

กำลังตัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง

ทวีชัย สํารานวนิช^{1,*} และ ลีน่า ปรัก²
twc@buu.ac.th^{1*}, lyna_p@rmutt.ac.th²

¹ ศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received : 16-Dec-2020
Revised : 31-Jan-2021
Accepted : 17-Aug-2021

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษากำลังตัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) ผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ทำการศึกษากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยด้วย โดยใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัดและกำลังแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังตัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งด้วยสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 5.0% เป็นระยะเวลาสองปี รวมทั้งตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตควบคุมไม่ผสมเส้นใยเหล็กมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็ก สำหรับกำลังตัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้งพบว่า กำลังตัดของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคาน คสล. ควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก กำลังตัดของคาน คสล. เมื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าคาน คสล. เมื่อเผชิญน้ำเปล่า นอกจากนี้ คาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เส้นใยเหล็ก กำลังตัด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ คลอไรด์

Flexural Strength and Chloride Penetration Resistance of Reinforced Concrete Beam with Steel Fiber after Exposure to Chloride Environment with Cyclic Wetting and Drying

Taweechai Sumranwanich^{1,*} and Lyna Prak²
twc@buu.ac.th^{1*}, lyna_p@rmutt.ac.th²

¹ Center of Construction Technology and Traffic Management, Faculty of Engineering, Burapha University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 16-Dec-2020
Revised	: 31-Jan-2021
Accepted	: 17-Aug-2021

Abstract

This paper aims to study the flexural strength and chloride penetration resistance of reinforced concrete (RC) beam containing steel fiber after exposure to chloride environment with cyclic wetting and drying. The compressive and splitting tensile strengths of concrete containing steel fiber were also studied. Steel fiber was used at the content of 0.50% by volume of the concrete. Compressive and splitting tensile strengths were tested at the age of 28 days. RC beams' flexural strength was tested after exposure to the cyclic wetting and drying period with 5.0% of chloride solution for two years. The chloride penetration of concrete was investigated. The study results found that the compressive strength of concrete containing steel fiber was similar to control concrete without steel fiber, but the splitting tensile strength of concrete mixed with steel fiber was higher than that without steel fiber. Considering the RC beam's flexural strength after exposure to cyclic wetting and drying, the RC beam's flexural strength with steel fiber was higher than the control RC beam without steel fiber. The RC beam's flexural strength exposed to the chloride environment was lower than that exposed to the water. Besides, RC beams with steel fiber had higher chloride penetration resistance than those without steel fiber.

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

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากเป็นวัสดุที่แข็งแรงและทนทาน จากความก้าวหน้าทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้าง คอนกรีตจึงถูกพัฒนาให้มีสมรรถนะสูงขึ้น เช่น คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel fiber reinforced concrete) เพื่อใช้เสริมแรงในโครงสร้างชั่วคราว หรือใช้ทดแทนเหล็กเสริมบางส่วน หรือใช้แทนเหล็กเสริมทั้งหมดของชิ้นส่วนโครงสร้างหล่อในที่และหล่อสำเร็จรูป [1] จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เส้นใยเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่บริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) ซึ่งมีเกลือคลอไรด์ (Chloride) การเกิดสนิมของเส้นใยเหล็กจึงเป็นปัญหาที่ต้องคำนึงถึงด้วย [2-3]

ทั้งนี้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ (Chloride environment) ขึ้นอยู่กับสมบัติของคอนกรีต คุณภาพงานการก่อสร้าง การบ่มและระยะหุ้มเหล็ก เป็นต้น [4] อย่างไรก็ตามเกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม ทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลง ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างลดลง เมื่อสนิมเหล็กมีปริมาณมากขึ้นก็จะดันผิวคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กให้แตกร้าวเสียหายได้ ซึ่งการซ่อมแซมต้องใช้วัสดุที่เหมาะสมและทนทานต่อสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ภายหลังการซ่อมแซม [5] เมื่อต้องออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญเกลือคลอไรด์ต้องเลือกคอนกรีตที่มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์สูง [6-7] และควรออกแบบไม่ให้เกิดรอยแตกร้าว เพราะรอยแตกร้าวเป็นช่องทางที่เกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่าย ทั้งรอยแตกร้าวจากการหดหรือจากการหดตัวของคอนกรีต แต่หากหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวให้เล็กที่สุด นอกจากนี้ หากต้องการให้โครงสร้างรับกำลังได้มากขึ้น โดยทั่วไปมักใช้วิธีขยายขนาดหน้าตัดโครงสร้าง แต่ก็อาจสิ้นเปลืองและสูญเสียพื้นที่ใช้สอย ดังนั้นอีกแนวทางหนึ่งที่ผู้ออกแบบเลือกใช้ คือ การใช้วัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต เช่น เส้นใยเหล็ก

เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มทั้งกำลังดึงของคอนกรีตและกำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย [8] แต่หากต้องใช้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลก็ต้องพิจารณาความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ไปพร้อมกัน ซึ่งการศึกษาผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying) ยังมีอยู่จำกัด

ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษากำลังดัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยศึกษาผลกระทบของประเภทสิ่งแวดล้อมและกำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันด้วย เพื่อประโยชน์ในการประเมินการใช้งานต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1. วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.1 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 1 โดยมีคอนกรีตที่แตกต่างกัน 2 กลุ่มคือ กลุ่มกำลังอัดออกแบบ 240 กก./ซม.² (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55) และกลุ่มกำลังอัดออกแบบ 350 กก./ซม.² (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.38) ใช้เส้นใยเหล็กผสมคอนกรีตในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต โดยขนาดและสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็กแสดงไว้ในตารางที่ 2 ส่วนลักษณะและรูปร่างของเส้นใยเหล็กแสดงไว้ในรูปที่ 1 และเงื่อนไขการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงไว้ในตารางที่ 3



รูปที่ 1 ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยเหล็กที่ใช้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

รหัสส่วนผสม คอนกรีต	กำลังอัด ออกแบบ f'_c (กก./ชม. ²)	w/b	ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m ³)					เส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตรของ คอนกรีต)
			ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	สารลดน้ำ พิเศษ (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	154	851	957	2.03	0.50

ตารางที่ 2 ขนาดและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็ก

ชนิดเส้นใย	ความยาว l_f (ชม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง d_f (ชม.)	ความถ่วงจำเพาะ	กำลังดึง f_f (กก./ชม. ²)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ชม. ²)
เส้นใยเหล็ก	3.5	0.055	7.85	11,200	1,121,300

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

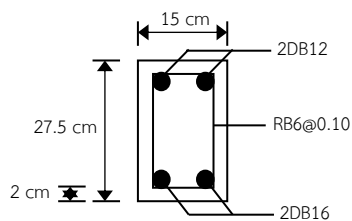
รหัสคาน คสล.	ปริมาณเส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตรของ คอนกรีต)	กำลังอัดออกแบบ, f'_c (กก./ชม. ²)	ประเภทสิ่งแวดล้อมในรูปแบบวัฏจักร เปียกสลับแห้ง
B1	-	240	น้ำเปล่า
B2	0.50		
B3	-		สารละลายคลอไรด์ 5.0%
B4	0.50		
B5	0.50	350	น้ำเปล่า
B6			สารละลายคลอไรด์ 5.0%

2.2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

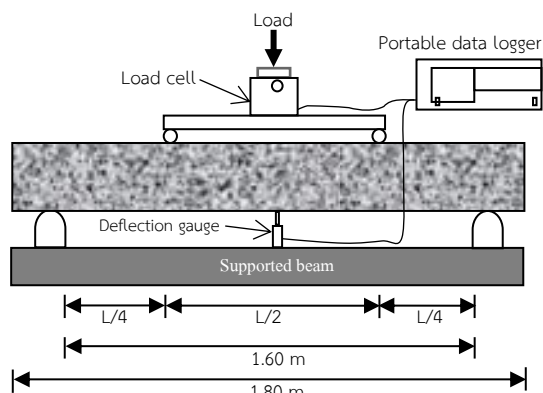
สำหรับการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตนั้นใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หล่อตัวอย่างด้วยส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 1 ทำการถอดแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [9] กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting tensile strength test) ตามมาตรฐาน ASTM C 496 [10] ส่วนการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเหล็ก (Flexural strength test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 78 [11] ซึ่งทดสอบกำลังดัดด้วยวิธีการดัดแบบ 4 จุด (Four-point

bend test) โดยทำการหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) ตามส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 1 (กรณีผสมเส้นใยเหล็ก เส้นใยเหล็กถูกผสมเข้าในคอนกรีตตั้งแต่ตอนผสมคอนกรีต) โดยใช้คานคสล. ที่มีความกว้าง 15 เซนติเมตร สูง 27.5 เซนติเมตร ยาว 180 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับคานเท่ากับ 160 เซนติเมตร และเสริมเหล็กในคานแบบต่ำกว่าสภาวะสมดุล (Under reinforcement) ดังรายละเอียดในรูปที่ 2 ทำการถอดแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง และบ่มคาน คสล. ด้วยกระสอบชุบน้ำตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างคาน คสล. ไปแช่ในประเภทสิ่งแวดล้อมแบบน้ำเปล่าและแบบสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% (ดังตารางที่ 3) เป็นระยะเวลา 2 ปี ในรูปแบบวัฏ

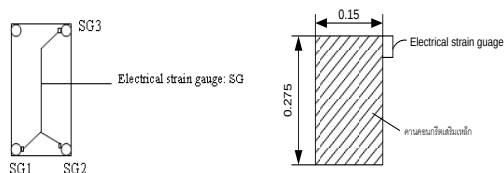
จักรเปือกสลับแห้ง (5 วัน เปือก และ 2 วัน แห้ง) เพื่อเทียบเคียงกับบริเวณสภาวะน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยคอนกรีตเผชิญอยู่ในช่วงเปือกยาวนานกว่าช่วงแห้ง ทั้งนี้ในช่วงวัฏจักรเปือกตัวอย่างคาน คสล. ถูกวางในบ่อน้ำเปล่าหรือบ่อสารละลายคลอไรด์โดยให้ระดับท้องคาน คสล. จมอยู่ใต้น้ำเปล่าหรือสารละลายคลอไรด์เป็นระยะความลึก 5 เซนติเมตร วัดจากระดับท้องคานส่วนที่จมขึ้นมา



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคาน คสล.

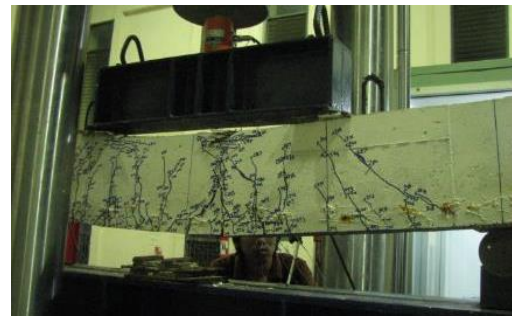


รูปที่ 3 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบกำลังดัดของคาน คสล.



(ก) บนเหล็กเสริม (ข) บนผิวของคอนกรีต

รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical-strain gauge

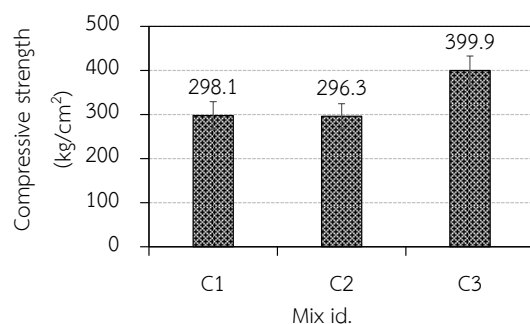


รูปที่ 5 การทดสอบกำลังดัดของคาน คสล.

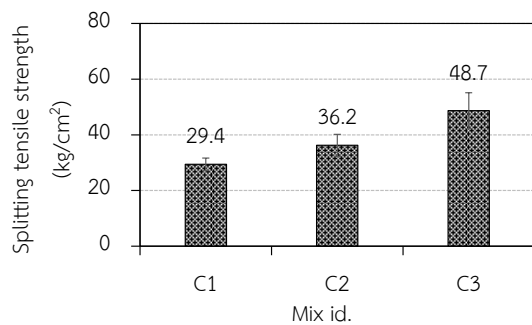
รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกำลังดัดของคาน คสล. ด้วยวิธีการดัดแบบ 4 จุด ที่มีแรงเฉือนเป็นศูนย์ในช่วงที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3 ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 150 ตัน เป็นต้นกำเนิดแรงกดกระทำที่กึ่งกลางคาน คสล. โดยอ่านค่าแรงกดจากโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 50 ตัน สำหรับการวัดการโก่งตัวของคานใช้อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) ติดตั้งที่กึ่งกลางใต้ท้องคานระหว่างจุดรองรับทั้งสอง และการวัดระยะการยืดหดของเหล็กเสริมภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ Electrical-strain gauge (SG) ติดที่บนผิวเหล็กที่ช่วงกลางคานทั้งเหล็กบนและเหล็กล่างดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และในการวัดการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านบนของคาน คสล. โดยใช้ Electrical-strain gauge ประเภทที่ติดผิวคอนกรีต ติดที่ผิวด้านข้างส่วนที่ชิดผิวด้านบนของคาน คสล. บริเวณช่วงกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ค่อยๆ ให้แรงกดจนคาน คสล. วิกฤติ ดังแสดงในรูปที่ 5

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1. กำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต

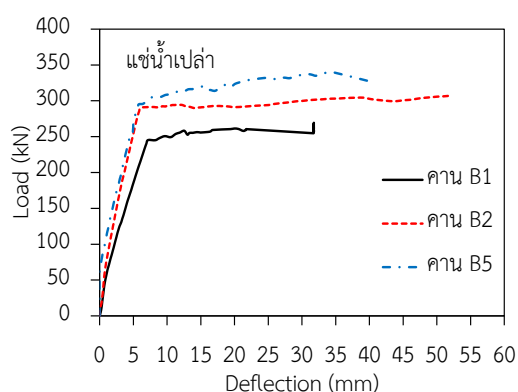


รูปที่ 7 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

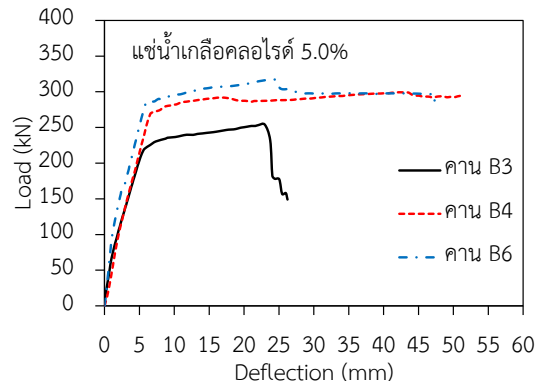
กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันแสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งเมื่อพิจารณาคอนกรีตกลุ่มกำลังอัดออกแบบเดียวกัน 240 กก./ซม.² (C1 และ C2) พบว่าเส้นใยเหล็กไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตลดลง (C2 และ C3)

3.2. กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต เมื่อพิจารณาคอนกรีตกลุ่มกำลังอัดออกแบบเดียวกัน 240 กก./ซม.² (C1 และ C2) พบว่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็กซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng et al. (2018) [12] และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง (C2 และ C3)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัวของคาน คสล. ที่แช่อยู่ในน้ำเปล่า



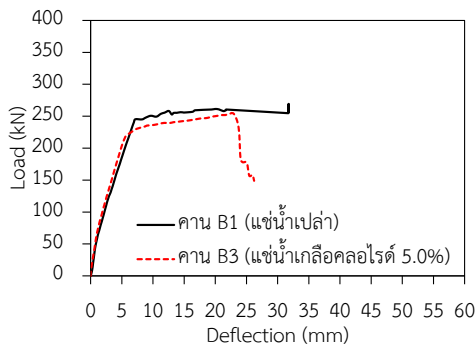
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัวของคาน คสล. ที่แช่อยู่ในสารละลายคลอไรด์ 5.0%

3.3. กำลังดัดของคาน คสล.

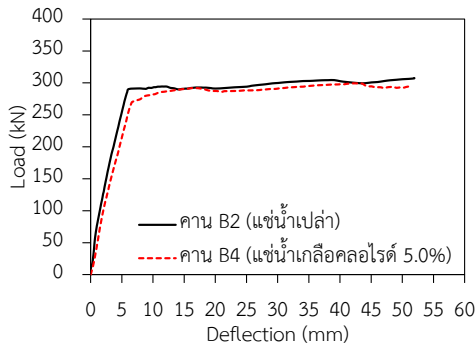
รูปที่ 8 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กและไม่ผสมเส้นใยเหล็กภายหลังแช่อยู่ในสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์เป็นระยะเวลา 2 ปี แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยจากรูปที่ 8 และ 9 เมื่อพิจารณาผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. กรณีเป็นกลุ่มกำลังอัดออกแบบเดียวกันแต่แช่อยู่ในสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์ตามลำดับ (เปรียบเทียบระหว่าง B1 กับ B2 และ B3 กับ B4) พบว่า คาน คสล. ที่ผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดัดได้สูงกว่าคาน คสล. ที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. นอกจากนี้เมื่อพิจารณากรณีเป็นกลุ่มกำลังอัดออกแบบต่างกันเมื่อใช้เส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดออกแบบสูงกว่าทำให้ความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. สูงขึ้นตามไปด้วย (B5 และ B6)

เมื่อพิจารณาความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. ภายหลังแช่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันคือน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 10 (กรณีคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็ก) พบว่า คาน คสล. ที่แช่อยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถรับแรงดัดสูงสุดน้อยกว่าคาน คสล. ที่แช่อยู่ในน้ำที่ไม่มีคลอไรด์ เนื่องจากเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเกิดสนิมจากการทำลายของคลอไรด์ทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลัก

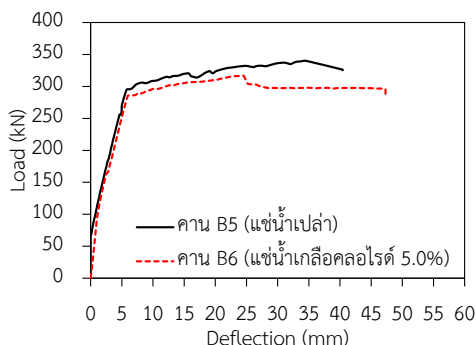
ลดลง ความสามารถแรงดัดของคาน คสล. จึงลดลง ในทำนองเดียวกัน สำหรับคาน คสล. ที่ผสมเส้นใย เหล็ก ดังรูปที่ 11 และ 12 ความสามารถรับแรงดัดของ คาน คสล. ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถรับแรง ดัดสูงสุดได้น้อยกว่าคาน คสล. ที่ไม่เผชิญสิ่งแวดล้อม คลอไรด์ (เผชิญกับน้ำเปล่า) เนื่องจากเส้นใยเหล็กเกิด สนิมเมื่อต้องเผชิญในสิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์ ดังเห็น ได้จากรูปที่ 13 ส่งผลให้ความสามารถรับแรงดัดของ คาน คสล. ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัว ของคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C1)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัว ของคาน คสล. ที่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C2)



รูปที่ 12 แรงกดและการแอ่นตัวของคาน คสล. ที่ผสม เส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C3)



รูปที่ 13 การเกิดสนิมของเส้นใยเหล็กและเหล็กเสริมใน คาน คสล. ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ตารางที่ 4 กำลังดัดของคาน คสล.

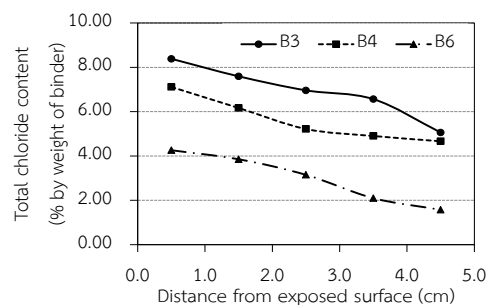
No.	กำลังดัดของคานที่สภาวะต่างๆ		
	M_{cr} (kg-m)	M_y (kg-m)	M_n (kg-m)
B1	1,530	4,897	5,490
B2	2,141	5,918	6,269
B3	1,427	4,695	5,372
B4	2,039	5,515	6,100
B5	2,446	6,018	6,932
B6	2,345	5,764	6,457

ค่ากำลังดัด (โมเมนต์ดัด, M) ของคาน คสล. ที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ตั้งแต่เริ่มแตกร้าว (Cracking) เหล็กเสริมล้าคราก (Yielding) และสูงสุด (Nominal) ได้ถูกวิเคราะห์และสรุปไว้ในตารางที่ 4 จากตารางพบว่า คาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กสูงมีกำลัง ดัดสูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็กในทุกสภาวะ ของการดัด (กำลังดัดแตกร้าว (M_{cr}) กำลังดัดคราก (M_y) และกำลังดัดสูงสุด (M_n)) ทั้งในกรณีที่คานเผชิญ สิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์และสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีคลอไรด์ (น้ำเปล่า) โดยเมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังดัดสูงสุด (M_n) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า กำลังดัดสูงสุดของ คาน B2 และ B5 เมื่อเทียบกับคาน B1 มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 14.2% และ 26.3% ตามลำดับ (กรณีคาน คสล. เผชิญสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีคลอไรด์หรือน้ำเปล่า) และกำลังดัดสูงสุดของคาน B4 และ B6 เมื่อเทียบกับ คาน B3 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.6% และ 20.2% ตามลำดับ (กรณีคาน คสล. เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์) โดยกำลังดัดของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่เผชิญ สิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์เพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่าเมื่อ

เทียบคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีคลอไรด์ เนื่องจากการการเกิดสนิมทั้งที่เหล็กเสริมและที่เส้นใยเหล็กจากเกลือคลอไรด์ จึงทำให้ความสามารถต้านทานกำลังดัดของคาน คสล. ลดลงมากนั่นเอง โดยเมื่อพิจารณาคาน คสล. ที่ใช้คอนกรีตชนิดเดียวกัน (คาน B1 กับ B3, คาน B2 กับ B4, และคาน B5 กับ B6) แต่เผชิญสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันพบว่า กำลังดัดสูงสุดของคาน คสล. ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าของคาน คสล. ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมไม่มีคลอไรด์ -2.1%, -2.7 และ -6.9% สำหรับคาน B3, B4 และ B6 ตามลำดับ

3.4. การแทรกซึมคลอไรด์ในคาน คสล.

หลังจากที่ทดสอบกำลังดัดของคาน คสล. เสร็จแล้ว ทำการเจาะคาน คสล. B3, B4 และ B6 ตรงบริเวณด้านข้างคานเหนือเหล็กล่าง (คอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งของสารละลายคลอไรด์) ที่ความลึกชั้นละ 1 เซนติเมตร จนถึง 5 เซนติเมตร เพื่อนำผงคอนกรีตไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [13] จากรูปที่ 14 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ในคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็ก (B4 และ B6) ต่ำกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก (B3) หรือกล่าวได้ว่าคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคาน คสล. ที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก อาจเนื่องจากการใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณที่เหมาะสม (0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต) ทำให้อุณหภูมิคอนกรีตมีความตึงเครียดขึ้น ประกอบกับเส้นใยขวางการแทรกซึมจึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของลิน่า ปรัก และทวีชัย สำราญวานิช (2563) [14] ที่พบว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.50 โดยปริมาตรคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก นอกจากนี้ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (B6) มีค่าสูงกว่าคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง



รูปที่ 14 การแทรกซึมคลอไรด์ในคาน คสล.

4. สรุปผล

จากผลการศึกษากำลังดัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เส้นใยเหล็กไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังดัดของคอนกรีต แต่ส่งผลทำให้กำลังดัดแบบผ่าซีกของคอนกรีตสูงขึ้น

2. กำลังดัดของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใย ทั้งกรณีภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์หรือสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าในรูปแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล.

3. กำลังดัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต่ำกว่ากำลังดัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าในรูปแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เนื่องจากเกิดการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลักมากกว่า

4. คาน คสล. ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก อาจเนื่องจากการใช้เส้นใยเหล็กทำให้อุณหภูมิคอนกรีตตึงเครียดขึ้นและขัดขวางการแทรกซึมของคลอไรด์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 110/2558 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) และศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Marcos-Meson V, Michel A, Solgaard A, Fischer G, Edvardsen C, Skovhus T.L. Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete – A literature review. *Cement and Concrete Research*. 2018; 103:1-20.
- [2] Pyo S, Koh T, Tafesse M, Kim HK. Chloride-induced corrosion of steel fiber near the surface of ultra-high performance concrete and its effect on flexural behaviour with various thickness. *Construction and Building Materials*. 2019;224:206-13.
- [3] Yoo DY, Shin W, Chun B. Corrosion effect on tensile behaviour of ultra-high performance concrete reinforced with straight steel fibers. *Cement and Concrete Composites*. 2020;109: 103566.
- [4] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. Concrete structure deterioration. Bangkok: Charansanitwong Printing; 2018. (in Thai)
- [5] Prak L, Sumranwanich T. Chloride binding capacity and water absorption of mortar containing fly ash, limestone powder, and expansive additive. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2020; 18(2):133-44. (in Thai)
- [6] Prak L, Sumranwanich, T. Investigation of Chloride Penetration and Steel Corrosion in Repaired Concrete after Exposure to Marine Environment of Thailand. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2020;18(1);165-73.
- [7] Arttamart S, Sumranwanich T. Compressive strength and chloride penetration resistance of concrete with fly ash, limestone powder and partial replacement of fine aggregate by bottom ash. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2019;17(2):113-25. (in Thai)
- [8] Sumranwanich T, Phuchan A, Manwicha S. Behavior and calculation method of the flexural strength of reinforced concrete beam with fiber. *KMUTT Research and Development Journal*. 2007;30(2):345-62. (in Thai)
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standard*. 2004.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C496. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standard*. 2004.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM C78. Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). *Annual Book of ASTM Standard*. 2004.
- [12] Zheng Y, Wu X, He G, Shang Q, Xu J, Sun Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. *Advances in Civil Engineering*. 2018:1-11.

- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards. 2004.
- [14] Prak L, Sumranwanich T. Compressive strength and water permeability of concrete mixed with steel fiber. In: Proceedings of the 25th National Convention of Civil Engineering; 2020 Jul 15-17; Chonburi, Thailand. p. 1826-30. (in Thai)