

การทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อย
เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PRECAST REINFORCED
CONCRETE BEAMS WITH DEFORMED BARS WELDED TO STEEL
PLATE EMBEDDED AT THE SUPPORT SECTIONS UNDER THE
TRANVERSE POINT LOADS



CHUTHONG KONGKAEW

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil, Transportation and Geo-resources
Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2021

การทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับ
แผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. สงวน วงษ์ชวลิตกุล)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. สิทธีชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร. ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชูธง กงแก้ว : การทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็ก
ข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง
(EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PRECAST REINFORCED CONCRETE
BEAMS WITH DEFORMED BARS WELDED TO STEEL PLATE EMBEDDED
AT THE SUPPORT SECTIONS UNDER THE TRANSVERSE POINT LOADS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 142 หน้า.

คำสำคัญ : คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป/จุดต่อ/ความยาวระยะฝัง

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็ก
ข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับ โดยใช้วิธีการทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด เพื่อศึกษา
พฤติกรรมทางกล ลักษณะการวิบัติ และผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่
ส่วนรองรับ และผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่มีผลต่อกำลังของคานตัวอย่าง
ทดสอบ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณจากสมการการออกแบบคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ 1008-38 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็น
คานที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และยาว 4.0 ม. จุดเชื่อมต่อของคานทำด้วยแผ่น
เหล็กขนาดหน้าตัดกว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. และหนา 0.02 ม. เชื่อมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 16 มม. (DB16) ที่มีระยะฝังยาว 500 (คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง) 1000 และ 1500 มม.

จากการทดสอบพบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบ bilinear โดยในช่วงแรกจะมี
พฤติกรรม linear elastic จนกระทั่งกำลังต้านทานแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของ
กำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุด คานตัวอย่างทดสอบจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรม non-linear จากนั้น คาน
ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งคานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

ที่สภาวะใช้งาน (ที่ค่าการแอ่นตัวสูงสุด $L/240$) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยยาว
1.0 และ 1.5 ม. เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงกว่าคานตัวอย่าง
ทดสอบอ้างอิงอยู่ในช่วง 4.27 ถึง 17.45 เปอร์เซ็นต์ โดยรูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ
เปลี่ยนจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับ
เป็นการวิบัติแบบ flexural failure บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ และ diagonal shear
failure ตามที่ได้ออกแบบการทดสอบไว้

สุดท้าย เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นจากสมการของ วสท. พบว่า อยู่ในช่วง 1.70 ถึง 2.86 ขึ้นอยู่กับความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก



สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา *อลลลล*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *7.2*

CHUTHONG KONGKAEW : EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PRECAST REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH DEFORMED BARS WELDED TO STEEL PLATE EMBEDDED AT THE SUPPORT SECTIONS UNDER THE TRANVERSE POINT LOADS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SITTICHAJ SEANGATITH, Ph.D. 142 PP.

keyword: Precast reinforced concrete beam/Connection/Embedded length

This thesis presents the result from the experimental study on precast reinforced concrete beams, having connection in the form of deformed bars welded to steel plate and embedded at the support sections. The experiments were performed by using the four-point loading test. The objectives of this research are to study the mechanical behaviors, modes of failure, the effect of deformed bars welded to steel plate and the effect of stirrup spacing on the precast reinforced concrete beam specimens and compare the experimental results with ones calculated by using the EIT 1008-38's design equations for reinforced concrete beam. The beam specimens have the cross section of 0.175 m width and 0.35 m depth with 4.0 m clear span. The beam's connections at the ends of the beam were made of steel plate, having the cross section of 0.25 m width, 0.15 m depth and 0.02 m thickness, and welded with 16 mm diameter (DB16) deformed bars with the embedded length of 500 (reference beam), 1000 and 1500 mm.

According to the experiments, it was found that all of the specimens have a bilinear behaviors. They have linear elastic behavior up to about 80-90 percent of their maximum load-carrying capacity and, then, they have non-linear behavior with rapid increase in the deflection until their failure.

At the service condition (at the maximum deflection of $L/240$), the beam specimens, having the embedded length of 1.0 and 1.5 m, has the load-carrying capacity higher than that of the reference beams are in the range of 4.27 to 17.45 percent. It was found that the modes of failure of the beam specimens can be

separated into two parts. The beam specimens had the vertical cracks of the concrete at the support sections due to the slip of the steel plate, and, then, the beam specimens were failed in the form of the flexural failure or the diagonal shear failure in accordance with the experimental design.

Finally, when comparing the ratio between the linear elastic load-carrying capacity of the beam specimens from the experiments and that from EIT's equations, it was found that the ratios are in the range of 1.70 to 2.86, depending on the embedded length of the deformed bars.



School of Civil Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature *alt.k*
Advisor's Signature *y.w*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และหน่วยงานต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และชี้แนะแนวทางจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เจริญวัสดุภัณฑ์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจารุวี คำสมบูรณ์ เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานด้านเอกสารต่าง ๆ ในระหว่างการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณโกวิท กฐินใหม่ เจ้าหน้าที่ห้องทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจิระ วงศ์พรหม เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ครู คณาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้วิจัยจนประสบผลสำเร็จในวันนี้

ขอขอบคุณ เจ้าของเอกสารทางวิชาการ ตำรา บทความทางวิชาการ และหนังสือทุกท่านที่ผู้วิจัยใช้ในการสืบค้นข้อมูล

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็ง และช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ชูธง กงแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ประวัติความเป็นมาของโครงสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป.....	6
2.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	8
2.3.1 พฤติกรรมการต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	8
2.3.2 ลักษณะการวิบัติเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกกระทำโดยแรงดัด.....	11
2.3.3 พฤติกรรมการต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	14
2.3.4 พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5	ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง.....	17
2.4	ปรีทศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.5	สรุป	24
3.	วิธีการดำเนินการวิจัย	26
3.1	บทนำ.....	26
3.2	ออกแบบการศึกษาคานตัวอย่างทดสอบ	27
3.3	การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	33
3.3.1	การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด	33
3.3.2	การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบเพื่อต้านทานแรงเฉือน	37
3.3.3	การคำนวณระยะแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ	40
3.4	กำลังต้านทานแรงดึงของแผ่นเหล็กด้า.....	42
3.5	กำลังต้านทานแรงกดอัดของคอนกรีต	43
3.6	กำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเส้นกลม และเหล็กข้ออ้อย	43
3.7	การทดสอบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	44
4.	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล.....	60
4.1	บทนำ.....	60
4.2	คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	60
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ.....	61
4.3.1	คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1	61
4.3.2	คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2	63
4.3.3	คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบของกลุ่มต่าง ๆ.....	67
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าความเครียดในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ	68
4.6	กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการคราก และกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบ.....	71
4.7	อัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นของสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท.....	72
4.8	หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบ	74
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ และความยาวของคานตัวอย่างทดสอบ	76
4.10	รูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ	80
4.10.1	คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1	80
4.10.2	คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2	82
4.10.3	คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3	83
4.10.4	เปรียบเทียบลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม	85
4.11	อิทธิพลของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีต่อคานตัวอย่างทดสอบ.....	85
5.	สรุปและข้อเสนอแนะ	88
5.1	บทนำ.....	88
5.2	พฤติกรรมการณ์ต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบ	88
5.2.1	พฤติกรรมการณ์ต้านทานแรงของคานตัวอย่างทดสอบ	88
5.2.2	พฤติกรรมการณ์แอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3	ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ 89
5.2.4	ผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่อกำลังของ คานตัวอย่างทดสอบ 90
5.2.5	ผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กต่อกำลังของ คานตัวอย่างทดสอบ 91
5.3	ข้อเสนอแนะเพื่อการใช้งาน 92
5.4	ข้อจำกัดในงานวิจัย 93
5.5	ข้อเสนอแนะในงานวิจัย 93
รายการอ้างอิง 94
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	ผลการสอบเทียบ HYDRAULIC CYLINDER..... 96
ภาคผนวก ข	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..... 98
ภาคผนวก ค	วิเคราะห์ และวิจารณ์ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 112
ภาคผนวก ง	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย.. 118
ภาคผนวก จ	SPREADSHEET สำหรับออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย..... 121
ภาคผนวก ฉ	เปรียบเทียบราคาการหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย..... 134
ภาคผนวก ช	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 137
ประวัติผู้เขียน 145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวคูณลดกำลัง (reduction factor, ϕ)	18
2.2 ความลึกต่ำสุดขององค์อาคารรับแรงดัด	19
2.3 พิกัดการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และแผ่นเหล็กที่ยอมให้	19
3.1 คานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	52
3.2 ตัวอย่างหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก	53
3.3 ตัวอย่างหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก	54
4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	61
4.2 กำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1	62
4.3 กำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2	64
4.4 กำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3	66
4.5 กำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบ	72
4.6 กำลังต้านทานแรงกระทำในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นของคานตัวอย่างทดสอบ กำลังต้านทานแรงกระทำในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นของสมการออกแบบของ วสท. และอัตราส่วนระหว่าง $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$	74
4.7 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบ	76
4.8 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกระทำที่สภาวะใช้งาน	79
ข.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	100
ข.2 ค่าการยุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ	103
ข.3 ชื่อขนาด และมวลรวมระบุของเหล็กเส้นกลม	107
ข.4 คุณสมบัติทางกลในการรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย	107
ข.5 ชื่อขนาด และมวลรวมระบุของเหล็กเส้นข้ออ้อย	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.6 ชนิด และชั้นคุณภาพของแผ่นเหล็ก	111
ข.7 คุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็ก	111
ค.1 ผลการทดสอบของเหล็กเส้นกลม (RB6) และเหล็กข้ออ้อย (DB16).....	115
ค.2 ผลการทดสอบของแผ่นเหล็ก	116
ฉ.1 เปรียบเทียบระหว่างราคาที่สูงขึ้น และกำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน.....	135



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่	2
1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่นำมาเชื่อมต่อกับเสาโดยใช้วิธีจุดต่อ	3
1.3 การติดตั้งคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับ เข้ากับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
2.1 การก่อสร้างคานคอดินแบบหล่อในที่	7
2.2 การก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป	8
2.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงยึดหุ่นเชิงเส้น	9
2.4 รูปแบบการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแรงดึง และการกระจายหน่วยแรง และความเครียดที่หน้าตัดเกิดการแตกร้าว	10
2.5 ลักษณะการกระจายหน่วยแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สภาวะ ที่มีปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงต่ำกว่าสภาวะสมดุล	12
2.6 ลักษณะการกระจายหน่วยแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สภาวะ ที่มีปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงสูงกว่าสภาวะสมดุล.....	13
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	14
2.8 รอยร้าวแบบ flexural shear crack.....	15
2.9 รอยร้าวแบบ web shear crack.....	15
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่ำกว่าสภาวะสมดุล.....	16
2.11 จุดวิบัติของคานที่เกิดขึ้นที่ปลายคานที่ฝังอยู่ในคอนกรีต.....	21
2.12 ค่าระยะฝังของเหล็กรูปตัวไอที่เหมาะสมที่สุด	21
2.13 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝังที่ส่วนรองรับ.....	22
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะฝังของเหล็กวางน้ำ.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับ.....	23
2.16 จุดเชื่อมต่อระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	25
3.1 แบบจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
3.2 แผนภาพรับแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดจากการทดสอบแบบแรงกระทำ 3 จุด.....	30
3.3 ส่วนประกอบของส่วนรองรับของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ.....	31
3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.5 การกระจายของหน่วยแรง และความเครียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	33
3.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
3.7 การผูกเหล็กเสริมของคานตัวอย่างทดสอบ.....	46
3.8 การติดตั้ง strain gauge เข้ากับเหล็กเสริม.....	47
3.9 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก.....	47
3.10 แบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.11 เหล็กเสริมที่นำไปใส่ในแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะหุ้มเท่ากับ 2.5 cm.....	48
3.12 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝิ่งที่ส่วนรองรับของคานตัวอย่างทดสอบ.....	49
3.13 คอนกรีตที่หล่อทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง.....	49
3.14 แบบหล่อที่ปิดส่วนแผ่นเหล็กที่ยื่นออกมาจากคานตัวอย่างทดสอบ.....	50
3.15 การบ่มคานตัวอย่างทดสอบด้วยกระสอบชุบน้ำ.....	50
3.16 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ RC-0000-100.....	55
3.17 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ PC-0500-100, PC-1000-100 และ PC-1500-100.....	55
3.18 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ RC-0000-300.....	56
3.19 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ PC-0500-300, PC-1000-300 และ PC-1500-300.....	56
3.20 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ RC-0000-500.....	57
3.21 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ PC-0500-500, PC-1000-500 และ PC-1500-500.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame	58
3.23 การติดตั้ง dial gauge เข้ากับคานตัวอย่างทดสอบ	58
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1	62
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2	64
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3	66
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม	67
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1	69
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2	70
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3	70
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน และความยาวระยะฝั่ง ของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก	75
4.9 การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1	77
4.10 การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2	78
4.11 การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3	78
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ และความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก	80
4.13 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 1	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 1.....	82
4.15 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 2.....	83
4.16 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 2	83
4.17 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 3.....	84
4.18 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 3	84
ก.1 ผลการสอบเทียบ hydraulic cylinder.....	97
ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด และความเครียดในคอนกรีต.....	104
ข.2 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	106
ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และความเครียดในเหล็กเสริม.....	109
ค.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัด และความเครียดกดอัดของคอนกรีต.....	113
ค.2 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัด	114
ค.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และความเครียดดึงของเหล็กเสริม RB6 และ DB16.....	115
ค.4 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเส้นกลม และเหล็กข้ออ้อยภายใต้แรงดึง.....	116
ค.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และความเครียดดึงของแผ่นเหล็ก.....	117
ค.6 ลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็ก	117
ง.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบกำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่างทดสอบ.....	119
ง.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของคานตัวอย่างทดสอบ	120

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ความลึกของพื้นที่การกระจายหน่วยแรงในด้านรับแรงอัด
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
A'_s	=	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด
A_v	=	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (พื้นที่เป็น 2 เท่าของเหล็กเสริม)
b	=	ความกว้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
c	=	ความลึกที่วัดจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังแกนสะเทิน
d	=	ความลึกประสิทธิภาพจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมรับแรงดึง
d'	=	ความลึกประสิทธิภาพจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมรับแรงดึง
DL	=	น้ำหนักบรรทุกคงที่
E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
f'_c	=	กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต
f_r	=	โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต
f_s	=	กำลังต้านทานแรงของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
f'_s	=	กำลังต้านทานแรงของเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด
f_{sy}	=	กำลังต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
f_u	=	กำลังต้านทานแรงดึงประลัยของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
f_y	=	กำลังต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม
h	=	ความลึกของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
l	=	โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
I_{cr}	=	โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวที่เกิดขึ้น
I_e	=	โมเมนต์เฉื่อยประสิทธิผลที่เกิดขึ้น

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

I_g	=	โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดทั้งหมดที่เกิดขึ้น
kd	=	ระยะที่วัดจากผิวบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กถึงแนวแกนสะเทินของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
L	=	ความยาวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
l_e	=	ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก
LL	=	น้ำหนักบรรทุกจร
M_o	=	โมเมนต์มากที่สุดที่กระทำต่อหน้าตัดที่พิจารณา
M_{cr}	=	โมเมนต์แตกร้าวที่เกิดขึ้น
M_n	=	กำลังรับโมเมนต์ที่คำนวณได้
M_u	=	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคุณสมบัติ
n	=	อัตราส่วนโมดูลัส
P	=	กำลังต้านทานโมเมนต์
$P_{L/240}$	=	กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน (ค่าการแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ $L/240$)
P_{max}	=	กำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุด
P_y	=	กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเกิดการคราก
S	=	ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
T	=	แรงดึงในเหล็กเสริม
U	=	กำลังที่ต้องการ
V_c	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต
V_n	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบ
V_s	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
V_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการ
w_c	=	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
w_g	=	น้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

\emptyset	=	ตัวคูณลดกำลัง
Δ	=	ค่าการแอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
ϵ_c	=	ความเครียดของคอนกรีต
ϵ_{ct}	=	ความเครียดดึงของคอนกรีต
ϵ_s	=	ความเครียดของเหล็กเสริม
ϵ_u	=	ความเครียดสูงสุดของคอนกรีต
ϵ_y	=	ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม
ρ	=	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
ρ'	=	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด
ρ_b	=	ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะความเครียดสมดุลที่มีเหล็กเสริม
$\bar{\rho}_b$	=	ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะความเครียดสมดุลที่มีเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง อย่างเดียว
ρ_{max}	=	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมากที่สุดที่ยอมให้
ρ_{min}	=	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงน้อยที่สุดที่ยอมให้
ACI	=	American Concrete Institute
AISC	=	American Institute of Steel Construction
FS.	=	Factor of Safety
UTM	=	Universal Testing Machine

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

โครงสร้างอาคารสาธาณูปโภคส่วนใหญ่ในประเทศไทยนั้นล้วนถูกสร้างจากวัสดุที่ผสมผสานกันระหว่างคอนกรีต (concrete) ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานแรงอัดได้สูง และเหล็กโครงสร้าง (structural steel) ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานแรงดึง และแรงอัดได้สูงมาหลอมรวมกันในแบบหล่อที่อาจทำจากวัสดุต่าง ๆ เช่น ไม้ และเหล็ก เป็นต้น ก่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมาก สามารถต้านทานได้ทั้งแรงอัดและแรงดึง ทนทานต่อสภาพอากาศที่ย่ำแย่ได้ดี รับน้ำหนักบรรทุกได้ดี ยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั้ง 2 ชนิดที่ยังไม่ได้นำมารวมกัน และยังมีเสถียรภาพที่น้อยกว่า เรียกว่า โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete structure)

ในหลายปีที่ผ่านมา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยส่วนใหญ่นั้นล้วนมีกรรมวิธีการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยส่วนใหญ่จะเริ่มจากการก่อสร้างในระบบเสา-คาน (frame structure) การก่อสร้างแบบระบบเสา-คานนั้นจะต้องเป็นไปตามขั้นตอนของการก่อสร้างไม่สามารถลัดขั้นตอนในการก่อสร้างได้ ในแต่ละขั้นตอนก็จะต้องมีการเตรียมแบบหล่อ คอนกรีต เหล็กโครงสร้าง และกำลังคนให้เพียงพอก่อน เช่น หากต้องการที่จะหล่อเสาในระบบเสา-คานจะต้องให้คนงานเตรียมเหล็กเสริมมาผูกต่อกันให้พร้อมจึงจะสามารถนำแบบหล่อมารอบเสาและจำเป็นที่จะต้องตั้งค้ำยันเพื่อให้เสาอยู่ในแนวตั้งตั้งฉากกับแนวระนาบให้มากที่สุดจึงจะสามารถเทคอนกรีตได้ ถ้าคอนกรีตที่เทใส่แบบหล่อยังไม่ได้กำลังรับแรงอัดที่ต้องการก็ไม่สามารถถอดแบบหล่อออกมาได้ ในขณะที่รอคอนกรีตได้กำลังรับแรงที่ต้องการก็ไม่สามารถหล่อคานต่อได้ เนื่องจากติดแบบหล่อที่ทำการหล่อเสาอยู่ หรือถ้าหากทำขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งไม่เสร็จทันเวลา ก็จะส่งผลให้ขั้นตอนต่อ ๆ ไปไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างต่อได้ ในตัวอย่างที่ยกขึ้นมาดังกล่าวนี้ทำให้การก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในแบบหล่อในที่ที่มีผลเสีย คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างใช้เวลานานมากจนอาจจะส่งผลให้สถานที่ก่อสร้างเกิดความล่าช้า การสิ้นเปลืองงบประมาณในการเช่าแบบหล่อ และคนงานอาจจะส่งผลให้งบประมาณในการก่อสร้างสูงขึ้นเกินความจำเป็นอีกด้วย

ในปัจจุบันจึงได้มีการต้องการที่จะลดผลเสียจากการใช้ระบบหล่อในที่ด้วยการนำระบบที่เรียกว่า การก่อสร้างโครงสร้างแบบสำเร็จรูป (precast construction) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของ เสา ที่นำเอาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปมาเชื่อมติดกับเสา ซึ่งเป็นคานที่หล่อมาจากโรงงานหล่อซึ่งอาจจะอยู่ไกลจากสถานที่ก่อสร้าง หรืออยู่ในสถานที่ก่อสร้างแล้วนำมาประกอบ ณ สถานที่ก่อสร้างโดยใช้วิธีจุดต่อ (joint connection) โครงสร้างที่นำมาประกอบกันถูกออกแบบให้รับแรงถ่ายแรง และเสริมความแกร่งให้กันได้อย่างดี การก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จรูปนั้น มีข้อดีหลายประการ เช่น ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ประหยัดงบประมาณจากคนงานและแบบหล่อ ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม มีความคลาดเคลื่อนจากการทำงานที่น้อยกว่าอีกด้วย



รูปที่ 1.1 การก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่



รูปที่ 1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่นำมาเชื่อมต่อกับเสาโดยใช้วิธีจุดต่อ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประเทศไทยได้มีการนำวิธีการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จรูปมาใช้เป็นจำนวนมากในระบบการก่อสร้างสาธารณูปโภคที่มีขนาดใหญ่ เช่น ทางด่วนแบบสำเร็จรูป และทางรถไฟยกระดับสำเร็จรูป เป็นต้น ในงานก่อสร้างองค์อาคาร เช่น แผ่นพื้นสำเร็จรูป กำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป และคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป เป็นต้น

เพื่อต้องการที่จะตอบสนองความต้องการคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสำเร็จรูป และให้สอดคล้องกับแนวคิดอาคารสีเขียว (green building) งานวิจัยนี้จึงศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปอีกหนึ่งรูปแบบ คือ คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝึงที่ส่วนรองรับ ซึ่งหน่วยงานก่อสร้างของบริษัท Shibakawa (Thailand) CO.,LTD Extension factory นิคมอุตสาหกรรมเหมราช จ.สระบุรี ที่ผู้วิจัยได้มีโอกาสไปออกสหกิจศึกษาได้นำคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อแบบดังกล่าวที่มีความยาวระยะฝึงของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm เข้ามาใช้ในหน่วยงานก่อสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งแผ่นเหล็กจะนำไปยึดติดกับเสาเพื่อความรวดเร็วในการก่อสร้าง



รูปที่ 1.3 การติดตั้งคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับเข้ากับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบ 4 จุด (four-point loading test) และลักษณะของการวิบัติ (modes of failure) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับ เปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงกระทำกับคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ความยาวระยะฝังเท่ากับ 500 mm (คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง) และผลการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก (embedded length, l_e) และผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (stirrup spacing, S) ที่มีผลต่อกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตแนวทางการศึกษาไว้ ดังนี้

1.3.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสำเร็จรูป (precast reinforced concrete beam) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 175 mm ลึก

350 mm โดยมีความยาวระหว่างจุดรองรับ (clear span) 4.0 m และมีรูปแบบเป็นจุดรองรับอย่างง่าย (simple supported beam)

1.3.2 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก โดยมีความยาวระยะฝั่งทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 500 (คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง) 1000 และ 1500 mm และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน โดยมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 100 300 และ 500 mm

1.3.3 เหล็กเสริมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย โดยที่เหล็กเส้นกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (มอก. 20-2559) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทราชสีมาผลิตเหล็ก จำกัด (RSM) เกรด SR24 และเหล็กข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm (มอก. 24-2559) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไทยสตีลโปรไฟล์ จำกัด (TSC) เกรด SD40

1.3.4 เหล็กรูปพรรณที่เชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กแผ่นดำ (steel plate) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 250 mm ลึก 150 mm และหนา 20 mm ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 1479-2541) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SINO COMMODITIES INTERNATIONAL PTE. LTD. เกรด SS400

1.3.5 คอนกรีตแบบผสมสำเร็จ (ready-mixed concrete) กำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) มีค่าเท่ากับ 380 kg/cm^2 ของแท่งทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m สูง 0.30 m ที่อายุบ่ม 28 วัน ผลิตโดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 409-2525)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ได้องค์ความรู้ และความเข้าใจในพฤติกรรมการรับแรงแบบแรงกระทำ 4 จุด และลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่งที่ส่วนรองรับ และนำไปสู่การพัฒนาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปในลักษณะดังกล่าวเพื่อการใช้งานจริง

1.4.2 การนำคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปในลักษณะนี้มาใช้งานจริงจะช่วยให้สามารถประหยัดเวลาในการก่อสร้างงบประมาณในการจัดซื้อแบบหล่อ และงบประมาณในการจัดหาแรงงานคน รวมถึงรักษาสีสิ่งแวดล้อมโดยการลดขยะที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้างซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดอาคารสีเขียว (green building)

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงประวัติศาสตร์ความเป็นมาของการก่อสร้างโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปในประเทศไทย พฤติกรรมการต้านทานโมเมนต์ดัด พฤติกรรมการต้านทานแรงเฉือน สมการการออกแบบ และข้อกำหนดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท.1008-38) และงานวิจัยที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา

2.2 ประวัติความเป็นมาของโครงสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป

ระบบการก่อสร้างแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้เข้ามามีบทบาทในประเทศไทย หลังจากจบสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากในสมัยก่อนคนไทยนิยมสร้างบ้านด้วยไม้เป็นหลัก โครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ ระบบการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (cast in place reinforced concrete structure) และระบบการก่อสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป (precast reinforced concrete structure) ซึ่งระบบโครงสร้างแบบหล่อในที่มีความแพร่หลายมากในการใช้งานในการก่อสร้างเป็นอย่างมาก แต่มีข้อเสียหลัก ๆ คือ เสียค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลาในการก่อสร้างค่อนข้างนาน ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีมีความทันสมัยมากขึ้น จึงได้มีการนำเครื่องจักรเข้ามาช่วยในการก่อสร้าง ทำให้ปัจจุบันการก่อสร้างแบบระบบคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีคอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำในการก่อสร้างสูง สามารถผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ในพื้นที่ที่จำกัดได้ แต่ยังไม่มีความแพร่หลายในช่วงแรก จนเมื่อเข้าสู่ช่วงศตวรรษที่ 20 ได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างที่มีมาตรฐานในการก่อสร้างสูง เนื่องจากโครงการก่อสร้างเริ่มมีขนาดใหญ่ และซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ขั้นตอนการก่อสร้างต้องการความแม่นยำสูงเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่นำมาสู่ความเสียหายของโครงสร้างน้อยที่สุด และต้องการให้ระยะเวลาในการก่อสร้างมีระยะเวลาที่สั้นที่สุด จึงได้มีการนำการก่อสร้างแบบสำเร็จรูปมาใช้ในประเทศไทยมากขึ้น เช่น อาคารขนาดใหญ่ คอนโด เป็นต้น

ซึ่งจากประสบการณ์ที่ผู้วิจัยได้มีโอกาสไปออกสหกิจศึกษาในระดับปริญญาตรี ที่โครงการก่อสร้างของบริษัท Shibakawa (Thailand) CO., LTD Extension factory นิคมอุตสาหกรรมเหมราช จังหวัดสระบุรี ทางโครงการได้มีการก่อสร้างโครงสร้างคานคองกรีตเสริมเหล็กทั้ง 2 ระบบ โดยที่ระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่จะใช้ในการก่อสร้างคานคอดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และระบบการก่อสร้างแบบคานคองกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่เป็นที่มาของงานวิจัยใช้ในการก่อสร้างคานคองกรีตเสริมเหล็กเพื่อเชื่อมตติระหว่างเสา ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากการสังเกต และสอบถามเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง พบว่า การก่อสร้างแบบคานคองกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปสามารถประหยัดเวลาในการก่อสร้าง ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง จำนวนคนงานที่ใช้ในการหล่อคานคองกรีตเสริมเหล็กขยะที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง และมีความคลาดเคลื่อนของโครงสร้างน้อยกว่าการก่อสร้างคานคองกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่พอสมควร



รูปที่ 2.1 การก่อสร้างคานคอดินแบบหล่อในที่



รูปที่ 2.2 การก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

2.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

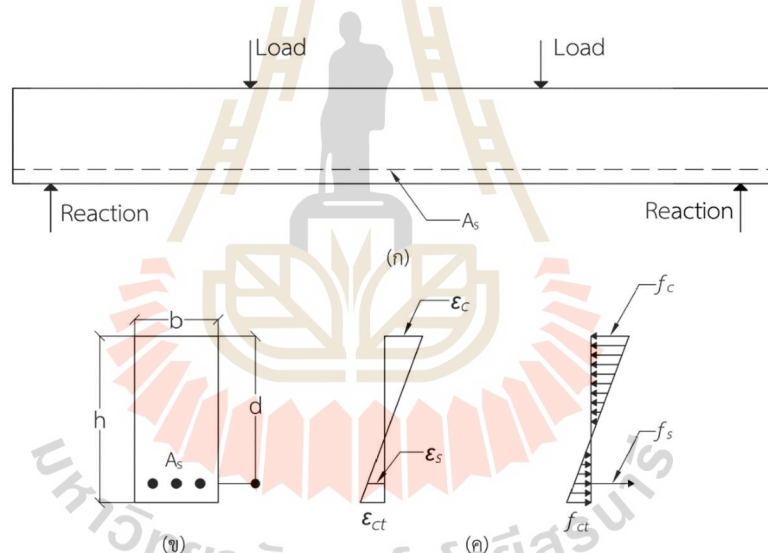
คานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหนึ่งในส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งขององค์อาคารที่อยู่ในแนวราบขนานกับพื้น ซึ่งประกอบด้วยคอนกรีตเป็นหลัก และมีเหล็กเสริมอยู่ภายในตัวของคอนกรีต โดยที่เหล็กเสริมที่เรียงไปในแนวตามยาวของคานคอนกรีตถูกเรียกว่า เหล็กเสริมหลัก (main reinforcement) เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง เช่น น้ำหนักแผ่นจากกำแพง น้ำหนักแผ่นจากพื้นอาคาร และน้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด เช่น น้ำหนักเกิดจากคานชอย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเหล็กเสริมที่เสริมเข้ามาเพื่อช่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวคานเพื่อช่วยรับแรงเฉือนส่วนเกินที่ตัวของคอนกรีตจะสามารถรับได้ อันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานส่งผลให้เกิดทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเสมอ แต่ในบางกรณีอาจจะเกิดโมเมนต์บิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไม่ได้กระทำผ่านศูนย์กลางของแรงเฉือน ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในตัวคาน เช่น หน่วยแรงบิด หน่วยแรงดัด เป็นต้น

2.3.1 พฤติกรรมการต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในคานคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมภายในนั้นไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการรับแรงดัดเนื่องจากคอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงดัดได้ต่ำแต่สามารถรับแรงอัดได้สูง ทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติด้วยแรงดัดเป็นหลักเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ต่ำมาก เมื่อเกิดการวิบัติโดยแรงดัดอย่างรวดเร็วจึงทำให้คอนกรีตรับแรงอัดได้ไม่เต็มที่ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมาการนำเหล็กมาเสริมกำลังในการต้านทานแรงดัดที่บริเวณด้านรับแรงดัดของคอนกรีต โดยมีระยะหุ้ม (covering) เพื่อป้องกันไม่ให้เหล็ก

เกิดการกักต่อน และผลกระทบอื่น ๆ ที่อาจจะทำให้เหล็กเสียกำลังในการรับแรงดึง เมื่อนำทั้งคอนกรีตและเหล็กโครงสร้างมารวมกัน เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผิวด้านบนของคานจะเกิดแรงอัดซึ่งคอนกรีตจะรับแรงอัดเป็นหลัก และผิวด้านล่างของคานเหล็กเสริมจะมีหน้าที่ยึดรับแรงดึงเป็นหลัก ซึ่งกลไกการทำงานร่วมกันของคอนกรีตและเหล็กโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กโครงสร้างต้องมามีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดลื่นไถลออกจากกัน

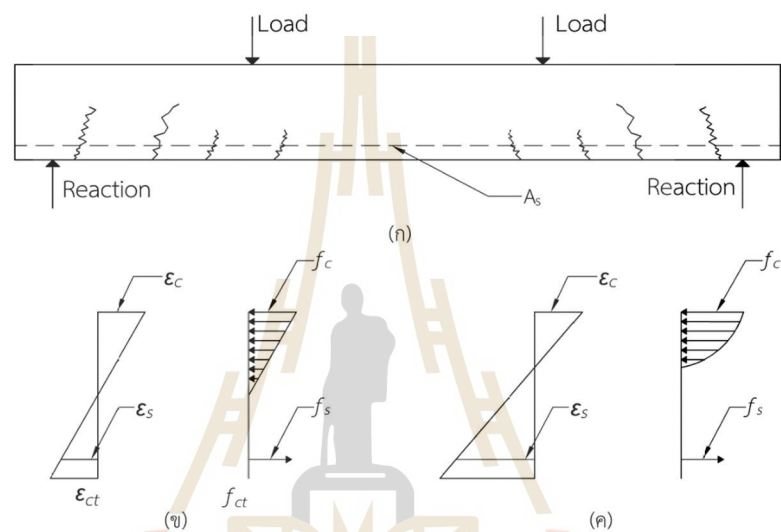
เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ แต่ไม่ถึงค่าโมดูลัสแตกหักของคอนกรีต หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตจะช่วยกันต้านโมเมนต์ ที่ผิวบนคอนกรีตก็จะรับแรงอัดและที่ผิวล่างของคอนกรีตก็จะรับแรงดึง ที่สภาวะดังกล่าวหน่วยแรงในคอนกรีตจะมีค่าน้อยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค)



รูปที่ 2.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น

เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่คอนกรีตบริเวณผิวด้านล่างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้ คอนกรีตจะเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นเนื่องจากแรงดึง และขยายตัวกว้างขึ้นในอัตราที่รวดเร็วเมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) สำหรับคานที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดี ความกว้างของรอยแตกร้าวที่น้ำหนักบรรทุกสภาวะใช้งาน (service load) จะเล็กมาก บริเวณผิวด้านล่างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใน

ส่วนที่เกิดการแตกร้าวจะไม่มีกำลังในการต้านทานแรงดึงอีกต่อไป ทำให้เหล็กเสริมเข้ามารับหน้าที่รับแรงดึงทั้งหมดของหน้าตัด ที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกทุกมีค่าไม่มาก (หน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่เกิน $0.5 f_c'$) หน่วยแรง และความเครียดของหน้าตัดจะยังเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกันดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) เมื่อน้ำหนักที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หน่วยแรงและความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกันดังแสดงในรูปที่ 2.4(ค)



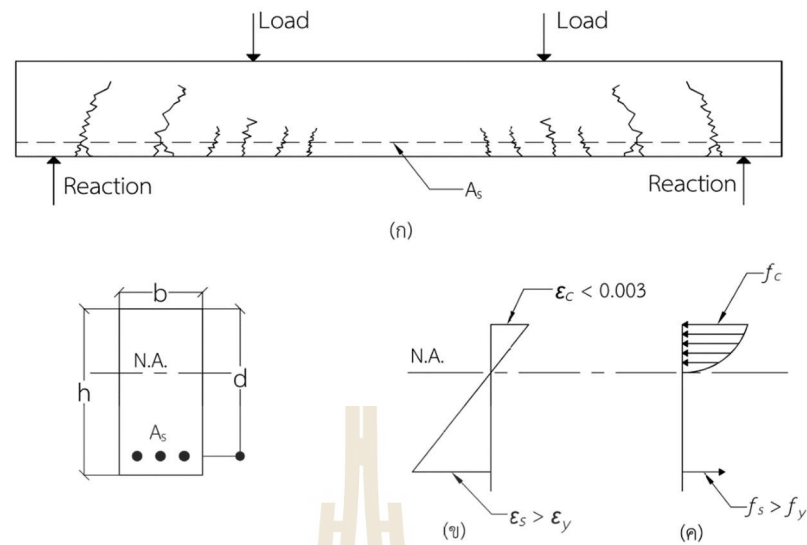
รูปที่ 2.4 รูปแบบการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแรงดึง และการกระจายของหน่วยแรงและความเครียดที่หน้าตัดเกิดการแตกร้าว

จนในที่สุดเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนถึงจุดที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติ ซึ่งลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การวิบัติที่เกิดจากเหล็กเสริมรับแรงดึงถูกดึงถึงจุดครากที่ด้านรับแรงดึง (yielding failure) หลังจากนั้นคอนกรีตถูกอัดแตก (crushing) เรียกว่า การวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) อีกหนึ่งรูปแบบของการวิบัติ คือ คอนกรีตถูกอัดแตกในด้านรับแรงอัด (ด้านบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก) โดยที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดคราก เรียกว่า การวิบัติแบบแรงอัดเป็นหลัก (compression failure)

2.3.2 ลักษณะของการวิบัติเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกกระทำโดยแรงดัด

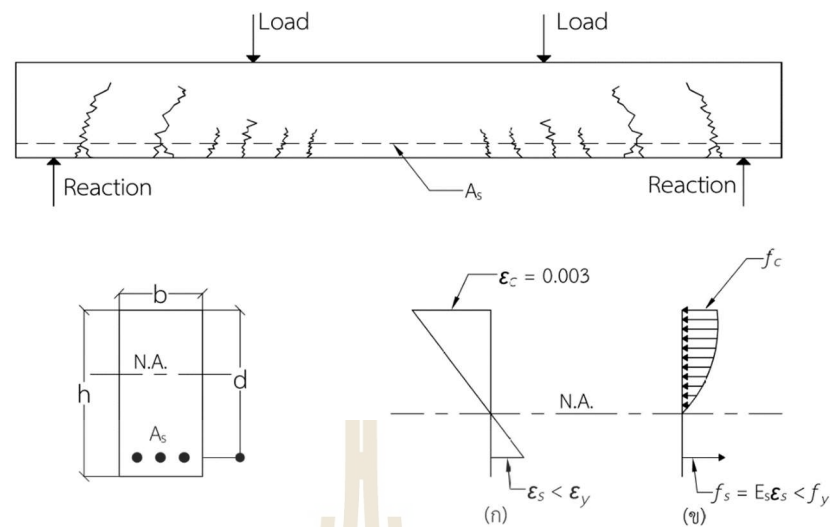
เมื่อนำลักษณะการวิบัติทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกับปริมาณเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะสามารถจำแนกการออกแบบคานได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1. Under-reinforced concrete beam คือ สภาวะที่ปริมาณของเหล็กเสริมในส่วนที่รับแรงดัดมีค่าต่ำกว่าที่สภาวะสมดุล (balance-reinforced concrete beam) เหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกดึงจนถึงจุดครากก่อนที่ผิวของคอนกรีตด้านรับแรงอัดจะถูกอัดแตกเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) ในขณะที่การกระจายของหน่วยแรงอัดเริ่มไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นโมเมนต์ที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ทำให้เหล็กเสริมที่รับแรงดัดเกิดการยืดตัวมากขึ้นในขณะที่แรงดัดในเหล็กเสริมมีค่าคงที่ ซึ่งหมายความว่าระยะแขนของโมเมนต์ (moment arm) บนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาจากสมการสมดุลของแรงเนื่องจากแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตต้องมีค่าเท่ากับแรงดัดที่เหล็กเสริม แต่พื้นที่ในส่วนรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเนื่องจากการเคลื่อนตัวของแกนสะเทิน (neutral axis, N.A.) ขยับขึ้นไปทางฝั่งรับแรงอัดมากขึ้น ส่งผลให้หน่วยแรงอัดและความเครียดในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด รอยร้าวบริเวณด้านรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะกว้างขึ้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเกิดการแอ่นตัวมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นการเตือนว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กกำลังจะเกิดการวิบัติตามมา แต่ถ้าหากยังเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเข้าไปอีกคอนกรีตที่อยู่เหนือแกนสะเทิน (ส่วนที่รับแรงอัดเป็นหลัก) ก็จะถูกอัดแตก (crushing) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



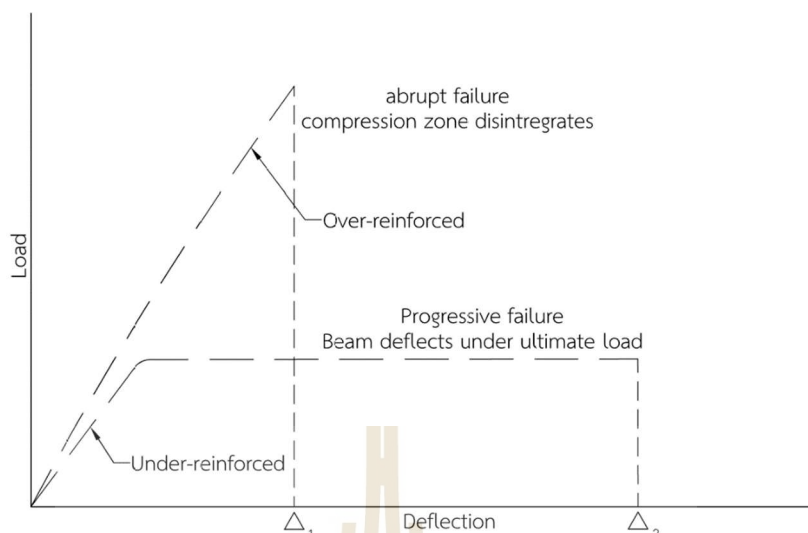
รูปที่ 2.5 ลักษณะการกระจายหน่วยแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงต่ำกว่าที่สภาวะสมดุล

2. Over-reinforced concrete beam คือ สภาวะที่ปริมาณของเหล็กเสริมในส่วนที่รับแรงดึงมีค่ามากกว่าที่สภาวะสมดุล (balance-reinforced concrete beam) ในสภาวะนี้ คานคอนกรีตเสริมเหล็กจะวิบัติจากการอัดแตกของคอนกรีต (crushing failure) ที่บริเวณด้านรับแรงอัด (ผิวด้านรับแรงอัดมีความเครียดสูงสุด ประมาณ 0.003-0.004 mm/mm) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ก่อนที่เหล็กเสริมจะถูกดึงจนรูดงอแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) หมายความว่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมในส่วนที่รับแรงดึงยังไม่ถึงจุดคราก การวิบัติในสภาวะนี้จะเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยที่ไม่มีการเตือนล่วงหน้าของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้การวิบัติแบบสภาวะนี้มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน จึงไม่นำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการก่อสร้างจริง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกระจายหน่วยแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สถานะที่ปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงสูงกว่าที่สถานะสมดุล

เมื่อนำสถานะทั้งสองแบบมาวาดแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กในส่วนที่รับแรงดึงต่ำกว่าสถานะสมดุล จะมีค่าการแอ่นตัวที่มากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กในส่วนรับแรงดึงมากกว่าที่สถานะสมดุล หมายความว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กในส่วนที่รับแรงดึงต่ำกว่าที่สถานะสมดุลจะมีความเหนียวมากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กในส่วนรับแรงดึงมากกว่าที่สถานะสมดุล รูปแบบการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กในส่วนที่รับแรงดึงต่ำกว่าสถานะสมดุลเป็นรูปแบบการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) ซึ่งเป็นการวิบัติที่มีความปลอดภัยมากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กในส่วนรับแรงดึงมากกว่าที่สถานะสมดุลที่มีรูปแบบการวิบัติแบบทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



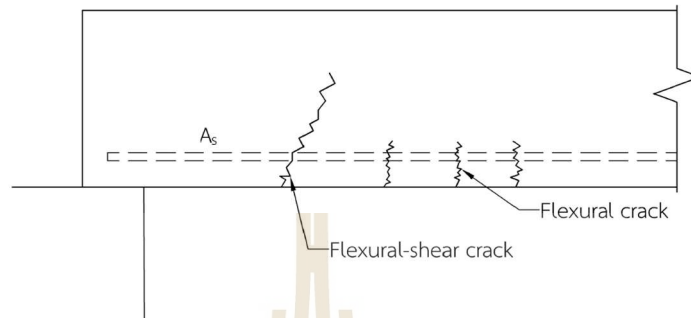
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.3.3 พฤติกรรมการต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือน (shear failure) ส่วนใหญ่จะเกิดจากแรงดึงทแยง (diagonal tension) เกิดจากการกระทำของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนและคอนกรีตไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ คานจะปรากฏรอยร้าวขึ้น โดยที่รอยร้าวที่เกิดจากแรงดึงทแยง (diagonal tension cracks) จะมีความกว้างมากกว่ารอยร้าวจากโมเมนต์ดัด (flexural crack) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะมีรอยแตกร้าวจากแรงเฉือน 2 รูปแบบ ได้แก่ flexural shear crack และ web shear crack ขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่มากกระทำ

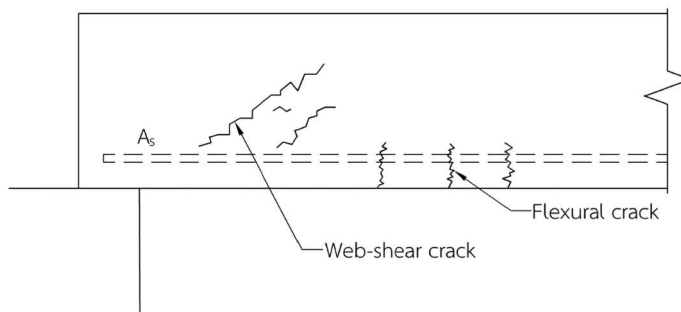
2.3.3.1 Flexural shear crack เป็นรอยแตกที่เกิดที่บริเวณระหว่างปลายคานก่อนถึงจุดกึ่งกลางคาน เป็นจุดที่มีโมเมนต์มากกระทำค่อนข้างมาก รอยร้าวลักษณะนี้ที่ท้องคานจะปรากฏรอยร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัด (flexural failure) ขึ้นก่อน รอยร้าวนี้จะมีแนวตั้งฉากตามแนวยาวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ในขณะที่เดียวกันคานคอนกรีตเสริมเหล็กก็จะปรากฏรอยร้าวที่บริเวณใกล้กับแนวแกนสะเทินอันเนื่องมาจากแรงดึงทแยงจากแรงเฉือน เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นรอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์ดัดก็จะมี ความกว้างขึ้นและขยับเลยออกมาจากส่วนที่รับแรงดึง และจะมาบรรจบกับรอยร้าวจากแรงดึงทแยง รอยร้าวนี้จะเบนเข้ามาหาที่กึ่งกลางคาน เรียกรอยร้าวลักษณะนี้ว่า รอยร้าวจาก

แรงเฉือนร่วมกับแรงดัด (flexural shear crack) รอยร้าวลักษณะนี้จะพบน้อยกว่ารอยร้าวแบบ web shear crack จากการทดสอบพบว่า แรงเฉือนที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวนี้มีค่าเท่ากับ $0.5\sqrt{f'_c}bd$ kg



รูปที่ 2.8 รอยร้าวแบบ flexural shear crack

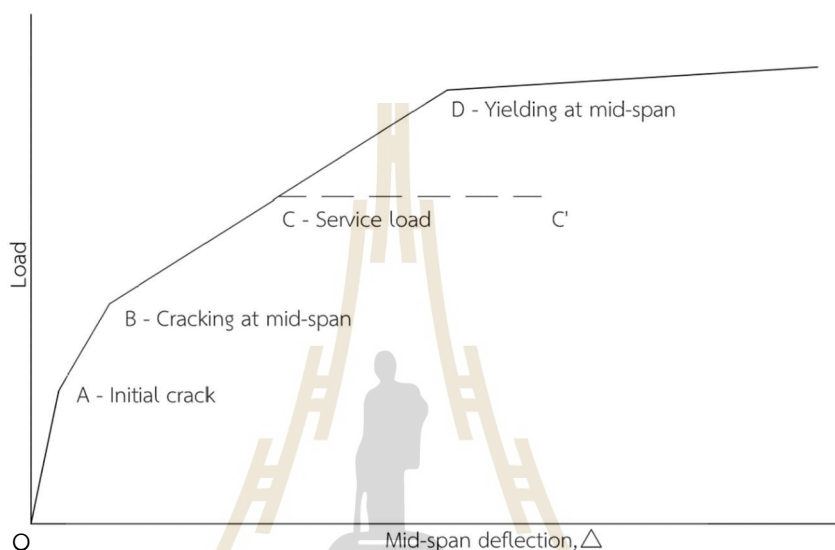
2.3.3.2 Web shear crack เป็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงเฉือนที่มากกว่าโมเมนต์ดัด โดยค่าของแรงดัดแนวทแยงที่บริเวณแนวแกนสะเทินมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือน รอยร้าวลักษณะนี้จะทำมุม 45 องศากับแนวของคาน รอยร้าวลักษณะนี้เรียกว่า web shear crack มักจะเกิดกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความกว้างของหน้าตัดน้อย จากการทดสอบพบว่า แรงเฉือนที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าวในลักษณะนี้มีค่าเท่ากับ $0.93\sqrt{f'_c}bd$ kg ซึ่งจะเห็นว่าการแตกร้าวลักษณะนี้จะมีค่ามากกว่าการแตกร้าวแบบ flexural shear crack



รูปที่ 2.9 รอยร้าวแบบ web shear crack

2.3.4 พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับโมเมนต์และแรงเฉือน เมื่อคานได้รับน้ำหนักบรรทุกมากกระทำ คานจะเกิดการแอ่นตัวหรือโก่งงอทำให้คานไม่อยู่ในแนวตรงตามยาวคานเดิมเหมือนกับตอนแรกที่ยังไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่ำกว่าสภาวะสมดุล

จากรูปที่ 2.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่ำกว่าสภาวะสมดุล (under-reinforced concrete beam) จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าช่วง O-A น้ำหนักบรรทุกมีค่าน้อยยังไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นที่บริเวณท้องคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นจนถึงจุดที่โมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าสูงกว่าโมเมนต์แตกตัวของคานคอนกรีต เริ่มมีรอยแตกจากแรงดัดในแนวตั้งฉากกับคานเกิดขึ้น (จุด A) เมื่อมีรอยแตกจากโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นค่าความแกร่ง (stiffness) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะน้อยลง ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการโก่งตัวเกิดขึ้น (จุด A ถึง B) เมื่อกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (จุด B) เริ่มมีรอยแตกกว้างมากขึ้นทำให้เหล็กในส่วนรับแรงดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการครากขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางคาน ส่งผลให้คานเริ่มมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่น้ำหนักบรรทุกไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก (จุด D) โดยทั่วไปแล้วการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริม

เหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (service load) จะเกิดขึ้นที่ประมาณจุด C ซึ่งเป็นการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นแบบทันทีหลังจากรับน้ำหนักบรรทุก แต่การแอ่นตัวที่เพิ่มจากจุด C ไปยังจุด C' เกิดการคืบ (creep) ของคอนกรีตซึ่งเป็นการแอ่นตัวแบบระยะยาว (long-term deflection)

2.3.5 ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง

มาตรฐาน วสท. (1008-38 : วิธีกำลัง) ให้ความหมายของคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete, RC) ว่า คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าปริมาณต่ำสุดที่ต้องการโดยมาตรฐานและคำนวณออกแบบบนสมมุติฐานที่ว่า วัสดุทั้งสองมีพฤติกรรมร่วมกันในการรับแรงต่าง ๆ ซึ่งการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลังเป็นการพิจารณาหาขนาดของโครงสร้างคอนกรีต และปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะก่อนที่โครงสร้างจะเกิดการวิบัติจากน้ำหนักบรรทุกเกินที่คาดไว้

สมมุติฐานเบื้องต้นในการออกแบบโดยวิธีกำลัง

1. ระยะเวลาของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนการตัดยังคงเป็นระยะเวลาเดียวกันกับระยะเวลาหลังการตัด
2. ไม่คิดกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในด้านรับแรงดึงของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็กต้องยึดเหนี่ยวกันได้ดี
4. หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถือว่าวิบัติเมื่อค่าความเครียดของคอนกรีต $\epsilon_{cu} = 0.003 \text{ mm/mm}$
5. หน่วยแรงอัดในคอนกรีตซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น สามารถใช้การกระจายเชิงเส้นเทียบเท่าได้

หลักเกณฑ์การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง

เมื่อพิจารณากำลังของโครงสร้าง ณ ภาวะประลัย (ultimate stage) ซึ่งจะกำหนดให้ กำลังระบุขององค์อาคาร (nominal strength, R_n) ซึ่งลดค่าแล้วมีค่ามากกว่า น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้ว (overload, Q_u)

$$\phi R_n > Q_u \quad (2.1)$$

กำลังที่ต้องการ เนื่องจากวิธีนี้เป็นกรณีวิเคราะห์ในภาวะประลัยดังนั้นน้ำหนักที่ใช้ ออกแบบจึงเป็นน้ำหนักประลัยคาดว่าจะทำให้ส่วนของโครงสร้างนั้นเกิดการวิบัติหรือไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ซึ่งได้จากการคูณน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานด้วยตัวคูณเพิ่ม

มาตรฐาน วสท. 1008-38 กำหนดให้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกจร เช่น สำหรับอาคารที่ไม่ได้รับแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว

$$U = 1.4DL + 1.7LL \text{ (วสท.)} \quad (2.2)$$

กำลังที่ใช้ออกแบบ คือ กำลังต้านของส่วนโครงสร้างที่คำนวณได้จากกำลังที่ระบุแต่ ถูกลดด้วยตัวคูณลดกำลัง ถือเป็นการสำรองกำลังต้านทานโครงสร้างอีกหนึ่งวิธี

มาตรฐาน วสท. 1008-38 กำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง (ϕ) เป็นค่าต่าง ๆ แต่มีค่าน้อยกว่า 1.00 ขึ้นอยู่กับประเภทของโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวคูณลดกำลัง (reduction factor, ϕ)

ชนิดของแรงกระทำ	ตัวคูณลดกำลัง
สำหรับการดัดร่วมกับแรงดึงหรือไม่มีแรงดึง	0.90
สำหรับแรงดึงตามแนวแกน	0.90
สำหรับแรงเฉือนและแรงบิด	0.85
สำหรับแรงอัดในเสาปลอกเกลียว	0.75
สำหรับแรงอัดในองค์อาคารอื่น ๆ	0.70
สำหรับแรงกดบนคอนกรีต	0.70

เมื่อโครงสร้างมีน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ค่าการแอ่นตัวต้องไม่เกินกว่าค่าที่กำหนด มาตรฐาน วสท. ได้ให้ข้อกำหนดควบคุมระยะแอ่นไว้สองแบบ คือ

1. การควบคุมระยะการแอ่นโดยอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อระยะช่วงของคาน (depth to span ratio) ตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความลึกต่ำสุดขององค์อาคารรับแรงดัด

ความหนาต่ำสุด (h_{min}) หน่วย cm เมื่อความยาวช่วง (L) มีหน่วย cm				
องค์โครงสร้าง	ช่วงเดี่ยว ธรรมดา	ต่อเนื่องด้านเดียว	ต่อเนื่อง 2 ด้าน	ปลายยื่น
แผ่นพื้นทางเดียว	$L/20$	$L/24$	$L/28$	$L/10$
คาน	$L/16$	$L/18.5$	$L/21$	$L/8$

2. การควบคุมระยะแอ่นตัวโดยค่าสูงสุดของการแอ่นตัว ตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 (เมื่อต้องการให้การคำนวณระยะการแอ่นตัว จากแผ่นพื้นหรือคานที่มีความหนาหรือความลึกน้อยกว่าตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.3 พิกัดการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นพื้นที่ยอมให้

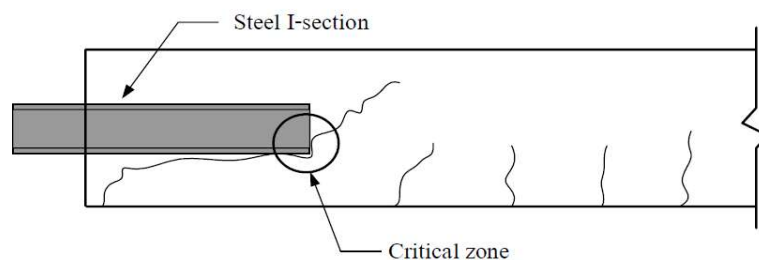
ชนิดขององค์อาคาร	ระยะแอ่นที่พิจารณา	พิกัดการแอ่นตัว (cm)
หลังคาราบซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับ ชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งคาดว่าจะ เกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัว มาก	ระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันที เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	$L/180$
พื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชั้นส่วนที่ ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความ เสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันที เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	$L/360$
หลังคาหรือพื้นซึ่งรองรับหรือติดกับ ชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งคาดว่าจะ เกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัว มาก	ส่วนของระยะแอ่นตัวทั้งหมด ที่เกิดขึ้นหลังจากการยึด ชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (ผลรวมของระยะแอ่นที่ เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดและ ระยะที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)	$L/480$
หลังคาหรือพื้นซึ่งรองรับติดกับชั้นส่วน ที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งคาดว่าจะเกิด ความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดและ ระยะที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)	$L/240$

2.4 ปรีทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

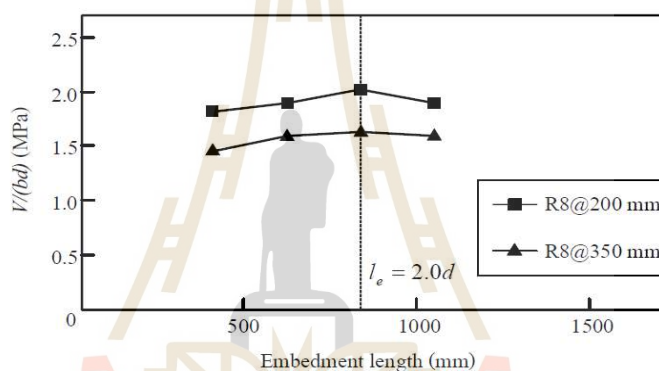
จากการค้นคว้าหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบการวิจัยใดที่ศึกษาการฝังเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ส่วนรองรับของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีงานวิจัยที่ใกล้เคียง ได้แก่

2.4.1 Yip, Teng, Ting และ Hu (1999) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กรูปตัวไอฝังที่ส่วนรองรับ (Behavior of precast reinforcement concrete beams with structural steel I-section embedded at the support section) ขนาดหน้าตัดคาน กว้าง 250 mm ความลึก 450 mm และยาว 4.0 m ใช้เหล็กรูปพรรณตัวไอขนาดหน้าตัด 317 x 165 mm ฝังที่จุดรองรับทั้งสองด้านของคาน โดยแปรผันความยาวของระยะฝัง (l_e) เหล็กรูปตัวไอทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 425 638 850 และ 1063 mm โดยเพิ่มระยะฝังขึ้นครั้งละ 0.5 เท่าของความลึกคาน และแปรผันระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกรับแรงเฉือน 2 ค่าคือ 200 มม. และ 350 mm พบว่า

1. คานจะเกิดการวิบัติที่ปลายด้านในของเหล็กรูปตัวไอที่ฝังอยู่ในคาน ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติแบบการเฉือนตามแนวทแยง (diagonal shear failure) ดังแสดงในรูปที่ 2.11
2. คานที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกรับแรงเฉือน 350 mm จะมีความสามารถในการรับแรงได้ต่ำกว่าคานที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกรับเฉือน 200 mm
3. ค่าแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กรูปตัวไอฝังที่จุดรองรับ มีค่าเทียบเท่ากับคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง
4. ระยะฝังของเหล็กรูปตัวไอของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป ที่มีความยาวเป็นสองเท่าของความลึกประสิทธิผล ($l_e = 2.0d$) เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อการรับแรงเฉือนและแรงยึดเหนี่ยวของคาน เนื่องจากเป็นตำแหน่งซึ่งคานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.12
5. ที่จุดวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กตัวไอฝังที่จุดรองรับเกิดขึ้นที่ปลายของเหล็กรูปตัวไอที่ฝังอยู่ในคอนกรีต



รูปที่ 2.11 จุดวิบัติของคานที่เกิดขึ้นที่ปลายคานที่ฝังอยู่ในคอนกรีต (Yip, Teng, Ting และ Hu, 1999)



รูปที่ 2.12 ค่าระยะฝังของเหล็กรูปตัวไอที่เหมาะสมที่สุด (Yip, Teng, Ting และ Hu, 1999)

2.4.2 จักชดา และสิทธิชัย (2548) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่เสริมเหล็กทรงน้ำผึ้งที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำตามขวาง (Investigation on precast reinforced concrete beam with steel channel section embedded at the support section under transverse point loads) เปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกกับสมการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน วสท. ภายใต้แรงกระทำตามขวางแบบ 4 จุด คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดกว้าง 175 mm ลึก 350 mm และยาว 4.0 m ใช้เหล็กทรงน้ำผึ้งประกบกันเป็นรูปตัวไอขนาดหน้าตัด 100 x 50 mm ฝังที่ส่วนรองรับของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่ระยะ 500, 1100 และ 1400 mm จากการศึกษาพบว่า

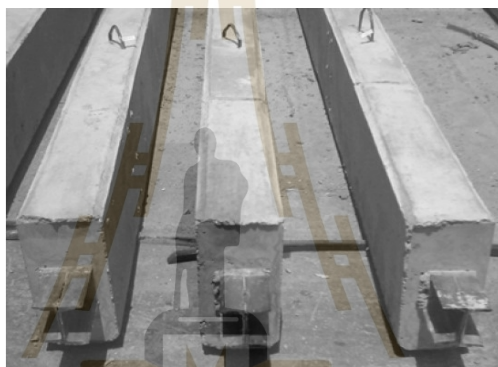
1. คานส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงแบบ Bilinear โดยที่ความสามารถในการรับแรงสูงสุดในช่วงเส้นตรงแรกมีค่าประมาณ 80-90% ของกำลังสูงสุด (ที่ค่าการแอนตัว $L/100$) ในช่วง

ที่สองการแอนตัวของคานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนคานเกิดการวิบัติที่สภาวะใช้งาน (ที่ค่าการแอนตัว $L/240$)

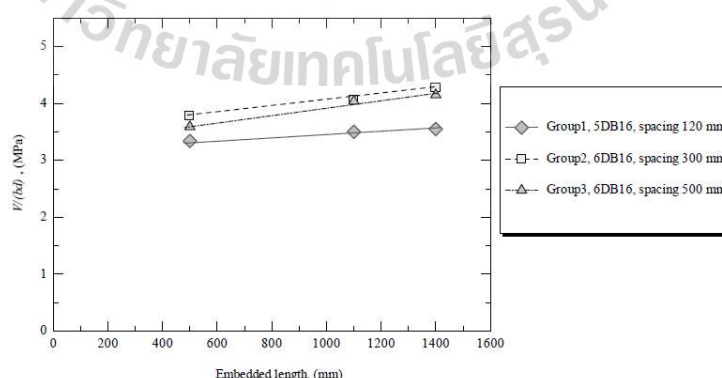
2. คานที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปอ้างอิงประมาณ 5.8-37.6%

3. คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับมีอัตราส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้นประมาณ 1.06-1.59

4. ความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของระยะฝิ่งของเหล็กวางน้ำ



รูปที่ 2.13 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับ (จักษดา และสิทธิชัย, 2548)

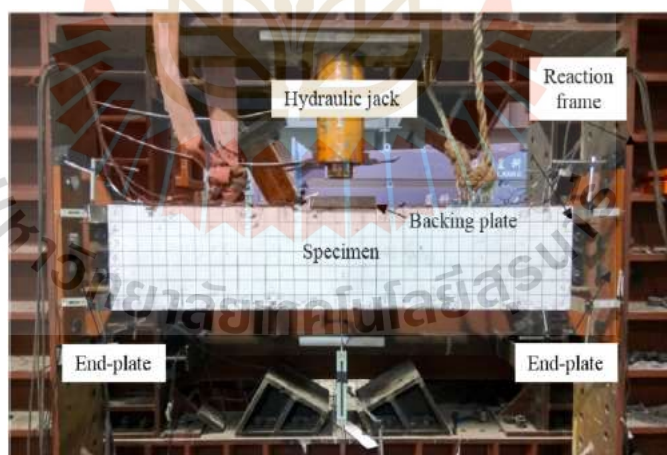


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะฝิ่งของเหล็กวางน้ำ (จักษดา และสิทธิชัย, 2548)

2.4.3 Guo, Gao, Wang and Bui (2018) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติภายใต้แรงกระทำตามขวางของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับ (Bearing capacity of embedded channel-shape steel connections at precast concrete end beam) ตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าตัดกว้าง 250 mm ลึก 350 mm และยาว 1.65 m ใช้เหล็กวางน้ำฝิ่งขนาดหน้าตัด 250 x 80 มม. ฝิ่งที่ส่วนรองรับของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่ระยะ 100, 200 และ 300 mm ภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด (three-point loading test) จากการศึกษาพบว่า

1. ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป 2 แบบ คือ การรูดออกของเหล็กปูวางน้ำ และ การอัดแตกของคอนกรีตที่จุดรองรับ และยังพบอีกว่าการแอนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปมีค่าใกล้เคียงศูนย์ระหว่างการทดสอบ

2. กำลังต้านทานแรงกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความยาวระยะฝิ่งของเหล็กปูวางน้ำ เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกจะทำให้กำลังต้านทานแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นและการแอนตัวมีค่าลดลง โดยที่ค่าการแอนตัวสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปอยู่ที่คานที่มีระยะฝิ่งของเหล็กปูวางน้ำที่ระยะฝิ่งเท่ากับ 200 mm



รูปที่ 2.15 การติดตั้งตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับ (Guo, Gao, Wang and Bui, 2018)

จากปริทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั้งที่ส่วนรองรับ ดังนั้นจึงสมควรที่จะศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั้งที่ส่วนรองรับ

2.5 สรุป

จากการทบทวนวรรณกรรม ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กรูปพรรณฝั้งที่ส่วนรองรับทำให้เข้าใจในพื้นฐานของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัสดุที่จำเป็นต่องานวิจัย สมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กรูปพรรณฝั้งที่ส่วนรองรับ และข้อสังเกตคือคานในลักษณะรูปแบบต่าง ๆ อาจจะต้องตั้งในการก่อสร้างจริงได้ยาก เนื่องจากจุดต่อของทั้งสามปริทัศน์จะต้องเว้นช่องว่างระหว่างเสาเพื่อติดตั้งคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนที่จะเทคอนกรีต ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการพัฒนารูปแบบจุดต่อที่สามารถทำงานได้ง่ายขึ้น โดยมีรูปแบบการต่อโดยนำปลายแผ่นเหล็กที่อยู่ที่ปลายคานคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นจุดต่อไปเจาะรูและนำสลักมาต่อกันดังแสดงในรูปที่ 2.16 เป็นการพัฒนาต่อยอดมาจากประสบการณ์ที่ได้จากการไปสหกิจศึกษาที่โครงการก่อสร้างของบริษัท Shibakawa (Thailand) CO.,LTD Extension factory นิคมอุตสาหกรรมเหมราช จ.สระบุรี โดยจะใช้ความรู้วิชาต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์โครงสร้าง การทดสอบวัสดุ การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในการพัฒนาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั้งที่ส่วนรองรับ และทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อแบบดังกล่าว เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบ 4 จุด และลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั้งที่ส่วนรองรับ เปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกกับคานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระยะฝั้งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm ซึ่งเป็นความยาวระยะฝั้งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่หน่วยงานก่อสร้างนำมาฝั้งเข้าไปในคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป โดยที่จะนำความยาวระยะฝั้งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กดังกล่าวมาเป็นความยาวระยะฝั้งอ้างอิง และสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38) ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวถึงในบทที่ 3



รูปที่ 2.16 จุดเชื่อมต่อระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

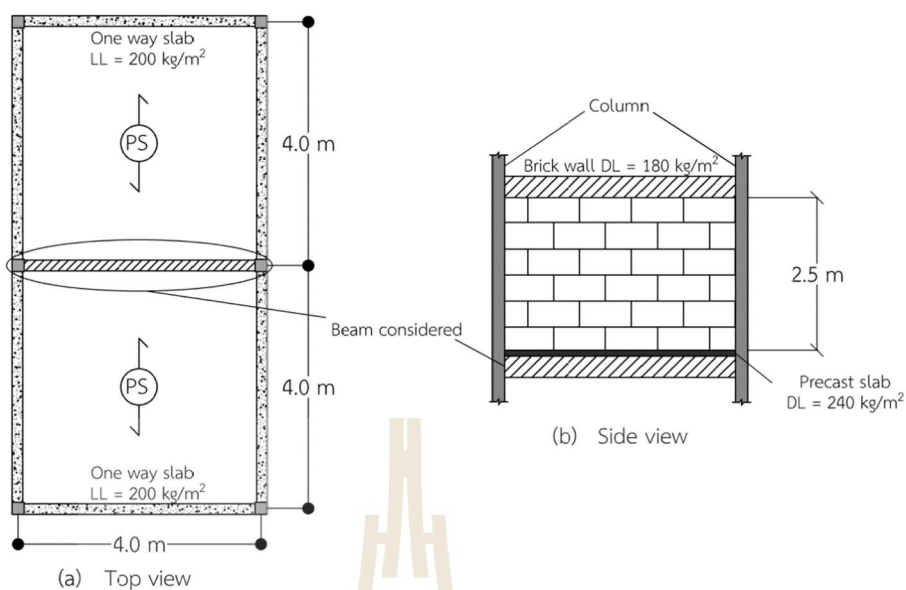
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แบ่งส่วนของการศึกษาออกเป็นทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาภาคทฤษฎี และงานทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในภาคทฤษฎีนั้นจะศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับทฤษฎีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อกำหนดทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (ultimate strength design) ตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนของงานทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นจะออกแบบ และหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ โดยออกแบบคานตัวอย่างทดสอบให้ครอบคลุมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 เพื่อตอบคำถามงานวิจัยตามขอบเขตงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ คอนกรีต เหล็กเส้นกลม เหล็กข้ออ้อย และแผ่นเหล็กดำ โดยจะหาค่ากำลังต้านทานแรงกดอัดของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริม และแผ่นเหล็ก ตามมาตรฐาน มอก. ซึ่งจะกล่าวถึงในภาคผนวก ค หลังจากนั้นจะเป็นการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กด้วยวิธีแรงกระทำ 4 จุดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบ 4 จุด ลักษณะการวิบัติคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ ศึกษาผลของความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่มีผลต่อกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ เปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงที่มีความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยเท่า 500 mm และสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ

3.2 ออกแบบการศึกษาคานตัวอย่างทดสอบ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงที่มา และขั้นตอนการออกแบบการศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะเริ่มพิจารณาคานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระหว่างจุดรองรับ (clear span) เท่ากับ 4.0 m ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่ลักษณะการใช้งานของโครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างของบ้านพักอาศัยตามกฎหมายกระทรวงมหาดไทย (ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527) โดยกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร (live load, LL) เท่ากับ 200 kg/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 3.1(a) และน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load, DL) ที่กระทำโดยน้ำหนักกำแพงอิฐมวลฉนวน (wall load) เท่ากับ 180 kg/m^2 และน้ำหนักบรรทุกคงที่จากแผ่นพื้นสำเร็จรูป (precast slab load) ที่มีความหนาเท่ากับ 10 cm มีน้ำหนักเท่ากับ 240 kg/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 3.1(b) โดยสมมติให้น้ำหนักบรรทุกจร และน้ำหนักบรรทุกคงที่แผ่กระจายสม่ำเสมอกระทำบนแนวระดับของคานตัวอย่างทดสอบ

การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบโดยวิธีกำลัง (ultimate strength design method) ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38) ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้วิธีกำลังในการออกแบบคานในงานวิจัย มีดังนี้

1. การออกแบบโดยวิธีกำลังให้ทางเลือกในการใช้ตัวคูณเพิ่ม (load factor) ได้อย่างมีหลักการ คือ น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่าแน่นอน เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) จะใช้ค่าตัวคูณเพิ่มที่มีค่าต่ำลง ส่วนของน้ำหนักบรรทุกที่ไม่ทราบค่าแน่นอน จะใช้ตัวคูณเพิ่มที่มีค่าสูงขึ้น
2. การออกแบบโดยวิธีกำลังสามารถสำรองกำลังต้านทานแรงกระทำของโครงสร้างที่คำนวณได้ โดยใช้ตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) จึงทำให้ทราบอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety, F.S.) ที่แท้จริงของโครงสร้าง
3. การออกแบบโดยวิธีกำลังสามารถคาดเดากำลังสูงสุดของโครงสร้างได้อย่างถูกต้องกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน (working stress design method, WSD)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนั้นได้เลือกใช้หน้าตัดของคานตัวอย่างทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 175 mm ลึก 350 mm และความยาวระหว่างจุดรองรับ 4.0 m จำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.3 โดยแบ่งประเภทของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยออกเป็นทั้งหมด 2 กลุ่ม ได้แก่

1. คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั้ที่ส่วนรองรับ จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดหน้าตัดของคานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวจะกล่าวถึงในตารางที่ 3.2

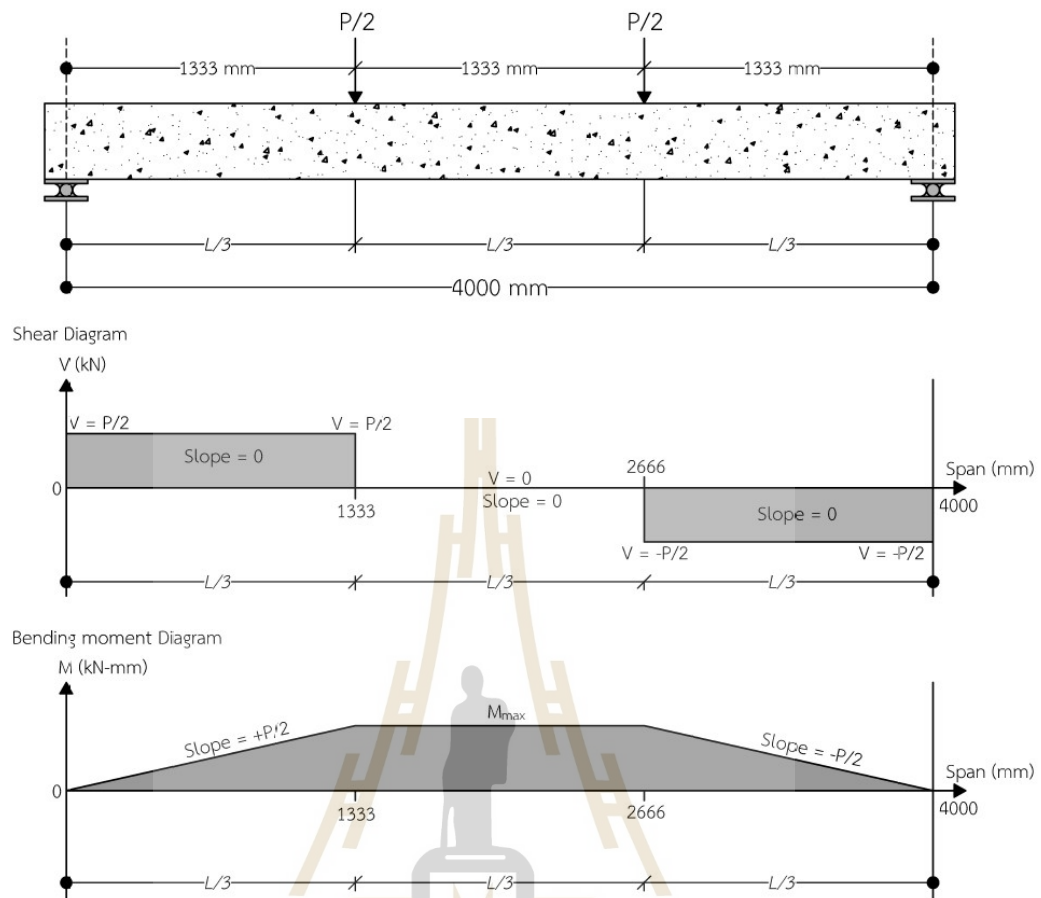
2. คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั้ที่ส่วนรองรับจำนวนทั้งหมด 18 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดของหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจะกล่าวถึงในตารางที่ 3.3

เหล็กเสริมในด้านรับแรงดึง และแรงอัดใช้เหล็กข้ออ้อย (deformed bar) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไทยสตีลโพรไฟล์ จำกัด (TSC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm (DB16, SD40) ตามมาตรฐาน มอก. 24-2559 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอก (stirrups) ใช้เหล็กเส้นกลม (round bar) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทราชสีมาผลิตเหล็ก จำกัด (RSM) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (RB6, SR24) ตามมาตรฐาน มอก. 20-2559 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไทย

สตีลโพรไฟล์ จำกัด (TSC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm (DB16, SD40) แผ่นเหล็กดำที่เชื่อมติดกับเหล็กข้ออ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SINO COMMODITIES INTERNATIONAL PTE. LTD. จะมีขนาด 1219 x 2438 x 20 mm น้ำหนัก 467.2 kg/แผ่น โดยนำมาตัดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดแผ่นละ 250 x 150 x 20 mm (SS400) ตามมาตรฐาน มอก.1479-2541 และคอนกรีตผสมเสร็จ (ready-mixed concrete) ถูกผสมและออกแบบกำลังต้านทานแรงอัดประลัย (f'_c) โดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC) คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 380 kg/cm² ของแท่งทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m สูง 0.3 m ที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก. 409-2525

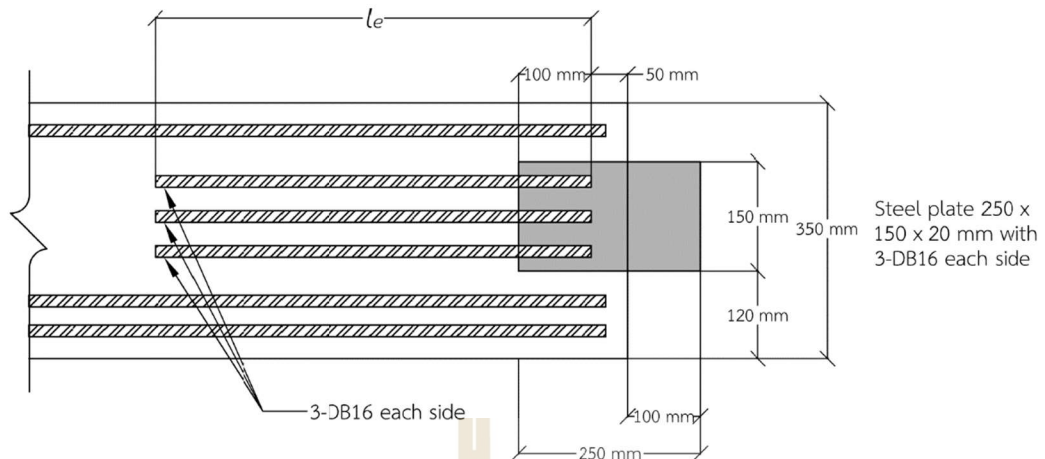
จากการออกแบบคานตัวอย่างทดสอบ ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 มีทั้งหมด 2 ตัวแปร ได้แก่

1. ความยาวระยะฝัง (embedded length, l_e) ของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก เมื่อพิจารณาคานตัวอย่างทดสอบภายใต้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด สำหรับความยาวระหว่างจุดรองรับ (support) ของคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 4.0 m ช่วงที่รับแรงเฉือนสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบ คือ เริ่มจากจุดรองรับถึงที่ระยะ $L/3$ (ประมาณ 1.33 m) ทั้งสองด้านของคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การฝังเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กคาดว่าจะช่วยเพิ่มกำลังต้านแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบได้ จึงแปรผันความยาวของระยะฝังจากความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเริ่มต้นเท่ากับ 500 mm ซึ่งเป็นความยาวระยะฝังอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ถูกใช้ในหน่วยงานก่อสร้างที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ถึงความยาวระยะฝังเท่ากับ 1500 mm ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการตัดแบ่งเหล็กข้ออ้อย จึงเลือกความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 500 1000 และ 1500 mm ซึ่งเป็นความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ครอบคลุมถึงช่วงที่คานตัวอย่างทดสอบเกิดแรงเฉือนสูงสุด



รูปที่ 3.2 แผนภาพแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดจากการทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด

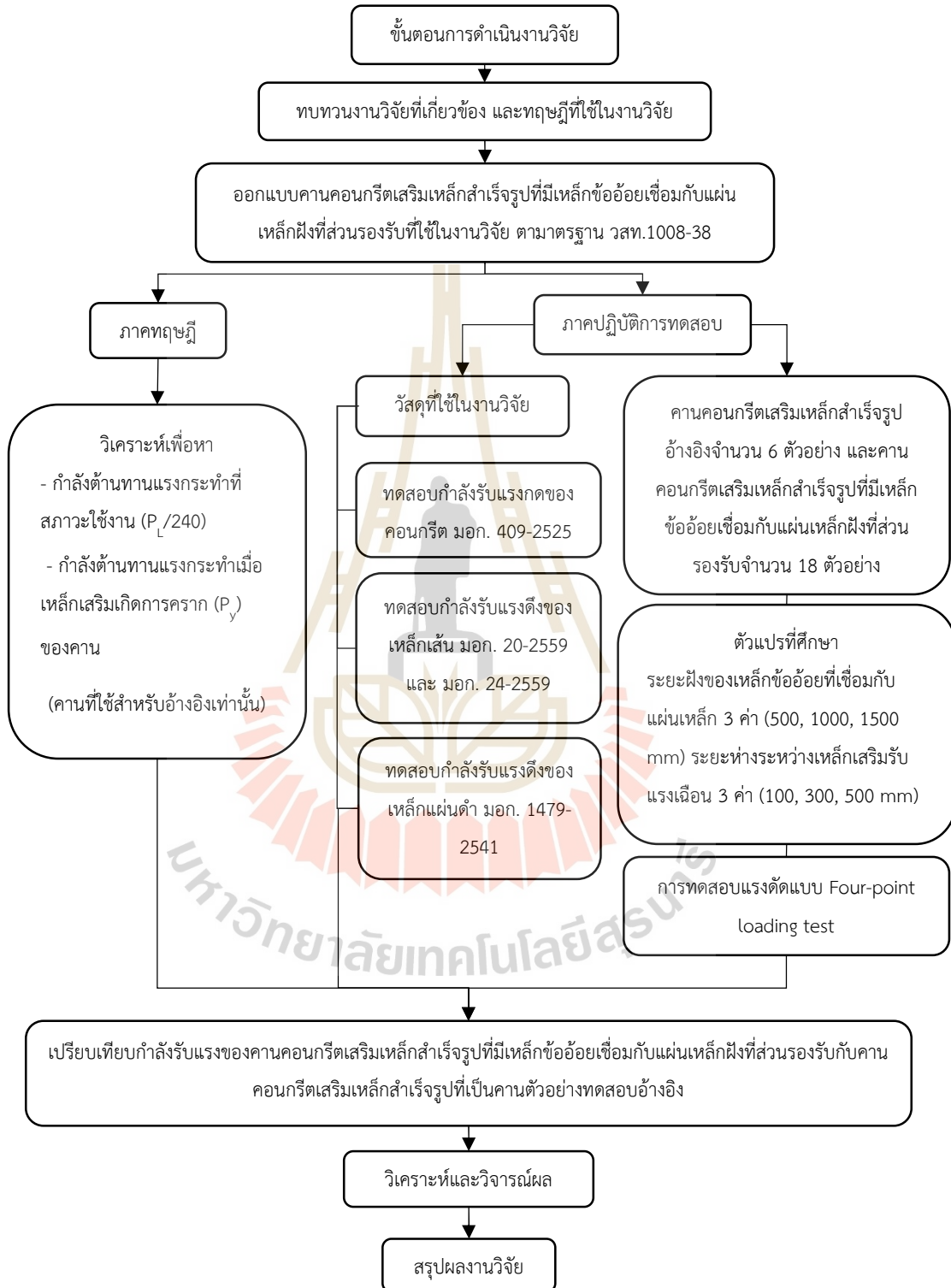
นอกจากนี้ เมื่อนำแผ่นเหล็กมาตัดให้มีขนาดหน้าตัดกว้าง 250 mm ลึก 150 mm และหนา 20 mm ไปฝังที่ส่วนรองรับของคานตัวอย่างทดสอบ แผ่นเหล็กนั้นจะต้องยื่นออกมาจากส่วนรองรับเป็นระยะ 100 mm ทำให้แผ่นเหล็กดำฝังอยู่ในคานามีระยะเท่ากับ 150 mm ส่วนของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กให้เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 100 mm ทำหน้าที่เปรียบเสมือนกับแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปในเสา ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของส่วนรองรับของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับ

2. ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (stirrups spacing, S) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเงื่อนไขที่กำหนดลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท.1008-38 ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ $S \leq S_{req} = 200.5 \text{ mm}$ หรือ $\max S \leq d/2 \leq 600 \text{ mm}$ ($d = 290 \text{ mm}$) ดังนั้นจึงเลือกระยะห่างระหว่างเหล็กรับแรงเฉือน $S = 100 \text{ mm}$ เป็นค่าต่ำสุดเพื่อที่จะทำให้คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบ flexural failure เพื่อตรวจสอบว่าคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเพียงพอ เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปจะช่วยกำลังต้านทานแรงเฉือนได้มากหรือน้อยเพียงใด และเพื่อให้คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบ shear failure ($S > S_{req} = 200.5 \text{ mm}$) ดังนั้นจึงเลือกระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน $S = 300$ และ 500 mm เพื่อตรวจสอบว่า หากคานตัวอย่างทดสอบมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปจะช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนได้ทดแทนระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือนได้มากหรือน้อยเพียงใด

แผนการขั้นตอนดำเนินการศึกษางานวิจัยสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4



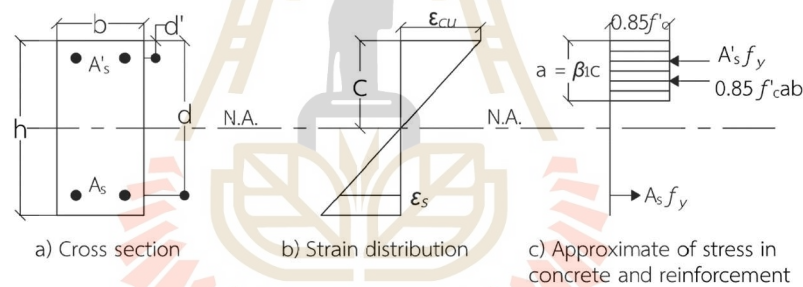
รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3 การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบคานตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท.1008-38 ซึ่งในการออกแบบเบื้องต้นนั้นจะไม่นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝั่งที่ส่วนรองรับเข้ามาพิจารณาในการคำนวณออกแบบ โดยจะแบ่งการออกแบบคานตัวอย่างทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด ต้านทานแรงเฉือน และ การคำนวณค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ

3.3.1 การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด

จากรูปที่ 3.5 พบว่าเมื่อปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานตัวอย่างทดสอบ (ρ) น้อยกว่าหรือเท่ากับ $0.75\rho_b$ (มาตรฐาน วสท.1008-38) กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานตัวอย่างทดสอบอาจหาได้โดยการประมาณว่ามีแค่เหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงเท่านั้นที่รับแรงดึง (คอนกรีตผิวล่างเกิดการแตกร้าวจนไม่สามารถรับแรงดึงได้อีก) และเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงมีกำลังถึงจุดคราก



รูปที่ 3.5 การกระจายของหน่วยแรง และความเครียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อเหล็กเสริมในด้านรับแรงดึงในคานตัวอย่างทดสอบ (A_s) ถูกดึงจนถึงจุดคราก (yielding failure) แล้วคอนกรีตด้านรับแรงอัดจะถูกอัดแตกที่ความเครียด (compressive strain) สูงสุดมีค่าประมาณ 0.003-0.004 mm/mm แต่ในเหล็กเสริมด้านรับแรงอัดจะถูกอัดจนถึงจุดครากหรือไม่ก็ได้ หน่วยแรงอัดของเหล็กเสริมด้านรับแรงอัดจะมีค่าเท่ากับ $f'_s = \epsilon'_s E_s$ และหน่วยแรงในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมีค่าเท่ากับกำลังที่จุดคราก f_y การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขั้นตอน ดังนี้

1. ค่าโดยประมาณของปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3.1)$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{bd} \quad (3.2)$$

โดยที่	ρ	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึง
	ρ'	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมในส่วนรับแรงอัด
	A_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึง (cm ²)
	A'_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในส่วนรับแรงอัด (cm ²)
	b	คือ	ความกว้างของคานตัวอย่างทดสอบ (cm)
	d	คือ	ความลึกประสิทธิผลจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง (cm)
	d'	คือ	ความลึกประสิทธิผลจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงอัด (cm)

2. ตรวจสอบค่าปริมาณเหล็กเสริม ρ ในคานตัวอย่างทดสอบโดยที่ต้องมีค่าไม่เกิน $0.75\rho_b$ และต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐานของ วสท.1008-38

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} \quad (3.4)$$

$$\rho_{max} = 0.75\rho_b \quad (3.5)$$

$$\bar{\rho}_b = 0.85\beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) \quad (3.6)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่	ρ	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
	ρ_{max}	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมากที่สุดที่ยอมให้
	ρ_{min}	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงน้อยที่สุดที่ยอมให้
	$\bar{\rho}_b$	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะความเครียดสมดุลที่มีเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงอย่างเดียว
	f'_c	คือ	กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (kg/cm^2)
	f_y	คือ	กำลังต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (kg/cm^2)

3. ตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด ซึ่งเหล็กเสริมจะเกิดการคราก

เมื่อ

$$\rho - \rho' \geq 0.85\beta_1 \left(\frac{f'_c d'}{f_y d} \right) \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อเหล็กเสริมด้านรับแรงอัดไม่เกิดการคราก ให้ใช้

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b a + A'_s f'_s \quad (3.9)$$

เมื่อ $a = c\beta_1$ (3.10)

$$f'_s = 6120 \frac{c - d'}{c} \quad (3.11)$$

เมื่อเหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเกิดการคราก ให้ใช้

$$f'_s = f_y \quad (3.12)$$

โดยที่	f'_s	คือ	กำลังของเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด (kg/cm^2)
	a	คือ	ความลึกของพื้นที่การกระจายหน่วยแรงในด้านรับแรงอัด (cm)
	c	คือ	ความลึกที่วัดจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังแกนสะเทิน (cm)

4. ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริม กรณีในคานที่มีเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด

$$\rho \leq 0.75\bar{\rho}_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} \quad (3.13)$$

5. ตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ โดยที่

$$\phi M_n \geq M_u \quad (3.14)$$

$$M_n = (A_s f_y - A'_s f'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (3.15)$$

โดยที่	M_n	คือ	กำลังรับโมเมนต์ที่คำนวณได้ (kg-m)
	M_u	คือ	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคูณเพิ่มค่า (kg-m)
	ϕ	คือ	ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.90 (สำหรับแรงดัด)

6. แปลงกำลังต้านทานโมเมนต์ที่คำนวณได้ (M_n) เป็นกำลังรับแรง (P) แบบ four-point loading test

$$P = \left(M_n - \frac{w_g L^2}{8} \right) \frac{6}{L} \quad (3.16)$$

โดยที่	P	คือ	กำลังต้านทานโมเมนต์ (kg)
	w_g	คือ	น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (kg/m)
	L	คือ	ความยาวประสิทธิผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (m)

3.3.2 การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบเพื่อต้านทานแรงเฉือน

การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบเพื่อต้านทานแรงเฉือนตามมาตรฐาน วสท.1008-38 จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้ โดยที่ กำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบต้องมีค่ามากกว่า กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ

$$\phi V_n \geq V_u \quad (3.17)$$

เมื่อ
$$V_n = V_c + V_s \quad (3.18)$$

แทน V_n ในสมการ (3.18) ลงในสมการ (3.17) จะได้

$$\phi (V_c + V_s) \geq V_u \quad (3.19)$$

โดยที่	V_n	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบ (kg)
	V_u	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการ (kg)
	V_c	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต (kg)
	V_s	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (kg)
	ϕ	คือ	ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับแรงเฉือนตามมาตรฐานของ วสท. 1008-38

มาตรฐานของ วสท. ได้กำหนดให้สมการสำหรับการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงเฉือน โดยกำหนดให้แรงเฉือนของคอนกรีต V_c และกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน V_s ดังนี้

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd \quad (3.20)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{sy} d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (3.21)$$

เมื่อใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้ง ($\alpha = 90^\circ$)

$$\sin 90^\circ = 1, \cos 90^\circ = 0$$

$$V_s = \frac{A_v f_{sy} d}{s} \quad (3.22)$$

โดยที่	b	คือ	ความกว้างของคานตัวอย่างทดสอบ (cm)
	d	คือ	ความลึกประสิทธิภาพ วัดจากขอบบนสุดของคานคอนกรีตไปยังจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง (cm)
	f_{sy}	คือ	กำลังต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (kg/cm ²)
	A_v	คือ	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (พื้นที่เป็น 2 เท่าของเหล็กเสริมหนึ่งเส้น) (cm ²)
	S	คือ	ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (cm)

ข้อกำหนดในการออกแบบคานตัวอย่างทดสอบเพื่อต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้น

1. ไม่จำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเมื่อ

$$V_u \leq 0.50\phi V_c \quad (3.23)$$

เมื่อ

2. จำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยที่สุด (ยกเว้นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก)

$$0.5\phi V_c < V_u < \phi V_c \quad (3.24)$$

การเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน วสท. 1008-38

$$\phi V_s = \min \phi V_s = \phi 3.5bd \quad (3.25)$$

ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมากที่สุด

$$\max S \leq d/2 \leq 60 \text{ cm} \quad (3.26)$$

3. ต้องเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามข้อ 2 เมื่อ

$$\phi V_c < V_u < [\phi V_c + \min \phi V_s] \quad (3.27)$$

4. จำเป็นต้องเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเมื่อ

$$[\phi V_c + \min \phi V_s] < V_u < [\phi V_c + 1.1\phi\sqrt{f'_c}bd] \quad (3.28)$$

การเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c \quad (3.29)$$

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_{sy} d}{S} \quad (3.30)$$

$$\max S \leq d/2 \leq 60 \text{ cm} \quad (3.26)$$

5. ต้องเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเมื่อ

$$[\phi V_c + 1.1\phi\sqrt{f'_c}bd] < V_u < [\phi V_c + 2.1\phi\sqrt{f'_c}bd] \quad (3.31)$$

การเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน วสท.

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c \quad (3.29)$$

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_{sy} d}{S} \quad (3.30)$$

$$\max S \leq d/4 \leq 30 \text{ cm} \quad (3.32)$$

3.3.3 การคำนวณระยะแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ

ในมาตรฐานของ วสท.1008-38 กำหนดให้คำนวณระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบในช่วงยึดหยุนเชิงเส้นไว้ ดังนี้

1. ค่ามอดุลค่าแห่งของแกนสะเทิน (kd)

$$k = \left[\sqrt{2n \left(\rho + \frac{2\rho'd'}{a} \right) + n^2(\rho + 2\rho')^2} \right] - n(\rho + 2\rho') \quad (3.33)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.34)$$

โดยที่	kd	คือ	ระยะที่วัดจากผิวบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กถึงแนวแกน สะเทินของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (cm)
	n	คือ	อัตราส่วนโมดูลัส
	E_s	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (kg/cm ²)
	E_c	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (kg/cm ²)
	ρ	คือ	ปริมาณของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
	ρ'	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด
	d	คือ	ความลึกประสิทธิผล วัดจากขอบบนสุดของคานคอนกรีตไปยัง จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง (cm)
	d'	คือ	ความลึกประสิทธิผลจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยัง จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงอัด (cm)

2. หาโมเมนต์เฉื่อยประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบ (I_e)

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (3.35)$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{(h/2)} \quad (3.36)$$

เมื่อ $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$ (3.37)

$$I_g = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.38)$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd^3)}{3} + nA_s(d - kd)^2 + (n - 1)A'_s(kd - d')^2 \quad (3.39)$$

โดยที่	I_e	คือ	โมเมนต์เฉื่อยประสิทธิผลที่เกิดขึ้น (cm^4)
	M_{cr}	คือ	โมเมนต์แตกร้าวที่เกิดขึ้น (kg-m)
	M_a	คือ	โมเมนต์มากที่สุดที่กระทำต่อหน้าตัดที่พิจารณา (kg-m)
	I_g	คือ	โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดทั้งหมดที่เกิดขึ้น (cm^4)
	I_{cr}	คือ	โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวที่เกิดขึ้น (cm^4)
	f_r	คือ	โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต (kg/cm^2)
	h	คือ	ความลึกของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (cm)
	b	คือ	ความกว้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (cm)

3. ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ (Δ) เป็นผลรวมของระยะการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load, DL) เนื่องจากน้ำหนักของตัวคานคอนกรีตเสริมเหล็กเอง และระยะการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักจากการทดสอบแบบ four-point load testing

$$\Delta = \frac{5 w_g L^4}{384 E_c I} + \frac{23 PL^4}{648 E_c I} \quad (3.40)$$

โดยที่	I	คือ	โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบ (cm^4)
	Δ	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวของคานตัวอย่างทดสอบ (cm)
	L	คือ	ความยาวของคานตัวอย่างทดสอบ (m)
	w_g	คือ	น้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานตัวอย่างทดสอบ (kg/m)

3.4 กำลังต้านทานแรงดึงของแผ่นเหล็กด้า

เก็บตัวอย่างแผ่นเหล็กด้าที่เชื่อมติดกับเหล็กข้ออ้อยสำหรับประกอบในคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปหากำลังรับแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัว และโมดูลัสยืดหยุ่น เพื่อตรวจสอบหาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 1479-2541) เหล็กกล้าทรงแบนรีดร้อนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป

ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบแผ่นเหล็กดำ ใช้ชิ้นส่วนแนวขวาง (transverse test piece) กับทิศการรีดร้อนตัดเป็นรูปกระดูก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 1479-2541) จำนวน 5 ตัวอย่าง

3.5 กำลังต้านทานแรงกดอัดของคอนกรีต

เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการสร้างคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปหาค่ากำลังรับแรงกดอัดประลัย และโมดูลัสยืดหยุ่น เพื่อใช้ในการออกแบบคานตัวอย่างทดสอบ

มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 409-2525) วิธีการทดสอบความต้านทานของแท่งคอนกรีต (Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Specimens)

ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m สูง 0.30 m บ่ม (curing) เป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 409-2525) จำนวน 5 ตัวอย่าง

3.6 กำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเส้นกลม และเหล็กข้ออ้อย

เก็บตัวอย่างเหล็กเสริมที่ใช้ในการสร้างคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปหาค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก กำลังรับแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัวและโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม เพื่อหาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของเหล็กเสริมทั้ง 2 แบบ

มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 20-2559) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กเส้นกลม (Standard for Steel bars for reinforced concrete: Round bars)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 24-2559) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย (Standard for Steel bars for reinforced concrete: Deformed bars)

ตัวอย่างทดสอบ

เหล็กเสริมชนิดเหล็กเส้นกลมขนาด 6 mm (SR24) จำนวน 5 ตัวอย่าง และเหล็กเสริมชนิดเหล็กข้ออ้อยขนาด 16 mm, DB16 (SD40) จำนวน 5 ตัวอย่าง

3.7 การทดสอบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

จุดประสงค์ของการทดสอบ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบ 4 จุด (four-point loading test) และลักษณะของการวิบัติ (modes of failure) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่งที่ส่วนรองรับ เปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงกระทำกับคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ความยาวระยะฝั่งเท่ากับ 500 mm (คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง) และสมการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38)

2. ศึกษาผลของความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่อกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบมีดังนี้

1. โครงข้อแข็ง (loading frame) ขนาด 100 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ก)
2. แม่แรงไฮดรอลิก (hydraulic pump) พร้อมมาตรวัดความดัน (pressure gauge) และกระบอกไฮดรอลิก (hydraulic cylinder) ขนาด 100 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข) และ 3.6(ค)
3. ฐานรองจุดรองรับแบบหมุด (pinned support) ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ง)
4. Dial gauge พร้อมกับ magnet grip ดังแสดงในรูปที่ 3.6(จ)
5. เครื่องวัดความเครียด (strain gauge indicator and recorder) ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ช)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ช)

รูปที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

การเตรียมการหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

คานตัวอย่างทดสอบนี้ได้ถูกหล่อโดยช่างฝีมือแรงงานตามที่มาตรฐานของ วสท. กำหนดใน จังหวัดนครราชสีมา โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการหล่อตัวอย่างทดสอบ ดังนี้

1. ทำการผูกเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง และแรงอัดโดยจะแบ่งโดยลักษณะการวิบัติดังนี้

1.1 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure กำหนดให้เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm จำนวน 5 เส้น (5-DB16) เหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm จำนวน 2 เส้น (2-DB16) และมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 100 mm ตลอดความยาวคานตัวอย่างทดสอบ

1.2 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure กำหนดให้เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm จำนวน 6 เส้น (6-DB16) เหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm จำนวน 2 เส้น (2-DB16) และมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 300 และ 500 mm ตลอดความยาวคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การผูกเหล็กเสริมของคานตัวอย่างทดสอบ

2. ทำการเจียรด้านใต้ผิวของเหล็กข้ออ้อยด้านรับแรงดึง จากนั้นติดตั้ง strain gauge บริเวณกึ่งกลางความยาวของคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม เพื่อตรวจสอบว่าเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยให้เหล็กเสริมรับแรงดึงพัฒนาหน่วยแรงดึงจนถึงหน่วยแรงครากได้หรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การติดตั้ง strain gauge เข้ากับเหล็กเสริม

3. นำเหล็กข้ออ้อยที่มีความยาวเท่ากับ 500 1000 และ 1500 mm มาเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 250 mm ลึก 150 mm และหนา 20 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

4. ทำการประกอบแบบหล่อที่ทำจากไม้อัดเพื่อเป็นแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

5. นำเหล็กเสริมที่ได้ทำการผูกไว้แล้ววางลงไปแบบหล่อ โดยให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตทุกด้านเท่ากับ 2.5 cm ตลอดความยาวคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เหล็กเสริมที่นำไปใส่ในแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะหุ้มเท่ากับ 2.5 cm

6. นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กใส่เข้าไปที่ส่วนรองรับทั้ง 2 ด้านของคานตัวอย่างทดสอบ โดยให้ปลายของแผ่นเหล็กยื่นออกมาจากคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังที่ส่วนรองรับของคานตัวอย่างทดสอบ

7. คอนกรีตที่ได้ออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 380 kg/cm^2 จากนั้นหล่อทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 หลังจากนั้นจึงทำการแกะแบบหล่อออก และทำการบ่มด้วยกระสอบชุบน้ำเป็นเวลาประมาณ 28 วัน จะได้คานที่มีแผ่นเหล็กโผล่ออกมาจากจุดรองรับเท่ากับ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 คอนกรีตที่หล่อทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง

8. ทำการติดตั้งแบบหล่อ และทาน้ำยาประสานคอนกรีตเพื่อเตรียมหล่อคอนกรีตปิดส่วนปลายจตุรกรับของคานตัวอย่างทดสอบ โดยคอนกรีตที่ใช้หล่อส่วนนี้มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับชั้นตอนที่ 7 (380 kg/cm^2) โดยทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แบบหล่อที่ปิดส่วนแผ่นเหล็กที่ยื่นออกมาจากคานตัวอย่างทดสอบ

9. ทำการถอดแบบหล่อออกจากส่วนปลายจตุรกรับของคานตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นทำการบ่มคอนกรีตโดยใช้กระสอบชุบน้ำคลุมเป็นเวลาประมาณ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การบ่มคานตัวอย่างทดสอบด้วยกระสอบชุบน้ำ

คานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

คานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กท 24 ตัวอย่าง โดยจะถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 กลุ่ม ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝัองที่ส่วนรองรับ จำนวน 6 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 18 ตัวอย่าง คานตัวอย่างทดสอบทั้งหมดถูกออกแบบโดยใช้สมการออกแบบของ วสท. 1008-38 โดยที่ไม่นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมาพิจารณาในการออกแบบ คานทั้ง 2 กลุ่มจะกำหนดความยาวระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 4.0 m มีน้ำหนักบรรทุกจรที่ถูกถ่ายลงคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 800 kg/m น้ำหนักบรรทุกคงที่ ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เกิดจากน้ำหนักกำแพงเท่ากับ 450 kg/m และพื้นสำเร็จรูปเท่ากับ 960 kg/m เท่ากันทั้ง 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อแปลงน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกระจายสม่ำเสมอเป็นแรงกระทำแบบจุดจากการทดสอบแบบแรงจะทำ 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แรงกระทำแบบจุดที่กระทำ ($P/2$) ต่อคานจะมีค่าเท่ากับ 43.36 kN

คานทั้ง 2 กลุ่มมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 175 mm ลึก 350 mm เหล็กเสริมด้านรับแรงดึง เหล็กเสริมด้านรับแรงอัด และเหล็กที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ส่วนรองรับเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm (DB16) เกรด SD40 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (RB6) เกรด SR24 โดยคานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกออกแบบให้อยู่ในสถานะที่ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงต่ำกว่าอัตราส่วนที่สถานะสมดุลตามข้อกำหนด 4303(ข) (วสท. 1008-38) ส่วนแผ่นเหล็กที่เชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝัองที่ส่วนรองรับมีขนาดกว้าง 250 mm ลึก 150 mm และหนา 20 mm เกรด SS400

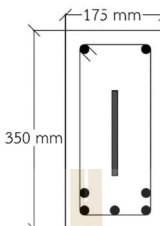
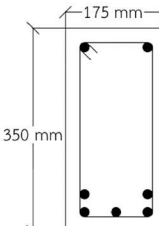
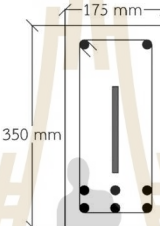
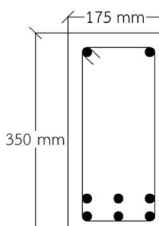
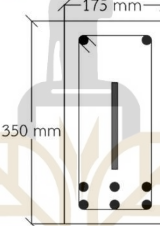
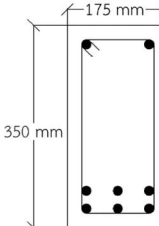
ตัวแปรในการทดสอบมีทั้งหมด 2 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวระยะฝัองของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 500 (ความยาวระยะฝัองอ้างอิง), 1000 และ 1500 mm และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 100, 300 และ 500 mm

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อของคานตัวอย่างทดสอบ มีสัญลักษณ์ของชื่อเป็น XX-YYYY-ZZZ โดยที่ X หมายถึง รูปแบบของคานตัวอย่างทดสอบมีทั้งหมด 2 กลุ่ม ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก (RC) และคานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อย (PC) Y หมายถึง ความยาวระยะฝัองของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) และ Z หมายถึง ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

ตาราง 3.1 คานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

กลุ่ม ที่	คานตัวอย่าง ทดสอบ	ระยะฝั่งของ เหล็กข้ออ้อย (mm)	ระยะห่างระหว่าง เหล็กเสริมรับแรง เฉือน (mm)	ลักษณะการวิบัติที่ ออกแบบ	จำนวน
1	RC-0000-100	0	100	Flexural failure	2
	PC-0500-100	500	100	Flexural failure	2
	PC-1000-100	1000	100	Flexural failure	2
	PC-1500-100	1500	100	Flexural failure	2
2	RC-0000-300	0	300	Shear failure	2
	PC-0500-300	500	300	Shear failure	2
	PC-1000-300	1000	300	Shear failure	2
	PC-1500-300	1500	300	Shear failure	2
3	RC-0000-500	0	500	Shear failure	2
	PC-0500-500	500	500	Shear failure	2
	PC-1000-500	1000	500	Shear failure	2
	PC-1500-500	1500	500	Shear failure	2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก

คานตัวอย่าง ทดสอบ	ระยะห่างเหล็ก เสริมรับแรง เฉือน (mm)	End span		Middle span	
		Diagram	Reinforcement	Diagram	Reinforcement
RC-0000-100	100		2-DB16 RB6 @ 100 mm Steel plate 250 x 150 x 20 mm with 6-DB16 5-DB16		2-DB16 RB6 @ 100 mm 5-DB16
RC-0000-300	300		2-DB16 RB6 @ 300 mm Steel plate 250 x 150 x 20 mm with 6-DB16 6-DB16		2-DB16 RB6 @ 300 mm 6-DB16
RC-0000-500	500		2-DB16 RB6 @ 500 mm Steel plate 250 x 150 x 20 mm with 6-DB16 6-DB16		2-DB16 RB6 @ 500 mm 6-DB16

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างหน้าตัดของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมติดกับแผ่นเหล็ก

คานตัวอย่าง ทดสอบ	ระยะห่างเหล็ก เสริมรับแรง เฉือน (mm)	End span		Middle span	
		Diagram	Reinforcement	Diagram	Reinforcement
PC-0500-100 PC-1000-100 PC-1500-100	100		2-DB16 RB6 @ 100 mm Steel plate 250 x 150 x 20 mm with 6-DB16		2-DB16 RB6 @ 100 mm
PC-0500-300 PC-1000-300 PC-1500-300	300		2-DB16 RB6 @ 300 mm Steel plate 250 x 150 x 20 mm with 6-DB16		2-DB16 RB6 @ 300 mm
PC-0500-500 PC-1000-500 PC-1500-500	500		2-DB16 RB6 @ 500 mm Steel plate 250 x 150 x 20 mm with 6-DB16		2-DB16 RB6 @ 500 mm

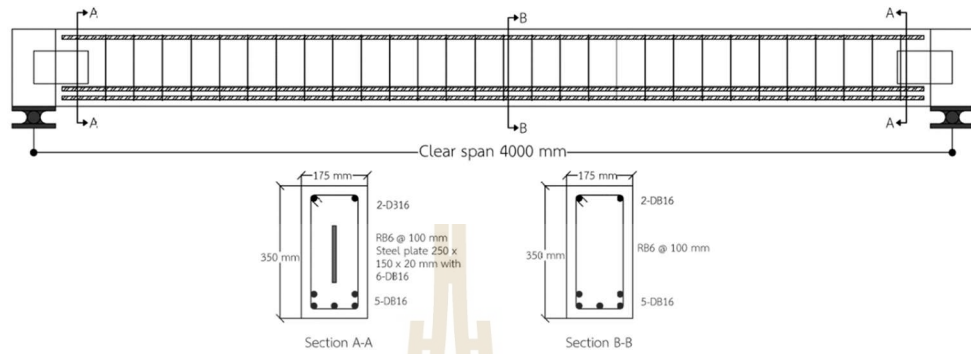
ในการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 24 ตัวอย่าง จะถูกจำแนกออกเป็นทั้งหมด 3 กลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

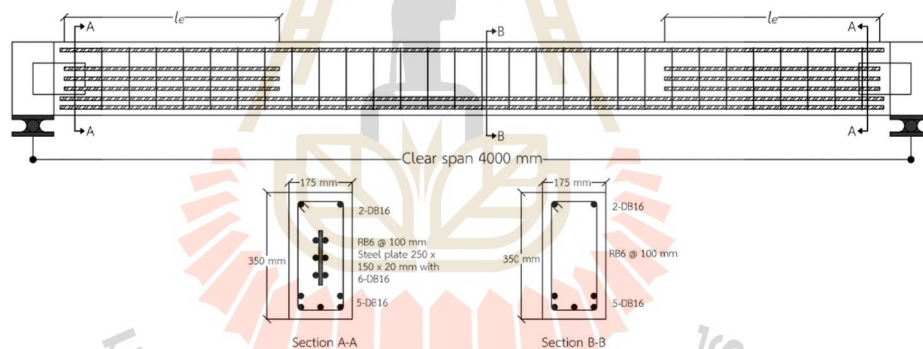
RC-0000-100 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กแต่ไม่ได้เชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝั้งที่ส่วนรองรับ มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 100 mm และออกแบบให้คานเกิดการวิบัติแบบ flexural failure ดังแสดงในรูปที่ 3.16

PC-0500-100, PC-1000-100, PC-1500-100 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝั้งที่ส่วนรองรับ โดยที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะฝั้งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm เป็นคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

100 mm ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก 500, 1000 และ 1500 mm และ ออกแบบให้คานเกิดการวิบัติแบบ flexural failure ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ RC-0000-100



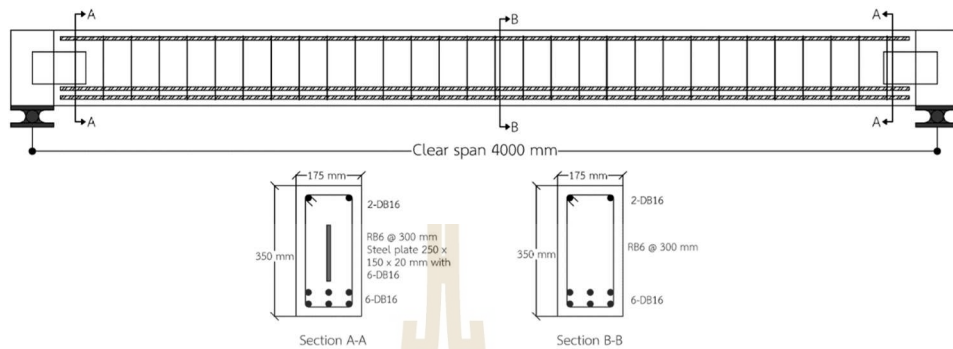
รูปที่ 3.17 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ PC-0500-100, PC-1000-100 และ PC-1500-100

คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

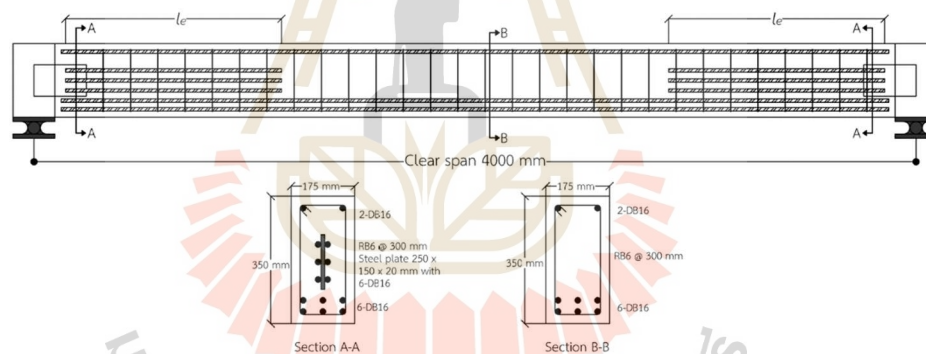
RC-0000-300 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กแต่ไม่ได้เชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝั่งที่ส่วนรองรับ มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 300 มม. และออกแบบให้คานเกิดการวิบัติแบบ shear failure ดังแสดงในรูปที่ 3.18

PC-0500-300, PC-1000-300, PC-1500-300 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝั่งที่ส่วนรองรับ โดยที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm เป็นคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

300 mm ความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก 500, 1000 และ 1500 mm และ ออกแบบให้คานเกิดการวิบัติแบบ shear failure ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ RC-0000-300



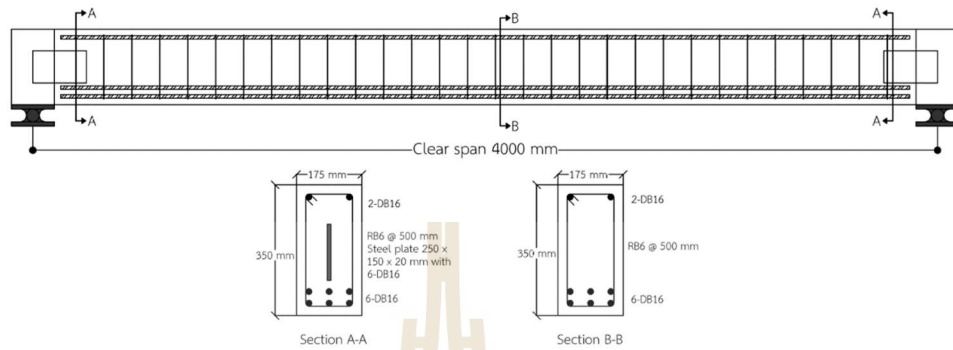
รูปที่ 3.19 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ PC-0500-300, PC-1000-300 และ PC-1500-300

คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

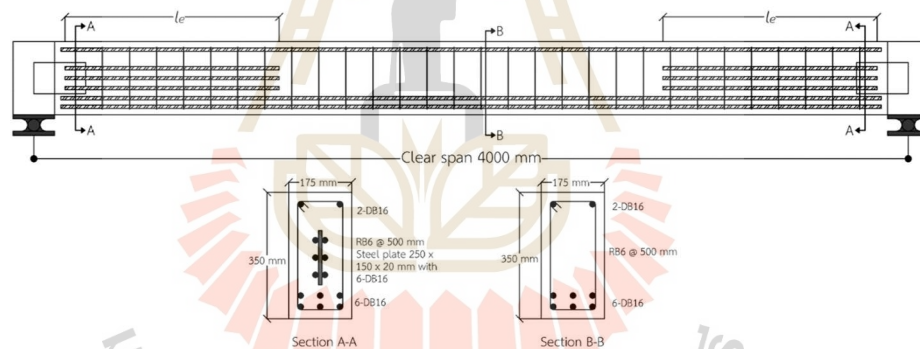
RC-0000-500 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กแต่ไม่ได้เชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝังที่ส่วนรองรับ มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 500 มม. และออกแบบให้คานเกิดการวิบัติแบบ shear failure ดังแสดงในรูปที่ 3.20

PC-0500-500, PC-1000-500, PC-1500-500 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝังที่ส่วนรองรับ โดยที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm เป็นคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

500 mm ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก 500, 1000 และ 1500 mm และ ออกแบบให้คานเกิดการวิบัติแบบ shear failure ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ RC-0000-500

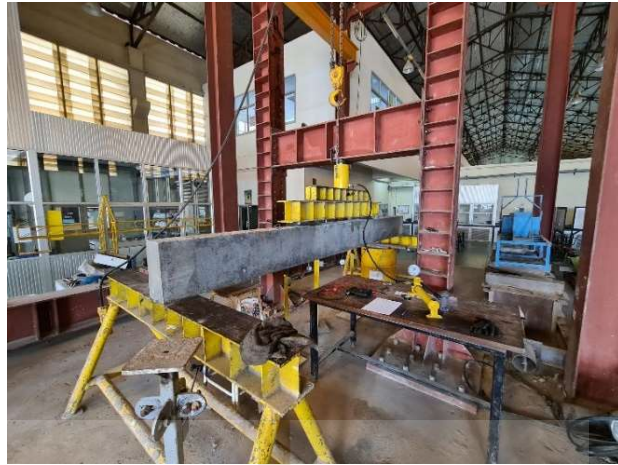


รูปที่ 3.21 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ PC-0500-500, PC-1000-500 และ PC-1500-500

ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝั่งที่ส่วนรองรับ และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีขั้นตอน ดังนี้

1. ติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame โดยให้จุดรองรับทั้ง 2 ด้านเป็นจุดรองรับแบบหมุด (pinned support) การทดสอบคานตัวอย่างทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบ four-point loading test โดยการใช้เหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ ทำหน้าที่เป็นคานถ่ายแรงจาก hydraulic cylinder ลงสู่ตัวอย่างคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame

2. ติดตั้ง dial gauge เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบโดยติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ 1 ตัว และที่ระยะ $L/6$ ถัดไปจากกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาด้านละ 1 ตัว และที่จุดรองรับของคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 1 ตัว เพื่อวัดค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์ของจุดรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.23 (ก) dial gauge ที่บริเวณจุดรองรับ (ข) dial gauge ที่บริเวณกึ่งกลาง และ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบ

3. ต่อสายไฟจาก strain gauge ที่ได้ทำการติดตั้งไว้ในคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ strain gauge indicator เพื่อใช้อ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง
4. ทำการให้แรงก่อน (pre-loading) กับคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า pressure gauge บน hydraulic pump, dial gauge และ strain gauge indicator ที่ได้ทำการติดตั้งทำงานได้อย่างสมบูรณ์
5. ปรับค่า dial gauge และ strain gauge indicator ให้เป็นศูนย์ทั้งหมด
6. ตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ทดสอบอีกครั้งเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายขึ้นขณะที่ทำการทดสอบ
7. เริ่มทำการทดสอบโดยให้ลักษณะทดสอบเป็นแบบ displacement controlled ให้การแอนตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 มิลลิเมตร (50 ซีดบนหน้าปัด dial gauge) จากนั้น บันทึกค่าแรง ค่าความเครียดของเหล็กเสริมที่อ่านได้จาก strain gauge indicator ที่เกิดขึ้น ค่าการแอนตัวที่จุดต่าง ๆ ที่ได้ติดตั้ง dial gauge ไว้ และสังเกตพฤติกรรมของคานตัวอย่างทดสอบ เมื่อรอยร้าวปรากฏขึ้นใช้ปากกาลากตามรอยร้าวที่เกิดขึ้น เพื่อให้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน
8. ทำซ้ำข้อที่ 7 จนกระทั่ง คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ เมื่อคานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ ถอด dial gauge ออกเพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้น บันทึกค่าแรงกระทำที่เกิดขึ้น ค่าการแอนตัว (ค่าสุดท้ายก่อนที่จะทำการถอด dial gauge ออก) และค่าความเครียดในเหล็กเสริม จากนั้นถอดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบออกจากคานตัวอย่างทดสอบ และบันทึกภาพลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลภายหลัง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง โดยใช้วิธีการทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (four-point loading test) ผลที่นำเสนอได้นั้น ได้แก่ คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบที่ความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝิ่งต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำและค่าความเครียดในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเกิดการคราก กำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดที่คานตัวอย่างทดสอบรับได้ ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบ ($P_{y, test}$) ต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นของสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท. ($P_{y, calculated}$) ของคานตัวอย่างทดสอบ ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบที่สภาวะใช้งาน ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบในแต่ละกลุ่ม และอิทธิพลของความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กต่อกำลังต้านทานแรงกระทำ และการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ

4.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทดสอบได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ตามหัวข้อที่ 3.4 ถึง 3.6 ซึ่งมีค่าคุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนการวิเคราะห์ และอภิปรายผลของการทดสอบนั้น ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ค.

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	Yielding stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Percent of elongation (%)
คอนกรีต (380 kg/cm ²)	-	40.33	29.85	-
เหล็กเส้นกลม (RB6, SR24)	370.20	493.46	195.3	20.29
เหล็กข้ออ้อย (DB16, SD40)	590.10	645.21	198.5	23.86
แผ่นเหล็กกล้า (SS400)	404.74	568.42	196.3	19.88

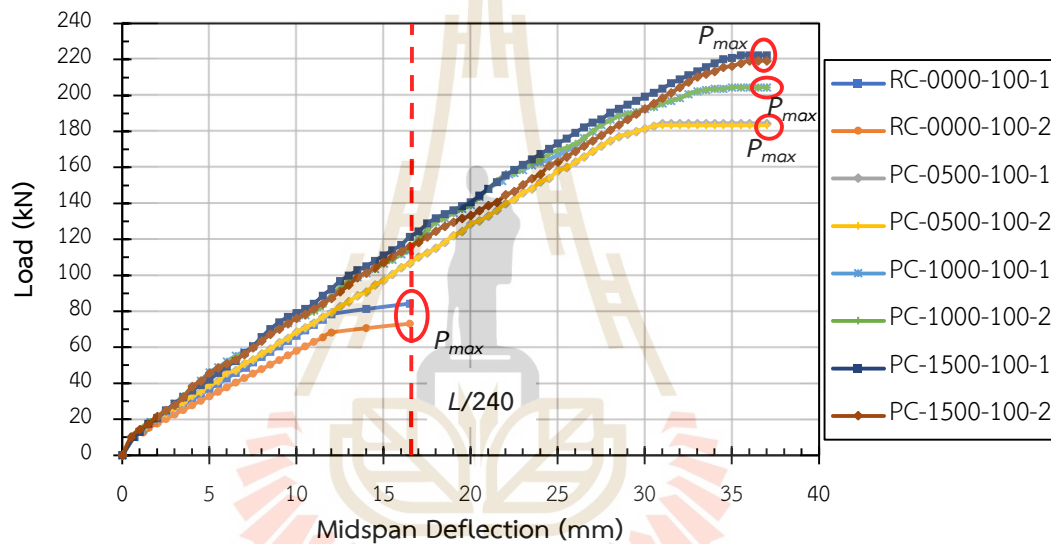
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้นำกำลังต้านทานแรงกระทำมาพิจารณาทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ $P_{L/240}$ เป็นกำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน (service load) ของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นกำลังต้านทานแรงกระทำที่ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/240$ (ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าการแอ่นตัวประมาณ 1667 mm) P_y เป็นกำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบเมื่อเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบเกิดการคราก (yielding) และ P_{max} เป็นกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบที่คานตัวอย่างทดสอบสามารถรับได้

4.3.1 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

รูปที่ 4.1 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ (load) และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ (midspan deflection) ของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 จากความสัมพันธ์ พบว่า ลักษณะกราฟของคานตัวอย่างทดสอบแบ่งเป็นเส้นตรงทั้งหมดสองช่วง (bilinear) โดยที่เส้นกราฟในช่วงแรกจะมีความชันสูง ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) โดยที่คอนกรีต และเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงร่วมกันรับแรงดึง โดยที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับแนวของคานบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ และค่อย ๆ มีจำนวนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งคานตัวอย่างทดสอบมีแรงกระทำที่ค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูงสุด (P_{max}) เหล็กเสริมจะเกิดการคราก (yielding) ที่ค่าความเครียดประมาณ 0.00185 ถึง 0.0022 mm/mm ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากนั้นเส้นกราฟจะเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (non-linear) เมื่อบริเวณผิวของคอนกรีตที่บริเวณท้องคานตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับแรงดึงได้ เหล็กเสริมจะรับแรง

ดิ่งทั้งหมด และการแตกร้าบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบจะขยายตัวกว้างขึ้นอย่างต่อเนื่อง และค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถต้านทานแรงกระทำได้เกินกว่าค่าการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งาน เนื่องจากไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่งที่ส่วนรองรับที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ส่งผลให้พฤติกรรมของคานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะที่เปราะ โดยเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด (abrupt failure) ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

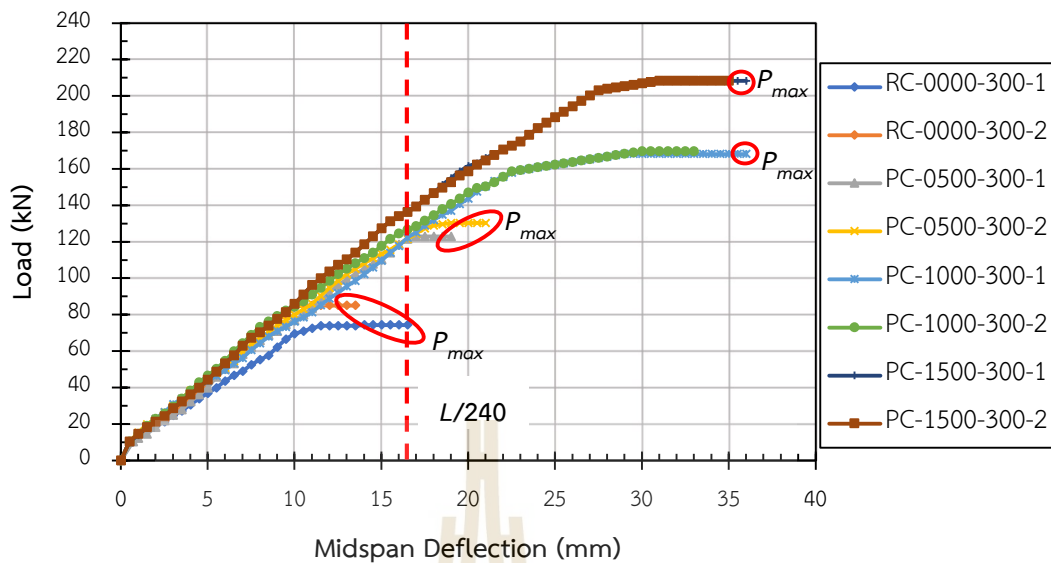
ตารางที่ 4.2 กำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝัง (l_e) (mm)	$P_{L/240}$ (kN)	$P_{L/240}$ ที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)	ความแกร่ง (kN/m)	ความแกร่งที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)
RC-0000-100	0	84.33	-20.90	6420.2	-4.40
PC-0500-100	500	106.60	-	6715.4	-
PC-1000-100	1000	115.51	+8.36	7450.7	+10.95
PC-1500-100	1500	121.45	+13.93	7690.9	+14.53

จากตารางที่ 4.2 แสดงกำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำ และความแกร่งลดลง ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำ และความแกร่งเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน และความแกร่งของคานตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

4.3.2 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

รูปที่ 4.2 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบของคานกลุ่มที่ 2 จากกราฟความสัมพันธ์ พบว่า ลักษณะกราฟของคานตัวอย่างทดสอบแบ่งเป็นเส้นตรงสองช่วงคล้ายกลับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 โดยในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยที่คอนกรีตบริเวณท้องคานตัวอย่างทดสอบ และเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงร่วมกันรับแรงดึง จนกระทั่งกำลังต้านทานแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูงสุด คานตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดรอยร้าวบริเวณบริเวณ $L/3$ จากจุดรองรับของคานตัวอย่างทดสอบ โดยที่เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมีความเครียดประมาณ 0.00067 ถึง 0.00195 mm/mm (เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่ยังไม่เกิดการคราก) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากนั้นเส้นกราฟจะเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น เมื่อบริเวณผิวคอนกรีตที่บริเวณท้องคานตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับแรงดึงได้ เหล็กเสริมจะรับแรงดึงทั้งหมด รอยแตกร้าวที่บริเวณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบเกิดการขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และค่าระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถต้านทานแรงกระทำได้เกินกว่าค่าการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งาน เนื่องจากไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ส่งผลให้พฤติกรรมของคานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะที่เปราะ โดยเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากขึ้น



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

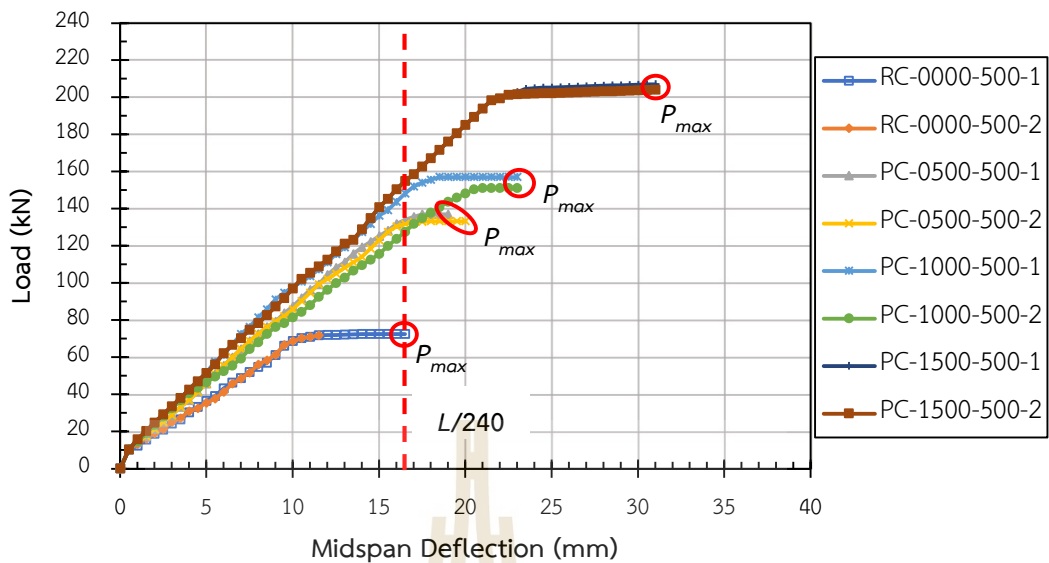
ตารางที่ 4.3 กำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝัง (l_e) (mm)	$P_{L/240}$ (kN)	$P_{L/240}$ ที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)	ความแกร่ง (kN/m)	ความแกร่งที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)
RC-0000-300	0	74.38	-38.76	5888.8	-22.04
PC-0500-300	500	121.45	-	7554.1	-
PC-1000-300	1000	126.64	+4.27	8204.1	+8.60
PC-1500-300	1500	136.30	+12.23	8562.1	+13.34

จากตารางที่ 4.3 แสดงกำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำ และความแกร่งลดลง ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำ และความแกร่งเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน และความแกร่งของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

4.3.3 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

รูปที่ 4.3 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบของคานกลุ่มที่ 3 จากกราฟความสัมพันธ์ พบว่า ลักษณะกราฟของคานตัวอย่างทดสอบแบ่งเป็นเส้นตรงสองช่วงคล้ายกลับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 โดยในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยที่คอนกรีตบริเวณท้องคานตัวอย่างทดสอบ และเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงร่วมกันรับแรงดึง จนกระทั่งกำลังต้านทานแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูงสุด คานตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดรอยร้าวบริเวณบริเวณ $L/3$ จากจุดรองรับของคานตัวอย่างทดสอบ โดยที่เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมีความเครียดประมาณ 0.0010 ถึง 0.00185 mm/mm (เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่ยังไม่เกิดการคราก) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากนั้นเส้นกราฟจะเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น เมื่อบริเวณผิวคอนกรีตที่บริเวณท้องคานตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับแรงดึงได้ เหล็กเสริมจะรับแรงดึงทั้งหมด รอยแตกร้าวที่บริเวณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบเกิดการขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และค่าระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถต้านทานแรงกระทำได้เกินกว่าค่าการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งาน เนื่องจากไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่ที่ส่วนรองรับที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ส่งผลให้พฤติกรรมของคานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะที่เปราะ โดยเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

ตารางที่ 4.4 กำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

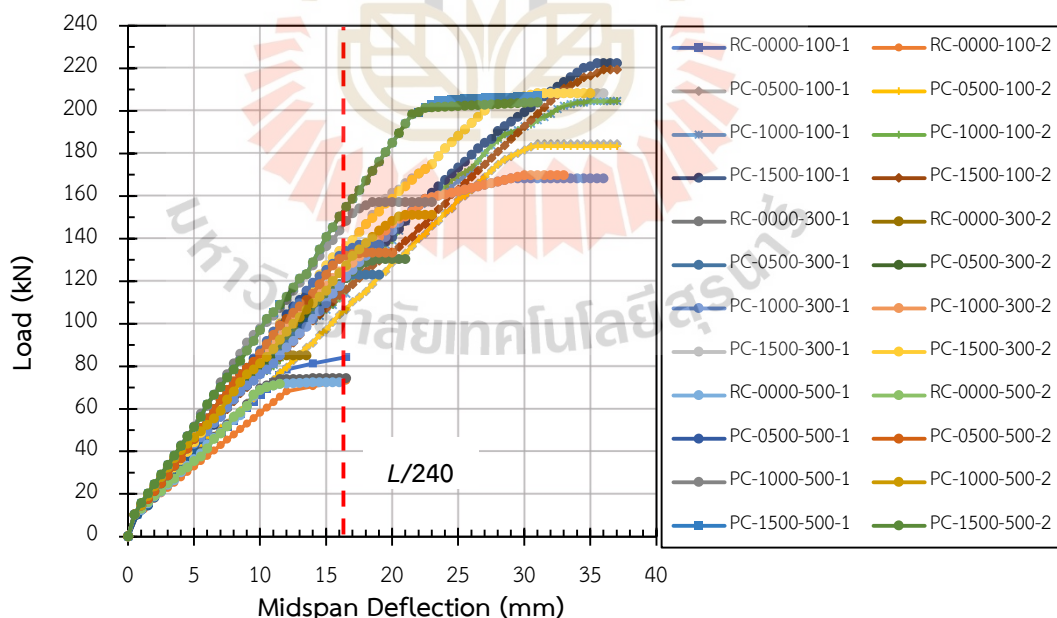
ตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝัง (l_e) (mm)	$P_{L/240}$ (kN)	$P_{L/240}$ ที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)	ความแกร่ง (kN/m)	ความแกร่งที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)
RC-0000-500	0	72.45	-45.05	6908.8	-19.50
PC-0500-500	500	131.84	-	8582.5	-
PC-1000-500	1000	148.17	+12.39	9374.9	+9.23
PC-1500-500	1500	154.85	+17.45	9508.5	+10.79

จากตารางที่ 4.4 แสดงกำลังของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำ และความแกร่งลดลง ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำ และความแกร่งเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน และความแกร่งของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบของกลุ่มต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน พบว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น พฤติกรรมรับแรงกระทำโดยรวมของคานตัวอย่างทดสอบดีขึ้น คานตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการต้านทานแรงช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ดีขึ้น ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงกระทำเพิ่มขึ้น

เมื่อสังเกตคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กส่วนใหญ่ไม่สามารถต้านทานแรงกระทำได้เกินกว่าค่าการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งาน ($P_{L/240}$) เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา และช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของคานตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้พฤติกรรมของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีพฤติกรรมแบบเปราะ ทำให้เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด (abrupt failure) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าความเครียดในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบได้ติดตั้ง strain gauge ที่บริเวณกึ่งกลางด้านใต้ผิวของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง เพื่อตรวจสอบว่าเมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นสามารถช่วยให้หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงพัฒนาถึงหน่วยแรงครากได้หรือไม่

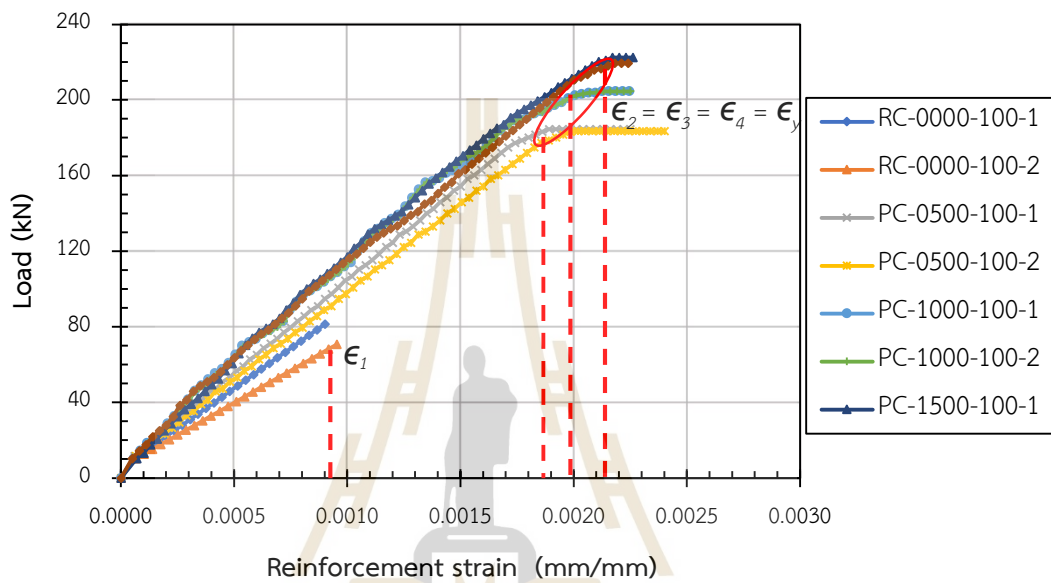
รูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึง ของคานกลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ 3 จากกราฟความสัมพันธ์พบว่า คานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่มีพฤติกรรมแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น จากนั้นเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจนกำลังต้านทานแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุด คานตัวอย่างทดสอบจะเข้าสู่ช่วงที่สองมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น ความเครียดในเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ในขณะที่แรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเกิดการวิบัติที่หน่วยแรงคราก

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบเปราะที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ส่งผลให้ไม่สามารถต้านทานแรงกระทำจนกระทั่งเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเกิดการครากได้ เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น พบว่า เหล็กข้ออ้อยที่ฝังเข้าไปในแนวขวางช่วยเพิ่มสามารถในการต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากแรงกระทำให้ดียิ่งขึ้น พฤติกรรมการรับแรงโดยรวมของคานตัวอย่างทดสอบดีขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงถูกพัฒนาหน่วยแรงดึงได้สูงขึ้น จนกระทั่งเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงถูกดึงจนถึงหน่วยแรงครากที่ประมาณ 0.0018-0.0020 mm/mm ซึ่งจะกล่าวถึงในภาคผนวก ค.

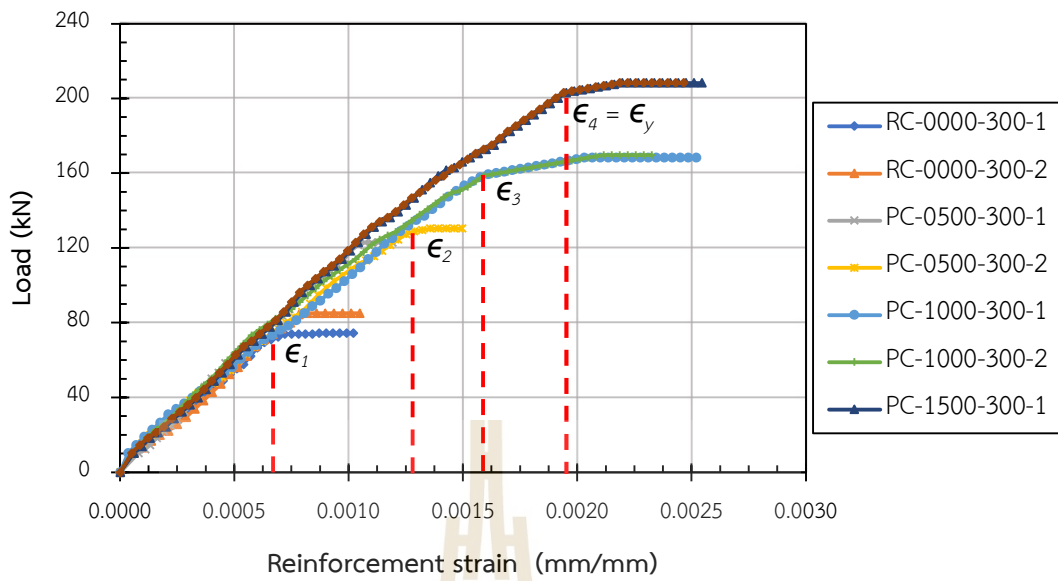
รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 พบว่า คานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่ไม่สามารถรับแรงกระทำจนถึงค่าที่ความเครียดของเหล็กเสริมเกิดการคราก (0.0018-0.0020 mm/mm) ได้ จนกระทั่งความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเท่ากับ 1500 mm พบว่า ความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยมีส่วนช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบรับแรงเฉือนเนื่องจากแรงกระทำให้ดียิ่งขึ้น พฤติกรรมการรับแรงโดยรวมของคานตัวอย่างทดสอบดีขึ้น ส่งผลให้

เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงถูกพัฒนาหน่วยแรงดึงได้สูงขึ้น จนกระทั่งเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงถูกดึงจนถึงหน่วยแรงคราก

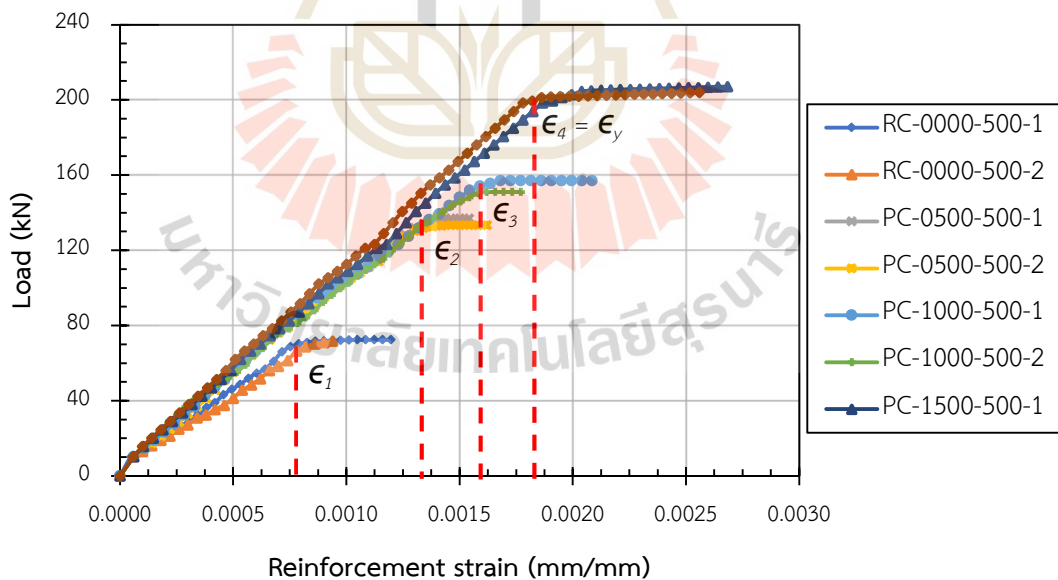
ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงถูกพัฒนาหน่วยแรงดึงได้ดีขึ้น จนกระทั่งถูกดึงจนถึงหน่วยแรงคราก



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริม
ด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และความเครียดเหล็กเสริม
ด้านรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

4.6 กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการคราก และกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบที่สภาวะต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (ระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm) พบว่า กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน ($P_{L/240}$) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำลดลงอยู่ในช่วง 29.90-45.05 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นกำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 8.36-13.93 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 4.27-12.23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 12.39-17.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ที่กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการคราก (P_y) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการครากลดลงอยู่ในช่วง 37.59-56.47 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นกำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการครากเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.31-21.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 34.46-68.92 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 13.66-52.95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และที่ กำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานลดลงอยู่ในช่วง 39.49-54.31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.86-20.51 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 36.84-69.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.62-51.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่งเข้าไปในคานตัวอย่างทดสอบ กำลังต้านทานแรงกระทำทุกสภาวะมีค่าลดลงค่อนข้างมาก ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น พฤติกรรมการรับแรงโดยรวมของคานดีขึ้น สามารถรับแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงกระทำที่ได้จากการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 กำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่	ตัวอย่าง ทดสอบ	กำลังต้านทานแรงกระทำ (kN)			กำลังที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)		
		$P_{L/240}$	P_y	P_{max}	$P_{L/240}$	P_y	P_{max}
1	RC-0000-100	84.33	78.39	84.33	-20.90	-56.47	-54.31
	PC-0500-100	106.60	180.09	184.55	-	-	-
	PC-1000-100	115.51	198.65	204.59	+8.36	+10.31	+10.86
	PC-1500-100	121.45	217.95	222.41	+13.93	+21.02	+20.51
2	RC-0000-300	74.38	73.94	74.38	-38.76	-37.59	-39.49
	PC-0500-300	121.45	118.48	122.93	-	-	-
	PC-1000-300	126.64	159.31	168.22	+4.27	+34.46	+36.84
	PC-1500-300	136.30	200.14	208.30	+12.23	+68.92	+69.45
3	RC-0000-500	72.45	72.16	72.45	-45.05	-44.65	-47.13
	PC-0500-500	131.84	130.36	137.04	-	-	-
	PC-1000-500	148.17	148.17	157.08	+12.39	+13.66	+14.62
	PC-1500-500	154.85	199.39	207.11	+17.45	+52.95	+51.13

4.7 อัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหย่อนเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหย่อนเชิงเส้นของสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท.

ตารางที่ 4.6 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงกระทำที่ได้จากการทดสอบ และกำลังต้านทานแรงกระทำที่คำนวณจากสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท. ในช่วงยึดหย่อนเชิงเส้น พบว่าเมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น อัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ (ที่แสดงถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก) ของคานตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

จากตารางสามารถแบ่งรูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่

4.7.1 รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกต่ำ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่าอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ค่อนข้างต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก (ค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 2.0) เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อก่อนที่จะเกิดการวิบัติที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงนั้น พบว่า เกิดการวิบัติที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้เล็กน้อย เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นคานตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อแทน ซึ่งลักษณะการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงกระทำค่อนข้างต่ำ

4.7.2 รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกปานกลาง ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 mm ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure พบว่า เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝั่งเข้าไปในแนวขวาง ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำส่งผลให้ค่าอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ มีเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง 1.70 ถึง 1.87 ซึ่งถือเป็นค่าความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานได้ในระดับหนึ่ง

4.7.3 รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกสูง ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 mm ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้มีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ที่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝั่งเข้าไปในแนวขวางมีส่วนช่วยในการต้านทานแรงเฉือนได้ค่อนข้างมาก

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กหรือมีความยาวระยะฝั่งที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่เมื่อคานตัวอย่างทดสอบมีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น อัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจนมีค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก

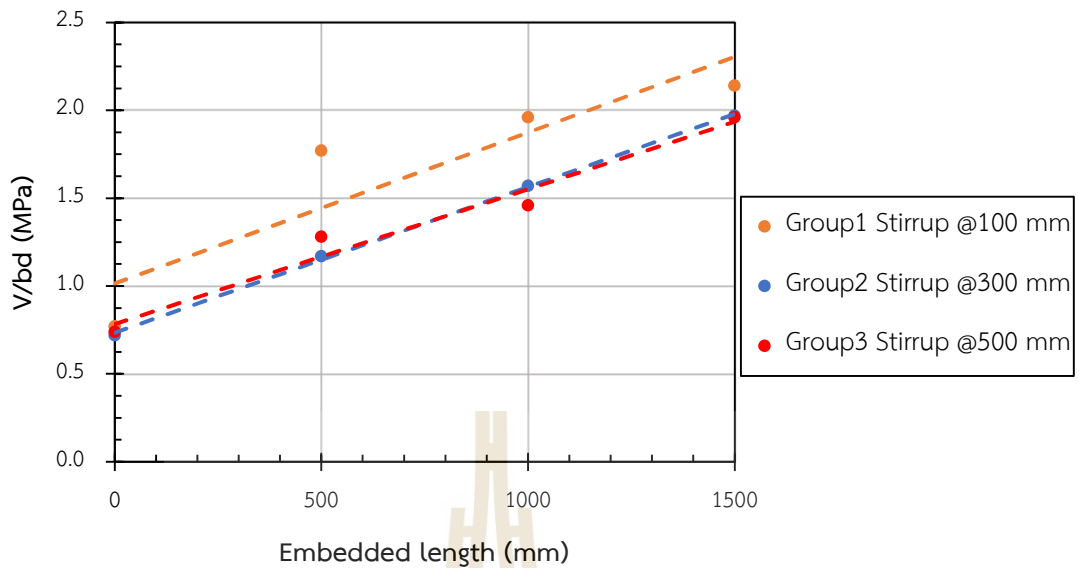
ตารางที่ 4.6 กำลังต้านทานแรงกระทำในช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นของคานตัวอย่างทดสอบ กำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นของสมการการออกแบบของ วสท. และอัตราส่วนระหว่าง $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$

กลุ่มที่	ตัวอย่างทดสอบ	กำลังต้านทานแรงกระทำ (kN)		อัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ
		$P_{y, test}$	$P_{y, calculated}$	$P_{y, calculated}$
1	RC-0000-100	78.39	116.86	0.67
	PC-0500-100	180.09	116.86	1.54
	PC-1000-100	198.65	116.86	1.70
	PC-1500-100	217.95	116.86	1.87
2	RC-0000-300	73.94	77.49	0.95
	PC-0500-300	118.48	77.49	1.53
	PC-1000-300	159.31	77.49	2.06
	PC-1500-300	200.14	77.49	2.58
3	RC-0000-500	70.23	69.62	1.01
	PC-0500-500	130.36	69.62	1.87
	PC-1000-500	148.17	69.62	2.13
	PC-1500-500	199.39	69.62	2.86

หมายเหตุ : อัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกมีค่าเท่ากับ 2.0

4.8 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 4.8 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและความยาวระยะฝึงของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า หน่วยแรงเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวระยะฝึงของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก กล่าวคือ เมื่อความยาวระยะฝึงของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน และความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

เมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นลดลงอยู่ในช่วง 37.61-56.50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.73-20.90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 34.19-68.38 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.06-53.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นลดลงค่อนข้างมาก ในขณะที่ความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เนื่องจากระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีค่าเพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือน คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 มีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนร่วมกับระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอ

เมื่อเปรียบเทียบคานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากัน พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ

100 mm) มีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมากกว่าคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับเฉือนเท่ากับ 300 mm) และคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 500 mm) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นให้กับคานตัวอย่างทดสอบมากเพียงใด ก็ไม่สามารถเพิ่มหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นให้กับคานตัวอย่างทดสอบได้เทียบเท่ากับคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเพียงพอ

ตารางที่ 4.7 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบ

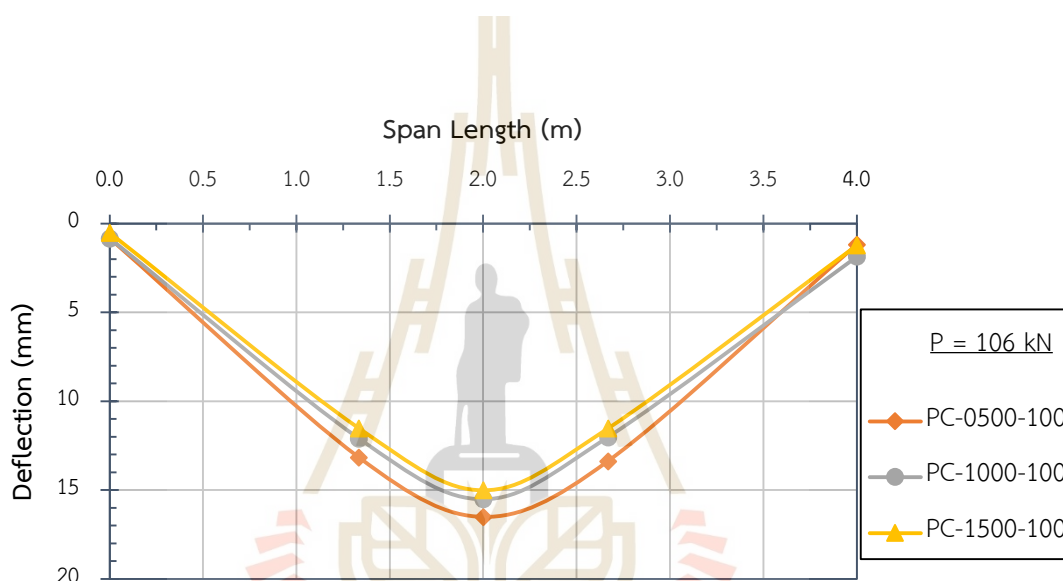
กลุ่มที่	ตัวอย่างทดสอบ	ความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อย, l_e (mm)	หน่วยแรงเฉือน (MPa)	หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (%)
1	RC-0000-100	0	0.77	-56.50
	PC-0500-100	500	1.77	-
	PC-1000-100	1000	1.96	+10.73
	PC-1500-100	1500	2.14	+20.90
2	RC-0000-300	0	0.73	-37.61
	PC-0500-300	500	1.17	-
	PC-1000-300	1000	1.57	+34.19
	PC-1500-300	1500	1.97	+68.38
3	RC-0000-500	0	0.74	-42.19
	PC-0500-500	500	1.28	-
	PC-1000-500	1000	1.46	+14.06
	PC-1500-500	1500	1.96	+53.13

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอนตัวของคานตัวอย่างทดสอบ และความยาวของคานตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบกำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบ ได้ทำการติดตั้ง dial gauges ทั้งหมด 5 ตัว เพื่อวัดการแอนตัวของคานตัวอย่างทดสอบ โดยที่ dial gauges 3 ตัว วัดค่าการแอน

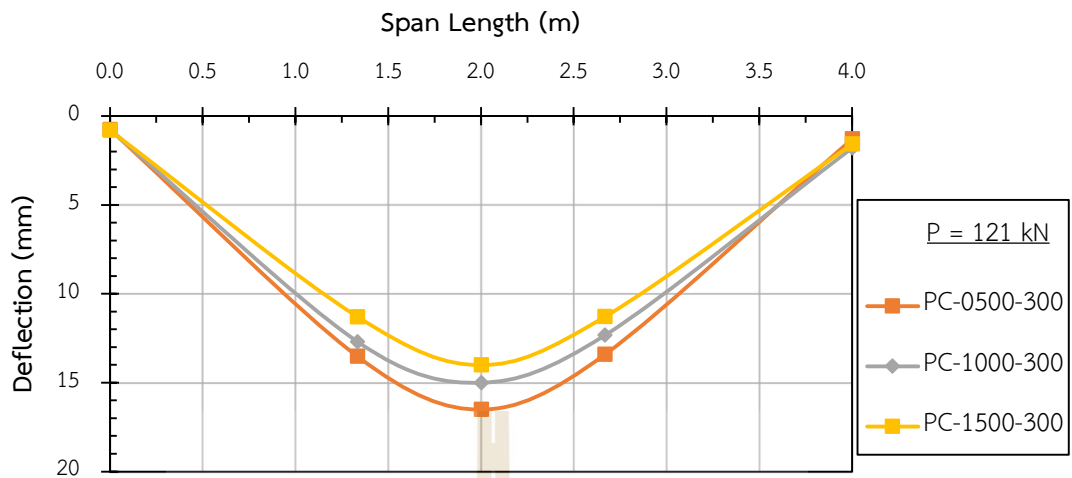
ตัวของคานตัวอย่างทดสอบ และ dial gauge อีก 2 ตัว วัดค่าการแอ่นตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับจุดรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 3.23 (ก) และรูปที่ 3.23 (ข)

รูปที่ 4.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัว และความยาวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ภายใต้กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน (การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/240$) เท่ากับ 106 kN พบว่า ที่กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานเท่ากัน เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง



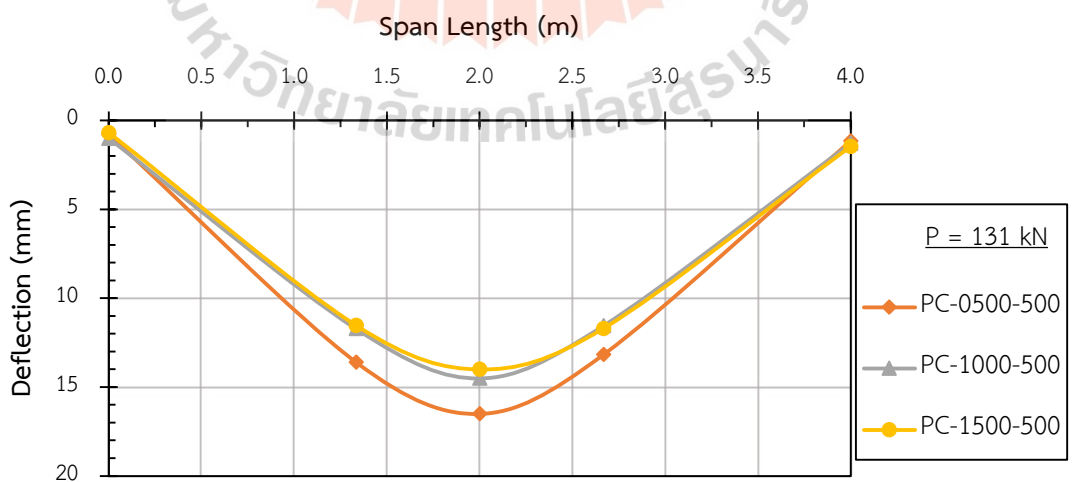
รูปที่ 4.9 การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

รูปที่ 4.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัว และความยาวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ภายใต้กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน (การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/240$) เท่ากับ 121 kN พบว่า ที่กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานเท่ากัน เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.10 การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

รูปที่ 4.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัว และความยาวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ภายใต้กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน (การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/240$) เท่ากับ 131 kN พบว่า ที่กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานเท่ากัน เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.11 การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเพิ่มขึ้น ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มลดลงตาม นั่นคือความตัวอย่างทดสอบจะมีความแกร่ง (stiffness) เพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

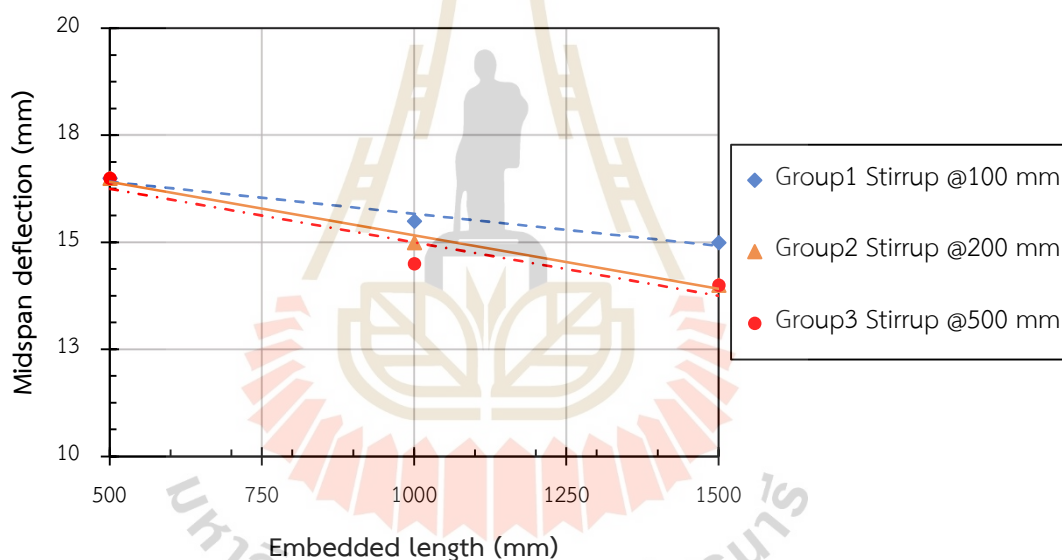
เมื่อนำค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบที่กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานในแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานได้เทียบเท่ากับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเนื่องจากการวิบัติแบบเปราะที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบลดลงอยู่ในช่วง 6.06-9.09 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 9.09-15.15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 12.12-15.15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มลดลงตาม

ตารางที่ 4.8 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกระทำที่สภาวะใช้งาน

กลุ่มที่	ตัวอย่างทดสอบ	ความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก (mm)	ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (mm)	ค่าการแอ่นตัวที่ลดลง (%)
1	RC-0000-100	0	-	-
	PC-0500-100	500	16.50	-
	PC-1000-100	1000	15.50	-6.06
	PC-1500-100	1500	15.00	-9.09
2	RC-0000-300	0	-	-
	PC-0500-300	500	16.50	-
	PC-1000-300	1000	15.00	-9.09
	PC-1500-300	1500	14.00	-15.15
3	RC-0000-500	0	-	-
	PC-0500-500	500	16.50	-
	PC-1000-500	1000	14.50	-12.12
	PC-1500-500	1500	14.00	-15.15

รูปที่ 4.12 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ และความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจะแปรผกผันกันกับค่าความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก กล่าวคือ เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นค่าระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจะมีค่าลดลง

เมื่อสังเกตกราฟความสัมพันธ์ พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีการแอ่นตัวที่ลดลงค่อนข้างน้อยกว่าคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 เป็นผลจากจำนวนเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานตัวอย่างทดสอบมีจำนวนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำนวนของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงนั้นมีอิทธิพลต่อการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบเช่นกัน



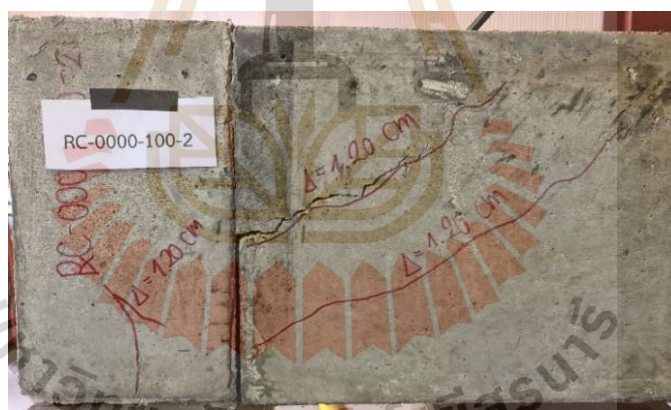
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ และความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

4.10 รูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ

4.10.1 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

จากการทดสอบและสังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น พบว่าลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 แบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ คาน

ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบเกิดรอยแยกทำมุม 90 องศา (slip mode) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อปิดแผ่นเหล็กที่ทำหน้าที่แทนเสาบริเวณจุดรองรับ ซึ่งเกิดจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็กที่ฝังบริเวณจุดรองรับที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยที่ตัวอย่างทดสอบไม่เกิดการวิบัติแบบ flexural failure ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 อีกรูปแบบหนึ่งจะเกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีความยาวระยะฝังเท่ากับ 500, 1000 และ 1500 มม. เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจะเกิดการวิบัติแบบ flexural failure โดยที่รอยร้าวเกิดขึ้นทำมุมประมาณ 90 องศา ที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นคานตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเกิดรอยร้าวทำมุม 90 องศาที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสาเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กโดยที่รอยร้าวมีความกว้างน้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่ามากขึ้น ทำให้การวิบัติเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) ดังแสดงในรูปที่ 4.14



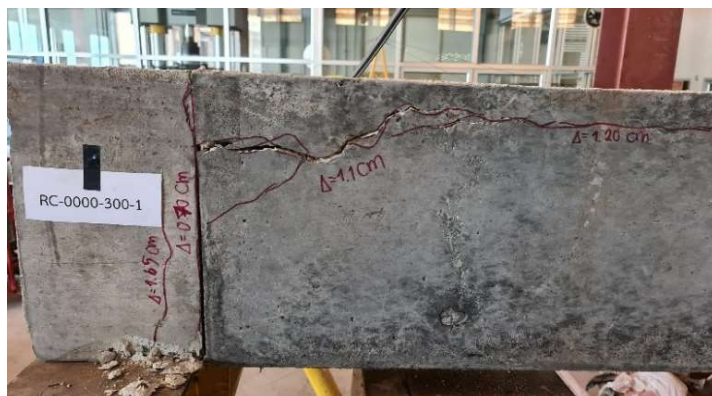
รูปที่ 4.13 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.14 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 1

4.10.2 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

จากการทดสอบและสังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น พบว่าลักษณะการวิบัติของคานกลุ่มที่ 2 แบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 รูปแบบคล้ายกับคานกลุ่มที่ 1 คือ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบเกิดรอยแยกทำมุม 90 องศาที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อปิดแผ่นเหล็กที่ทำหน้าที่แทนเสาบริเวณจุดรองรับคล้ายกับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 โดยที่ตัวอย่างทดสอบไม่เกิดการวิบัติแบบ shear failure ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 อีกหนึ่งรูปแบบการวิบัตินั้นเกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีความยาวระยะฝังเท่ากับ 500, 1000 และ 1500 มม. เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นคานตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) โดยที่ในช่วงแรกจะเกิดรอยร้าวในแนวตั้งที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบก่อนจนกระทั่งค่าแรงดึงทแยงมากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตและเหล็กเสริม คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้น จากนั้นจะเกิดการวิบัติแบบเฉือนทแยง (shear failure) ขึ้นบริเวณจุดรองรับไปจนถึงบริเวณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบทั้งสองด้านโดยทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวของคาน ร่วมกับการวิบัติแบบการแยกตัวของคอนกรีตที่บริเวณจุดรองรับแบบทันทีทันใด โดยที่รอยร้าวที่บริเวณจุดรองรับจะเกิดขึ้นน้อยลงตามความยาวของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 2



รูปที่ 4.16 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 2

4.10.3 คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3

จากการทดสอบและสังเกตลักษณะการวิบัติการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น พบว่า ลักษณะการวิบัติของคานกลุ่มที่ 3 มีลักษณะการวิบัติคล้ายกับคานกลุ่มที่ 2 กล่าวคือ การวิบัติของคานกลุ่มที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบเกิดรอยแยกทำมุม 90 องศา ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อปิดแผ่นเหล็กที่ทำหน้าที่แทนเสาบริเวณจุดรองรับคล้ายกับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 โดยที่ตัวอย่างทดสอบไม่เกิดการวิบัติแบบ shear failure ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 อีกหนึ่งรูปแบบการวิบัตินั้นเกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบที่มี

เหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝัง 500, 1000 และ 1500 มม. จะเกิดการวิบัติแบบเฉือนทแยง โดยที่ในช่วงแรกจะเกิดรอยร้าวในแนวตั้งที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบก่อน จนกระทั่งค่าแรงดึงทแยงมากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตและเหล็กเสริม คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้น จากนั้นจะเกิดการวิบัติแบบเฉือนทแยงขึ้นบริเวณจุดรองรับถึงบริเวณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบทั้งสองด้านโดยทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวของคาน ร่วมกับการวิบัติแบบการแยกตัวของคอนกรีตที่บริเวณจุดรองรับแบบทันทีทันใด โดยที่รอยร้าวที่บริเวณจุดรองรับจะเกิดขึ้นน้อยลงตามความยาวของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 3



รูปที่ 4.18 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กกลุ่มที่ 3

4.10.4 เปรียบเทียบลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม

เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบเกิดขึ้นทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ slip mode, flexural failure และ shear failure โดยการวิบัติแบบ slip mode จะเกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่มแต่จะสังเกตเห็นได้ชัดในคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก เนื่องจากไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา และยังช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนให้กับคานตัวอย่างทดสอบอีกด้วย ซึ่งลักษณะการวิบัติแบบ slip mode เป็นการวิบัติที่ไม่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ โดยเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ลักษณะการวิบัติแบบ flexural failure จะเกิดขึ้นกับคานกลุ่มที่ 1 ที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 100 mm ซึ่งเป็นการวิบัติที่พบได้ทั่วไปในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนลักษณะการวิบัติแบบ shear failure จะเกิดขึ้นกับคานกลุ่มที่ 2 และ 3 ซึ่งรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณจุดรองรับถึงบริเวณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบโดยจะทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งคานตัวอย่างที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกับลักษณะการวิบัติที่ออกแบบไว้ ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีลักษณะการวิบัติแบบ slip mode ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใส่เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเข้าไปในคานตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบมีความค่อยเป็นค่อยไปมากยิ่งขึ้น

4.11 อิทธิพลของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีต่อคานตัวอย่างทดสอบ

จากตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.4 แสดงถึงกำลังของคานตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน และความแกร่งที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการวิบัติแบบเปราะที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าเหล็กข้ออ้อยที่ฝังเข้าไปในแนวขวางช่วยเพื่อนำกำลังต้านทานแรงกระทำให้กับคานตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน และความแกร่งของคานตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบของแต่ละกลุ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า

คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่ค่าการแอนตัวเท่ากับ $L/240$ เนื่องจากเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ซึ่งเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น คานตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการต้านทานแรงช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นได้มากขึ้น พฤติกรรมการต้านทานแรงกระทำโดยรวมของคานตัวอย่างทดสอบดีขึ้น ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงกระทำช่วงเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดการคราก และกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก

จากตารางที่ 4.5 แสดงถึงกำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานแรงกระทำในทุกสภาวะที่ค่อนข้างต่ำ ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำในทุกสภาวะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงกระทำที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

จากตารางที่ 4.6 แสดงถึงกำลังต้านทานแรงกระทำในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบ กำลังต้านทานแรงกระทำของสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท. และอัตราส่วนระหว่าง $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ของคานตัวอย่างทดสอบ พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง มีความปลอดภัยในการนำมาใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุกค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่เพียงพอที่จะทำให้อัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ อยู่ในช่วงที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น อัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังเพิ่มขึ้นจนมีค่าเพียงพอ คานตัวอย่างทดสอบจะมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ อยู่ในช่วงที่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบคานตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะเดียวกัน พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 100 mm (คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1) มีหน่วยแรงเฉือนมากกว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 300 (คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2) และ 500 mm (คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าความยาวระยะฝังของ

เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กจะสามารถช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนได้มากเพียงใด ก็ไม่สามารถต้านทานแรงได้เทียบเท่ากับคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมที่เพียงพอ

จากรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11 แสดงถึงการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม ที่กำลังต้านทานแรงกระทำที่เท่ากันของคานตัวอย่างทดสอบในแต่ละกลุ่ม พบว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น การแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มลดลงตาม

จากตารางที่ 4.7 แสดงถึงหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบค่อนข้างต่ำ ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีหน่วยแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวมีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้น และคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 มีหน่วยแรงเฉือนเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่ฝังเข้าไปในแนวขวางช่วยต้านทานแรงเฉือนทดแทนเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่มีระยะห่างไม่เพียงพอ โดยที่เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กจะมีอิทธิพลในการต้านทานแรงเฉือนมากที่สุดในคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 300 mm)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการวิบัติกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบ slip mode ที่เกิดการจากการแยกตัวกันระหว่างคานตัวอย่างทำสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา เนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปในคานตัวอย่างทดสอบ เป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นนอกเหนือลักษณะการวิบัติที่ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใด เมื่อมีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบนั้นจะเกิดขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เกิดการวิบัติแบบ flexural failure โดยที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการวิบัติแบบ slip mode จะเกิดขึ้นน้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 เกิดการวิบัติแบบ shear failure โดยที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการวิบัติแบบ slip mode จะเกิดขึ้นน้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่วนให้คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นมีความค่อยเป็นค่อยไปมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบ 4 จุด ลักษณะการวิบัติ ผลของความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่มีผลต่อกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง โดยมีตัวแปรหลักคือ ความยาวระยะฝัง (embedded length, l_e) ของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (spacing, S) จากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.2 พฤติกรรมการต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบ

5.2.1 พฤติกรรมการต้านทานแรงของคานตัวอย่างทดสอบ

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่มีลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรงแบ่งออกเป็นสองช่วง (bilinear) โดยในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ความสัมพันธ์ของคานตัวอย่างทดสอบจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมที่สอง ความชันของกราฟมีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (non-linear) เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น รอยร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่างทดสอบจะขยายตัวกว้างขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว ในขณะที่แรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งคานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทุกกลุ่มไม่สามารถต้านทานแรงกระทำในช่วงค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/240$ ซึ่งเป็นกำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน (service load) ได้ เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนให้กับคาน

ตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้เกิดการวิบัติแบบ slip mode ที่เกิดจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก บริเวณจุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) เมื่อคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด พฤติกรรมการต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบในช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นเกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ ซึ่งบ่งบอกให้เห็นได้ชัดว่าคานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเป็นคานที่มีลักษณะแบบเปราะที่บริเวณจุดรองรับที่เป็นส่วนที่สำคัญมากต่อการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป จึงไม่ควรนำคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไปใช้ในงานรับน้ำหนักบรรทุก

เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นได้เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นตาม

5.2.2 พฤติกรรมการแอนตัวของคานตัวอย่างทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการแอนตัวของคานตัวอย่างทดสอบที่กำลังต้านทานแรงกระทำสภาวะใช้งานกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถรับแรงกระทำที่สภาวะได้เท่ากับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบการแอนตัวได้ ในขณะที่ เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น เมื่อความแกร่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้การแอนตัวที่สภาวะใช้งานของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง

5.2.3 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ

เมื่อสังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีลักษณะการวิบัติออกทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กซึ่งเกิดการวิบัติแบบเกิดรอยแยกทำมุม 90 องศา (slip mode) ที่เกิดจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กที่ฝังในส่วนรองรับที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อปิดแผ่นเหล็กที่ทำหน้าที่แทนเสาบริเวณจุดรองรับเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด อีกหนึ่งลักษณะการวิบัตินั้นเกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝัง 500, 1000 และ 1500 มม. จะเกิดการวิบัติแบบ flexural failure โดยที่รอยร้าวเกิดขึ้นทำมุมประมาณ 90 องศา ที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น คานตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดรอยร้าวทำมุม 90 องศาที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อปิดแผ่นเหล็ก โดยที่รอยร้าวบริเวณดังกล่าวมีความกว้าง และขยายตัวในอัตราที่น้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง

คอนกรีตที่หล่อแทนเสากับเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่ามากขึ้น ทำให้การวิบัติเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure)

คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีลักษณะการวิบัติในรูปแบบแรกที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กคล้ายกับคานกลุ่มที่ 1 คือการวิบัติแบบเกิดรอยแยกทำมุม 90 องศา ที่เกิดจากการรูดออกของแผ่นเหล็กที่ฝังในส่วนรองรับที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อปิดแผ่นเหล็กที่บริเวณจุดรองรับ อีกหนึ่งรูปแบบลักษณะการวิบัตินั้นเกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝัง 500, 1000 และ 1500 มม. การวิบัติเป็นการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) โดยในช่วงแรกจะเกิดรอยร้าวในแนวตั้งที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ จนกระทั่งค่าแรงดึงทแยงมากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตและเหล็กเสริม คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้น จากนั้นจะเกิดการวิบัติแบบเฉือนทแยง (shear failure) ขึ้นบริเวณจุดรองรับถึงบริเวณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบทั้งสองด้านโดยทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวระดับของคานตัวอย่างทดสอบ ร่วมกับการวิบัติแบบการแยกตัวของคอนกรีตที่บริเวณจุดรองรับแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยที่รอยร้าวที่บริเวณจุดรองรับมีความกว้าง และขยายตัวในอัตราที่น้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีหรือระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่เพียงพอเกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากสำหรับโครงสร้างแบบสำเร็จรูป เมื่อคานตัวอย่างทดสอบมีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพียงพอ ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบก่อน เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจึงเริ่มเกิดรอยแตกร้าวที่เกิดจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับ โดยที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะกว้าง และขยายตัวขึ้นในอัตราที่น้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก จากการสังเกตการวิบัติ พบว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติที่ค่อยเป็นค่อยไปมากยิ่งขึ้น

5.2.4 ผลของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่อกำลังของคานตัวอย่างทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากัน พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 100 mm) มีหน่วยแรงเฉือนมากกว่าคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 300 mm) และ 3 (ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 500 mm)

ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กจะช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนได้มากเพียงใด ก็ไม่มีความสามารถเพิ่มหน่วยแรงเฉือนให้ได้เทียบเท่ากับคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เพียงพอ

5.2.5 ผลของความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กต่อกำลังของคานตัวอย่างทดสอบ

เมื่อคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน ($P_{L/240}$) มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 20.90-45.05 เปอร์เซ็นต์ กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการคราก (P_y) มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 37.59-56.47 เปอร์เซ็นต์ และกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 39.49-54.31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงกระทำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม โดยที่ กำลังต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 8.36-17.45 เปอร์เซ็นต์ กำลังต้านทานแรงกระทำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการครากมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.31-68.92 เปอร์เซ็นต์ และกำลังต้านทานแรงกระทำสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.86-69.45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ควบคุมความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบ

การเพิ่มระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กยังเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของคานตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปในแนวขวางกับคานตัวอย่างทดสอบสามารถเข้าไปช่วยเสริมกำลังที่บริเวณที่รับแรงเฉือน เนื่องจากแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในงานวิจัยมีค่าอยู่ในช่วงความยาวจากจุดรองรับถึงประมาณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งกำลังต้านทานแรงเฉือนจะแปรผันตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ วสท. ($P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$) พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง มีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงถึงคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวมีความปลอดภัยเมื่อนำไปใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกค่อนข้างต่ำ เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น คานตัวอย่างทดสอบจะมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวมีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการใช้งาน

จากการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ ผู้วิจัยขอแนะนำเสนอข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษาไปใช้งานตามรูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังนี้

5.3.1 รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุกต่ำ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบทุกกลุ่ม ที่ไม่มีระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และที่มีระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500 mm พบว่า ไม่ควรนำมาใช้งานรับแรงกระทำตามสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ 1008-38 เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อๆ ก่อนที่จะเกิดการวิบัติในลักษณะที่กำหนด คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติในลักษณะที่กำหนดไว้เพียงเล็กน้อย เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจะเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อๆ และทำให้มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่ต่ำกว่าที่สมการออกแบบฯ ทำนาย

5.3.2 รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุกปานกลาง ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก 1000 และ 1500 mm ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure นั้น พบว่า คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเกิดการวิบัติตามลักษณะที่กำหนด จากนั้น จึงเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ดังนั้น ถ้าหากต้องการนำไปใช้งานฯ แล้ว วิศวกรควรพิจารณาลดความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของคาน โดยใช้ตัวคูณลดกำลังที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

5.3.3 รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกสูง ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก 1000 และ 1500 mm ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure พบว่า เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังในแนวขวางมีส่วนช่วยในการต้านทานแรงเฉือนของคาน และทำให้มีอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุนเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุนเชิงเส้นจากสมการของ วสท. พบว่าอยู่ในช่วง 2.06-2.86 ซึ่งถือว่า อยู่ในช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้

จากการวิเคราะห์รูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุก ทางผู้วิจัยแนะนำให้เลือกใช้คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่ถูกลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกด้วยตัวคูณลดน้ำหนักที่เหมาะสมแล้ว เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวถูกออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure ซึ่งการวิบัติลักษณะดังกล่าวเปรียบเสมือนเครื่องเตือนภัย ก่อนที่โครงสร้างจะเกิดการวิบัติ

5.4 ข้อจำกัดในงานวิจัย

5.4.1 กระบอกลไฮดรอลิก (hydraulic cylinder) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีระยะยืด-หด (stroke) ของกระบอกลไม่เพียงพอที่จะทำให้คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure นั้นเกิดการวิบัติขึ้นได้อย่างชัดเจนมากพอ

5.4.2 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงแบบแรงกระทำ 4 จุด ซึ่งต่างจากสภาพการใช้งานของโครงสร้างจริงที่มีการรับน้ำหนักแบบทุกแบบกระจายสม่ำเสมอ

5.5 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.5.1 ต่อยอดองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยด้วยการนำคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อแบบดงกล่าวไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบซ้ำว่าผลที่ได้จากการทดสอบดงกล่าวมีความใกล้เคียงกับผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณได้หรือไม่ และพัฒนาจุดเชื่อมต่อซึ่งอาจจะมีพฤติกรรมที่ดีขึ้นจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

5.5.2 ควรติดตั้งแผ่นเหล็กให้อยู่กึ่งกลางขนานกับแนวของคานให้มากที่สุด และยึดให้อยู่ในตำแหน่งที่ติดตั้งอย่างแน่นหนาเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นเหล็กมีระยะเยื้องศูนย์หรือเกิดการเอียงออกจากตำแหน่งเดิม ซึ่งสาเหตุอาจเกิดได้จากการเทคอนกรีตเข้าไปในแบบหล่อ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดขณะทำการติดตั้งคานเข้ากับเสา ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้

รายการอ้างอิง

- Elliott K.S. (2016). **Precast Concrete Structures**. Second edition, Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Guo X., Gao S., Wang L. and Bui T.N. (2018). **Bearing capacity of embedded channel-shaped steel connections at precast concrete beam end**. *Engineering Structures*, 175, 177-190.
- Wight J.K., MacGregor J.G. (2012). **Reinforced Concrete Mechanics and Design**. Sixth edition, New Jersey: Pearson Education Inc.
- Yip W.K., Teng S., Ting S.K. and Hu H.B. (1999). **Behaviour of precast reinforced concrete beams with structural steel I-section embedded at the support section**. The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, August 27-29, Kochi, Japan.
- จักษดา อารังวุฒิ (2548). **การตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- จักษดา อารังวุฒิ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2548). **คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10: STR1-6.
- จักษดา อารังวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2548). **ผลของความยาวระยะฝิ่งเหล็กวางน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป**. นครราชสีมา: การพัฒนาทีมงานวิจัยในเครือข่ายอุดมศึกษา นครราชสีมา: 57-60.
- พรพจน์ ต้นเส็ง (2555). **Field Instrumentation in Geotechnical Engineering**, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- พนพจน์ ต้นเส็ง (2555). **กลศาสตร์วัสดุ Mechanics of Materials**, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (2543). **Concrete technology**, บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 1516 ถ.ประชาราษฎร์ 1 บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

- มงคล จีรวัชรเดช (2549). การออกแบบคานกรีตเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Design Working Stress Design Strength Design Method. Forth Edition, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 20-2559), เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 24-2559), เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 409-2525), วิธีทดสอบความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 1479-2541), เหล็กกล้าทรงแบนรีดร้อน สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2561). คู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ Material Testing: Laboratory Manual, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2561). กลศาสตร์วัสดุ Mechanics of Materials, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2538), มาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง, มาตรฐาน วสท.1008-38, กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย



ภาคผนวก ก

ผลการสอบเทียบ Hydraulic cylinder



ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุก่อสร้าง
ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การสอบเทียบแรง
Calibration of Hydraulic Jack

Customer	:-																							
Location of Calibration	ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุก่อสร้าง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี																							
Equipment	Hydraulic Jack 100T	Certificate No. : xxxxxxxx																						
Hydraulic Hand Pump	- / HHB-700B	Date of Receipt : 16-02-2564																						
Cylinder Serial Number	- / HHYG-100150	Date of Calibration : 16-02-2564																						
Gauge Serial Number	- / (MC) ZFYB	Calibrated By : Mr.Kowit Gathinmai																						
Equipment Standard	Standard Load Cell 2,000 KN	Serial No. : C140-08/AB/0005																						
Manufacturer / Model	Matest / C140-08	Due Date : 25-03-2564																						
Certificate Reference	23-61/0367-01 ; traceable to Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) / Thailand																							
Results of Calibration	Without Adjustment	Method : Inhouse																						
Environment Condition	Temperature : 25.6 ± 5 °C	Humidity : 53.7 ± 10 %RH																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gauge Reading (MPa)</th> <th>Load (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>10</td><td>155.02</td></tr> <tr><td>20</td><td>305.37</td></tr> <tr><td>30</td><td>465.69</td></tr> <tr><td>40</td><td>602.72</td></tr> <tr><td>50</td><td>748.69</td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Gauge Reading (MPa)	Load (kN)	0	0.00	10	155.02	20	305.37	30	465.69	40	602.72	50	748.69								
Gauge Reading (MPa)	Load (kN)																							
0	0.00																							
10	155.02																							
20	305.37																							
30	465.69																							
40	602.72																							
50	748.69																							
Calibration Equation	Actual Load (kN) = Gauge Reading (MPa) x 14.8467 + 10.0981																							
Conversion Factor	1 kN = 101.9716213 kgf 1 kN = 0.1019716213 Tonf																							
	ลงชื่อ xxxxxxxxxxxxxxxx (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรัชย์ อัจฉาหาญ) รักษาการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี xx กุมภาพันธ์ 2564	ผู้รับรองผล																						

End of Report

รูปที่ ก.1 ผลการสอบเทียบ hydraulic cylinder



ภาคผนวก ข

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ข.1 คอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในการก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ททราย หรือ กรวด) และ น้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับเพิ่มหรือลดคุณสมบัติด้านอื่น ๆ เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่า ไฮเดรชัน (hydration) โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและเกิดการแข็งตัว ในสถานะนี้จะเรียกกันว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่ผสม และยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากการแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นคงที่ คุณสมบัติหลักของคอนกรีต คือ การรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10% ของแรงอัด)

ข.1.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ข.1.1.1 ซีเมนต์เพสต์ (cement paste)

ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และอากาศ โดยทั่วไปในเนื้อคอนกรีตจะมีปริมาณของซีเมนต์เพสต์ประมาณ 23-40% โดยปริมาตร หน้าที่หลัก ๆ ของซีเมนต์เพสต์ คือ เป็นตัวยึดวัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะดูที่กำลัง (strength) เป็นหลัก โดยกำลังจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water/cement ratio) ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มาก (น้ำมาก ปูนน้อย) กำลังของซีเมนต์เพสต์ก็จะน้อย ในทางกลับกันถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์น้อย (น้ำน้อย ปูนมาก) กำลังของซีเมนต์เพสต์ก็จะมากขึ้น เพราะฉะนั้น การควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำและซีเมนต์ผสมกันเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ซึ่งจะทำให้ปูนซีเมนต์แปรสภาพจากเม็ดเล็กละเอียดเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายวุ้น และจะค่อย ๆ แข็งตัวขึ้นตามลำดับ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่อยู่ในคอนกรีต

ข.1.1.2 วัสดุมวลรวม (aggregate)

วัสดุมวลรวม คือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ยึดเข้าไว้ด้วยกันด้วยซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวลรวมนี้จะได้จากธรรมชาติ เป็นแร่ธาตุเฉื่อยไม่มีปฏิกิริยา ที่ใช้ในทั่วไป ได้แก่ หินอ่อน หินกรวด และทรายหยาบ

ประเภทของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวม สามารถแบ่งตามลักษณะขนาดได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

วัสดุมวลรวมละเอียด (fine Aggregate) หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีความละเอียดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือเป็นเม็ดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม.

วัสดุมวลรวมหยาบ (coarse Aggregate) หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ได้ ได้แก่ หินย่อย กรวด

ข.1.2 ปูนซีเมนต์ (cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ แล้วผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียม และ อลูมิเนียมซิลิเกต สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม ของประเทศไทย ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ตารางที่ ข.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิด	ประเภท	ลักษณะการใช้งาน
I	Ordinary Portland cement	ใช้ในการทำงานคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่อยู่ในสภาวะอากาศรุนแรง
II	Modified Portland cement	ใช้ในการทำคอนกรีตที่เกิดความร้อนต่ำและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต ตอม่อสะพาน เป็นต้น
III	High-Early Strength Portland cement	ให้กำลังสูงในระยะแรก เนื้อปูนมีลักษณะเป็นผงละเอียดกว่าแบบธรรมดา ผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนผสม โดยการเติมสารอื่น และบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการความเร่งด่วนหรือที่ต้องการรีบหล่อเร็ว ๆ เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้น และ คานที่ต้องการใช้งานเร็ว เป็นต้น
IV	Low-Heat Portland cement	ให้ความร้อนต่ำสุด ใช้กันมากในการก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน เป็นต้น
V	Sulfate-Resistant Portland cement	ใช้กับโครงสร้าง ที่อยู่ใต้อากาศที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น ในน้ำ หรือ ในดินที่มีความเป็นด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทที่หนึ่ง

ข.1.3 น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต (mixing water)

ลักษณะของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ควรต้องสะอาดปราศจากสิ่งเจือปน เช่น กรด ต่าง น้ำมัน และสารอินทรีย์จำนวนมากเกินไป น้ำทำหน้าที่หลายประการในการผสมคอนกรีต ได้แก่

ข.1.3.1 เคลือบวัสดุมวลรวม

น้ำทำให้วัสดุมวลรวมเปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าเกาะได้โดยรอบและจับยึดตัวกันได้

ข.1.3.2 หล่อลื่นวัสดุมวลรวมทำให้เกิดความเหลว

เมื่อคอนกรีตมีความเหลวสามารถเทได้ กระทบ ขยายเข้ารูรูปแบบหล่อได้

ข.1.3.3 ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์

เมื่อน้ำทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้ผงซีเมนต์ติดอยู่กับวัสดุมวลรวม ช่วยประสานผิวระหว่างวัสดุผสมให้เกาะยึดตัวแน่นเมื่อแข็งตัว

ข.1.4 สารผสมเพิ่ม (admixtures)

สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต สารผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่

ข.1.4.1 สารเร่งการก่อตัว (accelerator)

สารเร่งการก่อตัวที่นิยมใช้กับคอนกรีต เช่น แคลเซียมคลอไรด์ และ โซเดียมซิลิเกต เป็นต้น สารผสมเพิ่มดังกล่าวจะทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งแรงขึ้นกว่าปกติ จะใช้เมื่อต้องการเร่งเวลาในการถอดแบบหล่อหรือเมื่อต้องการให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วกว่าปกติ เช่น การทำเสาเข็มธรรมดา และ เสาคอนกรีตอัดแรง ใช้อุจรรูไว้ในเนื้อคอนกรีต

ข.1.4.2 สารหน่วงการก่อตัว (retarders)

การหน่วงการก่อตัวที่นิยมใช้กับคอนกรีต เช่น แคลเซียม หรือ ยิบซัม มีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตก่อตัวช้ากว่าปกติ ส่วนใหญ่จะใช้ในกรณีที่ต้องเสียเวลาในการเคลื่อนย้ายคอนกรีตที่ผสมแล้วไปยังจุดเทที่ไกล ๆ ข้อเสียของการใช้สารหน่วงการก่อตัว คือ จะทำให้กำลังคอนกรีตต่ำลงในช่วง 3 วันแรก แต่ผลพลอยได้ คือ ช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมได้ประมาณ 5-15%

ข.1.4.3 สารลดปริมาณน้ำ (water reducing admixture)

สารลดปริมาณน้ำที่นิยมใช้ในคอนกรีตเป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำมาจากเกลือลิกโนซัลโฟนิค (lignosulfonic acid) หรือเกลือ และสารประกอบกรดไฮดรอกซีคาร์บอซีลิก (hydroxycarboxylic acid) หรือสารประกอบโพลีเมอร์บางชนิด เช่น โพลีเมอร์ ไฮดรอกซีเลต

(Hydroxylated Polymers) ซึ่งจะช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในคอนกรีต แต่ยังคงความชื้นเทียบเท่ากับคอนกรีตธรรมดา

ข.1.4.4 สารป้องกันน้ำ (waterproofing)

สารป้องกันน้ำที่นิยมใช้ในคอนกรีตเป็นพวกอัลคาไลซิลิเกต (alkaline Silicates) เช่น โซเดียมซิลิเกต หรือ อลูมิเนียม และ สังกะสีซัลเฟต (zinc Sulphates) ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่บ่มแล้วไม่ให้น้ำซึมผ่านเข้ามาได้ สารป้องกันน้ำจะแทรกเข้าไปในเนื้อคอนกรีต นิยมใช้กับงานก่อสร้าง เช่น อุโมงค์ สระน้ำ หลังคา พื้นห้องน้ำ เป็นต้น

ข.1.4.5 สารกระจายกักฟองอากาศ (air-entraining admixture)

สารกระจายกักฟองอากาศที่นิยมใช้กับคอนกรีตมีหลายชนิด อาจทำมาจาก ยางไม้ ไขมัน น้ำมันพืช-สัตว์ ซึ่งจะช่วยให้ฟองอากาศเล็ก ๆ แฝบอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร อาจจะมีฟองอากาศเล็ก ๆ นี้ประมาณ 3-6% ของเนื้อคอนกรีตโดยปริมาตร ฟองอากาศขนาดเล็กจะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้มากขึ้น แม้ว่าปริมาณน้ำจะน้อยก็ตาม

ข.1.5 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีต (curing) เป็นการควบคุม และป้องกันไม่ให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากตัวคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้น หลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน วิธีการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับสภาพงานของคอนกรีตนั้น ๆ ลักษณะการบ่มคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็นได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

ข.1.5.1 การบ่มโดยการเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต

การบ่มลักษณะนี้ จะเพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อทดแทนการระเหยของน้ำ การบ่มลักษณะนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การชังด้วยน้ำ การฉีดน้ำ การคลุมด้วยวัสดุเปียก เป็นต้น

ข.1.5.2 การบ่มโดยป้องกันการเสียหายน้ำจากเนื้อคอนกรีต

การบ่มวิธีนี้ใช้การผนึกผิวของคอนกรีต เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นจากคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การบ่มในแบบหล่อ การใช้กระดาษกันซึม เป็นต้น

ข.1.5.3 การบ่มด้วยการเร่งกำลัง

เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ โดยการให้ความชื้น และความร้อนกับคอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ ๆ วิธีนี้จะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ลดการหดตัว นิยมใช้กับงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป

ข.1.6 คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต

ข.1.6.1 ความสามารถเทได้ (workability)

ความสามารถในการเทได้ คือ ผลรวมของพลังงานที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคส่วนผสมในคอนกรีต และแรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับแบบหล่อ และเหล็กเสริมคอนกรีต หากคอนกรีตมีความสามารถเทได้ดี คอนกรีตจะไหลได้เต็มรูปแบบ และหุ้มเหล็กเสริมได้ดี การทดสอบความสามารถเทได้ดีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump test) ตัวอย่างค่าการยุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปในประเทศไทยแสดงไว้ในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.2 ค่าการยุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ

ชนิดของงานก่อสร้าง	ค่าการยุบตัว (cm)
ฐานราก	7.5 +/- 2.5
แผ่นพื้น คาน ผนัง คอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0 +/- 2.5
เสา	10.0 +/- 2.5
ผนังบาง	10.0 +/- 2.5
ถนน สนามบิน	5.0 +/- 2.5
งานที่ต้องใช้คอนกรีตปั๊ม	10.0 +/- 2.5
เสาเข็มเจาะระบบแห้ง หรือเสาเข็มขนาดเล็ก	10.0 +/- 2.5
งานเทคอนกรีตใต้น้ำ	มากกว่า 15
เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่	มากกว่า 15
งานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15

ข.1.6.2 การอยู่ตัว (soundness)

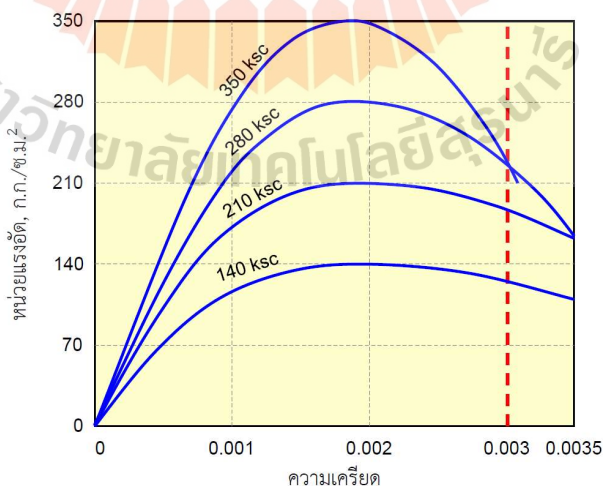
การอยู่ตัวหรือความชื้น คือ การที่คอนกรีตคงความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตตลอดช่วงเวลาที่เท หรือ ระหว่างขนย้าย คอนกรีตที่มีการอยู่ตัวดี จะสามารถอัดแน่นในแบบหล่อได้ดี โดยที่ไม่เกิดการแยกตัว (segregation) และไม่เกิดการเยิ้ม (bleeding)

ข.1.6.3 กำลังของคอนกรีต (strength)

กำลังของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง คือ อัตราส่วนน้ำ - ซีเมนต์ (water-cement ratio) ถ้าใช้น้ำผสมคอนกรีตมากกำลังของคอนกรีตจะน้อย การที่กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นั้น เป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำกับซีเมนต์ โดยปกติแล้วงานก่อสร้างทั่วไปจะถือเอากำลังของคอนกรีตเมื่ออายุครบ 28 วัน เป็นมาตรฐานในการบอกกำลังของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงอัดถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีตที่เกิดการแข็งตัวแล้ว เนื่องจาก เมื่อคอนกรีตเกิดการแข็งตัวแล้ว กำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงดัด ก็จะมีกำลังต้านทานแรงเพิ่มขึ้นตามกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตด้วย รูปที่ ข.1 เป็นกราฟความสัมพันธ์เมื่อนำคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มาทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดมาบันทึกค่าระหว่างหน่วยแรงอัด (compressive stress) และ ความเครียด (compressive strain)



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด และ ความเครียดในคอนกรีต (มกค., 2548)

โดยในช่วงต้นจะค่อนข้างเป็นเส้นตรง (elastic linear) หน่วยแรงอัดจะขึ้นถึงค่า f'_c คือ ค่าหน่วยแรงอัดที่มากที่สุดที่ความเครียดประมาณ 0.002 แล้วตกลงจนแตกหักที่ความเครียดประลัย (ultimate strain) ประมาณ 0.003 คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้นจะมีความยืดหยุ่นน้อยลง

กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตนั้นมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 8-15 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ผสมของกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตขึ้นอยู่กับรอยร้าวเล็ก ๆ ที่อยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากรอยร้าวในเนื้อคอนกรีตไม่สามารถถ่ายแรงผ่านรอยแตกได้ ทำให้พื้นที่ประสิทธิผลในการส่งผ่านแรงดึงมีน้อยกว่าพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัดคอนกรีต ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะไม่นำกำลังต้านทานแรงดึงมาพิจารณา เนื่องจากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใช้เหล็กเสริมเพื่อรับแรงดึงเป็นหลัก

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (modulus of elasticity, E_c) เป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตหาได้จากการทดสอบการอัดทรงกระบอกของคอนกรีต ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงต่อความเครียดในช่วงอิลาสติก

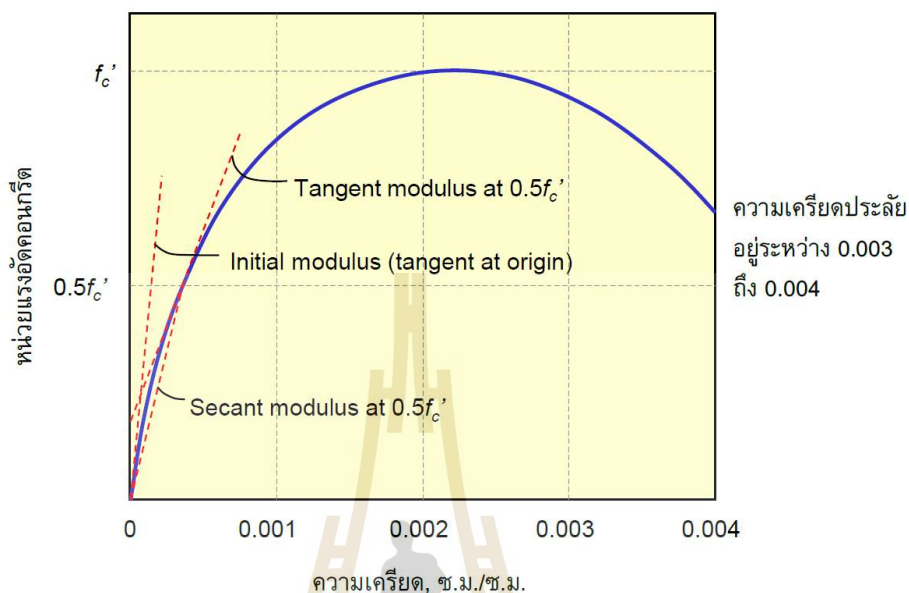
$$E_c = \frac{\text{unit stress}}{\text{unit strain}} \quad (\text{ข.1})$$

โมดูลัสยืดหยุ่นจะใช้วัดสติเฟเนสหรือความต้านทานการเสียรูปของคอนกรีต รูปที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการยืดหดสำหรับคอนกรีตภายใต้แรงอัด ซึ่งแสดงถึงโมดูลัสเริ่มต้น (initial modulus) โมดูลัสสัมผัส (tangent modulus) และซีแคนท์โมดูลัส (secant modulus) โดยปกติซีแคนท์โมดูลัสจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25-50 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังต้านทานแรงอัดประลัย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ

$$E_c = 4270 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (\text{ข.2})$$

สำหรับค่า w_c ที่ค่าระหว่าง 1.45 และ 2.48 ตัน/ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ หน่วยน้ำหนัก 2.32 ตัน/ลบ.ม. เท่ากับ

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} \quad (\text{ข.3})$$



รูปที่ ข.2 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (มกคล, 2548)

ข.2 เหล็กเสริมคอนกรีต

เหล็กเส้น (rebar) เสริมคอนกรีตในบริเวณที่รับแรงดึงหรือต้านทานการแตกร้าวในคอนกรีต แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (round Bar, RB) และ เหล็กข้ออ้อย (deformed Bar, DB)

ข.2.1 เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (round bar, RB) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2559 กำหนดไว้เพียงชั้นคุณภาพเดียว โดยใช้สัญลักษณ์ SR24 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลในการรับแรงดึง ได้แก่

1. ความต้านทานแรงดึงประลัย (ultimate tensile strength, F_u) ต้องไม่น้อยกว่า 385 MPa (3900 ksc)
2. ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (yielding tensile strength, F_y) ต้องไม่น้อยกว่า 235 MPa (2400 ksc)
3. ความยืด (percent elongation) ต้องไม่น้อยกว่า 21 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข.3 ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นกลม

ชื่อขนาด	ขนาดระบุ		มวลระบุ (kg/m)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	
RB6	6	28.3	0.222
RB9	9	50.3	0.395

ข.2.2 เหล็กเส้นข้ออ้อย (deformed Bar, DB) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 24-2559 กำหนดไว้ 3 ชั้นคุณภาพ คือ SD30, SD40 และ SD50

ตารางที่ ข.4 คุณสมบัติทางกลในการรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงดึงประลัย	ความต้านทานแรงดึงที่จุด คราก	ความยืด %
	MPa (ksc)	MPa (ksc)	
SD30	480 (4900)	295 (3000)	17
SD40	560 (5700)	390 (4000)	15
SD50	620 (6300)	490 (5000)	13

ตารางที่ ข.5 ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นข้ออ้อย

ชื่อขนาด	ขนาดระบุ		มวลระบุ (kg/m)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	
DB10	10	78.5	0.616
DB12	12	113.1	0.888
DB16	16	201.1	1.578
DB20	20	314.2	2.466
DB22	22	380.1	2.984
DB25	25	490.9	3.853
DB28	28	615.8	4.834
DB32	32	804.2	6.313
DB36	36	1017.9	7.990
DB40	40	1256.6	9.865

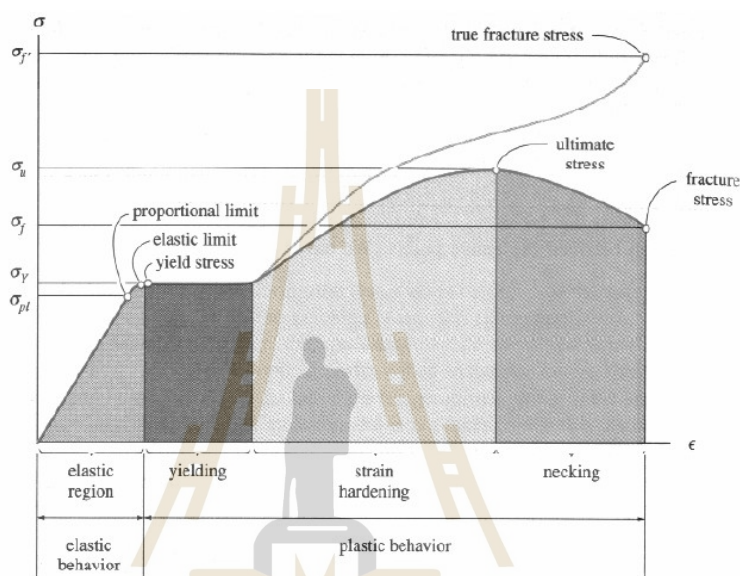
ข.2.3 คุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต

ในการคำนวณแบบออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะต้องพิจารณาเลือกเหล็กเสริมตามชั้นคุณภาพ โดยที่เหล็กเสริมที่นำมาพิจารณานั้นจะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุว่ามีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้หรือไม่ คุณสมบัติทางกลที่ควรตรวจสอบ ได้แก่

1. กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (yielding strength : f_y)
2. กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength : f_u)
3. โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity : E_s)
4. ความยืดตัว (elongation)

คุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถหาได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุ จำนวนวัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ความยาวของตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ 1.0 เมตร และนำมาหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุทั้ง 3 ตัวอย่าง และนำไปทดสอบกับ

เครื่องมือทดสอบตามมาตรฐานโดยให้เครื่องมือทดสอบออกแรงดึงจนตัวอย่างทดสอบนั้นเกิดการวิบัติ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ คือ ค่าแรงที่กระทำ และระยะยืดของวัสดุ จากนั้นนำค่าแรงที่กระทำมาแปลงให้เป็นค่าหน่วยแรง และ ระยะยืดแปลงเป็นความเครียด แล้วจึงนำค่ามาหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดให้อยู่ในรูปของกราฟดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และความเครียดของเหล็กเสริม (สิทธิชัย, 2561)

จากรูปจะเห็นว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมจะแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่

ข.2.3.1 Elastic Behavior ในช่วงนี้วัสดุจะตอบสนองต่อแรงกระทำแบบยืดหยุ่น คือ เมื่อเอาแรงที่กระทำออกจากวัสดุ วัสดุก็จะคืนตัวกลับไปสู่รูปร่างและความยาวเริ่มต้น ซึ่งในช่วงนี้ ค่าของหน่วยแรงจะแปรผันโดยตรงกับความเครียด จนถึงค่าของหน่วยแรงหนึ่ง เรียกว่า พิกัดปฏิกิริยา หรือ Proportional limit เมื่อค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่า พิกัดปฏิกิริยา วัสดุจะยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นอยู่ จุดสุดท้ายบน stress-strain curve diagram ที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมยืดหยุ่น เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (elastic limit)

ข.2.3.2 Yielding ช่วงการคราก (yielding) จะเริ่มเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรขึ้น ซึ่งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่จุดนี้มีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก

(yielding stress) หลังจากผ่านจุดนี้ไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการยืดอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงดึงเลย ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุในลักษณะนี้เรียกว่า พฤติกรรมแบบพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (perfectly plastic) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ระนาบของผลึกของเหล็กมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ อย่างเป็นระเบียบมากขึ้นเรื่อย ๆ

ข.2.3.3 Strain Hardening เมื่อสิ้นสุดการครากของวัสดุแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นมากอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ stress-strain curve เริ่มมีความชันเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่ความชันของกราฟนี้จะมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งสุดท้ายความชันของกราฟนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่หน่วยแรงประลัย (ultimate stress) เรียกพฤติกรรมช่วงนี้ว่า strain hardening

ข.2.3.4 Necking หลังจากที่หน่วยแรงในตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประลัยแล้ว พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ในบริเวณ gauge-length จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว หรือที่เรียกว่า necking ซึ่งเป็นผลมาจากการเลื่อนของระนาบของผลึกของเหล็กและจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าแรงดึงและค่าความชันของ stress-strain curve มีค่าลดลงตามไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุมีการแตกหักเกิดขึ้น ค่าของหน่วยแรงจุดนี้เรียกว่า หน่วยแรงแตกหัก (fracture stress)

ข.2.3.5 กฎของฮุก (Hooke's Law) ในปี ค.ศ. 1676 Robert Hooke ได้พบว่าเมื่อวัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ค่าหน่วยแรง (stress) จะแปรผันโดยตรงกับค่าความเครียด (strain) ซึ่งเรียกว่า Hooke's Law โดยที่

$$\sigma = E\epsilon \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ E = ค่า modulus of elasticity หรือ young's modulus ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าความชันของ stress-strain curve ในช่วงดังกล่าว ค่า E นี้จะมีหน่วยเช่นเดียวกับแรง เช่น GPa เป็นต้น

ข.3 แผ่นเหล็ก (steel plate)

แผ่นเหล็กที่ใช้งานกันทั่วไปในประเทศไทย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 1479-2541) กำหนดชนิดและชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ ข.5 และคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข.6 ชนิด และชั้นคุณภาพของแผ่นเหล็ก

ชนิด	ชั้นคุณภาพ
เหล็กกล้าแผ่นม้วนรีดร้อน	SS330 SS400 SS490 SS540
เหล็กกล้าแผ่นหนา/แผ่นบางรีดร้อน	

ตารางที่ ข.7 คุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็ก

ชั้น คุณภาพ	R_{eH} หรือ $R_{p0.2}$ ต่ำสุด (MPa)				R_m (MPa)	ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)	A ต่ำสุด (%)
	ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)						
	ไม่เกิน 16	มากกว่า 16 ถึง 40	มากกว่า 40 ถึง 100	มากกว่า 100			
SS330	205	195	175	165	330 ถึง 430	ไม่เกิน 5	26
					เหล็กแผ่นม้วน	มากกว่า 5 ถึง 16	21
					เหล็กแผ่นบาง/ แผ่นบาง	มากกว่า 16 ถึง 50	26
					เหล็กแผ่นหนา	มากกว่า 40	28
SS400	245	235	215	205	400 ถึง 510	ไม่เกิน 5	21
					เหล็กแผ่นม้วน	มากกว่า 5 ถึง 16	17
					เหล็กแผ่นบาง/ แผ่นบาง	มากกว่า 16 ถึง 50	21
					เหล็กแผ่นหนา	มากกว่า 40	23
SS490	285	275	255	245	490 ถึง 610	ไม่เกิน 5	19
					เหล็กแผ่นม้วน	มากกว่า 5 ถึง 16	15
					เหล็กแผ่นบาง/ แผ่นบาง	มากกว่า 16 ถึง 50	19
					เหล็กแผ่นหนา	มากกว่า 40	21
SS540	400	390	-	-	ต่ำสุด 540	ไม่เกิน 5	16
					เหล็กแผ่นม้วน	มากกว่า 5 ถึง 16	13
					เหล็กแผ่นบาง/ แผ่นบาง	มากกว่า 16 ถึง 50	17

หมายเหตุ: R_{eH} คือ ความเค้นคราก (MPa)

$R_{p0.2}$ คือ ความเค้นพิสูจน์สำหรับการยืดช่วงพลาสติก 0.2% (MPa)

R_m คือ ความต้านแรงดึง (MPa)

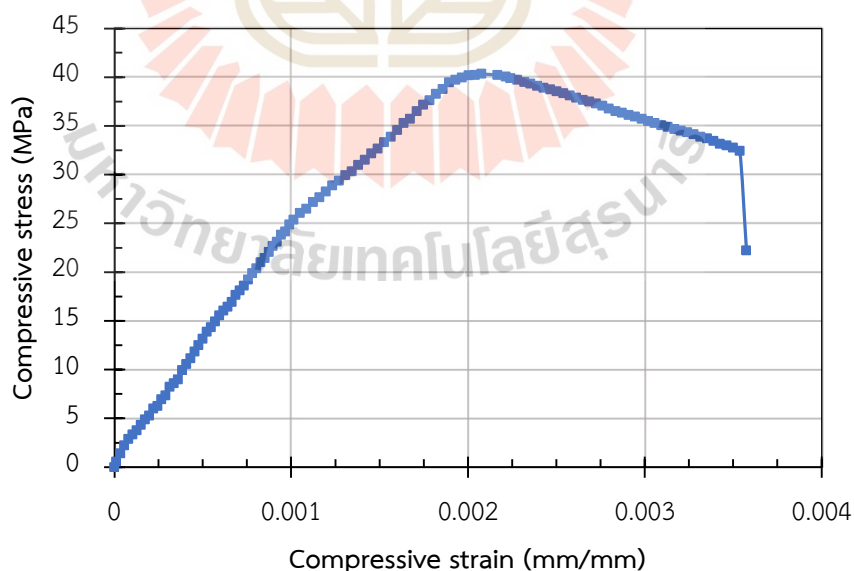
A คือ ความยืด (%)

ภาคผนวก ค
วิเคราะห์ผล และวิจารณ์ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

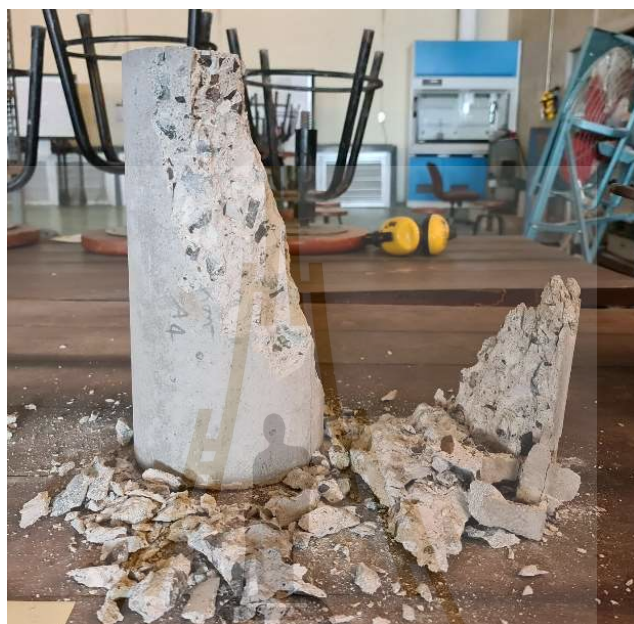
ค.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

การทดสอบรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผลิตโดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) ที่ใช้ในงานวิจัยที่บ่มครบอายุ 28 วัน กำลังรับแรงกดอัดประลัย (ultimate compressive strength) โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 40.33 MPa (411.15 kg/cm^2) และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 29.85 GPa ($304.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$) ซึ่งมีเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด (compressive stress) และ ความเครียดกดอัด (compressive strain) ดังแสดงรูปที่ ค.1 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตช่วงแรกจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ไปจนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดประลัย หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะเริ่มเกิดรอยร้าว (microcrack) จนทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดมีลักษณะเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) แนวโน้มของเส้นกราฟจะมีความชันที่ลดลงต่อเนื่อง จนกระทั่งเส้นกราฟมีความชันเท่ากับศูนย์เมื่อค่าแรงกดอัดมีค่าสูงสุด จากนั้นหน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตเกิดรอยแตกกว้างที่ชัดเจน จนตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติ



รูปที่ ค.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัด และความเครียดกดอัดของคอนกรีต

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตเกิดจากแรงอัดและแรงเฉือนร่วมกัน โดยลักษณะการวิบัติเป็นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) ดังแสดงในรูปที่ ค.2 จากรูปสังเกตเห็นว่ารอยแตกกว้างของตัวอย่างคอนกรีตทำมุมประมาณ 45-60 องศา กับแนวระดับ



รูปที่ ค.2 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัด

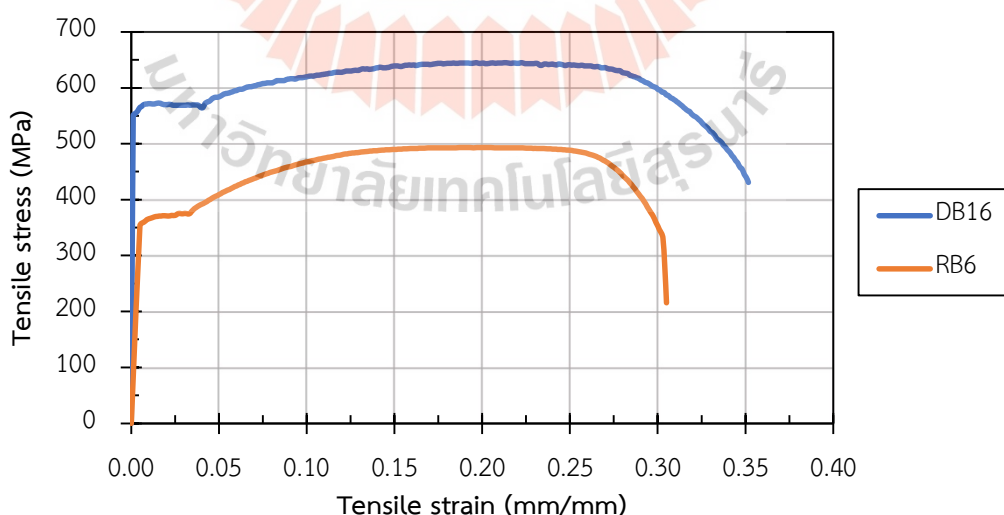
ค.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย

เหล็กเสริมที่นำมาศึกษาพฤติกรรมทางกลภายใต้แรงกระทำแบบแรงดึง แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กเส้นกลมเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทราชสีมาผลิตเหล็ก จำกัด (RSM) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ชั้นคุณภาพ SR24 และเหล็กข้ออ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไทยสตีลโพรไฟล์ จำกัด (TSC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ชั้นคุณภาพ SD40 จากผลการทดสอบของเหล็กทั้ง 2 ประเภท กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (yielding tensile strength) กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และ เปอร์เซ็นต์ความยืด (percent elongation) โดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบของเหล็กเส้นกลม (RB6) และเหล็กข้ออ้อย (DB16)

เหล็กเสริม	หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (f_y), MPa	หน่วยแรงดึงประลัย (f_u), MPa	โมดูลัสยืดหยุ่น (E), GPa	ความยืด %
RB6	370.20	493.46	198.50	20.29
DB16	590.10	645.21	195.30	23.86

จากรูปที่ ค.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (tensile stress) และความเครียดดึง (tensile strain) พบว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมในช่วงแรกจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งหน่วยแรงดึงถึงจุดครากที่ความเครียดดึงประมาณ 0.0018-0.0020 mm/mm (เหล็กเสริม RB6 เท่ากับ 370.20 MPa (3773.7 kg/cm²) และเหล็กเสริม DB16 เท่ากับ 590.10 MPa (6015.29 kg/cm²)) หลังจากนั้นเหล็กเสริมจะเข้าสู่พฤติกรรมช่วง yielding ในช่วงนี้เหล็กเสริมจะมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น ขณะที่หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ เมื่อผ่านช่วง yielding เหล็กเสริมจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรม strain hardening จะเห็นได้จากช่วงที่กราฟมีความชันเพิ่มขึ้นและจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนความชันมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นความชันของกราฟจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการวิบัติดังแสดงในรูปที่ ค.4a และ ค.4b



รูปที่ ค.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และความเครียดดึงของเหล็กเสริม RB6 และ DB16



(a) เหล็กข้ออ้อย DB16



(b) เหล็กเส้นกลม RB6

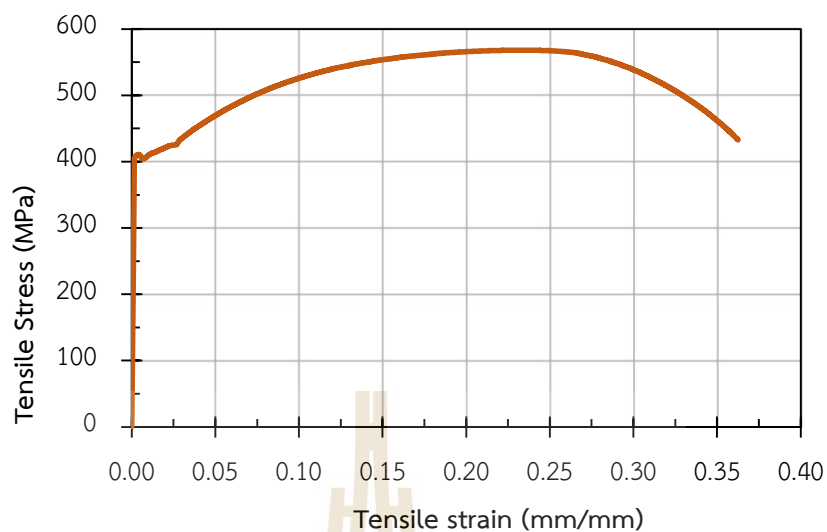
รูปที่ ค.4 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเส้นกลม และเหล็กข้ออ้อยภายใต้แรงดึง

ค.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของแผ่นเหล็ก

แผ่นเหล็กที่นำมาศึกษาพฤติกรรมทางกลนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SINO COMMODITIES INTERNATIONAL PTE. LTD. ชั้นคุณภาพ SS400 ได้ทำการตัดตัวอย่างให้เป็นรูปกระดูกตามมาตรฐาน มอก.1479-2541 จากการทดสอบพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (tensile stress) และความเครียดดึง (tensile strain) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ค.5 จากกราฟความสัมพันธ์คุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบของแผ่นเหล็ก

เหล็กเสริม	หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (f_y), MPa	หน่วยแรงดึงประลัย (f_u), MPa	โมดูลัสยืดหยุ่น (E), GPa	ความยืด %
Steel plate	430.0	568.42	196.3	19.88



รูปที่ ค.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง และความเครียดดึงของแผ่นเหล็ก

จากรูปที่ ค.5 จะเห็นว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงของแผ่นเหล็กดำจะมีลักษณะคล้ายกับพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมกลมและเหล็กข้ออ้อย เนื่องจากว่าวัสดุเป็นเหล็กที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) ซึ่งลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะที่คล้ายกับเหล็กเสริมกลมและเหล็กข้ออ้อย ดังแสดงในรูปที่ ค.6



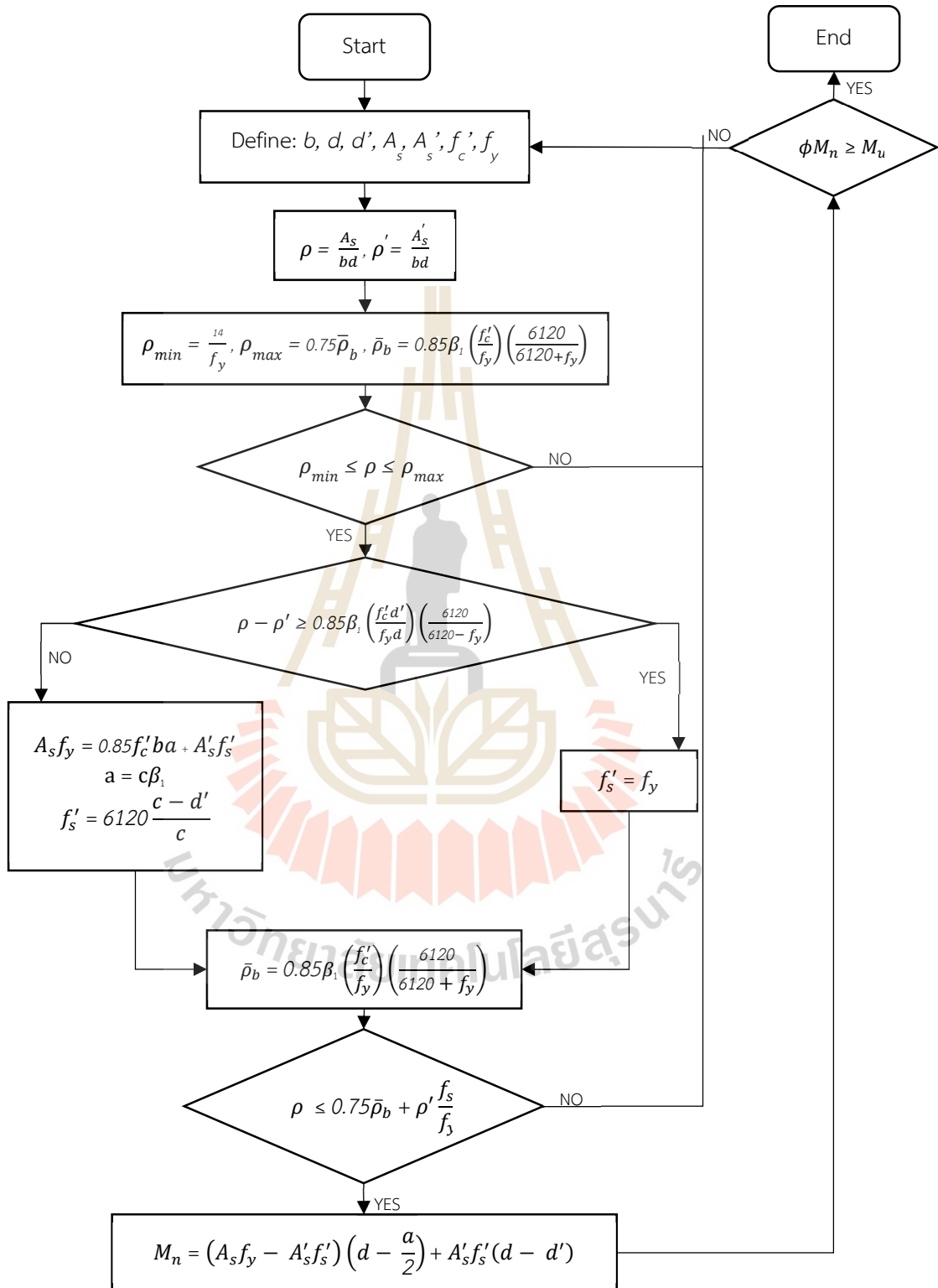
รูปที่ ค.6 ลักษณะการวิบัติของแผ่นเหล็ก

ภาคผนวก ง

แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

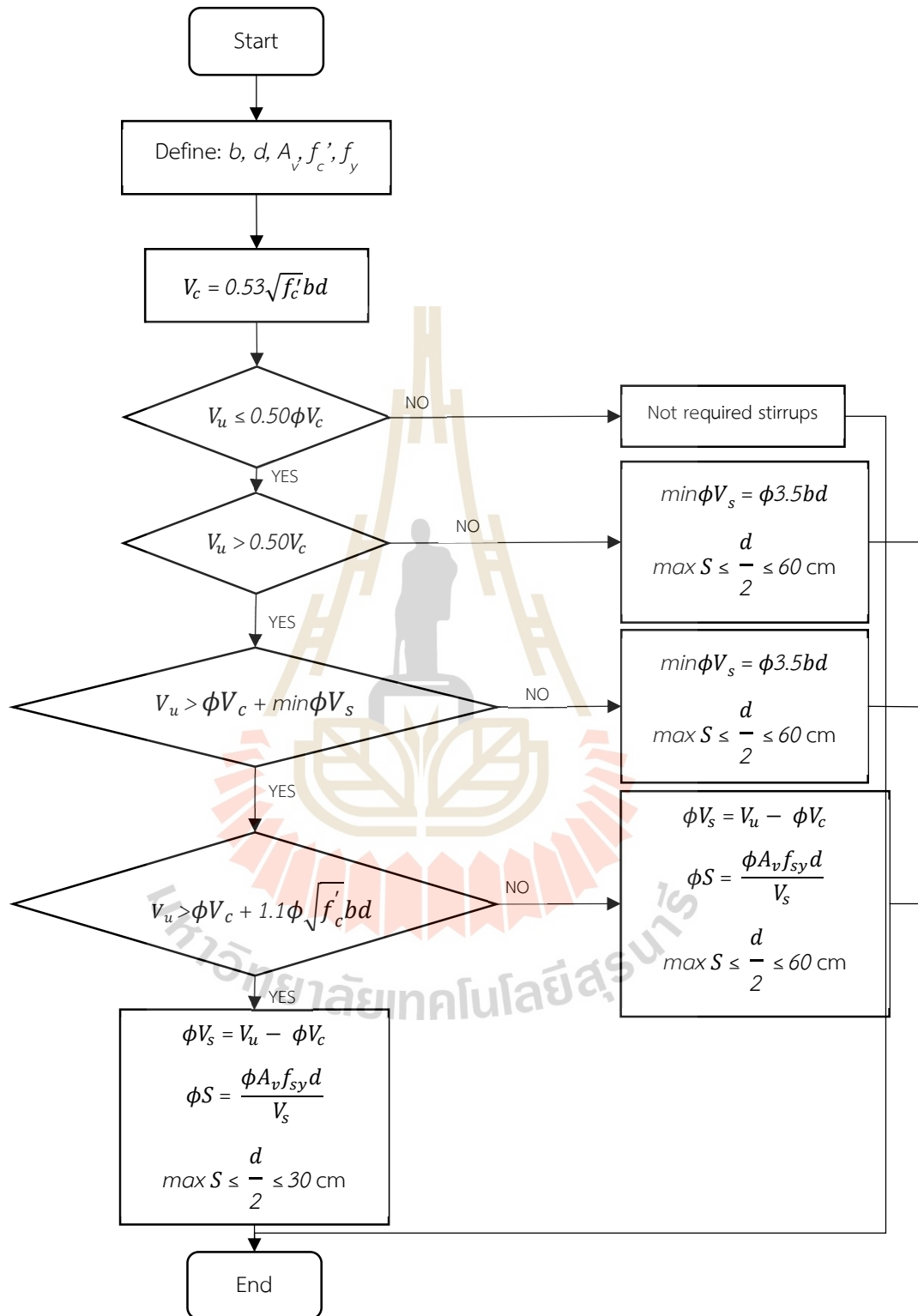


ง.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบกำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ ง.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบกำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่างทดสอบ

ง.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของคานตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ ง.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของคานตัวอย่างทดสอบ

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a stylized lotus flower. Above the figure are several 'H' characters arranged in a triangular pattern. The entire logo is rendered in a light beige color.

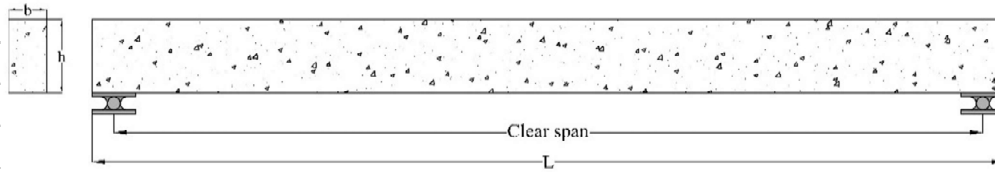
ภาคผนวก จ.

Spreadsheet สำหรับออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Spreadsheet สำหรับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กกลุ่มที่ 1

Reinforced concrete Beam : Ultimate strength design method

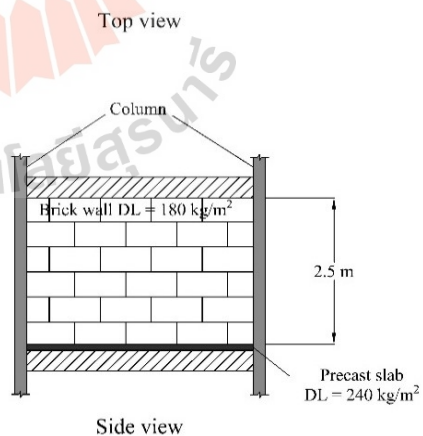
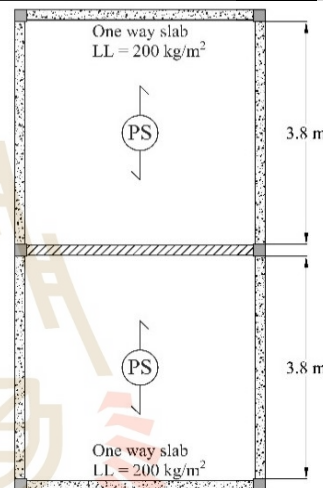


Section of Beam			Steel properties		
b	17.5	cm	$f_{y, SD40}$	5266	kg/cm ²
h	35	cm	$f_{y, SR24}$	3667	kg/cm ²
L	4.20	m	E_s	1991506	kg/cm ²
Clear Span	4.00	m			

Concrete properties		
f'_c	486	kg/cm ² (Cylinder)
E_c	$15100 \sqrt{f'_c}$	332885.66 kg/cm ²
w	2400	kg/cm ²

th reduction factor		
ϕ for shear		0.85
ϕ for bending		0.90

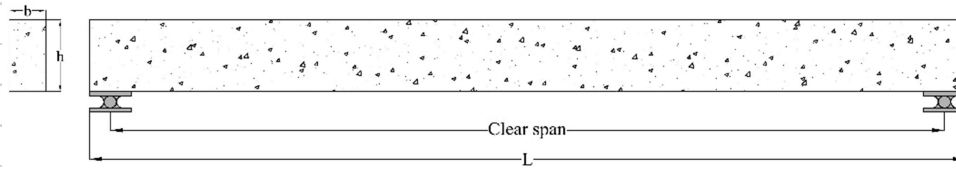
Design load and Moment condition		
Wall weight	180	kg/m ²
Wall height	2.50	m
Slab thickness	10.00	cm
Live load, LL	200	kg/m
Dead load Beam, w	147.00	kg/m
Dead load Wall, w	450.00	kg/m
Dead load Slab, w	912.00	kg/m
Dead load, w	1509.00	kg/m
Live load, w	760.00	kg/m
Ultimate load, w	3404.60	kg/m
V	6809.20	kg
M	3018.00	kg-m
M	1520.00	kg-m
M	6809.20	kg-m



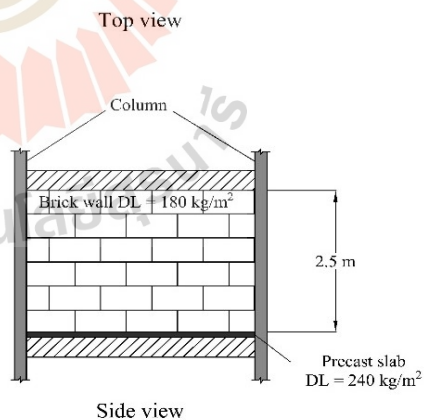
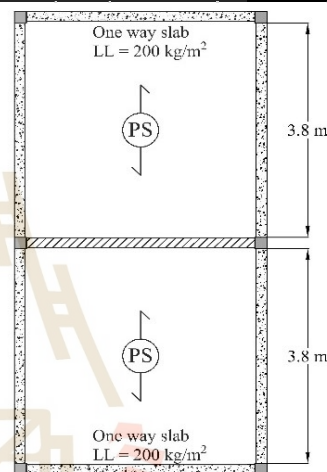
Design Main Reinforcement						
Select reinforced						
Top	2	DB	16	A'_s	4.02	cm ²
Bottom	5	DB	16	A_s	10.05	cm ²
d	=	29	cm			
d'	=	4	cm			
$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) = 0.703$						
$\rho = \frac{A_s}{bd} = 0.01980 > \rho_{min} \quad \text{OK!}$						
$\rho' = \frac{A'_s}{bd} = 0.00792$						
$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} = 0.00266$						
$\rho_{max} = 0.75 \bar{\rho}_b = 0.02223$						
$\bar{\rho}_b = 0.85 \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = 0.02964$						
$\rho - \rho' = 0.01188$						
$0.85 \beta_1 \left(\frac{f'_c d'}{f_y d} \right) \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = 0.05450 > \rho - \rho'$						

Spreadsheet สำหรับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กกลุ่มที่ 2

Reinforced concrete Beam : Ultimate strength design method



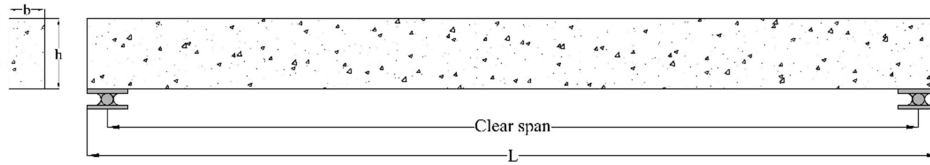
Section of Beam			Steel properties		
b	17.5	cm	f_y , SD40	5266	kg/cm ²
h	35	cm	f_y , SR24	3667	kg/cm ²
L	4.20	m	E_s	1991506	kg/cm ²
Clear Span	4.00	m			
Concrete properties					
f'_c	486	kg/cm ² (Cylinder)			
E_c	$15100 \sqrt{f'_c}$	332885.66			kg/cm ²
w	2400	kg/cm ²			
Strength reduction factor					
ϕ for shear		0.85			
ϕ for bending		0.90			
Design load and Moment condition					
Wall weight	180	kg/m ²			
Wall height	2.50	m			
Slab thickness	10.00	cm			
Live load, LL	200	kg/m			
Dead load Beam, w_B	147.00	kg/m			
Dead load Wall, w	450.00	kg/m			
Dead load Slab, w_S	912.00	kg/m			
Dead load, w	1509.00	kg/m			
Live load, w_{LL}	760.00	kg/m			
Ultimate load, w	3404.60	kg/m			
V	6809.20	kg			
M	3018.00	kg-m			
M_{LL}	1520.00	kg-m			
M_u	6809.20	kg-m			



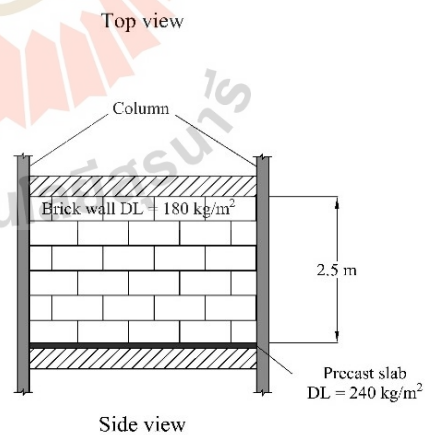
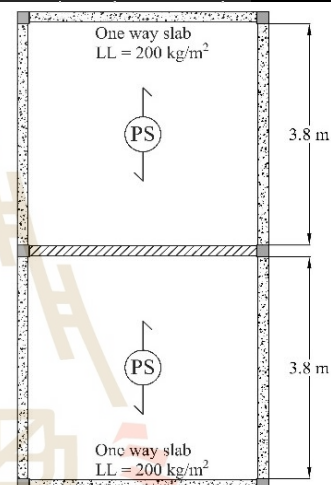
Design Main Reinforcement						
Select reinforced						
Top	2	DB	16	A'_s	4.02	cm ²
Bottom	6	DB	16	A_s	12.06	cm ²
d	=	29	cm			
d'	=	4	cm			
$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) = 0.703$						
$\rho = \frac{A_s}{bd} = 0.02376 > \rho_{min} \quad \text{OK!}$						
$\rho' = \frac{A'_s}{bd} = 0.00792$						
$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} = 0.00266$						
$\rho_{max} = 0.75 \bar{\rho}_b = 0.02223$						
$\bar{\rho}_b = 0.85 \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = 0.02964$						
$\rho - \rho' = 0.01584$						
$0.85 \beta_1 \left(\frac{f'_c d'}{f_y d} \right) \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = 0.05450 > \rho - \rho'$						

Spreadsheet สำหรับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กกลุ่มที่ 3

Reinforced concrete Beam : Ultimate strength design method



Section of Beam			Steel properties		
b	17.5	cm	f_y , SD40	5266	kg/cm ²
h	35	cm	f_y , SR24	3667	kg/cm ²
L	4.20	m	E_s	1991506	kg/cm ²
Clear Span	4.00	m			
Concrete properties					
f'_c	486	kg/cm ² (Cylinder)			
E_c	$15100 \sqrt{f'_c}$	332885.66			kg/cm ²
w	2400	kg/cm ²			
Strength reduction factor					
ϕ for shear		0.85			
ϕ for bending		0.90			
Design load and Moment condition					
Wall weight	180	kg/m ²			
Wall height	2.50	m			
Slab thickness	10.00	cm			
Live load, LL	200	kg/m			
Dead load Beam, w_B	147.00	kg/m			
Dead load Wall, w	450.00	kg/m			
Dead load Slab, w_S	912.00	kg/m			
Dead load, w	1509.00	kg/m			
Live load, w_{LL}	760.00	kg/m			
Ultimate load, w	3404.60	kg/m			
V	6809.20	kg			
M	3018.00	kg-m			
M_{LL}	1520.00	kg-m			
M_u	6809.20	kg-m			



Design Main Reinforcement						
Select reinforced						
Top	2	DB	16	A'_s	4.02	cm ²
Bottom	6	DB	16	A_s	12.06	cm ²
d	=	29	cm			
d'	=	4	cm			
$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) = 0.703$						
$\rho = \frac{A_s}{bd} = 0.02376 > \rho_{min} \quad \text{OK!}$						
$\rho' = \frac{A'_s}{bd} = 0.00792$						
$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} = 0.00266$						
$\rho_{max} = 0.75 \bar{\rho}_b = 0.02223$						
$\bar{\rho}_b = 0.85 \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = 0.02964$						
$\rho - \rho' = 0.01584$						
$0.85 \beta_1 \left(\frac{f'_c d'}{f_y d} \right) \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = 0.05450 > \rho - \rho'$						

ภาคผนวก ฉ
เปรียบเทียบราคาการหล่อคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ฉ.1 เปรียบเทียบราคา และกำลังต้านทานแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นของการเพิ่มขึ้นของ ระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝั่งที่ส่วนรองรับของคาน ตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ ฉ.1 แสดงถึงการเปรียบเทียบราคาการก่อสร้าง และกำลังรับแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นของ คานตัวอย่างทดสอบที่สถานะใช้งาน ($P_{L/240}$) สำหรับการดำเนินการก่อสร้างคานตัวอย่างทดสอบ 1 ตัวอย่าง โดยราคาต่อ 1 ตัวอย่างมีดังนี้ ราคาไม้แบบที่ใช้ในการหล่อ ราคาเหล็กประกอบไม้แบบ ราคา แรงงานคนงานในการก่อสร้าง ราคาแผ่นเหล็ก ราคาเหล็กเสริม และราคาคอนกรีต

ตารางที่ ฉ.1 เปรียบเทียบระหว่างราคาที่เพิ่มขึ้น และกำลังต้านทานแรงกระทำที่สถานะใช้งาน

กลุ่มที่	ตัวอย่าง ทดสอบ	ความยาว ระยะฝั่ง (mm)	ราคาต่อ 1 ตัวอย่าง (Baht)	ราคา ที่ เพิ่มขึ้น/ ลดลง (%)	กำลังที่ สถานะใช้ งาน, $P_{L/240}$ (kN)	กำลังที่ เพิ่มขึ้น/ ลดลง (%)
1	RC-0000-100	0	5355	-3.95	102.15	-20.90
	PC-0500-100	500	5575	-	106.60	-
	PC-1000-100	1000	5800	+4.04	115.51	+8.36
	PC-1500-100	1500	6025	+8.07	121.45	+13.93
2	RC-0000-300	0	5385	-3.96	74.38	-38.76
	PC-0500-300	500	5605	-	121.45	-
	PC-1000-300	1000	5830	+4.01	126.64	+4.27
	PC-1500-300	1500	6055	+8.03	136.30	+12.23
3	RC-0000-500	0	5350	-3.95	72.45	-45.05
	PC-0500-500	500	5570	-	131.84	-
	PC-1000-500	1000	5795	+4.04	148.17	+12.39
	PC-1500-500	1500	6020	+8.08	154.85	+17.45

จากตารางที่ ๑.1 เมื่อนำราคาและกำลังที่เพิ่มขึ้น/ลดลงมาเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีราคาลดลงเพียง 3.95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่ลดลง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานลดลงค่อนข้างมาก จึงไม่ควรนำมาใช้งาน คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 1000 และ 1500 mm มีราคาเพิ่มขึ้นเพียง 4.04 ถึง 8.07 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่เพิ่มขึ้น พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังที่เพิ่มขึ้นมากกว่าราคาที่เพิ่มขึ้น สามารถนำมาใช้งานได้ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีราคาลดลงเพียง 3.96 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่ลดลง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานลดลงค่อนข้างมาก จึงไม่ควรนำมาใช้งาน คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 1000 และ 1500 mm มีราคาเพิ่มขึ้นเพียง 4.01 ถึง 8.03 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่เพิ่มขึ้น พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังที่เพิ่มขึ้นมากกว่าราคาที่เพิ่มขึ้น สามารถนำมาใช้งานได้ และสำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีราคาลดลงเพียง 3.95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่ลดลง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีกำลังต้านทานลดลงค่อนข้างมาก จึงไม่ควรนำมาใช้งาน คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 1000 และ 1500 mm มีราคาเพิ่มขึ้นเพียง 4.04 ถึง 8.08 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังที่เพิ่มขึ้น พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังที่เพิ่มขึ้นมากกว่าราคาที่เพิ่มขึ้น สามารถนำมาใช้งานได้



ภาคผนวก ช

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ชูธง กงแก้ว, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และจักษดา อ่างรุฒิ, ผลของความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีผลต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26 (The 26th National Convention on Civil Engineering), หน้า STR17-1-6, การประชุมรูปแบบออนไลน์. 23-25 มิถุนายน 2564



ผลของความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีผลต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป
EFFECT OF EMBEDDED LENGTH OF DEFORMED BARS WELDED TO STEEL PLATE
ON PRECAST REINFORCED CONCRETE BEAM

ชุง กงแก้ว^{1*} ลิทธิชัย แลงอาทิตย์² และ จักขตา ฮ่างรุณี³

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Corresponding author address: chuthong.kongkaew@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงผลการศึกษาโดยการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อนับเป็นแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝังที่ส่วนรองรับ โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (4-point loading test) เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กบริเวณจุดรองรับต่อความสามารถในการรับแรงกระทำและลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นคานที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และ ยาว 4.0 ม. จุดเชื่อมต่อของคานทำด้วยแผ่นเหล็กหน้าตัดกว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. และ ทน 0.02 ม. ที่เชื่อมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. (DB16) ยาว 0.5, 1.0 และ 1.5 ม. จากผลการทดสอบพบว่า สำหรับคานตัวอย่างทดสอบที่มีตัวแปรควบคุมต่าง ๆ เหมือนกัน เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเพิ่มขึ้น ความสามารถรับแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบที่ค่าการเลื่อนตัวของคาน $L/240$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝัง 0.5 ม. เท่ากับ 4.27 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยรูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคานกริดเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับเป็นการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) ที่บริเวณจุดรองรับไปจนถึงที่ระยะประมาณ $L/3$ ของคานทั้งสองด้าน จากนั้น จึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคานกริดเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับ

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูป, จุดต่อ, ความยาวระยะฝัง

Abstract

This paper presents the result from the experimental study on precast reinforced concrete beams, having connection in the form of deformed bars welded to steel plate at the support sections. The experiments were performed by using the four-point loading test. The objectives of the research are to study the effects of the embedded length of deformed bars to the load-carrying capacity and the modes of failure of the beam specimens. The beams specimens have the cross section of 0.175 m width and 0.35 m depth with 4.0 m clear span. The beam's connections at the ends of the beam were made of steel plate, having the cross section of 0.25 m width, 0.15 m depth and 0.02 m thickness, and welded with 16 mm diameter (DB16) deformed bars, having the length of 0.5, 1.0 and 1.5 m embed to the end portions of the beams. According to the experiments, it was found that, for the specimens with the same control-variables, when the embedded length of deformed bars was increased, the load-carrying capacity of the beam specimens at the deflection of $L/240$ increased, compared to the specimens with 0.5 m the deformed bars, of 4.27 and 12.23 percent, respectively. Also, the modes of failure of the specimens are changed from the vertical concrete cracks of concrete due to the slip of the steel plate at the support sections to the diagonal shear failure of the specimens in the areas between the supports and the $1/3$ of the beam's span of both ends of the beam and, then, in the form of the vertical concrete cracks of concrete due to the slip of the steel plate at the support sections.

Keywords: Precast reinforced concrete beam, Connection, Embedded length

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นโครงสร้างแบบเสา-คาน โดยก่อสร้างแบบหล่อในที่

(cast-in-place) ซึ่งใช้แบบหล่อ แรงงานคน ค่าใช้จ่ายในโครงการและเวลาในการก่อสร้างมาก อีกทั้งยังเป็นกรากที่ยากที่จะควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง เนื่องจากคุณภาพฝีมือแรงงานของคานงานมักแตกต่างกันไปรายบุคคล เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบัน

จึงได้มีการพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จรูป (Precast) โดยพบว่า มีข้อดีหลายประการ เช่น การก่อสร้างทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง และสามารถควบคุมคุณภาพ การก่อสร้างได้ดีขึ้น และที่สำคัญระบบก่อสร้างดังกล่าวช่วยลดขยะ จากงานก่อสร้างเนื่องจากเศษปูนและไม้แบบได้ ช่วยส่งเสริมการ รักษาสุขภาพแวดล้อมที่ดีในสถานที่ก่อสร้างและชุมชนใกล้เคียงซึ่ง สอดรับกับแนวคิดอาคารเขียว (green building) [4],[5]

ในปัจจุบัน ผู้รับเหมาก่อสร้างได้นำระบบการก่อสร้างแบบ สำเร็จรูปมาใช้ กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก เช่น บ้านพัก อาศัย โรงงาน และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น มากขึ้นอย่างมาก ทั้งใน ส่วนของพื้นที่ สำเร็จรูป คานฯ หล่อสำเร็จรูป เสาฯ หล่อสำเร็จรูป และผนังฯ หล่อสำเร็จรูป โดยมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมา แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งของการก่อสร้าง แบบสำเร็จรูปคือ จุดต่อระหว่างโครงสร้าง เช่น ในกรณีของการ ก่อสร้างระบบคานและเสา เป็นต้น ที่จะต้องมีความแข็งแรงและ ความแกร่งเพียงพอในการรองรับแรงกระทำ โดยที่จุดต่อจะต้องเกิด การวิบัติหลังจากการวิบัติขององค์อาคาร ซึ่งในการศึกษานี้มี วัตถุประสงค์ในการพัฒนาจุดเชื่อมต่อนาน-เสาสำหรับการก่อสร้าง อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโดยการทดสอบคาน คอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อนาน-เสาเชื่อม กับเหล็กข้ออ้อยฝั่งที่ส่วนรองรับ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้มีหน่วยงาน ก่อสร้างแห่งหนึ่งที่ได้ไปศึกษาคูณานนำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่น เหล็กโดยมีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 0.5 ม. เข้ามาใช้ใน หน่วยงานก่อสร้าง โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (4-point loading test) เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝั่งของเหล็ก ข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กบริเวณจุดรองรับ และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและจุดเชื่อมต่อ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย ที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก (L) ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 ม.

2. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นไปตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (Thai Industrial Standard) หรือ มอก. ประกอบด้วย (1) การทดสอบเหล็กเสริมตาม มอก. 20-2559 (เหล็กเส้นกลม) [7] และ มอก. 24-2559 (เหล็กข้ออ้อย) [8] (2) การทดสอบแผ่นเหล็กค้ำตาม มอก. 1479-2541 [9] และ (3) การทดสอบคอนกรีตตาม มอก. 409-2525 [10] ซึ่งได้ผลการ ทดสอบหาคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 1 และพบว่า วัสดุที่ ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามที่ มอก. ที่เกี่ยวข้องกำหนด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	กำลังคราก เฉลี่ย (MPa)	กำลังสูงสุด เฉลี่ย (MPa)	โมดูลัส ยืดหยุ่นเฉลี่ย (GPa)
คอนกรีต	-	40.33	29.85
เหล็กข้ออ้อย (DB16)	590.10	645.21	198.5
เหล็กเส้นกลม (RB6)	370.20	493.46	195.3
แผ่นเหล็ก (Steel plate)	404.74	568.42	196.3

2.2. คานตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สำเร็จรูป ซึ่งออกแบบโดยวิธีกำลังตามมาตรฐานการออกแบบ วสท. 1008-38 [6] โดยที่ไม่นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมา พิจารณา คานตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าตัด กว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และยาว 4.0 ม. (clear span) จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง คือ คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่น เหล็กที่ระยะฝั่งเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ม. ชุดละ 2 ตัวอย่าง เหล็ก เสริมรับแรงดึงและอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (DB16 เกรด SD40) เหล็ก เสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) และแผ่น เหล็กที่ใช้เชื่อมต่อนานเข้ากับคานคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนจุด รองรับของคานเชื่อมมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม.หนา 0.020 ม. (เกรด SS400) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่น ออกมาจากปลายคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็ก ข้ออ้อยขนาด DB16 เกรด SD40 มาเชื่อมต่อตามความยาวระยะฝั่ง ที่กำหนด ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ โดยชื่อของคานตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป PRCB-Y โดยที่ PRCB คือ ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูป และ Y หมายถึง ความยาวระยะฝั่งเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งขอให้สังเกต ตำแหน่งของแผ่นเหล็กและเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก รูปที่ 3 แสดงหน้าตัดคานที่จุดฝั่งแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคาน (section A-A) และจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน (section B-B) จากรูป จะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบ PRCB-Y ตัวอย่างทดสอบถูกผลิตขึ้นโดยช่างฝีมือแรงงานตามแบบที่กำหนด โดยมีการติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่เหล็กส่วนที่รับ แรงดึงบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้ในการ ตรวจสอบความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำ เพื่อ

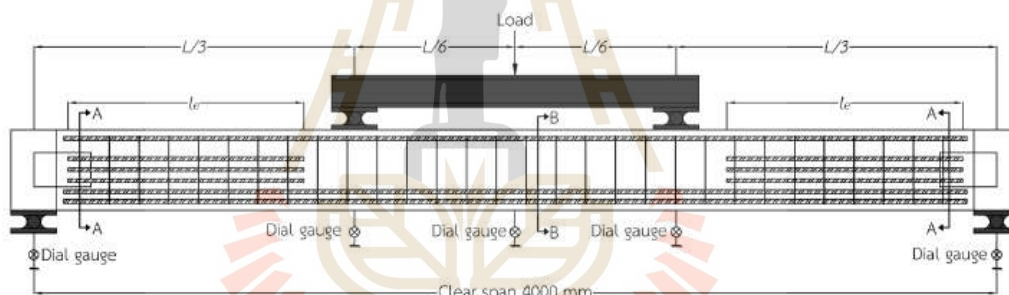
ตรวจสอบว่าเหล็กเสริมเกิดการคราก (yielding) ระหว่างการทดสอบหรือไม่ และได้รับการบ่มคอนกรีตตามที่ วสท. กำหนด เมื่อแกะแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบแล้ว จะมีการหล่อคอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กที่เหลือเพื่อจำลองคอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสา โดยคอนกรีตส่วนนี้จะวางอยู่บนจุดรองรับ



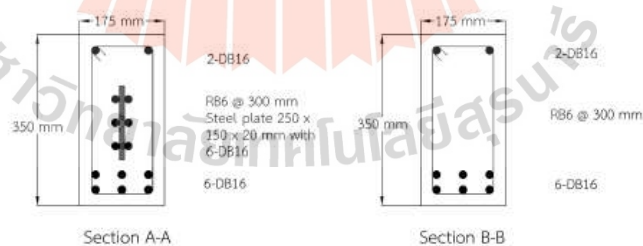
รูปที่ 1 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

คานตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝั่งเหล็ก (ม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (ม.)	ความยาว (ม.)	จำนวนเหล็กเสริมรับแรงดึง	จำนวนเหล็กเสริมรับแรงอัด	Mode of failure ที่ออกแบบ
PRCB-0.5	0.5	0.3	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear failure
PRCB-1.0	1.0	0.3	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear failure
PRCB-1.5	1.5	0.3	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear failure



รูปที่ 2 ลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 หน้าตัดคานที่จุดที่ฝั่งแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคานและจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน

2.3. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบมีดังนี้ (1) ติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยวางคานตัวอย่างทดสอบในรูปแบบคานบนจุดรองรับอย่างง่าย (simple supported beam) โดยให้คอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสาวางอยู่ที่จุดรองรับทั้งสองด้านและรอยต่ออยู่ตรงตำแหน่งของขอบจุดรองรับ (2) นำคานถ่ายแรงวางบนหลังคานตัวอย่างทดสอบจากนั้นนำ

กระบอกไฮดรอลิก (hydraulic cylinder) วางบนคานถ่ายแรงและปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่หัว hydraulic cylinder ชนกับ loading frame ในรูปแบบการทดสอบแรงกระทำสี่จุด (4-point loading test) (3) ติดตั้ง dial gauge ที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ 1 ตัว ที่ระยะ $L/6$ โดยวัดจากกึ่งกลางคานไปทั้งทางด้านซ้ายและขวาด้านละ 1 ตัว และที่จุดรองรับของคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 1 ตัว รวมทั้งหมดจำนวน 5 ตัว เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่าง

ทดสอบ (4) เชื่อมต่อ strain gauge เข้ากับ strain gauge indicator (5) ทำการ pre-loading ให้กับคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้คานตัวอย่างทดสอบ dial gauge และ strain gauge อยู่ในสภาพพร้อมทดสอบ (6) เริ่มทำการทดสอบแบบ displacement-controlling test โดยให้แรงกระทำผ่าน hydraulic pump และบันทึกค่าแรงกระทำที่ค่าการแอ่นตัวที่กลางคานเท่ากับ 0.5 มม. พร้อมกับการบันทึกค่าการแอ่นตัวจาก dial gauge อีก 4 ตัว บันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจาก strain gauge indicator และตรวจสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบ (7) ทำซ้ำข้อที่ 6 จนคานตัวอย่างทดสอบมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/120$ ซึ่งมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ วสท. จากนั้นทำการถอด dial gauge ทั้งหมดออกจากคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการเสียหายจากการทดสอบ และทำการให้แรงกระทำจนคานตัวอย่างมีความเสียหายในระดับที่มากพอ บันทึกค่าแรงและค่าความเครียดสุดท้าย สังเกตลักษณะการร้าวร้าวของคานตัวอย่างทดสอบอย่างละเอียดใช้ปากกาขีดตามรอยร้าวที่เกิดจากแรงที่กระทำ และถ่ายรูปเพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป



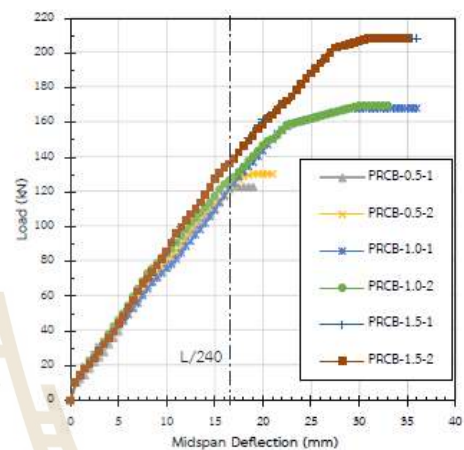
รูปที่ 4. การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 พฤติกรรมการรับแรงของคาน

รูปที่ 5 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคานตัวอย่างทดสอบ จากแผนภาพความสัมพันธ์ พบว่า ในภาพรวม คานตัวอย่างทดสอบทั้ง 6 ตัวอย่างมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำที่คล้ายคลึงกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่ชัดเจน ในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดที่แรงกระทำมีค่าประมาณ 85-90% ของแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ทดสอบได้ โดยเริ่มเกิดรอยร้าวทามมประมาณ 90 องศากับแนวของคานตัวอย่างทดสอบขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางความยาวและที่รอยต่อระหว่างคานและคอนกรีตที่

หล่อแทนเสา จากนั้น ตัวอย่างจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งความชันของเส้นกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีลักษณะแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรอยร้าวปรากฏเพิ่มจำนวนมากขึ้นและขยายตัวมากขึ้นจนถึงจุดที่หยุดการทดสอบคาน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ



รูปที่ 5. แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคาน

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบที่วัดได้เมื่อคานมีคานการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาว $L/240$ ($P_{L/240}$) ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวสูงสุดของคานในสภาวะการใช้งานที่มาตรฐานการออกแบบคาน วสท. กำหนด (กรณีคานไม่มีผนังได้ห้องคาน) จากตารางพบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝั่ง 1.0 และ 1.5 ม. มีความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะการแอ่นตัวใช้งาน ($P_{L/240}$) มากกว่าคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝั่ง 0.5 ม. เท่ากับ 4.27 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝั่งเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงใช้งาน (service load) ได้บ้างแต่ไม่มาก

ตารางที่ 3. ค่าแรงกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบที่วัดได้เมื่อคานมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาว $L/240$ ($P_{L/240}$)

คานตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝั่งเหล็ก (ม.)	$P_{L/240}$ (kN)	$P_{L/240}$ ที่เพิ่มขึ้น (%)
PRCB-0.5	0.5	121.45	-
PRCB-1.0	1.0	126.64	4.27
PRCB-1.5	1.5	136.30	12.23

ตารางที่ 4 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบ จากตารางจะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. มีค่าแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าแรง P_{max} ของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 0.5 ม. เท่ากับ 36.84 และ 69.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝึงเหล็กข้ออ้อยฯ ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบได้ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4 ค่าแรงกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบ

คานตัวอย่างทดสอบ	P_{max} (kN)	P_{max} ที่เพิ่มขึ้น (%)
PRCB-0.5	122.93	-
PRCB-1.0	168.22	36.84
PRCB-1.5	208.30	69.44

3.2 ลักษณะการวิบัติของคาน

รูปที่ 6 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะเห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติ 2 รูปแบบ คือ (1) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 0.5 ม. พบว่า คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยการแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่จุดต่อระหว่างคานและจุดรองรับที่ปลายคาน เนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก (slip mode) ดังแสดงในรูปที่ 6(a) และ (2) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึงเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. พบว่า ช่วงแรก คานจะเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตทำมุมประมาณ 40-45 องศาในแนวระดับที่บริเวณจุดรองรับจนถึงช่วง $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 คาน ในรูปแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) จากนั้น จึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวของระยะฝึงของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากแบบทันทีทันใด เป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) มากขึ้น



(a) ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยระยะฝึงเท่ากับ 0.5 ม.



(b) ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยระยะฝึงเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม.

รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลของระยะฝึงของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กพบว่า

4.1 เมื่อเปรียบเทียบคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝึง 1.0 และ 1.5 ม. กับคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะฝึง 0.5 ม. พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดวิบัติและเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดเปลี่ยนเป็นมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่แรงกระทำมีค่าประมาณ 85-90% ของแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ทดสอบได้ โดยเริ่มเกิดรอยร้าวขนาดเล็กบริเวณปลายคานเนื่องจากแรงเฉือนให้ความแกร่ง ของคานลดลงอย่างมาก และเข้าสู่ช่วงที่สอง ที่เป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือนปรากฏเพิ่มจำนวนมากขึ้นและขยายตัวมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความยาวของระยะฝึงของเหล็ก

ข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรม การรับแรงที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากขึ้น เมื่อคานตัวอย่างทดสอบ รับแรงสูงสุด

4.2 คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ ระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. มีความสามารถรับแรงกระทำใ้ งานที่ค่าการแอ่นตัว $L/240$ มากกว่าคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็ก ข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 0.5 ม. และเพิ่มมากขึ้น ตามความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 4.27 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถรับ แรงกระทำสูงสุด (P_{mo}) พบว่า คานที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่น เหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. มีความสามารถในการรับ แรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นเพิ่มมากขึ้นตามความยาวของระยะฝังของ เหล็กข้ออ้อย เท่ากับ 36.84 และ 69.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่ง แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝังเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบ ได้ค่อนข้างมาก แต่เพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงใช้งานของ คานตัวอย่างทดสอบได้เล็กน้อย

4.3 การเพิ่มระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กของ คานตัวอย่างทดสอบจาก 0.5 ม. เป็น 1.0 ม. และ 1.5 ม. ช่วยเพิ่ม แรงยึดเหนี่ยวของแผ่นเหล็กและส่วนของคอนกรีตที่ปลายคาน (ที่ แทนคอนกรีตในหัวเสา) ซึ่งทำให้เปลี่ยนลักษณะการวิบัติของคาน ตัวอย่างทดสอบจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่ จุดต่อระหว่างคานและจุดรองรับปลายคานเนื่องจากการเลื่อนของ แผ่นเหล็ก (slip mode) เป็นการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) ที่บริเวณจุดรองรับไปจนถึงที่ระยะประมาณ $L/3$ ของคานทั้งสองด้าน จากนั้น จึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของ คอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับ แผ่นเหล็ก ช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจาก แบบทันทีทันใดเป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากขึ้น

5. การอ้างอิง

- [1] Yip W.K., Teng S., Ting S.K. and Hu H.B. (1999). Behaviour of precast reinforced concrete beams with structural steel I-section embedded at the support section. *The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, August 27-29, Kochi, Japan.
- [2] Guo X., Gao S., Wang L. and Bui T.N. (2018). Bearing capacity of embedded channel-shaped steel connections at precast concrete beam end. *Engineering Structures*, 175, 177-190.
- [3] มงคล จีระวัชรเดช (2549). *การออกแบบคานกรีตเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Design Working Stress Design Strength Design Method Forth Edition*, สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
- [4] จักขตา อ่างรุณี (2548). *การตรวจสอบคานคอนกรีตเสริม เหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรง กระทำเป็นจุดตามขวาง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี
- [5] จักขตา อ่างรุณี และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2548). คาน คอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝังที่ส่วนรองรับ ภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง. *การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10*, พฤษภาคม 2-4, ชลบุรี, ประเทศไทย
- [6] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2538). *มาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริม เหล็ก โดยวิธีกำลัง*, กรุงเทพฯ
- [7] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (20-2559) , *เหล็กเส้น เสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม*
- [8] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (24-2559) , *เหล็กเส้น เสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย*
- [9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (1479-2541) , *เหล็กกล้าทรงแบนรีร้อน สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป*
- [10] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (409-2525), *วิธีทดสอบ ความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต*

ประวัติผู้เขียน

นายชูชง กงแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนอัสสัมชัญ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2651 ระหว่างการเรียนในระดับปริญญาตรีมีความสนใจด้านโครงสร้างเป็นอย่างมาก จึงตัดสินใจเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ในปีการศึกษา 2561 และยังได้รับประสบการณ์ระหว่างการศึกษาจากการทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนในระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ และนำความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง

