



พฤติกรรมของรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป

**Behavior of the Plate Connection for Precast Beams**

ภัทรสิทธิ์ จินา

**Pattharasit Jina**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Civil Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2557**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



พฤติกรรมของรอยต่อแบบเพลทเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป

**Behavior of the Plate Connection for Precast Beams**

ภัทรสิทธิ์ จินา

**Pattharasit Jina**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Civil Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2557**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      พฤติกรรมของรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป  
ผู้เขียน              นาย ภัทรสิทธิ์ จินา  
สาขาวิชา            วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
(ดร.ปฐมเมศ ผาณิตพจมาน)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสวี)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตัญญ)

.....  
(ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

.....กรรมการ  
(ดร.ปฐมเมศ ผาณิตพจมาน)

.....กรรมการ  
(ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

.....กรรมการ  
(ดร.นันทชัย ชูศิลป์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.ปฐเมศ ผาณิตพจมาน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นาย ภัทรสิทธิ์ จินา)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นาย ภัทรสิทธิ์ จินา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมของรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป
ผู้เขียน	นาย ภัทรสิทธิ์ จินา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

แม้ว่าระบบคานคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กจะมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคาร แต่การศึกษาทางด้านพฤติกรรมทางโครงสร้างและแนวทางการออกแบบที่จำกัด อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการใช้งานรอยต่อดังกล่าว ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ศึกษารอยต่อแบบเพลาเหล็กในด้านพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการวิบัติ โดยใช้การทดสอบและผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้จำนวน 7 ตัวอย่างทดสอบ โดยมีลักษณะเป็นคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน และชุดคานคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก คานยื่นทดสอบมีขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร และใช้เพลาเหล็กหนา 4 และ 6 มิลลิเมตรขนาดเท่ากับหน้าตัดของคานยื่น ซึ่งเชื่อมยึดเพลาเหล็กของคานหลักและคานยื่นทั้ง 4 ด้านเพื่อเป็นรอยต่อแบบเพลาเหล็ก ส่วนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นชุดคานหลักกับคานยื่นคอนกรีตลักษณะเดียวกันจำนวน 22 แบบจำลอง โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ขนาดของหน้าตัดคาน ขนาดเหล็กเสริม และความหนาของเพลาเหล็ก ผลการศึกษาพบลักษณะการวิบัติบริเวณรอยต่อระหว่างเพลาเหล็กกับเหล็กเสริม และการวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็กซึ่งมีลักษณะการโก่งของเพลาเหล็กก่อนการวิบัติ ส่วนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อแบบเพลาเหล็กขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งสามอย่างใดก็ตามเพลาเหล็กที่หนาขึ้นสามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อได้อย่างมีนัยสำคัญและอาจให้ผลใกล้เคียงกับคานที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้เสนอสมการการออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกอย่างง่าย โดยครอบคลุมกรณีการวิบัติได้แก่ การขาดของรอยเชื่อมระหว่างเพลาเหล็กกับเหล็กเสริม การครากของเหล็กเสริม และการวิบัติของเพลาเหล็ก การออกแบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้กับรอยต่อแบบเพลาเหล็กซึ่งการใช้งานทั่วไป

**คำสำคัญ :** คานคอนกรีต, รอยต่อแบบเพลาเหล็ก, พฤติกรรมการวิบัติ, สมการการออกแบบ, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

<b>Thesis Title</b>	Behavior of the plate connection for precast beams
<b>Author</b>	Mr. Pattharasit Jina
<b>Major Program</b>	Civil Engineering (Structural Engineering)
<b>Academic Year</b>	2013

### ABSTRACT

Even though the precast concrete beam systems with the welded steel plate connection have been widely used in building construction, studies on their structural behavior and design method are limited. The limitations may affect function safety of the connection. Therefore, this study investigates the structural behavior, the factors affecting the load capacity and the failure behavior of the connection. The investigations are conducted through the experiments and the finite element analysis. The 7 experiments used in this study include cast-in-place concrete main beams with a cantilever beam and concrete main beams connected with a cantilever beam by the welded plate. Cross sections of the experiments are  $150 \times 300 \text{ mm}^2$  and  $200 \times 400 \text{ mm}^2$  with length of 1600 mm. Thickness of the welded plate are 4 and 6 mm. Cross sections of the plates are same as cross section of the corresponding cantilever beams. The plate of the main and cantilever beams are welded on their four sides to provide the connection. The finite element models are 22 sets of the main-cantilever beams. The parameters used in this study are beam cross sections, steel reinforcement sizes and thicknesses of the welded plates. The failure types are found at the joint between the plate and the steel reinforcement, and at the steel plate edge with an arched behavior before its failure. Load capacities of the connections depend on the three parameters. However, the thicker plates provide the higher load capacity which may close to the capacity of the cast-in-place beam. This study also proposes simply design equations of the load capacity for failure cases of the reinforcement welding, the reinforcement yielding and the plate-edge yielding. The proposed design can apply to the plate connection which is normally used.

**Keywords** : reinforced concrete beam , plate connection , failure behavior , design equation , finite element model

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย	2
1.5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	7
บทที่ 2 การทดสอบรอยต่อแบบเพลาเหล็ก	9
2.1 ตัวอย่างการทดสอบ	9
2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	14
2.2.1 ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว	15
2.2.2 ตัวอย่างคานคอนกรีตสำเร็จรูป	18
2.3 การทดสอบ	23
2.4 ผลการทดสอบ	25
2.4.1 พฤติกรรมการวิบัติ	25
2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น	35
2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อและความเครียดของเพลาเหล็ก	38



### สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการศึกษาเชิงตัวแปร	41
3.1 การศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	41
3.1.1 การทดสอบที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	41
3.1.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	44
3.1.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ	50
3.2 การศึกษาเชิงตัวแปร	65
3.2.1 พฤติกรรมเชิงโครงสร้าง	68
3.2.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก	72
บทที่ 4 สมการการออกแบบรอยต่อแบบเพลทเหล็ก	76
4.1 การต้านทานแรงดึงจากการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง	78
4.2 การต้านทานแรงดึงจากการขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม	78
4.3 การต้านทานแรงดึงจากการขาดของขอบเพลทเหล็ก	79
4.4 การคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก	83
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	88
เอกสารอ้างอิง	90
ประวัติผู้เขียน	92
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	93

### รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สัญลักษณ์และรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ	14
2.2	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ	33
3.1	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและแบบจำลองของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ [2]	43
3.2	รายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ	44
3.3	ลักษณะการวิบัติของแบบจำลองและผลการทดสอบ	56
3.4	รายละเอียดของกรณีศึกษา	67
3.5	ลักษณะการวิบัติของกรณีศึกษา	71
4.1	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวิบัติ สำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป BM1	85
4.2	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวิบัติ สำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป BM2	86
4.3	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวิบัติ สำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป BM3	87

## รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	8
2.1	ลักษณะของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก	10
2.2	ลักษณะคานคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ	11
2.3	คานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว	12
2.4	คานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก	13
2.5	ลักษณะเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว	15
2.6	ตำแหน่งและการติด Strain gauge ของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว	16
2.7	การหล่อตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว	17
2.8	ลักษณะเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก	19
2.9	ตำแหน่งและการติด Strain gauge ของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก	20
2.10	ขั้นตอนการติด Strain gauge	21
2.11	การหล่อตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก	22
2.12	การทดสอบคานคอนกรีตสำเร็จรูป	24
2.13	ตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์วัดผลการทดสอบ	24
2.14	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว B1 12	26
2.15	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว B2 16	27
2.16	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B1 9-4	28
2.17	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B1 12-4	29
2.18	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B1 12-6	30
2.19	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B2 16-4	31
2.20	ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B2 16-6	32
2.21	การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากตัวอย่าง B19-6	34
2.22	การขาดของขอบเพลาเหล็กจากตัวอย่าง B2 16-4	34
2.23	การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมจากตัวอย่าง B1 12-6	35
2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานขึ้น	36

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต B1	37
2.26	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต B2	37
2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริม	39
2.28	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กบริเวณรอยต่อรับแรงดึง	39
2.29	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กบริเวณรอยต่อรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ B2 16-4	40
3.1	ขนาดเสาและคานยื่นคอนกรีต [2]	42
3.2	ขนาดคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ	43
3.3	ลักษณะเสาและคานยื่นคอนกรีต [2]	45
3.4	ลักษณะคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง	45
3.5	รายละเอียดของแบบจำลองเสาและคานยื่น	46
3.6	รายละเอียดของแบบจำลองคานหลักและคานยื่น	46
3.7	เอลิเมนต์ Solid65 และ Solid45 [11]	47
3.8	เอลิเมนต์ Link8 [11]	48
3.9	เอลิเมนต์ Conta173 [11]	48
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของคอนกรีต	49
3.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของเหล็กแบบต่างๆ	50
3.12	ลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีต	52
3.13	การโก่งตัวของเพลทเหล็กของคานคอนกรีตจากตัวอย่าง B1 12-4	53
3.14	การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากตัวอย่าง B1 9-6	53
3.15	การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมจากตัวอย่าง B1 12-6	54
3.16	การขาดของขอบเพลทเหล็กจากตัวอย่าง B2 16-4	54
3.17	ลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตของแบบจำลอง	55
3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่น [2]	57

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่น ของคานขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร	58
3.20	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่น ของคานขนาดหน้าตัด 200x400 ตารางมิลลิเมตร	59
3.21	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคานที่ใช้เพลทเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร	60
3.22	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคานที่ใช้เพลทเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร	60
3.23	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดเหล็กเสริมในคาน B1 12	62
3.24	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดเหล็กเสริมในคาน B2 16	62
3.25	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B1 9-4	63
3.26	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B1 12-4	63
3.27	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B1 12-6	64
3.28	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B2 16-4	64
3.29	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B2 16-6	65
3.30	ขนาดคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	66
3.31	ตัวอย่างการเสียรูปของเพลทเหล็ก	68
3.32	ตัวอย่างการกระจายแรงของเพลทเหล็ก	69
3.33	การกระจายแรงของคอนกรีต	70
3.34	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวของคานยื่น ของคานคอนกรีต BM1	72

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.35	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นของคานคอนกรีต BM2	73
3.36	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นของคานคอนกรีต BM3	73
3.37	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต BM1 และ BM2	74
3.38	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต BM3	75
4.1	ลักษณะรูปแบบจำลองที่ใช้ในการเสนอสมการออกแบบ	77
4.2	ลักษณะการวิบัติของรอยต่อ	77
4.3	ลักษณะการกระจายแรงดึงในเพลทเหล็ก	80
4.4	การกระจาย Stress จากเหล็กเสริม	81
4.5	การกระจายแรงและ โมเมนต์ในแนวราบ	82
4.6	การกระจาย Stress และ Strain ในหน้าตัดคาน [13]	83

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการนำระบบคานคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยรอยต่อแบบเพทเหล็กมาใช้ในการก่อสร้างกันอย่างแพร่หลาย อุตสาหกรรมการก่อสร้างนิยมใช้ระบบชิ้นส่วนคานคอนกรีตสำเร็จรูป เนื่องจากสามารถช่วยลดต้นทุนค่าก่อสร้าง ระยะเวลา การใช้แรงงานได้และสะดวกในการติดตั้ง

การออกแบบรอยต่อดังกล่าวให้มีความปลอดภัย จำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้างและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อด้วยการทดสอบและการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างไรก็ตามรอยต่อของคานคอนกรีตสำเร็จรูปยังมีการศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้างไม่มากนัก การศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพทเหล็กสำหรับคานคอนกรีต ด้วยผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อซึ่งมีการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ การศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบรอยต่อแบบเพทเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูปให้มีความปลอดภัย

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพทเหล็ก
2. เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบรอยต่อแบบเพทเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. การทดสอบที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติ และใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีลักษณะเป็นชุดคานหลักกับคานยื่นคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งยึดติดกันด้วยรอยต่อแบบเพลาเหล็ก และชุดการทดสอบคานหลักกับคานยื่นที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน โดยคานยื่นมีขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร ซึ่งมีเพลาเหล็กหนา 4 และ 6 มิลลิเมตรขนาดเท่ากับหน้าตัดของคานยื่น ซึ่งมีการเชื่อมยึดเพลาเหล็กของคานหลักและคานยื่นทั้ง 4 ด้านเพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อระหว่างคานหลักและคานยื่น และให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อปลายคานยื่นคอนกรีต ทั้งนี้ใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 7 ตัวอย่างทดสอบ

2. ศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพลาเหล็ก โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดคานหลักและคานยื่นคอนกรีตสำเร็จรูป และแบบจำลองที่เป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของคานยื่นที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร และขนาดหน้าตัด 250x500 ตารางมิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาคครอบคลุมตัวแปรต่างๆดังนี้ ขนาดของหน้าตัดคาน ขนาดของเหล็กเสริม และความหนาของเพลาเหล็ก

### 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1. มีความเข้าใจด้านพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป

2. เป็นแนวทางในการออกแบบรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูปให้มีความปลอดภัย



## 1.5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานศึกษาในด้านพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ลักษณะการวิบัติของรอยต่อและการออกแบบรอยต่อของคานคอนกรีตสำเร็จรูปในอดีต มีรายละเอียดดังนี้

โกวิท ฉันทจิตร [1] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการรับโมเมนต์ค้ำของรอยต่อคานคอนกรีตสำเร็จรูปที่ออกแบบเป็นแบบคานช่วงเดียว โดยทำการทดสอบคานตัวอย่าง 3 รูปแบบ ได้แก่ คานที่มีรอยต่อแบบการเชื่อมที่ปลายเหล็กเสริมของคานคอนกรีตสำเร็จรูปให้ติดกับเหล็กเสริมของเสา คานที่มีรอยต่อแบบที่ใช้เหล็กเสริมทาบกับเหล็กเสริมของคานคอนกรีตสำเร็จรูปที่ยื่นออกมาทั้ง 2 ข้างแล้วเชื่อมติดกัน และคานช่วงเดียวธรรมดาวางลงบนฐานรองรับ โดยคานตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด 150x250 ตารางมิลลิเมตร ยาว 3000 มิลลิเมตร ซึ่งคานคอนกรีตสำเร็จรูปทั้ง 3 ตัวอย่างได้ติด Strain Gauge ไว้ที่กึ่งกลางของคานคอนกรีตสำเร็จรูปและบริเวณรอยต่อ การทดสอบทำโดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลางของคานคอนกรีตสำเร็จรูปจนเกิดการวิบัติของคานคอนกรีตสำเร็จรูป ผลการทดสอบพิจารณาการแอ่นตัวและค่าโมเมนต์ค้ำของคานตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบการเชื่อมของเหล็กเสริมระหว่างคานกับเสาสามารถรับโมเมนต์ได้ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวช่วยให้การออกแบบขนาดของคานให้ประหยัดขึ้นได้ โดยต่างจากหลักการออกแบบคานที่มีรอยต่อโดยทั่วไปที่สมมติให้รอยต่อดังกล่าวไม่สามารถรับโมเมนต์ได้ จึงทำให้ขนาดของคานที่ได้จากการออกแบบมีขนาดใหญ่

จารุวัฒน์ ฉาวโรไพศาลชีวะ [2] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับเสาและคานยื่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยทำการทดสอบตัวอย่างเสาขนาดหน้าตัด 150x150 ตารางมิลลิเมตร ยาว 2350 มิลลิเมตร และคานยื่นขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกันด้วยเพลาเหล็กที่มีขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กเดี่ยวยึดติดกับเพลาเหล็ก และมีการติด Strain Gauge ฝังลงในเสาและคานยื่น ซึ่งออกแบบรอยต่อให้รับแรงเฉือนเป็นหลัก การทดสอบดำเนิน โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ปลายของคานยื่น ไปจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ผลการทดสอบพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมหมุนบริเวณรอยต่อ พฤติกรรมและความสามารถในการรับโมเมนต์ของรอยต่อ การศึกษามีการพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า

ขนาดของโมเมนต์จะส่งผลกระทบต่อรอยต่อระหว่างเสาและคานยื่นโดยตรง การวิบัติที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อมาจากการเสียรูปของเพลทเหล็กในลักษณะการโป่งออก และพบว่า การเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นเหล็กและขนาดของเหล็กเสริมจะเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถการรับโมเมนต์ได้มากขึ้น

จิราชัย เลาหสมพลเลิศ [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเชื่อมประสานด้วยคอนกรีตสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป โดยทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร เชื่อมต่อบริเวณปลายคานด้วยการงอเหล็กเสริมที่ปลายคาน 90 องศา เพื่อทาบทองขึ้นส่วนเข้าด้วยกัน โดยมีความยาวของรอยต่อเท่ากับ 200 และ 300 มิลลิเมตร มีการติด Strain gauge ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อและใช้คอนกรีตเป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อเป็นรอยต่อ และตัวอย่างทดสอบที่เป็นคานหล่อเนื้อเดียว การทดสอบเป็นการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ 2 จุดบริเวณกึ่งกลางของคาน การทดสอบทำโดยเพิ่มน้ำหนักจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ผลการทดสอบพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และพฤติกรรมของรอยต่อ ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเมื่อเปรียบเทียบกับคานหล่อเนื้อเดียวมีค่า 46% สำหรับคานที่ใช้ความยาวของรอยต่อ 200 มิลลิเมตร และ 94% สำหรับคานที่ใช้ความยาวของรอยต่อ 300 มิลลิเมตร โดยมีการวิบัติที่รอยต่อ

นพดล บุญกล่อม [4] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างเสาและคาน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้าง และลักษณะการวิบัติบริเวณรอยต่อระหว่างเสากับคาน โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ ตัวอย่างทดสอบที่มีรอยต่อระหว่างเสากับคานคอนกรีตที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างทดสอบที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็กระหว่างเสากับคานคอนกรีต และตัวอย่างทดสอบที่มีเพลทเหล็กเป็นรอยต่อระหว่างเสากับคานและใช้คอนกรีตเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างรอยต่อ ซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างการทดสอบใช้เสาขนาด 150x150 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1800 มิลลิเมตร มีรอยต่อสูงเหนือจากพื้น 450 มิลลิเมตร และคานยื่นออกจากรอยต่อ 2 ข้าง ขนาดของคานยื่นข้างละ 150x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร การทดสอบจะเป็นการให้แรงกระทำในแนวราบแก่เสา จนกระทั่งถึงระยะการเคลื่อนตัวบริเวณปลายเสาตามที่กำหนด ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างทดสอบที่หนึ่งมีประสิทธิภาพในการรับโมเมนต์ดัดของรอยต่อมากที่สุดและมีลักษณะการวิบัติที่เสา ตัวอย่างทดสอบที่สองมีประสิทธิภาพในการรับโมเมนต์ดัดได้ 79% ของแบบแรกและมีลักษณะการวิบัติที่เสา และตัวอย่างสุดท้ายรับโมเมนต์ดัดได้ 52% โดยมีลักษณะการวิบัติที่รอยต่อ

ปรัชญา ยอดคำรงค์ [5] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสา คอนกรีต โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต 2 รูปแบบ ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริม ต่อทาบ และตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กเสริมต่อทาบ ทั้ง 2 รูปแบบมีขนาดหน้าตัด 200x300 ตาราง มิลลิเมตร ยาว 1400 มิลลิเมตร แรงกระทำสลับติดกระทำบริเวณปลายเสา ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กเสริมต่อทาบจะมีค่าความเหนียวน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริม ต่อทาบ ทำให้เสามีความอ่อนตัวและสามารถเคลื่อน ไปด้านข้างได้มาก สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มี เหล็กเสริมต่อทาบเมื่อเสาเคลื่อนตัวไปด้านข้างสุดกำลังของแรงจะลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดการทรุด ตัวและเกิดการวิบัติแบบคัดเฉือน

พลกฤต อนุปกิจ [6] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงค้ำและลักษณะการวิบัติ ของเสาและคานสำเร็จรูปอัดแรงภายในแบบไร้การยึดเหนี่ยว โดยมีการทดสอบคานและเสา สำเร็จรูปร่วมกับการทำนายพฤติกรรมของชิ้นส่วนคานและเสาโดยโปรแกรมDFLEX ตัวอย่างเสา และคานสำเร็จรูปที่ใช้ถูกลดขนาดจากขนาดจริง จากผลการทดสอบเสาและคานสำเร็จรูปมี พฤติกรรมการวิบัติภายใต้แรงค้ำก่อนที่คอนกรีตจะเกิดการระเบิด สภาพะวิบัติของเสาสำเร็จรูป เกิดขึ้นเมื่อ Curvature ของหน้าตัดเสามากพอ โดยหน้าตัดคอนกรีตบริเวณผิวรับแรงอัดเกิดการอัด ระเบิด แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างมีความเหนียว จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับค่าที่ได้จาก การวิเคราะห์ด้วย โปรแกรม พบว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมของคาน และเสาสำเร็จรูป

ภาศิณ ลอยเจริญ [7] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเชื่อมประสานด้วย คอนกรีต ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดหน้าตัด 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1375 มิลลิเมตร เชื่อมต่อด้วยรอยต่อทั้งหมด 5 รูปแบบ ได้แก่ แบบเนื้อเดียวกัน รอยต่อที่ใช้เหล็ก เสริมต่อเนื่อง รอยต่อที่ใช้เหล็กเสริมวางทาบ รอยต่อที่งอปลายเหล็กเสริม 90 องศา และรอยต่อที่ เชื่อมทาบเหล็กเสริม โดยมีขนาดของรอยต่อ 250 มิลลิเมตรและใช้คอนกรีตเป็นตัวเชื่อมประสาน ทดสอบโดยการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ 2 จุดบริเวณกึ่งกลางคานและเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนเกิด การวิบัติ ผลการทดสอบพิจารณากำลังการรับโมเมนต์ค้ำและลักษณะของการวิบัติ ผลการศึกษา พบว่ารอยต่อที่เชื่อมทาบเหล็กเสริมมีความสามารถในการรับโมเมนต์ค้ำและลักษณะการวิบัติ ใกล้เคียงกับแบบหล่อเนื้อเดียว สำหรับรอยต่อแบบใช้การทาบเหล็กเสริมจะมีความสามารถในการ รับโมเมนต์ค้ำได้ในระดับหนึ่งและลักษณะวิบัติเป็นแบบบีบอัดของคอนกรีต และรอยต่อแบบใช้เหล็ก เสริมต่อเนื่องจะมีความสามารถในการรับโมเมนต์น้อยและเกิดการวิบัติโดยแรงยึดเหนี่ยว

รัฐพล เกติยศ [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างเสากับคานคอนกรีต โดยได้ทำการทดสอบรอยต่อระหว่างเสากับคานจำนวน 2 ตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำสลับทิศกันเพื่อจำลองการเคลื่อนไหวจากการเกิดแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบแรกเป็นรอยต่อรับแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบที่สองเป็นรอยต่อที่ใช้เหล็กเสริมวางทาบ ทั้ง 2 ตัวอย่างมีการแตกคอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดหน้าตัดคาน 150x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 3000 มิลลิเมตร และขนาดเสา 200x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 2000 มิลลิเมตร มีรอยต่ออยู่บริเวณกึ่งกลางของเสาและคาน โดยยึดปลายคานไว้กับฐานรองรับ แรงสลับทิศที่จะกระทำบริเวณปลายเสา ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างมีคุณสมบัติทางด้านกำลังที่ใกล้เคียงกันและเกิดการวิบัติด้วยแรงดัด

อานนท์ วงษ์แก้ว [9] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างเสากับคานเหล็กชนิดเชื่อมแผ่นปีกคาน โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อ โดยสร้างแบบจำลองรอยต่อระหว่างเสากับคานภายใต้แรงกระทำที่สลับทิศเพื่อจำลองลักษณะของการเกิดแผ่นดินไหวจำนวน 2 แบบจำลอง แบบจำลองแรกใช้รอยต่อแบบสลักเกลียว แบบจำลองที่สองใช้รอยต่อแบบการเชื่อม ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ใช้รอยต่อแบบการเชื่อมมีการกระจายตัวของความเค้นที่สม่ำเสมอ และมีประสิทธิภาพในการถ่ายแรงกระทำที่สลับทิศลงสู่เสาได้ดีกว่ารอยต่อแบบสลักเกลียว

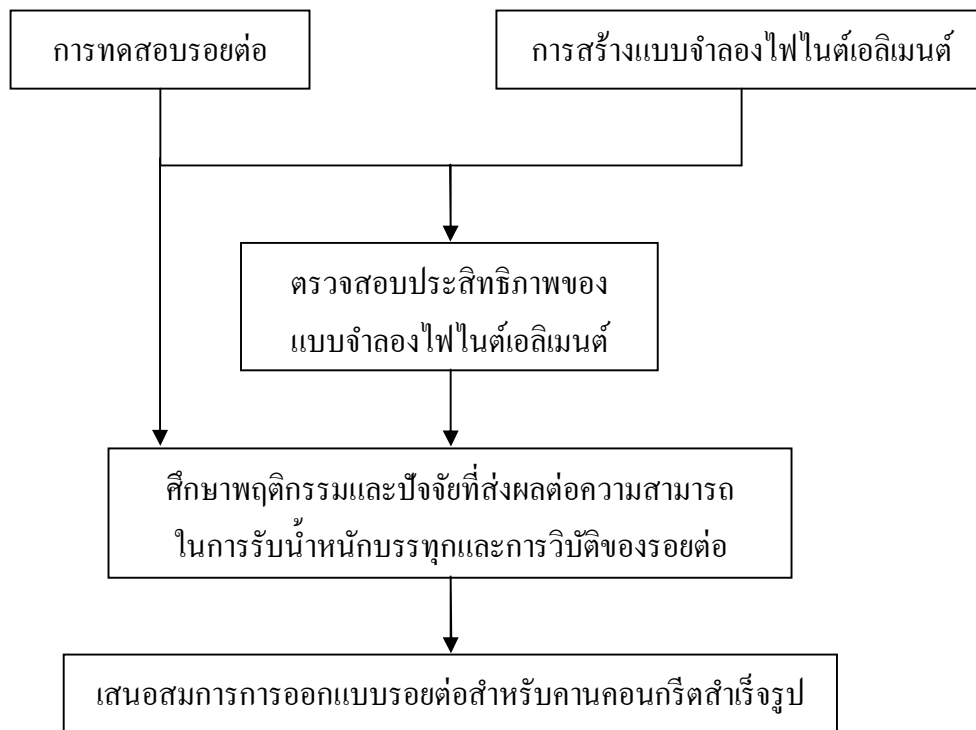
Alcocer [10] ได้ทำการศึกษารอยต่อระหว่างเสาและคานยื่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยได้ทำการทดสอบรอยต่อระหว่างเสากับคานยื่นคอนกรีตสำเร็จรูปจำนวน 2 ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำที่สลับทิศกัน ทั้งแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง เพื่อจำลองการเคลื่อนไหวให้เหมือนกับการเกิดแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบแรกใช้การงอเหล็กเสริมที่ปลายคานคอนกรีตสำเร็จรูป 90 องศา ยื่นเข้าไปในเสาบริเวณรอยต่อและมีเหล็กปลอกยึดไว้ด้วยกัน ตัวอย่างทดสอบที่สองใช้เหล็กเสริมงอเป็นรูปตัวยูที่ปลายคานคอนกรีตสำเร็จรูปยื่นเข้าไปในเสาบริเวณรอยต่อและมีเหล็กเสริมของเสาลอดผ่าน ทั้ง 2 ตัวอย่างมีการแตกคอนกรีตเชื่อมระหว่างเสาและคานยื่น เสาที่ใช้ขนาด 500x500 ตารางมิลลิเมตร ยาว 4000 มิลลิเมตร และคานยื่นขนาด 500x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 5120 มิลลิเมตร โดยมีรอยต่ออยู่กึ่งกลางทั้งของเสาและของคานยื่น โดยปลายคานยื่นทั้ง 4 จะวางไว้บนฐานรองรับ แรงกระทำสลับทิศจะกระทำบริเวณปลายของเสา ผลการศึกษาพบว่าการใช้เหล็กเสริมที่งอเป็นรูปตัวยูบริเวณคานคอนกรีตสำเร็จรูปยื่นเข้าไปในเสา ทำให้รอยต่อสามารถรับแรงกระทำที่สลับทิศได้ดีกว่าแบบงอเหล็กเสริมที่ปลายคานคอนกรีตสำเร็จรูป 90 องศา ทั้งนี้

เหล็กเสริมที่จะใช้ในรอยต่อจะต้องมีความแข็งแรงสูงเพื่อป้องกันการเกิดสภาพพลาสติกภายใต้แรงกระทำสลับทิศ

จากการทบทวนวรรณกรรมด้านการศึกษาคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างของรอยต่อคานคอนกรีต พบว่าการศึกษาด้านรอยต่อแบบเพลาเหล็กยังมีข้อจำกัดอยู่มาก ดังนั้นการศึกษานี้จึงช่วยขยายความเข้าใจด้านพฤติกรรมของรอยต่อคานคอนกรีตแบบเพลาเหล็ก

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ได้แบ่งการดำเนินการออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ การทดสอบรอยต่อคานคอนกรีต การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการเสนอสมการการออกแบบรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นชุดคานหลักกับคานยื่นคอนกรีตที่ใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กและตัวอย่างทดสอบที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อศึกษาคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้าง รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อในเบื้องต้น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในด้านการทำนายพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของรอยต่อ ทั้งนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ในการศึกษาคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างของรอยต่อสำหรับหน้าตัดคานขนาดต่างๆ ในด้านปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อ ผลการศึกษาจะนำไปสู่การเสนอสมการการออกแบบรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป ทั้งนี้สามารถสรุปรายละเอียดของการทำวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

## บทที่ 2

### การทดสอบรอยต่อแบบเพลาเหล็ก

การทดสอบรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีต เป็นการศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการวิบัติ เพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อแบบเพลาเหล็ก ผลการทดสอบในส่วนนี้ยังใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อ เพื่อเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเพลาเหล็กบริเวณรอยต่อ รวมทั้งลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพลาเหล็ก

#### 2.1 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นขูดคานหลักกับคานยื่น โดยเป็นตัวอย่างทดสอบที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันและคานคอนกรีตซึ่งยึดกันด้วยรอยต่อแบบเพลาเหล็ก สำหรับคานคอนกรีตที่ใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กจะใช้เพลาเหล็กขนาดเท่ากับหน้าตัดของคานยื่น โดยใช้เพลาเหล็ก 2 ชุด เพลาเหล็กชุดหนึ่งจะเชื่อมกับเหล็กที่ทะลุผ่านหน้าตัดของคานหลัก อีกชุดหนึ่งเชื่อมกับเหล็กเสริมในคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้รอยต่อแบบเพลาเหล็กคือการเชื่อมยึดเพลาเหล็ก ปิดปลายของคานยื่นกับชุดเพลาเหล็กบริเวณกึ่งกลางของคานหลักทั้ง 4 ด้านเพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อระหว่างคานหลักและคานยื่น

รายละเอียดของชุดการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.2 ในส่วนของคานหลักยึดปลายทั้งสองข้างเข้ากับที่รองรับ ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อปลายคานยื่นคอนกรีตสำเร็จรูป การศึกษานี้ได้กำหนดตัวแปรในการศึกษาคือ ขนาดของหน้าตัดคาน ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง และความหนาของเพลทเหล็ก หน้าตัดคานหลักมีขนาด 300x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร หน้าตัดของคานยื่นมี 2 ขนาด คือขนาด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร

โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็กและรอยต่อแบบเพลทเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับคานหล่อเนื้อเดียว และรูปที่ 2.4 สำหรับคานที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก โดยเพลทเหล็กที่ใช้มีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตรขนาดเท่ากับหน้าตัดของคานยื่น เหล็กปลอกของคานหลักและคานยื่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 150 มิลลิเมตร ทั้งนี้สัญลักษณ์ในการทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสรุปดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยกำหนดสัญลักษณ์ B1 และ B2 หมายถึงตัวอย่างการทดสอบคานคอนกรีตที่มีหน้าตัดของคานยื่นขนาด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เช่น B1 12-4 หมายถึงตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดของคานยื่นขนาด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และใช้รอยต่อแบบเพลทเหล็กมีความหนา 4 มิลลิเมตร



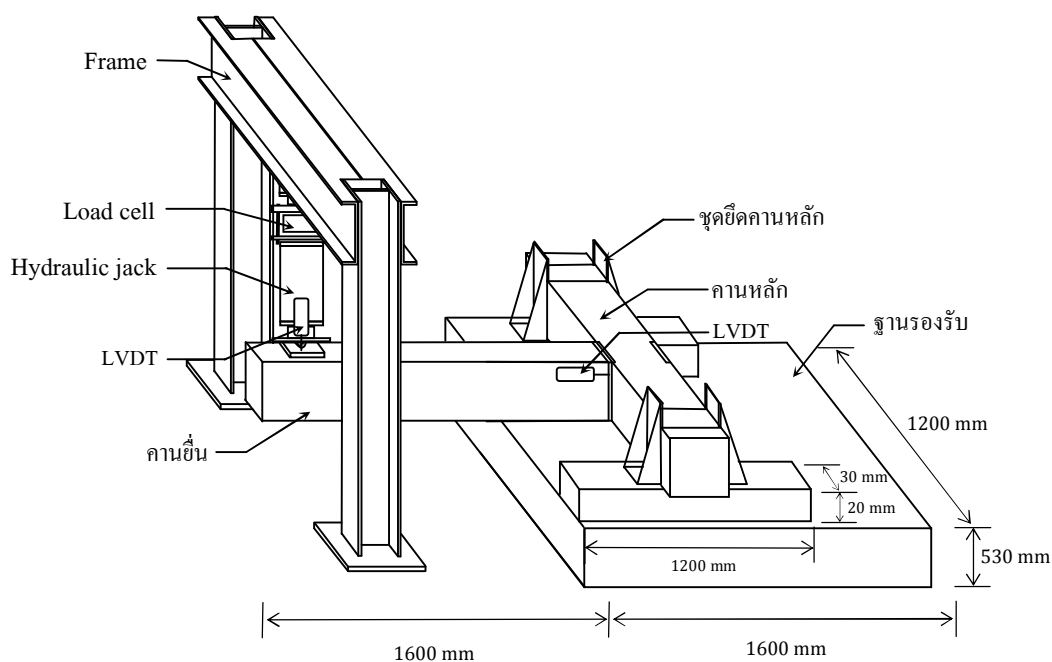
คานคอนกรีตที่ใช้รอยต่อแบบเพลทเหล็ก



เพลทเหล็กบริเวณรอยต่อ

รูปที่ 2.1 ลักษณะของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก

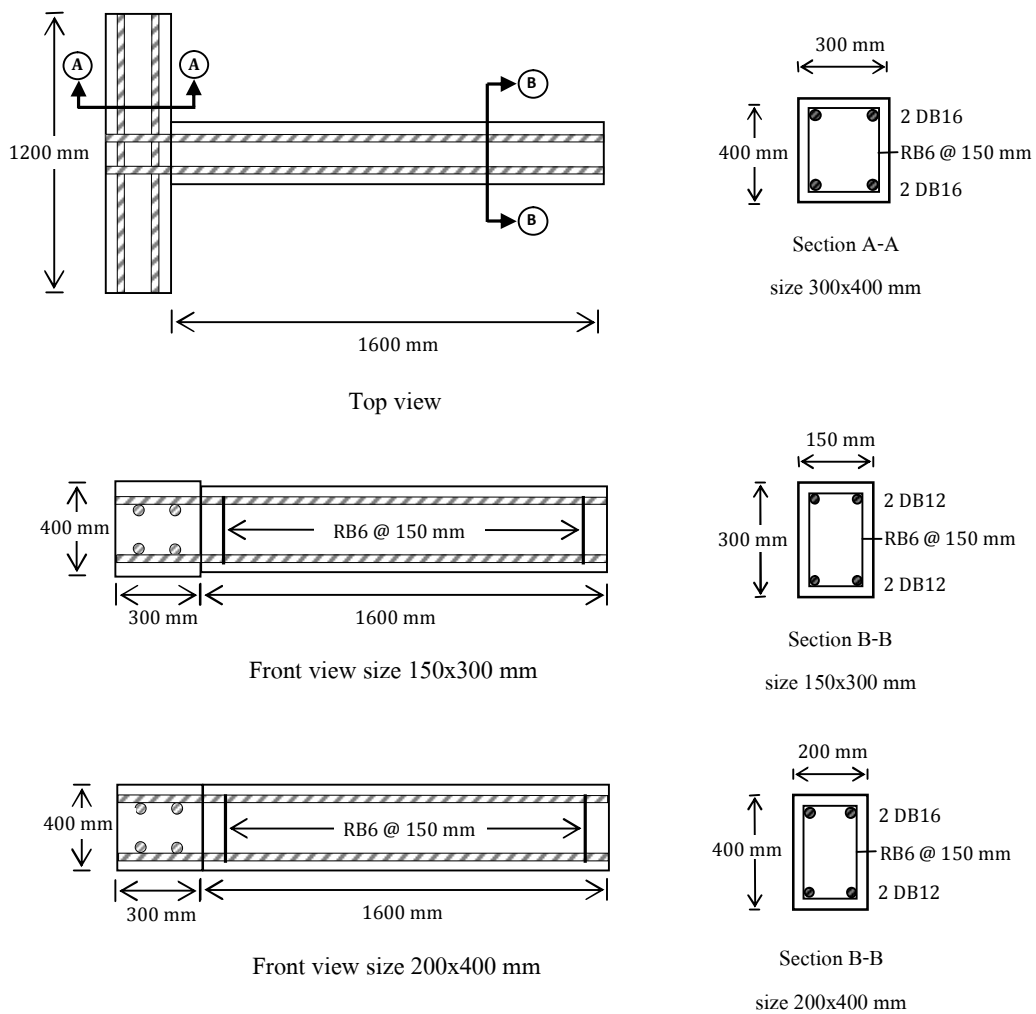




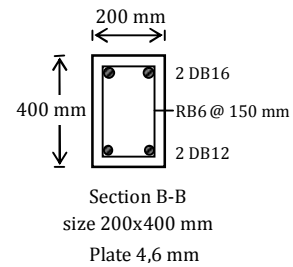
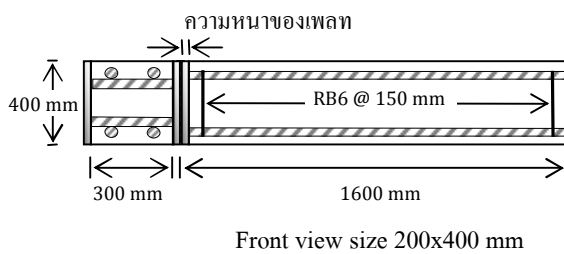
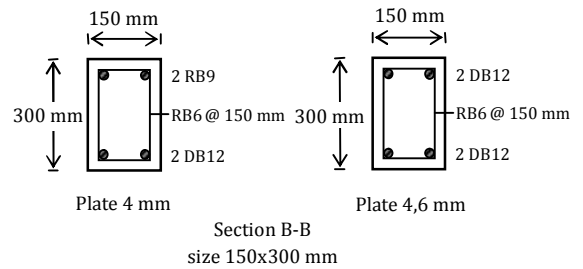
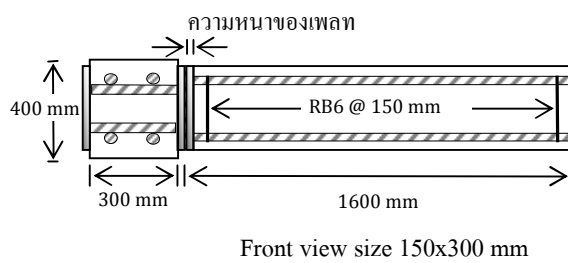
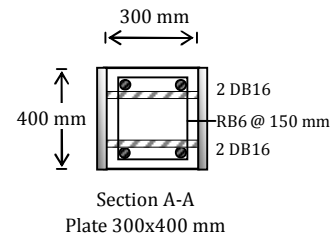
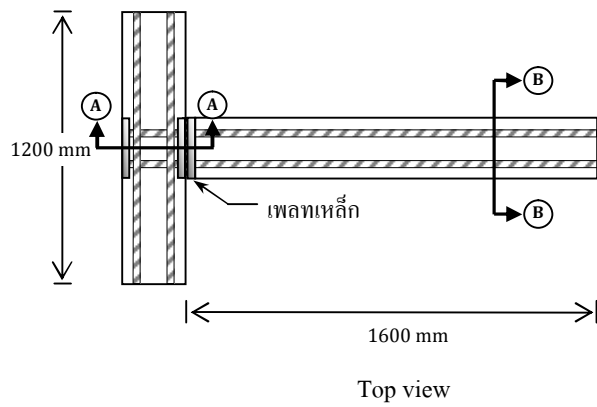
รูปที่ 2.2 ลักษณะคานคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบดังกล่าวได้ใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติดังนี้ คอนกรีตมีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 260 ksc จากตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานจำนวน 6 ตัวอย่างทดสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 และ 16 มิลลิเมตร เป็นเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 โดยมีกำลังรับแรงดึงทดสอบ ณ จุดครากเท่ากับ 4750 ksc สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และกำลังรับแรงดึงทดสอบ ณ จุดครากเท่ากับ 4500 ksc สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ส่วนเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 9 มิลลิเมตร เป็นเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SR24 โดยมีกำลังการรับแรงดึงทดสอบที่จุดครากเท่ากับ 3200 ksc และใช้เพลทเหล็กชั้นคุณภาพ HR1 ขนาดหน้าตัดของเพลทเหล็กเท่ากับ 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร โดยมีกำลังรับแรงดึง ณ จุดครากเท่ากับ 3800 ksc (อ้างอิงตามผลการทดสอบของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ[2]) สำหรับวัสดุเชื่อมเกรด E60 มีกำลังรับแรงดึง ณ จุดครากเท่ากับ 4200 ksc

หากพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของหน้าตัดคานโดยใช้การออกแบบตามข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร โดยใช้วิธีหน่วยแรงใช้งาน ตามคุณสมบัติของวัสดุ ดังกล่าวได้กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกในการออกแบบของคานหล่อเนื้อเดียวขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร มีค่า 1,100 kg และคานขนาด 200x400 ตารางมิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 2,500 kg



รูปที่ 2.3 คานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว



รูปที่ 2.4 คานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	ขนาดคานยื่น กว้างxลึกxยาว (มิลลิเมตร)	ขนาดของ เหล็กเสริมรับแรงอัด (มิลลิเมตร)	ขนาดของ เหล็กเสริมรับแรงดึง (มิลลิเมตร)	ความหนาของ เพลทเหล็ก (มิลลิเมตร)
B1 12	150x300x1600	12	12	-
B2 16	200x400x1600	12	16	-
B1 9-4	150x300x1600	12	9	4
B1 12-4	150x300x1600	12	12	4
B1 12-6	150x300x1600	12	12	6
B2 16-4	200x400x1600	12	16	4
B2 16-6	200x400x1600	12	16	6

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในช่วงของการเตรียมตัวอย่างทดสอบ เมื่อเตรียมโครงของเหล็กเสริมเสร็จแล้ว ตัวอย่างทดสอบมีการติดตั้ง Strain gauge ที่มีความยาว 5 มิลลิเมตรสำหรับศึกษาพฤติกรรมความเครียดของเหล็กเสริมและเพลทเหล็กบริเวณรอยต่อขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุกโดยใช้ Strain gauge ที่มีความต้านทานภายใน 120  $\Omega$  ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 1  $\mu\epsilon$  การเตรียมตัวอย่างทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว และ ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก

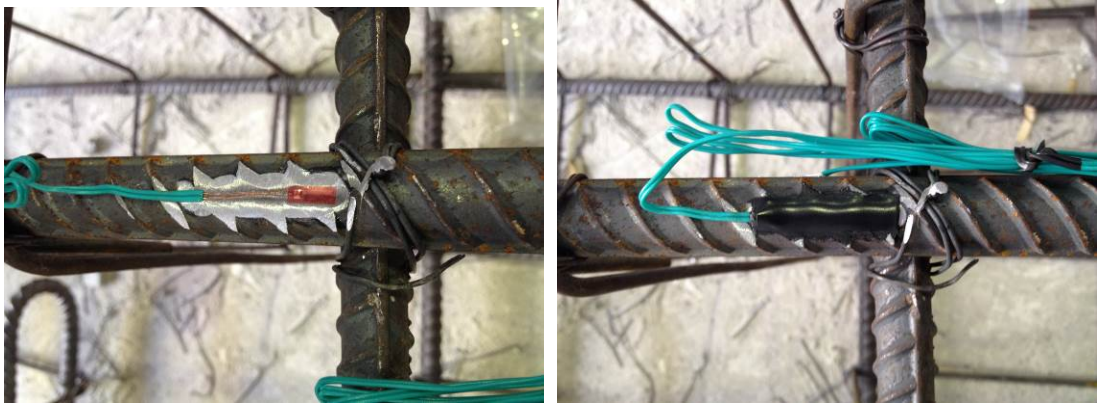
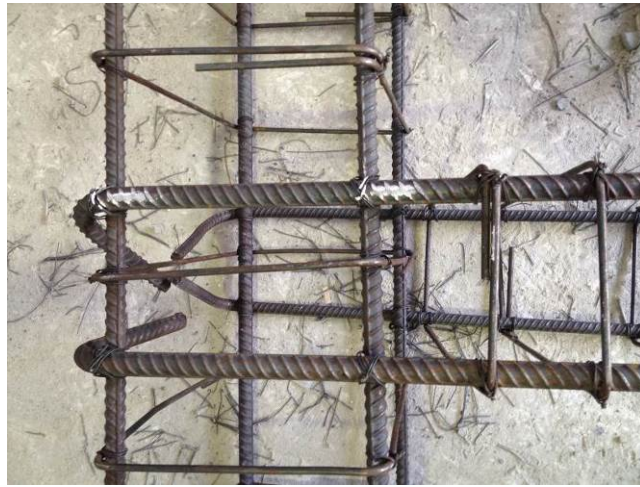
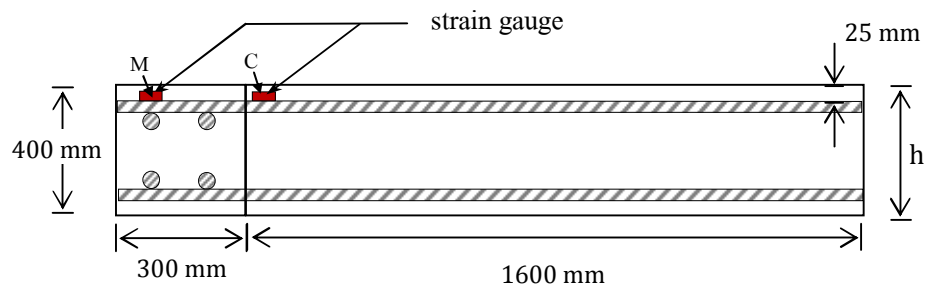
### 2.2.1 ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว

การเตรียมตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว ซึ่งจะเป็นการหล่อคอนกรีตพร้อมกันทั้งคานหลักและคานยื่น หลังจากการเตรียมชุดเหล็กเสริมทั้ง 2 ชิ้นส่วนแล้ว นำชุดเหล็กเสริมของคานยื่นไปเกี่ยวกับชุดเหล็กเสริมของคานหลักบริเวณกึ่งกลางของคานหลักดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากนั้นปรับพื้นผิวของเหล็กเสริมรับแรงดึงให้เรียบเพื่อติด Strain gauge จำนวน 2 ตัวบริเวณรอยต่อระหว่างคานหลักและคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยการปรับพื้นผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่ต้องการให้เรียบและสะอาด จากนั้นทากาวติด Strain gauge พร้อมใส่อากาศระหว่าง Strain gauge กับเหล็กเสริมออกโดยใช้แผ่นพลาสติกและจัดสาย Strain gauge ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม แล้วนำวัสดุเคลือบผิวมาปิดทับอีกครั้งเพื่อป้องกันความชื้นและความเสียหายจากการหล่อคอนกรีต

หลังจากเตรียมแบบคานที่ใช้ในการหล่อคอนกรีตเสร็จแล้วจึงนำชุดเหล็กเสริมวางใส่ในแบบที่เตรียมไว้ พร้อมทั้งรองเหล็กเสริมด้วยลูกปูน โดยมีระยะหุ้มคอนกรีต 25 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.7 และใส่หุยกสำหรับการขนย้ายในการติดตั้ง ในขณะที่เทคอนกรีตจะต้องระมัดระวังการจี้คอนกรีตใกล้กับบริเวณที่ติด Strain gauge เนื่องจากอาจจะเกิดความเสียหายต่อ Strain gauge และสาย Strain gauge ได้ ภายหลังจากการหล่อคอนกรีตให้คอนกรีตแข็งตัวจนครบ 3 วันแล้วจึงถอดแบบออกและบ่มคอนกรีตโดยการรดน้ำต่อจนครบ 28 วัน



รูปที่ 2.5 ลักษณะเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งและการติดตั้ง Strain gauge ของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว



รูปที่ 2.7 การหล่อตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว

## 2.2.2 ตัวอย่างคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก

การเตรียมตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก ประกอบขึ้นจาก 2 ชั้นส่วนคือ ชั้นส่วนของคานหลักและชั้นส่วนของคานยื่น มาเชื่อมต่อกันบริเวณกึ่งกลางของคานหลักด้วยรอยต่อแบบเพลทเหล็ก โดยที่เพลทเหล็กถูกเชื่อมติดกับเหล็กเสริมในคานยื่นด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งถูกเชื่อมติดกับชุดเพลทเหล็กในคานหลักดังแสดงในรูปที่ 2.8 การเชื่อมในตัวอย่างทดสอบต่างๆเป็นรอยเชื่อมหนา 5 มิลลิเมตร ทั้งนี้ได้เชื่อมยึดทั้ง 2 ชั้นส่วนเข้าด้วยกันก่อนติด Strain gauge (ก่อนการเทคอนกรีต) เนื่องจากตำแหน่งที่ติด Strain gauge อยู่ใกล้กับขอบของเพลทเหล็กซึ่งอาจจะได้รับความร้อนจากการเชื่อมและทำให้ Strain gauge เกิดความเสียหายได้ ซึ่งตำแหน่งการติด Strain gauge จะติดบริเวณเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อ 2 ตัว บริเวณเพลทเหล็กรับแรงดึง 4 ตัว และเพลทเหล็กรับแรงอัด 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยการปรับพื้นผิวของเหล็กเสริมและเพลทเหล็กบริเวณที่ต้องการให้เรียบและสะอาด จากนั้นทากาวติด Strain gauge พร้อมใส่อากาศระหว่าง Strain gauge กับเหล็กเสริมออกโดยใช้แผ่นพลาสติกและจัดสาย Strain gauge ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม แล้วนำวัสดุเคลือบผิวมาปิดทับอีกครั้งเพื่อป้องกันความชื้นและความเสียหายจากการหล่อคอนกรีตลักษณะการติด Strain gauge แสดงในรูปที่ 2.10

หลังจากเตรียมแบบคานที่ใช้ในการหล่อคอนกรีตแล้วเสร็จจึงนำชุดเหล็กเสริมวางใส่ในแบบที่เตรียมไว้ โดยให้เพลทเหล็กอยู่ในตำแหน่งรอยต่อระหว่างคานหลักกับคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 2.11 จากนั้นทำการหล่อและบ่มคอนกรีตเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว





ชุดเพลทเหล็กของคานยื่น

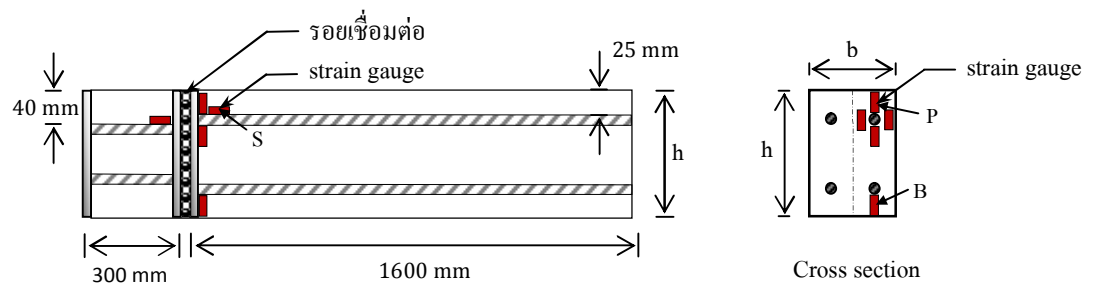


ชุดเพลทเหล็กของคานหลัก



ลักษณะของรอยต่อแบบเพลทเหล็ก

รูปที่ 2.8 ลักษณะเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งและการติด Strain gauge  
ของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก



ปรับผิวให้เรียบและสะอาด



ทาขาวติดสำหรับ Strain gauge



ติด Strain gauge พร้อมทั้งใส่ฟองอากาศ



ปิดทับด้วยวัสดุเคลือบผิว

รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการติด Strain gauge



ตำแหน่งการวางเพลทเหล็ก



รูปที่ 2.11 การหล่อตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็ก

## 2.3 การทดสอบ

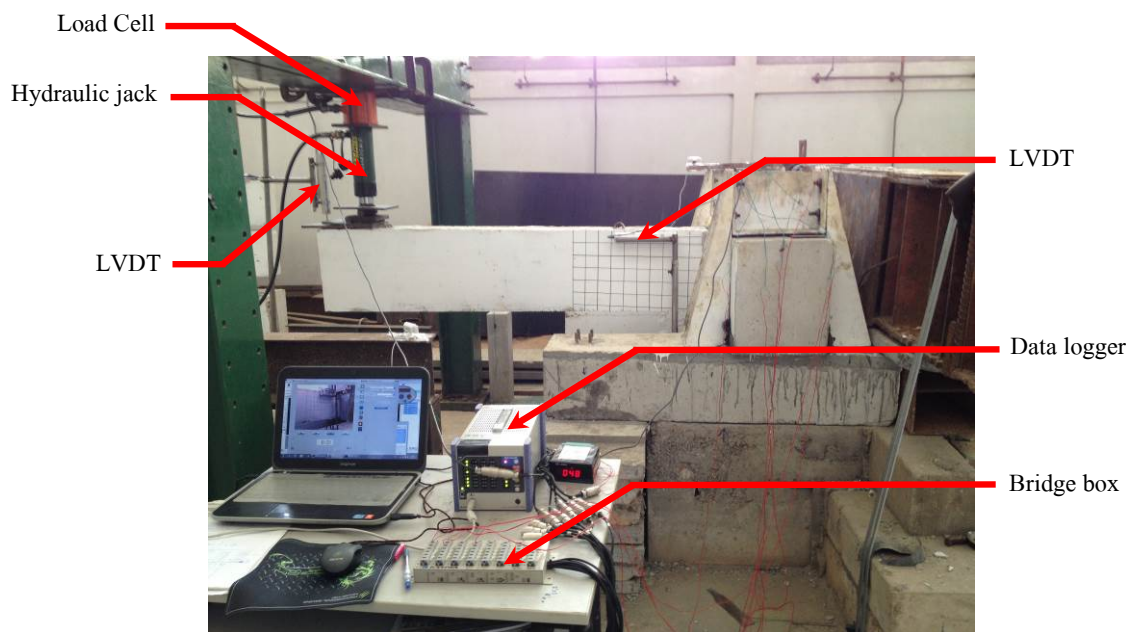
นำตัวอย่างทดสอบในส่วนของคานหลักมาตั้งบน Support และใช้ชุดเพลาเหล็ก ยึดบริเวณปลายคานหลักทั้งสองข้าง เพื่อให้เกิดลักษณะของคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 2.12 คานทดสอบมีการทาสีขาวลงบนพื้นผิวและตีตารางเพื่อช่วยต่อการสังเกตรอยแตกร้าว จากนั้นติดตั้ง Load Cell และ Hydraulic jack ขนาด 15 ตัน ซึ่งห่างปลายคานยื่น 150 มิลลิเมตร โดย Load Cell สามารถอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ละเอียดในระดับ 22.5 กิโลกรัม และติดตั้ง LVDT ที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง  $2.54 \times 10^{-3}$  มิลลิเมตร ณ ตำแหน่งบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อคานยื่น 1 ตัว เพื่อวัดค่าการแอ่นตัว และบริเวณรอยต่อรับแรงดึงอีก 1 ตัวเพื่อวัดค่าการแยกตัวของรอยต่อ

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ในส่วนต่างๆแล้วเสร็จต่อสาย Strain gauge เข้ากับ Bridge box แล้วเชื่อมต่อ Bridge box, Load cell และ LVDT เข้ากับเครื่อง Data logger เพื่อบันทึกข้อมูล ตำแหน่งและการติดตั้งชุดการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 2.13 หลังจากการติดตั้งคานหลักกับคานยื่น เข้ากับอุปกรณ์ในการวัดผลการทดสอบตามตำแหน่งแล้ว การทดสอบจะให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานยื่นบริเวณปลายคานยื่นแสดงในรูปที่ 2.13 โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอจนเกิดการวิบัติ โดยมีการบันทึกค่าของน้ำหนักบรรทุก ความเครียดของเพลาเหล็กและเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อ การแอ่นตัวของคานทุก 1 วินาที และเมื่อคานยื่นเคลื่อนตัวลงทุก 10 มิลลิเมตรจะหยุดการให้น้ำหนักบรรทุกเพื่อตรวจสอบการแยกตัวของรอยต่อ ลักษณะของรอยวิบัติต่างๆทั่วทั้งตัวอย่างทดสอบ



ชุดเพลาเหล็กยึดปลายคาน

รูปที่ 2.12 การทดสอบคานคอนกรีตสำเร็จรูป



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์วัดผลการทดสอบ

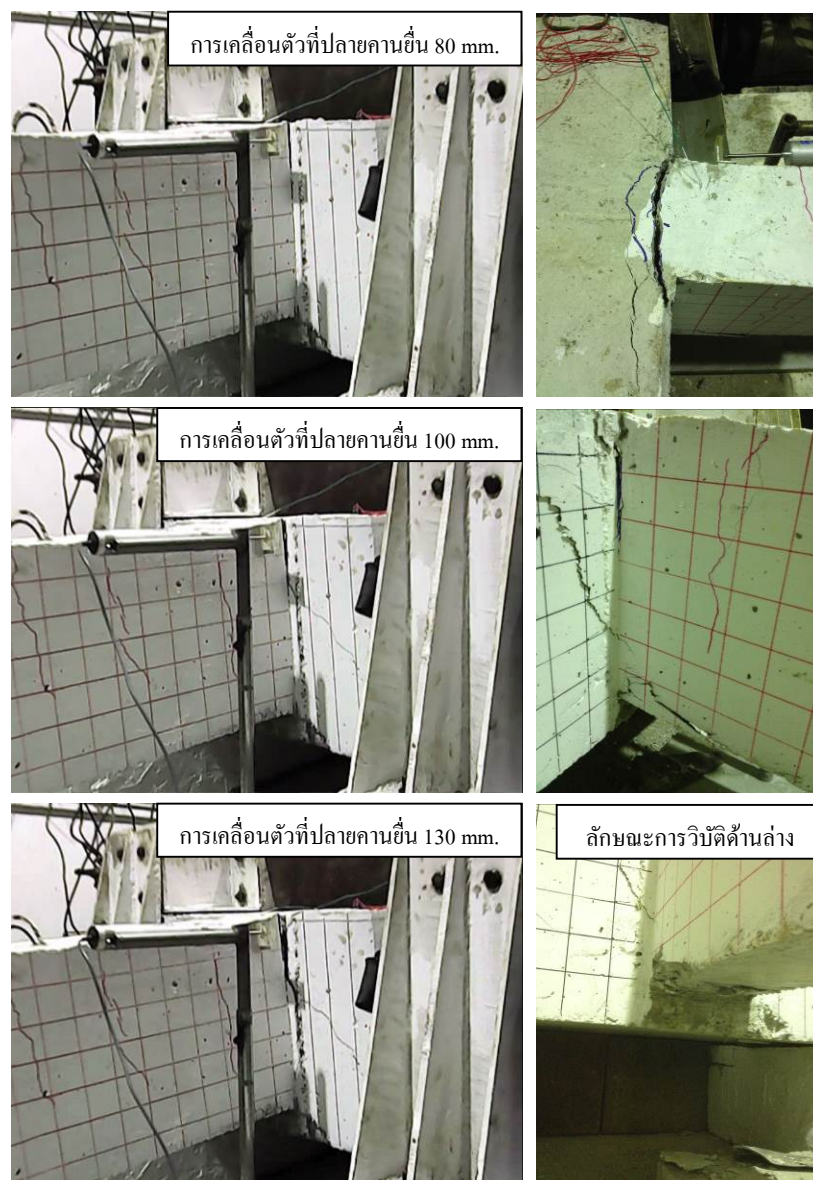
## 2.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ใช้ในการการศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและการวิบัติของรอยต่อแบบเพลาเหล็ก โดยมีรายละเอียดผลการทดสอบได้แก่ พฤติกรรมการวิบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเพลาเหล็กบริเวณรอยต่อ

### 2.4.1 พฤติกรรมการวิบัติ

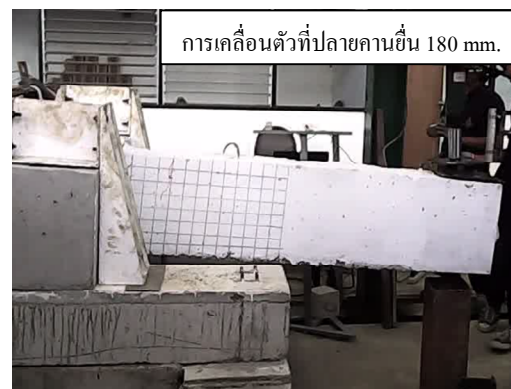
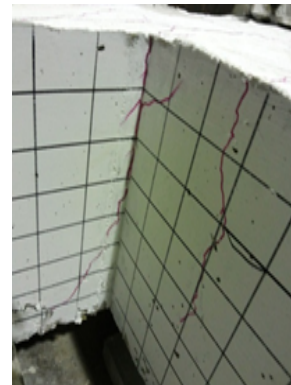
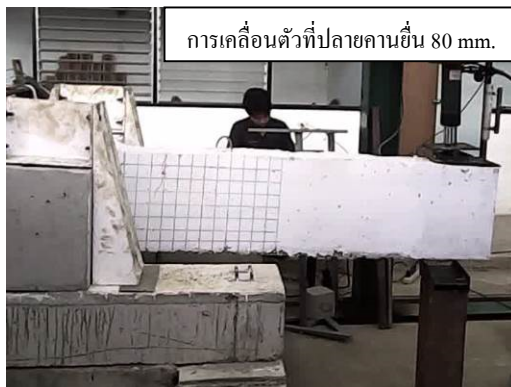
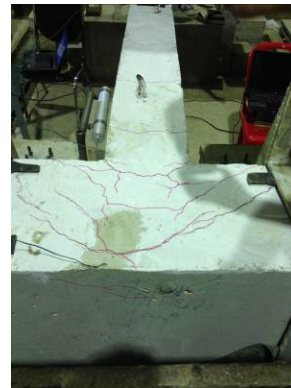
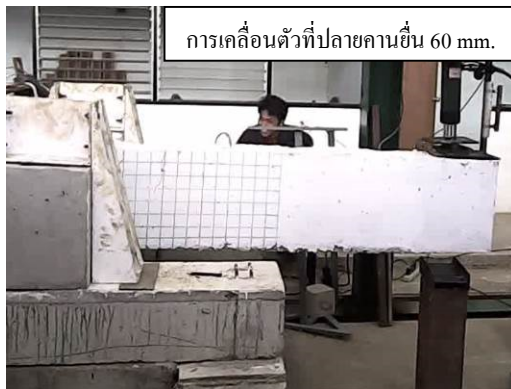
ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียวกัน B1 12 และ B2 16 ในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่นแสดงดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ โดยลักษณะการวิบัติของคานทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน ภายใต้การให้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นคานคอนกรีตแบบหล่อเนื้อเดียวจะเกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อด้านบนของคานหลัก เนื่องจากเกิดการส่งถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนไปยังรอยต่อผ่านทางเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมด้านบนบริเวณรอยต่อได้รับแรงดึงที่ส่งผ่านมาจะถ่ายแรงสู่เนื้อคอนกรีตโดยรอบ เมื่อการถ่ายแรงมากเกินไปกำลังต้านทานของเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตด้านบนของคานยื่นและคานหลักบริเวณรอยต่อเกิดรอยแตกร้าว ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยเหล็กเสริมจากคานยื่นซึ่งเกี่ยวกับเหล็กเสริมของคานหลักจึงทำให้มีแรงยึดรั้งระหว่างเหล็กเสริมรับแรงดึงกับคานหลักสูง เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการยึดตัวจะส่งผลให้เกิดรอยแยกเป็นชั้น ตลอดจนถึงด้านหลังของคานหลัก ทั้งนี้ในส่วนของท่อนคานยื่นซึ่งเป็นส่วนที่คอนกรีตรับแรงอัดจะเกิดแรงอัดจำนวนมากจนคอนกรีตด้านล่างบริเวณรอยต่อเกิดการแตกออก จากพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงลักษณะการถ่ายแรงที่สมบูรณ์ การแตกร้าวและการวิบัติเกิดในวงกว้างบริเวณรอยต่อ และเหล็กเสริมเกิดการครากอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาจากความเครียดในส่วนที่ 2.4.3

รายละเอียดการแตกร้าวและการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพททเหล็กในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่นแสดงดังรูปที่ 2.16 ถึงรูปที่ 2.20 ซึ่งคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพททเหล็ก โดยมากพบลักษณะความเสียหายของรอยต่อ โดยเริ่มจากการแยกออกระหว่างเพททเหล็กและคอนกรีต และแรงดึงในเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดแรงดึงกับเพททเหล็กและเหล็กเดือยในคานหลักบริเวณรอยต่อด้านบนจนทำให้เพททเหล็กเกิดการโก่งตัวออก การวิบัติจะเห็นชัดเจนเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ทำให้เกิดการแยกตัวออกจากกันระหว่างเพททเหล็กกับคอนกรีตตลอดแนว การแตกร้าวของคอนกรีตในคานยื่นและคานหลักเป็นเพียงการแตกร้าวขนาดเล็กเฉพาะบางบริเวณ จึงถือได้ว่าการวิบัติเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณรอยต่อแบบเพททเหล็กเป็นหลัก



รูปที่ 2.14 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว B1 12





รูปที่ 2.15 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว B2 16



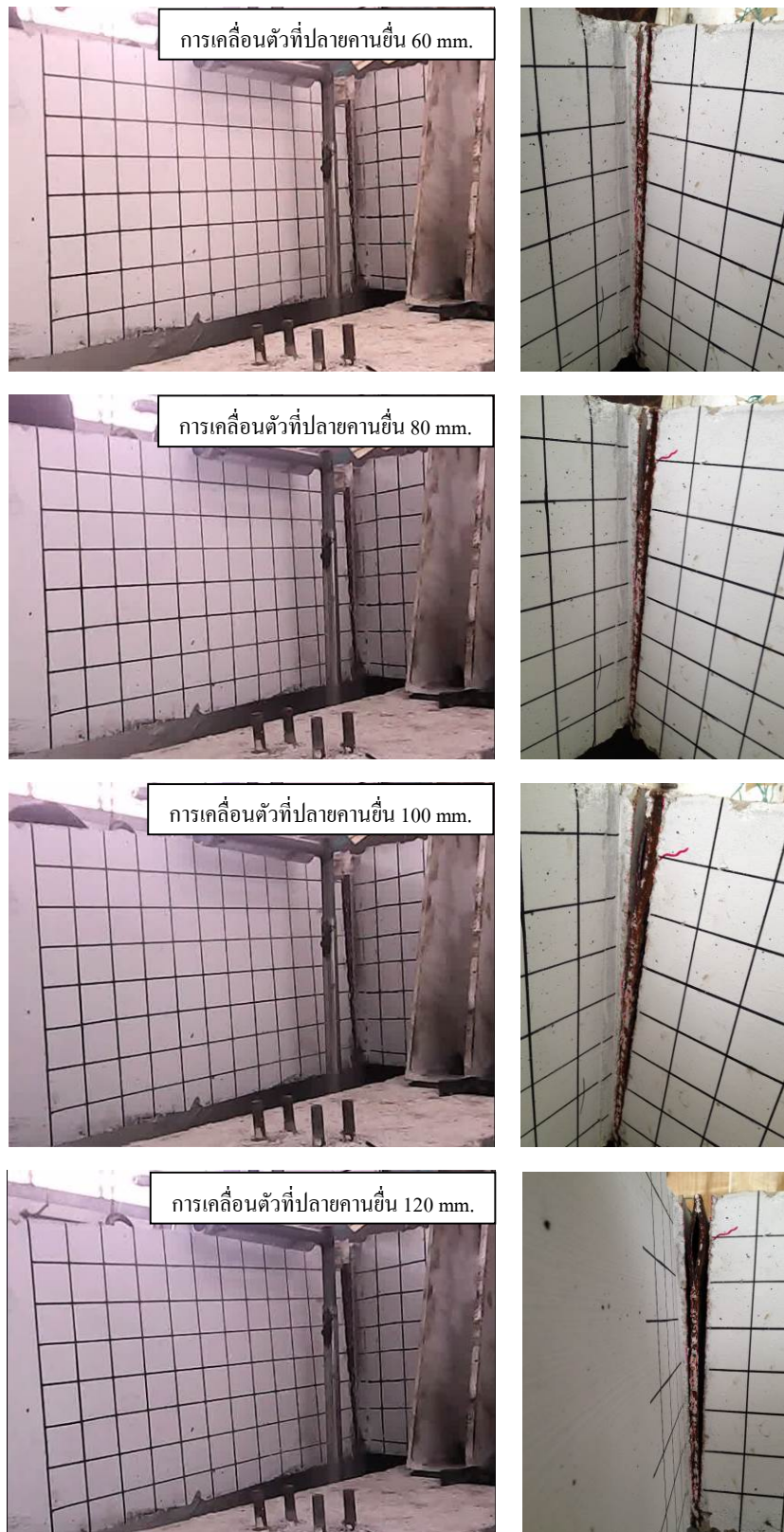
รูปที่ 2.16 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B1 9-4



รูปที่ 2.17 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B1 12-4



รูปที่ 2.18 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B1 12-6



รูปที่ 2.19 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B2 16-4



รูปที่ 2.20 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็ก B2 16-6

ลักษณะการวิบัติของชุดคานคอนกรีตต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.2 ทั้งนี้คานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็กพบลักษณะการวิบัติ 3 กรณี คือ

1) การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงซึ่งเกิดจากเหล็กเสริมได้รับแรงดึงที่สูงกว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก เหล็กเสริมเกิดการยืดตัวจนขาด การวิบัติลักษณะนี้จะเกิดร่วมกับรอยแตกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉพาะบริเวณใกล้รอยต่อเนื่องจากผลของแรงดึงในเหล็กเสริมแต่ไม่พบการแตกร้าวเป็นวงกว้าง ลักษณะการวิบัติของเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 2.21

2) การขาดของขอบเพลาเหล็กเกิดจากการที่เพลาเหล็กได้รับแรงดึงจากเหล็กเสริม ซึ่งเพลาเหล็กทำหน้าที่ถ่ายแรงดึงดังกล่าวจนเกิดการ โกงตัวบริเวณรอยเชื่อมระหว่างเหล็กเสริมรับแรงดึง เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกแรงดึงระหว่างเพลาเหล็กสูงขึ้นจนกระทั่งทำให้รอยเชื่อมด้านข้างของรอยต่อเกิดการฉีกขาดดังแสดงในรูปที่ 2.22

3) การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมเกิดจากรอยเชื่อมได้รับแรงดึงสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อม จึงเกิดการฉีกขาดดังแสดงในรูปที่ 2.23 ลักษณะดังกล่าวพบความเสียหายของเพลาเหล็กและรอยต่อค่อนข้างน้อย

ตารางที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	ลักษณะการวิบัติ
B1 12	การแตกร้าวของรอยต่อร่วมกับการครากของเหล็กเสริม
B2 16	การแตกร้าวของรอยต่อร่วมกับการครากของเหล็กเสริม
B1 9-4	การครากของเหล็กเสริม
B1 12-4	การขาดของขอบเพลาเหล็กร่วมกับ การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม
B1 12-6	การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม โดยพบการขาดของรอยเชื่อมเพียงเล็กน้อย
B2 16-4	การขาดของขอบเพลาเหล็ก
B2 16-6	การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม



รูปที่ 2.21 การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากตัวอย่าง B19-6



รูปที่ 2.22 การขาดของขอบเหล็กจากตัวอย่าง B2 16-4



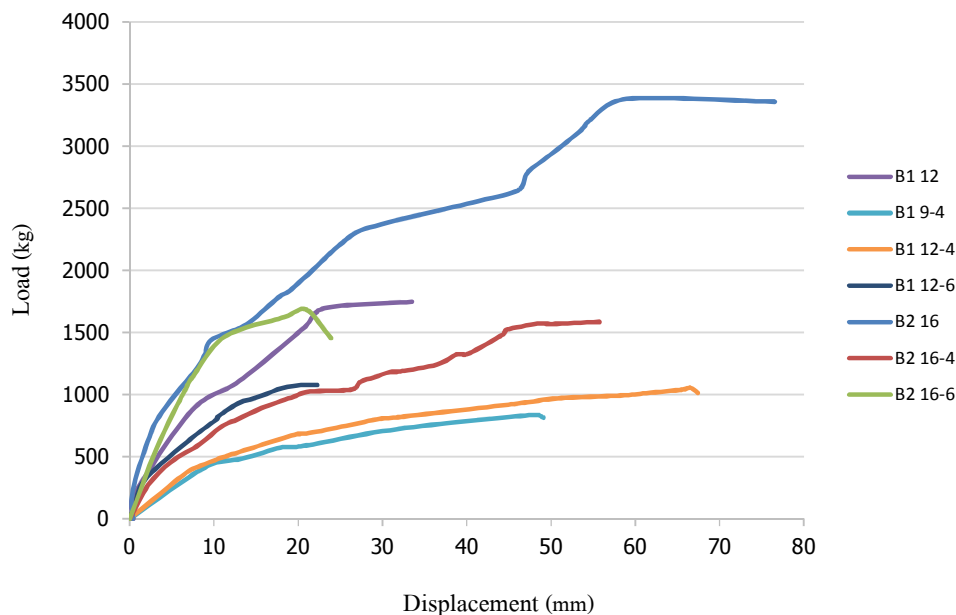


รูปที่ 2.23 การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมจากตัวอย่าง B1 12-6

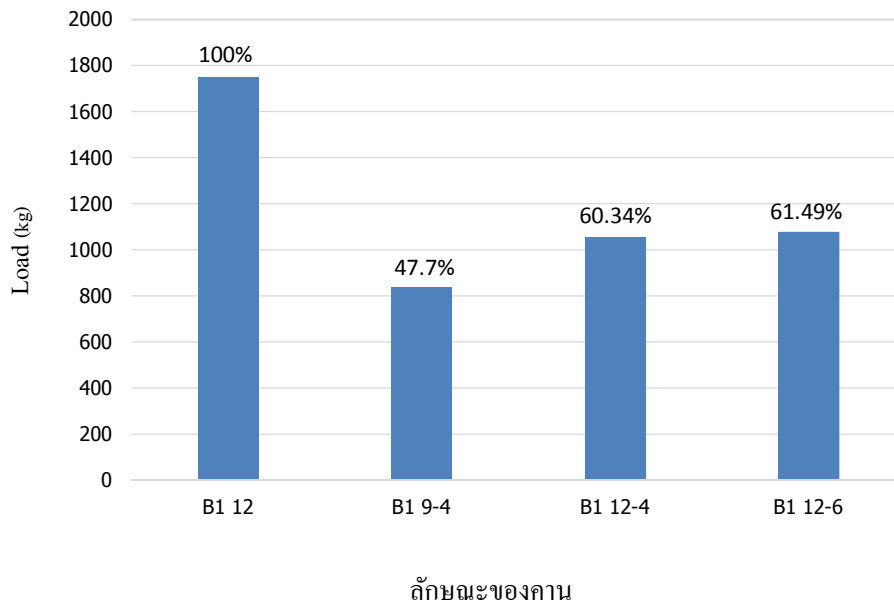
#### 2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 2.24 พิจารณาชุดคาน B1 และ B2 พบว่าภายใต้การเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นเดียวกันความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตขึ้นกับปัจจัยในด้านขนาดของหน้าตัดคานขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง และขนาดความหนาของเพลทเหล็ก ทั้งนี้การเพิ่มขนาดของหน้าตัดคานจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่ออย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มขนาดของหน้าตัดคานทำให้คานคอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ได้มากขึ้น การเพิ่มขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานยื่นจะทำให้เหล็กเสริมมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเพลทเหล็กและคอนกรีตในคานยื่นมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เหล็กเสริมมีพื้นที่การกระจายแรงสู่เพลทเหล็กเพิ่มขึ้น คานคอนกรีตมีความแข็งแรงและสามารถต้านการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขนาดความหนาของเพลทเหล็กบริเวณรอยต่อส่งผลให้รอยต่อมีความแข็งแรงและสามารถต้านการเสียดรูปเนื่องจากแรงดึงจากเหล็กเสริมได้มากขึ้น โดยคานมีการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นน้อยกว่ารอยต่อที่ใช้เพลทเหล็กบางกว่า

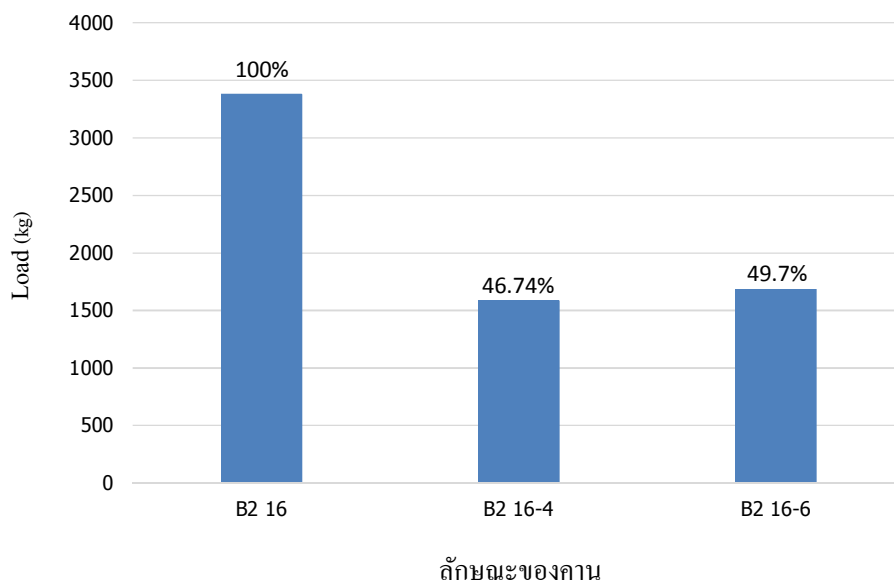
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดของคานคอนกรีตที่ใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กกับคานหล่อเนื้อเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.25 สำหรับคานขนาด 150x300 ตารางมิลลิเมตร และรูปที่ 2.26 สำหรับคานขนาด 200x400 ตารางมิลลิเมตร พบว่าคานคอนกรีตขนาด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ที่มีรอยต่อและใช้ขนาดเหล็กเสริมรับแรงเท่ากับคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียวจะมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดประมาณ 60 % ของคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว ส่วนคานคอนกรีตขนาดหน้าตัดคาน 200x400 ตารางมิลลิเมตร พบว่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดของคานคอนกรีตมีค่าประมาณ 45 % เมื่อเทียบกับคานคอนกรีตหล่อเนื้อเดียว ซึ่งต่ำกว่าคานขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ทั้งนี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดของคานคอนกรีตซึ่งใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กที่หนา 6 มิลลิเมตร ไม่ต่างจากเพลาเหล็กที่หนา 4 มิลลิเมตร อาจเนื่องจากตัวอย่างการทดสอบ B1 12-6 และ B2 16-6 เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติโดยมีการบิดขาดของรอยเชื่อมระหว่างเพลาเหล็กกับเหล็กเสริมรับแรงดึง ทั้งนี้จึงทำให้กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกทุกน้อยกว่าที่ควรจะเป็น (อาจเกิดจากรอยเชื่อมในการเตรียมตัวอย่างไม่สมบูรณ์เพียงพอ)



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานขึ้น



รูปที่ 2.25 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต B1



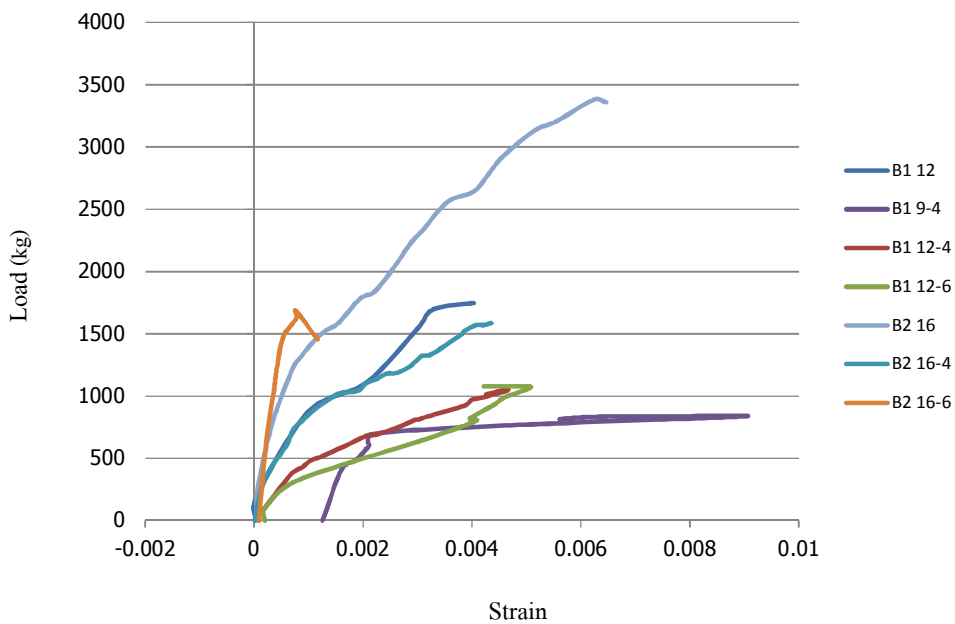
รูปที่ 2.26 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต B2

### 2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อและความเครียดของเพลาเหล็ก

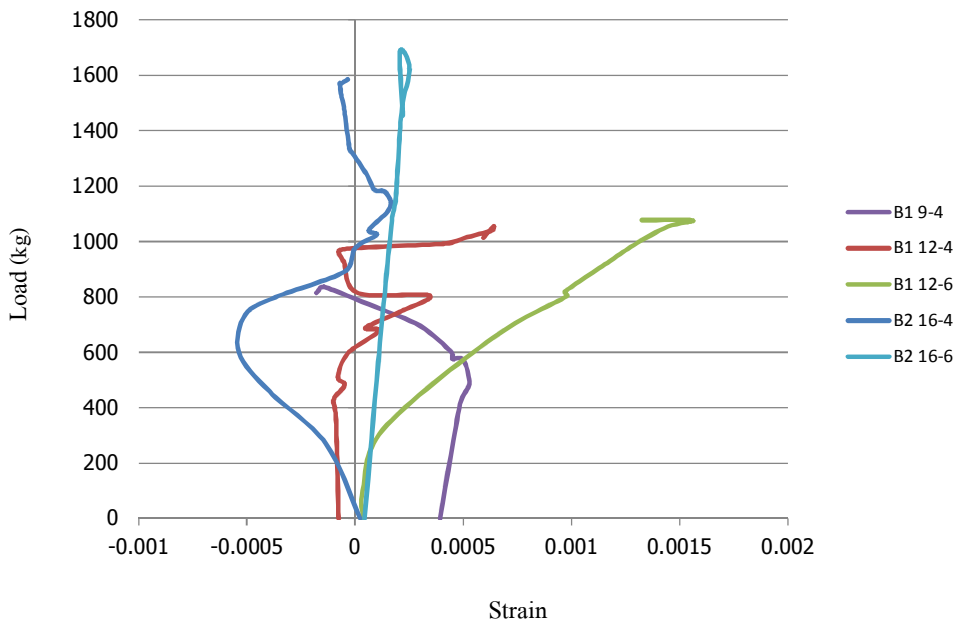
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานยื่นบริเวณรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.27 พบว่าภายในน้ำหนักบรรทุกเดียวกันความเครียดในเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อหน้าตัดคานมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดของเหล็กเสริมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดมากนัก เนื่องจากขนาดหน้าตัดคานที่ใหญ่ขึ้นทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงออกแรงต้าน โมเมนต์น้อยลงภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลาเหล็กบริเวณรอยต่อรับแรงดึงในคานยื่นแสดงในรูปที่ 2.28 พบว่าการเพิ่มขนาดความหนาของเพลาเหล็กบริเวณรอยต่อจะสามารถช่วยด้านการเสีรูปร่างของเพลาเหล็กได้ดี รอยต่อจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งจะทำให้เพลาเหล็กมีความเครียดน้อยลง และส่งผลให้คานคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบ B1 12-6 เกิดการบิดตัวของเพลาเหล็กเนื่องจากเกิดการฉีกขาดของรอยเชื่อมระหว่างเพลาเหล็กกับเหล็กเสริมรับแรงดึงในระหว่างการทดสอบจึงทำให้ความเครียดของเพลาเหล็กดังกล่าวมีค่าสูงกว่าปกติ

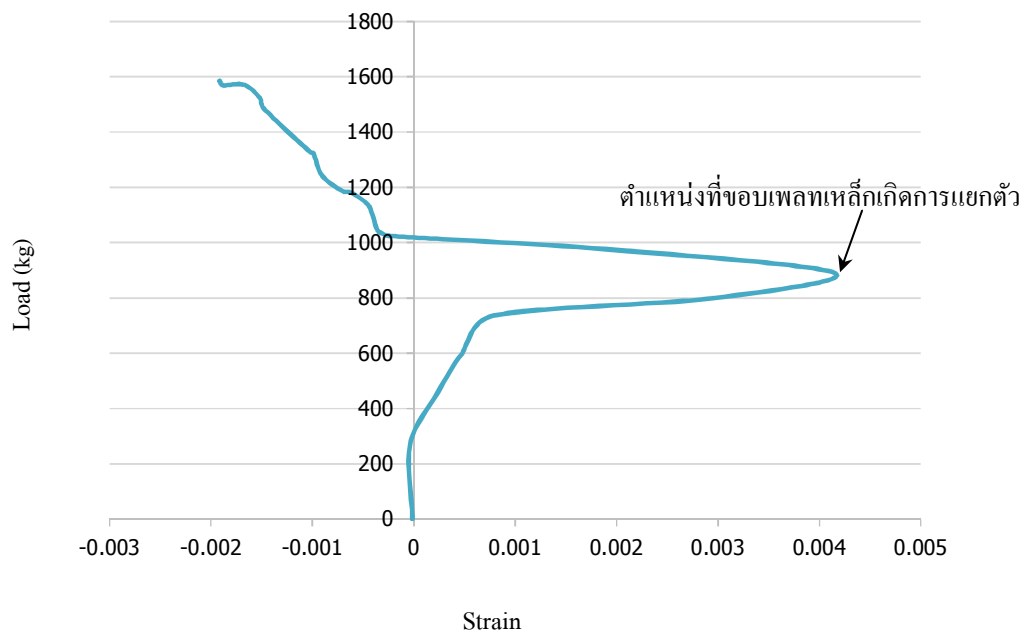
ทั้งนี้ Strain gauge บริเวณเพลาเหล็กรับแรงอัดเกิดความเสียหายเกือบทั้งหมด โดยมีการทดสอบเพียงตัวอย่าง B2 16-4 ดังแสดงในรูปที่ 2.29 พบว่าค่าของความเครียดของเพลาเหล็กรับแรงอัดภายหลังการแยกของขอบเพลาเหล็กมีความแตกต่างจากช่วงแรก



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริม



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก  
บริเวณรอยต่อรับแรงดึง



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กบริเวณรอยต่อรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ B2 16-4

เมื่อพิจารณาทั้ง 3 ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมรอยต่อของคานคอนกรีตคือ ขนาดของหน้าตัดคาน ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึงและความหนาของเพลทเหล็ก ทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตสำเร็จรูปทั้งสิ้น โดยขนาดตัวแปรที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตสำเร็จรูป อีกทั้งยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการวิบัติ

อย่างไรก็ตามการทดสอบยังมีข้อจำกัดด้านขนาดคานยื่นที่สามารถทดสอบได้ ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อแบบเพลทเหล็กโดยใช้ตัวแปรที่ต่างออกไป จำเป็นต้องใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษา

### บทที่ 3

## แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการศึกษาเชิงตัวแปร

การศึกษานี้เลือกใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ANSYS ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพลาเหล็ก โดยมีการศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของรอยต่อแบบเพลาเหล็กโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองกับผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีตและผลทดสอบในบทที่ 2

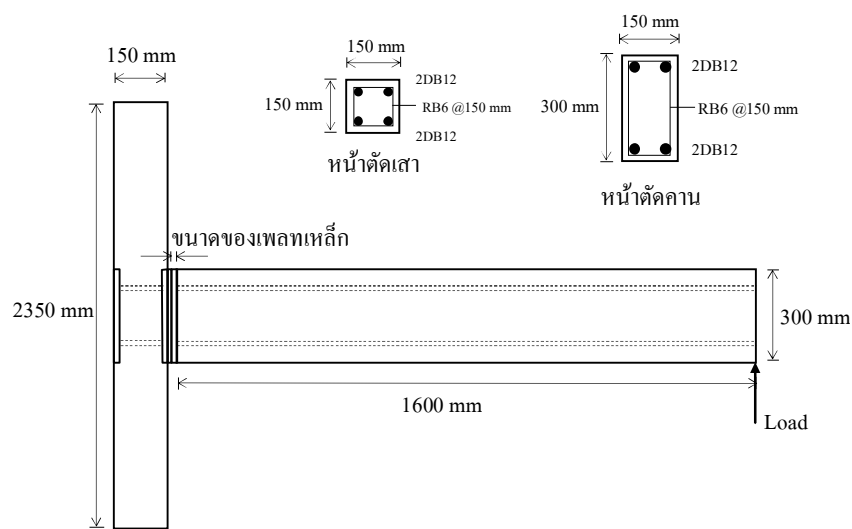
### 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.1.1 การทดสอบที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

การศึกษานี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลการทดสอบรอยต่อของคานคอนกรีตที่ใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็ก โดยการทดสอบที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เป็นการทดสอบของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ และการทดสอบในบทที่ 2 ทั้งนี้การทดสอบของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ มีลักษณะเป็นเสา คานยื่นคอนกรีต ส่วนในการทดสอบในบทที่ 2 เป็นชุดคานหลักกับคานยื่นคอนกรีต โดยการเปรียบเทียบพิจารณาในด้านของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวของปลายคานยื่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของเพลาเหล็กและเหล็กเสริมในคานยื่นบริเวณรอยต่อรับแรงดึงของคานคอนกรีต และพฤติกรรมการวิบัติ

ตัวอย่างทดสอบของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ [2] เป็นเสาขนาด 150x150 ตารางมิลลิเมตร ยาว 2350 มิลลิเมตรและคานยื่นคอนกรีตขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร ใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตรขนาดเท่าหน้าตัดของคานยื่นเป็นรอยต่อระหว่างเสาและคานยื่น มีการติด Strain gauge ที่เพลาเหล็กและเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อรับแรงดึง โดยยึดปลายของเสาทั้งสองด้านเข้ากับที่รองรับและให้น้ำหนักบรรทุก

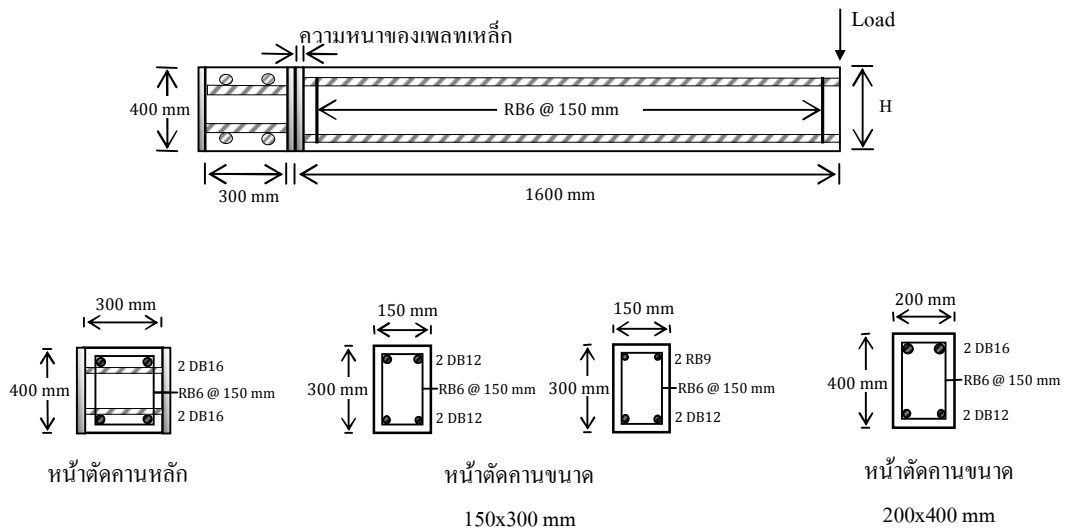
กระทำต่อปลายคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวได้ใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติดังนี้ คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 210 ksc เหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรเป็นเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 โดยมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 3800 ksc สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรเป็นเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SR24 โดยมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 2400 ksc เป็นเหล็กปลอกของเสาและคานยื่น และเพลทเหล็กของรอยต่อเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ HR1 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 3800 ksc



รูปที่ 3.1 ขนาดเสาและคานยื่นคอนกรีต [2]

ส่วนการทดสอบในบทที่ 2 มีลักษณะเป็นชุดคานหลักกับคานยื่นคอนกรีต โดยตัวอย่างการทดสอบมีทั้งแบบที่หล่อเป็นเนื้อเดียว และเชื่อมต่อกันด้วยรอยต่อแบบเพลทเหล็ก คานหลักมีขนาด 300x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร และคานยื่นมีขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างที่เป็นรอยต่อแบบเพลทเหล็กใช้เพลทเหล็กหนา 4 และ 6 มิลลิเมตรขนาดเท่าหน้าตัดของคานยื่นเป็นรอยต่อระหว่างคานหลักและคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยคุณสมบัติวัสดุต่างๆแสดงในบทที่ 2





รูปที่ 3.2 ขนาดคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ[2] ซึ่งได้กำหนดสัญลักษณ์ของแต่ละแบบจำลองอ้างอิงตามตารางที่ 3.1 โดยกำหนดสัญลักษณ์ BC หมายถึงการทดสอบคาน-เสา (Beam-Column) และสัญลักษณ์ M หมายถึงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบ เช่น MBC-4 หมายถึงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบ BC-4 ซึ่งใช้รอยต่อแบบเพลทเหล็กมีความหนา 4 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและแบบจำลองของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ [2]

สัญลักษณ์ของแบบจำลอง	ขนาดคานยื่น กว้างxลึกxยาว (มิลลิเมตร)	ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงอัด (มิลลิเมตร)	ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง (มิลลิเมตร)	ความหนาของเพลทเหล็ก (มิลลิเมตร)
BC-4	150x300x1600	12	12	4
BC-6	150x300x1600	12	12	6
MBC-4	150x300x1600	12	12	4
MBC-6	150x300x1600	12	12	6

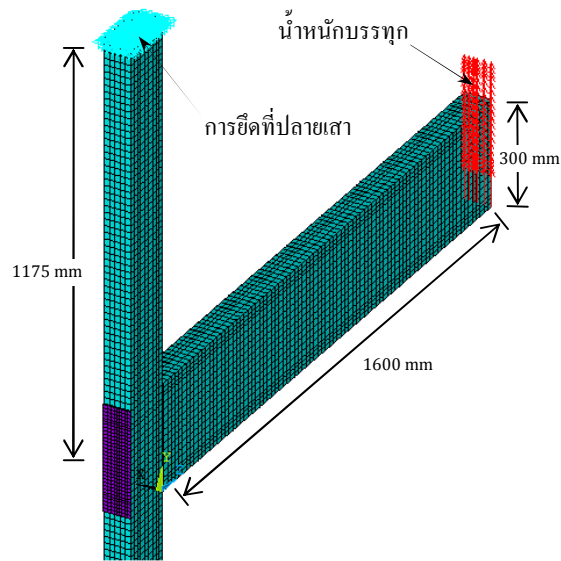
สำหรับการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในบพที่ 2 ได้กำหนดสัญลักษณ์ของแต่ละแบบจำลองอ้างอิงตามตารางที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยเพิ่มสัญลักษณ์ M ไว้หลังสัญลักษณ์ของตัวอย่างทดสอบแต่ละตัว เช่น BM1 12-4 หมายถึง แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบ B1 12-4

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

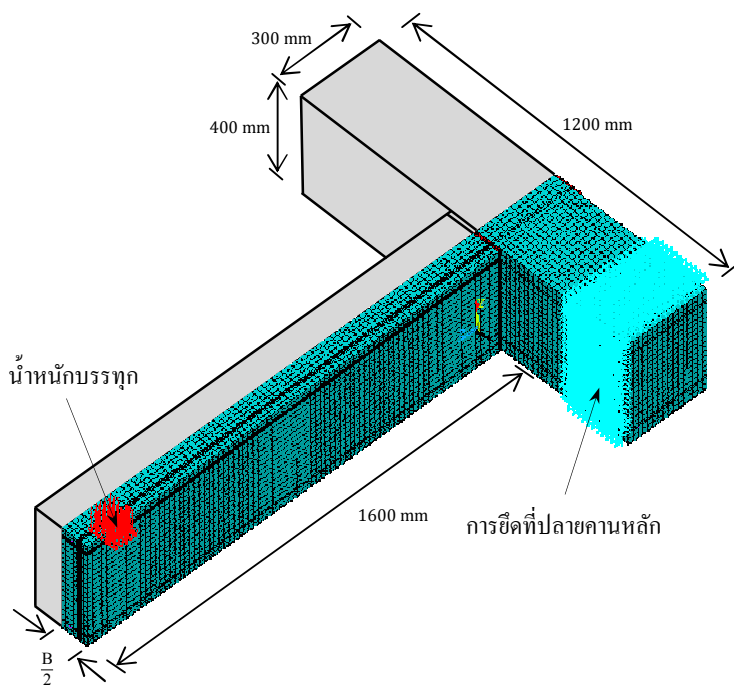
สัญลักษณ์ของแบบจำลอง	ขนาดกานขึ้นกว้างxลึกxยาว (มิลลิเมตร)	ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงอัด (มิลลิเมตร)	ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง (มิลลิเมตร)	ความหนาของเพลทเหล็ก (มิลลิเมตร)
BM1 12	150x300x1600	12	12	-
BM2 16	200x400x1600	12	16	-
BM1 9-4	150x300x1600	12	9	4
BM1 12-4	150x300x1600	12	12	4
BM1 12-6	150x300x1600	12	12	6
BM2 16-4	200x400x1600	12	16	4
BM2 16-6	200x400x1600	12	16	6

### 3.1.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากลักษณะตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ด้วยเหตุผลความสมมาตรตามแนวแกนจึงใช้แบบจำลองในลักษณะครึ่งหนึ่งตามแนวสมมาตร เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองและลดเวลาในการคำนวณ ทั้งนี้ได้กำหนดให้มีจุดรองรับแบบยึดแน่นบริเวณรอบปลายของเสาและกานหลักและให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อปลายกานขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ในลักษณะสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



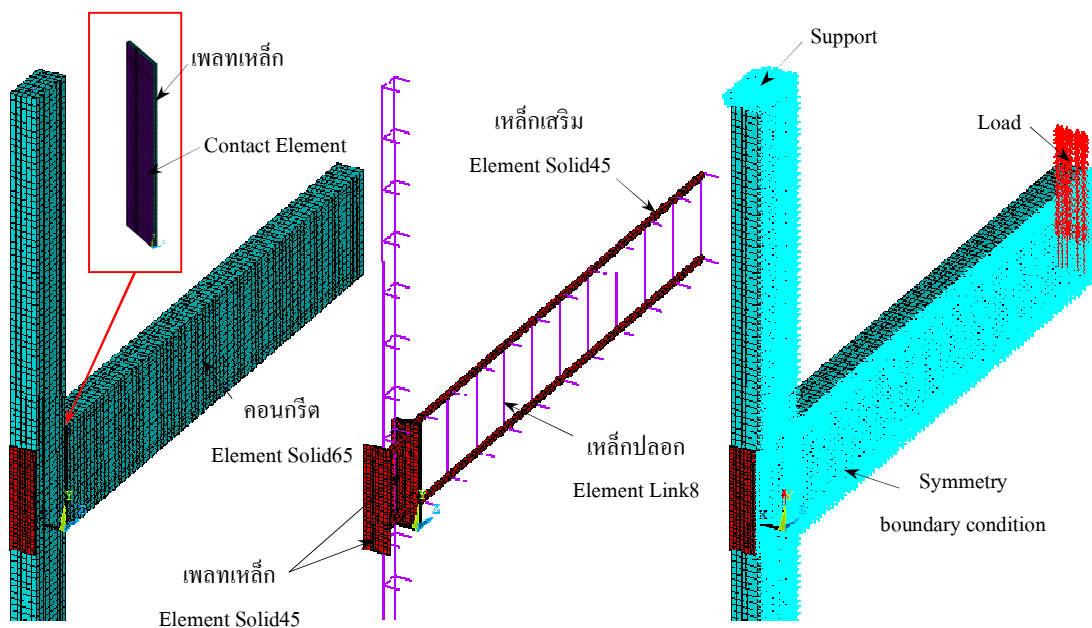
รูปที่ 3.3 ลักษณะเสาและคานยื่นคอนกรีต [2]



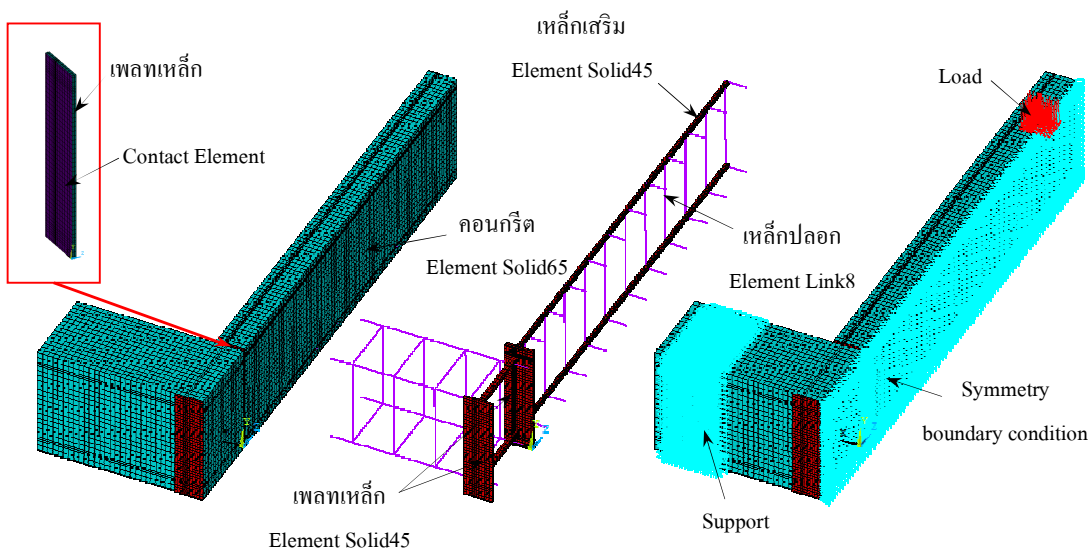
รูปที่ 3.4 ลักษณะคานหลักและคานยื่นคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง

### 3.1.2.1 ชนิดของเอลิเมนต์

แบบจำลองของชุดการทดสอบประกอบด้วยวัสดุประเภทต่างๆอันได้แก่ คอนกรีต เหล็กเสริม และเพลทเหล็ก โดยการจำลองวัสดุต่างๆในการทดสอบใช้เอลิเมนต์ 4 ชนิด คือ Solid65, Solid45 , Link8 และ Conta173 ซึ่งใช้ในแต่ละส่วนของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



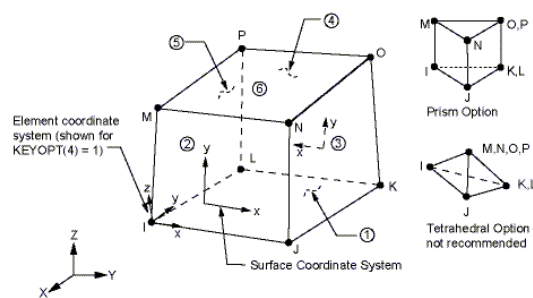
รูปที่ 3.5 รายละเอียดของแบบจำลองเสาและคานยื่น [2]



รูปที่ 3.6 รายละเอียดของแบบจำลองคานหลักและคานยื่น

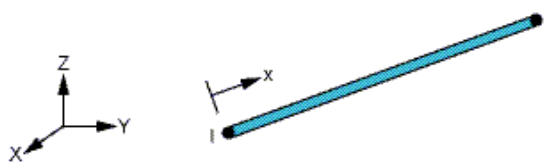
**Solid65** เป็นเอลิเมนต์ประเภท 3 มิติใช้ในการจำลองวัสดุประเภทคอนกรีต โดยแต่ละเอลิเมนต์มี 8 โหนดดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งแต่ละโหนดจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ใน 3 ทิศทางตามแนวแกน X,Y,Z มีความสามารถในการวิเคราะห์การแตกร้าวเนื่องจากแรงดึง และเกิดการวิบัติแบบอัดแตกเนื่องจากแรงอัดได้ ซึ่งเป็นเอลิเมนต์เฉพาะสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุคอนกรีต

**Solid45** เป็นเอลิเมนต์ประเภท 3 มิติแบบเดียวกับ Solid65 โดยใช้เป็นเอลิเมนต์ของเพลทเหล็กและเหล็กเสริมที่เชื่อมกับเพลทเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่ต้องศึกษาพฤติกรรมโดยละเอียด แต่ละเอลิเมนต์มี 8 โหนดดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งแต่ละโหนดจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ใน 3 ทิศทางตามแนวแกน X,Y,Z มีความสามารถในการวิเคราะห์การคืบ ความเค้น ความเครียด และการโก่งตัวได้ เหมาะสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของเหล็ก



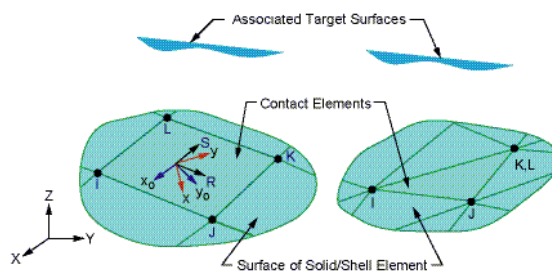
รูปที่ 3.7 เอลิเมนต์ Solid65 และ Solid45 [11]

**Link8** เป็นเอลิเมนต์ประเภทเส้น โดยใช้เป็นเอลิเมนต์ของเหล็กปลอกและเหล็กเสริมในเสาและคานหลัก แต่ละเอลิเมนต์มี 2 โหนดดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งแต่ละโหนดจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ใน 3 ทิศทางตามแนวแกน X,Y,Z เอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถรับแรงดึงและแรงอัดได้ในแนวทิศทางตามแนวแกนของเอลิเมนต์ มีความสามารถในการวิเคราะห์การคืบ และการโก่งตัวได้ การเลือกใช้เอลิเมนต์ประเภทนี้ในการจำลองเหล็กปลอกและเหล็กเสริมของคานหลัก เนื่องจากไม่ใช่ส่วนหลักของการศึกษาพฤติกรรมโดยละเอียด ดังนั้นการใช้เอลิเมนต์ประเภทเส้นจึงเพียงพอแก่การวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง อีกทั้งยังช่วยลดความซับซ้อนด้านจำนวนเอลิเมนต์และลดจำนวนโหนดของแบบจำลอง



รูปที่ 3.8 เอลิเมนต์ Link8 [11]

**Conta173** เป็นเอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับจำลองพื้นผิวสัมผัส (Contact element) 3 มิติ โดยใช้เป็นเอลิเมนต์ของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับเพลาเหล็กบริเวณรอยต่อ เนื่องจากเพลาเหล็กอาจเกิดการแยกจากคอนกรีต ดังนั้นการใช้เอลิเมนต์ของเพลาเหล็กยึดติดกับคอนกรีตโดยสมบูรณ์จึงไม่สามารถศึกษาพฤติกรรมการแยกตัวจากคอนกรีตและการโก่งของเพลาเหล็กที่ชัดเจนได้ ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ประเภทผิวสัมผัสเป็นรอยต่อระหว่างเพลาเหล็กกับคอนกรีต แต่ละเอลิเมนต์มี 4 โหนดดังแสดงในรูปที่ 3.9 เหมาะสำหรับเป็นพื้นผิวสัมผัสของของแข็ง สามารถส่งถ่ายแรงกด ความเค้นเฉือน และแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวสัมผัส但不能ต้านทานแรงดึงได้จึงสามารถใช้ในการสังเกตพฤติกรรมการแยกตัวจากคอนกรีตของเพลาเหล็กบริเวณรอยต่อระหว่างคานยื่นกับเสาหรือคานหลัก ทั้งนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของ Contact element ให้มีค่า Coefficient of friction เท่ากับ 0.2 และค่า Normal penalty stiffness เท่ากับ 0.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแยกตัวของเพลาเหล็กจากคอนกรีตและการโก่งตัวของเพลาเหล็ก

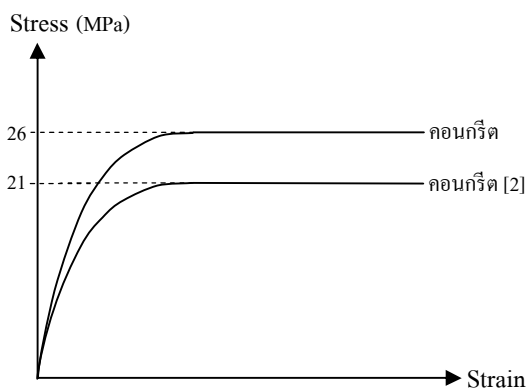


รูปที่ 3.9 เอลิเมนต์ Conta173 [11]

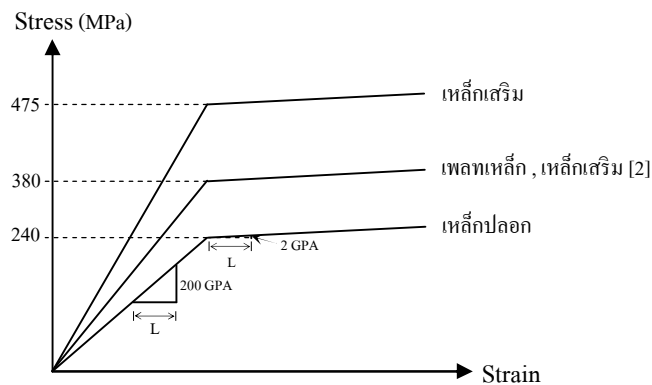
### 3.1.2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง

กำหนดให้คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กเสริมและเพทเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้ คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ 10% ของกำลังอัดประลัย โดยกำลังอัดประลัยของ จารูวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ [2] มีค่า 21 MPa และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตสำหรับการทดสอบในบทที่ 2 มีค่า 26 MPa ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress - Strain จากแรงกดอ้างอิงตามมาตรฐาน BS EN 1992-1-1:2004 [12] โดยสมมุติพฤติกรรมของ Stress และ Strain หลังจากกำลังอัดสูงสุดเป็นลักษณะ Plastic ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain สำหรับการออกแบบหน้าตัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS EN 1992-1-1:2004 โดยการจำลองลักษณะ Plastic ดังกล่าว ช่วยสนับสนุนให้แบบจำลองมีเสถียรภาพ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างรอยแตกกว้างเท่ากับ 0.3 และ 0.5 สำหรับรอยแตกกว้างแบบเปิดและแบบปิดตามลำดับ (Zhou et al 2004 [14])

คุณสมบัติของวัสดุเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองมี ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 200 GPa และอัตราส่วนปัวซองมีค่า 0.3 โดยสำหรับการทดสอบของ จารูวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ [2] เหล็กเสริมมีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากมีค่า 380 MPa และในส่วนของ การทดสอบในการศึกษานี้มีค่ามีค่า 475 MPa ทั้งนี้เพทเหล็กและเหล็กปลอกสำหรับการทดสอบของ จารูวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ [2] และการทดสอบในบทที่ 2 มีค่าเท่ากันคือ เพทเหล็กมีความต้านแรงดึงที่จุดครากมีค่า 380 MPa และเหล็กปลอกมีความต้านแรงดึงที่จุดครากมีค่า 240 MPa โดยกำหนดให้ Stress และ Strain ของเหล็กแบบต่างๆแสดงในรูปที่ 3.11 ในลักษณะ Bi-linear คือช่วงอีลาสติกและช่วงหลังอีลาสติก โดยกำหนดให้ความชันของวัสดุหลังจุดอีลาสติกมีค่าเท่ากับ 1% ของโมดูลัสความยืดหยุ่น [13]



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของคอนกรีต



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของเหล็กแบบต่างๆ

### 3.1.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ

#### 3.1.3.1 พฤติกรรมการวิบัติ

พฤติกรรมการวิบัติของการทดสอบของ จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ[2] และผลทดสอบในบทที่ 2 มีลักษณะการวิบัติบริเวณรอยต่อใกล้เคียงกัน โดยในส่วนของคานคอนกรีตเนื้อเดียวผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงรอยแตกร้าวบริเวณด้านบนของคานขึ้นและจะเกิดรอยแตกร้าวมากในคานหลักบริเวณรอยต่อซึ่งแสดงลักษณะความเสียหายที่รุนแรงในรอยต่อของคานหลักมากกว่าคานขึ้น การแตกร้าวของคอนกรีตเกิดจากผลของแรงดึงและแรงอัดในคานขึ้นร่วมกับการกระจายแรงเฉือน ซึ่งทำให้เกิดการบิดตัวของคานหลักบริเวณคานขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.12

สำหรับแบบจำลองคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็กพบลักษณะรอยแยกระหว่างเพลาเหล็กกับคอนกรีตบริเวณรอยต่อร่วมกับการโก่งตัวของเพลาเหล็ก ซึ่งเกิดจากเพลาเหล็กได้รับแรงดึงจากเหล็กเสริมในคานขึ้นจนเกิดการโก่งตัวของเพลาเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งลักษณะดังกล่าวใกล้เคียงกับผลการทดสอบ การศึกษานี้จึงเน้นการพิจารณาพฤติกรรมการวิบัติของผลการทดสอบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งมีกรณีการวิบัติ 3 กรณีคือ

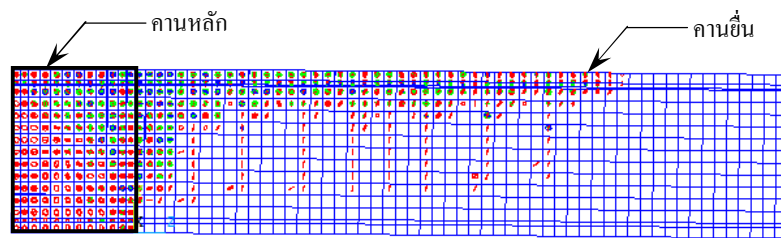


1) การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองได้แสดงให้เห็นว่าความเค้นของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่ามากบริเวณรอยต่อ และมีกระจายความเค้นสู่เพลทเหล็กน้อย ลักษณะเช่นนี้ถือเป็นการวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึงสำหรับแบบจำลอง

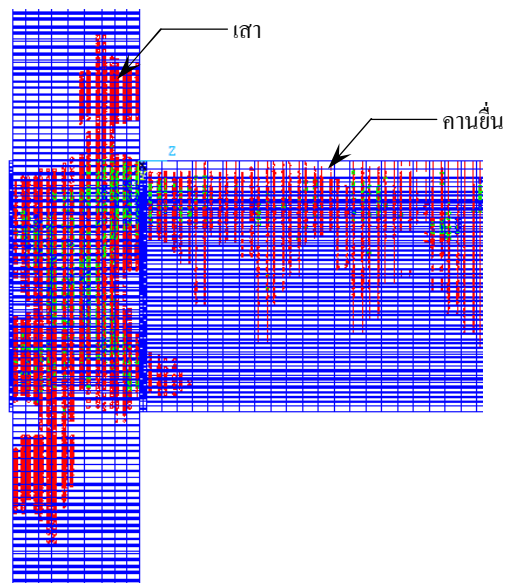
2) การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 3.15 ผลจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าความเค้นของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่ามากบริเวณรอยต่อทั้ง 2 ด้าน แต่เนื่องจากแบบจำลองได้กำหนดให้เพลทเหล็กกับเหล็กเสริมเป็นเนื้อเดียวกัน การวิบัติของแบบจำลองจึงเป็นการวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยไม่สามารถแสดงลักษณะการวิบัติของรอยเชื่อมได้

3) การขาดของขอบเพลทเหล็กหรือการวิบัติบริเวณขอบของเพลทเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.16 ผลจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าความเค้นมีค่ามากที่ขอบของเพลทเหล็ก(มากกว่าความเค้นในเหล็กเสริม) ตำแหน่งของความเค้นจะอยู่บริเวณตำแหน่งของเหล็กเสริมรับแรงดึงเท่านั้น

ผลการเปรียบเทียบลักษณะการวิบัติจากผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองกับตัวอย่างทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.3 ทั้งนี้ในส่วนของแบบจำลองมีข้อจำกัดในการพิจารณาลักษณะการวิบัติ 2 กรณีคือ การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง และการวิบัติบริเวณขอบของเพลทเหล็ก เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองด้านขนาดของเอลิเมนต์โดยแบบจำลองกำหนดให้เหล็กบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

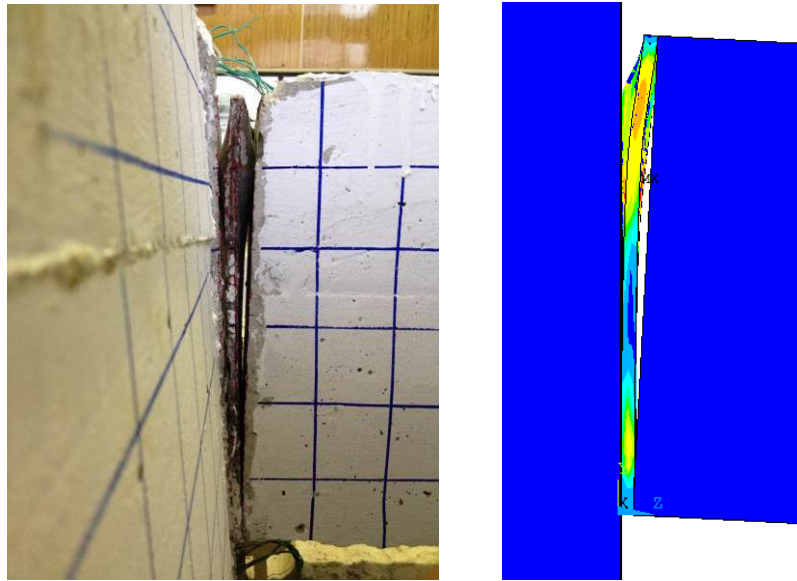


ลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ B2 16

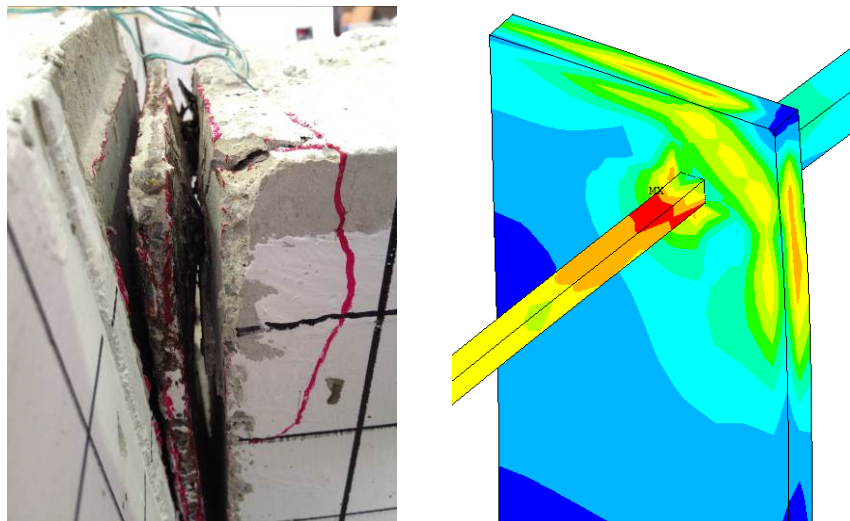


ลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ BC-4 [2]

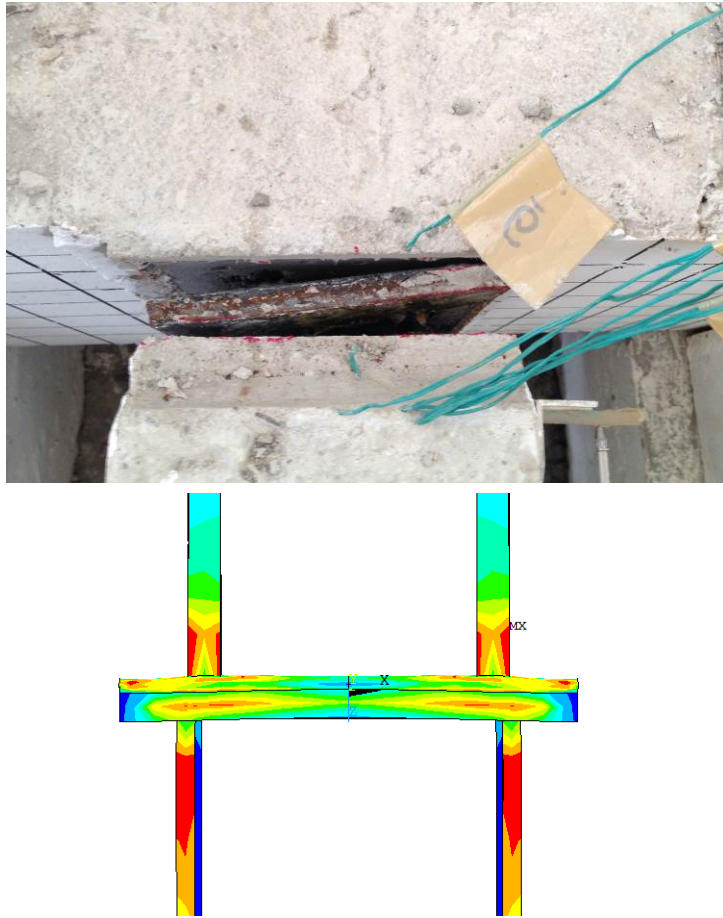
รูปที่ 3.12 ลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีต



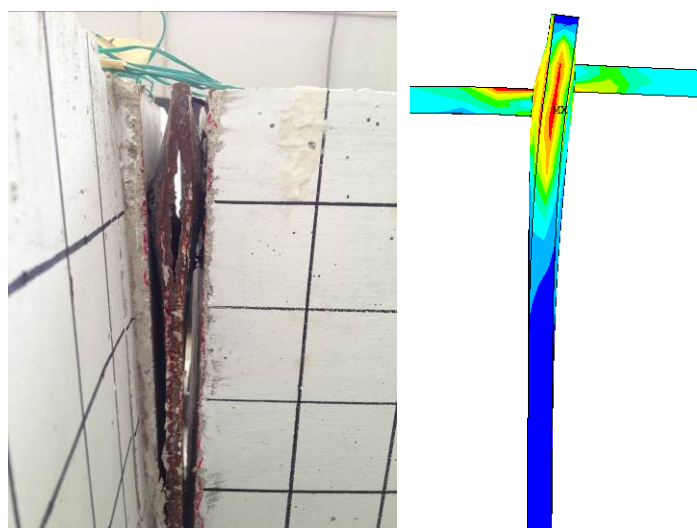
รูปที่ 3.13 การโค้งตัวของเพลทเหล็กของคานคอนกรีตจากตัวอย่าง B1 12-4



รูปที่ 3.14 การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากตัวอย่าง B1 9-6

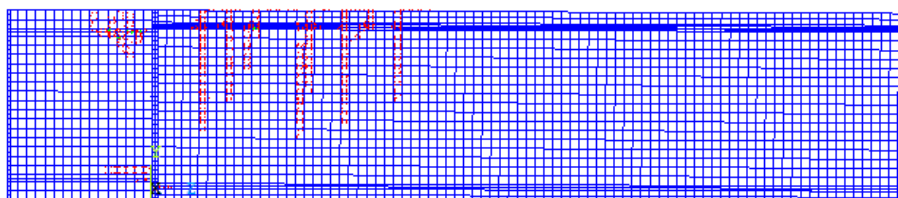


รูปที่ 3.15 การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมจากตัวอย่าง B1 12-6

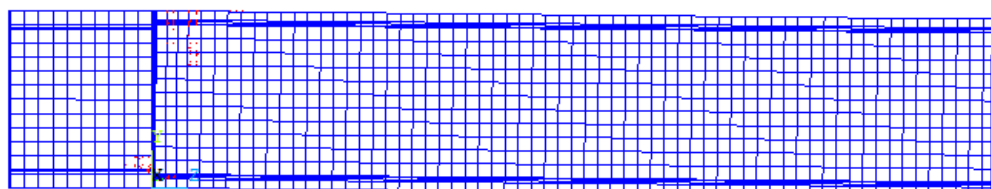


รูปที่ 3.16 การขาดของขอบเหล็กจากตัวอย่าง B2 16-4

เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคอนกรีตในแต่ละกรณีดังแสดงในรูปที่ 3.17 พบว่า การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง สังกัดพบรอยแตกร้าวของคอนกรีตน้อยกว่าการวิบัติของ รอยต่อแบบอื่น โดยลักษณะดังกล่าวเกิดจากการที่เหล็กเสริมได้รับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก และได้กระจายแรงดึงจากคานขึ้นลงสู่เพลาเหล็กผ่านทางรอยเชื่อมโดยตรง แต่รอยเชื่อมมีกำลังต้าน แรงดึงต่ำกว่าแรงดึงในเหล็กเสริม รอยเชื่อมจึงเกิดการฉีกขาดก่อนที่เหล็กเสริมเกิดการกระจายแรง ลงสู่คอนกรีตในระดับที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าว จากการศึกษาเชิงตัวแปรพบว่าการวิบัติลักษณะ ดังกล่าวให้ความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกน้อยที่สุด



การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็กจากตัวอย่าง B2 16-4



การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากตัวอย่าง B3 12-6

รูปที่ 3.17 ลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตของแบบจำลอง

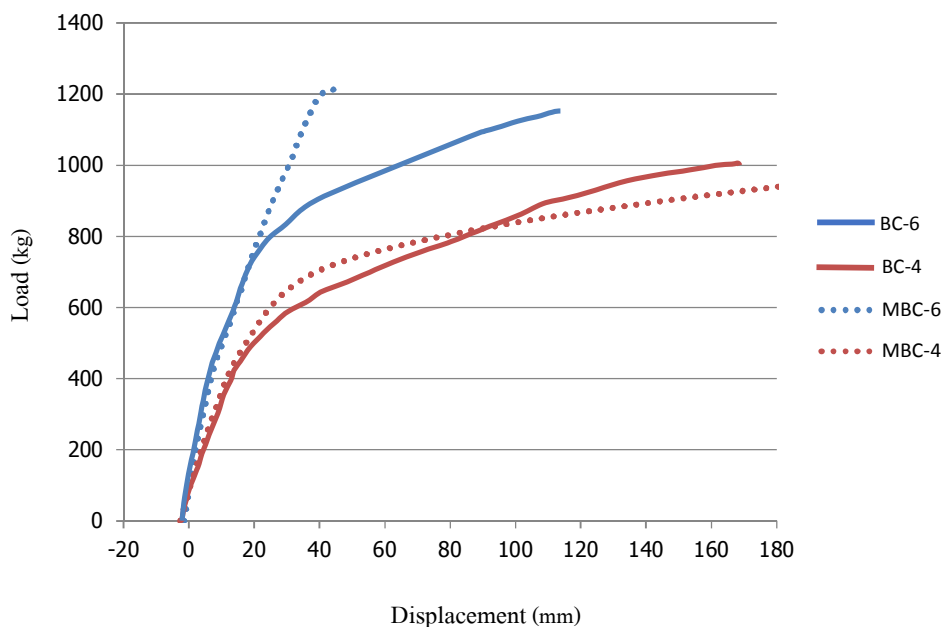
ตารางที่ 3.3 ลักษณะการวิบัติของแบบจำลองและผลการทดสอบ

สัญลักษณ์ของ แบบจำลอง	ลักษณะการวิบัติ	
	การทดสอบ	แบบจำลอง
BC-4 [2]	การขาดของขอบเพลาเหล็ก	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
BC-6 [2]	การขาดของขอบเพลาเหล็ก	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
B1 12	การแตกร้าวของรอยต่อร่วมกับ การครากของเหล็กเสริม	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
B2 16	การแตกร้าวของรอยต่อร่วมกับ การครากของเหล็กเสริม	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
B1 9-4	การครากของเหล็กเสริม	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
B1 12-4	การขาดของขอบเพลาเหล็กพร้อมกับ การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
B1 12-6	การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม โดยพบการขาดของรอยเชื่อมเพียงเล็กน้อย	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
B2 16-4	การขาดของขอบเพลาเหล็ก	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
B2 16-6	การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก

### 3.1.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นสำหรับการทดสอบเสากับคานยื่น ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่แบบจำลองที่ใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กหนา 6 มม. จะมีค่าการเคลื่อนตัวของคานยื่นต่างจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.18 เนื่องจากการทดสอบจะเกิดการแยกตัวออกจากกันระหว่างคอนกรีตและเพลาเหล็กมากกว่าแบบจำลองทำให้ระยะการแอ่นตัวโดยรวมมีค่ามากกว่าการวิเคราะห์ หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยต่อแบบเพลาเหล็กในแบบจำลองมีความเป็น rigid สูงกว่าการทดสอบจริง อาจเกิดจากการจำลองคุณสมบัติของคอนกรีต โดยขอบของเพลาเหล็กด้านบนทำหน้าที่รับแรงอัดระหว่างเสาและคานยื่นส่งผลให้คอนกรีตด้านบนของคานยื่นบริเวณรอยต่อเกิดการแตกร้าว แต่เนื่องด้วยแบบจำลองได้กำหนดให้คุณสมบัติของคอนกรีตมีคุณสมบัติเป็น Plastic หลังจากถึงค่า

กำลังอัดประลัยนั้นคือยังสามารถรับกำลังอัดได้โดยสมบูรณ์ แต่ผลการทดลองคอนกรีตบริเวณรอบต่อเกิดการแตกร้าวและเสียกำลังด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้คานยื่นเกิดการแอ่นตัวสูงกว่าแบบจำลอง อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดยังมีความใกล้เคียงกัน

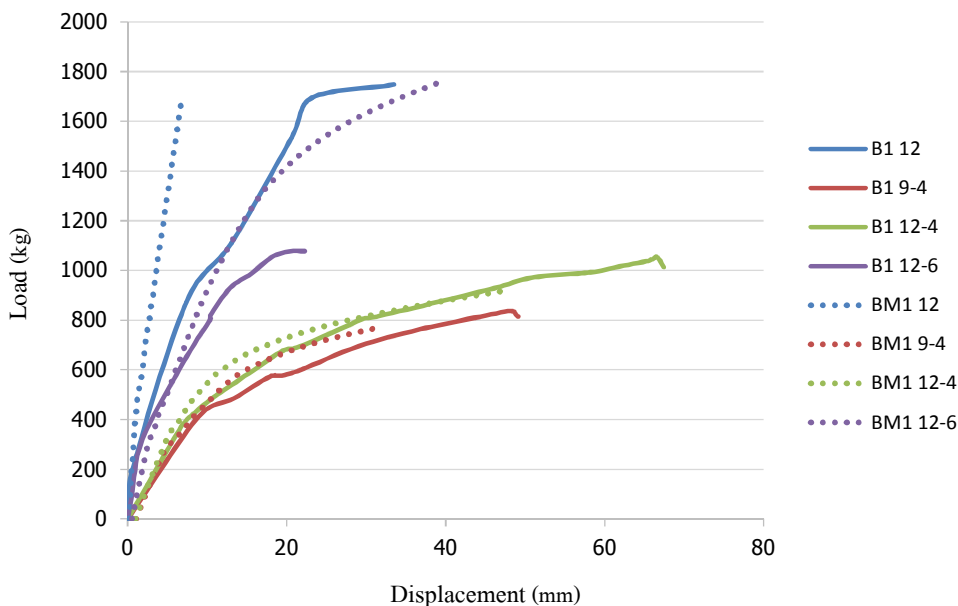


รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่น[2]

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่นสำหรับแบบจำลองของการทดสอบคานหลักกับคานยื่นดังแสดงในรูปที่ 3.19 สำหรับหน้าตัดคานขนาด 150x300 ตารางมิลลิเมตร และรูปที่ 3.20 สำหรับหน้าตัดคานขนาด 200x400 ตารางมิลลิเมตร

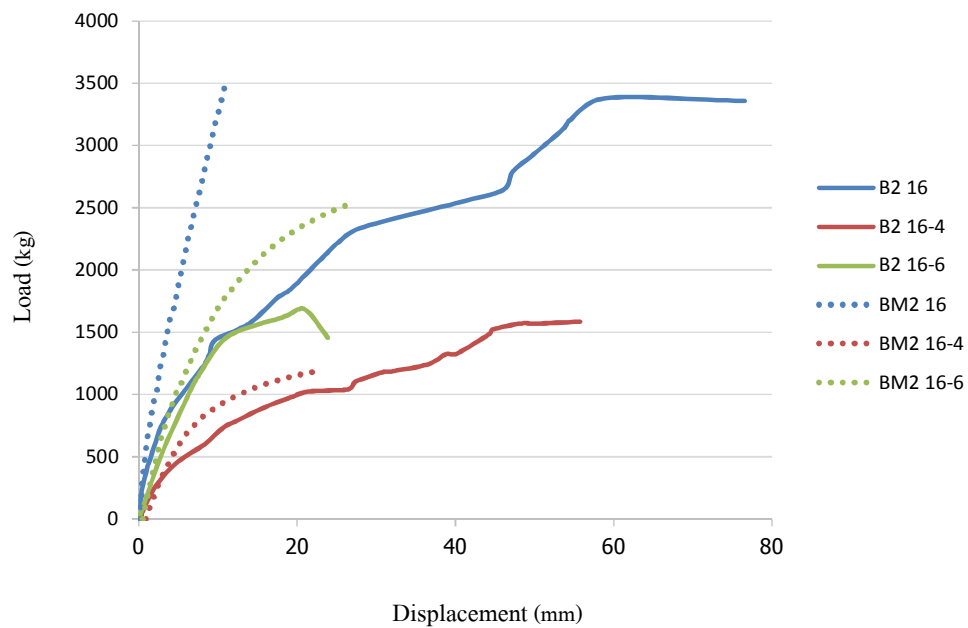
ผลการวิเคราะห์คานหล่อเนื้อเดียว B1 12 และ B2 16 จะมีค่าเคลื่อนตัวของคานยื่นต่างจากผลการทดสอบ เนื่องจากการทดสอบจะเกิดการแตกร้าวบริเวณรอบรอยต่อโดยเฉพาะด้านบนคานหลักซึ่งมีสภาพการรับแรงดึง จึงทำให้คอนกรีตแตกตัวออกทำให้คอนกรีตเสียหายในการกระจายแรงระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมส่งผลให้ stiffness โดยรวมลดลง ซึ่งแบบจำลองอาจมีข้อจำกัดในการพิจารณาการแตกร้าวลักษณะดังกล่าว จึงทำให้ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองมีลักษณะที่ rigid มากเกินไป ทั้งนี้หากพิจารณาในด้านความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดทั้งแบบจำลองและผลการทดลองได้ผลออกมาใกล้เคียงกัน พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกับผลการวิเคราะห์ของ BC-6

พบว่ากราฟเกิดการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจนเนื่องจากขนาดความหนาของเพลทเหล็ก แสดงให้เห็นว่าความหนาของเพลทเหล็กมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากการเพิ่มขนาดความหนาของเพลทเหล็กทำให้รอยต่อมีความเป็น rigid มากขึ้นส่งผลให้สามารถกระจายแรงดึงจากคานยื่นลงสู่คานหลัก ได้ดีขึ้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตได้ ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองที่ใช้รอยต่อแบบเพลทเหล็กให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แต่แบบจำลองสำหรับกรณี B1 12-6 และ B2 16-6 จะมีค่าการเคลื่อนที่และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่างจากผลการทดสอบ เนื่องจากการทดสอบเกิดการขาดของรอยเชื่อมระหว่างเหล็กเสริมรับแรงดึงกับเพลทเหล็กด้านคานยื่น จึงทำให้ผลการทดสอบมีค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่หากพิจารณาผลการทดสอบในช่วง Elastic การเคลื่อนที่ตัวจะมีความใกล้เคียงกับแบบจำลอง และสำหรับการเปรียบเทียบในตัวอย่าง B2 16-4 ซึ่งเกิดการการรณีกขาดของรอยเชื่อมด้านข้างของเพลทเหล็กซึ่งในแบบจำลองเกิดการวิบัติบริเวณขอบของเพลทเหล็ก โดยเมื่อเกิดการครากแบบจำลองจะสามารถต้านแรงได้เพิ่มเติมเพียงเล็กน้อยแต่ในส่วนของการทดสอบพบว่าภายหลังการรณีกขาดของรอยเชื่อมเพลทเหล็กยังคงสามารถต้านแรงได้เพิ่มเติม จึงทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าแบบจำลอง



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานยื่นของคานขนาดหน้าตัด 150x300 ตารางมิลลิเมตร

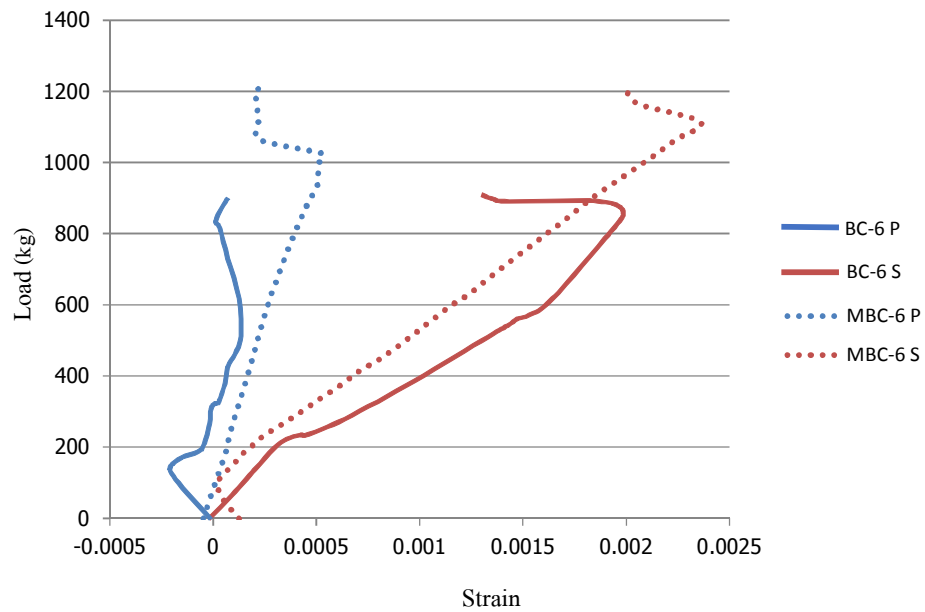




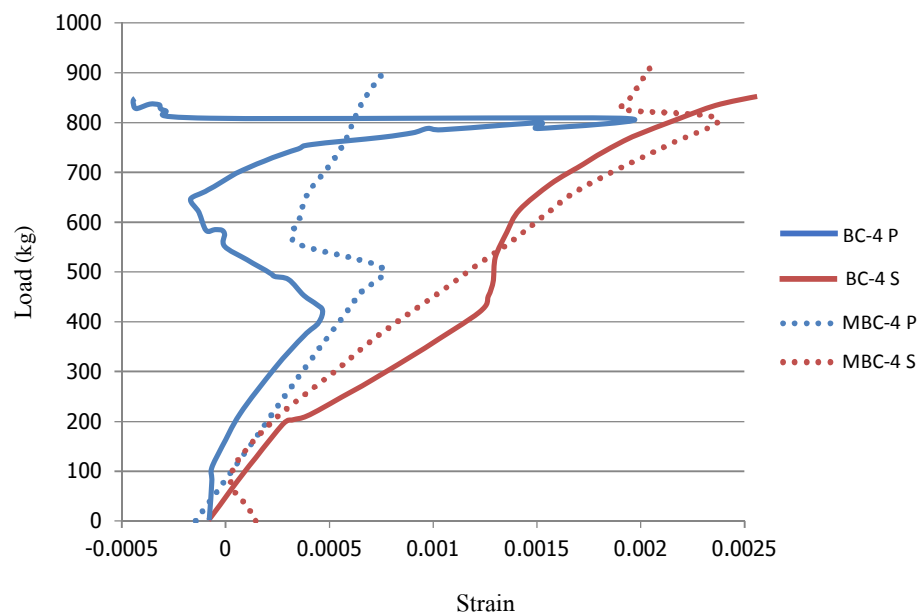
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานายื่น ของคานขนาดหน้าตัด 200x400 ตารางมิลลิเมตร

### 3.1.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กและเหล็กเสริมในคานยื่น

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบเสากับคานยื่น ในด้านของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กรับแรงดึง และเหล็กเสริมในคานยื่นบริเวณรอยต่อรับแรงดึง ทั้งจากแบบจำลองและจากการทดลองได้ผลออกมาใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.21 สำหรับคานที่ใช้เพลทเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร และรูปที่ 3.22 สำหรับคานที่ใช้เพลทเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคานที่ใช้เพลทเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร

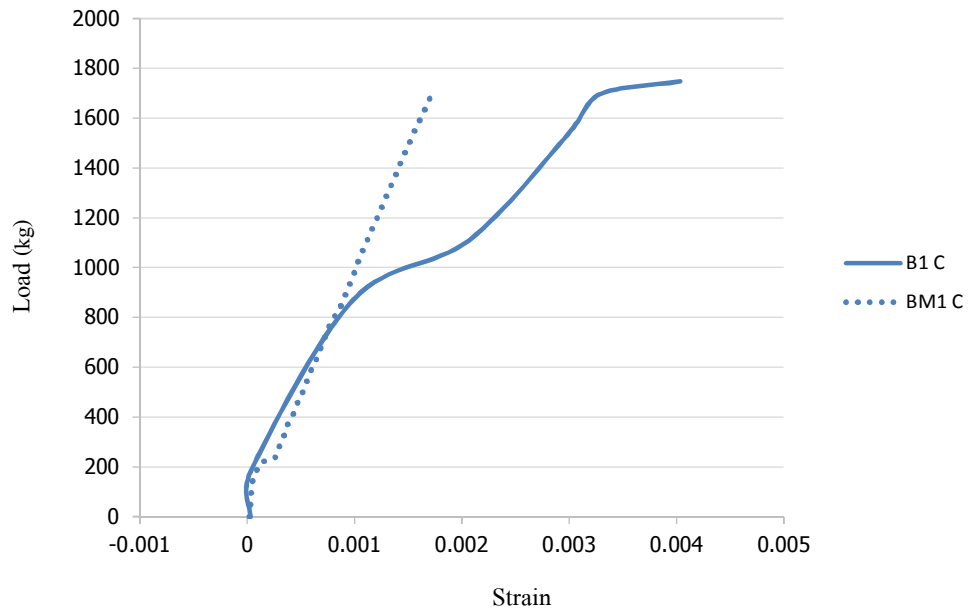


รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคานที่ใช้เพลทเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร

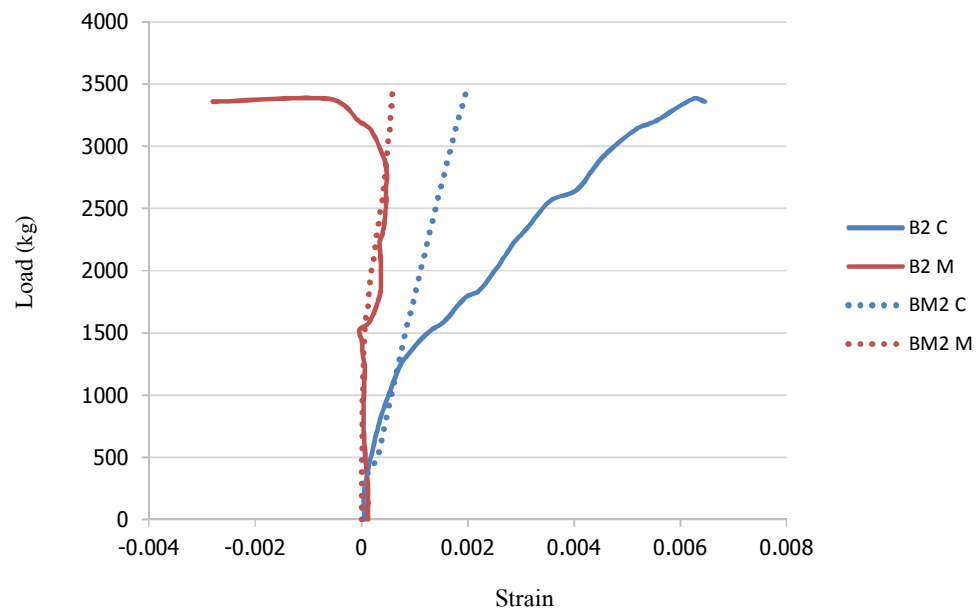
สำหรับผลการวิเคราะห์กรณีคานหลักและคานยื่นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อของคานหลัก (ตำแหน่ง M) และเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อของคานยื่น (ตำแหน่ง C) (ดูรูปที่ 2.6) สำหรับการทดสอบของคานหลักกับคานยื่นหล่อเนื้อเดียว แสดงในรูปที่ 3.23 สำหรับคาน B1 12 และรูปที่ 3.24 สำหรับคาน B2 16 ทั้งนี้ Strain gauge บริเวณเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานหลักของคาน B1 เกิดความเสียหายระหว่างการเตรียมตัวอย่างทดสอบ ผลการเปรียบเทียบพบว่าความเครียดของเหล็กเสริมของคานยื่นในช่วงแรกมีค่าใกล้เคียงกันทั้งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ แต่ผลการวิเคราะห์จะแตกต่างจากผลการทดสอบโดยมีความชันมากกว่าในช่วงต่อมา หรือกล่าวได้ว่าเหล็กเสริมจากการทดสอบมีความเครียดมากกว่าแบบจำลอง พฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากคอนกรีตรอบเหล็กเสริมเกิดความเสียหายจากการแตกร้าว จึงไม่สามารถช่วยกระจายแรงในเหล็กเสริมได้ จึงทำให้เหล็กเสริมต้องรับแรงมากกว่าแบบจำลองและเกิดความเครียดที่มากกว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กรับแรงดึง (ตำแหน่ง P) และเหล็กเสริมในคานยื่นบริเวณรอยต่อรับแรงดึง (ตำแหน่ง S) (ดูรูปที่ 2.9) แสดงในรูปที่ 3.25 ถึงรูปที่ 3.29 โดยพิจารณาค่าความเครียดจากแบบจำลอง ณ ตำแหน่งรับแรงดึงโดยเฉลี่ยพบว่าค่าความเครียดทั้งจากแบบจำลองและจากการทดสอบได้ลักษณะความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบ B1 12-6 เกิดการบิดตัวของเพลทเหล็กเนื่องจากเกิดการบิดของรอยเชื่อมระหว่างเพลทเหล็กกับเหล็กเสริมรับแรงดึงในระหว่างการทดสอบ จึงทำให้ความเครียดของเพลทเหล็กดังกล่าวมีค่าสูงกว่าปกติเมื่อเทียบกับแบบจำลอง

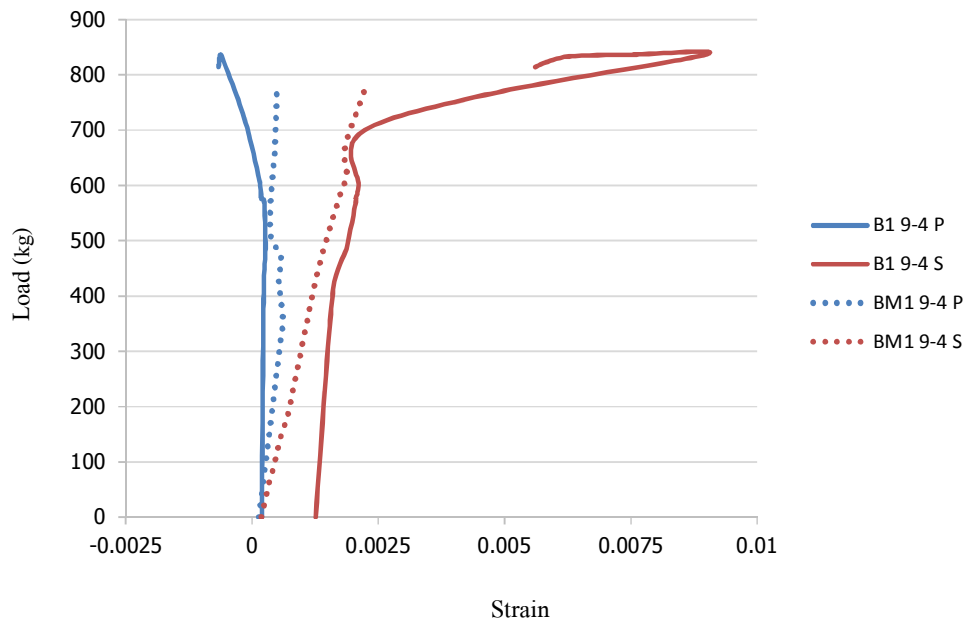
ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็กรับแรงอัด (ตำแหน่ง B) (ดูรูปที่ 2.9) สามารถวัดผลจากการทดสอบได้เฉพาะคาน B2 16-4 ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งพบว่าความเครียดของเพลทเหล็กรับแรงอัด จากการทดสอบมีความแตกต่างจากแบบจำลอง ภายหลังการบิดตัวของรอยเชื่อมด้านข้างของเพลทเหล็ก



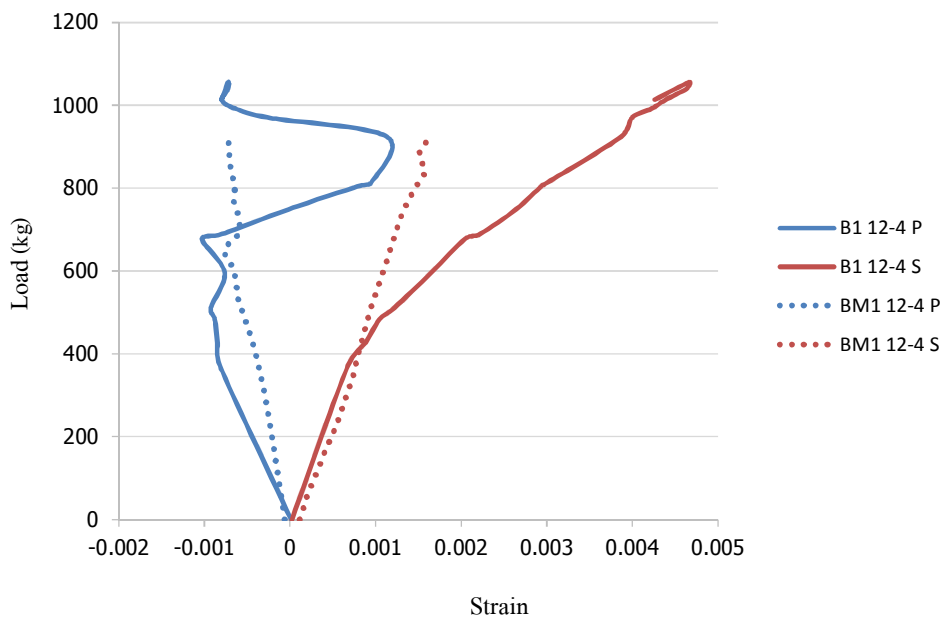
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดเหล็กเสริมในคาน B1 12



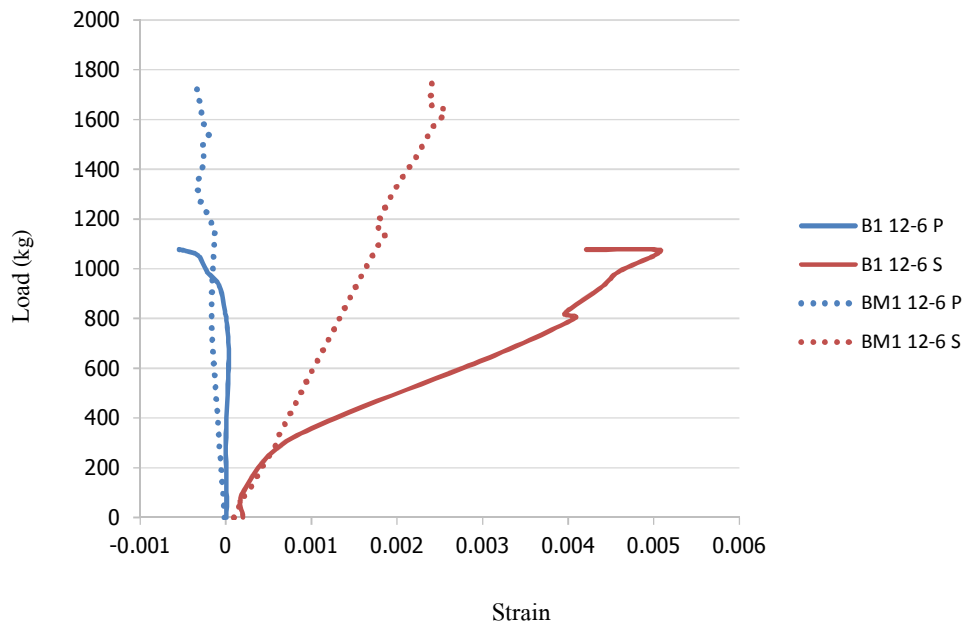
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดเหล็กเสริมในคาน B2 16



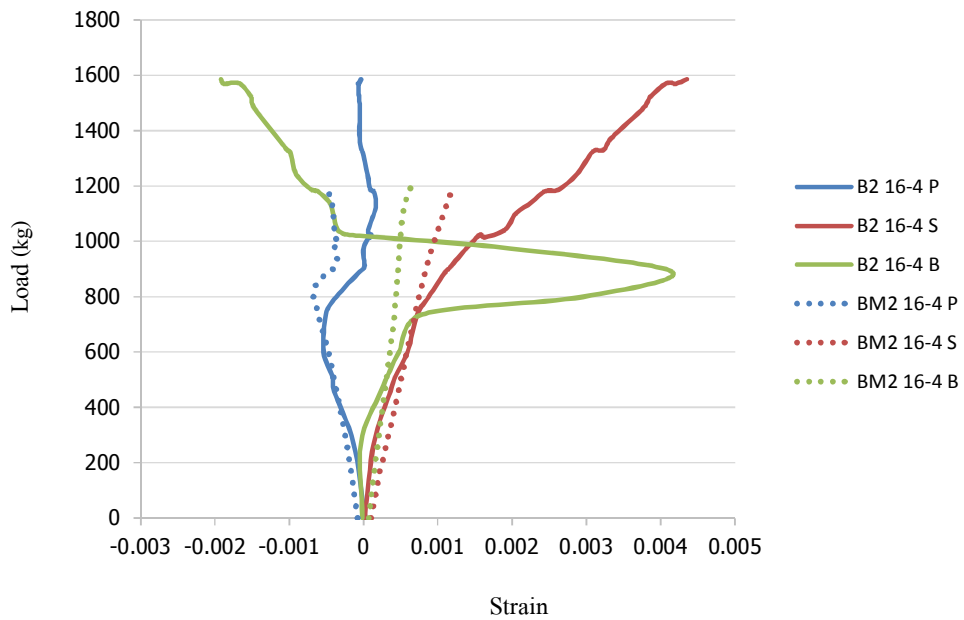
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B1 9-4



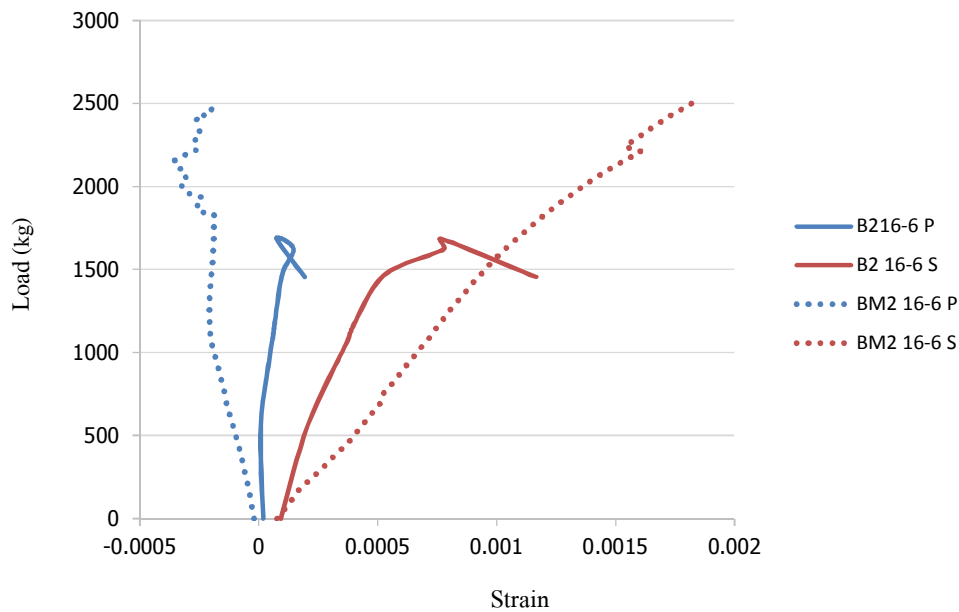
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B1 12-4



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B1 12-6



รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B2 16-4



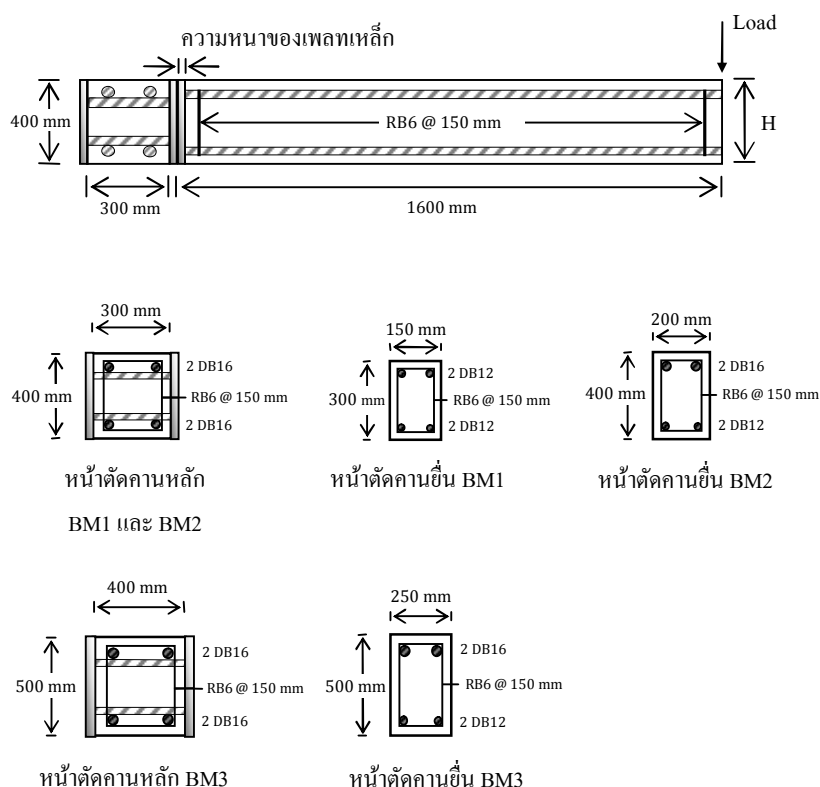
รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเพลทเหล็ก และเหล็กเสริมในคาน B2 16-6

จากการศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองพฤติกรรมของรอยต่อ ในด้านความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการวิบัติ เมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่า แบบจำลองมีประสิทธิภาพและความสามารถเพียงพอในการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเพลทเหล็กในชั้นของการศึกษาเชิงตัวแปร

### 3.2 การศึกษาเชิงตัวแปร

ในการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเพลทเหล็กสำหรับคานคอนกรีต ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในลักษณะคานหลักและคานอื่นเช่นเดียวกับการทดสอบในบทที่ 2 และได้กำหนดตัวแปรในการศึกษาคือขนาดของหน้าตัด ขนาดของเหล็กเสริม และความหนาของเพลทเหล็ก

โดยแบบจำลองกำหนดให้คานายืนมีขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร ใช้ร่วมกับคานหลักที่มีขนาดหน้าตัด 300x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร และคานยืนมีขนาดหน้าตัด 250x500 ตารางมิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร ใช้ร่วมกับคานหลักที่มีขนาดหน้าตัด 400x500 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร และใช้รอยต่อแบบเพลาเหล็กขนาดเท่าหน้าตัดของคานยืนดังแสดงในรูปที่ 3.30 ทั้งนี้ได้กำหนดให้มีจุกรองรับแบบยึดแน่นบริเวณรอยต่อของคานหลักและให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อปลายคานยืนเช่นเดียวกับรูปที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็ก ลักษณะรอยต่อและขนาดของเพลาเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยมีกรณีศึกษาทั้งสิ้น 22 กรณี เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดระหว่างรอยต่อแบบเพลาเหล็กกับคานหล่อเนื้อเดียวในคานแต่ละขนาด รวมถึงการศึกษาลักษณะการวิบัติในแต่ละแบบจำลอง



รูปที่ 3.30 ขนาดคานหลักและคานยืนคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา



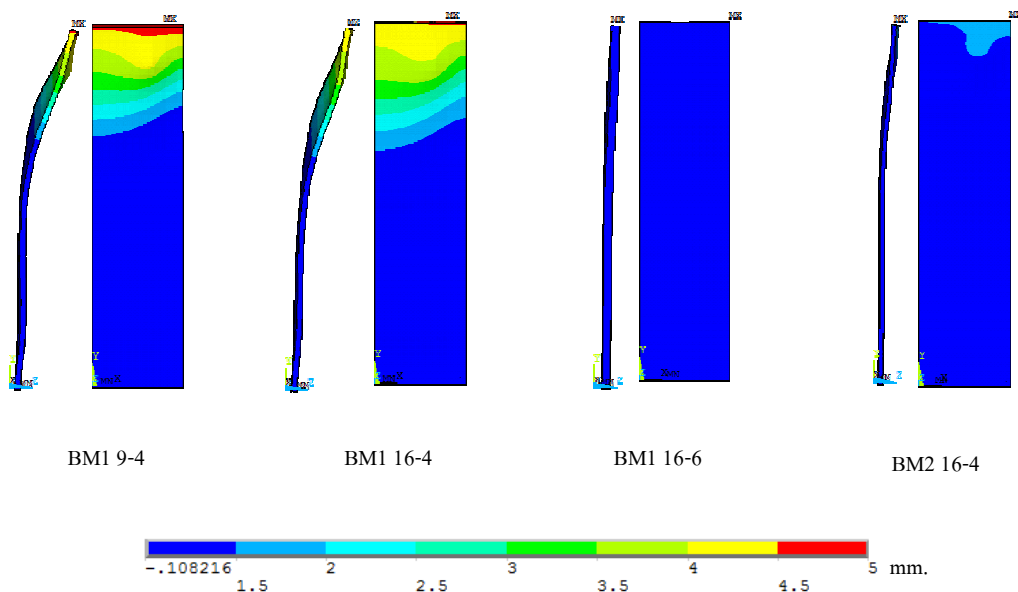
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของกรณีศึกษา

ลำดับที่	กรณีศึกษา	ขนาดคาน กว้างxลึกxยาว (มม.)	ขนาดของ เหล็กเสริมรับ แรงอัด (มม.)	ขนาดของ เหล็กเสริมรับ แรงดึง (มม.)	ความหนาของ เพลทเหล็ก (มม.)
1	BM1 12	150x300x1600	12	12	คานหล่อเนื้อเดียว
2	BM1 9-4	150x300x1600	12	9	4
3	BM1 9-6	150x300x1600	12	9	6
4	BM1 12-4	150x300x1600	12	12	4
5	BM1 12-6	150x300x1600	12	12	6
6	BM1 16-4	150x300x1600	12	16	4
7	BM1 16-6	150x300x1600	12	16	6
8	BM2 12	200x400x1600	12	12	คานหล่อเนื้อเดียว
9	BM2 16	200x400x1600	12	16	คานหล่อเนื้อเดียว
10	BM2 9-4	200x400x1600	12	9	4
11	BM2 9-6	200x400x1600	12	9	6
12	BM2 12-4	200x400x1600	12	12	4
13	BM2 12-6	200x400x1600	12	12	6
14	BM2 16-4	200x400x1600	12	16	4
15	BM2 16-6	200x400x1600	12	16	6
16	BM3 12	250x500x2400	12	12	คานหล่อเนื้อเดียว
17	BM3 12-4	250x500x2400	12	12	4
18	BM3 12-6	250x500x2400	12	12	6
19	BM3 16-4	250x500x2400	12	16	4
20	BM3 16-6	250x500x2400	12	16	6
21	BM3 2-16-4	250x500x2400	16	16	4
22	BM3 2-16-6	250x500x2400	16	16	6

### 3.2.1 พฤติกรรมเชิงโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบลักษณะการวิบัติ 2 กรณี ได้แก่ การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณรอยต่อ และการวิบัติบริเวณขอบของเพลทเหล็ก โดยรายละเอียดและลักษณะการวิบัติแสดงในหัวข้อที่ 3.1.3.1 ทั้งนี้ตัวอย่างพฤติกรรมเชิงโครงสร้างด้านลักษณะการเสีรูปร่างของเพลทเหล็ก การกระจายแรงของเพลทเหล็ก การกระจายแรงของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.31 ถึงรูปที่ 3.33 ตามลำดับและลักษณะการวิบัติในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 3.5

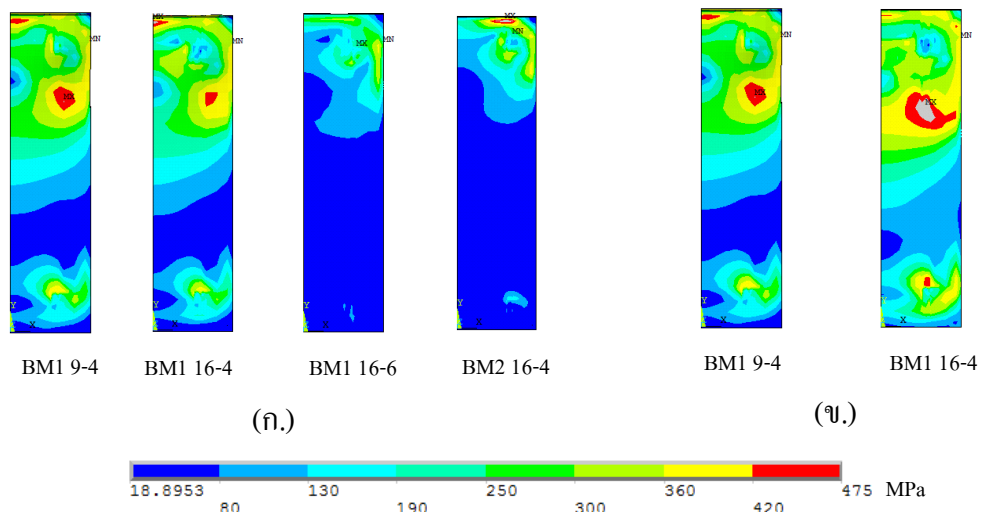
เมื่อพิจารณาลักษณะการเสีรูปร่างของเพลทเหล็กบริเวณรอยต่อภายใต้น้ำหนักบรรทุกใดๆ เช่นภายใต้น้ำหนักบรรทุก 800 kg ดังแสดงในรูปที่ 3.31 พบว่าการเสีรูปร่างของเพลทเหล็กเกิดขึ้นมากบริเวณรอยต่อรับแรงดึง การเพิ่มขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง ขนาดความหนาของเพลทเหล็ก และขนาดหน้าตัดคานสามารถช่วยลดการเสีรูปร่างของเพลทเหล็กลงได้ เนื่องจากขนาดเหล็กเสริมในคานยื่นที่เพิ่มขึ้นจะมีผิวสัมผัสระหว่างเพลทเหล็กกับเหล็กเสริมมากขึ้นส่งผลให้เหล็กเสริมสามารถกระจายแรงสู่เพลทเหล็กได้มากขึ้น ส่วนการเพิ่มความหนาของเพลทเหล็กสามารถช่วยลดการเสีรูปร่างของเพลทเหล็กลงได้ และการเพิ่มขึ้นของขนาดหน้าตัดคานส่งผลให้แรงคู่ควบในการต้านทานโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกลดลงซึ่งจะช่วยลดความเครียดที่เกิดขึ้นในเพลทเหล็กลงได้



รูปที่ 3.31 ตัวอย่างการเสีรูปร่างของเพลทเหล็ก

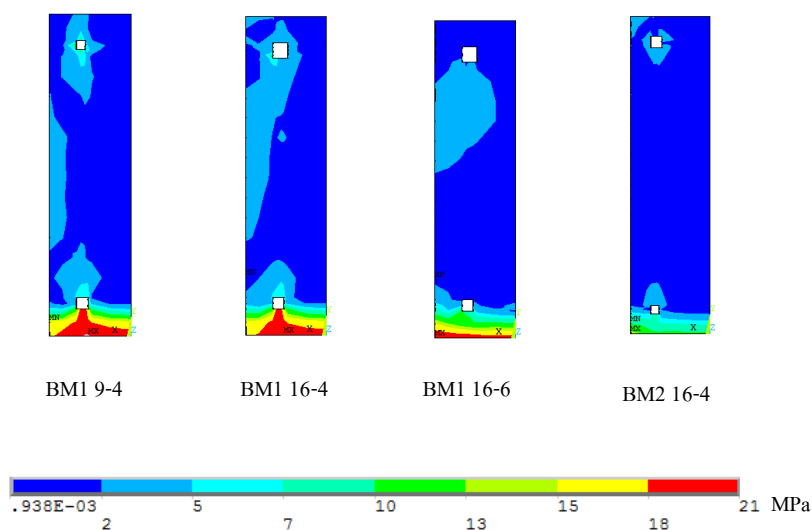
สำหรับตัวอย่างการกระจายความเค้นประเภท Von Mises Stress ในโปรแกรม ANSYS ของเพลทเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกใดๆดังแสดงในรูปที่ 3.32(ก.) (สำหรับน้ำหนักบรรทุก 800 kg) เหล็กเสริมรับแรงดึงในคานยื่นเกิดการกระจายแรงต่อไปยังเพลทเหล็ก ในทางกลับกันเหล็กเสริมรับแรงอัดในคานยื่นจะเกิดแรงอัดกระทำต่อบริเวณด้านล่างของเพลทเหล็ก พบว่าการกระจายแรงดึงจากเหล็กเสริมเกิดขึ้นมากบริเวณรอยต่อรับแรงดึง จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง ขนาดความหนาของเพลทเหล็ก และขนาดหน้าตัดคาน สามารถช่วยกระจายความเค้นในเพลทเหล็กได้ เนื่องจากการเพิ่มขนาดของเหล็กเสริมทำให้มีผิวสัมผัสระหว่างเพลทเหล็กกับเหล็กเสริมมากขึ้นส่งผลให้สามารถลดการกระจุกตัวของความเค้นจากแรงดึงในเหล็กเสริมได้ สำหรับการเพิ่มความหนาของเพลทเหล็กและการเพิ่มขนาดหน้าตัดคานทำให้เพลทเหล็กมีความต้านทานการเสีรูปร่างสูงขึ้นส่งผลให้สามารถกระจายความเค้นจากเหล็กเสริมได้ดี

สำหรับการกระจายความเค้นของเพลทเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 3.32(ข.) (สำหรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด) จากแบบจำลอง BM1 9-6 และ BM1 16-4 พบว่าขนาดความกว้างของการกระจายความเค้นเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยเหล็กเสริมขนาดใหญ่จะมีความกว้างของการกระจายแรงมากกว่าเหล็กเสริมขนาดเล็กจากผลของความแข็งแรงของเพลทเหล็ก



รูปที่ 3.32 ตัวอย่างการกระจายแรงของเพลทเหล็ก

การกระจายความเค้นของคอนกรีตเกิดจากเพลาเหล็กกระจายความเค้นสู่คอนกรีตของคานยื่นดังแสดงตัวอย่างการกระจายความเค้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุก 800 kg ในรูปที่ 3.33 โดยการกระจายความเค้นจากเพลาเหล็กกระทำต่อคอนกรีตของคานยื่นมากบริเวณเหล็กเสริมรับแรงอัด พบว่าการเพิ่มขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง ความหนาของเพลาเหล็ก และขนาดของหน้าตัดคานสามารถช่วยลดการกระจุกตัวของความเค้นจากการกระจายแรงของเพลาเหล็กลงได้



รูปที่ 3.33 การกระจายแรงของคอนกรีต

ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบลักษณะการวิบัติได้แก่การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง และการวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก โดยลักษณะการวิบัติของแบบจำลองในแต่ละกรณีแสดงดังตารางที่ 3.5 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก แลลักษณะการวิบัติของการออกแบบต่อไป

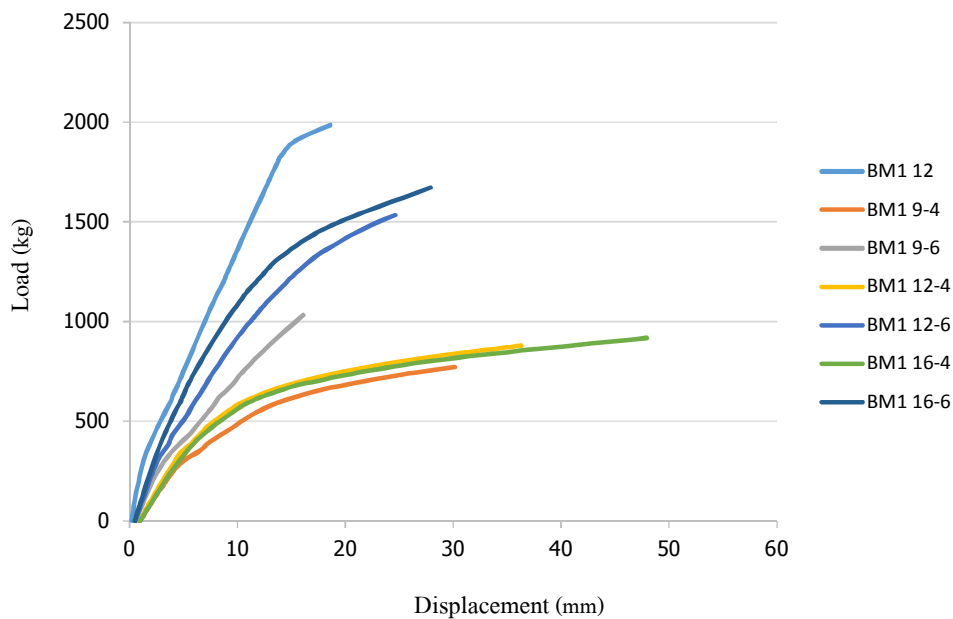
ตารางที่ 3.5 ลักษณะการวิบัติของกรณีศึกษา

ลำดับที่	กรณีศึกษา	ลักษณะการวิบัติ
1	BM1 12	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
2	BM1 9-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
3	BM1 9-6	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
4	BM1 12-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
5	BM1 12-6	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
6	BM1 16-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
7	BM1 16-6	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
8	BM2 12	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
9	BM2 16	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
10	BM2 9-4	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
11	BM2 9-6	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
12	BM2 12-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
13	BM2 12-6	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
14	BM2 16-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
15	BM2 16-6	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
16	BM3 12	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
17	BM3 12-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
18	BM3 12-6	การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง
19	BM3 16-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
20	BM3 16-6	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
21	BM3 2-16-4	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก
22	BM3 2-16-6	การวิบัติบริเวณขอบของเพลาเหล็ก

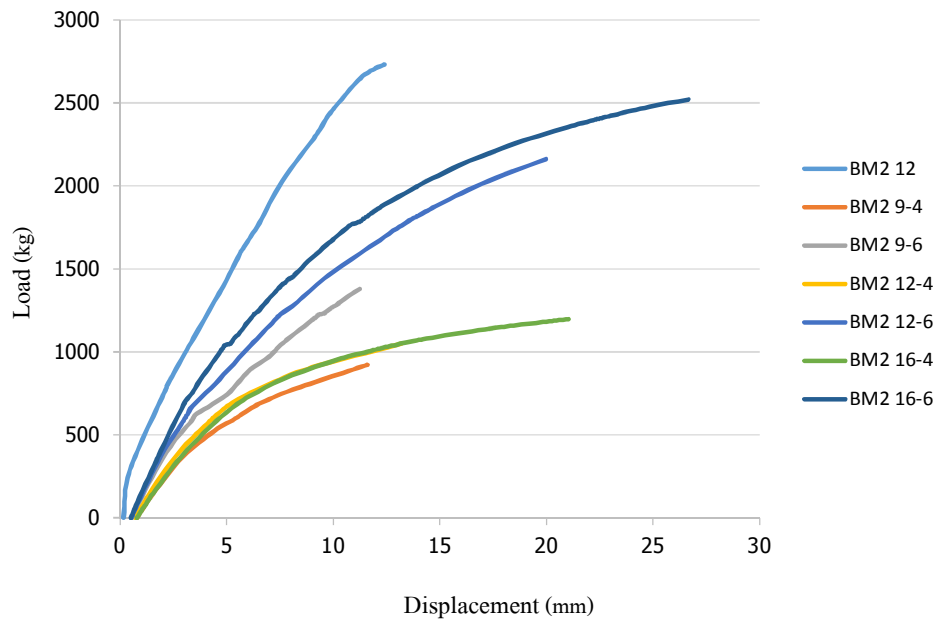
### 3.2.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

สำหรับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่ปลายคานคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.34 ถึงรูปที่ 3.36 จำแนกตามขนาดหน้าตัดของคานยื่นพบว่ากราฟเกิดการแบ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่มตามความหนาของเพลาเหล็กที่ใช้เป็นรอยต่อ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดความหนาของเพลาเหล็กจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่ออย่างชัดเจน โดยการเพิ่มขนาดความหนาของเพลาเหล็กทำให้รอยต่อมีความเป็น rigid มากขึ้นสามารถกระจายแรงดึงจากคานยื่นลงสู่คานหลักได้ดีขึ้นซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตได้

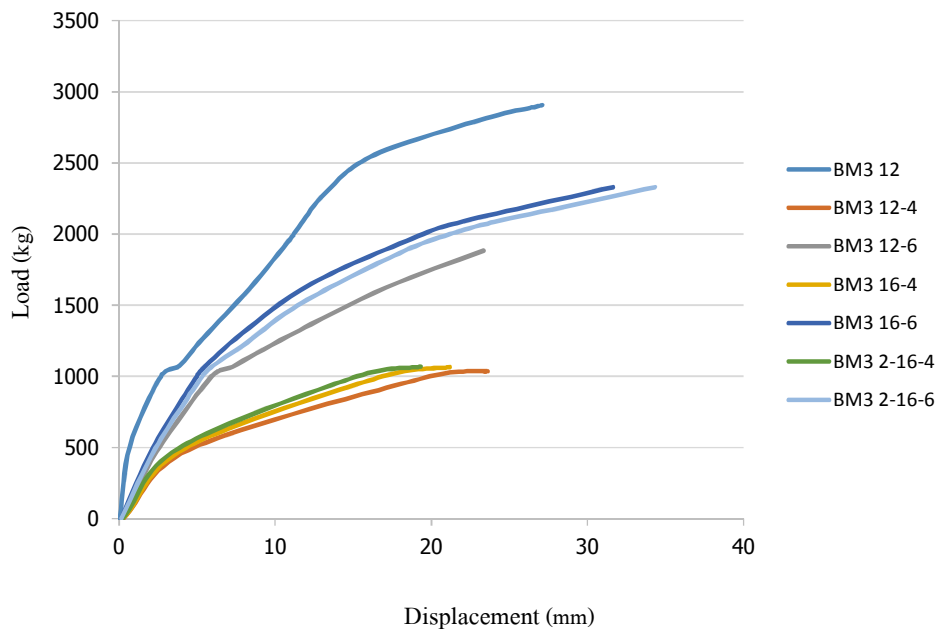
ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของขนาดเหล็กเสริมส่งผลให้หน้าตัดคอนกรีตสามารถต้านทานโมเมนต์ได้เพิ่มขึ้นและมีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตของคานยื่นและมีพื้นที่การกระจายแรงดึงจากคานยื่นลงสู่เพลาเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต อย่างไรก็ตามการส่งผ่านแรงระหว่างคานยื่นกับคานหลักยังคงขึ้นกับความแข็งแรงของเพลาเหล็ก ดังนั้นการเพิ่มขนาดเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อได้



รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่นของคานคอนกรีต BM1



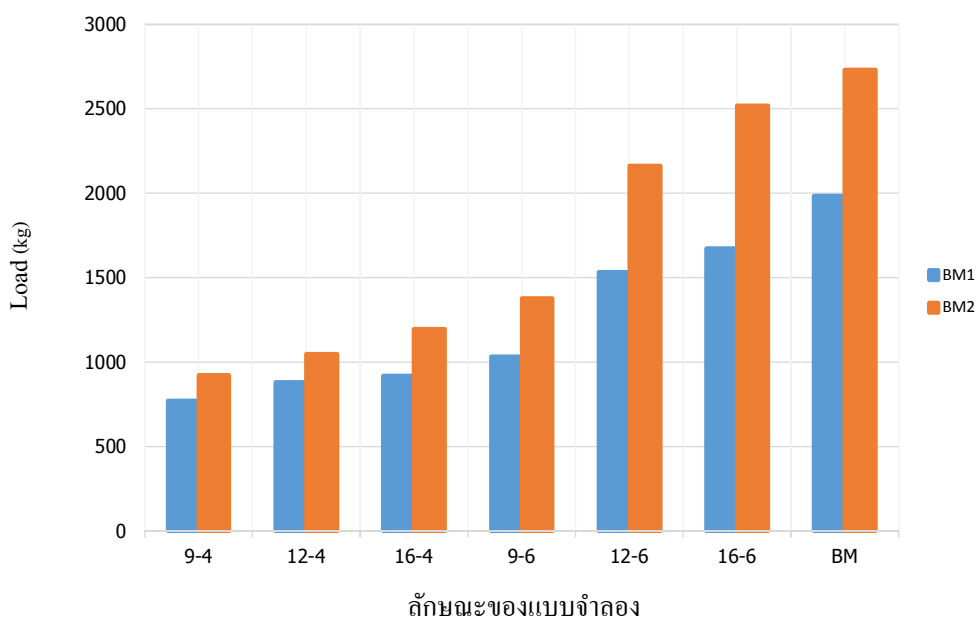
รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น  
ของคานคอนกรีต BM2



รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวที่ปลายคานยื่น  
ของคานคอนกรีต BM3

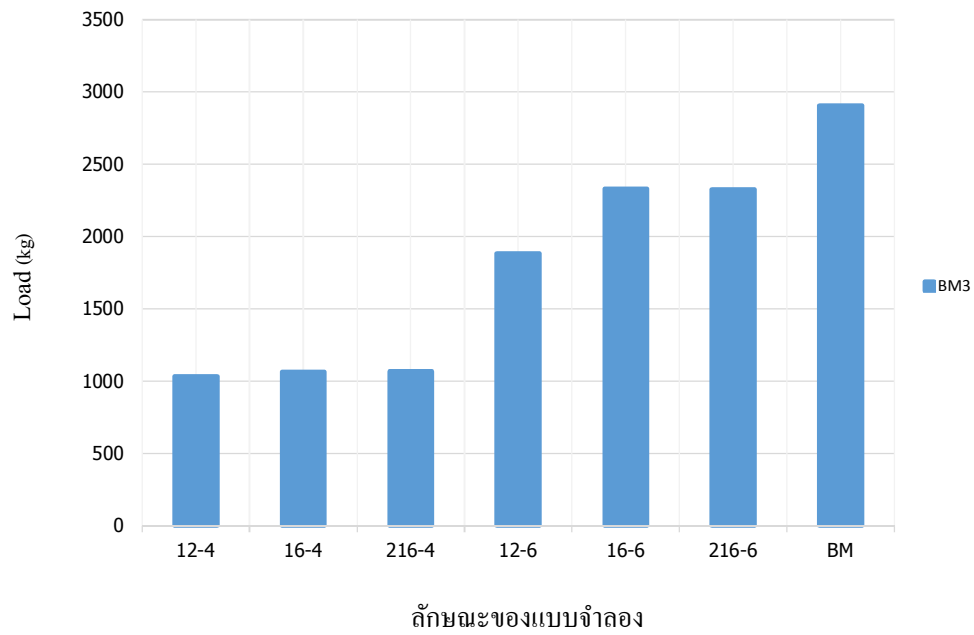
ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในแต่ละแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 พบว่าการเพิ่มขนาดของหน้าตัดของคานยื่นจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเพลาเหล็กบริเวณรอยต่ออย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มขนาดของหน้าตัดคานทำให้คานคอนกรีตสามารถต้านทาน โมเมนต์ ได้มากขึ้นจึงส่งผลให้คานคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับรอยต่อที่ใช้ขนาดความหนาของเพลาเหล็กต่างกัน เช่นกรณี 12-4 และ 12-6 ในรูปที่ 3.35 พบว่าความต่างของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน B1 และคาน B2 มีความแตกต่างกันมาก เนื่องมาจากรอยต่อที่ใช้เพลาเหล็กขนาดบางทำให้เกิดการวิบัติของเพลาเหล็กก่อนการถ่ายแรงจะสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามหากใช้ขนาดเพลาเหล็กให้หนาขึ้นดังเช่นกรณี 16-6 จะพบว่าความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกมีค่าใกล้เคียงกับคานหล่อเนื้อเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเพลาเหล็กมีความหนาเพียงพอในการถ่ายแรงระหว่างคานหลักและคานยื่น



รูปที่ 3.37 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต BM1 และ BM2





รูปที่ 3.38 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีต BM3

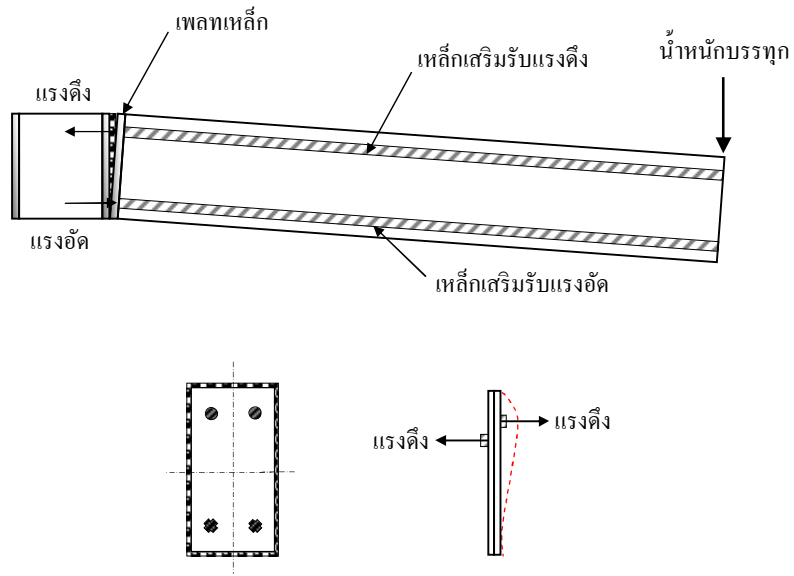
## บทที่ 4

### สมการการออกแบบรอยต่อแบบเพลาเหล็ก

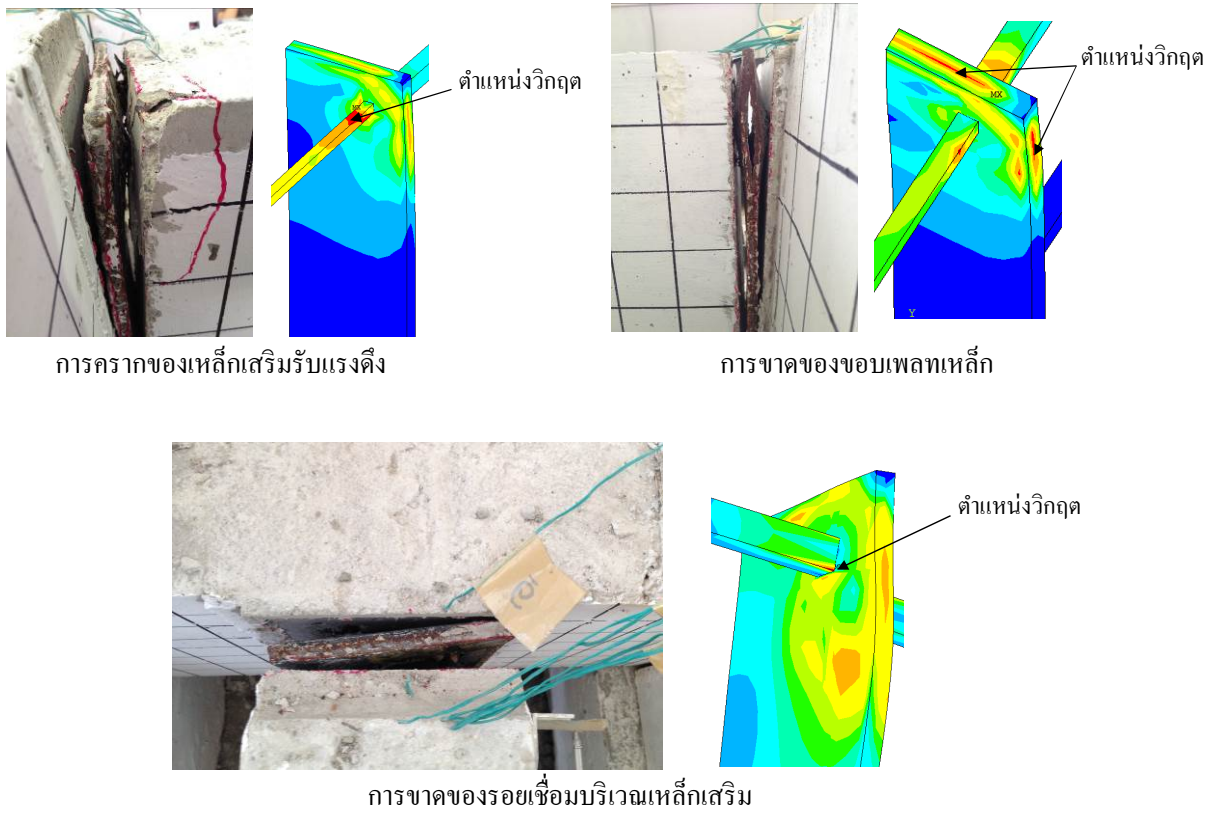
การเสนอสมการการออกแบบรอยต่อแบบเพลาเหล็กได้พิจารณาแรงดึงจากเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กระทำต่อคานคอนกรีตเป็นหลัก และกำหนดให้ที่ขอบของรอยต่อระหว่างเพลาเหล็กเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับคานคอนกรีต สามารถพิจารณาจากความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน แรงดึง และโมเมนต์ทั้งส่วนของหน้าตัดคานและรอยต่อ อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาความสามารถในการต้านทานแรงวิกฤตสามารถกำหนดลักษณะการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้ 3 กรณีซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ได้แก่

- 1) การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงซึ่งเกิดจากเหล็กเสริมได้รับแรงดึงที่มีค่าสูงกว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก
- 2) การขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริมเกิดจากรอยต่อได้รับแรงดึงสูงเกินกว่าค่ากำลังของรอยเชื่อมจึงทำให้รอยเชื่อมเกิดการฉีกขาด
- 3) การขาดของขอบเพลาเหล็กเกิดจากการที่เพลาเหล็กได้รับโมเมนต์จากแรงดึงของเหล็กเสริมร่วมกับแรงดึงจากเหล็กเสริมโดยตรง จนทำให้เกิดหน่วยแรงในหน้าตัดสูงกว่าหน่วยแรงที่เพลาเหล็กจะต้านได้

จากการวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของรอยต่อในการออกแบบนำไปสู่การออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกให้มีความปลอดภัยดังนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปแบบจำลองที่ใช้ในการเสนอสมการออกแบบ



รูปที่ 4.2 ลักษณะการวิบัติของรอยต่อ

#### 4.1 การต้านทานแรงดึงจากการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง

กำลังการรับแรงดึงของเหล็กเสริม ( $T_s$ ) ภายใต้หน้าทับบรรทุกทุกที่กระทำต่อคาน คอนกรีตแสดงดังสมการที่ 4.1

$$T_s = A_s f_s \quad (4.1)$$

โดยที่  $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ( $\text{mm}^2$ )  
 $f_s$  คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม (ksc)

#### 4.2 การต้านทานแรงดึงจากการขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม

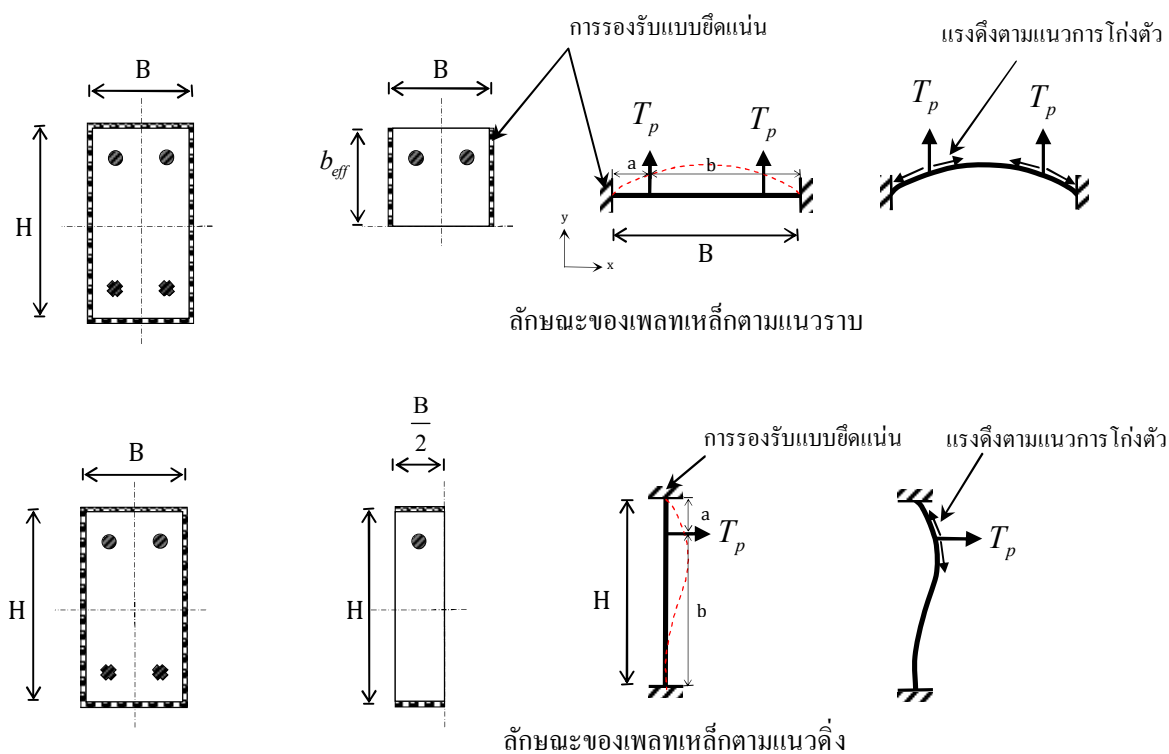
กำลังการรับแรงดึง ( $T_b$ ) บริเวณรอยเชื่อมรอบเหล็กเสริมแสดงดังสมการที่ 4.2 ในการศึกษานี้พิจารณา กำลังรับแรงดึงประลัยของลวดเชื่อม E60 มีค่า  $F_u = 4,200 \text{ ksc}$

$$T_b = 0.707 \times F_u \times t_w \times L \quad (4.2)$$

โดยที่  $F_u$  คือ กำลังรับแรงดึงประลัยของลวดเชื่อม E60 (ksc)  
 $t_w$  คือ ขนาดความหนาของรอยเชื่อม (mm)  
 $L$  คือ ความยาวของรอยเชื่อมรอบเหล็กเสริม  $= \pi d_b$  (mm)  
 $d_b$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)

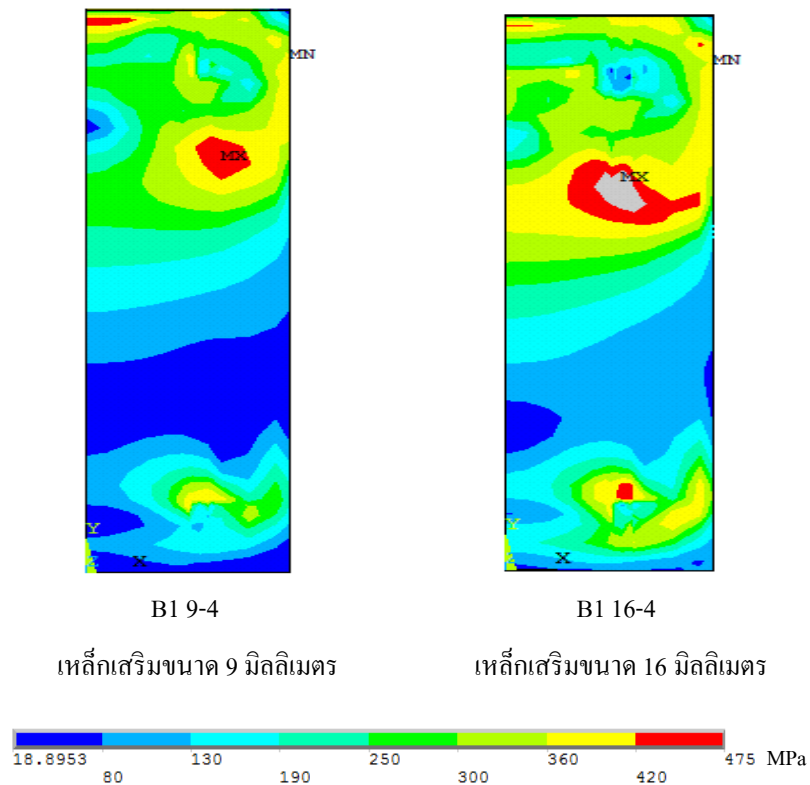
### 4.3 การต้านทานแรงดึงจากการขาดของขอบเพลทเหล็ก

การออกแบบกำลังการรับแรงดึงของเพลทเหล็กซึ่งได้รับผลกระทบจากแรงดึงของเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำ ผลกระทบของแรงดึงในเหล็กเสริม ( $T_p$ ) ทำให้เกิดแรงดึงในเพลทเหล็กตามแนวการ โกงตัว พร้อมทั้งเกิดโมเมนต์ในเพลทเหล็กเช่นกัน ทั้งนี้การกระจายแรงดึงในเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นใน 2 ทิศทางคือ ทิศของแนวราบและแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.3 การออกแบบนี้กำหนดให้ขอบของรอยต่อระหว่างเพลทเหล็กเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น หากพิจารณาโดยใช้หลักการการแอนด์ที่เท่ากันของเพลทเหล็กทิศทางในแนวราบและแนวตั้ง การกระจายแรงในแนวราบจะเกิดขึ้นประมาณ  $0.6T_p - 0.7T_p$  (พิจารณาความกว้างของเพลทเหล็กในแนวราบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความสูงเพลทเหล็ก) แต่เนื่องจากในสภาพการรับแรงจริง แรงดึงในเหล็กเสริมจะมีการกระจายเป็นแรงในแนวระนาบเพลทเหล็กบางส่วนเนื่องจากผลของการ โกงตัวของเพลทเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในกรณีศึกษาจึงกำหนดให้สัดส่วนของแรงดึงที่กระทำต่อเพลทเหล็กตามแนวราบมีค่าเท่ากับ  $0.5T_p$  โดยพิจารณาเพลทเหล็กในแนวราบเป็นแนววิกฤตในการออกแบบเนื่องจากเป็นแนวที่เกิด โมเมนต์สูงสุด



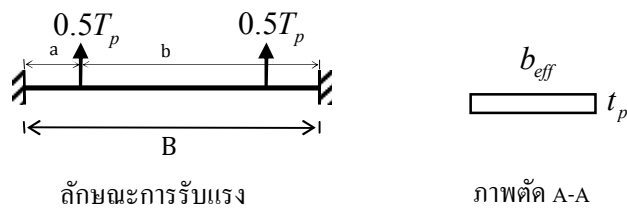
รูปที่ 4.3 ลักษณะการกระจายแรงดึงในเพลาเหล็ก

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง ผลการกระจายแรงจากเหล็กเสริมไปยังขอบของเพลาเหล็กดังแสดงในรูป 4.4 พบว่าความกว้างของการกระจาย stress เปลี่ยนแปลงตามขนาดเหล็กเสริม โดยเหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่จะมีความกว้างในการกระจาย stress ที่มากกว่าเหล็กเสริมขนาดเล็ก สำหรับการออกแบบนี้ได้กำหนดความกว้างประสิทธิภาพของเพลาเหล็ก ( $b_{eff}$ ) สำหรับเหล็กเสริมรับแรงดึงขนาด 9 มิลลิเมตร เป็น  $0.4H$  และความกว้างประสิทธิภาพสำหรับเหล็กเสริมรับแรงดึงขนาด 12 และ 16 มิลลิเมตร เป็น  $0.6H$  เพื่อให้สอดคล้องกับผลการศึกษาของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.4 การกระจาย Stress จากเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาการกระจายโมเมนต์ในเพลาเหล็กแนวราบซึ่งเกิดจากแรงดึงของเหล็กเสริมดังแสดงรูปที่ 4.5 พบโมเมนต์สูงสุด ( $M_{\max}$ ) ของเพลาเหล็กตามแนวราบเกิดขึ้นที่ขอบของเพลาเหล็กตามสมการที่ 4.3 และมีแรงเฉือนสูงสุด ( $V_{\max}$ ) ตามสมการที่ 4.4 หากพิจารณาความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ในช่วงพลาสติก ( $M_p$ ) ดังสมการที่ 4.5 ร่วมกับสมการโมเมนต์ที่ขอบของเพลาเหล็ก(สมการที่ 4.3) สามารถกำหนดความต้านทานแรงดึงจากเหล็กเสริม ( $T_p$ ) สูงสุดสำหรับกรณีวิถีที่ขอบของเพลาเหล็กดังสมการที่ 4.6



แผนภาพการกระจายโมเมนต์

รูปที่ 4.5 การกระจายแรงและโมเมนต์ในแนวนราบ

$$M_{\max} = \frac{0.5T_p}{B^2}(a^2b + ab^2) \quad (4.3)$$

$$V_{\max} = \frac{T_p b^2}{B^3}(3a + b) + \frac{T_p a^2}{B^3}(a + 3b) \quad (4.4)$$

$$M_p = \left( \frac{b_{\text{eff}} t_p^2}{4} \right) f_p \quad (4.5)$$

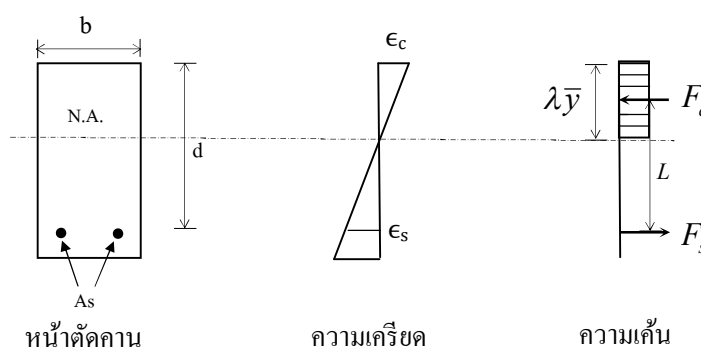
$$T_p = \frac{2B^2 M_p}{(a^2b + ab^2)} \quad (4.6)$$

- โดยที่
- $a, b$  คือ ระยะระหว่างน้ำหนักบรรทุกถึงจุดรองรับ(สอดคล้องกับตำแหน่งของเหล็กเสริมรับแรงดึง) (cm)
  - $B$  คือ ความยาวของเพลทเหล็กในแนวนราบ (cm)
  - $b_{\text{eff}}$  คือ ความกว้างประสิทธิภาพของเพลทเหล็ก สำหรับการพิจารณาการต้านโมเมนต์ของเพลทเหล็กในแนวนราบ (cm)
  - $t_p$  คือ ความหนาของเพลทเหล็ก (cm)
  - $f_p$  คือ หน่วยแรงดึงในเพลทเหล็ก (ksc)



#### 4.4 การคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

จากการคำนวณกำลังการรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมจากการวิบัติแต่ละกรณี สามารถพิจารณาเป็นกำลังที่ใช้ในการออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ( $P$ ) ที่กระทำต่อปลายคานยื่น โดยการแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมเป็นความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ตามมาตรฐาน BSEN 1992-1-1:2004 [12] ซึ่งเป็นการพิจารณาภายใต้หลักการกระจายความเครียดในหน้าตัด ความสมดุลของแรงอัดจากคอนกรีต ( $F_c$ ) และแรงดึงจากเหล็กเสริม ( $F_s$ ) ในหน้าตัด ร่วมกับการพิจารณาความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคอนกรีตที่รับแรงอัด ( $\lambda\bar{y}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 การคำนวณความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ในหน้าตัดของคาน ( $M_c$ ) แสดงดังสมการที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การกระจาย Stress และ Strain ในหน้าตัดคาน [13]

$$M_c = F_s \left( d - \frac{\lambda\bar{y}}{2} \right) \quad (4.7)$$

โดยที่  $F_s = f_s A_s \quad (4.8)$

$$F_c = b \lambda \bar{y} f'_c \quad (4.9)$$

$$\bar{y} = \frac{f_s A_s}{b \lambda f'_c} \quad (4.10)$$

$$\lambda = 0.8 \quad (4.11)$$

$b$  คือ ความกว้างของหน้าตัดคานคอนกรีต (cm)

$f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ksc)

ความสามารถในการต้าน โมเมนต์สามารถแปลงเป็นน้ำหนักบรรทุกที่ปลายคาน ยื่น ( $P$ ) ได้ดังแสดงในสมการที่ 4.12

$$P = \frac{M_c}{L_b} \quad (4.12)$$

โดยที่  $L_b$  คือ ความยาวของคานคอนกรีต

เพื่อทดสอบความแม่นยำในการทำนายความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการวิบัติของสมการออกแบบที่เสนอ จึงได้เปรียบเทียบผลการออกแบบกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 พบว่าความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติในการออกแบบ มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง ตัวอย่างเช่นแบบจำลอง BM2 16-4 ได้ ออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยเชื่อมระหว่างเพลทเหล็กกับเหล็กเสริมไว้ ที่ 2287 kg ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเหล็กเสริมอยู่ที่ 4160 kg และความสามารถ ในการรับน้ำหนักบรรทุกของเพลทเหล็กอยู่ที่ 1300 kg ซึ่งมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ที่วิกฤตอยู่ที่เพลทเหล็กและเป็นน้ำหนักบรรทุกที่มีความปลอดภัยเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกของ ผลการทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 1580 kg และมีความใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกของผลการวิเคราะห์ จากแบบจำลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 1190 kg ดังนั้นลักษณะการวิบัติของตัวอย่างนี้คือการขาดของขอบ เพลทเหล็กซึ่งตรงกับลักษณะการวิบัติของผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวิบัติสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป BM1

กรณีศึกษา	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (kg)					ลักษณะการวิบัติ		
	การออกแบบ			การทดสอบ	แบบจำลอง	การออกแบบ	การทดสอบ	แบบจำลอง
	รอยต่อ	เหล็กเสริม	เพลทเหล็ก					
BM1 12	-	1620	-	1740	1980	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม
BM1 9-4	1450	670	500	830	770	เพลทเหล็ก	เหล็กเสริม	เพลทเหล็ก
BM1 9-6	1450	670	1110	-	1030	เหล็กเสริม	-	เหล็กเสริม
BM1 12-4	1890	1620	740	1050	870	เพลทเหล็ก	รอยต่อ	เพลทเหล็ก
BM1 12-6	1890	1620	1640	1070	1530	เพลทเหล็ก	รอยต่อ	เพลทเหล็ก
BM1 16-4	1600	2893	740	-	910	เพลทเหล็ก	-	เพลทเหล็ก
BM1 16-6	1600	2893	1640	-	1670	รอยต่อ	-	เพลทเหล็ก

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวิบัติสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป BM2

กรณีศึกษา	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (kg)					ลักษณะการวิบัติ		
	การออกแบบ			การทดสอบ	แบบจำลอง	การออกแบบ	การทดสอบ	แบบจำลอง
	รอยต่อ	เหล็กเสริม	เพลาเหล็ก					
BM2 16	-	4160	-	3380	3460	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม
BM2 12	-	2280	-	-	2730	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม
BM2 9-4	2020	930	870	-	920	เพลาเหล็ก	-	เหล็กเสริม
BM2 9-6	2020	930	1940	-	1370	เหล็กเสริม	-	เหล็กเสริม
BM2 12-4	2672	2280	1300	-	1040	เพลาเหล็ก	-	เพลาเหล็ก
BM2 12-6	2672	2280	2860	-	2160	เหล็กเสริม	-	เพลาเหล็ก
BM2 16-4	2287	4160	1300	1580	1190	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก
BM2 16-6	2287	4160	2860	1680	2520	รอยต่อ	รอยต่อ	เพลาเหล็ก

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและลักษณะการวิบัติสำหรับคานคอนกรีตสำเร็จรูป BM3

กรณีศึกษา	ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (kg)				ลักษณะการวิบัติ	
	การออกแบบ			แบบจำลอง	การออกแบบ	แบบจำลอง
	รอยต่อ	เหล็กเสริม	เพลาเหล็ก			
BM3 12	-	1950	-	2900	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม
BM3 12-4	2230	1950	1330	1030	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก
BM3 12-6	2230	1950	2940	1880	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม
BM3 16-4	2950	3590	1330	1060	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก
BM3 16-6	2950	3590	2940	2330	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก
BM3 2-16-4	2950	3590	1330	1070	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก
BM3 2-16-6	2950	3590	2940	2330	เพลาเหล็ก	เพลาเหล็ก

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเพลาเหล็ก โดยการใช้ตัวอย่างทดสอบที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นชุดคานหลักกับคานยื่นคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลาเหล็กจำนวน 7 ตัวอย่าง โดยมีขนาดของคานยื่นได้แก่ คานขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตสำเร็จรูปได้แก่ ขนาดของหน้าตัดคาน ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง และความหนาของเพลาเหล็ก โดยลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง การขาดของขอบเพลาเหล็ก และการขาดของรอยเชื่อมบริเวณเหล็กเสริม

เพื่อให้ครอบคลุมกรณีการใช้งานรอยต่อแบบเพลาเหล็กที่มีความหลากหลาย การศึกษานี้จึงได้ศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการวิบัติเชิงตัวแปรโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งได้รับการตรวจสอบประสิทธิภาพในด้านการทำนายพฤติกรรมเชิงโครงสร้างและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเทียบกับผลการทดสอบ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบจำลองลักษณะคานหลักและคานยื่นเช่นเดียวกับการทดสอบจำนวน 22 แบบจำลอง ซึ่งกำหนดตัวแปรในการศึกษาคือขนาดของหน้าตัดได้แก่ ขนาดหน้าตัดของคานยื่น ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง และความหนาของเพลาเหล็ก โดยมีขนาดหน้าตัดของคานยื่นได้แก่ ขนาดหน้าตัด 150x300 และ 200x400 ตารางมิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร และขนาดหน้าตัด 250x500 ตารางมิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร แม้ว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแบบจำลองขึ้นอยู่กับ ขนาดของหน้าตัดคาน ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึง และความหนาของเพลาเหล็ก แต่หากพิจารณาแบบจำลองที่มีขนาดหน้าตัดคานและเหล็กเสริมที่มีขนาดเดียวกันพบว่า การเพิ่มความหนาของเพลาเหล็กสำหรับรอยต่อเพียง 2 มิลลิเมตร สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากข้อจำกัดในการ

จำลองรอยเชื่อม ดังนั้นลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองคือ การวิบัติของเหล็กเสริมรับแรงดึง และการวิบัติบริเวณขอบของเพลทเหล็ก ซึ่งความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ

ในการเสนอสมการการออกแบบรอยต่อแบบเพลทเหล็ก เพื่อออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะของการวิบัติของรอยต่อ ได้พิจารณากรณีวิกฤตของการวิบัติของรอยต่อออกเป็น 3 กรณีคือ การขาดของรอยเชื่อมระหว่างเพลทเหล็กกับเหล็กเสริม การครากของเหล็กเสริม และการวิบัติบริเวณขอบของเพลทเหล็กซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ พบว่าผลการออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติของรอยต่อมีความใกล้เคียงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการวิบัติการศึกษาเชิงตัวแปรสมการการออกแบบเป็นการคำนวณบนพื้นฐานของความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัด ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมและรอยเชื่อมของเหล็กเสริม และการกระจายแรงจากเหล็กเสริมไปยังขอบของเพลทเหล็กในแนวตั้งและแนวนอน

ผลการศึกษาจะเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบคานคอนกรีตที่มีรอยต่อแบบเพลทเหล็กให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน

## ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตสำเร็จรูป เกิดความเสียหายต่อสายของ Strain gauge ภายในคอนกรีต จึงควรระมัดระวังในการหล่อคอนกรีตบริเวณตำแหน่งที่ติด Strain gauge และควรเพิ่มปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในการศึกษาเชิงตัวแปร เช่น ตำแหน่งของเหล็กเสริมในคานคอนกรีต ประเภทของคานที่ใช้ในการทดสอบ และลักษณะของรอยต่อระหว่างเพลทเหล็กกับเหล็กเสริมรับแรงดึง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] โกวิท ฉันทจิตร (2553). “ความสามารถในการรับโมเมนต์ตัดของจุดต่อ คานคอนกรีตสำเร็จรูป” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [2] จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชีวะ (2550). “พฤติกรรมและประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อแบบเพลาเหล็กสำหรับรอยต่อคาน-เสาสำเร็จรูป” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [3] จิราชัย เลาสสมพลเลิศ (2551). “พฤติกรรมของรอยต่อคานคอนกรีตสำเร็จรูปรับโมเมนต์ตัด” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] นพดล บุญกล่อม (2553). “การเปรียบเทียบความแข็งแรงของจุดต่อเสา-คานแบบแผ่นเหล็กประกบและแบบหล่อในที่” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5] ปรัชญา ยอดดำรงค์ (2556) “ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวจำกัดโดยแปรผันเปอร์เซ็นต์เหล็กยื่น แบบมีเหล็กต่อทาบและไม่ต่อทาบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, บทความ STR090: 334-340
- [6] พลกฤต อนุปกิจ (2550) “พฤติกรรมการตัดของเสาและคานคอนกรีตชิ้นส่วนสำเร็จรูปอัดแรงภายในแบบไร้การยึดเหนี่ยว” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [7] ภากิณ ลอยเจริญ (2553) “พฤติกรรมรอยต่อแบบเป็ยกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปภายใต้การตัด” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, บทความ STR-08: 485-491
- [8] รัฐพล เกติยศ (2556) “การทดสอบโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายในอาคารที่ตัดพันธะแรงยึดเหนี่ยวเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงวัฏจักร” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, บทความ STR052: 178-184
- [9] อานนท์ วงษ์แก้ว (2556) “การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ข้อต่อคาน-เสาเหล็กก่อสร้างตามรูปแบบการก่อสร้างในประเทศไทยภายใต้แรงวัฏจักร” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, บทความ STR 093: 352-359



- [10] Alcocer et al (2002). **“Seismic Tests of Beam-To-Column Connections In a Precast Concrete Frame.”** PCI Journal: 70-89
- [11] ANSYS (2007), **ANSYS multiphysics. Version 11.0 SP1**, ANSYS Inc., Canonsburg(PA)
- [12] BS EN 1992-1-1 (2004), Eurocode 2 : **Design of concrete structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings.** European committee for standardization: 35
- [13] Lawson (2006). **“Design of FABSEC Cellular Beams in Non-composite and Composite Applications”**
- [14] Zhou et al (2004).**“Effects of Superstructure Flexibility on Strength of Reinforced Concrete Bridge Decks”** Computers & Structures 82(1): 13-23