ประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเป็นสนิมในสภาวะที่ต่างกัน

โดย

วศิน สุชาติพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2567

Ref. code: 25676510031047AGJ

SHEAR PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CORRODED STIRRUPS

BY

WASIN SUCHATPONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2024

Ref. code: 25676510031047AGJ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นาย วศิน สุชาติพงษ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเป็นสนิมในสภาวะที่ต่างกัน

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

เมื่อวันที่ 21 **ธันวาคม** 2567

ประธานกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชนะชัย ทองโฉม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตหรา ลาวงศ์เกิด)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม _____

(อาจารย์ ดร.เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์)

คณบดี _____

(ศาสตราจารย์ ดร.สัญญา มิตรเอม)

Ref. code: 25676510031047AGJ

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเป็นสนิมในสภาวะที่ต่างกัน
ชื่อผู้เขียน	วศิน สุชาติพงษ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. ชนะชัย ทองโฉม
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเกิดสนิมในสภาวะที่ต่างกัน ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาสนิม (30 และ 60วัน) โดยทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัด 15×20 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร จำนวน 8 คาน กำหนดระยะเวลาในการเร่งสนิม 30 และ 60 วัน ภายใต้ 4 สภาวะ ได้แก่ สภาวะน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานเปรียบเทียบระหว่างคานที่เหล็กปลอกเกิดสนิมเนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมกับคานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม (คานควบคุม) จากการทดสอบพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สูญเสียเหล็กปลอกเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมจะมีกำลังรับแรงเฉือนลดลงขึ้นอยู่กับระดับการสูญเสียเหล็กปลอกที่เกิดในเหล็กเสริม เมื่อเหล็กปลอกเกิดสนิมมากขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของคานจะลดลงมากขึ้นด้วย โดยคานตัวอย่างที่ทำการเร่งปฏิกิริยาสนิม 30 วัน ในสภาวะน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต รับน้ำหนักบรรทุกได้ลดลง 3.1% 6.4% และ 3.5% ตามลำดับ คานตัวอย่างที่ทำการเร่งปฏิกิริยาสนิม 60 วัน ในสภาวะน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต รับน้ำหนักบรรทุกได้ลดลง 11.4% 23.8% และ 15.4% ตามลำดับ ส่วนการเร่งปฏิกิริยาสนิมในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ใกล้เคียงกับคานควบคุม เนื่องจากไม่เกิดสนิม

คำสำคัญ: แรงเฉือน, สนิม, พฤติกรรม, คอนกรีต, เหล็กเสริม

Ref. code: 25676510031047AGJ

Thesis Title	SHEAR PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CORROSION DAMAGED STIRRUPS
Author	Wasin Suchatphong
Degree	Master of Engineering (Civil Engineering)
Major Field/Faculty/University	Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Chanachai Thongchom, Ph.D.
Academic Year	2024

Abstract

This research aims to investigate the shear behavior of reinforced concrete beams with corroded steel bars under different conditions. The variables studied include the duration of corrosion acceleration (30 and 60 days) by testing specimens of reinforced concrete beams with cross-sectional dimensions of 15×20 centimeters and a length of 120 centimeters, totaling 8 beams. Corrosion acceleration durations of 30 and 60 days were conducted under 4 different conditions: immersion in water, sodium chloride solution, magnesium sulfate solution, and calcium hydroxide solution. The shear strength of the beams with corroded steel bars was compared to that of beams without corrosion acceleration (control beams). The tests revealed that the shear strength of reinforced concrete beams decreases depending on the level of corrosion of the steel bars. As the corrosion of the steel bars increases, the shear strength of the beams decreases significantly. For example beam, the specimens subjected to 30 days of corrosion acceleration in water, sodium chloride solution, and magnesium sulfate solution experienced reductions in load-carrying capacity of 3.1%, 6.4%, and 3.5% respectively. Similarly, specimens subjected to 60 days of corrosion acceleration in water, sodium chloride solution, and magnesium sulfate solution experienced reductions in load-carrying capacity of 11.4%, 23.8%, and 15.4% respectively. However, when subjected to corrosion

Ref. code: 25676510031047AGJ

acceleration in calcium hydroxide solution, the load-carrying capacity of the specimens was comparable to that of the control beams, as no corrosion occurred

Keywords: Shear force, Corrosion, Behavior, Concrete,Steel reinforcement

Ref. code: 25676510031047AGJ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโฉม อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้ ตลอดจนให้ความรู้ในเรื่องการออกแบบตัวอย่างการทดสอบ การเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ อย่างเหมาะสม

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตหรา ลาวงศ์เกิด และ อาจารย์ ดร.เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์ ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่นำมาใช้ปรับปรุงข้อผิดพลาดต่างๆ ในงานวิจัยนี้ ขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการโยธาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ หากงานวิจัยฉบับนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยในอนาคต นับเป็นความปิติยินดียิ่งที่ได้จัดทำงานวิจัยฉบับนี้ขึ้น และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

วศิน สุชาติพงษ์

Ref. code: 25676510031047AGJ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
ABSTRACT	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(4)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูปภาพ	(9)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2วัตถุประสงค์	1
1.3ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทดสอบ	3
2.1.1เหล็กเส้นกลม (Round Bars)	3
2.1.2 เหล็กเส้นข้ออ้อย	4
2.2 การเกิดสนิมในเหล็ก	5
2.3 การเกิดสนิมในเหล็กโดยคลอไรด์	6
2.4 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (Strength Design)	7

Ref. code: 25676510031047AGJ

2.4.1 น้ำหนักบรรทุกประลัยที่ใช้ออกแบบ 7
2.4.2 กำลังต้านทานหรือกำลังที่ออกแบบ 8
2.5 การวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 8
2.5.1 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว 8
2.5.2 การออกแบบหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวโดยวิธีกำลังประลัย 12
2.5.3 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด 14
2.5.4 การออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด 15
2.6การออกแบบเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือนและรงยึดหน่วง 17
2.6.1 กำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะประลัย 17
2.6.2 แรงยึดหน่วงประลัย 18
2.7การทดลองผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมต่อการรับแรงดัด 19
2.8 การทดลองผลของเหล็กปลอกที่เป็นสนิมต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 22
2.9 ผลของการกัดกร่อนในเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริมเหล็กแบบสั้น 24

บทที่ 3 วิธีการวิจัย 27

3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา 27
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 27
3.2.1 คอนกรีต 27
3.2.2 เหล็กเสริมคอนกรีตและเหล็กปลอก 27
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 28
3.3.1 มัลติมิเตอร์ 28
3.3.2 เครื่องมือทดสอบ Half-Cell Potential 28
3.3.3 Power Supply 29
3.3.4 สายไฟและตัวต้านทาน 29

Ref. code: 25676510031047AGJ

3.4 การออกแบบตัวอย่าง 30

3.5 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม 30

3.5.1 สารละลายที่นำมาเป็นตัวกลางทางไฟฟ้า 32

3.6 ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กปลอก 34

3.7 การติดตั้งเครื่องมือวัด 35

3.7.1 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบสี่ตำแหน่ง 35

3.8 วิธีการดำเนินงาน 36

บทที่ 4 ผลการศึกษา 39

4.1 ผลการทดสอบ 39

4.1.1 ผลการทดสอบคาน B30W 39

4.1.2 ผลการทดสอบคาน B60W 40

4.1.3 ผลการทดสอบคาน B30N 41

4.1.4 ผลการทดสอบคาน B60N 41

4.1.5 ผลการทดสอบคาน B30C 42

4.1.6 ผลการทดสอบคาน B30M 43

4.1.7 ผลการทดสอบคาน B60M 44

4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ 45

4.2.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว 45

บทที่ 5 บทสรุป 49

รายการอ้างอิง 50

ประวัติผู้เขียน 52

Ref. code: 25676510031047AGJ

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1คุณสมบัติของเหล็กเส้นกลม(มอก.20-2543)	4
2.2 คุณสมบัติของเหล็กเส้นข้อย้อย(มอก.20-2536)	5
3.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริมและเหล็กปลอก	27
3.2 ตัวอย่างคานคอนกรีต	30
3.3 มาตรฐาน ASTM C876-99	35
4.1 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง	45

Ref. code: 25676510031047AGJ

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เหล็กเส้นกลม	3
2.2 เหล็กเส้นข้ออ้อย	4
2.3 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว	9
2.4 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว	9
2.5 การออกแบบหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวโดยวิธีกำลังประลัย	13
2.6 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด	15
2.7 การออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด	16
2.8 กำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะประลัย	17
2.9 รายละเอียดของคาน (Shamsad Ahmad, 2022)	19
2.10 การเชื่อมต่อวงจรกับคานคอนกรีต (Shamsad Ahmad, 2022)	20
2.11 การเชื่อมต่อวงจรกับคานคอนกรีต (Shamsad Ahmad, 2022)	20
2.12 ลักษณะรอยร้าวของคาน U, A, B, และ C (Shamsad Ahmad, 2022)	21
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัว (Shamsad Ahmad, 2022)	21
2.14 ตารางผลการทดสอบ (Shamsad Ahmad, 2022)	22
2.15 รายละเอียดของคานทดสอบ (R H Shehab และคณะ, 2020)	22
2.16 รายละเอียดของคานทดสอบ (R H Shehab และคณะ, 2020)	23
2.17 ผลการทดสอบคาน (R H Shehab และคณะ, 2020)	23
2.18 ตัวอย่างคานทดสอบ (Ahmed K. EL-SAYED และคณะ)	24
2.19 รายละเอียดและหน้าตัดตัวอย่างคานทดสอบ (Ahmed K. EL-SAYED และคณะ)	25
2.20 กระบวนการเร่งการกัดกร่อน (Ahmed K. EL-SAYED และคณะ)	25
2.21 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง (Ahmed K. EL-SAYED และคณะ)	26
3.1 มัลติมิเตอร์	28

Ref. code: 25676510031047AGJ

3.2 Half-Cell Potential 28
3.3 Power Supply 29
3.4 สายไฟฟ้าตัวนำทองแดง 29
3.5 ตัวต้านทาน 29
3.6 แสดงลักษณะของคานคอนกรีตตัวอย่าง 31
3.7 แสดงภาพตัวอย่างคานและหน้าตัดคาน 31
3.8 โซเดียมคลอไรด์(เกลือแกง) 32
3.9 แมกนีเซียมซัลเฟต 33
3.10 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 33
3.11 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม 34
3.12 กระบวนการทดสอบ Half-Cell Potential 34
3.13 ขั้นตอนการจัดเตรียมการทดสอบ 35
3.14 ขั้นตอนการจัดเตรียมการทดสอบ 36
3.15 การเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีตตัวอย่าง 36
3.16 การหล่อคานคอนกรีตตัวอย่าง 37
3.17 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมที่เหล็กปลอกของคานตัวอย่าง 37
3.18 การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงดัดแบบสี่ตำแหน่ง 38
4.1 รอยร้าวแรกของคาน B30W หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 39
4.2 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30W 40
4.3 รอยร้าวแรกของคาน B60W หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 40
4.4 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B60W 40
4.5 รอยร้าวแรกของคาน B30N หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 41
4.6 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30N 41
4.7 รอยร้าวแรกของคาน B60N หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 42
4.8 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B60N 42

Ref. code: 25676510031047AGJ

4.9 รอยร้าวแรกของคาน B30C หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 43
4.10 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30C 43
4.11 รอยร้าวแรกของคาน B30M หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 44
4.12 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30M 44
4.13 รอยร้าวแรกของคาน B60M หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก 44
4.14 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B60M 45
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน 46
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน 46
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน 47

Ref. code: 25676510031047AGJ

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
As	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง
b	ความกว้างของคาน
d	ความลึกประสิทธิผล
fc'	หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต
fs	หน่วยแรงดึง หรือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็ก
fy	หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม
Vc	หน่วยแรงเฉือนของคอนกรีต
ρ	อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคาน

Ref. code: 25676510031047AGJ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบโดยทั่วไปแล้วว่า คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้สูง แต่ไม่สามารถทนต่อการรับแรงดึงได้ ซึ่งในโครงสร้างคอนกรีตนั้นอาจมีแรงดึงเกิดขึ้น เช่น ในกรณีของคานหรือพื้น ดังนั้นจึง ได้มีการนำเอาเหล็กซึ่งมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดและแรงดึงได้ดี นำมาเสริมในโครงสร้างคอนกรีตซึ่งเรียกว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเหล็กเสริมที่ใช้เสริมกำลังให้กับคอนกรีตโดยทั่วไปนั้น ได้แก่ เหล็กข้ออ้อย DB (Deformed Bar) เหล็กกลม RB (Round Bar) แต่เหล็กเสริมคอนกรีตนั้นแม้ว่าจะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีแล้วก็ตาม ข้อด้อยของเหล็กเสริมคือสามารถเป็นสนิมได้ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างมาก

ปกติเหล็กจะถูกใช้งานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีค่า pH ประมาณ 7–8 และมีค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ในย่าน Corrosion หรือย่านการเกิดสนิม แต่เนื่องจากภายในคอนกรีตมีความเป็นด่างสูง (ค่า pH ประมาณ 12.6–13.8) ดังนั้นเหล็กเสริมในคอนกรีตจึงเปลี่ยนสภาวะจากย่านการเกิดสนิม (Corrosion) ไปสู่ย่านการเกิดฟิล์ม (Passivity) ซึ่งเป็นย่านที่ผิวเหล็กจะเกิดออกไซด์ฟิล์มขึ้นป้องกันสนิมแต่อย่างไรก็ตามเหล็กของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถสนิมได้โดยมีปัจจัยการเกิดสนิมอีกหลายปัจจัย โดยความรุนแรงของการเกิดสนิมจะมีความแตกต่างกันเมื่ออยู่ในสภาวะต่างๆ เนื่องจากมีปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิมต่างกัน

การทดลองนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมของเหล็กปลอกในสภาวะ น้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมที่เหล็กปลอกในสภาวะน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาสนิมและสารละลายที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาสนิม

Ref. code: 25676510031047AGJ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัด 15×20 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร จำนวน 8 คาน ที่เหล็กปลอกผ่านการเร่งสนิม กำหนดระยะเวลาในการเร่งสนิม 30 และ 60 วัน ภายใต้ 4 สภาวะได้แก่ สภาวะน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานเปรียบเทียบระหว่างคานที่เหล็กปลอกเกิดสนิมเนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมกับคานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม (คานควบคุม)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในกรณีที่เหล็กปลอกเกิดสนิม ที่เปรียบเทียบภายใต้ 4 สภาวะ

2..เพื่อนำเสนอผลของ การเร่งสนิมที่เหล็กปลอกโดยกำหนดระยะเวลาต่างกัน และสภาวะการเร่งสนิม 4 สภาวะ ว่าส่งผลอย่างไรต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและลักษณะการวิบัติของคาน

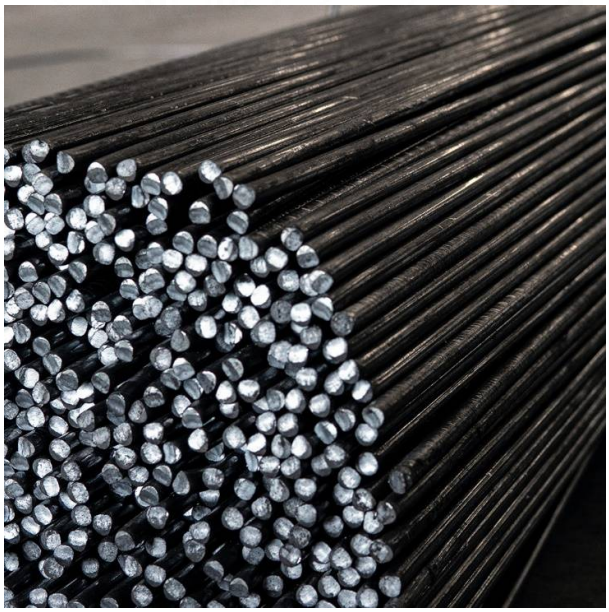
Ref. code: 25676510031047AGJ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทดสอบ

2.1.1 เหล็กเส้นกลม (Round Bars) หรือ RB คือเหล็กเส้นที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างอาคาร เป็นเหล็กพื้นฐานช่วยเพิ่มความแข็งแรงและรับแรงโครงสร้างอาคาร โดยมักจะนำมาใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก งานก่ออิฐทั่วไป และงานปลอกเสา คานต่างๆ เป็นต้น

เหล็กเส้นกลมคุณภาพดีต้องผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 20-2559 เกรด SR 24 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นเริ่มต้นจาก 6 มม. – 34 มม. มีความยาวมาตรฐาน 10 และ 12 เมตร ตามลำดับ เหล็กขนาด 6 มม. - 9 มม. มักถูกใช้เป็นเหล็กปลอกเสา คาน ส่วนเหล็กขนาด 12 มม. ขึ้นไป จะใช้ในงานเสริมแกนโครงสร้างอาคาร



ภาพที่ 2.1 เหล็กเส้นกลม

Ref. code: 25676510031047AGJ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเหล็กเส้นกลม(มอก 20-2543)

ชนิดเหล็ก	สัญลักษณ์	ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก	ความต้านทานแรงดึงที่จุดประลัย	ความยืดในช่วงความยาว 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
เหล็กกลม (Round Bar)	SR24	≥2400 ksc ≥235 Mpa	≥3900 ksc ≥385 Mpa	≥21 %

2.1.2 เหล็กเส้นข้ออ้อย

เหล็กเส้นข้ออ้อย คือ เหล็กที่มีครีบและบั้งที่ผิวเหล็ก ซึ่งหน้าที่ของครีบและบั้งคือช่วยให้เหล็กยึดเกาะกับคอนกรีตได้ดี ทำให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนมากมักจะใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต เช่น คาน เสา พื้นถนน สะพาน เขื่อน บ้าน อาคาร และงานก่อสร้างที่มีแรงอัดมากๆ เป็นต้น โดยเหล็กเส้นข้ออ้อยจะมีหลายขนาดและหลายความสามารถในการรับแรง ซึ่งเหมาะกับการใช้งานแตกต่างกัน เช่น เหล็กเส้นข้ออ้อย SD30 SD40 SD40S และ SD50

เหล็กเส้นข้ออ้อย SD30, SD40 และ SD50 เป็นเหล็กเส้นแบบเดียวกัน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 – 40 มม. และผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 24-2559 แต่ความแตกต่างของเหล็กแต่ละแบบนั้นจะอยู่ที่ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก. / ตร.ซม. หรือ ksc)) เช่น SD30 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยที่มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 3,000 ksc ส่วน SD40 และ SD50 หมายถึง เหล็กข้ออ้อยที่มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4,000 ksc และ 5,000 ksc ตามลำดับ

ภาพที่ 2.2 เหล็กเส้นข้ออ้อย

Ref. code: 25676510031047AGJ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเหล็กเส้นข้ออ้อย(มอก 20-2536)

ชนิดเหล็ก	สัญลักษณ์	ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก	ความต้านทานแรงดึงที่จุดประลัย	ความยืดในช่วงความยาว 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar)	SD30	≥3000 ksc ≥295 Mpa	≥4900 ksc ≥480 Mpa	≥17 %
	SD40	≥4000 ksc ≥390 Mpa	≥5700 ksc ≥560 Mpa	≥15 %
	SD50	≥5000 ksc ≥490 Mpa	≥6300 ksc ≥620 Mpa	≥13 %

2.2 การเกิดสนิมในเหล็ก

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นขบวนการทางไฟฟ้า-เคมีที่มีองค์ประกอบคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน ความชื้นและออกซิเจน โดยปกติแล้วคอนกรีตจะมีสภาวะความเป็นด่างสูงอันเนื่องมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นซึ่งมีค่า pH ประมาณ 12.5 - 13.5 ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริม ($\gamma - Fe_2O_3$: Gamma ferric oxide) ซึ่งเป็นแผ่นบางๆที่เรียกว่า Passivation Layer โดยที่แผ่นฟิล์มนี้ทำหน้าที่เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดสนิมจากการสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นโดยตรง ซึ่งจะทำให้ช่วยต้านทานการเกิดสนิมได้ดีในระดับหนึ่ง

เหล็กในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขทั้ง 3 ประการนี้ต้องเกิดขึ้น

1.ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงปฏิกิริยาอะโนดิค (Anodic process) สามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิคเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วย สาเหตุดังต่อไปนี คือ คาร์บอเนชั่น (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือ แม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก

2. มีความชื้นเพียงพอที่จะท้าให้ อิออนของเหล็ก (Fe2+) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และพอเพียงที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทาง

Ref. code: 25676510031047AGJ

ช่องว่างที่ ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมากดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลามักจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก

การเกิดสนิมในเหล็กภายในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดจากการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ผ่านตัวนำไฟฟ้าจากขั้วแอโนด (Anode) ไปยัง ขั้วแคโทด (Cathode) และการไหลของอิออนผ่านอิเล็กโตรไลท์เมื่อชั้นฟิล์มของเหล็กเสริมถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า “ปฏิกิริยาอะโนดิค(Anodic Reaction)” เหล็กจะสูญเสียอิเล็กตรอน ดังสมการเคมี

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$

โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมานี้จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ชั้นฟิล์มไม่ได้ถูกทำลายล้าง ซึ่งมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) และทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลอิออน $[OH]^{-}$ เรียกว่า “ปฏิกิริยาคะโทดิค (Cathodic Reaction)” ดังสมการเคมี

$$2e^{-} + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2[OH]^{-}$$

จากสมการเคมี 2 สมการข้างต้น เหล็กไอออนจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลิออนและออกซิเจน เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งก็คือสนิม ดังสมการเคมี

$$4Fe^{2+} + 6[OH]^{-} + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + H_2O$$

2.3 การเกิดสนิมในเหล็กโดยคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลงและหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

โดยแหล่งที่มาของคลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หินทราย (โดยเฉพาะ อย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีต(วสท. 1014-40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความ

Ref. code: 25676510031047AGJ

ทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่ คอนกรีตได้โดยวิธี ดังต่อไปนี้

1. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)
2. การแพร่ของอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต
3. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละออง น้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็ก เสริมน้อยมาก เนื่องจากในบริเวณใต้น้ำทะเล ความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เพราะช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

2.4 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (Strength Design)

การออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย จะใช้น้ำหนักบรรทุกประลัยซึ่งเป็นน้ำหนักที่คาดว่าจะเป็นน้ำหนักที่ทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างและใช้กำลังประลัยของคอนกรีต (f_c') และ เหล็กเสริม (f_y) ในการออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะพิจารณโครงสร้างในสภาวะที่รับแรงซึ่งมากกว่าแรงขณะใช้งาน โดยที่ใกล้เคียงกับกับการวิบัติของโครงสร้าง ดังนั้นจึงออกแบบได้ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากกว่า ในการออกแบบให้ปลอดภัย

2.4.1 น้ำหนักบรรทุกประลัยที่ใช้ออกแบบ

มาตรฐานการออกแบบของอเมริกัน (ACI Code) ก่อนปี 2002 กำหนดน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วย Load Factor แล้วดังนี้

$$U = 1.4D + 1.7L$$

Ref. code: 25676510031047AGJ

U = น้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วย Load Factor แล้ว
D = น้ำหนักหรือผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (ใช้งาน)
L = น้ำหนักหรือผมของน้ำหนักบรรทุกจร (ใช้งาน)

มาตรฐานการออกแบบตามข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร หรือ กฎกระทรวง กำหนดน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วย Load Factor แล้วดังนี้

$$U = 1.7D + 2.0L$$

ผลของน้ำหนักบรรทุก (Load effect) เช่น โมเมนต์ดัดหรือแรงเฉือน ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างตามมาตรฐานการออกแบบแล้วจะถือว่าเป็น กำลังที่ต้องการ (Required Strength) ซึ่งจะต้องออกแบบให้หน้าตัดมีกำลังต้าน (Resistance) ไม่น้อยกว่าค่าดังกล่าว

2.4.2 กำลังต้านทานหรือกำลังที่ออกแบบ

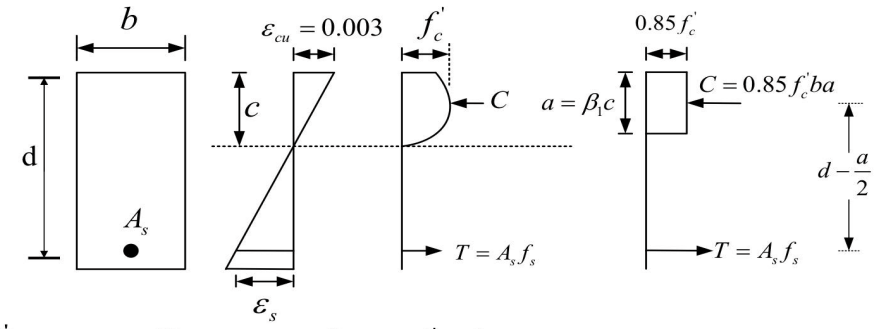
กำลังต้านทานตามมาตรฐาน ACI จะเรียกว่า กำลังที่ออกแบบ (Design Strength) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกำลังต้านแบบ Nominal (Nominal Strength) คูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor หรือ Resistance Factor , ϕ) กำลังต้านทานแบบ Nominal จะคำนวณได้โดยกำหนดให้หน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมถึงค่ากำลังสูงสุดที่วัสดุต้านทานได้

= 0.9 สำหรับโมเมนต์ดัด
= 0.85 สำหรับแรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยว
= 0.75 สำหรับเสาปลอกเกลียว
= 0.7 สำหรับเสาปลอกเดี่ยว

2.5 การวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

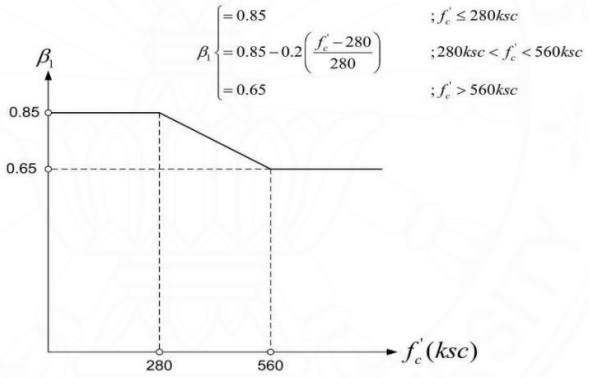
2.5.1 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 2.3 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

เมื่อทราบคุณสมบัติของ คอนกรีต และเหล็กเสริม ทราบขนาดหน้าตัด และปริมาณเหล็กเสริม สามารถคำนวณหาโมเมนต์ดัดที่หน้าตัดได้ที่สภาวะประลัย หรือกำลังต้านโมเมนต์ของหน้าตัด



ภาพที่ 2.4 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

สมการสมดุล

ผลรวมของแรงในแนวราบเท่ากับศูนย์

$$0.85f_c'a = A_s f_s$$

$$a = \frac{A_s f_s}{0.85f_c'b}$$

Ref. code: 25676510031047AGJ

โมเมนต์ดัดประลัยต้านทานโดยวัสดุต้องเท่ากับโมเมนต์กระทำภายนอก
กรณีคิดโมเมนต์ดัดต้านทานจากแรงดึงในเหล็กเสริม

$$M_n = Tjd = A_s f_s (d - \frac{a}{2})$$

กรณีคิดโมเมนต์ดัดต้านทานจากแรงอัดในคอนกรีต

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_s (d - \frac{a}{2})$$

มาตรฐานการออกแบบของอเมริกัน ACI Code ได้คำนึงความแปรผันของกำลังวัสดุจึงกำหนดให้ลดกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานด้วย ตัวคูณลดกำลัง (Resistance factor or Strength reduction factor)

$$\phi = 0.9$$

ดังนั้น ในการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดจะคำนวณได้จากสมการ
กรณีคิดโมเมนต์ดัดต้านทานจากแรงดึงในเหล็กเสริม

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_s (d - \frac{a}{2})$$

กรณีคิดโมเมนต์ดัดต้านทานจากแรงอัดในคอนกรีต

$$M_u = \phi M_n = \phi 0.85 f'_c ba(d - \frac{a}{2})$$

สมการความต่อเนื่อง : ใช้ในการตรวจสอบว่าเหล็กเสริมถึงจุด yield หรือไม่

$$c = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{cu}} d = \frac{0.003}{\varepsilon_s + 0.003} d$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \frac{d}{c} - 0.003$$

Ref. code: 25676510031047AGJ

ที่สภาวะประลัยการวิบัติของหน้าตัดเนื่องจากการดัดเป็นไปได้ 3 กรณี

1. กรณีหน่วยแรงและความเครียดในเหล็กเสริมถึงจุดครากพอดี หน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตถึงสภาวะประลัยพอดี สภาวะดังกล่าวเรียกว่า สภาวะสมดุล (Balanced condition)โมเมนต์ดัดประลัยที่ต้านทานโดยหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะคำนวณได้จากสมการ

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_s (d - \frac{a}{2})$$

$$M_u = \phi M_n = \phi 0.85 f_c' ba (d - \frac{a}{2})$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$$

เมื่อหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมเท่ากับ f_y และหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเท่ากับ f_c'

2. กรณีความเครียดในเหล็กเสริมเกินกว่าจุดครากแต่หน่วยแรงในเหล็กเสริมจะยังคงเป็นหน่วยแรงที่จุดคราก ส่วนหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตถึงสภาวะประลัยพอดี หน้าตัดที่ทำให้เกิดสภาวะดังกล่าวเรียกว่า หน้าตัดเสริมเหล็ก (เมื่อเทียบกับหน้าตัดคอนกรีต) น้อยกว่าสภาวะสมดุล (Under reinforced section) โมเมนต์ดัดประลัยที่ต้านทานโดยหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะคำนวณได้จากสมการ

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_s (d - \frac{a}{2})$$

$$M_u = \phi M_n = \phi 0.85 f_c' ba (d - \frac{a}{2})$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$$

3. กรณีความเครียดในเหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดครากหน่วยแรงในเหล็กเสริมจะน้อยกว่าหน่วยแรงที่จุดคราก ยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นและเป็นไปตามกฎของฮุค ส่วนหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตถึงสภาวะประลัยพอดี หน้าตัดที่ทำให้เกิดสภาวะดังกล่าวเรียกว่า หน้าตัดเสริมเหล็ก(เมื่อเทียบกับหน้าตัดคอนกรีต)มากกว่าสภาวะสมดุล(Over reinforced section) โมเมนต์ดัดประลัยที่ต้านทานโดยหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะคำนวณได้จากสมการ

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_s (d - \frac{a}{2})$$

หรือ

$$M_u = \phi M_n = \phi 0.85 f_c' ba (d - \frac{a}{2})$$

Ref. code: 25676510031047AGJ

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b} = \beta_1 c$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = \left(0.003 \frac{d}{c} - 0.003 \right) E_s$$

แทนค่า f_s และ a = $\beta_1 c$ ในสมการสมดุล

$$0.85 f_c' a = A_s f_s$$

แล้วจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$(0.85\beta_1 f_c' b)c^2 + (0.003 A_s E_s)c - 0.003 d A_s E_s = 0$$

จากนั้นแก้สมการหาค่า c แล้วคำนวณหาหน่วยแรงในเหล็กเสริมจาก

$$f_s = \varepsilon_s E_s = \left(0.003 \frac{d}{c} - 0.003 \right) E_s$$

เมื่อทราบค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมซึ่งมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่จุดครากก็สามารถคำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยที่หน้าตัดต้านทานได้

2.5.2 การออกแบบหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวโดยวิธีกำลังประลัย

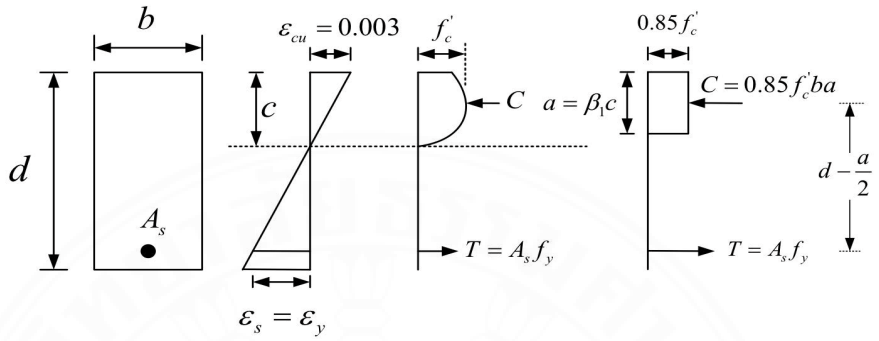
ในการออกแบบจะมีหลักการที่ต่างกันกับวิธีหน่วยแรงใช้งานซึ่งจะออกแบบที่สภาวะสมดุลโดยหน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมจะถึงหน่วยแรงที่ยอมให้พอดี ส่วนวิธีกำลังประลัยจะออกแบบให้เป็นหน้าตัดเสริมเหล็ก น้อยกว่าสภาวะสมดุล (Under reinforced section) ขณะเกิดการวิบัติของหน้าตัดเนื่องจากโมเมนต์ดัด ความเครียดในคอนกรีตจะถึงสภาวะประลัย ($\varepsilon_{cu} = 0.003$) ส่วนความเครียดในเหล็กเสริมจะมากกว่าที่จุดคราก $\varepsilon_s > \varepsilon_y$ แต่หน่วยแรงในเหล็กเสริมจะยังคงเป็นหน่วยแรงที่จุดคราก $f_s > f_y$ เนื่องจากการสมมุติให้เหล็กไม่เกิด Strain hardening แต่เกิดการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow)

เพื่อให้มั่นใจว่าเหล็กเสริมจะถึงจุดครากขณะเกิดการวิบัติซึ่งจะเป็นการวิบัติแบบเหนียว (Ductile failure) และ มีการเตือนมาตรฐานการออกแบบของอเมริกัน (ACI) กำหนดให้

Ref. code: 25676510031047AGJ

ควบคุมปริมาณเหล็กเสริมโดยกำหนดให้ $\rho = \frac{A_s}{bd}$ ต้องไม่เกินกว่า 75% ของ ρ ที่สภาวะสมดุล $\rho < 0.75\rho_b$

ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล



ภาพที่ 2.5 การออกแบบหน้าตัดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวโดยวิธีกำลังประลัย

ที่สภาวะสมดุลความเครียดในเหล็กเสริมจะถึงจุดคราก และความเครียดในคอนกรีตจะถึงจุดประลัยพอดี สภาวะดังกล่าวไม่มีการเตือนและเป็นการวิบัติแบบเปราะ (Brittle failure)

สมการสมดุล

$$0.85 f_c' ab = A_s f_y$$
$$0.85 f_c' \beta_1 cb = A_s f_y$$

สมการความต่อเนื่อง (Compatibility)

$$c = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{cu}} d = \frac{0.003}{\varepsilon_s + 0.003} d$$

แทนลงในสมการสมดุลจะหาเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมที่สภาวะสมดุลได้

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \left(\frac{0.003}{0.003 + \varepsilon_y} \right)$$

Ref. code: 25676510031047AGJ

เมื่อ $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ ถ้าแทนค่า $E_s = 2.04(10)^6$ ksc

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_y}\left(\frac{6117}{6117+f_y}\right)$$

$$\frac{14}{f_y} \le \rho \le 0.75\rho_b$$

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_y (d - \frac{a}{2})$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$$

แทนค่า a ลงในสมการ M_u แล้วจัดเทอมจะได้ว่า

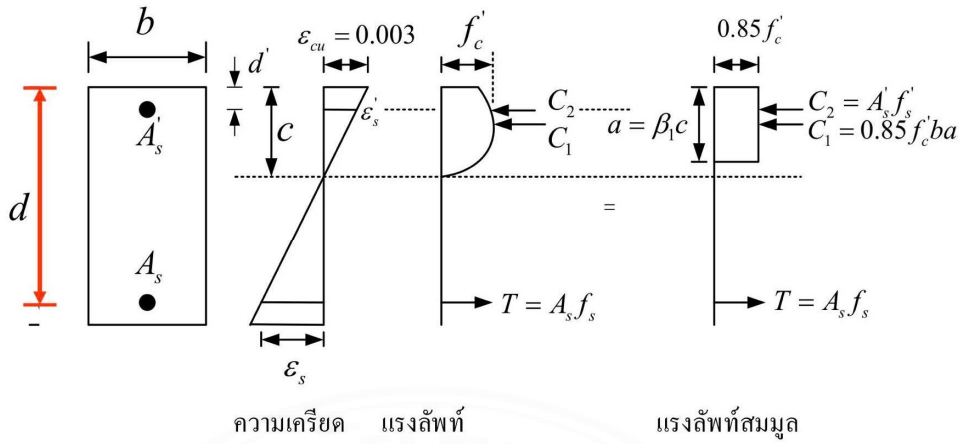
$$\frac{M_u}{\phi f_c' b d^2} = q(1-0.59q)$$

$q = \rho\frac{f_y}{f_c'}$ = Reinforcing Index

$\rho = \frac{A_s}{bd}$ = Steel percentage

ในการออกแบบอาจกำหนด $\rho = \frac{A_s}{bd}$ โดยต้องอยู่ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมต่ำที่สุด และสูงสุดที่อนุญาตโดยมาตรฐานการออกแบบ $\frac{14}{f_y} \le \rho \le 0.75\rho_b$ เมื่อ $\frac{14}{f_y}$ เป็นเปอร์เซนต์เหล็กเสริมต่ำสุดที่อนุญาตให้ใช้แทนค่าโมเมนต์ดัดที่คูณด้วย Load factor แล้ว (Factored moment) ที่ต้องการออกแบบลงในสมการ $\frac{M_u}{\phi f_c' b d^2} = q(1-0.59q)$ สมมุติ b เพื่อหา d ซึ่งเป็นความลึกประสิทธิผลต่ำสุดของหน้าตัดที่ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงอัด จากนั้นหาปริมาณเหล็กเสริมได้จาก $A_s = \rho bd$

2.5.3 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด



ภาพที่ 2.6 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ถ้า $\frac{A_{s1}}{bd} \leq \rho_b$ หน้าตัดจะเป็นแบบเสริมเหล็กน้อยกว่าสภาวะสมดุล (Under reinforced section) โมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัยจะคำนวณได้จาก

$$M_n = \phi A_{s1} f_y (d - \frac{a}{2}) + A_{s2} f_y (d - d')$$

$$M_u = \phi M_n$$

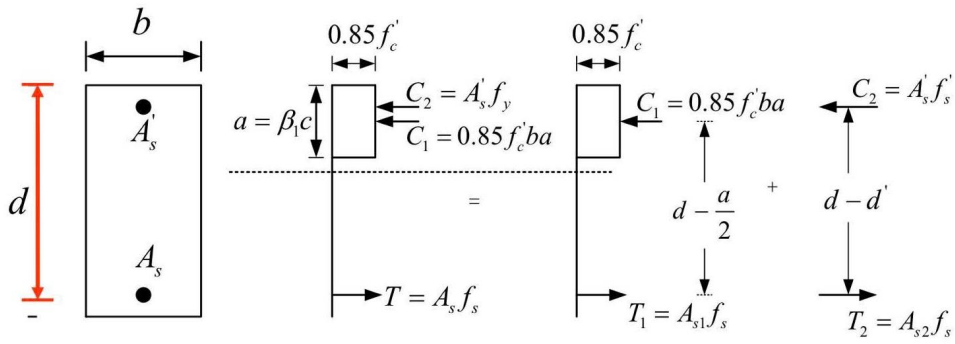
ถ้า $\frac{A_{s1}}{bd} > \rho_b$ หน้าตัดจะเป็นแบบเสริมเหล็กมากกว่าสภาวะสมดุล (Over reinforced section) จะต้องคำนวณหาหน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึง fs ซึ่งน้อยกว่าจุดคราก โมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัยจะคำนวณได้จาก

$$M_n = \phi A_{s1} f_s (d - \frac{a}{2}) + A_{s2} f_s (d - d')$$

$$M_u = \phi M_n$$

2.5.4 การออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 2.7 การออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

$$A_{s2}=A_s-A_{s1}=A'_s$$

$$A_{s1}=A_s-A_{s2}=A_s-A'_s$$

$$T=T_1+T_2 \qquad T_1=A_{s1}f_s \qquad T_2=A_{s2}f_s$$

ในกรณีที่ถูกบังคับขนาดหน้าตัดของคานและได้มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงเท่ากับ $0.75\rho_b$ แล้วก็ยังรับโมเมนต์ดัดประลัย M_1 ได้น้อยกว่าทีหน้าตัดจะต้องรับ M_u จะต้องเสริมเหล็กรับแรงอัดและเหล็กรับแรงดึงเพื่อเพิ่มเพื่อต้านทานโมเมนต์ส่วนที่เกินกว่าหน้าตัดจะรับได้

$$M_2=M_u-M_1$$

$$M_1=\phi f_c'q(1-0.59q)bd^2$$

$$q=\rho\frac{f_y}{f_c'} \qquad \rho=0.75\rho_b \qquad A_{s1}=\rho bd$$

$$M_2=M_u=M_1$$

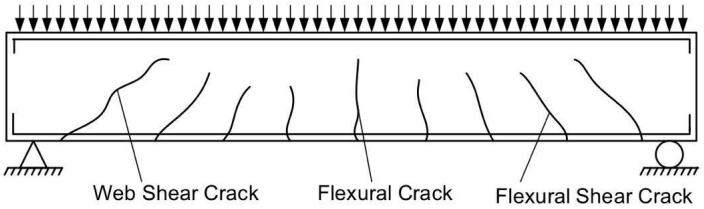
$$A_s'=A_{s2}=\frac{M_2}{f_y(d-d')}$$

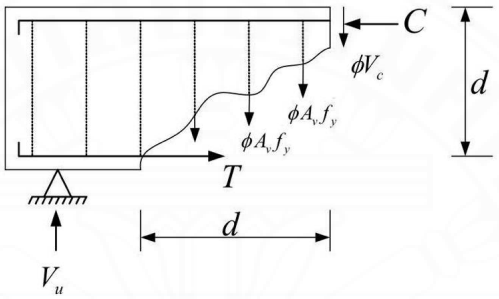
$$A_s=A_{s1}+A_{s2}$$

ในกรณีที่ต้องการให้หน้าตัดเหนียว(Ductility)มากขึ้นอาจใช้ปริมาณเหล็กเสริมส่วนที่ 1 $\rho=\frac{A_{s1}}{bd}$ น้อยกว่า $0.75\rho_b$ แต่ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด $\rho_{\min}=\frac{14}{f_y}$ แล้วคำนวนหาโมเมนต์ M_1 M_2 A_{s1} และ A_{s2} ได้โดยขั้นตอนเดียวกัน

2.6 การออกแบบเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือนและแรงยึดหน่วง

2.6.1 กำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะประลัย





ภาพที่ 2.8 กำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะประลัย

หน่วยแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤติ

$$v_u = \frac{V_u}{bd}$$

V_u = แรงเฉือนที่สภาวะประลัย

กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = v_c bd = \phi 0.53\sqrt{f_c'}\,bd$$

v_c = กำลังต้านทานหน่วยแรงเฉือน

ในกรณีที่แรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดน้อยกว่าที่ต้านทานได้โดยคอนกรีตก็ไม่ จำเป็นต้องเสริมเหล็กปลอก แต่มาตรฐานต้องให้เสริมด้วยปริมาณเหล็กเสริมต่ำที่สุดโดยระยะเรียงไม่เกินกว่า d/2

Ref. code: 25676510031047AGJ

แต่ในกรณีที่ V_u มากกว่า V_c จะต้องเสริมเหล็กปลอก ซึ่งคำนวณได้ด้วยหลักการแบบจำลองโครงข้อหมุน (Truss Model) แรงเฉือนทั้งหมดจะต้านทานด้วยคอนกรีตส่วนรับแรงอัด เหล็กปลอก Aggregate interlocking และเหล็กเสริมตามยาว (Dowel action) อาจสมมติให้แรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นต้านทานด้วยคอนกรีตและเหล็กปลอกเท่านั้น เพื่อ ความง่าย สะดวกต่อการออกแบบและเป็นการสมมติเชิงปลอดภัย(Conservation) โดยมีสมการดังนี้

$$V_u = V_s + V_c$$

$$V_s = \phi \frac{d}{s} A_v f_y$$

V_s = กำลังต้านแรงเฉือนโดยเหล็กปลอก

การเลือกขนาดเหล็กปลอกทำให้สามารถคำนวณระยะเรียงได้จากสมการ

$$s = \frac{\phi A_v f_y d}{V_u - V_c}$$

โดยระยะเรียงไม่เกินกว่า $\frac{d}{2}$ และมี A_v ไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด

2.6.2 แรงยึดหน่วงประลัย (Ultimate bond stress)

$$u = \frac{V_u}{\phi(\sum 0)\, jd}$$

$$jd = 0.875d - 0.9d$$

u = แรงยึดหน่วงประลัย

$\sum 0$ = เส้นรอบรูปของเหล็กที่ใช้ในการรับแรงยึดหน่วง

กำลังรับหน่วยแรงยึดหน่วง (u_{allow})

เหล็กข้ออ้อย

เหล็กบน $\frac{0.451\sqrt{f_c'}}{D}$ หรือไม่เกินกว่า 39.4 ksc

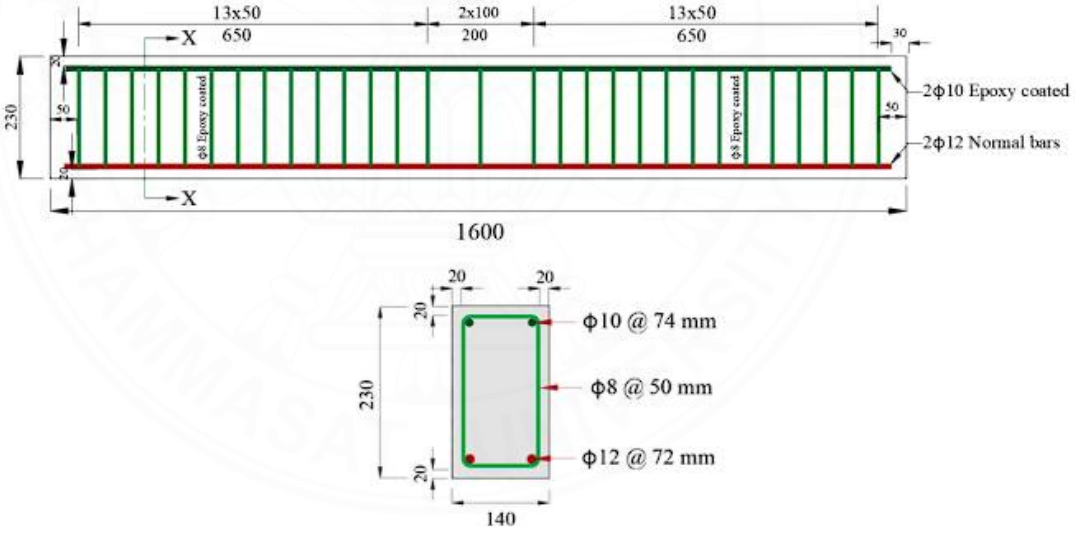
Ref. code: 25676510031047AGJ

เหล็กอื่นที่ไม่ใช่เหล็กบน $\frac{6.39\sqrt{f_c'}}{D}$ หรือไม่เกินกว่า 50.2 ksc

เหล็กกลม ใช้ครึ่งเดียวของกำลังรับแรงยึดหน่วงของเหล็กข้ออ้อย

2.7 การทดลองผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมต่อการรับแรงดัด

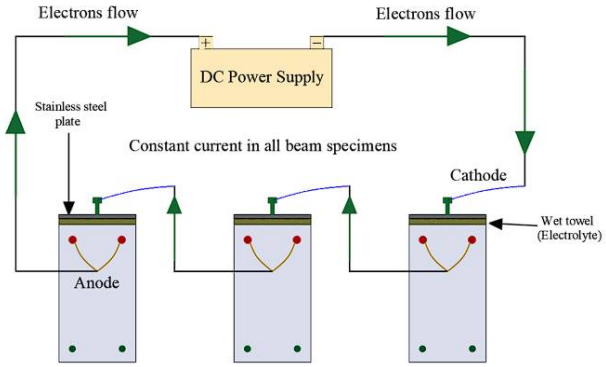
Shamsad Ahmad และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมโดยในการทดสอบใช้คานทั้งหมด 4 คาน ขนาดความกว้าง 140 มิลลิเมตร ความลึก 230 มิลลิเมตร ความยาว 1600 มิลลิเมตร โดยมีระยะหุ้มคอนกรีต 20 มิลลิเมตร เหล็กเสริมด้านล่างเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 12มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้น เหล็กเสริมด้านบนเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้น และเหล็กปลอกขนาด 8 มิลลิเมตร ระยะเรียง 50 มิลลิเมตร ที่เหล็กปลอกและเหล็กด้านบนถูกเคลือบด้วย อีพ็อกซี่เพื่อต้านทานกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการทดสอบหนึ่งคานจะไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นคานควบคุม(U)และอีกสามคานซึ่งเป็นคาน A B และ Cจะมีการให้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนเกิดสนิมที่ระดับเป้าหมาย 10% 20%และ30%ตามลำดับ



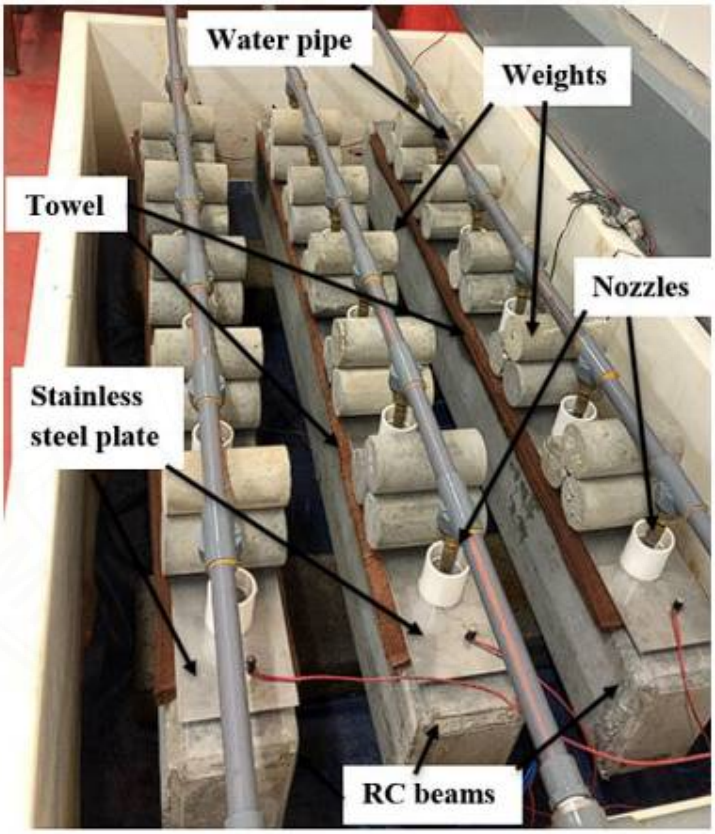
ภาพที่ 2.9 รายละเอียดของคาน (Shamsad Ahmad,2022)

คานคอนกรีตมีการวางกลับหัวให้ด้านเหล็กเสริมที่ไม่ได้ปกคลุมด้วยอีพ็อกซี่อยู่ด้านบน โดยเหล็กเสริมที่ไม่ได้ปกคลุมด้วยอีพ็อกซี่จะทำหน้าที่เป็นแอโนด และ แผ่นสแตนเลสจะทำหน้าที่เป็นแคโทด มีการปล่อยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่าน Water Pipe ทุกๆ 3 ชั่วโมง และปล่อยกระแสไฟฟ้าความหนาแน่นสม่ำเสมอ 200 μA/cm2

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 2.10 การเชื่อมต่อวงจรกับคานคอนกรีต (Shamsad Ahmad, 2022)



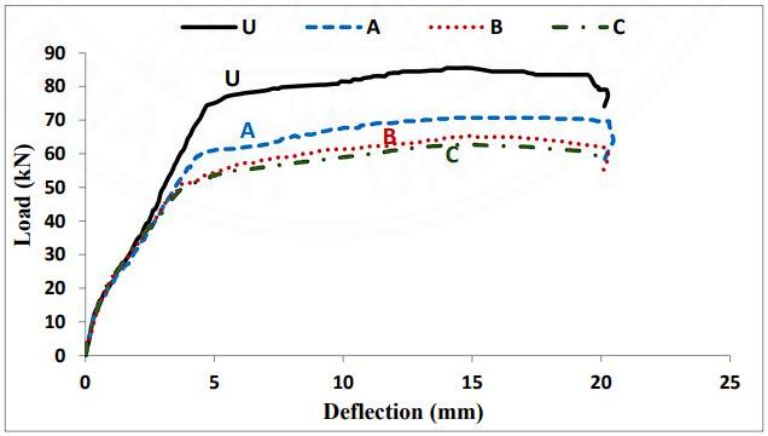
ภาพที่ 2.11 การเชื่อมต่อวงจรกับคานคอนกรีต (Shamsad Ahmad, 2022)

Ref. code: 25676510031047AGJ

จากผลการทดสอบคาน A รอยแตกร้าวสูงสุดและเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2 มิลลิเมตร. และกว้าง 0.8 มิลลิเมตร คานBรอยแตกร้าวสูงสุดและเฉลี่ยอยู่ที่ 2.1 มิลลิเมตร. และ 1.2 มิลลิเมตร. คาน C รอยแตกร้าวสูงสุดและเฉลี่ยอยู่ที่ 2.9 มิลลิเมตร. และ 1.5 มิลลิเมตร. โดยความกว้างของรอยแตกที่วัดได้ของคานที่เกิดสนิม เป็นไปตามเกณฑ์ ACI 318-14 [66] ซึ่งจำกัดความกว้างสูงสุดของรอยแตกไว้ที่ 0.40 มิลลิเมตร

คานทั้งหมด 4 คานพังด้วยแรงดัดและเริ่มเกิดรอยร้าวจากแรงดัดที่แรงกระทำ 19.5, 17.4, 16.4, และ 16.1 กิโลนิวตัน ตามลำดับ (U, A, B, และ C)

ภาพที่ 2.12 ลักษณะรอยร้าวของคาน U, A, B, และ C (Shamsad Ahmad, 2022)



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัว (Shamsad Ahmad, 2022)

Beam ID	Actual Mass Loss	Average Crack Width	At Cracking		At Steel Yielding		At Ultimate Load	
	%	C_{avg} (mm)	P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_{ult} (kN)	δ_{ult} (mm)
U	0	0	19.5	0.83	75.1	5.5	85.5	14
A	9.8	0.8	17.4	0.72	59.3	4.7	70.7	14.3
B	17.4	1.2	16.4	0.61	48.2	4.1	65.4	14.9
C	20.8	1.5	16.1	0.56	46.5	3.8	62.8	15

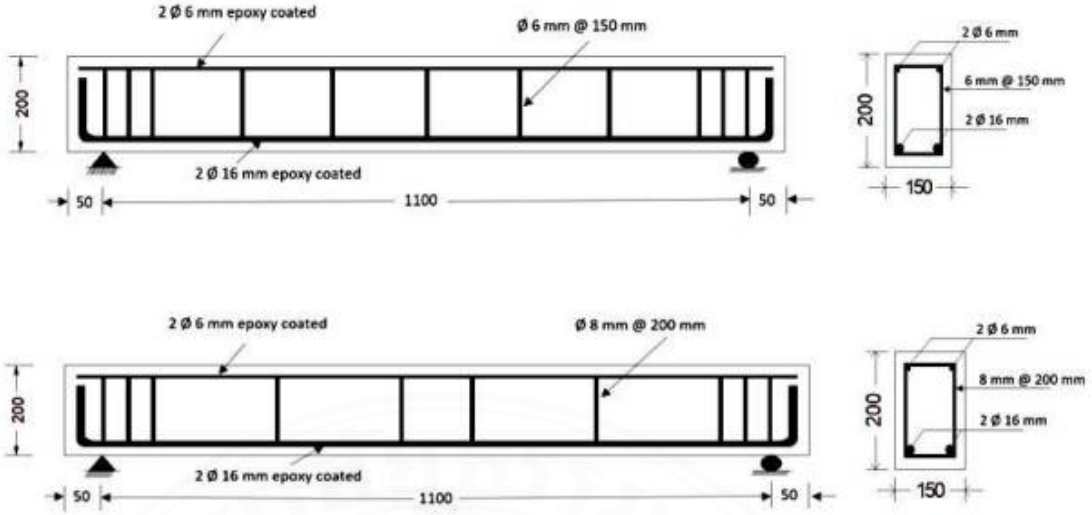
ภาพที่ 2.14 ตารางผลการทดสอบ (Shamsad Ahmad, 2022)

2.8 การทดลองผลของเหล็กปลอกที่เป็นสนิมต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

R H Shehab และคณะ(2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของเหล็กปลอกที่เป็นสนิมต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคานได้รับการทดสอบถึงความล้มเหลวในการรับแรงเฉือนภายใต้แรงกดสี่จุด ขนาดคานยาว 1200 มม. ลึก 200 มม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 150 มม. เหล็กเส้นเสริมแรงดึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 2 เส้น และเหล็กบนเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. จำนวน 2 เส้น เหล็กเสริมทั้งด้านบนและล่างเคลือบด้วยอีพ็อกซี่เพื่อป้องกันเหล็กเส้นจากการผุกร่อน เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกถูกนำมาเป็นตัวแปร โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอกข้ออ้อย 6 มม. และ 8 มม. กำหนดอัตราการเป็นสนิมสำหรับเหล็กปลอกเป็นร้อยละ 0 5และ10 ตามลำดับโดยเทียบจากน้ำหนักที่หายไปของเหล็กปลอกหลังเกิดสนิม

Group	Specimen	*Diameter*	*corrosion level*
A	D6M0	6mm	0
	D6M5		5%
	D6M10		10%
	D6M16		15%
B	D8M0	8mm	0
	D8M5		5%
	D8M10		10%
	D8M15		15%

ภาพที่ 2.15 รายละเอียดของคานทดสอบ (R H Shehab และคณะ,2020)



ภาพที่ 2.16 รายละเอียดของคานทดสอบ (R H Shehab และคณะ, 2020)

จากผลการทดสอบ คานที่กำหนดระดับการเกิดสนิมร้อยละ 5 มีการรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงกับคานทดสอบ ส่วนคานที่กำหนดระดับการเกิดสนิมร้อยละ 10 และ 15 ในกลุ่ม A (เหล็กปลอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร) มีอัตราลดลงของการรับแรงเฉือนอยู่ที่ร้อยละ 7 ถึง 14 คานที่กำหนดระดับการเกิดสนิมร้อยละ 10 และ 15 ในกลุ่ม B (เหล็กปลอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร) มีอัตราลดลงของการรับแรงเฉือนอยู่ที่ร้อยละ 2 ถึง 6

Specimens	Compressive strength (Mpa)	Load at first flexure crack (KN)	Load at first shear crack (KN)	Ultimate Measured load (kN)	Mid- span deflection at first shear crack (mm)	Mid-span deflection at failure (mm)	δu/δv	Failure Modes
	f´c	Fcr	Vcr	V	δv	δu		
D6M0	38.8	40	60	121.19	2.17	6.28	2.894	SC [a]
D6M5	40	55	65	112.21	2.67	5.83	2.184	SC [a]
D6M10	37.74	50	65	109.23	2.74	5.97	2.179	DS [b]
D6M15	36.84	45	75	104.41	3.27	5.5	1.682	SR[c]
D8M0	38.75	50	80	137.28	2.64	6.49	2.458	SC [a]
D8M5	42	55	95	142.43	3.75	7.21	1.923	SC [a]
D8M10	38.86	50	100	135.1	4.15	7.01	1.689	DS [c] + CC[d]
D8M15	36.64	45	110	129.14	5.1	6.92	1.357	DS [c]

[a] Shear compression,
[b] Diagonal splitting,
[c] Stirrups Rupture,
[d] Crashing concrete

ภาพที่ 2.17 ผลการทดสอบคาน (R H Shehab และคณะ, 2020)

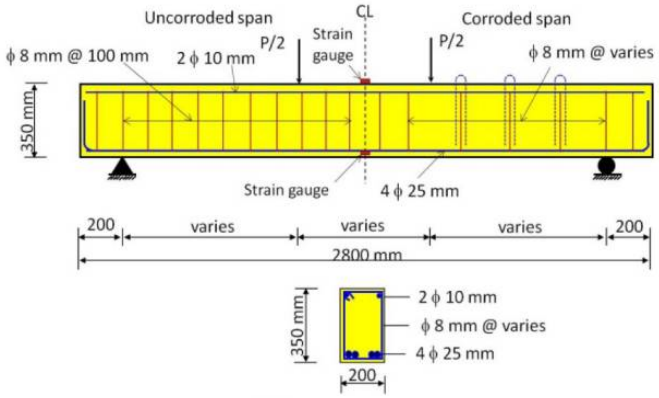
2.9 ผลของการกัดกร่อนในเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสั้น

Ahmed K. EL-SAYED และ คณะ ได้ทำการทดสอบ ประกอบด้วยการทดสอบแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 14 คาน โดยมีคาน 9 คาน ที่ถูกเร่งให้เกิดการกัดกร่อน และคานอีก 5 คาน ที่ไม่ถูกกัดกร่อนเพื่อใช้เป็นคานควบคุม คานทุกตัวได้รับการเสริมเหล็กตามแนวยาวเพื่อให้สามารถเกิดการวิบัติในลักษณะแรงเฉือนได้ก่อนที่จะถึงกำลังดัด (flexural capacities) ของคาน โดยคานทดสอบมีความกว้าง 200 มม. ลึก 350 มม. และยาว 2800 มม. แต่ละคานมีการเสริมเหล็กตามแนวยาวด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. จำนวน 4 เส้น และเหล็กด้านบนขนาด 10 มม. จำนวน 2 เส้น โดยเหล็กปลอกที่ใช้เสริมแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. และมีระยะหุ้มคอนกรีตด้านข้าง 20 มม.

Beam	Shear span to depth ratio, a/d	Stirrup spacing (mm)	Target mass loss (%)
0-200-2	2	200	0
10-200-2			10
30-200-2			30
0-150-2		150	0
10-150-2			10
30-150-2			30
0-100-2		100	0
30-100-2			30
0-150-1	1	150	0
10-150-1			10
30-150-1			30
0-100-1		100	0
10-100-1			10
30-100-1			30

ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างคานทดสอบ(Ahmed K. EL-SAYED และ คณะ)

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 2.19 รายละเอียดและหน้าตัดตัวอย่างคานทดสอบ (Ahmed K. EL-SAYED และคณะ)

หลังการบ่มคอนกรีต ชิ้นงานทดสอบถูกเร่งให้เกิดการกัดกร่อนโดยใช้กระแสไฟฟ้าตรง (DC) ต่อเข้าสู่คาน โดยเหล็กปลอกจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและเหล็กสเตนเลสขนาด 10 มม. ซึ่งฝังอยู่ในคอนกรีตเป็นขั้วลบ กระแสไฟฟ้าถูกควบคุมให้มีความหนาแน่นกระแสที่ 0.4 mA/cm² เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนในระดับที่ต้องการ

ภาพที่ 2.20 กระบวนการเร่งการกัดกร่อน(Ahmed K. EL-SAYED และ คณะ)

หลังจากกระบวนการกัดกร่อนเร่งเสร็จสิ้น คานทดสอบจะถูกทดสอบจนกระทั่งเกิดการวิบัติ โดยใช้การวางน้ำหนักแบบสี่จุด (four-point bending) พร้อมวัดการแอ่นตัวตรงกลางของคาน และบันทึกการเกิดรอยร้าว

Ref. code: 25676510031047AGJ

Beam	Concrete strengt, MPa	Measured load (kN)		Ultimate strength reduction (%)	Mid-span deflection at failure (mm)	Mid-span strain (με)		Max. stirrup strain (με)	Average mass loss (%)	Failure mode*
		Diagonal cracking	Ultimate			Long. bars	concrete			
0-200-2	38	189	572	–	8.9	1777	–1590	3036	–	SC
10-200-2		230	529	8	9.5	1685	–1175	–	16.5	SR
30-200-2		280	535	6	10.8	1757	–1413	–	22.2	SR
0-150-2		191	610	–	10.7	1882	–1475	3411	–	SC
10-150-2		260	547	10	8.5	1710	–1245	–	12.3	SR
30-150-2		285	526	14	11.5	1645	–1228	–	21.5	SR
0-100-2		202	640	–	10.1	1956	–1477	3829	–	SC
30-100-2		277	512	20	9.2	1602	–1297	–	23.6	SC
0-150-1	29.4	233	1040	–	9.0	1446	–1356	2960	–	SC
10-150-1		310	916	12	8.2	1318	–1208	–	15.8	SR
30-150-1		356	845	19	8.2	1006	–1125	–	20.3	SR
0-100-1		287	1105	–	10.4	–+	–1372	2875	–	DC
10-100-1		394	892	19	7.8	1162	–1227	–	17.8	DC
30-100-1		421	841	24	8.4	1050	–1089	–	24.0	DC

ภาพที่ 2.21 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง (Ahmed K. EL-SAYED และคณะ)

Ref. code: 25676510031047AGJ

บทที่ 3
วิธีการวิจัย

3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

-ระยะเวลาในการเร่งปฏิกริยาสนิม
-สารละลายที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทั้ง 8 คาน เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ(Ready Mixed Concrete) ที่มีค่ากำลังอัด 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีการทดสอบส่วนผสมด้วยมาตรฐาน ASTM C494,ASTM C33,ASTM C150 และมีการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)

3.2.2 เหล็กเสริมคอนกรีตและเหล็กปลอก

เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มาตรฐานกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มาตรฐานกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริมและเหล็กปลอก

คุณสมบัติทางกล	เหล็ก DB12 SD40	เหล็ก RB6 SR24
Yield Strength (ksc)	4,000	2,400
Tensile Strength(ksc)	5,700	3,900
Elongation	15	21

Ref. code: 25676510031047AGJ

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1 มัลติมิเตอร์ ที่อ่านค่าความละเอียดได้ระดับ 0.01 mV

ภาพที่ 3.1 มัลติมิเตอร์

3.3.2 เครื่องมือทดสอบ Half-Cell Potential

ภาพที่ 3.2 Half-Cell Potential

3.3.3 Power Supply

แปลงจากไฟกระแสสลับ 220โวลต์ เป็นไฟกระแสตรง 4.5โวลต์ ถึง 12โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

ภาพที่ 3.3 Power Supply

3.3.4 สายไฟและตัวต้านทาน

สายไฟฟ้าตัวนำทองแดง ขนาดหน้าตัด 1×1.5 ตารางมิลลิเมตร ทนความร้อนสูงสุด 70 องศาเซลเซียส และรองรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 450/750 โวลต์

ภาพที่ 3.4 สายไฟฟ้าตัวนำทองแดง

ตัวต้านทาน 2.2 กิโลโอห์ม 1 วัตต์ ชนิด 5%

ภาพที่ 3.5 ตัวต้านทาน

Ref. code: 25676510031047AGJ

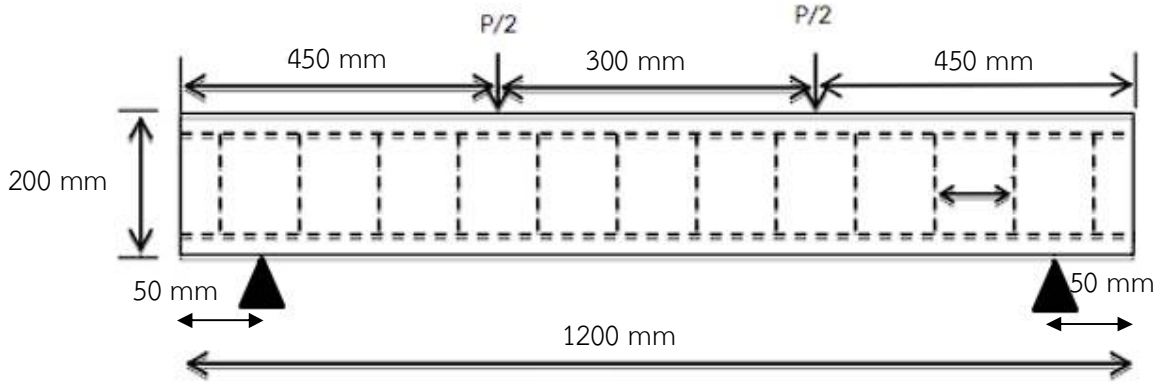
3.4 การออกแบบตัวอย่าง

ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ มีตัวอย่างทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่1 โดยศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือน และลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเกิดสนิมด้วยการเร่งปฏิกิริยาสนิมในสภาวะที่ต่างกัน 4 สภาวะ ได้แก่ น้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สายละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในระยะเวลา 30 และ 60 วัน ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความลึก 200 มิลลิเมตร และความยาว 1200 มิลลิเมตร โดยมีความยาวระหว่างจุดรองรับทั้งสองด้านคือ 1100 มิลลิเมตร ระยะหุ้มของตัวอย่างคาน 25 มิลลิเมตร มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงบริเวณท้องคานด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้น เสริมเหล็กรับแรงอัดบริเวณส่วนบนของคานด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้นและเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือน ด้วยเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยมีระยะเรียงอยู่ที่ 125 มิลลิเมตรโดยมีการคำนวณรายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังนี้

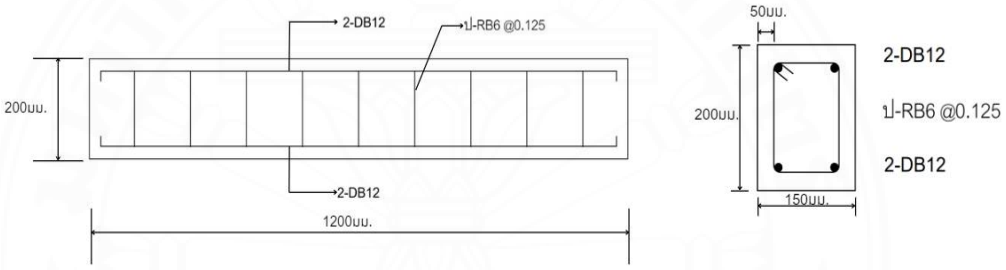
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างคานคอนกรีต

คาน ตัวอย่าง	เหล็ก เสริม	Grade	เหล็กปลอก	b(cm)	d(cm)	สภาวะการเกิด สนิม	Time (วัน)
BC	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	-	0
B30W	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	น้ำ	30
B60W	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	น้ำ	60
B30N	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	โซเดียมคลอไรด์	30
B60N	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	โซเดียมคลอไรด์	60
B30C	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	แคลเซียมไฮดรอกไซด์	30
B30M	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	แมกนีเซียมซัลเฟต	30
B60M	2DB12	SD40	RB6@0.125	15	20	แมกนีเซียมซัลเฟต	60

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของคานคอนกรีตตัวอย่าง



ภาพที่ 3.7 ภาพตัวอย่างคานและหน้าตัดคาน

3.5 การเร่งปฏิกิริยาสนิม

การเร่งกระบวนการกัดกร่อนใช้วิธีกัลป์วาโนสแตติก โดยเป็นการเร่งกระบวนการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมโดยเทียม วิธีการเร่งการกัดกร่อนแบบกัลป์วาโนสแตติกถูกใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยในการทดสอบได้ทำการเตรียมบ่อสำหรับนำคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง ลงไปแช่ในสารละลาย โดยใช้สารละลายเป็นน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 4% เทียบกับน้ำหนักของน้ำ และใช้ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำการเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วย เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า (DC Powersupply) ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 5 แอมป์ ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ต่อสายไฟโดยให้เหล็กปลอกเป็นแอโนด(ขั้วบวก)และให้เหล็กที่จุ่มสารละลายเพื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าเคมีเป็นแอโนด (ขั้วลบ) ใช้อุปกรณ์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อนำค่าความต่างศักย์ที่ได้ไป

Ref. code: 25676510031047AGJ

จดบันทึกในแต่ละวันโดยทำการวัดวันละสองรอบ ในการเร่งปฏิกิริยาสนิมจะกระทำต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 และ 60 วัน

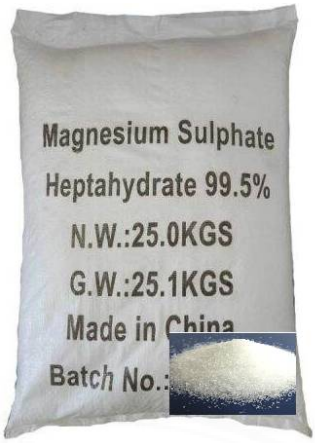
3.5.1 สารละลายที่นำมาเป็นตัวกลางทางไฟฟ้าในการทดสอบ

(1) โซเดียมคลอไรด์ (อังกฤษ: Sodium chloride, สูตรเคมี: NaCl) มีชื่อที่เรียกทั่วไป คือเกลือแกง หรือฮาไลต์ เป็นสารประกอบเคมี โซเดียมคลอไรด์เป็นเกลือที่มีบทบาทต่อความเค็มของมหาสมุทร และของเหลวภายนอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ เป็นส่วนประกอบหลักในเกลือที่กินได้ มันถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเป็นเครื่องปรุงรส และใช้ในการถนอมอาหาร โดยในการทดสอบใช้ความเข้มข้นของสารละลายคือ 4%เทียบกับน้ำหนักของน้ำ

ภาพที่ 3.8 โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง)

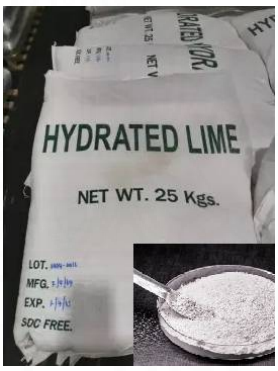
(2) แมกนีเซียมซัลเฟต (อังกฤษ: magnesium sulfate) เป็นสารประกอบเคมีของแมกนีเซียม มีสูตรเคมีคือ MgSO4 มักอยู่ในรูปของเฮปต้า ไฮเดรต เริ่มแรกโดยการเคี่ยวน้ำแร่ (mineral water) จนงวดและแห้งที่เมืองยิปซัม (Epsom) ประเทศอังกฤษ และต่อมาภายหลังเตรียมได้จากน้ำทะเลและพบในแร่หลายชนิด โดยในการทดสอบใช้ความเข้มข้นของสารละลายคือ 4%เทียบกับน้ำหนักของน้ำ

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 3.9 แมกนีเซียมซัลเฟต

(3) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (อังกฤษ: calcium hydroxide) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรเคมี คือ Ca(OH)2 ลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีหรือผงสีขาว ได้จากการเจือจางแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ สารละลายอิ่มตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ รู้จักในชื่อน้ำปูนใส โดยในการทดสอบใช้ความเข้มข้นของสารละลาย คือ 4% เทียบกับน้ำหนักของน้ำ



ภาพที่ 3.10 แคลเซียมไฮดรอกไซด์

(4) น้ำ องค์ประกอบทางเคมีของน้ำประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน (H) 2 อะตอม และออกซิเจน (O) 1 อะตอม รวมกันเป็นน้ำ (H2O) 1 โมเลกุล น้ำบริสุทธิ์ ใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่เหนี่ยวนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของน้ำแสดงถึง การเจือปนของสารละลายในน้ำ การเหนี่ยวนำไฟฟ้าของน้ำมีหน่วยวัดเป็น ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (mS/cm) น้ำสะอาดมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ

Ref. code: 25676510031047AGJ

5 – 30 mS/cm แต่น้ำที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น น้ำที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่านี้

ภาพที่ 3.11 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม

3.6 ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กปลอกด้วยวิธี Half-Cell Potential ตามมาตรฐาน ASTM C876-99

วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเหล็กปลอกและผิวของคอนกรีตทุก 1 วัน เพื่อที่จะได้ทำการประเมิณการกัดกร่อนและโอกาสในการเกิดสนิมของเหล็กปลอก ดังที่แสดงในตารางที่ 3.3

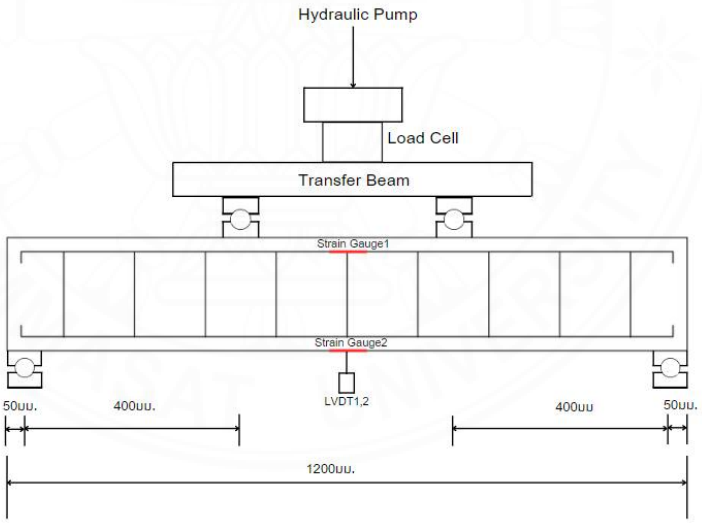
ภาพที่ 3.12 กระบวนการทดสอบ Half-Cell Potential

ตารางที่ 3.3 มาตรฐาน ASTM C876-99

ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	เงื่อนไขการเกิดสนิม
มากกว่า -0.12V	มีโอกาสร้อยละ 10 ที่เหล็กจะเกิดสนิม
-0.12V ถึง -0.276V	มีความเสี่ยงในการเกิดสนิมระดับปานกลาง
น้อยกว่า -0.276V	มีโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กจะเกิดสนิม
น้อยกว่า -0.426V	เกิดสนิมในระดับรุนแรง

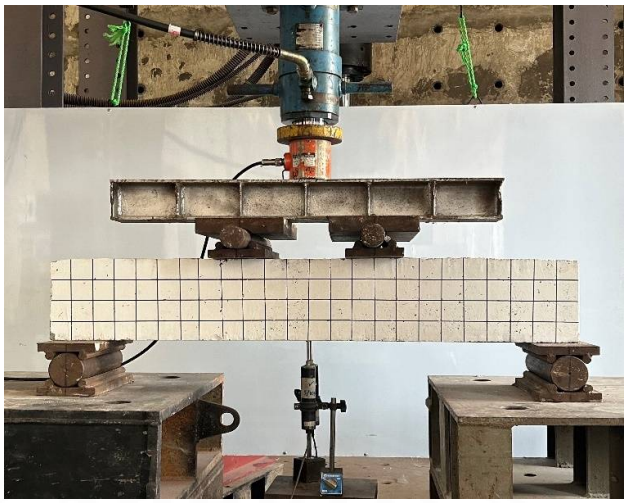
3.7 การติดตั้งเครื่องมือวัด

3.7.1 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบสี่ตำแหน่ง (Four-point test) ความยาวคานในช่วงทดสอบคือ 1100 มิลลิเมตร โดยติดตั้งเครื่องมือวัดค่าความแอ่นตัวของคานคอนกรีต (Linear Variable Differrential Tranformer, LVDT) สองตำแหน่งที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่าง การทดสอบแรงเฉือนสี่ตำแหน่งมีลักษณะการให้แรงกระทำต่อเนื่อง โดยมีการกำหนดอัตราแรงกระทำเป็นอัตราการแอ่นตัว 0.5 มิลลิเมตร/1นาที ไปจนถึงจุดวิบัติ



ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนการจัดเตรียมการทดสอบ

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการจัดเตรียมการทดสอบ

3.8 วิธีการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง
2. วางแผนการทำงานและจัดขั้นตอนการทำงาน
3. ตัด และ เตรียมเหล็ก ตามขนาดที่ออกแบบไว้ เพื่อหล่อคานคอนกรีตตัวอย่าง

ภาพที่ 3.15 การเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีตตัวอย่าง

4. หล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามตัวอย่างที่ออกแบบ โดยใช้คอนกรีตที่มีค่า Strength ที่ต้องการ (240 ksc)

Ref. code: 25676510031047AGJ

ภาพที่ 3.16 การหล่อคานคอนกรีตตัวอย่าง

5. ทำการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมบริเวณเหล็กปลอกของคานตัวอย่างทั้งหมด

ภาพที่ 3.17 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมที่เหล็กปลอกของคานตัวอย่าง

6. นำคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในแต่ละตัวอย่างไปทำการทดสอบ โดยให้น้ำหนักผ่านทรานสเฟอร์บีมด้วยอัตราการแอ่นตัว 0.5 มิลลิเมตร/1นาที ใช้ทรานดิวเซอร์ดิชเพลสเมนต์และ Strain Gauge ในการวัดและอ่านค่า

Ref. code: 25676510031047AGJ

ภาพที่ 3.18 การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงดัดแบบสี่ตำแหน่ง

Ref. code: 25676510031047AGJ

บทที่ 4
ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต โดยได้นำเสนอข้อมูลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคานคอนกรีตที่เหล็กปลอกเกิดสนิม

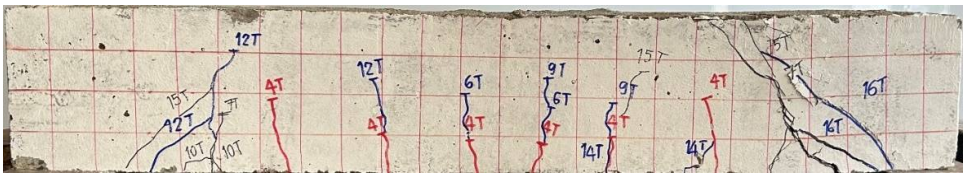
4.1.1 ผลการทดสอบ คานB30W

สำหรับ คาน B30W จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และเสริมด้านบน 2 เส้น และมีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 30 วันในสภาวะน้ำ

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 163.9 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 39.9 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.1 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 163.9 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.2

ภาพที่ 4.1 รอยร้าวแรกของคาน B30W หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก

Ref. code: 25676510031047AGJ



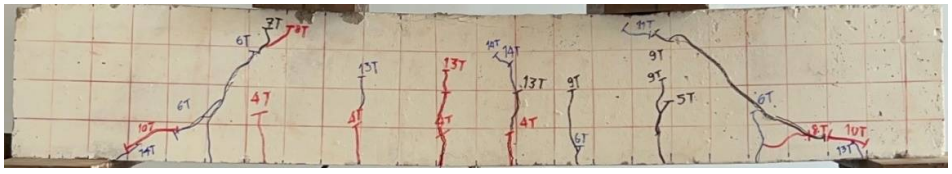
ภาพที่ 4.2 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30W

4.1.2 ผลการทดสอบ คานB60W

สำหรับ คานB60W จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และเสริมด้านบน 2 เส้น และมีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 60 วันในสภาวะน้ำ

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 149.8 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 39.9 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.3 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 149.8 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงภาพที่ 4.4

ภาพที่ 4.3 รอยร้าวแรกของคาน B60W หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก



ภาพที่ 4.4 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B60W

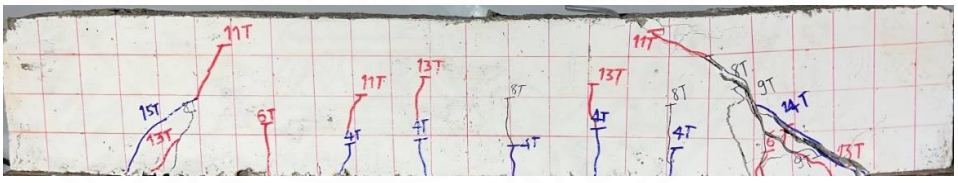
Ref. code: 25676510031047AGJ

4.1.3 ผลการทดสอบ คานB30N

สำหรับ คานB30N จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และเสริมด้านบน 2 เส้น และมีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 30 วันในสภาวะโซเดียมคลอไรด์

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 158.4 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 39.9 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.5 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 158.4 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงภาพที่ 4.6

ภาพที่ 4.5 รอยร้าวแรกของคาน B30N หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก



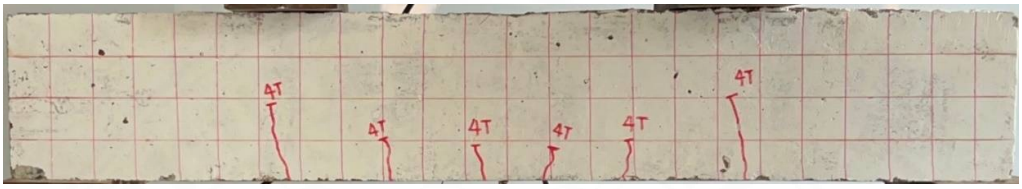
ภาพที่ 4.6 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30N

4.1.4 ผลการทดสอบ คานB60N

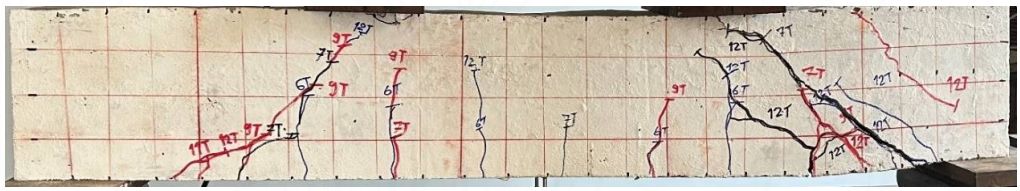
สำหรับ คานB0N จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และเสริมด้านบน 2 เส้น และมีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 60 วันในสภาวะโซเดียมคลอไรด์

Ref. code: 25676510031047AGJ

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 128.9 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 59.8 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.7 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 129.8 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.7 รอยร้าวแรกของคาน B60N หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก



ภาพที่ 4.8 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B60N

4.1.5 ผลการทดสอบ คานB30C

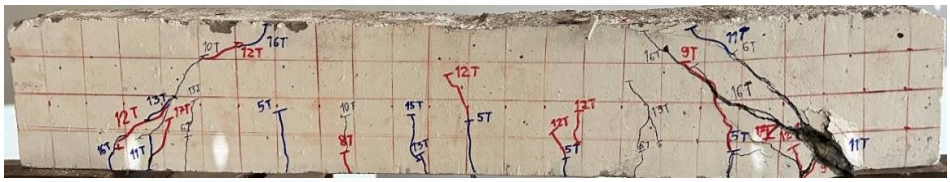
สำหรับ คานB30C จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และ เสริมด้านบน 2 เส้น และ มีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 30 วันในสภาวะแคลเซียมไฮดรอกไซด์

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 167.9 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 49.8 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.9 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณ

Ref. code: 25676510031047AGJ

ด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 167.9 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.10

ภาพที่ 4.9 รอยร้าวแรกของคาน B30C หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก



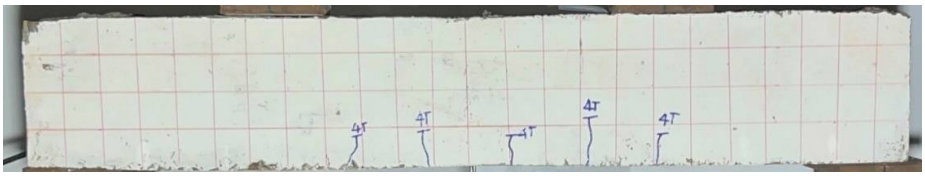
ภาพที่ 4.10 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30C

4.1.6 ผลการทดสอบ คานB30M

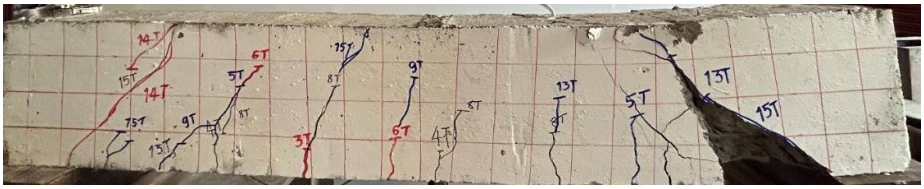
สำหรับ คานB30M จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และเสริมด้านบน 2 เส้น และมีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 30 วันในสภาวะแมกนีเซียมซัลเฟต

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 163.2 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 49.8 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.11 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 163.2 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงภาพที่ 4.12

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 4.11 รอยร้าวแรกของคาน B30M หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก



ภาพที่ 4.12 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B30M

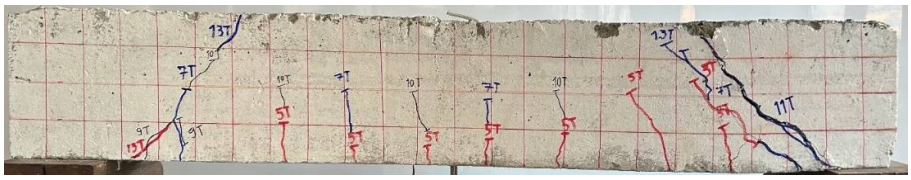
4.1.7 ผลการทดสอบ คานB60M

สำหรับ คานB60M จะเป็นคานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15 * 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยเสริมด้านล่าง 2 เส้น และเสริมด้านบน 2 เส้น และมีการเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม ขนาดหน้าตัด 6 มิลลิเมตร ระยะเรียง 12.5 เซนติเมตร ผ่านการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 60 วันในสภาวะแมกนีเซียมซัลเฟต

พฤติกรรมการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก ในเบื้องต้นได้แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก บรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยน้ำหนักบรรทุกของคานจากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักสูงสุด (P) ได้เท่ากับ 143 กิโลนิวตัน โดยรอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 29.9 กิโลนิวตัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.13 จากการสังเกตการแตกร้าวของคาน เห็นได้ว่ามีการแตกร้าว แบบกระจายตัว ซึ่งจะเริ่มมีการแตกร้าวจากบริเวณกึ่งกลางคานแล้วจึงขยายออกมาบริเวณด้านข้าง โดยคานจะเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P) เท่ากับ 143 กิโลนิวตัน เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ดังที่แสดงภาพที่ 4.14

ภาพที่ 4.13 รอยร้าวแรกของคาน B60M หลังจากให้น้ำหนักบรรทุก

Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 4.14 รอยร้าวและลักษณะการวิบัติของคาน B60M

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

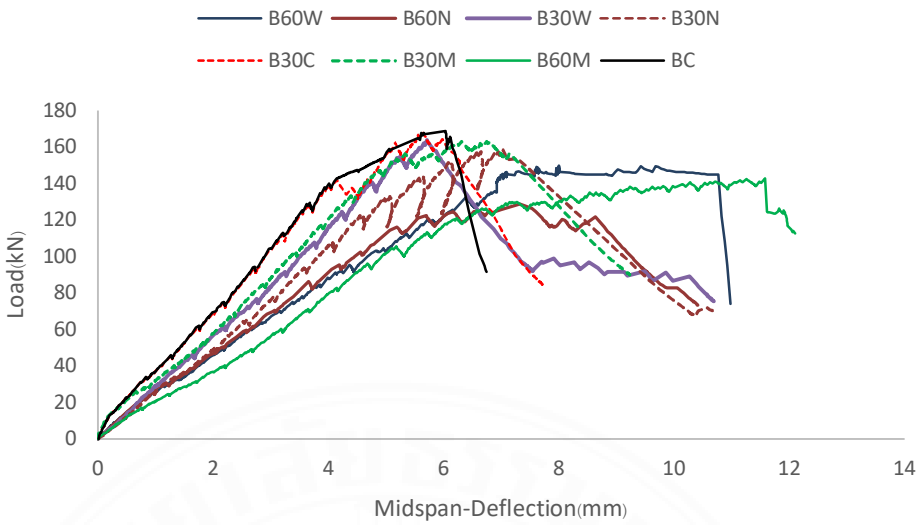
4.2.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่สภาวะประลัยของคานคอนกรีตแต่ละตัวอย่าง

จากผลการทดสอบคานตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่างและนำมาเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุดที่คำนวณได้ น้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานที่สภาวะประลัย จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

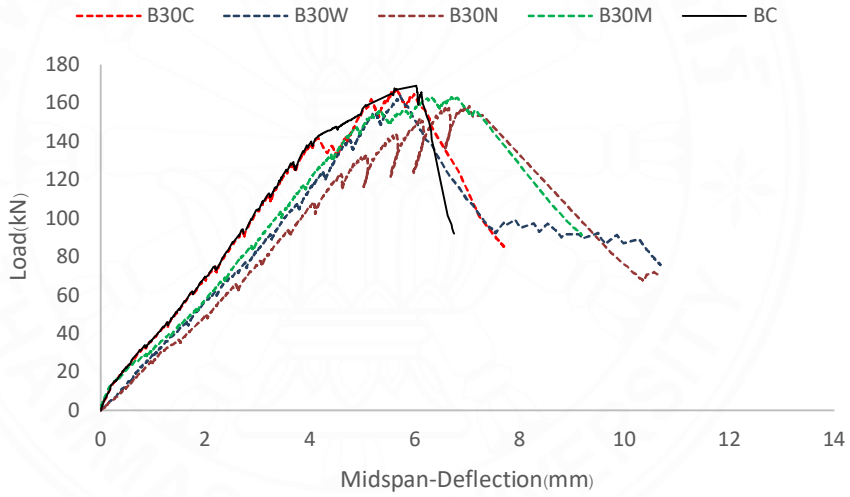
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง

ตัวอย่างคาน	At first shear crack		At Ultimate Load		Mode Failure
	Pcr(kN)	Deflection (mm)	Pult(kN)	Deflection (mm)	
BC	49.8	1.5	169.1	6.0	SC
B30W	39.9	1.5	163.9	5.7	SC
B60W	39.9	1.8	149.8	8.0	SC
B30N	39.9	1.7	158.4	7.0	SC
B60N	59.8	2.6	128.9	7.3	SC
B30C	49.8	1.4	167.9	5.6	SC
B30M	49.8	1.7	163.2	6.3	SC
B60M	29.9	1.6	143.0	11.6	SC

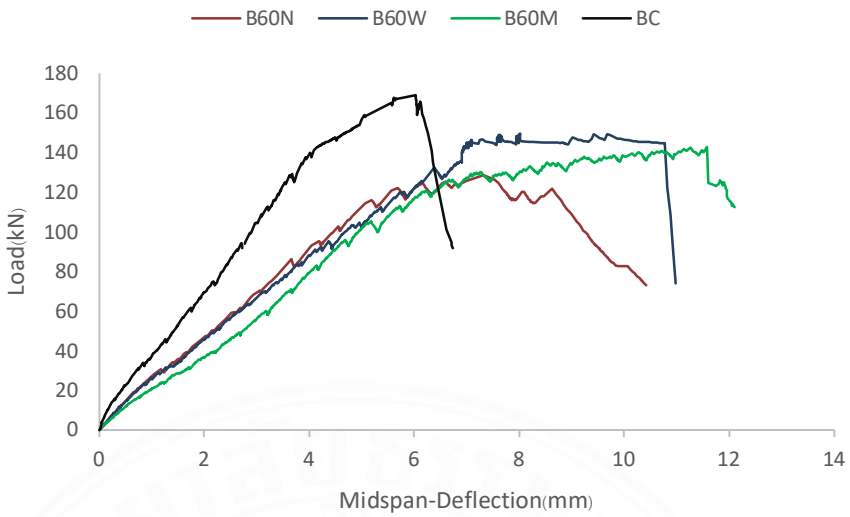
Ref. code: 25676510031047AGJ



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน

จากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวขณะวิบัติ

คานที่ BC มีค่าการแอ่นตัว 8.3 mm. นำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างคานต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30W ค่าการแอ่นตัวมีค่า**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{8.3-5.7}{8.3}\right)*100$ =31.3%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B60W ค่าการแอ่นตัวมีค่า**ลดลง**เท่ากับ $\left(\frac{8.3-8}{8.3}\right)*100$ = 3.6%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30N ค่าการแอ่นตัวมีค่า**ลดลง**เท่ากับ $\left(\frac{8.3-7}{8.3}\right)*100$ = 15.7%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B60N ค่าการแอ่นตัวมีค่า**ลดลง**เท่ากับ $\left(\frac{8.3-7.3}{8.3}\right)*100$ = 12%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30C ค่าการแอ่นตัวมีค่า**ลดลง**เท่ากับ $\left(\frac{8.3-5.6}{8.3}\right)*100$ = 32.5%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30M ค่าการแอ่นตัวมีค่า**ลดลง**เท่ากับ $\left(\frac{8.3-6.3}{8.3}\right)*100$ = 24.1%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B60M ค่าการแอ่นตัวมีค่า**เพิ่มขึ้น**เท่ากับ $\left(\frac{11.6-8.3}{8.3}\right)*100$ = 39.8%

เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก

คานที่ BC รับน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุด 169.1 kN. นำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างคานต่าง

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30W สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-163.9}{17}\right)*100$ = 3.5%

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B60W สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-149.8}{17}\right)*100 = 11.8\%$

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30N สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-158.4}{17}\right)*100 = 6.5\%$

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B60N สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-128.9}{17}\right)*100 = 24.1\%$

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30C สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-167.9}{17}\right)*100 = 0.59\%$

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B30M สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-163.2}{17}\right)*100 = 3.7\%$

เมื่อเปรียบเทียบกันคาน B60M สามารถรับน้ำหนัก**ลดลง** เท่ากับ $\left(\frac{169.1-143}{17}\right)*100 = 15.3\%$

Ref. code: 25676510031047AGJ

บทที่ 5
บทสรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเป็นสนิมในสภาวะที่ต่างกัน โดยทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัด 15×20 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร จำนวน 8 คาน ที่เหล็กปลอกผ่านการเร่งสนิม กำหนดระยะเวลาในการเร่งสนิม 30 และ 60 วัน ภายใต้ 4 สภาวะได้แก่ สภาวะน้ำ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคานเปรียบเทียบระหว่างคานที่เหล็กปลอกเกิดสนิมเนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมกับคานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม (คานควบคุม) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

คานตัวอย่างที่มีการเร่งปฏิกิริยาสนิมบริเวณเหล็กปลอกในสภาวะโซเดียมคลอไรด์ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงมากที่สุด โดยคานตัวอย่าง B30N สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ลดลง 6.4% และ คานตัวอย่าง B60N สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ลดลง 23.8% เมื่อเทียบกับคานควบคุม(คานตัวอย่าง BC) ที่ไม่ได้มีการเร่งปฏิกิริยาสนิม ในส่วนของคานตัวอย่างที่มีการเร่งปฏิกิริยาสนิมบริเวณเหล็กปลอกในสภาวะแมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงเป็นอัตราที่น้อยกว่าสภาวะโซเดียมคลอไรด์ตามลำดับ

คานตัวอย่างที่มีการเร่งปฏิกิริยาสนิมบริเวณเหล็กปลอกในสภาวะแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงจากคานควบคุมเพียงเล็กน้อยหรือเทียบเท่ากับคานควบคุม

ข้อเสนอแนะ

1.ควรทำการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในระยะเวลาที่มากกว่า 60 วัน เพื่อความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้นในการวิเคราะห์ผล

Ref. code: 25676510031047AGJ

รายการอ้างอิง

R H Shehab, A S Mahmoud, Y A Mansoor. (2020). The effect of corroded stirrups on shear behavior of reinforced concrete beams

Jin Xia, Wei-liang Jin, Long-yuan Li. (2020). Shear performance of reinforced concretebeams with corroded stirrups in chloride environment. School of Civil Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, UK.

Abdullah A. Almusallam. (2001). Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. Department of Ciil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

H.S. Wong, Y.X. Zhao, A.R. Karimi, N.R. Buenfeld, W.L. Jin. (2010). On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride induced corrosion, Corros.Sci. 52 (2010) 2469–2480

Inamullah K, Raoul F and Arnaud C. (2014). Experimental and analytical study of corroded shear critical reinforced concrete beams Mater. Struct. 47 1467–1481.

Lei X Z, Jianren Z, Yafei M and Yongming L. (2015). Effects stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior of RC beams. Constr. Build. Mater 98 537– 546.

Christopher S, Ahmed E and Khaled S. (2010). Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams. Can. J. Civ. Eng. 37 1045–1056.

Yuan, Y., Ji, Y., Shah, S.P. (2007). Shear Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures. ACI Struct. J. 2007,104, 344–347

Ahmed E., Raja R.H., Ahmed B.S. (2016). Influence of stirrup corrosion on shear strength of reinforced concrete slender beams. ACI Struct. J. 113 1223–1232.

Rodriguez J, Ortega L M, Casal J. (1997). Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Constr. Build. Mater. 11 239–248.

N.A. Taha, M. Morsy. (2015). Study of the behavior of corroded steel bar and convenient method of repairing. HBRC Journal

Saifullah M. (1994). Effect of Reinforcement Corrosion on Bond Strength in Reinforced Concrete. Ph. D. thesis, The University of Birmingham, UK.

Ye Z, Zhang W, Gu X. (2018). Deterioration of shear behavior of corroded reinforced concrete beams. Eng Struct 2018;168:708–20.

Ref. code: 25676510031047AGJ

Wang L, Zhang X, Zhang J, Ma Y, Liu Y. (2015). Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior of RC beams. Constr Build Mater 2015;98:537–46

Xia J, liang Jin W, Yuan Li L. (2011). Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment. Corros Sci 2011;53:1794–805.

Xia, J., Jin, W.-L., Li, L.-Y. (2012). Effect of Chloride-Induced Reinforcing Steel Corrosion on the Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams. Mag. Concr. Res. 2012, 64, 471–485.

Ahmed K. EL-SAYED, Raja R. HUSSAIN, Ahmed B. SHURAIM. (2016). EFFECT OF STIRRUP CORROSION ON THE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SHORT BEAMS. JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT ISSN 1392-3730/eISSN 1822-3605

Higgins, C., Farrow, W. C. (2006). Tests of reinforced concrete beams with corrosion damaged stirrups. ACI Structural Journal 103(1): 133–141.

Ahmad, S., Al-Huri, M.A., Al-Osta, M.A., Maslehuddin, M., Al-Gadhib, A.H. (2022). An Experimental Approach to Evaluate the Effect of Reinforcement Corrosion on Flexural Performance of RC Beams. Buildings 2022, 12, 2222.

Azad, A.K., Ahmad, S., Azher, S.A. (2007). Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. ACI Mater. J. 2007, 104, 40–47.

Ref. code: 25676510031047AGJ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	วศิน สุชาติพงษ์
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

บทความการประชุมวิชาการชื่อบทความ “ประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กปลอกเป็นสนิมในสภาวะที่ต่างกัน” ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาครั้งที่ 29 วันที่ 29-31 พฤษภาคม ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ จัดการประชุมโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

Ref. code: 25676510031047AGJ