

หน่วยแรงในเหล็กเสริมคานคอนกรีตที่จุดรองรับ

**STRESS IN REINFORCEMENT AT SUPPORT
OF CONCRETE BEAM**

ชำนาญ น้อยพิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หน่วยแรงในเหล็กเสริมคานคอนกรีตที่จุดรองรับ

ชำนาญ น้อยพิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หน่วยแรงในเหล็กเสริมคานคอนกรีตที่จุดรองรับ Stress in Reinforcement at Support of Concrete Beam
ชื่อ - นามสกุล	นายชำนาญ น้อยพิทักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. มาโนช รุจิภากร
ปีการศึกษา	2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.หมีง จิ่ง)

..... กรรมการ
(ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์)

..... กรรมการ
(ดร.สนธยา ทองอรุณศรี)

..... กรรมการ
(ดร. มาโนช รุจิภากร)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)

วันที่ 18 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หน่วยแรงในเหล็กเสริมคานคอนกรีตที่จุดรองรับ
ชื่อ – นามสกุล	นายชำนาญ น้อยพิทักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. มาโนช รุจิภากร
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมของคานคอนกรีตที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเสา-คาน ได้ถูกศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองเสา-คานที่เทคอนกรีตแบบมีรอยต่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเสา-คานที่เทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อเนื่องจากการก่อสร้าง (construction joint) แบบจำลองมีขนาดคาน $20 \times 40 \times 100$ ซม. เสริมเหล็กแกน 4 เส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ($\rho = 0.005$) เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. เสริมที่ระยะห่าง 15 ซม. ขนาดเสา $20 \times 20 \times 100$ ซม. เสริมเหล็กแกน 4 เส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ($\rho = 0.02$) เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. เสริมที่ระยะห่าง 15 ซม.

การศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ไม่มีรอยต่อนั้นสามารถรับแรงเฉือนโดยรวมสอดคล้องกับทฤษฎีการออกแบบ (ultimate design) ในขณะที่แบบจำลองที่มีรอยต่อรับแรงเฉือนได้เพียงร้อยละ 60 เท่านั้น สำหรับหน่วยแรงในเหล็กปลอกมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ประมาณร้อยละ 25 ของหน่วยแรงที่ยอมให้ก่อนที่จะลดลงเนื่องจากการเสียหายของคาน

ผลการศึกษาหน่วยแรงในเหล็กแกนยังพบอีกว่า แบบจำลองที่เทคอนกรีตแบบมีรอยต่อรับแรงโดยรวมลดลงจากแบบจำลองที่เทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อ ร้อยละ 8.8 ถึง ร้อยละ 15 และพบว่าปริมาณเหล็กแกนที่เพิ่มขึ้นในคานคอนกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มเหล็กเฉื่อยจากปริมาณเหล็กแกนเดิมร้อยละ 23.66 ถึงร้อยละ 32.62 ทำให้คานคอนกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงเทียบเท่ากับคานคอนกรีตที่ไม่มีรอยต่อได้

คำสำคัญ: หน่วยแรงเหล็กเสริม รอยต่อคอนกรีต เหล็กเฉื่อย

Thesis Title	Stress in Reinforcement at Support of Concrete Beam
Name - Surname	Mr. Chumnahn Noipitak
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Dr. Manoch Rujipakorn
Academic Year	2011

ABSTRACT

Stresses in the reinforcement of concrete beams at the joints between the columns – beams have been studied by modeling of the column - beams. By comparing the column - beam connection model were constructed. These models consist of connection models without construction joint and connection models with construction joint. Beam model sized of 200mm (width) × 400mm (depth) × 100mm (long) reinforced by 4bars diameter of 16 mm bars ($\rho = 0.005$) and 6 mm diameter steel stirrup with spacing 150mm. Culumn model sized of 200mm (width) × 200mm (depth) × 100mm (long) reinforced by 4bars diameter of 16 mm bars ($\rho = 0.02$) and 6 mm diameter steel stirrup with spacing 150mm were used for this studies.

Studies have shown that the connetion model without construction joint has shearing capacity that relavan to the ultimate strength design theory, while connection model with construction joint has only 60 percent. The stresses in the stirrups was maximum developed approximately 25 percent of the allowable stresses that was due to damage of the beam.

The results showed that the strength of the connection model with construction joint decreased by 8.8% – 15% compared with the the connection model without construction joint and found that by increasing of the cross section area of the longitudinal bar range of 23.66% to 32.62% can compensate the loss of connection strength.

Keywords: stress in steel, concrete connection, dowel bar

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศักดิ์ กร้ามาตร ประธานกรรมการหลักสูตร ดร. หมีง จิ่ง ประธานกรรมการ ดร. วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ กรรมการ ดร. สนธยา ทองอรุณศรี กรรมการ และ ดร. มาโนช รุจิภากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอย่างสูงในการแนะนำและให้คำปรึกษา สิ่งที่มีประโยชน์แก่การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชำนาญ น้อยพิทักษ์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	3
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษาวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก.....	6
2.2 การทดสอบแรงเฉือนของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบ JSCE-SF6.....	8
2.3 รอยร้าวในแนวทแยงของคาน ค.ส.ล. ที่ไม่มีเหล็กเสริมทางขวาง.....	8
2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล. ที่ไม่เสริมเหล็กเสริมทางขวาง.....	10
2.5 กลไกระบบแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล.....	10
2.6 การออกแบบเหล็กเสริมแกนรับแรงคัดคาน ค.ส.ล.....	12
2.7 การออกแบบเหล็กเสริมปลอกรับแรงเฉือนคาน ค.ส.ล.....	15
2.8 ข้อกำหนดระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน.....	18
2.9 การวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis (FEA).....	18
2.10 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปถาวร.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.11 ความแปรปรวนของ Residual และ R-squar	28
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบสำหรับทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน	30
3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	32
3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม	34
3.4 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน	37
3.5 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	38
3.6 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม	40
3.7 ลำดับขั้นตอนทดสอบด้วยการจำลองวิธี โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	42
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	45
4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคอนกรีตล้วน	45
4.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	50
4.3 ผลการทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม	53
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลงานวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
รายการอ้างอิง	59
ภาคผนวก	60
ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	61
ประวัติผู้เขียน	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อมูลการทดสอบ แรงเฉือนที่มีรอยต่อ แบบ JSCE - SF6.....	46
4.2 ค่าผลการทดสอบแรงเฉือนสูงสุด.....	51
4.3 ผลเปรียบเทียบ ผลการทดสอบกับวิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีออกแบบ WSD ..	54
4.4 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในเหล็กเคียวที่จุดต่อเสา - คาน กับวิธี โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์..	54



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ลักษณะการเสริมเหล็ก	2
2.1 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก.....	7
2.2 ขนาดแท่นกดทดสอบแรงเฉือนกับแท่งคอนกรีตตัวอย่างวิธีทดสอบ JSCE-SF6.....	8
2.3 รอยร้าวจากแรงเฉือนและแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด	10
2.4 Free Body Diagram แสดงการถ่ายแรงเฉือนบริเวณหน้าตัด	11
2.5 Model การถ่ายแรงเฉือนแบบ Shear – Friction	11
2.6 หน้าตัดแปลง (ร้าว) ของคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึง.....	14
2.7 การวิบัติของคานเสริมเหล็กปัดรับแรงเฉือน	16
2.8 แรงที่เกิดขึ้นบนรอยแตกร้าวในแนวทแยง ของคานเสริมเหล็กปัดรับแรงเฉือน	17
2.9 ระยะห่างสูงสุดของเหล็กปัด.....	18
2.10 แสดงการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ	19
2.11 การวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตร	23
3.1 แท่งคอนกรีตบดทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	30
3.2 การเทคอนกรีต โดยหยดที่บริเวณตรงกลาง.....	31
3.3 แท่งตัวอย่างและการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำ	31
3.4 การประกอบไม้แบบหล่อตัวอย่างเสา - คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	32
3.5 การผูกเหล็กปัดเสากับเหล็กแกนเสา	32
3.6 แบบหล่อพร้อมเหล็กเสริมที่จะเทคอนกรีต สำหรับตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็ก..	33
3.7 การเทคอนกรีตแท่งตัวอย่างตัวอย่างเสา - คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	33
3.8 ประกอบแบบหล่อสำหรับชิ้นส่วนตัวอย่างเสา - คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	34
3.9 เตรียมเหล็กเสริมสำหรับชิ้นส่วนตัวอย่างคานประกอบเข้ากับเหล็กเสริม เสา	34
3.10 เตรียม สเตรนเกจ	35
3.11 การติด สเตรนเกจที่ผิวของเหล็กแกนคาน	35
3.12 การป้องกันแผ่น สเตรนเกจการใช้วัสดุเหนียวติดสายไฟ.....	36
3.13 แท่งตัวอย่างการเทคอนกรีตเสา - คานแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง	36
3.14 เครื่องทดสอบเบรกประสงค์ขนาด 2,000 KN.	37
3.15 แท่นกดทดสอบแรงเฉือน	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.16 การติดตั้งชั้นทดสอบกับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์.....	38
3.17 ภาพชิ้นส่วนคอนกรีตที่ได้ทำการทดสอบแล้ว.....	38
3.18 Structural action of a corbel	39
3.19 การติดตั้งชิ้นส่วนตัวอย่างเสา – คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	39
3.20 จุครองรับที่ยึดติดเรียบร้อยแล้วทั้งสองด้าน	40
3.21 การติดตั้งชุดทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อกรณีมีแรงตัดร่วม กรณีคานช่วงเดียว.....	41
3.22 การเตรียมชิ้นงานก่อนเทคอนกรีตคานยื่น	41
3.23 การติดตั้งชุดทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อกรณีมีแรงตัดร่วม กรณีคานยื่น	42
3.24 ตัวอย่างองค์ประกอบ โครงสร้างแต่ละชั้น.....	43
3.25 ตัวอย่างโครงสร้างแต่ละชั้นที่ทำการ Mesh พร้อมประกอบชิ้นส่วนตัวอย่าง.....	43
3.26 ชิ้นส่วนกำหนดขนาดแรงกระทำ	43
4.1 เทคอนกรีตต่อเนื่อง (ไม่มีรอยต่อ)	45
4.2 เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง (มีรอยต่อ)	46
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระหว่างแรงเฉื่อย กับ เวลา	48
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดกำลังแรงเนื่องกับเวลาหยุดเทคอนกรีต.....	49
4.5 เทคอนกรีตต่อเนื่อง (ไม่มีรอยต่อ)	50
4.6 เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง (มีรอยต่อ)	50
4.7 กราฟ เปอร์เซ็นต์เพิ่มปริมาณเหล็ก เฉพาะกรณีขนาดคานทดสอบ	52
4.8 รูปลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง.....	53
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับความเค้นในเหล็กแกน	53
4.10 รูปลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง.....	55
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับความเค้นในเหล็กเสริม	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจัยที่ควรคำนึงเป็นลำดับต้นๆ ในการก่อสร้าง คือ ความประหยัดในการก่อสร้าง ความสะดวกรวดเร็วในการทำงาน ตลอดจนวิธีการก่อสร้างที่ไม่ยุ่งยาก ส่วนในเชิงวิศวกรรมคือ นำความสามารถและข้อดีในด้านต่างๆ ทางกลศาสตร์ของวัสดุมาใช้งานอย่างเหมาะสมและเต็มประสิทธิภาพสูงสุด

ในงาน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้นำข้อดีด้านกลศาสตร์ของคอนกรีตและเหล็กเสริมมาใช้ร่วมกัน ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กปัจจุบันใช้เหล็กเสริมทำเป็นปลอกเสริมต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวทแยง กรณีแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวตั้งบริเวณรอยต่อของคอนกรีตที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน วิศวกรผู้ฝึชชอบที่เกี่ยวข้องต้องตรวจสอบ ออกแบบเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ การออกแบบเพิ่มเติม เพื่อให้องค์ประกอบของโครงสร้างได้ใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพ อย่างปลอดภัย ผู้ออกแบบจำเป็นต้องรู้ข้อมูลในการออกแบบให้ถูกตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นทำให้มีแนวคิดในการรวบรวมข้อมูล การออกแบบ การดำเนินการก่อสร้าง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น พร้อมนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้น ตลอดจนศึกษาถึงวิธีการเสริมเสริมเหล็กเดือย ผลสรุปของการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำข้อมูลใช้เป็นพื้นฐานในการพิจารณาประกอบการออกแบบของวิศวกร เพื่อการป้องกันความเสียหายอันมาจากแรงเฉือน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคอนกรีตล้วนที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน

1.2.2 ศึกษาแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน

1.2.3 ศึกษาหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงดัดร่วม

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

สมมุติฐานของการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ สมมุติฐานว่ารอยต่อคานกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกกระทำโดยแรงเฉือน มีผลกระทบต่อระบบหน่วยแรงของเหล็กแกนและเหล็กปลอก

1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1.4.1 สร้างแบบจำลองทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วนบริเวณรอยต่อที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกันขนาดหน้าตัดแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ มี 4 ขนาด คือ

- ขนาดหน้าตัด 15 x 7.5 x 50 ซม.
- ขนาดหน้าตัด 15 x 15 x 50 ซม.
- ขนาดหน้าตัด 15 x 22.5 x 50 ซม.
- ขนาดหน้าตัด 15 x 30 x 50 ซม.

ระยะเวลาหยุดเทคอนกรีตแตกต่างกันที่ 0 hr., 0.5 hr., 1 hr., 2 hr., 24 hr. ทดสอบช่วงเวลาละ 6 แท่งตัวอย่าง รวม 120 แท่งตัวอย่าง กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต 180 กก./ตร.ซม.

1.4.2 สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบคานยื่นยาว 1 ม. เสาขนาด 20x20 ซม. ทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน จำนวนรวม 8 แท่งตัวอย่าง มีรูปแบบการเสริมเหล็กแกนแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 1 กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต 180 กก./ตร.ซม. เหล็กแกน SD30 ขนาด DB 16 พื้นที่หน้าตัด 1,930 ตร.ซม. กำลังดึงจุดกลาง 4,027 กก./ตร.ซม. เหล็กปลอก SR24 ขนาด RB 6 พื้นที่หน้าตัด 0.275 ตร.ซม. กำลังดึงจุดกลาง 6,575 กก./ตร.ซม.



ภาพที่ 1.1 ลักษณะการเสริมเหล็ก

1.4.3 สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบช่วงเดียวยาว 4 ม. เสาขนาด 20x20 ซม. ทดสอบหน่วยแรงในเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน จำนวนแบบจำลองละ 2 แห่ง ตัวอย่าง มีรูปแบบการเสริมเหล็กแกนแบบ B1 แสดงในภาพที่ 1.1 กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต 180 กก./ตร.ซม.

1.4.4 สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบคานยื่นยาว 1.2 ม. เสาขนาด 20x20 ซม. ทดสอบหน่วยแรงในเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน จำนวนแบบจำลองละ 2 แห่ง ตัวอย่าง มีรูปแบบการเสริมเหล็กแกนแบบ B1 แสดงในภาพที่ 1.1 กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต 180 กก./ตร.ซม.

1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลจากบทความ วารสาร และตำรา ที่สามารถศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ ทฤษฎีแรงเฉือนและหน่วยแรงในเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.5.2 เตรียมอุปกรณ์และชุดเครื่องมือทดสอบ

1.5.3 ทดสอบหาคคุณสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม ทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมอ้างอิงมาตรฐาน ASTM A370 ทดสอบแรงอัดคอนกรีต อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C39

1.5.4 เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน อ้างอิงมาตรฐาน JSCE-SF6 เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบแรงเฉือนและหน่วยแรงในเหล็กเสริมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงมาตรฐาน ACI-318-63

1.5.5 ทำการทดสอบหาค่าแรงเฉือนและหน่วยแรงในเหล็กเสริมคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้อ 1.5.4

1.5.6 ทำการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสมือนการทดสอบจริงโดยใช้โปรแกรมทางด้าน Finite Element ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

1.5.7 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดสอบ

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษาวิจัย

1.6.1 ขาดการสนับสนุนทุนการวิจัยและงบประมาณของผู้วิจัยที่มีจำกัด เครื่องมือวัดในการทดสอบที่มีราคาแพงเนื่องมาจากเป็นเครื่องมือเฉพาะทาง

1.6.2 การเคลื่อนย้ายตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาดใหญ่ และ น้ำหนักมากทำให้ต้องเพิ่มความปลอดภัยในการยกชิ้นงาน

1.6.3 การสร้างแบบจำลองทดสอบในแนวนอนแทนในแนวตั้ง เนื่องจากทดสอบในแนวตั้งมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงกว่ามาก

1.6.4 ระยะเวลาในการทำการศึกษาวิจัยที่มีอยู่จำกัดเนื่องผู้ทำวิจัยติดภารกิจการทำงานที่ต้องรับผิดชอบ

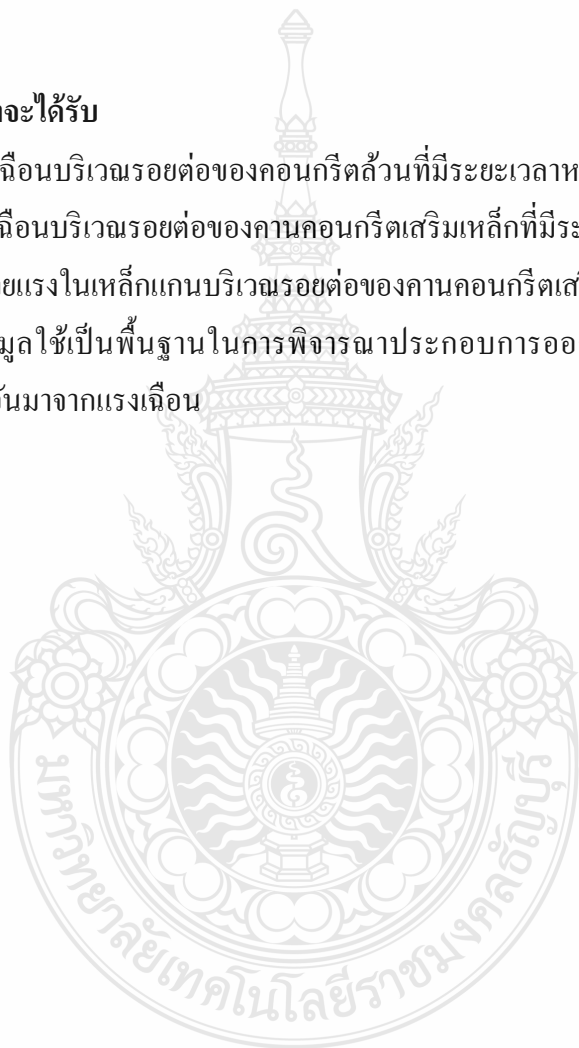
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคอนกรีตล้วนที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน

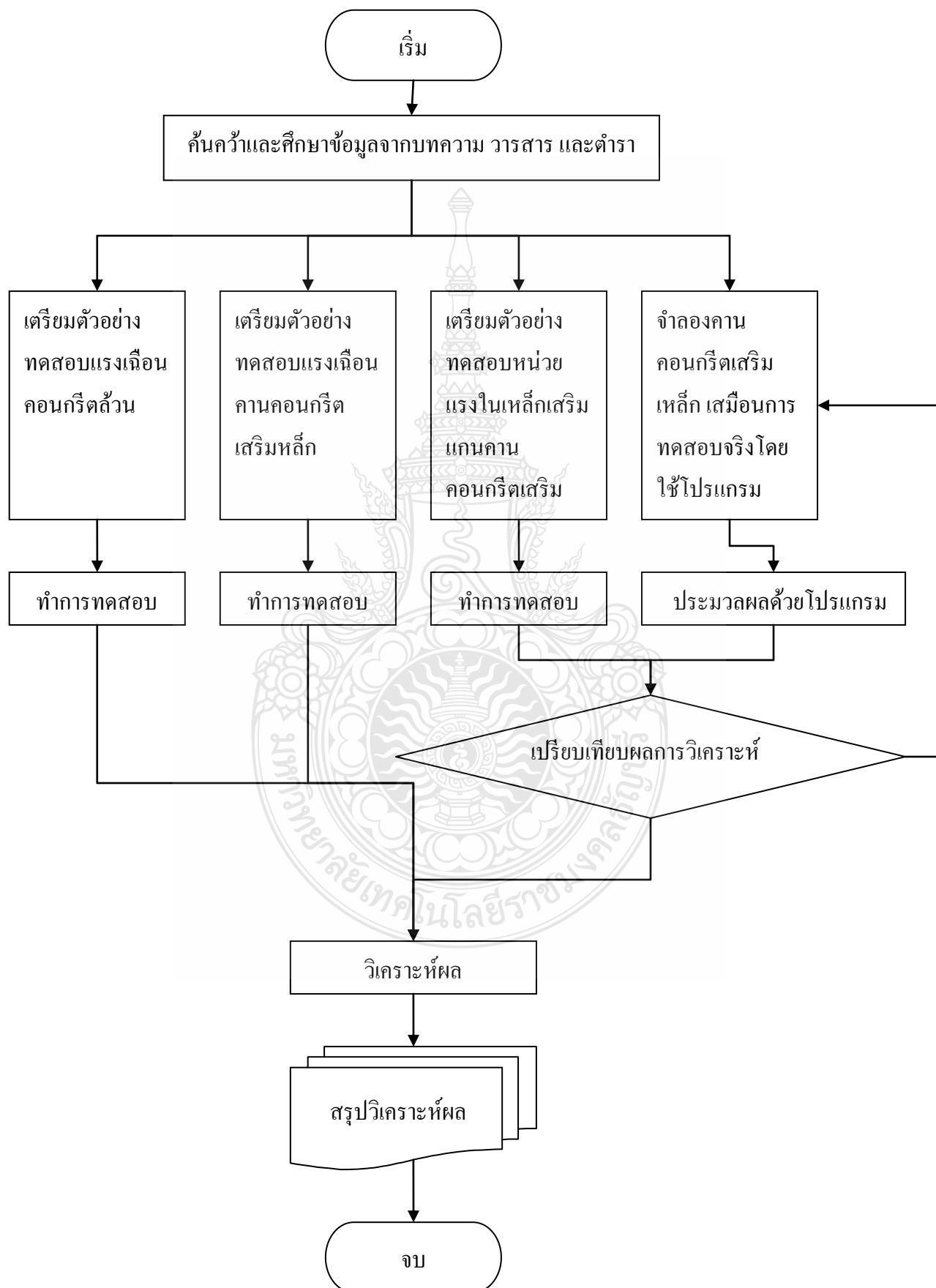
1.7.2 ทราบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเวลาหยุดเทแตกต่างกัน

1.7.3 ทราบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงดัดร่วม

1.7.4 เพื่อนำข้อมูลใช้เป็นพื้นฐานในการพิจารณาประกอบการออกแบบของวิศวกร เพื่อการป้องกันความเสียหายอันมาจากแรงเฉือน



แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาวิจัย



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กำลังเฉือนหรือแรงเฉือนเป็นการกระทำต่อระนาบของแรง 2 แรงที่ขนานและขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้วัสดุแยกออกจากกัน ในโครงสร้างคอนกรีตพบว่าแรงเฉือนมักเกิดจากแรงดึงและแรงอัดซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิชากลศาสตร์วัสดุ แรงเฉือนล้วนๆเกิดได้ในกรณีที่ทำให้แรงบิดกระทำต่อตัวอย่างทรงกระบอก เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำกว่าแรงเฉือน ดังนั้นเมื่อให้แรงบิดต่อคอนกรีต แรงบิดจะทำให้เกิดเป็นแรงดึงทแยง (Diagonal Tension) ในคอนกรีตและส่งผลให้คอนกรีตที่รับแรงบิดแตกร้าวเนื่องจากไม่สามารถรับแรงดึงทแยงได้ หรือในโครงสร้างของคานคอนกรีตที่รับแรงดัดจะพบว่ามีความเค้น และแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัด แรงอัดและแรงดึงที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแรงเฉือนและทำให้คานคอนกรีตแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนที่อยู่ในรูปของแรงดึงทแยงเช่นกัน

การทดสอบเพื่อหาค่าแรงเฉือนของคอนกรีตโดยตรงทำได้ยากและไม่เป็นที่นิยม เพราะมักมีแรงอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น แรงค้ำ แรงเสียดทาน แรงยึดที่ปลายของอุปกรณ์ทดสอบ เป็นต้น กำลังเฉือนของคอนกรีตมีค่าสูงกว่ากำลังดึงโดยตรงประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 (หรือกำลังเฉือนมีค่าประมาณร้อยละ 12 ของแรงอัด) ขณะที่นักวิจัยอีกหลายคนกล่าวว่าการรับกำลังเฉือนของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าการรับกำลังดึงหลายเท่าโดยมีค่าประมาณร้อยละ 50 ถึง 90 ของกำลังอัดอย่างไรก็ตามในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. [1] ได้กำหนดให้คอนกรีตรับแรงเฉือนได้ไม่เกิน $0.53 \sqrt{f_c'}$ สำหรับคานคอนกรีตไม่อัดแรงเมื่อมีแรงเฉือนและแรงดัดกระทำต่อองค์อาคารเท่านั้นและเพิ่มเป็น $1.06 \sqrt{f_c'}$ สำหรับกรณีของพื้นและฐานราก โดยหน่วยของแรงเฉือน (กำลังอัดประลัยของคอนกรีต) มีหน่วยเป็น kg/cm^2

2.1 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก

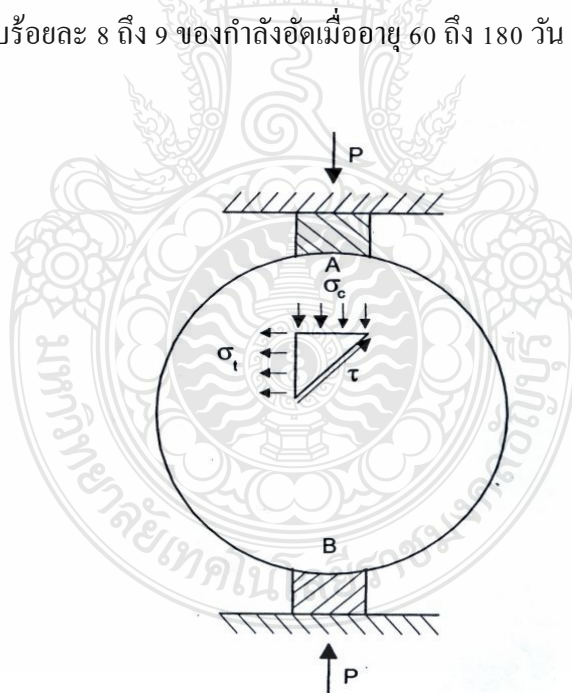
การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Test) พัฒนารึ้นในประเทศบราซิล ASTM C496 [2] ได้กำหนดการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 30 ซม. สูง 30 ซม. วางนอนเพื่อรับแรงกดที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มม. แรงอัดที่ส่งผ่านไม้อัดจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นซึ่งเกือบคงที่ตลอดหน้าตัดคั้งแสดง ดังภาพที่ 2.1 โดยมีแรงอัดที่ผิวสัมผัสระหว่างไม้อัดกับคอนกรีต แต่เนื่องจากคอนกรีตรับแรงอัดได้สูงดังนั้นแรงอัดที่เกิดขึ้นจึงยัง

ไม่ก่อให้เกิดคอนกรีตเสียหาย แต่แรงดึงซึ่งเกิดขึ้นจะเกินกว่าแรงดึงที่คอนกรีตรับได้ คอนกรีตจึงแตกออกเป็น 2 ซีก การคำนวณค่าแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 ส่วนแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะเป็นไปตามสมการที่ 2.2 ซึ่งทั้งสองสมการใช้ทฤษฎีอิลาสติก (Theory of Elasticity) ในการวิเคราะห์

$$\text{แรงดึงของคอนกรีต} \quad \sigma_v = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.1)$$

$$\text{แรงอัดของคอนกรีต} \quad \sigma_c = \frac{2P}{\pi LD} \left[\frac{D^2}{r(D-r)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

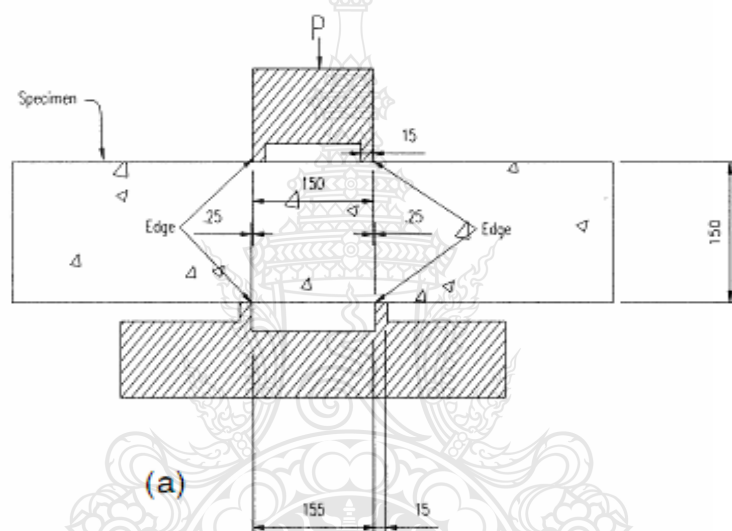
แรงดึงโดยวิธีผ่าซีกจะมีค่าสูงกว่าแรงดึงที่ทดสอบโดยตรงประมาณร้อยละ 15 ขณะที่แรงดึงโดยวิธีผ่าซีกมีค่าประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ของแรงดึงโดยวิธีตัด (โมดูลัสแตกร้าว) สำหรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีกเมื่อเป็นคอนกรีตกำลังสูงมีค่าร้อยละ 10 ถึง 12 ในช่วงอายุ 3 วันหลังจากนั้นจะมีค่าต่ำลงเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 8 ถึง 9 ของกำลังอัดเมื่ออายุ 60 ถึง 180 วัน



ภาพที่ 2.1 การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีก [2]

2.2 การทดสอบแรงเฉือนของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบ JSCE-SF6

การทดสอบแรงเฉือน (Shear) โดยวิธีทดสอบตามวิธีทดสอบมาตรฐานที่เรียกว่า JSCE-SF6 [3] ลักษณะการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.2 ในการทดสอบนี้คือ การเพิ่มน้ำหนักกดแรงเฉือน (P) โดยประยุกต์การเพิ่มน้ำหนัก ทดสอบแรงเฉือนผ่านแท่งกดคู่รอยแตกริ้วของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง ขนาด 150x150 มม. การกำหนดพื้นบริเวณรอยแตกริ้ว (Crack) ตามขอบเขตที่ต้องการ โดยการบากรอยแตกริ้วรอบชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ความลึก 15 มิลลิเมตร การคำนวณหาหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยตามสมการ 2.3 คำนวณหน่วยแรงเฉือนเป็นแบบ Double Shear



ภาพที่ 2.2 ขนาดแท่งทดสอบแรงเฉือนกับแท่งคอนกรีตตัวอย่างวิธีทดสอบ JSCE-SF6 [3]

2.3 รอยร้าวในแนวทแยงของคาน ค.ส.ล. ที่ไม่มีเหล็กเสริมทางขวาง

เมื่อคานรับน้ำหนักหรือแรงกระทำน้อย ๆ ซึ่งคอนกรีตยังไม่เกิดรอยร้าว การรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่เสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวจะคล้ายกับคานคอนกรีตล้วน แต่เมื่อรับน้ำหนักหรือแรงกระทำมากขึ้นจนทำให้บริเวณใต้แกนแนวสะเทินของคานเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัด พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล. จะแตกต่างกันไปเนื่องจากเหล็กเสริมตามยาวที่นำมาใช้จะเริ่มทำหน้าที่หลักคือช่วยรับแรงดึงทั้งหมดที่เกิดจากโมเมนต์ดัด โดยเหล็กเสริมที่ใช้มีส่วนช่วยต้านทานแรงเฉือนน้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แนวแกนสะเทินจึงทำหน้าที่รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว การคำนวณหาหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยที่หน้าตัดคาน ค.ส.ล. (V_c) ดังนี้

$$V_c = V/bd \quad (2.3)$$

เมื่อ

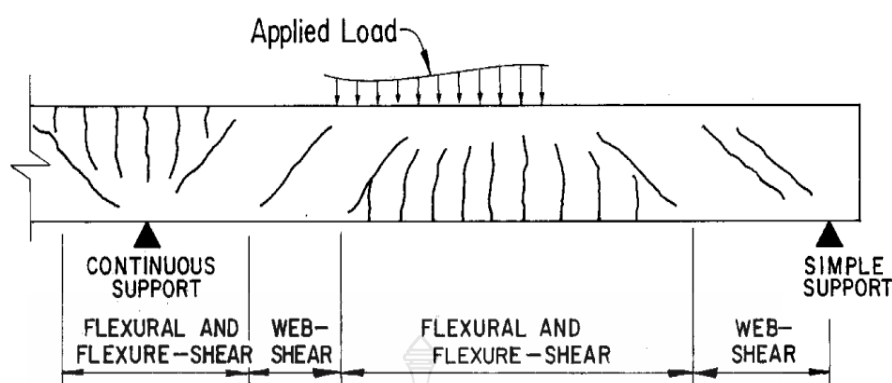
V = แรงเฉือนที่กระทำ

B = ความกว้าง

d = ความลึก

ค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยนี้เป็นเพียงค่าที่แสดงความเข้มเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนที่หน้าตัดเท่านั้น โดยหน่วยแรงเฉือนที่แนวแกนสะเทินจะมีค่ามากที่สุดค่าหนึ่งซึ่งมากกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยอยู่จำนวนหนึ่ง รอยแตกร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นในคาน ค.ส.ล. มีอยู่สองอย่าง คือ รอยร้าวจากแรงเฉือน (Web – Shear Cracks) และรอยร้าวจากแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด (Flexural – Shear Cracks) ดังภาพที่ 2.3 ขึ้นอยู่กับค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่กระทำ กล่าวคือ ที่บริเวณปลายคาน ซึ่งแรงเฉือนที่กระทำมีค่ามากแต่โมเมนต์ดัดที่กระทำมีค่าน้อยรอยร้าวในแนวทแยงจะปรากฏในตัวคาน (Web) โดยค่าของแรงดัดทแยงที่บริเวณแนวแกนสะเทินมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือน (Web – Shear Cracks) ซึ่งจะเกิดกับคานที่ตัวคานมีความหนาแน่นในบริเวณที่แรงเฉือนมีค่ามากแต่โมเมนต์ดัดมีค่าน้อย แรงเฉือนที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าวแบบนี้มีค่าเท่ากับ $0.93 \sqrt{f_c'} \cdot bd$ (kg.)

ที่บริเวณถัดจากปลายคานเข้ามาแต่ไม่ถึงกลางคานซึ่งทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่กระทำมีค่ามาก ในกรณีนี้ที่ท้องคานจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัด (Flexural Cracks) ขึ้นก่อนเมื่อหน่วยแรงดัดที่ผิวมีค่าเกินกว่าค่าของโมเมนต์ดัดแตกร้าว รอยร้าวนี้จะมีแนวตั้งฉากกับแนวยาวของคาน ขณะเดียวกันจะปรากฏรอยร้าวที่บริเวณใกล้กับแนวแกนสะเทินด้วย อันเนื่องมาจากแรงดัดทแยงที่เกิดจากแรงเฉือน เมื่อโมเมนต์ดัดที่กระทำมีค่ามากขึ้นรอยร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัดก็ขยับตัวสูงขึ้น และเมื่อรอยร้าวนี้ขยับเลยจากตำแหน่งที่เสริมเหล็กรับแรงดัด ก็จะมาบรรจบกับรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงดัดทแยง แล้วรอยร้าวนี้จะเบนเข้าหาถึงกลางคาน ลามไปในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงอัด ตามค่าของน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น เรียกรอยร้าวนี้ว่า รอยร้าวจากแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด (Flexural – Shear Cracks) รอยร้าวแบบนี้พบมากกว่ารอยร้าวแบบแรกในบริเวณที่โมเมนต์ดัดมีค่ามาก แรงเฉือนที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าวในลักษณะนี้มีค่าประมาณ $0.50 \sqrt{f_c'} \cdot bd$ (kg.)



ภาพที่ 2.3 รอยร้าวจากแรงเฉือนและแรงเฉือนร่วมกับแรงคด [4]

2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล. ที่ไม่เสริมเหล็กเสริมทางขวาง

กำลังต้านทานแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล. ที่ไม่เสริมเหล็กเสริมทางขวาง สมการเพื่อใช้คาดคะเนกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตในคาน ค.ส.ล. ดังนี้

$$V_c = (0.50\sqrt{f_c'} + 176P_w \frac{V_u d}{M_n}) b_w d \leq 0.93 \sqrt{f_c'} \cdot b d \text{ (kg.)} \quad (2.4)$$

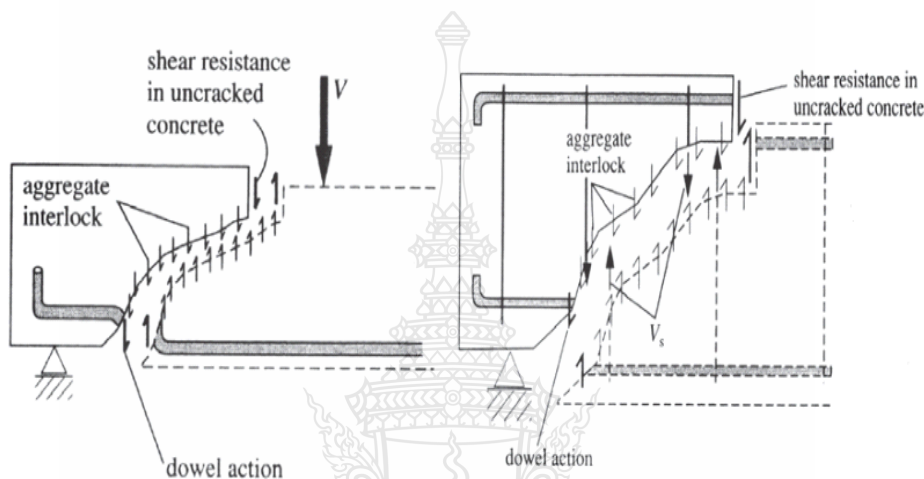
แต่มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ยอมให้คำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล. ที่ไม่มีเหล็กเสริมทางขวาง ทั้งนี้เพื่อให้การคำนวณออกแบบง่ายขึ้น โดยไม่ต้องพิจารณาถึงค่าของอัตราส่วน P_w และ $\frac{V_u d}{M_n}$ ดังนี้

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c'} \cdot b d \text{ (kg.)} \quad (2.5)$$

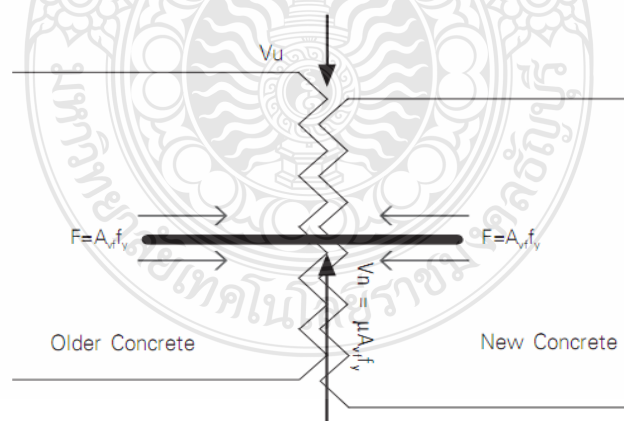
2.5 กลไกระบบแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล.

กลไกระบบแรงเฉือนของคาน ค.ส.ล.ปกติ ประกอบด้วย 3 กลไก ประการแรกคือ ผ่านเหล็กเสริมนอนที่เรียกว่า Dowel Action กลไกนี้เกิดจากแรงปฏิกิริยาด้านทานแรงคด-ดึง ของเหล็กเสริมในตำแหน่งที่เกิดแรงเฉือนที่ประกอบกันกับการต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมอาจกล่าวได้ว่า Dowel Action เป็นกลไกที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม กลไกนี้จะวิบัติเมื่อ หน้าตัดรับแรงเฉือนถึงความสามารถสูงสุด ของหน้าตัด (V_n) นั่นๆ กลไกที่สองถูกเรียกว่า

Aggregate Interlock เป็นการต้านแรงเฉือนที่เกิดจากการขัดกันของอนุภาคมวลรวมแต่ละอนุภาคในหน้าตัดขณะแตกร้าว แรงเสียดทานของมวลรวมแต่ละอนุภาคจะช่วยกันต้านทานแรงเฉือนที่ไหลผ่านหน้าตัด ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) จะกล่าวถึงในภาพรวมของ ผลรวมของแรงประกอบ $0.53 \sqrt{f_c} \cdot bd$ kg. ส่วนกลไกที่สามเป็นการต้านแรงเฉือนของหน้าตัดส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินของหน้าตัดที่ยังไม่แตกร้าวและรับแรงอัดร่วมอยู่ด้วย ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 Free Body Diagram แสดงการถ่ายแรงเฉือนบริเวณหน้าตัด [5]



ภาพที่ 2.5 Model การถ่ายแรงเฉือนแบบ Shear – Friction กรณีแตกคอนกรีตแบบมีรอยต่อ [5]

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho \quad (2.7)$$

2.6.2 ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดในกรณีคานคอนกรีตเสริมเหล็ก การวิบัติอาจเกิดขึ้นได้ หากค่าโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดมีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่แตกร้าว หน้าตัดนี้จะเกิดการวิบัติทันทีทันใด เมื่อเกิดรอยแตกร้าวโดยไม่มีการเตือนภัยก่อน ตามข้อกำหนดของ ACI (1999) และมาตรฐานว.ส.ท. (2545) ได้กำหนด ร้อยละของเหล็กเสริมต่ำสุดให้เท่ากับ

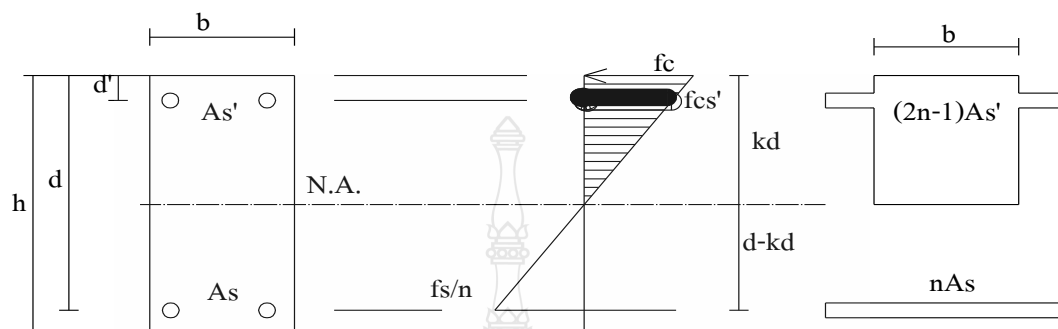
$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} \quad (2.8)$$

ร้อยละของเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) นี้ได้จากการคำนวณโมเมนต์ดัดแตกร้าวของคานคอนกรีตล้วนแล้วให้มีค่าเท่ากับ กำลังของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดเท่ากัน ร้อยละของเหล็กที่ได้จะเป็นค่าเหล็กเสริมน้อยที่สุดหรือในอีกทางเลือกหนึ่งเนื้อที่ของเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับทุกหน้าตัดที่รับโมเมนต์บวกหรือ โมเมนต์ลบต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่า 1.33 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของแผ่นพื้นคานนี้ไม่สามารถใช้ได้ ให้ใช้ปริมาณของเหล็กเสริมต่ำสุด ที่ใช้สำหรับด้านการยึดเหนี่ยวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.6.3 สำหรับกรณีที่มีคานคอนกรีตเสริมรับแรงอัด การพิจารณาเปลี่ยนเนื้อที่แปลงหน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัดให้เป็นเนื้อที่หน้าตัดของคอนกรีตที่เทียบเท่า ต้องพิจารณาด้วยว่าคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดสามารถหดตัวได้เพิ่มขึ้นตามกาลเวลาภายใต้แรงอัดที่กระทำคงที่อันเนื่องมาจากผลการคืบตัวของคอนกรีต (Creep) ซึ่งมีผลให้เหล็กเสริมรับแรงอัดเกิดการหดตัวมากขึ้นและหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมที่รับแรงอัดมีค่ามากขึ้นกว่าปกติที่คำนวณได้ตามระยะห่างจากแกนสะเทิน มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดให้หน่วยแรงเสริมรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของหน่วยแรงปกติที่คำนวณได้ตามระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าหน่วยในแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม นั่น นั่นคือ ถ้า f_{cs} เป็นหน่วยแรงอัดของคอนกรีตบนหน้าตัดแปลงตรงตำแหน่งที่เสริมเหล็กรับแรงอัดที่คำนวณได้ตามระยะที่ห่างจากแกนสะเทินของหน้าตัดแปลง ดังนั้นหน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัด $f_{s'} = 2f_{cs} \leq f_s$ กก./ตร.ซม.

หมายเหตุ หน่วยแรงอัดของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริมรับแรงอัดและหน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัดดังกล่าวข้างต้น มิใช่หน่วยแรงที่แท้จริงที่จะพิสูจน์ด้วยการทดลอง หากแต่เป็นค่าที่ใช้สำหรับการพิจารณาคำนวณออกแบบเท่านั้น ดังนั้น เนื้อที่หน้าตัดแปลงของเหล็กเสริมรับแรงอัดจะมีค่าเท่ากับ $(2m-1) A_s'$ เมื่อคิดเนื้อที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเหล็กเสริมรับแรงอัด ดังภาพที่

2.6 อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาให้เนื้อที่หน้าตัดแปลงของเหล็กเสริมรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ $2nA_s'$ โดยไม่คิดหน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเหล็กเสริมรับแรงอัดก็ได้ซึ่งจะไม่ทำให้ผลการคำนวณผิดพลาดมากนัก



ภาพที่ 2.6 หน้าตัดแปลงของคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึง [6]

$$\rho = \frac{A_s}{bd} ; \rho' = \frac{A_s'}{bd} \quad (2.9)$$

$$k = \sqrt{n^2(2\rho' + \rho)^2 + 2n\left[\rho + 2\rho'\left(\frac{d'}{d}\right)\right]} - n(2\rho' + \rho) \quad (2.10)$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2 + 2nA_s'(kd - d')^2 \text{ cm.}^4 \quad (2.11)$$

$$f_c = \frac{Mkd}{I_{cr}} \text{ ksc.} \quad (2.12)$$

$$f_s = \frac{Mn(d - kd)}{I_{cr}} \text{ ksc.} \quad (2.13)$$

$$f_{s'} = \frac{kd - d'}{d - kd} 2f_s = \frac{M2n(kd - d')}{I_{cr}} \text{ ksc.} \quad (2.14)$$

2.7 การออกแบบเหล็กเสริมปลอกรับแรงเฉือนคาน ค.ส.ล.

ในการออกแบบหน้าตัดขององค์อาคารเพื่อรับแรงเฉือนนั้นต้องออกแบบโดยให้แรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากำลังเฉือนระบุขององค์อาคาร

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.15)$$

เมื่อ

V_u = แรงเฉือนประลัยที่คูณด้วยตัวคูณน้ำหนักบรรทุกแล้วที่หน้าตัดวิกฤติขององค์อาคาร

V_n = กำลังเฉือนระบุที่หน้าตัดวิกฤติขององค์อาคาร

ϕ = ตัวคูณลดกำลัง มีค่ากับ 0.85

เมื่อเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนกำลังระบุขององค์อาคารสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_n = V_c - V_s \quad (2.16)$$

เมื่อ

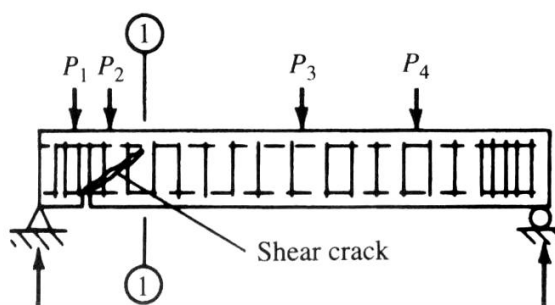
V_c = แรงเฉือนระบุที่คอนกรีตรับได้

V_s = แรงเฉือนระบุที่เหล็กเสริมรับได้

เมื่อแทนค่า V_n จากสมการ 2.16 ลงในสมการ 2.15 จะได้

$$V_u \leq \phi (V_c - V_s) \quad (2.17)$$

พิจารณาคานเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือน รับแรงกระทำ เมื่อคานเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยง เมื่อตัดคานที่หน้าตัด 1-1 ดังภาพที่ 2.7 มาพิจารณาพบว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความเครียดขึ้นในเหล็กปลอกจนถึงจุดคลาก กำลังรับแรงเฉือนระบุของเหล็กปลอก (V_s) สามารถคำนวณได้จากสมการ



ภาพที่ 2.7 การวิบัติของคานเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือน [7]

$$V_s = A_v f_y n \quad (2.18)$$

เมื่อ

A_v = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (2 ขา)

f_y = หน่วยแรงดึงที่จุดกลางของเหล็กปลอก

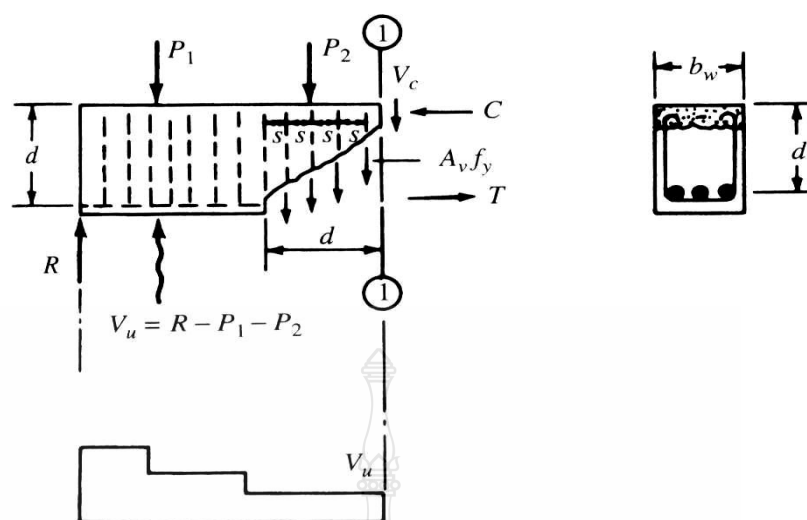
n = จำนวนเหล็กปลอกบนรอยแตกกว้างในแนวแท่ง

จากสมดุลของแรงในแนวดิ่งในภาพที่ 2.7 จะได้ว่า

$$R - P_1 - P_2 = \phi (V_c - V_s) \quad (2.19)$$

$R - P_1 - P_2$ = แรงเฉือนประลัย (V_u) ที่หน้าตัดวิกฤติขององค์อาคาร
แทนค่า V_s จากสมการที่ 2.18 ลงในสมการที่ 2.17 จะได้ว่า

$$V_u = \phi V_c + \phi A_v f_y n \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.8 แรงที่เกิดขึ้นบนรอยแตกร้าวในแนวทแยง ของคานเสริมเหล็กปดกรับแรงเฉือน [7]

จากภาพที่ 2.8 ภาพฉายของรอยแตกร้าวในแนวราบสมมุติให้รอยแตกร้าวมีความลึกเท่ากับระยะ d ของคานจำนวนเหล็กปดที่อยู๋บนรอยแตกร้าวคำนวณได้จาก $n = \frac{d}{s}$ เมื่อแทนค่า n ลงในสมการที่ 2.20 จะได้ว่า

$$V_u = \phi V_c + \phi A_v f_y \frac{d}{s} \quad (2.21)$$

และเมื่อจัดรูปแบบสมการที่ (2.21) ใหม่จะได้ว่า

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_y d} \quad (2.22)$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณระยะห่างของเหล็กปด (s) ได้จากสมการ

$$s = \frac{\phi A_v f_y d}{V_u - \phi V_c} \quad (2.23)$$

2.8 ข้อกำหนดระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เหล็กปลอกต้องมีระยะห่างสูงสุดไม่มากกว่า $\frac{d}{2}$ เมื่อ $V_u \leq 1.59 \phi \sqrt{f_c'}$ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงระหว่างเหล็กปลอกซึ่งจะแบ่งคานออกเป็นสองส่วน การเสริมเหล็กปลอก ระยะห่างไม่มากกว่า $\frac{d}{2}$ จะทำให้มั่นใจได้ว่ามีเหล็กปลอกอย่างน้อย 1 เส้นเสริมอยู่ระหว่างรอยแตกร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 2.4 และจะมีเหล็กปลอกอย่างน้อย 3 เส้นเสริมอยู่ระหว่างรอยแตกร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ระยะห่างไม่มากกว่า $\frac{d}{4}$ กรณี $V_u > 1.59 \phi \sqrt{f_c'}$



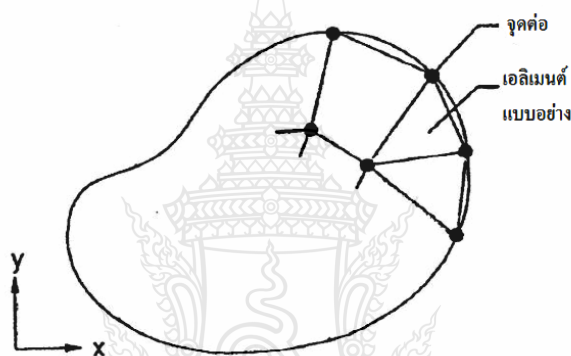
ภาพที่ 2.9 ระยะห่างสูงสุดของเหล็กปลอก [8]

2.9 การวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis (FEA)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบและใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อจะแก้สมการ ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะการมีแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) และเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (Node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมนจากนั้นจึงแก้ระบบสมการดังกล่าวซึ่งจะได้เฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมน จุดเด่นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ ความสามารถในการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน ได้เป็นอย่างดี อุปสรรคที่เป็นสาเหตุทำให้ผู้คนไม่เข้าใจระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยชัดแจ้งคือ การเปลี่ยนแปลงระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ให้ไปเป็นสมการทางพีชคณิตสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ การแปลงดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ขั้นสูง รวมทั้งการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบต่างๆ กัน เช่น การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Functions) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ การประยุกต์วิธีหาค่าอนุพันธ์และอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Differentiation and Integration) การประยุกต์ระเบียบวิธีการแก้ระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linear) หรือไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ก็ได้ หากระบบสมการนั้นอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ก็จำเป็นต้องประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ชนิดอื่นเพื่อช่วยแก้สมการเพิ่มเติมเข้าไปอีก เหตุผลต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้เองทำให้การเรียนรู้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นสิ่งจำเป็นก่อนการทำความเข้าใจในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวมานี้ ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่องที่มีจำนวนนับได้ ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหา ดังภาพที่ 2.10 เราเรียกชิ้นส่วนย่อย สมการที่สร้างขึ้นจะต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันเข้าเป็นสมการชุดใหญ่ ซึ่งผลเฉลยที่ได้รับจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้น



ภาพที่ 2.10 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ [9]

2.9.1 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งเขตรูปร่างของปัญหา ที่ต้องการหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กันเช่นปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)

2) ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.10 โดยต่อจุดนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า โดยตัวไม่ทราบค่าเหล่านี้อาจเป็นการยืดหรือหดตัว (Displacement) หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิก็ได้ ลักษณะการกระจายของตัวแปรเหล่านี้บนเอลิเมนต์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณค่าที่จุดต่อได้ดังสมการที่

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + \dots + N_i(x, y)\phi_i \quad (2.24)$$

เมื่อ

$N_i(x, y)$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

ϕ_i คือ ค่าของตัวแปรที่จุดต่อ และ $i = 1, 2, 3 \dots n$

1) ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการเอลิเมนต์ (Element Equation) ดังตัวอย่าง เช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังภาพที่ 2.1 จะอยู่ในรูปดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} \phi \\ \phi \\ \phi \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} F \\ F \\ F \end{bmatrix}_e \quad (2.25)$$

ซึ่งสามารถเขียนย่อให้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.26)$$

ขั้นตอนการสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ 2.2 นี้ถือว่าเป็นหัวใจของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสองวิธีการที่สำคัญในการสร้างสมการของเอลิเมนต์ของปัญหาที่มีความซับซ้อนในสองลักษณะ 2 มิติที่มีความต่อเนื่อง (Continuum Problem) คือวิธีการแปรผัน (Variational Approach) และ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) โดยวิธีการเลอว์คิน (Galerkin)

4) ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equation) ในรูปแบบดังสมการ

$$\sum (\text{Element Equation}) \rightarrow [K]\{\phi\} = \{F\} \quad (2.27)$$

5) ขั้นตอนที่ 5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ลงในสมการ 2.27 แล้วจึงแก้สมการเพื่อหา $\{\phi\}$ อันประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns)

6) ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบได้ เช่น เมื่อทราบระยะการกระจัด (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างสามารถนำไปใช้หาความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลได้ เป็นต้น

จากที่กล่าวข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่า ผู้ที่จะสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่คำนวณได้นั้น จำเป็นต้องมีความรู้ในหลายด้าน ได้แก่

1. ความเข้าใจในคณิตศาสตร์ขั้นสูงที่เกี่ยวข้องกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น
2. ความรู้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านั้นให้อยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิตเพื่อสามารถนำไปใช้แก้หาผลลัพธ์ได้
3. ความรู้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบต่างๆ กัน เพื่อประยุกต์สำหรับการประดิษฐ์สมการพีชคณิตเหล่านี้ รวมทั้งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้ระบบสมการขนาดใหญ่
4. ความเข้าใจในไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ประกอบด้วยขั้นตอนของการคำนวณที่สอดคล้องกับความเข้าใจในทฤษฎี ซึ่งจะก่อให้เกิดความมั่นใจในผลลัพธ์ที่คำนวณได้
5. ประสบการณ์ในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้เกิดความเข้าใจในผลลัพธ์ได้โดยลึกซึ้งอย่างรวดเร็ว อาจกล่าวได้ว่า ความจำเป็นที่ต้องมีความรู้ที่เหมาะสมอย่างเพียงพอในหลายๆ ด้าน ดังที่กล่าวมานี้ นับเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการเข้าถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างไรก็ตาม หากได้มีความเข้าใจในทุกๆ ด้านนี้แล้ว จะเห็น โอกาสที่เปิดกว้างสำหรับการแก้ปัญหาที่หลากหลายทั้งงานในทางวิศวกรรมและงานในศาสตร์อื่นๆ ในการแก้ปัญหาที่หลากหลายนี้จะเกิดความเข้าใจและเห็นคุณค่าในคณิตศาสตร์มากขึ้นตามลำดับ รวมทั้งได้รับประสบการณ์ในการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณประยุกต์เข้ากับคณิตศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์ที่แม่นยำ อันจะนำไปสู่ความเข้าใจในปัญหาและการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

หลักการทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement Function) ซึ่งนำมาแทนเอลิเมนต์และเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องในแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมโยงกันด้วยจุดต่อ (Node) และเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์ที่สัมผัสกัน โดยอาศัยการกำหนดคุณสมบัติทางกลที่ถูกต้องให้กับวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน เราสามารถหาการกระจัด ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของเอลิเมนต์ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน ซึ่งเป็นขั้นตอนทั่วไปที่คล้ายกันดังต่อไปนี้

2.9.2 การกำหนดเมฆ

ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบต่อเนื่องที่ลำดับชั้นต่างๆ เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องหาพื้นฐานของเมฆบนการเปลี่ยนรูปและสถานะปัจจุบันของวัสดุ ผลของการศึกษาการเกิดเมฆใหม่ซึ่งนำไปสู่การออกแบบการวิเคราะห์แบบต่อเนื่องที่ดีกว่า การศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นก่อนจากการวิเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นทุกๆ โหนด จุดที่มีการแปรผันจะมีการเปลี่ยนรูปจากเมฆเก่าไปยังเมฆใหม่ การเปลี่ยนรูปนี้ประกอบด้วยขั้นตอนอื่นตามมา สำหรับการศึกษาแบบสองมิติ เมฆใหม่สามารถหาได้โดยการควบคุมบริเวณที่เหมือนกันของการเปลี่ยนรูปเมฆเก่าที่ขอบเขตเส้นโค้งจะมีการเปลี่ยนเมฆเกิดขึ้น การแบ่งส่วนของอัลกอริทึม สมมติบริเวณที่เหมือนกันของแบบโดยการกำหนดเมฆใหม่แทนเมฆเก่า เมฆใหม่นี้บางทีอาจมีเลขโหนดที่มีความสมบูรณ์แตกต่างจากเมฆเก่า จำนวนของเอลิเมนต์ การเชื่อมกันของเอลิเมนต์ การกำหนดขอบเขตและอื่นๆ การหาความต่อเนื่องสำหรับทุกๆ โหนดและการแปรผันของเอลิเมนต์ อันดับแรกจุดที่มีการแปรผันทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นของโหนดแทนการเปลี่ยนรูปของเมฆเดิม อันดับที่สอง แบ่งเมฆทั้งหมดออกในรูปเรขาคณิตเมื่อรู้มุมของรูปทรงเหล่านี้และ โหนดเกิดขึ้นพร้อมกันหรือตรงกลางเอลิเมนต์ของรูปทรงเหล่านี้ ขั้นตอนทั้งหมดนี้เป็นที่ทราบกันดีคือ “บริเวณที่เรียบโดยสามเหลี่ยม” และใช้กันบ่อยในการกำหนดจุดประสงค์ การแปรผันในโหนดใหม่สามารถหาได้โดยตัวอย่างเชิงเส้นภายในสามเหลี่ยมของเมฆเดิม บ่อยครั้งที่ทุกๆ โหนดในเมฆใหม่ฝังตัวอยู่ภายในสามเหลี่ยม อย่างไรก็ตาม บนขอบเขตของเมฆ โหนดในเมฆใหม่ บางครั้งอาจอยู่ข้างนอกเมฆเก่า ในกรณีนี้บริเวณที่อยู่ใกล้สามเหลี่ยมจะถูกใช้และประยุกต์ใช้ในสมการเชิงเส้น ปริมาณของจุดสามเหลี่ยมของเอลิเมนต์ใหม่สามารถหาได้โดยการอินเตอร์โพลเรสโหนดต่างๆ ตัวแปรทั้งหมดสามารถอินเตอร์โพลเรสในทางนี้ ผลเฉลยสามารถหาได้ในเมฆใหม่

2.9.3 การกำหนดสมบัติวัสดุ

การทดสอบหาค่าสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติทางกลแบบยืดหยุ่น-พลาสติก ผู้วิจัยได้ใช้การทดสอบแรงดึงวัสดุ JIS SS400 และใช้เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal Testing Machine (UTM.) โดยใช้ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที วัสดุประสงค์เพื่อทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุ และสามารถนำมาเขียนแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ของวัสดุในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงยกกำลัง คือ

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n + Y \quad (2.28)$$

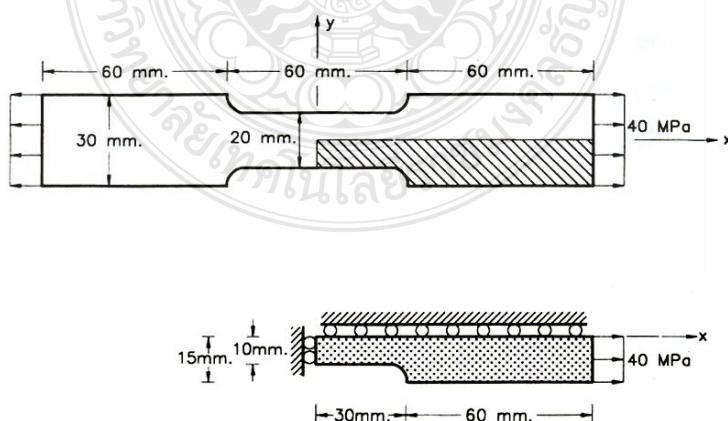
ค่า n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง K คือสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ และค่า Y คือความเค้นคราก สำหรับการกำหนดสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้วัสดุมีสมบัติเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก

2.9.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการสัมผัสระหว่างวัตถุเป็นการกำหนดค่าฟังก์ชันระยะสัมผัส โดยหากระยะระหว่างโหนดระหว่างวัตถุกลุ่มสัมผัสใดที่อยู่ในช่วงค่านี้จะพิจารณาว่าโหนดมีการสัมผัสกันในการวิเคราะห์แก้สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าวิธีสตีฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ที่ต่อเนื่องของโครงสร้างเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (2.29)$$

ซึ่ง $\{F\}$ คือเมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ $[K]$ คือสตีฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบและ $\{d\}$ คือ เมทริกซ์รวมของการกระจัดซึ่งอาจจะทราบค่าเพียงบางค่า จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) หรือเงื่อนไขบังคับ (Constrain) หรือ จุดรองรับ (Support) เพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์สามารถหาค่าการกระจัดในจุดต่อที่ต้องการได้ ตัวอย่างชนิดเงื่อนไขขอบต่างๆ คือแบบฟิกซ์ (Fix) แบบสไลด์ (Slide) แบบพิน (Pin) แบบอิสระ (Free) และแบบสมมาตร (Symmetry) ตัวอย่างการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตรแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตร [9]

2.9.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

สมการการแตกหักที่ใช้ในการคำนวณขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการทดลองใช้สมการการแตกหักของ Rice & Tracy ซึ่งสามารถประยุกต์แรงที่ใช้และง่ายในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งแสดงดังสมการ

$$C_{\text{Rice\&Tracy}} = \int_0^{\bar{\epsilon}} e^{\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}}} d\bar{\epsilon} \quad (2.30)$$

เมื่อ

σ_m = ความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress)

α = พารามิเตอร์ปรับแก้

C = เกณฑ์ความเสียหายของวัสดุ (Fracture Criteria)

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress)

$\bar{\epsilon}$ = ความเครียดประสิทธิผล (Effective Strain)

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.31)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.32)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (2.33)$$

เมื่อ

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = ความเค้นหลัก

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ = ความเครียดหลัก

2.10 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปถาวร

สภาพความเค้นและการกระจายความเค้นมีนิยามว่าเป็นแรง F ที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ A

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.34)$$

2.10.1 ความเค้นเบี่ยงเบน

ความเค้นไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Stress) มีความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับทฤษฎีการเปลี่ยนรูปถาวร สภาพความเค้นแบบนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร สภาพความเค้นในสามมิติทั่วไปจะมีส่วนหนึ่งเป็นความเค้นไฮโดรสแตติกคือ

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2.35)$$

เมื่อ

σ_m = ความเค้นเฉลี่ย

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = ความเค้นฉาก

ความเค้นเบี่ยงเบน (Stress Deviator) ทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การหาค่าความเค้นนี้ทำได้โดยเอาเทนเซอร์ของความเค้นไฮโดรสแตติกไปลบออกจากเทนเซอร์ของความเค้นปกติ

$$\begin{array}{l} \text{Stress Tensor} - \text{Hydrostatic Stress} = \text{Stress deviator} \\ \left[\begin{array}{ccc} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{array} \right] - \left[\begin{array}{ccc} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{array} \right] \\ T - T_H = T' \end{array} \quad (2.36)$$

2.10.2 วงกลมความเค้นของโมห์

ในการจะหาความเค้นที่จุดใดๆ บนวัตถุจะแบ่งวัตถุออกเป็นปริมาตรเล็กๆ ซึ่งมีรูปร่างสอดคล้องกับระบบแกน สำหรับระบบแกนตั้งฉากจะเลือกปริมาตรเล็กๆ ให้มีรูปร่างเป็นกล่องสี่เหลี่ยมสภาพความเค้นภายในปริมาตรเล็กๆ เป็นแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากภาวะภายนอก เช่นแรงและ

โมเมนต์ผลจากการที่ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากันจึงทำให้สภาพความเค้นประกอบด้วย ความเค้นปกติ 3 ตัว และความเค้นเฉือน 3 ตัว ขนาดของความเค้นปกติและความเค้นเฉือนที่กระทำกับวัตถุขึ้นอยู่กับ ระบายที่ความเค้นกระทำ ดังนั้นจึงมีอยู่ 3 ระบายที่ความเค้นเฉือนเป็นศูนย์ และความเค้นปกติมีค่าสูงสุด ซึ่งเรียกว่า ความเค้นหลัก

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx}; \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2.37)$$

ดัชนีตัวแรก : ระบายที่กระทำ, ดัชนีตัวที่สอง: ทิศทาง

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.19 จะได้ว่า ความเค้นหลัก σ_1 ตั้งฉากกับ σ_2 ตั้งฉากกับ σ_3 หมายความว่า ความเค้นหลักทั้งสามตั้งฉากซึ่งกันและกัน ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_x , σ_y และ σ_z กับ τ_{xy} กับความเค้นหลัก σ_1 , σ_2 และ σ_3 สามารถแสดงได้บนระนาบโดยวงกลมของโมห์ จากข้อตกลงทางด้านความเค้น ความเค้น σ_1 มีค่าสูงสุดทางพีชคณิต และ σ_3 มีค่าน้อยสุดทางพีชคณิต ดังนั้น $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ การแบ่งสภาพความเค้นว่าเป็นหนึ่ง สอง หรือสามมิติก็ดูจากค่า σ_1 , σ_2 และ σ_3 วงกลมความเค้นของโมห์เป็นวิธีการสร้างรูปแสดงสภาพความเค้นบนระนาบที่ σ_1 และ σ_2 กระทำกับแกนของวงกลมกำหนดโดยค่าความเค้นฉากและความเค้นเฉือนที่จุดนั้นในทิศทางใด ๆ อย่างไม่ก็ตามในการหาค่า τ_{xy} ยังต้องอ้างอิงกับทฤษฎีต่างๆที่สำคัญเช่นทฤษฎีของ Tresca, Mohr และทฤษฎีของ V. Mises, Hencky ในการหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบแม่นยำตรงในปัญหาด้านการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุสำหรับชิ้นงานโลหะแผ่นและโลหะแผ่นก๊อ

2.10.3 ปริมาตรคงที่

กฎปริมาตรคงที่กล่าวว่า ปริมาตร V_0 ของวัสดุก่อนการขึ้นรูปมีค่าเท่ากันพอดีกับปริมาตร V_1 หลังการขึ้นรูป

$$V_0 = V_1 \quad (2.39)$$

กฎนี้ได้ทำการตรวจสอบกันมากในทางปฏิบัติมีเพียงชิ้นงานหล่อเท่านั้นที่หลังการขึ้นรูปแล้วปริมาตรหายไป ทั้งนี้เนื่องจากความมีเนื้อพูนของเหล็กหล่อ

แม้จะมีผิวที่แข็งขึ้น (โดยการขึ้นรูปเย็น) ก็จะไม่เกิดปริมาตรลดลง การเกิดความแข็งไม่ได้เป็นเพราะเนื้อวัสดุถูกกดเข้าด้วยกัน แต่เป็นเพราะเกิดการเคลื่อนที่การเกาะกันของความคลาดเคลื่อนตำแหน่ง

2.10.4 เงื่อนไขในความเค้นไหล

เงื่อนไขความเค้นไหล (Flow Stress) หรือสมมติฐานในการไหลเกี่ยวข้องกับว่าภายใต้ภาระใดที่วัสดุจะเริ่มไหล เมื่อวัสดุรับแรงดึงในแนวแกนจะเริ่มการไหลอย่างถาวรในทันทีที่ความเค้นถึงบนพื้นที่ภาคตัด มีค่าถึงจุดครากหรือเมื่อให้มีการกดในด้านข้างก็จะเกิดการไหลในแนวยาวการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรในกรณีนี้เป็นเพราะความเค้นในแนวยาวมีค่ามากกว่าความเค้นที่จุดครากเป็นการไม่เพียงพอที่จะพิจารณาเงื่อนไขในการไหลเฉพาะความเค้นที่มีค่าสูงสุดเงื่อนไขในการไหลเป็นฟังก์ชันจะต้องพยายามทำให้ ความเค้นทั้งหกเป็นความเค้นค่าหนึ่ง เป็นค่าความเค้นเปรียบเทียบเพื่อที่จะได้ใช้เป็นค่าที่กำหนดว่าเมื่อใดจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร จากการพิจารณาข้างต้นทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขในการไหลในรูปทั่วไปได้

ในกรณีทั่วไปเงื่อนไขในการไหลไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของสภาพความเค้น แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของความเค้นที่ทำให้เกิดการเสียรูปเนื่องจากในช่วงก่อนเกิดการไหลจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น ช่วงนี้จึงคำนวณได้ตามกฎของฮุกเป็นที่ยอมรับว่าฟังก์ชันความเค้นไหล ซึ่งยังไม่รู้ค่าขึ้นอยู่กับความเค้นเพียงอย่างเดียว

$$k_f = f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) \quad (2.40)$$

ค่าทางด้านขวาของสมการเป็นค่าที่ต้องหามาเพื่อใช้เป็นความเค้นเปรียบเทียบ

เมื่อความเค้นเปรียบเทียบน้อยกว่าค่า k_f วัสดุจะเสียรูปอย่างยืดหยุ่นเมื่อมีค่าเท่ากับ k_f แสดงว่าเริ่มต้นการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อค่าความเค้นเปรียบเทียบมากกว่าค่า k_c ไม่อาจบอกอะไรได้

จากเงื่อนไขในไหลต่างๆ มีอยู่เพียงสองเงื่อนไขที่ใช้ได้อย่างดีสอดคล้องกับผลการทดลอง

1. สมมติฐานความเค้นเฉือน (Tresca, Mohr)
2. สมมติฐานพลังงานแปรรูป (V. Mises, Hencky)

เงื่อนไขในการ Flow ทั้งสองนี้ เป็นพื้นฐานที่ใช้กันเป็นอย่างมากทางด้านทฤษฎีพลาสติกที่ดี

2.10.5 สมมติฐานความเค้นเฉือนจาก Tresca และ Mohr

สมมติฐานความเค้นเฉือนกล่าวว่า วัสดุที่ตำแหน่งแน่นอนของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและคงอยู่อย่างนั้นได้เมื่อความเค้นเฉือนค่าสูงสุดที่กระทำที่ตำแหน่งนี้เกินค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งจะได้เงื่อนไขในการไหลตัวว่า

$$|\tau_{\max}| = k \quad (2.41)$$

จากความสัมพันธ์นี้ k (ขึ้นอยู่กับวัสดุ) เป็นข้อจำกัดในการไหลซึ่งสามารถหาได้โดยการทดสอบแรงเฉือน ในกรณีที่เป็สภาพความเค้นในระนาบ ซึ่งความเค้นหลักสูงสุดที่กระทำบนระนาบคือ σ_1 และความเค้นหลักต่ำสุดคือ σ_3 ซึ่งอาจแสดงได้โดยวงกลมความเค้นของโมห์ทำให้ทราบได้ว่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่กระทำบนระนาบมีค่าเท่าใด โดยดูจากระศิมของวงกลมความเค้นของโมห์ ความเค้นเฉือนนี้เป็นความเค้นเฉือนสูงสุดบนเอลิเมนต์ที่พิจารณา

เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมของโมห์ หาได้จากผลต่างของความเค้นหลักสูงสุดกับความเค้นหลักต่ำสุด ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = k \quad (2.42)$$

สมมติฐานความเค้นเฉือนพิจารณาโดยการตัดสินใจว่า สภาพความเค้นอย่างหนึ่งทำให้วัสดุเกิดการไหล โดยความเค้นที่มีอยู่ส่วนหนึ่งเพียงอย่างเดียว (ตัวอย่างเช่น ความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นต่ำสุด)

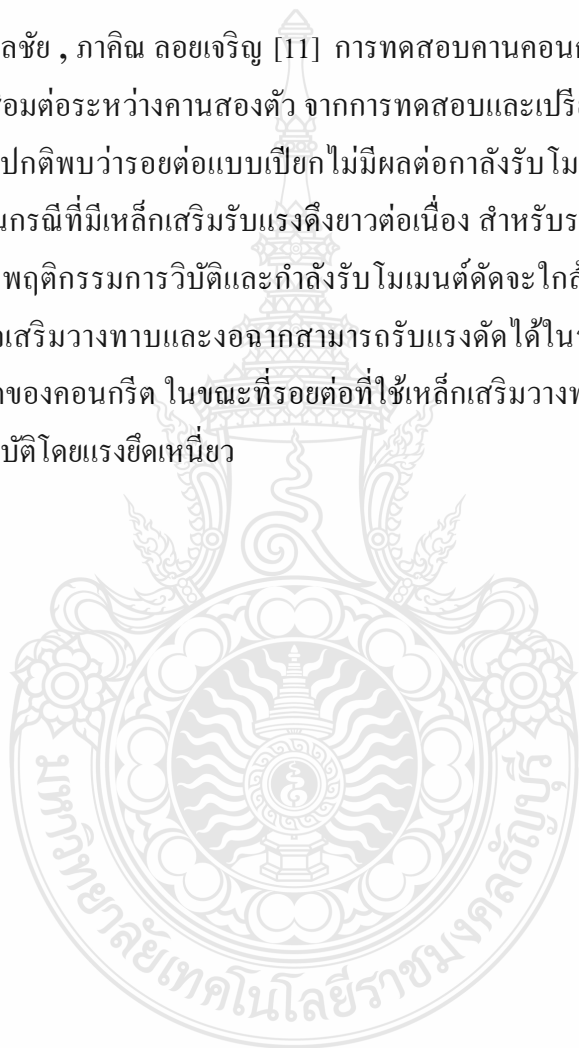
2.11 ความแปรปรวนของ Residual และ R-square

ความแปรปรวนของ Residual และ R-square ถ้าค่าความแปรปรวนของ σ^2 Residual ลดลงเมื่อเทียบกับความแปรปรวนดั้งเดิม มีค่าน้อยลงแล้ว σ^2 ก็จะทำให้ ความสามารถในการทำนายยิ่งดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้าไม่มีความสัมพันธ์ ระหว่าง X กับ Y ดังนั้น อัตราส่วนของความแปรปรวนของ σ^2 Residual ของ Y ต่อค่าความแปรปรวนดั้งเดิมจะเท่ากับ 1 ถ้า X กับ Y มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ σ^2 ดังนั้นจะไม่ σ^2 Residual อัตราส่วนค่าความแปรปรวนจะเท่ากับ 0 โดยทั่วไปค่านี้จะอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 และ ถ้า 1 ลบด้วย อัตราส่วนนี้ก็คือค่า R-square หรือ The Coefficient of Determination ถ้าค่านี้ เท่ากับ 0.40 หมายความว่า ความแปรปรวน

ของ $\sigma^2 Y$ รอบๆ เส้นถดถอยเท่ากับ 0.60 เท่าของค่าความแปรปรวนทั้งหมดหรือ อสมการถดถอยสามารถอธิบายได้ร้อยละ 40 ของความแปรปรวนดั้งเดิม ส่วนร้อยละ 60 เป็นความแปรปรวนอันเกิดจาก σ^2 Residual ต่อ σ^2 ความแปรปรวนคงเดิม R-square เป็นตัวชี้วัดตัวแบบของเรามาความเหมาะสม (Fit) กับค่าข้อมูลมากน้อยเพียงใดหรืออสมการถดถอยนั้น [10]

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกรียงศักดิ์ แก้วกลชัย , ภาคิณ ลอยเจริญ [11] การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จภาพที่ใช้รอยต่อแบบเปียกเชื่อมต่อระหว่างคานสองตัว จากการทดสอบและเปรียบเทียบกับผลทดสอบของคานที่ก่อสร้างด้วยวิธีปกติพบว่ารอยต่อแบบเปียกไม่มีผลต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปในกรณีที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงยาวต่อเนื่อง สำหรับรอยต่อที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ใช้การเชื่อมทาบ พฤติกรรมการวิบัติและกำลังรับโมเมนต์ดัดจะใกล้เคียงกับคานที่ไม่มีรอยต่อ ส่วนรอยต่อที่ใช้เหล็กเสริมวางทาบและงอฉากสามารถรับแรงดัดได้ในระดับหนึ่ง แต่จะวิบัติแบบฉับพลันจากการบีบอัดของคอนกรีต ในขณะที่รอยต่อที่ใช้เหล็กเสริมวางทาบอย่างเดียว จะมีกำลังรับโมเมนต์ดัดน้อย และวิบัติโดยแรงยึดเหนี่ยว



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้แบ่งเป็น 7 ขั้นตอนคือ การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ สำหรับทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม การเตรียมการทดสอบด้วยการจำลองวิธี โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการเตรียมการข้างต้นอธิบายลำดับขั้นการเตรียมงานดังนี้



ภาพที่ 3.1 แท่งคอนกรีตบอทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบสำหรับทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตโดยใช้ไม้มอเตอร์ไฟฟ้า ขั้นตอนแรกใส่น้ำ ตามด้วยหิน และปูนซีเมนต์ เปิดเครื่องให้ส่วนผสมเข้ากัน สุกท้ายตามด้วยทราย เหตุผลที่ต้องใส่ตามลำดับนี้ก็เพราะจะทำให้ส่วนผสมไม่ติดกับไม้มอเตอร์ไฟฟ้า หลังจากผสมคอนกรีตเรียบร้อยแล้วก็เก็บตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ดังภาพที่ 3.1 เพื่อนำไปทดสอบกำลัง

อัดของคอนกรีต และ ลูกบาศก์เมตร $0.15 \times 0.15 \times 0.15$ ซม. ในการเทคอนกรีตจะแบ่งแบบที่เทคอนกรีตเป็นสามส่วน โดยการเทคอนกรีตจะเทด้านข้างซ้ายและขวาก่อนแล้วเว้นบริเวณตรงกลางไว้หน้าตัดบริเวณตรงกลาง 15×15 ซม. เวลาเทคอนกรีตต้องกระทุ้งให้คอนกรีตลงไปให้ทั่วแบบ ส่วนบริเวณตรงกลางที่ทำการหยุดเทนั้น ก็จะเทต่อเมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้ คือ 0 ชม., 0.5 ชม. 1 ชม. 2 ชม. และ 24 ชม. ดังภาพที่ 3.2 ในการบ่มคอนกรีตจะต้องนำชิ้นคอนกรีตไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อที่จะทำให้ผิวของคอนกรีตไม่เกิดการแตกร้าว อันเนื่องจากการสูญเสียน้ำ เพื่อให้คอนกรีตมีความแข็งแรง สามารถรับกำลังตามที่ได้คำนวณออกแบบไว้ ดังภาพที่ 3.3



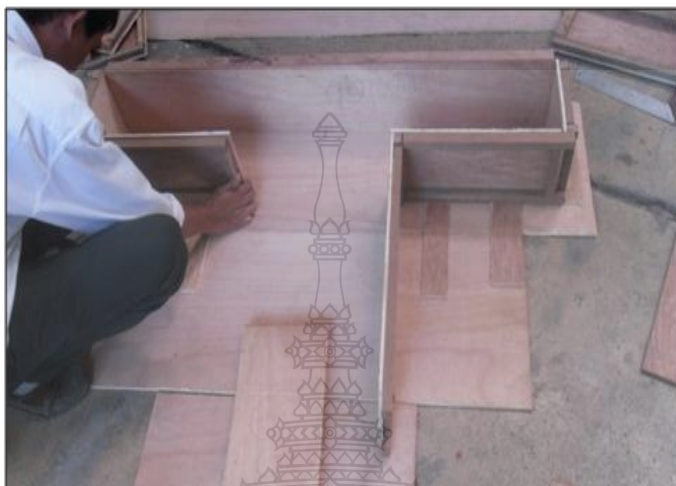
ภาพที่ 3.2 การเทคอนกรีตโดยหยุดที่บริเวณตรงกลาง



ภาพที่ 3.3 แท่งตัวอย่างและการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำ

3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การเตรียมไม้แบบไว้สำหรับหล่อแท่งตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การประกอบไม้แบบหล่อตัวอย่างเสา - คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การเตรียมเหล็กเสริมแกนโดยใช้เหล็ก DB 16 และเหล็กเสริมปลอกโดยใช้เหล็ก RB 6 ไว้สำหรับแท่งตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.5

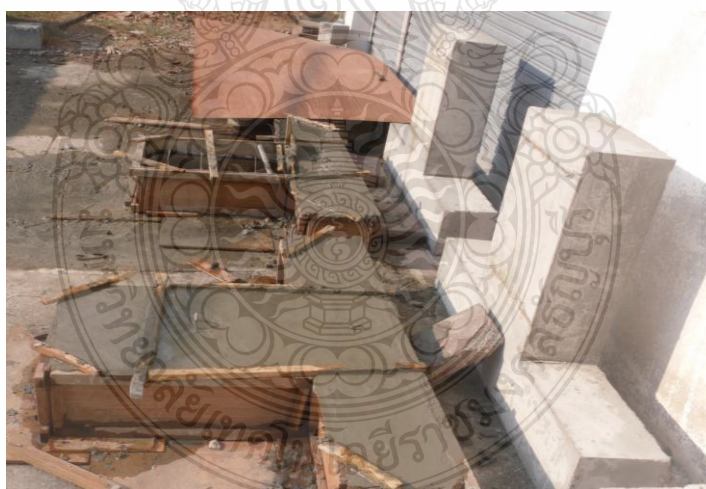


ภาพที่ 3.5 การผูกเหล็กปลอกเสากับเหล็กแกนเสา

เมื่อได้เหล็กเสริมของเสาแล้ว จากนั้นจึงนำเหล็กเสริมคานที่ตัดไว้แล้วมาผูกยึดกับเหล็กเสริมของเสา จากนั้นนำเหล็กเสริมของเสา-คานที่ได้มาวางในแบบ เชื้อกระยะห่อหุ้มของคอนกรีต แล้วยึดแบบให้แน่นเตรียมสำหรับเทคอนกรีต ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แบบหล่อพร้อมเหล็กเสริมที่จะเทคอนกรีต สำหรับตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 3.7 การเทคอนกรีตแท่งตัวอย่างตัวอย่างเสา - คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อผสมคอนกรีตและเก็บตัวอย่างไว้ทดสอบแล้ว จากนั้นก็ทำการตรวจสอบขนาดของชิ้นงานอีกครั้งหนึ่งแล้วทำความสะอาดแบบหล่อ จากนั้นจึงทำการเทคอนกรีตลงในแบบที่เตรียมไว้ โดยการเทคอนกรีตจะต้องแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ เทคอนกรีตให้เสร็จสำหรับตัวอย่างที่ต่อเนื่อง ส่วน

ตัวอย่างที่เทไม่ต่อเนื่องให้เว้นระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงมาเทคอนกรีตต่อให้เสร็จในเวลาต่อมา ดังภาพที่ 3.7

3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงตัดร่วม

การเตรียมแบบหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบแบบหล่อขึ้นรูปเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เทแบบต่อเนื่อง และเทแบบไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.8



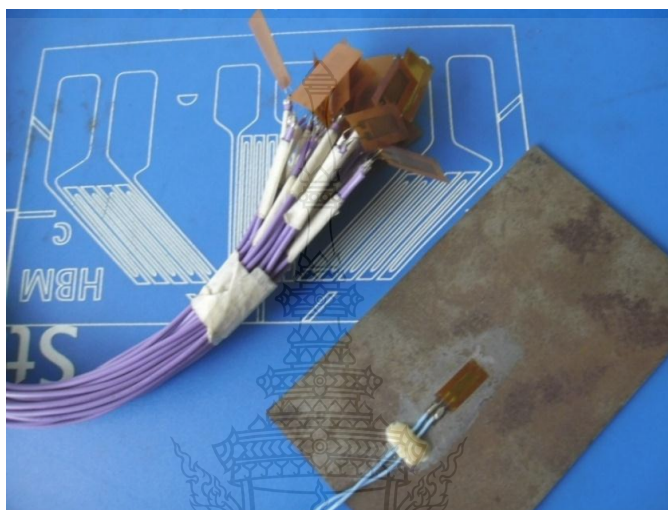
ภาพที่ 3.8 ประกอบแบบหล่อสำหรับขึ้นส่วนตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็ก



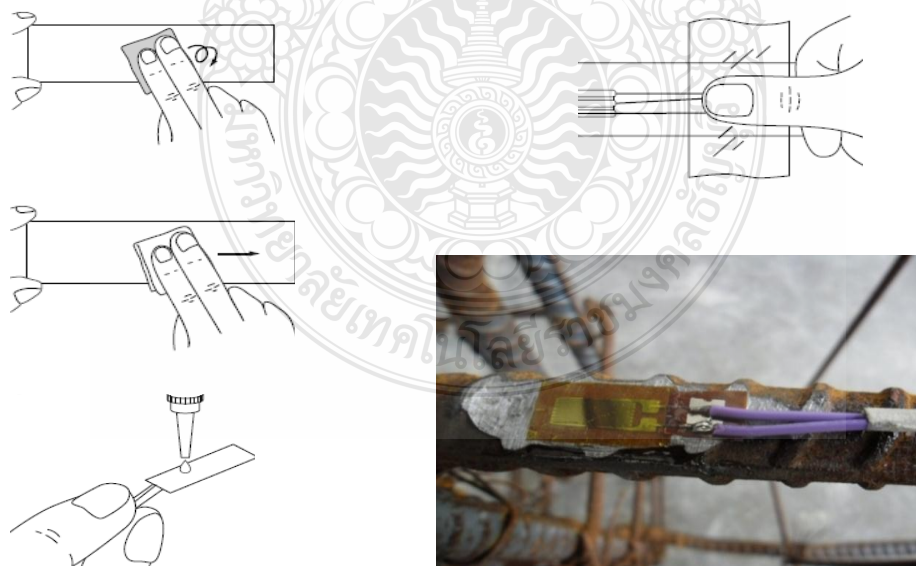
ภาพที่ 3.9 เตรียมเหล็กเสริมสำหรับขึ้นส่วนตัวอย่างคานประกอบเข้ากับเหล็กเสริม เสา

การเตรียมเหล็กเสริมแกนโดยใช้เหล็ก DB 16 และเหล็กเสริมปลอกโดยใช้เหล็ก RB 6 ไว้สำหรับแท่งตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.9

จากนั้นเตรียม สเตรนเกจ โดยการเชื่อมสายไฟติดกับสเตรนเกจ ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อที่จะนำไปติดตั้งในเหล็กแกนคาน ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เตรียม สเตรนเกจ



ภาพที่ 3.11 การติด สเตรนเกจที่ผิวของเหล็กแกนคาน

จากนั้นจัดเหล็กบริเวณที่ต้องการติด สเตรนเกจให้มีความเรียบมากที่สุดเพื่อที่จะติดแผ่น Strain Gage ลงไปในเหล็กแกน การขัดควรวัดให้มีความเรียบมากที่สุด โดยใช้กระดาษทรายละเอียดเบอร์ 300 ในการขัด เมื่อขัดเสร็จเรียบร้อยแล้วก็เป็นขั้นตอนการนำ สเตรนเกจมาติดลงในเหล็กแกน บริเวณที่กำหนดว่าต้องหยุดเทคอนกรีต ในการติด Strain Gage นั้นต้องติดให้สนิทแนบแน่นกับผิวของเหล็กเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของผลการทดสอบ ดังภาพที่ 3.11 เมื่อติด สเตรนเกจเสร็จเรียบร้อยแล้วก็ล๊อคสายของ สเตรนเกจและหุ้มแผ่น สเตรนเกจวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อป้องกันการกดทับจากคอนกรีต ทำให้ สเตรนเกจเสียหาย ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 การป้องกันแผ่น สเตรนเกจการใช้วัสดุเหนียวติดสายไฟ

เมื่อติด สเตรนเกจเรียบร้อยแล้วนำเหล็กเสริมที่เตรียมไว้ ติดตั้งในแบบหล่อที่เตรียมไว้ใน การติดตั้งเหล็กเสริมลงในแบบหล่อนั้นควรตรวจสอบระยะระยะหุ้มของเหล็กเสริมกับแบบหล่อที่ ระยะ 3 ซม. หลังจากนั้นทำการเทคอนกรีต แบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แท่งตัวอย่างการเทคอนกรีตเสา - คานแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

3.4 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนคอนกรีตล้วน

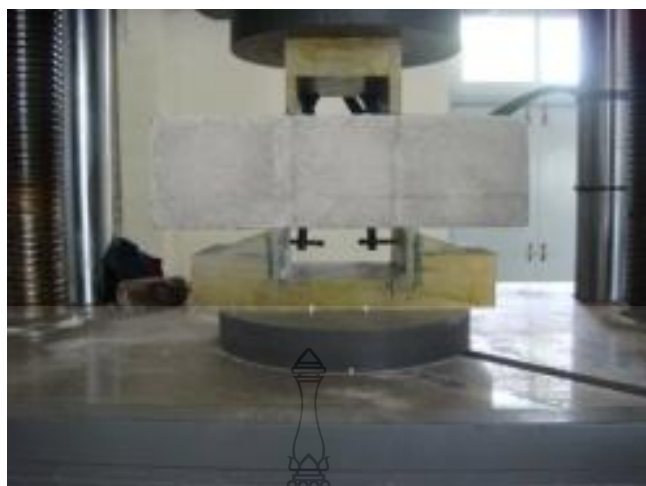
ในการทดสอบหาแรงเฉือน (Shear) ของคอนกรีตของชิ้นทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ขนาด 2,000 KN ดังภาพที่ 3.14 และใช้แท่นทดสอบแรงเฉือนตามมาตรฐาน JSCE-SF6 ติดตั้งกับเครื่องทดสอบ ดังภาพที่ 3.15 ในการกดทดสอบจะใช้ความเร็วอยู่ที่ 5 มิลลิเมตร ต่อ หนึ่งนาที ในการวางชิ้นทดสอบคอนกรีตที่จะทดสอบ จะต้องตั้งให้รอยต่อของคอนกรีตอยู่ตรงระหว่างแท่นทดสอบ เพื่อให้จะให้แรงเฉือนเกิดตรงจุดที่ต้องการทดสอบ ดังภาพที่ 3.16 ในการทดสอบจะต้องกดให้ชิ้นทดสอบเกิดการรอยแตกหรือ ขาดออกจากกันจนกว่าจะรับน้ำหนักไม่ได้แล้วพร้อมเก็บผลการทดสอบ ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.14 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ขนาด 2,000 KN.



ภาพที่ 3.15 แท่นกดทดสอบแรงเฉือน



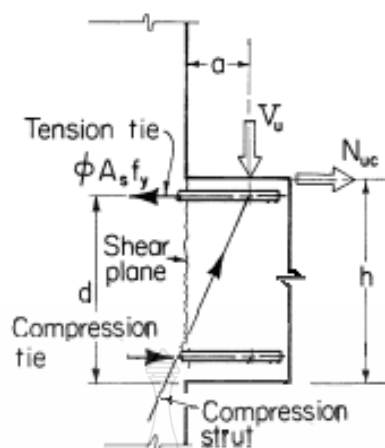
ภาพที่ 3.16 การติดตั้งชิ้นทดสอบกับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์



ภาพที่ 3.17 ภาพชิ้นส่วนคอนกรีตที่ได้ทำการทดสอบแล้ว

3.5 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การทดสอบตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องและต่อเนื่อง ติดตั้งชิ้นส่วนตัวอย่างเสา-คาน กับชุดทดสอบทดสอบ ให้ค่ากำลังเฉือนแรง ด้วยเครื่องทดสอบไฮดรอลิก วัดค่าแรงด้วย Load Cell แรงกระทำผ่านแผ่นเหล็กถูกบังคับให้กระทำบริเวณ Shear Plane แสดงดังภาพที่ 3.18 ในการทดสอบจะเพิ่มแรงจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ทำการบันทึกค่า แรงอัดจากแม่แรงไฮดรอลิก ค่าการเสียรูปทางด้านข้าง วัดการรื้อร้าว และลักษณะรื้อร้าวที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.18 Structural Action of a Corbel [12]



ภาพที่ 3.19 การติดตั้งชิ้นส่วนตัวอย่างเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.6 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงดัดร่วม

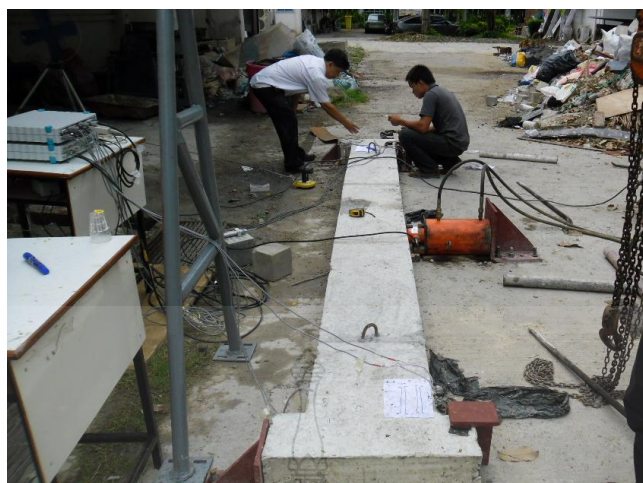
3.6.1 กรณี คานช่วงเดียว



ภาพที่ 3.20 จูกรองรับที่ยึดติดเรียบร้อยแล้วทั้งสองด้าน

เตรียมจูกรองรับของคาน-เสา ที่จะทำการทดสอบ ต้องติดตั้งจูกรองรับที่ปลายคาน-เสา และติดตั้งอุปกรณ์รองรับไฮโดรลิกที่จะค่าแรงทดสอบ คาน-เสา ที่บริเวณรอยต่อ ในการยึดจูกรองรับ นั้นควรที่จะเลือกบริเวณที่เป็นพื้นที่เรียบเสมอกันและพื้นคอนกรีตหนาควรไม่น้อยกว่า 15 ซม. จากนั้นทำการหาตำแหน่งในการเจาะรูพื้นคอนกรีตที่จะยึด โบลท์ขนาดหน้าตัด 22 มม. จำนวนตามที่แบบกำหนดและยึดแน่น โบลท์ด้วยอิมพ็อกซ์เพื่อยึดแน่นกับพื้นคอนกรีต ดังภาพที่ 3.20

ติดตั้งชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กับชุดทดสอบ ให้ค่าแรง ด้วยเครื่องทดสอบไฮโดรลิก วัดค่าแรงด้วย Load Cell แรงกระทำผ่านแผ่นเหล็กถูกบังคับให้กระทำบริเวณกลางคาน ในการทดสอบจะเพิ่มแรงจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ทำการบันทึกค่า แรงอัดจากแม่แรงไฮโดรลิกผ่าน Load Cell ค่าการเสียรูปทางด้านข้าง วัดค่ารอยร้าว และลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 การติดตั้งชุดทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีมีแรงค้ำร่วม กรณีคานช่วงเดียว

3.6.2 กรณี คานยื่น

เตรียมจุดรองรับของคาน-เสา คานยื่นที่จะทำการทดสอบ ต้องติดตั้งจุดรองรับที่ปลายคาน-
เสา และติดตั้งอุปกรณ์รองรับไฮดรอลิกที่จะค่าแรงทดสอบ คาน-เสา ที่บริเวณรอยต่อ คล้ายกับการ
ติดตั้งในคานช่วงเดียว แสดงการเตรียมชิ้นงานก่อนเทคอนกรีตคานยื่นแสดง ดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 การเตรียมชิ้นงานก่อนเทคอนกรีตคานยื่น

ติดตั้งชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กับชุดทดสอบทดสอบ ให้ค่าแรง ด้วยเครื่องทดสอบไฮดรอลิก วัดค่าแรงด้วย Load Cell แรงกระทำผ่านแผ่นเหล็กถูกบังคับให้กระทำบริเวณปลายคานยื่น ในการทดสอบจะเพิ่มแรงจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ทำการบันทึกค่า แรงอัดจากแม่แรงไฮดรอลิกผ่าน Load Cell ค่าการเสียรูปทางด้านข้าง วัดค่ารอยร้าว และลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 3.23

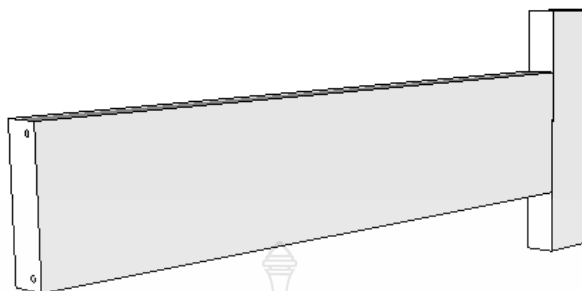


ภาพที่ 3.23 การติดตั้งชุดทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม กรณีคานยื่น

3.7 ลำดับขั้นทดสอบด้วยการจำลองวิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

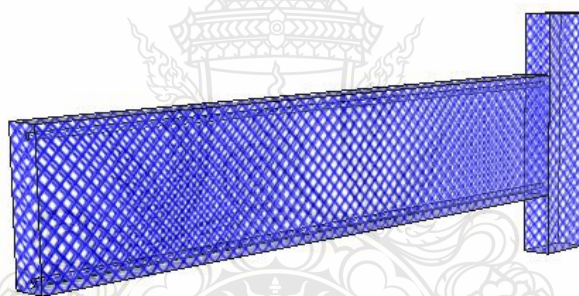
เนื่องจากชิ้นส่วนของโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร จึงจำลองเสาคอนกรีต คานคอนกรีตเหล็กแกนคาน และเหล็กปลอกเพียงครึ่งด้านของโครงสร้างจริงเพื่อทำให้ค่าในการวิเคราะห์น้อยลงแบบจำลอง เป็นคานช่วงเดียว มีแรงแบบจุดกระทำกลางคาน กำหนดให้เสาคอนกรีตถูกยึดแน่นพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กแกนที่บริเวณรอยต่อเสา – คาน ตามลำดับขั้นตอนดังนี้

3.7.1 ชั้นรูปองค์ประกอบโครงสร้างแต่ละชั้นส่วน แสดงดังภาพที่ 3.24



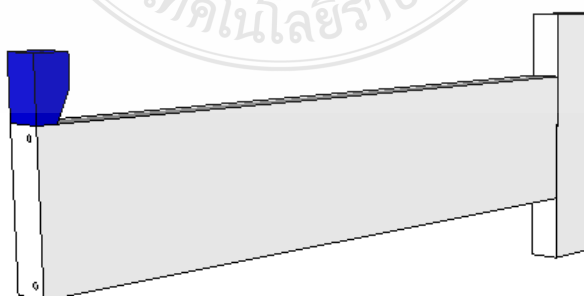
ภาพที่ 3.24 ตัวอย่างองค์ประกอบโครงสร้างแต่ละชั้นส่วน

3.7.2 ประกอบชั้นส่วน โครงสร้างแต่ละชั้นส่วน ที่ทำการ Mesh ตามเงื่อนไขที่กำหนดพร้อมประกอบชั้นส่วนตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ตัวอย่าง โครงสร้างแต่ละชั้นที่ทำการ Mesh พร้อมประกอบชั้นส่วนตัวอย่าง

3.7.3 กำหนดเงื่อนไขแรงกระทำตามเงื่อนไขการออกแบบ ที่ตำแหน่งกลางคานในชั้นส่วน กำหนดขนาดแรงกระทำ แสดงดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 ชั้นส่วนกำหนดขนาดแรงกระทำ

- 3.7.4 กำหนดเงื่อนไขจากรองรับ ผิวสัมผัสแรงยึดเกาะระหว่างชั้นส่วน โดยกำหนดให้เหมือนกับชั้นตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำผลวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบชั้นตัวอย่าง
- 3.7.5 กำหนดเงื่อนไขคุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กเสริมแกน และเหล็กเสริมปลอก
- 3.7.6 ดำเนินการประมวลผล
- 3.7.7 ดำเนินการแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

ผลการทดลองและวิเคราะห์แบ่งเป็น 3 ผลการทดสอบคือ การทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคอนกรีตล้วน ผลการทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงค้ำร่วม ผลการทดลองข้างต้นสามารถอธิบายและวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 3 การทดลองดังนี้

4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของคอนกรีตล้วน

4.1.1 รูปลักษณะการแตกร้าวของแท่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.1 เทคอนกรีตต่อเนื่อง (ไม่มีรอยต่อ)



ภาพที่ 4.2 เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง (มีรอยต่อ)

จากการเปรียบเทียบ ลักษณะการแตกร้าวภาพที่ 4.1 เทคอนกรีตต่อเนื่อง (ไม่มีรอยต่อ) และ ภาพที่ 4.2 เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง (มีรอยต่อ) มีความแตกต่างคือ การแตกร้าวแบบเทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อแตกร้าวตามการขัดกันของมวลหยาบ ส่วน การแตกร้าวแบบเทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อแตกร้าวตามแนวการหยุดเทจากการแตกร้าวดังกล่าวมีผลต่อกำลังที่สามารถรับได้แสดงในตารางที่ 4.1

4.1.2 ผลการทดสอบ แรงเฉือนที่มีรอยต่อ แบบ JSCE - SF6 แสดงผลในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดสอบ แรงเฉือนที่มีรอยต่อ แบบ JSCE - SF6

ทดสอบแท่งตัวอย่าง 7.5 x 15 x 70 cm. พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 225 cm ² .							
เทคอนกรีตเพิ่มเติม หลังจากหยุดเทเป็นเวลา	ก้อนที่						เฉลี่ย (KN.)
	1	2	3	4	5	6	
0 นาที	72.9	73.5	73.7	74.4	71.9	73.9	73.38
30 นาที	54.9	55.1	53.3	54.3	55.1	53.9	54.43
1 ชั่วโมง	34.6	38.4	34.2	31.2	30.6	37.4	34.40
2 ชั่วโมง	16.6	20.2	18.1	20.1	15.6	19.1	18.28
24 ชั่วโมง	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดสอบ แรงเฉือนที่มีรอยต่อ แบบ JSCE - SF6 (ต่อ)

ทดสอบแท่งตัวอย่าง 15 x 15 x 70 cm. พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 450 cm ² .							
เทคอนกรีตเพิ่มเติม หลังจากหยุดเทเป็นเวลา	ก่อนที่						เฉลี่ย (KN.)
	1	2	3	4	5	6	
0 นาที	258.6	226	223.6	233	222.8	230.2	232.37
30 นาที	118.1	155.9	151.7	181.7	171.8	120.6	149.97
1 ชั่วโมง	117.1	113.1	125.3	116	112.4	124.7	118.10
2 ชั่วโมง	63.6	76.5	64	72.7	67.5	74.3	69.77
24 ชั่วโมง	27.2	16.6	20.2	27.1	23.6	23	22.95

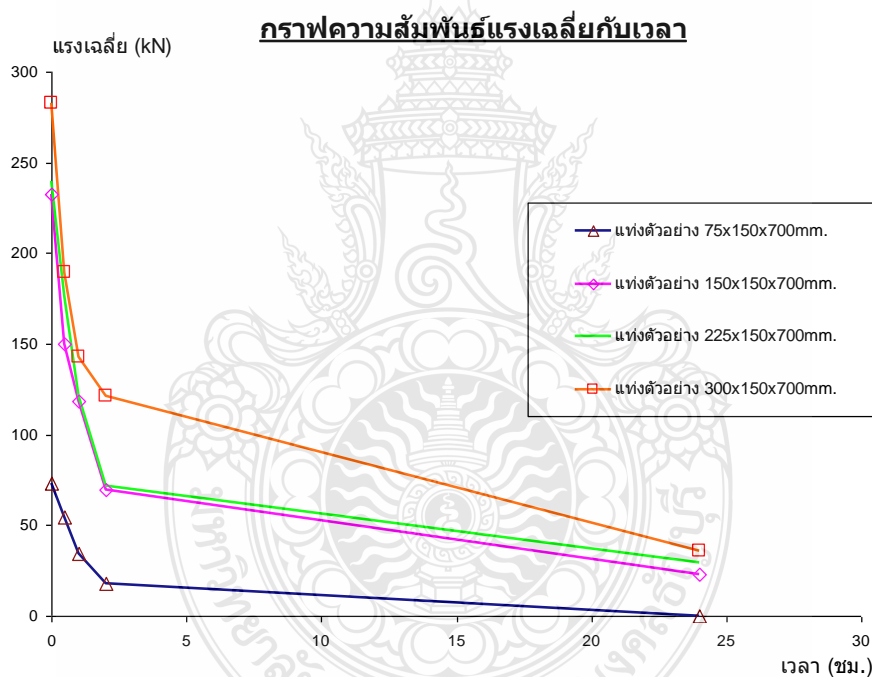
ทดสอบแท่งตัวอย่าง 15 x 22.5 x 70 cm. พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 675 cm ² .							
เทคอนกรีตเพิ่มเติม หลังจากหยุดเทเป็นเวลา	ก่อนที่						เฉลี่ย (KN.)
	1	2	3	4	5	6	
0 นาที	232.6	231.6	248.4	253.9	234.4	239	239.98

ทดสอบแท่งตัวอย่าง 15 x 22.5 x 70 cm. พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 675 cm ² .							
30 นาที	170.8	179.5	180.7	172.3	174.9	182.3	176.75
1 ชั่วโมง	115.5	120.8	121.4	137.7	121.7	112.7	121.63
2 ชั่วโมง	81.9	68.2	75.9	69.5	73.3	63.2	72.00
24 ชั่วโมง	25.9	25.2	36.4	28.7	35.2	23.6	29.17

ทดสอบแท่งตัวอย่าง 15 x 30 x 70 cm. พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 900 cm ² .							
เทคอนกรีตเพิ่มเติม หลังจากหยุดเทเป็นเวลา	ก่อนที่						เฉลี่ย (KN.)
	1	2	3	4	5	6	
0 นาที	295.2	280	272.4	280.7	291.5	275.4	282.53
30 นาที	184.2	180.2	203.4	195.3	182.2	190.5	189.30
1 ชั่วโมง	140.5	136.4	147.8	146.1	148.3	135.9	142.50
2 ชั่วโมง	122.4	120	122.5	122.4	120.2	122.3	121.63
24 ชั่วโมง	38.8	34.9	33.9	43.3	32.5	31.8	35.87

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดสอบ แรงเฉือนที่มีรอยต่อ แบบ JSCE - SF6 (ต่อ)

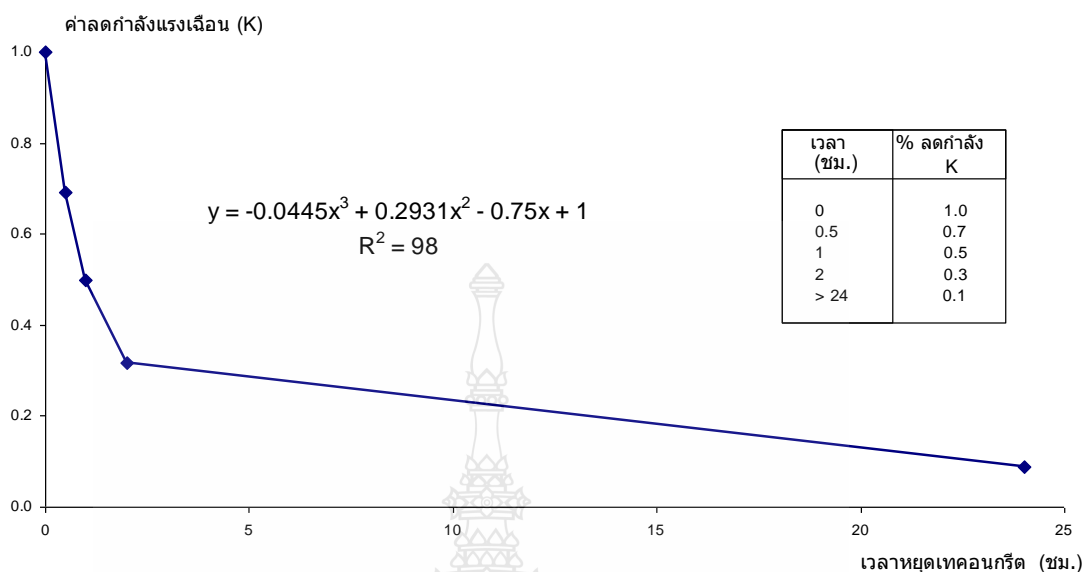
สรุปหน่วยแรงแต่ละช่วงเวลา						
เทคอนกรีตเพิ่มเติม หลังจากหยุดเทเป็นเวลา	หน่วยแรง (Ksc.)				เฉลี่ย (ksc.)	ค่า K
	7.5x15	15x15	15x22.5	15x30		
0 นาที	32.61	51.64	35.55	31.39	37.80	1.0
30 นาที	24.19	33.33	26.19	21.03	26.18	0.7
1 ชั่วโมง	15.29	26.24	18.02	15.83	18.85	0.5
2 ชั่วโมง	8.13	15.50	10.67	13.51	11.95	0.3
24 ชั่วโมง	-	5.10	4.32	3.99	3.35	0.1



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระหว่างแรงเฉลี่ย กับ เวลา

จากการทดสอบคอนกรีตล้วนรับแรงเฉือน ที่ระยะเวลาต่างกันจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงเฉือนที่เทียบกับเวลาจากการทดสอบตัวอย่าง พบว่ากำลังของหน่วยแรงเฉือนลดลงตามช่วงเวลาหยุดเท แสดงในภาพที่ 4.3

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดกำลังแรงเฉือนกับเวลาหยุดเทคอนกรีต



ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดกำลังแรงเฉือนกับเวลาหยุดเทคอนกรีต

เมื่อนำค่าหน่วยแรงที่ลดลงมาเขียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดกำลังแรงเฉือนกับเวลาแสดงในภาพที่ 4.4 ค่า R-Squared (R^2) = 0.98 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่าสมการที่ประมาณได้เป็นตัวแทนที่ดี สำหรับใช้คำนวณผลทดสอบแรงเฉือนที่ลดลงได้ ดังนั้น ความสัมพันธ์ค่า (%) K = $-0.0445x^3 + 0.2931x^2 - 0.75x + 1$ ค่าใช้ต้องมีค่ามากกว่า 0 เมื่อ x = ระยะเวลาที่หยุดเทคอนกรีต (hr.) จากข้อกำหนด ของ ACI. และ ว.ส.ท. ยอมให้ใช้กำลังต้านทานแรงเฉือน $V_c = 0.53\sqrt{f'_c}$ [6] เมื่อหยุดเทแล้วแต่ต่อค่าความสามารถกำลังต้านทานแรงเฉือน กรณี ไม่ใช้วัสดุประสานกำลังต้านทานแรงเฉือนที่รอยต่อ $V_c = K0.53\sqrt{f'_c}$

เมื่อ

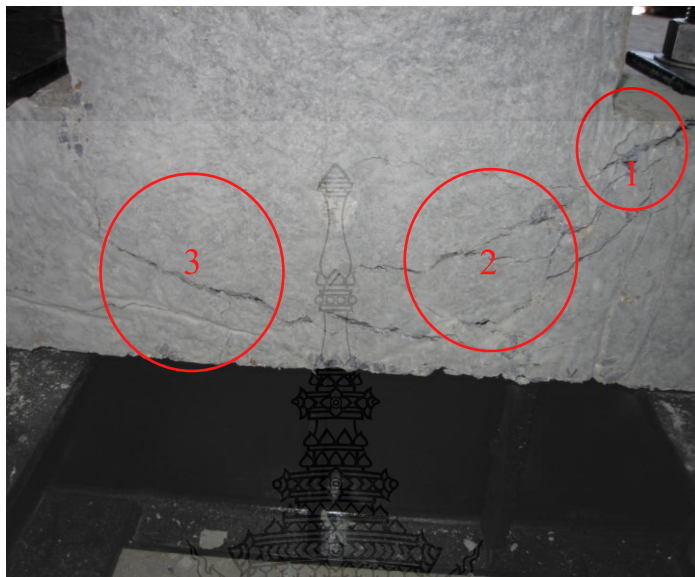
V_c = หน่วยแรงเฉือนที่สามารถรับได้ (Ksc.)

K = ค่าเปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงที่สามารถรับได้ (%)

f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต (Ksc.)

4.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.2.1 รูปลักษณะการแตกร้าวของแท่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.5 และ 4.6



ภาพที่ 4.5 เทคอนกรีตต่อเนื่อง (ไม่มีรอยต่อ)



ภาพที่ 4.6 เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง (มีรอยต่อ)

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่จุดต่อเสา – คาน พิจารณารอยแตกร้าว กรณีคานเทแบบไม่มีรอยต่อลักษณะความเสียหายจะมีรอยแยกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นลำดับแรก ตามภาพที่ 4.5 ส่วนตำแหน่งที่ 2 และ 3 เกิดจากการถ่ายแรงของเหล็กแกนสู่คานกรีตเสา ผลทำให้คานกรีตบริเวณเสาเสียหายเกิดรอยร้าวและแยกออกจากกันตามลำดับ ส่วนกรณีคานเทแบบมีรอยต่อลักษณะความเสียหายจะแตกต่างจากการเทแบบไม่มีรอยต่อ คือจะเกิดการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นลำดับแรกตามภาพที่ 4.6 ความเสียหายของคานในตำแหน่งที่ 2 เสียหายเนื่องจากการถ่ายแรงของเหล็กแกนคานสู่คานกรีตคาน ผลทำให้คานกรีตคานเสียหายเกิดรอยร้าวและแยกออกจากกัน ส่วนตำแหน่งที่ 3 เสียหายเนื่องจากการถ่ายแรงของเหล็กแกนคานสู่คานกรีตเสา ผลทำให้คานกรีตบริเวณเสาเสียหายเกิดรอยร้าวและแยกออกจากกันเหมือนกรณีคานเทแบบไม่มีรอยต่อ

4.2.2 ข้อมูลการทดสอบแรงเฉือนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

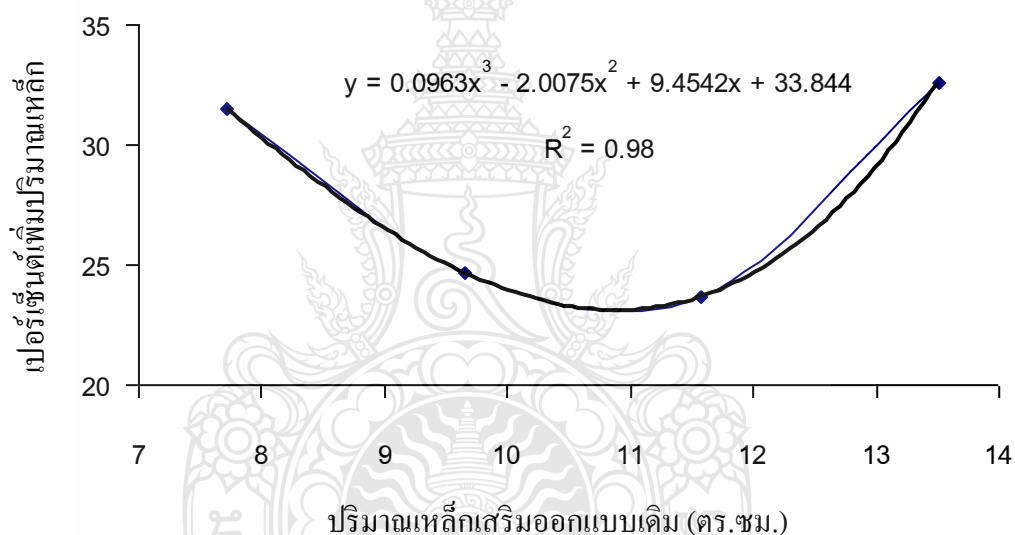
ผลการทดสอบพิจารณาเปรียบเทียบผลการรับกำลัง เนื่องจากการเทแบบมีรอยต่อ ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างคอนกรีตลดลงส่งผลให้การรับแรงโดยรวมลดลงร้อยละ 8.8 ถึงร้อยละ 15 ของคานที่เทแบบไม่มีรอยต่อ เมื่อพิจารณาปริมาณเหล็กแกนที่เพิ่มขึ้นในคานคอนกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ แสดงผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าผลการทดสอบแรงเฉือนสูงสุด

ลักษณะการเสริมเหล็ก	ปริมาณเหล็กเสริม As (ตร.ซม.)	ผลทดสอบค่าแรงเฉือนสูงสุดของคาน (P_u)				ปริมาณเหล็กที่ต้องการเนื่องจากแรงเฉือนสูงสุด	
		WSD (กก.)	ไม่มีรอยต่อ (กก.)	มีรอยต่อ (กก.)	ΔP_u ลดลง (%)	ปริมาณเหล็กเสริม As (ตร.ซม.)	ผลต่างปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้น (%)
B1	7.72	4,305	9,560	8,719	8.8	10.15	31.49
B2	9.65	4,305	9,987	9,088	9	12.03	24.67
B3	11.58	4,305	10,682	9,613	10	14.32	23.66
B4	13.51	4,305	11,857	10,078	15	17.92	32.62

เมื่อเปรียบเทียบผลต่างของปริมาณเหล็กเสริมจากรายที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีเหตุจำเป็นไม่สามารถเทคอนกรีตเสา - คาน ให้แล้วเสร็จในครั้งเดียวได้ ควรเพิ่มปริมาณเหล็กในคาน เพื่อให้รับแรงเฉือนได้มากเท่ากับคานที่เทเสร็จในครั้งเดียวโดยการเพิ่มปริมาณเหล็กออกจากที่ออกแบบเดิม

จากภาพที่ 4.7 กราฟเปอร์เซ็นต์เพิ่มปริมาณเหล็ก เฉพาะกรณีขนาดคานทดสอบ มีค่า R-Squared (R^2) = 0.98 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่าสมการที่ประมาณได้เป็นตัวแทนที่ดี สำหรับใช้คำนวณเปอร์เซ็นต์เพิ่มปริมาณเหล็กเสริมแกน การเพิ่มปริมาณเหล็กแกน ในคานที่เทแบบมีรอยต่อ ทำให้คานสามารถรับแรงได้มากขึ้นเทียบเท่ากับคานที่เทแบบไม่มีรอยต่อ โดยการนำผลต่างปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับปริมาณเหล็กเสริมที่ออกแบบเดิม

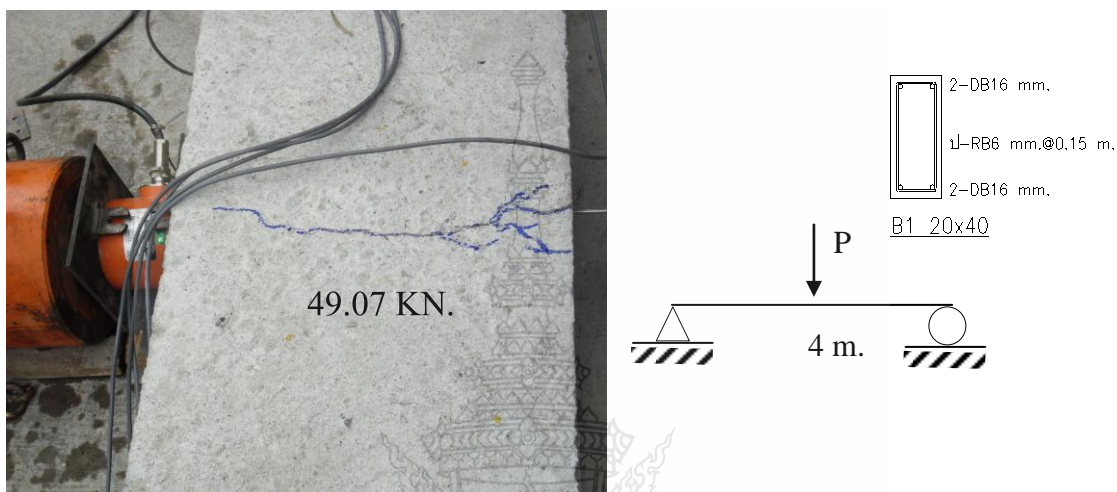


ภาพที่ 4.7 กราฟ เปอร์เซ็นต์เพิ่มปริมาณเหล็ก เฉพาะกรณีขนาดคานทดสอบ

4.3 ผลการทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงดัดร่วม

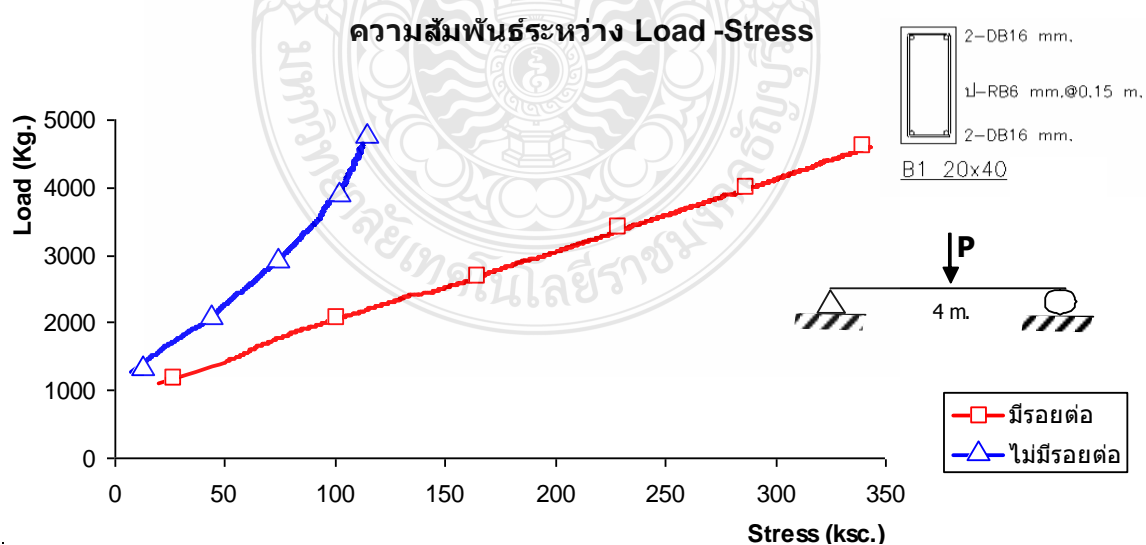
4.3.1 กรณี คานช่วงเดียว

1) รูปลักษณะการแตกร้าวของแท่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 รูปลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง

2) ข้อมูลการทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับความเค้นในเหล็กแกน

จากภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กแกน เมื่อคานรับน้ำหนักกระทำที่ตำแหน่งเท่ากัน เหล็กแกนกรณีแบบมีรอยต่อรับภาระหน่วยแรงมากกว่ากรณีไม่มีรอยต่อ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่บริเวณรอยต่อ จึงทำให้เหล็กแกนบริเวณรอยต่อรับแรงโดยลำพัง ส่งผลให้เหล็กแกนรับภาระหน่วยแรงมากขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 4.3 ผลเปรียบเทียบผลการทดสอบ ด้วยวิธี โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ กับ วิธีออกแบบ WSD

แรงสูงสุดที่ยอมให้ P_u (kg-force)	ลักษณะรอยต่อ	ค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กแกนที่จุดต่อเสา - คาน (ksc.)			
		วิธี WSD	โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์		ผลทดสอบ
		Fixed	Fixed	Hinge - Fixed	Hinge - Fixed
1870	ไม่มีรอยต่อ	78.8	82.5	48.3	34.8
	มีรอยต่อ	-	149.2	95.8	84.2

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบ ด้วยวิธีออกแบบ WSD กับ วิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และ เปรียบเทียบ ด้วยวิธี โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ กับ การทดสอบ ให้ค่าเปรียบเทียบมีแนวโน้มทางเดียวกัน จึงได้ทำการจำลองคานช่วงเดียวแบบง่ายยาว 4 ม. มีแรงกระทำเป็นจุด (P_u) กลางคาน ผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในเหล็กแกนที่จุดต่อเสา - คานระหว่าง วิธีออกแบบ WSD กับ แบบจำลองทดสอบด้วยวิธี โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีหน้าตัดอื่นๆ แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในเหล็กแกน ที่จุดต่อเสา - คาน

ลักษณะการเสริมเหล็ก	แรงสูงสุดที่ยอมให้ P_u (kg-force)	ลักษณะรอยต่อ	ค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กแกนที่จุดต่อเสา - คาน (ksc.)			ผลต่างหน่วยแรงระหว่าง WSD กับ FEM กรณี Fixed (%)
			WSD	โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์		
			Fixed	Fixed	Hinge- Fixed	
B1	1,870	ไม่มีรอยต่อ	78.8	82.5	48.3	4.48
		มีรอยต่อ	-	149.2	95.8	-
B2	2,804	ไม่มีรอยต่อ	118.2	119.3	91.7	0.92
		มีรอยต่อ	-	176.3	119.9	-

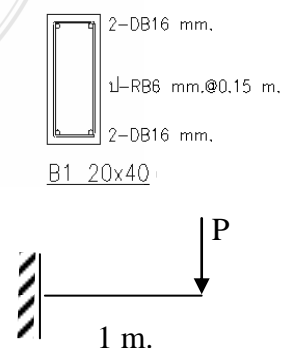
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในเหล็กแกน ที่จุดต่อเสา - คาน (ต่อ)

ลักษณะการเสริมเหล็ก	แรงสูงสุดที่ยอมให้ P_u (kg-force)	ลักษณะรอยต่อ	ค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กแกน ที่จุดต่อเสา - คาน (ksc.)			ผลต่างหน่วยแรงระหว่าง WSD กับ FEM กรณี Fixed (%)
			WSD	โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์		
			Fixed	Fixed	Hinge- Fixed	
B3	3,656	ไม่มีรอยต่อ	154.2	155.0	117.7	0.52
		มีรอยต่อ	-	195.8	156	-
B4	3,909	ไม่มีรอยต่อ	164.8	172.4	126	4.41
		มีรอยต่อ	-	214.4	166.3	-

เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กแกน จากตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ทุกกรณี รอยต่อทุกเงื่อนไขจุดรองรับ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับเหล็กแกนมีค่ามากกว่ากรณีไม่มีรอยต่อ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่บริเวณรอยต่อ ทำให้เหล็กแกนบริเวณรอยต่อรับแรงโดยลำพัง เมื่อนำค่าหน่วยแรงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีออกแบบ WSD กรณีไม่มีรอยต่อจุดรองรับแบบ Fixed เปรียบเทียบกับวิเคราะห์ด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีมีรอยต่อจุดรองรับแบบ Hinge - Fixed มาวิเคราะห์เทียบกับแผนภูมิ โมเมนต์ตัด ค่าโมเมนต์ที่ปลายคานมีแนวโน้มเป็นแบบคานช่วงเดียวยึดแน่นที่ปลายทั้งสองด้าน

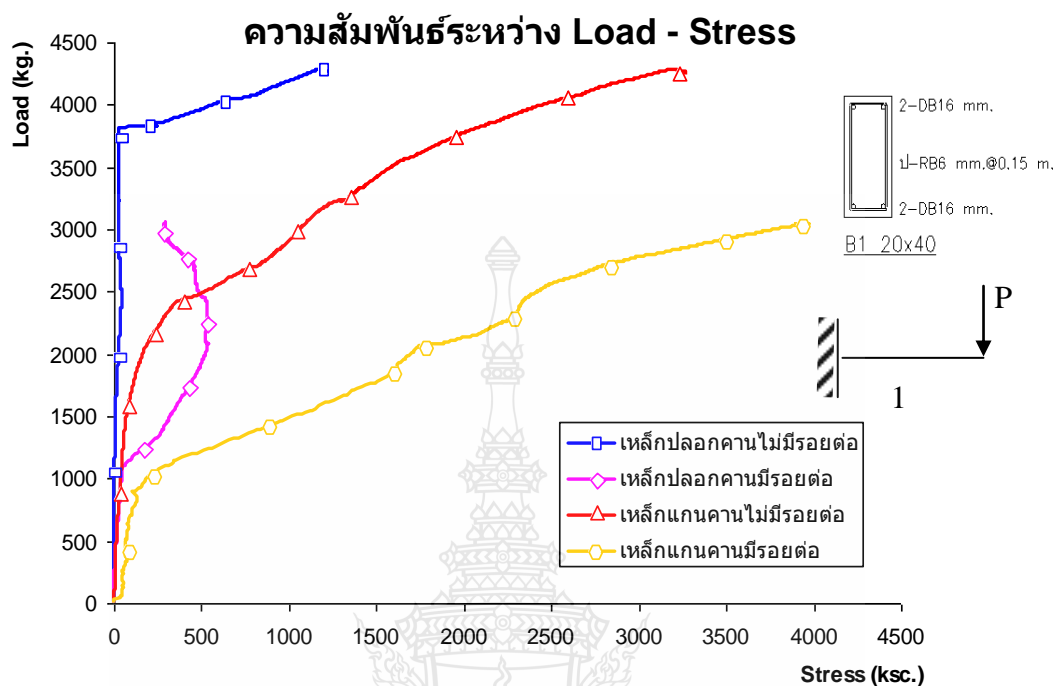
4.3.2 กรณี คานยื่น

1) รูปลักษณะการแตกร้าวของแท่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 รูปลักษณะการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง

2) ข้อมูลการทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับความเค้นในเหล็กเสริม

จากภาพที่ 4.11 ผลการทดสอบคานอื่น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กแกน เมื่อคานรับน้ำหนักกระทำที่ตำแหน่งเท่ากัน เหล็กแกนกรณีมีรอยต่อรับภาระหน่วยแรงมากกว่ากรณีไม่มีรอยต่อ เหมือนกับการทดสอบคานช่วงเดียว

ส่วนภาระหน่วยแรงในเหล็กปลอกในช่วงแรกกรณีมีรอยต่อจะเกิดหน่วยแรงมากกว่ากรณีไม่มีรอยต่อมาก แต่เมื่อพิจารณาจนถึงระดับแรงกระทำสูงสุดที่รับได้ของแต่ละกรณีคาน กรณีมีรอยต่อจะรับแรงกระทำโดยรวมได้น้อยกว่ากรณีไม่มีรอยต่อ ส่งผลทำให้หน่วยแรงโดยรวมที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกเกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีไม่มีรอยต่อ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการทดสอบคอนกรีตล้วนรับแรงเฉือน ที่ระยะเวลาต่างกันจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงเฉือนที่เทียบกับเวลาจากการทดสอบตัวอย่าง พบว่ากำลังของหน่วยแรงเฉือนลดลงตามช่วงเวลาที่ยืดเยื้อ จากข้อกำหนด ของ ACI และ ว.ส.ท. ยอมให้ใช้กำลังต้านทานแรงเฉือน $V_c = 0.53\sqrt{f'_c}$ เมื่อหยุดเทแล้วเพื่อค่าความสามารถกำลังต้านทานแรงเฉือน กรณี ไม่ใช้วัสดุประสานกำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงดังนั้น ค่าหน่วยแรงเฉือน V_c ที่ใช้ออกแบบระยะห่างของเหล็กปลอกบริเวณรอยต่อ

$$\text{แนะนำ } V_c = K0.53\sqrt{f'_c}$$

เมื่อ V_c = หน่วยแรงเฉือนที่สามารถรับได้ (Ksc.)
K = ค่าเปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงที่สามารถรับได้ (%)
 f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต (Ksc.)

ผลการทดสอบ แรงเฉือนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แบบจำลองที่เทคอนกรีตแบบมีรอยต่อรับแรงโดยรวมลดลงจากแบบจำลองที่เทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อ ร้อยละ 8.8 ถึง ร้อยละ 15 จากการทดสอบพบว่าปริมาณเหล็กแกนที่เพิ่มขึ้นในคานคอนกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มเหล็กเดือยจากปริมาณเหล็กแกนเดิมร้อยละ 23.66 ถึงร้อยละ 32.62 สำหรับหน่วยแรงในเหล็กปลอกมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ประมาณร้อยละ 25 ของหน่วยแรงที่ยอมให้ก่อนที่จะลดลงเนื่องจากการเสียหายของคาน

ผลการทดสอบหน่วยแรงในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีมีแรงดัดร่วม ผลกระทบของโมเมนต์ในเหล็กแกนบริเวณรอยต่อเป็นแบบคานยึดแน่นที่ปลายคานทั้งสองด้าน ส่วนผลกระทบแรงเฉือนต่อเหล็กแกนบริเวณรอยต่อเป็นแบบคานช่วงเดียวอย่างง่าย

จากการทดสอบแบบจำลองสรุปผลว่า เมื่อเทคอนกรีตที่เสา - คาน แบบมีรอยต่อทำให้เหล็กแกนรับภาระแรงเฉือนมากขึ้นจากที่ออกแบบเดิม ควรเพิ่มปริมาณเหล็กแกนในคานเพื่อรับแรงเฉือนได้มากเท่ากับคานที่เทเสร็จในครั้งเดียว โดยการเพิ่มปริมาณเหล็กเดือยร้อยละ 30 จากปริมาณเหล็กแกนที่ออกแบบเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรหาแรงเฉือนที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ต่างกัน

5.3.2 ควรเปรียบเทียบการรับแรงเฉือนของรอยต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หน้าตัดแตกต่างกัน

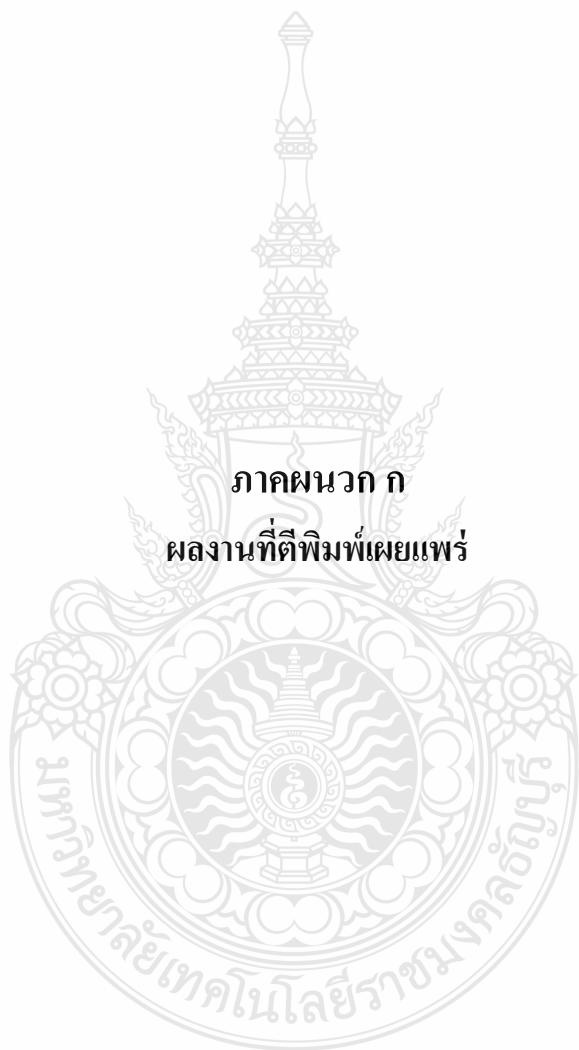


รายการอ้างอิง

- [1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2546. **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฑาทอง.
- [2] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร 2536 .**คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ.
- [3] **Shear strength of steel fiber-reinforced concrete** 2002. [Online] Available: <http://www.Concrete.Org/pubs/journals/abstractdetail.asp?id=12326> (Retrieved November 11, 2008)
- [4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2545. **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: จุฑาทอง.
- [5] สมิตร ส่งพิริยะกิจ, 2553.**กำลังรับแรงเฉือนระหว่างรอยต่อคอนกรีตเก่าและใหม่ของหน้าตัดรับแรงดัด**, โยธาสาร, เล่มที่ 2: เลขหน้า 70 - 73.
- [6] วินิต ช่อวิเชียร. 2545. **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน**.พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ป. สัมพันธ์พาณิชย์.
- [7] สมศักดิ์ คำปลิว. 2547. **การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [8] สนั่น เจริญเผ่าและวินิต ช่อวิเชียร.2537.**คอนกรีตเสริมเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่7. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [9] ยุทธการ มณีจันทร์, กิจพัฒน์ ภูววรรณ , 2553. **ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก**, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, อุบลราชธานี, 12 – 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553, บทความเลขที่ STR 050.
- [10] นิติพงษ์ ส่งศรีโรจน์, ความหมายของค่าสถิติบางตัวจากการประมาณสมการ (Online), 2553. Available: <http://www.nitiphong.com/files/some%20Eviews%20printout.pdf> (15 เมษายน 2554)
- [11] เกรียงศักดิ์ แก้วกลชัย , ภาคิณ ลอยเจริญ , 2544. **พฤติกรรมรอยต่อแบบเป็ยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปภายใต้การดัด**, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6, พ.ศ. 2544, บทความเลขที่ STR 08.
- [12] วินิต ช่อวิเชียร. 2540. **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง**. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: ป. สัมพันธ์พาณิชย์.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก
ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16
16th National Convention on Civil Engineering

ประกาศนียบัตรรับรองการนำเสนอบทความ

ประกาศนียบัตรฉบับนี้มีไว้เพื่อแสดงว่า

ชานัญ น้อยพิทักษ์, มาโนช รุจิภากร

ได้เข้าร่วมและนำเสนอบทความเรื่อง

หน่วยแรงในเหล็กเดือยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่จุดรองรับ

Stress in Dowel Bar of Reinforced Concrete Beam at Support

ในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

ระหว่างวันที่ 18 – 20 พฤษภาคม 2554 ณ โรงแรมเดอะชานันท์ พัทยา



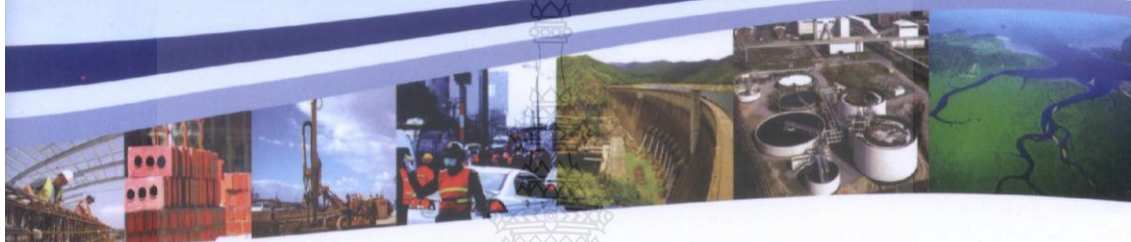
จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชวีร์ สิละวัตน์)
ประธานคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16



เอกสารประกอบการประชุม

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16
16th National Convention on Civil Engineering



วิศวกรรมโยธากับการเผชิญวิกฤตปัญหาโลก
CIVIL ENGINEERING AND GLOBAL CRISES

18 - 20 พฤษภาคม 2554 | โรงแรมเดอะชานน์ พัทยา ชลบุรี



จัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

- | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|---------|
| 1. ผศ.ดร.ภัทรภรณ์ | เมฆพฤษวงค์ | 3. ดร.อัจฉรา | ชุมวงศ์ |
| 2. ดร.วศพร | เดชะพีรพานิช | | |

กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

- | | | | |
|----------------|--------|--|--|
| 4. ดร.เอกรัตน์ | อาชีวะ | | |
|----------------|--------|--|--|

กรมทางหลวงชนบท

- | | | | |
|-----------------|------------|--|--|
| 5. ดร.แก่นวิทย์ | วงศ์ชูศิริ | | |
|-----------------|------------|--|--|

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

- | | | | |
|-------------|--------------|--|--|
| 6. ดร.สาโรช | บุญศิริพันธ์ | | |
|-------------|--------------|--|--|

การประปานครหลวง

- | | | | |
|---------------|---------|--|--|
| 7. นายดลเชษฐ์ | กล้าหาญ | | |
|---------------|---------|--|--|

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- | | | | |
|---------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 8. พ.อ.ดร.กนก | วีรวงศ์ | 22. ผศ.ดร.วัชระ | เพียรสุภาพ |
| 9. รศ.ดร.เกษม | ชูจากรุกุล | 23. ผศ.ดร.วัฒน์ชัย | สมิทธาร |
| 10. ผศ.ดร.จรูญ | รุ่งอมรรัตน์ | 24. รศ.วิชัย | เยี่ยงวีรชน |
| 11. ผศ.ดร.จิตติชัย | รุ่งนภานานฎ | 25. ผศ.ดร.วิทิต | ปานสุข |
| 12. ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ | จินตนาภักดี | 26. รศ.ดร.วิศณุ | ทรัพย์สมพล |
| 13. ศ.ดร.เฉลิมชนม์ | สภิระพจน์ | 27. รศ.ดร.วิสุทธิ์ | ช่อวีเชียร |
| 14. รศ.ดร.ฐิรวัตร | บุญญะฐี | 28. ผศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ | เฉลิมพงศ์ |
| 15. ผศ.ดร.ชเนศ | ศรีศิริโรจนาร | 29. รศ.ดร.สมพงษ์ | ศิริโสภณศิลป์ |
| 16. ผศ.ดร.นพดล | จอกแก้ว | 30. ผศ.ดร.สรรเพชญ | ชื่อนิธิไพศาล |
| 17. อ.ดร.บุญชัย | แสงเพชรงาม | 31. รศ.ดร.สุจิต | คุณธนกุลวงศ์ |
| 18. อ.ดร.เบญจพร | บุญชยาอนันต์ | 32. รศ.ดร.สุธา | ชาวเชียร |
| 19. ผศ.ดร.พิสุทธิ | เพียรมนกุล | 33. ผศ.ดร.เสรี | จันทร์โยธา |
| 20. รศ.ดร.เพชรพร | เขาวกิจเจริญ | 34. อ.ดร.อัศววัชร | เล่นวารี |
| 21. ผศ.ดร.มาโนช | โลหเตปานนท์ | | |

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

- | | | | |
|--------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| 35. อ.ดร.จิระกานต์ | ศิริวิญญูไมตรี | 41. รศ.ดร.วราวุธ | วุฒินิชย์ |
| 36. อ.ชูพันธุ์ | ชมภูจันทร์ | 42. อ.ดร.วิษุวัตก์ | แต่สมบัติ |
| 37. ดร.นันทวัฒน์ | ชมหวาน | 43. อ.ดร.สมชาย | ประยงค์พันธ์ |
| 38. ผศ.นิมิตร | เจ็ดฉันทพิพัฒน์ | 44. รศ.สันติ | ทองพ่านัก |



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

39.	รศ.ดร.บัญญัติ	ขวัญยืน	45.	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์	โพลิตสกุลชัย
40.	อ.ดร.ปนัดดา	กสิกิจวิวัฒน์			

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

46.	อ.ดร.ชัชชัย	ตันชัยสวัสดิ์
-----	-------------	---------------

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

47.	รศ.ดร.ก่อโชค	จันทรวงกูร	67.	อ.ดร.วรพงศ์	ศรีโสพล
48.	รศ.ดร.กอบเกียรติ	ผ่องพูน	68.	อ.ดร.วรรณดี	ไทยสยาม
49.	ผศ.ดร.กิจพัฒน์	ภู่วรรณ	69.	ผศ.ดร.วราเมศวร์	วิเชียรแสน
50.	อ.ดร.จิระวัฒน์	กณะสุด	70.	รศ.วัชรินทร์	วิทยกุล
51.	รศ.ดร.ชวลัย	วณิชเวทิน	71.	ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ
52.	รศ.ชัยวัฒน์	ชยันการนาวิ	72.	อ.ว่าที่ร้อยตรีรัชช	สุขวิมลศรี
53.	รศ.ดร.ตระกูล	อร่ามรักษ์	73.	รศ.ดร.ศุภกิจ	นนทนานันท์
54.	อ.ดร.ทรงพล	จารุวิเศษย์	74.	ผศ.ดร.ศุภวุฒิ	มาลัยกฤษณะชลิ
55.	ผศ.ดร.ทรงวุฒิ	เฮงพระธานี	75.	ดร.สมปราวณา	ฤทธิ์พริ้ง
56.	อ.ดร.ทวีศักดิ์	จิรชนถาวร	76.	รศ.ดร.สมโพธิ์	วิวิธเกยูรวงศ์
57.	อ.ดร.ธีรพงศ์	จันทร์เพ็ญ	77.	อ.สมฤทัย	ทะเลดวง
58.	ผศ.ดร.นฤมล	วงศ์ธนาสุนทร	78.	อ.สมศักดิ์	โชติชนาทวีวงศ์
59.	รศ.ดร.นุชนารณ	ศรีวงศ์ตานนท์	79.	รศ.ดร.สันติ	ชินานูวัตวงศ์
60.	อ.ดร.บารเมศ	วรรณระกฤติ	80.	อ.ดร.สิดางค์	พิลัยหล้า
61.	รศ.ดร.เบญจพล	เวทย์วิวัฒน์	81.	อ.ดร.สุชาติ	เหลืองประเสริฐ
62.	รศ.ประทีป	ดวงเดือน	82.	ผศ.ดร.สุนิรัตน์	กุศลาลัย
63.	ผศ.ดร.ปิยะ	โชติโกไกร	83.	รศ.ดร.สุวิมล	สังจาวณิชย์
64.	ผศ.ดร.พงศ์ศักดิ์	หนูพันธ์	84.	อ.ดร.เหมือนมาศ	วิเชียรสินธุ์
65.	รศ.ภัชราภรณ์	สุวรรณวิทยา	85.	ผศ.ดร.อดิษฐ์	พรพรหมินทร์
66.	ผศ.ดร.รุ่งรัตน์	ภิสัชเพ็ญ	86.	อ.ดร.อภินิติ	โชติสังกาศ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

87.	ดร.สิริวงศ์	กลิ่นคำสอน	88.	อ.ดร.อำพน	จรัสรุ่งเกียรติ
-----	-------------	------------	-----	-----------	-----------------

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

89.	อ.ดร.พิชิตต์	จรัสบำรุงโรจน์	91.	อ.ดร.อดิเทพ	ศรีคงศรี
90.	อ.ดร.สุนิศา	สุภาพ			

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

92.	ผศ.ดร.ธเนศ	เสถียรนาม	97.	อ.ดร.วันชัย	สะตะ
93.	ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	98.	รศ.ดร.วันเพ็ญ	วิโรจน์ภูมิ
94.	ผศ.ดร.พงศกร	พรพรรณรัตนศิลป์	99.	ผศ.ดร.วิเชียร	ปลื้มกมล
95.	ผศ.ดร.พนกฤษณ	คลังบุญครอง	100.	รศ.วีระ	หอสกุลไท

96. รศ.พัชรีย์ หอวิจิตร

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

101. ผศ.ดร.ชยานนท์ หารัชภิญโญ
102. รศ.ดร.ธนพร สุปรียศิลป์
103. ผศ.ธิดิ เชี่ยวชาญวิทย์
104. ผศ.ดร.บุญเทพ นานะวงศ์สรศักดิ์
105. ผศ.ดร.ประพนธ์ เขมดำรง
106. อ.ดร.ปรีดา พิทยาพันธ์
107. ผศ.ดร.ปุ่น เทียงบูรณธรรม

108. อ.ดร.พุทธิพล คำรงค์ชัย
109. ผศ.ดร.ยงยุทธ สุขวนาชัยกุล
110. อ.ดร.รังสรรค์ อุดมศรี
111. รศ.ลำดวน ศรีศักดิ์
112. รศ.สมใจ กาญจนวงศ์
113. รศ.ดร.เสนีย์ กาญจนวงศ์
114. อ.อุดม ฉัตรศิริกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

115. ผศ.ดร.จินต์ อโณทัย
116. ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์
117. รศ.ดร.เฉลิมราช วันทวิน
118. ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
119. อ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล
120. อ.ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์
121. ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์
122. ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน
123. อ.ธงชัย ไพร์ทอง
124. ดร.ธรรมบุญ เสงษ์ภูิกุล
125. อ.ดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี
126. ผศ.ดร.นิตยา หวังวงศ์วิโรจน์
127. อ.ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล

128. ผศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์
129. อ.ดร.พิชญ์ สุธีวรธรรม
130. อ.ดร.วรัช ก้องกิจกุล
131. อ.ดร.วีระชาติ ตั้งจิรภัทร
132. ผศ.ดร.สนิท วงษา
133. รศ.ดร.สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์
134. ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล
135. ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว
136. ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์
137. อ.ดร.อภิชาติ อัฐกุล
138. อ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์
139. รศ.เอนก ศิริพานิชกร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

140. รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ
141. อ.ดร.กวิณ ตันติเสวี
142. รศ.ดร.กิตติชัย ธนทรัพย์สิน
143. ผศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช
144. ผศ.ดร.นิรันดร์ อนันต์ธนกุล

145. รศ.ดร.ปิติ สุนทรสุขกุล
146. อ.ดร.พรรณพิมพ์ มะเปี่ยม
147. อ.ดร.ภาณุวัฒน์ ปิ่นทอง
148. ผศ.ดร.วรรณวิทย์ แด้มทอง
149. อ.ดร.สุัญญา โปษะเนันทน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

150. อ.ดร.มาโนช สรรพกิจทิพากร

151. ผศ.ดร.สัจจา บุญยฉัตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

152. ผศ.ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร
153. อ.ดร.ถิรยุทธ ลิมานนท์

158. อ.ดร.ศิริดล ศิริธร
159. ผศ.สนั่น ตั้งสถิตย์



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

154.	ผศ.ดร.ปรียาพร	โกษา	160.	รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์
155.	ผศ.ดร.พรพจน์	ตันเส็ง	161.	รศ.ดร.สุขสันต์	หอยพิบูลสุข
156.	อ.ดร.รัฐพล	ภูบุบผาพันธ์	162.	ผศ.ดร.สุดจิต	ครุจิต
157.	ผศ.ดร.วชรภูมิ	เบญจโอฬาร	163.	อ.ดร.อภิชน	วัชรเรนทร์วงศ์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์					
164.	อ.เกษมชาติ	ศรีวัลย์	168.	อ.ดร.ภาวิณี	เอี่ยมตระกูล
165.	รศ.ดร.ชวลิต	ชาลีรักษ์ตระกูล	169.	ผศ.ดร.ภูมิศิต	เลิศวัฒนารักษ์
166.	ผศ.ดร.दनัย	วันทนากร	170.	รศ.ดร.วีรยา	ฉิมอ้อย
167.	รศ.ดร.บุรฉัตร	ฉัตรวีระ	171.	อ.ดร.หาญพล	พึงรัมย์
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์					
171.	อ.ดร.กำพล	ทรัพย์สมบูรณ์	176.	รศ.วิชัย	ฤกษ์ภูริทัต
172.	อ.ดร.คุษฎี	สภิตเศรษฐทวี	177.	อ.ดร.ศิริชัย	ตันรัตวงศ์
173.	ผศ.ดร.ทวีศักดิ์	แตงกระโทก	178.	รศ.ดร.สมบัติ	ชื่นชูกลิ่น
174.	ผศ.ดร.ปจวีย์	ทองสนิท	179.	ผศ.ดร.สลีภรณ์	เหลืองวิเศษเจริญ
175.	อ.ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา			
มหาวิทยาลัยบูรพา					
180.	ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	183.	ผศ.ดร.สยาม	ยิ้มศิริ
181.	อ.ดร.ธรรมบุญ	รัศมีมาสเมือง	184.	ผศ.ดร.สุเมศวร์	พิริยะวัฒน์
182.	อ.ดร.พัชรพงษ์	อาสนจินดา			
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม					
185.	อ.ดร.กฤษณ์	ชัยมูล	189.	ผศ.ดร.เรืองรุชดี	ธีระโรจน์
186.	อ.ชัยชาญ	ไชถิตนอม	190.	อ.ดร.สหลาภ	หอมวุฒิวงศ์
187.	อ.ดร.นิตา	ชัยมูล	191.	อ.สุดารัตน์	คำปิลิว
188.	ผศ.ดร.เพชร	เพ็งชัย	192.	ผศ.ดร.อนงค์ฤทธิ์	แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหิดล					
193.	Asst.Prof.Dr. Ranjna	Jindal	203.	อ.พนม	ชัยสิทธิ์
194.	อ.ดร.กฤษณัส	สุรกิจย์	204.	อ.ดร.บุษยามา	พันธุ์กมลศิลป์
195.	ผศ.ดร.กวี	ไกรระวี	205.	อ.ดร.ระวี	สุวรรณเดโชไชย
196.	อ.ดร.กาญจนา	นาคะภากร	206.	ผศ.ดร.วรรณสิริ	พันธุ์อุไร
197.	อ.ดร.จาวรรณ	วงศ์ทะเลนตร	207.	ผศ.ดร.วเรศรา	วีระวัฒน์
198.	ผศ.ดร.รัชวีร์	ลีละวัฒน์	208.	อ.ดร.ว้จันท์	มัตติทานนท์
199.	ผศ.ดร.บันลือ	เอมระจุ	209.	ผศ.สมพงษ์	ชื่นอัม
200.	ผศ.ดร.เบญจภรณ์	ประภักดี	210.	ผศ.ดร.อัฉรดา	อัศวรุจิกุลชัย
201.	อ.ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	211.	ผศ.ดร.อารียา	ฤทธิมา
202.	ผศ.ปิยะ	รัตนสุวรรณ	212.	รศ.อุษณีย์	อุยเสถียร

มหาวิทยาลัยรังสิต

213. รศ.กิริติ	สีวัจนกุล	217. ผศ.ดร.วินัย	อวยพรประเสริฐ
214. อ.ดร.เกียรติศักดิ์	สหศักดิ์มนตรี	218. รศ.วิสูตร	จิระดำเกิง
215. อ.ดร.ธรรมบุญ	สุสำเภา	219. ผศ.สมศักดิ์	เอื้ออัมมาลัย
216. ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์	รุจิระบรรยง		

มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

220. ผศ.ดร.ชีวินทร์	ลี้มศิริ	222. ผศ.ดร.อนุชิต	อุชายภิชาติ
221. อ.ดร.ประยงค์	กิริติอุไร		

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

223. อ.ดร.นคร	กกแก้ว	224. อ.ดร.ปกรณ	ดิษฐกิจ
---------------	--------	----------------	---------

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

225. ผศ.ดร.ธนาตล	คงสมบูรณ์	227. อ.อารีย์	หาญสืบสาย
226. ผศ.สุคนธ์รัตน์	เพชรรัตน์		

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

228. ผศ.ดร.ชัยศรี	สุขสาโรจน์	230. รศ.สราวุธ	จริตงาม
229. รศ.ดร.ธนิศ	เฉลิมยานนท์		

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

231. อ.ดร.กรรณิภา	รัตนพงษ์เสนา	238. ผศ.ดร.ธนากร	ทวีวุฒิ
232. ผศ.กฤษณ์	ศรีวรมาศ	239. อ.ดร.วัลยา	วิริยเสนกุล
233. ผศ.ดร.กิตติศักดิ์	ขันตียวิชัย	240. ผศ.ดร.วิภาดา	สนองราษฎร์
234. ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	241. ผศ.ดร.วิวัฒน์	พัทธานานนท์
235. อ.จักรกฤษณ์	อัมพูช	242. รศ.ดร.สถาพร	โกคา
236. อ.ดร.ณนัตถิก	ชาวีรัตน์	243. ผศ.ดร.สิทธา	เจนศิริศักดิ์
237. ผศ.ดร.ทวีศักดิ์	วังไพศาล		

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

244. พ.ต.ดร.ณัฐพร	นุตยะสกุล	247. พ.ท.ดร.ไท	ชาญกุล
245. พ.ท.ณัฐภูมิ	ศรีเพชร	248. พ.ท.ดร.ปรีชา	อภิวันท์ตระกูล
246. ร.ต.ดร.ต้องการ	แก้วเฉลิมทอง	249. พ.อ.ดร.อนันต์	ปัจวิทย์

สถาบันพัฒนาการชลประทาน

250. อ.ดร.วิษณุ	ศรีวงษา		
-----------------	---------	--	--

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

251. ผศ.ดร.มงกุฏ	เพียรธนะกุลชัย	252. ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล
------------------	----------------	-----------------	-----------------



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

253.	อ.ดร.ประพัทธ์พงษ์	อุปลา	255.	รศ.สิริวัฒน์	ไชยชนะ
254.	ผศ.สมเกียรติ	ขวัญพฤษ			

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

256.	รศ.ดร.พานิช	วุฒิปฤษ	257.	ผศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ
------	-------------	---------	------	-------------	--------------

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

258.	อ.ดร.ธราวุธ	ทิพย์เดโช
------	-------------	-----------

สำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร

259.	นายรัชชชัย	นภาศักดิ์ศรี
------	------------	--------------

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.)

260.	ผศ.ดร.ปริญญา	ถนัดทาง	261.	ดร.ชัชวาล	สิมะสกุล
------	--------------	---------	------	-----------	----------

หน่วยงานภาคเอกชน / อื่น ๆ

262.	Prof.Dr.CT.	Thomas	NJIT, USA
263.	นายจรง	เจียมอนุกุลกิจ	บริษัท เดคโค เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนซัลแทนท์ จำกัด
264.	ดร.สวัสดิชัย	องค์ประเสริฐ	บริษัท ทีเอ็มคอนซัลตติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด
265.	ดร.สุจิต	จิตติรัตนาก	บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)
266.	ดร.ชรรมณูญ	มนัสสุทธิกิจ	บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)
267.	ดร.กิตตินันท์	ศิริจรรยาชัย	
268.	รศ.ดร.พิชัย	นิมิตรยงสกุล	
269.	นายธนาย	ชรินทร์สาร	
270.	ดร.สมเกียรติ	มณีสถิตย	
271.	ดร.อิสรทัต	รัตมัท	

STR0014	การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและกรณีศึกษา Evaluation of Existing Strength of RC. Bridge and Case Study วิชัย กิจวัชรเวทย์, ประเสริฐ ศิริรัตนันต์, วิมล ลาวัณยวิสุทธิ์	230
STR0016	ผลของระดับความเสียหายต่อความแข็งแกร่งเชิงคดและความถี่ธรรมชาติของคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึง ภายหลัง Effects of Structural Damage on Flexural Rigidity and Natural Frequencies of Post – Tensioned Prestressed Concrete Beam คณิศร บีชะตระกูล, สายันต์ ศิริมนตรี, กฤดาบุษย์ ชุมภูมิ่ง	231
STR0018	โครงสร้างแผ่นประกบระหว่าง เหล็ก-คอนกรีต-เหล็ก: โครงสร้างทางเลือกสำหรับวิศวกรรมโครงสร้าง Steel-Concrete-Steel Sandwich Structure: An Alternative Structure for Structural Engineering มานิตย์ ลีกิจวัฒน์	232
STR0019	การประเมินสะพานเหล็กยกระดับในกรุงเทพมหานคร ด้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยวิธี แผนภาพกำลัง และความต้องการ Seismic Evaluation of Elevated Steel Bridge in Bangkok by Capacity-Demand Diagram Method มานิตย์ ท่าทอง, วิโรจน์ บุญญุกัญญา	233
STR0020	พฤติกรรมการรับแรงดัดของพื้นแผ่นเหล็กประกอบที่เพิ่ม Perforated Rib ด้านแรงเฉือน Behavior of Composite Steel Deck Floor with Perforated Rib as Shear Connector under Bending นพดล ชุมวิโรจน์, ตระกูล อารามรักษ์, ต๋องกุล กาญจนาลัย	234
STR0021	ระเบียบวิธี K-FEM ในการประยุกต์ใช้กับปัญหาที่วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกัน The Application of Kriging based Finite Element Method (K-FEM) in Material Discontinuity Problems วิเชียร โสมณวัฒน์, วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย	235
STR0022	ผลของความหนาต่อการกระจายตัวประกอบความเข้มของความเค้น Influence of Thickness on Distribution of Stress Intensity Factors กิตติศักดิ์ สุขสุทธิ, จรุง รุ่งอมรรักษ์	236
STR0026	อิทธิพลของอัตราส่วนความสูงต่อความหนาต่อกำลังอัดของปริซึมบล็อกประสาน Influence of Height-to-Thickness Ratio on Compressive Strength of Interlocking Block Masonry Prisms อนุกุล ศรีหรั่ง, กริสน์ ชัยมูล, สหสภาก หอมวิวัฒน์	237
STR0029	การวิเคราะห์และออกแบบบันไดชานพักลอยแบบสมมาตร 2 ชั้น Design and Analysis of 2 Story Symmetrical Free-Standing Stairs นัฐพล วัฒนมั่นคง, อำนวย พานิชกุลพงศ์, สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	238
STR0032	การวิเคราะห์พฤติกรรมก่อนและหลังการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย RBSM Analysis of Pre- and Post- Crack Behavior of Reinforced Concrete Beam by RBSM วราพงษ์ ศรีโสมหา	239
STR0033	หน่วยแรงในเหล็กเดือยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่จุดรองรับ Stress in Dowel Bar of Reinforced Concrete Beam at Support ชานัญ น้อยพิทักษ์, มาโนช รุจิภากร	240
STR0034	Anchorage Behaviour of Headed Reinforcement Bar in CCT Nodes Wichian Kaewkhampa, Trakool Aramraks, Wanchai Yodsudjai	241

หน่วยแรงในเหล็กเดือยของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่จุดรองรับ Stress in dowel bar of reinforced concrete beam at support

ชำนาญ ห้อยพิทักษ์ (Chumnahn Noipitak)¹

มานอช รุจิภากร (Manoch Rujipakorn)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี nahn@hotmail.com

²อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี drmanoch@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยแรงในเหล็กเสริมของคานคองกรีตเสริมเหล็ก ที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเสา-คาน โดยการสร้างแบบจำลองเสา-คาน ที่เทคอนกรีตแบบมีรอยต่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเสา-คานที่เทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อ แบบจำลองมีขนาดคาน 20X40X100 ซม. เสริมเหล็กแกนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. เสริมที่ระยะห่าง 15 ซม. ขนาดเสา 20X20X100 ซม. เสริมเหล็กแกนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. เสริมที่ระยะห่าง 15 ซม. ผลการทดสอบ แบบจำลองที่เทคอนกรีตแบบมีรอยต่อรับแรงโดยรวมลดลงจากแบบจำลองที่เทคอนกรีตแบบไม่มีรอยต่อ ร้อยละ 8.8 ถึง ร้อยละ 15 จากการทดสอบพบว่าปริมาณเหล็กแกนที่เพิ่มขึ้นในคานคองกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มเหล็กเดือยจากปริมาณเหล็กแกนเดิมร้อยละ 23.66 ถึงร้อยละ 32.62 ทำให้คานคองกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงเทียบเท่ากับคานคองกรีตที่ไม่มีรอยต่อได้ ดังนั้นจากการศึกษาสรุปได้ว่า เมื่อต้องเทคอนกรีตระหว่างเสา-คาน แบบมีรอยต่อ ควรมีการเสริมเหล็กเดือยเพิ่มในรอยต่อ เพื่อให้คานสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น

ABSTRACT

This research study was focused on stress in dowel bar of reinforced concrete beam at support, particularly at the joint of the column-beam. The beam specimens cast were in 20X40X100 cm. rectangular beam mold, reinforced with DB16 cm. bar as well as with RB 6 mm. stirrup at spacing of 15 cm. While, column specimens cast were in 20X20X100 cm. rectangular beam mold, reinforced with DB16 cm. bar as well as with RB 6 mm. stirrup at spacing of 15 cm. When comparing to joint reinforced concrete beam at support and without joint reinforced concrete, it was found that load generally decreased at 8.8 -15 per cent. From the study, it revealed that the increasing quality of main reinforced steel bar could strengthen the joint, when enhancing dowel bar 23.66 - 32.62 per cent of original main reinforced steel bar could strengthen the joint the same as without joint beam concrete. Based on the results, it can be concluded that the number of dowel bar should be increased when interval placing concrete technique was introduced at the joint of reinforced concrete beam near support.

KEYWORDS: Reinforced concrete, Concrete connection, Dowel bar

ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ศึกษา

ปัจจัยที่ควรคำนึงเป็นลำดับต้นๆ ในการก่อสร้าง คือ ความประหยัด ความสะดวกรวดเร็วในการทำงาน ตลอดจนวิธีการก่อสร้างที่ไม่ยุ่งยาก ส่วนในเชิงวิศวกรรมคือ นำความสามารถและข้อดีในด้านต่างๆ ทางกลศาสตร์ของวัสดุมาใช้กันอย่างเหมาะสมและเต็มประสิทธิภาพสูงสุด

ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้นำข้อดีด้านกลศาสตร์ของคอนกรีตและเหล็กเสริมมาใช้ร่วมกัน ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กปัจจุบันใช้เหล็กเสริมทำเป็นปลอกเสริมต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวทแยงกรณีแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวตั้งบริเวณรอยต่อของคอนกรีตที่มีระยะเวลาการก่อตัวแตกต่างกัน วิศวกรผู้รับผิดชอบที่เกี่ยวข้องต้องตรวจสอบ ออกแบบเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ การออกแบบเพิ่มเติม เพื่อให้ห้องค์ประกอบของโครงสร้างได้ใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพ อย่างปลอดภัย ผู้ออกแบบจำเป็นต้องรู้ข้อมูลในการออกแบบให้ถูกต้องตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นทำให้มีแนวคิดในการรวบรวมข้อมูล การออกแบบ การดำเนินการก่อสร้าง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น พร้อมนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหาย ตลอดจนศึกษาถึงวิธีการเสริมเหล็กเดี่ยว ผลสรุปของการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำข้อมูลไปใช้เป็นพื้นฐานในการพิจารณาประกอบการออกแบบของวิศวกร เพื่อการป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงเฉือน

บทความปริทัศน์และทฤษฎีพื้นฐาน

กรณีไม่สามารถทดสอบคอนกรีตให้แล้วเสร็จได้ในครั้งเดียว ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ การคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (A_{vf}) บริเวณรอยต่อที่ไม่มีเหล็กถูกตั้งรับแรงเฉือนได้ดังนี้

$$V_n = \mu A_{vf} f_y \quad (1)$$

V_n = กำลังแรงเฉือนที่ยอมให้เกิดขึ้น

μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

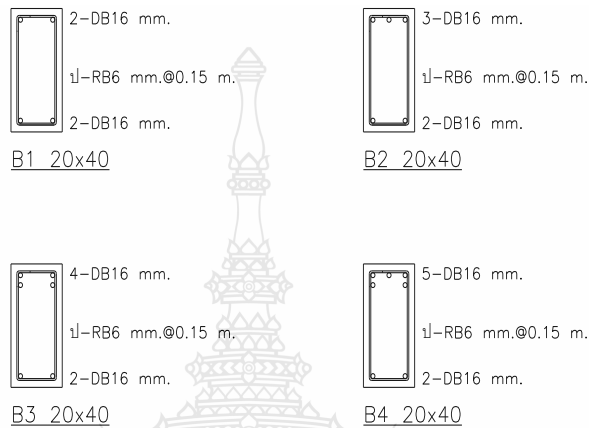
A_{vf} = ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริม

อย่างไรก็ตามในการออกแบบปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รอยต่อเสา – คาน ควรพิจารณาเหล็กแกนที่เสริมรับโมเมนต์ดัดร่วมด้วย เพื่อหาข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการพิจารณาคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน และแนวทางการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นจากแรงเฉือนและแรงโมเมนต์ดัดบริเวณจุดต่อเสา-คาน ตลอดจนพัฒนาวิธีการเสริมกำลัง ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยมีการศึกษาหน่วยแรงในเหล็กแกนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รอยต่อเสา – คาน เพื่อรวบรวมข้อมูล ลักษณะรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงกระทำบริเวณรอยต่อ พร้อมวิเคราะห์หาสาเหตุและแนวทางการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น

วิธีการศึกษา วิเคราะห์ วิจัย

คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบคานยื่น จำนวน 8 ตัวอย่าง มีรูปแบบการเสริมเหล็กแกนแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 1 โดยหล่อแบบไม่มีรอยต่อ 4 ตัวอย่าง หล่อแบบมีรอยต่อ 4 ตัวอย่าง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบช่วงเดียว ลักษณะการเสริมเหล็กแกน กรณี B1 ยาว 4 ม. จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยหล่อแบบไม่มีรอยต่อ 1 ตัวอย่าง หล่อแบบมีรอยต่อ 1 ตัวอย่าง



ภาพที่ 1 ลักษณะเหล็กเสริม

คุณสมบัติของคอนกรีต

กำลังอัดสูงสุด 180 กก./ตร.ซม.ที่อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ คงที่เท่ากับ 0.63

คุณสมบัติของเหล็กเสริม

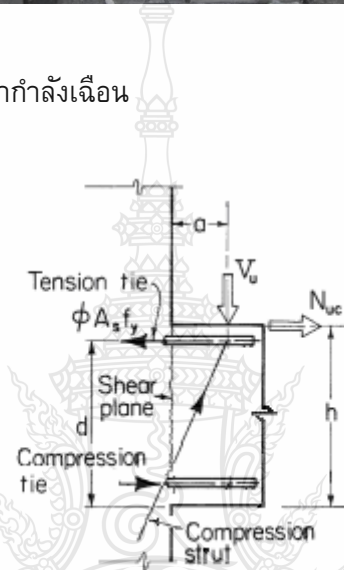
เหล็กปลอก SR24 ขนาด RB 6 พื้นที่หน้าตัด 0.275 ตร.ซม. กำลังดึงจุดกลาง 6,575 กก./ตร.ซม.เหล็กแกน SD30 ขนาด DB 16 พื้นที่หน้าตัด 1.930 ตร.ซม. กำลังดึงจุดกลาง 4,027 กก./ตร.ซม.

วิธีการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่จุดต่อเสา – คาน

แท่งตัวอย่างทดสอบหาค่ากำลังเฉือน ลักษณะตามภาพที่ 2 เป็นแบบคานยื่น ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบไฮดรอลิก วัดค่าแรงด้วย Load Cell แรงกระทำผ่านแผ่นเหล็กถูกบังคับให้กระทำบริเวณ Shear Plane แสดงดังภาพที่ 3 ในการทดสอบจะเพิ่มแรงจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ



ภาพที่ 2 แท่งตัวอย่างทดสอบหาค่ากำลังเฉือน



ภาพที่ 3 Structural action of a corbel

วิธีการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทดสอบในแบบจำลองกำหนดค่าตามเงื่อนไขการออกแบบ

คุณสมบัติของคอนกรีต

กำลังอัดประลัย (f'_c) = 180 กก./ตร.ซม.

โมดูลัสความยืดหยุ่น (E_c) = $15,120 \sqrt{f'_c}$ = 202,856 กก./ตร.ซม.

อัตราส่วนปัวซอง (ν_c) = 0.15

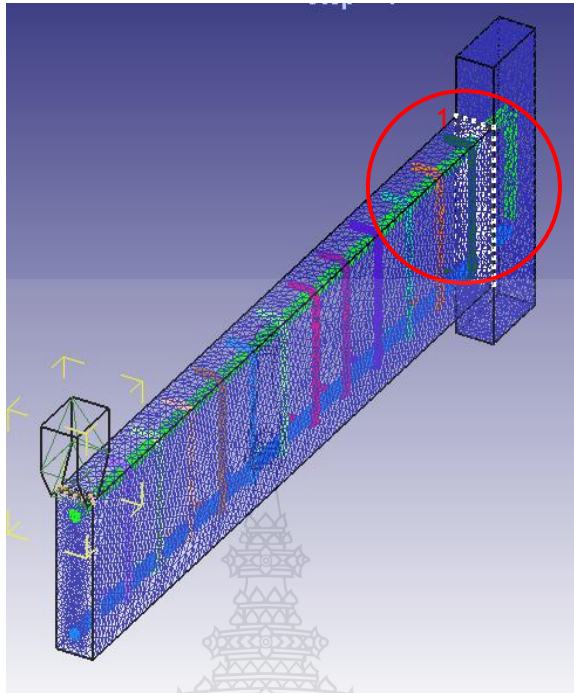
คุณสมบัติเหล็กเสริม

โมดูลัสความยืดหยุ่น (E_s) = 2.04×10^6 กก./ตร.ซม.

อัตราส่วนปัวซอง (ν_s) = 0.30

แรงเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีตที่รอยต่อเสา - คาน $\mu = 0.6$ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กแกนกับ

ผิวคอนกรีตเป็นแบบ มีแรงยึดแน่นเพียงพอ



ภาพที่ 4 แบบจำลองคานช่วงเดี่ยวยาว 4 ม. มีแรงกระทำเป็นจุดที่ตำแหน่งกลางคาน

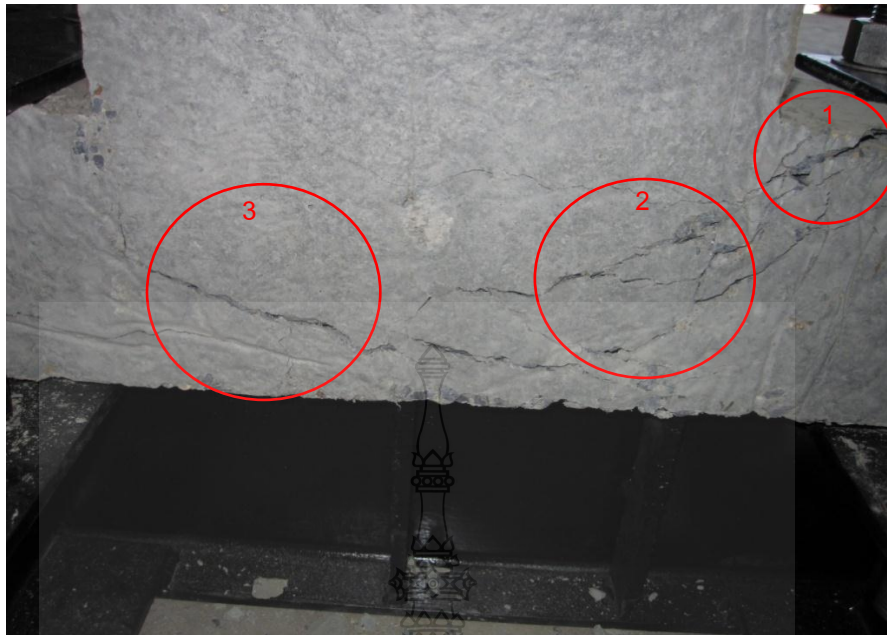
เนื่องจากชิ้นส่วนของโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร จึงจำลองเสาคอนกรีต คานคอนกรีต เหล็กแกนคาน และเหล็กปลอกเพียงครึ่งหนึ่งของโครงสร้างจริงเพื่อให้ค่าในการวิเคราะห์ห้อยลง แบบจำลอง เป็นคานช่วงเดี่ยว มีแรงแบบจุดกระทำกลางคาน กำหนดให้เสาคอนกรีตถูกยึดแน่น พิจารณาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กแกนที่บริเวณรอยต่อเสา – คาน ในตำแหน่งที่ 1 มีลักษณะประกอบดังภาพที่ 4

ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

ผลทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่จุดต่อเสา – คาน

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่จุดต่อเสา – คาน พิจารณารอยแตกร้าว

กรณีเทแบบไม่มีรอยต่อลักษณะความเสียหายจะมีรอยแยกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นลำดับแรก ตามภาพที่ 5 ส่วนตำแหน่งที่ 2 และ 3 เกิดจากการถ่ายแรงของเหล็กแกนสู่คอนกรีตเสา ผลทำให้คอนกรีตบริเวณเสาเสียหายเกิดรอยร้าวและแยกออกจากกันตามลำดับ ส่วนกรณีเทแบบมีรอยต่อลักษณะความเสียหายจะแตกต่างจากการเทแบบไม่มีรอยต่อ คือจะเกิดการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นลำดับแรกตามภาพที่ 6 ความเสียหายของคานในตำแหน่งที่ 2 เสียหายเนื่องจากการถ่ายแรงของเหล็กแกนคานสู่คอนกรีตคาน ผลทำให้คอนกรีตคานเสียหายเกิดรอยร้าวและแยกออกจากกัน ส่วนตำแหน่งที่ 3 เสียหายเนื่องจากการถ่ายแรงของเหล็กแกนคานสู่คอนกรีตเสา ผลทำให้คอนกรีตบริเวณเสาเสียหายเกิดรอยร้าวและแยกออกจากกัน เหมือนกรณีเทแบบไม่มีรอยต่อ



ภาพที่ 5 ลักษณะรอยแตกร้าวกรณีเทแบบไม่มีรอยต่อ



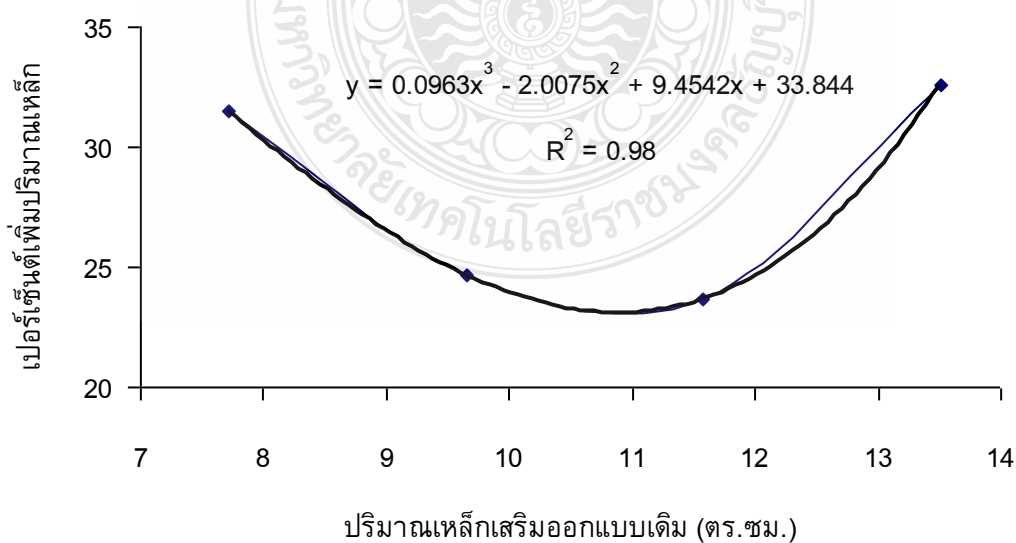
ภาพที่ 6 ลักษณะรอยแตกร้าวกรณีเทแบบมีรอยต่อ

พิจารณาด้านการรับกำลัง จากผลการทดสอบพิจารณาเปรียบเทียบผลการรับกำลัง เนื่องจากการเทแบบมีรอยต่อ ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างคอนกรีตลดลงส่งผลให้การรับแรงโดยรวมลดลงร้อยละ 8.8 ถึงร้อยละ 15 ของคานที่เทแบบไม่มีรอยต่อ เมื่อพิจารณาปริมาณเหล็กแกนที่เพิ่มขึ้นในคานคอนกรีตที่มีรอยต่อสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ แสดงผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าผลการทดสอบแรงเฉือนสูงสุด

ลักษณะการเสริมเหล็ก	ปริมาณเหล็กเสริม As (ตร.ซม.)	ผลทดสอบค่าแรงเฉือนสูงสุดของคาน (P_u)				ปริมาณเหล็กที่ต้องการเนื่องจากแรงเฉือนสูงสุด	
		WSD (กก.)	ไม่มีรอยต่อ (กก.)	มีรอยต่อ (กก.)	ΔP_u ลดลง (%)	ปริมาณเหล็กเสริม As (ตร.ซม.)	ผลต่างปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้น (%)
B1	7.72	4,305	9,560	8,719	8.8	10.15	31.49
B2	9.65	4,305	9,987	9,088	9	12.03	24.67
B3	11.58	4,305	10,682	9,613	10	14.32	23.66
B4	13.51	4,305	11,857	10,078	15	17.92	32.62

เมื่อเปรียบเทียบผลต่างของปริมาณเหล็กเสริมจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีเหตุจำเป็นไม่สามารถเทคอนกรีตเสา - คาน ให้แล้วเสร็จในครั้งเดียวได้ ควรเพิ่มปริมาณเหล็กในคานเพื่อให้รับแรงเฉือนได้มากเท่ากับคานที่เทเสร็จในครั้งเดียวโดยการเพิ่มปริมาณเหล็กเดี่ยวยจากที่ออกแบบเดิม



ภาพที่ 7 กราฟ เปอร์เซ็นต์เพิ่มปริมาณเหล็ก เฉพาะกรณีขนาดคานทดสอบ

กราฟเปอร์เซ็นต์เพิ่มปริมาณเหล็ก เฉพาะกรณีขนาดคานทดสอบแสดงในภาพที่ 7 คือการเพิ่มปริมาณเหล็กแกน ในคานที่เทแบบมีรอยต่อ ทำให้คานสามารถรับแรงได้มากขึ้นเทียบเท่ากับคานที่เทแบบไม่มีรอยต่อ โดยการนำผลต่างปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับปริมาณเหล็กเสริมที่ออกแบบเดิม

อย่างไรก็ตามเงื่อนไขการออกแบบแรงเฉือนสูงสุดจะแปรผันตามเหล็กเสริมปลอกและกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งในคานตัวอย่างทดสอบนี้ยอมให้รับแรงเฉือนสูงสุดที่ 4,305 กก. เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดเหล็กรับแรงเฉือนที่ต้องการบริเวณจุดต่อ ถ้าให้เหล็กแกนรับภาระแรงเฉือนโดยล่ำพังปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ 7.175 ตร.ซม.

ถ้าพิจารณาแรงบิดที่ผิวสัมผัสของหน้าตัดคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ช่วยรับภาระแรงร่วมด้วย แทนค่าจากสมการที่ 1 ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ 4.783 ตร.ซม.

ซึ่งตัวเลข 7.175 และ 4.783 มีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริมในคานทุกกรณี ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณเหล็กแกนในคานที่เทแบบมีรอยต่อ เพื่อเพิ่มความสามารถการรับแรงให้เทียบเท่ากับคานที่เทแบบไม่มีรอยต่อต้องเพิ่มปริมาณเหล็กอีกร้อยละ 33.90 (ได้จากการแทนค่าจากภาพที่ 7) ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ 9.61 ตร.ซม. ดังนั้นต้องเพิ่มเหล็กเดียวในคานกรณี B1 เพียงกรณีเดียว จึงจะทำให้คานสามารถต้านทานแรงเฉือนที่ยอมให้ตามค่าที่ออกแบบเดิมได้อย่างปลอดภัยทุกกรณี

จากการจำลองคานช่วงเดียวแบบง่ายยาว 4 ม. มีแรงกระทำเป็นจุด (P_u) กลางคานผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในเหล็กเดียวที่จุดต่อเสา - คาน กับแบบจำลองทดสอบด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงในเหล็กเดียวที่จุดต่อเสา - คาน กับวิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ลักษณะการเสริมเหล็ก	แรงสูงสุดที่ยอมให้ P_u (kg-force)	ลักษณะรอยต่อ	ค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กแกนที่จุดต่อเสา - คาน (ksc.)			
			วิธี WSD		วิธีโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	
			กลางคาน	ปลายคาน	กลางคาน	ปลายคาน
B1	1,870	ไม่มีรอยต่อ	154.9	78.8	164.3	48.3
		มีรอยต่อ	154.9	-	73.5	95.8
B2	2,804	ไม่มีรอยต่อ	157.2	118.2	145.2	91.7
		มีรอยต่อ	157.2	-	191.3	159.9
B3	3,656	ไม่มีรอยต่อ	165.8	154.2	164.8	117.7
		มีรอยต่อ	165.8	-	238.4	156
B4	3,909	ไม่มีรอยต่อ	141.5	164.8	149	126
		มีรอยต่อ	141.5	-	259	166.3

จากตารางที่ 2 พิจารณาค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กแกนกรณีเทคอนกรีตแบบมีรอยต่อ ผลจากการเคลื่อนตัวบริเวณรอยต่อทำให้เหล็กแกนบริเวณรอยต่อรับแรงโดยลำพัง หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นกับเหล็กแกนจึงมีค่ามากกว่ากรณีเทแบบไม่มีรอยต่อ เมื่อนำค่าหน่วยแรงมาวิเคราะห์เทียบกับแผนภูมิโมเมนต์ตัดผลของแผนภูมิเป็นแบบคานช่วงเดียวยึดแน่นที่ปลายทั้งสองด้าน

สรุปผล

เมื่อเทคอนกรีตที่เสา - คานแบบมีรอยต่อจะมีผลทำให้คาน รับแรงเฉือนโดยรวมลดลงร้อยละ 8.8 ถึงร้อยละ 15 ปริมาณเหล็กแกนที่เพิ่มขึ้นทำให้รอยต่อสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น การเพิ่มเหล็กเดือยร้อยละ 23.66 ถึงร้อยละ 32.62 ของปริมาณเหล็กเสริมเดิมทำให้รอยต่อสามารถรับแรงเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่มีรอยต่อได้ ผลกระทบของโมเมนต์ในเหล็กเดือยบริเวณรอยต่อเป็นแบบคานยึดแน่นที่ปลายคานทั้งสองด้าน ส่วนผลกระทบแรงเฉือนต่อเหล็กเดือยบริเวณรอยต่อเป็นแบบคานช่วงเดียวอย่างง่าย เมื่อเทคอนกรีตที่เสา - คาน แบบมีรอยต่อทำให้เหล็กแกนรับภาระแรงเฉือนมากขึ้นจากที่ออกแบบเดิม ควรเพิ่มปริมาณเหล็กแกนในคานเพื่อรับแรงเฉือนได้มากกว่าคานที่เทเสร็จในครั้งเดียว โดยการเพิ่มปริมาณเหล็กเดือยเพื่อรับภาระแรงที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัยตามกรณีคานที่ต้องการเหล็กเดือยเพิ่มจากการออกแบบเดิม

อ้างอิง

- ยุทธการ มณีจันทร์, กิจพัฒน์ ภู่วรรณ , 2553. ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, อุบลราชธานี, 12 – 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553, บทความเลขที่ STR 050.
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ, 2553.กำลังรับแรงเฉือนระหว่างรอยต่อคอนกรีตเก่าและใหม่ของหน้าตัดรับแรงดัด, โยธาสาร, เล่มที่ 2: เลขหน้า 70 - 73.
- ABAQUS/CAE User's Manual, version 6.7, Dassault Systemes, Providence, RI, 2007.
- M Gohnert. 2006. Contractor Postulates on shear in reinforced concrete. Journal of the South African institution of civil engineering, Volume 48 Number 4: 9–13

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายชำนาญ น้อยพิทักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	5 พฤษภาคม 2516
ที่อยู่	168 หมู่ 1 ตำบล บ้านกร่าง อำเภอ ศรีประจันต์ จังหวัด สุพรรณบุรี 72140
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2544
ประวัติการทำงาน	รับราชการ ตำแหน่ง อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
พ.ศ. 2539 – ปัจจุบัน	

