กำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง
Flexural Strength of Reinforced Concrete Beam with Steel Fiber under Exposure to Chloride Environment with Cyclic Wetting and Drying

ลีน่า ปรัก[1] และ ทวีชัย สำราญวานิช[2,*]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
**Corresponding author; E-mail address: twc@buu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษากำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง รวมทั้งกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตด้วย โดยใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัดและกำลังแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งด้วยสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 5.0% เป็นเวลา 2 ปี จากผลการทดลอง พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตควบคุมไม่แตกต่างกัน แต่กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก กำลังดัดของคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก และกำลังดัดของคานคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต่ำกว่าคานคอนกรีตที่เผชิญกับน้ำเปล่า

คำสำคัญ: คอนกรีต, เส้นใยเหล็ก, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, คลอไรด์, กำลังดัด

Abstract

This paper aims to study the flexural strength of reinforced concrete (RC) beam containing steel fiber under chloride environment with cyclic wetting and drying. The compressive strength, splitting tensile strength of concrete containing steel fiber were also studied. Steel fiber was used at the content of 0.50% by volume of the concrete. The compressive strength and splitting tensile strength and were tested at the age of 28 days. The flexural strength test of the RC beam was done after the cyclic wetting and drying period of 2 years in the 5.0% of chloride solution. From the experimental results, it was found that the compressive strength of concrete containing steel fiber was similar to control concrete. The splitting tensile strength of concrete mixed with steel fiber was higher than that without steel fiber. The flexural strength of RC beam with steel fiber was higher than that without steel fiber. The flexural strength of RC beam exposed to chloride environment was lower than that exposed to the water.

Keywords: concrete, steel fiber, reinforced concrete beam, chloride, flexural strength

1. คำนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง [1-3] จากความก้าวหน้าทางด้านวิศวกรรมก่อสร้าง คอนกรีตสมรรถนะสูงเช่น คอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กค่อยๆถูกนำมาใช้ในโครงสร้างสำคัญๆ [4, 5] อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษา พบว่า การใช้เส้นใยเหล็กจะมีผลต่อการไหลและความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมคอนกรีต ตลอดจนคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต [6, 7] อีกทั้งการศึกษาผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อความคงทนของคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ก็ยังจำกัด

ความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีต คุณภาพงาน การก่อสร้าง การบ่ม และระยะหุ้มเหล็ก อย่างไรก็ตามในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ ไอออนคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม ส่งผลให้หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงซึ่งมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างลดลงด้วย ตลอดจนการเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะทำให้เกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหายได้

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับคลอไรด์นั้น นอกจากการออกแบบที่ต้องใช้คอนกรีตที่มีความคงทนต่อการทำลายเนื่องจากคลอไรด์แล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งคือต้องออกแบบคอนกรีตไม่ให้เกิดการแตกร้าว เพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่ทำให้คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวจากการรับแรงหรือจากปัญหาอื่นๆ เช่นการหดตัว หรือถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวให้เล็กที่สุดเท่าที่ทำได้ [8]

คอนกรีตหากต้องการเพิ่มกำลังรับแรงให้สูงขึ้นสามารถกระทำได้ด้วยการขยายขนาดหน้าตัดของโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ

ถือเป็นการสิ้นเปลือง อีกทั้งทำให้ต้องสูญเสียพื้นที่ใช้สอยของอาคาร ดังนั้น นักวิจัยพยายามพัฒนาวัสดุผสมเพิ่มที่ช่วยให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้มากขึ้นโดยที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ต้องมีขนาดใหญ่เกินไป ซึ่งเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึงได้สูงมาก ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้เส้นใยเหล็กมาช่วยทำหน้าที่รับแรงดึงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กนอกเหนือจากเหล็กเสริม แต่ต้องพิจารณาถึงความคงทนต่อการเกิดสนิมด้วยโดยเฉพาะการเกิดสนิมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งศึกษากำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยศึกษาผลของกำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันด้วย

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.1 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้แสดงในตารางที่ 1 ใช้เส้นใยเหล็กผสมคอนกรีตในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งขนาดและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็กได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ส่วนลักษณะและรูปร่างทางกายภาพของเส้นใยเหล็กได้แสดงในรูปที่ 1 และเงื่อนไขการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	กำลังอัดออกแบบ, f'_c (kg/cm^2)	w/b	ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m^3)					Steel fiber (%)
			ซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	SP	
C1	240	0.55	304	167	909	1,024	1.52	-
C2			304	167	909	1,024	1.52	0.50
C3	350	0.38	405	152	851	957	2.03	0.50

ตารางที่ 2 ขนาดและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็ก

Fiber type	Length, l_f (cm)	Diameter, d_f (cm)	Specific gravity	Tensile strength, f_f (kg/cm^2)	Elastic modulus (kg/cm^2)
Steel	3.5	0.055	7.85	11,213	1,121,300



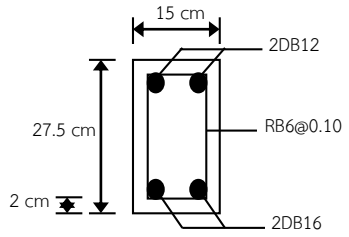
รูปที่ 1 ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยเหล็กที่ใช้

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Beam no.	ปริมาณเส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตรของคอนกรีต)	กำลังอัดออกแบบ, f'_c (kg/cm^2)	สิ่งแวดล้อมแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง
B1	-	240	แช่น้ำเปล่า
B2	0.50	240	แช่น้ำเปล่า
B3	-	240	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0%
B4	0.50	240	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0%
B5	0.50	350	แช่น้ำเปล่า
B6	0.50	350	แช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5.0%

2.2 รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

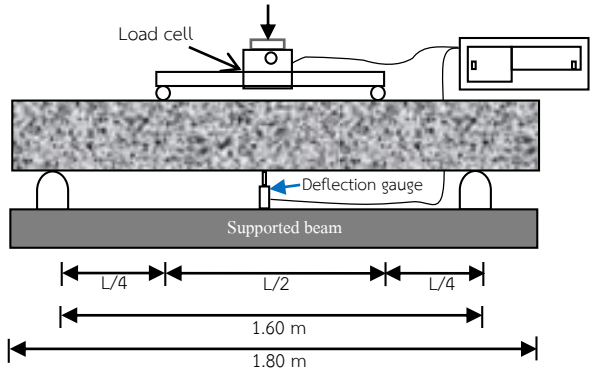
หล่ออย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ตามส่วนผสมของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ตามตารางที่ 1 ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน จึงนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [9] กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting tensile strength test) ตามมาตรฐาน ASTM C 496 [10] ส่วนการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเหล็ก (Flexural strength test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 78 [11] โดยทดสอบกำลังดัดด้วยวิธีการดัดแบบ 4 จุด (Four-point bend test) ทำการหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ดังแสดงในตารางที่ 1 (กรณีคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก เส้นใยได้ถูกผสมเข้าไปในคอนกรีตในขั้นตอนผสมคอนกรีต) โดยใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 27.5 เซนติเมตร ยาว 180 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับคานเท่ากับ 160 เซนติเมตร และเสริมเหล็กในคานน้อยกว่าสภาวะสมดุล (Under reinforcement) ตามรายละเอียดดังรูปที่ 2 ทั้งนี้ทำการบ่มคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยกระสอบชุบน้ำตลอดเวลาหลังการหล่อเป็นระยะเวลา 28 วัน จึงนำตัวอย่างคานไปแช่ในน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% เป็นแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (5 วัน เปียก / 2 วัน แห้ง) เป็นระยะเวลา 2 ปี โดยในช่วงวัฏจักรเปียกตัวอย่างคานจมอยู่ในน้ำหรือสารละลายเกลือคลอไรด์ที่ความลึก 5 เซนติเมตร วัดจากท้องคานที่จม



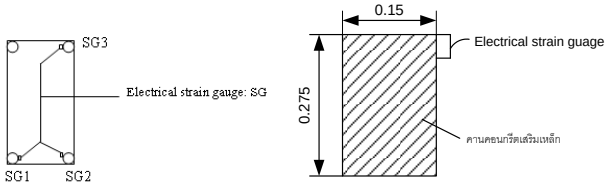
รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Load

Portable data logger



รูปที่ 3 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ก) บนเหล็กเสริม (ข) บนผิวของคอนกรีต

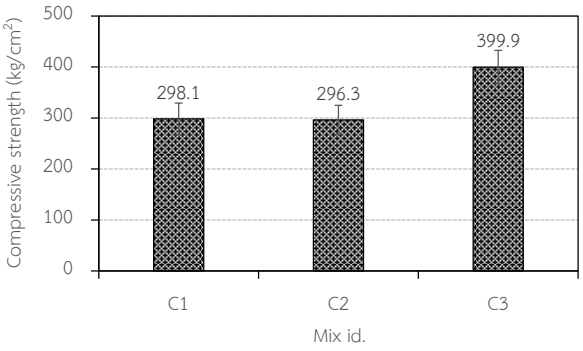
รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical-strain gauge

รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการดัดแบบ 4 จุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal testing machine ขนาด 150 ตัน เป็นต้นกำเนิดแรงกดกระทำที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอ่านค่าแรงกดจากโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 50 ตัน ส่วนการวัดการโก่งตัวของคาน ใช้อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement transducer or deflection gauge) ติดตั้งที่กึ่งกลางใต้ท้องคานระหว่างจุดรองรับทั้งสอง และการวัดระยะการยืดหดของเหล็กเสริมภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้ Electrical-strain gauge (SG) ติดบนผิวเหล็กที่ช่วงกลางคานทั้งเหล็กบนและเหล็กล่างดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และในการวัดการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้ Electrical-strain gauge ประเภทที่ติดผิวคอนกรีต ติดที่ผิวด้านข้างส่วนบนของคานคอนกรีตบริเวณช่วงกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข)

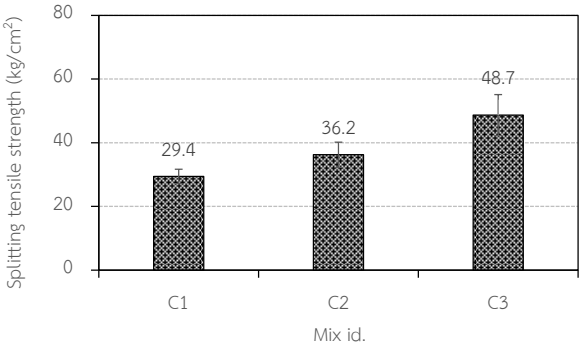
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

กำลังอัดของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาคอนกรีตชนิดเดียวกัน (C1 และ C2) พบว่า เส้นใยเหล็กไม่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต แต่พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง (C3) อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน สูงกว่าค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้ 24.2%, 23.4% และ 66.6% สำหรับ C1, C2 และ C3 ตามลำดับ โดยค่ากำลังอัดของ C1 และ C2 ออกแบบไว้ที่ 240 kg/cm^2 ส่วน C3 ออกแบบไว้ที่ 350 kg/cm^2



รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

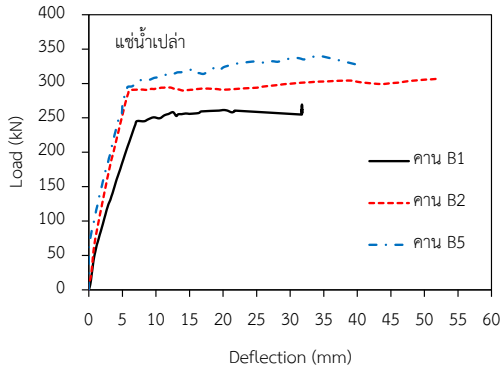
รูปที่ 6 แสดงค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต เมื่อพิจารณาคอนกรีตชนิดเดียวกัน (C1 และ C2) พบว่า กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็กซึ่ งสอดคลองกับงานวิจัยของ Zheng et al. (2018) [12] และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง (C3)

3.3 กำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก

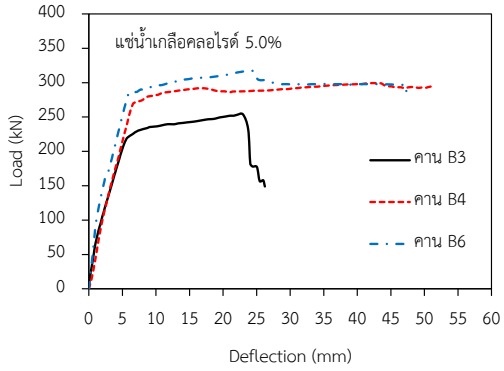
รูปที่ 7 ถึง 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมและไม่ผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญกับวัฏจักเปียกสลับแห้งด้วยน้ำเปล่าและสารละลายเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 2 ปี จากรูปที่ 7 และ 8 เมื่อพิจารณาผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อความสามารถรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณากรณีเป็นคอนกรีตชนิดเดียวกัน (เปรียบเทียบระหว่าง B1 กับ B2 และ B3 กับ B4) พบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดัดได้สูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก นอกจากนี้ เมื่อใช้เส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นส่งผลทำให้ความสามารถรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสูงขึ้นตามไปด้วย

พิจารณาความสามารถรับแรงดัดของคานภายหลังเผชิญในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันคือน้ำและสารละลายเกลือคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ถึง 11 พบว่า คานที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถรับแรงกดสูงสุดต่ำกว่าคานที่เผชิญกับน้ำที่ไม่มีคลอไรด์ เนื่องจากเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ส่งผลให้หน้าตัดเหล็กลดลง กำลังรับแรงจึงลดลง อย่างไร

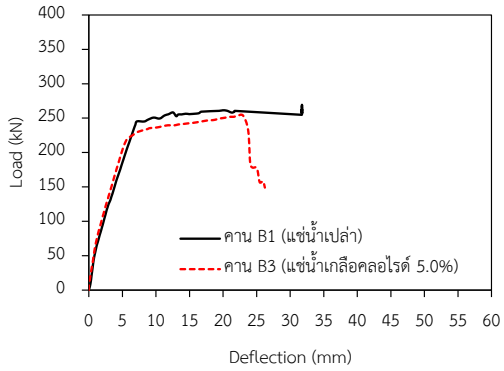
ก็ตาม สำหรับคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก ความสามารถรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถรับแรงกดสูงสุดได้น้อยกว่าคานที่ไม่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ (เผชิญกับน้ำ) เนื่องจากเส้นใยเหล็กเกิดสนิมเมื่อต้องเผชิญในสิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์ ดังรูปที่ 12 ส่งผลให้ความสามารถรับแรงของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กลดลง ความสามารถรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจึงลดลงตามไปด้วย



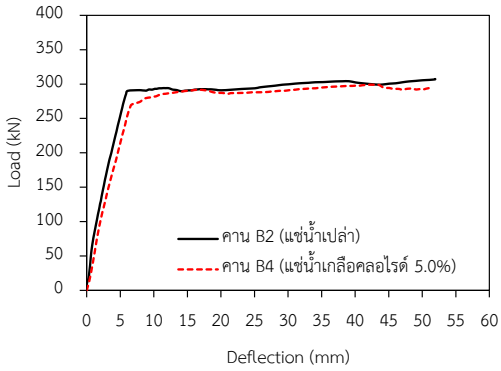
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับน้ำ



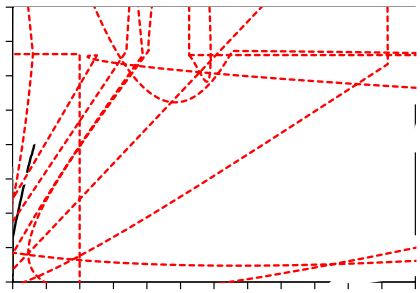
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์ 5.0%



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C1)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C2)



รูปที่ 11 แรงกดและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C3)



รูปที่ 12 การเกิดสนิมของเส้นใยเหล็กและเหล็กเสริมในคานคอนกรีตภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง 2 ปี

4. สรุปผล

จากผลการศึกษากำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้เส้นใยเหล็กผสมคอนกรีตไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นกำลังอัดของคอนกรีต แต่มีผลต่อการเพิ่มกำลังดึงของคอนกรีต โดยกำลังดึงของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก และเมื่อใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นส่งผลให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย

2. กำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใย ทั้งที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์และสิ่งแวดล้อมไม่มีคลอไรด์ (เผชิญน้ำเปล่า)

3. กำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต่ำกว่ากำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมไม่มีคลอไรด์ (เผชิญกับน้ำเปล่า)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 112/2557 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] Zhang, P., Wan, J., Wang, K. and Li, Q. (2017). Influence of nano-SiO_2 on properties of fresh and hardened high-performance concrete: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 148, pp. 648–658.

[2] Lan, L. (2014). *A new experimental study on the basic mechanical properties of concrete*, Dalian University of Technology, Dalian, China, 2014.

[3] Mohammed, T. J., Bakar, B. A. and Bunnori, N. M. (2016). Torsional improvement of reinforced concrete beams using ultra highperformance fiber reinforced concrete (UHPFC) jackets–experimental study. *Construction and Building Materials*, 106, pp. 533–542.

[4] Ya-Mei, H. and Li-Hua, W. (2018). Study on mechanical properties of green concrete. *China Rural Water and Hydropower*, 1, pp. 150–153.

[5] Zhang, P., Zhao, Y.-N., Li, Q.-F., Zhang, T.-H. and Wang, P. (2014). Mechanical properties of fly ash concrete composites reinforced with nano-SiO2 and steel fiber. *Current Science*, 106(11), pp. 1529–1537.

[6] Jaivignesh, B. and Sofi, A. (2017). Study on mechanical properties of concrete using plastic waste as an aggregate. *Earth and Environmental Science*, 80(1).

[7] Akca, A. H. and Ozyurt, N. (2018). Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 159, pp. 540–552.

[8] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์., การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต. ความคงทนของคอนกรีต :30

[9] ASTM C39 (2004). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02.

[10] ASTM C496 (2004). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02.

[11] ASTM C78 (2004). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02.

[12] Zheng, Y., Wu, X., He, G., Shang, Q., Xu, J., & Sun, Y. (2018). Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. *Advances in Civil Engineering*, pp. 1–11.