในเหล็กไม่สามารถส่งผ่านจุดต่อได้ จึงต้องส่งผ่านแรงดึงผ่านแรงอัดที่หน้าเสาด้านตรงข้ามแทน (ดูรูป 24(ก)) ส่งผลให้เกิดแรงอัดกับ strut คอนกรีตใน strut mechanism เพิ่มขึ้นในขณะเดียวกับ strut คอนกรีตก็จะอ่อนแอลงเพราะแรงกระทำซ้ำ ๆ ของแผ่นดินไหวและ และยังมีความเค้นดึงในแนวตั้งฉากกับ strut ลดกำลังอัดของคอนกรีตลงอีกด้วย ทั้งสองสิ่งนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติของจุดต่อ

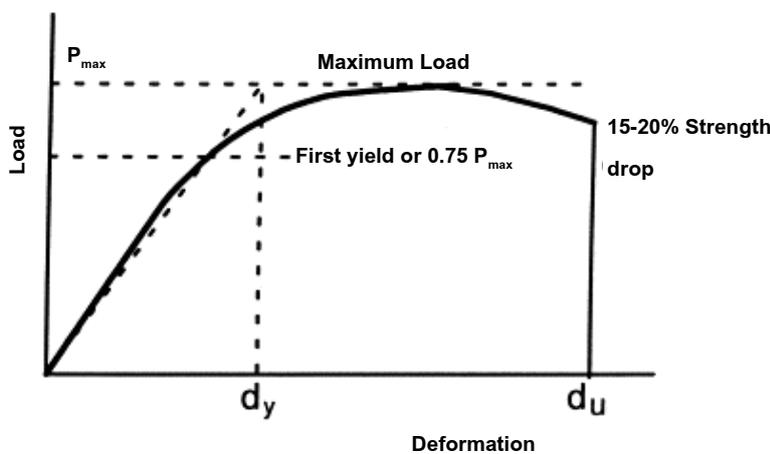
อย่างไรก็ตามกลไกการรับแรงของจุดต่อยังขึ้นกับรายละเอียดการเหล็กเสริมอีกส่วนหนึ่งด้วย เช่น รูปแบบการวิบัติที่แตกต่างกันของจุดต่อคาน – เสารูปตัว T ในการศึกษาของ S. Pampanin, และคณะ (2002) ในรูปที่ 2.36(ก) เมื่อเกิดรอยร้าวทแยงแล้วจุดต่อไม่อาจส่งผ่านแรงเฉือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ไม่สามารถสร้าง strut mechanism ได้อย่างมีประสิทธิภาพ) และในรูปที่ 2.36(ง) การใช้เหล็กเสริมเส้นกลมผิวเรียบจะทำให้คอนกรีตหลุดออกเป็นลิ้ม เนื่องเสียการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตบริเวณจุดต่อ เมื่อเหล็กเสริมรับแรงอัดจะเกิดการสั่นไถลและดันคอนกรีตให้หลุดออก



รูปที่ 2.36 กลไกการการเกิดเสียหายที่ต่างกันของจุดต่อรูปตัว T (ก) เหล็กเสริมคานดัดออกจากจุดต่อ (ข)(ค) เหล็กเสริมคานดัดเข้าสู่บริเวณจุดต่อ และ (ง) มีการร่อนปลายเหล็กเสริมคาน (Pampanin. ,Calviand Moratti ,2002)

2.5 ค่าความเหนียว (μ , Ductility)

ความเหนียว(μ) เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะโก่งตัวสูงสุด (d_u) ต่อระยะโก่งตัวที่จุดคราก(d_y) ถือเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบอินอีลาสติกระหว่างเหตุแผ่นดินไหว ค่าระยะโก่งตัวที่จุดครากอาจได้มาจากระยะโก่งตัวที่เหล็กเสริมตามแนวยาวเกิดค่าความเครียดเท่ากับ ความเครียดครากที่วัดโดยเกจความเครียด หรือหาได้จากระยะโก่งตัวหลังกำลังสูงสุดเมื่อกำลังลดลงมา 15-20% ในรูปที่ 2.37 แสดงเส้นโค้งขอบ (Backbone curve, Enveloped curve) จากความสัมพันธ์ Hysteresis ของตัวอย่างในระหว่างทดสอบของการโยกตัวสัมพันธ์ในแต่ละระดับ



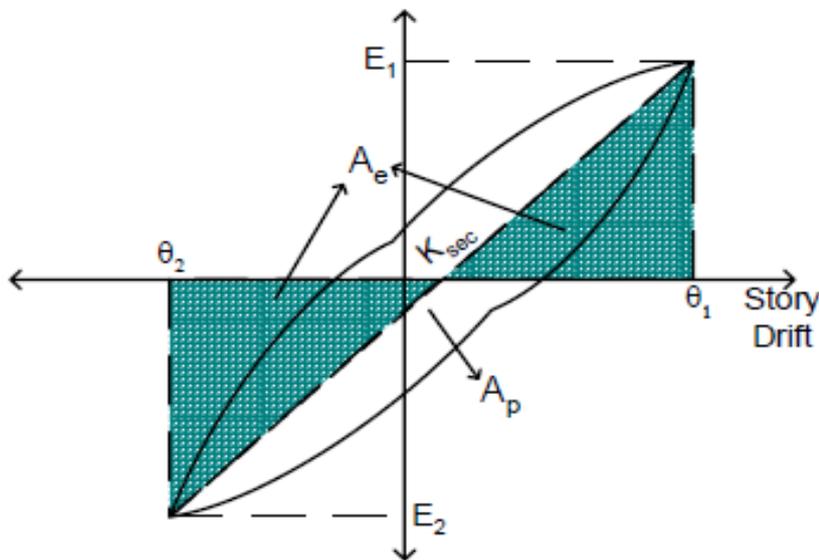
$$\mu = \frac{d_u}{d_y}$$

รูปที่ 2.37 การคำนวณค่าความเหนียว

ที่มา : Park(1989)

2.6 การเสื่อมลงของค่าความแข็งแรง (Stiffness Degradation)

ค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของโครงสร้างเสื่อมลงเมื่อให้ค่าระยะโยกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเสียหายเกิดขึ้นและค่อยๆสะสมมากขึ้น ค่าความแข็งแรงมักจะคำนวณโดยวิธี Secant (Secant stiffness, K_{sec}) ได้มาจากรอบสุดท้ายของค่าระยะโยกตัวสัมพัทธ์ในแต่ละระดับ (ในแต่ละค่าของระยะโยกทำซ้ำ 3 ครั้ง) ซึ่งค่า K_{sec} ที่คำนวณมาจากความชันของเส้นกราฟระหว่างแรงในแนวราบกับค่าระยะโยกที่ตำแหน่งโกลที่สูงสุดในทิศทางบวกและลบของแต่ละระดับของระยะโยก หรือกล่าวได้ว่าเป็นค่าความแข็งแรงระหว่างค่าจุดยอดของวงทดสอบระยะโยกหนึ่งๆ (Peak-to-peak stiffness) ดังแสดงในรูปที่ 2.38 นอกจากนี้ ได้พิจารณาอัตราส่วนความแข็งแรงเปรียบเทียบ (Normalized stiffness, K_{Nor}) โดยทำการเทียบค่ากับค่า Secant stiffness ในรอบสุดท้ายของระยะโยกสัมพัทธ์ในระดับแรกคือ 0.15%



รูปที่ 2.38 การคำนวณค่า Secant stiffness และค่าอัตราส่วนการหน่วงเทียบเท่า

ที่มา : Onur(2005)

2.7 การสลายพลังงาน (Energy Dissipation)

ในการประเมินพฤติกรรมการดูดซับพลังงานจากตัวอย่างการทดสอบ มีวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางอยู่ 2 วิธีคือ การคำนวณอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (Equivalent viscous damping ratio, ζ_{eq}) จากการศึกษาของ Chopra(1999) และการคำนวณค่าอัตราส่วนการดูดซับพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy dissipation ratio, β) จากวิธีการของ ACI T1.1-01(2001) การศึกษาในโครงการนี้ ได้ใช้การประเมินการสลายพลังงานในการทดสอบจากการศึกษาของ Chopra(1999) ซึ่งการคำนวณอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ Hysteresis จากการทดสอบ โดยการหาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภายในวงรอบ Hysteresis (A_p) ซึ่งอยู่ในรูปการดูดซับพลังงานของโครงสร้างจากการทดสอบกับพลังงานความเครียดที่ได้จากเส้นยืดหยุ่นสมมติที่ใช้ในการพิจารณาค่า K_{sec} ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ในการคำนวณอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) แสดงในสมการที่ 2.1

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_p}{A_e} \times 100 \quad (2.1)$$

2.8 ทฤษฎี AHP เพื่อการตัดสินใจ

2.8.1 หลักการของ AHP

ทฤษฎี AHP (Analytic Hierarchy Process) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Thomas L. Saaty ในปี 1980 ในปัจจุบันจัดได้ว่าทฤษฎี AHP เป็นทฤษฎีทางด้าน Multiple Criteria Decision Making (MCDM) ที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดในการตัดสินใจประเมินโครงการต่าง ๆ (Harng-Mo, 1991) และเป็นทฤษฎีที่จัดได้ว่ามีความแม่นยำมากที่สุดในการให้น้ำหนักคะแนนต่อเกณฑ์การตัดสินใจในการเปรียบเทียบทางเลือกต่าง ๆ (Hagquist, 1993) และ AHP ได้รับความนิยมมากกว่าทฤษฎีทางด้าน MCDM อื่น ๆ เนื่องจาก มีความง่าย เป็นทฤษฎีที่มีความน่าเชื่อถือในหลักการ สามารถจัดความโน้มเอียงในการให้อัตราส่วนตัวเลขและสามารถวัดความไม่สอดคล้องของการลงความเห็นได้โดยตรง (Klungboonklong, 1995)

วิฑูรย์ ตันศิริคงค (2542) ได้ทำการสรุปกระบวนการ AHP ไว้ว่าเป็นกระบวนการทางทฤษฎี MCDM ที่ได้รับความนิยมและมีความถูกต้องแม่นยำสูงที่สุดเนื่องจาก เป็นกระบวนการที่ช่วยการตัดสินใจในประเด็นของปัญหาที่มีความซับซ้อนให้มีความง่ายขึ้น โดยเลียนแบบกระบวนการตัดสินใจทางธรรมชาติของมนุษย์ AHP แบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกมาเป็นส่วน ๆ แล้วจัดแจงใหม่ให้อยู่ในรูปของแผนภูมิตามระดับชั้น ต่อจากนั้นก็กำหนดตัวเลขที่เกิดจากการวินิจฉัยเปรียบเทียบหาความสำคัญของแต่ละปัจจัยและสังเคราะห์ตัวเลขของการวินิจฉัยนั้นเพื่อที่จะคำนวณดูว่าปัจจัยหรือทางเลือก ใดที่มีค่าลำดับความสำคัญสูงที่สุดและมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของการแก้ปัญหาในอย่างไร นอกจากนี้แล้ว AHP ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการตัดสินใจที่เป็นกลุ่มหรือหมู่คณะเพราะ AHP ช่วยจัดระเบียบในกระบวนการคิดของกลุ่มด้วยการกำหนดตัวเลขของแต่ละองค์ประกอบของปัญหาทำให้ผู้ตัดสินใจมีความสอดคล้องกันของเหตุผลอย่างสม่ำเสมอในกระบวนการตัดสินใจที่เพิ่มเติมไปกว่านั้นคือ AHP เป็นกระบวนการที่สนับสนุนการลงประชามติของกลุ่มเพื่อช่วยให้การวินิจฉัยมีความสอดคล้องกันของเหตุผลมากยิ่งขึ้น

2.8.2 ขั้นตอนการประยุกต์ทฤษฎี AHP

Thomas L. Saaty (1995) สรุปขั้นตอนของการประยุกต์ทฤษฎี AHP ไว้ 4 ขั้นตอนคือ

- การสลายปัญหาที่ซับซ้อน (Decomposition) ให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างเป็นลำดับชั้น (Hierarchy Structure) แต่แต่ละระดับชั้นประกอบไปด้วยเกณฑ์ในการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้น

- การหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ละคู่ (Pairwise Comparisons) จากจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นโครงสร้าง โดยใช้วิธี Principle of Hierarchic Composition

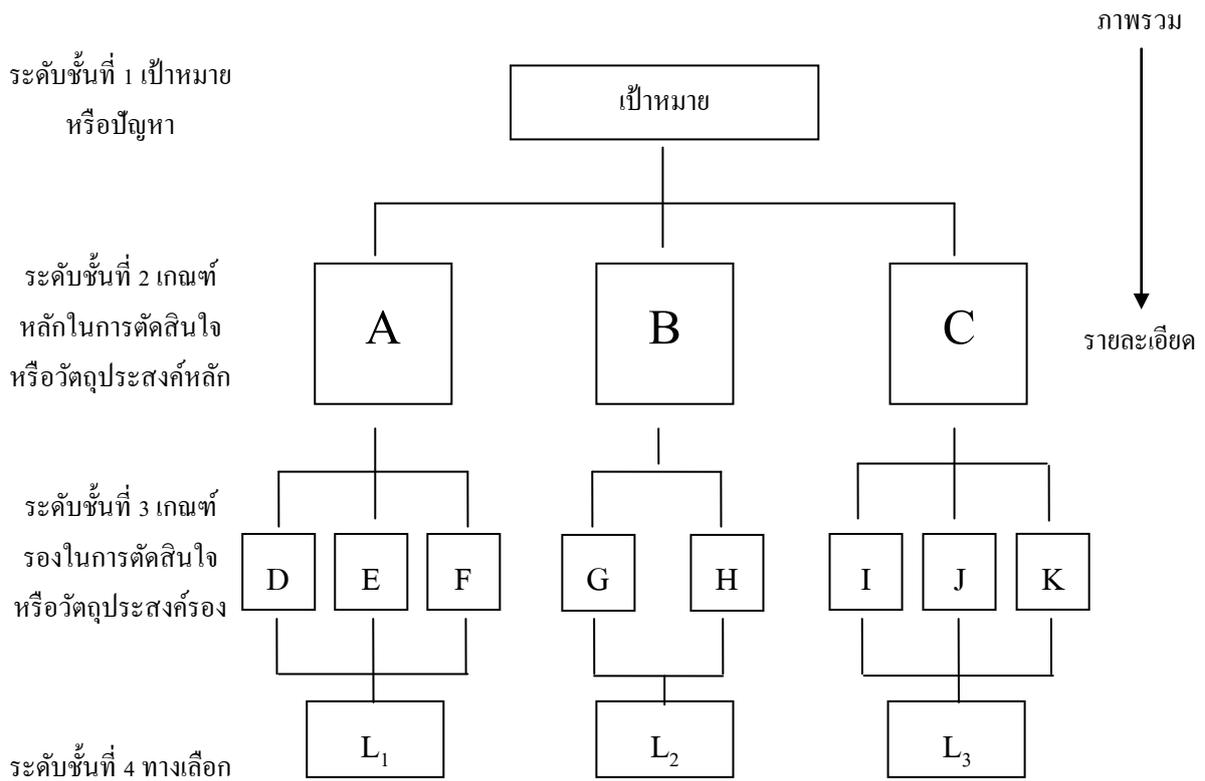
- การสังเคราะห์ (Synthesis) โดยการพิจารณาจากลำดับความสำคัญทั้งหมดจากการเปรียบเทียบว่าทางเลือกใดควรได้รับเลือก

- การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อปัจจัยในการวินิจฉัย (Sensitivity Analysis) จะทำการทดสอบหลังจากเสร็จกระบวนการทั้งหมด เป็นการพิจารณาว่าเมื่อข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านเกณฑ์การตัดสินใจหรือปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งแล้วจะทำให้อันดับความสำคัญของทางเลือกมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

ขั้นตอนต่าง ๆ ทั้ง 4 ขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1. การสลายปัญหาที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปของ แผนภูมิโครงสร้างเป็นลำดับชั้น

แผนภูมิจะแบ่งออกเป็นหลายระดับชั้นขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหาและระดับชั้นแต่ละระดับจะประกอบด้วยกลุ่มของปัจจัยต่าง ๆ ระดับชั้นบนสุดเรียกว่าเป้าหมายโดยรวมซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ระดับชั้นที่ 2 อาจมีหลายปัจจัยขึ้นอยู่กับว่าแผนภูมินั้นมีทั้งหมดกี่ระดับชั้น ที่สำคัญที่สุดปัจจัยต่าง ๆ ในระดับชั้นเดียวกันต้องมีความสำคัญทัดเทียมกัน ถ้ามีความสำคัญแตกต่างกันมากควรแยกเอาปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยกว่าลงไปอยู่ในระดับชั้นที่อยู่ถัดลงไป ตัวอย่างแผนภูมิชั้นโครงสร้าง AHP แสดงดังรูป 2.39



รูปที่ 2.39 แสดงโครงสร้างลำดับชั้น AHP

ที่มา: วิฑูรย์ ตันศิริคงคล , 2542

2. การหาลำดับความสำคัญ

ขั้นตอนแรกในการหาลำดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ คือ วิจัยเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ เป็นคู่ ๆ ตามความสำคัญที่มีต่อบรรดาปัจจัยรวมกันที่อยู่ในระดับชั้นที่อยู่ถัดขึ้นไป การวิจัยจะแสดงออกมาในรูปของมาตราส่วนของระดับความพึงพอใจที่เป็นตัวเลข 1 ถึง 9 ในตารางเมทริกซ์ เนื่องจากตารางเมทริกซ์คือเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดในการเปรียบเทียบในลักษณะเป็นคู่ ๆ หรือจับคู่ นอกจากนี้จะช่วยอธิบายเกี่ยวกับการเปรียบเทียบแล้วตารางเมทริกซ์ยังสามารถทดสอบความสอดคล้องกันของการวิจัยและสามารถวิเคราะห์ถึงความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญเมื่อการวิจัยเปลี่ยนแปลงไปได้อีกด้วย

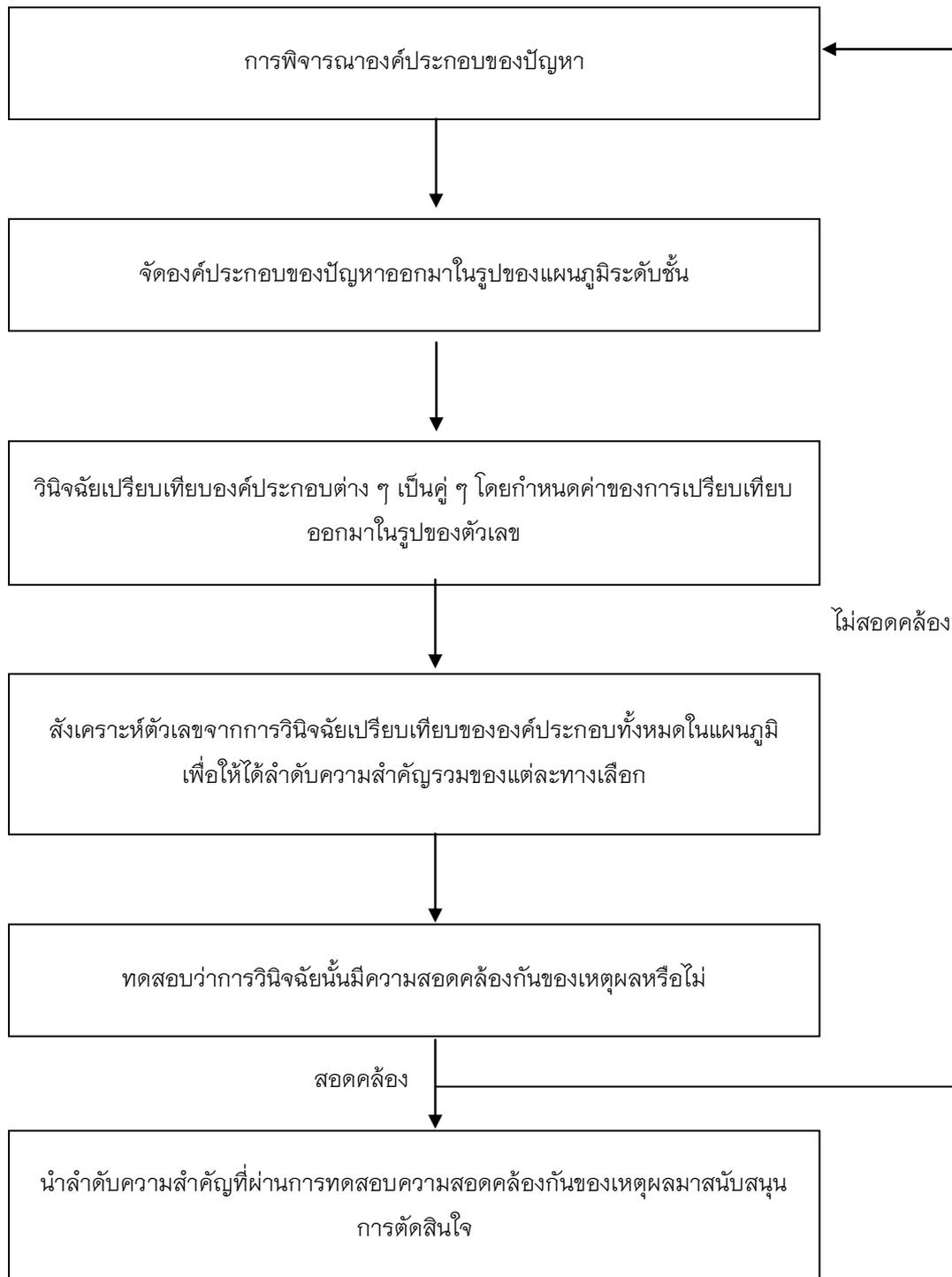
3. การสังเคราะห์แผนภูมิลำดับชั้น

เพื่อให้ได้ลำดับความสำคัญรวมของทางเลือกซึ่งเป็นลำดับชั้นล่างสุดของแผนภูมิเกิดขึ้นจากการนำเอาผลการวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ ของทุก ๆ ปัจจัยในตารางเมทริกซ์มาสังเคราะห์ ในอีกความหมายหนึ่งก็คือผู้ตัดสินใจต้องให้น้ำหนักและรวมน้ำหนักเข้าด้วยกันเพื่อทำให้เกิดตัวเลขหลักเดียวที่แสดงถึงลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยโดยใช้ Principle of Hierarchic Composition

4. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อหลักเกณฑ์ในการวินิจฉัย

กระทำเพื่อทดสอบดูว่าถ้ามีหลักเกณฑ์ใดหลักเกณฑ์หนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับ 0-1 แล้วจะมีผลทำให้ลำดับความสำคัญของทางเลือกเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

จากขั้นตอนต่าง ๆ ของทฤษฎี AHP สามารถสรุปเป็นแผนภูมิขั้นตอนได้ดังรูป 2.40



รูปที่ 2.40 แสดงแผนภูมิขั้นตอนกระบวนการ AHP
 ที่มา: วิฑูรย์ ตันศิริคงคล , 2542

2.8.3 กระบวนการวิเคราะห์ของ AHP

1. การวิเคราะห์เมทริกซ์

ในการวิเคราะห์ตัวเลขต่าง ๆ ทางกระบวนการ AHP จะใช้ทฤษฎีทางเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\text{กำหนดเมทริกซ์} \quad a_{ij} = w_i / w_j$$

$$\text{ค่าส่วนกลับเมทริกซ์} \quad a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

เมื่อ a_{ij} คือ เมทริกซ์ใด ๆ

w_i คือ สมาชิกของเมทริกซ์ a_{ij}

ให้ $A = (a_{ij})$ แล้ว

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

Thomas L. Saaty ได้แสดงสมการ

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = \sum_{j=1}^n w_i = n w_i \quad (2.2)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$

ให้ $Aw = nw$

$$\text{แล้ว } Aw = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw$$

$$Aw = \lambda_{max} w$$

λ_{max} = Eigenvalue ของ เมทริกซ์
 ถ้าข้อมูลมีความสอดคล้องกัน $\lambda_{max} = n$

เกณฑ์การตัดสินใจ	ปัจจัย				
	A1	A2	→		A5
A1	1	3	-	-	-
A2	1/3	1	-	-	-
ปัจจัย ↓ A5	-	-	-	-	1

ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างตารางเมทริกซ์ที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบเป็นคู่
 ที่มา: วิฑูรย์ ดันศิริคงคล , 2542

จากตารางที่ 2.2 ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ C ปัจจัย A1 ในแถวซ้ายมือบนสุดจะถูกเปรียบเทียบกับปัจจัย A2 ถึง A5 ในแถวบนของ A1 การเปรียบเทียบก็ดำเนินการเช่นเดียวกันในแถวบนที่ 2 ในการเปรียบเทียบนั้นผู้ตัดสินใจจะต้องทำการตัดสินใจว่า ปัจจัยนี้มีความสำคัญหรือส่งผลหรือมีอิทธิพล หรือมีผลประโยชน์มากกว่าปัจจัยอื่นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบในระดับไหน

AHP จะใช้ตัวเลข 1 ถึง 9 แทนวลีของการเปรียบเทียบตัวเลข 1 ถึง 9 นี้แสดงมาตราส่วนวัดระดับความแตกต่างระหว่าง 2 ปัจจัยที่ถูกเปรียบเทียบในแง่ของความพึงพอใจ อันเกิดจากความชำนาญและประสบการณ์ภายใต้กรอบของเหตุผล โดยมีสติคอยกำกับเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความลำเอียง

เมื่อปัจจัยแต่ละอันเปรียบเทียบกับตัวเองในตารางเมทริกซ์ ตัวอย่างเช่น A1 เทียบกับ A1 ค่าที่ได้จะเท่ากับ 1 ในตารางเมทริกซ์ เส้นทแยงมุมประกอบด้วยตัวเลข 1 เท่านั้นเพราะว่าเป็นจุดที่ปัจจัยแต่ละตัวเปรียบเทียบกับตัวเอง ส่วนพื้นที่ที่อยู่เหนือเส้นทแยงมุมจะเป็นตัวเปรียบเทียบระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ส่วนพื้นที่ใต้เส้นทแยงมุมจะเป็นค่าต่างตอบแทนของค่าที่อยู่ในพื้นที่เหนือเส้นทแยงมุม ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเปรียบเทียบ 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกมีความสำคัญมากกว่าปัจจัยที่ 2 5 เท่า ค่า 5 จะอยู่ที่แถวบนที่ 1 แถวตั้งที่ 2 และค่า 1/5 (ค่าต่างตอบแทนของ 5) จะอยู่ในแถวบนที่ 2 แถวตั้งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.41

	ปัจจัย 1	ปัจจัย 2	
ปัจจัย 1	1	5	(ปัจจัยที่ 1) มีความสำคัญมากกว่า(ปัจจัย 2) 5 เท่า
ปัจจัย 2	1/5	1	แนวเส้นทแยงมุม

ค่าต่างตอบแทน หรือ (ปัจจัยที่ 2) สำคัญเป็น 1/5 เท่าของ (ปัจจัย 1)

รูปที่ 2.41 แสดงตัวอย่างตารางเมทริกซ์ที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบเป็นคู่

ที่มา: วิฑูรย์ ตันศิริคงคล , 2542

ระดับความเข้มข้น ของความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 ปัจจัยส่งผลกระทบต่อวัตถุประสงค์เท่า ๆ กัน
2	สำคัญระหว่างเท่ากัน ถึงปานกลาง	อยู่ในลักษณะที่ก้ำกึ่งกัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	ประสบการณ์และการวินิจฉัยแสดงถึงความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่ง มากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งปานกลาง
4	ระหว่างปานกลางถึง ค่อนข้างมาก	อยู่ในลักษณะที่ก้ำกึ่งกัน
5	สำคัญกว่า ค่อนข้างมาก	ประสบการณ์และการวินิจฉัยแสดงถึงความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่ง มากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งค่อนข้างมาก
6	สำคัญระหว่าง ค่อนข้างมากถึงมาก	อยู่ในลักษณะที่ก้ำกึ่งกัน
7	สำคัญกว่ามาก	ปัจจัยหนึ่งได้รับความพึงพอใจมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอีกปัจจัยหนึ่ง โดยมีอิทธิพลเหนือกว่าอย่างเห็นได้ชัด
8	สำคัญระหว่างมากถึง มากที่สุด	อยู่ในลักษณะที่ก้ำกึ่งกัน
9	สำคัญกว่าสูงสุด	มีหลักฐานยืนยันความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งใน ระดับที่สูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ตาราง 2.3 แสดงมาตราส่วนในการเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ

2. การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (Geometric Mean Method)

ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเกิดจากการนำเอาตัวเลขที่ต้องการหาค่าเฉลี่ยมาคูณกัน แล้วนำเอาผลคูณนั้นมาถอดรากตามจำนวนตัวเลขนั้น แสดงได้ดังสมการ

$$V_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/a} \quad (2.3)$$

เมื่อ a_{ij} = ค่าตัวเลขในตารางเมทริกซ์

V_i = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต

n = จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

3. การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนของรูปแบบทางเลือก

การวิเคราะห์หาน้ำหนักคะแนนของแต่ละรูปแบบทางเลือกนั้นเกิดจากการสังเคราะห์ข้อมูลของแต่ละรูปแบบทางเลือก ดังสมการ

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (2.4)$$

และ $\sum W_i = 1.0$

เมื่อ W_i = น้ำหนักคะแนนของแต่ละเกณฑ์

V_i = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต

n = จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

4. การวิเคราะห์ความสอดคล้อง

วิธีการคำนวณหาความสอดคล้องกันของเหตุผลการให้คะแนน โดยการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่ละคู่ของหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกกำหนดโดยนำผลรวมของค่าวินิจฉัยของแต่ละหลักเกณฑ์ในแถวตั้ง แต่ละแถวมาคูณด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยในแถวบนแต่ละแถวแล้วนำเอาผลคูณที่ได้มารวมกัน ผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกเปรียบเทียบ ผลรวมนี้เรียกว่า Eigen Values (λ_{max})

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \right] \quad (2.5)$$

- ถ้าตารางเมทริกซ์มีความสอดคล้องกันของเหตุผลสมบูรณ์ 100%

ค่า $\lambda_{max} =$ จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกเปรียบเทียบ (n)

- ถ้าตารางเมทริกซ์ไม่มีความสอดคล้องกัน

ค่า $\lambda_{max} >$ จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกเปรียบเทียบ (n)

ความไม่สอดคล้องกันนี้ จะถูกนำมาเปรียบเทียบตัวเลขที่สุ่มตัวอย่างจากตารางเมทริกซ์เป็นจำนวน 64,000 ตาราง เพื่อคำนวณหาดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index : CI)

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (2.6)$$

n= จำนวนหลักเกณฑ์

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR)

$$CR = \frac{CI_{\text{จากการคำนวณ}}}{CI_{\text{จากการสุ่มตัวอย่าง}}} \quad (2.7)$$

ค่า CR ที่ได้จะมีเกณฑ์ในการวินิจฉัยว่ามีความสอดคล้องของเหตุผล โดยดูจากจำนวนปัจจัยดังนี้

จำนวนปัจจัย	3	ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 5 %
จำนวนปัจจัย	4	ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 9 %
จำนวนปัจจัย	5	ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 10 %

ถ้าค่า CR เกินกว่ามาตรฐานดังกล่าวแสดงว่าความสอดคล้องกันของเหตุผลไม่มีความสอดคล้องกัน ผู้วิจัยต้องทบทวนการวินิจฉัยที่ได้ทำไปแล้วใหม่ ซึ่งแนวทางในการแก้ไขปัญหาของความไม่สอดคล้องกันก็คือ เรียงลำดับปัจจัยตามน้ำหนักที่ได้จากการวินิจฉัยในครั้งแรก ต่อจากนั้นก็สร้างตารางเมทริกซ์เพื่อวินิจฉัยหาลำดับความสำคัญใหม่โดยดูว่าอันดับเปลี่ยนไปจากเดิมหรือไม่ ซึ่งถ้าเปลี่ยนไปในทางที่เป็นเหตุผลและตรงกับสถานการณ์ของปัญหาก็ย่อมหมายถึงความสอดคล้องกันของเหตุผลก็จะสูงขึ้น

ค่า CI จากการสุ่มตัวอย่าง ได้มาจากการทดลองโดยการสุ่มตัวอย่างจากตารางเมทริกซ์ จำนวน 64,000 ตัวอย่างโดย Saaty (1980) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ขนาดของตารางเมทริกซ์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่า CI จากการสุ่มตัวอย่าง	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า CI จากการสุ่มตัวอย่าง

ที่มา: วิฑูรย์ ดันศิริคงคล , 2542

5. การวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญ

ในการวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ทำการเปรียบเทียบนั้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. หาผลรวมของตัวเลขในแถวตั้งของแต่ละแถวของตารางเมทริกซ์ ตัวอย่างเช่น ในตารางที่ 4.4 ในแถวตั้ง A1 มีค่าผลรวม = (1 + 2 + 4 = 7) , ในแถวตั้ง A2 มีค่าผลรวม = (0.5 + 1 + 2 = 3.5) , ในแถวตั้ง A3 มีค่าผลรวม = (0.25 + 0.5 + 1 = 1.75)

2. นำตัวเลขแต่ละช่องของแถวตั้ง แต่ละแถวหารด้วยผลรวมของตัวเลขในแถวตั้งนั้น เพื่อให้ได้ตารางเมทริกซ์ของค่าเฉลี่ยซึ่งจะเป็นนัยสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ในแถวตั้ง A1 = 1/7 , 2/7 , 4/7 ในแถวตั้ง A2 = 0.5/3.5 , 1/3.5 , 2/3.5 ในแถวตั้ง A3 = 0.25/1.75 , 0.5/1.75 , 1/1.75

3. หาค่าเฉลี่ยของตัวเลขในแถวนอนแต่ละแถว โดยนำเอาผลรวมของตัวเลขทั้งหมดในแต่ละแถวนำมาหารด้วยจำนวนตัวเลขที่มีอยู่ในแถวนอนนั้น ตัวอย่างเช่น ในตารางที่ 4.4 แถวนอน A1 มีค่าเฉลี่ย = [1/7 + 0.5/3.5 + 0.25/1.75] / 3 = 0.143 ในแถวนอน A2 มีค่าเฉลี่ย = [2 / 7 + 1 / 3.5 + 0.5 / 1.75] / 3 = 0.286 ในแถวนอน A3 มีค่าเฉลี่ย = [4 / 7 + 2 / 3.5 + 1 / 1.75] / 3 = 0.571

เป้าหมายในการตัดสินใจ	A1	A2	A3	ลำดับความสำคัญ
A1	1	0.5	0.25	0.143
A2	2	1	0.5	0.286
A3	4	2	1	0.571
Σ	7	3.5	1.75	

ตาราง 2.5 แสดงตารางเมทริกซ์ที่แสดงถึงเป้าหมายการตัดสินใจภายใต้เกณฑ์ในการเปรียบเทียบ

6. การหาน้ำหนักคะแนนรวมของทั้งแผนภูมิแสดงได้ดังสมการ

$$s_i^j = RW_2 \times RW_3 \times W_i^j \quad (7)$$

เมื่อ s_i^j = น้ำหนักคะแนนรวมของทั้งแผนภูมิ

RW_2 = น้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ในแผนภูมิโครงสร้างชั้นที่ 2

RW_3 = น้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ในแผนภูมิโครงสร้างชั้นที่ 3

W_i^j = น้ำหนักความสำคัญของรูปแบบทางเลือก i จากการประเมินภายใต้หลักเกณฑ์ j

คะแนนรวมของทางเลือก L1

$$S_{L1} = \sum_i^j s \quad (8)$$

เป้าหมายการตัดสินใจ	A1 (0.143)	A2 (0.286)	A3 (0.571)	ลำดับความสำคัญรวม
L1	0.726	0.048	0.179	$(0.726 \times 0.143) + (0.048 \times 0.286) + (0.179 \times 0.571) = 0.220$
L2	0.212	0.191	0.709	$(0.212 \times 0.143) + (0.191 \times 0.286) + (0.709 \times 0.571) = 0.490$
L3	0.062	0.761	0.112	$(0.062 \times 0.143) + (0.761 \times 0.286) + (0.112 \times 0.571) = 0.290$

ตาราง 2.6 เมทริกซ์แสดงลำดับความสำคัญทั้งหมด

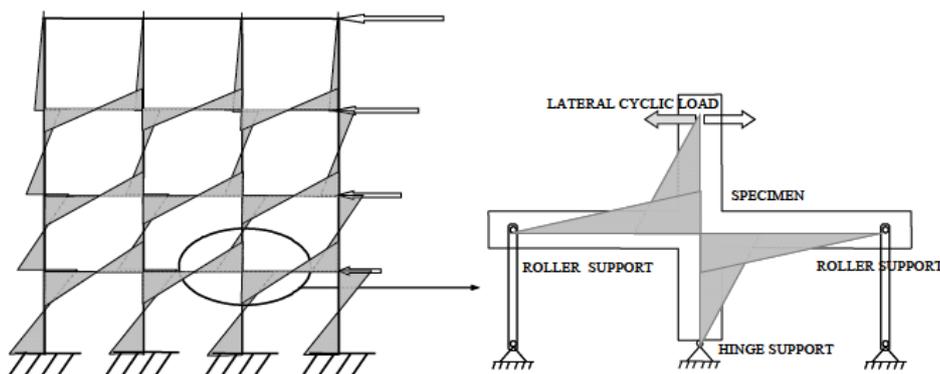
จากสมการที่ (8) สามารถหารลำดับความสำคัญรวมซึ่งจะทำให้ผู้ทำการตัดสินใจสามารถเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดจากตัวเลขที่มีน้ำหนักมากที่สุดภายใต้ทางเลือก L1 , L2 , L3 แสดงดังตัวอย่างในตารางที่ 2.6

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

โครงการจุดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือและผลกระทบกับโครงสร้างต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรมนี้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสาโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป และ 2. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทางด้านสถาปัตยกรรม โดยทั้งสองส่วนมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

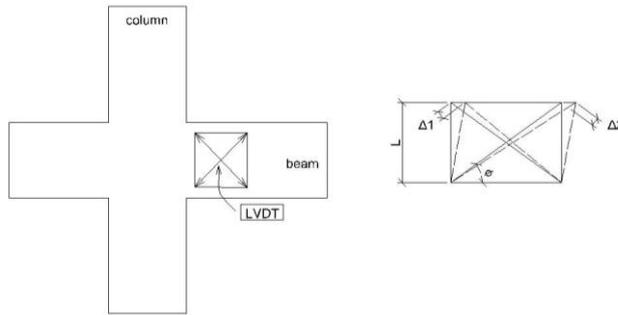
3.1 การทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสาโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป

จุดต่อที่ทำการศึกษาในโครงการนี้นั้นเป็นรูปแบบจุดต่อภายในอาคารจะนั้นในการเตรียมตัวอย่างทดสอบจะต้องให้มีความสอดคล้องทางพฤติกรรมของโครงสร้างจริงตามรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าโมเมนต์ที่เกิดในโครงสร้างอาคารเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างนั้นในบริเวณพื้นที่วงรีซึ่งเป็นส่วนที่ตัวอย่างทดสอบได้จำลองโครงสร้างออกมานั้นมีการกระจายตัวของโมเมนต์ที่เหมือนกันแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องทางพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ดังนั้นตัวอย่างทดสอบจึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของโครงสร้างอาคารจริงเพื่อดูรูปแบบความเสียหายที่เกิดบริเวณจุดต่อคาน-เสาได้



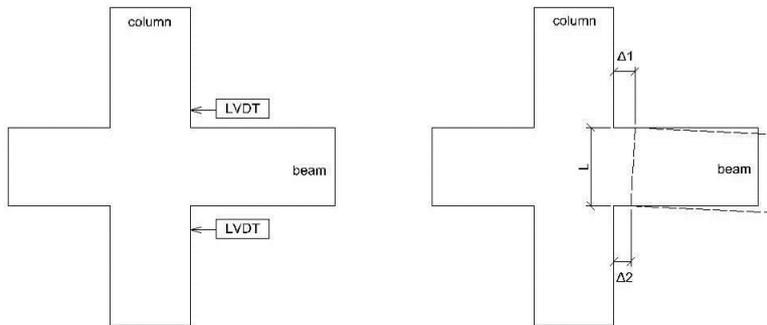
(ก) โมเมนต์ที่เกิดในโครงสร้างเมื่ออาคารรับแรง (ข) โมเมนต์ที่เกิดในตัวอย่างเมื่อให้แรงกระทำกระทำด้านข้าง

รูปที่ 3.1 แรงที่เกิดในโครงสร้างเมื่อมีแรงกระทำด้านข้าง



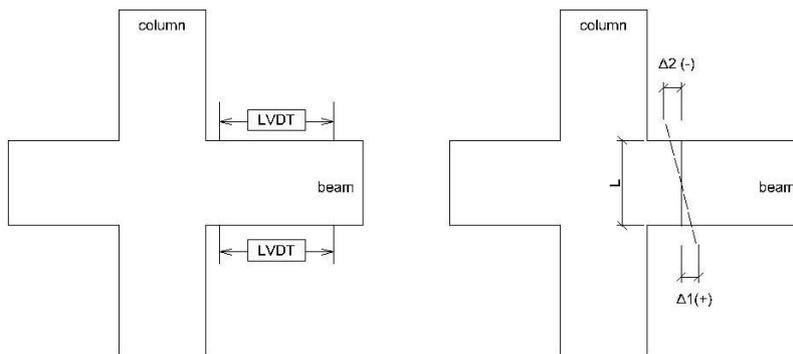
(ก) ตำแหน่งที่ติดตั้ง Pi-gauges และการวัดค่ามุมคดที่ตำแหน่งต่างๆ โดย

$$\text{rotation angle } (\gamma) = \frac{-\Delta_1 - \Delta_2}{2L \cos \phi}$$



(ข) ตำแหน่งที่ติดตั้ง LVDT เพื่อวัดค่ามุมเกร็งจากการเปลี่ยนรูปของคาน โดย

$$\text{rocking angle } (\theta) = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{L}$$



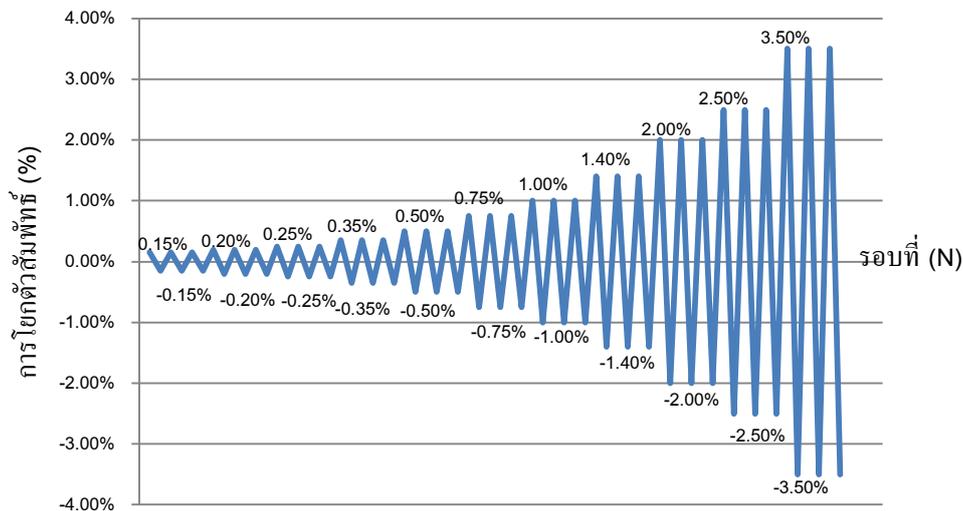
(ค) ตำแหน่งที่ติดตั้ง LVDT เพื่อวัดค่ามุมคด โดย

$$\text{rotation angle } (\theta) = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{L}$$

รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือ และการวัดค่า

(Pimanmas. and Chaimahawan ,2010)

การกำหนดรอบการเคลื่อนที่รวมถึงระยะการเคลื่อนที่ในแต่ละรอบนั้นทาง ACI T1.1 (2001) ที่ได้อธิบายในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แนะนำไว้ดังรูปที่ 3.4 ดังนี้โดยได้กำหนดในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์และรอบการเคลื่อนที่ตัว ซึ่งกำหนดให้รอบการเคลื่อนที่ตัว 3 รอบต่อหนึ่งการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

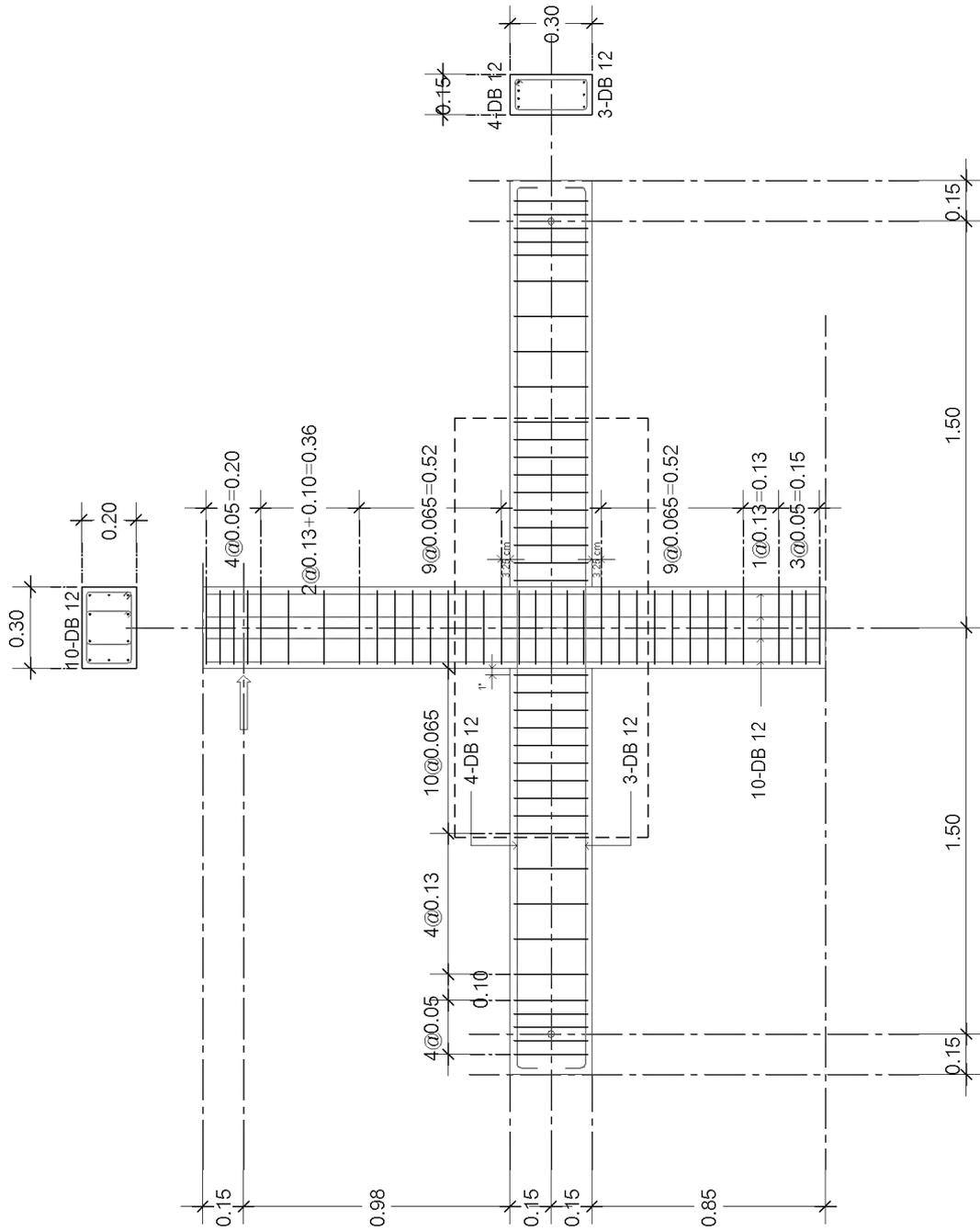


รูปที่ 3.4 การกำหนดรอบของการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบโดย ACI T1.1 (2001)

3.1.1 ตัวอย่างทดสอบ

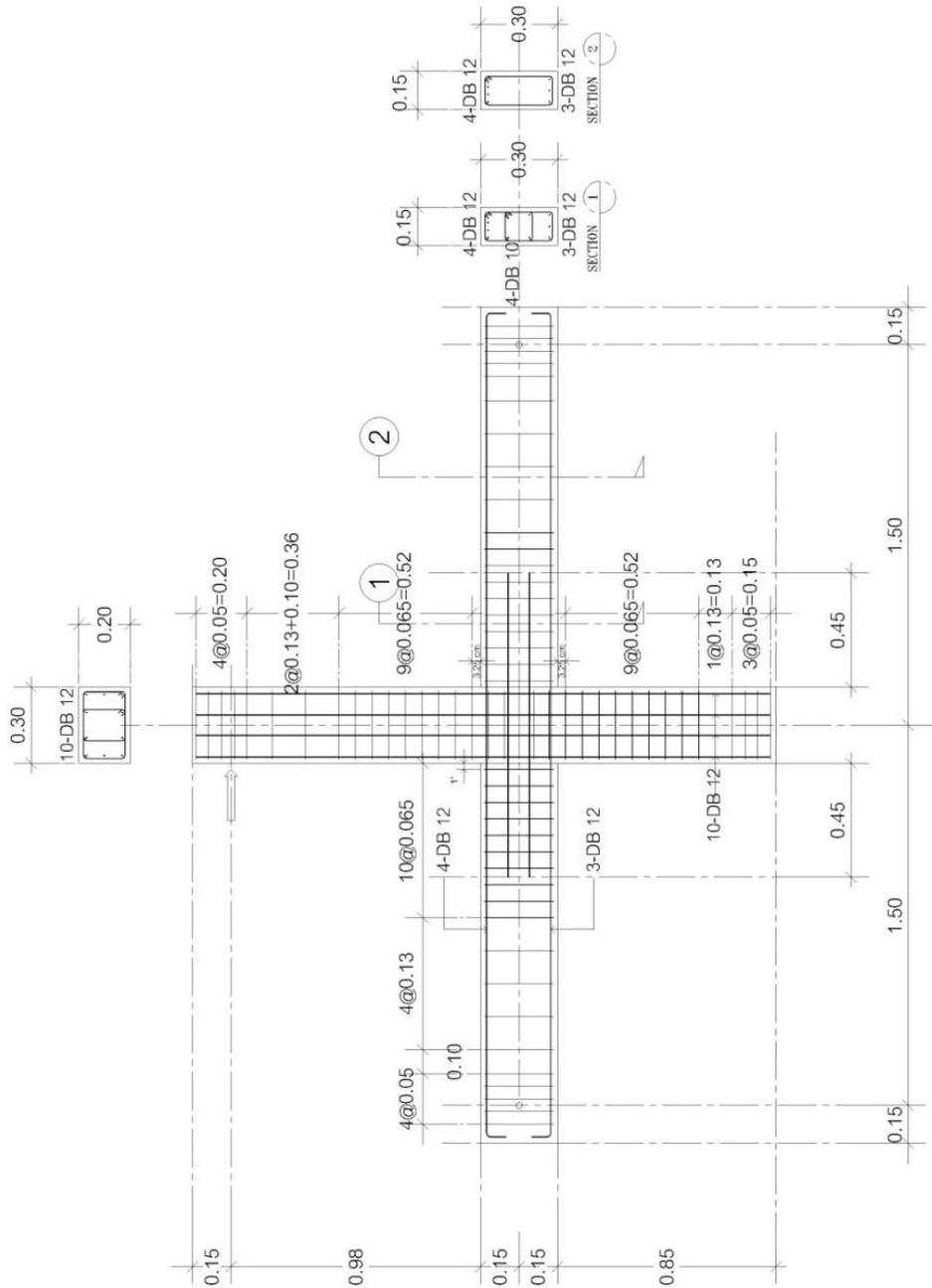
ตัวอย่างทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมของจุดต่อโครงสร้างคอนกรีตในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของจุดต่อคาน-เสาภายในอาคารนี้ การออกแบบขนาดของตัวอย่างนั้นได้พิจารณาให้ตัวอย่างนี้เป็นตัวแทนของอาคารพาณิชย์ขนาด 4 ชั้น และทำการลดขนาดของตัวอย่างเป็น 2/3 เท่าของขนาดโครงสร้างจริง โดยในโครงการนี้นั้นได้ออกแบบตัวอย่างทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง ประกอบด้วย

1. ตัวอย่าง RC 1 ตัวอย่างแรกนี้เป็นตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงพฤติกรรมของจุดต่อในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากเป็นตัวแทนของโครงสร้างอาคารทั่วไปที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งตัวอย่างที่ 1 นี้เป็นตัวอย่างของโครงสร้างในระบบเทในที่ตั้งบริเวณจุดต่อนั้นออกแบบตามมาตรฐานของ ACI 352R-02 โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็กดังรูปที่ 3.5



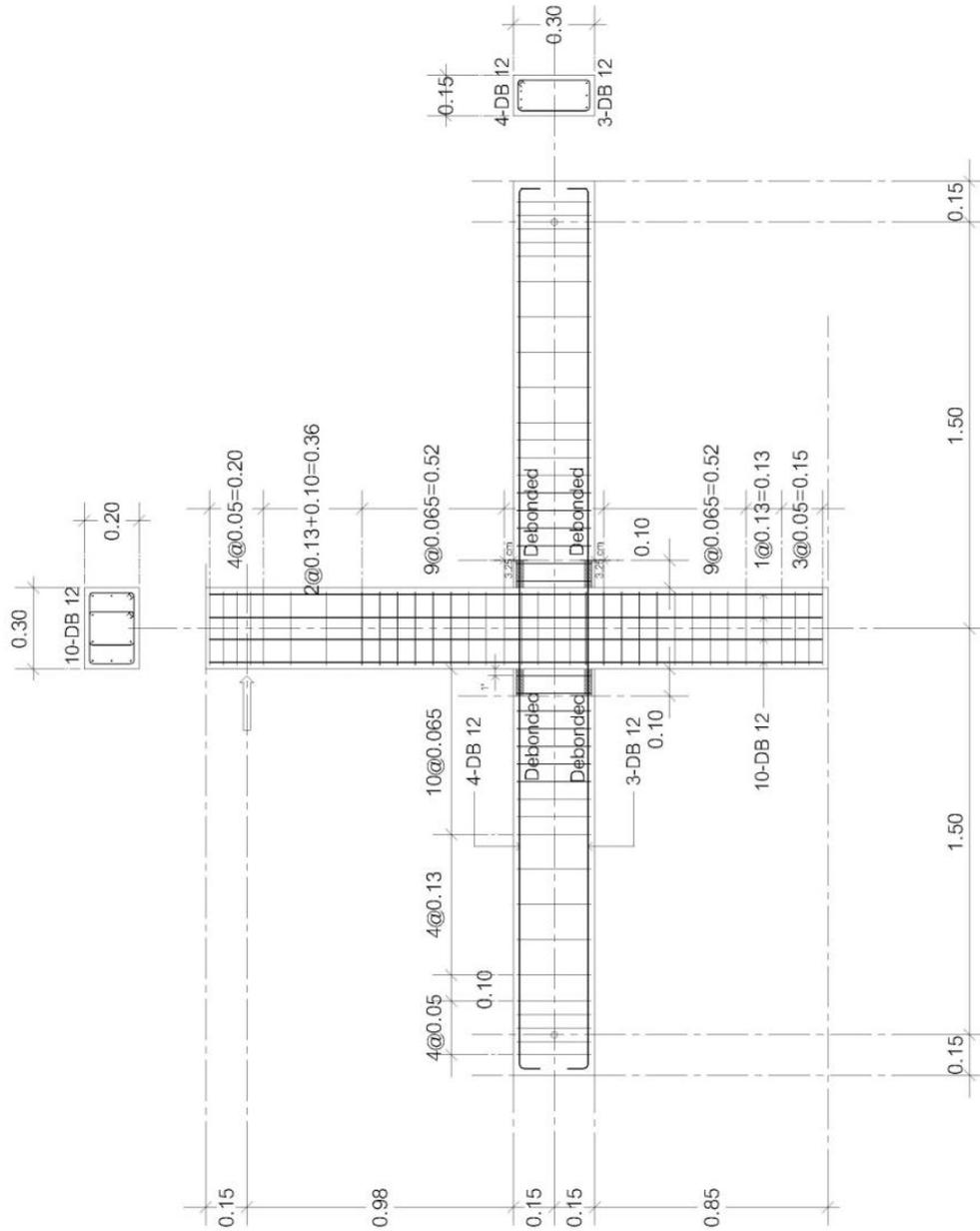
รูปที่ 3.5 รายละเอียดการเสริมเหล็กในตัวอย่างควบคุม RC 1

2. ตัวอย่าง RC 2 เป็นตัวอย่างที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนกับตัวอย่าง RC 1 โดยมีการเพิ่มเติม เหล็กเสริมระดับกลาง (Intermediate Steel) เข้าไปในบริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ตัวอย่างนี้เกิดตำแหน่งที่วิบัติบริเวณคานห่างจากหน้าเสา โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็กดังรูปที่ 3.6



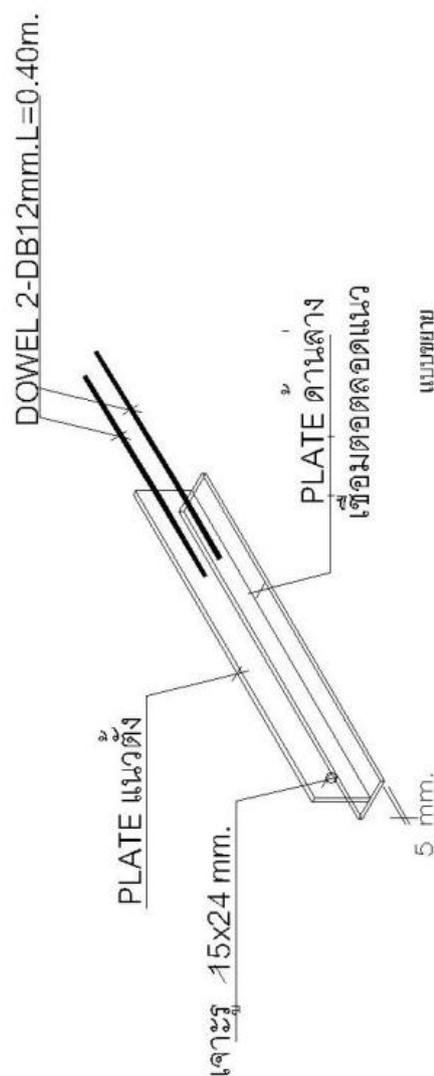
รูปที่ 3.6 รายละเอียดการเสริมเหล็กในตัวอย่าง RC 2

3. ตัวอย่าง RC 3 ในตัวอย่างนี้รายละเอียดของเหล็กเสริมจะเหมือนกับตัวอย่าง RC 1 เช่นกัน แต่จะมีการ Debonded หรือ เป็นการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตของเหล็กแกนของคานบริเวณที่ปลายคาน โดยแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.7

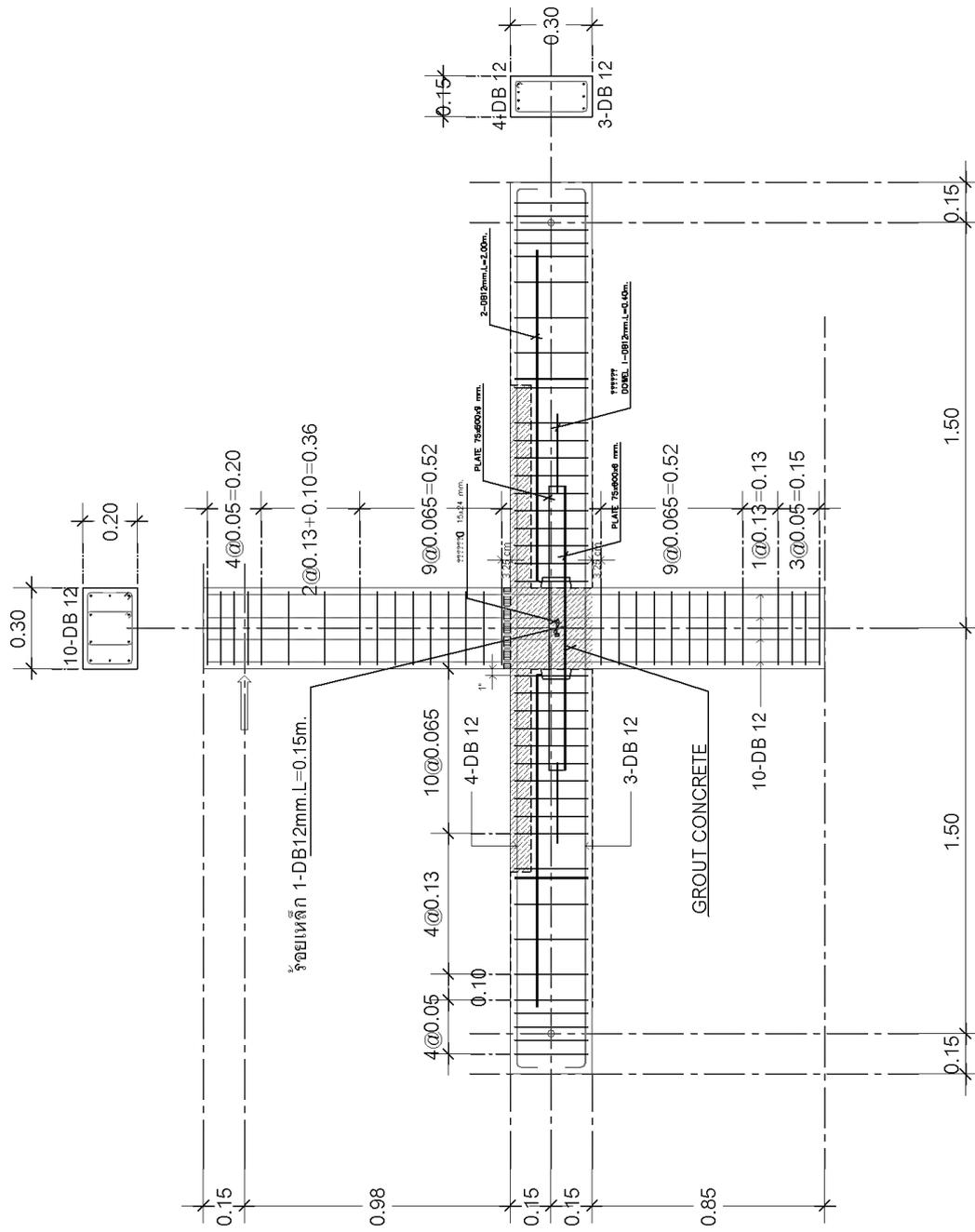


รูปที่ 3.7 รายละเอียดการเสริมเหล็กในตัวอย่าง RC 3

4. ตัวอย่าง PC 1 ตัวอย่างนี้จะเป็นรูปแบบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป โดยในตัวอย่างนี้เราต้องการทราบถึงพฤติกรรมของจุดต่อโครงสร้างชั้นส่วนสำเร็จรูปนี้ว่ามีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งในส่วนของ การติดตั้งตัวอย่างนั้นจะใช้เหล็กหน้าตัดตัวที่ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ผังเข้าไปในชั้นส่วนของคานเพื่อช่วยในการติดตั้งให้สามารถทำได้สะดวก โดยจำนวนของเหล็กเสริมที่คานและเสานั้นมีค่าเท่ากับเหล็กที่มีอยู่ในตัวอย่าง RC 1 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจน ในส่วนของรายละเอียดของการเสริมเหล็กในตัวอย่างที่เป็นระบบชั้นส่วนสำเร็จนี้แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 เหล็กหน้าตัดรูปตัวทีที่ฝังเข้าไปในชั้นส่วนคานสำเร็จรูป



รูปที่ 3.9 รายละเอียดการเสริมเหล็กในตัวอย่าง PC 1

โดยการเปรียบเทียบปริมาณของเหล็กเสริมรวมถึงลักษณะเฉพาะจุดของตัวอย่างต่าง ๆ นั้น แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1รายละเอียดสำหรับตัวอย่างทดสอบ

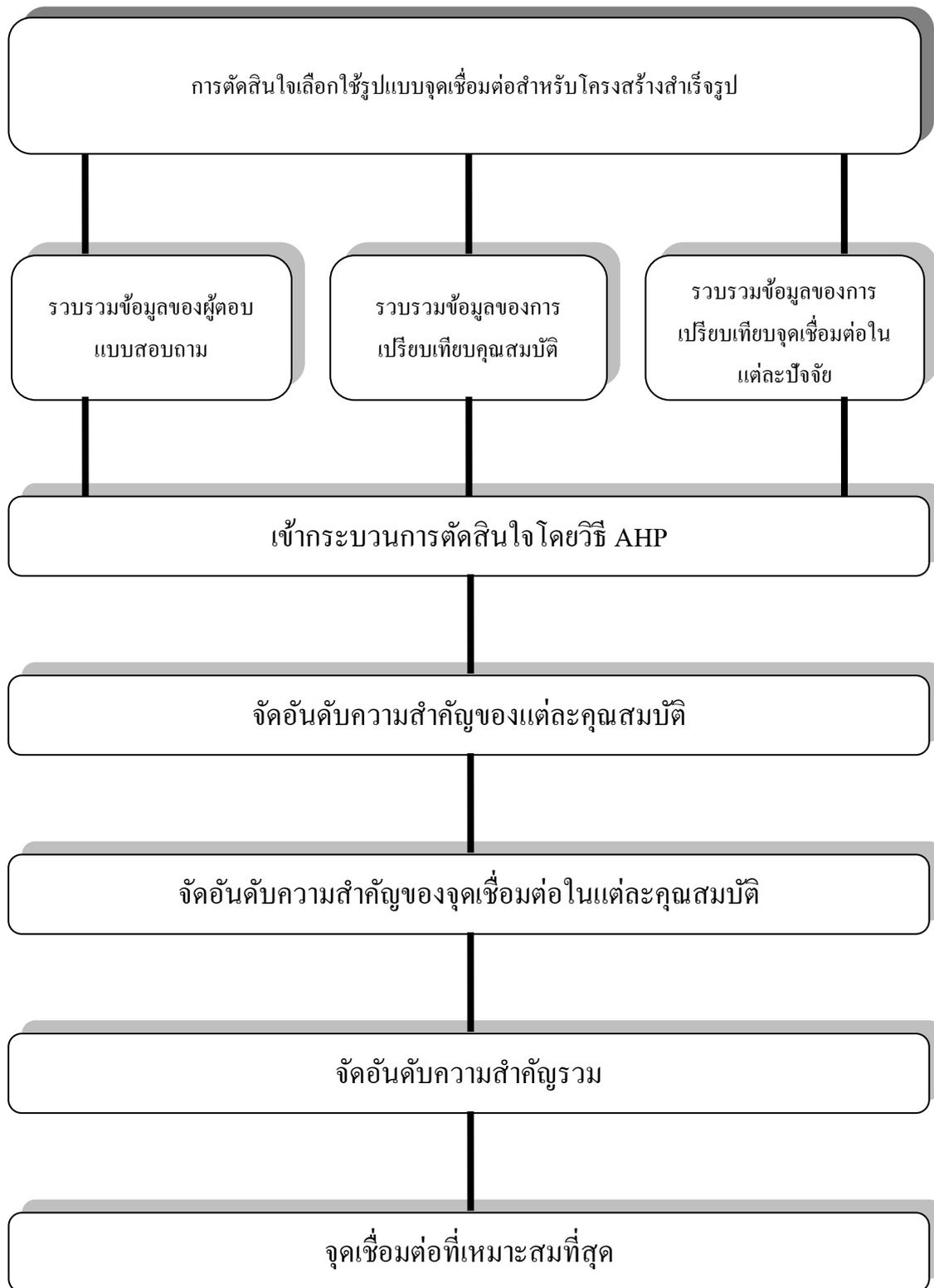
ชุดทดสอบ	คาน				เสา		ลักษณะเฉพาะของจุดต่อ
	b _x h (m)	ρ	ρ'	Av/s (cm ² /m)	b _x h (m)	ρ _g	
RC 2	0.15x0.30	0.0086 (3-DB12)	0.0116 (4-DB12)	0.566/0.06 5 (1-RB6)	0.20x0.3 0	0.0188 (10-DB12)	รูปแบบจุดต่อและการย้ายตำแหน่งวิบัติจากจุดต่อมายังคาน จากการศึกษาของBahjat A.Fและคณะ (1987)
RC 3	0.15x0.30	0.0086 (3-DB12)	0.0116 (4-DB12)	0.566/0.06 5 (1-RB6)	0.20x0.3 0	0.0188 (10-DB12)	รูปแบบจุดต่อและการย้ายตำแหน่งวิบัติจากจุดต่อมายังคาน วิธีการ Debondedบริเวณหน้าคาน-เสา
PC 1	0.15x0.30	0.0086 (3-DB12)	0.0116 (4-DB12)	0.566/0.06 5 (1-RB6)	0.20x0.3 0	0.0188 (10-DB12)	ชุดทดสอบคาน-เสา สำเร็จรูปโดยปรับปรุงรูปแบบของจุดต่อที่กำหนดอยู่เดิม

3.2 ลำดับความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อระหว่างคาน-เสา

การหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทางด้านสถาปัตยกรรมของวิธีการก่อสร้างแบบขึ้นส่วนสำเร็จนั้นจะใช้วิธีการออกแบบสำรวจ ซึ่งแบบสำรวจที่ได้จัดทำขึ้นจะเป็นลักษณะของการให้คะแนนปัจจัยต่างที่กำหนดให้ และในการให้คะแนนนั้นจะเป็นการให้คะแนนในลักษณะของการเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ โดยเกณฑ์การให้คะแนนนั้นแสดงในตารางที่ 3.1 โดยในขั้นตอนของการปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทางด้านสถาปัตยกรรมนั้นจะมีขั้นตอนของการทำงานดังนี้

- 1 จัดทำแบบสอบถามเพื่อรวบรวมข้อมูลโดยจัดทำแบบสอบถามแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้
 - 1.1 แบบสอบถามเพื่อรวบรวมข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถาม
 - 1.2 แบบสอบถามเพื่อทำการจัดอันดับความสำคัญของคุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อโดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติเป็นคู่ ๆ ด้วยการให้คะแนน
 - 1.3 แบบสอบถามเพื่อทำการจัดอันดับความเหมาะสมของรูปแบบจุดเชื่อมต่อในแต่ละคุณสมบัติโดยการเปรียบเทียบจุดเชื่อมต่อเป็นคู่ ๆ ด้วยการให้คะแนน
- 2 ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์
- 3 นำข้อมูลการให้คะแนนเปรียบเทียบคุณสมบัติเข้ากระบวนการเมทริกซ์ เพื่อจัดอันดับความสำคัญของคุณสมบัติ
- 4 นำข้อมูลการให้คะแนนเปรียบเทียบจุดเชื่อมต่อในแต่ละคุณสมบัติเข้ากระบวนการเมทริกซ์เพื่อจัดอันดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อในแต่ละคุณสมบัติ
- 5 นำข้อมูลอันดับความสำคัญของคุณสมบัติและอันดับความสำคัญของจุดเชื่อมต่อแต่ละอันดับมาทำการสังเคราะห์เพื่อหาอันดับความสำคัญรวม
- 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ซึ่งหากนำขั้นตอนดังกล่าวนี้มาเขียนเป็นแผนผังแสดงขั้นตอนการตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบจุดเชื่อมต่อสำหรับโครงสร้างสำเร็จรูปแล้วสามารถได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบจุดเชื่อมต่อสำหรับโครงสร้างสำเร็จรูป

โดยในการออกแบบสอบถามนั้นจะเป็นการสอบถามความคิดเห็น ซึ่งจะมีขอบเขตของการสอบถามถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1 ประสิทธิภาพ

1.1 ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม

1.2 ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม

1.3 ความง่ายในการเทคอนกรีต

2 การติดตั้ง

2.1 ความรวดเร็วในการติดตั้ง

2.2 ความปลอดภัยในการติดตั้ง

2.3 ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง

3 ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ

4 ความง่ายในการเก็บที่ปิดจุดเชื่อมต่อ

5 ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ

6 ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ

7 ความสวยงาม

บทที่ 4

ผลการทดสอบประเมินกำลังรับแรงกระทำวนซ้ำของจุดต่อคาน-เสา

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ข้อมูลการทดสอบกำลังของวัสดุประกอบไปด้วยข้อมูลของ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตและกำลังครากของเหล็ก ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

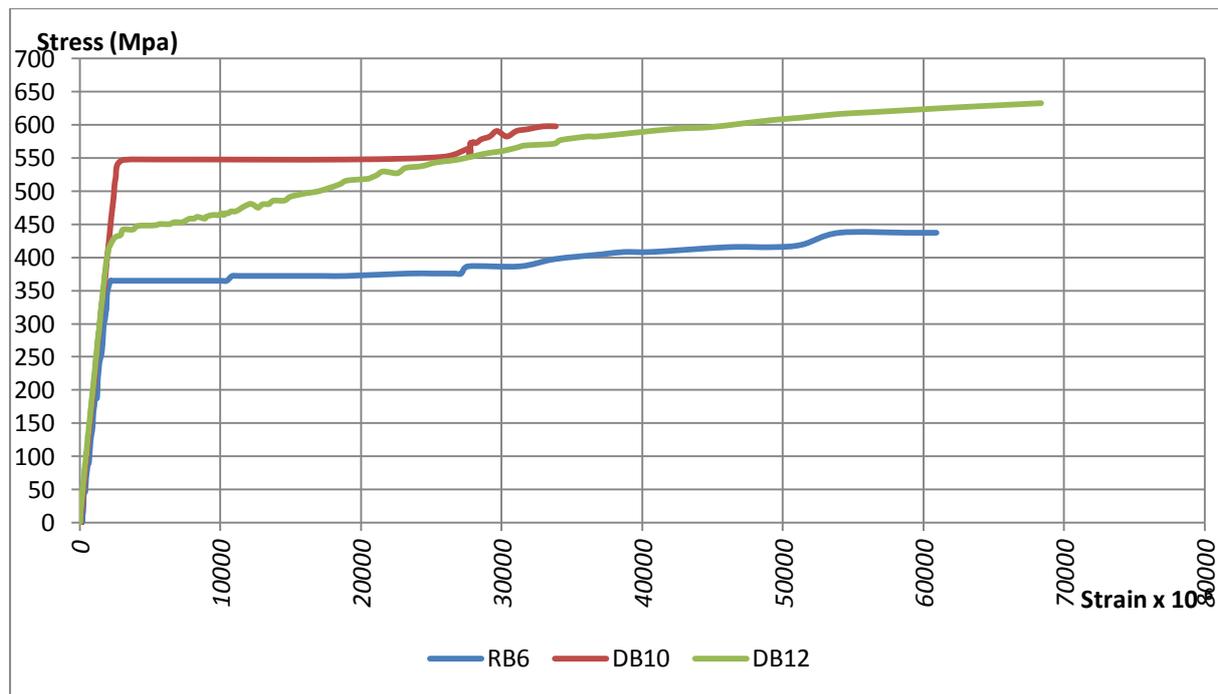
โดยข้อมูลกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในตารางที่ 4.1 นั้นจะมีข้อมูลอยู่หลายค่าเนื่องจากตัวอย่าง RC1 และ RC2 นั้นทำการเทคอนกรีตพร้อมกันโดยเป็นคอนกรีตชุดเดียวกันในส่วน of ตัวอย่าง RC3 นั้นทำการเทแยกตัวเดียว และตัวอย่าง PC1 นั้นเป็นการสร้างโดยใช้รูปแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปจึงทำการเทแยกชิ้นส่วนส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตแยกออกเป็น คาน เสา และบริเวณจุดต่อและในส่วน of กำลังครากของเหล็กนั้นแสดงตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในการศึกษา

ชุดทดสอบ	ชิ้นส่วนของโครงสร้าง	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)
ชุดที่ RC1	คาน	44.03
	เสา	
	จุดต่อ	
ชุดที่ RC2	คาน	44.03
	เสา	
	จุดต่อ	
ชุดที่ RC3	คาน	47.77
	เสา	
	จุดต่อ	
ชุดที่ PC1	คาน	42.97
	เสา	45.35
	จุดต่อ	61.99

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษา

	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	แรงดึงคราก (กก.)	หน่วยแรงดึงคราก (กก./ตร.ซม.)
RB6	0.278	1,034	3,721
DB10	0.723	4,028	5,571
DB12	1.094	4,659	4,259

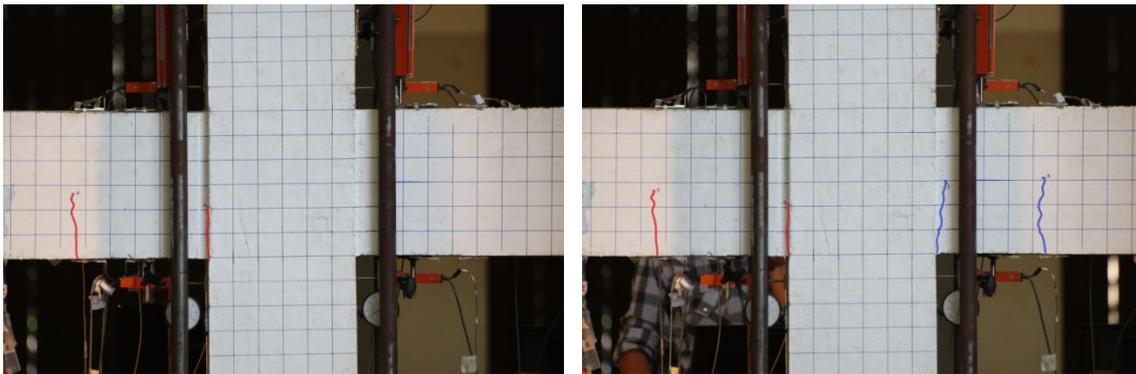


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษา

4.2 พฤติกรรมและพัฒนาการของการเกิดรอยร้าว ความเสียหายและการวิบัติ

1) ตัวอย่างทดสอบควบคุม RC1

จากผลการทดสอบพบว่า ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ตัวอย่างทดสอบนี้เกิดรอยร้าวแรกเมื่อทำการให้แรงแบบสลับทิศในรอบที่ 3 โดยรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าเสา และ คานส่วนล่างตามรูปที่ 4.1 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานโดยรอยร้าวสีแดงนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงผลัก (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางซ้าย) แก่ตัวอย่าง ในขณะที่รอยร้าวสีน้ำเงินนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดึง (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางขวา) แก่ตัวอย่าง โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้ทั้งที่เกิดขึ้นจากแรงผลักและแรงดึงนั้นมีลักษณะรอยร้าวเหมือนกันคือเกิดบริเวณส่วนล่างของคานและบริเวณหน้าเสาที่เชื่อมต่อกับคานบริเวณส่วนล่าง เนื่องจากเหล็กเสริมในคานนั้นเหล็กล่างมีปริมาณน้อยกว่าเหล็กบนจึงทำให้เมื่อเกิดแรงดัดที่เท่ากันแล้วรอยร้าวจึงเกิดขึ้นที่ด้านล่าง

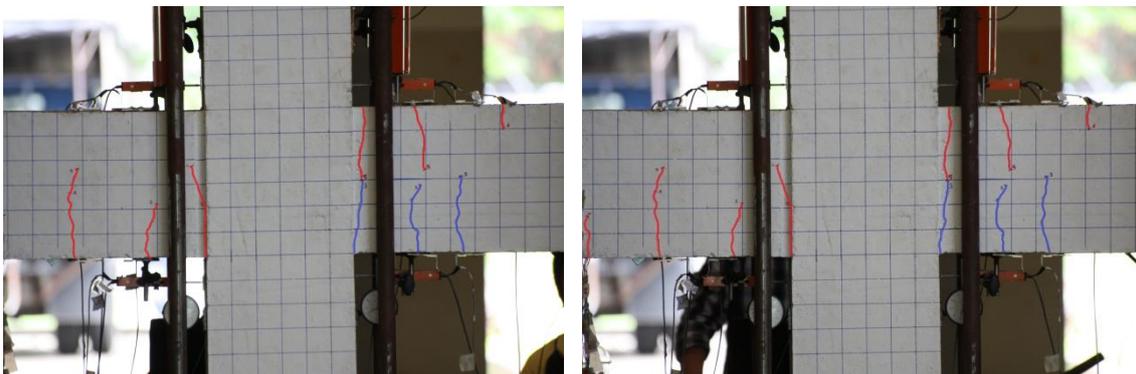


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นบริเวณคานด้านล่างโดยจำนวนและความยาวของรอยร้าวเพิ่มขึ้น และยังเกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณคานช่วงบนโดยเกิดเฉพาะช่วงที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างเท่านั้น รอยร้าวที่เกิดเพิ่มขึ้นบริเวณคานช่วงบนนี้ทำให้รอยร้าวด้านล่างและด้านบนเชื่อมต่อกันส่งผลให้รอยร้าวเกิดรอบคานซึ่งเกิดขึ้นบริเวณปลายคานตามรูปที่ 4.2

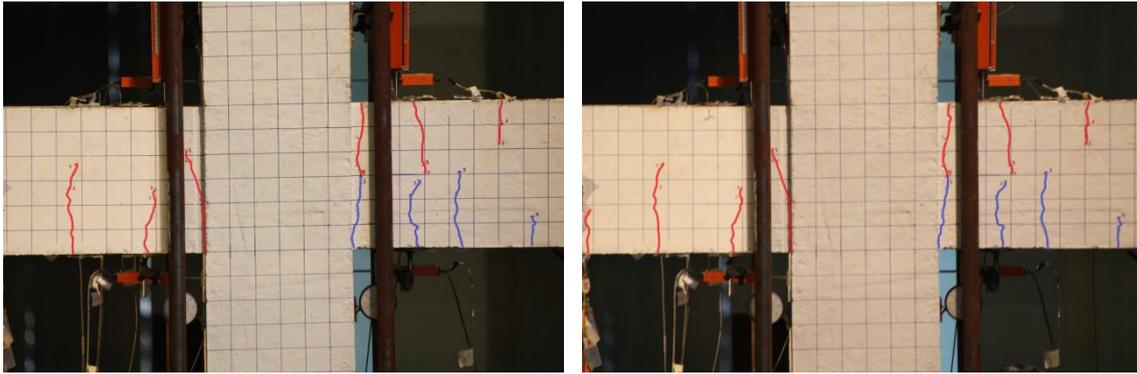


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ รอยร้าวเดิมที่มีอยู่มีความยาวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเกิดรอยร้าวใหม่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยบริเวณคานด้านล่างแต่มีความยาวไม่มากตามรูปที่ 4.3

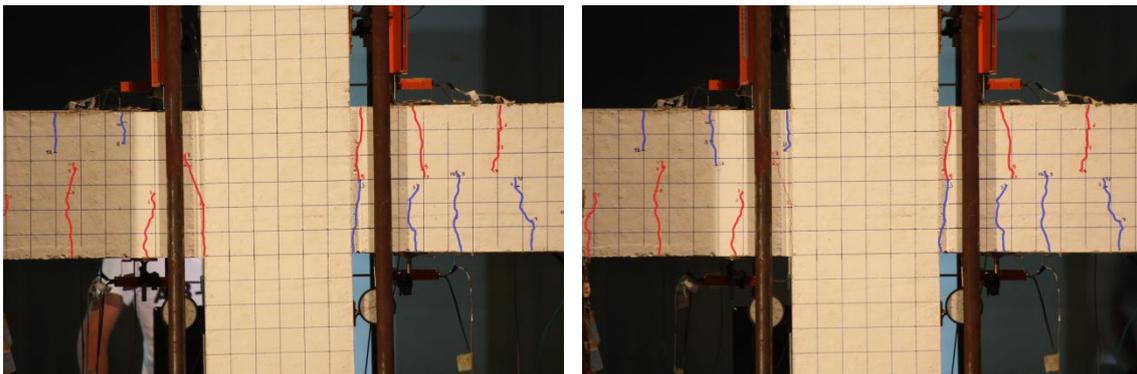


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้เกิดรอยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนบริเวณคานด้านซ้ายช่วงบนตามรูปที่ 4.4 จากเดิมที่เกิดเพียงรอยร้าวที่คานช่วงบนด้านขวาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ อีกทั้งรอยร้าวบริเวณปลายคานช่วงล่างที่ติดกับหน้าเสามีการเปิดอ้าออกและปิดกลับเมื่อมีแรงกระทำแบบสลับทิศ

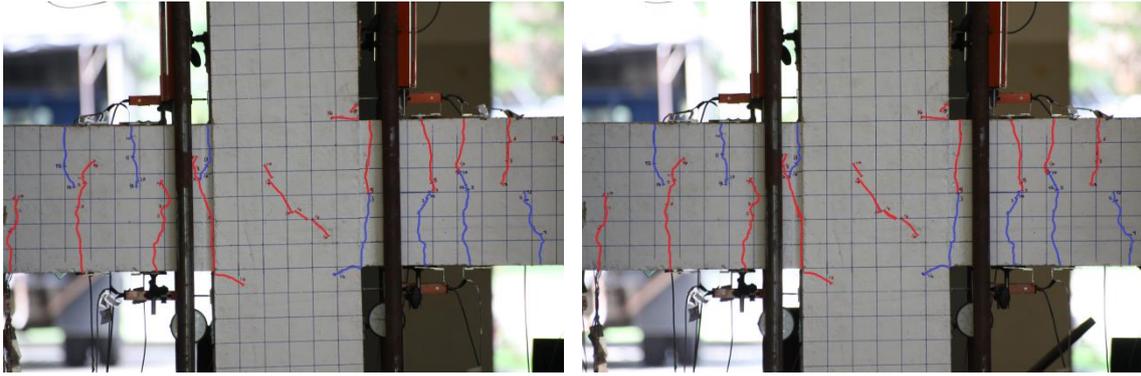


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ ในส่วนของรอยร้าวบริเวณคานนั้นพบว่ารอยร้าวเดิมที่มีอยู่แล้วมีความยาวเพิ่มขึ้น และ บริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นเกิดรอยร้าวในแนวทแยงโดยรอยร้าวในแนวทแยงนี้เกิดเฉพาะกรณีที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างเพียงอย่างเดียวในส่วนของกรณีที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่างนั้นยังไม่เกิดรอยร้าวในแนวทแยง ไม่เพียงแต่รอยร้าวในแนวทแยงเท่านั้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาดังแต่ยังเกิดรอยร้าวในแนวนอนที่มุมของจุดต่อคาน-เสา

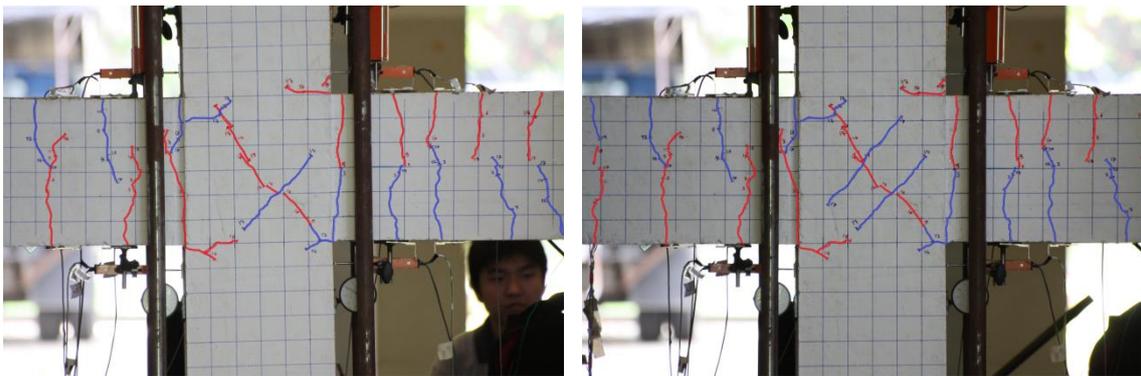


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.5 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ พบว่าเกิดรอยร้าวในแนวทแยงใหม่เพิ่มขึ้น และรอยร้าวเดิมมีความยาวเพิ่มมากขึ้นตามรูปที่ 4.6 โดยการผลักให้ตัวอย่างเคลื่อนใน รอบแรกพบว่าเมื่อให้แรงผลักแก่ตัวอย่างส่งผลให้รอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสามีความยาวเพิ่มมากขึ้นและเกิดรอยร้าวใหม่ในแนวนอนที่มุมของจุดต่อคาน-เสาขึ้นอีกทั้งยังเกิดรอยร้าวในแนวขนานกับเหล็กเสริมตามยาวของคาน และเมื่อให้แรงดึงแก่ตัวอย่างพบว่าเกิดรอยร้าวใหม่ในแนวทแยงเกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาขึ้นและยังเกิดรอยร้าวใหม่ในแนวนอนที่บริเวณมุมของจุดต่อคาน-เสาเช่นเดียวกับกรณีที่ให้แรงผลัก และเมื่อให้แรงกระทำแบบวนซ้ำในรอบที่สามพบว่าเกิดรอยร้าวในแนวทแยงเส้นใหม่ที่มีความยาวพอสมควรเกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาขึ้นในขณะที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่างและการให้แรงกระทำวนซ้ำในรอบที่สามนี้ยังส่งผลให้รอยร้าวเดิมที่มีอยู่ก่อนหน้านี้มีความยาวเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย



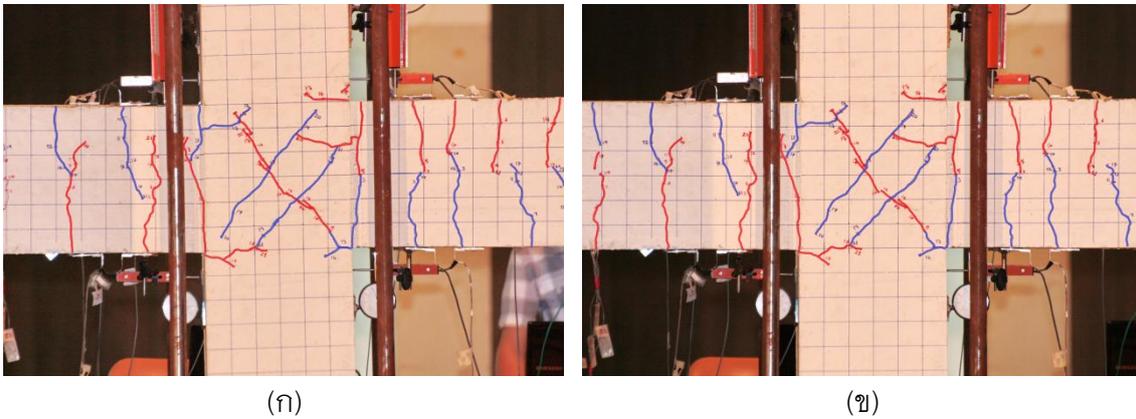
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.6 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

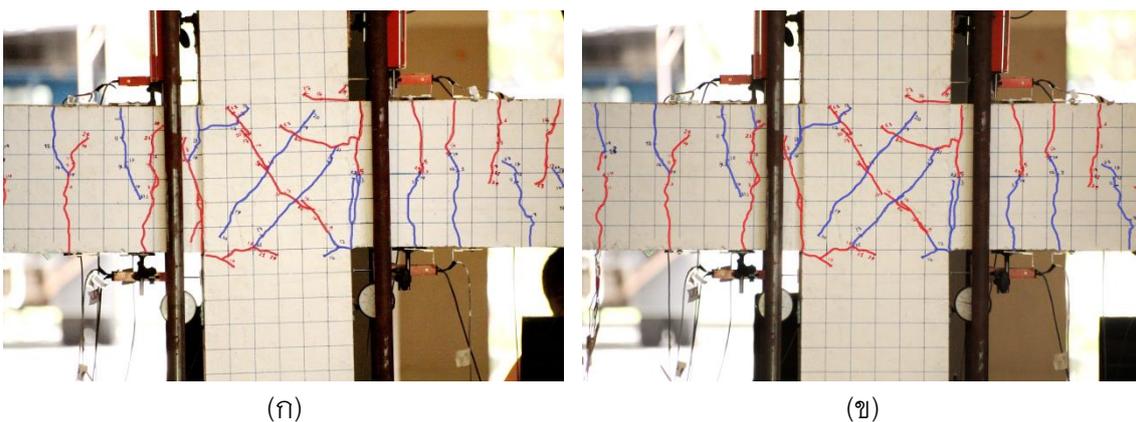
ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่นี้รอยร้าวเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาเป็นหลักดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยรอยร้าวทั้งหมดเกิดจากรอยร้าวเดิมที่มีอยู่แล้วโดยส่วนมากรอยร้าวจะเกิดจากรอยร้าวในแนวทแยงเดิมทั้งกรณีที่ให้แรงผลักและแรง

ดึง และที่ระยะการเคลื่อนที่นี้ทำให้ขนาดของรอยร้าวที่เปิด้าออกมีขนาดมากขึ้นโดยจะเปิด้าออกและปิดเมื่อให้แรงกระทำแบบสลับทิศแก่ตัวอย่างซึ่งสาเหตุนี้ทำให้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นน้อยลง



รูปที่ 4.7 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

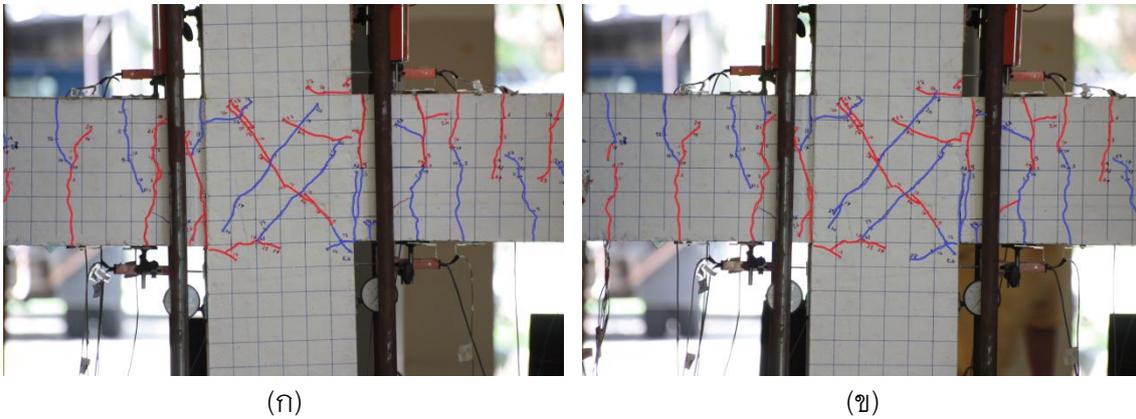
ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่นี้รอยร้าวที่เกิดเพิ่มขึ้นนั้นจะต่อจากรอยร้าวเดิมที่มีอยู่โดยเกิดทั้งในส่วนของคานที่ส่งผลให้ความยาวของรอยร้าวมีความยาวมากขึ้น ส่วนบริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นเกิดเพิ่มเติมในส่วนรอยร้าวในแนวทแยงในทิศที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่าง และยังเกิดรอยร้าวขนานกับเหล็กเสริมตามแกนของคานบริเวณจุดต่อคาน-เสาโดยเกิดต่อจากรอยร้าวเดิม ส่งผลให้รอยร้าวมีความยาวเพิ่มมากขึ้นตามรูปที่ 4.8 และสิ่งที่เห็นได้ชัดเจนคือการเปิด้าออกของรอยร้าวที่ปลายคานที่ติดกับหน้าเสาทั้งสองด้านโดยการเปิด้าออกและปิดกลับของรอยร้าวเมื่อให้แรงกระทำแบบสลับทิศนี้มีการเปิด้าออกซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.8 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

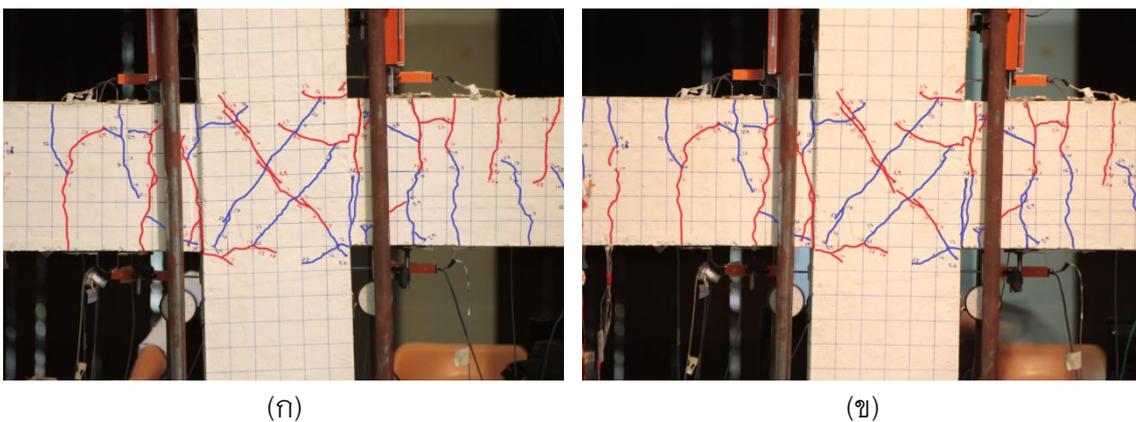
ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่นี้จะเห็นได้ว่าเกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาตามรูปที่ 4.9 แต่สิ่งที่เกิดขึ้นและเห็นได้ชัดเจนคือการเปิด้าออกของ

รอยร้าวที่ปลายคานติดกับหน้าเสาและที่ระยะห่างจากหน้าเสาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพของคาน แสดงให้เห็นว่าความเสียหายเกิดขึ้นที่จุดนี้รุนแรงมากที่สุด



รูปที่ 4.9 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

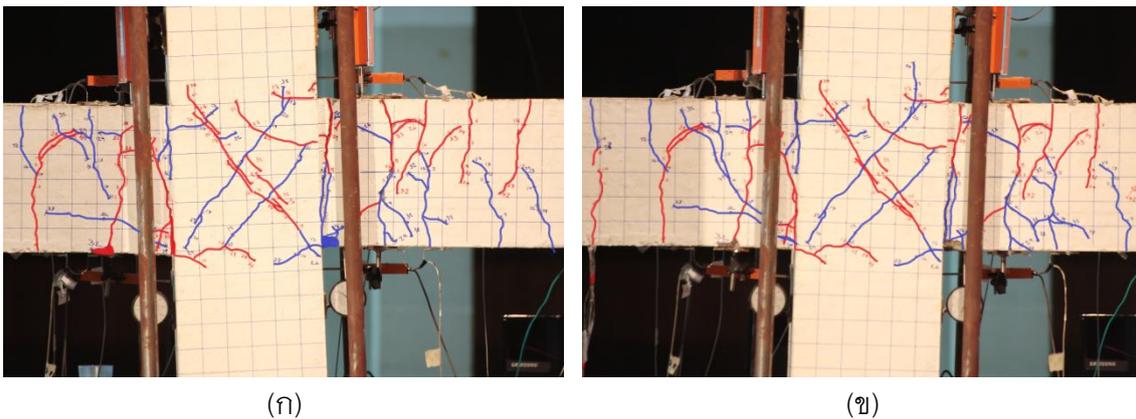
ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมทั้งในส่วนของบริษัทจุดต่อคาน-เสา และบริเวณปลายคานส่วนที่อยู่ใกล้กับหน้าเสาซึ่งเป็นจุดที่เกิดความเสียหายมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.10 อีกทั้งการเปิดอัดออกและปิดกลับของรอยร้าวบริเวณปลายคานที่ติดกับหน้าเสานั้นเกิดการบดอัดของคอนกรีตและแตกออกเป็นผง โดยความเสียหายที่เกิดจากการบดอัดกันของคอนกรีตนั้นยังเกิดขึ้นไม่มาก แต่ที่ระยะจากหน้าเสาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพของคานนั้นยังไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัดกันของคอนกรีต



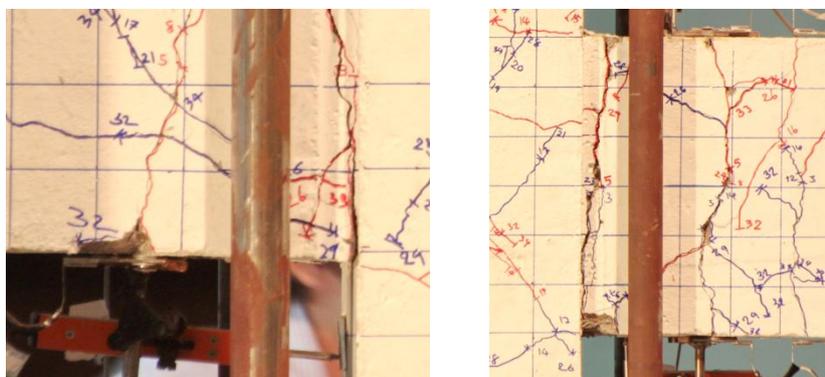
รูปที่ 4.10 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นในหลายจุดทั้งบริเวณจุดต่อคาน-เสาที่เกิดในลักษณะของรอยร้าวในแนวทแยงที่เกิดต่อจากรอยร้าวเดิม ในส่วนของรอยร้าวที่เกิดที่คานนั้นจะเกิดขึ้นใหม่ในบริเวณช่วงระยะห่างจากหน้าเสาครึ่งหนึ่งของระยะความลึกประสิทธิภาพโดยเกิดทั้งรอย

ร้าวในแนวตั้งและรอยร้าวในแนวราบตามที่แสดงในรูปที่ 4.11 ในส่วยของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนที่นี้ได้แสดงในรูปที่ 4.12 โดยความเสียหายส่วนมากเกิดจากการอัดแตกของคอนกรีตที่ต้องรับแรงอัดบริเวณรอยร้าวที่อัดออกและปิดกลับทำให้มีคอนกรีตบางส่วนแตกและหลุดออก ที่เห็นได้ชัดเจนคือที่คานซ้ายด้านล่างที่ระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผลจะเห็นว่าคอนกรีตหลุดออกเนื่องจากการอัดแตก และที่ปลายคานขวาล่างติดกับหน้าเสาก็เกิดคอนกรีตหลุดออกอีกทั้งยังจะเห็นว่าที่รอยร้าวเนื่องจากแรงดัดที่เกิดที่คานก็เกิดคอนกรีตแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ เนื่องจากการบดอัด



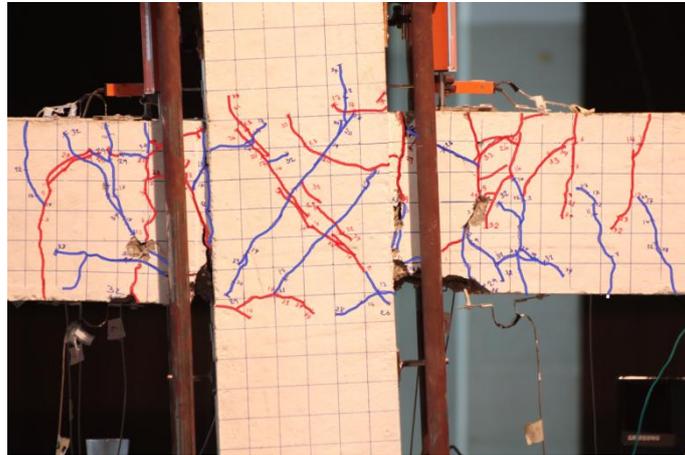
รูปที่ 4.11 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง



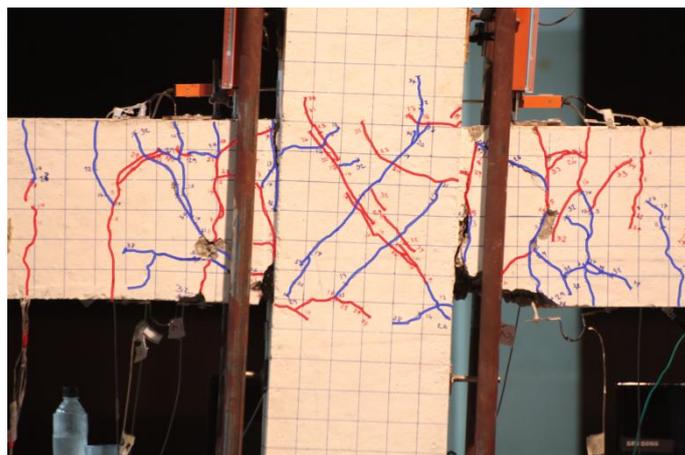
รูปที่ 4.12 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ เมื่อดูจากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนที่ตัวนี้ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดความเสียหายอย่างมากโดยเฉพาะที่บริเวณปลายคานที่ติดกับหน้าเสา จะเห็นว่าคอนกรีตที่ด้านล่างของคานเกิดการแตกและหลุดออกเป็นจำนวนมากจนสามารถมองเห็นเหล็กเสริมที่อยู่ภายในได้อย่างชัดเจน ซึ่งความเสียหายระดับนี้ถือว่าจุดต่อของตัวอย่างนี้เสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้แล้ว ในส่วนของรอยแตกขนาดเล็กที่เกิดตามขอบของรอยร้าวนั้นก็พัฒนามาจาก

ความเสียหายที่เกิดที่ระยะการเคลื่อนที่ก่อนหน้าันี้ที่เกิดจากการอัดแตกของคอนกรีต โดยการวิเคราะห์สาเหตุของการเสียหายโดยละเอียดในรูปแบบนี้จะได้ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป



(ก)

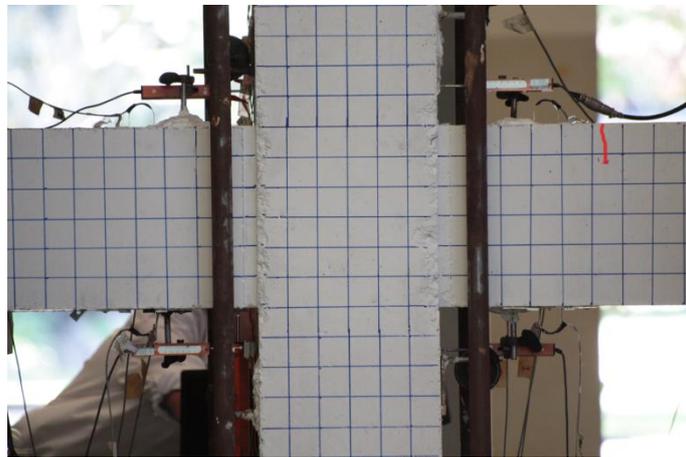


(ข)

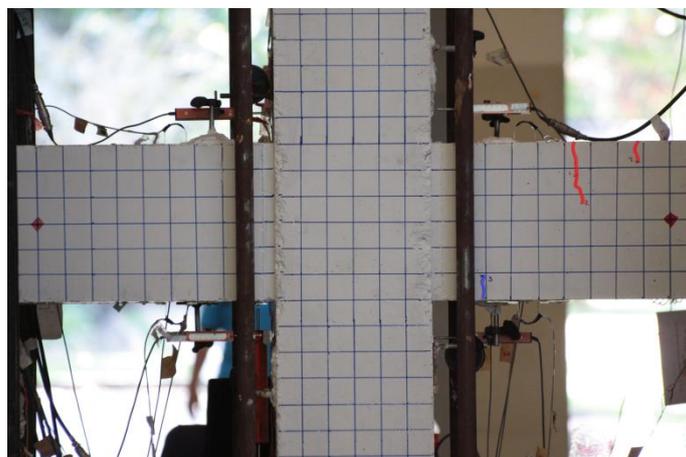
รูปที่ 4.13 รอยร้าวของตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ ก)แรงผลัก ข)แรงดึง

2) ตัวอย่างทดสอบ RC 2

จากผลการทดสอบพบว่า ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ตัวอย่างทดสอบนี้เกิดรอยร้าวแรกเมื่อทำการให้แรงแบบสลับทิศในรอบแรกโดยรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณคานส่วนบนห่างจากหน้าเสาเป็นระยะความลึกประสิทธิผลของคานตามรูปที่ 4.14 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานโดยรอยร้าวสีแสดนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงผลัก (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางซ้าย) แก่ตัวอย่าง ในส่วนของรอยร้าวสีน้ำเงินนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดึง (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางขวา) แก่ตัวอย่าง จากนั้นเมื่อให้ระยะการเคลื่อนตัวเท่าเดิมในรอบที่ 2 ปรากฏรอยร้าวขึ้น โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดต่อจากรอยร้าวเดิมและเกิดเฉพาะช่วงที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างทำ โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้แสดงในรูปที่ 4.15 .ในส่วนของการให้ระยะการเคลื่อนที่ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เท่าเดิมในรอบที่ 3 นี้ไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มเติม



รูปที่ 4.14 รอยร้าวแรกของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $+0.15\%$ รอบที่ 1



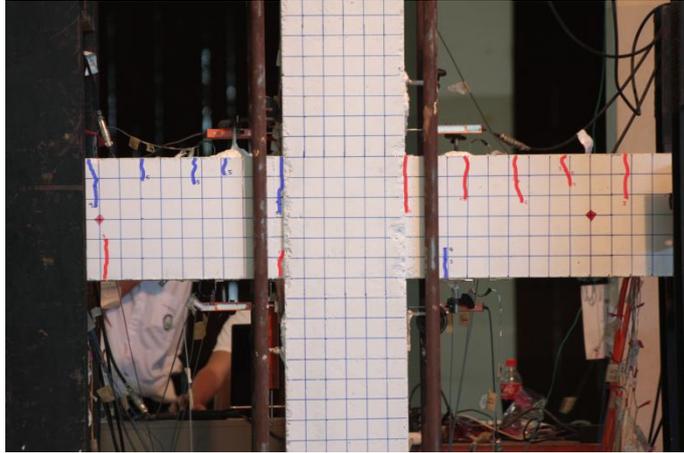
รูปที่ 4.15 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ รอบที่ 3

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ การเคลื่อนที่ในรอบแรกของระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นปรากฏรอยร้าวที่ปลายคานบริเวณหน้าเสาขึ้น โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดทั้งกรณีที่ให้แรงผลักและแรงดึงแก่ตัวอย่าง และยังเกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณคานด้านขวาส่วนบนโดยรอยร้าวนี้เกิดห่างจากหน้าเสาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพของคาน อีกทั้งยังเกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่ส่วนล่างของคานด้านขวาซึ่งเกิดต่อจากรอยร้าวเดิม ในส่วนของการเคลื่อนที่ในรอบที่ 2 ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เต็มนี้จะเห็นว่าเกิดรอยร้าวใหม่ขึ้นที่คานส่วนบนด้านซ้าย โดยลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เป็นลักษณะของรอยร้าวในแนวตั้งที่เกิดจากแรงดัดตั้งแสดงในรูปที่ 4.16



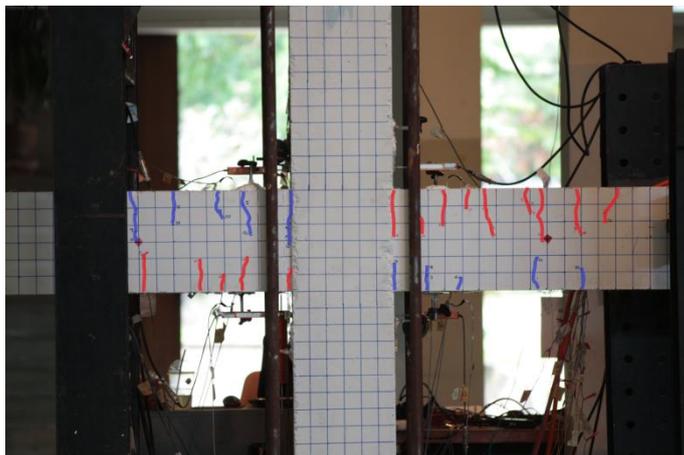
รูปที่ 4.16 รอยร้าวของตัวอย่าง RC2 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ เกิดรอยร้าวใหม่ขึ้นที่บริเวณคานดังรูปที่ 4.17 โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นทั้งส่วนบนและส่วนล่างของคาน ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ทั้งหมดนั้นเกิดห่างจากหน้าเสาที่ระยะมากกว่าความลึกประสิทธิภาพของคาน และเป็นรอยร้าวในแนวตั้ง



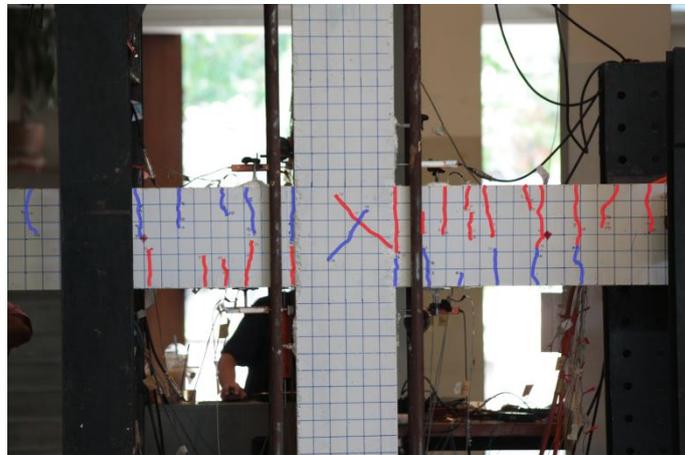
รูปที่ 4.17 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้รอยร้าวที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นที่การเคลื่อนที่ในรอบแรกของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดกระจายตัวในบริเวณคานซึ่งมีทั้งรอยร้าวที่เกิดขึ้นใหม่และรอยร้าวที่เกิดต่อจากรอยร้าวเดิมในรูปที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปลายคานที่บริเวณหน้าเสาไปจนระยะที่ห่างจากหน้าเสามากกว่าความลึกประสิทธิภาพของคานซึ่งระยะที่เกิดรอยร้าวห่างจากหน้าเสามากที่สุด 60 เซนติเมตร และรอยร้าวยังเกิดทั้งส่วนบนและส่วนล่างของคาน โดยรอยร้าวที่หน้าเสานั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดึงแก่ตัวอย่างเท่านั้นในส่วนของการให้แรงผลักแก่ตัวอย่างไม่ทำให้เกิดรอยร้าวที่บริเวณหน้าเสา



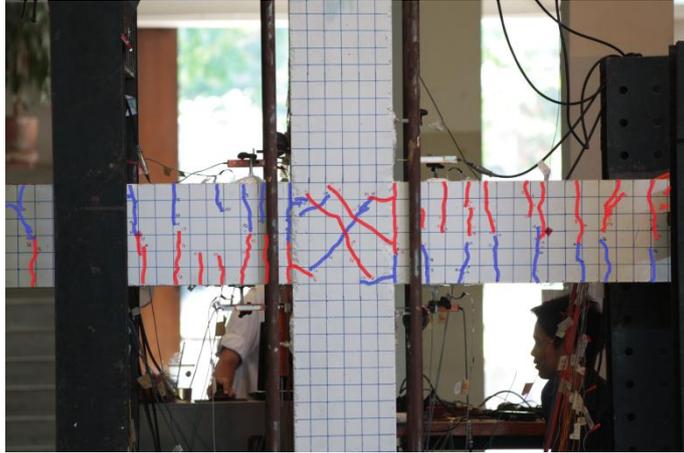
รูปที่ 4.18 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ ในรอบแรกของการเคลื่อนที่ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นั้นเกิดเพียงรอยร้าวบริเวณคานเท่านั้น โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดกระจายตัวทั้งคานเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ก่อนหน้านี้ แต่ในรอบการเคลื่อนที่ในรอบที่ 2 นั้นเกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้น โดยเกิดที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาแต่กลับไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มบริเวณคาน และการเคลื่อนที่ในรอบที่ 3 ที่ระยะการเคลื่อนที่ตัวนั้นไม่เกิดรอยร้าวในแนวทแยงเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อคาน-เสาแต่เกิดรอยร้าวในแนวตั้งกระจายตัวบริเวณคานทั้งสองข้างเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ในรอบแรกแต่จำนวนรอยร้าวที่เกิดเพิ่มเติมในการเคลื่อนที่ในรอบที่ 3 นี้เกิดขึ้นน้อยกว่าในรอบแรก และที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ยังไม่พบการร้าวออกของรอยร้าวโดยพบเพียงการเกิดเพิ่มของรอยร้าวซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นใหม่และมีขนาดยาวที่สุดนั้นเกิดที่ระยะห่างจากหน้าเส้าเป็นระยะ 75 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.19



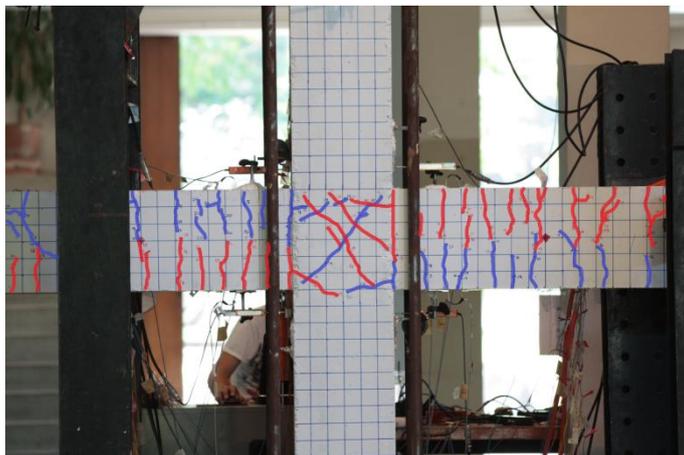
รูปที่ 4.19 รอยร้าวของตัวอย่าง RC2 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ ในรอบแรกของการเคลื่อนที่ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นั้นเกิดรอยร้าวใหม่ในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสาขึ้น และยังเกิดรอยร้าวในแนวราบที่มุมของบริเวณจุดต่อคานเสาขึ้น อีกทั้งยังเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมที่คานโดยที่ระยะห่างจากหน้าเส้ามากกว่า 60 เซนติเมตรซึ่งรอยร้าวที่เกิดเพิ่มนี้เข้าไปเชื่อมกับรอยร้าวเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้วทำให้รอยร้าววิ่งผ่านตลอดความลึกคานในส่วนของการเคลื่อนที่ในรอบที่ 2 และ 3 นั้นเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อโดยเกิดรอยร้าวในแนวราบที่มุมของบริเวณจุดต่อคาน-เสา ในส่วนรอยร้าวที่เหลือที่เกิดในระยะเวลาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ในการเคลื่อนที่ในรอบที่ 2 และ 3 นั้นจะเกิดต่อจากรอยร้าวเดิมที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ ซึ่งรอยร้าวที่เกิดนี้กระจายไปทั่วทั้งคานแต่ไม่เกิดเพิ่มบริเวณหน้าเส้าดังแสดงในรูปที่ 4.20



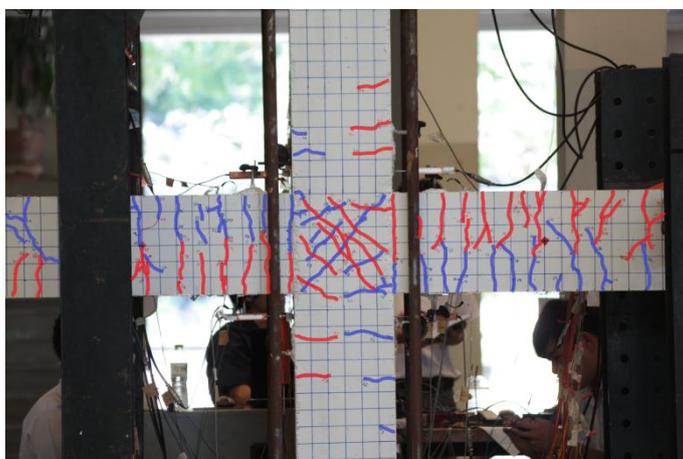
รูปที่ 4.20 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$ ที่ระยะการเคลื่อนตัวนั้นเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมทั้งในส่วนของบริเวณจุดต่อคาน-เสาและบริเวณคานตามรูปที่ 4.21 ในส่วนของบริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมเล็กน้อยโดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรอยร้าวในแนวทแยงซึ่งมีทั้งรอยร้าวที่เกิดขึ้นใหม่และรอยร้าวที่เกิดจากรอยร้าวเดิมความยาวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้มีความยาวประมาณไม่เกิน 5 เซนติเมตร และที่บริเวณจุดต่อนี้ยังเกิดรอยร้าวในแนวราบที่มุมของบริเวณจุดต่อซึ่งเป็นการเกิดต่อจากรอยร้าวเดิมทั้งสิ้น ส่วนของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณคานนั้นรอยร้าวยังเกิดกระจายตัวแต่จะเกิดขึ้นมากที่ระยะจากหน้าเสาไม่เกิน 40 เซนติเมตร โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรอยร้าวในแนวตั้งทั้งสิ้น



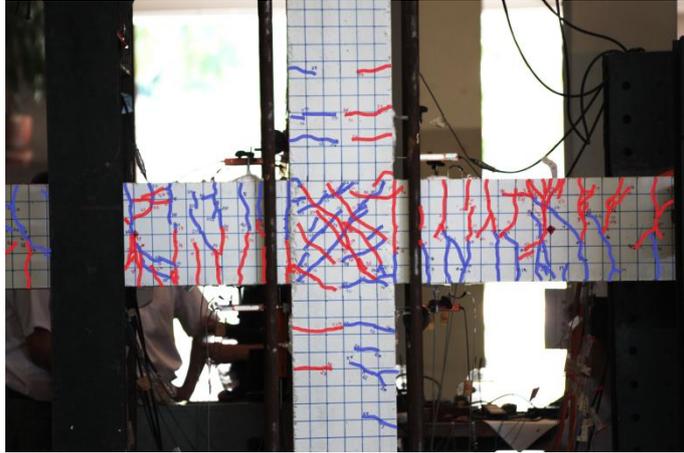
รูปที่ 4.21 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นใหม่คือการเกิดรอยร้าวขึ้นที่เสาตามรูปที่ 4.22 ซึ่งการเกิดรอยร้าวที่เสานี้เกิดขึ้นทั้งในรอบแรกของการเคลื่อนตัวและรอบที่ 2 ในส่วนของรอบที่ 3 ของการเคลื่อนตัวที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นเกิดรอยร้าวขึ้นเล็กน้อยที่เสาบนในช่วงที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่าง ในส่วนของบริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นพบว่าที่ระยะเคลื่อนตัวนี้เกิดรอยร้าวในแนวทแยงใหม่ขึ้นทั้งกรณีที่ให้แรงผลักและแรงดึงแก่ตัวอย่าง โดยรอยร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อนี้เกิดขึ้นในรอบของการเคลื่อนที่ในรอบแรกและในรอบที่ 2 ส่วนในรอบที่ 3 นั้นไม่เกิดรอยร้าวบริเวณจุดต่อเพิ่มเติม ในส่วนของกาการเกิดรอยร้าวที่บริเวณคานนั้นยังคงเกิดกระจายตัวเช่นเดียวกับระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ก่อนหน้า



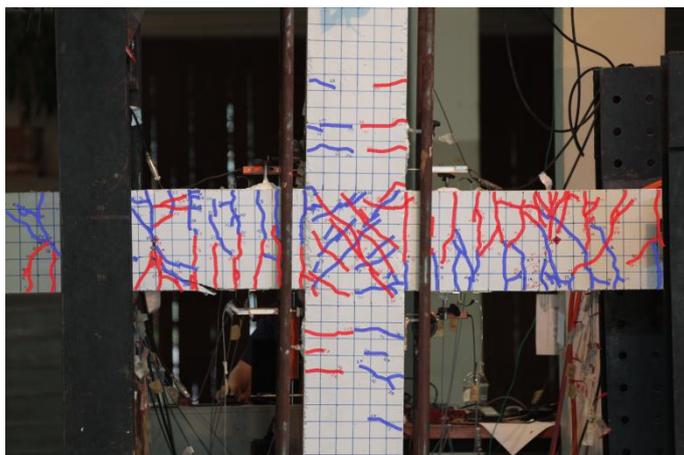
รูปที่ 4.22 รอยร้าวของตัวอย่าง RC2 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ ความเสียหายที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.23 คือ เกิดรอยร้าวในแนวราบขึ้นที่เสาโดยส่วนมากเกิดในรอบแรกของการเคลื่อนตัวที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้และเกิดเพิ่มเติมเล็กน้อยในการเคลื่อนที่รอบถัดมาซึ่งรูปแบบของรอยร้าวนี้เป็นรอยร้าวในแนวราบที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัด ในส่วนของบริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นเกิดรอยร้าวเพิ่มเพียงเล็กน้อยโดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นรอยร้าวในแนวทแยง และในส่วนของคานรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดอยู่ในช่วงบริเวณที่เป็นจุดสิ้นสุดของเหล็กเสริมพิเศษที่เพิ่มเติมเข้าไปในตัวอย่างนี้หรือที่ระยะจากหน้าเสา 45 เซนติเมตร ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในช่วงบริเวณนี้ โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่คานนี้เกิดทั้งรอยร้าวในแนวราบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของคอนกรีตและรอยร้าวในแนวตั้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัดที่เกิดขึ้น

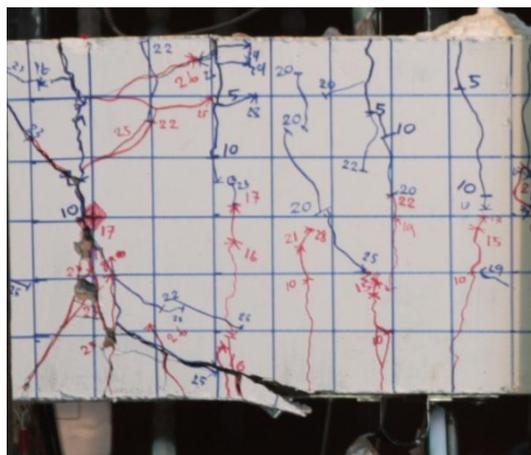


รูปที่ 4.23 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณคาน โดยจุดที่เสียหายมากที่สุดคือบริเวณคานด้านซ้ายดังแสดงในรูปที่ 4.25 ที่แสดงภาพความเสียหายที่เกิดขึ้น จากรูปจะเห็นว่าเกิดการร้าวออกของรอยแยกอย่างรุนแรงที่ส่วนล่างของคาน และในช่วงกึ่งกลางคานเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการอัดกันของคอนกรีต ลักษณะการร้าวออกของรอยแยกนั้นเป็นแนวเอียงซึ่งแสดงถึงการบิดเนื่องจากแรงเฉือนที่จุดดังกล่าว และในรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นที่บริเวณคานทั้งสองด้านนั้นเกิดขึ้นในจุดที่เป็นจุดสิ้นสุดของเหล็กเสริมพิเศษที่เสริมให้แก่ตัวอย่างนี้ ในส่วนของคานด้านขวาแม้ความเสียหายจะเกิดไม่เท่ากับคานด้านซ้ายแต่ก็พบการร้าวออกของรอยร้าวอย่างชัดเจน ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นในบริเวณดังกล่าว

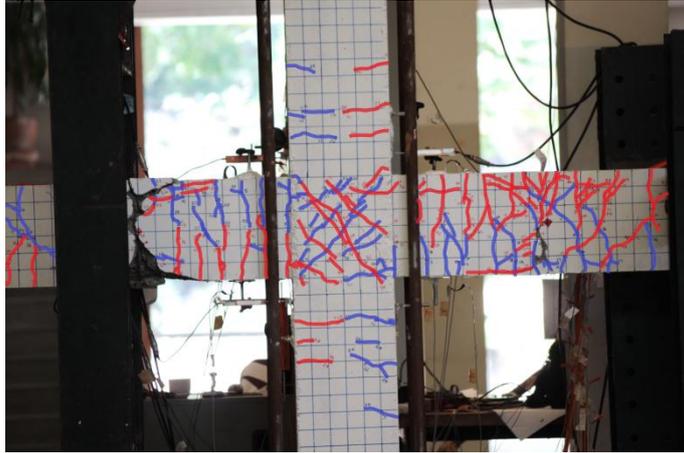


รูปที่ 4.24 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$



รูปที่ 4.25 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคานด้านซ้ายที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นต่อเนื่องมาจากระยะเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นยังเป็นความเสียหายเพิ่มเติมที่จุดเดิม ประกอบด้วยความเสียหายที่คานระยะที่เป็นจุดสิ้นสุดของระยะเหล็กเสริมพิเศษดังแสดงในรูปที่ 4.26 โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคานด้านซ้ายนั้นเมื่อดูจากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่ามีการหลุดร่อนของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างมากและขนาดของรอยร้าวมีขนาดกว้างมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยมีสาเหตุเนื่องมาจากการอัดแตกของคอนกรีตและจุดนี้ยังเป็นจุดที่เป็นระยะสิ้นสุดของเหล็กเสริมพิเศษทำให้กำลังต้านทานแรงดัดของคานที่จุดนี้ลดลงอย่างทันทีทันได้ส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นที่จุดนี้ ในส่วนของคานด้านขวาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ก่อนหน้านี้ยังพบความเสียหายน้อยที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นโดยมีการหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการบดอัดกันของคอนกรีตและยังมีความเสียหายเนื่องจากการฉีกขาดของเนื้อคอนกรีตเนื่องจากแรงเฉือนเกิดขึ้นด้วย ในส่วนของบริเวณจุดต่อคาน-เสาและเสานั้นไม่ปรากฏรอยร้าวเพิ่มเติมที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้



รูปที่ 4.26 รอยร้าวของตัวอย่างRC2ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$

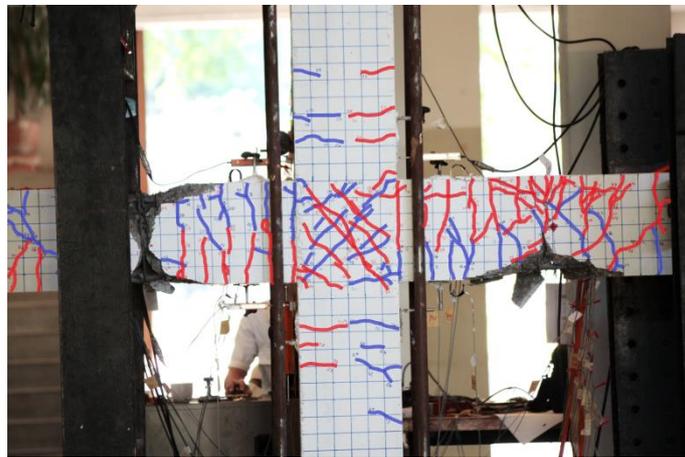


รูปที่ 4.27 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคานด้านซ้ายที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$

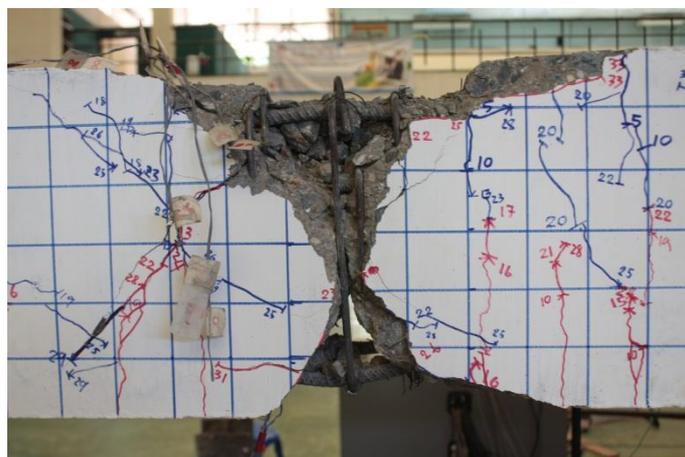


รูปที่ 4.28 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคานด้านขวาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$

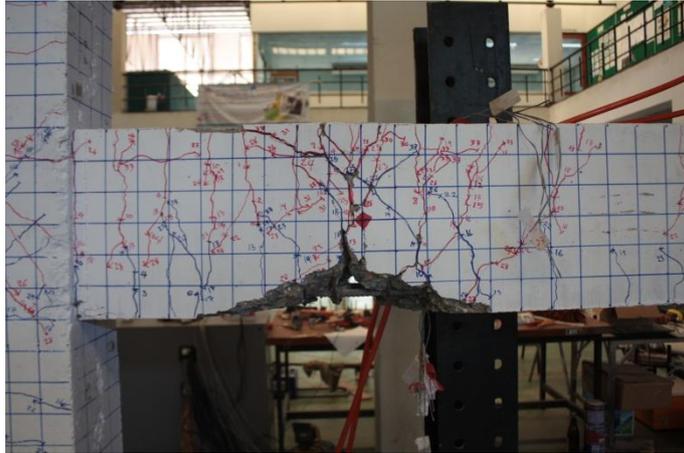
ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของการวิบัติของตัวอย่างนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าบริเวณคานด้านซ้ายที่เกิดความเสียหายจากระยะเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้จะเห็นว่าเนื้อคอนกรีตของคานนั้นได้หลุดร่อนออกเนื่องจากการอัดแตกของคอนกรีตโดยจะเห็นว่าในรูปที่ 4.30 เนื้อคอนกรีตที่ส่วนบนและส่วนล่างของคานหลุดออกเกือบทั้งหมดเหลือเพียงเนื้อคอนกรีตที่กลางของคาน โดยสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อคานรับแรงดัดจะส่งผลให้เกิดแรงอัดขึ้นในเนื้อคอนกรีตและเมื่อตัวอย่างรับแรงแบบสลับทิศแล้วส่งผลให้เนื้อคอนกรีตอัดแตกและหลุดออกทั้งส่วนบนและส่วนล่างของคาน และเมื่อเนื้อคอนกรีตหลุดออกจนเกือบหมดแล้วสิ่งที่ทำหน้าที่รับแรงแทนคอนกรีตคือเหล็กเสริมส่งผลให้เมื่อมีแรงอัดเกิดขึ้นทำให้เหล็กเสริมเกิดการโก่งงอและตัดเหล็กปลอกจนเสียรูป ในส่วนของคานด้านขวานั้นก็เกิดความเสียหายในลักษณะเช่นเดียวกับคานด้านซ้ายโดยจากรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นถึงการหลุดออกของเนื้อคอนกรีตเนื่องจากการอัดแตกเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.29 รอยร้าวของตัวอย่าง RC2 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$



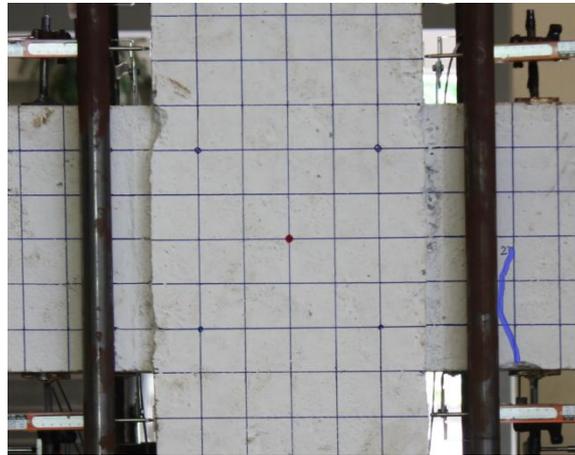
รูปที่ 4.30 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคานด้านซ้ายที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$



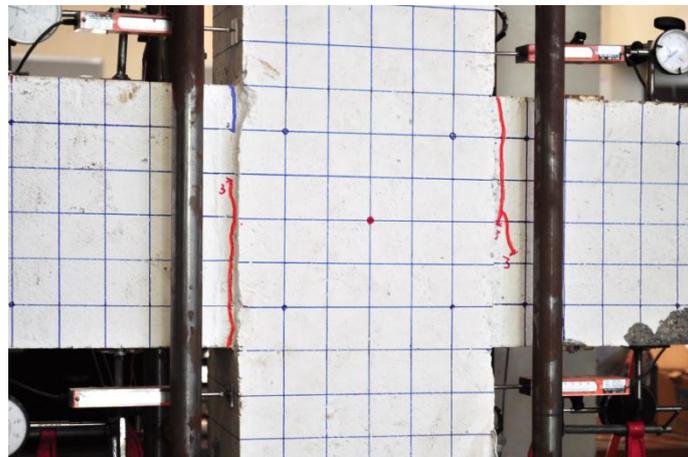
รูปที่ 4.31 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคานด้านซ้ายที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$

3) ตัวอย่างทดสอบ RC 3

จากผลการทดสอบพบว่า ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ตัวอย่างทดสอบนี้เกิดรอยร้าวแรกเมื่อทำการให้แรงแบบสลับทิศในรอบที่ 2 โดยรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณคานส่วนล่างห่างจากหน้าเสาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพของคานตามรูปที่ 4.32 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานโดยรอยร้าวสีแดงนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงผลัก (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางซ้าย) แก่ตัวอย่าง ในส่วนของรอยร้าวสีน้ำเงินนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดึง (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางขวา) แก่ตัวอย่าง จากนั้นเมื่อให้ระยะการเคลื่อนที่เท่าเดิมในรอบที่ 3 ปรากฏรอยร้าวขึ้นที่ปลายคาน โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้ทั้งที่เกิดจากแรงผลักและแรงดึงนั้นมีลักษณะรอยร้าวเกิดทั้งบริเวณส่วนล่างและส่วนบนของคานบริเวณหน้าเสา เนื่องจากตัวอย่างนี้ได้ทำการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตออกบริเวณหน้าเสาทำให้เกิดรอยร้าวทั้งด้านบนและล่างของคานดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 รอยร้าวแรกของตัวอย่าง RC3 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ รอบที่ 2



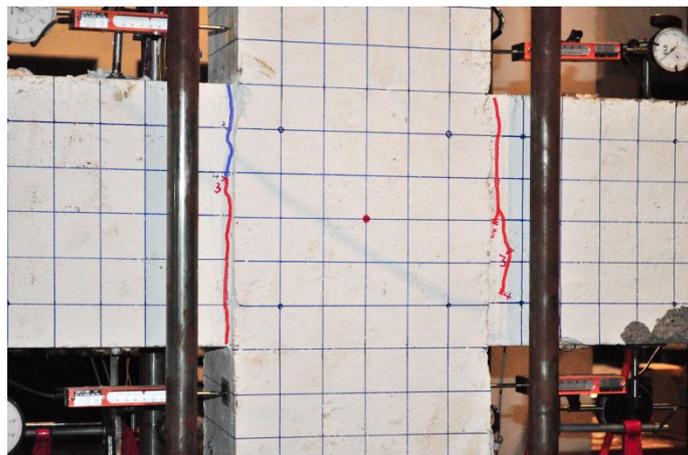
รูปที่ 4.33 รอยร้าวของตัวอย่าง RC3 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ รอบที่ 3

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ยังคงเกิดที่บริเวณปลายคานที่ติดกับหน้าเสาเช่นเดียวกับระยะการเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้ โดยจากรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นบริเวณหน้าเสา ซึ่งเป็นรอยร้าวที่เกิดต่อจากรอยร้าวเดิม โดยยังไม่เกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณจุดต่อเลย



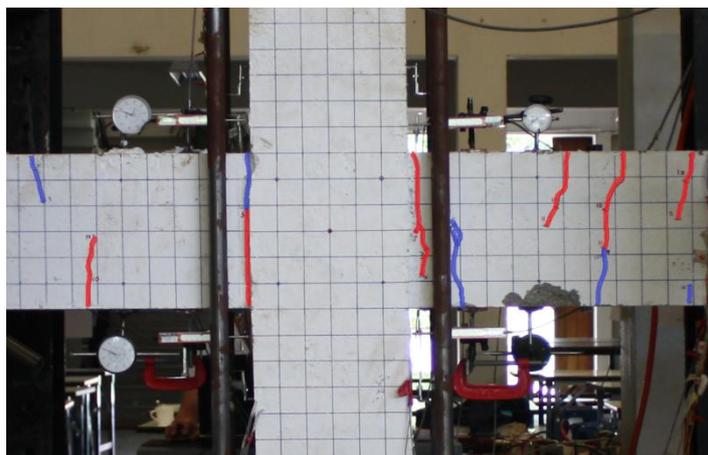
รูปที่ 4.34 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมดังแสดงในรูปที่ 4.35 จากระยะการเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้เกิดเพียงรอยร้าวอำเภออกเล็กน้อย



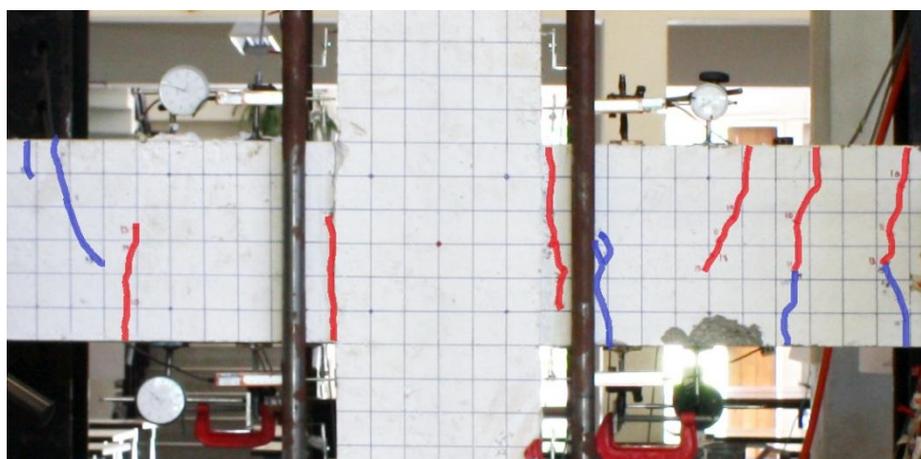
รูปที่ 4.35 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ จะเห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้รอยร้าวทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่คาน โดยการเคลื่อนที่ในรอบแรกของการเคลื่อนที่นี้เกิดรอยร้าวขึ้นที่คานทั้งคานส่วนบนและส่วนล่าง แต่รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังไม่เชื่อมต่อกัน และเมื่อให้การเคลื่อนที่ในรอบที่สองพบว่าเกิดรอยร้าวที่คาน โดยเกิดต่อจากรอยร้าวเดิมที่เกิดในรอบแรกของการเคลื่อนที่ที่ระยะนี้ ส่งผลให้รอยร้าวที่คานส่วนบนและส่วนล่างเชื่อมต่อกันที่บริเวณคานด้านขวาดังรูปที่ 4.36



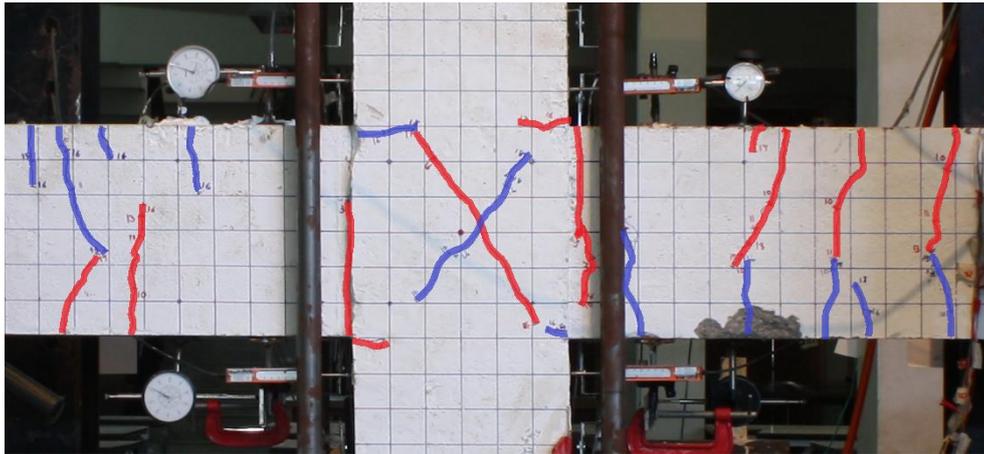
รูปที่ 4.36 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ ในระยะการเคลื่อนตัวนี้พฤติกรรมของรอยร้าวยังคงเหมือนกับการเคลื่อนที่ในระยะก่อนหน้านี โดยจากรูปที่ 4.37 จะเห็นว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดที่คานทั้งหมด และเกิดต่อจากรอยร้าวเดิม จะเห็นว่ารอยร้าวเกิดที่ระยะห่างจากหน้าเสามากกว่าระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน



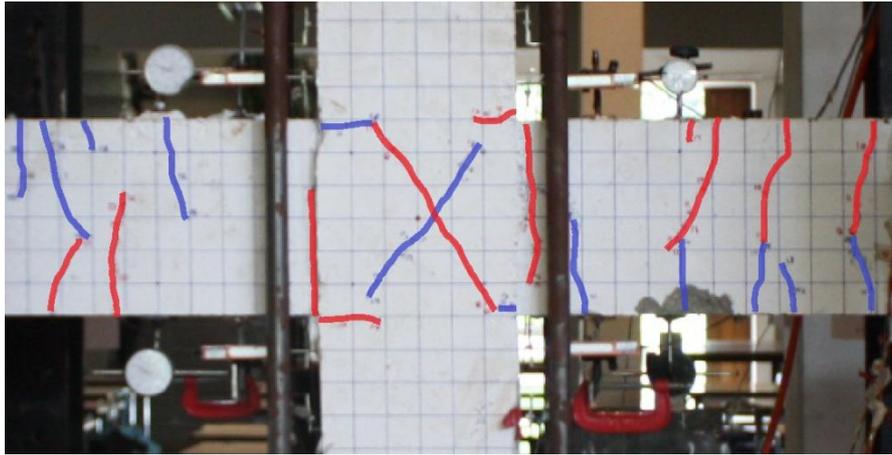
รูปที่ 4.37 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ จากรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนที่นี้เกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยเกิดขึ้นเมื่อให้ระยะเคลื่อนที่นี้ในรอบแรกซึ่งเกิดรอยร้าวในแนวทแยงทั้งทิศทางที่ให้แรงผลัก และ ทิศทางที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่าง อีกทั้งที่ระยะการเคลื่อนที่ตัวนี้ยังเกิดรอยร้าวในแนวแนวขึ้นที่บริเวณมุมของบริเวณจุดต่อคาน-เสาทั้งสี่มุม และยังเกิดรอยร้าวขึ้นที่คานทั้งรอยร้าวที่เกิดขึ้นใหม่และรอยร้าวที่เกิดต่อจากรอยร้าวเดิม



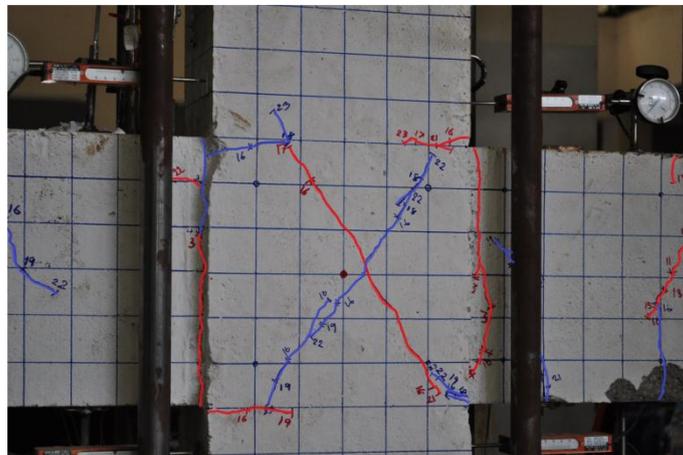
รูปที่ 4.38 รอยร้าวของตัวอย่าง RC3 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่นี้เกิดรอยร้าวขึ้นไม่มากโดยทั้งหมดเกิดต่อจากรอยร้าวเดิมโดยกระจายตัวไปยังส่วนต่างๆ ประกอบด้วย บริเวณจุดต่อคาน-เสา และ บริเวณคาน โดยสิ่งที่สังเกตได้จากการเคลื่อนที่ตัวในระยะนี้คือรอยร้าวบริเวณหน้าเสาเกิดการอ้าออกและปิดกลับเมื่อให้แรงกระทำแบบสลับทิศแก่ตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.39



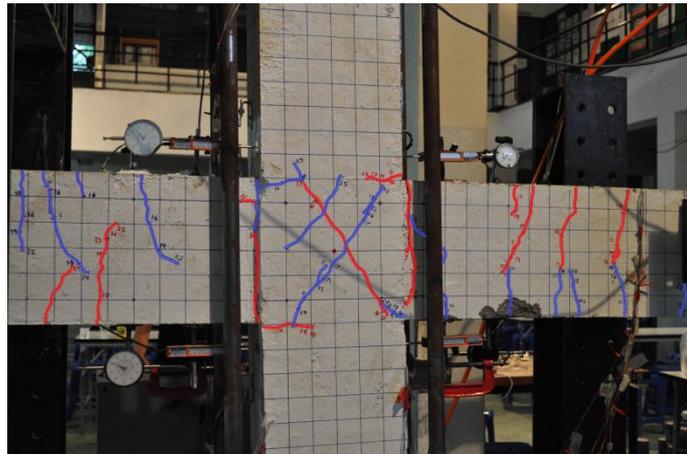
รูปที่ 4.39 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยเป็นรอยร้าวในแนวทแยงเกิดจากรอยร้าวเดิมซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เป็นรอยร้าวขนาดเล็ก ในส่วนของความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างที่ระยะการเคลื่อนที่นี้พบว่าพฤติกรรมของรอยร้าวที่เดิมเกิดขึ้นกับรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับระยะเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้ตามรูปที่ 4.40 โดยการ้าออกของรอยร้าวบริเวณหน้าเสานั้นเปิดออกกว้างกว่าระยะเคลื่อนที่ตัวก่อนหน้านี้

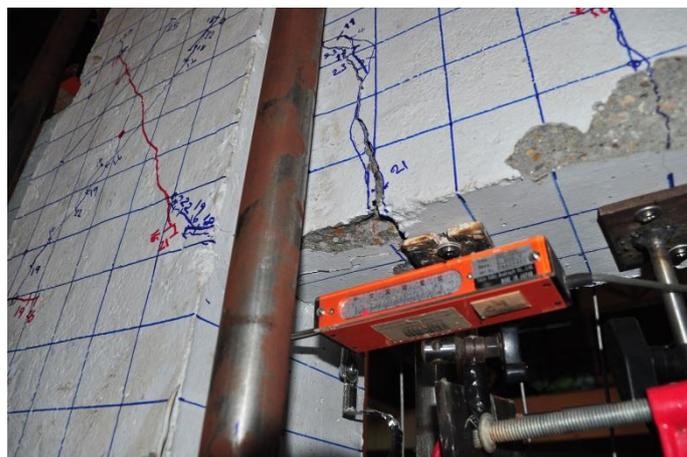


รูปที่ 4.40 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ เกิดรอยร้าวในแนวทแยงเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยเป็นรอยร้าวใหม่ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ให้แรงดิ่งแก่ตัวอย่างในรอบแรก อีกทั้งยังเกิดรอยร้าวที่ปลายคานด้านขวาบริเวณที่ติดกับหน้าเสาดังรูปที่ 4.41 โดยเป็นรอยร้าวที่เกิดต่อจากรอยร้าวเดิมซึ่งจุดนี้เองเป็นจุดที่เกิดความเสียหายมากที่สุดในตัวอย่าง ความเสียหายที่เกิดขึ้นคือการเปิดอ้าออกของรอยร้าวบริเวณหน้าเสาและปิดกลับสลับกันตามแรงที่กระทำแบบสลับทิศ ซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายแบบอัดแตกและหลุดออกจนเห็นความเสียหายได้ชัดเจนในรูปที่ 4.42 จากรูปแสดงการเปิดอ้าออกของรอยร้าวและการหลุดร่อนออกของคอนกรีตเนื่องจากการบดอัดกันของคอนกรีต

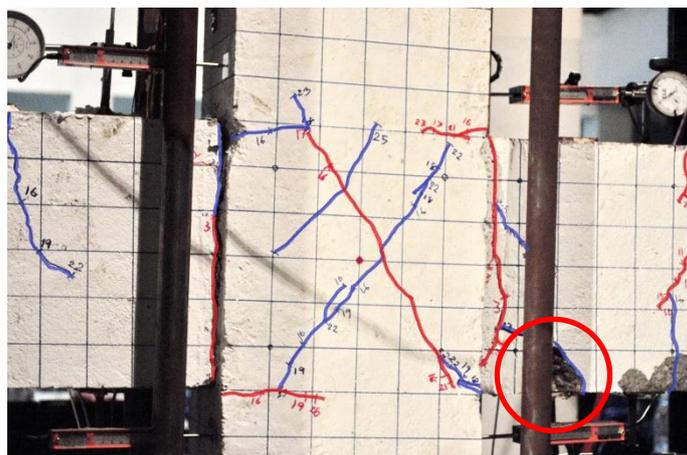


รูปที่ 4.41 รอยร้าวของตัวอย่าง RC3 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$



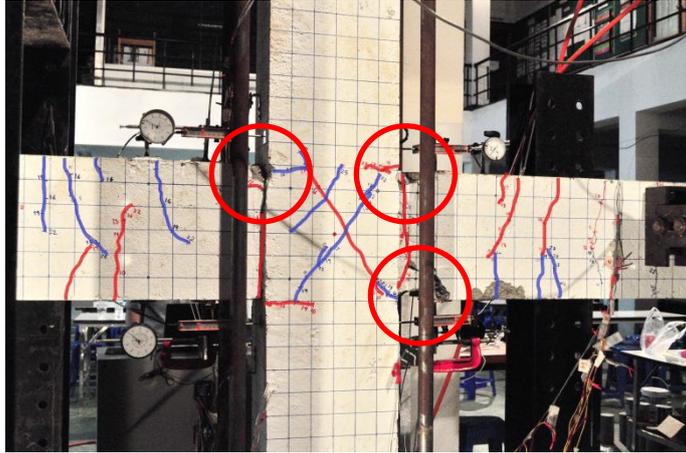
รูปที่ 4.42 ความเสียหายที่เกิดกับตัวอย่าง RC3 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่นั้นไม่เกิดรอยร้าวใหม่ขึ้นแต่เกิดความเสียหายที่บริเวณปลายคานด้านขวา โดยคอนกรีตบริเวณปลายคานนั้นหลุดออกเนื่องจากการอัดแตกของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 4.43 จากรูปนี้แสดงให้เห็นว่าความเสียหายที่เกิดกับตัวอย่างนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคานเป็นหลักทั้งในส่วนของการเปิดอัดออกของรอยร้าว การแตกออกและหลุดร่อนของคอนกรีตจะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้



รูปที่ 4.43 รอยร้าวของตัวอย่าง RC3 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.20\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่ตัวนี้จะเห็นว่ารอยร้าวใหม่ไม่ได้เกิดขึ้น แต่จะเกิดในส่วนของความเสียหายที่เกิดจากการอัดแตกของคอนกรีตที่บริเวณปลายคาน โดยจากรูปที่ 4.44 จะเห็นว่าเกิดการแตกออกของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัดบริเวณปลายคานที่ติดกับหน้าเสาทั้งสองด้านและคอนกรีตที่บริเวณรอยร้าวเกิดการบดอัดและแตกออกเป็นผงละเอียด ในส่วนของบริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นเกิดความเสียหายน้อยมากโดยเกิดเพียงรอยร้าวในแนวทแยงขึ้นแต่ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการอัดแตกของคอนกรีต



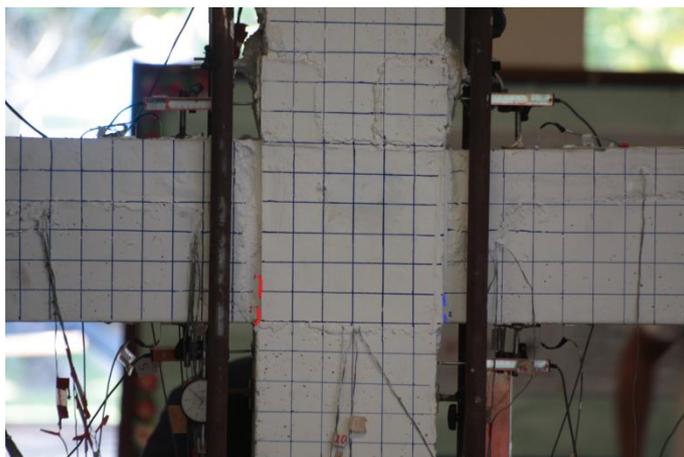
รูปที่ 4.44 รอยร้าวของตัวอย่างRC3ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.20\%$

4) ตัวอย่างทดสอบ PC 1

ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เป็นการประกอบกันของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปจากการทดสอบพบว่า ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ปรากฏว่าตัวอย่างนี้เกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณหน้าเสาตั้งแต่รอบแรกของการเคลื่อนที่ โดยรอยร้าวเกิดขึ้นที่ปลายคานส่วนล่างที่ติดกับหน้าเสาตามรูปที่ 4.45 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากแรงคัตที่เกิดขึ้นในคานโดยรอยร้าวสีแดงนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงผลัก (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางซ้าย) แก่ตัวอย่าง ในส่วนของรอยร้าวสีน้ำเงินนั้นเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดึง (ปลายเสาด้านบนเคลื่อนที่ไปทางขวา) แก่ตัวอย่าง จากนั้นเมื่อให้ระยะการเคลื่อนที่ตัวเท่าเดิมในรอบที่ 2 ปรากฏรอยร้าวเพิ่มเติมเมื่อให้แรงผลักแก่ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.46 โดยรอยร้าวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ได้คานบริเวณหน้าเสา และ เมื่อให้การเคลื่อนที่ในรอบที่ 3 ไม่พบรอยร้าวเพิ่มเติม



รูปที่ 4.45 รอยร้าวแรกของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ รอบแรก



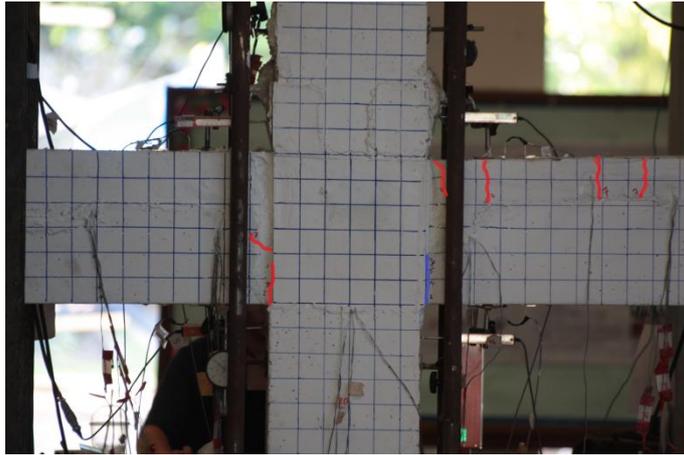
รูปที่ 4.46 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์นี้เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย โดยรอยร้าวที่เกิดเพิ่มเติมนี้เกิดต่อจากรอยร้าวเดิมที่บริเวณหน้าเสาเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.47 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์นี้นั้นเกิดขึ้นเมื่อให้การเคลื่อนที่ในรอบที่ 1 และ 2 เท่านั้นในรอบที่ 3 นั้นไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มเติม



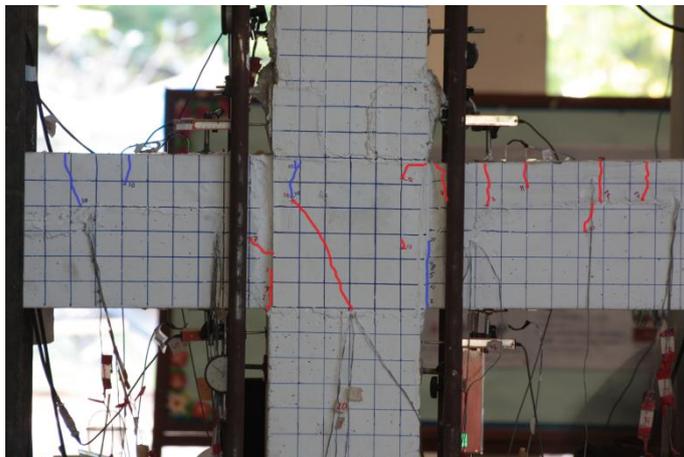
รูปที่ 4.47 รอยร้าวของตัวอย่าง PC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ ที่ระยะนี้ปรากฏรอยร้าวเกิดขึ้นที่คานด้านบนซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ non shrink grout . ในการเทปิดรอยเชื่อมต่อการประกอบชิ้นส่วนสำเร็จนี้ โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เกิดขณะที่ให้ระยะการเคลื่อนที่แก่ตัวอย่างในรอบแรกซึ่งรอยร้าวที่ส่วนบนของคานที่เกิดขึ้นนี้เกิดเฉพาะกรณีที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างเท่านั้นในส่วนกรณีที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่างนั้นไม่ส่งผลให้เกิดรอยร้าวขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ยังเกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณหน้าเสาเช่นเดียวระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ก่อนหน้านั้นแต่เกิดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอีกทั้งยังเกิดรอยร้าวที่บริเวณหน้าเสาที่เป็นรอยร้าวเอียงประมาณ 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ จะพบว่าสิ่งที่เกิดขึ้นใหม่ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ในรอบแรกของการเคลื่อนที่ที่ระยะนี้กรณีนี้ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างคือรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาดังรูปที่ 4.49 โดยรอยร้าวดังกล่าวนี้มีจุดเริ่มต้นที่บริเวณกึ่งกลางของด้านยาวของเสาที่เชื่อมต่อบริเวณจุดต่อคาน-เสานี้ซึ่งรอยร้าวดังกล่าวมีลักษณะเอียงทำมุมประมาณ 60 องศาเข้าหาจุดที่เป็นตำแหน่งเหล็กเสริมด้านบนของคานที่เชื่อมเข้าสู่คานและยังเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมที่คานด้านขวาโดยรอยร้าวดังกล่าวนี้เกิดอยู่ในช่วงที่เป็นคอนกรีตที่หล่อเป็นชิ้นส่วนสำเร็จ และในส่วนของกรณีนี้ให้แรงดึงแก่ตัวอย่างในการเคลื่อนที่ในรอบแรกนี้พบว่าเกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณคานเช่นกันโดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เข้ามาเชื่อมกับรอยร้าวที่เกิดก่อนหน้านี้ และ ยังเกิดรอยร้าวขึ้นที่ช่วงบนของคานด้านซ้ายที่เป็น non shrink grout และที่การเคลื่อนที่นี้ยังเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมที่บริเวณหน้าเสาอีกด้วย ในส่วนของการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่ 2 และ 3 นั้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาและคาน



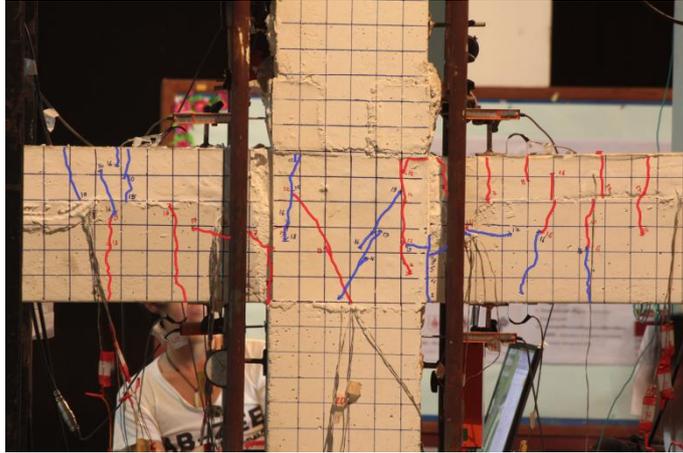
รูปที่ 4.49 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ การเคลื่อนที่ในรอบแรกของการเคลื่อนที่แบบวนซ้ำที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณจุดต่อโดยเกิดขึ้นในขณะที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่าง ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเหมือนกันรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ก่อนหน้านี้ คือเป็นรอยร้าวที่เริ่มที่ตรงกึ่งกลางของด้านยาวของเสาที่เชื่อมเข้ากับจุดต่อ และในส่วนของกรณีตัวอย่างรับแรงผลึกในรอบแรกของการเคลื่อนที่นี้พบว่าเกิดรอยร้าวในแนวตั้งเกิดขึ้น และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ยังส่งผลให้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นที่คานโดยเป็นลักษณะของรอยร้าวในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ พบว่าที่ระยะการเคลื่อนที่นี้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นในบริเวณจุดต่อคาน-เสาซึ่งรอยร้าวที่เกิดเพิ่มนี้มีทั้งรอยร้าวในแนวตั้งและรอยร้าวแบบเอียง และยังพบว่าที่บริเวณหน้าเสาเกิดรอยร้าวในแนวราบซึ่งเกิดขึ้นทั้งสองข้างของหน้าเสาที่เชื่อมต่อกับคานโดยตำแหน่งของรอยร้าวในแนวราบที่เกิดขึ้นนี้อยู่ในตำแหน่งช่วงกึ่งกลางคาน และยังพบว่าที่ระยะการเคลื่อนที่นี้เกิดรอยร้าวในแนวตั้งที่บริเวณส่วนล่างของคานขึ้นทั้งสองฝั่งซึ่งรอยร้าวบางรอยร้าวเกิดต่อกันจนเชื่อมขึ้นไปจนถึงคานช่วงบนดังแสดงในรูปที่ 4.51



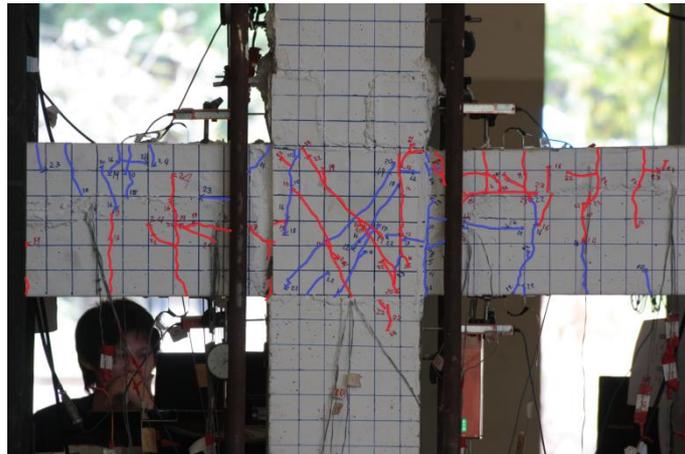
รูปที่ 4.51 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$ ที่ระยะการเคลื่อนที่นี้นั้นพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสา โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นคือเกิดรอยร้าวในแนวทแยงทั้งในกรณีที่ให้แรงผลักและกรณีที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่าง ซึ่งความยาวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เป็นแนวทแยงจากมุมหนึ่งไปยังอีกมุมหนึ่งของบริเวณจุดต่อคาน-เสาดังแสดงในรูปที่ 4.52

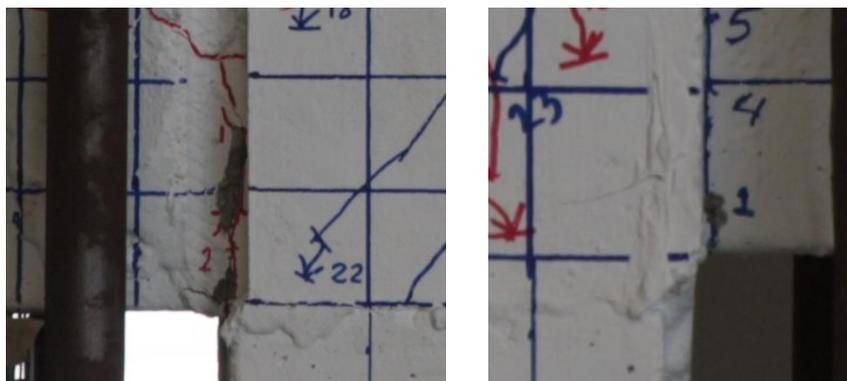


รูปที่ 4.52 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.00\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนที่นี้ จะเกิดขึ้นในบริเวณจุดต่อคาน-เสาและคานทั้งสองด้านที่ระยะห่างจากหน้าเสาไม่เกินระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน โดยจากรูปที่ 4.53 จะเห็นว่าบริเวณจุดต่อนั้นเกิดรอยร้าวในแนวทแยงเพิ่มเติมและยังเกิดรอยร้าวที่ขอบของบริเวณจุดต่อคาน-เสาเข้ามายังส่วนที่เป็นเสาซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นรอยร้าวในแนวตั้ง และในส่วนของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่คานนั้นจะเห็นว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นส่วนใหญ่จะเป็นรอยร้าวในแนวราบ และ ที่บริเวณมุมล่างของปลายคานที่บริเวณหน้าเสาเริ่มเกิดการ Spalling ของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4.54

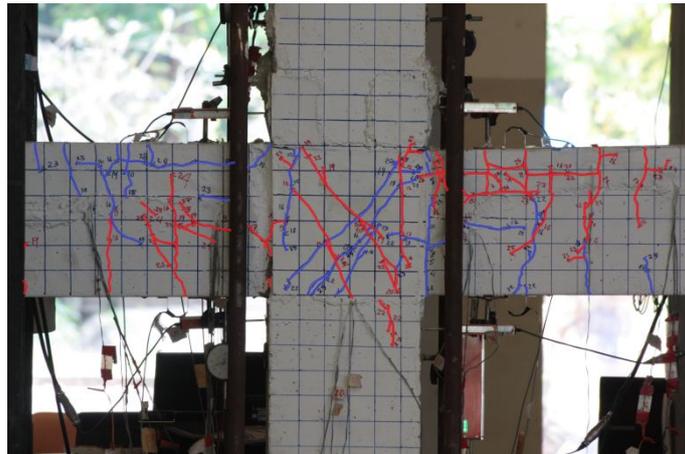


รูปที่ 4.53 รอยร้าวของตัวอย่าง PC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$

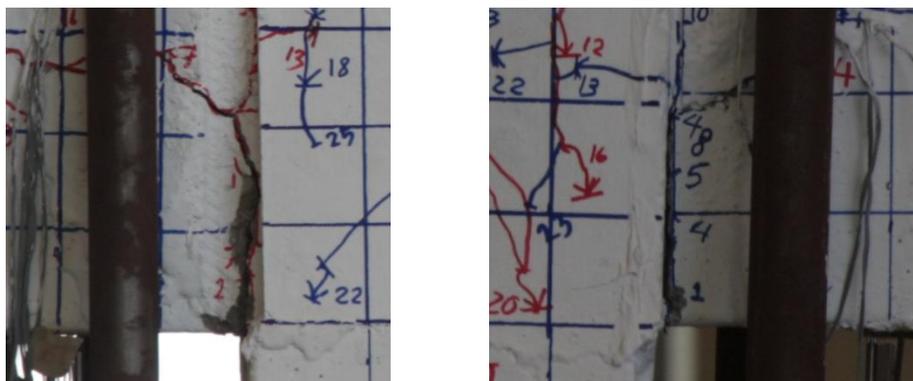


รูปที่ 4.54 การเกิด spalling กับคอนกรีตที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นลักษณะของความเสียหายนั้นต่อเนื่องมาจากระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ก่อนหน้านี้ โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นเกิดรอยร้าวในแนวทแยงเพิ่มเติมดังรูปที่ 4.55 แต่ความเสียหายหลักๆที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณคาน โดยเกิดรอยร้าวในแนวราบเพิ่มขึ้นที่ส่วนบนของคานและในส่วนของการเกิด Spalling ของคอนกรีตนั้นพบว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้นั้นเกิดเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งยังส่งผลให้รอยร้าวที่หน้าเสาบบริเวณส่วนล่างของคานทั้งสองด้านนั้นเปิด้าออกเมื่อรับแรงกระทำแบบสลับทิศดังแสดงในรูปที่ 4.56

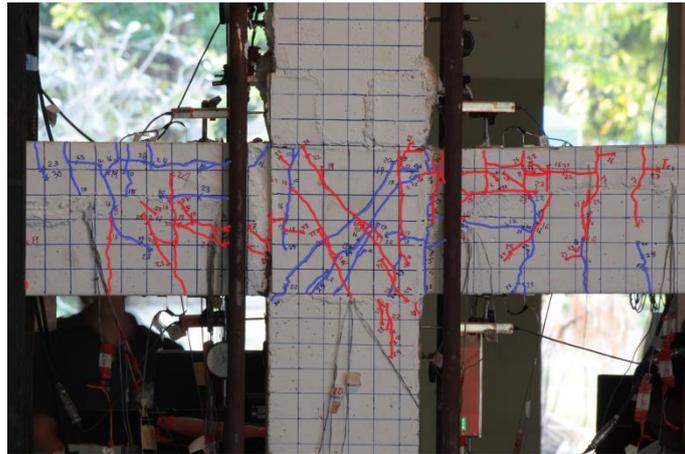


รูปที่ 4.55 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$

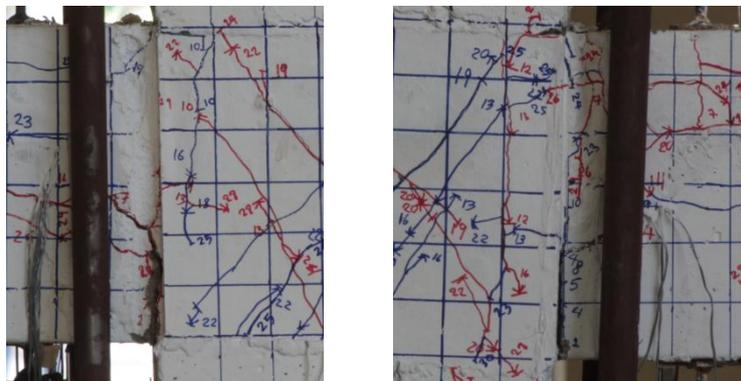


รูปที่ 4.56 การเปิด้าออกของรอยร้าวที่บริเวณหน้าเสาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย เกิดขึ้นกระจายทั้งในบริเวณของจุดต่อคาน-เสาและบริเวณคานตามรูปที่ 4.57 โดยสิ่งที่ทำให้เกิดรอยร้าวเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อยคือการเปิดอัดออกของรอยร้าวเมื่อมีแรงกระทำต่อโครงสร้างซึ่งจุดที่รอยร้าวเปิดอัดออกอย่างชัดเจนคือบริเวณหน้าเสาโดยการอัดออกของรอยร้าวที่คานส่วนล่างที่เชื่อมกับหน้าเสานั้นเป็นจุดที่อัดออกมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.58 เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่มีเหล็กเสริมเชื่อมต่อจากคานเข้าสู่บริเวณจุดต่อคาน-เสา

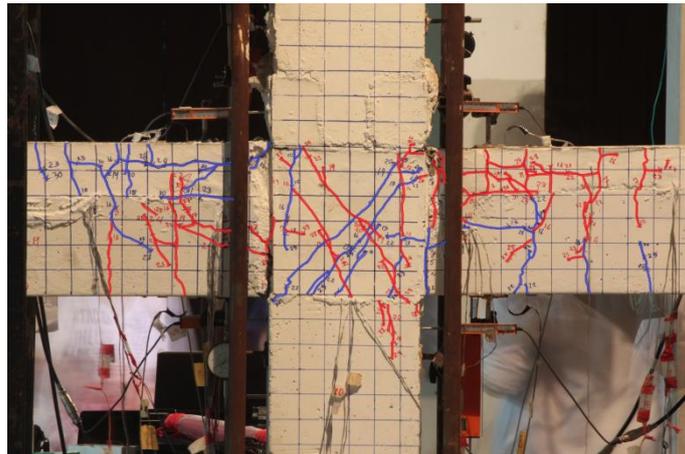


รูปที่ 4.57 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$

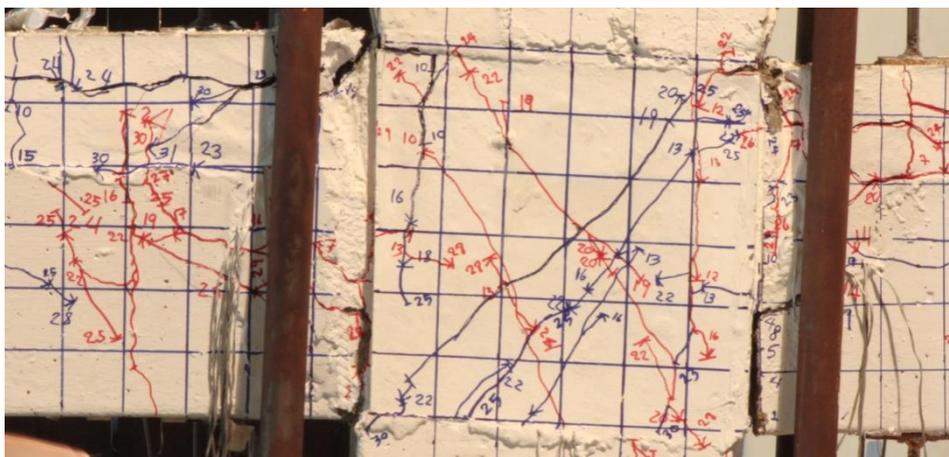


รูปที่ 4.58 การอัดออกของรอยร้าวที่บริเวณหน้าเสาเมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำแบบสลับทิศ

ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ เป็นระยะที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติอย่างชัดเจนเนื่องจากกำลังของโครงสร้างที่ต้านทานการเคลื่อนที่ลดลงอย่างมาก โดยในส่วนของกำลังของตัวอย่างนี้นั้นจะได้ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป ในส่วนของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้น จะเห็นว่าเกิดรอยร้าวเพิ่มเติมน้อยมากตามรูปที่ 4.59 แต่สิ่งที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนคือการ้าออกของรอยร้าวต่างๆตามรูปที่ 4.60 โดยจะเห็นว่ารอยร้าวในแนวราบที่บริเวณส่วนบนของคานด้านขวานั้นเปิด้าออกเป็นแนวยาว และบริเวณคานส่วนล่างที่ติดกับหน้าเสานั้นก็พบการ้าออกอย่างชัดเจนเช่นกัน ซึ่งการ้าออกนี้ส่งผลให้คอนกรีตบางส่วนที่บริเวณขอบของรอยร้าวเกิดการ Spalling



รูปที่ 4.59 รอยร้าวของตัวอย่างPC1ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$



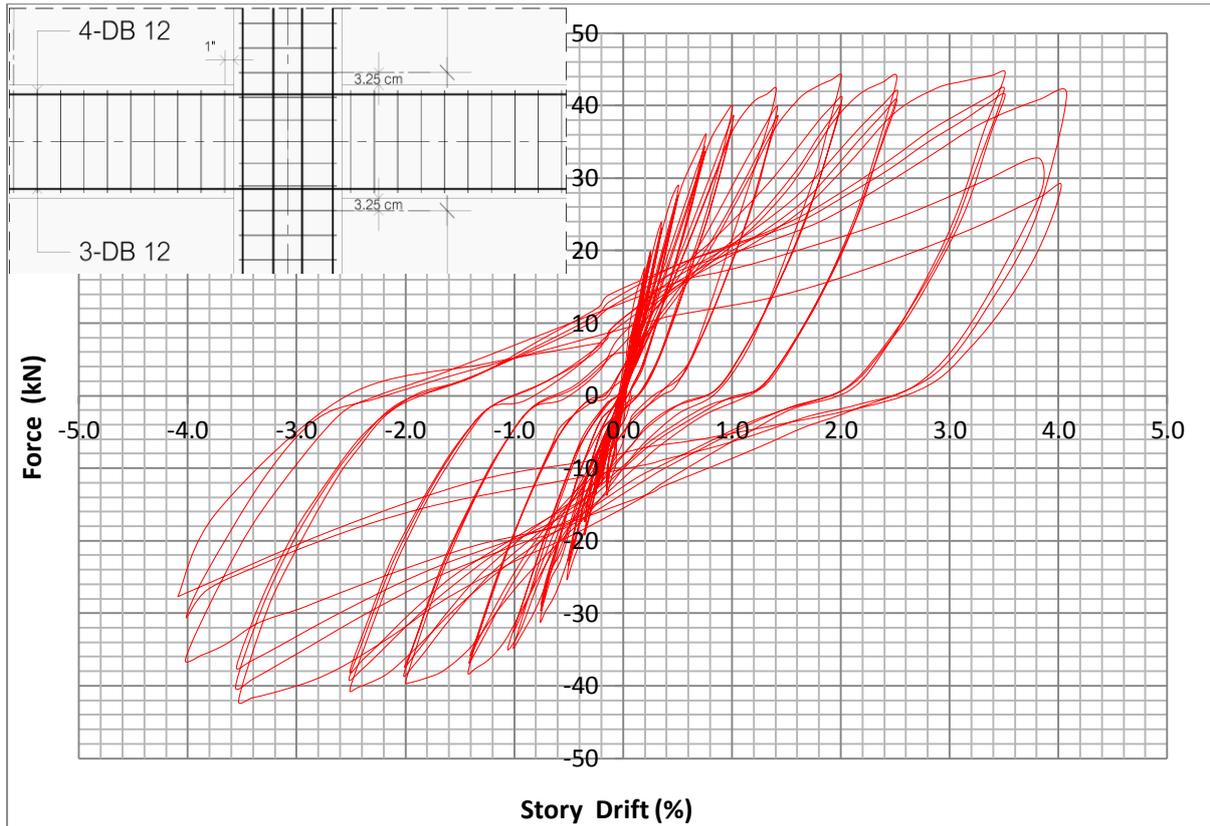
รูปที่ 4.60 การเปิด้าออกของรอยร้าวที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

1) ตัวอย่างทดสอบควบคุม RC 1

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่าง RC1 ที่แสดงในรูปที่ 4.61 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง RC1 นี้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) ในช่วงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 0.20\%$ โดยหลังจากที่ตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 0.20\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างค่อยๆ ลดลงจนตัวอย่างเข้าสู่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.00\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างนี้เหลืออยู่น้อยมาก แต่กำลังรับแรงของตัวอย่างยังไม่ลดลงโดยในช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ จนถึงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ กำลังรับแรงของตัวอย่างอยู่ในช่วงที่คงที่ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง RC1 ที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-02 นั้นมีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้พอสมควรเนื่องจากเมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายแล้วกำลังของโครงสร้างไม่ได้ตกลงอย่างทันทีทันใดโดยโครงสร้างยังคงมีกำลังคงเหลือเพื่อให้ผู้ที่อาศัยอยู่ภายในอาคารสามารถที่จะหลบหนีออกมาจากอาคารได้ อีกทั้งในตัวอย่างนี้มีกำลังสูงสุดเท่ากับ 44.4 kN ที่ระยะการเคลื่อนที่ $\pm 3.50\%$ ซึ่งเป็นระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์สุดท้ายก่อนที่กำลังต้านทานของตัวอย่างนี้จะลดลงที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$

สำหรับการวนซ้ำในรอบที่สองและสามในแต่ละระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นั้นจากกราฟในรูปที่ 4.61 แสดงให้เห็นว่าการวนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นส่งผลทำให้กำลังต้านทานแรงของตัวอย่างลดลงแต่จะลดลงไม่มาก แต่สิ่งที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือค่าความแข็งแรงของโครงสร้างโดยเฉพาะเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จะมองเห็นการลดลงของกำลังต้านทานและค่าความแข็งแรงได้อย่างชัดเจน และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ การวนซ้ำในรอบที่สองและรอบที่สามนั้นส่งผลให้กำลังต้านทานของตัวอย่างลดลงอย่างมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างนี้ได้วิบัติแล้ว ในส่วนของเส้นโค้ง hysteretic นั้นจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกทีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 1.00\%$ นั้นเส้นโค้งวนรอบ hysteretic นั้น มีลักษณะแคบ และโค้งเข้าหาจุดศูนย์กลาง (pinched) แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะการเคลื่อนตัวนี้มี การสลายพลังงานน้อย แต่หลังจากทีระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.00\%$ นั้นจะเห็นว่าเส้นโค้งวนรอบ hysteretic มีลักษณะกว้างขึ้นอีกทั้งพื้นที่ภายในลูบก็มีความกว้างขึ้นรวมไปถึงเส้นโค้งวนรอบ hysteretic ไม่ได้โค้งเข้าหาจุดศูนย์กลาง โดยยิ่งระยะการเคลื่อนตัวมากขึ้นส่งผลให้เส้นโค้ง hysteretic วนรอบเบนกว้างออกจากจุดศูนย์กลาง ซึ่งลักษณะทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีการสลายพลังงานในรอบการเคลื่อนตัวเกิดขึ้น ส่งผลให้เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้นจุดต่อคาน-เสาที่ออกแบบโดยมาตรฐาน ACI 318-02 มีความสามารถในการดูดซับและสลายพลังงานได้



รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่าง RC1

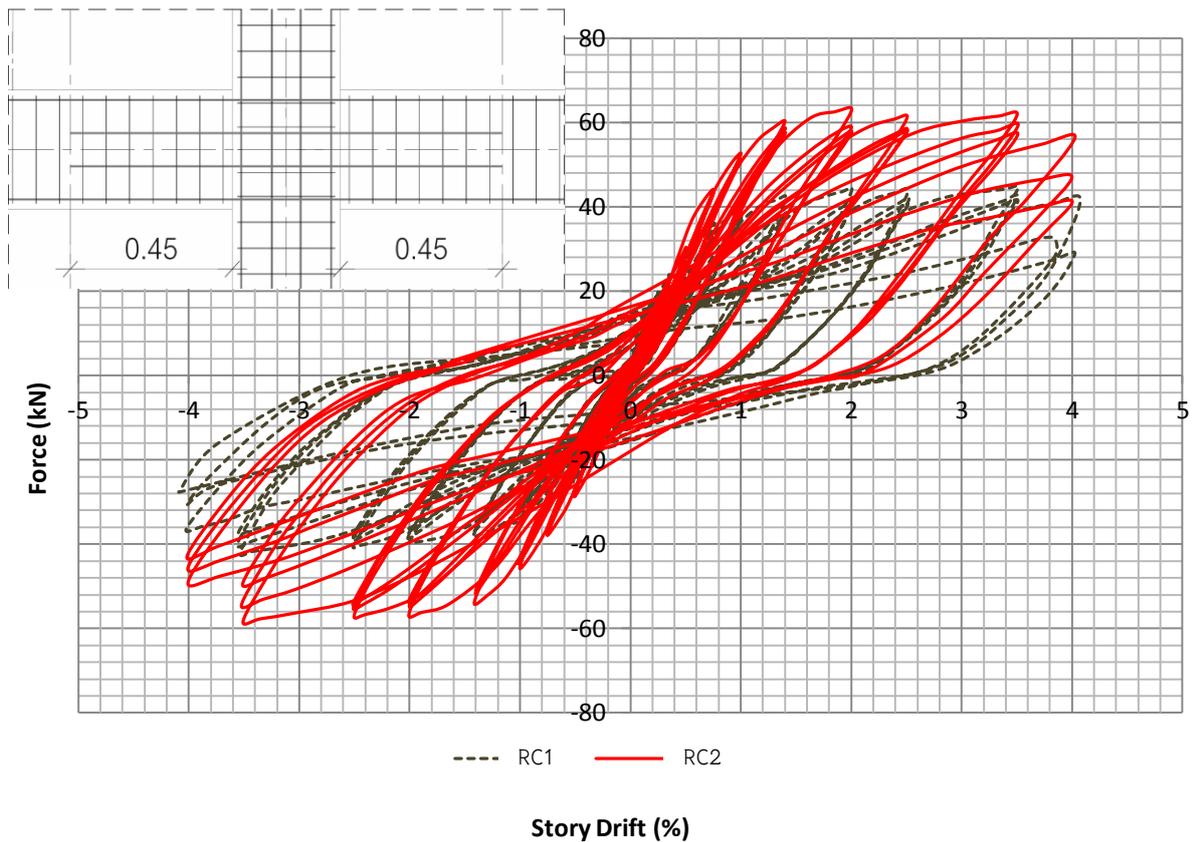
2) ตัวอย่างทดสอบ RC 2

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวอย่าง RC 2 ที่แสดงในรูปที่ 4.62 (เส้นสีแดง) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง RC 2 นี้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) ในช่วงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 0.35\%$ โดยหลังจากที่ตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 0.35\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างค่อยๆ ลดลงจนตัวอย่างเข้าสู่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.40\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างนี้เหลืออยู่น้อยมาก แต่กำลังรับแรงของตัวอย่างยังไม่ลดลงโดยในช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ จนถึงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ ในกรณีที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างกำลังรับแรงของตัวอย่างอยู่ในช่วงที่คงที่ แต่กรณีที่ให้แรงดึงแก่ตัวอย่างตั้งแต่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ จนถึงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ นั้นพบว่ากำลังต้านทานของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในแต่ละระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ นั้นกำลังต้านทานของตัวอย่างก็ตกลงและเป็นระยะที่เครื่องมือสามารถทดสอบได้โดยกำลังต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุดของตัวอย่างนี้อยู่ที่ 63.2kN ที่ระยะการเคลื่อนที่ $+2.00\%$

สำหรับการวนซ้ำในรอบที่สองและสามในแต่ละระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นั้นจากกราฟในรูปที่ 4.62 แสดงให้เห็นว่าการวนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นส่งผลทำให้กำลังต้านทานแรงของตัวอย่างลดลง

โดยที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ จนถึง $\pm 1.40\%$ นั้นจะเห็นว่าการรวนซ้ำนั้นส่งผลให้กำลังต้านทานของตัวอย่างลดลงไม่มากและค่าความแข็งแรงยังมีค่าคงที่ อีกทั้งในการรวนซ้ำในรอบที่สองและรอบที่สามนั้นพบว่ากำลังไม่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของตัวอย่างที่ยังคงมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ได้อยู่ และในส่วนของที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ และ $\pm 2.50\%$ นั้นพบว่าการรวนเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองส่งผลให้กำลังลดลงแต่เมื่อถึงการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สามแล้วกลับพบว่ากำลังต้านทานของตัวอย่างยังคงที่อยู่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีเสถียรภาพในการต้านทานการเคลื่อนที่ลดลงแต่ลดลงเล็กน้อยซึ่งยังถือว่าตัวอย่างนั้นยังคงมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่มีเสถียรภาพอยู่เนื่องจากค่าความแข็งแรงในการรวนซ้ำรอบที่สองและสามยังคงที่ แต่เมื่อมาถึงการเคลื่อนที่ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ พบว่าการเคลื่อนที่วนซ้ำทั้งในรอบที่สองและรอบที่สามนั้นส่งผลให้กำลังต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเสถียรภาพของตัวอย่างลดลงเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่ตัวอย่าง และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ ซึ่งเป็นระยะที่ตัวอย่างเสียหายจนขาดเสถียรภาพในการต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากกำลังในการต้านทานตกลงและการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นแสดงให้เห็นถึงกำลังต้านทานการเคลื่อนที่ที่ตกลงอย่างเห็นได้ชัดอีกทั้งค่าความแข็งแรงของตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนที่นั้นลดลงอย่างมากจุดนี้แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของตัวอย่างที่สูญเสียไปที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ในส่วนของเส้นโค้ง hysteretic นั้นพบว่าในช่วงของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 1.40\%$ นั้นกราฟมีลักษณะแคบและเกิดการโค้งเข้าหาจุดศูนย์กลาง (pinched) แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะการเคลื่อนที่ตัวนี้มีกำลังงานน้อย แต่เมื่อระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นกว่า $\pm 1.40\%$ พบว่าเส้นโค้ง hysteretic มีพื้นที่ภายในรูปเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งการรวนกลับของเส้นโค้งเบนออกจากจุดศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อเพิ่มระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นสิ่งที่เกิดขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีการสลายพลังงานในรอบการเคลื่อนที่ตัวเกิดขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.62 ระหว่างตัวอย่าง RC 2 (เส้นสีแดงเข้ม) และ ตัวอย่างควบคุม RC 1 (เส้นประสีดำ) จะเห็นว่ากำลังในการต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง RC 2 มีมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.62 แสดงให้เห็นว่าในช่วงของระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 0.75\%$ นั้นพบว่ากำลังที่ต้านทานการเคลื่อนที่นั้นยังคงใกล้เคียงกันแต่เมื่อระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่าจุดนี้แล้วกำลังของตัวอย่าง RC 2 มากกว่าอย่างชัดเจนอีกทั้งที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 0.75\%$ แต่ไม่เกิน $\pm 1.40\%$ นั้นค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง RC 2 มีค่ามากกว่าตัวอย่าง RC 1 และกำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่าง RC 2 นี้ยังมากกว่าตัวอย่าง RC 1 ถึง 42 % แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง RC 2 นั้นดีกว่าตัวอย่าง RC 1 อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่าง RC2

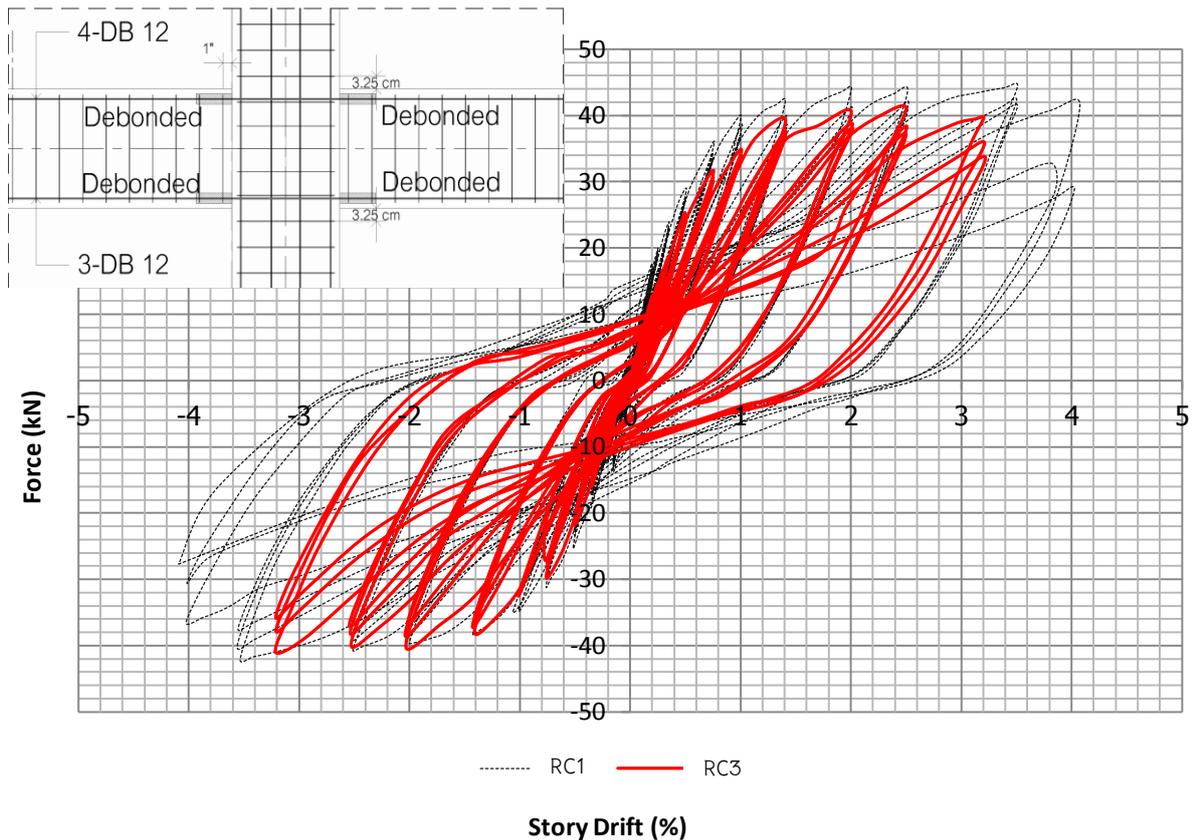
3) ตัวอย่างทดสอบ RC 3

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่าง RC 3 ที่แสดงในรูปที่ 4.63 (เส้นสีแดง) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง RC 3 นี้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) ในช่วงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 0.35\%$ โดยหลังจากที่ตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 0.35\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างค่อยๆ ลดลงจนตัวอย่างเข้าสู่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.40\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างนี้เหลืออยู่น้อยมาก แต่กำลังรับแรงของตัวอย่างยังไม่ลดลงโดยในช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ จนถึงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.20\%$ กำลังรับแรงของตัวอย่างอยู่ในช่วงที่คงที่ เนื่องจากเครื่องมือในการทดสอบสามารถให้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แก่ตัวอย่างนี้เพียง $\pm 3.20\%$ ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบนี้ยังเคลื่อนตัวไปไม่ถึงระยะสัมพัทธ์ที่เกิดความเสียหาย โดยกำลังต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุดของตัวอย่างนี้อยู่ที่ 41.1 kN ที่ระยะการเคลื่อนที่ $+2.50\%$

สำหรับการวนซ้ำในรอบที่สองและสามในแต่ละระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นั้นจากกราฟในรูปที่ 4.63 แสดงให้เห็นว่าการวนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นส่งผลทำให้กำลังต้านทานแรงของตัวอย่างลดลงแต่จะลดลงไม่มากดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 1.00\%$ นั้นการวนซ้ำในรอบที่สองและรอบที่สาม

นั่นทำให้กำลังลดลงน้อยมากแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของตัวอย่างเมื่อรับแรงกระแบบวนซ้ำในช่วงระยะการเคลื่อนที่นี้และเมื่อระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.00\%$ แล้วจะเห็นว่ากำลังลดลงของแรงต้านทานในการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองและสามเกิดเพิ่มมากขึ้นตามระยะเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.00\%$ นี้สิ่งที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือค่าความแข็งแรงของโครงสร้างโดยเฉพาะเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จะมองเห็นการลดลงของกำลังต้านทานและค่าความแข็งแรงได้อย่างชัดเจน ในส่วนของเส้นโค้ง hysteretic นั้นจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 1.00\%$ นั้นเส้นโค้งวนรอบ hysteretic นั้น มีลักษณะแคบและโค้งเข้าหาจุดศูนย์กลาง (pinched) แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะการเคลื่อนที่นี้มีการสลายพลังงานน้อย แต่หลังจากที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 1.00\%$ นั้นจะเห็นว่าเส้นโค้งวนรอบ hysteretic มีลักษณะกว้างขึ้นอีกทั้งพื้นที่ภายในลูปก็มีมากขึ้นรวมถึงเส้นโค้งวนรอบ hysteretic ไม่ได้โค้งเข้าหาจุดศูนย์กลาง โดยยิ่งระยะการเคลื่อนที่มากขึ้นส่งผลให้เส้นโค้ง hysteretic วนรอบเบนกว้างออกจากจุดศูนย์กลาง ซึ่งลักษณะทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีการสลายพลังงานในรอบการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.63 ระหว่างตัวอย่าง RC3 (เส้นสีแดงเข้ม) และ ตัวอย่างควบคุม RC1 (เส้นประสีดำ) จะเห็นว่ากำลังในการต้านทานการเคลื่อนที่นั้นตัวอย่าง RC3 น้อยกว่าตัวอย่างควบคุม RC1 โดยในระยะแรกๆของการเคลื่อนที่นั้นกำลังของทั้งสองตัวอย่างแทบจะไม่แตกต่างกัน ซึ่งจุดที่กำลังของทั้งสองตัวอย่างเริ่มเห็นความแตกต่างนั้นเกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตั้งแต่ $\pm 2.00\%$ และมีค่าต่างกันมากขึ้นเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้น ในส่วนของตัวอย่าง RC3 ที่มีการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตนั้นจะเห็นว่าเมื่อถึงจุดที่โครงสร้างมีกำลังต้านทานสูงสุดแล้วกำลังจะค่อยๆลดลงซึ่งต่างกับตัวอย่าง RC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุมที่ใช้เปรียบเทียบนั้นจะเห็นว่าเมื่อถึงจุดที่โครงสร้างมีกำลังต้านทานสูงสุดแล้วโครงสร้างยังคงมีกำลังคงที่ช่วงหนึ่งก่อนที่จะเกิดความเสียหายจนใช้งานไม่ได้ แต่เมื่อดูในส่วนของการลดลงของกำลังเมื่อให้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แก่ตัวอย่างจะเห็นว่าทั้งสองตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญมีเพียงกำลังของตัวอย่าง RC1 ที่มีกำลังมากกว่า สำหรับพฤติกรรมการสลายพลังงานนั้นทั้งสองตัวอย่างไม่แตกต่างกัน แต่จะแตกต่างกันในส่วนจากรูปแบบความเสียหายที่เกิดแก่ตัวอย่างซึ่งได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้ว



รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่าง RC3

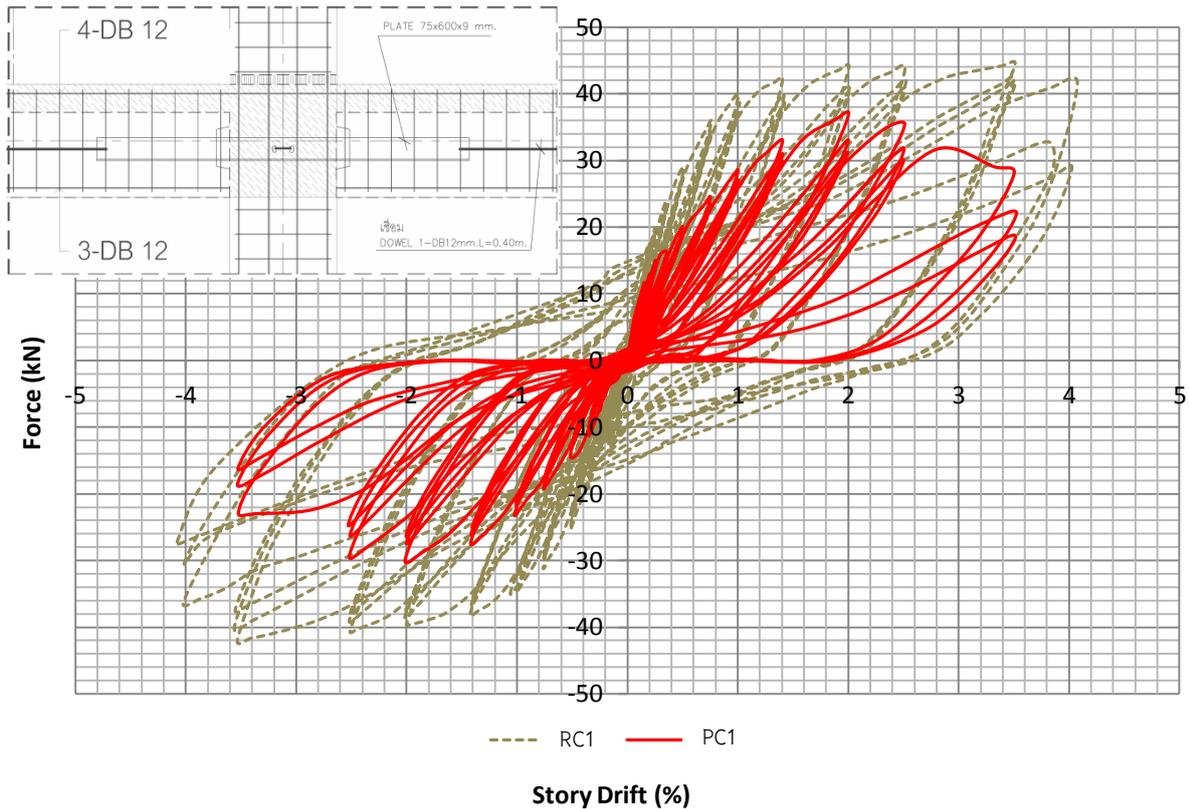
4) ตัวอย่างทดสอบ PC 1

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวอย่าง PC 1 ที่แสดงในรูปที่ 4.64 (เส้นสีแดง) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง PC 1 นี้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) ในช่วงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 0.25\%$ โดยหลังจากที่ตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า $\pm 0.25\%$ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของตัวอย่างค่อยๆ ลดลงจนตัวอย่างเข้าสู่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ จะเห็นว่าที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นเป็นจุดที่ตัวอย่างมีกำลังต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุด โดยในตัวอย่างนี้พบว่าค่ากำลังในการต้านทานการเคลื่อนที่ในกรณีของการให้แรงผลักกับการให้แรงดึงแก่ตัวอย่างนั้นมีค่าไม่เท่ากันโดยค่ากำลังสูงสุดในการต้านทานการเคลื่อนที่กรณีของการให้แรงผลักนั้นอยู่ที่ 37.0 kN และในกรณีของการให้แรงดึงแก่ตัวอย่างนั้นค่ากำลังต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุดนั้นอยู่ที่ 30.1 kN อีกทั้งค่าความแข็งแรงของตัวอย่างในกรณีของการให้แรงผลักจะแรงดึงนั้นก็มีความไม่เท่ากันโดยช่วงที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างนี้เป็นช่วงที่ตัวอย่างมีค่าความแข็งแรงมากกว่า

สำหรับการวนซ้ำในรอบที่สองและสามในแต่ละระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์โดยพบว่าในช่วงของการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 1.40\%$ นั้นในการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นส่งผลให้กำลังการต้านทานการเคลื่อนที่ของโครงสร้างลดลงไม่มาก แสดงให้เห็นว่า

โครงสร้างนี้ยังคงมีเสถียรภาพในการรับแรงอยู่ แต่ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ นั้นถึงแม้ว่ากำลังการต้านทานการเคลื่อนที่ของการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นจะลดลงไม่มากแต่สำหรับการเคลื่อนที่ในรอบที่สองนั้นพบว่ากำลังก็เริ่มลดลงอย่างชัดเจนและในส่วนของ การเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สามนั้นกำลังแทบจะไม่ลดลงซึ่งสามารถดูได้จากกราฟรูปที่ 4.64 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างนี้เริ่มสูญเสียเสถียรภาพในการต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น และเมื่อตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ และระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ นั้นพบว่าการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองนั้นกำลังต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างลดลงอย่างมากและเมื่อให้การเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สามนั้นกำลังการต้านทานการเคลื่อนที่ ยังคงลดลงแต่การลดลงของกำลังในรอบนี้นั้นน้อยกว่าการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สอง อีกทั้งที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.00\%$ เป็นระยะที่โครงสร้างมีกำลังต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุดแสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพในการต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างนี้นั้นเริ่มสูญเสียไปอย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับการเคลื่อนที่วนซ้ำที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ ซึ่งเป็นระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของตัวอย่างนี้นั้นพบว่าการเคลื่อนที่วนซ้ำในรอบที่สองและสามนั้นมีลักษณะเหมือนกันคือกำลังต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจนและยังส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างลดลงอีกด้วยแสดงให้เห็นว่าที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้นั้นตัวอย่างไม่มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะต้านทานการเคลื่อนที่

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.64 ระหว่างตัวอย่าง PC 1 (เส้นสีแดงเข้ม) และ ตัวอย่างควบคุม RC 1 (เส้นประสีดำ) จะเห็นว่ากำลังสูงสุดในการต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง PC 1 น้อยกว่าตัวอย่าง RC 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุมอย่างชัดเจน อีกทั้งค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง PC 1 นั้นยังน้อยกว่าซึ่งสอดคล้องกับกำลังของตัวอย่างที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ อีกทั้งเมื่อดูจากกราฟรูปที่ 6.64 นั้นจะเห็นว่ากำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่าง PC 1 นั้นเกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์น้อยกว่าตัวอย่างอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการต้านทานเคลื่อนที่ของตัวอย่างนี้นั้นด้อยกว่าตัวอย่างอ้างอิง และอีกจุดหนึ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือการตกลงของกำลังต้านทานการเคลื่อนที่ โดยจะเห็นว่าตัวอย่าง PC 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้วิธีการก่อสร้างแบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปคือเมื่อตัวอย่างเกิดกำลังต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุดแล้วกำลังจะลดลงอย่างทันทีทันใดต่างจากตัวอย่างที่เป็นแบบการเทในที่ (RC 1) ซึ่งกำลังจะคงที่อยู่ระยะหนึ่งก่อนที่จะเริ่มลดลงแต่ไม่เกิดการลดลงแบบทันทีทันใด



รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่าง PC 1

4.4 การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรง

การลดลงของค่าความแข็งแรง (Stiffness Degradation) ของตัวอย่างเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Drift Ratio) เพิ่มขึ้นจะบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น เนื่องจากหากค่าความแข็งแรงของตัวอย่างลดลงอย่างทันทีทันใดแล้ว อาจทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติอย่างเฉียบพลันส่งให้เกิดอันตรายต่อผู้อยู่อาศัยภายในอาคารได้ ดังนั้น หากการลดลงของค่าความแข็งแรงของตัวอย่างเป็นไปอย่างช้าๆ แล้วยอมแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างนั้นมีประสิทธิภาพในการต้านทานการเคลื่อนที่หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น

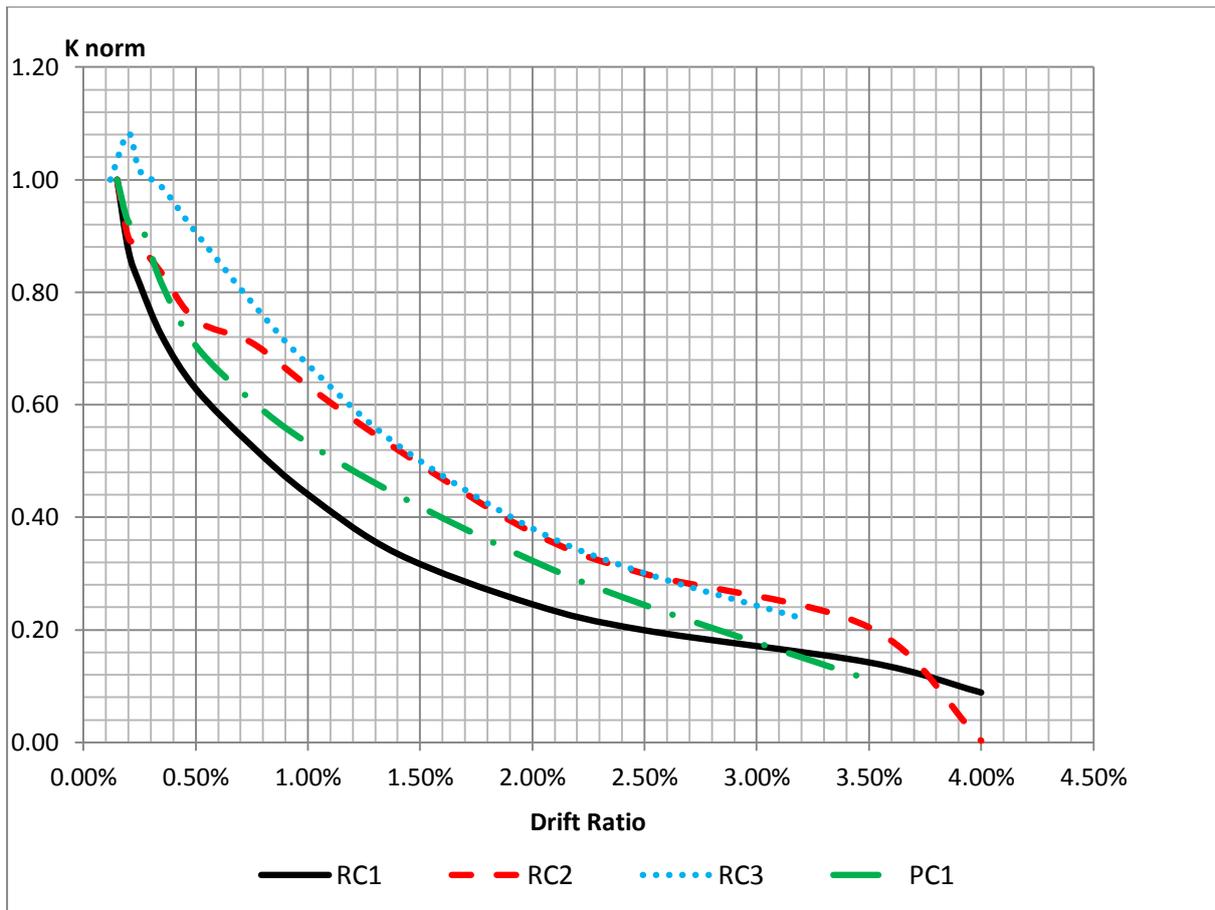
เมื่อเปรียบเทียบการลดลงของค่าความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบที่ 4 ตัวอย่างนั้นพบว่า ตัวอย่าง RC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้วิธีการหล่อในที่และยังเป็นตัวอย่างควบคุมที่ใช้อ้างอิงการลดลงของค่าความแข็งแรงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ เกิดขึ้นช้าลงเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้น

ในส่วน of ตัวอย่าง RC2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กระดับกลาง (Intermediate Steel) บริเวณจุดต่อคาน-เสาและปลายคานนั้นพบว่า การลดลงของค่าความแข็งแรงของตัวอย่างนี้เมื่อเทียบกับตัวอย่าง RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ไม่เกิน 1.50 % นั้นจะเห็นว่าตัวอย่าง RC2 เกิดการลดลงของ

ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าตัวอย่าง RC1 แต่เมื่อเข้าสู่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.50–3.50 % นั้นกลับพบว่าการลดลงของค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง RC2 นั้นเกิดขึ้นเร็วกว่าตัวอย่างควบคุม RC1 และเมื่อตัวอย่างมีระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 4.00 % จะเห็นว่าจากกราฟ RC2 ในรูปที่ 4.64 นั้นมีค่าความชันสูงมากแสดงให้เห็นถึงการวิบัติอย่างเฉียบพลันที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง RC2 นี้

ในส่วน of ตัวอย่าง RC3 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (Debonded) ที่บริเวณหน้าเสานั้นพบว่าในช่วงของการเกิดระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์แรกๆนั้น การลดลงของค่าความแข็งแรงเกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่าง RC1 เมื่อดูจากความชันของกราฟในรูปที่ 6.64 โดยจะเห็นว่าความชันของกราฟ RC3 มีน้อยกว่าอย่างชัดเจนแต่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า 2.00 % แล้วนั้นพบว่าค่าความชันของกราฟ RC3 และกราฟ RC1 นั้นมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก และในช่วงของระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า 3.00 % นั้นพบว่าการลดลงของค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง RC3 เกิดขึ้นมากกว่าตัวอย่างควบคุม RC1

และในส่วน of ตัวอย่าง PC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการรูปแบบก่อสร้างโดยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast) นั้นเมื่อดูจากกราฟรูปที่ 4.64 พบว่าพฤติกรรมการลดลงของค่าความแข็งแรงนั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอย่าง RC1 คือการลดลงของค่าความแข็งแรงจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์จากนั้นการลดลงก็จะค่อยๆเกิดช้าลงแต่จะมีส่วนที่แตกต่างคือที่ช่วงที่ตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากกว่า 2.00 % นั้นจะพบว่าการความชันของกราฟ PC1 มีค่ามากกว่ากราฟของ RC1 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง PC1 นั้นยังคงเกิดขึ้นมากกว่าตัวอย่างควบคุม RC1



รูปที่ 4.64 กราฟแสดงการเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรง (Stiffness Degradation)

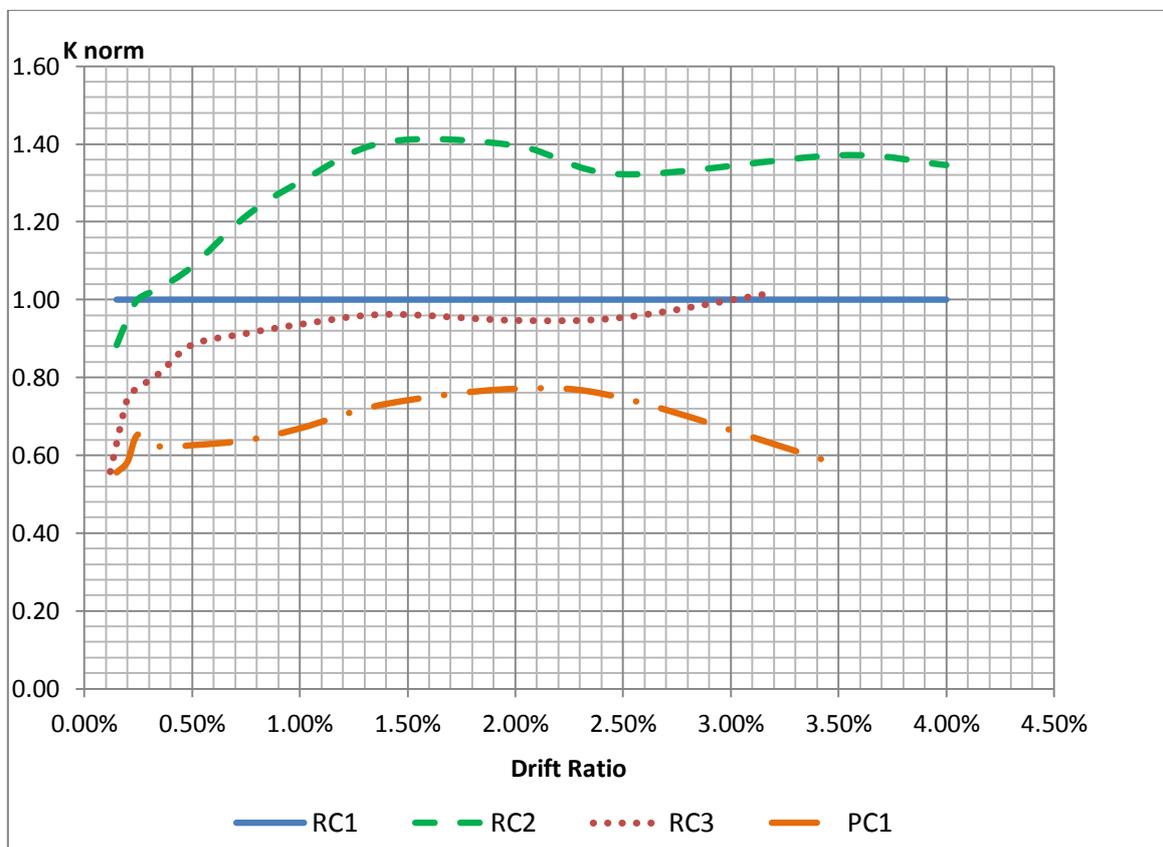
4.5 อัตราส่วนค่าความแข็งแรงเทียบกับตัวอย่างควบคุม

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบถึงค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของตัวอย่างทดสอบเทียบกับตัวอย่างควบคุม RC1 ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ (Story Drift) ต่างๆ โดยจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง RC2 ที่มีการเสริมเหล็กระดับกลาง (Intermediate Steel) บริเวณจุดต่อคาน-เสาและปลายคานมีค่า stiffness มากกว่าตัวอย่างควบคุมชัดเจนในทุกๆระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ ซึ่งกราฟรูปที่ 4.65 นั้นจะเห็นว่าในช่วงระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์แรกๆนั้นค่า stiffness ของตัวอย่าง RC2 มีค่ามากกว่าตัวอย่างควบคุม ตามระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นจนระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ตั้งแต่ 1.50 % พบว่าค่าอัตราส่วนของ stiffness ของตัวอย่าง RC2 มีค่ามากกว่าตัวอย่างควบคุมคงค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากตามค่าระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ที่เพิ่มมากขึ้นโดยค่า stiffness จุดที่มากที่สุดนั้นมากกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 40 %

ในส่วน of ตัวอย่าง RC3 ที่มีการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานกริดและเหล็กเสริมที่บริเวณปลายคานจากผลการทดสอบพบว่าในช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์แรกๆนั้นค่าอัตราส่วน Stiffness ของตัวอย่างนี้เทียบกับตัวอย่างควบคุมมีค่าต่างกันมาก โดยค่า stiffness ของตัวอย่าง RC3 มีค่าน้อย

กว่าแต่เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นกลับพบว่าค่า stiffness ของตัวอย่าง RC3 นี้มีค่าเข้าใกล้ ตัวอย่างควบคุมมากขึ้น และเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตั้งแต่ 1.50 % นั้นค่าอัตราส่วน stiffness เทียบกับตัวอย่างควบคุมมีค่าใกล้เคียงกันจนตัวอย่างทั้งสองตัวนี้มีค่า stiffness เท่ากับที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3.00 %

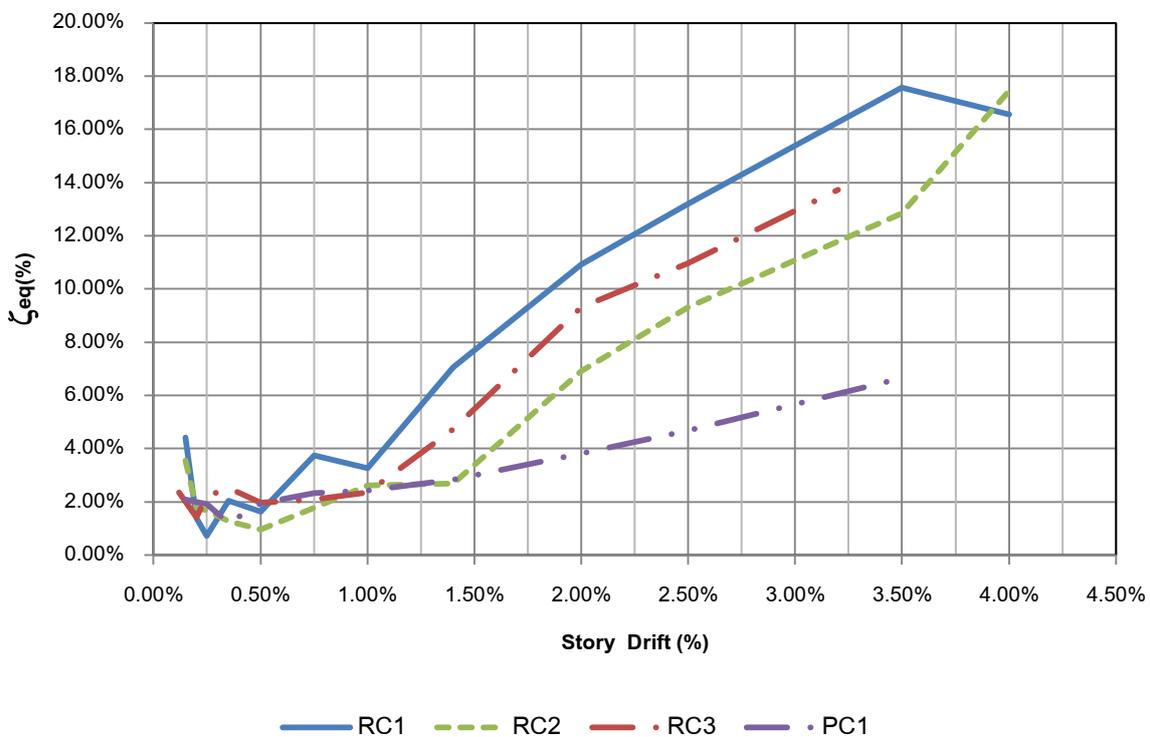
และตัวอย่าง PC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้วิธีการก่อสร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปพบว่าค่าอัตราส่วน stiffness เทียบกับตัวอย่างควบคุมมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมทุกระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ โดยจากกราฟในรูปที่ 4.65 นั้นช่วงที่ค่าอัตราส่วน stiffness เทียบกับตัวอย่างควบคุมมีค่าต่างกันมากที่สุดนั้นอยู่ในช่วงเริ่มต้นและช่วงปลายของระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และช่วงที่ตัวอย่าง PC1 นี้มีค่า stiffness ใกล้เคียงตัวอย่างควบคุมมากที่สุดที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 2.00 % โดยตัวอย่าง PC1 มีค่า stiffness น้อยกว่าตัวอย่างควบคุม 22 % ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้



รูปที่ 4.65 กราฟแสดงอัตราส่วนของค่าความแข็งแรงเทียบกับตัวอย่างควบคุม (Stiffness Ratio)

4.6 การสลายพลังงาน

จากค่าการสลายพลังงาน(Energy Dissipation) ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.66 นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นแล้วค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเนื่องจากเมื่อตัวอย่างมีค่าระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นนั้นความเสียหายที่เกิดสะสมแก่ตัวอย่างก็เกิดมากขึ้นตามส่งผลให้กราฟ Hysteretic ของตัวอย่างมีวงกว้างมากขึ้น โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างควบคุม RC1 เป็นตัวอย่างที่มีค่าการสลายพลังงานดีที่สุดใน และมีตัวอย่าง RC3 ที่มีค่าการสลายพลังงานใกล้เคียงตัวอย่างควบคุมมากที่สุด และตัวอย่างที่มีค่าการสลายพลังงานแย่มากที่สุดคือตัวอย่าง PC1 :ซึ่งจะเห็นจากกราฟว่าค่าการสลายพลังงานที่มากที่สุดมีค่าเพียง 6 %



รูปที่ 4.66 กราฟแสดงค่าการสลายพลังงาน

4.7 ความเหนียว

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีค่าความเหนียวมากที่สุดนั้นคือตัวอย่างควบคุม RC1 และตัวอย่างที่มีค่าความเหนียวน้อยที่สุดคือตัวอย่าง PC1 ตามตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างควบคุมเป็นตัวอย่างที่มีความสามารถในการเสียรูปได้มากที่สุดเนื่องจากมีค่าความเหนียวมากที่สุด ในส่วนของตัวอย่าง PC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นเป็นตัวอย่างที่มีค่าความสามารถในการเสียรูปได้น้อยที่สุดในส่วนของตัวอย่าง RC2 และ RC3 นั้นเป็นตัวอย่างที่มีค่าความสามารถในการเสียรูปอยู่

ช่วงปานกลางแต่เนื่องจากตัวอย่าง RC3 นั้นกำลังของตัวอย่างยังไม่ตกลงส่งผลให้ค่าความเหนียวที่ได้นี้ อาจไม่ใช่ค่าความเหนียวจริงของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.3 ค่าความเหนียวของชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	ด้านผลัก (Push)			ด้านดึง (Pull)			ค่าอัตราส่วนความเหนียวเฉลี่ย
	d_u (%)	d_y (%)	μ	d_u (%)	d_y (%)	μ	
RC1	3.78	0.90	4.20	3.95	1.10	3.60	3.90
RC2**	4.00	1.15	3.48	4.00	1.05	3.08	3.28
RC3**	3.20	0.95	3.37	3.20	1.25	2.56	2.97
PC1	3.18	1.30	2.44	3.35	1.35	2.48	2.46

** กำลังยังไม่ลดลงเหลือ 80%ของค่ากำลังสูงสุด

4.8 กำลังของตัวอย่างทดสอบ

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีกำลังมากที่สุดคือตัวอย่าง RC2 โดยจะเห็นว่าตัวอย่างนี้นั้นมีกำลังมากกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างนี้สามารถพัฒนากำลังไปจนถึงจุดสูงสุดของการออกแบบ รองลงมาคือตัวอย่าง RC1 และ RC3 ซึ่งทั้งสองตัวนี้มีกำลังใกล้เคียงกัน และสุดท้ายคือตัวอย่าง PC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีกำลังน้อยที่สุดตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 กำลังแรงเฉือนที่เสา (H, Column Shear Force) ของชุดทดสอบจากการออกแบบ

ตัวอย่าง	คาน	เสา	จุดต่อ	H ที่วิบัติ (kN)	ตำแหน่งที่วิบัติ
	H (kN)	H (kN)	H (kN)		
RC1	56.68	57.08	60.51	56.68	คาน
RC2	56.68	57.08	60.51	56.68	คาน
RC3	56.68	57.08	60.51	56.68	คาน
PC1	20.20	57.08	60.51	20.20	คาน

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังสูงสุดเปรียบเทียบกับค่ากำลังสูงสุดออกแบบ

ตัวอย่าง	กำลังสูงสุด (H, kN)		กำลังเฉือน ผลทดสอบ/ ออกแบบ (Push/Pull)	รูปแบบการเสียหาย	
	ออกแบบ	ผลทดสอบ (Push/Pull)		ออกแบบ	ผลทดสอบ
RC1	56.68	42.20/40.06	0.74/0.71	BMF	BMF
RC2	56.68	63.22/58.22	1.12/1.03	BMF	BMF
RC3	56.68	41.10/40.98	0.73/0.72	BMF	BMF
PC1	20.20	36.99/30.09	1.83/1.49	BMF	BMF

หมายเหตุ :

JS = Joint shear failure

CF = Connection failure

BMF = Beam member flexural failure

CMF = Column member flexural failure

บทที่ 5

ลำดับความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อระหว่างคาน-เสา

จุดต่อคาน-เสาถือเป็นสิ่งที่เป็นสำคัญสำหรับโครงสร้าง เนื่องจากเป็นจุดที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อแรงที่เกิดจากชิ้นส่วนหนึ่งไปยังอีกชิ้นส่วนหนึ่งหรือที่เรียกกันว่าการถ่ายแรง หากจุดเชื่อมต่อนี้ไม่สามารถถ่ายแรงที่เกิดขึ้นได้แล้วนั้นย่อมส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ สำหรับโครงสร้างใด ๆ ก็ตามจะต้องมีจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนเกิดขึ้นไม่มากก็น้อย ปัจจุบันได้มีการพัฒนาถึงรูปแบบการก่อสร้างอาคารโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปโดยในตัวของชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นจะประกอบด้วยชิ้นส่วนคาน ชิ้นส่วนเสา ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้จะต้องนำมาประกอบกันเป็นโครงสร้างผ่านทางจุดต่อคาน-เสา ส่งผลให้งานวิจัยนี้ได้มองถึงปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของจุดต่อคาน-เสา และหยิบเอาปัจจัยเหล่านี้มาดูลำดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธี AHP เพื่อวิเคราะห์ดูว่าผู้ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างนั้นมีมุมมองถึงปัจจัยเหล่านี้อย่างไร และในส่วนของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับการก่อสร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นมีมุมมองถึงปัจจัยเหล่านี้อย่างไรโดยทำการเทียบคู่แต่ละปัจจัยและนำมาเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนารูปแบบจุดต่อในอนาคตต่อไป

สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับจุดต่อคาน-เสานั้นทางผู้วิจัยได้หยิบเอาส่วนที่สำคัญที่มีผลต่อรูปแบบจุดต่อโดยตรงซึ่งประกอบไปด้วย

- ปัจจัย 1 ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม
- ปัจจัย 2 ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม
- ปัจจัย 3 ความง่ายในการเทคอนกรีต
- ปัจจัย 4 ความรวดเร็วในการติดตั้ง
- ปัจจัย 5 ความปลอดภัยในการติดตั้ง
- ปัจจัย 6 ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง
- ปัจจัย 7 ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ
- ปัจจัย 8 ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ
- ปัจจัย 9 ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ
- ปัจจัย 10 ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ
- ปัจจัย 11 ความสวยงาม

ซึ่งจากผลการสำรวจความคิดเห็นจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างเกี่ยวกับความสำคัญของปัจจัยเหล่านี้จะได้กล่าวต่อไป

5.1 ลำดับความสำคัญของปัจจัยในมุมมองของผู้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง

จากการสำรวจความคิดเห็นจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างทั้งที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับการก่อสร้างโดยใช้ระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโดยใช้ระบบหล่อในที่จำนวนทั้ง 30 คนนั้นพบว่า ปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อกาน-เสาที่ผู้เกี่ยวข้องให้ความสำคัญมากที่สุดนั้นคือ ความปลอดภัยในการติดตั้งที่หน้างานซึ่งจากคะแนนความสำคัญทั้งหมด 100 % นั้นปัจจัยในเรื่องของความปลอดภัยในการติดตั้งนั้นมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 13.6 % ปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาได้แก่ ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อซึ่งมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 13.3 % ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริมมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 12.7 % ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริมมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 11.0 % ความง่ายในการเทคอนกรีตมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 9.3 % ความรวดเร็วในการติดตั้งมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 8.9 % ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 7.2 % ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 6.7 % ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 6.0 % และสุดท้ายคือปัจจัยในส่วนของความสวยงามของจุดต่อซึ่งมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 2.9 % โดยลำดับทั้งหมดนี้ได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ลำดับความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อกาน-เสาในมุมมองของผู้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง

ลำดับ	ปัจจัย	คะแนนความสำคัญ (%)
1	ปัจจัย 5	13.6
2	ปัจจัย 7	13.3
3	ปัจจัย 1	12.7
4	ปัจจัย 2	11.0
5	ปัจจัย 3	9.3
6	ปัจจัย 4	8.9
7	ปัจจัย 9	8.5
8	ปัจจัย 6	7.2
9	ปัจจัย 8	6.7
10	ปัจจัย 10	6.0
11	ปัจจัย 11	2.9

5.2 ลำดับความสำคัญของปัจจัยในมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ

ในส่วนของผู้เชี่ยวชาญที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้เน้นหมายถึงผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับระบบการก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปทั้งในฐานะของผู้ออกแบบ ผู้ผลิต และสถาปนิก อีกทั้งยังมีประสบการณ์เกี่ยวกับการทำงานในระบบนี้มากกว่า 5 ปี โดยจากการสอบถามความเห็นเกี่ยวกับปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อดาน-เสานี้พบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดนั่นคือความปลอดภัยในการติดตั้งโดยมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 20.1 % และปัจจัยที่มีคะแนนความสำคัญรองลงมาได้แก่ ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต้อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 16.6 % ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต้อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 14.3 % ความรวดเร็วในการติดตั้งมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 9.0 % ความยืดหยุ่นในการติดตั้งมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 7.7 % ความง่ายในการเทคอนกรีตมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 7.3 % ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริมมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 6.1 % ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริมมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 5.9 % ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต้อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 5.3 % ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต้อมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 4.9 % และปัจจัยสุดท้ายคือความสวยงามซึ่งมีคะแนนความสำคัญอยู่ที่ 2.9 % โดยลำดับความสำคัญของปัจจัยนี้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ลำดับความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อดาน-เสาในมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ

ลำดับ	ปัจจัย	คะแนนความสำคัญ (%)
1	ปัจจัย 5	20.1
2	ปัจจัย 7	16.6
3	ปัจจัย 9	14.3
4	ปัจจัย 4	9.0
5	ปัจจัย 6	7.7
6	ปัจจัย 3	7.3
7	ปัจจัย 1	6.1
8	ปัจจัย 2	5.9
9	ปัจจัย 8	5.3
10	ปัจจัย 10	4.9
11	ปัจจัย 11	2.9

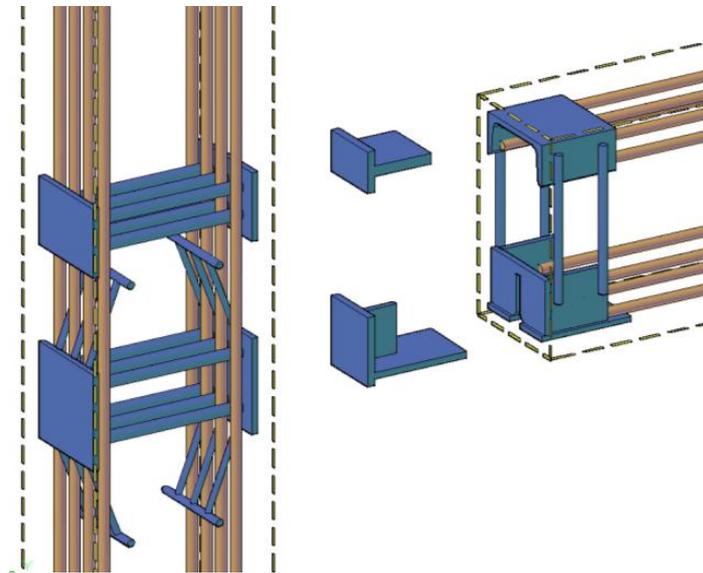
5.3 เปรียบเทียบรูปแบบจุดต่อคาน-เสา

หัวข้อนี้เน้นทางผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างรูปแบบจุดต่อคาน-เสาที่ได้มีการพัฒนาขึ้นจำนวน 2 รูปแบบ ซึ่งทั้งรูปแบบนั้นใช้วิธีการติดตั้งต่างกัน โดยในส่วนของตัวอย่าง A นั้นเป็นรูปแบบของจุดที่ใช้วิธีการติดตั้งโดยการเชื่อมเหล็ก Plate และทำการเทเกร้าที่ปิดบริเวณจุดเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 5.1 แต่ในส่วนของตัวอย่าง B นั้นวิธีการติดตั้งนั้นจะแตกต่างออกไปโดยจะใช้วิธีการติดตั้งโดยการเชื่อมต่อบริเวณส่วนล่างของคานนั้นจะใช้วิธีการเชื่อมเหล็ก Plate แต่ในส่วนบนของคานนั้นจะใช้วิธีการติดตั้งโดยการต่อเหล็กผ่านทาง Coupler ที่ฝังไว้ภายในเสาจากนั้นจึงทำการทาบเหล็กไปยังส่วนบนของคานที่ได้เว้นพื้นที่ไว้และทำการเทเกร้าที่ปิดบริเวณจุดเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 5.2

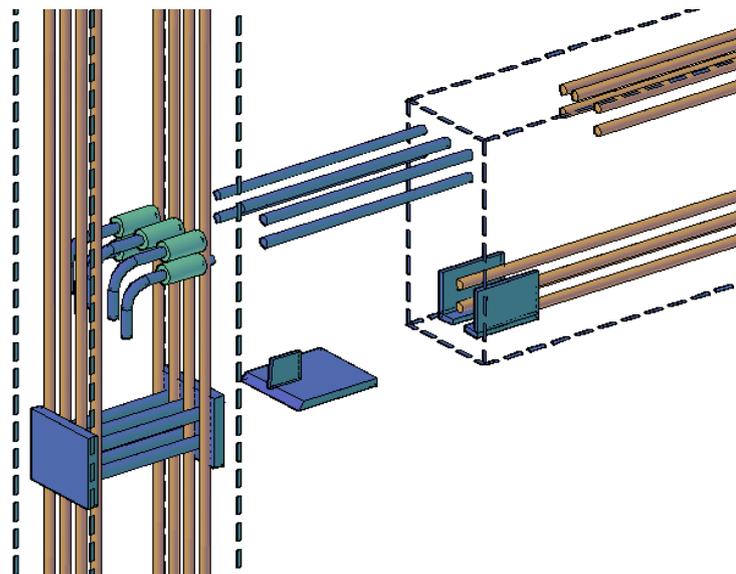
จากผลการสำรวจเพื่อประเมินเปรียบเทียบรูปแบบจุดต่อทั้งสองรูปแบบโดยใช้เกณฑ์การให้คะแนนคือปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อกานเสาที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้อันและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจโดยวิธี AHP พบว่า ในส่วนของปัจจัยความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริมนั้นพบว่าตัวอย่าง A นั้นมีคะแนนดีกว่าโดยได้คะแนน 51.2 และตัวอย่าง B ได้คะแนนเพียง 48.8 ต่อมาคือปัจจัยความง่ายในการประกอบเหล็กเสริมพบว่าตัวอย่าง A ได้คะแนนดีกว่าโดยได้คะแนน 52.2 และตัวอย่าง B ได้ 47.8 และปัจจัยความง่ายในการเทคอนกรีตพบว่าทั้งสองตัวอย่างมีคะแนนใกล้เคียงกันมากโดยตัวอย่าง A ได้คะแนน 50.6 ส่วนตัวอย่าง B ได้คะแนน 49.4 และปัจจัยความรวดเร็วในการติดตั้งพบว่าตัวอย่าง A ได้คะแนนมากกว่าโดยได้ 56.7 ส่วนตัวอย่าง B ได้เพียง 43.3 และปัจจัยความปลอดภัยในการติดตั้งพบว่าตัวอย่าง A ได้คะแนนมากกว่าโดยได้ 57.3 ส่วนตัวอย่าง B ได้คะแนนเพียง 42.7 และปัจจัยความยืดหยุ่นในการติดตั้งนั้นกลับกลายเป็นตัวอย่าง B ที่มีคะแนนดีกว่าโดยได้คะแนน 53.1 ส่วนตัวอย่าง A ได้ 46.9 และปัจจัยความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อพบว่าตัวอย่าง A มีคะแนนดีกว่าโดยได้คะแนน 59.8 ส่วนตัวอย่าง B ได้เพียง 40.2 และปัจจัยความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อพบว่าตัวอย่าง B มีคะแนนดีกว่าโดยได้คะแนน 52.7 ส่วนตัวอย่าง A ได้ 47.3 และปัจจัยความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อพบว่าตัวอย่าง A มีคะแนนมากกว่าโดยได้คะแนน 58.8 ส่วนตัวอย่าง B ได้ 41.2 และปัจจัยความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อพบว่าตัวอย่าง A มีคะแนนมากกว่าอย่างมากโดยได้คะแนนถึง 62.0 ส่วนตัวอย่าง B ได้เพียง 38.0 เท่านั้น และสุดท้ายคือปัจจัยเรื่องความสวยงามพบว่าตัวอย่าง A มีคะแนนดีกว่าโดยได้คะแนนไป 58.2 ส่วนตัวอย่าง B ได้เพียง 41.8 โดยลำดับคะแนนทั้งหมดแสดงในตารางที่ 5.3

จากการเปรียบเทียบตัวอย่างทั้งสองโดยการเปรียบเทียบที่ละปัจจัยจากนั้นนำผลการเปรียบเทียบที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ในภาพรวมซึ่งใช้กระบวนการ AHP ในการวิเคราะห์นั้นพบว่า โดยภาพรวมแล้วผู้เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างมองว่ารูปแบบจุดเชื่อมต่อของตัวอย่าง A สามารถนำไปใช้งานได้ดีกว่าตัวอย่าง B โดยคะแนนของตัวอย่าง A ที่ได้โดยภาพรวมนั้นคือ 54.6 และในส่วนของรูปแบบจุดเชื่อมต่อของตัวอย่าง B นั้นได้คะแนนทั้งสิ้น 45.4 ตามตารางที่ 5.4 จากผลการสำรวจความคิดเห็นในครั้งนี้มองว่ารูปแบบจุดเชื่อมต่อกาน-เสาของตัวอย่าง A นั้นสามารถนำไปใช้งานได้ดีว่ารูปแบบจุด

เชื่อมต่อของตัวอย่าง B ในอนาคตแนวทางในการพัฒนารูปแบบจุดเชื่อมต่อคาน-เสานั้นสามารถใช้รูปแบบของตัวอย่าง A เป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อไปได้



รูปที่ 5.1 รูปแบบจุดต่อคานเสาดตัวอย่าง A



รูปที่ 5.2 รูปแบบจุดต่อคานเสาดตัวอย่าง B

ตารางที่ 5.3 คะแนนเปรียบเทียบรูปแบบจุดต่อ

ปัจจัย	ความสำคัญ	
	จุดต่อ A	จุดต่อ B
ปัจจัย 1	51.2	48.8
ปัจจัย 2	52.2	47.8
ปัจจัย 3	50.6	49.4
ปัจจัย 4	56.7	43.3
ปัจจัย 5	57.3	42.7
ปัจจัย 6	46.9	53.1
ปัจจัย 7	59.8	40.2
ปัจจัย 8	47.3	52.7
ปัจจัย 9	58.8	41.2
ปัจจัย 10	62.0	38.0
ปัจจัย 11	58.2	41.8

ตารางที่ 5.4 คะแนนโดยรวมจากเปรียบเทียบ

ตัวอย่าง	ความสำคัญ
A	54.6
B	45.4

บทที่ 6

สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษา

6.1 ผลของรูปแบบจุดต่อ

จากผลของกำลังแล้วพบว่าการเสริมเหล็กระดับกลาง(Intermediate steel) มีผลทำให้กำลังของตัวอย่างพัฒนาไปจนถึงกำลังสูงสุดที่ออกแบบไว้และตัวอย่างยังคงมีค่าความเหนียวอยู่ในระดับที่ดีเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมอีกทั้งยังส่งผลให้ความสามารถในการสลายพลังงานอยู่เกณฑ์ปานกลางไปจนถึงดีได้ ในส่วนของตัวอย่างที่มีการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมนั้น (Deboned) พบว่ากำลังของตัวอย่างนี้ไม่ต่างกับตัวอย่างควบคุมแต่สิ่งที่ต่างกันคือความเหนียวของตัวอย่างแต่ความความเหนียวนี้อาจไม่ใช่ค่าจริงของตัวอย่างนี้แต่สิ่งที่พบคือค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างนี้มีค่าดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นยกเว้นตัวอย่างควบคุมซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีค่าการสลายพลังงานดีที่สุด และสุดท้ายคือตัวอย่างที่เป็นรูปแบบของชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นพบว่าค่ากำลังของตัวอย่างนี้มีค่าต่ำที่สุดโดยเกิดจากรายละเอียดภายในจุดต่อที่ยังไม่ดีพอทำให้ความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างนี้ค่อนข้างต่ำจึงควรมีการปรับปรุงรายละเอียดบริเวณจุดต่อในอนาคตเนื่องจากตัวอย่างนี้นั้นยังมีค่าความเหนียวน้อยและยังมีความสามารถในการสลายพลังงานน้อยอยู่เช่นกัน

6.2 เปรียบเทียบการเสื่อมลดและค่าความแข็งแรง

การลดลงของค่าความแข็งแรงนั้นยิ่งเกิดขึ้นดีเนื่องจากจะส่งผลให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบการลดลงของค่าความแข็งแรงของทั้ง 4 ตัวอย่างทดสอบแล้วพบว่า ตัวอย่าง RC3 เป็นตัวอย่างที่มีการลดลงของค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดในช่วงแรกของการเกิดระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เมื่อดูจากกราฟรูปที่ 4.64 แต่เมื่อโครงสร้างมีระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากๆแล้วกลับพบว่าตัวอย่าง RC1 และ RC3 มีค่าการลดลงใกล้เคียงกับโดยความชันของกราฟ RC3 มากกว่าอยู่เล็กน้อย แตกต่างกับตัวอย่าง PC1 ที่เริ่มแรกการลดลงของค่าความแข็งแรงเกิดขึ้นในช่วงปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 4 ตัวอย่างทดสอบแต่กลับมีการลดลงของค่าความแข็งแรงอย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และในส่วนของตัวอย่าง RC2 แล้วนั้นจะเห็นว่าการลดลงของค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วงปานกลางเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบอื่นแต่จะมีจุดที่สนใจคือตัวอย่างนี้เกิดการวิบัติอย่างเฉียบพลันที่ระยะการเคลื่อนที่ 4.00 % ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงให้เกิดในโครงสร้างที่ออกแบบสำหรับอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

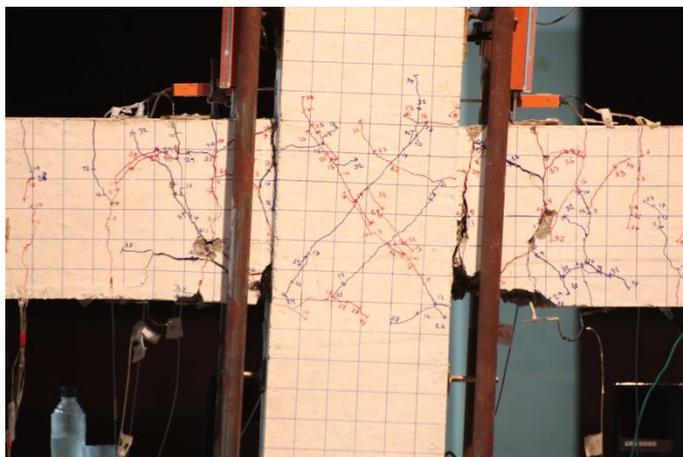
ในส่วนของค่าความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนกับตัวอย่างควบคุมจะเห็นว่าแม้เพียงตัวอย่าง RC2 เท่านั้นที่มีค่า stiffness มากกว่าตัวอย่างควบคุม RC1 และเมื่อพิจารณาถึง

ตัวอย่าง RC3 นั้นพบว่าในช่วงแรกนั้นค่า stiffness มีแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมแต่เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นจะเห็นว่าค่า stiffness ค่อยๆเข้าสู่ค่า stiffness ของตัวอย่างควบคุม แตกต่างกับตัวอย่าง PC1 ที่ค่า stiffness ห่างจากตัวอย่างควบคุมตลอดการทดสอบ

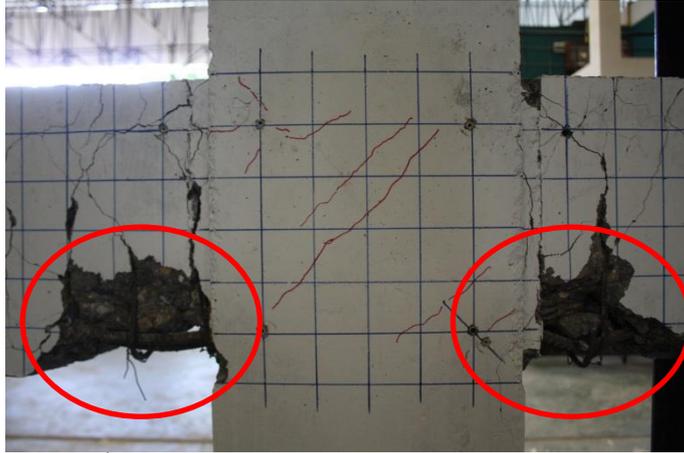
6.3 รูปแบบการวิบัติ

ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยตัวอย่างทั้งหมด 4 ตัวอย่างซึ่งแต่ละตัวอย่างมีรายละเอียดต่างกัน ส่งผลให้รูปแบบการวิบัติของแต่ละตัวอย่างนั้นไม่เหมือนกัน โดยจากการทดสอบพบว่า

ตัวอย่าง RC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI318-02 และบริเวณจุดต่อคาน-เสานั้นออกแบบตามมาตรฐาน ACI352R-02 ซึ่งจากการทดสอบให้แรงกระทำจนพบว่าจุดที่เกิดความเสียหายจนนำไปสู่การวิบัติของตัวอย่างนี้นั้นเกิดขึ้นบริเวณหน้าเสาตามรูปที่ 6.1 โดยจะเห็นว่าในรูปแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นอย่างมากบริเวณปลายคานที่ติดกับหน้าเสาอีกทั้งยังเกิดการแอ่นออกของรอยร้าวบริเวณหน้าเสา และยังมีการหลุดออกของคอนกรีตบริเวณปลายคานส่วนล่าง ซึ่งการหลุดออกของคอนกรีตนี้เองส่งผลให้คานสูญเสียพื้นที่รับแรงอัดส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดัดของคานลดลงรวมกับการยึดของเหล็กเสริมตามยาวที่บริเวณปลายคานจนเข้าสู่ภาวะพลาสติก (Plastic) และที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงๆยังพบการโก่งตัวของเหล็กเสริมที่บริเวณปลายคานดังแสดงในรูปที่ 6.2 เนื่องจากคอนกรีตที่หุ้มเหล็กไว้นั้นได้แตกและหลุดออกไปทั้งหมดทำให้ตัวอย่างสูญเสียกำลังต้านทานการเคลื่อนที่จนนำไปสู่การวิบัติของตัวอย่าง

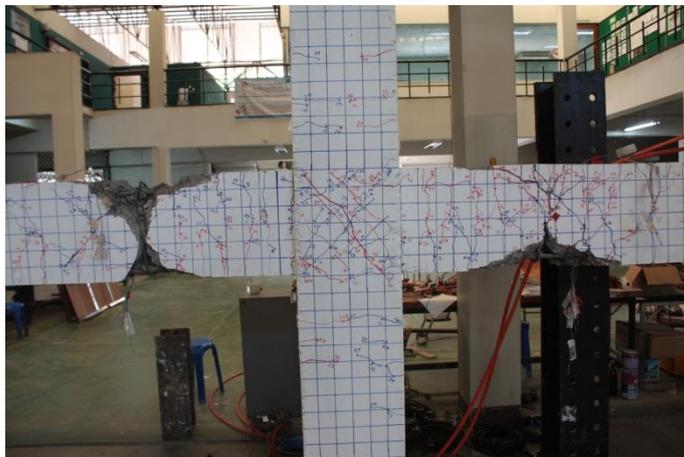


รูปที่ 6.1 รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง RC1

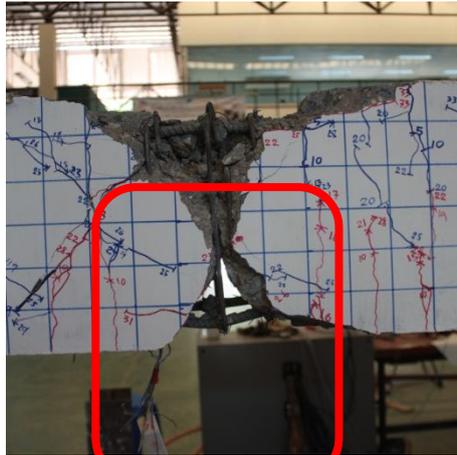


รูปที่ 6.2 การโก่งของเหล็กเสริมตามยาวของคาน

ตัวอย่าง RC2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ทำการเพิ่มเติมเหล็กเสริมระดับกลาง (Intermediate Steel) บริเวณจุดต่อคาน-เสา และปลายคานพบว่าจุดที่เกิดความเสียหายอย่างมากเกิดที่บริเวณคานภายใน ซึ่งจะเห็นว่าจากเดิมที่ตัวอย่าง RC1 นั้นเกิดความเสียหายที่บริเวณหน้าเสาแต่เมื่อเพิ่มเหล็กเสริมระดับกลางเข้าไปยังบริเวณจุดต่อคาน-เสาและปลายคานแล้วนั้นส่งผลให้ความเสียหายย้ายไปเกิดที่บริเวณคานภายในแทน ส่งผลให้รูปแบบความเสียหายของตัวอย่างนี้นั้นตรงกับรูปแบบของเสาเชิงคานอ่อนซึ่งเป็นรูปแบบที่ออกแบบสำหรับโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว โดยสาเหตุที่นำไปสู่การวิบัติของตัวอย่างนี้นั้นพบว่าเมื่อคานรับแรงดัดกระทำแบบสลับทิศจะพบว่าคอนกรีตที่รับแรงอัดนั้นได้เกิดการอัดแตกและค่อยหลุดออกทั้งส่วนบนและส่วนล่างของคานส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดัดของคานค่อยๆ ลดลงจนในที่สุดเมื่อคอนกรีตหลุดออกจนหมดแล้วนั้นสิ่งที่รับแรงดัดก็คือเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เกิดการโก่งของเหล็กเสริมตามยาวตามรูปที่ 6.4 และสุดท้ายคานก็ไม่มีกำลังในการต้านทานแรงดัดจนนำไปสู่การวิบัติของตัวอย่าง

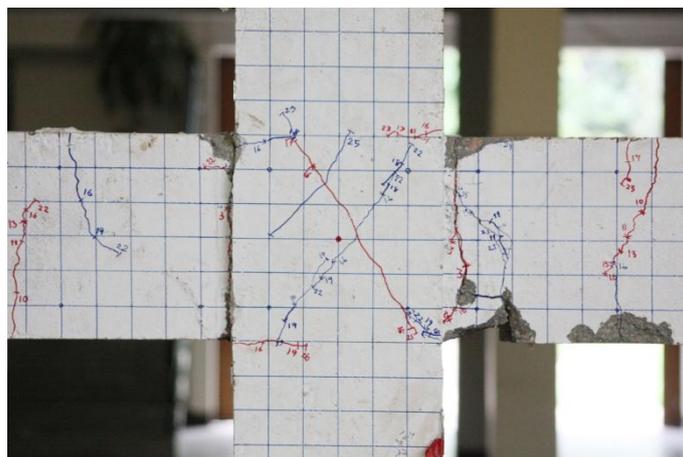


รูปที่ 6.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง RC2



รูปที่ 6.4 การโค้งงอของเหล็กเสริมตามยาวบริเวณคานภายใน

ตัวอย่าง RC3 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ทำการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมตามยาวของคานบริเวณหน้าเสาพบการความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างนี้คล้ายคลึงกับตัวอย่าง RC1 แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าที่เกิดกับตัวอย่าง RC1 จากรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าความเสียหายยังคงเกิดขึ้นบริเวณหน้าเสาอยู่แต่ปริมาณของรอยร้าวและการหลุดร่อนของคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยกว่าแต่หากมองไปถึงกำลังการต้านทานการเคลื่อนที่ของตัวอย่างนี้นั้นพบว่าตัวอย่างนี้ยังไม่เข้าสู่จุดวิบัติเนื่องจากกำลังต้านทานการเคลื่อนที่ที่ยังไม่ลดลงแต่ด้วยเนื่องจากความจำกัดของอุปกรณ์การทดสอบส่งผลให้ไม่สามารถให้ระยะการเคลื่อนที่จนตัวอย่างเข้าสู่จุดวิบัติได้ แต่โดยภาพรวมแล้วการตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวบริเวณหน้าเสานี้ช่วยให้ความเสียหายเกิดขึ้นน้อยลง



รูปที่ 6.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง RC3

ตัวอย่าง PC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้ระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปในการก่อสร้างพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างนี้นั้นเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของคานเนื่องจากตัวอย่างนี้บริเวณจุดต่อนั้นมีเพียงเหล็กเสริมจากคานเชื่อมเข้ามายังจุดต่อเพียงเหล็กบนและเหล็กหน้าตัดตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานเท่านั้น ส่งผลให้ความเสียหายที่นำไปสู่การวิบัตินั้นเกิดขึ้นบริเวณช่วงบนของคานโดยจากรูปที่ 6.6 นั้นแสดง

การอ้างอิงของรอยร้าวในแนวราบที่บริเวณช่วงบนของคานซึ่งรอยร้าวดังกล่าวนี้เกิดจากการรูดไถลของเหล็กเสริมภายในซึ่งสาเหตุนี้เองทำให้ตัวอย่างสูญเสียกำลังต้านทานการเคลื่อนที่จนทำให้ตัวอย่างเกิดการวิบัติในที่สุดและยังพบการอ้างอิงของรอยร้าวบริเวณคานส่วนล่างเนื่องจากไม่มีเหล็กเสริมเข้ามาเชื่อมต่อกับจุดต่อ



รูปที่ 6.6 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง PC1

6.4 ปัจจัยที่สำคัญสำหรับจุดเชื่อมต่อกาน-เสา

จากการสำรวจความคิดเห็นทั้งในส่วนของผู้ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างและผู้เชี่ยวชาญระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นพบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดที่กลุ่มคนทั้งสองกลุ่มมีความเห็นตรงกันคือ ปัจจัยในส่วนของความปลอดภัยในการติดตั้ง เนื่องจากถึงแม้ว่าจุดเชื่อมต่อที่ออกแบบมาจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำมากเพียงใดแต่หากไม่สามารถทำการติดตั้งได้อย่างปลอดภัยแล้วย่อมส่งผลให้การติดตั้งอาจไม่สามารถทำได้ส่งผลให้จุดเชื่อมต่อที่ออกแบบมานั้นไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง และปัจจัยที่มีความสำคัญต่อมาคือความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นสิ่งต้องการหลักในการออกแบบเนื่องจากหากกล่าวว่ารูปแบบจุดต่อนี้มีความสามารถในการติดตั้งได้อย่างปลอดภัยแล้วอีกทั้งยังมีความมั่นคงแข็งแรงย่อมกล่าวได้ว่าจุดเชื่อมต่องดกล่าวมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ในส่วนของปัจจัยต่อมานั้นพบว่า ความเห็นของคนทั่วไปนั้นจะมองในส่วนของความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริมซึ่งสิ่งนี้จะกำหนดระยะเวลาในการทำงานซึ่งหากสามารถทำได้อย่างรวดเร็วแล้วนั้นย่อมเป็นผลดีต่อโครงการในการใช้เวลาการก่อสร้างอย่างมาก แต่เมื่อมองในมุมของผู้เชี่ยวชาญแล้วปรากฏว่าปัจจัยที่สำคัญอันดับ 3 คือปัจจัยในส่วนของความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อซึ่งในมุมมองนี้อาจจะต้องมีความเข้าใจถึงพฤติกรรมการรับแรงของจุดเชื่อมต่อเสียก่อน ซึ่งในความเห็นนี้นั้นมองในมุมของประสิทธิภาพในการรับแรงและส่งถ่ายแรงไปยังส่วนต่างๆ

ของโครงสร้าง ซึ่งจากการสำรวจถึงความสำคัญของปัจจัยในข้างต้นก็สามารถมองเห็นถึงการพัฒนารูปแบบของจุดเชื่อมต่อดาน-เสาในอนาคตได้โดยใช้ปัจจัยเหล่านี้เป็นต้นนำทาง

6.5 ผลกระทบต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม

จากการทดสอบแบบจำลองปัจจัยของรูปแบบจุดต่อ 2 แบบ โดยอาศัยผลจากผลการสำรวจความคิดเห็นในข้างต้นนั้นจะเห็นว่า รูปร่างลักษณะภายนอกของจุดเชื่อมต่อดาน-เสาทั้ง 2 แบบที่ทดสอบการเลือกนั้นไม่มีความแตกต่าง โดยทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะเป็นในส่วนของรายละเอียดของการเชื่อมต่อกายในที่ไม่มีผลต่อรูปแบบภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อความต้องการทางสถาปัตยกรรม เนื่องจากผลการสำรวจแล้วพบว่า ปัจจัยดังกล่าวถือเป็นเรื่องเล็กน้อยที่สามารถจะทำการออกแบบแก้ไขได้

บรรณานุกรม

- จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ และ พิสนธ์ อุดมวรรณ (2548), พฤติกรรมการวิบัติของรอยต่อคานเสาสำเร็จรูป, การประชุมประจำปี สวทช, กรุงเทพฯ.
- มาลี โตบารมีกุล, (2540), การศึกษาระบบการก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุทธิพล วิวัฒน์ที่ปะ, กฤษฎา แท้ประสาทสิทธิ์ และ วิ เจียรวิโรจน์, (2540), การใช้ระบบ Precast กับงานอาคาร, การสัมมนาและนิทรรศการทางวิชาการเรื่อง “การก่อสร้างที่ใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูป”, น.32-60, คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขา วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- วรกร วรทไพฑูรย์, กิติมา กองอินทร์ และ กฤษณะ พักนาค, (2549), การเปรียบเทียบราคาก่อสร้าง และแผนงานก่อสร้างบ้านเอื้ออาทรระหว่างการใช้โครงสร้างแบบหล่อในที่และโครงสร้างแบบหล่อสำเร็จ : กรณีศึกษาโครงการบ้านเอื้ออาทร, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
- วิฑูรย์ ต้นศิริมงคล, (2542), AHP กระบวนการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก, กรุงเทพฯ: กราฟิก แอนด์ ปริ้นติ้ง.
- บริษัท พินุลย์คอนกรีต จำกัด [ระบบออนไลน์]2554. แหล่งที่มา <http://www.pcc-concrete.com> [1 กันยายน 2554]
- อภิสิทธิ์ นิ่มสกุล, (2547), การสำรวจความคิดเห็นต่อการใช้ระบบโครงสร้างสำเร็จรูปในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยในจังหวัดเชียงใหม่, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมและการบริหารการก่อสร้าง.
- เป็นหนึ่งใน วานิชชัย และ อาเต ลิซานโตโน, (2537), การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, หน้า 30-52.
- ACI Committee 374, (2001), Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing, T1.1-01/T1.1R-01, Farmington Hills, MI.
- Alcocer S. M. , Carranza R. , Navarete D. P. and Martinez R., (2002), Seismic Tests of Beam-to-Column Connections in a Precast Concrete Frame.
- Au, F.T.K., Huang, K. and Pam, H.J., (2005), Diagonally-Reinforced Beam-Column Joints Reinforced Under Cyclic Loading, Structures & Buildings 158, Issue SB1, pp. 21-40

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Brzev, S. and Perez, T.G., (2011), Precast Concrete Construction, British Columbia Institute of Technology, Canada.
- Camarena, D., (2542), Finite Element Analysis of Precast Prestressed Beam–Column Concrete Connection in Seismic Construction, Master’s Thesis in the International Master’s Programme in Structural Engineering, Chalmers University of Technology.
- Camarena, D., (2006), Finite Element Analysis of Precast Prestressed Beam–Column Concrete Connection in Seismic Construction, Master’s Thesis, Calmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Elliott, K. S., Davies, G., Corgun, H. and Adlparvar M. R., (1998), The Stability of Precast Concrete Skeletal Frames.
- Elliott, K. S., Davies, C., Mahdi, A. A., Corgun, H., Viridi, K. and Ragupathy, P., (1998), Precast Concrete Semi rigid Beam–to–Column Connections in Skeletal Frames, Control of the Semi–rigid Behavior of Civil Engineering Structural Connections, *COST CI International Conference*, Liege, September 1998, pp.45–54.
- Englekirk, R., (2002), Design–Construction of The Paramount – A 39–Story Precast Prestressed Concrete Apartment Building, *PCI Journal*, Vol.47, No.4, July– August 2002, pp. 56–71.
- EURO CODE 3 Draft Version 5, November 1990
- Hitoshi, S. and Fumio, W., (2000), THE JAPAN PRESSS PRECAST CONCRETE CONNECTION DESIGN.
- Kaung, J.S. and Wong, H.F., (2011), Effectiveness of Horizontal Stirrups in Joint Core for Exterior Beam–Column Joints with Nonseismic Design, The Twelfth East Asia–Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp.3301–3307.
- Kishi, N. and Hasan, R., (1997), Study of Eurocode3 steel connection Classification, *Engineering Structures*, Vol 19, No. 9, pp.772–779.
- Legeron, F. and Paultre, P., (2000), Behavior of High–Strength Concrete Columns under Cyclic Flexure and Constant Axial Load, *ACI Structural Journal* 97(4), pp.591–601.
- Lukkunaprasit, P. and Sittipunt, C., (2000), Ductility Enhancement of Moderately Confined Concrete Tied Columns with Hook–Clips, *ACI Journal* 100(4), pp.422–429.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Pampanin, S., Calvi, G.M., and Moratti, M., (2002), Seismic Behaviour of R.C. Beam–Column Joints Designed for Gravity Loads, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper Reference 726
- Park, R., (2003), The Fib State–of–the–Art Report on the Seismic Design of Precast Concrete Building Structure, 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper Number 011.
- Pimanmas, A. and Chaimahawan, P., (2010), Shear Strength of Beam–Column Joint with Enlarged Joint Area, Engineering Structure 32, pp.2529–2545.
- Sheikh, S. A. and Khouty, S. S., (1993), Confined Concrete Columns With Stubs, ACI Structural Journal 90(4), pp.414–431.
- Supaviriyakit, T. and Pimanmas, A., (2008), Comparative Performance of Sub–Standard Interior Reinforced Concrete Beam–Column Connection with Various Joint Reinforcing Details, Materials and Structures 41, pp.543–557.

ภาคผนวก

แบบสอบถาม

เรื่อง

“การตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบจุดต่อ คาน-เสา ของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป
โดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้น”

แบบสอบถามเพื่อการวิจัย
เรื่อง “การตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบจุดต่อ คาน-เสา ของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป
โดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้น”

คำชี้แจง

แบบสอบถามฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมและการบริหารการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จัดทำขึ้นเพื่อสำรวจ ข้อมูลสำหรับการศึกษาเรื่อง “การตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบจุดต่อ คาน-เสา ของโครงสร้างคอนกรีต สำเร็จรูปโดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้น” โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อการ ตัดสินใจเลือกชนิดของจุดเชื่อมต่อระหว่าง เสา – คาน

ในการทำวิจัยครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้หากปราศจากข้อมูลที่เป็นจริง ความคิดเห็นของทุก ๆ ท่านจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย ผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูลส่วนตัวของท่านเป็นความลับและการ ตอบแบบสอบถามนี้จะไม่มีการระบุชื่อใด ๆ เกิดขึ้นแก่ผู้ตอบแบบสอบถาม ผู้วิจัยจึงใคร่ขอความอนุเคราะห์ จากท่าน โปรดกรุณาตอบแบบสอบถามตามความคิดของท่าน

แบบสอบถามนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม

ส่วนที่ 2 การประเมินเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อระหว่าง เสา – คาน

ส่วนที่ 3 การประเมินเปรียบเทียบชนิดของจุดเชื่อมต่อ ระหว่าง เสา – คาน

ขอขอบพระคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่าน ที่เสียสละเวลาอันมีค่าของท่านในการอนุเคราะห์ข้อมูล อันมีประโยชน์มา ณ โอกาสนี้

ทศพล พัฒนเรืองกุล

ผู้วิจัย

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

คำชี้แจง : กรุณาเติมข้อความลงในช่องว่างและทำเครื่องหมายลงหน้าข้อความที่ตรงกับความเป็นจริง

1. เพศ

ชาย

หญิง

2. อายุ

ต่ำกว่า 25 ปี

25 – 30 ปี

31 – 35 ปี

36 – 40 ปี

41 – 45 ปี

46 – 50 ปี

51 ปีขึ้นไป

3. ระดับการศึกษา

ปริญญาตรี

สูงกว่าปริญญาตรี

อื่นๆ _____

4. อาชีพ/ตำแหน่งงาน

ผู้รับเหมา

วิศวกร

ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง

สถาปนิก

อื่นๆ _____

5. ประสบการณ์ทำงาน

ต่ำกว่า 5 ปี

5 – 10 ปี

มากกว่า 10 ปี

6. ท่านเคยมีประสบการณ์ทำงานในระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปหรือไม่(ถ้าเคยโปรดระบุจำนวน)

ไม่เคย

1 – 2 โครงการ

3 – 4 โครงการ

มากกว่า 5 โครงการ

7. หากท่านเคยมีประสบการณ์ทำงานในระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป ท่านทำงานในฐานะใด

(สามารถตอบได้มากกว่า 1 ข้อ)

ผู้ออกแบบ

ผู้ผลิต

ผู้ใช้งาน

8. ระบบโครงสร้างสำเร็จรูปที่ท่านเคยมีประสบการณ์ทำงานนั้น เป็นระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป

แบบใด(สามารถตอบได้มากกว่า 1 ข้อ)

แบบจุดต่อ เสา – คาน

แบบผนังรับน้ำหนัก

ส่วนที่ 2 การประเมินเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยสำหรับจุดเชื่อมต่อระหว่าง เสา – คาน

ข้อแนะนำ : ให้ทำเครื่องหมาย○ ลงในช่องระดับความสำคัญของปัจจัย เพื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย โดยเลือกเพียง 1 ระดับของแต่ละปัจจัย ที่ตรงกับความคิดเห็นของท่านมากที่สุด โดยมีเกณฑ์คะแนนเปรียบเทียบความสำคัญและความหมายในการวินิจฉัยเปรียบเทียบ ดังนี้

ระดับความเข้มข้นของความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 ปัจจัยส่งผลกระทบต่อวัตถุประสงค์เท่า ๆ กัน
2	สำคัญระหว่างเท่ากันถึงปานกลาง	อยู่ในลักษณะที่กำกึ่งกัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	ประสบการณ์และการวินิจฉัยแสดงถึงความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งปานกลาง
4	ระหว่างปานกลางถึงค่อนข้างมาก	อยู่ในลักษณะที่กำกึ่งกัน
5	สำคัญกว่าค่อนข้างมาก	ประสบการณ์และการวินิจฉัยแสดงถึงความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งค่อนข้างมาก
6	สำคัญระหว่างค่อนข้างมากถึงมาก	อยู่ในลักษณะที่กำกึ่งกัน
7	สำคัญกว่ามาก	ปัจจัยหนึ่งได้รับความพึงพอใจมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอีกปัจจัยหนึ่ง โดยมีอิทธิพลเหนือกว่าอย่างเห็นได้ชัด
8	สำคัญระหว่างมากถึงมากที่สุด	อยู่ในลักษณะที่กำกึ่งกัน
9	สำคัญว่าสูงสุด	มีหลักฐานยืนยันความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับที่สูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ตัวอย่าง : ถ้าความเห็นของท่านในกรณีปัจจัยที่ 1 “ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม” มีความสำคัญกว่าปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยที่ 2 “ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม” กรุณาวางกลมในช่อง 3:1

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า								สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย		
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก		ปานกลาง	เท่ากันถึง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก		ถึงมาก	มาก
1. ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	2. ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม		

ตัวอย่าง : ถ้าความเห็นของท่านในกรณีปัจจัยที่ 1 “ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม” มีความสำคัญน้อยกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยที่ 2 “ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม” กรุณาวางกลมในช่อง 1:7

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า								สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย	
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก		ปานกลาง	เท่ากันถึง	ปานกลาง	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก		มาก
1. ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	2. ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม	

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า									ปัจจัย					
	มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก		ปานกลาง	ปานกลาง	เล็กน้อย	มาก	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก		ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เล็กน้อย
1. ความรวดเร็วในการประกอบ เหล็กเสริม	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	2. ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	3. ความง่ายในการเทคอนกรีต						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	4. ความรวดเร็วในการติดตั้ง						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	5. ความปลอดภัยในการติดตั้ง						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการกร้ำที่ปิดจุดเชื่อมต่อ						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่าน จุดเชื่อมต่อ						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและ ซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ						

	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----------------

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า									ปัจจัย
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึงถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เทกกันถึง	ปานกลาง		มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึงถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เทกกันถึง	ปานกลาง	
2. ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	3. ความง่ายในการเทคอนกรีต		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	4. ความรวดเร็วในการติดตั้ง		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	5. ความปลอดภัยในการติดตั้ง		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ		

	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและ ช่อมแซมจุดเชื่อมต่อ
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง ค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึง	ปานกลาง		มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง ค่อนข้างมาก	ปานกลาง	
3. ความง่ายในการทดสอบกรีต	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	4. ความรวดเร็วในการติดตั้ง	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	5. ความปลอดภัยในการติดตั้ง	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ	

	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย	
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างปานกลาง	ปานกลาง	เท่ากันถึง		ปานกลาง	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ค่อนข้างปานกลาง
4. ความรวดเร็วในการติดตั้ง	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	5. ความปลอดภัยในการติดตั้ง		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ		

	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----------------

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า									ปัจจัย	
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึง		ปานกลาง	มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ค่อนข้างมาก
5. ความปลอดภัยในการติดตั้ง	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการเกร้าที่ปีจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม			

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า									ปัจจัย	
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึง		ปานกลาง	มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ค่อนข้างมาก
6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม			

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย	
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ปานกลาง	เท่ากันถึง	ปานกลาง		มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ค่อนข้างมาก
7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	8. ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม		

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า									สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย	
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึง	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง	ปานกลาง	เท่ากันถึง	ปานกลาง		มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ค่อนข้างมาก
8. ความง่ายในการเกร้าที่ปิดจุดเชื่อมต่อ	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ		

	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----------------

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า								สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึงถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึงปานกลาง		มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึงถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึงปานกลาง	
9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม

ปัจจัย	ให้สำคัญมากกว่า								สำคัญเท่ากัน	ให้สำคัญน้อยกว่า								ปัจจัย
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึงถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึงปานกลาง		มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมากถึงถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึงปานกลาง	
10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	11. ความสวยงาม

ส่วนที่ 3 การประเมินเปรียบเทียบชนิดของจุดเชื่อมต่อ ระหว่าง เสา – คาน

ตัวอย่าง : ถ้าความเห็นของท่านในหัวข้อที่ 1 “ประดิษฐ์กรรม” “รูปแบบ A” มีความเหมาะสมกว่าปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับ “รูปแบบ B” กรุณาวางกลมในช่อง 3:1

รูปแบบทางเลือก	ให้เหมาะสมมากกว่าอีกทางเลือกหนึ่ง								สำคัญเท่ากัน	ให้เหมาะสมน้อยกว่าอีกทางเลือกหนึ่ง								รูปแบบทางเลือก
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง		เท่ากันถึงปานกลาง	เท่ากันถึงปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	มาก	มากถึงมากที่สุด	
หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 1. ประดิษฐ์กรรม																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

ตัวอย่าง : ถ้าความเห็นของท่านในหัวข้อที่ 1 “ประดิษฐ์กรรม” “รูปแบบ A” มีความเหมาะสมน้อยกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับ “รูปแบบ B” กรุณาวางกลมในช่อง 1:7

รูปแบบทางเลือก	ให้เหมาะสมมากกว่าอีกทางเลือกหนึ่ง								สำคัญเท่ากัน	ให้เหมาะสมน้อยกว่าอีกทางเลือกหนึ่ง								รูปแบบทางเลือก
	มากที่สุด	มากถึงมากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ปานกลาง		เท่ากันถึงปานกลาง	เท่ากันถึงปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	มาก	มากถึงมากที่สุด	
หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 1. ประดิษฐ์กรรม																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

รูปแบบทางเลือก	ให้เหมาะสมมากกว่าอีกทางเลือกหนึ่ง								สำคัญเท่ากัน	ให้เหมาะสมน้อยกว่าอีกทางเลือกหนึ่ง								รูปแบบทางเลือก
	มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ปานกลาง	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	มาก	มากถึง	มากที่สุด	มากที่สุด	

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 1. ความรวดเร็วในการประกอบเหล็กเสริม																			
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B	

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 2. ความง่ายในการประกอบเหล็กเสริม																			
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B	

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 3. ความง่ายในการเทคอนกรีต																			
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B	

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 4. ความรวดเร็วในการติดตั้ง																			
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B	

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 5. ความปลอดภัยในการติดตั้ง																				
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B		
	ให้เหมาะสมมากกว่าอีกทางเล็กน้อย								สำคัญเท่ากัน	ให้เหมาะสมน้อยกว่าอีกทางเล็กน้อย								รูปแบบทางเลือก		
	มากที่สุด	มากถึง	มากที่สุด	มาก	ค่อนข้างมาก	ถึงมาก	ค่อนข้างมาก	ปานกลางถึง		ค่อนข้างมาก	ปานกลาง	เท่ากันถึง	ปานกลาง	ปานกลางถึง	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก	ค่อนข้างมาก		ถึงมาก	มาก

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 6. ความยืดหยุ่นในการติดตั้ง																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 7. ความมั่นคงแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 8. ความง่ายในการเก็บที่ปิดจุดเชื่อมต่อ																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

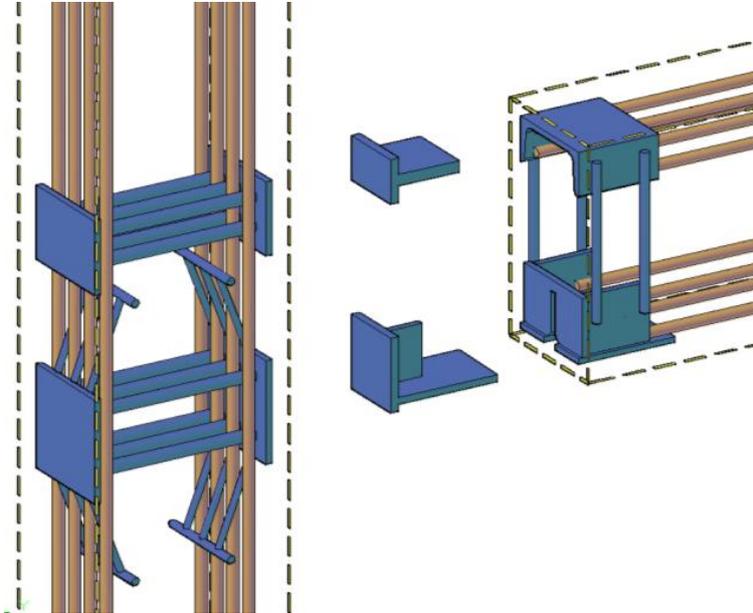
หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 9. ความสามารถในการส่งถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมต่อ																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 10. ความง่ายในการประเมินและซ่อมแซมจุดเชื่อมต่อ																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

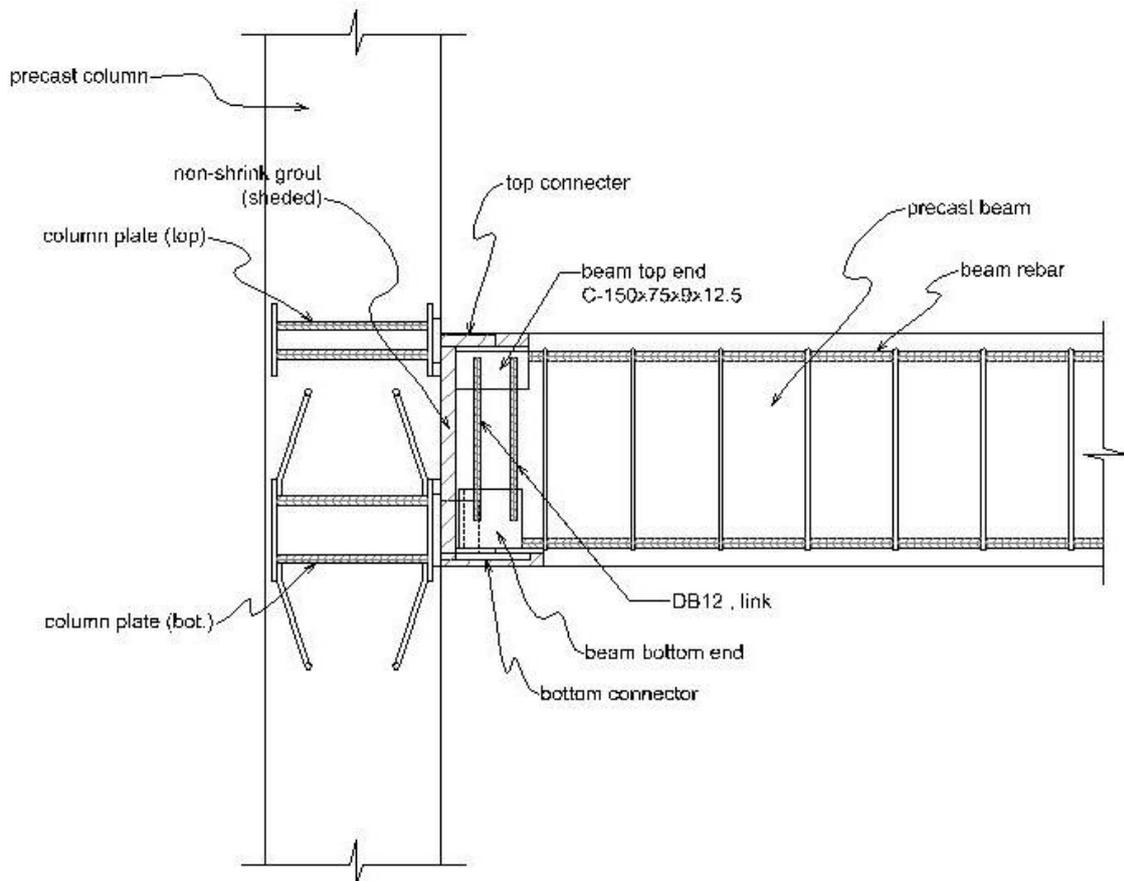
หัวข้อที่ทำการเปรียบเทียบ 11. ความสวยงาม																		
รูปแบบ A	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	รูปแบบ B

รายละเอียดรูปแบบของจุดเชื่อมต่อที่ทำการศึกษามีดังนี้

รูปแบบ A เป็นจุดต่อที่ยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน โดยใช้การเชื่อม ทั้งด้านบนและด้านล่างของคาน ดังรูป

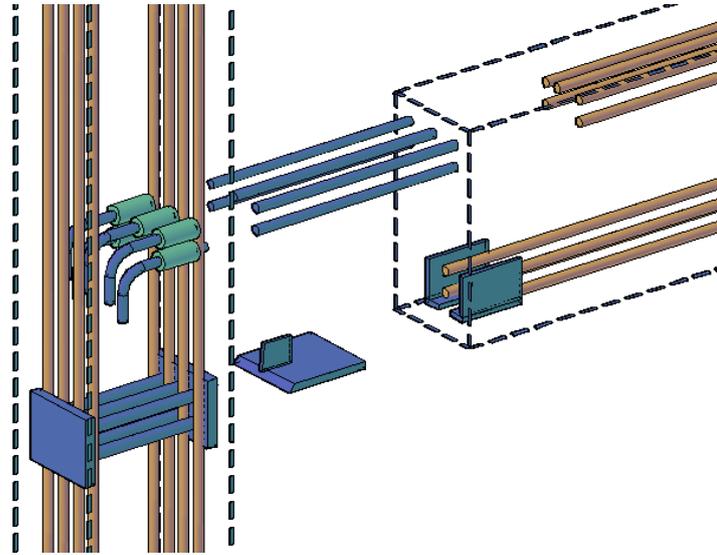


รูป แสดงจุดเชื่อมต่อแบบ A

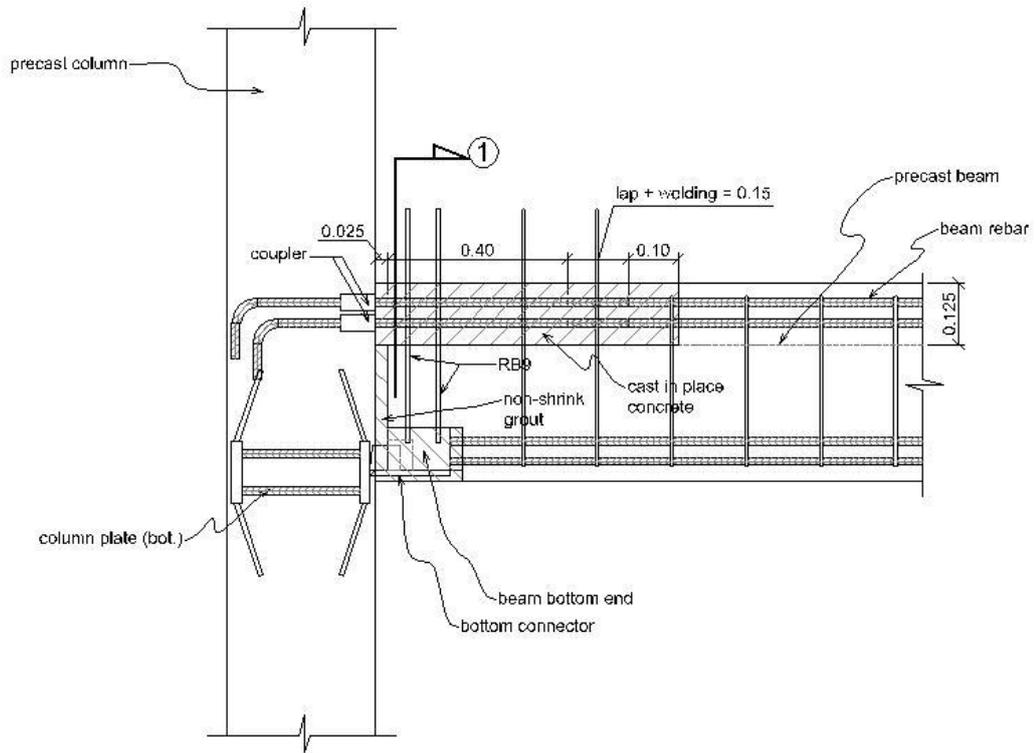


รูป Typical detail ของจุดเชื่อมต่อแบบ A

รูปแบบ B เป็นจุดต่อแบบเชื่อมที่ด้านล่างคาน และจุดต่อด้วยเกลียวที่ปลายบนคาน ดังรูป



รูป แสดงจุดเชื่อมต่อแบบ B



รูป Typical detail ของจุดเชื่อมต่อแบบ B