



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย กำลังและความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายใต้
การทำลายของเกลือคลอไรด์
(Strength and durability of reinforced-concrete beam with steel fiber under
chloride attack)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 177239
สัญญาเลขที่ 110/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย กำลังและความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายใต้
การทำลายของเกลือคลอไรด์
(Strength and durability of reinforced-concrete beam with steel fiber under
chloride attack)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล
(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัย
แห่งชาติ เลขที่สัญญา 110/2558

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through
National Research Council of Thailand (Grant No. 110/2558)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษากำลังรับแรงคัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์ โดยหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.15x0.275x1.80 เมตร ที่เสริมเหล็กเหมือนกันจำนวน 7 ตัว โดยมีเส้นใยเหล็กปริมาณ 0.5% โดยปริมาตรของคอนกรีตในคานจำนวน 5 ตัว มีคานจำนวน 4 ตัว อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์ 5% และควบคุมสภาวะเปียกสลับแห้ง (เปียก 5 วันและแห้ง 2 วัน) ต่อหนึ่งวัฏจักร ส่วนคานอีก 3 ตัวอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีเกลือคลอไรด์ (น้ำเปล่า) โดยมีสภาวะเปียกสลับแห้งเหมือนกัน ภายหลังเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งจนกระทั่งคานคอนกรีตในทั้งสองสิ่งแวดล้อมเกิดการเสียหายเนื่องจากพบสนิมขึ้นที่ผิวคานคอนกรีตตามแนวเหล็กปลอก ซึ่งพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์เกิดความเสียหายมากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมไม่มีเกลือคลอไรด์ จากนั้นทดสอบกำลังรับแรงคัดของคานจนวิบัติ จากข้อมูลกำลังคัดที่ได้และทฤษฎีกำลังรับแรงคัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก สามารถประมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมที่สูญเสียไปเนื่องจากการเกิดสนิมโดยการคำนวณย้อนกลับได้

นอกจากนี้ ได้ออกแบบและพัฒนาระบบการควบคุมสภาวะเปียกสลับแห้งแบบอัตโนมัติ ทำงานด้วยการตั้งเวลา เพื่ออำนวยความสะดวกในการทดลองสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยสูบน้ำขึ้นเก็บในถังเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (แห้ง) และปล่อยน้ำลงอ่างแช่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (เปียก) รวมเวลาต่อหนึ่งรอบของสภาวะเปียกสลับแห้ง 168 ชั่วโมง

Abstract

This research aims to study the flexural strength of steel fiber reinforced concrete beams after exposed to chloride environment. Seven reinforced concrete beams of 0.15x0.275x1.80 m size with a constant reinforcement ratio were cast and five of them had steel fiber content of 0.5% by volume of concrete. Four beams were exposed to 5% chloride environment and under cyclic wetting and drying condition (5-day wet and 2-day dry per cycle). The others were exposed to no-chloride environment (pure water) and under cyclic wetting and drying condition. After exposure until some deteriorations of steel corrosion were occurred along stirrup bars of beams. It was found that reinforced concrete beams in chloride environment were more deteriorated than those in no-chloride environment. Then, all beams were tested to investigate the flexural strength. From the experimental results and flexural strength theory of reinforced concrete with steel fiber, the loss of cross sectional area of reinforcing steel due to corrosion can be estimated by back calculation.

Moreover, an automatic system of cyclic wetting and drying condition was designed and developed in this study in order to facilitate the experiment of cyclic wetting and drying condition. The water was sucked up to the tank for 120 hours (Dry) and released to the bath for 48 hours (Wet). The total period of cyclic wetting and drying was 168 hours per cycle.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญเรื่อง.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	4
เส้นใยเหล็ก	15
การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก...	15
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	25
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	35
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	35
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย.....	45
รายละเอียดการทดสอบ.....	48

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
ขั้นตอนการทดสอบ.....	54
ระบบการทำงานเปียกสลับแห้ง (Wet and dry cycle system).....	65
การคำนวณกำลังรับแรงค้ำที่สภาวะต่างๆ ภายหลังเผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง น้ำเปล่าและน้ำเกลือคลอไรด์.....	66
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	68
กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต.....	68
อัตราส่วนปัวของลี้ของคอนกรีต.....	69
กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีต.....	72
กำลังรับแรงค้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	78
การเปรียบเทียบแรงและการโก่งตัวของคานแต่ละกลุ่ม.....	97
การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต.....	100
กำลังอัดคอนกรีตทดสอบด้วยวิธี Schmidt hammer.....	101
กำลังรับแรงค้ำสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเหล็กเสริมเกิดสนิม....	102
5 สรุปผล.....	103
สรุปผล.....	103
ข้อเสนอแนะ.....	104
ผลผลิต	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก.....	45
3-2 รายละเอียดคานและสิ่งแวดล้อมที่เผชิญ.....	46
4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วย Schmidt hammer.....	101
4-2 กำลังรับแรงค้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเหล็กเสริมเกิดสนิม.....	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	5
2-2 รูปตัดคาน และหน้าตัดแปลงเมื่อเสริมเหล็กแบบ Double reinforcement.....	6
2-3 รูปตัดคาน การกระจายของหน่วยการยึดตัว การกระจายของหน่วยแรง และ แรงภายในบนหน้าตัด.....	7
2-4 รูปตัดคาน การกระจายของหน่วยการยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์ M_{n1} และ โมเมนต์ M_{n2}	11
2-5 รูปตัดคาน การยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง ตาม NJIT Method.....	16
2-6 รูปตัดคาน การยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง และหน้าตัดแปลง.....	17
2-7 รูปตัดคาน การยึดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์ M_{y1} และ โมเมนต์ M_{y2}	18
2-8 รูปตัดคาน การยึดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์ M_{n1} และ โมเมนต์ M_{n2}	21
2-9 ขั้นตอนการคำนวณหากำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มร้าว และกำลังรับแรงดัด สูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมไฟเบอร์.....	24
2-10 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	26
3-1 ลักษณะของเส้นใยเหล็ก (Steel fiber).....	36
3-2 แบบที่ใช้ในการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	37
3-3 แบบที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร.....	37
3-4 แบบที่ใช้ในการหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร.....	38
3-5 แบบที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร.....	38
3-6 เครื่องผสมคอนกรีต.....	39
3-7 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 150 ตัน.....	39
3-8 เครื่องทดสอบกำลังอัด.....	40

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-9 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 30 ตัน.....	40
3-10 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล.....	41
3-11 โต้ะเขย่าคอนกรีต.....	41
3-12 เครื่องบันทึกข้อมูล “Portable data logger รุ่น TDS-303”.....	42
3-13 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว.....	42
3-14 อุปกรณ์วัดการยึดหดตัวของเหล็กเสริม.....	43
3-15 อุปกรณ์วัดหน่วยการหดตัวของคอนกรีต.....	43
3-16 ผลิตภัณฑ์กันซึม โพลีเมอร์สังเคราะห์.....	44
3-17 กาวติดอุปกรณ์วัดหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กเสริม.....	44
3-18 หน้าตัดคาน และเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 240 ksc.....	47
3-19 หน้าตัดคาน และเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 350 ksc.....	48
3-20 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural strength test).....	50
3-21 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical - strain gauge บนเหล็กที่ใช้เสริมกำลังในคาน คอนกรีตเสริมเหล็ก.....	51
3-22 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical - strain gauge เพื่อวัดระยะการหดตัวของคอนกรีต บนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	52
3-23 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (f_c') ของตัวอย่างคอนกรีต.....	53
3.24 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (f_r) ของตัวอย่างคอนกรีต.....	54
3.25 การตัดเหล็กเสริมเพื่อใช้ทำคานตัวอย่างทดสอบ.....	54
3.26 การตัดเหล็กเสริมเพื่อใช้ทำคานตัวอย่างทดสอบ.....	55
3.27 การประกอบคานตัวอย่างทดสอบ.....	55
3.28 การติดลูกปูนเพื่อให้ได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมที่ต้องการ.....	56
3.29 การนำคานตัวอย่างที่ประกอบเสร็จไปลงในแบบหล่อคานทดสอบ.....	56

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.30 การหาค่า Absorption ของทรายที่ใช้ในการผสม.....	57
3.31 การทดสอบ Cone Sand Test เพื่อหาค่า Absorption ของทรายที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.32 ชั่งตวงส่วนผสมที่ใช้สำหรับทำคานตัวอย่างที่ใช้ทดลอง.....	58
3.33 แบบทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.34 แบบทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	59
3.35 การผสมคอนกรีตที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทดลอง.....	59
3.36 การหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทดลอง.....	60
3.37 การจีแบบหล่อคานตัวอย่างทดลองด้วยเครื่องจีเขย่าคอนกรีต.....	60
3.38 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงที่ใช้ในการทดลอง.....	61
3.39 การแกะตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ.....	61
3.40 การบ่มตัวอย่างคานทดสอบด้วยกระสอบ.....	62
3.41 การบ่มตัวอย่างทดสอบแบบขังน้ำ.....	62
3.42 การวัดความต้านทานของ Strain gauge หลังจากแกะออกจากแบบหล่อคาน.....	63
3.43 บ่อสำหรับแช่คานคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	63
3.44 คานทดสอบที่แช่ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์.....	64
3.45 คานทดสอบที่แช่ในน้ำปลา.....	64
3.46 ระบบการทำงานเปียกสลับแห้ง (Wet and dry cycle system).....	65
4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	68
4.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต.....	68
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามแนวแกนกับการยืดตัวตามแนวนอน ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc.....	69
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามแนวแกนกับการยืดตัวตามแนวนอน ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber.....	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามแนวแกนกับการยืดตัวตามแนวนอน ของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber.....	71
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการ โกงตัว ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc.....	72
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความกว้างรอยแตกร้าว ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc.....	72
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวและความกว้างรอยแตกร้าว ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc.....	73
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการ โกงตัว ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber.....	74
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความกว้างรอยแตกร้าว ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber.....	74
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวและความกว้างรอยแตกร้าว ของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber.....	75
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการ โกงตัว ของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber.....	76
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความกว้างรอยแตกร้าว ของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber.....	76
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวและความกว้างรอยแตกร้าว ของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber.....	77
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการ โกงตัวของคาน B1.....	78
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B1.....	79
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B1.....	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B1.....	80
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของคาน B2.....	80
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B2.....	81
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B2.....	82
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B2.....	82
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของคาน B3.....	83
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B3.....	83
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B3.....	84
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B3.....	85
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของคาน B4.....	86
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B4.....	87
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B4.....	88
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของคาน B5.....	89
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B5.....	89
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B5.....	90
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B5.....	91
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของคาน B6.....	91
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B6.....	92
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B6.....	92
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B6.....	93
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection ของคาน B7.....	94
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B7.....	94
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B7.....	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Deflection ของคาน B7.....	95
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน 240 ksc.....	97
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน 240 ksc fiber.....	97
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน 350 ksc fiber.....	98
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคานเช่น้ำธรรมดา.....	98
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน เช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0%.....	99
4.47 การแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตที่เช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0% ภายใต้อุณหภูมิ เปียกสลับแห้ง.....	100

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete structure) เป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากในงานก่อสร้างของไทยในปัจจุบัน โดยคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึงกระทำซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัด ส่วนใดของโครงสร้างที่รับแรงอัดก็ให้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด และส่วนใดที่รับแรงดึงก็ให้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านทานแรงดึง ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีคุณสมบัติต้านทานแรงอัดได้ดีมากแต่มีคุณสมบัติด้อยในด้านรับแรงดึง ส่วนเหล็กเสริมมีคุณสมบัติต้านทานทั้งแรงดึงและแรงอัดได้ดี ประกอบกับเหล็กเสริมและคอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวใกล้เคียงกันจึงเหมาะสมในการส่งถ่ายแรงระหว่างกันได้ดี โครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตล้วน แต่ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการรับน้ำหนักบรรทุกที่มาก โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้มีพื้นที่ใช้สอยน้อยลง ประกอบกับราคาวัสดุก่อสร้างก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จึงจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุชนิดต่างๆ ที่ราคาไม่สูงมากแต่สามารถช่วยทำให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เพื่อช่วยลดขนาดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และต้นทุนการก่อสร้างให้เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการใช้วัสดุอื่นผสมเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการรับแรงดึงและแรงอัดได้มากขึ้น เช่น เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ซึ่งเป็นเส้นลวดรีดเย็น มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ที่ปลายทั้งสองข้างหักงอ และมีกาวยึดลวดแต่ละเส้นที่อยู่ในกลุ่ม เมื่อใช้ผสมในส่วนคอนกรีตจะแตกตัวเป็นเส้นลวดอิสระกระจายตัวทั่วเนื้อของคอนกรีตซึ่งจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตให้สูงขึ้น

ทั้งนี้ โดยทั่วไปแล้วมักเข้าใจว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรงคงทนและมีอายุที่ยาวนาน แต่หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นต้องเผชิญอยู่ในสภาวะแวดล้อมของเกลือคลอไรด์ เช่น ตั้งอยู่ในทะเลหรือบริเวณใกล้ทะเล หรือตั้งอยู่ในบริเวณดินเค็ม โครงสร้างนั้นก็อาจมีอายุการใช้งานที่สั้นลงกว่าที่คาดไว้ได้เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีต อันเนื่องมาจากเกลือคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างแล้วทำให้เหล็กเสริมโครงสร้างเกิดสนิมขึ้น

ดังนั้น แนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กก็คือ ควรที่จะพิจารณาออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีทั้งกำลังและความคงทนต่อ

สภาวะที่แวดล้อมที่มีการทำลายสูง เช่น ในทะเล ตั้งแต่แรก ซึ่งต้องอาศัยองค์ประกอบของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั่นเองในการป้องกันการทำลายที่รุนแรง อาทิเช่น คุณสมบัติความ คงทนของคอนกรีต ระยะหุ้มเหล็กเสริม การบ่มคอนกรีต ตลอดจนคุณภาพในขั้นตอนของการ ก่อสร้างประกอบเข้าด้วยกัน เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบกำลังต้านของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กที่ เชนิณุสภาวะแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยใช้ปริมาณเส้นใยเหล็ก กำลังอัด คอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเสริมต่างๆ
2. เพื่อศึกษาความคงทนของคานคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กที่ เชนิณุ สภาวะแวดล้อมคลอไรด์

ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาและเปรียบเทียบกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete beam) ที่ ผสมเส้นใยเหล็กที่มีอัตราส่วนผสม 0.5% โดยปริมาตรของคอนกรีต เชนิณุสภาวะแวดล้อมเกลือ คลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% และมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้แก่ การใช้เส้นใยเหล็ก กำลังอัด คอนกรีต ระยะหุ้มเหล็กเสริม คานที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 0.15 ม. x 0.275 ม. x 1.80 ม. ระยะเวลา ในการสัมผัสสารละลายเกลือคลอไรด์และอากาศเป็นวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (เปียก 5 วัน แห้ง 2 วัน) จนกระทั่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสียหายขึ้น จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงคัดของ คานด้วยการทดสอบแบบ Four-point bend test ควบคุมการทดสอบแบบ Displacement control จนกระทั่งคานวิบัติ

นอกจากนี้ ทำการศึกษาความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อการแทรกซึมของ เกลือคลอไรด์ที่มาจากสารละลายเกลือคลอไรด์ที่คานสัมผัสหรือแช่อยู่ด้วย โดยการตรวจสอบ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration resistance) ที่เข้าสู่ภายในคาน รวมทั้ง ศึกษากำลังอัดของคานคอนกรีตภายหลังจากแช่ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ด้วยการทดสอบ แบบไม่ทำลาย (Non-destructive test) ด้วย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบกำลังต้านของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กที่เผชิญสภาวะแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยใช้ปริมาณเส้นใยเหล็ก กำลังอัดคอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเสริมต่างๆ
2. ทำให้ทราบความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กที่เผชิญสภาวะแวดล้อมคลอไรด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงคดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงคดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สภาวะต่างๆ ตามพฤติกรรมของการรับน้ำหนักบรรทุก นอกจากจะได้ค่ากำลังต้านทานแรงคดที่สภาวะนั้นๆ แล้วยังสามารถหาค่าของความโค้ง (Curvature: ϕ) ซึ่งเป็นความชันของเส้นแสดงหน่วยการยืดหดตัวที่สอดคล้องกับแรงคดที่สภาวะนั้นๆ ค่าความโค้งที่ได้จะนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าของการแอ่นหรือโก่งตัวของคาน (เนื่องจากความโค้ง ϕ มีค่าเท่ากับ M/EI นั่นเอง) ตลอดจนนำไปหาความเหนียว (Ductility) ของคานก่อนที่จะเกิดการวิบัติได้ [3]

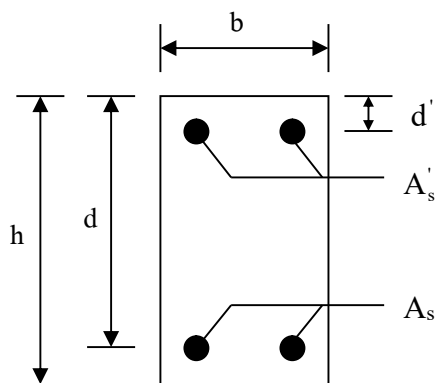
สมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หากำลังต้านทานแรงคดมีดังนี้ :

1. หารูปตัด ยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการรับแรงคด นั้นหมายความว่า การกระจายของหน่วยการยืดและหดตัวบนหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแนวแกนสะเทิน

2. การยืดเหนียวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือหน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับหน่วยการยืดตัวของคอนกรีต ณ ตำแหน่งเดียวกัน

3. ให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด กับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต เป็นสัดส่วนโดยตรงเมื่อหน่วยแรงอัดในคอนกรีต (f_c') ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า $0.50 f_c'$ (โดยประมาณ) แต่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่สภาวะก่อนเกิดการวิบัติไม่เป็นสัดส่วนกัน และให้หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 มม./มม.

4. ให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงเมื่อหน่วยการยืดตัว (ϵ_s) มีค่าไม่เกินหน่วยการยืดตัวที่จุดคราก (ϵ_y) โดยเหล็กเสริมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 2.04×10^6 กก./ชม.² และให้ความลึกประสิทธิภาพซึ่งวัดจากผิวบนของคานมายังตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ d ซม. ดังภาพที่ 2.1



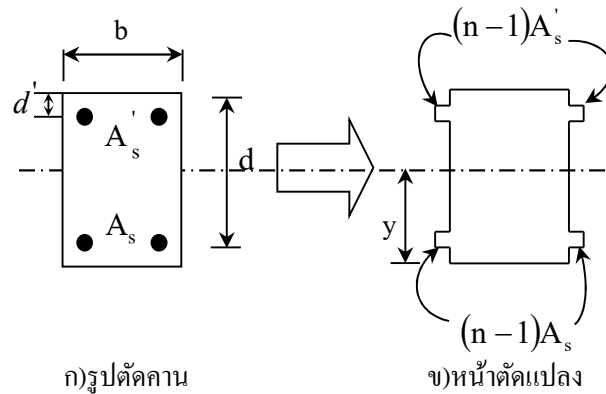
ภาพที่ 2.1 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. กำลังต้านทานแรงดัดเมื่อคานยังไม่ร้าว (Section uncracked)

เมื่อเสริมเหล็กแบบ Double reinforcement:

เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพียงเล็กน้อย หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานมีค่าน้อยกว่าค่าโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of rupture: $f_r = 2.0 \sqrt{f_c'}$ กก./ซม.²) ดังนั้น คานจึงยังไม่ร้าว หน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดของคานจึงสามารถรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้โดยหน่วยการยืดหดตัว (Strain distribution) บนหน้าตัดจะกระจายแบบเชิงเส้น โดยมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแนวแกนสะเทิน ส่วนการกระจายของหน่วยแรง (Stress distribution) บนหน้าตัดจะเป็นสัดส่วนกับหน่วยการยืดหดตัวและมีค่าอยู่ในช่วงอิลาสติก

การวิเคราะห์หาค่ากำลังต้านทานแรงดัดเมื่อคานยังไม่ร้าว เมื่อเสริมเหล็กแบบ Double reinforcement นั้นมีหลักในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับคานที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก ให้เป็นหน้าตัดของคอนกรีตอย่างเดียว หรือให้เป็นหน้าตัดของเหล็กเสริมอย่างเดียว แล้ววิเคราะห์หาค่าต่างๆ โดยใช้สูตรแรงดัด (Flexural formula) ตามทฤษฎี อิลาสติกเช่นเดียวกับคานที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว โดยแสดงตัวอย่างการแปลงหน้าตัดดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 รูปตัดคาน และหน้าตัดแปลงเมื่อเสริมเหล็กแบบ Double reinforcement

จากข้อสมมุติฐานข้อที่สอง ดังนั้นที่ตำแหน่งของเหล็กเสริม : $\varepsilon_s = \varepsilon_c$

แต่จากกฎของฮุก จะได้ $\varepsilon_s = f_s/E_s$ และ $\varepsilon_c = f_c/E_c$

ในเมื่อ E_s และ E_c เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมและของคอนกรีต ตามลำดับ

ดังนั้น
$$f_s = \frac{E_s}{E_c} f_c = n f_c$$

ในเมื่อ $n = E_s/E_c$ เรียกว่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modular ratio)

จากสมการข้างต้นแสดงว่าเหล็กเสริมสามารถรับแรงได้ถึง n เท่าของคอนกรีต นั้นหมายความว่าสามารถแปลงเนื้อที่เหล็กเสริม A_s ให้เป็นเนื้อที่คอนกรีตที่เทียบเท่าได้เท่ากับ nA_s และ nA_s'

ฉะนั้น เนื้อที่ของหน้าตัดแปลง $A_t = A_c + nA_s + nA_s'$

แต่ เนื้อที่สุทธิของคอนกรีต $A_c = A_g - A_s - A_s'$

นั่นคือ เนื้อที่ของหน้าตัดแปลง $A_t = (A_g - A_s - A_s') + nA_s + nA_s'$

$$A_t = A_g + (n-1)A_s + (n-1)A_s'$$

ค่าแรงดัดที่ทำให้คานเริ่มร้าวเรียกว่า แรงดัดแตกร้าว (Cracking moment : M_{cr}) ซึ่งจะวิเคราะห์ได้เมื่อหน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่ท้องคานมีค่าเท่ากับค่าโมดูลัสของการแตกร้าว

ดังนั้น จากสูตรแรงดัด $f = My/I_t$ หรือ $M = fI_t/y$

ในที่นี้ $f = f_r = 2.0\sqrt{f_c'}$

I_t = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลง (แต่ไม่ร้าว) ซม.⁴

ถ้าให้ y_{bottom} = ระยะจากแนวแกนสะเทินของรูปตัดถึงผิวล่างของท้องคาน ซม.

$$\text{ดังนั้นกำลังต้านทานแรงดัดเมื่อเริ่มร้าว} \quad M_{cr} = \frac{(2.0\sqrt{f'_c})I_t}{y_{bottom}} \text{ กก.ซม.} \quad (2.1)$$

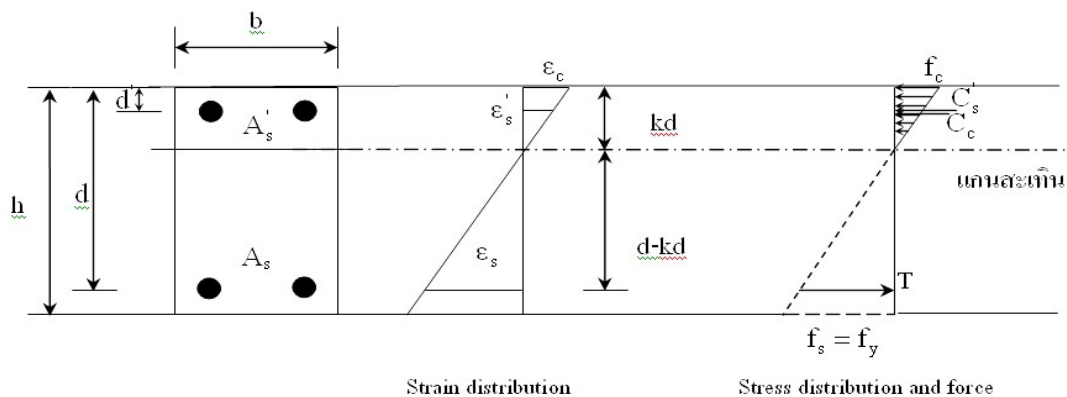
เมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยการยืดหดตัว จะได้ความโค้งเมื่อคานเริ่มร้าว

$$\text{Cracking curvature } \phi_{cr} = \frac{\varepsilon_r}{y_{bottom}} = \frac{(2.0\sqrt{f'_c})/E_c}{y_{bottom}} \quad (2.2)$$

2. กำลังต้านทานแรงดัดเมื่อคานร้าว (Flexural strength when section cracked)

เมื่อเสริมเหล็กแบบ Double reinforcement:

คานจะร้าวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เพราะหน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่ท้องคานมีค่ามากกว่าโมดูลัสของการแตกร้าว อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถมองเห็นรอยร้าวนี้ได้ด้วยตาเปล่า ที่สภาวะนี้หน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมยังอยู่ในช่วงอิลาสติก ($f_c \leq 0.5f'_c$ และ $f_s \leq f_y$) ดังนั้นการวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่เกิดขึ้น หรือกำลังต้านทานแรงดัดสามารถพิจารณาได้จากหน้าตัดแปลง (ร้าว) ตามทฤษฎีอิลาสติกหรือใช้ทฤษฎีเส้นตรง (Straight-line theory) ก็ได้



ภาพที่ 2.3 รูปตัดคาน การกระจายของหน่วยการยืดตัว การกระจายของหน่วยแรง และ แรงภายในบนหน้าตัด

จากสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{kd}{d - kd}$$

แต่ $\varepsilon = \frac{f}{E}$

ดังนั้น $\frac{f_c/E_c}{f_s/E_s} = \frac{kd}{d - kd}$

$$\frac{E_s}{E_c} \times \frac{f_c}{f_s} = \frac{kd}{d - kd} \quad (2.3)$$

จากสมมูลของแรงบนหน้าตัด จะได้

$$C_s + C_c = T$$

$$A_s f_s' + \frac{1}{2} b k d f_c = A_s f_s$$

$$\rho' b d f_s' + \frac{1}{2} b d k f_c = \rho b d f_s$$

$$\rho' f_s' + \frac{k}{2} f_c = \rho f_s$$

$$\rho' \frac{f_s'}{f_s} + \frac{k}{2} \frac{f_c}{f_s} = \rho \quad (2.4)$$

แทน (2.3) ใน (2.4) จะได้

$$n \times \frac{2}{k} \left(\rho - \rho' \frac{f_s'}{f_s} \right) = \frac{kd}{d - kd}$$

$$\frac{2n}{k} \left(\rho - \rho' \frac{f_s'}{f_s} \right) = \frac{k}{1 - k} \quad (2.5)$$

จากสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon_s} = \frac{kd - d'}{d - kd}$$

แต่ $\varepsilon = \frac{f}{E}$

ดังนั้น $\frac{f'_s/E_s}{f_s/E_s} = \frac{kd - d'}{d - kd}$

$$\frac{f'_s}{f_s} = \frac{kd - d'}{d - kd} \quad (2.6)$$

แทน (2.5) ใน (2.6) จะได้

$$\frac{2n}{k} \left[\rho - \rho' \times \left(\frac{kd - d'}{d - kd} \right) \right] = \frac{k}{1 - k}$$

$$\frac{2n}{k} \left[\rho - \rho' \times \frac{d(k - d'/d)}{d(1 - k)} \right] = \frac{k}{1 - k}$$

$$\frac{2n}{k} \left[\rho - \rho' \times \frac{(k - d'/d)}{(1 - k)} \right] = \frac{k}{1 - k}$$

$$2n \frac{[\rho(1 - k) - \rho'(k - d'/d)]}{1 - k} = \frac{k^2}{1 - k}$$

$$2n \left[\rho(1 - k) - \rho' \left(k - \frac{d'}{d} \right) \right] = k^2$$

$$\rho - \rho k - \rho' k + \rho' \frac{d'}{d} = \frac{k^2}{2n}$$

$$\left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} \right) - (\rho + \rho') k - \frac{k^2}{2n} = 0$$

$$\left(-\frac{1}{2n} \right) k^2 + [-(\rho + \rho')] k + \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} \right) = 0$$

เพราะฉะนั้น

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

3. กำลังต้านทานแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก M_y :

คานามีปริมาณเหล็กเสริมน้อย ๆ (Under reinforcement) เหล็กเสริมจะถูกดึงถึง จุดคราก ($\varepsilon_s = \varepsilon_y$ และ $f_s = f_y$) ก่อนถ้าการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น จะหาแรงดัดและความโค้งเมื่อเหล็กเสริมเริ่มครากโดยทฤษฎีเส้นตรงได้

จากภาพที่ 2.3 ให้หน่วยการยึดตัว $\varepsilon_s = \varepsilon_y$ ดังนั้น แรงดึง $T = A_s f_y$

นั่นคือ Yield moment : $M_y = (A_s - A'_s) f_y j d + A'_s f_y (d - d')$ (2.7)

Yield curvature : $\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{f_y/E_s}{d - kd}$ (2.8)

แต่ถ้าการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น หรือเมื่อคานามีเหล็กเสริมเป็นปริมาณมาก (Under reinforcement) การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีเส้นตรงดังกล่าวข้างต้น จะทำให้ได้ค่าของแรงดัด M_y มากไป และค่าของความโค้ง ϕ_y น้อยไป การวิเคราะห์โดยละเอียดจะทำวิธีลองผิดลองถูกและอาศัยรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยแรงกดตัวของคอนกรีต

ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด :

เมื่อคานาคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มร้าว คอนกรีตจะถ่ายหน่วยแรงดึงให้กับเหล็กเสริมที่อยู่ในคานาทันที ปริมาณของเหล็กเสริมที่ใช้ต้องมีปริมาณอย่างน้อยที่สามารถต้านทานแรงดัดแตกร้าวได้ มิฉะนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มร้าว คานาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะวิบัติยับพลันทันที ปริมาณของเหล็กเสริมอย่างน้อยที่ต้องใช้ในคานาคอนกรีตเสริมเหล็ก พิจารณาได้จากการสมมุติให้หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมมีกำลังถึงจุดคราก นั่นคือ

$$M_{cr} = A_s f_y j d$$

แต่ $M_{cr} = f_r I / y \approx f_r b d^2 / 6$

ดังนั้น $A_s = 0.2 b d (f_r / f_y)$ สมมุติว่า ระยะ $j = 7/8$

เมื่อแทนค่า $f_r = 2.0 \sqrt{f'_c}$ กก.-ชม. และสมมุติส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.0

ดังนั้น $A_{smin} = 0.8 b d (\sqrt{f'_c} / f_y)$

หรือ $\rho_{min} = A_s/bd = 0.8\sqrt{f'_c}/y$

ถ้ากำหนดให้ $f'_c = 250-400$ กก./ซม.² จะได้ $\rho_{min} = (13-16)/f_y$

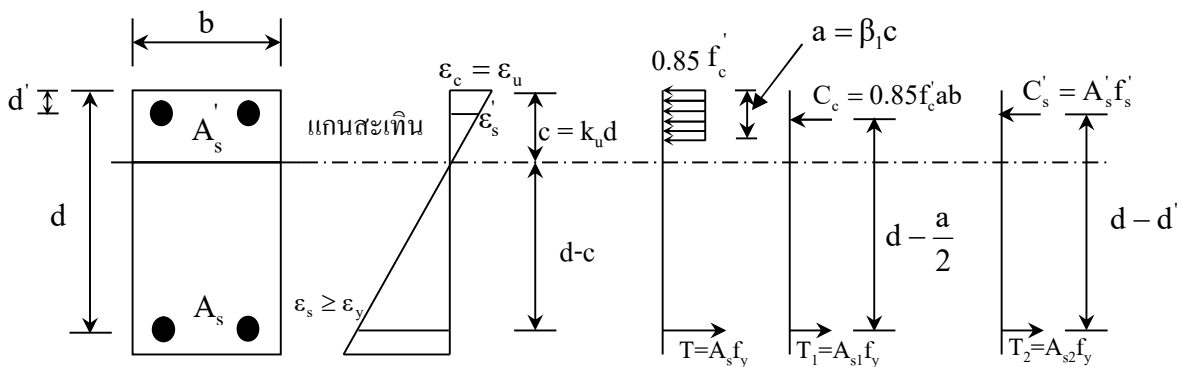
ฉะนั้น เพื่อป้องกันการวิบัติที่เกิดอย่างฉับพลันทันทีเมื่อมีรอยร้าวปรากฏที่ด้านรับแรงดึง มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. จึงกำหนดปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุดสำหรับส่วนโครงสร้างที่รับแรงดัด ดังนี้

- 1.) ให้ใช้ $\rho_{min} \geq 14/f_y$ หรือ
- 2.) ให้ใช้ปริมาณเหล็กเสริมอย่างน้อยเท่ากับ 1.33 เท่าของค่าที่คำนวณได้

ข้อจำกัดของปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุดดังกล่าวข้างต้น ไม่ใช้กับแผ่นพื้น คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กทางเดียว แต่จะกำหนดปริมาณเหล็กเสริมอย่างน้อยที่ต้องใช้ ให้เท่ากับปริมาณของเหล็กเสริมด้านการยึดหดหรือเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

4. กำลังต้านทานแรงดัดสูงสุด (Nominal flexural strength)

เมื่อเสริมเหล็กแบบ Double reinforcement:



(ก) รูปตัดคาน (ข) การกระจายตัวของหน่วยการยึดหด (ค) การกระจายตัวของหน่วยแรงและแรงภายในบนหน้าตัด (ง) โมเมนต์ M_{n1} (จ) โมเมนต์ M_{n2}

ภาพที่ 2.4 รูปตัดคาน การกระจายของหน่วยการยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์ M_{n1} และ โมเมนต์ M_{n2}

กำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดของคาน M_n จะได้จากการพิจารณารวมกำลังต้านทานแรงดัดสูงสุด 2 ส่วน คือ M_{n1} และ M_{n2} โดยที่ M_{n1} เป็นกำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดของคานที่มีรูปตัดเปรียบเสมือนเป็นคานที่มีแต่เหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว ดังภาพที่ 2.4(ง) นั่นคือกำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดจะพิจารณาได้จากแรงอัดในส่วนของคอนกรีต หรือจากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ $A_{s1} = A_s - A_{s2}$ ส่วนกำลังต้านทานแรงดัดสูงสุด M_{n2} เป็นกำลังต้านทานแรงดัดที่ได้จากแรงอัดในเหล็ก

เสริมรับแรงอัดที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ A_s' หรือจากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึง ที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ A_{s2} ดังภาพที่ 2.4 (จ)

นั่นคือ กำลังต้านทานโมเมนต์สูงสุดของคาน $M_n = M_{n1} + M_{n2}$

เมื่อไม่คิดเนื้อที่ของคอนกรีตซึ่งถูกแทนที่ด้วยเนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัด A_s'

$$M_{n1} = 0.85f_c' ba(d - 0.5a) \text{ หรือ } A_{s1}f_y(d - 0.5a)$$

$$M_{n2} = A_s' f_c' (d - d') \text{ หรือ } A_{s2}f_y(d - d')$$

$$\text{ดังนั้น } M_n = 0.85f_c' ba(d - 0.5a) + A_s' f_c' (d - d') \quad (2.9)$$

$$\text{หรือ } M_n = A_{s1}f_y(d - 0.5a) + A_{s2}f_y(d - d') \quad (2.10)$$

ทั้งนี้ ต้องทราบตำแหน่งของแนวสะเทิน c ก่อน เพราะเมื่อทราบ c ก็จะหาระยะ a ได้ ($a = \beta_1 c$) และทำให้ทราบหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัด f_s' หรือปริมาณของเหล็กเสริม A_{s2} ซึ่งเท่ากับ $A_s' f_s' / f_y$

ตำแหน่งแนวแกนสะเทิน :

จากสมดุลของแรงภายใน จะได้

$$T = C_c + C_s'$$

$$A_s f_y = 0.85f_c' ba + A_s' f_s'$$

$$\text{แต่ } a = \beta_1 c \text{ และ } f_s' = \epsilon_s' E_s = \left[\frac{c - d'}{c} \times 0.003 \right] E_s$$

$$\text{ดังนั้น } A_s f_y = 0.85f_c' b\beta_1 c + \left[\frac{c - d'}{c} \times 0.003 \right] E_s A_s'$$

คูณตลอดด้วย c จะได้

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

แทนค่า $E_s = 2.04 \times 10^6$ กก./ชม.² จะได้

$$(0.85f_c' b\beta_1) c^2 + (6120A_s' - A_s f_y) c - 6120d'A_s' = 0$$

แก้สมการกำลังสอง จะได้ระยะของแนวแกนสะเทิน

$$c = -R \pm \sqrt{R^2 + Q}$$

$$\text{เมื่อ } R = \frac{6,120A_s' - A_s f_y}{1.7f_c' b\beta_1}, \quad Q = \frac{6,120d'A_s'}{0.85f_c' b\beta_1}$$

ดังนั้น เมื่อทราบ c จะหาหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมรับได้แรงอัดได้จาก

$$f'_s = \epsilon'_s E_s = \left[\frac{c-d'}{c} (0.003) \right] E_s = \left[\frac{c-d'}{c} 6120 \right] \text{ กก./ซม.}^2$$

นำค่าที่ได้กลับไปแทนลงในสมการ (2.9) หรือ (2.10) จะได้กำลังต้านทานแรงคัตของคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงอัด

อนึ่ง ถ้าหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัดมีกำลังถึงจุดคราก (นั่นคือ $f'_s = f_y$) การคำนวณต่างๆจะง่ายมากขึ้น กล่าวคือ

$$\text{จะได้ } A_{s2} = A_s f'_s / f_y = A_s f_y / f_y = A_s'$$

$$\text{และ } A_{s1} = A_s - A_{s2} = A_s - A_s'$$

ฉะนั้น กำลังต้านทานแรงคัตสูงสุด

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = (A_s - A_s') f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d')$$

$$M_n = R_u b d^2 + A_s' f_y (d - d')$$

เมื่อ

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(\rho - \rho') f_y d}{0.85 f'_c}$$

$$R_u = (\rho - \rho') f_y \left(1 - \frac{0.59(\rho - \rho') f_y}{f'_c} \right)$$

อัตราส่วนของเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล (Balanced steel ratio: ρ_b):

ที่สภาวะนี้ หน่วยการยึดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ ϵ_y และหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.003 ($\epsilon_s = \epsilon_y$, $\epsilon_c = 0.003$)

ถ้าให้หน่วยการหดตัวของเหล็กเสริมรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ ϵ'_s

จากรูปการกระจายของหน่วยการยึดตัว จะได้ $\epsilon'_s = \epsilon_u - \frac{d'}{d} (\epsilon_u + \epsilon_y)$

$$f'_s = E_s \left[\epsilon_u - \frac{d'}{d} (\epsilon_u + \epsilon_y) \right]$$

จากสมดุลของแรงบนหน้าตัดในแนวนอน

$$T = C_s + C'_s$$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b a + A_s' f'_s$$

เมื่อหารตลอดด้วย $b d f_y$ จะได้

$$\rho = \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y}$$

$$\rho - \rho' \frac{f'_s}{f_y} = \rho_b$$

แต่เพื่อให้คานมีความเหนียวมากพอก่อนเกิดการวิบัติหรือให้คานวิบัติแบบ Yielding failure ซึ่งเหล็กเสริมรับแรงดึงจะถูกดึงถึงกำลังที่จุดครากก่อน ตามมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. จึงกำหนด อัตราส่วนของเหล็กเสริมที่มากที่สุด ดังนี้

$$\left(\rho - \rho' \frac{f_s'}{f_y} \right)_{max} = 0.75\rho_b$$

ในกรณีที่เหล็กเสริมรับแรงอัดถูกอัดถึงกำลังที่จุดคราก ($f_s' = f_y$) ดังนั้น

$$(\rho - \rho')_{max} = 0.75\rho_b$$

$$\text{โดยที่} \quad \rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \cdot \frac{6120}{6120 + f_y}$$

สำหรับอัตราส่วนของเหล็กเสริม ($\rho - \rho'$) ขั้นต่ำซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถูกอัดถึงกำลังที่จุดครากที่สภาวะก่อนวิบัติ ให้พิจารณาจากรูปการกระจายของหน่วยการยึดหดตัว โดยใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้าย ซึ่งจะได้

$$\varepsilon_s' = \frac{\varepsilon_u (c - d')}{c} = \varepsilon_u \left[1 - \frac{d'}{c} \right]$$

จากสมมูลของแรงภายในจะได้

$$a = c\beta_1$$

$$c = \frac{a}{\beta_2} = \frac{(A_s - A_s')f_y}{\beta_2(0.85f_c'b)} = \frac{(\rho - \rho')f_y d}{\beta_2(0.85f_c')}$$

ดังนั้น หน่วยการหดตัวของเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_u \left[1 - \frac{0.85\beta_1 f_c' d'}{(\rho - \rho')f_y d} \right]$$

เมื่อต้องการให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถูกอัดถึงจุดคราก นั่นคือค่าของ $\varepsilon_s' \geq \frac{f_y}{E_s}$

$$\text{หรือ} \quad \varepsilon_u \left[1 - \frac{0.85\beta_1 f_c' d'}{(\rho - \rho')f_y d} \right] \geq \frac{f_y}{E_s}$$

$$\text{นั่นคือ ต้องใช้} \quad \rho - \rho' \geq 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u - \frac{f_y}{E_s}}$$

เมื่อกำหนดให้ $E_s = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ และ $\varepsilon_u = 0.003$

จะได้ ค่า $(\rho - \rho')$ ขั้นต่ำที่ทำให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงกำลังที่จุดคราก นั่นคือ

$$\rho - \rho' \geq 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u - \frac{f_y}{E_s}} \quad (2.11)$$

หมายความว่า ถ้าใช้อัตราส่วนของ $(\rho - \rho')$ น้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการ (2.11) แสดงว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดถูกอัดไม่ถึงกำลังที่จุดคราก

เส้นใยเหล็ก

เส้นใย (Fiber) เป็นวัสดุผสมเพิ่มอย่างหนึ่ง ช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อแรงดึงดีขึ้น ลดการแตกร้าว (Plastic shrinkage) ตลอดจนมีความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสีดีขึ้น วัสดุที่ใช้คือ โพลีพอฟีลีน (Polypropylene) หรือเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ในปริมาณ 0.4 – 1% โดยปริมาตรของคอนกรีต [4]

เส้นใยเหล็กที่ใช้ในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตในครั้งนี้ ผลิตโดยบริษัท ดรามิกซ์ (Dramix) มีชื่อเรียกว่า “RC-65/35-BN” ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นลวด รูปร่างคงตัว และตัดให้ได้ตามความยาวที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตเสริมเหล็ก มอร์ต้า และวัสดุประกอบอื่น ๆ

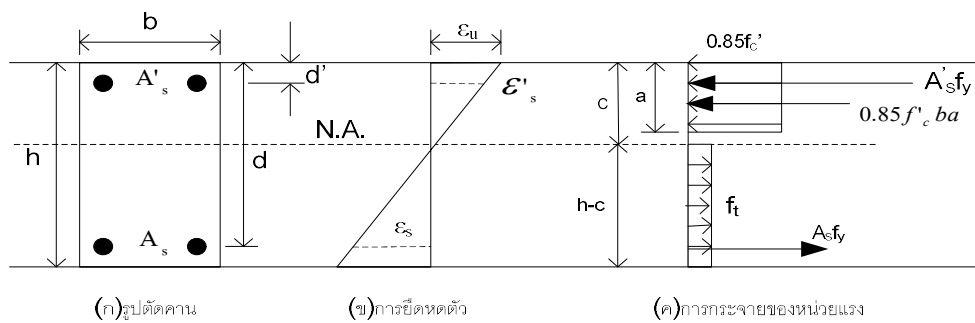
RC-65/35-BN นี้ เป็นลวดเส้นใยเหล็กกริดเย็น มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ที่ปลายทั้งสองข้างหักงอ และมีความยืดหยุ่นแต่ละเส้นที่อยู่ในกลุ่ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) เท่ากับ 0.55 มิลลิเมตร ค่าตัวเลข 35 ที่ปรากฏในชื่อ หมายถึง ความยาวของลวดเส้นใยเหล็ก มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และค่าตัวเลข 65 หมายถึง ค่าอัตราส่วนรูปทรง (Aspect ratio) ซึ่งการแบ่งชั้นประสิทธิภาพของเส้นใยเหล็ก หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเส้นใยเหล็ก ซึ่งในที่นี้อัตราส่วนรูปทรงมีค่าเท่ากับ 64 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของลวดเส้นใยจะแบ่งได้เป็นชั้น 45 65 และ 80 ลวดเส้นใยเหล็ก “RC-65/35-BN” จึงถูกจัดให้อยู่ในชั้น 65 เส้นใยเหล็กชนิดนี้ในน้ำหนัก 1.0 กิโลกรัมนั้นจะมีลวดเส้นใยเหล็กประมาณ 14,500 ชิ้น และมีกำลังรับแรงดึง น้อยที่สุด เท่ากับ 1,213 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก [4]

1. การคำนวณกำลังรับแรงดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก (BUU method)

ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย (BUU method) ที่แต่ละสภาวะต่างๆ อันได้แก่ กำลังรับแรงดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าว (M_{cr}) กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก (M_y) และกำลังรับแรงดัดสูงสุด (M_n) โดยมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดดังต่อไปนี้

- 1) ระบายของหน้าตัดยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการรับแรงดัด นั้นหมายถึง การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางที่ห่างจากแนวแกนสะเทิน
- 2) การยืดเหี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ หน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกัน
- 3) หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003
- 4) การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมีลักษณะสม่ำเสมอเป็นกลุ่มหน่วยแรงเทียบเท่า (Equivalent stress block)
- 5) จำนวนเส้นใยใต้แนวแกนสะเทินที่สามารถรับแรงดึงจากการดัดของคานให้คิดเป็นจำนวนหนึ่งในสิบห้าของจำนวนเส้นใยที่ผสมทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากการนำตัวอย่างของคานที่ใช้ทดสอบหาค่ากำลังแรงดัด (Flexural strength) มาวิเคราะห์หน้าตัดเพื่อนำมานับจำนวนเส้นใยประสิทธิผลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ รวมทั้งการลองคำนวณย้อนกลับเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ทำนายกำลังรับแรงดัด
- 6) กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กเมื่อเหล็กเสริมครากเท่ากับร้อยละ 70 ของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก
- 7) คอนกรีตส่วนที่แตกร้าวได้แกนสะเทินสามารถรับแรงดึงได้ เนื่องจากมีเส้นใยเหล็กกระจายตัวอยู่ โดยให้การกระจายตัวของหน่วยแรงดึงคอนกรีตนี้เท่ากับจำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คูณกับค่าเฉลี่ยประสิทธิผลของแรงดึงถอนเส้นใย ซึ่งสมมติฐานข้อนี้เหมือนกับวิธีการของ NJIT [5] ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์หาค่ากำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดของคาน ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 รูปตัดคาน การยืดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง ตาม NJIT Method

$$\text{ดังนั้น } M_n = A'_s f'_s (d - d') + (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + f_t b \left(h - \frac{a}{\beta_1}\right) \left(\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2}\right) \quad (2.12)$$

โดยที่ $f_t = 0.7 P_t n_e$

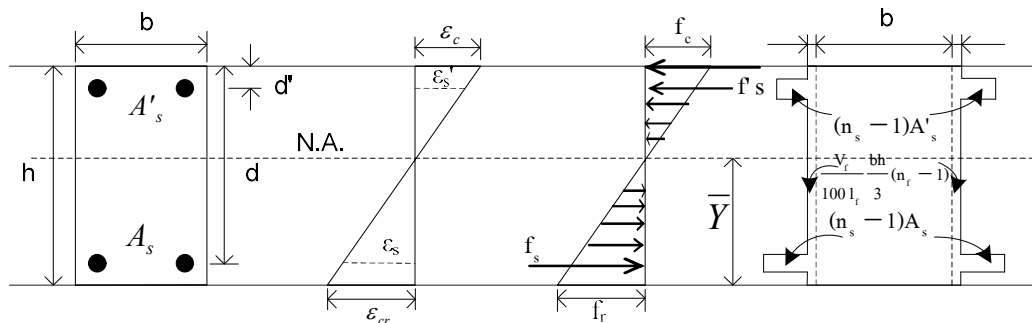
$$n_e = \frac{4V_f(0.41)}{\pi d_f^2 l_f}$$

P_t = แรงดึงถอนของเส้นใยเหล็ก (กิโลกรัม)

- n_e = จำนวนของเส้นใยเหล็กประสิทธิภาพในทิศทางใดๆต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
 V_f = ปริมาณเส้นใยเหล็กในคอนกรีต (% โดยปริมาตร)
 d_f = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยเหล็ก (เช่น ดีเมตร)
 l_f = ความยาวของเส้นใยเหล็ก (เช่น ดีเมตร)

1.1 กำลังรับแรงดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าว (Cracking moment, M_{cr})

การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเริ่มแตกร้าวสามารถทำได้ โดยการแปลงหน้าตัดเหล็กเสริมบนและล่าง และหน้าตัดของจำนวนเส้นใยประสิทธิภาพในทิศทางใดๆ ต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งคิดจากหนึ่งในสามของจำนวนเส้นใยทั้งหมดตามสมมติฐานข้อที่ 5 ให้เป็นหน้าตัดคอนกรีตล้วนเทียบเท่า ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 รูปตัดคาน การยืดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง และหน้าตัดแปลง

จาก $\epsilon_s = \frac{f_s}{E_s}$, $\epsilon_s' = \frac{f_s'}{E_s}$, $\epsilon_c = \frac{f_c}{E_c}$ และ $\epsilon_f = \frac{f_f}{E_f}$

และ $n_s = \frac{E_s}{E_c}$, $n_s' = \frac{E_s'}{E_c}$, $n_f = \frac{E_f}{E_c}$

ดังนั้น

$$\text{ระยะจากขอบล่างคานถึงแกนสะเทิน } \bar{y} = \frac{(A_g \frac{h}{2}) + (n-1)A_s(h-d) + (n-1)A_s'(h-d') + 0.33(b)(n_f-1)\frac{A_f h}{l_f}(\frac{h}{2})}{A} \quad (2.13)$$

A_f = พื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์ในหนึ่งหน่วยพื้นที่

โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง $I_t = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ (2.14)

โดยที่ $I_1 = (\frac{1}{12}bh^3) + [(bh)(\frac{h}{2} - \bar{y})^2]$,

$I_2 = (n_s' - 1)A_s'[(h - d') - \bar{y}]^2$

$I_3 = (n_s - 1)A_s[\bar{y} - (h - d)]^2$, $I_4 = 0.33(b)(n_f - 1)A_f h[\frac{h}{2} - \bar{y}]^2$

ดังนั้น กำลังรับแรงดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าวเท่ากับ

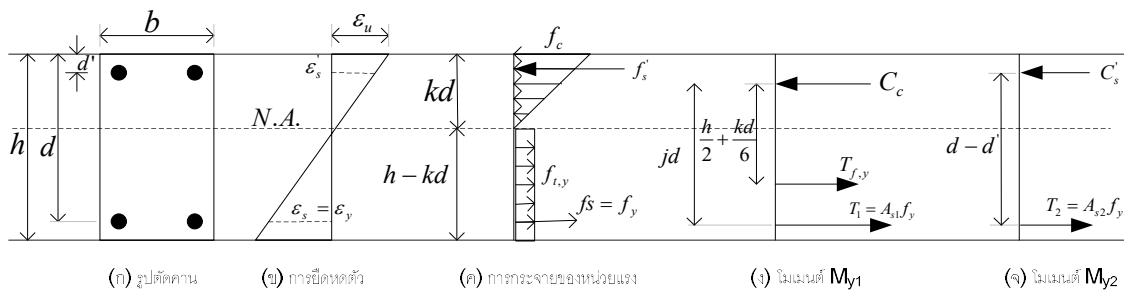
$$M_{cr} = \frac{f_r I_t}{y} \quad (2.15)$$

และแรงกดที่กระทำเมื่อคานเริ่มแตกร้าว สำหรับ Four-point bend test เท่ากับ

$$P_{cr} = \frac{32M_{cr}}{7L} \quad (2.16)$$

1.2 กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมคราก (Yielding moment, M_y)

กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยและเสริมเหล็กเสริมต่ำกว่าสถานะสมมูล เมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก ($\epsilon = \epsilon_y$ และ $f_s = f_y$) กำลังรับแรงดัดของคานมาจากสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือ M_{y1} เป็นกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการพิจารณาเสมือนเป็นคานที่มีเหล็กเสริมและเส้นใยรับแรงดึงอย่างเดียวดังรูป 2.7(ง) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงของเหล็กเสริมรับแรงดึง A_s แรงดึงของเส้นใยที่กระจายตัวสม่ำเสมอได้แก่แกนสะเทิน และแรงอัดของคอนกรีต และส่วนที่สองคือ M_{y2} เป็นกำลังรับแรงดัดที่ได้จากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A_{s2} และแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $A_{s'}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (จ)



ภาพที่ 2.7 รูปตัดคาน การยึดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์ M_{y1} และโมเมนต์ M_{y2}

จากภาพที่ 2.7 จะได้ว่า

$$M_{y1} = (A_s - A_{s'})f_y jd + f_{t,y} b(h - kd) \left(\frac{h}{2} + \frac{kd}{6} \right) \quad (2.17)$$

$$M_{y2} = A_{s'} f_y (d - d') \quad (2.18)$$

ทั้งนี้ให้ $f_{t,y} = 0.70f_{t,n}$ เป็นไปตามสมมติฐานข้อที่ 6

สำหรับค่า k สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k = -R_y \pm \sqrt{R_y^2 - Q_y} \quad (2.19)$$

โดยที่ R_y และ Q_y ได้จากการพิสูจน์ จากภาพที่ 2.7 ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$\text{จาก } C_s' + C_c = T + f_{t,y}b(h - kd)$$

$$A_s' f_s' + \frac{1}{2} b k d f_c = A_s f_y + f_{t,y} b (h - kd)$$

$$\rho' b d f_s' + \frac{1}{2} b k d f_c = \rho b d f_y + f_{t,y} b h - f_{t,y} b k d$$

หารตลอดด้วย bd จะได้

$$\rho' f_s' + \frac{1}{2} k f_c = \rho f_y + \frac{f_{t,y} h}{d} - f_{t,y} k$$

หารตลอดด้วย f_y จะได้

$$\rho' \frac{f_s'}{f_y} + \frac{1}{2} k \frac{f_c}{f_y} = \rho + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k}{f_y}$$

$$\frac{f_c}{f_y} = \frac{2}{k} \left[\rho + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k}{f_y} - \frac{\rho' f_s'}{f_y} \right]$$

$$\text{จาก } n \frac{f_c}{f_y} = \frac{k}{(1-k)}$$

$$\text{จะได้ } \frac{2n}{k} \left[\rho - \frac{\rho' f_s'}{f_y} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k}{f_y} \right] = \frac{k}{1-k}$$

$$\text{จาก } \frac{f_s'}{f_y} = \frac{kd - d'}{d - kd}$$

$$\frac{2n}{k} \left[\rho - \rho' \left(\frac{kd - d'}{d - kd} \right) + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k}{f_y} \right] = \frac{k}{1-k}$$

$$\frac{2n}{k} \left[\rho - \rho' \left(\frac{k - \frac{d'}{d}}{1-k} \right) + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k}{f_y} \right] = \frac{k}{1-k}$$

$$\frac{2n \left[\rho(1-k) - \rho' \left(k - \frac{d'}{d} \right) + \frac{f_{t,y} h(1-k)}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k(1-k)}{f_y} \right]}{1-k} = \frac{k^2}{1-k}$$

คูณตลอดด้วย $1-k$ จะได้

$$2n \left[\rho(1-k) - \rho' \left(k - \frac{d'}{d} \right) + \frac{f_{t,y} h(1-k)}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k(1-k)}{f_y} \right] = k^2$$

$$\left[\rho(1-k) - \rho' \left(k - \frac{d'}{d} \right) + \frac{f_{t,y} h(1-k)}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k(1-k)}{f_y} \right] = \frac{k^2}{2n}$$

$$\rho - \rho k - \rho' k + \rho' \frac{d'}{d} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y} h k}{f_y d} - \frac{f_{t,y} k}{f_y} + \frac{f_{t,y} k^2}{f_y} - \frac{k^2}{2n} = 0$$

จัดสมการให้อยู่ในรูป $Ak^2 + Bk + c = 0$ จะได้

$$\left(\frac{f_{t,y}}{f_y} - \frac{1}{2n} \right) k^2 + \left(-\rho - \rho' - \frac{f_{t,y} h}{f_y d} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right) k + \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right) = 0$$

นำ -1 คูณตลอดทั้งสมการ จะได้

$$\left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right) k^2 + \left(\rho + \rho' + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} + \frac{f_{t,y}}{f_y} \right) k - \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right) = 0$$

$$\text{จาก } k = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$k = \frac{- \left(\rho + \rho' + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} + \frac{f_{t,y}}{f_y} \right) \pm \sqrt{\left(\rho + \rho' + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} + \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)^2 + 4 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right) \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right)}}{2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}$$

$$k = \frac{- \left(\rho + \rho' + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} + \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}{2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)} \pm \sqrt{\frac{\left(\rho + \rho' + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} + \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)^2}{\left[2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right) \right]^2} + \frac{\left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right)}{\left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}}$$

$$\text{จากการพิสูจน์ จะได้ } \mathbf{R}_y = \frac{\left[\rho + \rho' + \frac{f_{t,y}}{f_y} \left(\frac{h+d}{d} \right) \right]}{2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}, \quad \mathbf{Q}_y = \frac{\rho + \rho' \frac{d'}{d} + \frac{f_{t,y} h}{f_y d}}{\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y}}$$

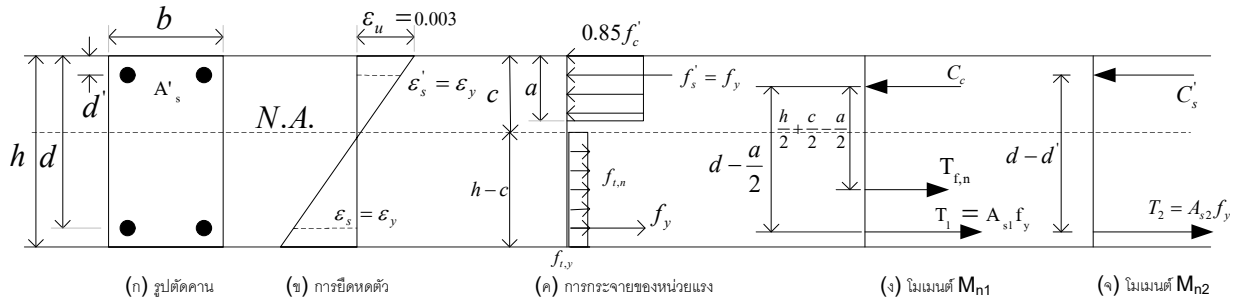
ดังนั้น กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มครากเท่ากับ

$$M_y = M_{y1} + M_{y2} \quad (2.20)$$

$$\text{และแรงกดที่กระทำเมื่อเหล็กเสริมคราก สำหรับ Four-point bend test เท่ากับ } P_y = \frac{32M_y}{7L} \quad (2.21)$$

1.3 กำลังรับแรงค้ดสูงสุด (Nominal moment, M_n)

กำลังรับแรงค้ดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยหาได้จากผลรวมของกำลังรับแรงค้ดสองส่วน ได้แก่ M_{n1} เป็นกำลังรับแรงค้ดสูงสุดของคานที่มีเหล็กเสริมและเส้นใยรับแรงค้ดอย่างเดียวดังรูป 2.8 (ง) โดยพิจารณาจากเหล็กเสริมรับแรงค้ด A_{s1} กับแรงอัดในส่วนของคอนกรีต และแรงค้ดของเส้นใยที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบริเวณใต้แกนสะเทินกับแรงอัดของคอนกรีต และ M_{n2} เป็นกำลังรับแรงค้ดที่ได้จากแรงค้ดในเหล็กเสริมรับแรงค้ดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A_{s2} กับแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงค้ดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A'_s ดังภาพที่ 2.8 (จ)



ภาพที่ 2.8 รูปตัดคาน การยึดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์ M_{n1} โมเมนต์ M_{n2}

จากภาพที่ 2.8 จะได้

$$M_{n1} = (A_s - A'_s)f_y(d - \frac{a}{2}) + f_{t,n}b(h - \frac{a}{\beta_1})(\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2}) \quad (2.22)$$

$$M_{n2} = A'_sf_y(d - d') \quad (2.23)$$

ดังนั้น กำลังรับแรงค้ดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเท่ากับ

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.24)$$

โดยที่

$$f_{t,n} = \psi_n P_f n_e$$

ψ_n = ตัวประกอบประสิทธิภาพเส้นใย (Factor of fiber efficiency)

$$P_f = f_f \frac{\pi d_f^2}{4}$$

$$n_e = \frac{4V_f(0.0667)}{\pi d_f^2 l_f}$$

$$a = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s + f_{t,n} b h}{0.85 f'_c b + f_{t,n} \frac{b}{\beta_1}}$$

$$f'_s = \frac{0.003 E'_s (c - d')}{c} \text{ โดยที่ } c \text{ ได้จาก } c = -R_n \pm \sqrt{R_n^2 + Q_n} \text{ และ } R_n, Q_n \text{ ได้จากการพิสูจน์}$$

จากภาพที่ 2.8 ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$\text{จาก } T + T_f = C_c + C'_s$$

$$A_s f_y + f_{t,n} b (h - c) = 0.85 f'_c b a + f'_s A'_s$$

$$A_s f_y + f_{t,n} b (h - c) = 0.85 f'_c b a + \left[\frac{c - d'}{c} \times 0.003 \right] E_s A'_s$$

เอา c คูณตลอดจะได้

$$A_s f_y c + f_{t,n} b h c - f_{t,n} b c^2 = 0.85 f'_c b a c + (c - d') 0.003 E_s A'_s$$

เนื่องจาก $a = \beta_1 c$

$$\text{จะได้ } A_s f_y c + f_{t,n} b h c - f_{t,n} b c^2 = 0.85 f'_c b \beta_1 c^2 + (c - d') 0.003 E_s A'_s$$

หารตลอดด้วย $-0.85 f'_c b \beta_1$ ตลอดจะได้

$$\frac{-A_s f_y c}{0.85 f'_c b \beta_1} - \frac{f_{t,n} b h c}{0.85 f'_c b \beta_1} + \frac{f_{t,n} b c^2}{0.85 f'_c b \beta_1} = -c^2 - \frac{(c - d') 0.003 E_s A'_s}{0.85 f'_c b \beta_1}$$

จัดสมการให้อยู่ในรูป $A c^2 + B c + C = 0$ จะได้

$$\left(\frac{f_{t,n} b + 0.85 f'_c b \beta_1}{0.85 f'_c b \beta_1} \right) c^2 + \left(\frac{-A_s f_y - f_{t,n} b h + 0.003 E_s A'_s}{0.85 f'_c b \beta_1} \right) c - \frac{0.003 E_s A'_s d'}{0.85 f'_c b \beta_1} = 0$$

จาก $c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ จะได้

$$c = -\frac{(-A_s f_y - f_{t,n} b h + 0.003 E_s A_s')}{2(f_{t,n} b + 0.85 f_c' b \beta_1)}$$

$$\pm \frac{\sqrt{\left(\frac{-A_s f_y - f_{t,n} b h + 0.003 E_s A_s'}{0.85 f_c' b \beta_1}\right)^2 - 4\left(\frac{-0.003 E_s d' A_s' f_{t,n} b - 0.003 E_s A_s' d' \cdot 0.85 f_c' b \beta_1}{(0.85 f_c' b \beta_1)^2}\right)}}{2\left(\frac{f_{t,n} b + 0.85 f_c' b \beta_1}{0.85 f_c' b \beta_1}\right)}$$

จากการพิสูจน์ จะได้

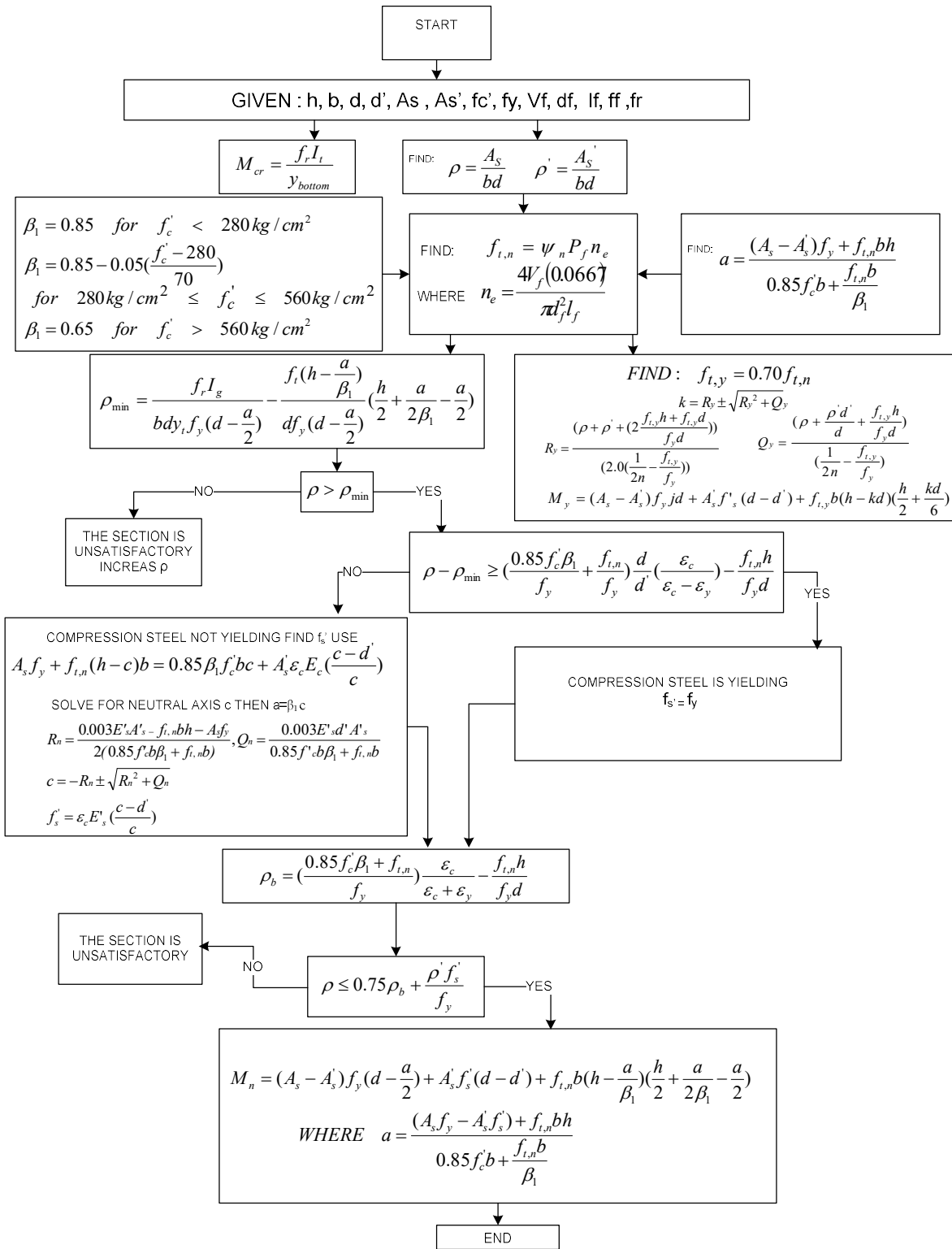
$$R_n = \left(\frac{0.003 E_s A_s' - f_{t,n} b h - A_s f_y}{2(f_{t,n} b + 0.85 f_c' b \beta_1)}\right), \quad Q_n = \frac{0.003 E_s d' A_s'}{0.85 f_c' b \beta_1 + f_{t,n} b}$$

เมื่อนำผลการทดลองของผู้วิจัยมาทำการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) จะได้ค่าตัวประกอบเนื่องจากผลของปริมาณเส้นใยและตัวประกอบประสิทธิภาพเส้นใย (Factor of fiber efficiency) ดังนี้

$$\psi_n = 0.0073(V_f^{-2.8618}) + 0.5575 \quad (2.25)$$

และแรงกดที่กระทำสูงสุด สำหรับ Four-point bend test ตามที่ทดสอบโดยผู้วิจัย [2] เท่ากับ

$$P_n = \frac{32 M_n}{7L} \quad (2.26)$$



ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าลึงรับแรงค้ดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก และค่าลึงรับแรงค้ดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต [1] ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) ได้นั้นคือเหล็กจะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e^-$) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 ถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กก็เป็นปัจจัย สำคัญของการควบคุมความเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

1. กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

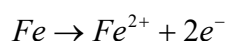
เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ ก็ต่อเมื่อ เงื่อนไขทั้ง 3 ประการนี้ต้องเกิดขึ้น

1. ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยสาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนเนชัน (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก ซึ่งกลไกการทำให้ความเป็นด่างลดลงโดยแต่ละสาเหตุจะได้แยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างหากต่อไป

2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และพอเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่แล้ว

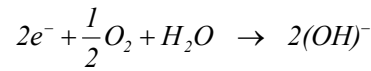
3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก

กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (ภาพที่ 2.10) ในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นด่างในบริเวณที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่ มีค่าความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังสมการต่อไปนี้

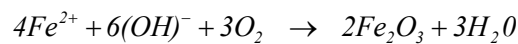


โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ต่อจากนั้น $2e^-$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะ

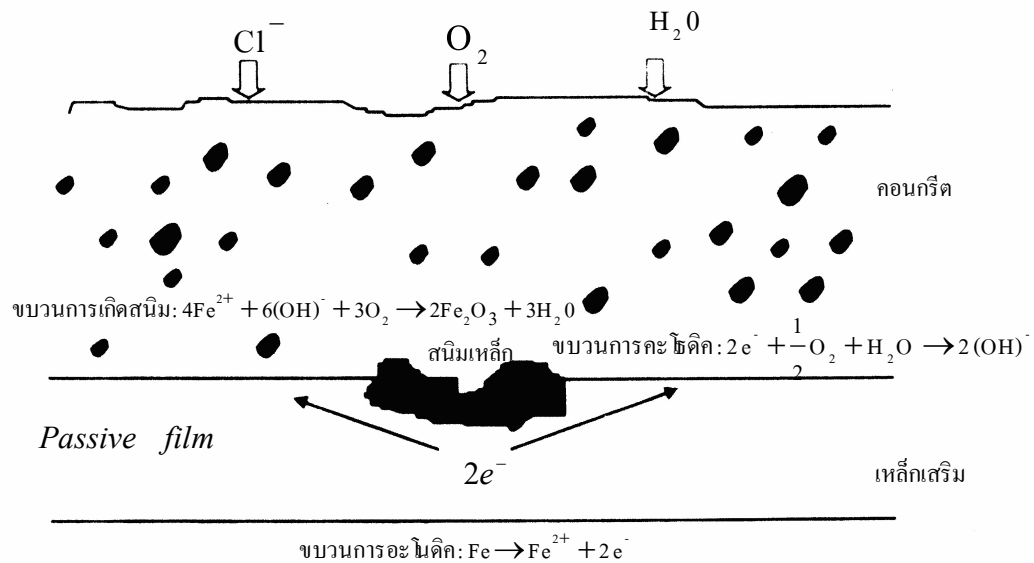
ไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ($(OH)^-$) ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการคะโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือเฟอริกออกไซด์ หรือ สนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ซึ่งหมายความว่าสนิมอาจจะเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้



ภาพที่ 2.10 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงลงไปจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการ คือ

1) ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลง เนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน (e^-) ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงในบริเวณดังกล่าวลดลงตามขนาดของเหล็กที่ลดขนาดลง

2) การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาตรมากกว่าเหล็กเดิมที่สลายตัวเข้าสู่สารละลาย ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กอาจมีปริมาตรมากกว่า 6 เท่าของเหล็กเดิม ถ้าปริมาณน้ำและออกซิเจนมีมากและบริเวณที่เกิดสนิมอาจเป็นบริเวณข้างเคียงบริเวณที่เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนก็ได้ ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ (Splitting crack)

ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้ก็คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลง การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย

3. การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation)

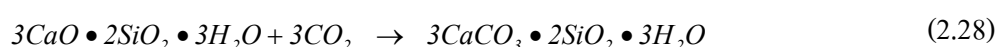
คาร์บอนเนชันเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลิตผลบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กลไกของการเกิดคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการของปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



หรือ



ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.27) มากกว่า (2.28) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาก็ต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของ

สารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอนेटไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีตลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนชั่นจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่าน โครงสร้างช่องว่าง (Pore structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนेटไปแล้ว ซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น

เนื่องจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอนชั่น เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะมีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังนั้น คาร์บอนชั่นจะรุนแรง ในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-dry) นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก

ผลของคาร์บอนชั่น

คาร์บอนชั่นทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนชั่นต่ำลง
 2) ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนชั่นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต

3) ทำให้เกิดการหดตัว (Carbonation shrinkage) ซึ่งเป็นผลมาจากที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ภายใต้อิทธิพลของแรงอัดที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอนชั่นทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือ กรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่เป็นผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น

- 1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นรุนแรง
- 2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมากก็จะทำให้การเกิดคาร์บอนชั้นมาก
- 3) อุณหภูมิสูงก็จะทำให้ปฏิกิริยาการคาร์บอนชั้นดำเนินไปเร็ว
- 4) ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำ จะเกิดคาร์บอนชั้นได้เร็ว
- 5) การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไป

การป้องกันการเกิดคาร์บอนชั้น

- 1) ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมเต็มช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟุ่ม จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นลดลง
- 2) บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น
- 3) สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ควรออกแบบคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมให้หนาขึ้น ถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คาร์บอนชั้นรุนแรง

4. การเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยคลอไรด์

กลไกของการมีคลอไรด์ในคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้เกิดความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (วสท. 1014 - 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้สารละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี ดังต่อไปนี้

- 1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary suction)

- 2) การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต
- 3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมแพร่ผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก

ในบริเวณใต้น้ำทะเล ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อย เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่าปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้ง โดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิมมิด (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง ที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งให้ค่าความเป็นค่าของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

สถานะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) โดยกลไก ต่อไปนี้

1) Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับ โดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Fridel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium chloroferrite) หรือแม้แต่อยู่นใน โครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึด ได้ด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้ บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหิน ได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

1) ในกรณีของสถานะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวของคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สถานะแวดล้อมเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสถานะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีที่สถานะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากนั้นก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่าในบริเวณกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสถานะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

การป้องกันการเกิดสนิมโดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม

1) ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำจะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยาก เนื่องจากความสามารถในการแพร่จะน้อยลง ซึ่งจะกระทำได้โดย การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อย การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม การใช้สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสม

2) ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต เช่น Epoxy เป็นต้น แต่มักมีราคาแพง

3) ใช้สารผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium nitrite ที่สามารถช่วยทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic) นั้นเกิดยากขึ้น

4) ใช้เหล็กเสริมที่ไม่เป็นสนิม หรือเคลือบผิวเหล็กเสริม แต่เป็นวิธีที่มีราคาแพงข้อเสนอนี้ประการหนึ่งคือ ต้องออกแบบคอนกรีตไม่ให้แตกร้าว เพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวจากการรับแรงหรือจากปัญหาอื่นๆ เช่นการหดตัวหรือถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวให้เล็กที่สุดเท่าที่ทำได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก

ปรัชญา จุฬาลง และนัฐภา ภาระศรี (2547) รายงานว่าการใช้เส้นใยอะคริลิกและเส้นใยเหล็กเป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีต ช่วยทำให้กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมากกว่าคานคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มเมื่อใช้ปริมาณเหล็กเสริมภายในคานคอนกรีตเท่ากัน

อภิรักษ์ ภูซัน และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา (2548) รายงานว่า เมื่อใช้ปริมาณเหล็กเสริมหลักในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากัน การใช้เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะคริลิก ผสมในส่วนผสมคอนกรีตช่วยให้กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใย

Altun et al. (2005) กล่าวว่าไว้ว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กมีกำลังรับแรงสูงสุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสรุปว่า ส่วนผสมเส้นใยเหล็ก ที่ 30 kg/m^3 ดีกว่าส่วนผสมเส้นใยเหล็ก ที่ 60 kg/m^3 เพราะ 1.การต้าน Bending moment และการ Crack ดีกว่า 2.ความสามารถในการรับ Bending moment เพิ่มขึ้น และ 3. ความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคลอไรด์

Mangat and Gurusamy (1987) รายงานว่า ความกว้างของรอยแตกร้าวที่ยอมให้เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นที่น่าพอใจสำหรับคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่หลอมแล้วทำการตัดออกมา ค่าที่น้อยที่แนะนำสำหรับคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็ก สามารถช่วยให้ความกว้างของรอยแตกร้าว ลดน้อยลง จากการสังเกตภายใต้การทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

Granju' and Balouch (2003) รายงานว่ามีการกักกรองของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กเพียงเล็กน้อย และความสามารถในการรับแรงค้ำหลังเกิดการกักกรองสูงขึ้น

Morse and Williamson (1977) รายงานว่าไม่สามารถควบคุมการเกิดความกว้างของรอยแตกร้าวให้มีขนาดเล็กกว่า 0.01 นิ้ว (0.25 มิลลิเมตร) ได้ ทั้งนี้เนื่องจากความกว้างของช่องที่จะให้น้ำทะเลผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากักกรองกับเส้นใยเหล็กซึ่งเป็นผลต่อเนื่องให้เกิดการแตกร้าวได้ ในทางตรงกันข้ามเส้นใยจะเป็นผลทำให้เกิดการแตกร้าวที่กว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการกักกรองที่ดียิ่งขึ้น การซึมผ่านของอากาศเข้าไปยังคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กเท่ากับ 65% ซึ่งเป็นสภาพที่แท้จริงที่ถูกรับของน้ำเค็มในธรรมชาติ

Ashour and Wafa (1993) รายงานว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก ปริมาณเส้นใยต่างกันและนำมาทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าว ความทนทานของคานคอนกรีต พบว่าเส้นใยเหล็ก มีผลทำให้กำลังเพิ่มขึ้น ความทนทานเพิ่มขึ้น และคานมีกำลังต้านทานการร้าวสูงขึ้น

Bayasi and Zeng (1993) รายงานว่าคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสม Polypropylene fiber มีค่าการยุบตัว กำลังรับแรงอัด พฤติกรรมการแตกร้าว ความทนทานต่อแรงประทะ และความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสม Polypropylene fiber

Singh et al. (2006) รายงานว่าคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็ก (SFRC) ซึ่งมีส่วนผสมของ เส้นใยเหล็ก 1.0%, 1.5% และ 2.0% ของปริมาตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของ หน่วยแรง กับ cycle of failure ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ส่วนผสมเส้นใย 1.0% ซึ่งการทดลองส่วนผสมที่แตกต่างกันนี้ ทำให้สามารถสร้างสมการขึ้นมาเพื่อทำนายกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กได้

Mangat and Gurusamy (1988) รายงานว่าเส้นใยเหล็กที่ถูกฝังลงไปคอนกรีตยังคงสภาพเดิม มีการกักกรองเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง มีสนิมเกิดขึ้นเป็นจุดๆในเส้นใยเหล็กที่เกิดการกักกรอง แต่ไม่ได้ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงค้ำเพิ่มขึ้น

Mangat and Gurusamy (1987) รายงานว่าคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.4% ไม่สามารถทำอันตรายกับคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กได้

สุรัชย์ สุทธิธรรมมา (2549) รายงานว่าการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตมีผลทำให้คุณสมบัติในด้านการต้านทานการซึมผ่านของคอนกรีตต่ำลง และยังพบว่าการผสมเส้นใยเหล็กในปริมาณ 0.5% โดยปริมาตร มีผลทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านดีกว่าการผสมเส้นใยเหล็กในปริมาณ 1.0% โดยปริมาตร

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (Ordinary Portland cement) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้างในการหล่อตัวอย่างทั้งหมด

2. ทราย (Fine aggregate)

ทรายที่ใช้เป็นทรายบกในจังหวัดชลบุรี ทำการทดสอบ Sieve Analysis แล้วพบว่า ทรายที่นำมาใช้เป็นทรายที่มีขนาดละเอียด สามารถใช้ผสมคอนกรีตได้เลย

3. หิน (Coarse aggregate)

หินที่ใช้เป็นหินปูน (Limestone) ทำการทดสอบ Sieve Analysis แล้วพบว่า มีขนาดละเอียด จึงต้องคัดแยกขนาดของหินแต่ละขนาดออกจากกัน จากนั้นจึงนำหินแต่ละขนาดมาผสมกันให้ได้ขนาดละเอียดดี จึงจะนำไปใช้ผสมคอนกรีตได้

4. น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตคือน้ำประปาที่ใช้อุปโภค ภายในห้องปฏิบัติการคอนกรีตและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

5. เส้นใย (Fiber)

เส้นใยที่ใช้ในการผสมเพิ่มในคอนกรีต คือ เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) โดยมีรายละเอียดและคุณสมบัติของเส้นใยดังนี้

เส้นใยเหล็กที่ใช้ในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตในครั้งนี้ ผลิตโดย บริษัท ดรามา็กซ์ (Dramix) มีชื่อเรียกว่า “RC-65/35-BN” ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของเส้นใยเหล็ก (Steel fiber)

RC-65/35-BN นี้ เป็นลวดเส้นใยเหล็กรีดเย็น มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ที่ปลายทั้งสองข้างหักงอ และมีกาวยึดลวดแต่ละเส้นที่อยู่ในกลุ่ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) เท่ากับ 0.55 มิลลิเมตร ค่าตัวเลข 35 ที่ปรากฏในชื่อ หมายถึง ความยาวของลวดเส้นใยเหล็ก มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และค่าตัวเลข 65 หมายถึง ค่าอัตราส่วนรูปทรง (Aspect ratio) ซึ่งการแบ่งชั้นประสิทธิภาพของเส้นใย หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเส้นใย ซึ่งในที่นี้อัตราส่วนรูปทรงมีค่าเท่ากับ 64 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของลวดเส้นใยจะแบ่งได้เป็นชั้น 45 65 และ 80 ลวดเส้นใยเหล็ก “RC-65/35-BN” จึงถูกจัดให้อยู่ในชั้น 65 เส้นใยเหล็กชนิดนี้ในน้ำหนัก 1.0 กิโลกรัมจะมีลวดเส้นใยเหล็ก ประมาณ 14,500 ชิ้น และมีกำลังรับแรงดึงน้อยที่สุด เท่ากับ 11,213 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6. เหล็กเสริม (Reinforcing steel)

เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบคานคอนกรีต เป็นเหล็กข้ออ้อย (บลส.) ชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 และ 16 มิลลิเมตร และเหล็กกลม (บลส.) ชั้นคุณภาพ SR24 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) แบบหล่อตัวอย่าง

แบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย

1.1) แบบหล่อนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 15 x 30 x 180 เซนติเมตร แสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แบบหล่อนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.2) แบบหล่อตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร แสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร

1.3) แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) 10 เซนติเมตร และสูง (Height) 20 เซนติเมตร แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แบบหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร

1.4) แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) 15 เซนติเมตร และสูง (Height) 30 เซนติเมตร แสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร

2) เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete mixer)

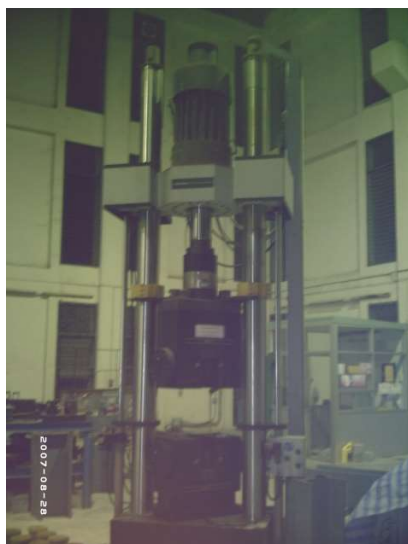
เครื่องผสมคอนกรีต แสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องผสมคอนกรีต

3) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ขนาด 150 ตัน

เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 150 ตัน แสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ลักษณะของเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 150 ตัน

4) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression testing machine)

เครื่องทดสอบกำลังอัดขนาด 300 ตัน แสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบกำลังอัด

5) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ขนาด 30 ตัน

เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 30 ตัน แสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 30 ตัน

6) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital balance)

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล แสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

7) โต๊ะเขย่าคอนกรีต (Vibrating table)

โต๊ะเขย่าคอนกรีต แสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 โต๊ะเขย่าคอนกรีต

10) อุปกรณ์วัดหน่วยการยืดหดของเหล็กเสริม (Electrical strain gauge of steel)

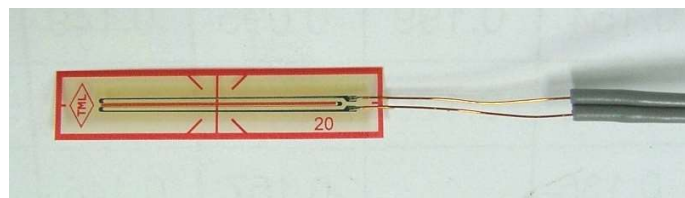
อุปกรณ์วัดหน่วยการยืดหดของเหล็กเสริม แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 อุปกรณ์วัดหน่วยการยืดหดของเหล็กเสริม

11) อุปกรณ์วัดหน่วยการหดตัวของคอนกรีต (Electrical strain gauge of concrete)

อุปกรณ์วัดหน่วยการหดตัวของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 อุปกรณ์วัดหน่วยการหดตัวของคอนกรีต

12) ผลิตภัณฑ์กันซึมโพลีเมอร์สังเคราะห์

มีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมที่มีลักษณะพิเศษดีกว่าซีลีโคนโดยทั่วไป ซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุในการห่อหุ้มอุปกรณ์วัดการเสียดรูปของเหล็กเสริม (Electrical strain gauge of steel) เพื่อป้องกันน้ำ ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 ผลิตภัณฑ์กันซึมโพลีเมอร์สังเคราะห์

13) กาวติดอุปกรณ์วัดหน่วยการยึดหดของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 กาวติดอุปกรณ์วัดหน่วยการยึดหดของเหล็กเสริม

รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย

ในการศึกษากำลังรับแรงดัดใช้คานที่มีขนาดหน้าตัด 15x27.5 เซนติเมตร และยาว 180 เซนติเมตร โดยในการทดสอบนี้ได้ทำการเสริมวัสดุเส้นใยเหล็กที่ใช้เสริมกำลังภายในคานคอนกรีตโดยใช้เหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD 40 ขนาด DB12 และ DB16 เป็นวัสดุเสริมหลัก และใช้เหล็กกลม ชั้นคุณภาพ SR 24 RB 6 เป็นเหล็กปลอกโดยมีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 10 เซนติเมตร ในการหล่อคานคอนกรีตนี้กำหนดให้คานคอนกรีตนี้มีระยะหุ้มของคอนกรีตเท่ากับ 2.5 เซนติเมตรและ 1.5 เซนติเมตร โดยจะทำการหล่อตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ จำนวนทั้งหมด 7 ตัวอย่าง เมื่ออายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างไปเผชิญสภาพแวดล้อมตามที่กำหนดไว้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก

Mix id.	Mix details	ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m ³)						w/c	s/a	% fiber
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	SP	fiber			
C1	Fc' = 240 ksc / No fiber	304	167	909	1,024	1.52	-	0.55	0.47	-
C2	Fc' = 240 ksc / Fiber 0.5%	304	167	909	1,024	1.52	39.25	0.55	0.47	0.5
C3	Fc' = 350 ksc / Fiber 0.5%	405	152	851	957	2.03	39.25	0.38	0.47	0.5

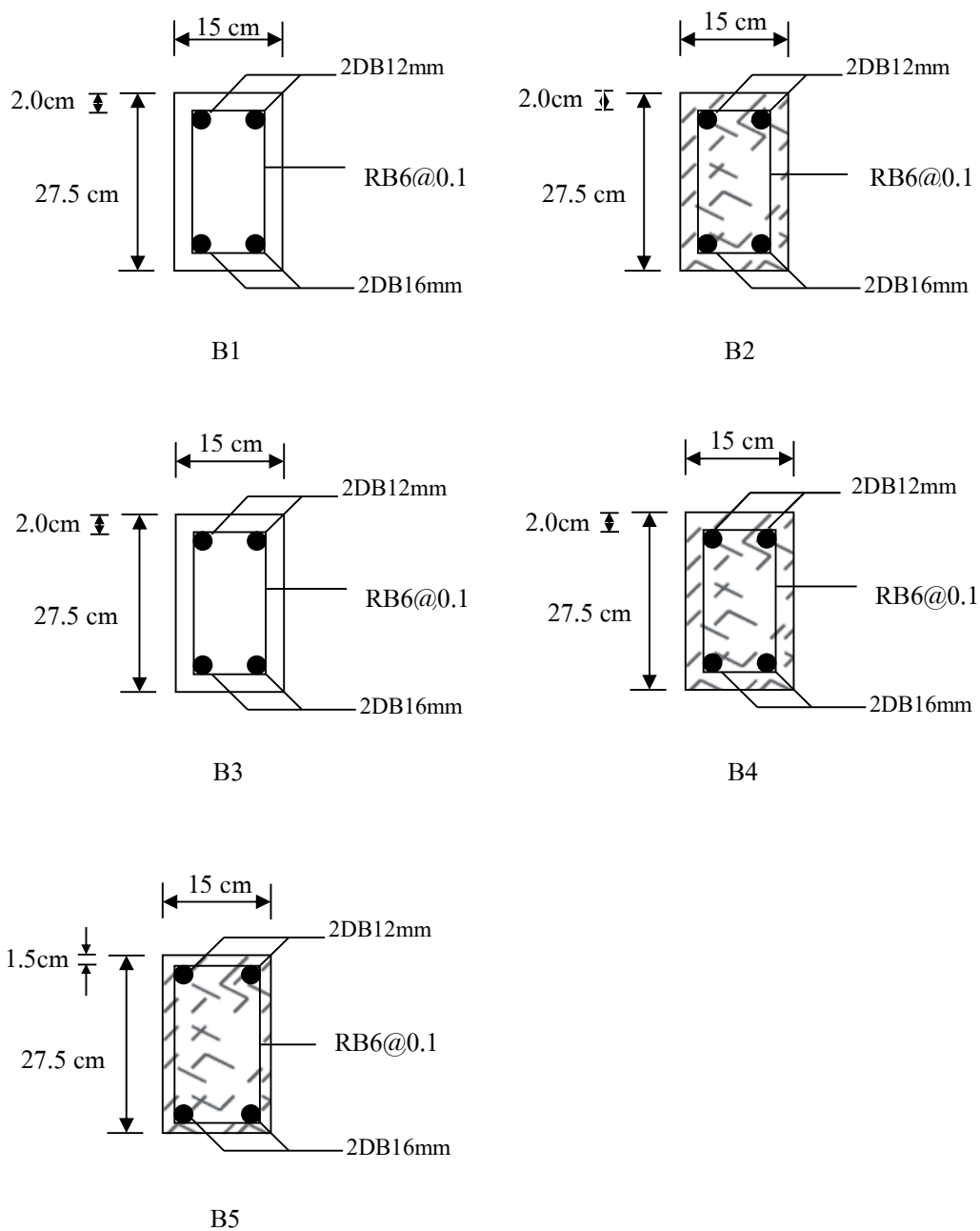
จากตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีตนี้ เป็นส่วนผสมที่ใช้จริงในการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก เพื่อใช้ในการศึกษาและทดสอบ คุณสมบัติต่างๆของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กในโครงการนี้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดคานและสิ่งแวดล้อมที่เผชิญ

Beam no.	% fiber	f'_c (kg/cm ²)	Covering (cm)	สภาพสิ่งแวดล้อม
B1	-	300	2.0	แช่น้ำ
B2	0.5	300	2.0	แช่น้ำ
B3	-	300	2.0	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5%
B4	0.5	300	2.0	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5%
B5	0.5	300	1.5	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5%
B6	0.5	400	2.0	แช่น้ำ
B7	0.5	400	2.0	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5%

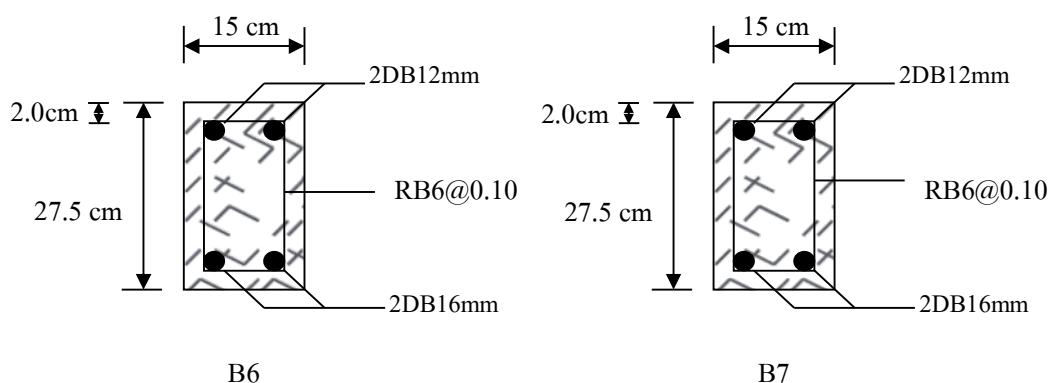
จากตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดคานและสิ่งแวดล้อมที่เผชิญในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อกำลังรับแรงค้ดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก

คานกลุ่ม $f'_c = 240 \text{ ksc}$



ภาพที่ 3.18 รายละเอียดหน้าตัด เหล็กเสริม และเส้นใยเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในกลุ่ม $f'_c = 240 \text{ ksc}$

คานกลุ่ม $f'_c = 350 \text{ ksc}$



ภาพที่ 3.19 รายละเอียดหน้าตัด เหล็กเสริม และเส้นใยเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในกลุ่ม $f'_c = 350 \text{ ksc}$

รายละเอียดการทดสอบ

1. การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Flexural strength test)

วิธีการทดลองทดสอบ กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคอนกรีต โดยเป็นแบบ Simple beam with four-point bend test

1. รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้น เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัด 15x27.5 เซนติเมตร ยาว 180 เซนติเมตร การเสริมเหล็ก แสดงรายละเอียด ดังภาพที่ 3.18 และภาพที่ 3.19

2. ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบหาลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้วิธีการทดสอบแบบ Simple beam with four-point bend test ตามมาตรฐาน ASTM C 78 [10] ดังภาพที่ 3.20 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

2.1 ติดตั้งจุกรองรับคานบนแท่นคานเหล็ก โดยที่จุดที่รองรับคานเป็นแบบ Roller support มีแผ่นเหล็กและปูนขาวอยู่ระหว่างคานกับจุดที่รองรับคาน เพื่อให้ผิวสัมผัสของคานกับจุกรองรับแนบสนิทโดยตลอด ความกว้างของคาน ติดเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)

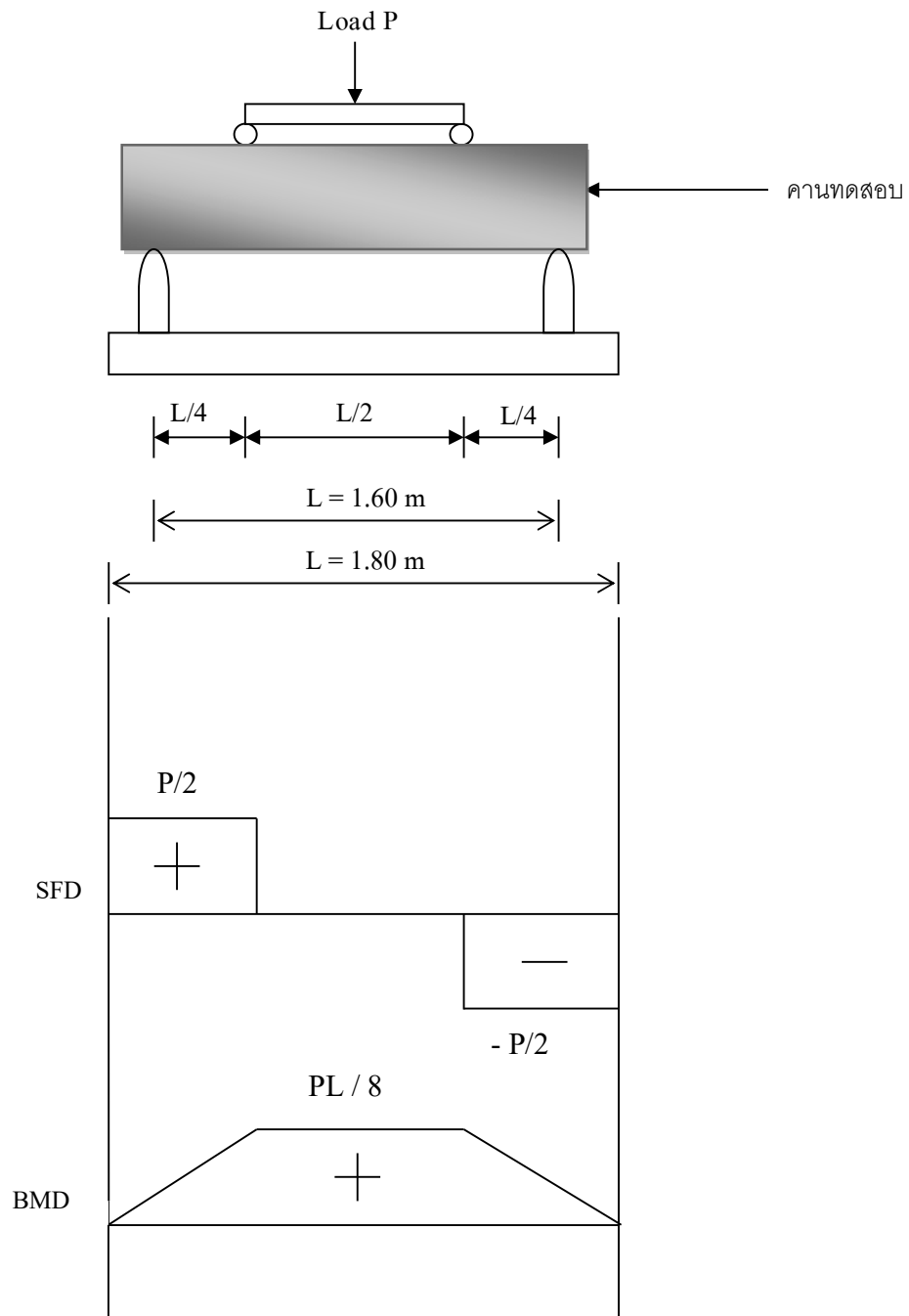
2.2 หาตำแหน่งกึ่งกลางของคานระหว่างจุดรองรับทั้งสอง กำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับคาน (Gauge length) เท่ากับ 160 เซนติเมตร และแบ่งระยะออกเป็นดังภาพที่ 3.20

2.3 วางคานทดสอบลงบนแท่นรองรับ โดยให้ตำแหน่งเส้นจุดรองรับคานตรงกับฐานของแท่น

2.4 ปรับให้อุปกรณ์กดด้านบนมาวางบนก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเส้นที่ขีดไว้

2.5 เริ่มทดสอบโดยกำหนดให้กดตัวอย่างคานในอัตรา 2 มิลลิเมตร/นาที

2.6 กดทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ



ภาพที่ 3.20 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

3. การวัดแรงที่กระทำต่อคาน

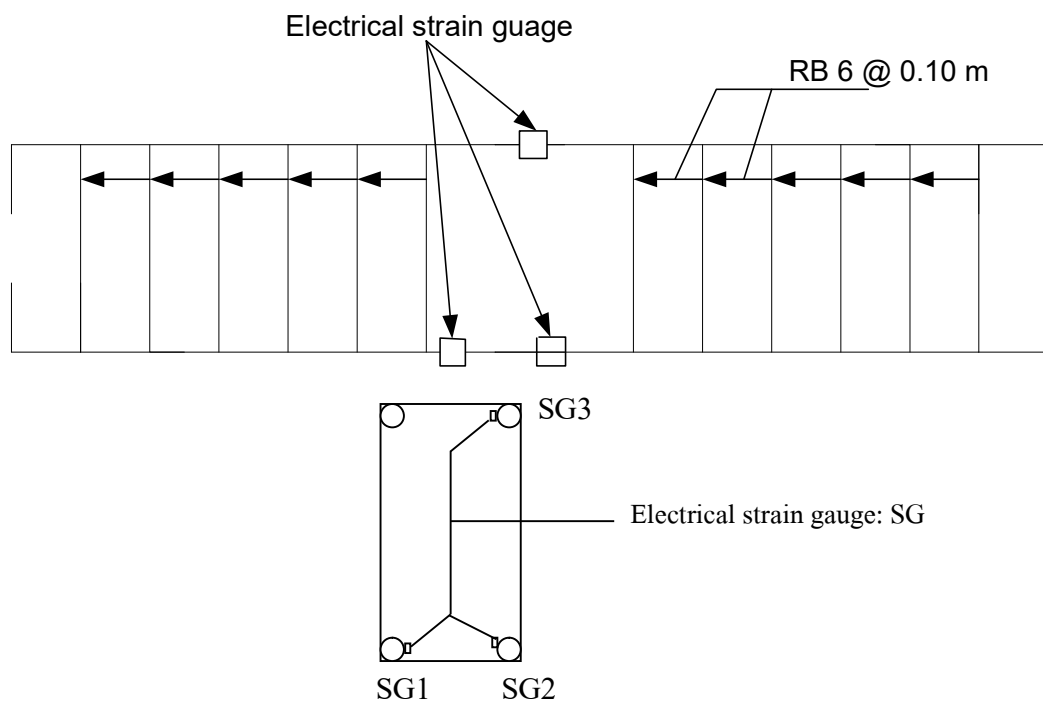
แรงที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้เครื่อง Universal Testing Machine เป็นตัวให้กำเนิดแรงกระทำต่อคาน ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการให้แรงกระทำเป็นอัตราเคลื่อนที่ของหัวกด ในที่นี้ใช้การควบคุมแบบอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาที

4. การวัดการโก่งตัวของคาน

การทดสอบในส่วนนี้ใช้ อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) จำนวน 1 ชุด ติดตั้งที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับทั้งสองด้านล่างคาน เพื่อวัดการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน ความละเอียดของอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่นี้ เท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร

5. การวัดหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุเสริมกำลังภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

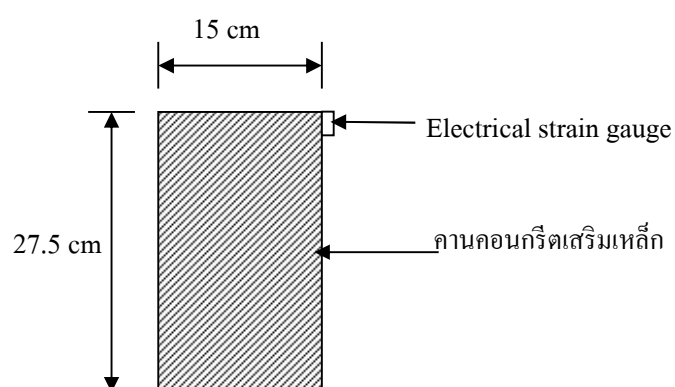
ใช้ Electrical - strain gauge ในการวัดระยะการยืดหดตัวของเหล็กที่เสริมกำลังภายในคานคอนกรีต ซึ่งอุปกรณ์นี้มีความยาว 10 ± 5 มิลลิเมตร ติดตั้งอุปกรณ์นี้บนเหล็กที่ใช้เสริมกำลังที่ตำแหน่งด้านล่างและด้านบน ดังภาพที่ 3.21 ก่อนหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น Electrical - strain gauge นี้ถูกฝังอยู่ในคานคอนกรีตในระหว่างการทดสอบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ความละเอียดของ Electrical - strain gauge เท่ากับ 1 ไมครอน



ภาพที่ 3.21 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical - strain gauge บนเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

6. การวัดหน่วยการหดตัวที่ผิวด้านบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ใช้ Electrical - strain gauge ชนิดติดบนผิวคอนกรีต ในการวัดหน่วยการหดตัวที่ผิวด้านบนของคานคอนกรีต โดยติดอุปกรณ์นี้ที่ผิวด้านบนของคอนกรีตบริเวณกึ่งกลางคานซึ่งอุปกรณ์นี้มีความยาว 20 ± 5 มิลลิเมตร ความละเอียดของ Electrical - strain gauge เท่ากับ 1 ไมครอน โดยมีตำแหน่งในการติดตั้ง Electrical - strain gauge ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical - strain gauge บนผิวคอนกรีตเพื่อวัดหน่วยการหดตัวของคอนกรีต

7. การบันทึกข้อมูล

การบันทึกข้อมูล แรงที่กระทำบนคาน การโก่งตัวของคานและหน่วยการยืดหดตัวต่างๆ ใช้ Portable data logger รุ่น TDS-303 ในการเก็บข้อมูล ข้อมูลจากเครื่อง Data logger สามารถบันทึกในแผ่นดิสก์ (Floppy disk) ของเครื่อง หรือพิมพ์ออกมาจาก Data logger เครื่อง Data logger สามารถตั้งให้บันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ หรือ แบบควบคุมด้วยตนเองก็ได้ ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้การพิมพ์ออกมา โดยการควบคุมด้วยตนเอง

2. การทดสอบกำลังของคอนกรีต

1. การทดสอบกำลังรับแรงอัด (f'_c) และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (f'_t) ของคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้แบบหล่อ ดังนี้

1.1) แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\varnothing 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ เพื่อทดสอบหา f'_c ดังภาพที่ 3.23

จำนวน 3 ลูก ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน

จำนวน 3 ลูก ทดสอบ ณ วันที่ทำการทดสอบคาน

1.2) แบบตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\varnothing 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ เพื่อทดสอบหา (f'_t)

จำนวน 3 ลูก ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน

จำนวน 3 ลูก ทดสอบ ณ วันที่ทำการทดสอบคาน

2. ทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์ ของคอนกรีตตัวอย่าง

ทรงกระบอกขนาด $\varnothing 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$

จำนวน 3 ลูก ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน

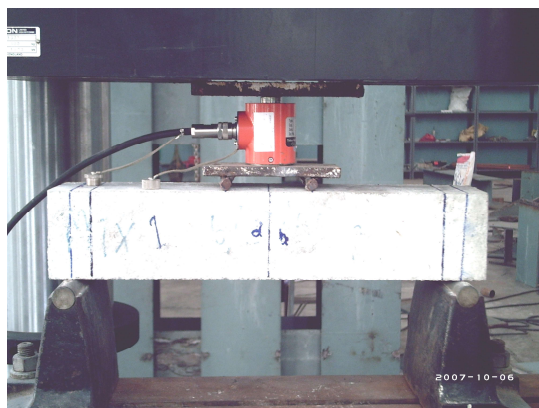
3. ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงค้ำ F_r ของคอนกรีตตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.24

รูปคานทดสอบขนาด $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$

จำนวน 3 คาน ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน



ภาพที่ 3.23 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (f'_c) ของตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 3.24 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (f_r) ของตัวอย่างคอนกรีต

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- 1) ตัดเหล็ก DB ϕ 16 mm , DB ϕ 12 mm ขนาดความยาว 1.90 เมตร และ RB ϕ 6 mm

ขนาดความยาว 85cm และ 90 cm ดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 การตัดเหล็กเสริมเพื่อใช้ทำคานตัวอย่างทดสอบ

- 2) ทำการตัดปลายของเหล็กเสริม โดยเหล็กเสริมบน DB ϕ 12 mm ให้งอลง และ DB12 ให้งอขึ้น

ตามลำดับ ดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 การตัดเหล็กเสริมเพื่อใช้ทำคานตัวอย่างทดสอบ

- 3) ทำการตัดเหล็ก RB ϕ 6 mm เพื่อใช้เป็นเหล็กปลอก โดยขนาดความยาว 85 cm จะใช้กับระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) 2.0 cm และขนาดความยาว 90 cm ใช้กับระยะหุ้มเหล็กเสริม 1.5 cm
- 4) ทำการติด Strain gauge ที่เหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่าง (รายละเอียดดังแสดงข้างต้น)
- 5) ประกอบเหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่างเข้ากับเหล็กปลอก เพื่อใช้เป็นคานทดสอบ ดังภาพที่

3.27



ภาพที่ 3.27 การประกอบคานตัวอย่างทดสอบ

6) ทำการติดลูกปูนเพื่อให้ได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมที่ต้องการ ดังภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 การติดลูกปูนเพื่อให้ได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมที่ต้องการ

7) วัดความต้านทานของ Strain gauge โดยความต้านทานที่ได้ต้องอยู่ในช่วง $119.8 \pm 0.5 \Omega$

8) ทำการติดส่วนหูสำหรับยกคาน โดยใช้เหล็ก RB ϕ 9 mm

9) นำแบบตัวอย่างคานใส่ลงในแบบหล่อตัวอย่างคานทดสอบ ดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.29 การนำคานตัวอย่างที่ประกอบเสร็จใส่ลงในแบบหล่อคานทดสอบ

2. ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่าง

- 1) คำนวณส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทำคานทดสอบ
- 2) ล้างหินและทรายที่ใช้ผสมคอนกรีตที่ใช้ทำคานทดสอบ
- 3) หาปริมาณความชื้นและค่าการดูดซึมของทรายและหินที่ใช้ทดสอบ ดังภาพที่ 3.30 และ ภาพที่

3.31

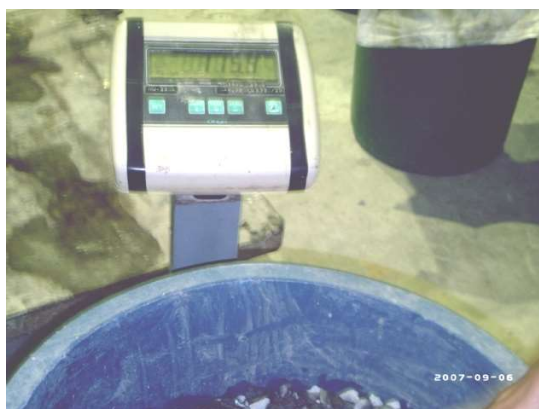


รูป 3.30 การหาค่า Absorption ของทรายที่ใช้ในการผสม



ภาพที่ 3.31 การทดสอบ Cone Sand Test เพื่อหาค่า Absorption ของทรายที่ใช้ในการทดลอง

4) ชั่ง ตวง ส่วนผสมที่ใช้ทำการผสม ดังภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.32 ชั่งตวงส่วนผสมที่ใช้สำหรับทำคานตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

3. ขั้นตอนการผสมและหล่อตัวอย่าง

1) เตรียมตัวอย่างแบบทดสอบกำลังรับแรงอัด , กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงคด ของคอนกรีตที่ใช้
ในคานตัวอย่างทดสอบ ดังภาพที่ 3.33 และ ภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.33 แบบทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง



รูป 3.34 แบบทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

2) ทำการผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 3.35



ภาพที่ 3.35 การผสมคอนกรีตที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทดลอง

3) นำคอนกรีตผสมมาทำการหาค่าการยุบตัว ดังภาพที่ 3.36



ภาพที่ 3.36 การหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ในการหล่อคานตัวอย่างทดลอง

4) นำคอนกรีตที่ผสมแล้วใส่ลงในแบบหล่อคานทดสอบ พร้อมจี้ด้วยเครื่องจี้เขย่าคอนกรีต ดังภาพที่

3.37



ภาพที่ 3.37 การจี้แบบหล่อคานตัวอย่างทดลองด้วยเครื่องจี้เขย่าคอนกรีต

5) นำคอนกรีตส่วนที่เหลือหลังจากใส่ในแบบหล่อคานทดสอบไปใส่ในตัวอย่างทดสอบกำลังรับ

แรงอัด, กำลังรับแรงดึง โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น กระทุ้ง 25 ครั้ง / ชั้น ดังภาพที่ 3.38



ภาพที่ 3.38 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงที่ใช้ในการทดลอง

4. ขั้นตอนการป่มตัวอย่างคอนกรีตและกานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1) ทำการถอดแบบหล่อออก และทำความสะอาดแบบหล่อ ดังภาพที่ 3.39



ภาพที่ 3.39 การถอดตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ

2) ตรวจสอบแบบคานและตัวอย่างคอนกรีตว่ามีโพรงเกิดขึ้นหรือไม่

3) บ่มตัวอย่างกานคอนกรีตด้วยกระสอบ และนำตัวอย่างทดสอบไปบ่มแบบขังน้ำ การบ่มจะใช้
เวลาทั้งสิ้น 28 วัน ดังภาพที่ 3.40 และภาพที่ 3.41

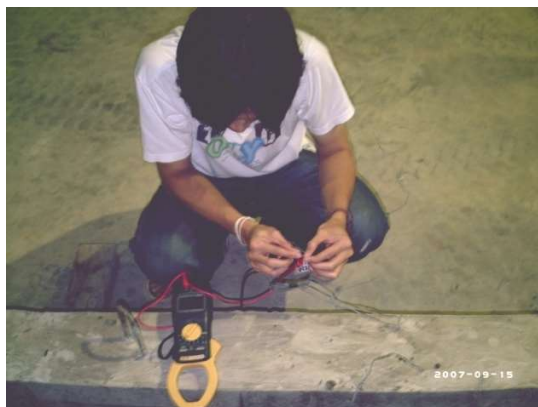


ภาพที่ 3.40 การบ่มตัวอย่างกานทดสอบด้วยกระสอบ



ภาพที่ 3.41 การบ่มตัวอย่างทดสอบแบบขังน้ำ

4) วัดความต้านทานของ Strain gauge ดังภาพที่ 3.42



ภาพที่ 3.42 การวัดความต้านทานของ Strain gauge หลังจากแกะออกจากแบบหล่อคาน

5) นำคานแช่ลงในบ่อ หลังจากตีบ่มครบ 28 วัน ดังภาพที่ 3.43



ภาพที่ 3.43 บ่อสำหรับแช่คานคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

5. การแช่ตัวอย่างคานทดสอบลงในบ่อทดสอบ

แช่คานลงในบ่อทดสอบที่มีสภาวะแวดล้อมต่างกัน 2 แบบ คือแช่ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ (ความเข้มข้น 5%) และแช่ในน้ำเปล่า โดยจะนำคาน B3, B4, B5 และ B7 ลงแช่ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ (ความเข้มข้น 5%) และนำคาน B1, B2 และ B6 แช่ในน้ำเปล่า ดังภาพที่ 3.44 และ ภาพที่ 3.45

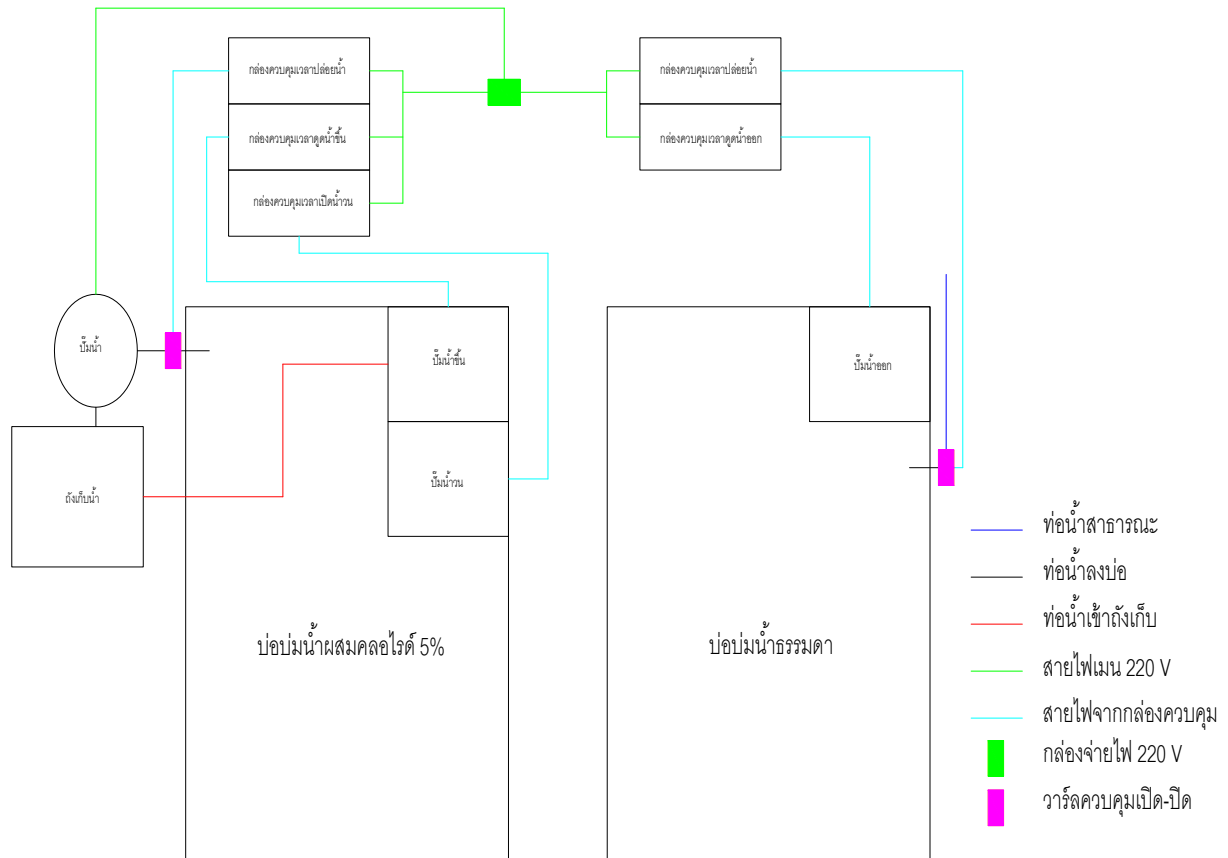


ภาพที่ 3.44 คานทดสอบที่แช่ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์



ภาพที่ 3.45 คานทดสอบที่แช่ในน้ำเปล่า

ระบบการทำงานเปียกสลับแห้ง (Wet and dry cycle system)



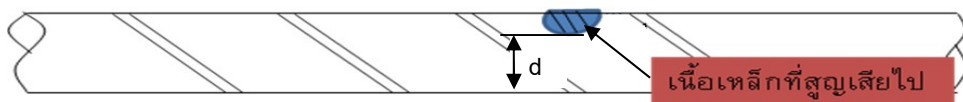
ภาพที่ 3.46 ระบบการทำงานเปียกสลับแห้ง (Wet and dry cycle system)

ระบบนี้ทำขึ้นเพื่อให้การทำงานของระบบ เปียกสลับแห้ง เป็นแบบอัตโนมัติ จากที่ต้องคอยไปปล่อยน้ำจากถังเข้าสู่บ่อแช่ สูบน้ำจากบ่อแช่กลับขึ้นไปเก็บบนถัง ระบบนี้ก็จะคอยควบคุมแทน แต่เพื่อที่จะไม่ให้เกิดความเสียหายกับระบบ เราต้องคอยดูแลระบบ อย่างน้อย 2 สัปดาห์ต่อครั้ง การทำงานของระบบนี้มี 2 บ่อบ่ม โดยการทำงานของ 2 บ่อนี้ จะแยกออกจากกันอย่างอิสระ เนื่องจากใช้กล่องควบคุมแยกออกจากกัน การทำงานของระบบนี้จะใช้การตั้งเวลา เพื่อให้ปั๊มสูบน้ำทำงาน ระบบนี้จึงสามารถที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไข เพื่อใช้กับโครงการอื่นๆ ได้

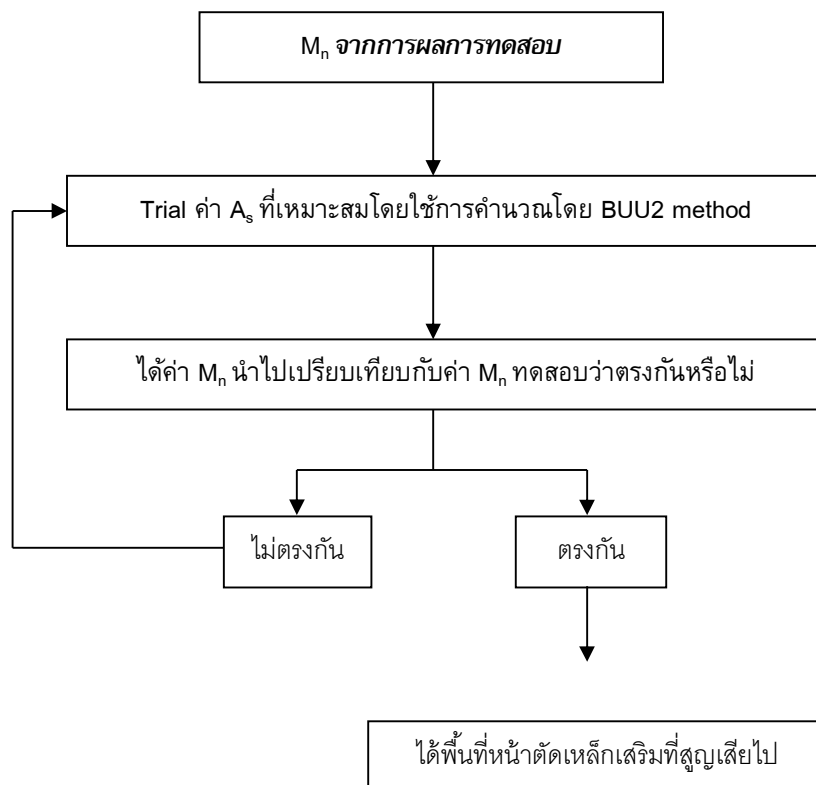
การคำนวณกำลังรับแรงดัดที่สภาวะต่างๆ ภายหลังจากเผชิญวัฏจักรเป็ยกสลับแห้ง ในน้ำเปล่าและน้ำเกลือคลอไรด์

สมมติฐานที่ใช้มีดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f_c') มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ณ วันทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. ปริมาณเส้นใยเหล็ก (V_f) มีปริมาณคงที่
3. อัตราส่วนเหล็กเสริม (ρ) มีค่าลดลงเนื่องจากการเกิดสนิม หลังจากการแช่น้ำเปล่าและเกลือคลอไรด์
4. การสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม เกิดขึ้น ณ จุดที่เหล็กเกิดสนิม มีเส้นผ่านศูนย์กลางเหลืออยู่ d เท่ากันทั้งสองเส้นของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



การประมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมที่สูญเสียไป จากการเกิดสนิมที่ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากผลการทดสอบคาน



การหาปริมาณคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายหลังเผชิญเผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ในน้ำเกลือคลอไรด์

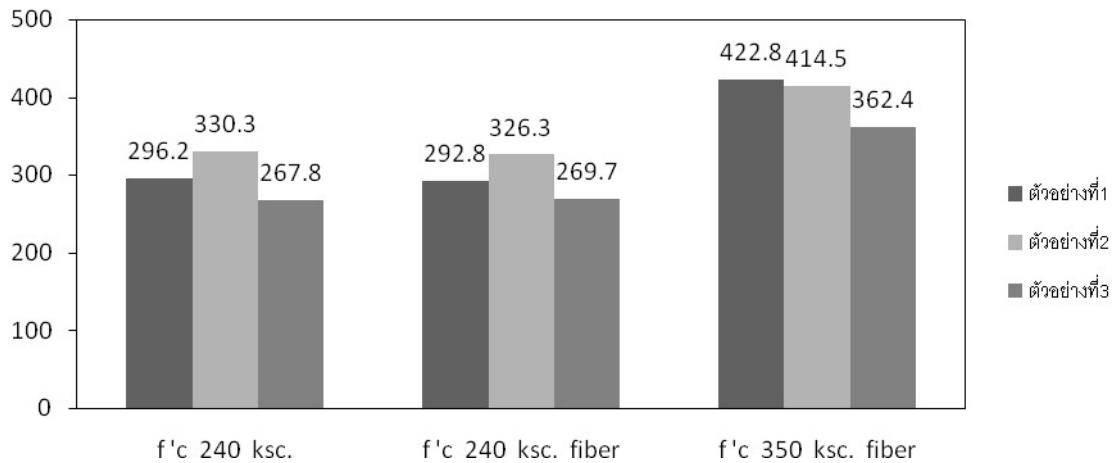
1. ทำการเจาะคานที่ใช้ทดสอบ บริเวณตำแหน่งใกล้กับเหล็กเสริมล่าง 5 จุด โดยเฉลี่ยตามความยาวของคาน ความลึกจุดละ 1 เซนติเมตร เพื่อเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต
2. เจาะที่ตำแหน่งจุดเดิมซ้ำ ความลึกจุดละ 1 เซนติเมตร ทำทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตที่ความลึกต่างๆ
3. นำผงคอนกรีตที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่า %คลอไรด์ ในแต่ละความลึกออกมา
4. นำค่า %คลอไรด์ ที่ได้แสดงผลในรูปแบบของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากคานคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละตัว ตามลำดับความลึกที่ทำการเจาะ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

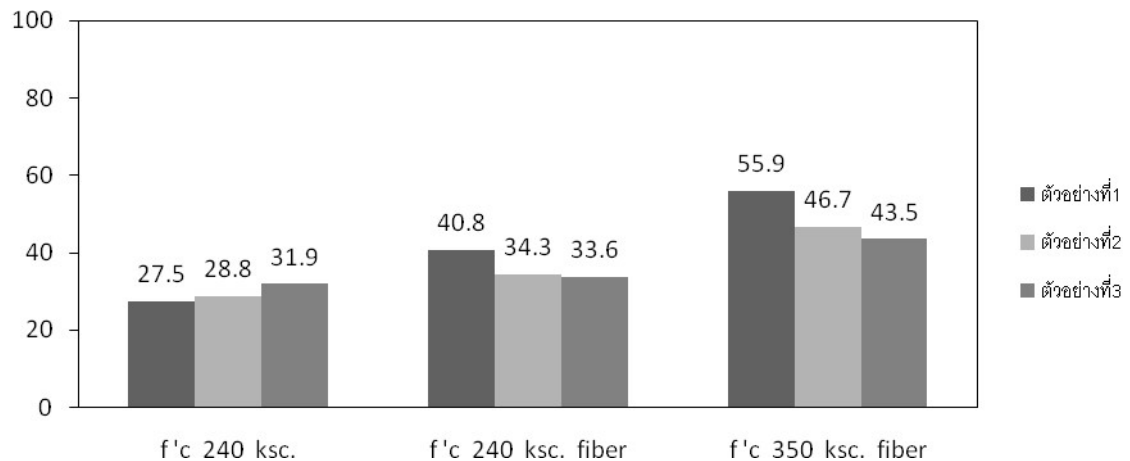
กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

กำลังรับแรงอัด f'_c (ksc)



ภาพที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

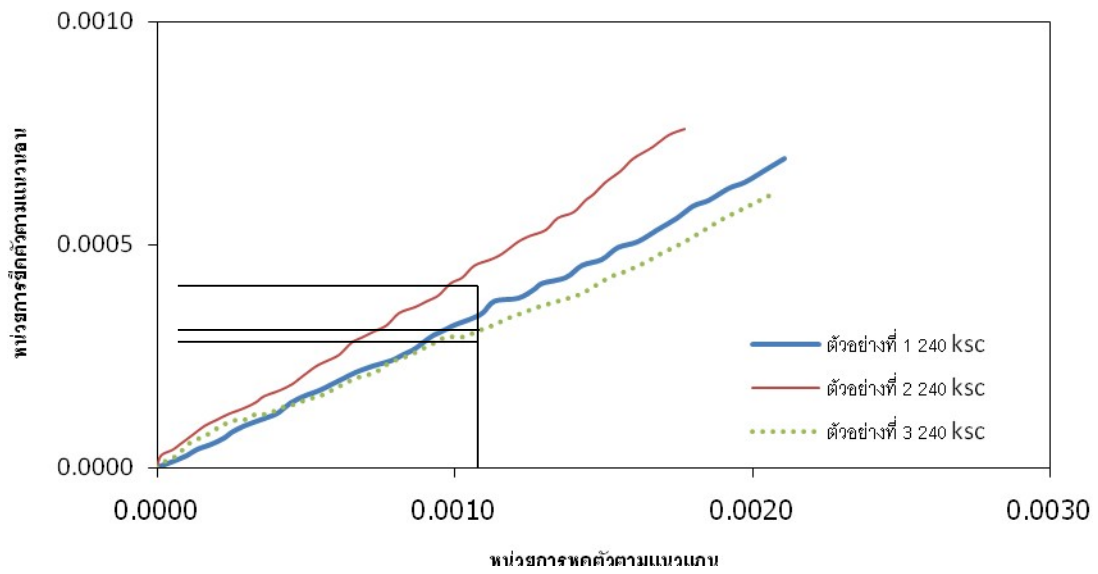
กำลังรับแรงดึง f_t (ksc)



ภาพที่ 4.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

จากภาพที่ 4.1-4.2 พบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่ามากกว่าค่า f'_c ที่ออกแบบไว้ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีต ทั้งนี้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตก็ให้ผลในลักษณะเดียวกันด้วย เนื่องจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ในส่วนผสมช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตให้สูงขึ้น

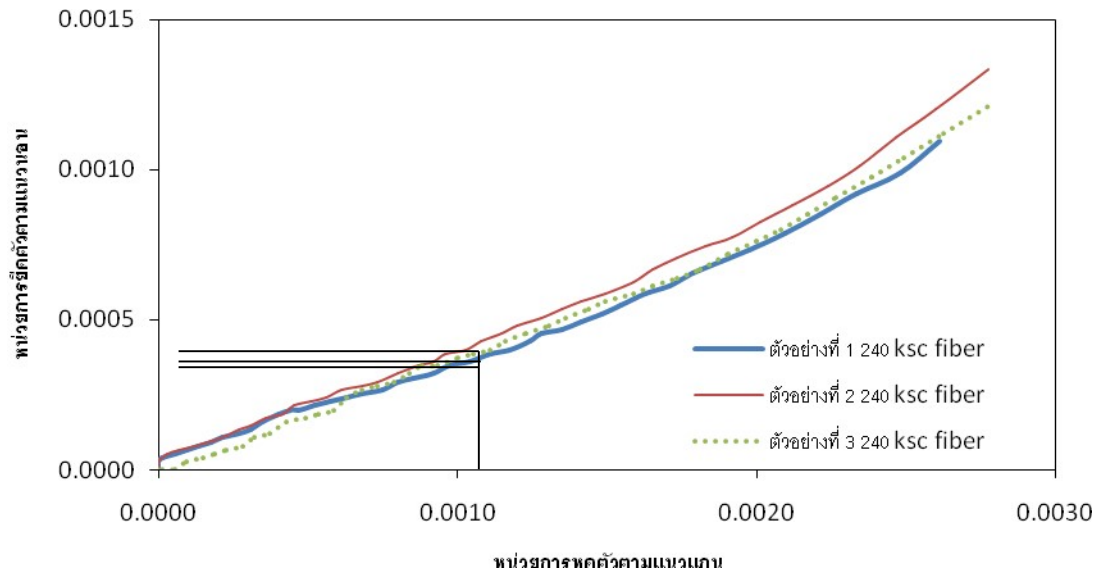
อัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีต



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามแนวแกนกับการยืดตัวตามแนวนอนของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc

ผลการทดสอบที่ 28 วัน	ตัวอย่างที่ 1 (240 ksc)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.31
	ตัวอย่างที่ 2 (240 ksc)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.48
	ตัวอย่างที่ 3 (240 ksc)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.32
		ค่าเฉลี่ย 0.37

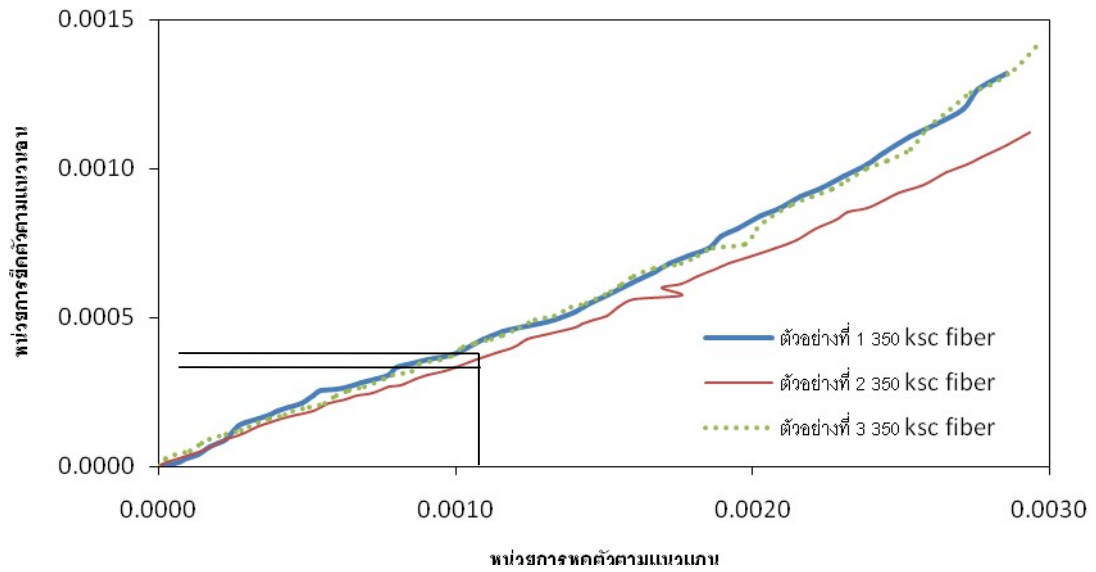
จากภาพที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.31-0.48



ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามแนวแกนกับการยืดตัวตามแนวนอนของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc และผสม fiber

ผลการทดสอบที่ 28 วัน	ตัวอย่างที่ 1 (240 ksc + fiber)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.48
	ตัวอย่างที่ 2 (240 ksc + fiber)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.47
	ตัวอย่างที่ 3 (240 ksc + fiber)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.36
		ค่าเฉลี่ย 0.44

จากภาพที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.36-0.48

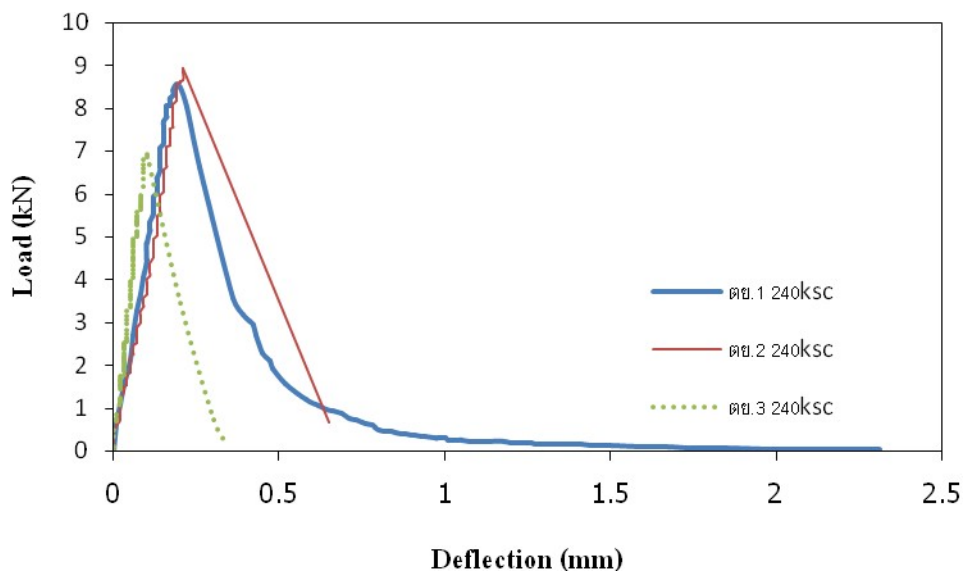


ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามแนวแกนกับการยืดตัวตามแนวนอน ของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc และผสม fiber

ผลการทดสอบที่ 28 วัน	ตัวอย่างที่ 1 (350 ksc + fiber)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.40
	ตัวอย่างที่ 2 (350 ksc + fiber)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.36
	ตัวอย่างที่ 3 (350 ksc + fiber)	อัตราส่วนปัวซองส์ มีค่า 0.43
		ค่าเฉลี่ย 0.39

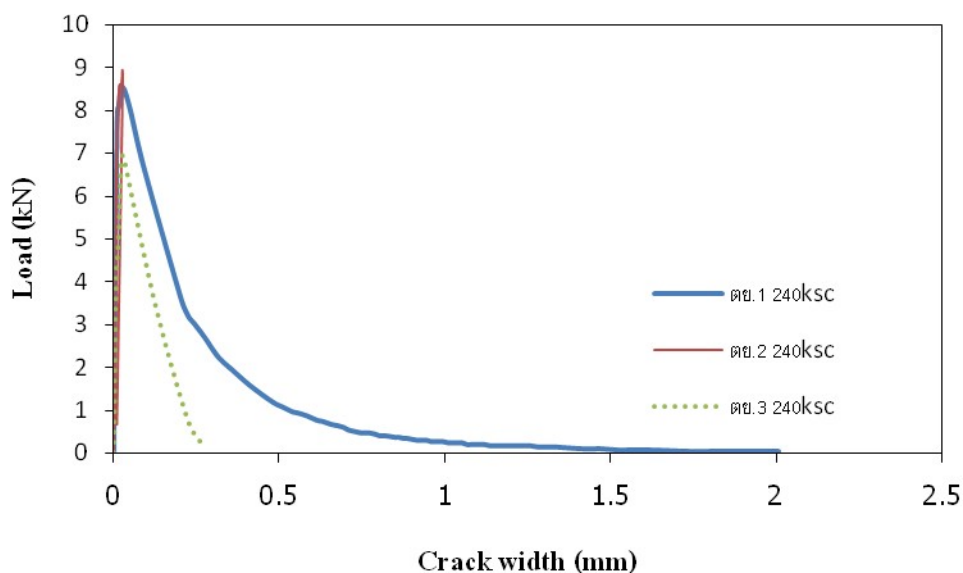
จากภาพที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.36-0.43

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc

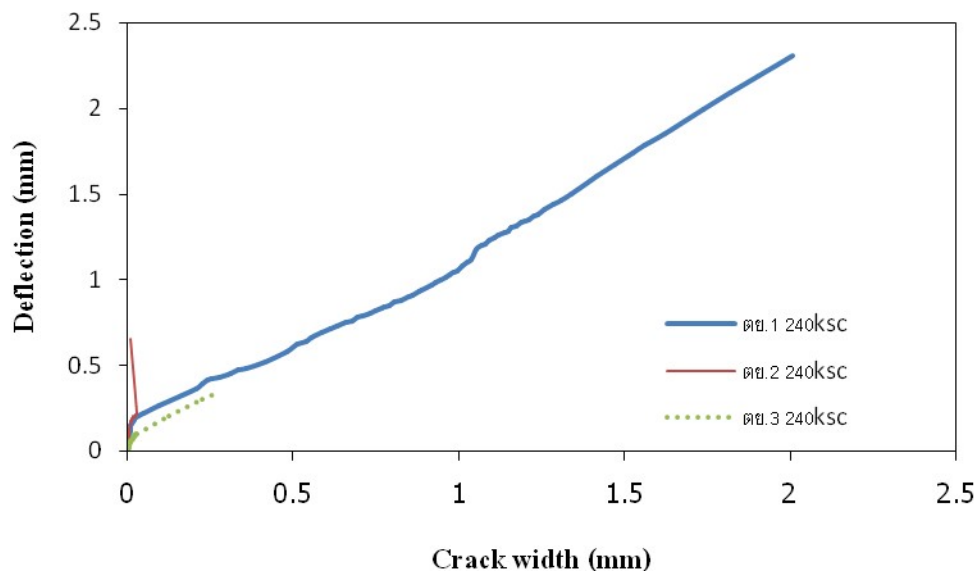
จากภาพที่ 4.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่กระทำ และการโก่งตัวของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 240 ksc ที่อายุ 28 วัน พบว่า แรงดัดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความกว้างรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc

จากภาพที่ 4.7 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่กระทำ และความกว้างรอยแตก ของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 240 ksc ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ผลที่ได้มีค่า

ใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต แต่เห็นได้ว่า ตัวอย่างที่ 2 ค่าความกว้างรอยแตกไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรอยแตกไม่ได้ผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้

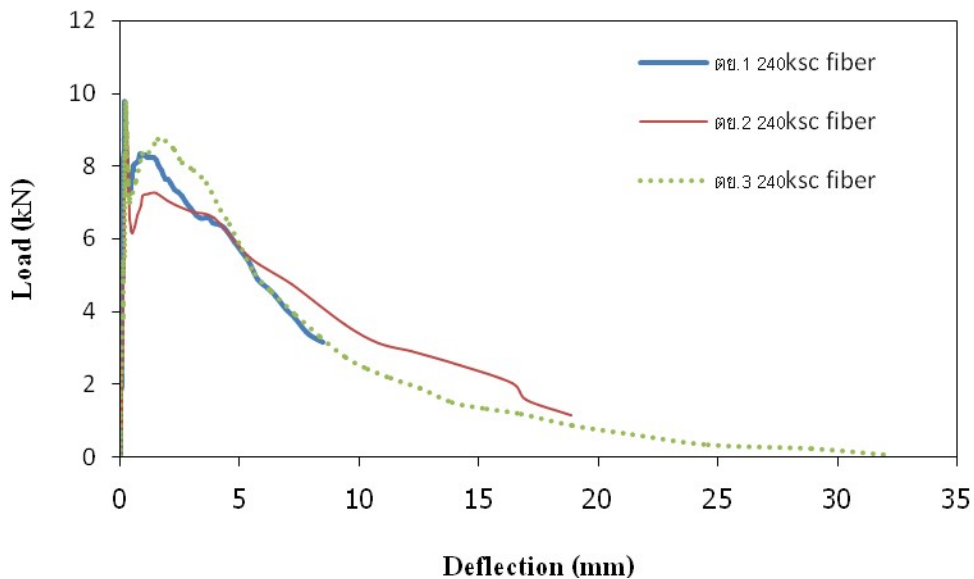


ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและความกว้างรอยแตกริ้วของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc

จากภาพที่ 4.8 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัว และความกว้างรอยแตก ของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 240 ksc ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต แต่เห็นได้ว่า ตัวอย่างที่ 2 ค่าความกว้างรอยแตกไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรอยแตกไม่ได้ผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้

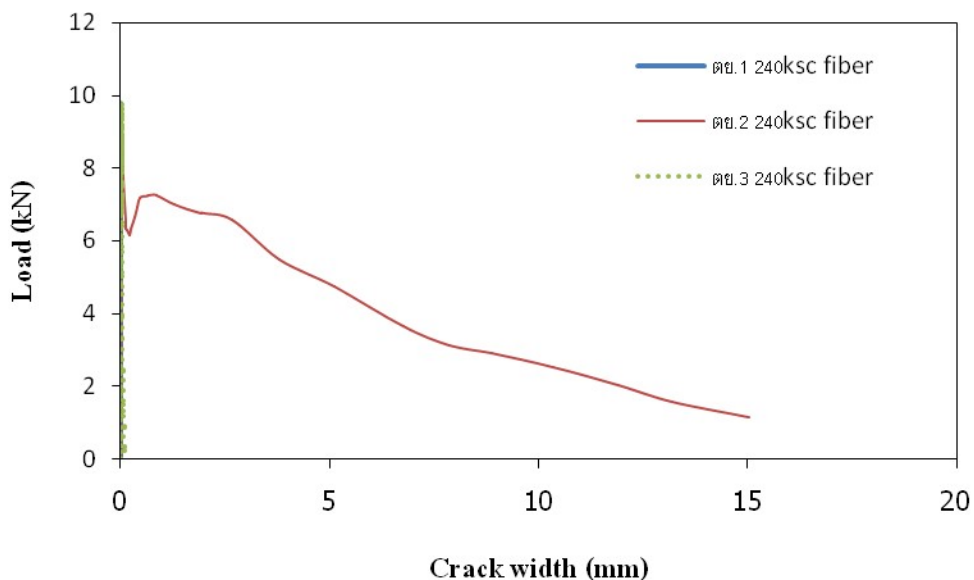
กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Modulus of rupture)

ผลการทดสอบที่ 28 วัน	ตัวอย่างที่ 1 240 ksc	มีค่า 58.8 ksc
	ตัวอย่างที่ 2 240 ksc	มีค่า 61.4 ksc
	ตัวอย่างที่ 3 240 ksc	มีค่า 47.6 ksc
		เฉลี่ย 55.9 ksc



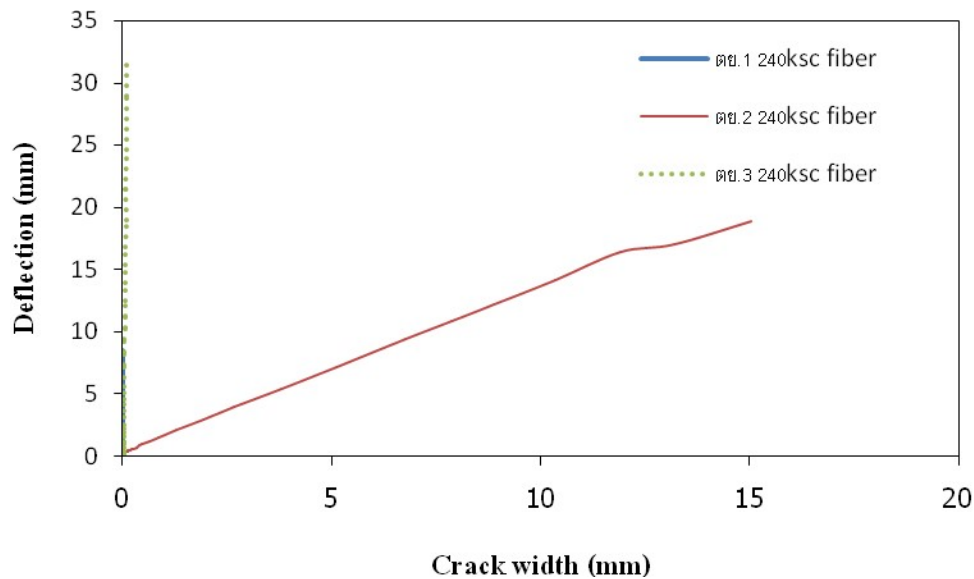
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber

จากภาพที่ 4.9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการโก่งตัว ของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 240 ksc fiber ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความกว้างรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber

จากภาพที่ 4.10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่กระทำ และความกว้างรอยแตก ของ ตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 240 ksc fiber ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ตัวอย่างที่ 1 และ 3 ค่าความกว้างรอยแตกไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรอยแตกไม่ได้ผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ ส่วนตัวอย่างที่ 2 นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปกติ ซึ่งความกว้างรอยแตกมีค่าสูงสุด 15 mm เนื่องจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ใน ส่วนผสมของคอนกรีตนั้น ช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น

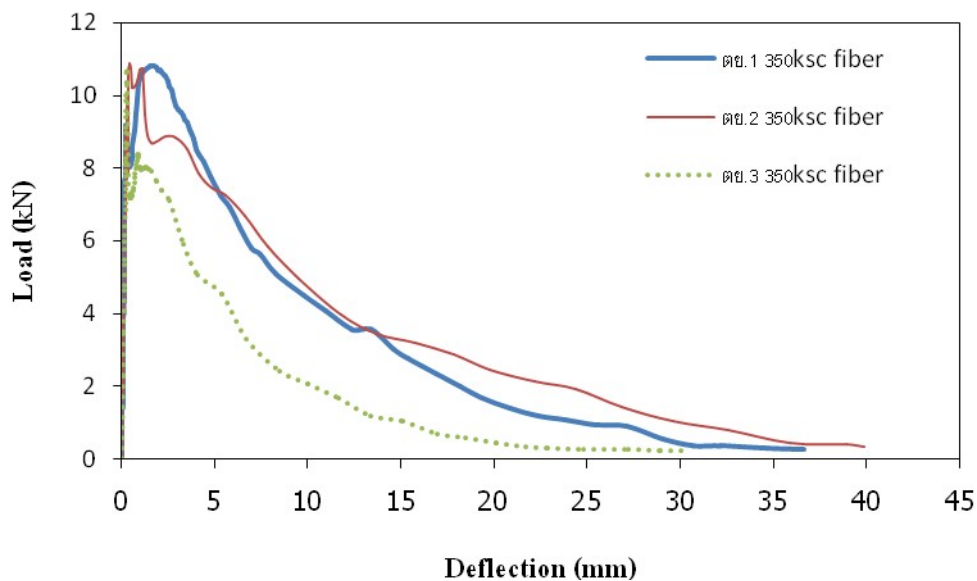


ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวและความกว้างรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต 240 ksc fiber

จากภาพที่ 4.11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่กระทำ และความกว้างรอยแตก ของ ตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 240 ksc fiber ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ตัวอย่างที่ 1 และ 3 ค่าความกว้างรอยแตกไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรอยแตกไม่ได้ผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ ส่วนตัวอย่างที่ 2 นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปกติ ซึ่งความกว้างรอยแตกมีค่าสูงสุด 15 mm เนื่องจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ใน ส่วนผสมของคอนกรีตนั้น ช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น

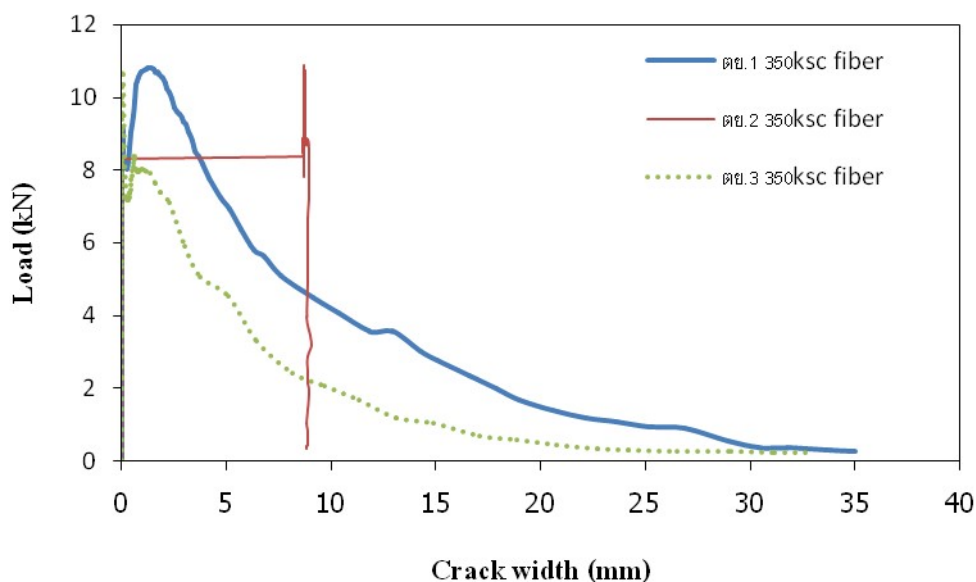
กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Modulus of rupture)

ผลการทดสอบที่ 28 วัน	ตัวอย่างที่ 1 240 ksc fiber	มีค่า 67.1 ksc
	ตัวอย่างที่ 2 240 ksc fiber	มีค่า 62.5 ksc
	ตัวอย่างที่ 3 240 ksc fiber	มีค่า 67.1 ksc
		เฉลี่ย 65.5 ksc



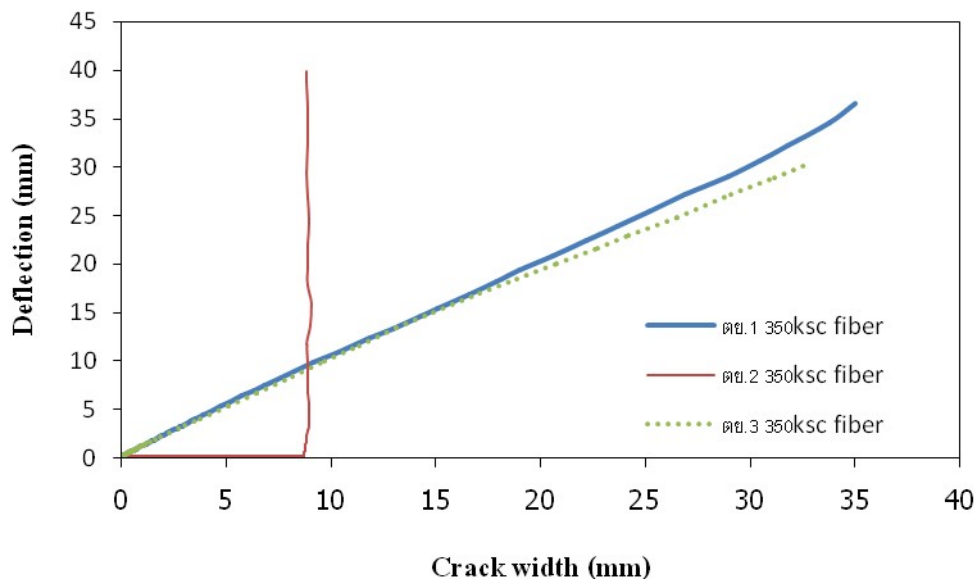
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber

จากภาพที่ 4.12 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ และการโก่งตัว ของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 350 ksc fiber ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความกว้างรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber

จากภาพที่ 4.13 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่กระทำ และความกว้างรอยแตก ของ ตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 350 ksc fiber ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ตัวอย่างที่ 2 นั้นมีค่าผิดปกติ เนื่องจากอุปกรณ์วัดความกว้างรอยแตกเกิดการหลุด ซึ่งเกิดจากรอยแตกผ่านฐานของ อุปกรณ์ จึงทำให้การวัดอุปกรณ์กับผิวของคอนกรีตหลุดออก ส่วนตัวอย่างที่อื่น ๆ นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปกติ ซึ่งความกว้างรอยแตกมีค่าสูงสุด 35 mm เนื่องจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีต นั้น ช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น อีกทั้งคอนกรีตนี้ยังมีความสามารถในการรับแรงที่สูง



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการ โกงตัวและความกว้างรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต 350 ksc fiber

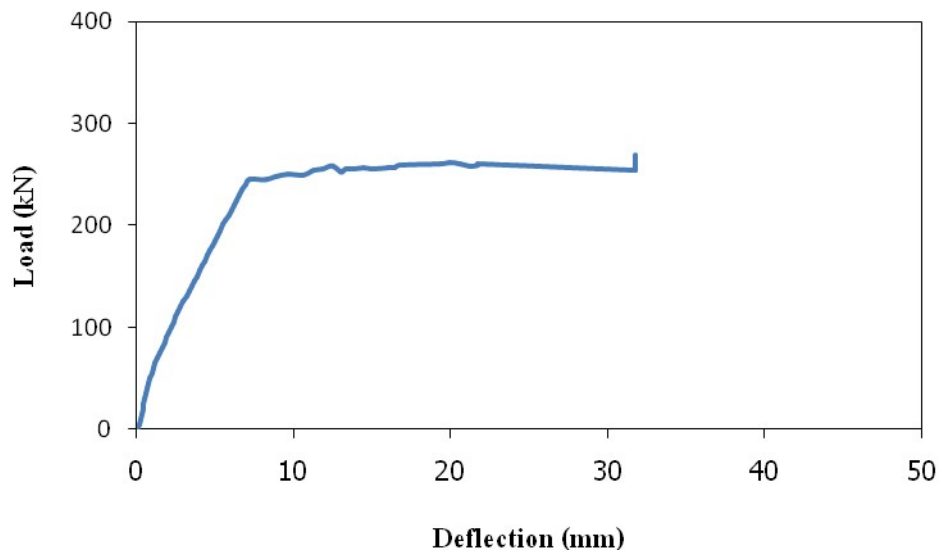
จากภาพที่ 4.14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การ โกงตัว และความกว้างรอยแตก ของ ตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน 350 ksc fiber ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อสังเกตกราฟพบว่า ตัวอย่างที่ 2 นั้นมีค่าผิดปกติ เนื่องจากอุปกรณ์วัดความกว้างรอยแตกเกิดการหลุด ซึ่งเกิดจากรอยแตกผ่านฐานของ อุปกรณ์ จึงทำให้การวัดอุปกรณ์กับผิวของคอนกรีตหลุดออก ส่วนตัวอย่างที่อื่น ๆ นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปกติ ซึ่งความกว้างรอยแตกมีค่าสูงสุด 35 mm เนื่องจากเส้นใยเหล็กที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีต นั้น ช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น อีกทั้งคอนกรีตนี้ยังมีความสามารถในการรับแรงที่สูง

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Modulus of rupture)

ผลการทดสอบที่ 28 วัน	ตัวอย่างที่ 1 350 ksc fiber	มีค่า 74.2 ksc
	ตัวอย่างที่ 2 350 ksc fiber	มีค่า 74.7 ksc
	ตัวอย่างที่ 3 350 ksc fiber	มีค่า 73.3 ksc
		เฉลี่ย 74.1 ksc

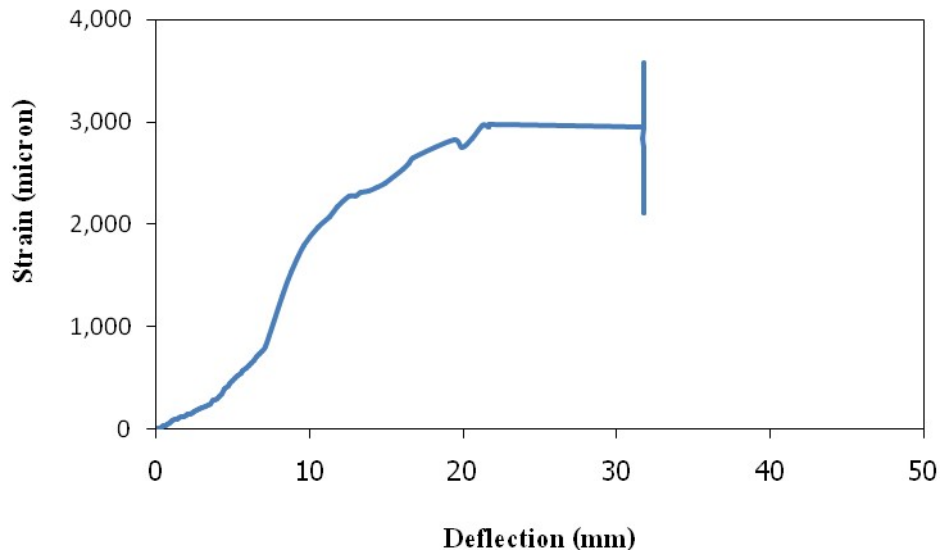
กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. คาน B1



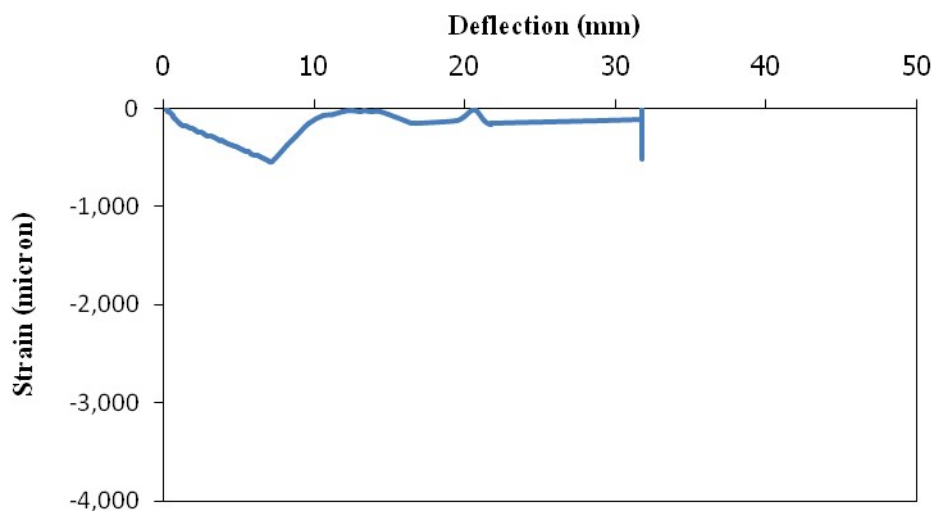
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B1

จากภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B1 240 ksc แขน้ำเปล่า ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 250 kN ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B1

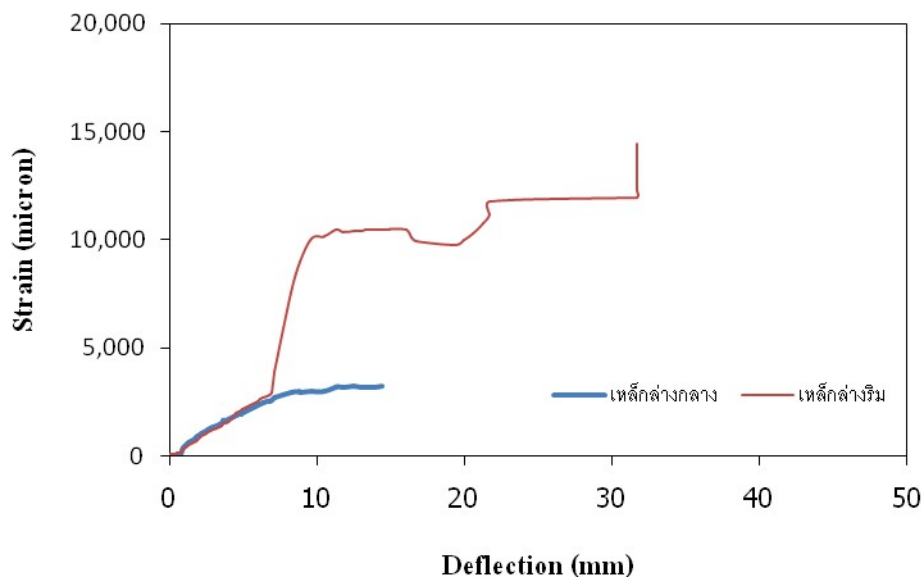
จากภาพที่ 4.16 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B1 240 ksc เช่นนี้แปลว่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 3,000 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กบน กับ Deflection ของคาน B1

จากภาพที่ 4.17 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กบน และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B1 240 ksc เช่นนี้แปลว่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ -

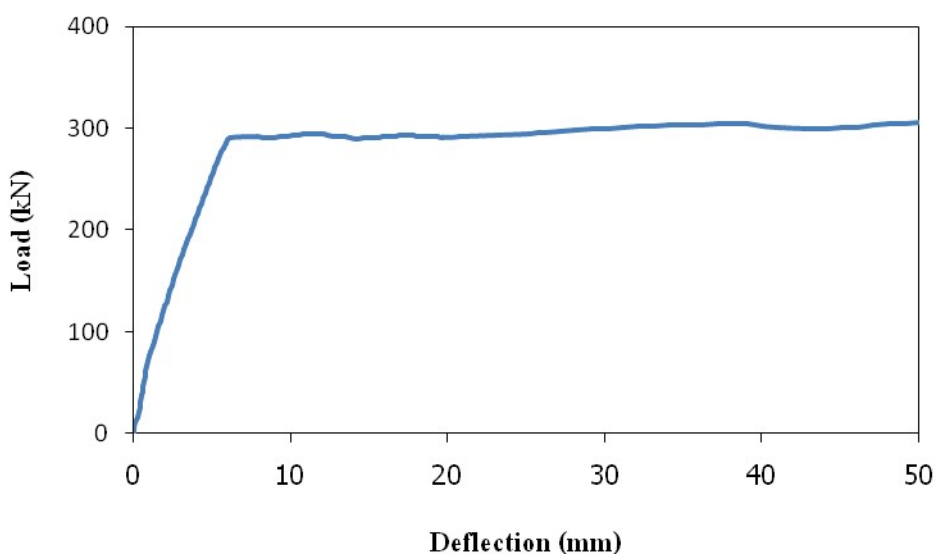
500 micron เป็นแรงอัด ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟไม่ปกติ เกิดจาก Strain gauge ได้หลุดออกจะผิวเหล็ก



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กค้ำ กับ Deflection ของคาน B1

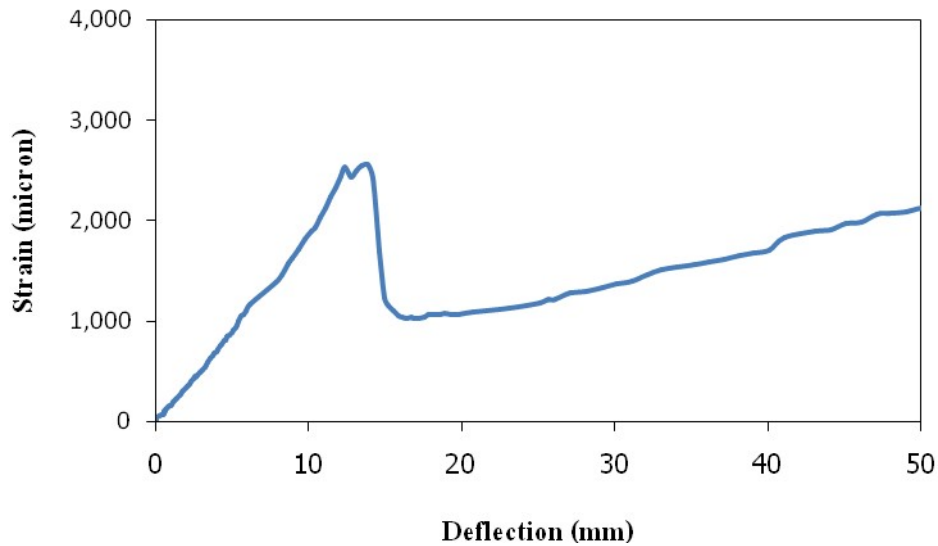
จากภาพที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กค้ำ และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B1 240 ksc เช่นนี้ ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 12,000 micron ตัวริม เนื่องจากรอยแตกที่ท้องคานไม่ได้เกิดตรงกลาง ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟของตัวกลางไม่ปกติ เกิดจาก Strain gauge ได้หลุดออกจะผิวเหล็ก

2. คาน B2



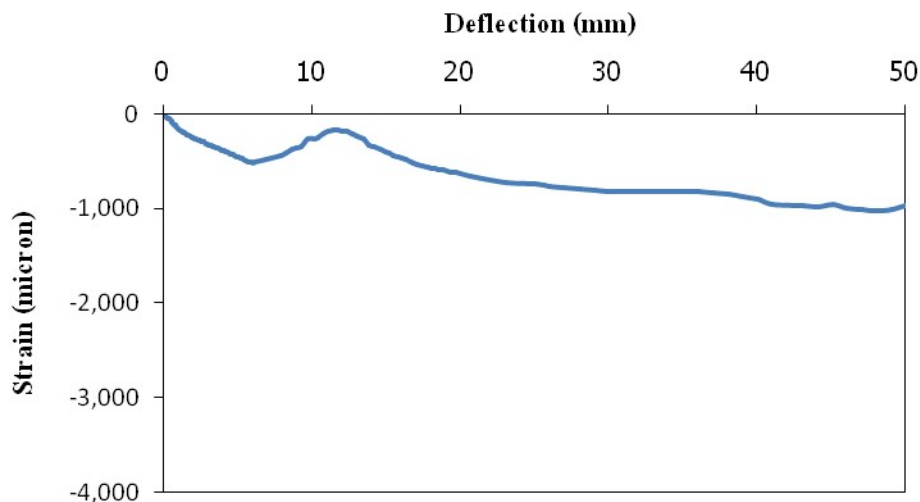
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B2

จากภาพที่ 4.19 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B2 240 ksc fiber ใช้น้ำเปล่า ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 300 kN ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



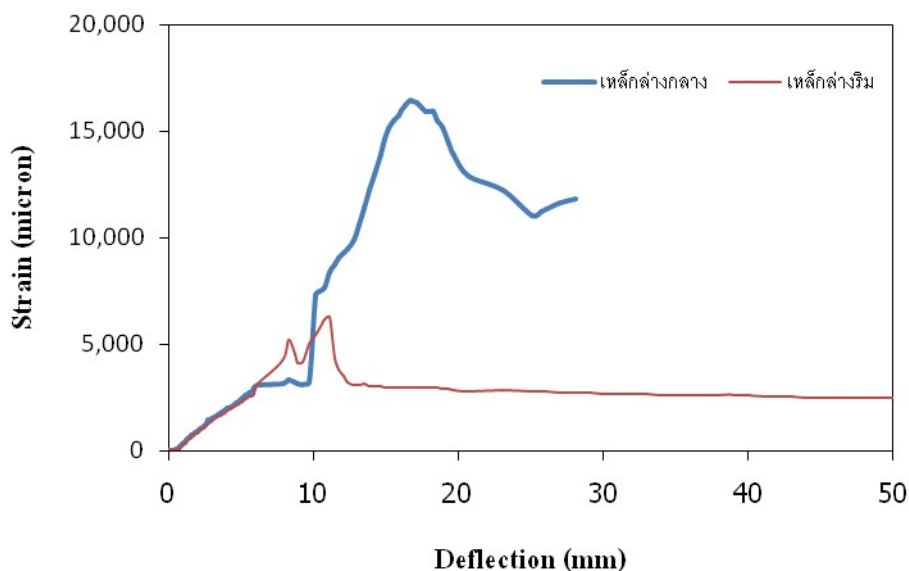
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B2

จากภาพที่ 4.20 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B2 240 ksc fiber ใช้น้ำเปล่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 2,500 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ สังเกตได้ว่ากราฟมีช่วงที่ค่าตกลง เกิดจากการแตกร้าวเกิดใกล้กับบริเวณที่ติด Strain gauge



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กบน กับ Deflection ของคาน B2

จากภาพที่ 4.21 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กบน และการ โกงตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B2 240 ksc fiber ให้นำเปล่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติ อยู่ที่ -1,000 micron เป็นแรงอัด ส่วนการ โกงตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ

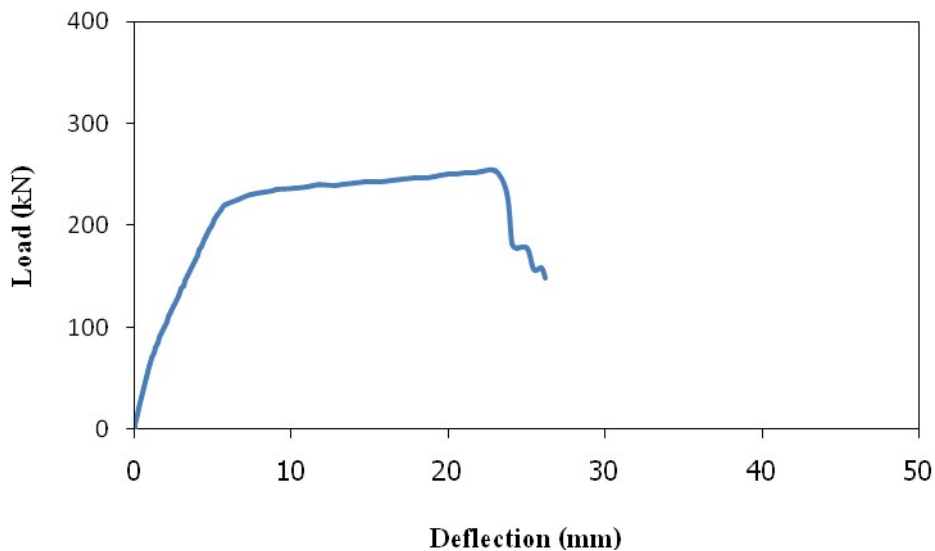


ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กล่าง กับ Deflection ของคาน B2

จากภาพที่ 4.22 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กล่าง และการ โกงตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B2 240 ksc fiber ให้นำเปล่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติ

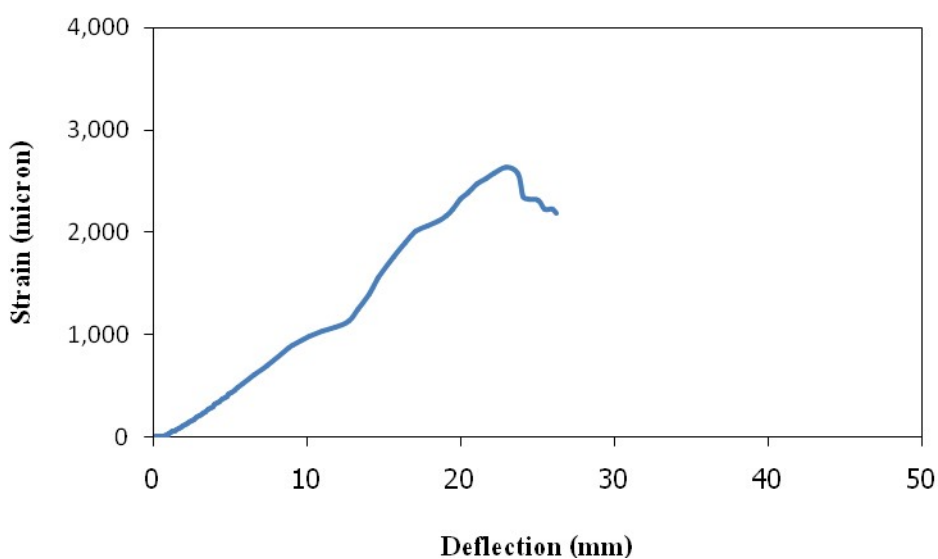
อยู่ที่ 16,000 micron ตัวกลาง ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ

3. คาน B3



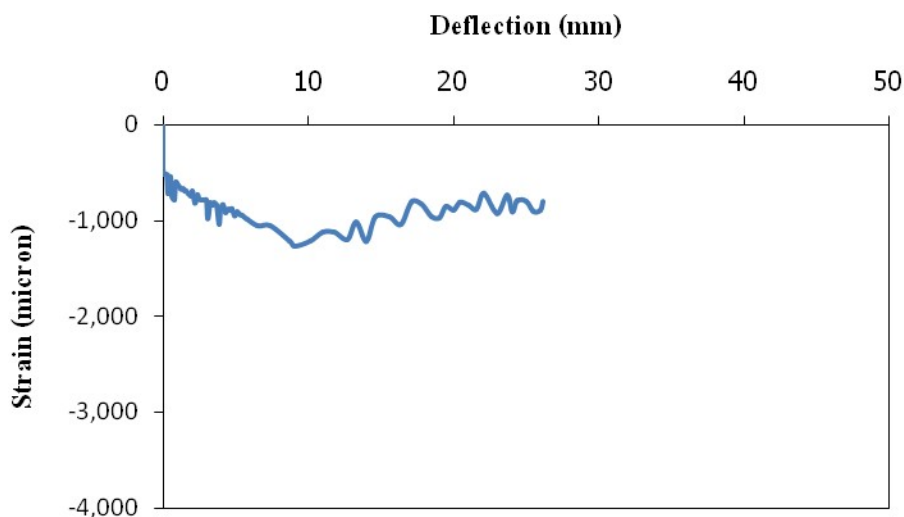
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B3

จากภาพที่ 4.23 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B3 240 ksc ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 250 kN ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



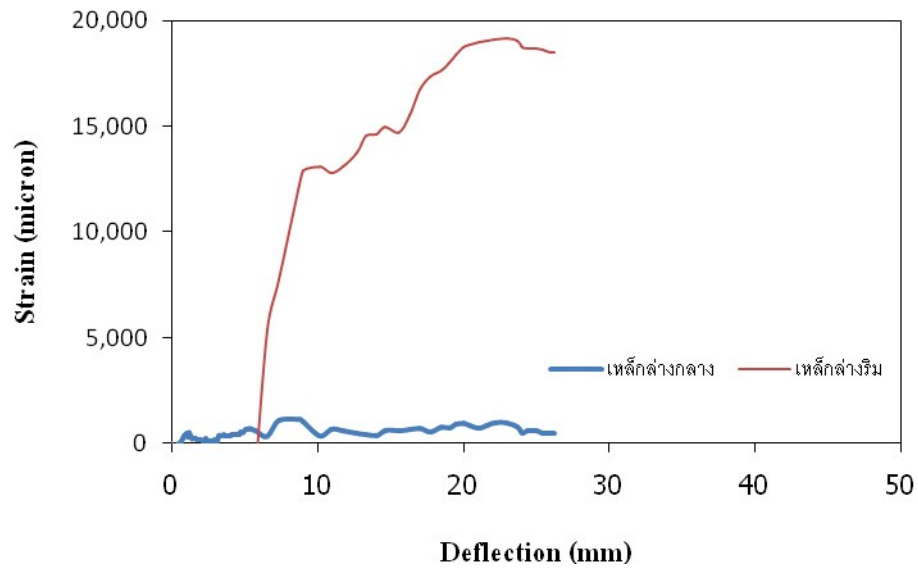
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B3

จากภาพที่ 4.24 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B3 240 ksc แชน้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 2,500 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กกับ Deflection ของคาน B3

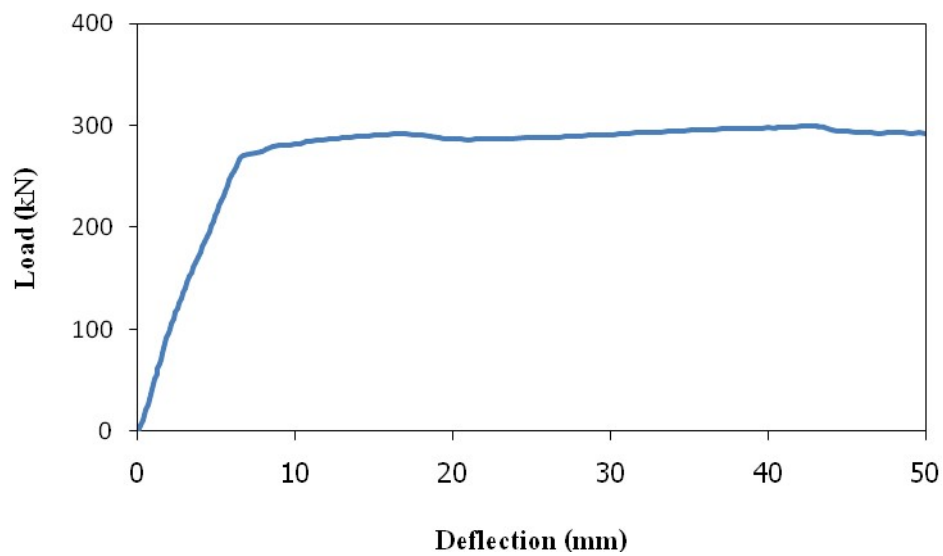
จากภาพที่ 4.25 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B3 240 ksc แชน้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ -1,300 micron เป็นแรงอัด ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ สังเกตกราฟเห็นได้ว่าค่าของกราฟมีการขึ้นๆลงๆ เนื่องจากที่ผิวด้านบนของคานทดสอบเกิดการแตกร้าวอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่เริ่มจนหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กสว่าง กับ Deflection ของคาน B3

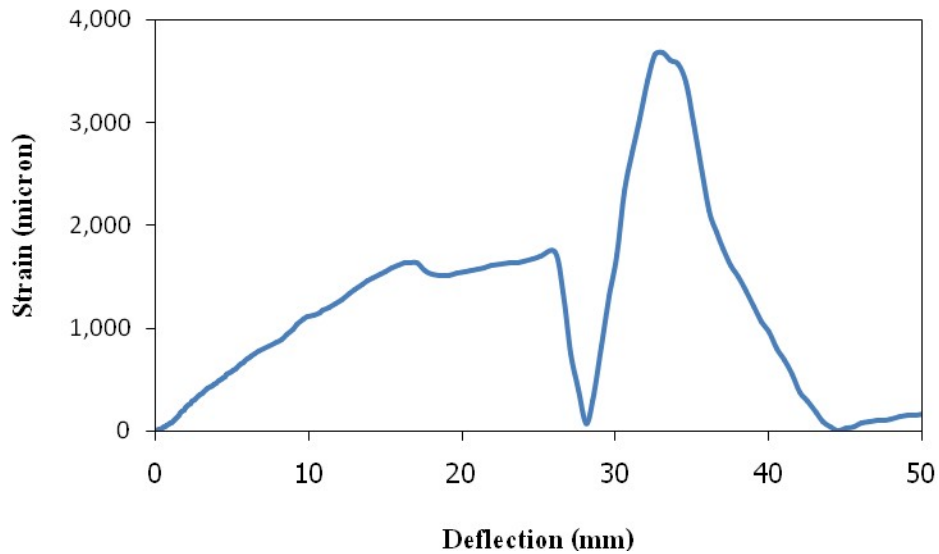
จากภาพที่ 4.26 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กสว่าง และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B3 240 ksc แชน้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 20,000 micron ตัวยริม เนื่องจากรอยแตกที่ท้องคานไม่ได้เกิดตรงกลาง ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟของตัวกลางไม่เพิ่มขึ้น เกิดจาก Strain gauge ได้หลุดออกจะผิวเหล็กตั้งแต่ก่อนที่จะเริ่มการทดสอบ เนื่องจากสนิมที่เหล็กเสริมขยายตัวออก

4. คาน B4



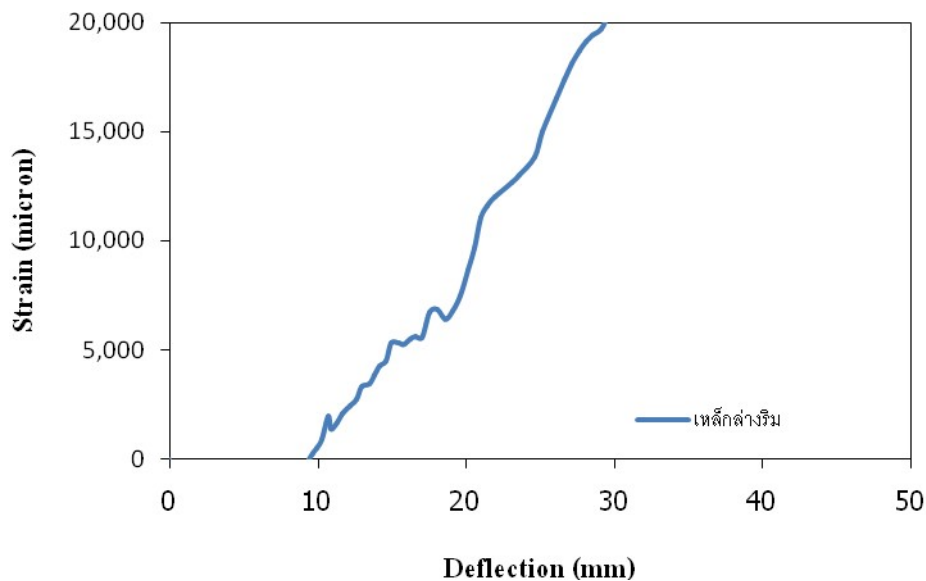
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B4

จากภาพที่ 4.27 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการ โก่งตัวที่ กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B4 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 300 kN ส่วนการ โก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการ ทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B4

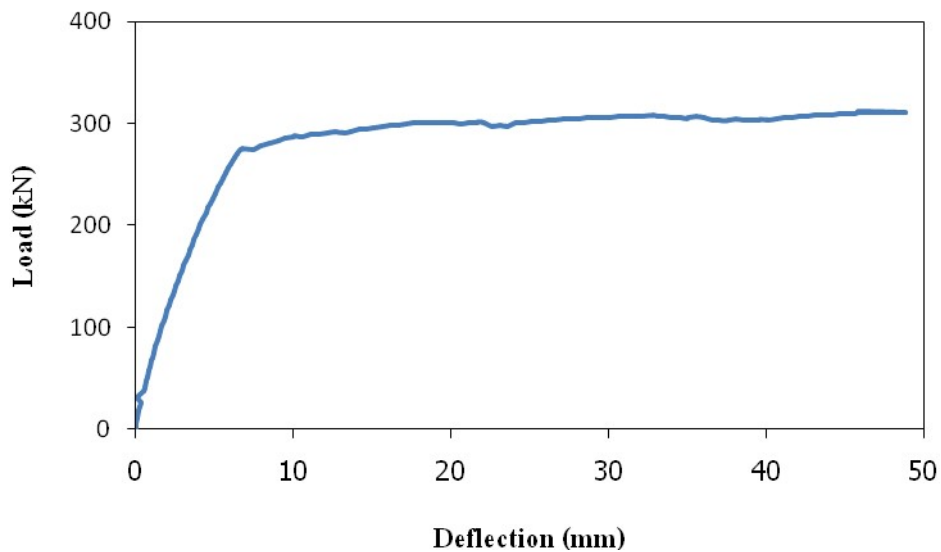
จากภาพที่ 4.28 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B4 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 3,500 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ สังเกตได้ว่ากราฟมีช่วงที่ค่าตกลง เกิดจากการแตกร้าวเกิดใกล้กับบริเวณที่ติด Strain gauge



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กกลาง กับ Deflection ของคาน B4

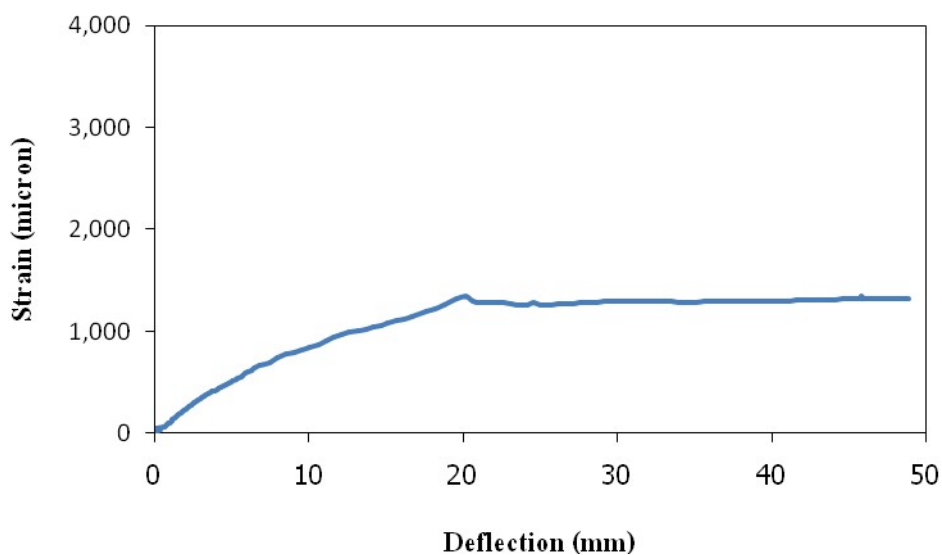
จากภาพที่ 4.29 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กกลาง และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B4 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 25,000 micron ตัวริม เนื่องจากรอยแตกที่ท้องคานไม่ได้เกิดตรงกลาง ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ ซึ่งสังเกตจากกราฟแล้วจะไม่มีค่าของตัวกลาง เกิดจากสาย Strain gauge ได้ขาดก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบ

5. คาน B5



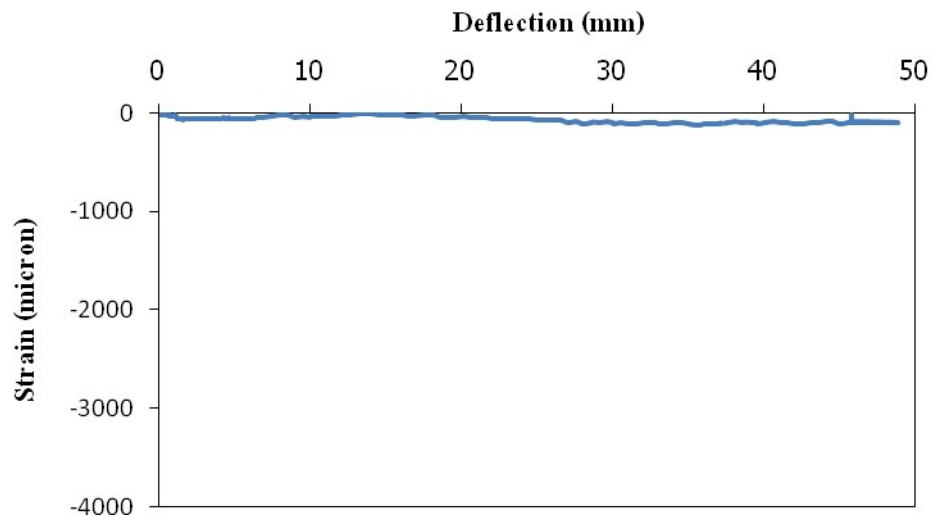
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B5

จากภาพที่ 4.30 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B5 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 300 kN ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



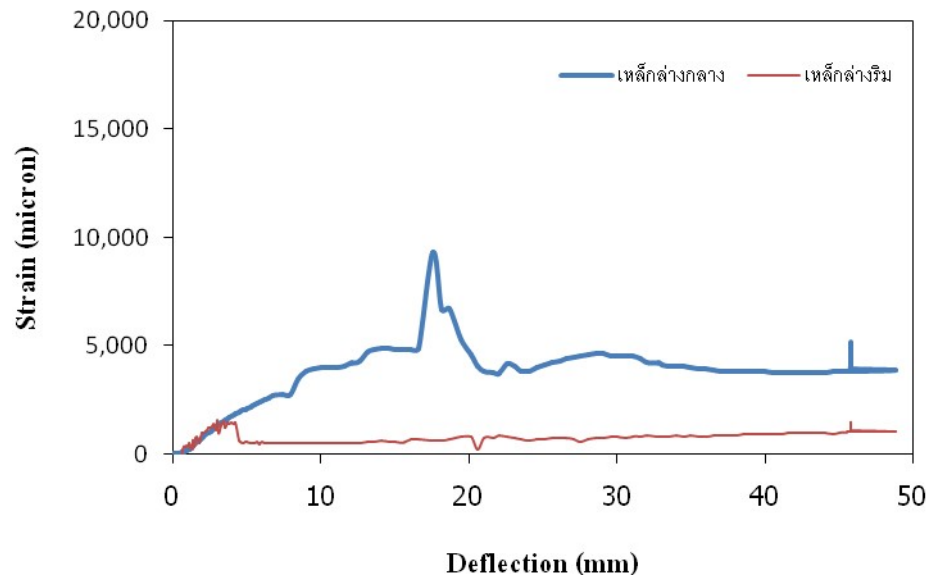
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B5

จากภาพที่ 4.31 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B5 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 1,400 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กกับ Deflection ของคาน B5

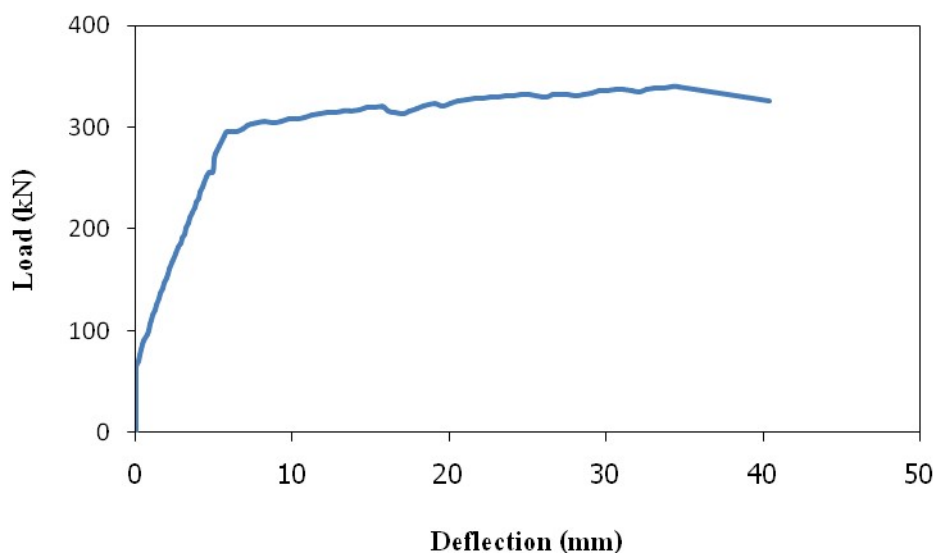
จากภาพที่ 4.32 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B5 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ -120 micron เป็นแรงอัด ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ สังเกตกราฟเห็นได้ว่าค่าของกราฟมีการขึ้นๆลงๆ เนื่องจากที่ผิวด้านบนของคานทดสอบเกิดการแตกร้าวอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่เริ่มจนหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กค้ำกลาง กับ Deflection ของคาน B5

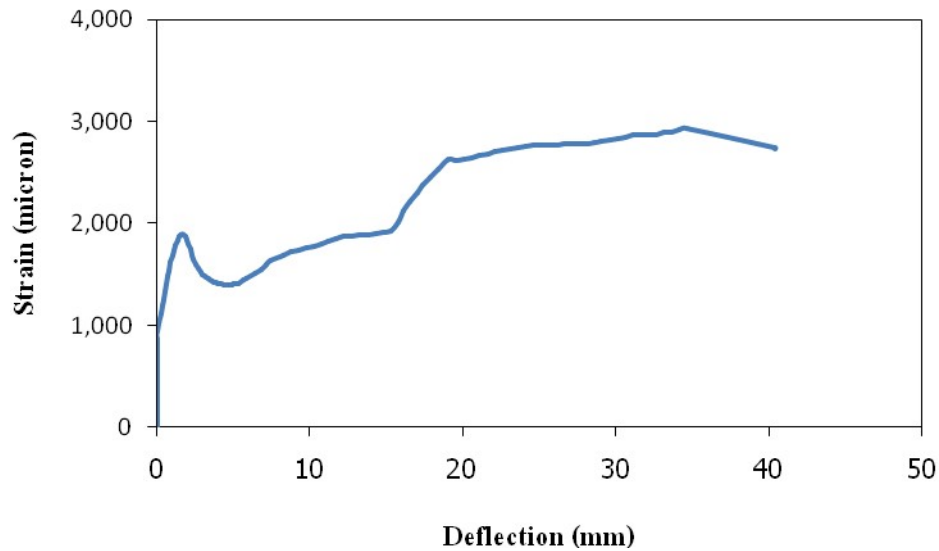
จากภาพที่ 4.33 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กค้ำกลาง และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B5 240 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 10,000 micron ตัวกลาง ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ

6. คาน B6



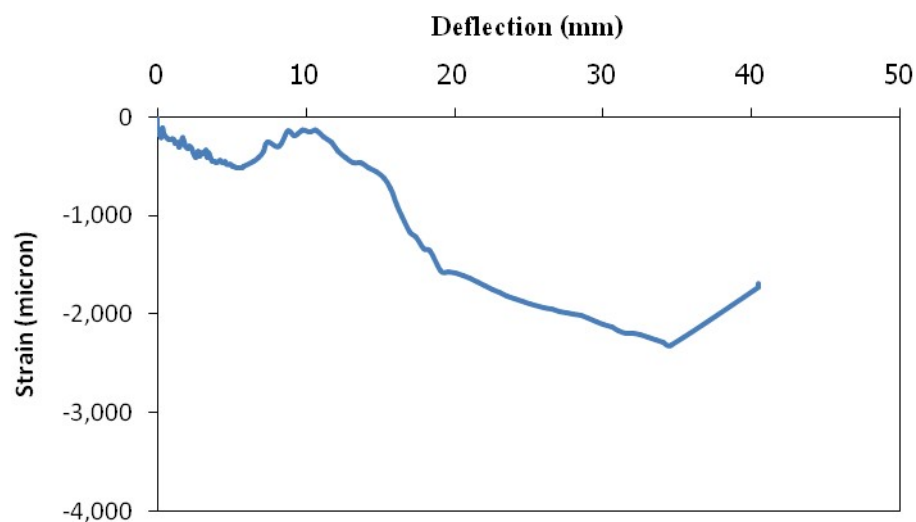
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B6

จากภาพที่ 4.34 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B6 350 ksc fiber แชน้ำเปล่า ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 330 kN ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



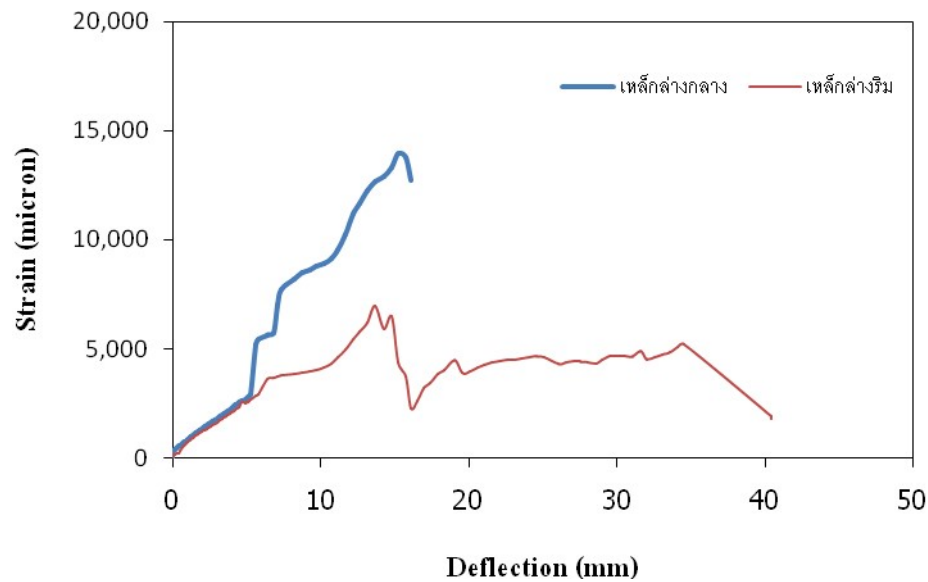
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B6

จากภาพที่ 4.35 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B6 350 ksc fiber แชน้ำเปล่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 3,000 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กบน กับ Deflection ของคาน B6

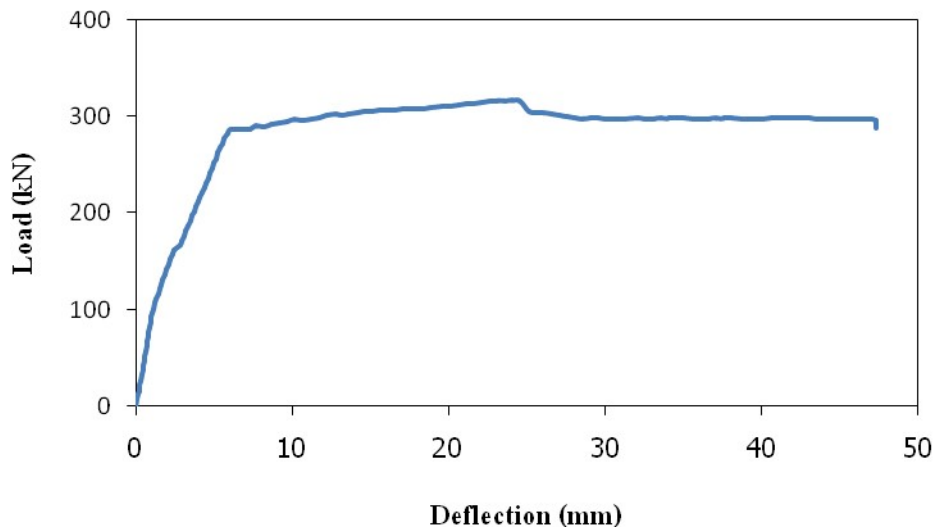
จากภาพที่ 4.36 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กบน และการ โกงตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B6 350 ksc fiber ใช้น้ำเปล่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ -2,400 micron เป็นแรงอัด ส่วนการ โกงตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กค้ำ กับ Deflection ของคาน B6

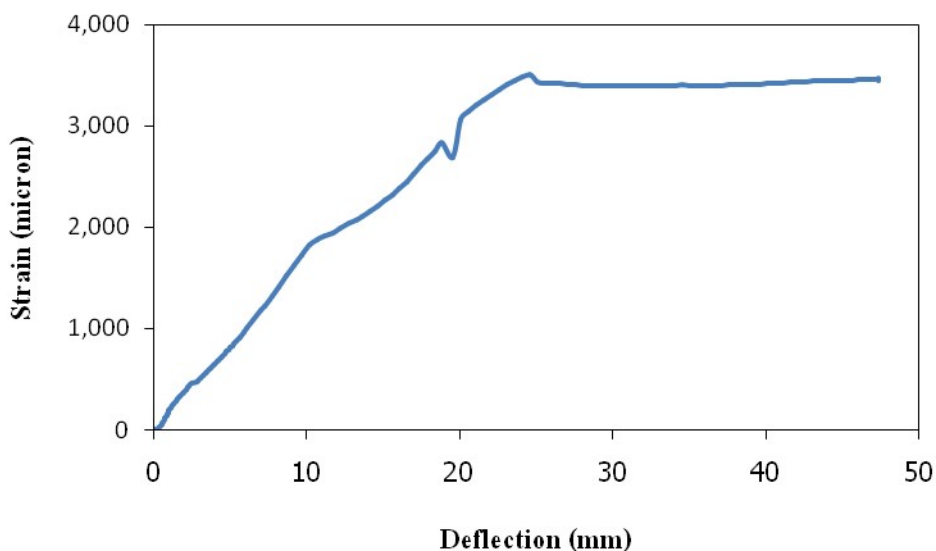
จากภาพที่ 4.37 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กค้ำ และการ โกงตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B6 350 ksc fiber ใช้น้ำเปล่า ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 15,000 micron ค้ำกลาง ส่วนการ โกงตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ แต่จะเห็นได้ว่ากราฟของค้ำกลางนั้นไม่สมบูรณ์ เนื่องจากสาย Strain gauge ได้ขาดก่อนที่จะหยุดการทดสอบ

7. คาน B7



ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคาน B7

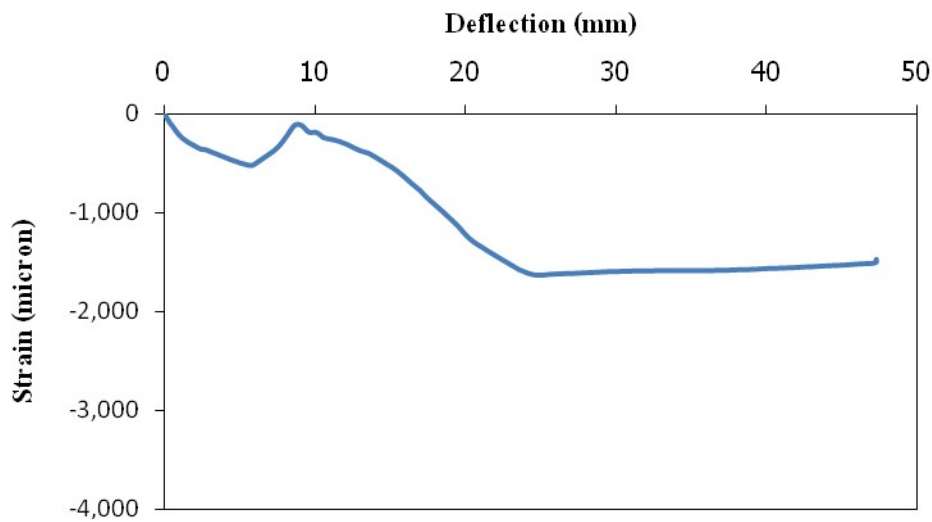
จากภาพที่ 4.38 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B7 350 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าแรงสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 320 kN ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain คอนกรีตที่ผิวบนของคาน กับ Deflection ของคาน B7

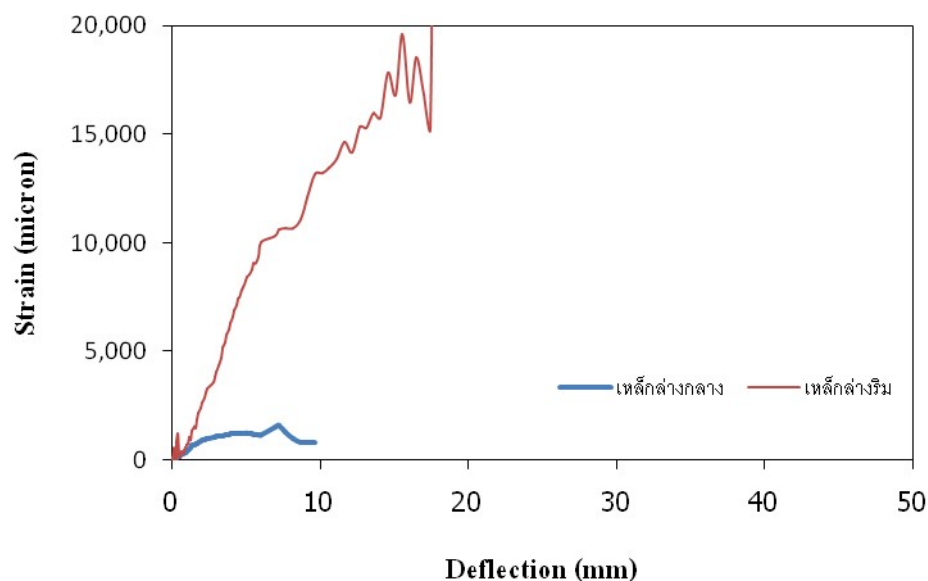
จากภาพที่ 4.39 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของคอนกรีต และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B7 350 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้

ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 3,500 micron ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กบน กับ Deflection ของคาน B7

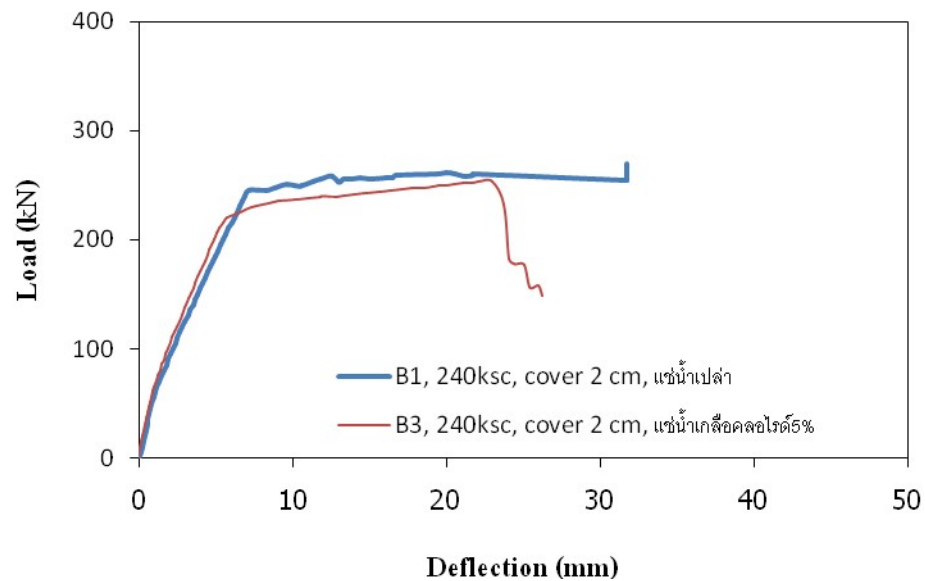
จากภาพที่ 4.40 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กบน และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B7 350 ksc fiber ใช้น้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ -2,400 micron เป็นแรงอัด ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ



ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain เหล็กกลาง กับ Deflection ของคาน B7

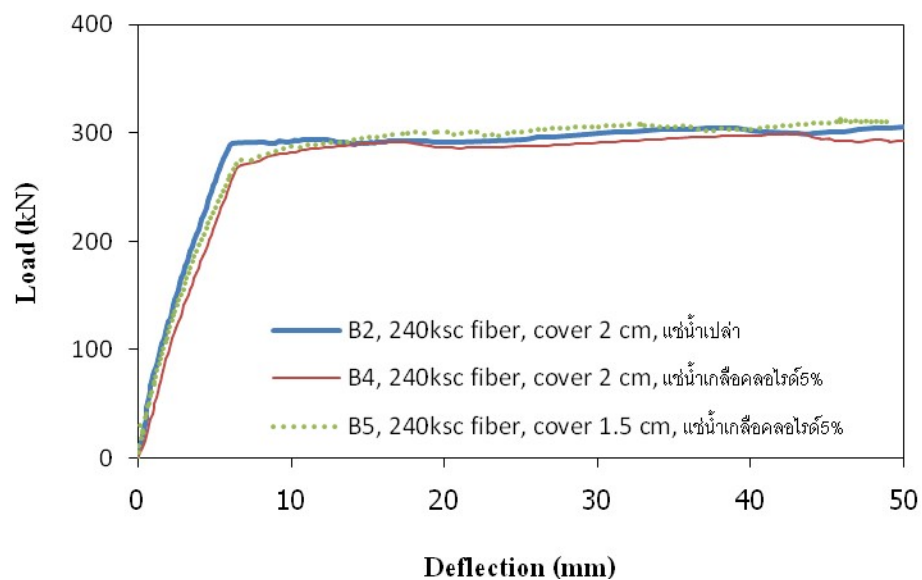
จากภาพที่ 4.41 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain ของเหล็กกล้า และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของคาน B7 350 ksc fiber แชน้ำเกลือคลอไรด์ 5% ค่าความเครียดสูงสุดที่รับได้ก่อนที่คานจะวิบัติอยู่ที่ 45,000 micron ตัวริม เนื่องจากรอยแตกที่ท้องคานไม่ได้เกิดตรงกลาง ส่วนการโก่งตัวของคานทดสอบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งหยุดทดสอบ ซึ่งสังเกตจากกราฟแล้วค่าของตัวกลางไม่เพิ่มขึ้นแล้วก็หายไป เนื่องจาก Strain gauge ได้หลุดออกเพราะสนิม และก็ขาดไปในขณะทดสอบ

การเปรียบเทียบแรงและการโก่งตัวของคานแต่ละกลุ่ม



ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน 240 ksc

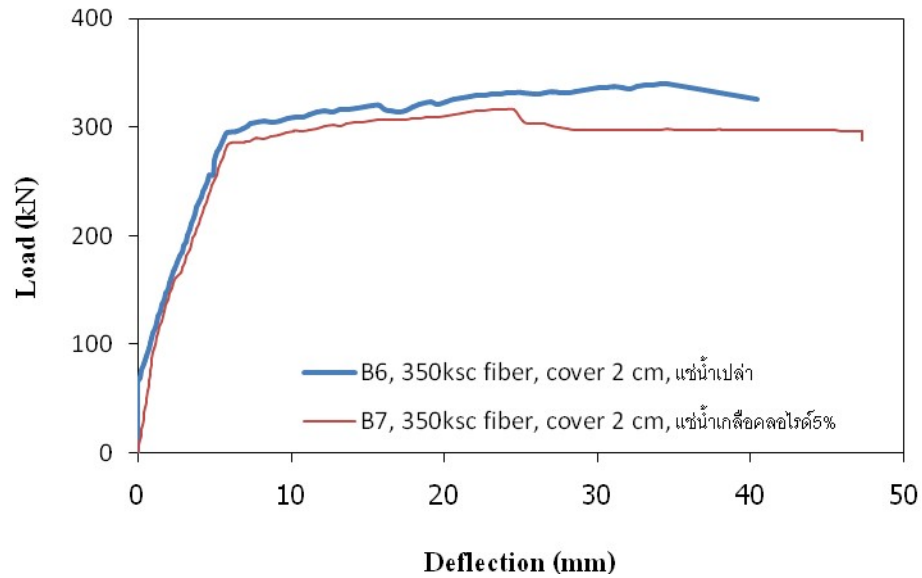
จากภาพที่ 4.42 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของกลุ่มคาน 240 ksc โดยเปรียบเทียบระหว่างคาน B1 และคาน B3 จะเห็นได้ว่าคาน B3 ที่แช่ในน้ำเกลือคลอไรด์นั้น มีค่ากำลังน้อยกว่าคาน B1 ที่แช่ในน้ำธรรมดาเล็กน้อย



ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน 240 ksc fiber

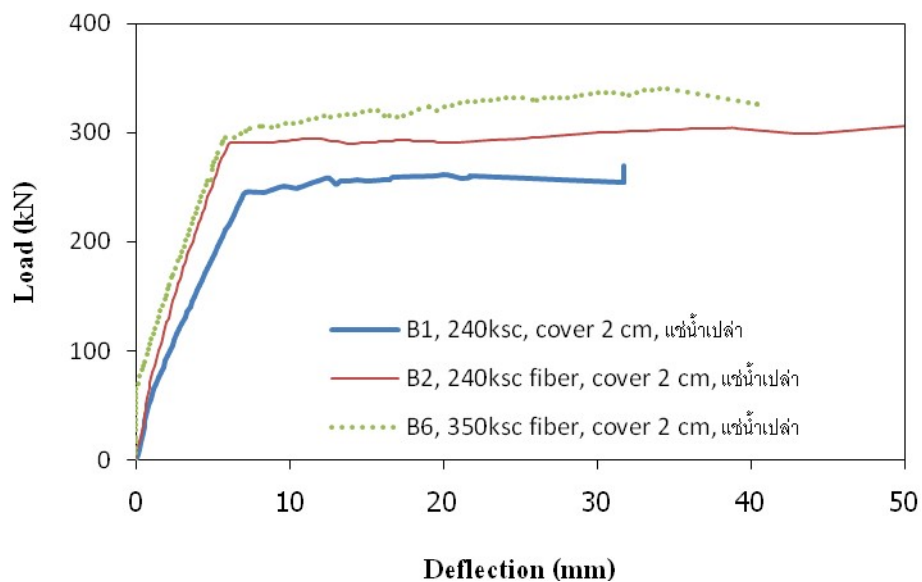
จากภาพที่ 4.43 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของกลุ่มคาน 240 ksc fiber โดยเปรียบเทียบระหว่างคาน B2, คาน B4 และ

คาน B5 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกคาน B2 ที่แช่น้ำธรรมดา นั้น มีค่ากำลังสูงกว่าคาน B4 และคาน B5 ที่แช่น้ำเกลือคลอไรด์อยู่นิดหน่อย พอถึงจุดหนึ่งค่าก็กลับมาใกล้เคียงกันทั้งหมด



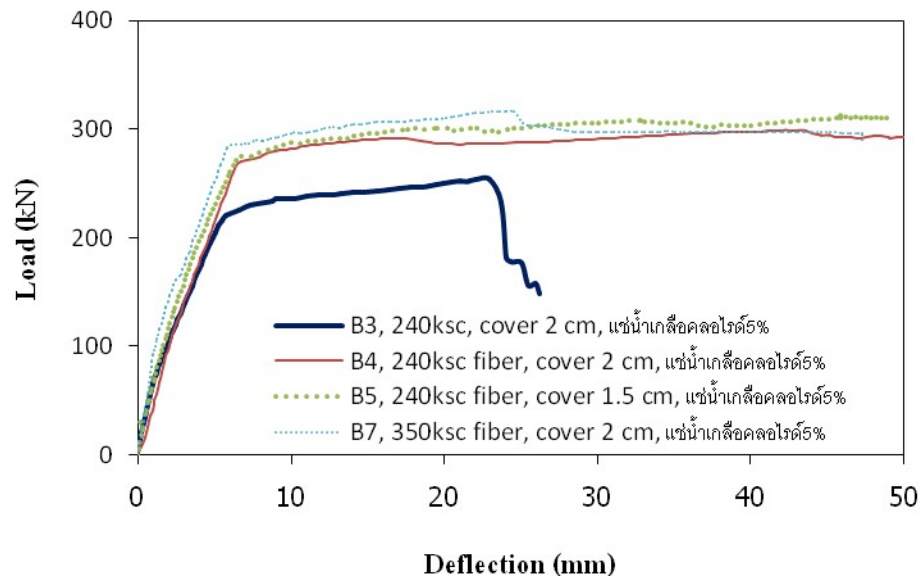
ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคาน 350 ksc fiber

จากภาพที่ 4.44 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของกลุ่มคาน 350 ksc fiber โดยเปรียบเทียบระหว่างคาน B6 และคาน B7 จะเห็นได้ว่าคาน B7 ที่แช่น้ำเกลือคลอไรด์นั้น มีค่ากำลังน้อยกว่าคาน B6 ที่แช่น้ำธรรมดา เล็กน้อย



ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคานแช่น้ำธรรมดา

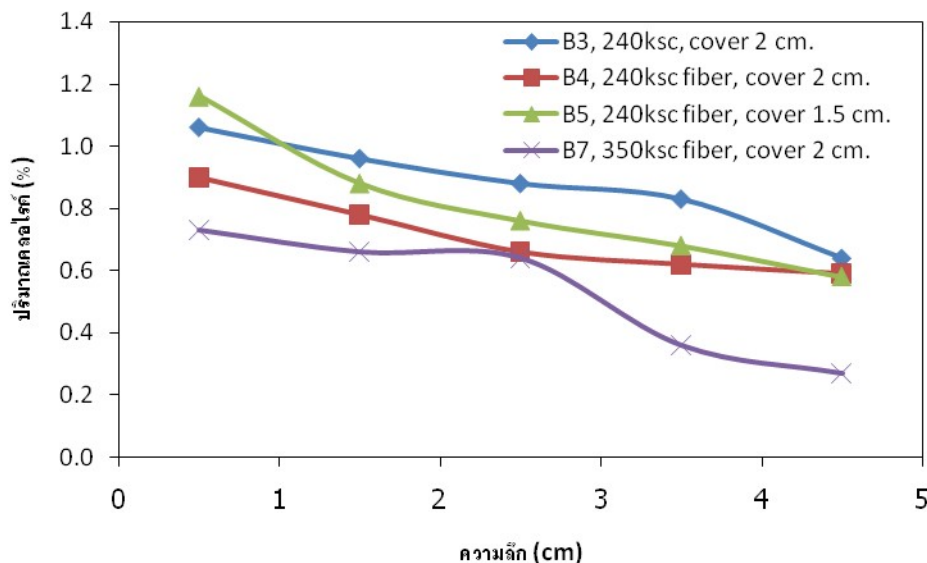
จากภาพที่ 4.45 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของกลุ่มคานเส้นใยธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบระหว่างคาน B1, คาน B2 และคาน B6 ซึ่งคาน B6 มีค่ากำลังมากที่สุด รองลงมาคือคาน B2 และคาน B1 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของกลุ่มคานเส้นใยธรรมชาติ 5%

จากภาพที่ 4.46 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดที่กระทำ (Load) และการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ของกลุ่มคานเส้นใยธรรมชาติ 5% โดยเปรียบเทียบระหว่างคาน B3, คาน B4, คาน B5 และคาน B7 ซึ่งในช่วงแรกคาน B7 มีค่ากำลังมากที่สุด แต่มากกว่าคาน B4 และคาน B5 เพียงเล็กน้อย แต่ในช่วงหลังก็มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนคาน B3 นั้นมีค่าน้อยที่สุด

การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต



ภาพที่ 4.47 การแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตที่แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0% ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

จากภาพที่ 4.47 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่กำลังอัดและผสมเส้นใยเหล็กภายหลังแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0% ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง โดยเมื่อพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าแล้วพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กทุกตัวมีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงตามระยะทางจากผิวหน้า ทั้งนี้คาน B7 มีการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตต่ำที่สุดเนื่องจากมีกำลังอัดสูงจึงมีความทึบแน่นของโครงสร้างโพรงช่องว่างมากกว่า คาน B3, B4 และ B5 และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์ระหว่างคาน B3 และคาน B4 กลับพบว่า แม้ว่ากำลังอัดคอนกรีตจะอยู่ในชั้นเดียวกันก็ตาม แต่คาน B4 มีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคาน B3 อาจเนื่องจากคาน B4 มีการเสริมเส้นใยเหล็กไว้ภายใน เส้นใยเหล็กจึงขวางการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต ทำให้มีปริมาณคลอไรด์ต่ำกว่า

กำลังอัดคอนกรีตทดสอบด้วยวิธี Schmidt hammer

ตารางที่ 4.1 กำลังอัดคอนกรีตทดสอบด้วยวิธี Schmidt hammer

Beam	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)						เฉลี่ย
	ด้านหน้า			ด้านหลัง			
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ซ้าย	กลาง	ขวา	
คาน B1	366	401	376	385	393	388	385
คาน B2	393	397	396	364	384	386	387
คาน B3	395	387	402	391	383	383	390
คาน B4	368	370	365	368	350	354	362
คาน B5	372	375	374	352	356	353	364
คาน B6	478	486	492	506	503	492	493
คาน B7	534	544	543	542	546	544	542

จากตารางที่ 4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วย Schmidt hammer นี้ ทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ากำลังอัดของคอนกรีต มีค่าเป็นไปตามความเป็นจริงหรือไม่ ผลที่ได้ กำลังอัดของคอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัย เป็นไปตามความเป็นจริง

กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเหล็กเสริมเกิดสนิม

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเหล็กเสริมเกิดสนิม

คาน	สภาวะ ตั้งเวดล้อม	A_s		M_{cr}		ΔM_{cr} (%)	M_y		M_y % ที่ลดลง	M_n		ΔM_n (%)
		คำนวณ 2 (cm)	ทดสอบ 2 (cm)	คำนวณ (kg-m)	ทดสอบ (kg-m)		คำนวณ (kg-m)	ทดสอบ (kg-m)		คำนวณ (kg-m)	ทดสอบ (kg-m)	
B1	น้ำ	4.02	1.99	975	1,530	-56.9	4,872	4,897	-0.5	6,829	5,490	19.6
B2	น้ำ	4.02	3.06	974	2,141	-119.7	6,698	5,918	11.6	7,227	6,269	13.3
B3	น้ำเกลือ	4.02	1.38	975	1,427	-46.3	4,872	4,695	3.6	6,829	5,172	24.3
B4	น้ำเกลือ	4.02	2.90	974	2,039	-109.3	6,698	5,515	17.7	7,227	6,100	15.6
B5	น้ำเกลือ	4.02	2.99	1,007	2,039	-102.6	6,868	5,525	19.6	7,431	6,371	14.3
B6	น้ำ	4.02	3.46	1,125	2,446	-117.4	6,698	6,018	10.2	7,528	6,932	7.9
B7	น้ำเกลือ	4.02	3.03	1,125	2,345	-108.4	6,698	5,764	13.9	7,528	6,457	14.2

หมายเหตุ ΔM มีค่าเป็นบวก เมื่อค่าจากการทดสอบน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ

ΔM มีค่าเป็นลบ เมื่อค่าจากการทดสอบมากกว่าค่าจากการคำนวณ

จากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเผชิญเกลือคลอไรด์มีค่าลดลง (เมื่อพิจารณา กำลังรับแรงดัดของคาน B6 กับคาน B7)
2. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ผสมเส้นใยเหล็กมีกำลังรับแรงดัดลดต่ำลงมากกว่า (เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดของคาน B3 กับคาน B4)

3. กำลังรับแรงค้ดของคานที่ใช้กำลังอัดประลัษคอนกรีต 350 ksc และคานที่ใช้กำลังอัดประลัษคอนกรีต 240 ksc การลดลงของกำลังรับแรงค้ดมีค่าใกล้เคียงกัน (เมื่อพิจารณากำลังรับแรงค้ดของคาน B4 กับคาน B7)

บทที่ 5

สรุปผล

สรุปผล

จากการทดลองและศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ (ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ 5%) และในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีเกลือคลอไรด์ (น้ำเปล่า) โดยทั้งสองสภาวะอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง (เปียก 5 วันและแห้ง 2 วัน) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใส่เส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถกำลังรับแรงดัดของคานให้สูงขึ้น ทั้งคานที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมเกลือคลอไรด์และสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีเกลือคลอไรด์
2. การใช้กำลังรับแรงอัดคอนกรีต (f'_c) ที่สูงขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้สูงขึ้น
3. การคำนวณหาปริมาณหน้าตัดเหล็กเสริมที่สูญเสียไปเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถทำได้โดยวิธีคำนวณย้อนกลับ (Back calculation)
4. ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Covering) ที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
5. โครงการนี้ได้ทำการพัฒนาและติดตั้งระบบการถ่ายน้ำอัตโนมัติ เปียกสลับแห้ง (Wet and dry cycle system) โดยใช้การตั้งเวลาและปั้มน้ำเป็นผลสำเร็จ และสามารถใช้งานได้ดี
6. จากผลการทดลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์พบว่า การเสริมเส้นใยเหล็กลงในคานคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคานนั้นต้องระวังหากคานคอนกรีต อยู่ในสภาวะที่แวดล้อมด้วยเกลือคลอไรด์ เนื่องจากเส้นใยเหล็กที่กระจายตัวอยู่บริเวณผิวหน้าคานจะเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ หรืออาจเป็นสาเหตุนำเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมหลักของคานได้ ทำให้เหล็กเสริมหลักเกิดสนิมก่อนเวลาอันควร

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาผลกระทบของเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณและชนิดของเส้นใยเหล็กให้หลากหลายขึ้น เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของกำลังรับแรงดัดและความคงทนของคอนกรีตที่ใช้เส้นใยเหล็กแต่ละชนิด และปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยเหล็กแต่ละชนิดที่ทำให้คานคอนกรีตนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2. ควรศึกษาขนาดคานคอนกรีตเสริมเหล็กใหญ่ขึ้น และอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมหลักต่างๆ ด้วย เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงไปของกำลังรับแรงดัดและความคงทนของคอนกรีตว่าในแต่ละขนาดของคานทดสอบและในแต่ละปริมาณเหล็กเสริมหลักนั้น ส่งผลให้ต่อคานคอนกรีตอย่างไร

3. ควรมีการพัฒนา ระบบเปียกสลับแห้ง (Wet and dry cycle system) ให้สมบูรณ์มากขึ้น เช่น เพิ่มระบบไฟฟ้าสำรอง และระบบถังเก็บน้ำสำรองสำหรับสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีเกลือคลอไรด์

ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

มีแผนตีพิมพ์ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

บรรณานุกรม

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543 ความคงทนของคอนกรีต
- [2] อภินันท์ ภูซัน และ สุรสิทธิ์ หมั่นวิชา, 2548. การศึกษากำลัรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมไฟเบอร์. โครงการงานทางวิศวกรรมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
- [3] วินิต ช่อวิเชียร, 2545. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง.
- [4] วินิต ช่อวิเชียร, 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี.
- [5] ปรัชญา จูเหลือ และ นัฐภา ภาระศรี, 2547. การศึกษาพลังงานการแตกร้าวของคอนกรีตและกำลัรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเหล็กผสมไฟเบอร์. โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
- [6] Altun F., Haktanir T., Ari K., Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. **Construction and Building Materials**, 2005.
- [7] Mangat P.S., Gurusamy K., Chloride Diffusion in Steel Fibre Reinforced Marine Concrete, *Cement & Concrete Research*, USA Pergamon Journals., July 1987, pp. 640-650
- [8] Balouch S.U., Granju J.-L., **Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks.** *Cement and Concrete Research* 35 (2005), pp. 572– 577
- [9] Morse D.C., Williamson G.R., **Corrosion Behavior of Steel Fibrous Concrete.** Technical report, M-217, US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, 1977
- [10] Samir A. Ashour and Faisal F. Wafa, 1993, **Flexural Behavior Of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams.** *ACI Structural Journal* 90 (1993), pp. 279-287.
- [11] Bayasi, Z. and Zeng, J., 1993. **Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete.** *ACI Structural Journal* 90, pp. 605-610.
- [12] Singh S.P., Mohammadi Y., Madan S.K. Flexural fatigue strength of steel fibrous concrete containing mixed steel fibres. *Journal of Zhejiang University* (2006) 7(8), pp. 1329-1325.
- [13] Mangat P.S., Gurusamy K., Corrosion Resistance of Steel Fibres in Concrete under Marine Exposure, *Cement & Concrete Research*, Vol 18, 1988 No.1, pp.44-54.
- [14] Mangat P.S., Gurusamy K., Corrosion of Steel Fibrous Concrete, Fourth International Conference on Durability of Building Materials & Components, 1987, Singapore.

- [15] สุรชัย สุทธิธรรมมา, 2549. ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตผสมเส้นใยภายหลังรับแรงกระทำ. โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [16] Craig R. Flexural Behavior and Design of Reinforced Fiber Concretes Members. International Conference on Recent Developments in Fiber Reinforced Cements and Concretes. UK, September 18-20, 1989, pp.517-563

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ตัด

1. กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1, B3 ที่สภาวะต่างๆ

$f_c' = 240 \text{ ksc}$, ระยะหุ้มเหล็กเสริม = 2.0 cm., ไม่ใส่เส้นใยเหล็ก

1.1 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1, B3 ที่สภาวะหน้าตัดคานเริ่มแตกร้าว (M_{cr})

n - 1	7.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A_s'	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	24.7	cm
f_c'	300	ksc		d'	4	cm

จากสมการ (2.1)
$$M_{cr} = \frac{(2.0\sqrt{f_c'})I_t}{\bar{y}}$$

โดยที่
$$\bar{y} = \frac{[(A_s)(h/2) + (n-1)(A_s')(d) + (n-1)(A_s)(d')]}{[A_s + (n-1)A_s + (n-1)A_s']}$$

$$\bar{y} = 11.63 \text{ cm}$$

และ
$$I_t = \left[\frac{1}{12}bh^3 \right] + \left[(bh)\left(\frac{h}{2} - \bar{y}\right)^2 \right] + \left[(n-1)(A_s')(h - d' - \bar{y})^2 \right] + \left[(n-1)(A_s)(h - d - \bar{y})^2 \right]$$

$$I_t = 32,735 \text{ cm}^4$$

แทนค่าลงในสมการ (2.1) จะได้

$$M_{cr} = \frac{(2.0\sqrt{300})32,735}{11.63} = 975 \text{ kg-m} \quad #####$$

1.2 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1, B3 ที่สถานะเหล็กเสริมถึงจุดคราก (M_y)

n	8.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	24.7	cm
f_y	5,700	ksc		d'	4	cm

จากสมการ (2.7) $M_y = (A_s - A'_s)f_y j d + A'_s f_y (d - d')$

โดยที่ $j = 1 - \frac{k}{3}$

และ $k = \frac{[-(\rho + \rho')] \pm \sqrt{(\rho + \rho')^2 + (2/n)(\rho + \rho')(d'/d)}}{(1/n)}$

$k = 0.33 \Rightarrow j = 0.89$

แทนค่าในสมการ (2.7) จะได้

$$M_y = (4.02 - 2.26)(5,700)(0.89)(24.7) + (2.26)(5,700)(24.7 - 4)$$

$M_y = 4,872 \text{ kg - m} \quad #####$

1.3 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B1, B3

b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
β_1	0.85	dimensionless		f'_c	300	ksc
c	5.76	cm		f_y	5,700	ksc
a	4.90	cm		d	24.7	cm
A_s	4.02	cm²		d'	4	cm

จากสมการ (2.9) $M_n = 0.85f'_c b a \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f'_s (d - d')$ เมื่อเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ถึงจุดคราก

โดยที่ $a = \beta_1 c$

และ $c = -R \pm \sqrt{R^2 + Q}$ เมื่อ $R = \frac{6,120A'_s - A_s f_y}{1.7f'_c b \beta_1}$, $Q = \frac{6,120d'A'_s}{0.85f'_c b \beta_1}$

จะได้ $c = 5.76 \text{ cm} \Rightarrow a = (0.85) \cdot (5.76)$

$$a = 4.90 \text{ cm}$$

แทนค่าลงในสมการ (2.9) จะได้

$$\begin{aligned}
 M_n &= 0.85 \cdot 300 \cdot 15 \cdot 4.90 \left(24.7 - \frac{4.90}{2}\right) + (2.26) \cdot (5,700)(24.7 - 4) \\
 &= 6,893 \text{ kg} - \text{m} \qquad \text{#####}
 \end{aligned}$$

2. กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B2, B4 ที่สถานะต่างๆ

$f'_c = 240 \text{ ksc}$, $V_f = 0.5\%$, ระยะหุ้มเหล็กเสริม = 2.0 cm

2.1 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B2, B4 ที่สถานะหน้าตัดคานเริ่มแตกร้าว (M_{cr})

n - 1	7.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	24.7	cm
f'_c	300	ksc		d'	4	cm
n_f	4.76	dimensionless		I_f	3.5	cm
A_f	0.0014	cm²				

จากสมการ (2.15) $M_{cr} = \frac{f_r I_t}{\bar{y}}$

โดยที่สมการ (2.13)
$$\bar{y} = \frac{[(A_s)(h/2) + (n-1)(A'_s)(d) + (n-1)(A_s)(d')] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) (h/2) \right]}{[A_s + (n-1)A'_s + (n-1)A_s] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) \right]}$$

จะได้ $\bar{y} = 11.63 \text{ cm}$

และ
$$I_t = \left[\frac{1}{12} b h^3 \right] + \left[(b h) \left(\frac{h}{2} - \bar{y} \right)^2 \right] + \left[(n-1)(A'_s)(h - d' - \bar{y})^2 \right] + \left[(n-1)(A_s)(h - d - \bar{y})^2 \right] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) \left((h/2) - \bar{y} \right)^2 \right]$$

$I_t = 32,723 \text{ cm}^4$

แทนค่าในสมการ (2.15) จะได้ $M_{cr} = \frac{35 \cdot 32,723}{11.63} = 974 \text{ kg - m}$ #####

2.2 กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B2, B4 ที่สถานะเหล็กเสริมเริ่มคราก (M_y)

n	8.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	24.7	cm
f_y	5,700	ksc		d'	4	cm
P_f	26.64	kg		ψ_n	0.61	dimensionless
n_e	4.01	เส้น				

จากสมการ (2.17)
$$M_{y1} = (A_s - A'_s)f_y j d + f_{t,y} b(h - kd) \left(\frac{h}{2} + \frac{kd}{6} \right)$$

จากสมการ (2.18)
$$M_{y2} = A'_s f_y (d - d')$$

$$M_y = M_{y1} + M_{y2}$$

โดยที่
$$k = -R_y \pm \sqrt{R_y^2 + Q_y}$$

เมื่อ
$$R_y = \frac{\left[(\rho + \rho') + \left(\frac{f_{t,y} h + f_{t,y} d}{f_y d} \right) \right]}{2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}, \quad Q_y = \frac{\left[\rho + \rho' \left(\frac{d'}{d} \right) + \left(\frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right) \right]}{\left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}$$

จะได้ $R_y = 0.34$, $Q_y = 0.42 \Rightarrow k = 0.391$, $j = 0.87$

แทนค่าในสมการ (2.17) จะได้

$$M_{y1} = (4.02 - 2.26)(5,700)(0.87)(24.7) + (45.6)(15)(27.5 - (0.391 \cdot 24.7)) \left(\frac{27.5}{2} + \frac{(0.391 \cdot 24.7)}{6} \right)$$

$$M_{y1} = 4,031 \text{ kg-m}$$

และแทนค่าลงในสมการ (2.18) จะได้

$$M_{y2} = (2.26)(5,700)(24.7 - 4) = 2,667 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_y = 4,031 + 2,667 = 6,698 \text{ kg} - \text{m} \quad \text{####}$$

2.3 การคำนวณหากำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B2, B4

b	15	cm		β_1	0.85	dimensionless
h	27.5	cm		ψ_n	0.61	dimensionless
d	24.7	cm		P_f	26.64	kg
d'	4	cm		n_e	4.01	เส้น
a	8.36	cm		f'_c	300	ksc
A_s	4.02	cm²		f_y	5,700	ksc
A'_s	2.26	cm²		E_s	2,040,000	ksc

จากสมการ (2.22)
$$M_{n1} = (A_s - A'_s)f_y(d - \frac{a}{2}) + f_{t,n}b(h - \frac{a}{\beta_1})(\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2})$$

และ สมการ (2.23)
$$M_{n2} = A'_sf_y(d - d')$$

โดยที่
$$f_{t,n} = \psi_n P_f n_e$$

$$= 65.2 \text{ ksc}$$

$$f'_s = \frac{0.003E_s(c - d')}{c} \quad \text{โดยที่ } c \text{ ได้จาก } c = -R_n \pm \sqrt{R_n^2 + Q_n}$$

เมื่อ
$$R_n = \left(\frac{0.003E_s A'_s - f_{t,n}bh - A_s f_y}{2(f_{t,n}b + 0.85f'_c b \beta_1)} \right) \quad Q_n = \frac{0.003E_s d' A'_s}{0.85f'_c b \beta_1 + f_{t,n}b}$$

จะได้ $R_n = -4.25$, $Q_n = 13.08$

$$\text{และ } a = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s + f_{t,n} b h}{0.85 f'_c b + f_{t,n} \frac{b}{\beta_1}}$$

$$= 8.36 \text{ cm}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.22) จะได้

$$M_{n1} = (4.02 - 2.26) \cdot (5700) \cdot \left(24.7 - \frac{8.36}{2}\right) + (65.2 \cdot 15) \cdot \left(27.5 - \frac{8.36}{0.85}\right) \cdot \left(\frac{27.5}{2} + \frac{8.36}{2 \cdot 0.85} - \frac{8.36}{2}\right)$$

$$= 4,560 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_{n2} = (2.26 \cdot 5700) \cdot (24.7 - 4)$$

$$= 2,667 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_n = 7,227 \text{ kg} - \text{m} \quad \text{#####}$$

3. กำลังต้านทานโมเมนต์คดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B5 ที่สถานะต่างๆ

$$f'_c = 240 \text{ ksc}, V_f = 0.5\%, \text{ ระยะหุ้มเหล็กเสริม} = 1.5 \text{ cm}$$

3.1 กำลังต้านทานโมเมนต์คดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B5 ที่สถานะหน้าตัดคานเริ่มแตกร้าว (M_{cr})

n - 1	7.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	25.2	cm
f'_c	300	ksc		d'	3.5	cm
n_f	4.76	dimensionless		I_f	3.5	cm
A_f	0.0014	cm²				

จากสมการ (2.15)
$$M_{cr} = \frac{f_r I_t}{\bar{y}}$$

โดยที่สมการ (2.13)
$$\bar{y} = \frac{[(A_s)(h/2) + (n-1)(A'_s)(d) + (n-1)(A_s)(d')] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) (h/2) \right]}{[A_s + (n-1)A'_s + (n-1)A_s] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) \right]}$$

จะได้
$$\bar{y} = 11.50 \text{ cm}$$

และ
$$I_t = \left[\frac{1}{12} b h^3 \right] + \left[(b h) \left(\frac{h}{2} - \bar{y} \right)^2 \right] + \left[(n-1)(A'_s)(h - d' - \bar{y})^2 \right] + \left[(n-1)(A_s)(h - d - \bar{y})^2 \right] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) \left((h/2) - \bar{y} \right)^2 \right]$$

$$I_t = 33,430 \text{ cm}^4$$

แทนค่าในสมการ (2.15) จะได้
$$M_{cr} = \frac{35 \cdot 33,430}{11.50} = 1,007 \text{ kg - m} \quad \text{####}$$

3.2 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B5 ที่สถานะเหล็กเสริมเริ่มคราก (M_y)

n	8.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	25.2	cm
f_y	5,700	ksc		d'	3.5	cm
P_f	26.64	kg		ψ_n	0.61	dimensionless
n_e	4.01	เส้น				

จากสมการ (2.17)
$$M_{y1} = (A_s - A'_s)f_y j d + f_{t,y} b(h - kd) \left(\frac{h}{2} + \frac{kd}{6} \right)$$

จากสมการ (2.18)
$$M_{y2} = A'_s f_y (d - d')$$

$$M_y = M_{y1} + M_{y2}$$

โดยที่
$$k = -R_y \pm \sqrt{R_y^2 + Q_y}$$

เมื่อ
$$R_y = \frac{\left[(\rho + \rho') + \left(\frac{f_{t,y} h + f_{t,y} d}{f_y d} \right) \right]}{2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}, \quad Q_y = \frac{\left[\rho + \rho' \left(\frac{d'}{d} \right) + \left(\frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right) \right]}{\left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}$$

จะได้ $R_y = 0.34$, $Q_y = 0.41 \Rightarrow k = 0.386$, $j = 0.871$

แทนค่าในสมการ (2.17) จะได้

$$M_{y1} = (4.02 - 2.26)(5,700)(0.871)(25.2) + (45.6)(15)(27.5 - (0.386 \cdot 25.2)) \left(\frac{27.5}{2} + \frac{(0.386 \cdot 25.2)}{6} \right)$$

$$M_{y1} = 4,073 \text{ kg} - \text{m}$$

และแทนค่าลงในสมการ (2.18) จะได้

$$M_{y2} = (2.26)(5,700)(25.2 - 3.5) = 2,795 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_y = 4,073 + 2,795 = 6,868 \text{ kg} - \text{m} \quad \text{####}$$

3.3 การคำนวณหากำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B5

b	15	cm		β_1	0.85	dimensionless
h	27.5	cm		ψ_n	0.61	dimensionless
d	25.2	cm		P_f	26.64	kg
d'	3.5	cm		n_e	4.01	เส้น
a	8.23	cm		f'_c	300	ksc
A_s	4.02	cm²		f_y	5,700	ksc
A'_s	2.26	cm²		E_s	2,040,000	ksc

$$\text{จากสมการ (2.22)} \quad M_{n1} = (A_s - A'_s)f_y(d - \frac{a}{2}) + f_{t,n}b(h - \frac{a}{\beta_1})(\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2})$$

$$\text{และ สมการ (2.23)} \quad M_{n2} = A'_sf_y(d - d')$$

$$\text{โดยที่ } f_{t,n} = \psi_n P_f n_e$$

$$= 65.2 \text{ ksc}$$

$$f'_s = \frac{0.003E'_s(c - d')}{c} \quad \text{โดยที่ } c \text{ ได้จาก } c = -R_n \pm \sqrt{R_n^2 + Q_n}$$

$$\text{เมื่อ } R_n = \left(\frac{0.003E_s A'_s - f_{t,n}bh - A_s f_y}{2(f_{t,n}b + 0.85f'_c b \beta_1)} \right) \quad Q_n = \frac{0.003E_s d' A'_s}{0.85f'_c b \beta_1 + f_{t,n}b}$$

จะได้ $R_n = -4.25$, $Q_n = 11.45$

$$\text{และ } a = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s + f_{t,n} b h}{0.85 f'_c b + f_{t,n} \frac{b}{\beta_1}}$$

$$= 8.23 \text{ cm}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.22) จะได้

$$M_{n1} = (4.02 - 2.26) \cdot (5700) \cdot (25.2 - \frac{8.23}{2}) + (65.2 \cdot 15) \cdot \left(27.5 - \frac{8.23}{0.85} \right) \cdot \left(\frac{27.5}{2} + \frac{8.23}{2 \cdot 0.85} - \frac{8.23}{2} \right)$$

$$= 4,636 \text{ kg - m}$$

$$M_{n2} = (2.26 \cdot 5700) \cdot (25.2 - 3.5)$$

$$= 2,795 \text{ kg - m}$$

$$M_n = 7,431 \text{ kg - m} \quad #####$$

4. กำลังต้านทานโมเมนต์ค้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B6, B7 ที่สภาวะต่างๆ

$f'_c = 350 \text{ ksc}$, $V_f = 0.5\%$, ระยะหุ้มเหล็กเสริม = 2.0 cm

4.1 กำลังต้านทานโมเมนต์ค้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B6, B7 ที่สภาวะหน้าตัดคานเริ่มแตกร้าว (M_{cr})

n - 1	7.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	24.7	cm
f'_c	400	ksc		d'	4	cm
n_f	4.76	dimensionless		I_f	3.5	cm
A_f	0.0014	cm²				

จากสมการ (2.15) $M_{cr} = \frac{f_r I_t}{\bar{y}}$

โดยที่สมการ (2.13)
$$\bar{y} = \frac{[(A_s)(h/2) + (n-1)(A'_s)(d) + (n-1)(A_s)(d')] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) (h/2) \right]}{[A_s + (n-1)A'_s + (n-1)A_s] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) \right]}$$

จะได้ $\bar{y} = 11.63 \text{ cm}$

และ
$$I_t = \left[\frac{1}{12} b h^3 \right] + \left[(b h) \left(\frac{h}{2} - \bar{y} \right)^2 \right] + \left[(n-1)(A'_s)(h - d' - \bar{y})^2 \right] + \left[(n-1)(A_s)(h - d - \bar{y})^2 \right] + \left[0.33(b)(n_f - 1) \left(\frac{A_f h}{I_f} \right) \left((h/2) - \bar{y} \right)^2 \right]$$

$I_t = 32,723 \text{ cm}^4$

แทนค่าในสมการ (2.15) จะได้ $M_{cr} = \frac{40 \cdot 32,723}{11.63} = 1,125 \text{ kg - m}$ #####

4.2 กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B6, B7 ที่ภาวะเหล็กเสริมเริ่มคราก (M_y)

n	8.72	dimensionless		A_s	4.02	cm²
b	15	cm		A'_s	2.26	cm²
h	27.5	cm		d	24.7	cm
f_y	5,700	ksc		d'	4	cm
P_f	26.64	kg		ψ_n	0.61	dimensionless
n_e	4.01	เส้น				

จากสมการ (2.17)
$$M_{y1} = (A_s - A'_s)f_y j d + f_{t,y} b(h - kd) \left(\frac{h}{2} + \frac{kd}{6} \right)$$

จากสมการ (2.18)
$$M_{y2} = A'_s f_y (d - d')$$

$$M_y = M_{y1} + M_{y2}$$

โดยที่
$$k = -R_y \pm \sqrt{R_y^2 + Q_y}$$

เมื่อ
$$R_y = \frac{\left[(\rho + \rho') + \left(\frac{f_{t,y} h + f_{t,y} d}{f_y d} \right) \right]}{2 \left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}, \quad Q_y = \frac{\left[\rho + \rho' \left(\frac{d'}{d} \right) + \left(\frac{f_{t,y} h}{f_y d} \right) \right]}{\left(\frac{1}{2n} - \frac{f_{t,y}}{f_y} \right)}$$

จะได้ $R_y = 0.34$, $Q_y = 0.42 \Rightarrow k = 0.391$, $j = 0.87$

แทนค่าในสมการ (2.17) จะได้

$$M_{y1} = (4.02 - 2.26)(5,700)(0.87)(24.7) + (45.6)(15)(27.5 - (0.391 \cdot 24.7)) \left(\frac{27.5}{2} + \frac{(0.391 \cdot 24.7)}{6} \right)$$

$$M_{y1} = 4,031 \text{ kg} - \text{m}$$

และแทนค่าลงในสมการ (2.18) จะได้

$$M_{y2} = (2.26)(5,700)(24.7 - 4) = 2,667 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_y = 4,031 + 2,667 = 6,698 \text{ kg} - \text{m} \quad \text{#####}$$

4.3 การคำนวณหากำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B6, B7

b	15	cm		β_1	0.85	dimensionless
h	27.5	cm		ψ_n	0.61	dimensionless
d	24.7	cm		P_f	26.64	kg
d'	4.0	cm		n_e	4.01	เส้น
a	6.85	cm		f'_c	400	ksc
A_s	4.02	cm²		f_y	5,700	ksc
A'_s	2.26	cm²		E_s	2,040,000	ksc

จากสมการ (2.22) $M_{n1} = (A_s - A'_s)f_y(d - \frac{a}{2}) + f_{t,n}b(h - \frac{a}{\beta_1})(\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2})$

และ สมการ (2.23) $M_{n2} = A'_sf_y(d - d')$

โดยที่ $f_{t,n} = \psi_n P_f n_e$

$$= 65.2 \text{ ksc}$$

$$f'_s = \frac{0.003E'_s(c - d')}{c} \quad \text{โดยที่ } c \text{ ได้จาก } c = -R_n \pm \sqrt{R_n^2 + Q_n}$$

$$\text{เมื่อ } R_n = \left(\frac{0.003E_s A'_s - f_{t,n}bh - A_s f_y}{2(f_{t,n}b + 0.85f'_c b \beta_1)} \right) \quad Q_n = \frac{0.003E_s d' A'_s}{0.85f'_c b \beta_1 + f_{t,n}b}$$

จะได้ $R_n = -3.38$, $Q_n = 10.41$

$$\text{และ } a = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s + f_{t,n} b h}{0.85 f'_c b + f_{t,n} \frac{b}{\beta_1}}$$

$$= 6.85 \text{ cm}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.22) จะได้

$$M_{n1} = (4.02 - 2.26) \cdot (5700) \cdot \left(24.7 - \frac{6.85}{2}\right) + (65.2 \cdot 15) \cdot \left(27.5 - \frac{6.85}{0.85}\right) \cdot \left(\frac{27.5}{2} + \frac{6.85}{2 \cdot 0.85} - \frac{6.85}{2}\right)$$

$$= 4,862 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_{n2} = (2.26 \cdot 5700) \cdot (24.7 - 4)$$

$$= 2,667 \text{ kg} - \text{m}$$

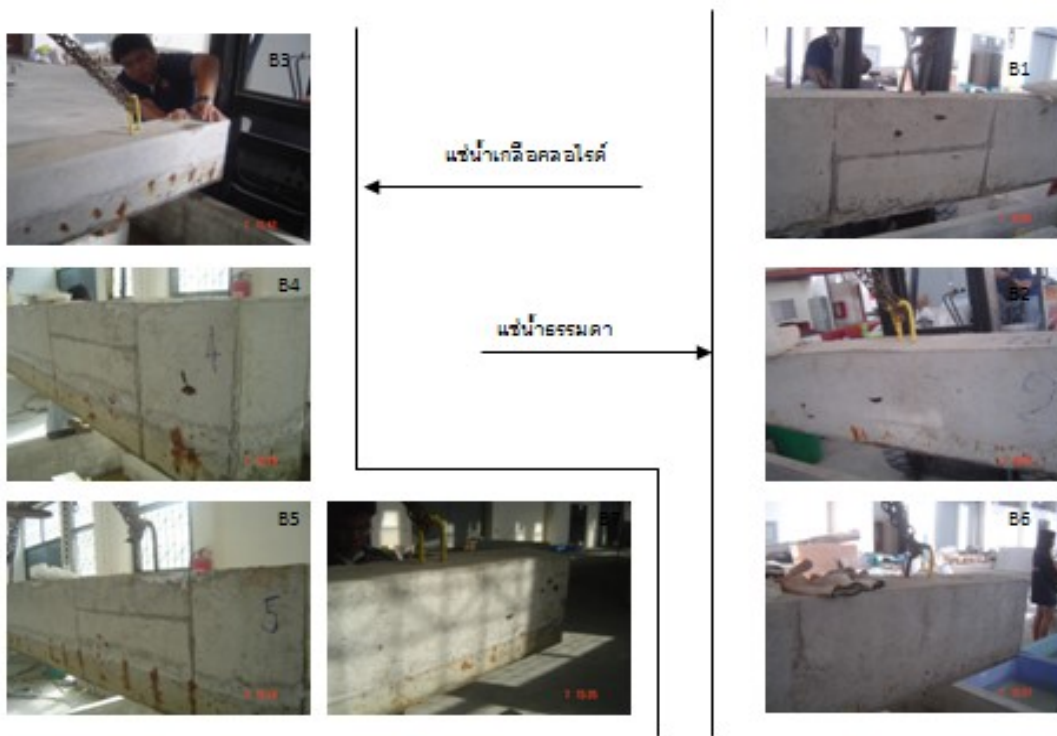
$$M_n = 7,528 \text{ kg} - \text{m} \quad \text{####}$$

ภาคผนวก ข

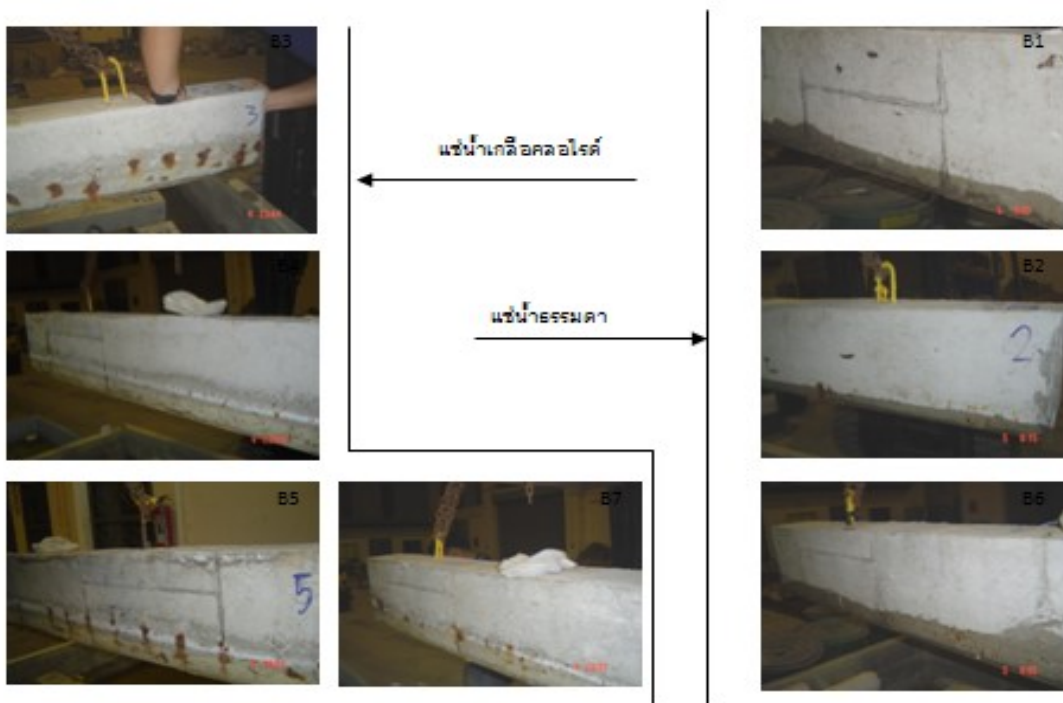
รูปแสดงความเสียหายของคานทดสอบตลอดระยะเวลา 23 เดือน



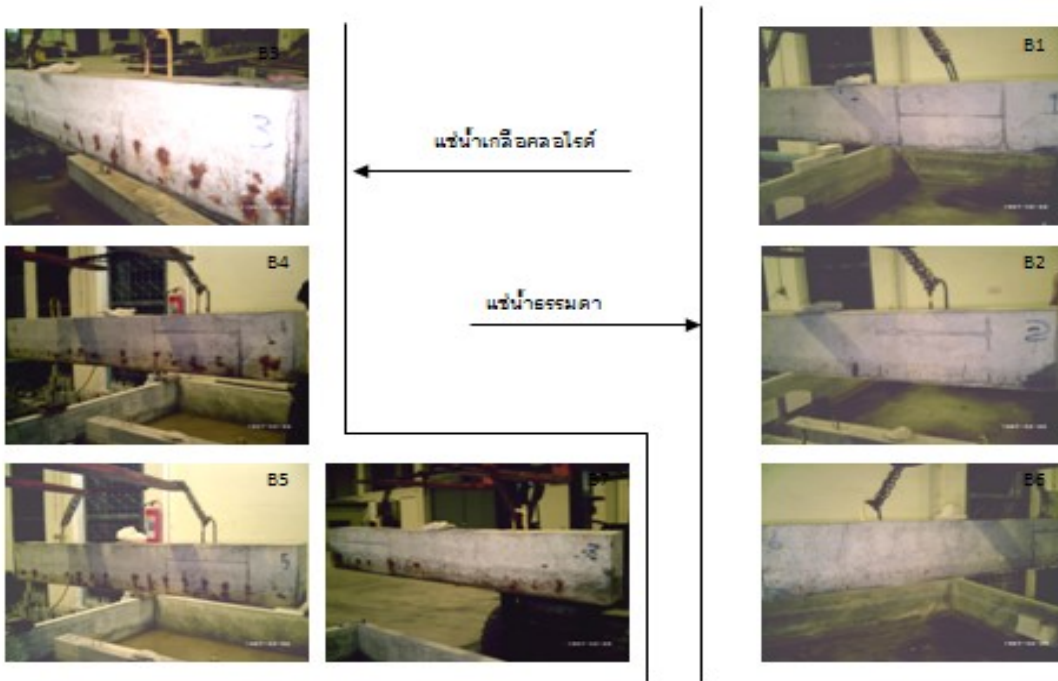
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 เดือน



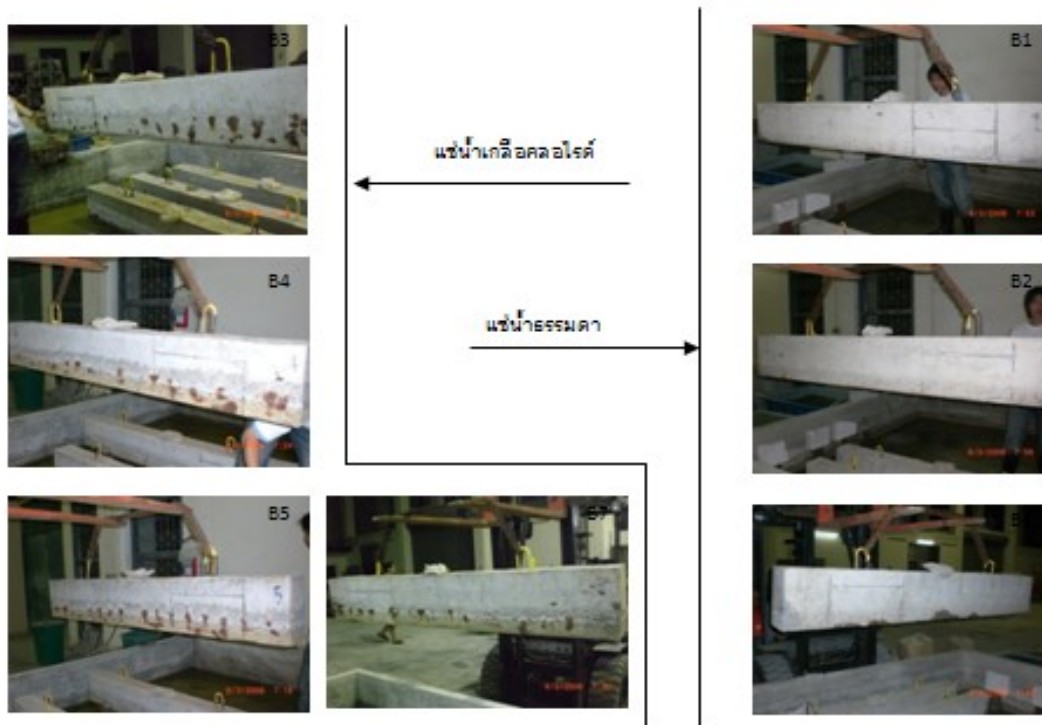
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 เดือน



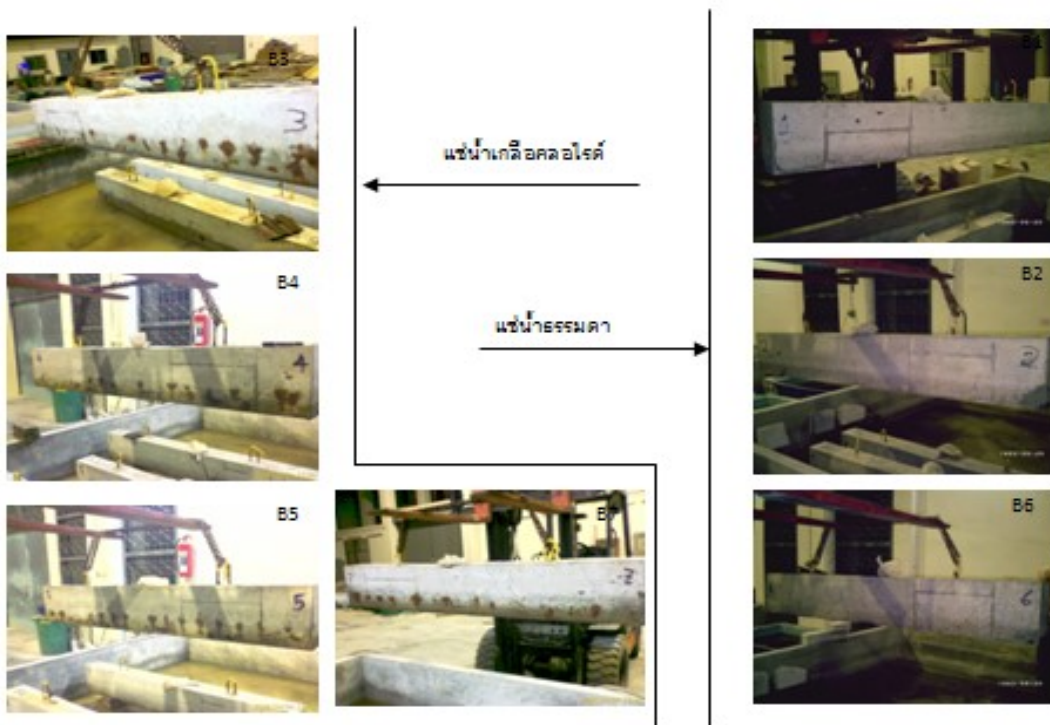
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 4 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 เดือน



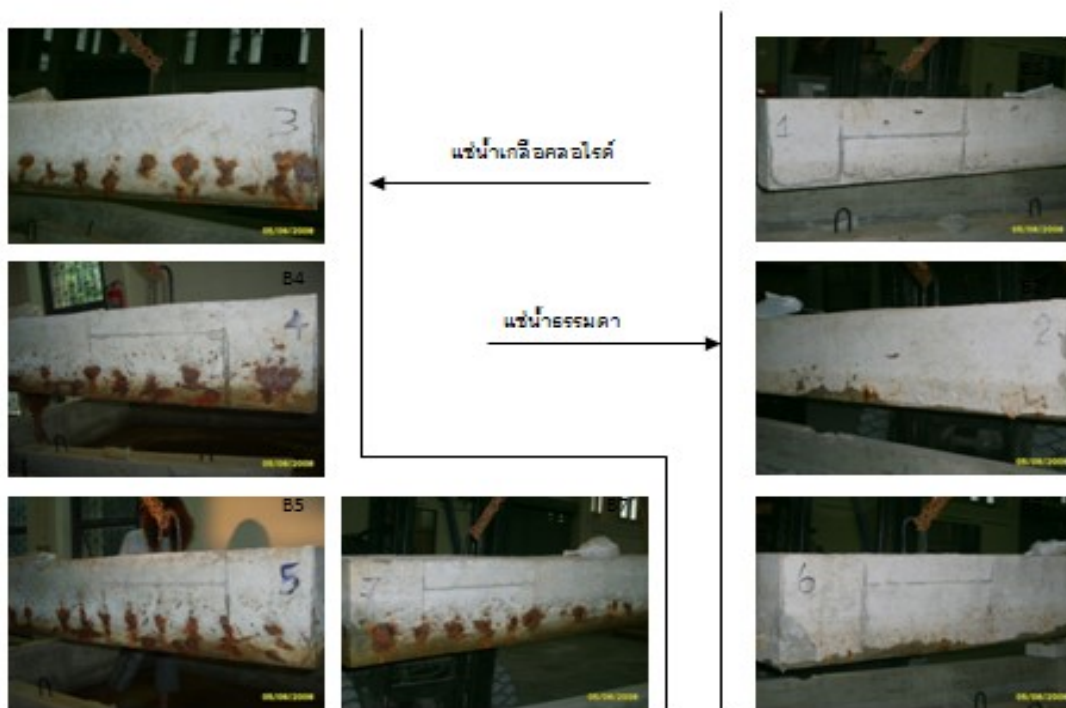
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 6 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 8 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 9 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 11 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 12 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 13 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 14 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 15 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 16 เดือน



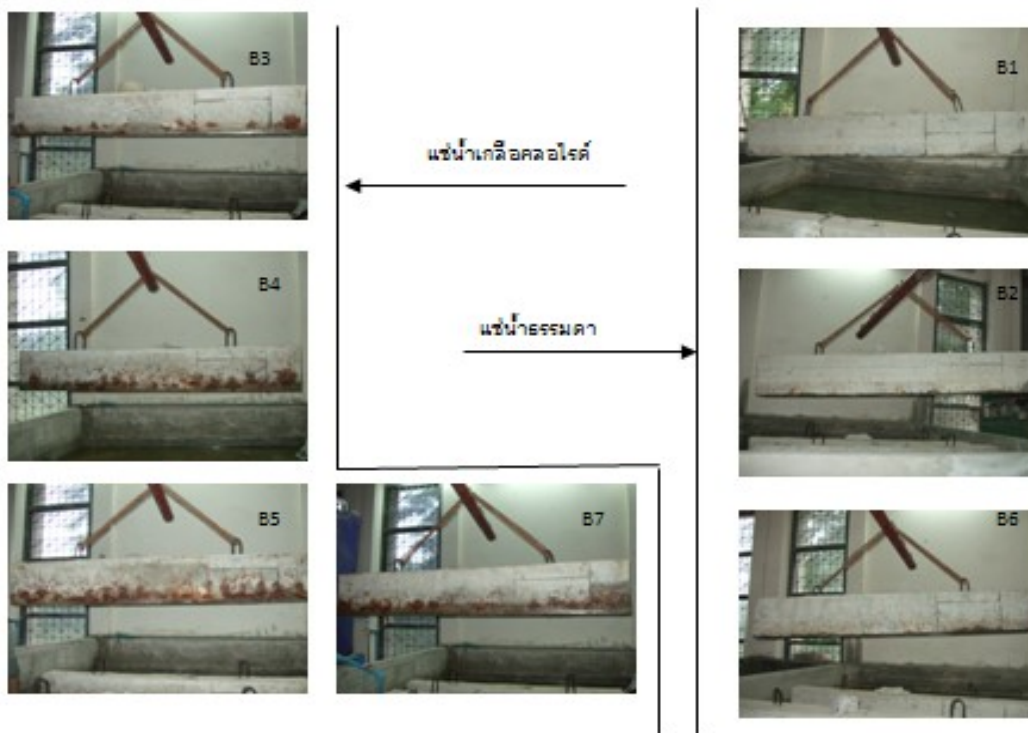
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 17 เดือน



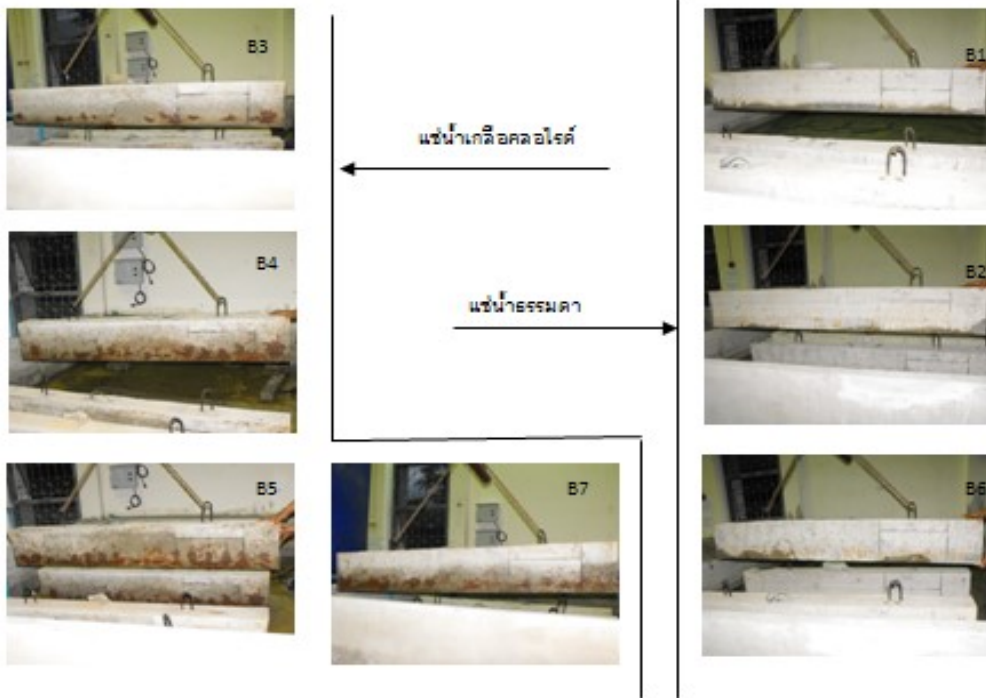
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 18 เดือน



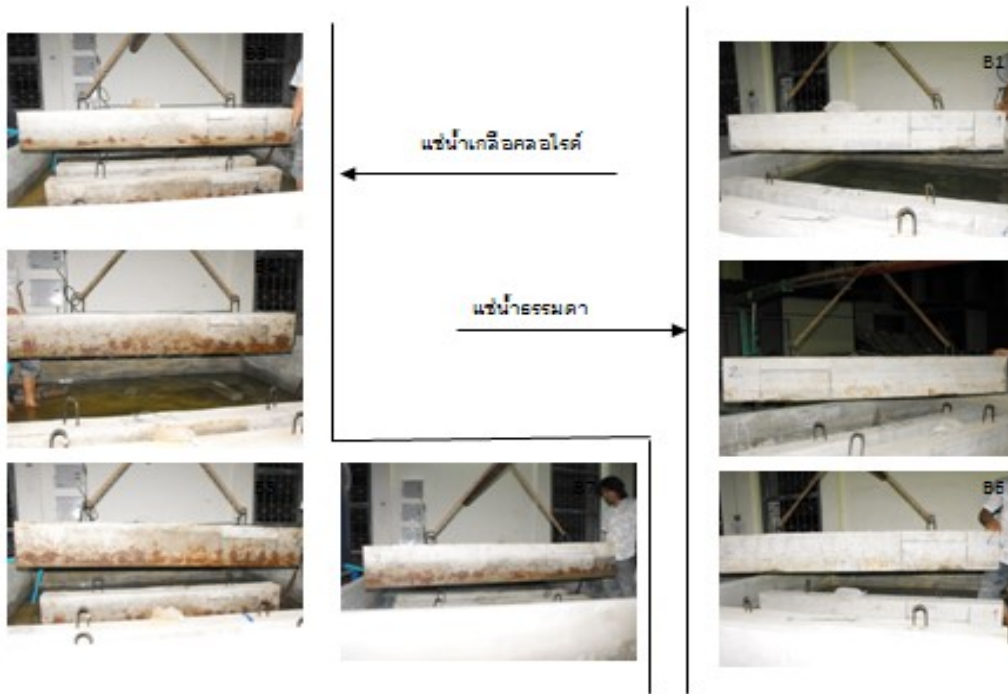
ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 21 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 22 เดือน



ภาพความเสียหายของคานทดสอบ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 23 เดือน

ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช (Asst. Prof. Dr. Taweechai Sumranwanich)

ที่ทำงาน: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง

จังหวัดชลบุรี 20131

โทรศัพท์ : 0 3810 2222 ต่อ 3310, 3356

โทรสาร : 0 3874 5806

โทรศัพท์มือถือ : 081-862 1230

E-mail: twc@buu.ac.th

Website: www.cebuu.net

วุฒิการศึกษา

- ปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2547
- วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโครงสร้าง) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย 2540
- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538

ประสบการณ์การทำงาน

15 มิ.ย. 2541 - ปัจจุบัน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

มิ.ย. 2540 - เม.ย. 2541

บริษัท พีดับบลิวเอชแอล วิศวกรที่ปรึกษา จำกัด

อาคารกุหลาบ ถนนบางนา-ตราด อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

เม.ย. 2538 - ส.ค. 2538

บริษัท เมโทร โปลิเตน เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด

19/2 ถนนสุขุมวิท ซอย 23 (ประสานมิตร) กรุงเทพฯ 10110

งานวิจัยที่สนใจ

- การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (Corrosion of steel in concrete due to chloride attack)
- ความคงทนของคอนกรีต (Durability of concrete)
- คอนกรีตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced concrete)
- โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเส้นใย (Reinforced concrete structures with fibers)
- คานคอนกรีตเสริมแท่ง FRP (FRP-reinforced concrete beam)

ความเชี่ยวชาญ

- สอนและวิจัยด้านวิศวกรรมคอนกรีตและวัสดุ
- ออกแบบโครงสร้าง
- ตรวจสอบอาคารตามกฎหมายควบคุมอาคาร

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- วุฒิสมาชิก สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) หมายเลข 1/021871
- กรรมการวิชาการ และสามัญสมาชิก สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) หมายเลข 0008

ใบอนุญาตผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรม

- สามัญวิศวกรโยธา สถาปนิก หมายเลข สย.8171

ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

- ผู้ตรวจสอบอาคาร บุคคลธรรมดา กรมโยธาธิการและผังเมือง เลขที่ บ.0951/2550

รางวัลที่ได้รับ

- รางวัล “รัตนบูรพา” สาขาการบริการวิชาการ ประจำปี 2556 จากมหาวิทยาลัยบูรพา
- รางวัลผลงานวิจัยดีเด่น สาขาวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2559 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จากผลงานเรื่อง “การพัฒนามาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตโดยคำนึงถึงความคงทนและอายุการใช้งาน” ร่วมกับคณะวิจัยทั้งหมด 11 คน โดยมี ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล เป็นหัวหน้าคณะวิจัย