

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การเสริมกำลังคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง* อภัย เบ็ญจพงศ์ และ ธรรมมา เจียรธรวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 16 มีนาคม 2563 แก้ไขบทความ 21 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดจากคลอไรด์มีความรุนแรงและกินพื้นที่เป็นวงกว้าง ไม่จำเป็นที่โครงสร้างต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยโดยตรง แม้แต่โครงสร้างที่อยู่ห่างออกมาก็ยังได้รับผลกระทบกับปัญหาเหล่านี้ด้วย เมื่อโครงสร้างคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับผลกระทบจากคลอไรด์ เหล็กเสริมที่อยู่ภายในจะเกิดการกัดกร่อนจนทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การโก่งตัว และรูปแบบการวิบัติของคาน หากไม่มีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังความสามารถต่าง ๆ เหล่านี้ จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่ปลอดภัยต่อการใช้งานอีกต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้โครงสร้างที่เสื่อมสภาพกลับมาใช้งานได้อย่างปลอดภัย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเสริมกำลังคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่ต่างกัน 4 รูปแบบ เพื่อศึกษาหาแนวทางการเสริมกำลังที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้ง 4 รูปแบบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย แต่ไม่สามารถเพิ่มความเหนียวของคานที่เกิดการเสื่อมสภาพให้กลับมาใกล้เคียงกับคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพได้ การเสริมกำลังที่สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้สูงสุดคือการเสริมกำลังในรูปแบบตาราง และการเสริมกำลังรูปแบบที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทำมุม 45 องศากับความยาวคานสามารถป้องกันรอยร้าวในแนวแยงได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : คานลิก; เสื่อมสภาพ; เสริมกำลัง; คาร์บอนไฟเบอร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9511 3185, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: rattanasak.h@mail.rmutk.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Strengthening of Deteriorated Reinforced Concrete Deep Beam Caused by Chloride with Carbon Fiber Sheets

Rattanasak Hongthong* Apai Benjaphong and Thamma Jairtalawanich

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep
2 Nanglinchee Road, Thungmahamek, Sathon, Bangkok, 10120

Received 16 March 2020; Revised 21 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

Deterioration of reinforced concrete deep beam structure caused by chloride is severe and takes up wide area even though the structure is not exposed to sea water or brackish water. Even the structure which is far from sea water or brackish water is affected by this problem. When the reinforced concrete deep beam structure is affected by chloride, steel reinforced inside the structure is corroded resulting in reducing the cross-sectional area of the reinforced steel affecting load capacity, deflection and beam failure. If there is no repair or strengthening, such capabilities are continuously reduced until it is no longer safe to use the beam. Therefore, it is necessary to repair or strengthening the deteriorated structure to be safely used. This research investigated strengthening of deteriorated reinforced concrete deep beam caused by chloride with 4 formats of carbon Fiber sheets to seek guidelines for the most efficient strengthening. The result showed that the strengthening by the 4 format of carbon fiber sheet could increase ultimate load capability yet could not improve ductility of the deteriorated beam to become close to the beam that is not deteriorated. The strengthening that could increase the maximum ultimate load capability was the table format strengthening. In addition, the strengthening that the carbon fiber making 45 degrees with the length of the beam could best prevent diagonal cracks.

Keywords : Deep Beam; Deterioration; Strengthening; Carbon Fiber

* Corresponding Author. Tel.: +668 9511 3185, E-mail Address: rattanasak.h@mail.rmutk.ac.th

1. บทนำ

คานเหล็กเป็นองค์อาคารช่วงสั้นที่มีความลึกประสิทธิภาพสูง ACI 318-14 [1] ระบุว่าคานเหล็กที่มีอัตราส่วนความยาวไม่เกิน 4 เท่าของความลึกหรือระยะห่างจากฐานรองรับมาถึงน้ำหนักที่มากกระทำแบบจุดต้องมีค่าไม่เกินกว่า 2 เท่าของความลึก การถ่ายแรงภายในของคานเหล็กจะมีพฤติกรรมคล้ายโครงข้อหมุน เหล็กเสริมทำหน้าที่คล้ายคอร์ดล่างและคอร์ดบน คอนกรีตทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงอัดจากบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกจากภายนอกมากระทำสู่ฐานรองรับคล้ายชิ้นส่วนแนวทแยงในโครงข้อหมุน เรียกว่า ท่อนรับแรงอัดในแนวทแยง ภายในท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงจะมีหน่วยแรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนรับแรงอัด เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ทำให้เกิดการแตกร้าวตามแนวแกนของท่อนรับแรงอัด เรียกรอยร้าวชนิดนี้ว่าการแตกร้าวที่เอวคาน หรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในแนวทแยง (Diagonal Crack) จึงจำเป็นต้องมีเหล็กเสริมที่เอวคาน (Web Reinforcement) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น เหล็กเสริมที่เอวคานไม่เพียงทำหน้าที่ป้องกันการแตกร้าวตามแนวทแยงของคานเท่านั้น แต่ยังมีส่วนกับรูปแบบการแตกร้าวและรูปแบบการวิบัติของคานเหล็กอีกด้วย [2]-[3] ดังนั้นหากคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพเหล็กเสริมที่เอวคานถูกกัดกร่อนจากสนิม อาจทำให้รูปแบบการแตกร้าว และรูปแบบการวิบัติของคานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ยิ่งไปกว่านั้น จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เมื่อเหล็กเสริมที่เอวคานถูกกัดกร่อนจากสนิม จะทำให้เกิดผลกระทบกับการโค้งตัวและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานลดลง [4]-[5] ไม่เพียงแต่เหล็กเสริมบริเวณเอวคานที่ส่งผลต่อคานเหล็ก A. Iman and A. Azad [6] ได้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพของคานเหล็กที่เกิดการกัดกร่อน เฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว พบว่าเมื่อเหล็กเสริม

รับแรงดึงถูกกัดกร่อนจากสนิม ความแกร่ง (Stiffness) และน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานมีค่าลดลง ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อคานเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ โดยที่เหล็กเสริมที่เอวคานและเหล็กเสริมรับแรงดึงถูกกัดกร่อนย่อมส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม แต่เมื่อต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล เหล็กเสริมที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตมักเกิดการผุกร่อนจากสนิม ปกติเหล็กเสริมที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตจะถูกป้องกันการกัดกร่อนด้วยความเป็นต่างของคอนกรีต แต่เมื่อความเป็นต่างของคอนกรีตถูกทำลายจากคลอไรด์ไอออน (Chloride Ions) จนกระทั่งอยู่ในระดับวิกฤติ หากมีปริมาณน้ำและออกซิเจนอย่างเพียงพอ เหล็กเสริมที่อยู่ภายในจะถูกกัดกร่อนจากสนิม [7] การเกิดสนิมไม่เพียงแต่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ยังทำให้เกิดการแตกร้าว และเกิดการหลุดล่อนของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดสนิมทำให้เกิดแรงดันภายในเนื้อของคอนกรีต เกิดการแตกร้าวและหลุดล่อนตามแนวเหล็กเสริม เป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้น [8] การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากคลอไรด์จึงมีความรุนแรง และยังกินพื้นที่เป็นวงกว้าง เพราะไม่จำเป็นที่โครงสร้างต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยโดยตรง แม้แต่โครงสร้างที่อยู่ห่างออกมาในรัศมีประมาณ 2 กิโลเมตร ก็ยังได้รับผลกระทบกับปัญหาเหล่านี้ด้วย [9]

ปัญหาการเสื่อมสภาพไม่เพียงจะส่งผลต่อพฤติกรรม และกำลังรับน้ำหนักประลัยของโครงสร้างเท่านั้น การเสื่อมสภาพยังส่งผลให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนแปลงไปจากที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ โครงสร้างที่เสื่อมสภาพเหล่านี้จึงจำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษา

หรือซ่อมแซม เพื่อให้ปลอดภัยและกลับมาใช้งาน ได้ดังเดิม การซ่อมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่นิยม ในปัจจุบันรูปแบบหนึ่งคือ การเสริมกำลังคานจาก ภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (FRP) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และมีความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อน ที่สำคัญสามารถติดตั้งและกำหนดทิศทางได้อย่าง สะดวก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเสริมกำลังคานเหล็ก คอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่น คาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ เพื่อหารูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลัง รับน้ำหนักบรรทุกทุกให้ได้ดีที่สุด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

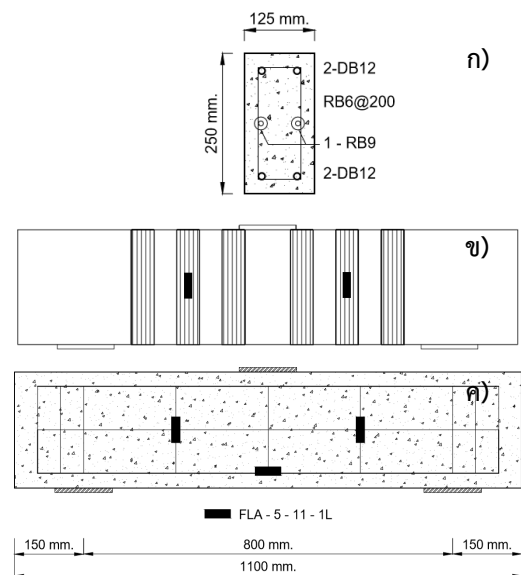
การศึกษาเรื่องการเสริมกำลังคานเหล็กคอนกรีต เสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ได้ทำการ ทดสอบตัวอย่างคานทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น ตัวอย่างที่คานไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (D0M) จำนวน 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ (D3M) จำนวน 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างคานที่เกิดการเสื่อมสภาพ เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 2 แต่นำมาเสริมกำลังด้วยแผ่น คาร์บอนไฟเบอร์จำนวนในรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 ตัวอย่าง (D3MS1-D3MS4) การเร่งให้คานเกิด การเสื่อมสภาพในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการสร้างสภาวะ แวดล้อมจำลองเพื่อเร่งให้เหล็กเสริมที่อยู่ภายใน คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนจากสนิม

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เริ่มต้นจากศึกษางานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก สร้างตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดสอบ สร้างสภาวะแวดล้อมจำลองให้คาน เกิดการเสื่อมสภาพ เสริมกำลังโครงสร้างคานคอนกรีต และทำการทดสอบแบบทำลายเพื่อศึกษาพฤติกรรม ต่าง ๆ ของคาน

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาด $0.125 \times 0.25 \times 1.10$ เมตร มีอัตราส่วนช่วงการเค้นต่อ ความลึกประสิทธิภาพ 1.85 คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีต ผสมเสร็จ มีกำลังอัดประลัยที่ 28 วันเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปทรงกระบอก) เหล็ก เสริมรับแรงอัดและแรงดึงใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (SD 40 T) สำหรับ เหล็กเสริมตามขวาง ใช้เหล็กผิวเรียบประกอบด้วยเหล็ก เสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 9 มิลลิเมตร มี กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 2,400 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร (SR 24)



รูปที่ 1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและตำแหน่งที่ติดตั้ง อุปกรณ์วัดความเครียด

แบบขยายหน้าตัด และการจัดเรียงเหล็กเสริม สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 1(ก) งานวิจัยนี้ทุกตัวอย่างได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัด ความเครียด (Strain Gauge) ยี่ห้อ TML รุ่น FLA-5-11-1L สามารถวัดความเครียดได้สูงสุด (Strain Limit) $50,000 \times 10^{-6}$ Strain ไว้ที่เหล็กเสริมรับแรงดึง 1

ตำแหน่ง และที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือน 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 1(ค) นอกจากนี้ก่อนทำการทดสอบแบบทำลายยังได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในบริเวณช่วงการเฉือนดังแสดงในรูปที่ 1(ข) อีกจำนวน 2 ตำแหน่ง

2.1.2 การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลอง

การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองเป็นการเร่งให้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเกิดการเสื่อมสภาพในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2 เพราะหากรอให้คอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติต้องใช้เวลานาน วิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อระยะเวลาในการเสื่อมสภาพคือ การใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอกโดยนำขั้วบวก (Anode) ต่อเข้ากับเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต ส่วนขั้วลบ (Cathode) ต่อเข้ากับแผ่นอลูมิเนียม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) การศึกษาที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 5 โวลต์ ขั้วบวกเข้ากับเหล็กเสริมรับแรงดึง (DB12) และเหล็กเสริมตามขวาง (RB 9) ส่วนขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นอลูมิเนียม สารละลายที่ใช้มีความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักของน้ำ ระหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยามีการเปลี่ยนสารละลาย และทำความสะอาดทุกสัปดาห์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2 การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลอง

2.1.3 การเสริมกำลังคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

หลังจากสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองเร่งให้คานเกิดการเสื่อมสภาพ จากนั้นจึงนำคานลึกคอนกรีตเสริม

เหล็ก 4 ตัวอย่าง มาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ยี่ห้อ Sikawrap-230C/45 มีลักษณะเส้นใยทิศทางเดียว (Uni-Direction) ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) มีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยอยู่ 43,832 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.34 เมกกะกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้ Sikadur 330 เป็นเรซินวัสดุประสานระหว่างผิวของคานคอนกรีตกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ดังรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 3 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และวัสดุประสาน

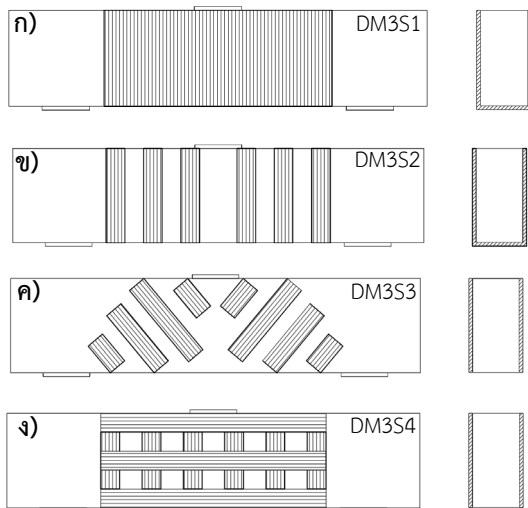
การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ใช้การติดตั้งแบบเปียก (Wet Lay Up) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1508-51 [10]



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ก่อนทำการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ต้องเตรียมผิวคานคอนกรีตโดยทำความสะอาดและขัดผิวให้สม่ำเสมอตามรูปที่ 4(ก) ทำการเตรียมวัสดุประสานใช้อัตราส่วนตามที่คู่มือของผลิตภัณฑ์ระบุไว้ดังรูปที่ 4(ข)

ต่อจากนั้นจึงหาเรซินที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานลงบนพื้นผิวคอนกรีตดังรูปที่ 4(ค) ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตามทิศทางที่ต้องการเสริมกำลัง พร้อมไล่ฟองอากาศที่ถูกขังอยู่ระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และผิวของคอนกรีตดังรูปที่ 4(ง) หลังจากทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วห้ามรบกวนตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังจนกว่าวัสดุประสานจะได้รับการบ่มเป็นเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์



รูปที่ 5 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 6 การทดสอบแบบทำลาย

การเสริมกำลังสำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนของคานาเหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากคลอไรด์ ดังนั้นการเสริมกำลังจึงติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ด้านข้าง

ของคานาคานเป็นหลัก ตัวอย่าง D3MS1 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะพันรอบ 3 ด้าน (U Wrap) ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ตัวอย่าง D3MS2 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรอบ 3 ด้านเช่นกัน แต่แผ่นที่ใช้จะมีลักษณะแบบแถบ (Strip) ขนาด 5 เซนติเมตร และทำการติดในบริเวณช่วงการเฉือนของคาน โดยที่แต่ละแผ่นติดห่างกัน 4 เซนติเมตร เรียกการติดตั้งลักษณะนี้ว่าการพันรอบบางส่วน (U Strip) ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) ตัวอย่าง D3MS3 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่ป้องกันการแตกร้าวที่เอวคาน (Web-Shear Crack) จึงติดตั้งในทิศทางที่ตั้งฉากกับท่อนรับแรงอัดในแนวทแยง หรือทำมุม 45 องศากับความยาวคาน การติดตั้งรูปแบบนี้ใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ขนาด 5 เซนติเมตรและวางห่างกัน 4 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5(ค) สำหรับตัวอย่างสุดท้ายคือตัวอย่าง D3MS4 เลือกติดตั้งในลักษณะตาราง แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้มีความกว้าง 5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 5(ง)

2.1.4 การทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test)

การทดสอบแบบทำลาย ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Jinan Liangong ทดสอบน้ำหนักได้ 200 ตัน การทดสอบใช้แรงกระทำสถิตแบบ 3 จุด (Three-Point Flexural Test) เพื่อป้องกันการวิบัติเฉพาะแห่ง (Local Failure) ได้ทำการติดตั้งแผ่นเพลทหนา 10 มิลลิเมตรไว้ในบริเวณฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักภายนอกมากระทำ ระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง เหล็กปลอกรับแรงเฉือน และที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จากอุปกรณ์วัดความเครียด นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดการโก่งตัว (Deflection) ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบด้วยการติดตั้ง Dial Gauge ยี่ห้อ Misumi ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านค่า 0.01 มิลลิเมตรไว้ที่กึ่งกลางคาน และติดตั้ง Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) ยี่ห้อ TML มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ที่บริเวณ

ฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับอุปกรณ์วัดความเครียดและ LVDT ถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Data Locker) ยี่ห้อ TML รุ่น TDS-530 หลังจากนั้นจึงส่งข้อมูลไปบันทึกผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลของการสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้ใช้การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเร่งให้คานเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพโดยกำหนดให้เกิดการกัดกร่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมที่เอนคาน หลังจากทำการทดสอบแบบทำลายได้ทำการทุบตัวอย่างคาน เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังจากเร่งปฏิกิริยา ผลการเร่งปฏิกิริยาด้วยกระแสไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงการกัดกร่อนของสนิมบนเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังแสดงในรูป 7(ก) และเหล็กเสริมที่เอนคานดังแสดงในรูปที่ 7(ข)



รูปที่ 7 เหล็กเสริมที่อยู่ภายในตัวอย่างคานคอนกรีตหลังสร้างสภาวะแวดล้อมจำลอง

3.2 ผลการทดสอบแบบทำลาย

การทดสอบแบบทำลายมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของคาน เช่น รูปแบบการแตกร้าว (Crack Pattern) รูปแบบการวิบัติ (Mode of Failure)

กำลังรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Load) การโก่งตัว (Deflection) และความเครียดที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอก รับแรงดึงและแรงเฉือน โดยนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังคานลึคคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพ

3.2.1 รูปแบบการแตกร้าว (Crack Pattern)

ระหว่างทำการทดสอบแบบทำลาย ได้ทำการสังเกตรูปแบบการแตกร้าวของตัวอย่างคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (DOM) เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพแต่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง (D3M) พบว่าตัวอย่าง DOM เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่กึ่งกลางคานมีทิศทางทำมุม 90 องศากับความยาวคาน หลังจากนั้นจึงเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงมีทิศทางทำมุมประมาณ 45 องศากับความยาวคาน การแตกร้าวในแนวทแยงจะหยุดขยายตัว เมื่อจุดปลายของรอยร้าวเคลื่อนตัวเข้าใกล้กับบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกจากเครื่องทดสอบมากระทำสักระยะหนึ่ง ในขณะที่รอยร้าวจากแรงดัดยังขยายตัวสูงขึ้น และรอยร้าวในแนวทแยงมีความกว้างเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นคอนกรีตที่อยู่ระหว่างปลายด้านบนรอยของร้าวในแนวทแยงกับบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกมากระทำ จึงอัดระเบิด (Crushing) เป็นสาเหตุให้คานวิบัติ เรียกการวิบัติรูปแบบนี้ว่า การวิบัติจากแรงเฉือนร่วมกับแรงอัด (Shear Compression Failure) ดังแสดงในรูปที่ 8(ก) สำหรับตัวอย่าง D3M รูปแบบการแตกร้าวคล้ายกับตัวอย่าง DOM แต่จะแตกต่างกันที่ เมื่อเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง การขยายตัวของรอยร้าวในแนวทแยงจะไปหยุดอยู่ใต้บริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกเพียงครู่เดียว ปลายด้านบนของรอยร้าวจะเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกมากระทำ ส่วนปลายด้านล่างจะเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณฐานรองรับ เป็นเหตุให้คานเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน และการวิบัติเกิดขึ้นเร็วกว่าคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ เรียกการวิบัติรูปแบบนี้ว่า การวิบัติจาก



รูปที่ 8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

การแตกหักในแนวทแยง (Diagonal Failure) ดังแสดงในรูปที่ 8(ข) อีกประการหนึ่งที่เกิดขึ้นได้คือ ความกว้างของรอยร้าวในแนวทแยงสำหรับตัวอย่าง DOM จะมีขนาดกว้างกว่าตัวอย่าง D3M อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังพบว่ารอยร้าวเนื่องจากแรงดัดแรก (First Flexural Crack) จะปรากฏเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุก 3.75 และ 2.69 ตัน และรอยร้าวในแนวทแยงแรก (First Diagonal Crack) จะปรากฏเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุก 13.40 และ 11.98 ตัน สำหรับตัวอย่างคาน DOM และ D3M ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ จะส่งผลต่อรูปแบบการวิบัติ ความกว้างของรอยร้าวในแนวทแยง และยังทำให้รอยร้าวจากแรงดัดรวมทั้งรอยร้าวในแนวทแยงปรากฏขึ้นเร็วกว่าเดิมอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเสื่อมสภาพของคานลิกไม่มีผลต่อรูปแบบการแตกหักของคาน

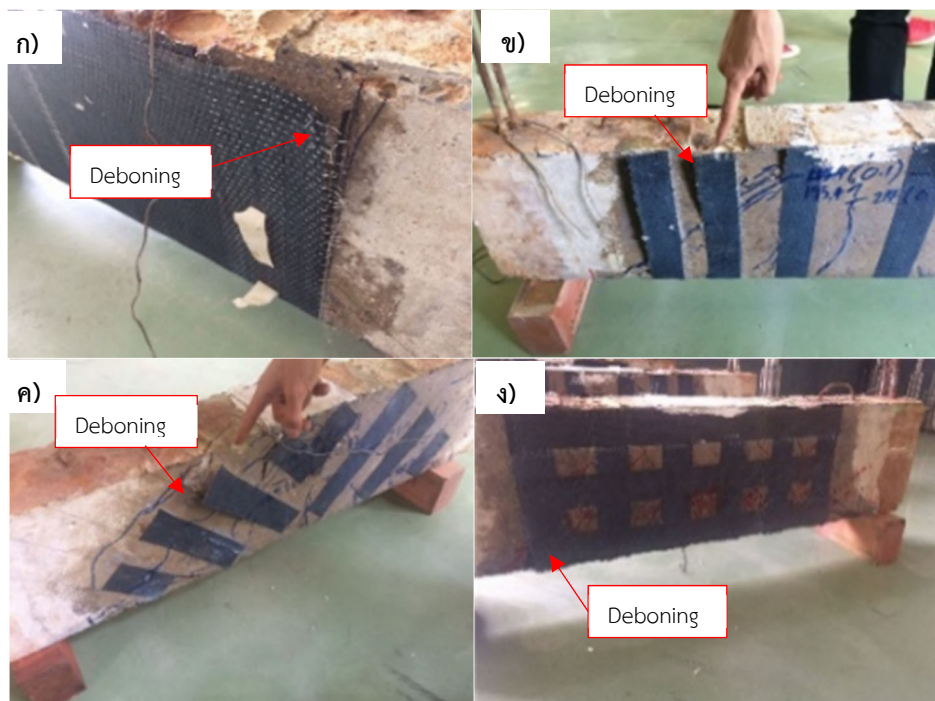
3.2.2 น้ำหนักประลัย (Ultimate Load)

น้ำหนักประลัยเป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ น้ำหนักประลัยทำการบันทึกได้จากเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ผลการทดสอบน้ำหนักประลัยสำหรับคานทุกตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 1 เมื่อนำตัวอย่างที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (DOM) และตัวอย่างที่เสื่อมสภาพ (D3M) มาเปรียบเทียบกันพบว่ามีย่านน้ำหนักประลัย 21.26 ตัน และ

17.77 ตัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานมีค่าลดลง

เมื่อนำตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ (D3M) มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพแต่ได้รับการเสริมกำลัง (D3MS1–D3MS4) พบว่า ตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังมีน้ำหนักประลัยมากกว่าตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานลิกที่เสื่อมสภาพได้ นอกจากนี้เมื่อนำกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังมาเปรียบเทียบกันพบว่า ตัวอย่าง D3MS1 D3MS2 D3MS3 และ D3MS4 มีน้ำหนักบรรทุกประลัย 22.84 23.84 22.48 และ 25.42 ตัน ตามลำดับ ทุกตัวอย่างมีรูปแบบการวิบัติที่เหมือนกันคือ เกิดการหลุดล่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่จุดปลายของแผ่น (FRP Deboning) เนื่องจากวัสดุประสานสูญเสียกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 9

การเสริมกำลังที่สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้สูงที่สุดคือตัวอย่าง D3MS4 มีน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 25.42 ตัน สาเหตุสำคัญที่ทำให้ตัวอย่าง D3MS4 เพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้สูงที่สุด คือ การติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบตารางที่จะสามารถยับยั้งหน่วยแรงดึง



รูปที่ 9 การวิบัติของตัวอย่างคานที่ได้รับการเสริมกำลัง (ก) ตัวอย่าง D3MS1 (ข) ตัวอย่าง D3MS2
(ค) ตัวอย่าง D3MS3 (ง) ตัวอย่าง D3MS4

จากแรงดัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงได้ หรือกล่าวได้ว่าสามารถป้องกันการแตกร้าวของคานได้ในสองทิศทาง ทั้งการแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัดและการแตกร้าวในแนวทแยง ซึ่งแตกต่างจากการเสริมกำลังรูปแบบอื่นที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถป้องกันการแตกร้าวได้เพียงทิศทางเดียว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแบบทำลาย

ตัวอย่าง	น้ำหนัก ประลัย (ตัน)	การโก่งตัวที่ สภาวะประลัย (มม.)	รูปแบบ การวิบัติ
D0M	21.26	7.20	SC
D3M	17.77	5.15	DF
D3MS1	22.84	5.45	FRP Deboning
D3MS2	23.84	5.06	FRP Deboning
D3MS3	22.48	5.22	FRP Deboning
D3MS4	25.42	4.36	FRP Deboning

SC คือ Shear Compression Failure และ DF คือ Diagonal Failure

3.2.3 การโก่งตัว (Deflection)

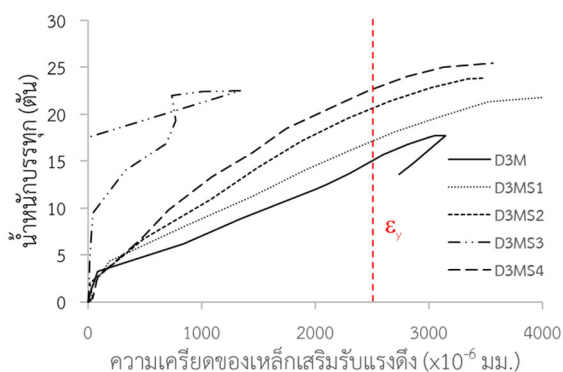
การโก่งตัวของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถบ่งบอกถึงความเหนียวของโครงสร้างได้ ยิ่งคานคอนกรีตมีค่าการโก่งตัวสูงแสดงว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อยู่ภายในมีกำลังถึงจุดครากก่อนที่คานคอนกรีตจะเกิดการวิบัติ ค่าการโก่งตัวที่แสดงในตารางที่ 1 เป็นค่าการโก่งตัวก่อนที่โครงสร้างจะเกิดการวิบัติหรือที่สภาวะประลัย

ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ D0M มีค่าการโก่งตัวเท่ากับ 7.20 มิลลิเมตร และเมื่อคานเกิดการเสื่อมสภาพ D3M มีค่าการโก่งตัวเพียง 5.15 มิลลิเมตร ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อคานลิกคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง หรือกล่าวได้ว่าความเหนียวของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าลดลงเมื่อคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ สำหรับตัวอย่างคานที่ได้รับการเสริมกำลังพบว่า การเสริมกำลังตัวอย่าง D3MS1

D3MS2 D3MS3 และ D3MS4 มีค่าการโก่งตัว 5.45 5.06 5.22 และ 4.36 มิลลิเมตรตามลำดับ ผลการทดสอบได้สอดคล้องกับผลการการศึกษาของ A. Saidy et al. [11] และ R. Azam [12] ที่ระบุว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีผลต่อการโก่งตัวหรือความเหนียวของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพ

3.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

เมื่อตัวอย่างคานที่ทำการทดสอบ เริ่มรับน้ำหนักบรรทุกที่ผิวล่างของคานจะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้น หากหน่วยแรงดึงมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ที่ผิวล่างของคานจะเกิดการแตกร้าวในทิศทางที่ตั้งฉากกับความยาวคาน (รอยร้าวเนื่องจากแรงดัด) ส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียกำลังต้านทานแรงดึง เหล็กเสริมจึงเริ่มทำหน้าที่ต้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นแทน งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงในตำแหน่งกึ่งกลางคาน เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริมรับแรงดึงเมื่อคานเกิดการเสื่อมสภาพและได้รับการเสริมกำลัง ผลกระทบที่เกิดขึ้นแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่บันทึกได้ระหว่างการทดสอบ แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กรับแรงดึง

จากผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับความเครียดที่เหล็กเสริมพบว่า น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ 15.06 18.11 19.54 และ 22.54 ตัน สำหรับตัวอย่าง D3M D3MS1 D3MS2 และ D3MS4 ตามลำดับ แต่ตัวอย่าง D3MS3 ไม่สามารถบันทึกค่าได้เนื่องจากอุปกรณ์วัดความเครียดชำรุดเสียหาย หากพิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงถึงจุดคราก ผลการทดสอบตามตัวอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงถึงจุดครากสำหรับตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลัง มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง หรือกล่าวได้ว่าการเสริมกำลังสามารถลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เข้ามาทำหน้าที่ช่วยป้องกันหน่วยแรงดึงหรือยับยั้งความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง ผลการทดสอบสอดคล้องกับการศึกษาของ A. M S และ P. Philip [13] สำหรับตัวอย่างที่สามารถลดหน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้สูงที่สุดคือตัวอย่าง D3MS4 ซึ่งเสริมกำลังในรูปแบบตาราง เนื่องจากการเสริมกำลังในรูปแบบตาราง มีการติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ผิวล่างของคาน และมีทิศทางของเส้นใยขนานกับความยาวคานดังรูปที่ 5(ง) จึงทำให้สามารถป้องกันหน่วยแรงดึงหรือยับยั้งการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดได้ดีกว่าการเสริมกำลังรูปแบบอื่น เป็นผลให้หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าต่ำกว่าทุกตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลัง

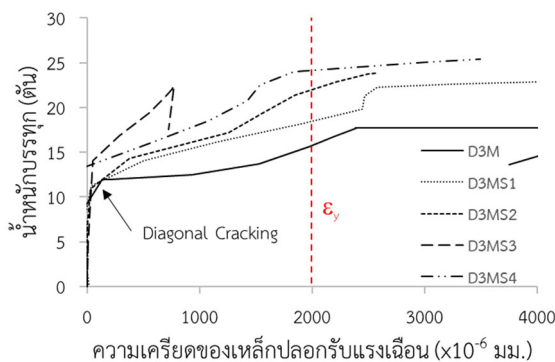
3.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

โดยทั่วไปคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นคานที่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลัก การแตกร้าวของคานลิกมักเกิดจากท่อนรับแรงอัดรูปขวดใน

แนวทแยงที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงจากจุดที่น้ำหนักบรรทุกถูกภายนอกมากระทำไปสู่ฐานรองรับ ภายในท่อนรับแรงอัดจะมีการกระจายตัวของหน่วยแรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนรับแรงอัด ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวตามแนวแกนของท่อนรับแรงอัด ดังนั้นจำเป็นต้องมีเหล็กเสริมตามขวางที่ประกอบด้วยเหล็กปลอกรับแรงเฉือน และเหล็กเสริมที่เอวคานในแนวนอนเพื่อป้องกันรอยร้าวและการวิบัติที่จะเกิดขึ้นตามมา งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ที่เหล็กปลอกเพื่อเก็บข้อมูลความเครียดของคานที่เสื่อมสภาพ และคานที่ได้รับการเสริมกำลัง

ความเครียดที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือนแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกระหว่างการทดสอบ ก่อนที่คานเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงจะไม่มีหน่วยแรงเกิดขึ้นที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือน เห็นได้จากค่าความเครียดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ตัวอย่างคานจะเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง เหล็กปลอกรับแรงเฉือนจึงเริ่มทำหน้าที่ป้องกันการแตกร้าว

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปความกว้างของรอยร้าวจะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ความเครียดในเหล็กปลอกจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดครากดังเช่นตัวอย่าง D3M ที่แสดงรูปที่ 11 หลังจากนั้นตัวอย่างคานจึงเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว



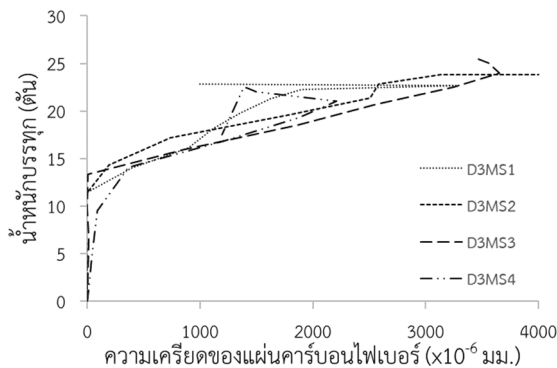
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน พบว่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนมีกำลังถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ 15.76 19.24 22.31 และ 24.43 ตัน สำหรับตัวอย่าง D3M D3MS1 D3MS2 และ D3MS4 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการเสริมกำลังตัวอย่างคานที่เสื่อมสภาพทุกรูปแบบสามารถช่วยลดความเครียดที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือน การที่ความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนลดลง แสดงว่าความกว้างของรอยร้าวในแนวทแยงถูกยับยั้งไว้ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นผลให้ตัวอย่างคานที่ได้รับการเสริมกำลังเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ดีมากกว่าคานที่เสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามแม้ว่าตัวอย่าง D3MS3 เหล็กปลอกรับแรงเฉือนมีกำลังไม่ถึงจุดครากแต่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นกลับมีค่าต่ำที่สุด สาเหตุดังกล่าวเกิดจากการเสริมกำลังในรูปแบบทำมุม 45 องศากับแนวคานหรือตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงสามารถป้องกันการแตกร้าวที่เอวคานหรือการแตกร้าวในแนวทแยงได้โดยตรงทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าการเสริมกำลังทุกรูปแบบ

3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้ในการเสริมกำลังมีลักษณะที่สามารถรับแรงดึงได้ในทิศทางเดียว มีหน้าที่หลักในการป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้น พฤติกรรมของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะคล้ายกับเหล็กปลอกรับแรงเฉือน คือ เมื่อมีการแตกร้าวในแนวทแยงเกิดขึ้น แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะเข้ามาทำหน้าที่รับแรงดึง สังเกตได้ดังรูปที่ 12 ความเครียด ที่เกิดขึ้นบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในช่วงแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อคานเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง หลังจากนั้นแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จึงเริ่มทำหน้าที่รับแรงดึงเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปพฤติกรรมของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อรับแรงดึง จะมี

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับหน่วยแรงดึงจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนที่มีการเสียรูปเมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่จุดคราก



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ผลการทดสอบสำหรับคานทั้ง 4 ตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังพบว่า เกิดการวิบัติในรูปแบบเดียวกันคือ เกิดการหลุดล่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่บริเวณปลายแผ่น ซึ่งเกิดจากการสูญเสียกำลังของวัสดุประสานที่มีหน้าที่ส่งถ่ายหน่วยแรงระหว่างผิวของคอนกรีตกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก่อนที่จะตัวอย่างคานจะเกิดการวิบัติ

4. สรุป

4.1 การเสื่อมสภาพของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมที่เอวคานถูกกัดกร่อนจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย การโก่งตัว ความกว้างของรอยร้าว และรูปแบบการวิบัติของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ไม่มีผลต่อรูปแบบการแตกร้าวของคาน

4.2 การเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบ สามารถเพิ่มกำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยรูปแบบที่เพิ่มความสามารถ

ในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ดีที่สุด คือ การเสริมกำลังในรูปแบบตาราง

4.3 แม้ว่าการเสริมกำลังในรูปแบบตารางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้สูงสุด แต่การเสริมกำลังในรูปแบบที่ทำมุม 45 องศา กับความยาวคานสามารถป้องกันการเกิดรอยร้าวในแนวทแยง และความเครียดที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือนได้ดีที่สุด

4.4 การเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบ ไม่ส่งผลต่อการโก่งตัวของคานลิกคอนกรีตเสริมหลักที่เกิดการเสื่อมสภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนประเภทงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2561 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Standard and Report 318, 2014
- [2] D. Kumar Sahoo, M. Sagar Varma Sagi, B. Singh, and P. Bhargava, "Effect of Detailing of Web Reinforcement on the Behavior of Bottle-shaped Struts," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 303–314, Oct. 2010.
- [3] M. D. Brown and O. Bayrak, "Minimum transverse reinforcement for bottle shape struts," *ACI Structure Journal*, vol. 103, no. 6, pp. 813-826, Nov. 2006.

- [4] C. Suffern, A. El-Sayed, and K. Soudki, "Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 37, no. 8, pp. 1045–1056, Aug. 2010.
- [5] S. Xu, Z. Zhang, R. Li, and B. Qiu, "Experimental Study on the Shear Behavior of RC Beams with Corroded Stirrups," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 178–189, Apr. 2017.
- [6] Ashhad Iman and Abul Kalam Azad, "Prediction of residual shear strength of corroded reinforced concrete beam," *International Journal of Advance Structure Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 307–318, Sep. 2016.
- [7] N. Thongkod and W. Yodsudjai, "Repairing structure deteriorated due to chloride with transfer electric ion," *Civil journal*, vol. 17, no. 5, pp. 50–51, Sep.–Oct. 2005.
- [8] W. Yodsudjai, "Steel corrosion occurs in reinforced concrete," *Concrete journal*, vol. 4, Aug. 2008.
- [9] R. Sahamitmongkol, "Deterioration of concrete structure due to contamination chloride in mixture," *Concrete journal*, vol. 6, Apr. 2009.
- [10] Standard Department of Public Works and Town & Country Planning, DPT Standard 1508, 2008.
- [11] A. H. Al-Saidy, A. S. Al-Harthy, K. S. Al-Jabri, M. Abdul-Halim, and N. M. Al-Shidi, "Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 8, pp. 1931–1938, Jul. 2010.
- [12] R. Azam and K. Soudki, "Structural performance of shear-critical RC deep beams with corroded longitudinal steel reinforcement," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 8, pp. 946–957, Sep. 2012.
- [13] Alexis M S and P. M. Philip, "Shear behavior of RC deep beams retrofitted with CFRP Sheets," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 6, pp. 1–4, 2018.