



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล

The Effects of Corrosion on the Performance of Reinforced Concrete Beams
Constructed in the Coastal Area

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

มีนาคม ๒๕๕๘

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล

The Effects of Corrosion on the Performance of Reinforced Concrete Beams
Constructed in the Coastal Area

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

บทคัดย่อ

ปัญหาสำคัญอันหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ก่อสร้างใกล้บริเวณชายฝั่งทะเล คือการเกิดสนิมในเหล็กเสริม กระบวนการเกิดสนิมนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเหล็กเสริมกับไอทะเลซึ่งสารประกอบคลอไรด์ ขณะที่เหล็กเสริมเกิดสนิมจะเกิดอาการบวมและดันให้คอนกรีตที่ผิวเกิดรอยแตกร้าวและในที่สุดเกิดการหลุดร่อน ทำให้โครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างประเภทนั้นๆไป วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1) เพื่อศึกษากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม 2) เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคานในสถานะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ เทียบกับในสถานะแวดล้อมปกติ 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ ตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการทดลองเป็นคานช่วงเดียวจำนวน 3 ชุด ชุดแรกมีขนาดหน้าตัด 150x250 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร ชุดสองขนาดหน้าตัด 200x400 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร ชุดสามขนาดหน้าตัด 250x500 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมจนน้ำหนักของเหล็กเสริมในคานลดลงถึงค่าที่กำหนดไว้ 3 ระดับคือระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับรุนแรง โดยใช้น้ำหนักเหล็กเสริมที่สูญเสียไป 15% 30% และ 50% ของน้ำหนักเหล็กเสริมเริ่มต้นเป็นตัวกำหนดความเสียหายตามลำดับ ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานเปรียบเทียบระหว่างคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมกับคานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม (คานควบคุม) ผลการทดสอบพบว่าคาน ค.ส.ล. ที่สูญเสียเหล็กเสริมเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมจะมีกำลังรับแรงดัดลดลงขึ้นอยู่กับระดับการสูญเสียเหล็กเสริมที่เกิดในเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมมากขึ้นกำลังรับแรงดัดของคานจะลดลงมากขึ้นด้วย สำหรับคานชุดที่ 1 (หน้าตัดขนาดเล็ก) พฤติกรรมการวิบัติของคาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมไม่แตกต่างจากคานควบคุม ซึ่งยังคงแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว อย่างไรก็ตามสำหรับคานหน้าตัดใหญ่ขึ้น (ชุด 2 และชุด 3) เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับปานกลางถึงรุนแรงจะแสดงพฤติกรรมการพังแบบเปราะเมื่อรับแรง และมีระยะการแอ่นตัวลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับคานควบคุม นอกจากนี้ลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับปานกลางและสูงมีขนาดใหญ่และกว้างมากกว่าคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับต่ำ ค่ากำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดคานที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ระบุที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการตาม ACI-318 ประมาณ 30% ถึง 56% ยกเว้นคาน B2E50

คำสำคัญ : คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คาน ค.ส.ล.), เหล็กเสริมเกิดสนิม, กำลังรับแรงดัด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่องผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2557 จาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต	3
2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	3
2.3 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
2.4 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม	6
2.5 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	15
3.3 การเตรียมตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา	17
3.4 การเตรียมวัสดุที่ใช้การทดสอบ	19
3.5 การหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	20
3.6 การบ่มคอนกรีต	21

บทที่ 4 ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมของคาน ค.ส.ล.	23
4.2 การคำนวณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม	25
4.3 ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมในตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ระดับความเสียหายต่ำ ปานกลาง และ รุนแรง	28
4.4 การซ่อมแซมคานคอนกรีตที่แตกร้าวเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริม	33

บทที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดคาน

5.1 การทดสอบการรับกำลังดัดของคานคอนกรีต ด้วยวิธีวิธี Third-Point Loading (ASTM C1609)	35
5.2 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 1 หน้าตัดคาน 15x25 ซม. ยาว 140 ซม.	38
5.3 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 2 หน้าตัดคาน 20x40 ซม. ยาว 240 ซม.	42
5.4 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 3	

หน้าตัดคาน 25x50 ซม. ยาว 240 ซม.	46
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก: แผ่น poster งานประชุมวิชาการ HERP3	53
ผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ขนาดคละของหิน	11
ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทราย	13
ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา	19
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมคอนกรีต	20
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่สูญเสียจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมของคาน ค.ส.ล.	28
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กและค่าโมเมนต์ของคานทดสอบ	49

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดแรงดึงในคอนกรีตบริเวณที่เหล็กเสริมเกิดสนิม	5
รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของคาน ค.ส.ล.	6
รูปที่ 2.3 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten NaCl	6
รูปที่ 3.1 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของหิน เทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33	12
รูปที่ 3.2 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของทราย เทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33	14
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดการยึดตัวของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	14
รูปที่ 3.4 ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว SikaGrout -212-11	15
รูปที่ 3.5 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง	15
รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าและกระจายกระแสไฟฟ้าเพื่อเร่งปฏิกิริยาสนิม	16
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า	16
รูปที่ 3.8 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นคานชุดที่ 1, 2, และ 3	18
รูปที่ 3.9 เหล็กเสริมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.	20
รูปที่ 3.10 การเข้าแบบเหล็กและวิธีการหล่อคาน	21
รูปที่ 3.11 การบ่มคานคอนกรีต	22
รูปที่ 4.1 การเร่งปฏิกิริยาสนิมคาน ค.ส.ล.ในบ่อ และเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่	24
รูปที่ 4.2 การประมาณค่าด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู	26
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลา สำหรับตัวอย่างคาน ค.ส.ล.	27

รูปที่ 4.4	รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับต่ำ	30
รูปที่ 4.5	รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับปานกลาง	31
รูปที่ 4.6	รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับรุนแรง	32
รูปที่ 4.7	การซ่อมแซมคาน ค.ส.ล. ที่เสียหายในชั้นรุนแรง	34
รูปที่ 5.1	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคาน ไดอะแกรมแรงเฉือนและไดอะแกรมโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนคาน	36
รูปที่ 5.2	การติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบคาน ค.ส.ล.	37
รูปที่ 5.3	พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 1	38
รูปที่ 5.4	ลักษณะการวิบัติของคาน B1, B1E15, B1E50	41
รูปที่ 5.5	พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 2	42
รูปที่ 5.6	ลักษณะการวิบัติของคาน B2, B2E15	44
รูปที่ 5.7	ลักษณะการวิบัติของคาน B2E30, B2E50	45
รูปที่ 5.8	พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 3	46
รูปที่ 5.9	ลักษณะการวิบัติของคาน B2E30, B2E50	48

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานต่อสภาวะอากาศได้ดี อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญอันหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างใกล้บริเวณชายฝั่งทะเล คือการเกิดสนิมในเหล็กเสริมซึ่งกระบวนการเกิดสนิมนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคอนกรีตกับไอทะเล มีสารประกอบซัลเฟตและสารประกอบคลอไรด์เป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพ และเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมจะเกิดอาการบวมและดันให้คอนกรีตที่ผิวเกิดรอยแตกร้าวและในที่สุดเกิดการหลุดร่อน ทำให้โครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างประเภทนั้นๆไป ปัญหาดังกล่าวนี้เป็นปัญหาหลักของโครงสร้างคอนกรีตที่สร้างอยู่ในน้ำทะเลหรือสร้างใกล้กับทะเล ซึ่งจะต้องเผชิญกับไอทะเล เป็นระยะเวลา ยาวนานและต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น ตอหม้อ, เส้า, คาน, พื้น, กำแพงกันของสะพาน, อาคารจอดรถ, หรือแม้แต่อาคารสูงที่ก่อสร้างในบริเวณหาดบางแสนก็ประสบกับปัญหานี้

จากการสำรวจพบว่า สะพานปลาบริเวณหาดวอนนภาและลานอเนกประสงค์บริเวณชายหาดวอนนภาและแหลมแท่น ที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เกิดปัญหาดังกล่าวข้างต้นทั้งหมด เป็นปัญหากับเทศบาลแสนสุขในการซ่อมบำรุงและปรับปรุงแก้ไข ส่วนในมหาวิทยาลัยบูรพาสำรวจที่อาคารเกษมจาดิกวานิช มีรอยร้าวเกิดขึ้นทั้งเส้า คาน และแผ่นพื้น โดยเฉพาะแผ่นพื้นนั้นมีการหลุดร่อนของคอนกรีตจนเห็นเหล็กเสริมด้านล่างเป็นสนิมอย่างชัดเจน และอาคารพักข้าราชการตร.เสนาะอนุากุล อาคาร 3 มหาวิทยาลัยบูรพา บริเวณชั้นล่างจะสังเกตเห็นรอยแตกที่เกิดขึ้นกับเส้าในหลายๆต้น และรอยร้าวที่ค่อนข้างใหญ่และกว้างของคานบันไดเกิดขึ้น ชั้น 2 บริเวณลิฟต์ด้านขวามือ จากการสำรวจเบื้องต้นจากทางภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา สรุปว่า รอยร้าวที่เห็นเกิดจากเหล็กเสริมหลักในเส้าและคานบันไดเกิดสนิม จึงทำให้เกิดการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีต เมื่อปล่อยไว้นานขึ้นรอยร้าวจะขยายตัวขึ้นทำให้คอนกรีตที่ห่อหุ้มกะเทาะออก ดังนั้นปัญหาการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต จึงทำให้เกิดคำถามอื่นๆ ตามมา เช่น ความปลอดภัยของโครงสร้าง, ความสามารถในการใช้งานของโครงสร้างต่อไป รวมไปถึงวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างเหล่านั้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้ด้วยความปลอดภัยและใช้งบประมาณในการซ่อมบำรุงต่ำสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 2) เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคานในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ เทียบกับในสภาวะแวดล้อมปกติ
- 3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการคำนวณกำลังรับแรงดัดกับการทดสอบกำลังรับแรงดัด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนำเสนอวิธีการเร่งปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กจนกระทั่งน้ำหนักของเหล็กเสริมในคานลดลงจนถึงค่าที่กำหนดไว้ เมื่อทราบปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไปแล้ว จะทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัดของคานเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับกำลังดัดของคานที่เหล็กเสริมไม่ได้เกิดสนิม จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการพังของคานทั้งสองชุดนี้ด้วย เพื่อแสดงถึงผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสรุปเป็นข้อได้ดังนี้

- 1) พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกนำเสนอโดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลังรับแรงดัด, ความเหนียว (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน
- 2) ผลกระทบของขนาดหน้าตัดคานที่มีต่อพฤติกรรมการรับกำลังดัด ความเหนียว และพฤติกรรมการพัง ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 3) นำเสนอพฤติกรรมการรับแรงของคานที่เหล็กเสริมหลักเกิดสนิมในระดับความเสียหายต่างๆ กัน คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับรุนแรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม
- 2) ทำให้ทราบว่า การคำนวณตามทฤษฎีและการประมาณการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพ ดังนี้

- 1) โดยสาเหตุทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การทรุดตัว การหดตัว
- 2) โดยสาเหตุทางเคมี ได้แก่ คาร์บอนเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด โดยซัลเฟต ปฏิกริยาระหว่างต่างกับมวลรวม
- 3) โดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การขีดสี การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ
- 4) โดยสาเหตุทางชีวภาพ ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดย ตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรีย
- 5) โดยสาเหตุรวม ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

ปัญหาของความคงทนในคอนกรีตส่วนใหญ่่มักจะเกิดกับคอนกรีตหลังจากสภาวะแข็งตัวแล้ว แต่อย่างไรก็ดี ปัญหาอย่างที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในสภาวะก่อนหน้านี้นี้ก็สามารถนำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้ สำหรับการศึกษาโครงการครั้งนี้ได้มุ่งเน้นเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และการหลุดกะเทาะออกของเนื้อคอนกรีตเท่านั้น

2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต ในสภาวะของความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ คือเหล็กจะไม่แตกตัวออกเป็นอ็อกไซด์ (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e$) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตมักจะอยู่ในช่วง 12.5 จนถึง 13.5 ขึ้นกับวัสดุ และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

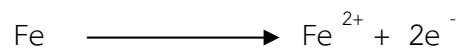
เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อได้เกิดเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังต่อไปนี้

- 1) ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิกสามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดได้นั้น จะมีค่า ph ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤติของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยสาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้ คือ คาร์

บอเนชั่น การซึมผ่านของคลอไรด์ เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตพรุนมาก

- 2) มีความชื้นพอที่จะทำให้ อีออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สารละลาย และเพียงพออยู่ในบริเวณที่คอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว
- 3) มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิมมิดด้วยน้ำ คือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลา มักจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก

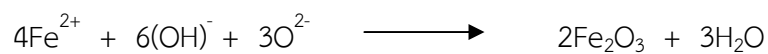
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเริ่มด้วย คอนกรีตในบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังต่อไปนี้



โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นอีออน Fe เข้าสู่สารละลาย อิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก จากนั้น $2e^{-}$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะรวมกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลอีออน (OH^{-}) ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้น สนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้

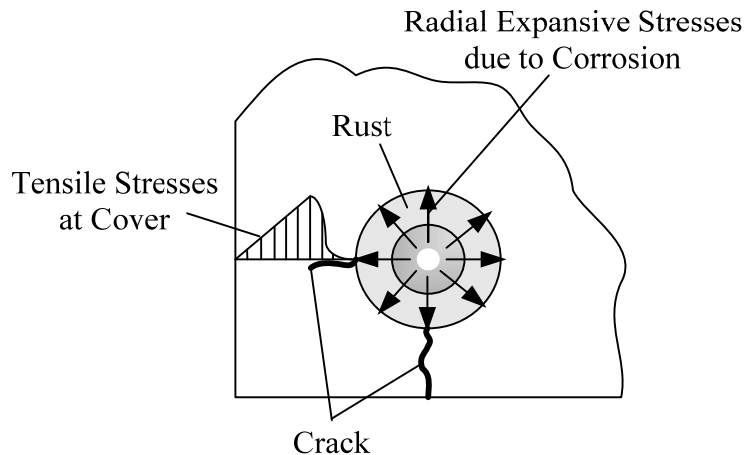


โดยที่ Fe_2O_3 คือเฟอร์ริกออกไซด์ หรือสนิม

2.3 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการคือ

- 1) ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลงเนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงในบริเวณดังกล่าวลดลงตามขนาดของเหล็กที่ลดขนาดลง
- 2) การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 2.1 เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเหล็กเดิมที่สลายตัวเข้าสู่สารละลาย ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Fatigue Strength และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยืดหยุ่นก็จะลดลง การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย รูปที่ 2.2 แสดงภาพถ้ำยการเกิดรอยแตกร้าวของคาน ค.ส.ล. ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดสนิม

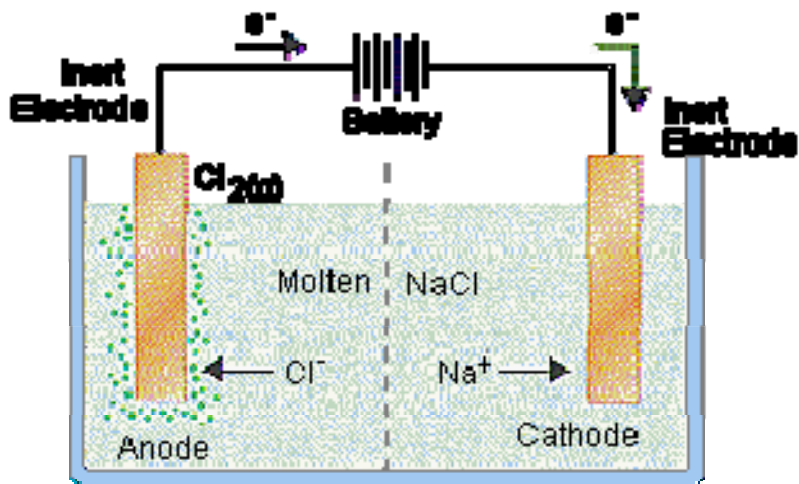


รูปที่ 2.1 การเกิดแรงดึงในคอนกรีตบริเวณที่เหล็กเสริมเกิดสนิม



รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของคาน ค.ส.ล.

2.4 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม



รูปที่ 2.3 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten NaCl

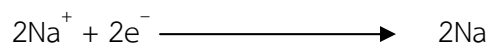
เนื่องจากโครงการวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตในการศึกษาเกี่ยวกับการเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสาเหตุจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม จึงต้องมีการสร้างสภาพความเสียหายให้เกิดขึ้นกับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะใช้ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลด้วยวิธีการที่ใช้ระยะเวลาสั้น และให้ผลถูกต้อง

แม่นยำ ดังนั้นการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในเหล็กเพื่อให้ไอเล็คตรอนหลุดจากเหล็กจนทำให้เกิดสนิม (electrolytic cells) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้ โดยมีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

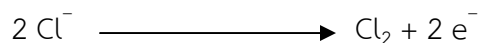
เซลล์ไฟฟ้าเคมี คือเซลล์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยสามารถแบ่งประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction ออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Galvanic Cells) และประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Voltaic Cells) สำหรับการศึกษาคourseงานวิจัยครั้งนี้ได้นำหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ แบบ Electrolytic Cells มาใช้ในขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่ง Electrolytic Cells คือ หน่วยเซลล์ซึ่งทำงานด้วยปฏิกิริยาเคมี และใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยา Oxidation และปฏิกิริยา Reduction) อย่างต่อเนื่อง โดย Electrolytic Cells มีหลักการทำงานดังนี้

จากหลักการของการแยกส่วนประกอบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (The Electrolysis of Molten NaCl) เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าบวกและลบซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะทำให้อะตอมของ Na^+ วิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้านลบ และอะตอมของ Cl^- จะวิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยเส้นประบริเวณกลางรูปใช้แทนวัสดุที่สามารถป้องกันการปะปนกันของ ก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบโดยยอมให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึมผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.3 เมื่ออะตอมของ Na^+ ชนกับขั้วไฟฟ้านลบซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์มากเพียงพอ อะตอมของ Na^+ จะเกิดปฏิกิริยา Reduction จนเปลี่ยนสภาพเป็น Sodium metal (Na) ดังสมการ



และเมื่ออะตอมของ Cl^- ชนกับขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation จนเปลี่ยนเป็นก๊าซคลอรีน ซึ่งก็คือฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกดังสมการ



โดยค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้ Cl^- เกิดปฏิกิริยา Oxidation กลายเป็น Cl_2 เท่ากับ -1.36 V และค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้ Na^+ เกิดปฏิกิริยา Reduction กลายเป็น Na เท่ากับ -2.71 V

จากรูปที่ 2.3 พบว่าขณะเกิดกระบวนการ Electrolysis ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้าลบ ดังนั้นเมื่อต่อขั้วไฟฟ้าบวกของระบบนี้เข้า
กับเหล็กเสริมของแท่งคอนกรีตจะทำให้เหล็กเสริมมีหน้าที่เปรียบเสมือนขั้วไฟฟ้าบวกด้วยจึงทำให้เหล็ก
เสริมเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับวัสดุที่ต่อเข้ากับขั้วลบซึ่งในกรณีนี้ใช้เหล็กประเภทเดียวกับเหล็ก
เสริมแต่ได้รับการเคลือบด้วยสารป้องกันการผุกร่อน (Epoxy และสีป้องกันสนิม) โดยทั้งนี้คอนกรีตที่หุ้ม
เหล็กเสริมจะทำหน้าที่เป็นวัสดุป้องกันการปะปนกันของก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะ
โซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาได้สอดคล้องกับเงื่อนไขในการเกิดสนิมของเหล็ก โดย
ทั้งนี้ปริมาณในการเกิดสนิมแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้รับโดยปริมาณเหล็กเสริมที่หายไป
สามารถคำนวณได้จากสมการฟาราเดย์ ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

2.5 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีได้ 2 ลักษณะ คือ คอนกรีตที่ถูกอัดแตกหรือระเบิดออก
ก่อน (Crushing Failure) ที่ด้านรับแรงอัด โดยเหล็กเสริมที่ถูกดึงยังไม่ถึงจุดครากเรียกว่า การวิบัติแบบ
แรงอัดเป็นหลัก (Compression Failure) และการวิบัติของคานอีกรูปแบบหนึ่งคือ การวิบัติที่เกิดจาก
เหล็กเสริมถูกดึงถึงจุดครากก่อน (Yielding Failure) ที่ด้านรับแรงดึง แล้วคอนกรีตที่ถูกอัดแตกหรือ
ระเบิดออก เรียกว่าการวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก (Tension Failure) หากเหล็กเสริมมีปริมาณไม่มากนัก
(Moderate Reinforcement) โดยที่ปริมาณเหล็กเสริม รับแรงดึงที่ต่ำกว่าอัตราส่วนที่ภาวะสมดุล
เรียกว่า Under-Reinforcement Concrete Beam เหล็กเสริมในคาน คสล. จะถูกดึงถึงกำลังจุดคราก
ก่อนเสมอ ($\epsilon_s = \epsilon_y$) ในขณะที่การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเริ่มที่จะไม่เป็นเส้นตรง โมเมนต์
ดัดที่ทำให้เหล็กเสริมในคานเริ่มครากเรียกว่า โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (Yielding Moment) เมื่อน้ำหนัก
บรรทุกเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเมนต์ที่กระทำมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมยืดตัวมากขึ้นซึ่งใน
ขณะที่แรงดึงในเหล็กเสริมมีค่าคงที่ ($T = A_s f_y$) หมายความว่าระยะของแกนโมเมนต์บนหน้าตัดของคาน
คสล. จะมีค่ามากขึ้นเพื่อสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้มากขึ้นไปอีก และตามหลักการสมดุลของแรง
แรงอัดของคอนกรีตต้องมีค่าเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริม แต่พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตมีน้อยลง จึงทำให้
หน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้การ
กระจายตัวของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะไม่เป็นสัดส่วนกับค่าของหน่วยการหดตัว ดังนั้นรายการที่
ปรากฏจะกว้างมากขึ้นจนสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าและขยับตัวสูงขึ้น ทำให้ค่าสติเฟนการดัดของงานหรือ
ความแข็งแรงของคาน คสล. มีค่าน้อยลง คานจึงแอ่นตัวมากขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งเป็นสัญญาณเตือนให้
ทราบว่าจะเกิดการวิบัติตามมา หากยังบรรทุกน้ำหนักหรือเพิ่มน้ำหนักต่อไปคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือ
แนวแกนสะเทินจะถูกอัดและระเบิดออก (Crushing) ซึ่งการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตก่อน

เกิดการวิบัติจะเป็นรูปโค้งพาราโบลา ดังนั้น หากเอาน้ำหนักบรรทุกออกเสียบ้างในตอนนี้จะช่วยไม่ให้คาน คสล. นั้นถึงกับพังลงมาได้ คาน คสล. ที่เสริมเหล็กมากเกินไปหรือให้เหล็กที่มีกำลังจุดครากสูงมาก เรียกว่า Over-Reinforcement Concrete Beam คานจะวิบัติโดยคอนกรีตถูกอัดแตกหรือระเบิดก่อน (Yielding Failure) โดยคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดประมาณ 0.003-0.004 มม./มม. ก่อนที่เหล็กเสริมจะเริ่มคราก ซึ่งเป็นการวิบัติแบบฉับพลันทันทีทันใดโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้าก่อน จัดว่าอันตรายมากต่อชีวิตและทรัพย์สิน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย [3] เป็นการศึกษาผลกระทบของการเป็นสนิมในเหล็กเสริม ต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริม โดยใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. และ 12 มม. ฝังในแท่งคอนกรีตและทำให้เกิดสนิม จากนั้นนำเอาเหล็กเสริมที่เป็นสนิมมาทำการทดสอบการรับแรงดึง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระดับการเกิดสนิมในเหล็กเสริมไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่คำนวณได้จากการใช้หน้าตัดจริง อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้หน้าตัดระบุของเหล็กเสริมในการคำนวณหาค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. และ 12 มม. พบว่า เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมที่ระดับ 11% สำหรับเหล็กเสริม 6 มม. และ 24% สำหรับเหล็กเสริม 12 มม. จะมีค่าแรงดึงสูงสุดน้อยกว่ามาตรฐาน ASTM A615 ที่ระบุค่าแรงดึงสูงสุดไว้เท่ากับ 600 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ พฤติกรรมการพังของเหล็กเสริมที่เป็นสนิมจะมีลักษณะการพังแบบเปราะ

การศึกษา [4] นำเสนอผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมที่ระดับความเสียหายต่างๆ กัน ในด้านการแอ่นตัวของคาน เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก คานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกทำให้เกิดสนิม โดยการเร่งปฏิกิริยาเสริมด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 30 วัน เมื่อครบกำหนด จะนำคานที่เป็นสนิมมาทำการทดสอบการรับแรงดัดแบบ 4 จุด ด้วยการใส่น้ำหนักบรรทุกที่ระดับ 23% และ 24% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ จากนั้นทำการวัดค่าการแอ่นตัวสูงสุด ของคานที่จุดกึ่งกลางคานที่เป็นสนิมเทียบกับคานควบคุมที่ไม่เป็นสนิม ผลการทดสอบคาน แสดงให้เห็นว่าเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียน้ำหนักไป 6% คานจะมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น 40% - 70% เมื่อเทียบกับคานควบคุม

การศึกษา [8] เป็นการทำทดลองเพื่อหาผลกระทบของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนของคาน ประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระดับความเสียหาย เนื่องจากสนิมในเหล็กเสริมหลักและในเหล็กปลอก ความสัมพันธ์ของการเป็นสนิมและรอยร้าวในคอนกรีต กับระดับการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ได้รับการศึกษาการทำนายกำลังรับแรงเฉือนที่เหลืออยู่ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เหล็กเสริมเป็นสนิม ถูกนำเสนอโดยสมการทางวิศวกรรม

งานวิจัย [9] นำเสนอผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด (153x254x3000 มม.) ที่มีระดับการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่แตกต่างกัน การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมหลักเกิดขึ้นด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบคานแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมรับแรงดึง จะเกิดสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางคาน ความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดของคาน พบว่ามีความสัมพันธ์กับระดับการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม โดยเมื่อเหล็กเสริมมีน้ำหนักหายไป 1% จะทำให้ ความสามารถในการรับแรงดัดลดลง 0.7%

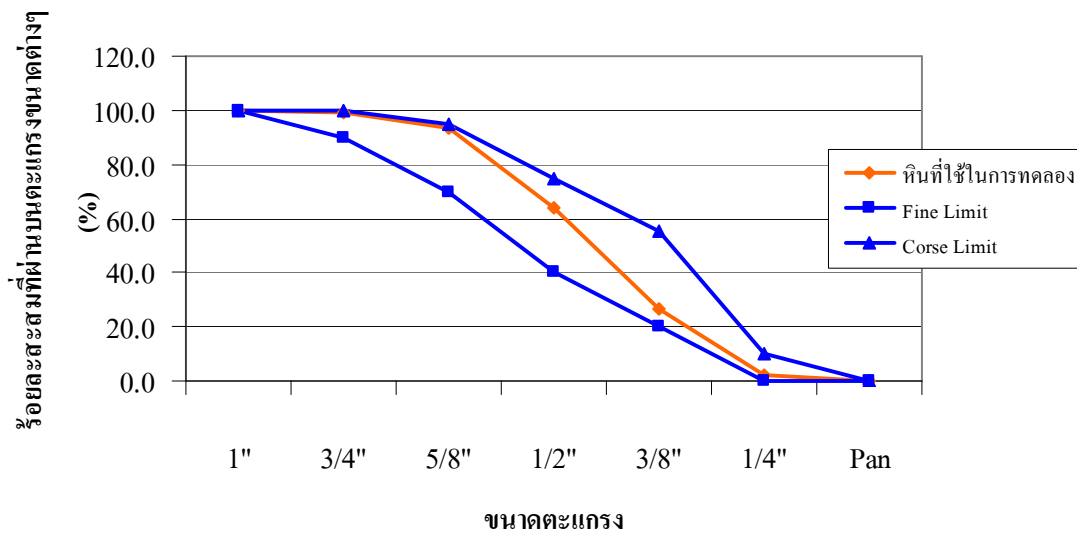
บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)
- 2) หิน (Coarse Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินปูน โดยมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.1 และจากรูปที่ 3.1 เป็นกราฟแสดงร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ของหินเทียบกับมาตรฐาน จะเห็นว่าหินที่นำมาทดสอบมีขนาดคละอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33

ตารางที่ 3.1 ขนาดคละของหิน

ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	ปริมาณ ที่ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละ ที่ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละ สะสมที่ค้ำ บนตะแกรง ขนาดต่างๆ	ร้อยละ สะสมที่ผ่าน ตะแกรง ขนาดต่างๆ	ร้อยละสะสมที่ ผ่านบนตะแกรง ขนาดต่างๆ (ASTM) (%)	
						Fine Limit	Coarse Limit
(ins)	(mm.)	(kg.)	(%)	(%)	(%)		
1"	25.000	0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/4"	19.000	45.7	0.9	0.9	99.1	90	100
5/8"	15.875	280.1	5.6	6.5	93.5	N/A	N/A
1/2"	12.500	1483	29.7	36.2	63.8	N/A	N/A
3/8"	9.500	1870.2	37.4	73.6	26.4	20	55
1/4"	4.750	1196.9	23.9	97.5	2.5	0	10
Pan	-	123.7	2.5	100.0	0.0	-	-
รวม		4999.6	100.0	-	-	-	-



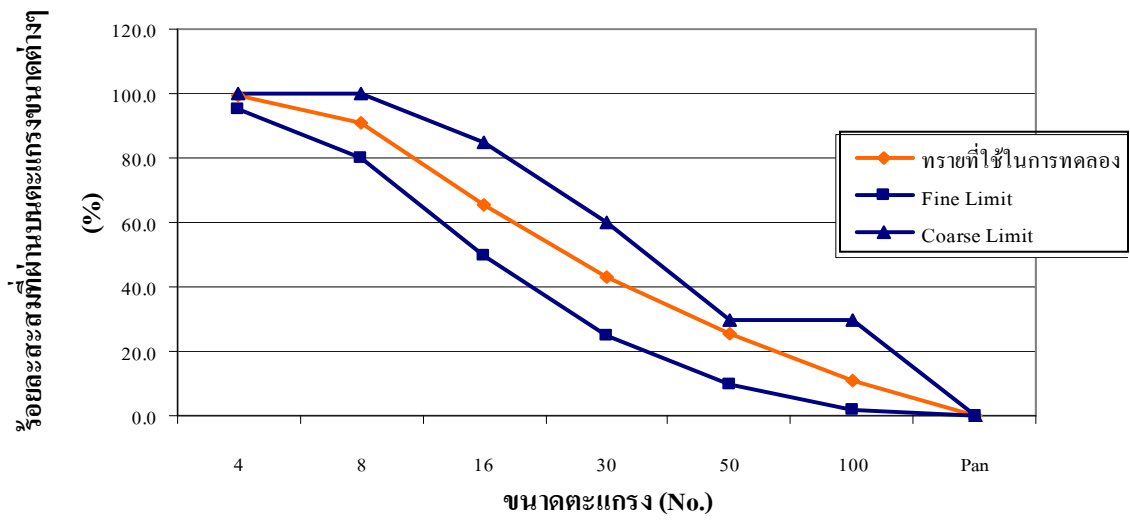
รูปที่ 3.1 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของหิน เทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33

- 3) ททราย (Fine Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.2 และจากรูปที่ 3.2 เป็นกราฟแสดงร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ของทรายเทียบกับมาตรฐาน จะเห็นว่าทรายที่นำมาทดสอบมีขนาดคละอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33
- 4) น้ำ (Water) น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดยที่น้ำจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของคอนกรีต ทำให้มีความชื้นเหลือในการเทคอนกรีตลงแบบหล่อได้ สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปา ในห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- 5) เหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม มีผิวเรียบตลอดความยาวของเหล็กตามมาตรฐาน มอก.20 กำหนดให้เหล็กกลมผิวเรียบมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR 24 ซึ่งหมายถึงมีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 2400 กก./ตร.ซม. โดยขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้ คือ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม. และ 9 มม. เป็นเหล็กปลอก
- 6) เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม แต่ที่ผิวตามความยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นบั้งหรือป่องหรือครีบเกลียว ตามมาตรฐาน มอก.24 โดยชั้นคุณภาพของเหล็ก คือ

SD 30 หมายถึง มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 3000 กก./ตร.ซม.
 โดยขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้ คือ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มม. และ 16 มม.
 เป็นเหล็กเสริมหลัก (Main Bar)

ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทราย

ขนาด ตะแกรง (No.)	ขนาด ตะแกรง (mm.)	ปริมาณ ที่ค้ำบน ตะแกรง (kg.)	ร้อยละ ที่ค้ำบน ตะแกรง (%)	ร้อยละ สะสมที่ค้ำ บนตะแกรง ขนาดต่างๆ (%)	ร้อยละ สะสมที่ผ่าน ตะแกรง ขนาดต่างๆ (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่าน บนตะแกรงขนาด ต่างๆ (ASTM) (%)	
						Fine Limit	Coarse Limit
4	0.6350	8.6	0.9	0.9	99.1	95	100
8	0.3175	79.3	7.9	8.8	91.2	80	100
16	0.1588	257.5	25.8	34.5	65.5	50	85
30	0.0847	222.3	22.2	56.8	43.2	25	60
50	0.0508	180.1	18.0	74.8	25.2	10	30
100	0.0254	143.5	14.4	89.1	10.9	2	30
Pan	-	108.4	10.8	100.0	0.0	-	-
รวม	-	999.7	100.0	-	-	-	-



รูปที่ 3.2 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของทราย เทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33

7) อุปกรณ์วัดระยะยืด-หดตัวอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical Strain Gauge)

อุปกรณ์วัดระยะยืด-หดตัวอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical Strain Gauge) ใช้สำหรับติดตั้งเพื่อใช้วัดหน่วยการยืดหดของชิ้นงานในขณะทดสอบเช่น เหล็กเสริม คอนกรีต รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดการยืดตัวของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

8) ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว

ใช้ ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว SikaGrout -212-11 คุณสมบัติของวัสดุใช้ตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต [www.sika.com] แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว SikaGrout -212-11

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) แบบหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คาน ค.ส.ล.) ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคาน



รูปที่ 3.5 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง

- 2) เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixing Machine) ใช้สำหรับผสมหิน ทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำคลุกเคล้าให้เข้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าและกระจายกระแสไฟฟ้าเพื่อเร่งปฏิกิริยาสนิม



รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าและกระจายกระแสไฟฟ้าเพื่อเร่งปฏิกิริยาสนิม

- 4) อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า
 ในการเร่งปฏิกิริยา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เป็นไปตามทฤษฎี ต้องมีการวัด ค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านเหล็กเสริมทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสนิม โดยการวัดจะวัดที่เวลาห่างกัน 2 ชั่วโมง ตลอดการทำการทดลอง ดังรูปที่ 3.7

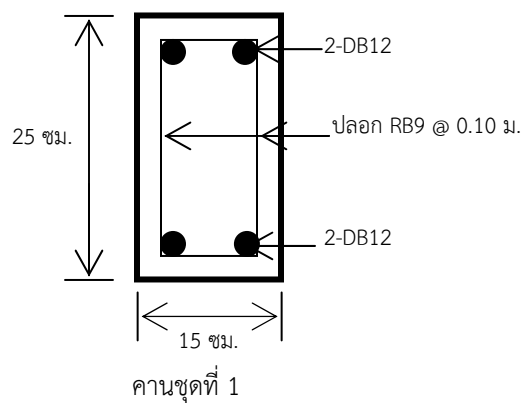


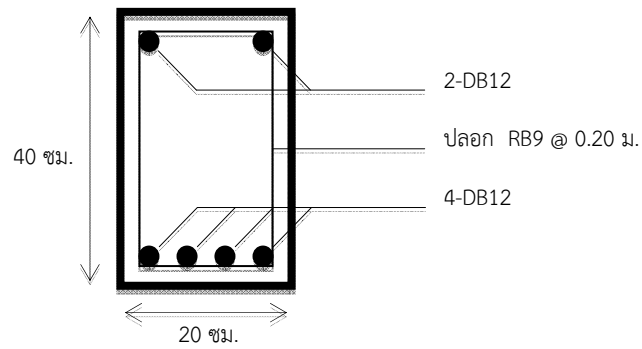
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า

- 6) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซัลขนาด 150 ตัน (Universal testing machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานช่วงเดียว
- 7) เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Testing Machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital Balance) ใช้สำหรับหาปริมาณน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ทในการผสมคอนกรีต เช่น หิน ทราย ปูนซีเมนต์
- 9) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement transducer) ใช้วัดการเคลื่อนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะทดสอบ
- 10) เครื่องบันทึกข้อมูล “Portable data logger รุ่น TDS-303” ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลการโก่งตัวของพื้น หน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม

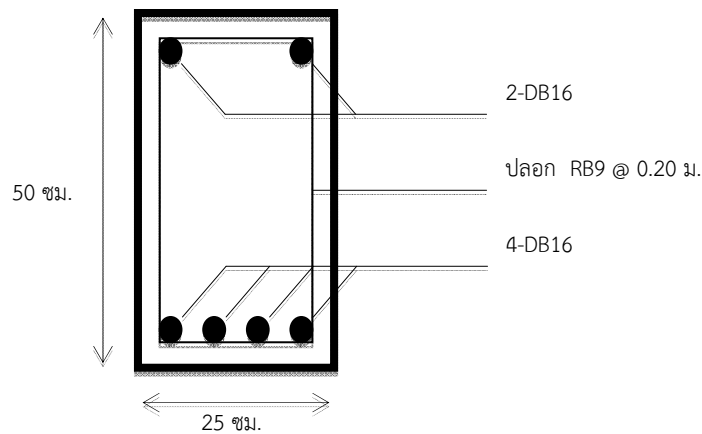
3.3 การเตรียมตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้กำหนดตัวอย่างคานทดสอบจำนวน 3 ขนาด หน้าตัดขนาดเล็ก 15X25 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 140 เซนติเมตร หน้าตัดขนาดกลาง 20X40 เซนติเมตร ความยาวของคานกำหนดให้เท่ากับ 240 เซนติเมตร หน้าตัดขนาดใหญ่ 25X50 เซนติเมตร ความยาวของคานกำหนดให้เท่ากับ 240 เซนติเมตร ใช้เหล็กข้ออ้อย DB12 ชั้นคุณภาพ SD 30 เป็นเหล็กแกนและเหล็กเส้นกลม RB9 ชั้นคุณภาพ SR 24 เป็นเหล็กปลอก ระยะการเสริมเหล็กปลอกเท่ากับ 10 เซนติเมตร และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 3 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.8





คานชุดที่ 2



คานชุดที่ 3

รูปที่ 3.8 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นคานชุดที่ 1, 2, และ 3

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษานี้ คานชุดที่ 1 (B1), คานชุดที่ 2 (B2), และคานชุดที่ 3 (B3) เป็นคานควบคุม ส่วนคาน B1E15, B1E30, B1E50, B2E15, B2E30, B2E50, B3E15, และ B3E50 เป็นคานที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็ก เหมือนคาน B1, B2, และ B3 ตามลำดับ นำมาผ่านกระบวนการเร่งสนิม โดยมีระดับความเสียหาย 3 ระดับคือ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับรุนแรง

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียดคาน ค.ส.ล.	ชื่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.	
	คาน	จำนวน
1) คาน ค.ส.ล. ความคุมชุดที่ 1	B1	1
2) คาน ค.ส.ล. เร่งการเกิดสนิม - ระดับต่ำ - ระดับปานกลาง - ระดับรุนแรง	B1E15 B1E30 B1E50	1 1 1
3) คาน ค.ส.ล. ความคุมชุดที่ 2	B2	1
4) คาน ค.ส.ล. เร่งการเกิดสนิม - ระดับต่ำ - ระดับปานกลาง - ระดับรุนแรง	B2E15 B2E30 B2E50	1 1 1
5) คาน ค.ส.ล. ความคุมชุดที่ 1	B3	1
6) คาน ค.ส.ล. เร่งการเกิดสนิม - ระดับต่ำ - ระดับรุนแรง	B3E15 B3E50	1 1
รวม		11

3.4 การเตรียมวัสดุที่ใช้การทดสอบ

3.4.1 การเตรียมหิน

- 1) คัดขนาดของหินโดยใช้เฉพาะหินที่ค้ำบนตะแกรง 5/8 , 1/2, 3/8, 1/4 นิ้ว
- 2) ล้างหินให้สะอาดจนเหลือฝุ่นและตกตะกอนให้น้อยที่สุด
- 3) แช่หินที่สะอาดแล้วไว้ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชม.
- 4) นำหินขึ้นมาวางผึ่งลมจนหินอยู่ในสภาพ SSD
- 5) เก็บหินไว้ในถังที่มีฝาปิดมิดชิดพร้อมรองถังด้วยถุงพลาสติกอีก 1 ชั้น

3.4.2 การเตรียมทราย

- 1) ล้างทรายให้สะอาดจนเหลือฝุ่นและตกตะกอนให้น้อยที่สุด
- 2) แช่ทรายที่สะอาดแล้วไว้ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชม.

- 3) นำทรายขึ้นมาวางฝั่งลมนจนทรายอยู่ในสภาพ SSD
- 4) เก็บทรายไว้ในถังที่มีฝาปิดมิดชิดพร้อมรองถังด้วยถุงพลาสติกอีก 1 ชั้น

3.4.3 การเตรียมเหล็กเสริม

- 1) ตัดเหล็กเสริมหลักโดยใช้เหล็ก DB 12, และ DB16
- 2) ตัดเหล็กเสริมหลักโดยใช้เหล็ก DB 12, และ DB16
- 3) เหล็กปลอกใช้เหล็ก RB 9 นำมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม
- 4) ยึดเหล็กเสริมตั้งและเหล็กปลอกให้ติดกันโดยผูกด้วยลวดผูกเหล็ก



รูปที่ 3.9 เหล็กเสริมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.

3.5 การหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ สำหรับหล่อคาน ค.ส.ล. ในงานศึกษานี้จะมีค่า $\frac{W}{C} = 0.58$ และค่า $\frac{S}{A} = 0.46$ โดยมีกำลัง เป้าหมายที่ 28 วัน เท่ากับ 250-280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Type of Cement	Mix proportion (kg/ 1 m ³)						slump (cm)	Design Strength (kN) At 28 Days
	w/c	weight (kg)				% void		
		Cement	Water	sand	rock			
1	0.58	356	149	815	984	0.23	12	250-280

วิธีหล่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก

- 1) ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
- 2) จัดวางเหล็กเสริมลงในแบบหล่อ โดยให้ขอบเหล็กปลอกมีระยะห่างจากแบบหล่อ 30 มิลลิเมตรเท่ากันทุกด้าน
- 3) ทดสอบ Workability พร้อมจดบันทึกค่า
- 4) ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง
- 5) เมื่อกระทุ้งชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ ทิ้งคอนกรีตไว้ในแบบหล่อจนแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงแกะออกจากแบบ



รูปที่ 3.10 การเข้าแบบเหล็กและวิธีการหล่อคาน ค.ส.ล.

3.6 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตหรือบำรุงคอนกรีต เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ รั่วหายออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและความทนทานตามที่ต้องการ หลังจากเทคอนกรีตและทิ้งไว้จนผิวหน้าคอนกรีตหมาดแข็งปราศจากรอยแล้ว จะต้องทำการบ่มทันทีด้วยวิธีที่ถูกต้อง โดยปกคลุมผิวมิให้ถูกแดดหรือลมร้อน และมีให้ถูกรบววนหรือสะท้อนโดยเฉพาะภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามต้องการ อีกทั้งเป็นการป้องกันการสูญเสียน้ำจาก

คอนกรีตที่เทใหม่ ๆ มิฉะนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวเร็วทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวที่กำลังจะแห้ง เป็นผลทำให้เกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ช่วงเวลาที่ป้องกันและรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลังจากเทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว เรียกว่าระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต โดยกำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตราบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ต่อไปอีก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็วในระยะแรกและ ค่อย ๆ ซ้ำลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิที่พอเหมาะ โดยอุณหภูมิที่ใช้บ่มคอนกรีตสำหรับคอนกรีตสำหรับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ควรอยู่ระหว่าง 15-39 องศาเซลเซียส สำหรับในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ใช้ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน นับจากวันที่หล่อคอนกรีตเสร็จแล้ว 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นให้กับคอนกรีตด้วยการหล่อน้ำ



รูปที่ 3.11 การบ่มคานคอนกรีต

บทที่ 4

ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมของคาน ค.ส.ล.

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงอัดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคือ การเกิดสนิมมีผลทำให้เนื้อเหล็กบางส่วนหายไปเป็นผลให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงลดลง และการเกิดสนิมทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาตรมากกว่าเหล็กเดิมทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ เป็นผลให้กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเช่นกัน เนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นปัญหาการเสื่อมสภาพที่พบบ่อยกับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปจึงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา แต่ทั้งนี้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมตามธรรมชาติเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ระยะเวลายาวนาน ในการศึกษาโครงงานวิจัยครั้งนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการเร่งการเกิดปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมเพื่อลดระยะเวลาการศึกษาโครงงานให้สั้นลง โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนสำหรับคาน ค.ส.ล.ดังนี้

4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เกลือแกงบริสุทธิ
- 2) น้ำสะอาด
- 3) บ่อแช่ตัวอย่าง
- 4) เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ต้นแบบ
- 5) อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้าแบบ Clamp Meter

4.1.2 ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาสนิมสำหรับคาน ค.ส.ล.

1) วางเรียงคาน ค.ส.ล. ลงในกระบะแช่ที่ทำขึ้นมาใหม่โดยจะให้คาน ค.ส.ล. ภูกน้ำและเสียหายเฉพาะส่วนที่ต้องการตามที่ออกแบบไว้เท่านั้น โดยเรียงแยกบ่อแช่ตัวอย่างและให้มีระยะห่างกันพอประมาณเพื่อป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า

2) ต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับสายไฟของตัวอย่างคาน ค.ส.ล. โดยขั้วบวกต่อกับเหล็กเสริมตั้งในตัวอย่างที่รับกระแสบวก ในกรณีจะเป็นเหล็กกลางและขั้วลบต่อกับเหล็กเสริมที่รับกระแสลบที่เป็นตัวเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนของโลหะ ซึ่งจะวางอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

3) เทน้ำเกลือเข้มข้นสูง ลงในกระบะแช่หลังจากที่ต่อขั้วกระแสไฟฟ้าเสร็จแล้ว โดยให้ระดับน้ำเกลือมีความสูงประมาณ 1 ใน 3 ของตัวอย่างคาน ค.ส.ล.

4) เปิดสวิตซ์ไฟฟ้าที่เครื่องควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อเริ่มกระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคาน

5) อ่านกระแสไฟฟ้าจาก Meter วันละอย่างน้อย 3 ครั้ง พร้อมกับจดบันทึกค่าที่ได้ โดยวัดและจดบันทึกค่าของกระแสไฟฟ้ารวมทั้งเวลาที่ทำการจดบันทึกค่าเป็นระยะ เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 4.1 การเร่งปฏิกิริยาสนิมคาน ค.ส.ล.ในบ่อ และเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่

6) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าความสูญเสียปริมาณเหล็กในคาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการซ่อมแซมคานต่อไป

7) เปลี่ยนน้ำเกลือและทำความสะอาดผิวของคานคองกรีต อย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสม่ำเสมอ

การกำหนดระดับความเสียหายของคานค.ส.ล. แบ่งเป็น 3 ระดับ กำหนดจากปริมาณของเหล็กเสริมที่สูญเสียเนื่องจากการเกิดสนิม โดยระดับความเสียหายแบ่งได้ดังนี้

- 1) ความเสียหายระดับต่ำ เหล็กเสริมสูญเสียปริมาณเหล็กตั้งแต่ 0–15 % ของปริมาณเหล็กตั้งต้น
- 2) ความเสียหายระดับปานกลาง เหล็กเสริมสูญเสียปริมาณเหล็กตั้งแต่ 15–30 % ของปริมาณเหล็กตั้งต้น
- 3) ความเสียหายระดับรุนแรง เหล็กเสริมสูญเสียปริมาณเหล็กตั้งแต่ 30–50 % ของปริมาณเหล็กตั้งต้น

4.2 การคำนวณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม

น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

$$\Delta W = \frac{I \cdot t \cdot A_m}{Z \cdot F} \dots\dots\dots (1)$$

- เมื่อ ΔW = น้ำหนักเหล็กที่หายไป (กรัม)
 I = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 t = ระยะเวลาเมื่อเหล็กเริ่มเกิดสนิม (วินาที)
 A_m = ค่าคงที่มวลอะตอมของโลหะ
 (=55.85 กรัม สำหรับเหล็ก)
 F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์)
 Z = 2

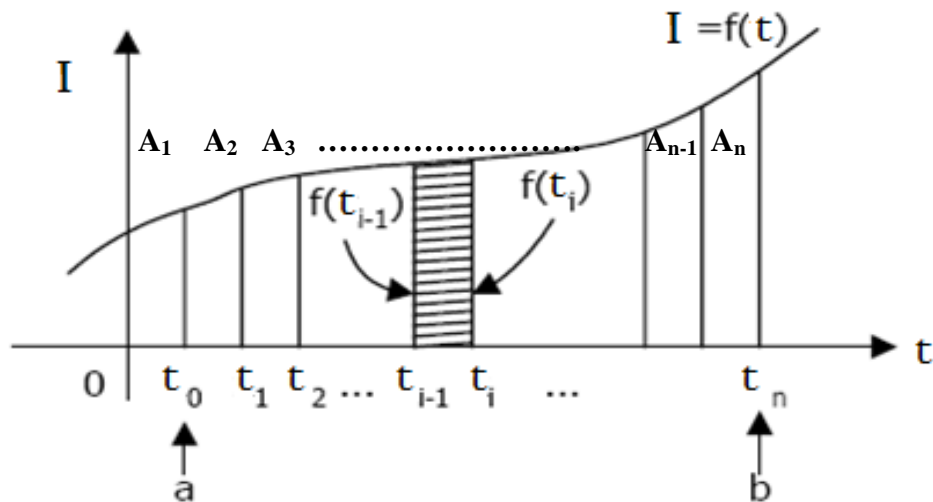
ค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณคือค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) หน่วยเป็นแอมแปร์กับเวลา (t) หน่วยเป็นวินาที ข้อมูลเหล่านี้สามารถวัดได้จากการทดลองโดยเลือกใช้วิธีการประมาณค่าพื้นที่ใต้กราฟแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid) ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

- 1) นำค่ากระแสไฟฟ้า (I) และเวลา (t) มาเขียนจุดด้วยโปรแกรม Excel
- 2) ใช้วิธีการประมาณเส้นกราฟด้วยโปรแกรม Excel ซึ่งโปรแกรมจะสร้าง สมการเส้นกราฟที่เหมาะสมในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าและเวลา โดยจะมีสมการเท่ากับ $I = f(t)$
- 3) ทำการแบ่งช่วงเวลาเป็นช่วงเท่า ๆ กัน จำนวน n ช่วง
- 4) คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ I-t แสดงดังพื้นที่แลเงาดังรูปที่ 4.2

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟ} = \frac{I}{2}(t_i - t_{i-1})[f(t_i) + f(t_{i-1})]$$

- 5) พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดในช่วงเวลา $t = 0$ ถึง $t = t_n$ มีค่าเท่ากับผลบวกของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูรูปเล็ก ๆ จำนวน n รูป ดังนั้นกำหนดให้ A คือ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด พื้นที่ A สามารถแสดงได้ดังนี้

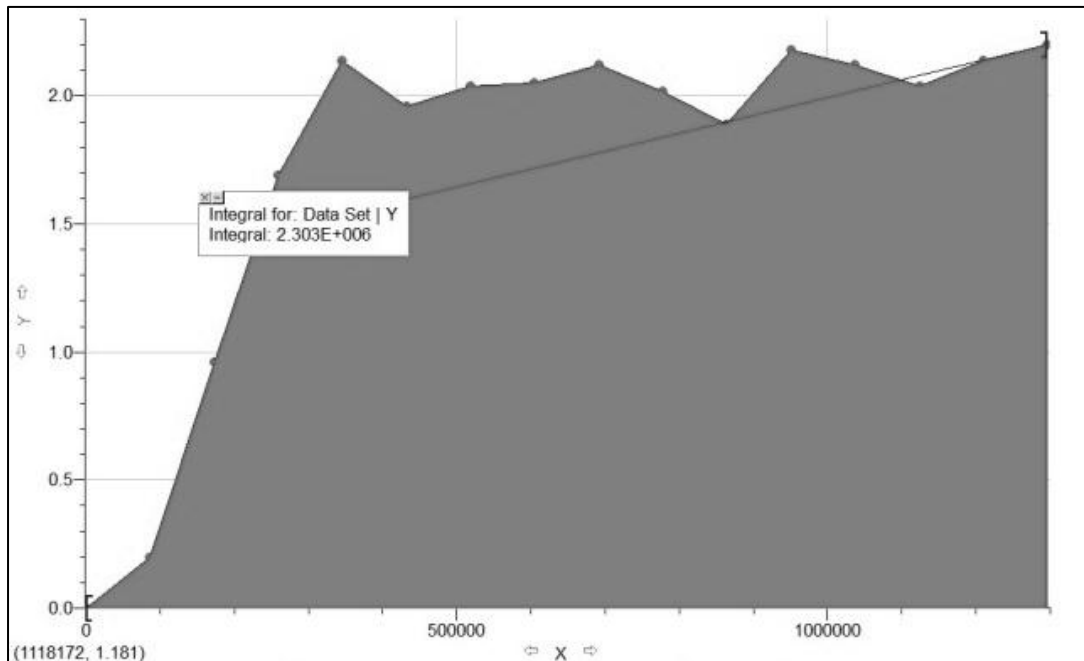
$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} + A_n$$



รูปที่ 4.2 การประมาณค่าด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลกระแสไฟฟ้า (I) และเวลา (t) ที่ได้จากการทดลองพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอ ทำให้การประมาณการข้อมูลด้วยเส้นกราฟเพียงหนึ่งเส้นได้ข้อมูลของพื้นที่ใต้กราฟ It ที่ไม่ถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนสูงจึงมีความจำเป็นต้องทำการแบ่งข้อมูลกระแสไฟฟ้า (I) และเวลา (t) ออกเป็นช่วง ๆ โดยใช้กราฟพิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลให้ข้อมูลมีความ

ต่อเนื่องกัน และมีลักษณะสม่ำเสมอเป็นช่วงๆ ซึ่งแต่ละช่วงของข้อมูลที่ได้ทำการแบ่งไว้จะประมาณด้วยสมการเส้นกราฟ $f(t)$ หนึ่งเส้น และทำการหาพื้นที่ใต้กราฟตามขั้นตอนที่ 3. ถึง 5. ที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟ It ในแต่ละช่วงข้อมูลจะเป็นค่าพื้นที่ใต้กราฟ It ข้อควรระวังในการทำการหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธีนี้ คือ การแบ่งช่วงเวลาของแต่ละช่วงเส้นกราฟต้องมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะสามารถประมาณค่ากระแสไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับผลการ เพื่อให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ It ได้ถูกต้องที่สุด การดำเนินการศึกษาได้กำหนดระดับความเสียหายของตัวอย่างคานไว้เป็น 3 ระดับ คือ กำหนดระดับความสูญเสียเป็น 3 ระดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 15, 30, 50 ของปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมด รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าสู่เหล็กเสริม หน่วยเป็นแอมแปร์ กับระยะเวลา หน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาสำหรับตัวอย่างคาน ค.ส.ล.

ผลที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็ก จากนั้นใช้โปรแกรม Graphical Analysis คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ นำค่าไปคำนวณหาการสูญเสียน้ำหนักเหล็กจากสมการพาราเบิ้ล ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่สูญเสียจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมของคาน ค.ส.ล.

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่สูญเสียจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมของคาน ค.ส.ล.

ชื่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.	น้ำหนักเหล็กเริ่มต้น (กรัม)	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากสมการพาราเคย์ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสีย (%)
B1	2494	0	0
B1E15	2494	424	17
B1E30	2494	773	31
B1E50	2494	1290	52
B2	9413	0	0
B2E15	9413	1743	18.5
B2E30	9413	2118	22.5
B2E50	9413	5635	59
B3	16956	0	0
B3E15	16956	2204	13
B3E50	16956	8817	52

4.3 ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมในตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ระดับความเสียหายต่ำ ปานกลาง และ รุนแรง

กระบวนการเกิดสนิมในช่วงแรกสนิมจะออกมาตามรูเล็กๆ ตรงบริเวณตำแหน่งด้านข้างและด้านล่างของคานคอนกรีต หลังจากนั้นปริมาตรของสนิมจะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ น้ำสนิมจะเริ่มไหลออกมาจากบริเวณเหล็กเสริมล่างของคานแล้ว เมื่อเกิดสนิมไปซ้กระยะหนึ่ง จะสังเกตเห็นรอยแตกขนาดเล็กๆ ตามแนวเหล็กเสริมล่างที่ผ่านกระแสไฟฟ้า ส่วนเหล็กบนของคาน จะไม่พบรอยคราบสนิม จากรูปที่ 4.4 แสดงรอยแตกของคานที่บริเวณหน้าตัดด้านข้าง และท้องคาน รอยแตกที่พบจะมีขนาดเล็ก ไม่กว้างและไม่ลึกมาก จะอยู่ในระดับเดียวกันกับตำแหน่งเหล็กล่าง ส่วนที่บริเวณหน้าตัดยังไม่พบรอยแตกหรือพบน้อยมาก ส่วนด้านบนของคานยังไม่พบสิ่งผิดปกติใดๆ

ลักษณะรอยแตกของคานที่เสียหายในระดับปานกลางแสดงดังรูปที่ 4.5 นั้นมีลักษณะคล้ายกับในระดับต่ำ กล่าวคือ เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง อย่างไรก็ตามจะพบว่า รอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่กว่า ยาวกว่า และลึกกว่า ของการเสียหายระดับแรก นอกจากนี้ บริเวณหน้าตัดคานยังพบว่า เหล็ก

ปลอกเกิดสนิมและบวมจนแบ่งให้คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกกระเทาะออก ส่วนด้านบนคานยังไม่พบรอยคราบสนิม

รูปที่ 4.6 แสดงรูปถ่ายการแตกของคานที่เร่งปฏิกิริยาสนิมในระดับรุนแรง ลักษณะโดยรวมจะเหมือนกับทั้งสองระดับที่กล่าวมา นอกจากนี้ยังสังเกตพบคราบสนิม ตามตำแหน่งเหล็กปลอกตลอดช่วงความยาวคานด้วย ส่วนรอยแตกที่พบ จะมีขนาดใหญ่ ยาว และลึกกว่าทั้งสองระดับข้างต้น อย่างไรก็ตามที่ระดับความเสียหายรุนแรงนี้ บริเวณด้านบนของคาน ยังคงไม่พบรอยคราบสนิมและรอยแตกใดๆ ทั้งสิ้นและไม่พบรอยแตกตามแนวเหล็กบน แสดงว่าเหล็กบนไม่เกิดสนิม หรือเกิดสนิมน้อยมากจนไม่สามารถทำให้เกิดรอยแตกได้

จากการสังเกตรอยแตกของคอนกรีตทั้งสามระดับนี้ ทำให้สรุปได้ว่า เมื่อระยะเวลาในการผ่านกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รอยแตกจะกว้างและยาวขึ้น นอกจากนี้ยังลึกขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและสมการที่ใช้คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจากการผ่านกระแสไฟฟ้าดังได้กล่าวไปแล้ว



รูปที่ 4.4 รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับต่ำ



รูปที่ 4.5 รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับปานกลาง



รูปที่ 4.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับรุนแรง

4.4 การซ่อมแซมคานคอนกรีตที่แตกร้าวเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริม

ก่อนนำคานค.ส.ล. มาทำการทดสอบหากำลังรับแรงดัด จะทำการซ่อมแซมรอยร้าวก่อนโดยจำแนกคานออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่เสียหายไม่รุนแรง รอยร้าวมีขนาดเล็กถึงไม่ใหญ่มาก และคอนกรีตที่หุ้มผิวอยู่ยังไม่กระเทาะออก ส่วนประเภทที่สอง เป็นความเสียหายที่รุนแรง รอยร้าวใหญ่ มีการกระเทาะออกของคอนกรีต ทั้งสองประเภทจะมีกระบวนการซ่อมแซมแตกต่างกันคือ

- 1) สำหรับรอยร้าวขนาดเล็กถึงไม่ใหญ่มาก และคอนกรีตหุ้มยังไม่กระเทาะออก รอยร้าวลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างที่สูญเสียเนื้อเหล็กประมาณ 15% - 20% การซ่อมแซมจะทำความสะอาดผิวคอนกรีต โดยให้กระทบกับรอยร่ววน้อยที่สุด โดยไม่ทำการซ่อมแซมรอยร้าว
- 2) สำหรับรอยร้าวขนาดใหญ่และคอนกรีตหุ้มกระเทาะออก ซึ่งเกิดขึ้นกับตัวอย่างที่สูญเสียเนื้อเหล็กตั้งแต่ 30% - 50% การซ่อมแซมทำโดย 1) กระเทาะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กออกลึกลงไปจนเกินระดับเหล็กล่างประมาณ 2.5 เซนติเมตร ทำความสะอาดผิวเหล็ก ขูดสนิมเหล็กออกบางส่วน แต่จะไม่ทำการเสริมเหล็กเพิ่ม ยังคงใช้เหล็กอยู่ในคาน ค.ส.ล. เดิม เตรียมผสมซีเมนต์ชนิดกำลังอัดสูงและไม่หดตัว Sika Frowt 212-11 (non shrink cement) กับหินเกร็ดขนาดผสม 10% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์เข้าแบบคานใหม่ เทคอนกรีตที่ผสมลงในแบบ ทั้งนี้ให้หนุนด้านล่างของคานที่ต้องการซ่อมสูงจากพื้นประมาณ 2.5-3 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การซ่อมแซมคาน ค.ส.ล. ที่เสียหายในชั้นฐานแรง

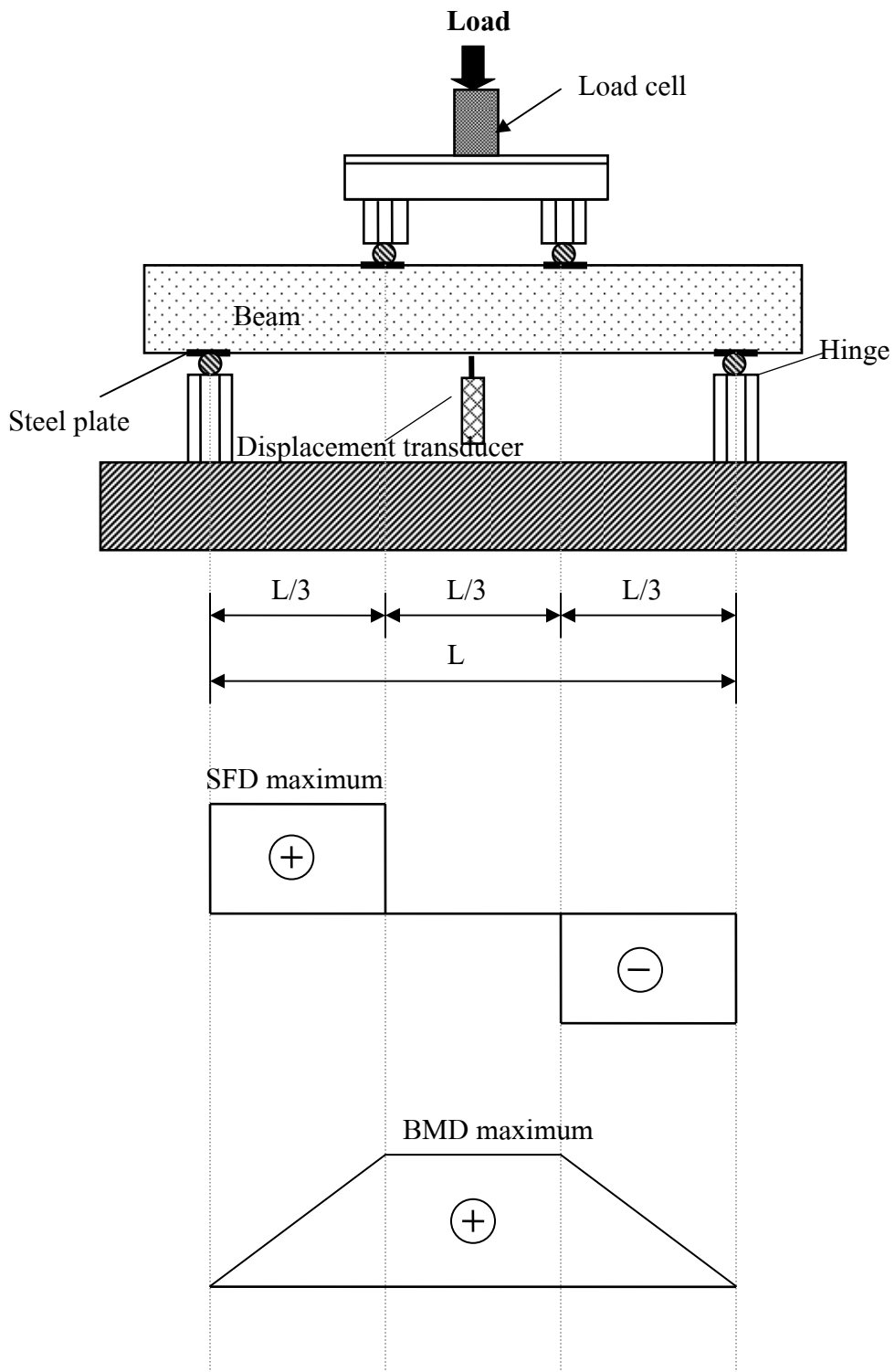
บทที่ 5

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดคาน

5.1 การทดสอบการรับกำลังดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธี Third-Point Loading (ASTM C1609)

สำหรับคานหน้าตัด 15x25 ซม. และ 20x40 ซม. ทำการทดสอบการรับกำลังดัดของคานคอนกรีตด้วยวิธี Third-Point Loading ตามมาตรฐาน ASTM C1609 แสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ติดตั้งแท่นทดสอบคานกับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) โดยจุดที่รองรับคานที่ใช้ในการทดสอบและแรงที่จะกระทำบนคานนั้น เป็นแบบ Hinge Support และมีระยะห่างของจุดรองรับเท่ากับ 120 และ 240 เซนติเมตร สำหรับคานหน้าตัด 15x25 ซม. และ 20x40 ซม. ตามลำดับ
- 2) วางคานตัวอย่างลงบนแท่นที่เตรียมไว้
- 3) นำแท่นเหล็กสำหรับให้น้ำหนักบรรทุกทุกที่มีช่วงห่าง 40 และ 80 เซนติเมตร หน้าตัด 15x25 ซม. และ 20x40 ซม. ตามลำดับ วางบนคานตัวอย่างโดยให้อยู่ตรงกึ่งกลางคาน ทำให้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับและตำแหน่งการใส่แรงมีค่าเท่ากับการแบ่งช่วงความยาวคานออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน (Third-Point Loading) การใส่แรงดัดในลักษณะนี้ทำให้สามารถวัดความสามารถในการรับกำลังดัดของคานได้โดยไม่มีผลกระทบของแรงเฉือน (Pure Bending) ดังแสดงในรูปไดอะแกรมโมเมนต์ดัด
- 4) ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 1 ชุด ที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับทั้งสองจุดตั้งรูป เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงที่กึ่งกลางคาน ความละเอียดของอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่นี้ เท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร
- 5) ต่อสายไฟที่ติดอุปกรณ์วัดระยะยืด-หดตัว เข้ากับเครื่องทดสอบ Data Logger พร้อมทั้งตั้งค่าให้เรียบร้อย
- 6) การใส่แรงกระทำกับคาน ให้ตั้งน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ จากนั้นเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกๆ ตัวอย่างคานวิบัติ พร้อมทั้งบันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกทุก
- 7) การบันทึกข้อมูล จะเป็นข้อมูล แรงที่กระทำบนคาน การโก่งตัวของคาน การยืดตัวของเหล็กเสริม



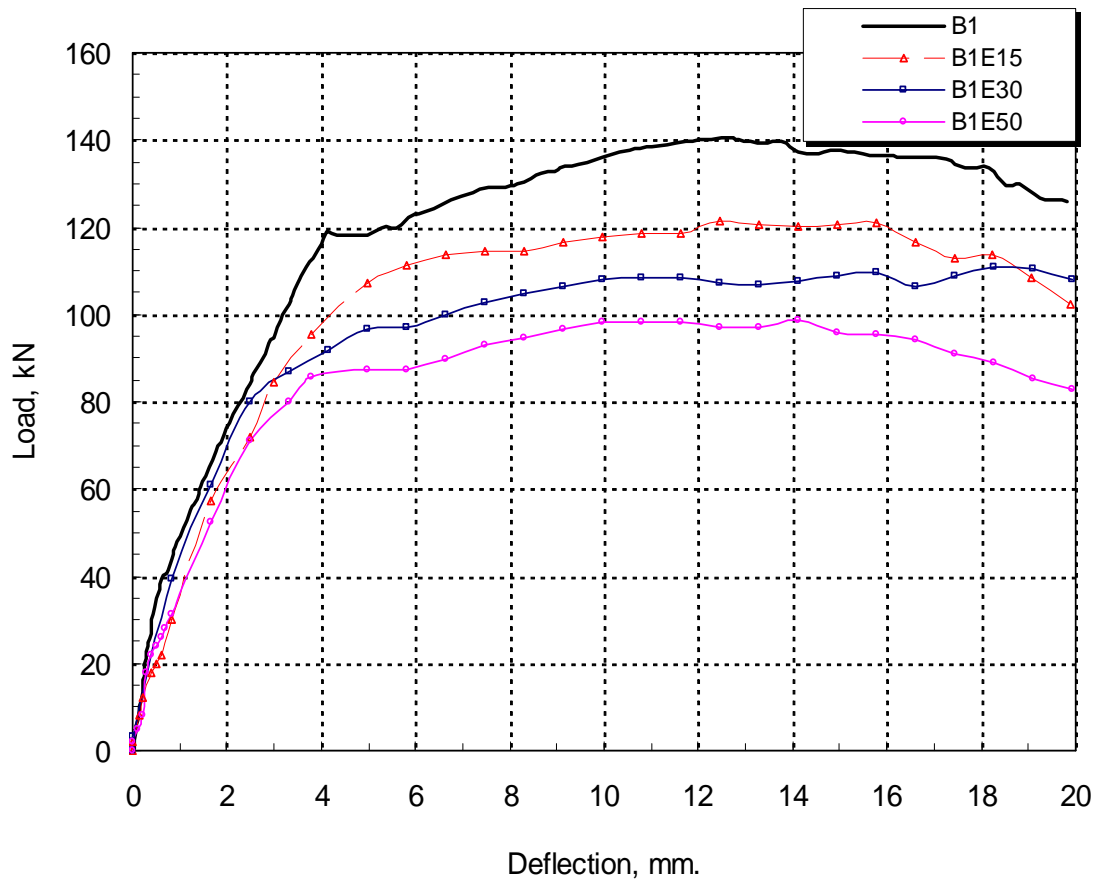
รูปที่ 5.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคาน ไตอะแกรมแรงเฉือนและไตอะแกรมโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนคาน

สำหรับการศึกษานี้ต้องการทราบว่า ความสามารถในการรับกำลังดัดของคานที่ผ่านกระบวนการ
เร่งปฏิกิริยาสนิม และสูญเสียเหล็กเสริมในปริมาณต่างๆ กัน จะมีความสามารถในการรับกำลังดัดเหลืออยู่
เท่าใด เมื่อเทียบกับคาน ค.ส.ล. ที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว (คานควบคุม) โดยการทดลองใน
โครงการวิจัยครั้งนี้ มีการเก็บข้อมูลผลการทดลองในลักษณะกราฟ เชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่าง
ค่าแรงดัด (Load) และค่าระยะการแอ่นตัวของคานในแนวตั้ง (Deflection) ที่บริเวณกึ่งกลางคาน โดย
เป็นการบันทึกค่าด้วยหน่วยประมวลผลในเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) และ
อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ที่ได้จากการทดลอง
นั้นประกอบด้วยหัวข้อหลัก คือ ลักษณะภายนอกของชิ้นงานทดสอบ ค่าแรงดัดที่คาน ค.ส.ล. สามารถรับ
ได้ ค่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานในแนวตั้ง (Deflection) และลักษณะพฤติกรรมการวิบัติ ลักษณะการ
ฉีกแตกของชิ้นงาน และปริมาณสนิมที่เกิดขึ้น สำหรับตัวอย่างทดสอบคาน ค.ส.ล. จะแบ่งเป็น 3 ชุดคือ
คานชุดที่ 1 ประกอบด้วย B1, B1E15, B1E30, B1E50 คานชุดที่ 2 ประกอบด้วย B2, B2E15, B2E30,
B2E50 และคานชุดที่ 3 ประกอบด้วย B3, B3E15, B3E50 ซึ่งเป็นคานที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมในระดับ
ต่ำ (15%), ระดับปานกลาง (30%) และระดับรุนแรง (50%) ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบคาน ค.ส.ล.

5.2 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 1 หน้าตัดคาน 15x25 ซม. ยาว 140 ซม.



รูปที่ 5.3 พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 1

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัด (Load) ที่กระทำกับตัวอย่างคาน ค.ส.ล. กับค่าระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน ในแนวตั้ง (Deflection) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ควบคุม (B1) ซึ่งเป็นคานตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม กับคาน ค.ส.ล. ที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมที่มีความสูญเสียของน้ำหนักเหล็กประมาณ 15% (B1E15) 30% (B1E30) และ 50% (B1E50) จากรูปกราฟพบว่าเมื่อเริ่มใส่น้ำหนักบรรทุกลงบนคาน B1 คานจะมีการรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้นพร้อมกับเกิดการแอนตัว โดยลักษณะของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงแบ่งเป็น 4 ช่วง โดยในช่วงแรกกราฟจะชันและเป็นเส้นตรงจนเมื่อคานนั้นเริ่มร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 15 กิโลนิวตัน ที่ตำแหน่งนี้จะสังเกตเห็นรอยร้าวที่กึ่งกลางคานบริเวณด้านข้าง โดยเริ่มร้าวจากท้องคานและค่อยๆ ยาวขึ้นด้านบน รอยร้าวนี้เป็นรอยร้าวขนาดเล็กลักษณะเป็นเส้นตรงเกือบตั้งฉากกับท้องคาน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า โมเมนต์ดัดการแตกร้าว (Cracking Moment) จากนั้นจึงเกิดการการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็นช่วงที่ 2 ซึ่งในช่วงนี้ เหล็กเสริมจะมีการยึดตัวเพิ่มมากขึ้นในขณะที่

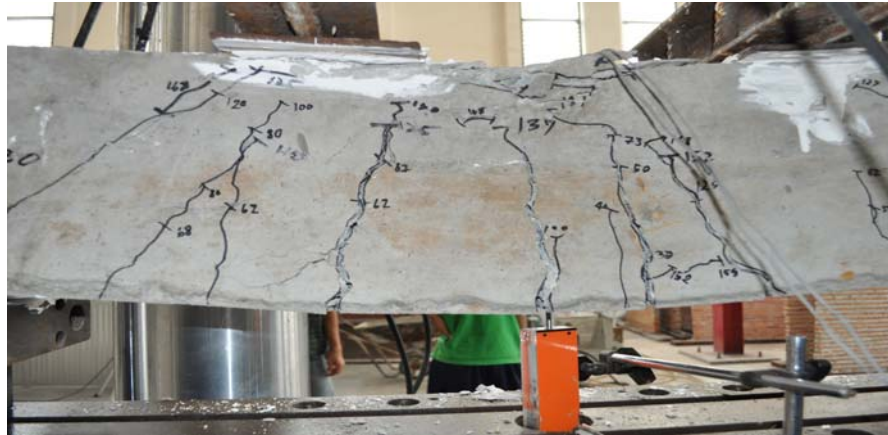
การแอ่นตัวของคานก็มากขึ้นด้วยเช่นกันสังเกตได้จากรูปกราฟ นอกจากนี้ยังมีรอยร้าวเพิ่มมากขึ้น ตำแหน่งสุดท้ายของกราฟในช่วงนี้จะอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกทุกได้ประมาณ 120 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานประมาณ 4 มิลลิเมตร ตามทฤษฎีที่ตำแหน่งนี้คือจุดที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก จากนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็นช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นความชันในช่วงการแอ่นตัวของคานที่ 4-13 มิลลิเมตร ในช่วงนี้น้ำหนักบรรทุกของคานจะเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับช่วงที่ 1 และ 2 ในขณะที่การแอ่นตัวของคานนั้นเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นช่วงที่เหล็กเสริมเกิดสภาวะ Strain Hardening และเกิดการสูญเสียรูป ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานมีค่าประมาณ 140 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นน้ำหนักบรรทุกของคานจึงตกลงเข้าสู่ความชันของกราฟในช่วงที่ 4 เป็นช่วงการแอ่นตัวของคานตั้งแต่ 13 มิลลิเมตรขึ้นไป ในช่วงนี้ คานไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อีกต่อไป จากรูปจะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกของคานจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อค่าการแอ่นตัวมากขึ้น แสดงว่าคาน B1 ได้เกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ จากเส้นกราฟนี้แสดงให้เห็นว่าคาน B1 มีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีทุกประการมีตำแหน่งคอนกรีตแตกร้าว ตำแหน่งเหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก และ ตำแหน่งรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งตรงกับการออกแบบเบื้องต้นของคาน B1 ที่กำหนดให้การวิบัติของคานนั้นเป็นการวิบัติแบบ Under-reinforced Beam ลักษณะการวิบัติของคาน B1 แสดงไว้ในรูปที่ 5.4

คาน B1E15 เป็นคาน ค.ส.ล.ที่มีการออกแบบและรายละเอียดหน้าตัดและเหล็กเสริมเหมือนคาน B1 ทุกประการ และผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมที่มีความสูญเสียของน้ำหนักเหล็กประมาณ 15% จากเส้นกราฟ BE15 พบว่าเมื่อคาน B1 สูญเสียเนื้อที่เหล็กเสริมไป จะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ลดลง จากค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 140 กิโลนิวตัน เป็น ประมาณ 120 กิโลนิวตัน ลดลงประมาณ 14% คาน BE15 นั้นเริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 12 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 105 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 5 มิลลิเมตร จะเห็นว่าเมื่อเหล็กล่างเกิดสนิมจุดเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงที่ 2 ไป 3 นั้น ไม่มีจุดเปลี่ยนที่ชัดเจนเหมือนคาน B1 ในกรณีนี้เนื่องจากสูญเสียเนื้อเหล็กเสริมไม่มาก ทำให้พฤติกรรมการวิบัติโดยรวมของคานทั้งสองตัวอย่างไม่แตกต่างกันมากนัก เพียงแต่มีค่าตามตำแหน่งต่างๆ ลดลง แต่คานทั้งสองตัวอย่างยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียว

คานที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมระดับกลาง 30% (B1E30) ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลงจาก 140 กิโลนิวตัน เป็นประมาณ 110 กิโลนิวตัน ลดลงประมาณ 21% คาน B1E30 นั้นเริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 10 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 80 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ถึงแม้ว่าการสูญเสียเนื้อเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นเป็น 30% แต่พฤติกรรมการวิบัติโดยรวม

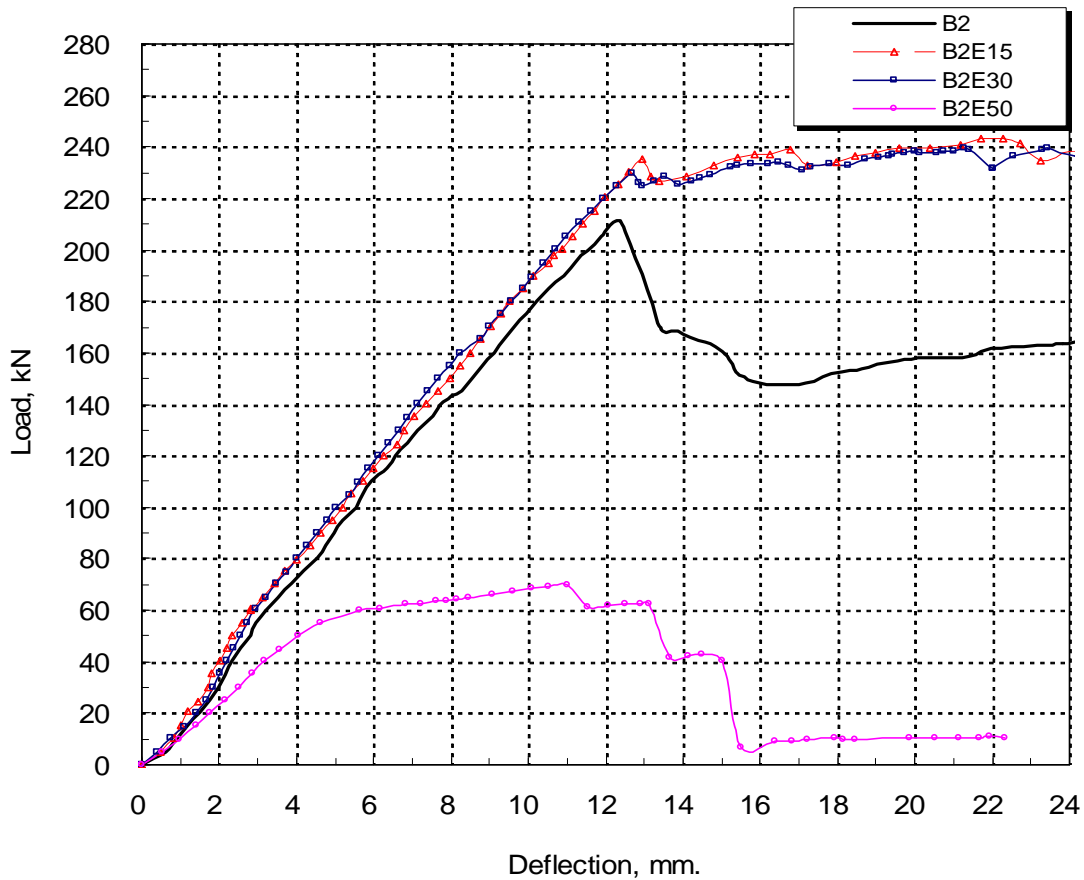
ของคานทั้งสองตัวอย่างยังคงไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือคานทั้งสองตัวอย่างยังแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว

คานสูญเสียเหล็กเสริมไปในระดับรุนแรง (50%) จะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลงจาก 140 กิโลนิวตัน เป็นประมาณ 97 กิโลนิวตัน ลดลงประมาณ 31% คาน B1E50 นั้นเริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 10 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 70 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 2.5 มิลลิเมตร และพฤติกรรมการวิบัติโดยรวมของคานทั้งสองตัวอย่างยังคงไม่แตกต่างกันมากนัก เพียงแต่มีค่าตามตำแหน่งต่างๆลดลง แต่คานทั้งสองตัวอย่างยังแสดงพฤติกรรมแบบเหนียว



รูปที่ 5.4 ลักษณะการวิบัติของคาน B1, B1E15, B1E50

5.3 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 2 หน้าตัดคาน 20x40 ซม. ยาว 240 ซม.



รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 2

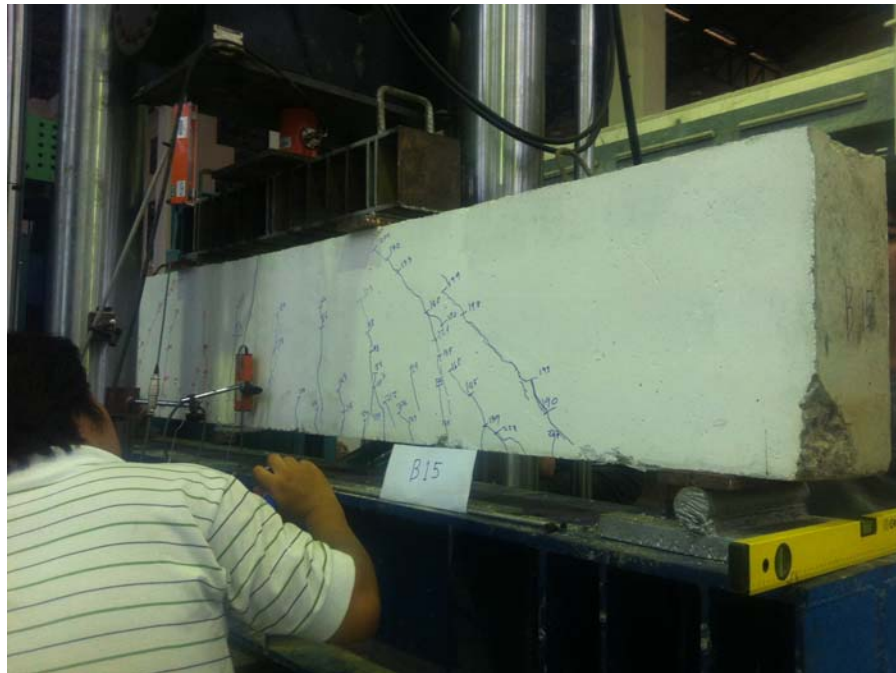
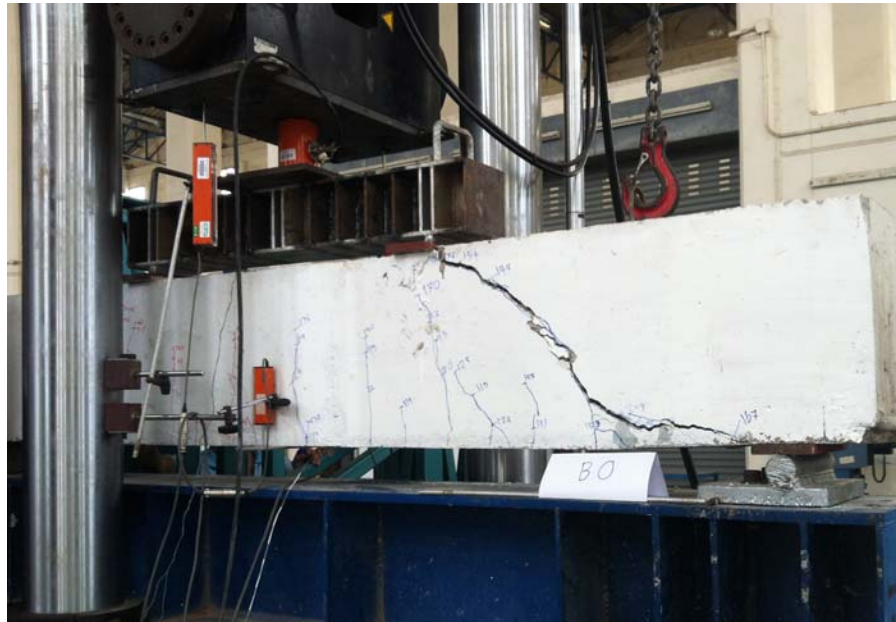
สำหรับคานชุดที่ 2 ซึ่งมีขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้น การทดสอบพบว่าคาน B2 มีน้ำหนักบรรทุกทุกเมื่อที่องคานเริ่มแตกร้าัวประมาณ 30 กิโลนิวตัน จากนั้นกราฟจะเปลี่ยนความชันและเป็นเส้นตรงในช่วงที่ 2 ตำแหน่งสุดท้ายของกราฟในช่วงนี้จะอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 210 กิโลนิวตัน จากนั้นคานเริ่มมีรอยแตกเส้นทะแยงมุมระหว่างตำแหน่งที่ใส่แรงและจุดรองรับ ทำให้แรงกระทำลงอย่างรวดเร็วลดลงเหลือเพียงประมาณ 160 กิโลนิวตัน นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อรอยแตกเส้นทะแยงมุมเกิดขึ้นแล้ว ไม่พบรอยแตกเกิดขึ้นเพิ่มเติมในบริเวณอื่นๆอีก รอยแตกนี้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนคานพัง พฤติกรรมคาน B2 แตกต่างจากคานตัวอื่นๆที่ทดสอบในการศึกษานี้เป็นอย่างมาก จากการศึกษาสรุปว่าการพังลักษณะนี้เป็น การพังแบบเปราะและพังด้วยแรงเฉือน แสดงดังรูปที่ 5.6

คาน B2E15 เป็นคาน ค.ส.ล.ที่มีการออกแบบและรายละเอียดหน้าตัดและเหล็กเสริมเหมือนคาน B2 นำไปผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสินิที่มี ความสูญเสียของน้ำหนักเหล็กประมาณ 15% จากเส้นกราฟ B2E15 พบว่าเมื่อคาน B2 สูญเสียเนื้อที่เหล็กเสริมไป สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่ากับ

240 กิโลนิวตัน เริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 20 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 230 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 12.5 มิลลิเมตร ในกรณีนี้เนื่องจากสูญเสียเนื้อเหล็กเสริมไม่มาก พฤติกรรมการวิบัติของคานเป็นแบบเหนียว

คานที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมระดับกลาง 30% (B2E30) พบว่าเมื่อคาน B2 สูญเสียเนื้อที่เหล็กเสริมไป สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่ากับ 240 กิโลนิวตัน เริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 14 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 230 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 12.5 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ถึงแม้ว่าการสูญเสียเนื้อเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 22.5% แต่พฤติกรรมการวิบัติโดยรวมของคาน B2E30 กับ B2E15 ทั้งสองตัวอย่างมีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนักถึงแม้ค่าการสูญเสียเหล็กเสริมแตกต่างกันประมาณ 20% นอกจากนี้คานยังแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว

คานสูญเสียเหล็กเสริมไปในระดับรุนแรง (50%) เริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 5 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 50 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 4 มิลลิเมตร คาน B2E50 รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่ากับ 70 กิโลนิวตัน ลดลงประมาณ 67% เทียบกับคาน B2 และเมื่อคานรับแรงสูงสุดแล้ว แรงกระทำลดลงอย่างรวดเร็ว พบรอยแตกขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานตั้งฉากกับท้องคานแตกขึ้นด้านบน แสดงดังรูปที่ 5.7

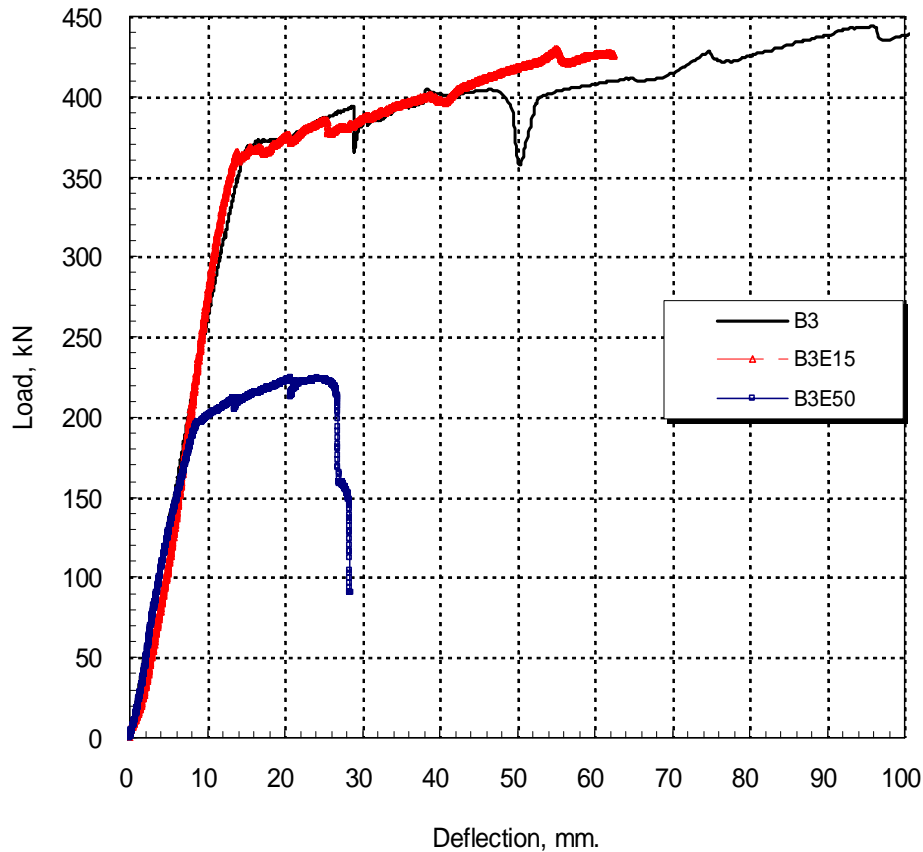


รูปที่ 5.6 ลักษณะการวิบัติของคาน B2, B2E15



รูปที่ 5.7 ลักษณะการวิบัติของคาน B2E30, B2E50

5.4 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 3 หน้าตัดคาน 25x50 ซม. ยาว 240 ซม.



รูปที่ 5.8 พฤติกรรมการรับแรงคานชุดที่ 3

คานชุดที่ 3 ขนาดหน้าตัด 25x50 ซม. ซึ่งเป็นหน้าตัดขนาดใหญ่ที่สุดของการศึกษานี้ การทดสอบพบว่าคาน B3 มีน้ำหนักบรรทุกเมื่อท้องคานเริ่มแตกร้าวประมาณ 10 กิโลนิวตัน จากนั้นกราฟจะเปลี่ยนความชันและเป็นเส้นตรงในช่วงที่ 2 ตำแหน่งสุดท้ายของกราฟในช่วงนี้จะอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 375 กิโลนิวตัน มีค่าการแอ่นตัวของคานประมาณ 14 มิลลิเมตร ตามทฤษฎีที่ตำแหน่งนี้คือจุดที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก จากนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเป็นช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นความชันในช่วงการแอ่นตัวของคานที่ 14-100 มิลลิเมตร ในช่วงนี้น้ำหนักบรรทุกของคานจะเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับช่วงที่ 1 และ 2 ในขณะที่การแอ่นตัวของคานนั้นเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นช่วงที่เหล็กเสริมเกิดสภาวะ Strain Hardening ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานมีค่าประมาณ 440 กิโลนิวตัน ที่ตำแหน่งพบการแตกของคอนกรีตที่บริเวณหลังคานอย่างรุนแรงแสดงดังรูปที่ 5.9

คาน B3E15 ที่มีความสูญเสียของน้ำหนักเหล็กประมาณ 15% สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่ากับ 420 กิโลนิวตัน เริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 10 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 370 กิโลนิวตัน และมีค่าการแอ่นตัวของคานที่จุดนี้ประมาณ 14 มิลลิเมตร ในกรณีนี้เนื่องจากสูญเสียเนื้อเหล็กเสริมไม่มากนัก ทำให้มีผลการทดสอบลักษณะการพังและรอยร้าวใกล้เคียงกับคาน B3 มาก และคานแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว

คาน B3E50 ที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมีระดับกลาง 30% เริ่มมีรอยร้าวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 10 กิโลนิวตัน ตำแหน่งที่เหล็กเสริมล่างมีกำลังถึงจุดคราก อ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 200 กิโลนิวตัน และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เท่ากับ 240 กิโลนิวตัน ลดลงประมาณ 45% เทียบกับคาน B3 ลักษณะการพังของคานตัวนี้แตกต่างจากคานตัวอื่นๆในชุดเดียวกันนี้ กล่าวคือ คานเกิดรอยแตกขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานตั้งฉากกับห้องคานแตกขึ้นด้านบน แสดงดังรูปที่ 5.9 จากนั้นแรงทดสอบลดลงอย่างรวดเร็วและมีการแอ่นตัวหลังจากรับแรงสูงสุดได้น้อยมาก จึงสรุปว่าคานมีลักษณะการพังแบบเปราะ

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่คำนวณจากการทดสอบด้วยสมการพาราเดย์กับค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่กำหนด และค่าโมเมนต์หน้าตัดคานที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI-318 จากผลการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณพบว่า ค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กจากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าน้ำหนักเหล็กที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมมีขั้นตอนการวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาที่มีความซับซ้อนและยุ่งยาก ค่าที่อ่านได้มีความผันผวน ทำให้อาจมีผลกระทบต่อค่าที่คำนวณได้จากสมการพาราเดย์ ส่วนค่ากำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดคานที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ระบุที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการตาม ACI-318 ประมาณ 30% ถึง 56% ยกเว้น คาน B2E50

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กและค่าโมเมนต์ของคานทดสอบ

คาน	ค่าการสูญเสีย น้ำหนัก เหล็กที่กำหนด (%)	ค่าการสูญเสีย น้ำหนัก เหล็กจาก สมการพาราเดย์ (%)	ความแตกต่าง ค่าการสูญเสีย น้ำหนัก เหล็ก (%)	ค่าโมเมนต์ ระบุ M_n (kN-m)	ค่าโมเมนต์ จากการ ทดสอบ M_u (kN-m)	ความ แตกต่าง ค่าโมเมนต์ (%)
B1	0	0	0.0	1721	2854	39.7
B1E15	15	17	11.8	1480	2446	39.5
B1E30	30	31	3.2	1233	2243	45.0
B1E50	50	52	3.8	894	1916	53.4
B2	0	0	0.0	6080	8563	29.0
B2E15	15	18.5	18.9	5212	9786	46.7
B2E30	30	22.5	-33.3	4328	9786	55.8
B2E50	50	59	15.3	3126	2854	-9.5
B3	0	0	0.0	13721	26911	49.0
B3E15	15	13	-15.4	11756	25688	54.2
B3E50	50	52	3.8	7070	14679	51.8

ค่าลบหมายถึงค่าจากการทดสอบน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหายเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดสนิม ด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี โดยแบ่งระดับความเสียหายของคาน ค.ส.ล. ออกเป็น 3 ระดับ คือ เสียหายระดับต่ำ (15%) ระดับปานกลาง (30%) และระดับรุนแรง (50%) ซึ่งใช้ปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไปเนื่องจากปฏิกิริยาเป็นตัวกำหนดระดับความเสียหาย ทำการทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม สามารถสรุปผลการศึกษาในเบื้องต้นได้ดังนี้

- 1) เมื่อระยะเวลากระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมมากขึ้น ปริมาณน้ำหนักของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ปริมาณเหล็กเสริมที่เหลืออยู่ในคานลดน้อยลง
- 2) คาน ค.ส.ล. ทั้ง 3 หน้าตัดที่เหล็กเสริมเกิดสนิมมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลงขึ้นอยู่กับระดับการสูญเสียเหล็กเสริมเมื่อเทียบกับคาน ค.ส.ล.ปกติ
- 3) สำหรับคานหน้าตัด 15x25 ซม. พฤติกรรมการวิบัติของคาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมไม่แตกต่างจากคาน ค.ส.ล.ปกติ ซึ่งยังคงแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว
- 4) สำหรับคาน ค.ส.ล. หน้าตัด 20x40 ซม. และ 25x50 ซม. พฤติกรรมการวิบัติของคาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมแตกต่างจากคาน ค.ส.ล.ปกติ ซึ่งเป็นพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ
- 5) ค่ากำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดคานที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ระบุที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการตาม ACI-318 ประมาณ 30% ถึง 56% ยกเว้นคาน B2E50

เอกสารอ้างอิง

- 1) American Concrete Institute Committee 318 (1999), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318), American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA.
- 2) ACI Committee 2005, Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-05) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331.
- 3) Almusallam A. A., "Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars", Construction and Building Materials 15, (2001), 361-368.
- 4) Ballim Y., Reid J.C., "Reinforcement corrosion and deflection of RC beams- an experimental critique of current test methods." Cement and concrete composites. Vol. 25, pg 625-632.
- 5) Castel, A., Francois, R., and Arliguie, G., "Mechanical Behavior of Corroded RC Beams - Part 1: Experimental Study of Corroded Beams." Materials and Structures 33, no. 233 (2000a): 539.
- 6) El Maaddaway T., Soudki K., "Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete." Journal of materials in civil engineering. Vol. 15, No. 1, pg 41-47.
- 7) Goitseone Malumbela, Mark Alexander, Pilate Moyo., "Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load", Dept. of Civil Eng., Univ. of Cape Town, Private Bag X3, Rondebosch 7700, South Africa.
- 8) Jin Xia, Wei-liang Jin, Long-yuan., "Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment", Corrosion Science, 53 (2011), 1794-1805.
- 9) Maaddawy, Tamer El; Soudki, Khaled; and Topper, Timothy. "Long-Term Performance of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams.", ACI Structural Journal 102, no.5 (2005b): 649-656.
- 10) Malumbela G., Alexander M., Moyo P., "Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load", Construction and Building Materials, 24 (2010), 1051-1059.

- 11) OKUDE N., KUNIEDA M., SHIOTANI T., NAKAMURA H., "Flexural Failure Behavior of RC Beams with Rebar Corrosion and Damage Evaluation by Acoustic Emmission", Report online.
- 12) Rio O., Andrade C., Izquierdo, Alonso C., "Behavior of patch repaired concrete structural elements under increasing static loads to flexural failure." Journal of materials in civil engineering. Vol. 17, No. 2 (2005), pg 168–17.
- 13) Roger W. Smith., "The effects of corrosion on the performance of reinforced concrete beams" Ryerson University.
- 14) Uomoto, T., and Misra, S., "Behaviors of Concrete Beams and Columns in Marine Environment when Corrosion of Reinforcing Bars Take Place" AO Special Publication SP-109 1988: 127-145. Excerpted Under "Load Carrying Capacity of Concrete Structures with Corroded Reinforcement." Construction and Building .Materials Construction and Building .Materials 11.4 (1997): 239.
- 15) Yoon, Sanchun; Wang, Kejin; Weiss, Jason W.; and Shah, Surendra P. "Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of RC.", ACI Materials Journal 97, no.6 (2000): 637.

ภาคผนวก
แผ่น poster งานประชุมวิชาการ HERP3



บทคัดย่อ

ปัญหาสำคัญอันหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล คือการเกิดสนิมในเหล็กเสริม กระบวนการเกิดสนิมนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเหล็กเสริมกับไอซอซัลเฟตในน้ำทะเลที่ซึมเข้ามาในคอนกรีต ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนเกิดการขยายตัวและดันให้คอนกรีตร้าวและในที่สุดเกิดการหลุดร่อน ทำให้โครงสร้างสูญเสียความแข็งแรงในการรับน้ำหนักของโครงสร้างประเภทนี้ไป วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1) เพื่อศึกษาการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เมื่อเหล็กเสริมเหล็กและเหล็กปลอกเกิดสนิม 2) เพื่อเปรียบเทียบการรับแรงดัดของคานในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ ที่เทียบกับในสภาวะแวดล้อมปกติ ตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการทดลองเป็นคานขนาดยาว 3 ชุด ชุดแรกมีขนาดหน้าตัด 150x250 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร ชุดสองขนาดหน้าตัด 200x400 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร ชุดสามขนาดหน้าตัด 250x500 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักของเหล็กเสริมในคานลดลงถึงค่าที่กำหนดไว้ 3 ระดับคือ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับรุนแรง โดยใช้น้ำหนักเหล็กเสริมที่สูญเสียไป 15% 30% และ 50% ของน้ำหนักเหล็กเสริมเริ่มต้นเป็นตัวกำหนดความเสียหายตามลำดับ ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานเปรียบเทียบระหว่างคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากกระบวนการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวมกับคานที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวม ผลการทดสอบพบว่าคาน ค.ส.ล. ที่สูญเสียเหล็กเสริมเนื่องจากกระบวนการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวมจะมีกำลังรับแรงดัดลดลงขึ้นอยู่กับระดับการสูญเสียเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมมากขึ้นกำลังรับแรงดัดของคานจะลดลงมากขึ้นด้วย สำหรับคานชุดที่ 1 (หน้าตัดขนาดเล็ก) พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมไม่แตกต่างจากคานควบคุม ซึ่งยังคงแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเปราะ อย่างไรก็ตามสำหรับคานหน้าตัดใหญ่ขึ้น (ชุด 2 และชุด 3) เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับปานกลางถึงรุนแรงจะแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเปราะและจะมีระยะเวลาอันสั้นก่อนจะแตกอย่างมาเมื่อเทียบกับคานควบคุม นอกจากนี้ลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับปานกลางและรุนแรงมีขนาดใหญ่มากกว่าคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับต่ำ

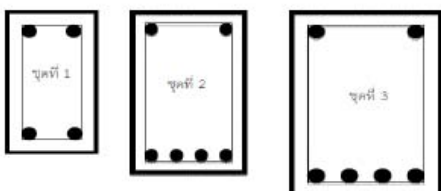
ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีราคาค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล คือการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งกระบวนการเกิดสนิมนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคอนกรีตกับไอซอซัลเฟต ซึ่งทำให้คอนกรีตขยายตัวและดันให้คอนกรีตร้าวและในที่สุดเกิดการหลุดร่อน ทำให้โครงสร้างสูญเสียความแข็งแรงในการรับน้ำหนักของโครงสร้างประเภทนี้ไป วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1) เพื่อศึกษาการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เมื่อเหล็กเสริมเหล็กและเหล็กปลอกเกิดสนิม 2) เพื่อเปรียบเทียบการรับแรงดัดของคานในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ ที่เทียบกับในสภาวะแวดล้อมปกติ

- 1) เพื่อศึกษาการรับแรงดัด (Flexural strength) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมและเหล็กปลอกเกิดสนิม
- 2) เพื่อเปรียบเทียบการรับแรงดัดของคานในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ ที่เทียบกับในสภาวะแวดล้อมปกติ

การเตรียมตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ใช้กำหนดตัวอย่างคานคอนกรีตจำนวน 3 ชุด หน้าตัดขนาดเดิม 15x25 ซม. ความยาวเท่ากับ 140 ซม. หน้าตัดขนาดกลาง 20x40 ซม. ความยาวของคานกำหนดให้เท่ากับ 240 ซม. หน้าตัดขนาดใหญ่ 25x50 ซม. ความยาวของคานกำหนดให้เท่ากับ 240 ซม. คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 280 กก./ซม.² ใช้เหล็กข้ออ้อย DB12 ขนาดแกน 5D 30 เป็นเหล็กเสริมคานและเหล็กปลอกแบบ RB9 ซึ่งขนาดหน้าตัด SR 24 เป็นเหล็กปลอก จะมีการเสริมเหล็กปลอกเท่ากับ 10 สำหรับคานชุดที่ 1 และ 20 ซม. สำหรับคานชุดที่ 2, 3 คอนกรีตจะมีระยะเวลาการเกิดสนิม 3 ชุด รายละเอียดเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับคานชุดที่ 1, 2, และ 3

การปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวมของคาน ค.ส.ล.

เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้เกิดสนิมบริเวณรอยร้าว เหล็กเสริมและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมเกิดสนิมได้กำลังรับแรงของคานลดลง แต่ทั้งนี้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมตามธรรมชาติเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน ในการศึกษาโครงสร้างวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการกำจัดสนิมด้วยวิธีการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อระยะเวลาการศึกษา โครงงานนี้ต้อง ปริมาณในการเสริมเหล็กเสริมกับปริมาณการเสริมเหล็กที่เดิมไว้ที่เดิม ปริมาณเหล็กเสริมที่หายไปสามารถคำนวณได้จากสมการพาราโบลา โดยใช้ค่าที่ขึ้นกับการกระจายของเหล็ก (b) หน่วงเป็นสมการพาราโบลา (c) หน่วงเป็นวินาที ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถคำนวณได้จากกราฟทดลอง และเมื่อใช้วิธีการประมาณค่าที่ได้จากการคำนวณวิธีนี้ให้ใช้สมการของ ตารางที่ 1 แสดงผลสรุปค่าเริ่มต้นเฉลี่ยที่สูญเสียจากการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\Delta W = \frac{I \cdot t \cdot A_m}{Z \cdot F}$$

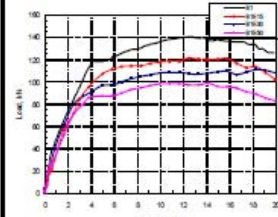
- ΔW - น้ำหนักเฉลี่ยที่สูญเสียไป (กรัม)
 I - ค่าการกระจายพาราโบลา (มม²)
 t - ระยะเวลาเฉลี่ยที่เหล็กเสริมเกิดสนิม (วัน)
 A_m - ค่าการกระจายของเหล็กเสริม (55-85 กรัม สำหรับเหล็ก)
 F - ค่าการกระจายของเหล็ก (96,500 ชุด/กรัม)
 Z - 2

ตารางที่ 1. ตัวอย่างคาน ค.ส.ล. และค่าเฉลี่ยที่สูญเสียจากการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวม

รายละเอียดคาน ค.ส.ล.	ชื่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.	จำนวนคาน	ปริมาณน้ำหนักรวมเหล็กเสริมเดิม (kg)	ปริมาณน้ำหนักรวมเหล็กเสริมเฉลี่ย (kg)
1) คาน ค.ส.ล. ชุดคานชุดที่ 1	B1	4	0	0
2) คาน ค.ส.ล. ชุดคานชุดที่ 2				
- ระดับต่ำ	B1E15	1	17	
- ระดับปานกลาง	B1E30	1	31	
- ระดับรุนแรง	B1E50	1	52	
3) คาน ค.ส.ล. ชุดคานชุดที่ 2	B2	1	0	0
4) คาน ค.ส.ล. ชุดคานชุดที่ 3				
- ระดับต่ำ	B2E15	1	18.5	
- ระดับปานกลาง	B2E30	1	22.5	
- ระดับรุนแรง	B2E50	1	39	
5) คาน ค.ส.ล. ชุดคานชุดที่ 3	B3	1	0	0
6) คาน ค.ส.ล. ชุดคานชุดที่ 3				
- ระดับต่ำ	B3E15	1	13	
- ระดับปานกลาง	B3E30	1	52	
รวม		11		

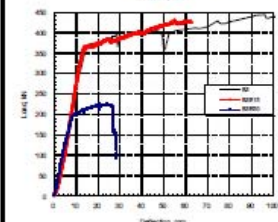
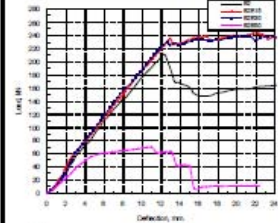
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผลการทดสอบการรับน้ำหนักดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก Third-Point Loading ตามมาตรฐาน ASTM C1609



ตารางที่ 2. รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 1, 2, 3

ชุด ค.ส.ล.	ขนาดหน้าตัด (กว้างxสูง)	ชุดคานที่เสริมเหล็ก	ขนาดหน้าตัด (กว้างxสูง)	ระดับการเกิดสนิม (%)	ระดับการเกิดสนิม (%)	ระดับการเกิดสนิม (%)
B1	15 x 25	NA	120 x 8	0	34	33
B1E15	12	NA	120 x 3	12	11	14
B1E30	19	NA	60 x 2.5	11	11	12
B1E50	18	NA	70 x 3.5	14	14	12
B2	30 x 2	NA	NA	NA	23	12
B2E15	29	3.5	230 x 12.5	24	24	24
B2E30	15	1	230 x 12.5	24	24	24
B2E50	3	1	50 x 4	7	11	12
B3	15 x 25	NA	375 x 14	44	44	11
B3E15	19	NA	375 x 14	42	45	
B3E30	19	NA	210 x 9	24	21	21



รูปที่ 2 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานชุดที่ 1, 2, 3

สรุปผลการศึกษา

- 1) เมื่อระยะเวลาการปรับปรุงปริมาณน้ำหนักรวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำหนักรวมของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ปริมาณเหล็กเสริมที่เหลืออยู่ในคานจะน้อยลง
- 2) คาน ค.ส.ล. ชุดที่ 3 หน้าตัดที่ใหญ่ที่สุดจะมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ลดลงเมื่อเทียบกับคานชุดอื่นที่มีหน้าตัดเล็กกว่า
- 3) สำหรับคานหน้าตัด 15x25 ซม. พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมยังคงแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเปราะ ส่วนคาน ค.ส.ล. หน้าตัด 20x40 ซม. และ 25x50 ซม. คาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเปราะ

ผลการอ้างอิง

- 1) Ballin Y., Reid J.C. 2003. "Reinforcement corrosion and deflection of RC beams: an experimental critique of current test methods." Cement and concrete composites, Vol. 25, pp 625-632.
- 2) El Maaddawy T., Soudki K. (Jan-Feb. 2003). "Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete." Journal of materials in civil engineering, Vol. 15, No. 1, pp 41-47.
- 3) Rio O., Andrade C., Izquierdo, Alonso C. April 2005. "Behaviour of patch repaired concrete structural elements under increasing static loads to flexural failure." Journal of materials in civil engineering, Vol. 17, No. 2, pp 168-177.

กิตติประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนาคณาจารย์วิจัยของมหาวิทยาลัยบูรพา ซึ่งได้รับการสนับสนุนการอุดหนุนค่าตอบแทนค่าจ้างที่ 2557