



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

EFFECTS OF SEVERE ENVIRONMENTAL EXPOSURE ON COMPRESSIVE BEHAVIOR OF CFRP-CONFINED CONCRETE

ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อพฤติกรรมภายใต้แรงอัดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

พนิดา กลิ่นโพธิ์กลาง¹จักรพันธ์ เทือกดี²

^{1, 2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ARTICLE INFO:

Received: November 2, 2016

Received Revised Form:

December 20, 2016

Accepted: December 21, 2016

ABSTRACT:

The objective of this research is to investigate the influences of severe environment on the behavior and strength of CFRP-confined concrete under uniaxial compression. Monotonic and cyclic compressive tests were conducted on $\varnothing 20 \times 45$ cm cylindrical concrete samples exposed to laboratory-simulated wet-dry cycles in chloride environment for 6, 13 and 19 months. It has been found that the compressive strength of CFRP-confined concrete was enhanced when compared to unconfined concrete. For the CFRP-confined specimens, compressive strength under monotonic compression increased initially after being exposed to wet-dry cycles for 6 months, but started to deteriorate after longer exposure. On the other hand, compressive strength of the CFRP-confined specimens under cyclic compression increased for all durations of environmental exposure. The environmental reduction factor (C_E) obtained from the strains in CFRP at failure in specimens exposed to wet-dry cycles were higher than the recommended value in the ACI 440-2R Guideline. Therefore, the recommended values are safe for design of FRP strengthening in both normal and severe environments. In addition, upon inspection of concrete samples with steel reinforcement using the half-cell potential method, it has been suggested that CFRP confinement could help reduce the tendency of steel corrosion in chloride environment.

**Corresponding Author,
Email: fengcptu@ku.ac.th*

KEYWORDS: Confinement, Axial Compression, CFRP, Severe Environment

บทคัดย่อ :

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงที่มีต่อพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดหน้าตัด $\varnothing 20 \times 45$ ซม. และบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมแบบน้ำทะเลที่จำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 6, 13 และ 19 เดือน ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการโอบรัดด้วย CFRP และเมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงในระยะแรกจะมีกำลังภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องสูงขึ้นและเริ่มลดลงเมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานานขึ้น แต่ในบางกรณีของตัวอย่างคอนกรีตได้รับแรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักร พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานาน ซึ่งตัวคูณลดค่าเนื่องจากสภาวะแวดล้อม (Environmental Reduction Factor) หรือค่า C_E ที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ACI 440.2R แนะนำให้ใช้ ดังนั้นการใช้ค่า C_E ตามที่มาตรฐานแนะนำสำหรับการออกแบบเสาที่มีการโอบรัดด้วย CFRP จะมีความปลอดภัยทั้งในสภาวะแวดล้อมปกติและสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง นอกจากนี้ยังทำการบ่มตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งที่มีและไม่มี CFRP โอบรัด เพื่อตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ หลังจากการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมแบบน้ำทะเลโดยตรง พบว่าการโอบรัดด้วย CFRP ยังสามารถช่วยลดแนวโน้มการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กได้

คำสำคัญ: การโอบรัด, แรงอัดตามแนวแกน, CFRP, สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

1. บทนำ

เสาคือองค์ประกอบสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งในโครงสร้างสิ่งที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ควบคู่กับการใช้งานคือการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง (Structural Deterioration) ซึ่งการเสื่อมสภาพนี้อาจเป็นไปตามอายุการใช้งาน เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ภัยธรรมชาติ หรืออุบัติเหตุ เป็นต้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงการใช้งานและการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาจทำให้มีความจำเป็นต้องเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างซึ่งปัจจุบันวัสดุ เทคนิค และวิธีการเสริมกำลังมีการพัฒนาไปอย่างมาก โดยเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับในปัจจุบันคือ การใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer; FRP) ทั้งนี้ งานวิจัยในอดีตได้นำเสนอเกี่ยวกับการประเมินความคงทนของวัสดุ FRP โดยการเร่งบ่ม การตรวจสอบพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และคอนกรีตภายใต้สภาวะน้ำขึ้นน้ำลงในน้ำทะเล (Wet-Dry Cycles) และสภาวะการแข็งตัว-ละลายตัวของน้ำแข็ง (Freeze-Thaw Cycles) ความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาคอนกรีตล้วน อันเนื่องมาจากการรับแรงกระทำแบบล้า (Fatigue Loading) หรือแม้แต่การตรวจสอบพฤติกรรมความล้าที่เกิดขึ้นในคานเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP [1-3] อย่างไรก็ตามงานวิจัยหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบร่วมกันของแรงกระทำตามแนวแกนและสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ยังมีอยู่อย่างจำกัด

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer) ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนทั้ง

แบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักรที่เป็นผลมาจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง โดยอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และได้มีการตรวจสอบและเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีและไม่มี CFRP โอบรัดเนื่องจากตัวอย่างต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง แนวโน้มที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) นั้นย่อมสูงกว่าสภาวะปกติทั่วไป เพื่อศึกษาความสามารถในการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมและเป็นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความคงทนของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตโดยการโอบรัดด้วย FRP และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน ACI 440.2R [4] ได้เสนอสมการเพื่อคำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ที่มี FRP โอบรัดและยังพิจารณาถึงผลของการเยื้องศูนย์ที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยอาศัยสมการกำลังอัดตามแนวแกนของเสา ค.ส.ล. ตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 318-08 [5] สำหรับเสา ค.ส.ล. ปลอกเกลียวและปลอกเดี่ยวดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P_{n(max)} = 0.85[0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (1)$$

$$P_{n(max)} = 0.80[0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (2)$$

เมื่อหน่วยแรงอัดในคอนกรีตในเสา ค.ส.ล. ที่มี FRP โอบรัดมีค่าเข้าใกล้กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตล้วน (f'_c) จะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กและนำไปสู่การขยายตัวทางขวางอย่างมีนัยสำคัญและก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงใน FRP และหน่วยแรงดันทางขวางต่อคอนกรีต ซึ่งเสาที่มีการโอบรัดด้วย FRP จะเกิดการวิบัติโดยการฉีกขาดของ FRP (FRP Rupture) โดยค่ากำลังอัดประลัยที่มีการโอบรัด (f'_{cc}) ค่าความดันด้านข้างที่เกิดจาก FRP (f_l) และความเครียดใน FRP ที่จุดวิบัติของ FRP (ϵ_{fe}) แสดงดังสมการที่ (3) ถึง (5) ตามลำดับ

$$f'_{cc} = f'_c + 3.3\psi_f \kappa_a f_l \quad (3)$$

$$f_l = \frac{2nt_f E_f \epsilon_{fe}}{D} \quad (4)$$

$$\epsilon_{fe} = \kappa_e \epsilon_{fu} \quad (5)$$

ทั้งนี้การเสริมกำลังเสา ค.ส.ล. ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงอาจส่งผลต่อ FRP ทำให้คุณสมบัติทางกลเสื่อมสภาพได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ตัวคูณเพื่อลดประสิทธิภาพการรับแรงดึงของวัสดุเสริมกำลัง ซึ่งมาตรฐาน ACI 440.2R ได้แนะนำค่าตัวคูณลดค่า อันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง (C_E) สำหรับ CFRP เท่ากับ 0.85 ทั้งนี้สามารถคำนวณค่าความเครียดสูงสุดของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบได้จากสมการที่ (6)

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \quad (6)$$

งานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึงผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อระบบเสริมกำลังด้วย FRP Au [1] ได้กล่าวว่าเส้นใยแก้ว (GFRP) มีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสน้ำหรือความชื้นเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากความสามารถในการดูดซับน้ำและความชื้นของออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ในซิลิกาซึ่งเป็นสารที่มีอยู่ในแก้ว ส่วนเส้นใยอะรามิด (AFRP) จะเกิดการดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวของเส้นใยมาก ทั้งนี้ได้มีการป้องกันโดยใช้สารเคลือบเส้นใยซึ่งอยู่ในรูปของแผ่น FRP (Laminate) แต่ในเส้นใยคาร์บอน (CFRP) จะไม่แสดงการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากน้ำและความชื้นออกมาให้เห็น อย่างไรก็ตาม Chung [2] ได้รายงานว่เส้นใยคาร์บอน หากสัมผัสกับโลหะโดยตรงจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก ยกเว้นกับทองคำ แพลตินัม และไททาเนียม การศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตที่โอบรัดด้วย FRP ในสภาวะน้ำทะเลนั้นที่ผ่านมาอยู่อย่างจำกัด โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพในการลดการกัดกร่อนและผลของการโอบรัดด้วย FRP ต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง จากการทดสอบ

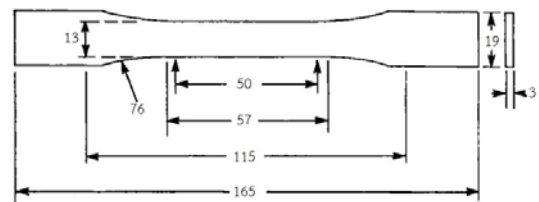
ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ในอดีตพบว่า การโอบรัดด้วย FRP จะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสา ค.ส.ล. ทั้งในกรณีที่ทำการโอบรัดก่อนสัมผัสสภาพแวดล้อมทางทะเลและหลังจากเกิดการกัดกร่อนแล้ว เนื่องจาก FRP จะลดการซึมผ่านของความชื้น คลอไรด์ไอออนและออกซิเจน ส่งผลให้ปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อนลดลง [6,7] นอกจากนี้การโอบรัดด้วย FRP ยังช่วยลดการเสื่อมสภาพของกำลังต้านทานแรงอัดในคอนกรีตทรงกระบอก [3]

3. วิธีการศึกษา

การศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้

3.1 วัสดุและการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

จากการออกแบบการทดสอบได้กำหนดกำลังรับแรงอัดที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดหน้าตัด $\varnothing 20 \times 45$ ซม. ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 24 MPa และใช้ CFRP ในการโอบรัดตัวอย่างคอนกรีต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินและเส้นใยคาร์บอนชนิดแผ่นอ่อน (Carbon Fiber Sheet) ซึ่งอีพอกซีเรซิน ดังกล่าวมี 2 องค์ประกอบ ผสมให้เข้ากันและขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D-638 [8] ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นจึงนำเส้นใยคาร์บอนมาขึ้นรูปแบบเปียก (Wet-Lay Up) ตามมาตรฐาน ASTM D-3039 [9] สำหรับการจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectional) ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากการเตรียมตัวอย่างและทิ้งไว้ให้แห้งเป็นระยะเวลา 5 วัน จึงนำตัวอย่างไปบ่มในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงซึ่งประกอบด้วยสภาวะเปียก 6 ชั่วโมงและแห้ง 6 ชั่วโมงสลับกันไปเป็นเวลา 6 (E-6) 13 (E-13) และ 19 (E-19) เดือน



รูปที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอีพอกซีเรซิน (หน่วย มม.)

ที่มา: ปรับปรุงจาก ASTM D638-02a

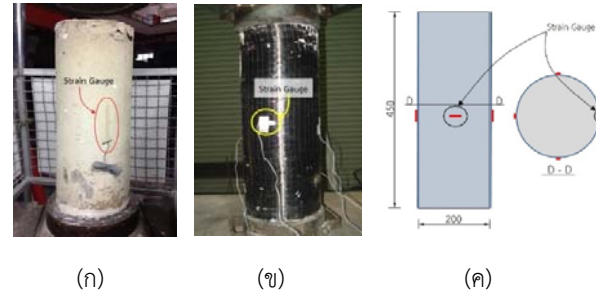


รูปที่ 2 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของ CFRP

3.2 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 มม. ความสูง 450 มม. โดยแบ่งตัวอย่างทดสอบทั้งหมดออกเป็น 3 กลุ่ม คือคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดและมีการโอบรัดด้วย CFRP จำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ซึ่งเส้นใยคาร์บอนที่นำมาโอบรัดตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 450 x 750 มม. และ 450 x 1,500 มม. ตามลำดับเส้นใยมีความหนา 0.33 มม. และมีการเรียงตัวแบบทิศทางเดียวโดยมีวิธีการติดตั้งแบบเปียกและให้มีรอยทาบต่อ (Overlap) ยาวเท่ากับ 12 และ 24 ซม. สำหรับการโอบรัด 1 และ 2 ชั้น ตามลำดับทั้งนี้ได้ทาสารเคลือบป้องกันการซึมผ่านของน้ำที่บริเวณฐานตัวอย่าง ซึ่งเป็นการควบคุมให้น้ำสามารถซึมผ่านได้เฉพาะด้านข้างเท่านั้น

ติดตั้ง Strain Gauge ที่มีความยาว Gauge Length เท่ากับ 70 มม. จำนวน 2 ตัว เพื่อวัดค่าการหดตัวหรือค่าความเครียดตามแนวแกน (Axial Strain) ที่ผิวด้านข้างของคอนกรีต ดังรูปที่ 3 (ก) นอกจากนี้ยังได้ติดตั้ง Strain Gauge ที่มีความยาว Gauge Length เท่ากับ 5 มม. อย่างละ 2 ตัว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงตัวอย่าง เพื่อวัดค่าความเครียดที่เกิดจากการหดตัวของ CFRP ตามแนวแกนของตัวอย่างและค่าความเครียดที่เกิดจากการขยายตัวด้านข้าง (Lateral Strain) ใน CFRP ดังรูปที่ 3 (ข) และ (ค)



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain Gauges

สำหรับการจำลองสภาวะแวดล้อมแบบน้ำทะเลซึ่งเกิดปรากฏการณ์น้ำขึ้นน้ำลงนั้นได้ใช้เกลือวิทยาศาสตร์ละลายน้ำในถังสี่เหลี่ยมซึ่งเกล็ดดังกล่าวใช้ในการผลิตน้ำทะเลเทียมสำหรับเลี้ยงปลาทะเลหรือปะการัง โดยค่าเฉลี่ยความเค็มของน้ำทะเลมีค่าประมาณ 35.5 ppt และจำนวนรอบที่กำหนดให้เกิดน้ำขึ้นน้ำลง 1 รอบ ประกอบด้วยสภาวะที่ตัวอย่างเปียก 6 ชั่วโมง และสภาวะแห้ง 6 ชั่วโมง ดังนั้นใน 1 วันจะมีสภาวะเปียกสลับแห้งจำนวน 2 รอบ และกำหนดให้ระดับน้ำมีความสูงประมาณ 35 ซม. จากกันถึง เพื่อไม่ให้น้ำทะเลซึมผ่านเข้าทางด้านบนของตัวอย่างที่ไม่ได้มีการทาสารเคลือบป้องกันความชื้น ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

Loading Pattern	Specimen	#Layer	#Wet-Dry Cycles	Loading Pattern	Specimen	#Layer	#Wet-Dry Cycles
Monotonic	L0-M-0	0	0	Cyclic	L0-C-0	0	0
	L1-M-0	1			L1-C-0	1	
	L2-M-0	2			L2-C-0	2	
	L0-M-6	0	360		L0-C-6	0	360
	L1-M-6	1			L1-C-6	1	
	L2-M-6	2			L2-C-6	2	
	L0-M-13	0	780		L0-C-13	0	780
	L1-M-13	1			L1-C-13	1	
	L2-M-13	2			L2-C-13	2	
	L0-M-19	0	1,140		L0-C-19	0	1,140
	L1-M-19	1			L1-C-19	1	
	L2-M-19	2			L2-C-19	2	

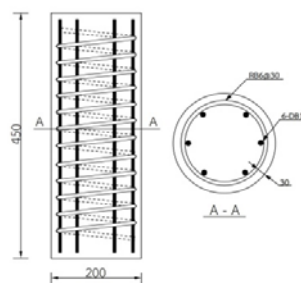
หมายเหตุ

- L0-, L1-, L2- = ไม่โอบรัดด้วย CFRP, โอบรัดด้วย CFRP จำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ตามลำดับ
 M- = รับแรงตามแนวแกนแบบต่อเนื่อง
 C- = รับแรงตามแนวแกนแบบวัฏจักร
 0 = ไม่อยู่ในสภาวะน้ำทะเล
 6, 13, 19 = ระยะเวลาที่ตัวอย่างอยู่ในสภาวะน้ำทะเลเป็นเวลา 6, 13 และ 19 เดือน ตามลำดับ
 1 รอบน้ำขึ้นน้ำลงตัวอย่างอยู่ในสภาวะเปียก 6 ชม. สลับแห้ง 6 ชม. ฉะนั้น 1 วันจะเกิดน้ำขึ้นน้ำลง 2 รอบ
 เช่น 6 เดือน = 180 วัน = 360 รอบ

ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างทดสอบมีการรับแรงอัดตามแนวแกน 2 แบบ นั่นคือ แรงกระทำตามแนวแกนแบบต่อเนื่อง (Monotonic Loading) และแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) ซึ่งแรงกระทำตามแนวแกนแบบวัฏจักรได้แบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วงที่ 1 เพิ่มแรงอัด (Loading) จาก 0 ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยแรงกระทำต่อเนื่องมาก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ตัวอย่างเสายังคงมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติคอยู่ แล้วลดขนาดแรงอัดลง (Unloading) จนกลับมาที่ 0.5 kN เพื่อให้แรงกระทำเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด และเพิ่มแรงอัด (Reloading) ทำเช่นนี้จนกระทั่งครบ 5 รอบ สำหรับช่วงที่ 2 เมื่อขึ้นรอบที่ 6 หลังจากน้ำหนักบรรทุกทุกช่วงที่ 1 ครบ เพิ่มแรงอัดอีกครั้งจาก 0.5 kN ถึงร้อยละ 70 ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากตัวอย่างที่ทดสอบด้วยแรงกระทำต่อเนื่องมาก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ตัวอย่างเสามีพฤติกรรมเป็นแบบอินอิลาสติค ในช่วงที่ 2 แล้วลดขนาดแรงอัดจนกลับมาที่ 0.5 kN ทำเช่นนี้จนกระทั่งครบ 5 รอบ สำหรับช่วงที่ 3 เมื่อครบทั้งช่วงที่ 1 และ 2 แล้วจึงเพิ่มแรงอัดแบบต่อเนื่องจนกระทั่งเสาตัวอย่างที่ใช้ทดสอบวิบัติ ทั้งนี้อัตราการให้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบต่อเนื่องและวัฏจักร กำหนดให้เป็น Displacement-Control ที่ 1 มม./นาที

3.3 การตรวจสอบแนวโน้มการรุกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP

เหล็กเสริมในเสาคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย FRP แล้วอาจเกิดการรุกร่อนได้ หากยังคงใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจสอบแนวโน้มการรุกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP โดยใช้ตัวอย่างขนาดเดียวกับตัวอย่างทดสอบพฤติกรรมรับแรงอัดข้างต้น แต่ได้ทำการเสริมเหล็กแกนด้วยเหล็กเส้นกลม SD30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. (DB12) จำนวน 6 เส้น และเหล็กปลอกเกลียว SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. (RB6) ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเกลียว 3 ซม. เพื่อระยะหุ้มของคอนกรีต (Clear Covering) ด้านบนและด้านล่าง 2.5 ซม. และด้านข้างจากเหล็กปลอก 3.0 ซม. ซึ่งตัวอย่างจะมีการโอบรัดด้วย CFRP 2 ชั้น จำนวน 3 ตัวอย่าง และไม่มีการโอบรัด CFRP จำนวน 1 ตัวอย่าง และบ่มในสภาวะแวดล้อมเช่นเดียวกับตัวอย่างคอนกรีตตัวอื่นๆ จากนั้นทำการทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Test) ตามมาตรฐาน ASTM C876 [10] ซึ่งก่อนทำการทดสอบได้ลอก CFRP ออกจากตัวอย่างและขัดผิวตัวอย่างเพื่อให้เหลือเฉพาะผิวคอนกรีตเท่านั้น ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าตลอดความยาวเส้นรอบวงทรงกระบอก จากนั้นจึงนำค่าที่บันทึกได้มาแสดงเป็นเส้นชั้นความสูงโดยแปลงจากทรงกระบอกให้เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปที่ 4 แสดงตัวอย่างและขั้นตอนการตรวจสอบแนวโน้มการรุกร่อนของเหล็กเสริมภายในเสาตัวอย่าง



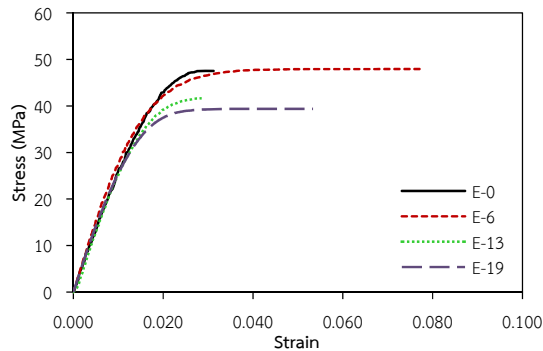
รูปที่ 4 ตัวอย่างและขั้นตอนการตรวจสอบแนวโน้มการรุกร่อนของเหล็กเสริมภายในเสาตัวอย่าง (หน่วย มม.)

4. ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

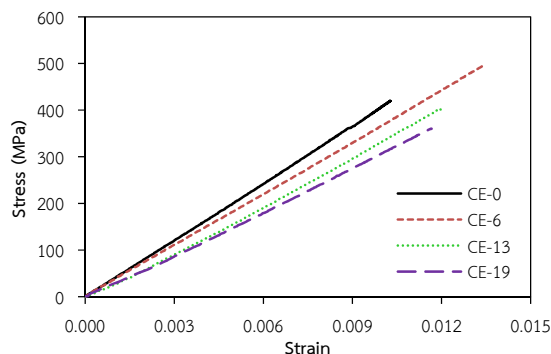
4.1 ผลของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อวัสดุ

จากการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินพบว่าเมื่อตัวอย่างรับแรงดึงในช่วงแรกจะมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติค และเมื่อเพิ่มขนาดแรงดึงไปอีก อีพอกซีเรซินจะมีพฤติกรรมแบบพลาสติกและที่จุดวิบัติจะเกิดการขาดบริเวณช่วงกลางตัวอย่าง ตารางที่ 2 สรุปค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด ความเค้นสูงสุด กำลังคราก ความเครียดสูงสุดที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น จะเห็นได้ว่ากำลังครากและความเครียดสูงสุดของอีพอกซีเรซินมีค่าลดลงเมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานาน ในขณะที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอีพอกซีเรซินที่ช่วงเวลาการบ่ม 0, 6, 13 และ 19 เดือน

จากการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดึงของ CFRP พบว่าตัวอย่าง CFRP มีพฤติกรรมแบบอีลาสติกและเกิดการพิบัติแบบ Rupture ตารางที่ 3 สรุปค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด ความเค้นสูงสุด ความเครียดที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง ส่วนความเครียดสูงสุดของ CFRP มีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะสัมพันธ์กับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานาน รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ CFRP



รูปที่ 6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ CFRP ที่ช่วงเวลาการบ่ม 0, 6, 13 และ 19 เดือน

4.2 ผลของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP

จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง สามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีและมีการโอบรัดด้วย CFRP จำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักร เมื่อได้สัมผัสสภาวะ

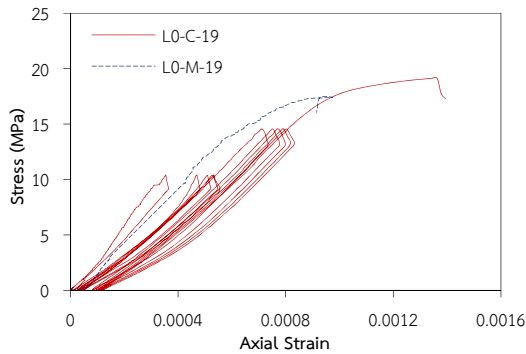
แวดล้อมที่รุนแรงแตกต่างกันกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตล้วน (LO) ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องแสดงพฤติกรรมในช่วงแรกเป็นแบบเชิงเส้นและเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มมากขึ้นพฤติกรรมจะเปลี่ยนเป็นแบบไม่เชิงเส้นจนเกิดการวิบัติ สำหรับตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักรพฤติกรรมในช่วงต้นจะเป็นแบบเชิงเส้นทั้งในระหว่างให้แรงกระทำและลดแรงกระทำ เมื่อแรงกระทำลดลงเข้าใกล้ 0.5 kN ความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวอาจเห็นได้ไม่ชัดเจนนักในการรับแรงแบบวัฏจักรช่วงที่ 1 แต่เมื่อตัวอย่างรับแรงแบบวัฏจักรช่วงที่ 2 จะมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นอย่างชัดเจน (รูปที่ 7 (ก)) สำหรับตัวอย่างที่โอบรัดด้วย CFRP (L1 และ L2) ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องพฤติกรรมในช่วงแรกเป็นแบบเชิงเส้นและเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มมากขึ้นพฤติกรรมจะเปลี่ยนเป็นแบบไม่เชิงเส้นจนเกิดการวิบัติ เช่นเดียวกับตัวอย่าง ที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP (LO) และภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักร พฤติกรรมในการรับแรงแบบวัฏจักรช่วงที่ 1 เป็นเช่นเดียวกับตัวอย่าง LO เมื่อตัวอย่างรับแรงแบบวัฏจักรช่วงที่ 2 จะมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นอย่างชัดเจน นั้นอาจเกิดขึ้นจากคอนกรีตภายในเกิดการแตกร้าวแต่ CFRP ยังคงทำหน้าที่โอบรัดคอนกรีตภายในเพื่อรักษารูปร่างของตัวอย่างไว้ เมื่อลดแรงกระทำลงกระทั่งเข้าใกล้ 0.5 kN เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นอีกครั้งอย่างชัดเจน (รูปที่ 7 (ข) และ (ค)) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lam et al. [5], Lam และ Teng [6] และจากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักรทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน นั่นคือเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดแบบวัฏจักรอยู่ภายใต้เส้นกราฟความเค้น-ความเครียดแบบต่อเนื่อง โดยเกิดทั้งในตัวอย่างที่มีและไม่มี การบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง จึงอาจสรุปได้ว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องจะเป็นกรอบ (Envelope) ให้กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wang et al. [7] ตารางที่ 4 และ 5 สรุปค่าความเค้นสูงสุด ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดหลังจากตัวอย่างเสถียรเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซิน

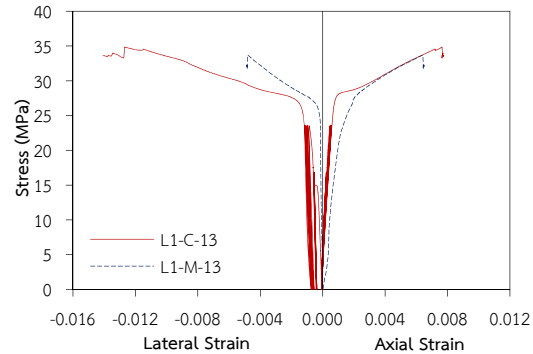
Specimen	#Wet-Dry Cycle	Max Load Avg. (kN)	Yield Avg. (MPa)	Peak Stress Avg. (MPa)	Ultimate Strain Avg.	Modulus of Elasticity (GPa)
E-0	0	1.76	47.93	47.80	0.0840	2.99
E-6	360	1.71	46.75	47.14	0.0351	2.92
E-13	780	1.53	39.04	42.61	0.0299	3.00
E-19	1,140	1.47	38.32	39.60	0.0585	3.06

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของ CFRP

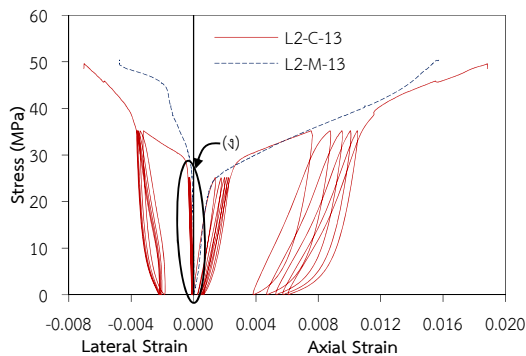
Specimen	#Wet-Dry Cycle	Load Avg. (kN)	Peak Stress Avg. (MPa)	Ultimate Strain Avg.	Modulus of Elasticity (GPa)
CE-0	0	6.34	422.92	0.0122	40.13
CE-6	360	6.97	464.87	0.0118	41.03
CE-13	780	6.07	404.67	0.0124	38.89
CE-19	1,140	6.52	434.44	0.0133	37.10



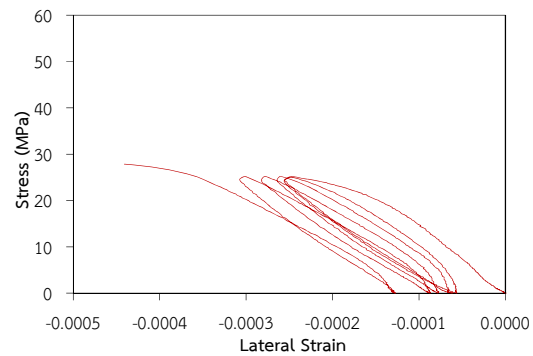
(ก) L0-C-19 vs. L0-M-19



(ข) L1-C-13 vs. L1-M-13



(ค) L2-C-13 vs. L2-M-13



(ง) ขยาย Lateral Strain (L2-C-13) น้ำหนักบรรทุกทุกช่วงที่ 1

รูปที่ 7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างคอนกรีต
ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักร

ตารางที่ 4 ค่าความเค้นและความเครียดที่ผิวคอนกรีตและที่ CFRP ของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่อง

Specimen	Max Load (kN)	Peak Stress (MPa)	Strain at Peak Stress		Strain at Ultimate	
			Axial	Lateral	Axial	Lateral
L0-M-0	546.38	17.39	-0.0012	-	-0.0013	-
L0-M-6	722.43	23.00	-0.0012	-	-0.0012	-
L0-M-13	654.27	20.83	-0.0008	-	-0.0009	-
L0-M-19	565.99	18.02	-0.0007	-	-0.0008	-
L1-M-0	871.09	27.60	-0.0037	0.0016	-0.0153	0.0026
L1-M-6	1,087.29	34.45	-0.0123	0.0052	-0.0125	0.0052
L1-M-13	1,059.19	33.56	-0.0064	0.0048	-0.0066	0.0049
L1-M-19	1,056.45	33.47	-0.0138	0.0054	-0.0140	0.0054
L2-M-0	1,473.01	46.46	-0.0106	0.0028	-0.0107	0.0088
L2-M-6	1,583.16	50.39	-0.0171	0.0068	-0.0171	0.0094
L2-M-13	1,581.12	49.87	-0.0157	0.0175	-0.0192	0.0048
L2-M-19	1,522.11	48.01	-0.0185	0.0097	-0.0185	0.0097

ตารางที่ 5 ค่าความเค้นและความเครียดที่ผิวคอนกรีตและที่ CFRP ของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักร

Specimen	Max Load (kN)	Peak Stress (MPa)	Strain at Peak Stress		Strain at Ultimate	
			Axial	Lateral	Axial	Lateral
L0-C-0	649.38	20.67	-0.0011	-	-0.0019	-
L0-C-6	759.49	24.18	-0.0014	-	-0.0014	-
L0-C-13	702.67	20.37	-0.0012	-	-0.0013	-
L0-C-19	600.95	19.13	-0.0014	-	-0.0014	-
L1-C-0	910.59	28.85	n/a	0.0027	n/a	0.0028
L1-C-6	1,108.51	34.96	-0.0105	0.0048	-0.0012	0.0048
L1-C-13	1,094.70	34.68	-0.0077	0.0125	-0.0077	0.0141
L1-C-19	1,123.71	35.60	-0.0137	0.0120	-0.0138	0.0122
L2-C-0	1,538.53	48.21	-0.0100	0.0053	-0.0100	0.0053
L2-C-6	1,638.24	51.91	-0.0079	0.0113	-0.0079	0.0113
L2-C-13	1,559.12	49.17	-0.0188	0.0038	-0.0189	0.0070
L2-C-19	1,542.97	48.66	-0.0035	0.0074	-0.0035	0.0074

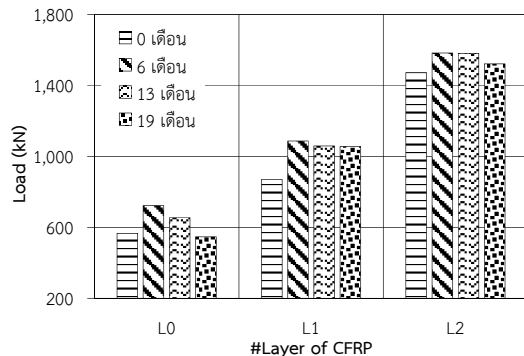
หมายเหตุ: n/a = Strain Gauge ชัดข้อง

4.2.2 ผลการทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่อง

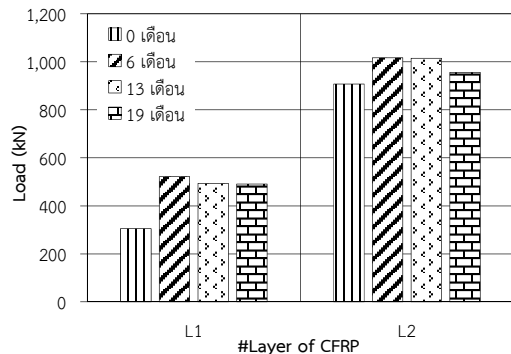
รูปที่ 8 (ก) แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องที่บ่มภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ระยะเวลาต่างกัน พร้อมทั้งเปรียบเทียบแรงอัดตามแนวแกนที่ได้เมื่อตัวอย่างทดสอบมีการโอบรัด CFRP จำนวนชั้นที่แตกต่างกันจากการทดสอบพบว่า การโอบรัดคอนกรีตด้วย CFRP ช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดทั้งในกรณีตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ทั้งนี้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงมีผลให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในระยะเวลาบ่ม 6 เดือน

แรกและจะลดลงเมื่อระยะการบ่มนานขึ้นทั้งในตัวอย่างที่มีและไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP และเมื่อพิจารณากำลังต้านทานแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจากการโอบรัดด้วย CFRP เท่านั้นโดยไม่คิดกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) ดังรูปที่ 8 (ข) พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จาก CFRP เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการบ่ม และลดลงเมื่อบ่มเป็นเวลานานขึ้นเช่นกัน รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังต้านทานแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละช่วงเวลาการบ่ม ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตได้มาจากค่าความต่างระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลา 6 เดือน เป็น 13 เดือน (6-13) และ 13 เดือนเป็น 19 เดือน (13-19)

ตามลำดับ ซึ่งค่าลบแสดงว่าคอนกรีตมีกำลังลดลง หากพิจารณาเปรียบเทียบเป็นรายกลุ่ม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาทั้งตัวอย่างที่มีและไม่มี การโอบรัดด้วย CFRP ภายใต้การบ่มที่มีสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง นานขึ้นหากพิจารณาแต่ละช่วงเวลาบ่ม พบว่าโดยรวมแล้ว ตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีจำนวน ชั้นของ CFRP เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การโอบรัดด้วย CFRP สามารถช่วยลดการเสื่อมสภาพทางด้านกำลังรับแรงอัดในกรณี ที่ตัวอย่างเสายู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงและได้รับแรง กระทำแบบต่อเนื่อง โดยอาจเป็นผลจากการซึมผ่านของความชื้น ที่ลดลง

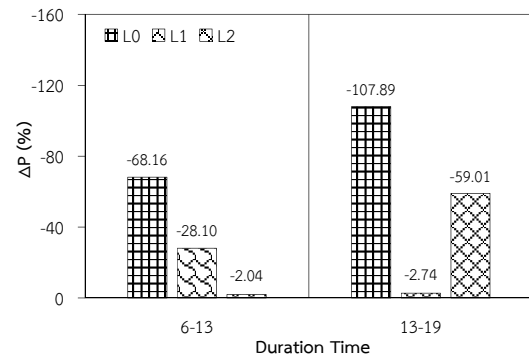


(ก) แรงอัดรวมของตัวอย่างทดสอบ



(ข) แรงอัดที่เกิดจากการโอบรัดด้วย CFRP เท่านั้น

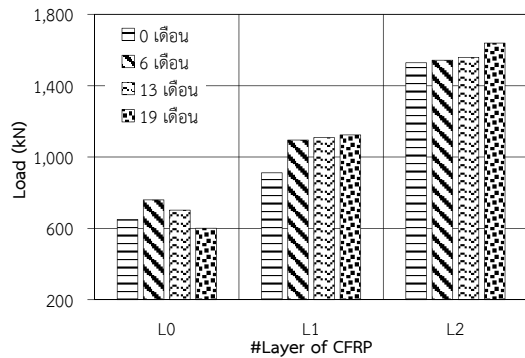
รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงอัดภายใต้แรง แบบต่อเนื่องโดยแบ่งตามจำนวนชั้น CFRP ของคอนกรีต



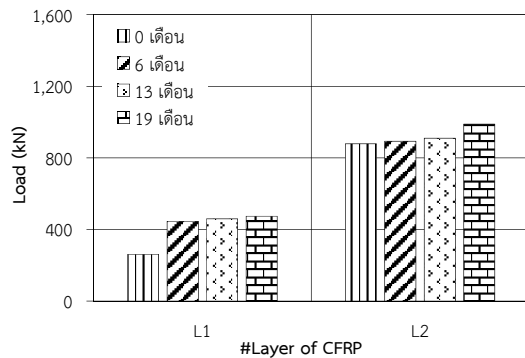
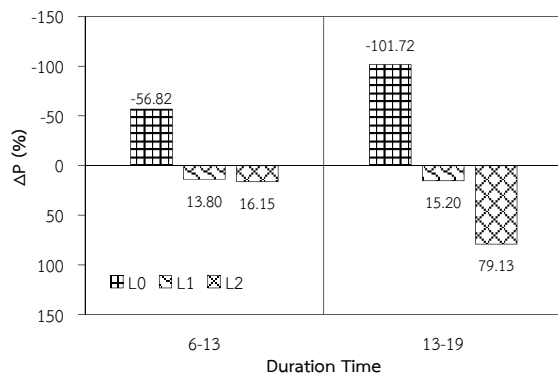
รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงกำลังคอนกรีตภายใต้แรงอัดตาม แนวแกนแบบต่อเนื่องเมื่อเผชิญสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

4.2.3 ผลการทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักร

กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงทุกกลุ่มตัวอย่าง (L0, L1, L2) มีกำลังรับแรงอัด สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ รุนแรงซึ่งอาจเกิดจากกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้น จากรูปที่ 10 (ก) กลุ่ม L0 เมื่อรับแรงอัดตาม แนวแกนแบบวัฏจักร กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นใน ระยะการบ่ม 6 เดือนแรก จากนั้นความสามารถในการรับแรงอัด ของคอนกรีตจะลดลงเมื่อตัวอย่างอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ รุนแรงเป็นระยะเวลานานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ ตัวอย่างกลุ่ม L0 ภายใต้แรงอัดแบบต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณากลุ่ม L1 และ L2 พบว่าตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นแม้ตัวอย่าง จะถูกบ่มในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นระยะเวลานานขึ้น และ รูปที่ 10 (ข) แสดงกำลังแรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักรเฉพาะที่ เกิดจากการโอบรัดด้วย CFRP เท่านั้น พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่ม มากขึ้นแม้ตัวอย่างจะถูกบ่มในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นระยะ เวลานานซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดรวมภายใต้แรงอัดตาม แนวแกนแบบวัฏจักร ในรูปที่ 10 (ก) รูปที่ 11 แสดงการ เปลี่ยนแปลงกำลังของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัดแบบวัฏจักร แต่ละช่วงเวลาการบ่มภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เมื่อ พิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะกลุ่ม L0 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อตัวอย่างถูกบ่มในสภาวะแวดล้อมที่ รุนแรงเป็นเวลานานขึ้น และกลุ่ม L1 และ L2 กลับพบว่าตัวอย่าง มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดมีค่าเป็นบวก แสดงว่า ตัวอย่างเสามีกำลังเพิ่มขึ้นภายหลังจากที่ตัวอย่างเผชิญสภาวะ แวดล้อมที่นานขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ ภายใต้อัดตามแนวแกนแบบวัฏจักรทำให้คอนกรีตมี ความเครียดค้าง (Residual Strain) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุก กระทำมาก่อนหน้านี้ (Load History)

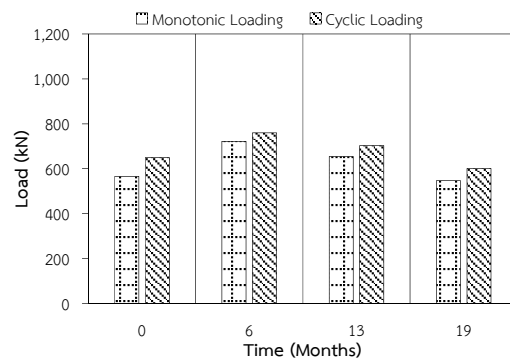


(ก) แรงอัดรวมของตัวอย่างทดสอบ

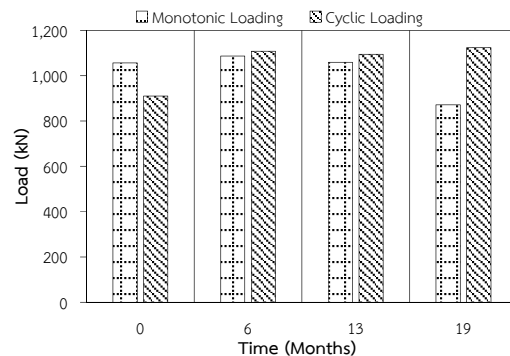
(ข) แรงอัดที่เกิดจากการโอบรัดด้วย CFRP เท่านั้น
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบแรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักรโดย
แบ่งตามจำนวนชั้น CFRPรูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงกำลังคอนกรีตภายใต้แรงอัด
ตามแนวแกนแบบวัฏจักรเมื่อเผชิญสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

รูปที่ 12 เปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักรของตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP พบว่าโดยส่วนใหญ่กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนแบบวัฏจักรมีค่าสูงกว่าแรงอัดตามแนวแกนต่อเนื่อง แม้ตัวอย่างจะถูกบ่มในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานาน และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดของตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP พบว่าตัวอย่างที่มีการโอบรัดด้วย

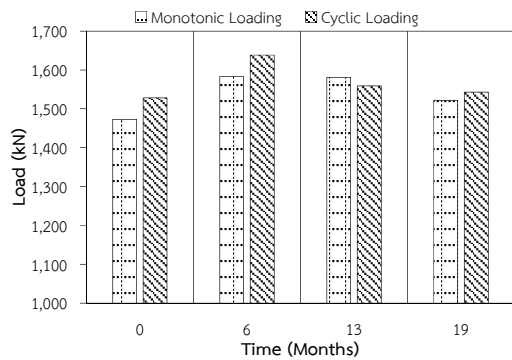
CFRP กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนมีค่าเพิ่มสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัดมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะกำลังและความเหนียวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากภายใต้สภาวะแรงอัดสามแกน (Triaxial Compression) เพราะแรงดันรอบข้างมีส่วนช่วยลดการแตกร้าวในคอนกรีตและช่วยจำกัดการขยายตัวของทางด้านข้างของคอนกรีตก่อนที่คอนกรีตจะเกิดการวิบัติลักษณะการวิบัติของตัวอย่างภายใต้แรงอัดตามแนวแกนต่อเนื่องและแบบวัฏจักรมีลักษณะเหมือนกัน นั่นคือ ในกรณีตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP เมื่อเสาตัวอย่างรับน้ำหนักมากขึ้นจะเกิดลักษณะของรอยแตกเป็นทางยาวจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง จนเสาตัวอย่างรับน้ำหนักสูงสุดถึงจุดวิบัติและไม่สามารถคงรูปร่างได้ จึงทำให้เกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด กรณีตัวอย่างที่มีการโอบรัดด้วย CFRP เกิดการฉีกขาดของ CFRP เมื่อสังเกตคอนกรีตภายในจะเกิดการแตกร้าวแล้วเสียรูปเป็นลักษณะทรงกรวย และการวิบัติที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดในบริเวณช่วงบนลงมาถึงช่วงกลางของความสูงตัวอย่าง แสดงลักษณะการวิบัติของเสาตัวอย่างดังรูปที่ 13



(ก) กรณีที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP



(ข) กรณีที่โอบรัดด้วย CFRP จำนวน 1 ชั้น



(ค) กรณีที่โอบรัดด้วย CFRP จำนวน 2 ชั้น
รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบแรงอัดตามแนวแกนระหว่างแรงอัดแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักร



รูปที่ 13 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย CFRP

4.3 ผลการตรวจสอบแนวโน้มการผุกร่อนของเหล็กเสริมภายในเสาตัวอย่าง

รูปที่ 14 แสดงเส้นชั้นความสูงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อแสดงขอบเขตพื้นที่ความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมภายในจะเกิดการผุกร่อนโดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C876 ดังตารางที่ 6 พบว่าตัวอย่าง CR-CON-0 และ CR-CFRP-0 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก แสดงว่าเหล็กเสริมไม่มีสัญญาณที่จะเกิดสนิม และเมื่อพิจารณาตัวอย่าง CR-CON-6 บ่มภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลา

6 เดือน ดังรูปที่ 14 (ค) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง -80 และ -540 mV เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการโอบรัดด้วย CFRP ภายใต้ระยะเวลาการบ่มที่เท่ากัน ดังรูปที่ 14 (ง) พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง -10 และ -180 mV เท่านั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 14 (จ) และ (ข) ตัวอย่างควบคุมภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นระยะเวลา 13 และ 19 เดือน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงสุดถึง -540 mV และ -560 mV ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามตารางที่ 6 แสดงว่าเหล็กเสริมในตัวอย่างควบคุมมีแนวโน้มที่จะเกิดสนิมเกินกว่า 90% ในทางตรงกันข้ามตัวอย่าง CR-CFRP-13 และ CR-CFRP-19 ดังรูปที่ 14 (ฉ) และ (ช) ที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 13 และ 19 เดือน ตามลำดับเช่นกัน มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ตรวจวัดได้เพียง -210 mV และ -270 mV ตามลำดับเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าเหล็กเสริมเพิ่งเริ่มมีการกัดกร่อน ดังนั้นการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP มีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย CFRP เมื่อต้องเผชิญสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นการโอบรัดด้วย CFRP จึงสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดสนิมในโครงสร้างได้เมื่อโครงสร้างนั้นต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

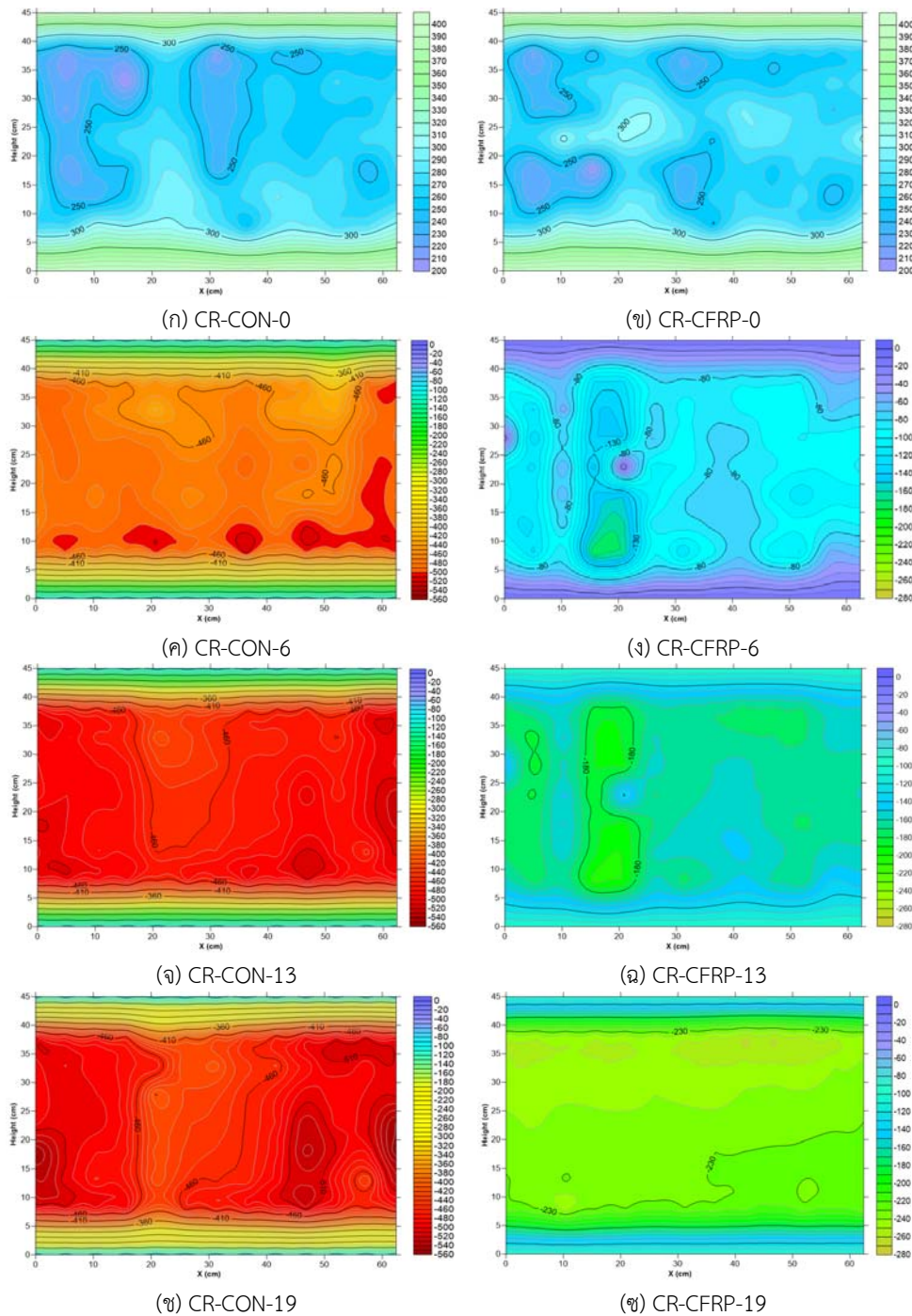
ตารางที่ 6 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ [10]

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	โอกาสการเกิดสนิม
<-350	90%
-200 ถึง -350	50%
> -200	10%

4.4 ความคงทนของคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP

ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดประสิทธิภาพของ FRP (κ_e) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเครียดตามแนวเส้นใยใน FRP ขณะที่กำลังเกิดการวิบัติแบบ FRP Rupture เมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยในการทดสอบแรงดึง โดยในการศึกษานี้ แบ่งการคำนวณค่า κ_e จากการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การนำ ϵ_{fu} และ E_f ที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแทนลงในสมการที่ (3) ถึง (5) ซึ่งเป็นตัวอย่างไม่ได้รับการบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ทำให้ κ_e ที่ได้จากการแก้สมการเป็นค่าความเครียดประสิทธิภาพของ CFRP ที่ไม่ได้รับการบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง หรือ $\kappa_{e,tt}$
2. การนำ ϵ_{fu} และ E_f ที่ได้จากการเอกสารข้อมูลวัสดุของผู้ผลิตแทนลงในสมการที่ (3) ถึง (5) แล้วแก้สมการหาค่า $\kappa_{e,manu}$



หมายเหตุ

- CR- = Corrosion Test
 CON- = ตัวอย่างควบคุมไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP
 CFRP- = ตัวอย่างมีการโอบรัดด้วย CFRP
 0 = ไม่อยู่ในสภาวะน้ำทะเล
 6,13,19 = ระยะเวลาที่ตัวอย่างอยู่ในสภาวะน้ำทะเลเป็นเวลา 6 ,13 และ 19 เดือน ตามลำดับ

รูปที่ 14 เส้นชั้นความสูงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า(หน่วย mV)

ทั้งนี้ ACI 440.2R ไม่ได้แนะนำค่า κ_e ที่สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ดังนั้นการใช้ค่า κ_e ที่สภาวะแวดล้อมปกติสำหรับการคำนวณค่า C_E ทำให้ได้ค่า C_E ที่เกิดขึ้นจริงตามสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อไป ค่า κ_e ที่ได้จากทั้งสองกรณี แสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่า κ_e เฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัดแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักร

Specimen	#Wet-Dry Cycle	$\kappa_{e,tt}$	$\kappa_{e,manu}$
L1-M-0	0	1.23	0.51
L2-M-0	0	1.83	0.76
L1-C-0	0	1.05	0.44
L2-C-0	0	1.80	0.75

เมื่อได้ค่า κ_e ดังตารางที่ 7 ข้างต้น นำมาคำนวณหาค่า C_E ซึ่งถูกแบ่งจากผลการทดสอบออกเป็น 2 แบบ เช่นเดียวกับ κ_e โดยค่า C_E เกิดจากผลต่างระหว่าง f'_{cc} และ f'_c ในสมการที่ (3) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีการโอบรัดด้วย CFRP ตามระยะเวลาที่เสาตัวอย่างถูกบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง และกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัดด้วย CFRP ที่ไม่ถูกบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงและใช้สมการที่ (3) ถึง (6) แทนค่าตัวแปรอีกครั้ง ทำให้ได้ค่า C_E อันเนื่องมาจากการบ่มที่สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงตารางที่ 8 แสดงค่า C_E ซึ่งได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 8 ค่า C_E ที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงอัดแบบต่อเนื่องและแบบวัฏจักร

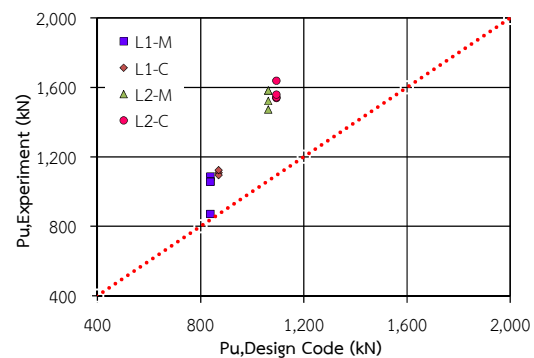
Specimen	#Wet-Dry Cycles	$C_{E,tt}$	$C_{E,manu}$
L1-M-6	360	2.38	1.71
L1-M-13	780	2.14	1.62
L1-M-19	1,140	2.00	1.61
L2-M-6	360	1.56	1.12
L2-M-13	780	1.48	1.12
L1-C-6	360	2.38	1.70
L1-C-13	780	2.32	1.76
L1-C-19	1,140	2.26	1.82
L2-C-6	360	1.42	1.02
L2-C-13	780	1.37	1.03
L2-C-19	1,140	1.40	1.11

หมายเหตุ

$C_{E,tt}$ = ค่าตัวคูณลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมจากการคำนวณแบบที่ 1

$C_{E,manu}$ = ค่าตัวคูณลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมจากการคำนวณแบบที่ 2

เมื่อเสาตัวอย่างได้รับการบ่มด้วยสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงที่นานขึ้น ค่า C_E ที่ได้จากการนำ $\kappa_{e,tt}$ และ $\kappa_{e,manu}$ มาใช้ก่อนหน้านี้พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน ACI 440.2R แนะนำ ซึ่งได้กำหนดให้ C_E สำหรับ CFRP เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงมีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ได้จากการทดลองโดยอาศัยค่า C_E ที่ได้จากการคำนวณจากข้างต้น ($P_{u,Experiment}$) กับกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการตามมาตรฐาน ACI 440.2R ($P_{u,Design Code}$) จะได้กราฟดังรูปที่ 15 พบว่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย CFRP ที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าค่าตัวคูณลดค่าเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่แนะนำในมาตรฐานมีความปลอดภัยทั้งในสภาวะแวดล้อมปกติและสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ทั้งนี้ ACI 440.2R ไม่ได้แนะนำสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงอัดแนวแกนแบบวัฏจักรของคอนกรีตมาโดยเฉพาะ



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบ $P_{u,Experiment}$ กับ $P_{u,Design Code}$ ของตัวอย่างคอนกรีต

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่โอบรัดด้วย CFRP ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงแบบเปียกสลับแห้งในสภาวะน้ำทะเล ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- คอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย CFRP มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น แม้ว่าจะสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานาน
- ตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนแบบวัฏจักร จะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นในช่วงเพิ่มแรงอัด แต่จะเป็นแบบไม่เชิงเส้นเมื่อลดแรงอัด (Unloading) ทั้งนี้การเพิ่มและการลดแรงอัดซ้ำๆ ส่งผลให้เกิดความเครียดคงค้างในคอนกรีต ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของน้ำหนักรบรรทุกกระทำแบบวัฏจักร
- คอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย CFRP กำลังรับแรงอัดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรเพิ่มขึ้น ถึงแม้จะสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ในทางตรงข้ามกำลังรับแรงอัดกลับลดลงในกรณีของ

คอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบต่อเนื่องและสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเกินกว่าระยะเวลา 6 เดือน

- ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงส่งผลให้เหล็กเสริมภายในเกิดสนิม ซึ่งการโอบรัดด้วย CFRP สามารถช่วยลดแนวโน้มการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ เมื่อโครงสร้างนั้นต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

- จากการคำนวณค่า κ_e จากผลการทดสอบตัวอย่างและจากข้อมูลวัสดุในเอกสารที่แนะนำโดยผู้ผลิต พบว่าค่า κ_e จากการคำนวณทั้งสองแบบมีค่าสูงกว่าค่า κ_e ตามที่ ACI440.2R แนะนำ ซึ่งส่งผลให้ C_E ค่าสูงกว่าค่าที่มาตรฐานแนะนำให้ใช้ในการออกแบบด้วยเช่นกัน ดังนั้นแม้จะใช้ค่า C_E ตามที่มาตรฐานได้แนะนำคอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย CFRP จะยังคงมีความปลอดภัยทั้งในสภาวะแวดล้อมปกติและสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

6. กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณบริษัทรีปเมค คอร์ปอเรชั่นที่กรุณาให้คำแนะนำและสาริตการติดตั้ง CFRP รวมถึงอนุเคราะห์วัสดุ CFRP ในการทดสอบ และขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์การใช้สถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำทดสอบ

7. นิยามศัพท์(หรือสัญลักษณ์)

A_g	= พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด
A_{st}	= พื้นที่เหล็กเสริมหลักในหน้าตัดเสา
C_E	= ตัวคูณลดค่าเนื่องจากสภาวะแวดล้อม
D	= เส้นผ่านศูนย์กลางเสา
E_f	= โมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP
f'_c	= กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด
f'_{cc}	= กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มีการโอบรัด
f_l	= ความดันด้านข้างที่เกิดจาก FRP
f_y	= กำลังครากของเหล็กเสริม
n	= จำนวนชั้นของ FRP
t_f	= ความหนาของ FRP แต่ละชั้น
ϵ_{fe}	= ความเครียดประลัยของ ณ จุดวิกฤติของ FRP
ϵ_{fu}	= ความเครียดประลัยของ FRP ที่ใช้ในการออกแบบ
ϵ_{fu}^*	= ความเครียดประลัยของ FRP จากรายงานผู้ผลิต
κ_a	= ค่าตัวคูณรูปทรงของหน้าตัด มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับหน้าตัดวงกลม
κ_e	= ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดประลัย
ψ_f	= ตัวคูณลดกำลังสำหรับ FRP มีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับการโอบรัดทุกด้าน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Au, "Behavior of FRP-Confined Concrete," Master Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA, 2001.
- [2] D.D.L. Chung, "Carbon Fiber Composites," Butterworth-Heinemann, 1994.
- [3] R. El-Hacha, M.F. Green, G.R. Wight, "Effect of Severe Environmental Exposures on CFRP Wrapped Concrete Columns," *Journal of Composites for Construction*, vol. 14(1), pp. 83-93, 2010.
- [4] *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440, 2008.
- [5] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI Committee 318, 2008.
- [6] M.F. Green, L.A. Bisby, V.K.R. Kodur, "FRP Confined Concrete Columns: Behavior under Extreme Conditions," *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, pp. 928-937, 2006.
- [7] K. Suh, G. Mullins, R. Sen, D. Winters, "Effectiveness of Fiber-Reinforced Polymer in Reducing Corrosion in Marine Environment," *ACI Structural Journal*, vol. 104(1), pp. 76-83, 2007.
- [8] *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM D638-02a, 2002.
- [9] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM D3039, 2008.
- [10] *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM C876, 2009.
- [11] L. Lam, J.G. Teng, C.H. Cheung, Y. Xiao, "FRP-confined concrete under axial cyclic compression," *Journal of Cement and Concrete Composites*, vol. 28 (10), pp. 949-958, 2006.
- [12] L. Lam, J.G. Teng, "Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression," *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 308-321, 2009.
- [13] Z. Wang, D. Wang, S.T. Smith, D. Lu, "Experimental testing and analytical of CFRP-confined large circular RC columns subjected to cyclic axial compression," *Journal of Engineering Structures*, vol. 40, pp. 64-74, 2011.