พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้ภาวะการกัดกร่อน

FLEXURAL BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED CONCRETE BEAM UNDER CORROSION

อาณสิทธิ์ การินทอง[1] สิริพงศ์ เกิดบุญมา[2,*] รุ่งรวี วัฒนพรพรหม[3] และ วิทิต ปานสุข[4]
[1,2,3,4] หน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
*Corresponding author address: siriphong10@gmail.com

บทคัดย่อ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเหล็กเสริมมีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่ต่ำ ปัญหาการกัดกร่อนภายในโครงสร้างเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างที่ลดลงเนื่องจากสูญเสียปริมาณเหล็กเสริมไป ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานโครงสร้างได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้สามารถรับกำลังภายใต้สภาวะการกัดกร่อนได้ดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายใต้ภาวะการกัดกร่อน ด้วยการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยที่ใช้ต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อน และอิทธิพลของปริมาณเส้นใยที่ใช้ต่อพฤติกรรมของคานที่สภาวะการกัดกร่อน ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ระดับการกัดกร่อน (ร้อยละ 0, 2 และ 5) และปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใช้ผสม (ร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตรคอนกรีต) โดยศึกษาจากตัวอย่างคานทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณการใช้ เส้นใยที่ในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ความกว้างรอยแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการผสมเส้นใยร้อยละ 1.0 ช่วยลดความกว้างรอยแตกร้าวลงได้ถึงร้อยละ 63.55 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 2 และลดลงร้อยละ 27.96 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 5 และการผสมเส้นใยช่วยทดแทนกำลังรับแรงดัดที่สูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อนได้โดยการผสมเส้นใยร้อยละ 0.5 สามารถทดแทนกำลังที่สูญเสียไปร้อยละ 101.3 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 2 และการผสมเส้นใยร้อยละ 1.0 สามารถทดแทนกำลังที่สูญเสียไปร้อยละ 101.2 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 5 อีกทั้งเส้นใยเหล็กยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายแรงไปยังเหล็กเสริมรับแรงดึง และช่วยให้พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้ภาวะการกัดกร่อน

คำสำคัญ: *คอนกรีตเสริมเส้นใย, เส้นใยเหล็ก, พฤติกรรมการรับแรงดัด, การกัดกร่อน*

Abstract

From the past until now, a reinforced concrete structure is one of the most widely used structure. However, the reinforcing bar, used in the structure, has low corrosion resistance. The corroded reinforcement steel in the structures can reduce the overall structural load capacity due to the reduction of bar diameter, which can cause the accident to the users. Therefore, the development of reinforced concrete structures that have an efficient load capacity under corrosion conditions is necessary. As a consequence, the objective of this research is to study the bending behavior of reinforced concrete beams with different amounts of steel fibers under corrosion conditions. The experiments were conducted by casting concrete beams with steel fiber (0, 0.5, 1.0, and 1.5 percent by volume of concrete) and the corrosion (0, 2, 5 percent) of concrete beams was induced by acceleration method. From the test, the results showed that when added 1.0 percent of fiber to the concrete beam, the average crack width due to corrosion was decreased 63.55% at 2% corrosion level and decreased 27.96% at 5% corrosion level. The steel fiber mixing can also compensate for the loss of flexural strength due to corrosion. When added 0.5% of fiber, the capacity of the beam is higher 101.3% (at 2% corrosion) compare to the controlled beam. When added 1.0% of fiber, the loading capacity was improved 101.2% at 5% corrosion level. Moreover, the steel fiber can also improve the efficiency of load transfer to the tensile reinforcement and ensures the bending behavior of the reinforced concrete beams under corrosion conditions.

Keywords: *fiber reinforced concrete, steel fiber, flexural behavior, corrosion*

1. คำนำ

ในอดีตจนถึงปัจจุบัน การก่อสร้างองค์อาคารต่างๆนั้น มักนิยมใช้โครงสร้างที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะคอนกรีตมีความแข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีต้นทุนก่อสร้างต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างชนิดอื่นๆ อีกทั้งยังมีเหล็กเสริมซึ่งช่วยเสริมกำลังและสร้างความปลอดภัยให้แก่โครงสร้างยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสารเคมีและการกัดกร่อนที่ต่ำ ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสื่อมสภาพและประสิทธิภาพในการใช้งานจึงมักมีสาเหตุมาจากผลกระทบจากการถูกทำลายไปของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในโครงสร้าง ดังนั้นปัญหาการกัดกร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงถือเป็นปัญหาสำคัญที่ไม่ควรมองข้ามไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางโครงสร้าง พฤติกรรมการรับแรงขององค์อาคาร รวมไปถึงอายุการใช้งานและความปลอดภัยขององค์อาคารนั้นๆ

ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การเกิดการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นที่เหล็กเสริมภายในโครงสร้าง โดยในคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะมีคอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัด ซึ่งสามารถต้านทานแรงอัดได้ดีมาก แต่กลับมีความต้านทานแรงดึงได้น้อย ในขณะที่เหล็กเสริมมีคุณสมบัติต้านทานได้ดีทั้งแรงอัดและแรงดึง ทั้งยังเป็นส่วนสำคัญที่รับแรงดึงในองค์อาคารรับแรงดัดที่คอนกรีตไม่สามารถรองรับได้ การเกิดการกัดกร่อนที่เหล็กเสริมจะทำให้เหล็กเสริมสูญเสียขนาดหน้าตัดโดยรอบไป หรือก็คือในโครงสร้างมีปริมาณเหล็กเสริมลดลงนั้นเอง ซึ่งย่อมส่งผลต่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ลดลง และความปลอดภัยในการใช้งานตามไปด้วย

ในปัจจุบันการนำเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถด้านต่างๆให้แก่โครงสร้างเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดึงในคอนกรีต นอกจากเหล็กเสริม เพิ่มความเหนียวและแข็งแรงขึ้นให้กับคอนกรีต ซึ่งช่วยทดแทนหรือเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้สูงขึ้น

เนื่องจากการเกิดการกัดกร่อนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คุณสมบัติและพฤติกรรมของโครงสร้างเปลี่ยนไป ผู้ศึกษาวิจัยได้เล็งเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีแนวคิดในการนำเส้นใยเหล็กมาช่วยพัฒนาโครงสร้างที่จะนำไปใช้ภายใต้ภาวะการกัดกร่อน เพื่อเพิ่มความทนทาน ลดอัตราการซ่อมแซม บำรุงรักษาที่ปฏิบัติงานยากภายใต้สภาพแวดล้อมนั้นๆ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานให้แก่องค์อาคารตั้งแต่ต้น อีกทั้งผู้วิจัยยังเห็นถึงปัญหาด้านต้นทุนและแหล่งที่มาของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในงานก่อสร้าง จึงเลือกใช้เส้นใยเหล็กจากประเทศเพื่อนบ้านอย่างประเทศเวียดนาม ที่ซึ่งเป็นแหล่งผลิตเส้นใยเหล็กที่ใกล้และมีต้นทุนต่ำ มาพัฒนาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แล้วทำการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการกัดกร่อน อีกทั้งการศึกษาในอดีตที่ผ่านมามักให้ความสนใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยที่สภาวะต่างๆและวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างปกติ แต่การศึกษาสภาวะการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กยังไม่เป็นที่ได้รับความสนใจมากนัก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยและเรียบเรียงบทความนี้

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา

บทความนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในสภาวะถูกกัดกร่อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังรับแรงดัด(flexural capacity) กับค่าการแอ่นตัว(displacement) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในสภาวะถูกกัดกร่อน ศึกษาอิทธิพลของปริมาตรเส้นใยเหล็กต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากความรุนแรงในการกัดกร่อนระดับต่างๆ และศึกษารูปแบบการเกิดรอยแตกร้าว (crack pattern) และลักษณะการวิบัติ (failure mode) ที่เกิดขึ้นด้วยการทดสอบการดัดคานภายใต้แรงกระทำสถิต (static load test) โดยตัวอย่างคานทดสอบใช้คอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบกัดแผ่น (mill cut steel fiber) ขนาด 32 มิลลิเมตร ในสัดส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตรคอนกรีต และคานทดสอบออกแบบโดยใช้มาตรฐาน ACI 318 [1] ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ลึก 200 มิลลิเมตร และยาว 1400 มิลลิเมตร ซึ่งบทความนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเมื่อเกิดผลกระทบจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ด้วยวิธีการเร่งการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้า (impressed current method) [2]

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1. การแบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบ

บทความนี้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 318 [1] โดยมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ระดับการกัดกร่อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ไม่เกิดการกัดกร่อน เกิดการกัดกร่อนร้อยละ 2 และเกิดการกัดกร่อนร้อยละ 5 ปริมาณของเส้นใยเหล็กที่ใช้ผสม มีทั้งหมด 4 ระดับ คือ ไม่ผสมเส้นใย ผสมปริมาณร้อยละ 0.5 ปริมาณร้อยละ 1.0 และปริมาณร้อยละ 1.5 ต่อปริมาตร คานตัวอย่างทั้งหมดมีขนาดเท่ากันทุกตัวอย่าง คือมีขนาดหน้าตัดกว้าง 150 มิลลิเมตร ลึก 200 มิลลิเมตร และยาว 1400 มิลลิเมตร เสริมเหล็กรับแรงดึงที่ส่วนล่างและเหล็กรับแรงอัดที่ส่วนบนของคานในปริมาณเหล็กเสริมสมดุลด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด DB12 จำนวนสองเส้น (2-DB12) เสริมเหล็กรับแรงเฉือนด้วยเหล็กกลม RB6 ที่เรียงตัวกันด้วยระยะห่าง 100 มิลลิเมตร ตลอดทั้งความยาวของคาน และมีระยะหุ้ม 25 มิลลิเมตร ความลึกประสิทธิผล 163 มิลลิเมตร

คอนกรีตถูกออกแบบให้มีกำลังอัดรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 40 เมกะปาสคาล (MPa) เส้นใยเหล็กที่ใช้ศึกษาเป็นเส้นใยเหล็กประเภทเส้นใยกัดแผ่น (mill cut) มีลักษณะรูปร่างแบบตะขอปลายเส้นใย (round with hooked ends) มีความยาว 32 มิลลิเมตร และกว้าง 2.6 มิลลิเมตร เส้นใยที่เลือกใช้ที่มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 700 เมกะปาสคาล (MPa) โดยคานทดสอบทั้ง 12 ตัวอย่างจะมีรายละเอียดและกรณีที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างคานทดสอบกรณีต่างๆ

ตัวอย่างที่	ตัวอย่างทดสอบ	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละโดยปริมาตรคอนกรีต)	ระดับการกัดกร่อน (ร้อยละ)
1	NC-0F	0	0
2	NC-0.5F	0.5	0
3	NC-1.0F	1.0	0
4	NC-1.5F	1.5	0
5	2C-0F	0	2
6	2C-0.5F	0.5	2
7	2C-1.0F	1.0	2
8	2C-1.5F	1.5	2
9	5C-0F	0	5
10	5C-0.5F	0.5	5
11	5C-1.0F	1.0	5
12	5C-1.5F	1.5	5

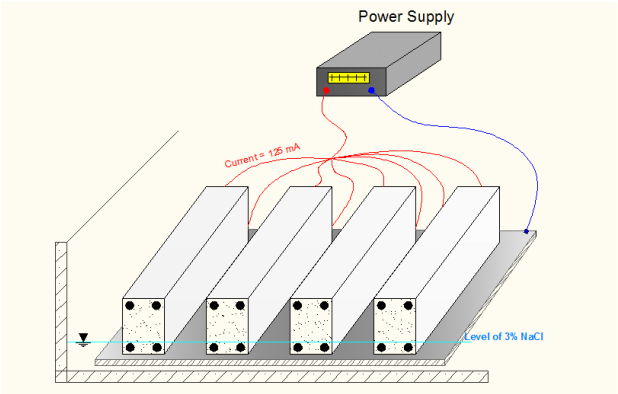
3.2. กระบวนการเร่งการกัดกร่อน

ในงานศึกษานี้มีตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งหมด 8 ตัวอย่างจากตัวอย่างคาน 12 ตัวอย่าง ที่ทำการเร่งให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานคอนกรีต การทดสอบได้กำหนดการเร่งระดับการกัดกร่อนอยู่ที่ 2 ระดับคือ การกัดกร่อนที่ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 ของการสูญเสียมวลรวมในเหล็กเสริมตลอดความยาวของเหล็กเสริมตามยาว การเร่งการกัดกร่อนโดยการแช่คานตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3% (3% NaCl solution) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ และติดตั้งแผ่นเหล็กกันสนิม (stainless steel) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วที่รับอิเล็กตรอน (cathode) เหล็กเสริมในคานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบก็จะทำหน้าที่เป็นขั้วที่ให้อิเล็กตรอน (anode) จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบซึ่งจะให้ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current, DC) [2] โดยควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ 250 μA/cm² ทำการควบคุมระดับสารละลายและเก็บค่าแอมแปร์ต่อชั่วโมง การทดสอบนี้จะกำหนดให้เก็บค่าแอมแปร์ต่อชั่วโมงอยู่ที่ 450 แอมแปร์ต่อชั่วโมง เพื่อให้ได้ปริมาณการสูญเสียมวลรวมของเหล็กที่ร้อยละ 2 ต้องใช้ระยะเวลาในกระบวนการเร่งประมาณ 19 วัน และร้อยละ 5 ต้องใช้ระยะเวลาในกระบวนการเร่งประมาณ 38 วัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 รูปแบบการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 สำหรับการทดสอบจริง

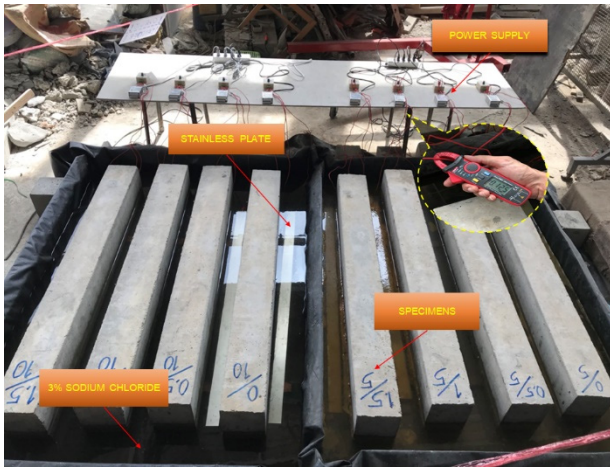
สำหรับการตรวจสอบระดับการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสามารถทำได้โดยการทำลายคอนกรีตภายนอกที่หุ้มเหล็กเสริมออก แล้วจึงทำความสะอาดเหล็กเสริมที่ถูกกัดกร่อนด้วยการขัดทำความสะอาดเพื่อขจัดสนิมที่เกิดขึ้นในขั้นต้นก่อน จากนั้นจึงนำเหล็กตัวอย่างที่ถูกกัดกร่อนไปแช่ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาที เพื่อขจัดคราบสนิมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G1-03 [3] แล้วจึงทำการหาปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไปโดยการชั่งน้ำหนัก และนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณดังสมการที่ (1) เพื่อหาร้อยละปริมาณถูกกัดกร่อน

ตารางที่ 2 ระดับการกัดกร่อนและระยะเวลาที่ใช้เร่งกัดกร่อน

ตัวอย่างที่	ตัวอย่างทดสอบ	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	การกัดกร่อน (ร้อยละ)
1	2C-0F	0	452	2
2	2C-0.5F	0.5	452	2
3	2C-1.0F	1.0	452	2
4	2C-1.5F	1.5	452	2
5	5C-0F	0	905	5
6	5C-0.5F	0.5	905	5
7	5C-1.0F	1.0	905	5
8	5C-1.5F	1.5	905	5



รูปที่ 1 แบบจำลองการเร่งการเกิดการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้า



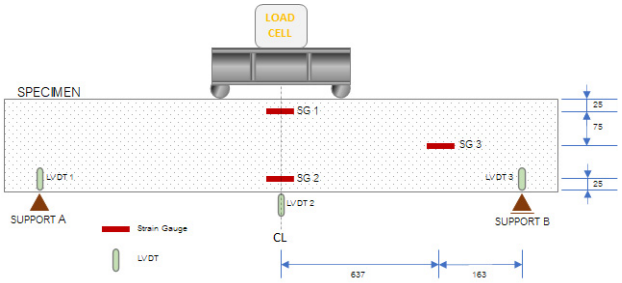
รูปที่ 2 การเร่งการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้า

$$\rho = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \times 100 \qquad (1)$$

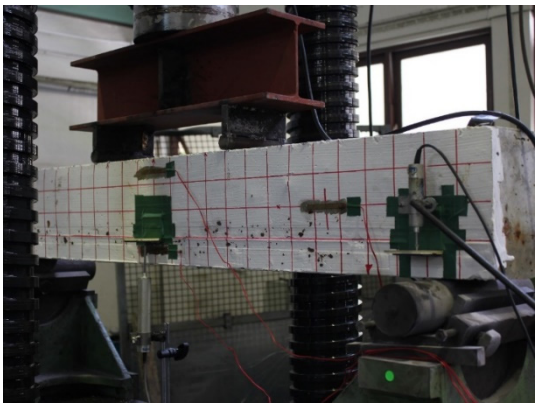
เมื่อ ρ คือ ร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อน, W_i คือ มวลเหล็กเสริมก่อนการกัดกร่อน (g), W_f คือ มวลเหล็กเสริมเมื่อถูกกัดกร่อน (g)

3.3. *การทดสอบกำลังรับแรงดัด*

ในการทดสอบการรับแรงดัดของคานคอนกรีตนั้น จะทดสอบโดยการทดสอบการน้ำหนักของคานตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบประเภทแรงกระทำแบบจุดสี่แรง (4 Points bending testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D6272 ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3 โดยการทดสอบจะให้น้ำหนัก (Load) ลงไปที่คานตัวอย่างจนเกิดการแอ่นตัวและเกิดการวิบัติในคานขึ้นเนื่องจากแรงดัด จากนั้นทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เก็บค่ากำลังรับน้ำหนักในช่วงต่างๆของตัวอย่างจากการทดสอบ โดยข้อมูลที่ได้ผ่านทางอุปกรณ์วัดค่าที่ทำการติดตั้งไว้ ซึ่งจะถูกต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) แล้วเชื่อมต่อมายังคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด (Strain Gauge) ไว้ที่ผิวคานคอนกรีตช่วงคอนกรีตรับแรงอัด ช่วงระยะเฉือนคาน และช่วงคอนกรีตรับแรงดึง เพื่อวัดค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งดังกล่าว และติดตั้ง Linear variable differential transformer (LVDT) เพื่อใช้วัดค่าการแอ่นตัวของคานที่ทดสอบด้วย ทั้งนี้เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมด อาทิ ค่ากำลังรับน้ำหนักกระทำ ค่าการแอ่นตัว ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวคาน ณ บริเวณที่ระบุ รูปแบบการเกิดรอยร้าว การวิบัติ เป็นต้น นำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของคานตัวอย่างทดสอบต่อไป พร้อมทั้งทำการเก็บภาพการทดสอบด้วยกล้อง 2 ตัวที่ด้านหน้าและด้านข้างของคานตัวอย่างเพื่อบันทึกลักษณะคานตัวอย่างก่อนและหลังทดสอบ รวมทั้งรูปแบบรอยร้าวและการวิบัติที่เกิดขึ้น ดังแสดงการทดสอบกำลังรับแรงดัดดังในรูปที่ 5



รูปที่ 4 แบบจำลองการทดสอบการรับน้ำหนักของคานด้วยวิธีแรงกระทำแบบจุดสี่แรงและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงดัดคานด้วยเครื่องทดสอบแรงกระทำแบบสี่จุด

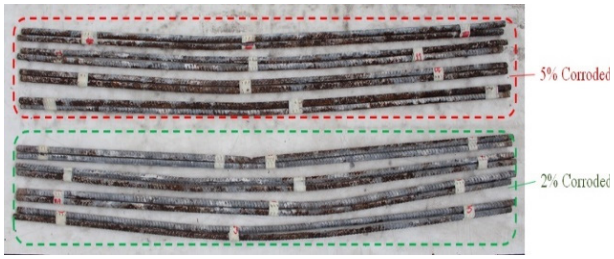
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1. *ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน*

การทดสอบจะสร้างเงื่อนไขที่เกิดผลกระทบจากการกัดกร่อน 3 ระดับคือ ไม่เกิดการกัดกร่อน, การกัดกร่อนในเหล็กเสริมร้อยละ 2 และการกัดกร่อนในเหล็กเสริมร้อยละ 5 ซึ่งลักษณะเหล็กเสริมที่ถูกกัดกร่อนระดับต่างๆได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 ตัวอย่างถูกเร่งให้เกิดกระบวนการกัดกร่อนโดยให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปยังเหล็กเสริมรับแรงดึงคงที่ขนาด 125 mA และควบคุมระยะเวลาในการให้กระแสไฟฟ้าด้วยการเก็บบันทึกชั่วโมงการให้กระแสไฟฟ้ารายชั่วโมง ซึ่งระดับความรุนแรงในการกัดกร่อนสามารถประเมินได้จากปริมาณการสูญเสียมวลของเหล็กเสริม ระดับการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างจากการเร่งปฏิกริยาด้วยกระแสไฟฟ้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีความไม่สม่ำเสมอกันตลอดทั้งคานและรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นเพียงบริเวณผิวข้างตลอดทั้งคาน ณ ตำแหน่งการวางตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเป็นตำแหน่งของระดับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ระดับความรุนแรงของการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้รอยแตกร้าวที่พบมีจำนวนเพิ่มขึ้นและความกว้างรอยแตกร้าวที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาจากผิวคานตลอดทั้งช่วง พบว่าที่ระดับการกัดกร่อนร้อยละ 2 มีความกว้างรอย

แตกร้าวสูงสุดเท่ากับ 0.20 มิลลิเมตร ขณะเดียวกันที่ระดับการกัดกร่อนร้อยละ 5 ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.60 มิลลิเมตร ซึ่งอีกข้อสังเกตหนึ่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นคือในตัวอย่างคานเดียวกันรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะมีความกว้างและความต่อเนื่องของรอยแตกร้าวที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีความไม่สม่ำเสมอกันตลอดทั้งความยาว ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปที่เกิดขึ้นได้จากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ ที่มีลักษณะในการเกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุด และความไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้าที่ไหลได้ในเหล็กเสริมรับแรงดึงเพราะความต้านทานการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าภายในคาน ณ ตำแหน่งต่างๆมีขนาดไม่เท่ากัน

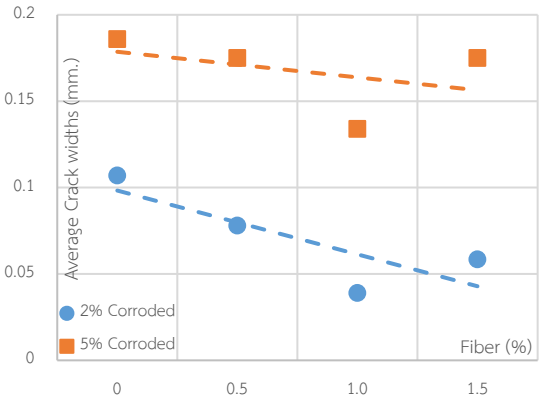


รูปที่ 6 ลักษณะเหล็กเสริมที่ถูกกัดกร่อนระดับต่างๆ

เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อความเสียหายของคานคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อน โดยพิจารณาจากความกว้างของรอยแตกร้าวเฉลี่ยซึ่งได้จากความกว้างของรอยแตกร้าวเฉลี่ยในช่วงความยาวคานทุกๆ 20 เซนติเมตรพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยที่ใช้มีผลทำให้ความกว้างของรอยแตกร้าวจากความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงให้เห็นในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยที่ใช้กับความกว้างรอยแตกร้าวเฉลี่ยในรูปที่ 7 โดยปริมาณเส้นใยที่ใช้ในร้อยละ 1.0 ช่วยลดความกว้างรอยแตกร้าวได้ดีที่สุด ซึ่งช่วยลดความกว้างรอยแตกร้าวได้ถึงร้อยละ 63.55 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 2 และร้อยละ 27.96 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 5 แต่พบข้อสังเกตหนึ่งคือ ที่การใช้ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.5 ความกว้างรอยแตกร้าวกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปอาจมีผลต่อการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดี ทำให้ความสามารถในการยึดรั้งและช่วยลดรอยแตกร้าวในคอนกรีตลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมอย่างการผสมเส้นใยในร้อยละ 1.0

ตารางที่ 3 ผลทดสอบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างคาน

ตัวอย่างทดสอบ	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น (ร้อยละ)	ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด (มิลลิเมตร)
NC-0F	-	0	-
NC-0.5F	-	0	-
NC-1.0F	-	0	-
NC-1.5F	-	0	-
2C-0F	452	2.26	0.20
2C-0.5F	452	2.04	0.20
2C-1.0F	452	2.05	0.10
2C-1.5F	452	2.41	0.20
5C-0F	905	5.92	0.30
5C-0.5F	905	5.13	0.50
5C-1.0F	905	5.04	0.60
5C-1.5F	905	5.34	0.60

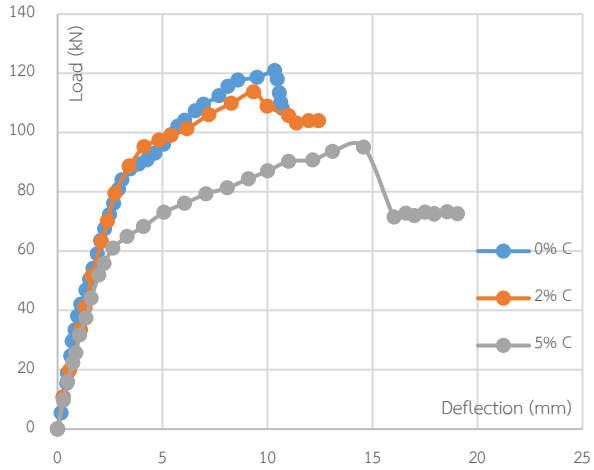


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยแตกร้าวกับปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใช้

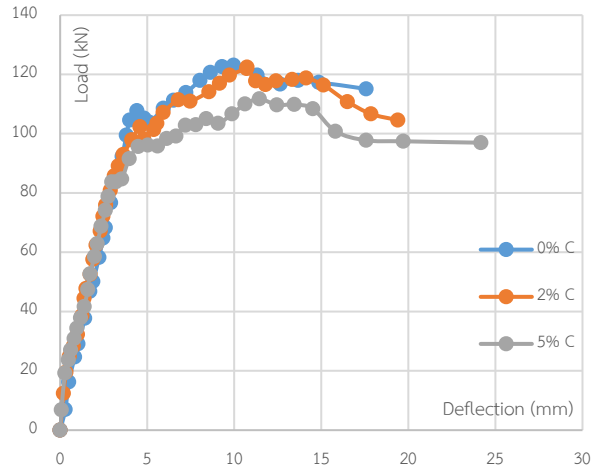
4.2. อิทธิพลของปริมาณเส้นใยต่อการรับแรงดัดของคาน

สำหรับการพิจารณาโดยใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กที่ผสมในคานคอนกรีตเป็นเกณฑ์ พบว่าที่การผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 1.5 ดังแสดงในรูปที่ 11 ปริมาณเส้นใยเพียงพอต่อปริมาณการสูญเสียเหล็กเสริมรับแรงดึงภายใต้ภาวะการกัดกร่อนในระดับที่ทำการศึกษาได้ จึงทำให้กำลังรับแรงดัดในคานยังคงที่ในทุกระดับการกัดกร่อน ส่วนที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 และ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 9 ตามลำดับ กำลังรับแรงดัดทดแทนจะลดลงตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 12 ดังนั้นจึงวิเคราะห์ได้ว่า กำลังรับแรงดัดทดแทนเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใช้ผสมในคานคอนกรีต กล่าวคือ ปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพียงพอจะช่วยทดแทนปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดคานที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อนในเหล็กเสริมรับแรงดึง และมีผลทำ

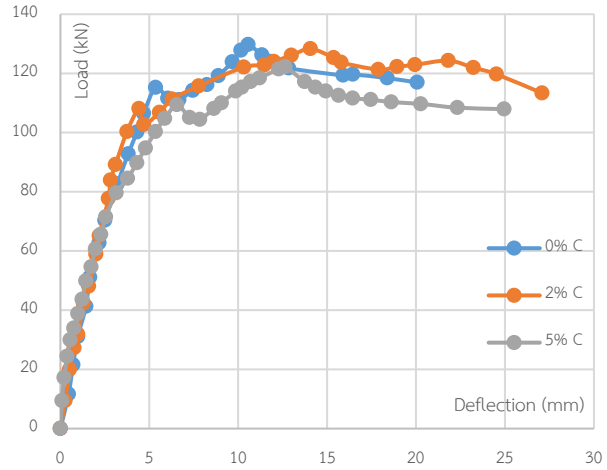
ให้คานคอนกรีตยังคงไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมและประสิทธิภาพในการรับแรงไปเนื่องจากการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น



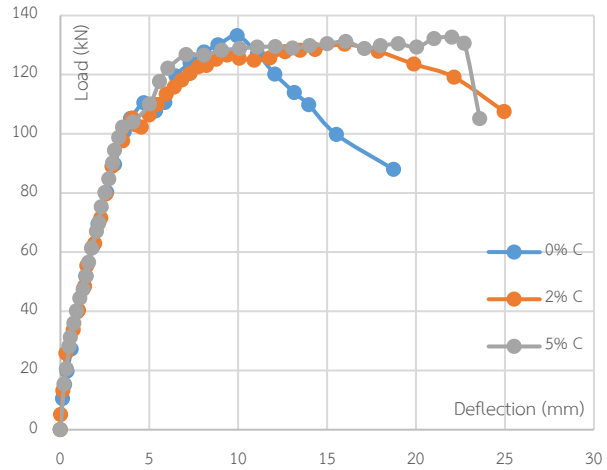
รูปที่ 8 ค่าน้ำหนักกระทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่ไม่ผสมเส้นใยในคอนกรีต



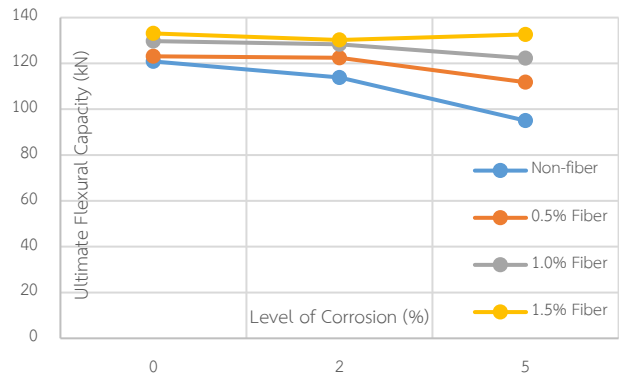
รูปที่ 9 ค่าน้ำหนักกระทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.5 ในคอนกรีต



รูปที่ 10 ค่าน้ำหนักกระทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่ผสมเส้นใยร้อยละ 1.0 ในคอนกรีต



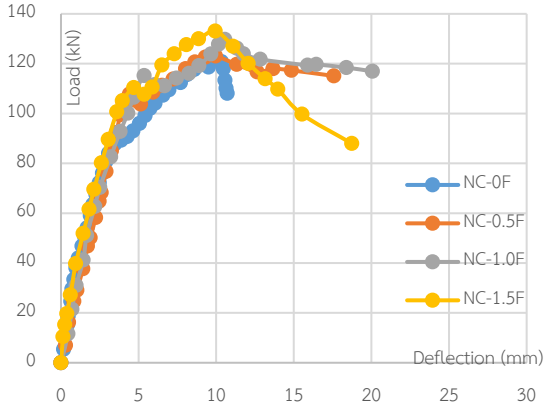
รูปที่ 11 ค่าน้ำหนักกระทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่ผสมเส้นใยร้อยละ 1.5 ในคอนกรีต



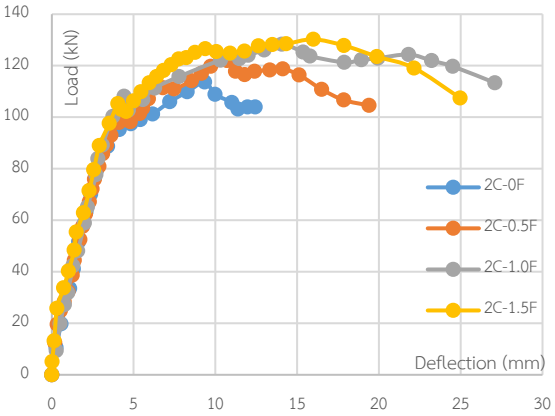
รูปที่ 12 ค่าน้ำหนักกระทำสูงสุดกับการกัดกร่อนในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.3. อิทธิพลของระดับการกัดกร่อนต่อการรับแรงดัดของคาน

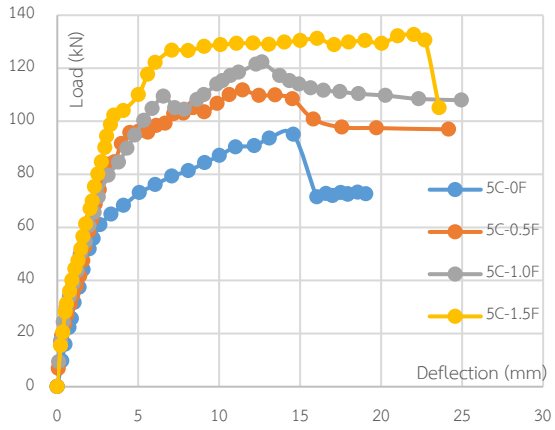
ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคานคอนกรีตโดยใช้ระดับการกัดกร่อนเป็นเกณฑ์พบว่า ที่ระดับการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย (กัดกร่อนร้อยละ 2) ดังแสดงในรูปที่ 14 ยังไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานมากนักและไม่ทำให้กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่การกัดกร่อนจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคานมากขึ้นทั้งกำลังรับแรงดัดของคานที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและการแอ่นตัวของคานที่เพิ่มมากขึ้นที่ระดับการกัดกร่อนที่รุนแรง (กัดกร่อนร้อยละ 5) ดังแสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นจึงวิเคราะห์ได้ว่า ระดับการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ขณะเดียวกันก็ทำให้คานมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการกัดกร่อนทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงในหน้าตัดคานไป



รูปที่ 13 ค่าน้ำหนักกรทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่ไม่เกิดการกัดกร่อน



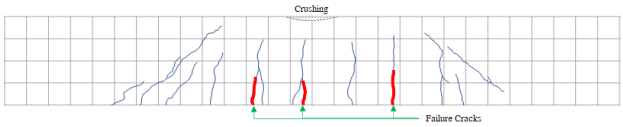
รูปที่ 14 ค่าน้ำหนักกรทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมร้อยละ 2



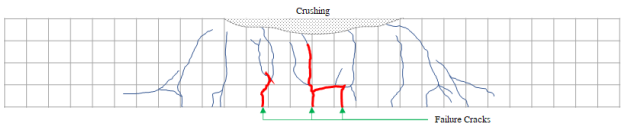
รูปที่ 15 ค่าน้ำหนักกรทำกับการแอ่นตัวของกลุ่มคานที่เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมร้อยละ 5

4.4. รอยแตกร้าวและการวิบัติที่เกิดขึ้น

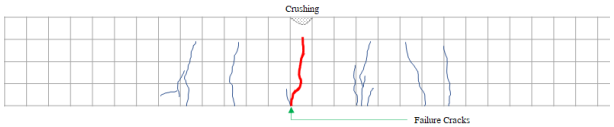
วิเคราะห์รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตทดสอบพบว่าหากพิจารณาจากรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็กและในคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กในปริมาณน้อย (ผสมเส้นใยปริมาณร้อยละ 0.5) จะพบรอยแตกร้าวในแนวทแยงกับระนาบตามยาวคานเนื่องจากเกิดแรงดึงในแนวราบร่วมกับแรงเฉือนดึงในแนวตั้ง (Flexural Shear Crack) และรอยร้าวเนื่องจากการเฉือน (Web Shear Crack) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 16 และรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าคานมีพฤติกรรมการรับแรงเปลี่ยนไปคือ คานมีการรับแรงเฉือนร่วมด้วย และรูปแบบรอยแตกร้าวลักษณะดังกล่าวจะลดลงเมื่อมีปริมาณการผสมเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 18 และรูปที่ 20 จึงเห็นได้ว่าเส้นใยเหล็กช่วยให้คานยังคงไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการรับแรงไป ซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการรับแรงดึงเป็นหลักเนื่องจากการดัดจนถึงจุดวิบัติของคาน



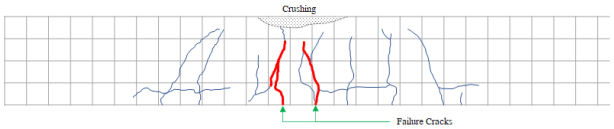
รูปที่ 16 ตัวอย่างคานไม่เกิดการกัดกร่อนและไม่ผสมเส้นใย (NC-0F)



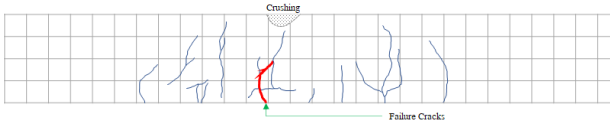
รูปที่ 17 ตัวอย่างคานเกิดการกัดกร่อนร้อยละ 2 และไม่ผสมเส้นใย (2C-0F)



รูปที่ 18 ตัวอย่างคานเกิดการกัดกร่อนร้อยละ 2 และผสมเส้นใยร้อยละ 1.5 (2C-1.5F)



รูปที่ 19 ตัวอย่างคานเกิดการกัดกร่อนร้อยละ 5 และไม่ผสมเส้นใย (5C-0F)



รูปที่ 20 ตัวอย่างคานเกิดการกัดกร่อนร้อยละ 5 และผสมเส้นใยร้อยละ 1.0 (5C-1.0F)

อีกทั้งรอยแตกร้าวในแนวตั้งฉากกับแรงดึงหลัก (Flexural Crack) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดการกัดกร่อนในระดับที่รุนแรงขึ้นกล่าวคือ เมื่อระดับการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตก็สูงมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียปริมาณเหล็กเสริมและประสิทธิภาพในการถ่ายแรงดึงสู่เหล็กเสริมรับแรงดึงในคาน ทำให้คอนกรีตรับภาระในการรับแรงดึงจากน้ำหนักกระทำมากขึ้น ดังจะเห็นรอยแตกร้าวตั้งฉากเนื่องจากการดัดมากขึ้น และเกิดรอยแตกร้าวในแนวยาวตามแนวเหล็กเสริมขึ้น ดังแสดงตัวอย่างให้เห็นในรูปที่ 17 และรูปที่ 19 แต่กำลังรับแรงดัดในคานยังคงที่เมื่อมีปริมาณการผสมเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้เห็นได้ว่าเส้นใยเหล็กช่วยรับแรงดึงในคานคอนกรีตและเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายแรงสู่เหล็กเสริมที่ถูกกัดกร่อนได้เมื่อเทียบกับคานคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก

5. บทสรุป

จากการศึกษากำลังรับแรงดัดและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กในสภาวะการกัดกร่อนที่ระดับต่าง ๆ ด้วยการศึกษาจากตัวอย่างคานคอนกรีตทั้งหมด 12 ตัวอย่างคาน สามารถสรุปได้ว่า

ปริมาณการใช้เส้นใยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความกว้างของรอยแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ที่เหมาะสม โดยการผสมเส้นใยที่ร้อยละ 1.0 ช่วยลดความกว้างของรอยแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนได้ดีที่สุด ในการกัดกร่อนร้อยละ 2 สามารถความกว้างรอยแตกร้าวได้ถึงร้อยละ 63.55 และการกัดกร่อนร้อยละ 5 สามารถความกว้างรอยแตกร้าวได้ถึงร้อยละ 27.96

การกัดกร่อนทำให้กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตลดลงตามความรุนแรงของการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงดัดลดลงถึงร้อยละ 21.35 ที่การกัดกร่อนร้อยละ 5 การผสมเส้นใยเหล็กในคานคอนกรีตช่วยทดแทนกำลังรับแรงดัดที่สูญเสียไปให้แก่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภาวะการกัดกร่อนได้ โดยที่ระดับกัดกร่อนร้อยละ 2 การผสมเส้นใยร้อยละ 0.5 สามารถทดแทนกำลังที่สูญเสียไปได้ร้อยละ 101.3 และระดับการกัดกร่อนร้อยละ 5 การผสมเส้นใยร้อยละ 1.0 สามารถทดแทนกำลังที่สูญเสียไปได้ในร้อยละ 101.2

เส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยรักษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานไว้ ด้วยการลดการเกิดหน่วยแรงดึงตั้งฉากเนื่องจากแรงเฉือนที่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงดัดร่วมกับแรงเฉือน (Flexural Shear Crack) และรอยแตกร้าวเฉือน (Web Shear crack) จนถึงจุดวิบัติของคาน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14). 2014.

[2] El Maaddawy, T.A. and K.A. Soudki, Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete. Journal of materials in civil engineering, 2003. 15(1): p. 41-47.

[3] ASTM International, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. 2011.