แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าว ของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่มีการเสริม เหล็กเส้นเพิ่มเติม

Interaction diagram for crack control steel fiber reinforced concrete with additional reinforcing bars

ดำริห์ อร่ามศรีประเสริฐ[1], เกณฑกานต์ งามสอน[1] และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล[1,*]

[1] ภ ควช วศวกรรม ยธ , คณ วศวกรรมศ สตรม มห วทย ลยพร จ มกล ธนบร, กรง ทพมห นคร, ปร ทศ ทย

**Corresponding author; E-mail address: raktipong.sah@mail.kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความกว้างรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดแบบทางเดียวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่มีการเสริมเหล็กเส้นและทำการ โดยใช้วิธีการคำนวณความกว้างรอยร้าวตามมาตรฐาน EUROCODE 2 ที่พัฒนาต่อโดย Löfgren เพื่อพัฒนาชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดที่กระทำร่วมกับแรงตามแนวแกน การวิเคราะห์ช่วยให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้น ความหนาของหน้าตัดคอนกรีต และปริมาณเส้นใยเหล็กล้วนมีผลต่อความกว้างรอยร้าวที่จะเกิดขึ้นในหน้าตัดคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยการใส่เหล็กเส้นเข้าไปในหน้าตัดคอนกรีตส่งผลให้ความกว้างรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดลดลง ในขณะที่การเพิ่มความหนาของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กส่งผลให้หน้าตัดสามารถรับกำลังรับแรงดัดแตกร้าวได้สูงขึ้น งานวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าหน้าตัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นจะมีค่าแรงดัดที่ควรควบคุมอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นเพื่อให้ความกว้างรอยร้าวเป็นไปตามคำแนะนำของมาตรฐาน EUROCODE 2

คำสำคัญ: ความกว้างรอยร้าว, คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, กำลังรับแรงดึงคงเหลือ, ตัวควบคุมความปลอดภัย, แผนภูมิปฏิสัมพันธ์

Abstract

This research was an analysis for crack width of steel-fiber-reinforced concrete (SFRC) with additional reinforcing steel bars under one-way flexure. The crack width was calculated according to the modified EUROCODE 2 standard proposed by Löfgren. An algorithm for analyzing flexural strength with axial force for safety envelope using crack width as a control parameter is developed. The analysis successfully evaluates the influences from the amount of reinforcing steel bars, the thickness of cross-section, and the amount of steel fibers on the width of cracks that will take place. When more reinforcing steel bars or when the thickness of cross-section is increased, the crack width is reduced. The study also shows that the bending moment should be limited to 20-30 percent of the flexural strength of the cross-section of SFRC with reinforcing steel bar if the crack width is to be controlled according to recommendations in the EUROCODE 2 standard.

Keywords: Crack width, Residual Tensile Strength, Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), Steel Reinforcing bar, Eurocode

1. บทนำ

โดยทั่วไปของการออกแบบแผ่นพื้นโรงงานผู้ออกแบบจะต้องออกแบบให้แผ่นพื้นสามารถรับแรงได้มากกว่าปกติเนื่องจากแผ่นพื้นโรงงานจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกจาก พาเลทสินค้า รถยกสินค้า หรือเครื่องจักร จากการใช้งานที่หนักก็จะทำให้ตัวแผ่นพื้นเกิดความเสียหายเป็นรอยแตกร้าว ซึ่งรอยแตกร้าวพวกนี้ส่งผลกระทบให้บางบริเวณไม่สามารถดำเนินการได้เป็นปกติ ทำให้จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักรหรือส่งสินค้าเพื่อทำการซ่อมแซมพื้นส่วนที่แตกร้าวเกือบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามขนาดของรอยร้าวสามารถจำกัดและควบคุมได้ โดยปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยเหล็ก (steel fiber) มาใช้ทำหน้าที่รับแรงดึงภายในคอนกรีตเช่นเดียวกับเหล็กเส้น จากพฤติกรรมการรับแรงดึงหลักการแตกร้าวของเส้นใยเหล็กในกรณีที่เสริมเส้นใยเหล็กเพียงพอจะทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีพฤติกรรมแบบการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด(strain hardening) [7] ทำให้หลังคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าววคอนกรีตสามารถรับแรงดัดหลังเกิดการแตกร้าวได้มากกว่ากำลังรับแรงดัดแตกร้าว ซึ่งรอยแตกร้าวที่เกิดจะค่อยๆขยายความกว้างอย่างช้าๆ ซึ่งจะต่างจากพฤติกรรมหลังการแตกร้าวแบบอ่อนตัวเนื่องจากความเครียด (strain softening) เมื่อเวลาเกิดรอยแตกร้าวคอนกรีตสามารถรับแรงดัดหลังเกิดการแตกร้าวได้น้อยกว่ากำลังรับแรงดัดแตกร้าว ซึ่งรอยแตกร้าวจะขยายกว้างด้วยอัตราที่มากกว่าพฤติกรรมแบบการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (strain hardening) จากปัญหาดังกล่าว ผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างพื้น ด้วยชุดคำสั่ง Visual Basic for Applications (VBA)

บน Microsoft Excel นำเข้าข้อมูล ในรูปแบบของตัวเลขคำนวณวิเคราะห์หากำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดที่หน้าตัดสามารถรับได้ พร้อมคำนวณความกว้างรอยแตกร้าว ตามมาตรฐาน EUROCODE 2 [3] แสดงผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์แรงตามแนวแกนและแรงดัด

2. วิธีการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีคำนวณความกว้างรอยร้าวตามมาตรฐานการออกแบบของ EUROCODE2 [3] ที่ถูกพัฒนาต่อโดย Löfgren [2] ในส่วนของการคำนวณแรงดัดและแรงตามแนวแกนคำนวณตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กทั่วไป [8]

2.1 วิธีคำนวณความกว้างรอยร้าว

ในการคำนวณความกว้างรอยร้าวของงานวิจัยนี้จะใช้มาตรฐานของการออกแบบ EUROCODE2 [3] ที่ถูกพัฒนาต่อโดย Löfgren [2] ภายในมาตรฐานมีการระบุวิธีการคำนวณระยะห่างระหว่างรอยร้าวที่ และ วิธีการคำนวณความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กดังสมการที่ (1) และ (4)

$$s_{r,max}=k_3c+k_1k_2k_4k_5\frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (1)$$

โดย $s_{r,max}$ คือระยะห่างสูงสุดระหว่างรอยร้าว, c คือระยะหุ้มเหล็ก ของเหล็กเสริมตามยาว, ϕ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ตามยาว, $\rho_{p,eff}$ คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ตามแนวยาวกับพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตบริเวณที่รับแรงดึง, k_1 คือค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงความสามารถในการยึด เหนี่ยวของผิวเหล็กเสริม โดย k_1 จะเท่ากับ 0.8 สำหรับเหล็กที่มีแรง ยึดเหนี่ยวสูง และ k_1 จะเท่ากับ 1.6 สำหรับเหล็กที่มีผิวแบบธรรมดา ทั่วไป, k_2 คือค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงการระจายตัวของความเครียด โดย k_2 จะเท่ากับ 0.5 สำหรับแรงดัด และ k_2 จะ เท่ากับ 1.0 สำหรับแรงดึงโดยตรง, ส่วน k_3 และ k_4 EUROCODE 2 แนะนำให้ใช่ค่าเท่ากับ 3.4 และ 0.425 ตามลำดับ ตัวแปร k_5 เป็นตัวแปรที่คำนึงถึงผลของเส้นใยเหล็กที่ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างรอยร้าวและความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้น โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยเหล็ก และรูปร่างของเส้นใยเหล็ก โดยตัวแปร k_5 สามารถหาได้จากสมการที่ *(2)*

$$k_5=1-\frac{f_{ft,res}}{f_{ctm}} \quad (2)$$

โดย $f_{ft,res}$ คือกำลังรับแรงดึงหลังการเกิดแตกร้าวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กซึ่งสามารถหาได้จากสมาการที่ *(3)*

$$f_{ft,res}=0.45f_{Rm,1} \quad (3)$$

ค่า $f_{Rm,1}$ คือค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงดึงคงเหลือของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.5 มม. (CMOD=0.5mm) ความกว้างรอยร้าวตามมาตรฐาน EUROCODE 2 สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$w_k=s_{r,max}(\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}) \quad (4)$$

โดย w_k คือความกว้างรอยร้าว, ε_{sm} คือค่าเฉลี่ยความเครียดของเหล็กเสริม ε_{cm} คือค่าเฉลี่ยความเครียดของคอนกรีตระหว่างรอยร้าวซึ่ง $(\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm})$ สามารถหาได้จากสมการที่ *(5)*

$$(\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm})=\frac{\sigma_s-k_t\frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}(1+\alpha_e\rho_{p,eff})}{E_s} \quad (5)$$

โดย σ_s คือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริมและคำนวณโดย พิจารณาว่าหน้าตัดมีการแตกร้าว α_e คืออัตราส่วนระหว่างโมดูลัส ยืดหยุ่นของเหล็กและคอนกรีต (E_s/E_c), k_t คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่ กับระยะเวลาในการให้แรง โดย จะเท่ากับ 0.6 สำหรับการให้แรงแบบระยะสั้น และ k_t จะเท่ากับ 1.0 สำหรับการให้แรงแบบระยะยาว โดยในมาตรฐานมีการระบุถึงความกว้างรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้ในกรณีที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กอย่างเดียว และกรณีที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กพร้อมกับเหล็กเส้นอยู่ที่ 0.3มม.

2.2 วิธีคำนวณแรงดัดสูงสุด

วิธีในคำนวณแรงดัดและแรงตามแนวแกนในการวิจัยนี้จะอ้างอิงมาจาก [5] โดยสมมุติฐานในการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัด ดังต่อไปนี้

1) ระนาบของหน้าตัดยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการรับแรงดัด หมายถึง การกระจายของหน่วยยืดหดบนหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างจากแนวแกนสะเทิน

2) การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมไปเป็นอย่างสมบูรณ์ หมายถึง หน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกัน

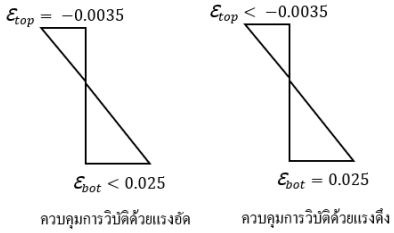
3) หน่วยแรงของเส้นใยเหล็กสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์หน่วยแรงและหน่วยการยืดหด

4) หน่วยการยืดหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ -0.0035 และน้อยสุดที่ -0.002 ในกรณีที่รับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว

5) สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นหน่วยการยืดหดสูงสุดเท่ากับ 0.025

เริ่มจาก เงื่อนไขการวิบัติแบบสมดุล(Balance failure condition) โดยจะทำการเปลี่ยนค่าหน่วยการยืดหดเพิ่มขึ้นและลดลงตามแต่ละกรณี การทำเช่นนี้จะสามารถหาค่าระยะแกนสะเทินในแต่ละกรณีได้ ซึ่งค่าระยะแกนสะเทินจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าแรงตามแนวแกนและแรงดัดได้ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 การกระจายตัวของหน่วยแรงยืดหดในแต่ละกรณี



ซึ่งหลักในการวิเคราะห์หากำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดของคานจะใช้สมการที่(6)ในการวิเคราะห์ ซึ่งสมการนี้ได้มากจากความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของหน่วยแรงโดยใช้สมการสมดุลแรง

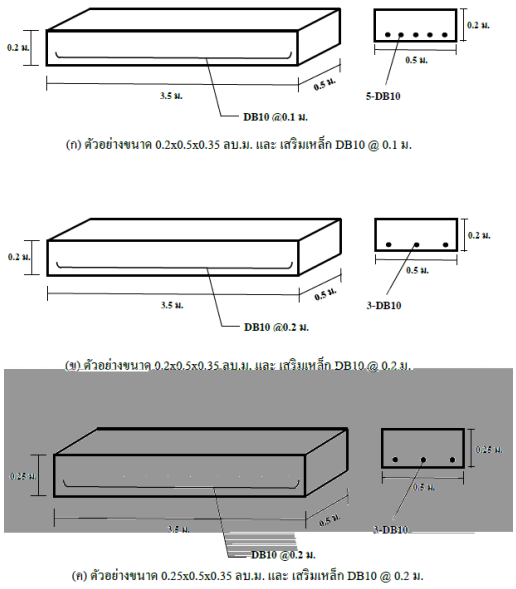
$$M_n=(A_s f_y)(d-\frac{x}{2})+F_{fc,t}b(h-x)(\frac{h}{2}+\frac{x}{6}) \quad (6)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, f_y คือค่าความเค้นของเหล็กเส้น, $F_{fc,t}$ คือค่ากำลังรับแรงดึงคงเหลือของเส้นใยเหล็ก, d คือระยะจากขอบบนของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางเหล็กเสริม, x คือระยะแนวแกนสะเทินและ b, h คือความกว้าง ความลึกของหน้าตัดตามลำดับ

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่มีการเสริมเหล็กเส้น โดยตัวอย่างทดสอบมีด้วยกัน 2 ขนาด คือ0.2 x 0.5 x 3.5 ลบ.ม. และ 0.25 x 0.5 x 3.5 ลบ.ม. เป็นขนาดของความลึก ความกว้าง และความยาวตามลำดับ



รูปที่ 2 รายละเอียดขนาดและการเสริมเหล็กเส้นของแผ่นพื้นตัวอย่าง

ซึ่ง ตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเส้นมีระยะหุ้มเหล็ก 0.03 ม. และ ตัวอย่างทุกตัวมีปริมาณการใส่เส้นใยเหล็ก 40 กก./ลบ.ม. กำลังอัด 35 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 90 วัน โดย รายละเอียดตัวอย่างทดสอบทั้งหมด แสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1

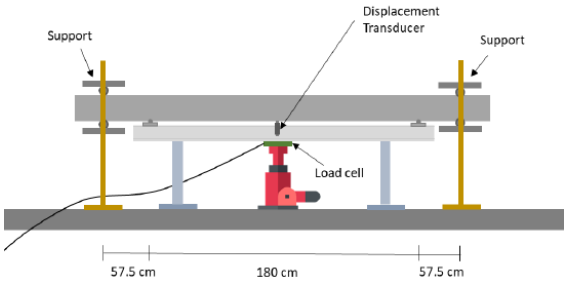
ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และแผ่นพื้นคอนกรีตที่ผสมทั้งเส้นใยเหล็กและเหล็กเส้น

ตัวย่อ	การเสริมกำลัง	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละโดยปริมาตรคอนกรีต)	กำลังรับแรงดึงของเส้นใยเหล็ก(เมกะปาสคาล)	ขนาดของตัวอย่างทดอสบ (ม.)
HE40	เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย	1.67	1500	0.2x0.5x3.5
HE40@0.1	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายและเหล็ก DB10@0.1 ม.	1.67	1500	0.2x0.5x3.5
HE40@0.2	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายและเหล็ก DB10@0.2ม.	1.67	1500	0.2x0.5x3.5
DHE40	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายสองหยัก	1.67	2000	0.2x0.5x3.5
DHE40@0.1	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายสองหยักและ เหล็ก DB10@0.1 ม.	1.67	2000	0.2x0.5x3.5
DHE40@0.2	เส้นใยเหล็กแบบงอปลายสองหยักและ เหล็ก DB10@0.2ม.	1.67	2000	0.2x0.5x3.5
HE40T25	เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย	1.67	1500	0.25x0.5x3.5
HE40T25@0.2	เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย	1.67	1500	0.25x0.5x3.5

3.2 การทดสอบ

การทดสอบเป็นการทดสอบหาความกว้างรอยร้าวระยะห่างระหว่างรอยร้าวของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงดัดแบบทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดัดสี่จุด (Four Point Bending Test) และให้แรงที่ตำแหน่ง 0.575 ม. วัดเข้ามาจากฐานรองรับทั้งสองข้าง ให้แรงโดยใช้แม่แรงไฮดรอลิก และ เก็บข้อมูลความกว้างรอยร้าวโดยใช้ แถบวัดเทียบขนาดรอยร้าว (Crack Scale) และกล้องไมโครสโคป (Microscope) แสดงในรูปที่ 1 จากการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการแอ่นตัวที่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ (Load & Deflection) จากนั้นจะนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่น

พื้นตัวอย่างทดสอบกับค่าแรงดัดที่ได้จากการคำนวณจากชุดคำสั่งในกรณีต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ใช้เส้นใยเหล็กที่มีปริมาณต่างกัน กรณีที่มี



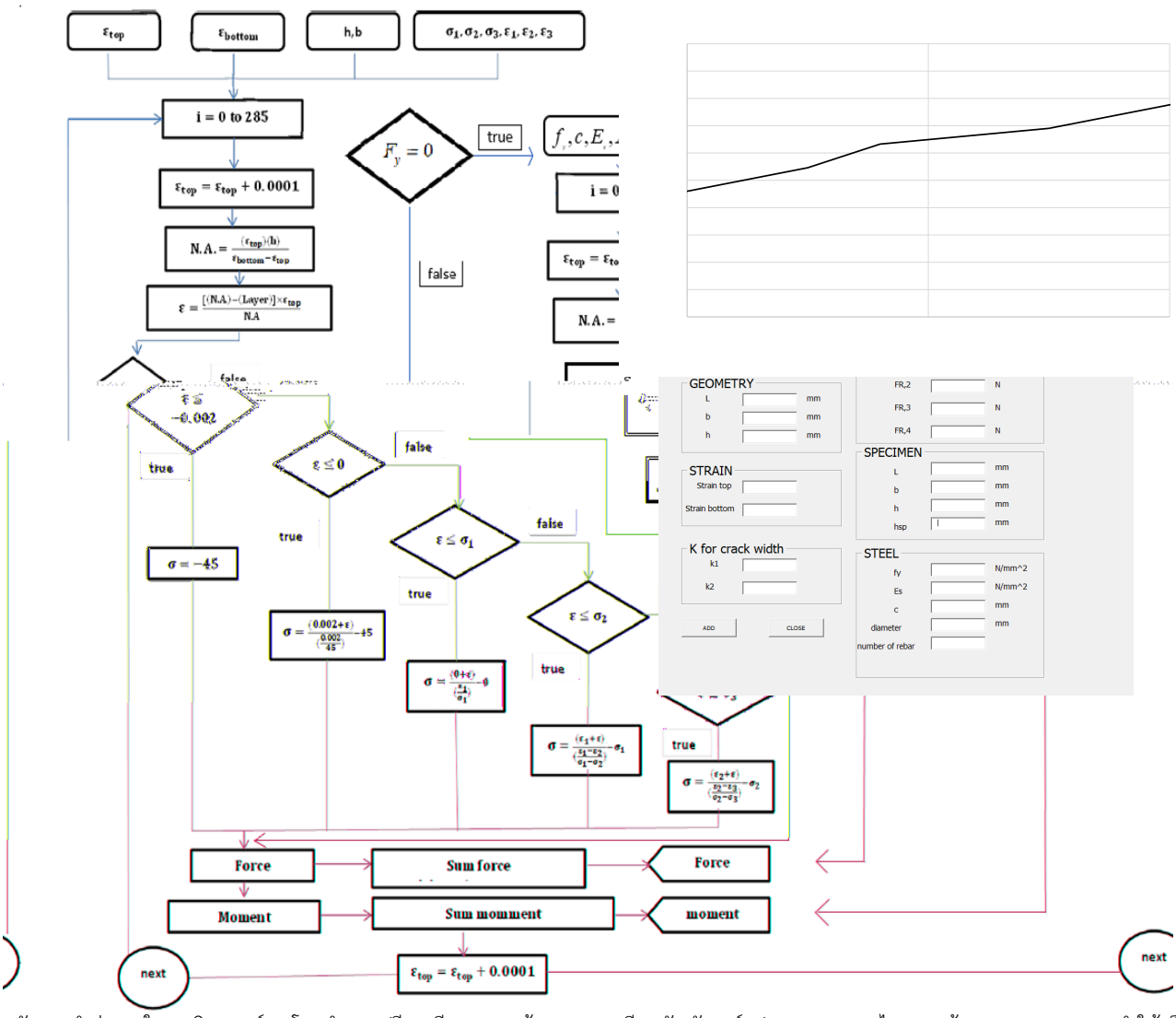
รูปที่ 3 การทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

ความหนาไม่เท่ากัน และ กรณีที่ตัวอย่างทดสอบมีปริมาณเหล็กเส้นไม่เท่ากัน เป็นต้น นอกจากนี้การทดสอบข้างต้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่แรงกระทำต่าง ๆ อีกด้วย ในการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแรงที่กระทำให้อยู่ในรูปของโมเมนต์ดัด และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่โมเมนต์ดัดกระทำต่าง ๆ ใ

ร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัดแบบทางเดียวของแต่ละตัวอย่างทดสอบกับค่าความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการคำนวณจากชุดคำสั่งเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างรอยร้าวที่ทำให้เกิดความกว้างรอยร้าวที่แตกต่างกันออกไป

4. การพัฒนาชุดคำสั่ง

ในขั้นตอนการพัฒนาชุดคำสั่งนั้นผู้ศึกษาเลือกที่จะพัฒนาชุดคำสั่ง Visual Basic for Applications (VBA) บน Microsoft excel (ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรม) ให้มีคุณลักษณะที่ใช้งานได้โดยง่ายและคุ้นเคยเหมือนขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบในรูปแบบป้อนตัวเลขเพื่อใช้วิเคราะห์คำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดของโครงสร้างพื้น พร้อมทั้งคำนวณหาความกว้างรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด เมื่อได้ผลของค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดของโครงสร้างพื้นและความกว้างรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด ก็จะนำมาแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ โดยมี 3 ขั้นตอนดังนี้ 1. การวิเคราะห์ (Analysis) เป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากก่อนที่จะพัฒนาชุดคำสั่งใดก็ตามจะต้องวิเคราะห์รายละเอียดในรายการคำนวณ เพื่อนำมาเป็นรายละเอียดในการ



ow chart) ทำให้เห็น

รูปที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณหากำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก

ภาพรวมของการคำนวณวิเคราะห์ 2. การพัฒนา (Development) คือขั้นตอนการเขียนชุดคำสั่งด้วยภาษาคอมพิวเตอร์โดยเลือกใช้ภาษาและข้อมูลที่มีความเหมาะสมและง่านต่อการปรับปรุงแก้ไขภายหลัง 3. การตรวจสอบ (Testing) เมื่อทำการพัฒนาชุดคำสั่งสำเร็จเรียบร้อยแล้วจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความถูกต้องพร้อมทั้งแก้ไขส่วนที่มีปัญหา ซึ่งหลังจากการตรวจสอบและแก้ไขชุดคำสั่งจนแล้วเสร็จทำให้เขียนชุดคำสั่งเป็นขั้นตอนได้ดังรูปที่ 4

รูปที่ 5 ตัวอย่างหน้ากรอกข้อมูลเพื่อคำนวณกำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกน

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการตรวจสอบชุดคำสั่ง

ในการตรวจสอบชุดสั่งทางผู้วิจัยได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับความกว้างรอยร้าวของการทดสอบตัวอย่างข้างต้นเปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการคำนวณของชุดคำสั่งดังซึ่งจากผลการตรวจสอบของตัวอย่างทดสอบ HE40@0.1ม.พบว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 38.81 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ HE40@0.1ม. เป็น 35.70 กิโลนิวตัน-เมตร ในส่วนของตัวอย่างทดสอบ HE40@0.2ม.พบว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 30.19 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ HE40@0.2ม. เป็น 35.70 กิโลนิวตัน-เมตร 22.84 กิโลนิวตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6

ผลการตรวจสอบของตัวอย่างทดสอบ DHE40@0.1ม.พบว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 34.5 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของ DHE40@0.1ม. เป็น 42.43 กิโลนิวตัน-เมตร ในส่วนของตัวอย่างทดสอบ HE40T25@0.2ม. พบว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 35.94 กิโลนิวตัน-เมตร จากการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. ของ HE40T25@0.2ม. เป็น 35.70 กิโลนิวตัน-เมตร 30.12 กิโลนิวตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน

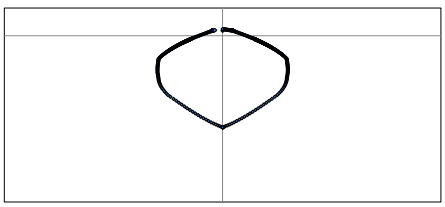
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน

จากการตรวจสอบชุดคำสั่งพบว่าค่าความกว้างรอยร้าวที่ได้จากการคำนวณด้วยชุดคำสั่งและค่าความกว้างรอยร้าวที่ได้จากผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อความกว้างรอยร้าวมากขึ้นค่ากำลังรับแรงดัดก็จะมีแนวโน้มเพื่อมขึ้นตามซึ่งค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม.ของการทดสอบและค่ากำลังรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. จากการคำนวณมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน

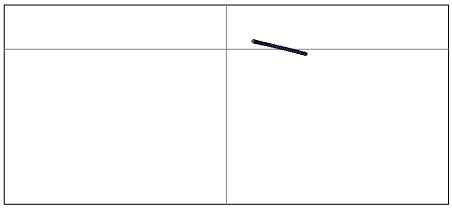
5.2 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุด

ผู้วิจัยได้นำชุดคำสั่งมาใช้วิเคราะห์กำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าว โดยได้ทำการจำลองตัวอย่างไว้หลายกรณีโดยจะแบ่งเป็นความต่างของปริมาณเส้นใยเหล็ก, ความต่างของปริมาณเหล็กเสริม และความต่างของหน้าตัด การวิเคราะห์ช่วยให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้น ความหนาของหน้าตัดคอนกรีต และปริมาณเส้นใยเหล็กซึ่งล้วนมีผลต่อความกว้างรอยร้าวที่จะเกิดขึ้นในหน้าตัดคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

ในการวิเคราะห์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดผู้วิจัยได้ทำการกำหนดกลุ่มตัวอย่างจำลองเป็นกลุ่มหลายกรณีได้แก่ กรณีของปริมาณเส้นใยเหล็ก 20, 30 และ40 กก./ลบ.ม.โดยคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 0.83, 1.25 และ1.67 โดยปริมาตรของคอนกรีตตามลำดับ กรณีปริมาณเหล็กเส้น 10DB@0.1ม. และ10DB@0.2ม. สุดท้ายกรณีที่ขนาดหน้าตัด0.15x0.5, 0.2x0.5 และ 0.25x0.5 ตร.ม. พบว่ากรณีของตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม.หรือร้อยละ 0.83 โดยปริมาตรของคอนกรีต ที่หน้าตัดความลึก 0.15,0.2 และ 0.25 ม. สามารถรับแรงดัดสูงสุดได้ 59.71,108.35 และ 170.29 กิโลนิวตันเมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 8 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนเส้นใยเหล็ก 20,30 และ 40 กก./ลบ.ม.ขนาดหน้าตัดและมีการเสริมเส้นใยเหล็กคงที่เป็น 0.15x0.5 ตร.ม. DB10@0.2ม.พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุด 59.71,61.45 และ63.11 กิโลนิวตันเมตรดังแสดงรูปที่ 9 และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมขนาดหน้าตัดและปริมาณเส้นใยเหล็กคงที่โดยจำลองปริมาณเส้นใยเหล็กอยู่ที่ 30 กก./ลบ.ม.ขนาดหน้าตัดอยู่ที่0.2x0.5 ตร.ม.และจำลองปริมาณเหล็กเสริม2แบบคือ DB10@0.1ม. และDB10@0.2ม. พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุด 114.06 และ123.38 กิโลนิวตันเมตรดังแสดงรูปที่ 10



รูปที่ 8 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดกรณีที่ปริมาณเส้นใยเหล็กและปริมาณเหล็กเสริมคงที่



รูปที่ 9 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดกรณีที่ปริมาณเหล็กเสริมและหน้าตัดคงที่

รูปที่ 10 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุดกรณีที่ปริมาณเส้นใยเหล็กและหน้าตัดคงที่

5.3 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าว

ในการวิเคราะห์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าว ผู้วิจัยใช้กลุ่มตัวอย่างจำลองเดียวกับหัวข้อ 5.2 จากการวิเคราะห์ผลกำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าวของกรณีตัวอย่างจำลองปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม. ของหน้าตัดที่มีความลึกต่างกันคือ 0.15 ,0.2 และ 0.25 ม. มีความสามารถในการรับแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 12.85, 21.85 และ30.98 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 11 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยเหล็กเป็น 20,30 และ40 กก./ลบ.ม.หรือร้อยละ 0.83, 1.25 และ1.67 มีขนาดหน้าตัดและมีการเสริมเส้นใยเหล็กคงที่เป็น 0.15x0.5 ตร.ม. DB10@0.2ม. พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 12.85, 18.23 และ18.89 กิโลนิวตัน-เมตรตามลำดับดังแสดงรูปที่ 12 และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมในขณะที่ขนาดหน้าตัดและปริมาณเส้นใยเหล็กคงที่โดยจำลองปริมาณเส้นใยเหล็กอยู่ที่ 30 กก./ลบ.ม.ขนาดหน้าตัดอยู่ที่0.2x0.5 ตร.ม.และจำลองปริมาณเหล็กเสริม2แบบ คือ DB10@0.1ม. และDB10@0.2ม. พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดที่ความกว้างรอยร้าว 0.3 มม. เป็น 28.99 และ35.7 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 13

รูปที่ 11 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าวกรณีที่ปริมาณเส้นใยเหล็กและปริมาณเหล็กเสริมคงที่

รูปที่ 12 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าวกรณีที่ปริมาณเหล็กเสริมและหน้าตัดคงที่

รูปที่ 13 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมรอยร้าวกรณีที่ปริมาณเส้นใยเหล็กและหน้าตัดคงที่

5.4 ความกว้างรอยร้าว

5.4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้นต่อความกว้างรอยร้าว

จากผลการวิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าวของตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม.หรือร้อยละ 0.83 พบว่าตัวอย่างจำลองขนาดหน้า

ตัด 0.15x0.5 ตร.ม. กำลังอัด 45 เมกะปาสคาลมีค่าแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.3 มม. เป็น 12.85 และ 17.63 กิโลนิวตัน-เมตร ในขณะที่ตัวอย่างจำลองขนาดหน้าตัด 0.2x0.5 และ 0.25x0.5 ตร.ม.มีค่าแรงดัดที่ความกว้างรอยร้าวเท่ากับ 0.3 มม. เป็น 21.85, 30.01, 30.98 และ 43.28 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 จะสังเกตเห็นได้ว่าในการเพิ่มปริมาณเหล็กเส้นมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกัน ณ ขณะที่แรงดัดเท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ปริมาณเหล็กเส้นที่เพิ่มขึ้นมาสามาถช่วยรับแรงดัดได้ทำให้ความกว้างรอยร้าวมีขนาดเล็กลง

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวของกรณีตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเหล็กเส้นไม่เท่ากัน

โดยหากเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่ 20 กิโลนิวตัน-เมตร ของกรณีตัวอย่าง 0.2x0.5ม. DB10@0.2ม. กับ 0.2x0.5ม. DB10@0.1ม. จะเห็นได้ว่าของตัวอย่างแรกที่โมเมนต์ดัด 20 กิโลนิวตัน-เมตรมีความกว้างรอยร้าวอยู่ที่ 0.29 มม. ในกรณีตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเส้นมากกว่ามีความกว้างรอยร้าว อยู่ที่ 0.18 มม. โดยความกว้างรอยร้าวลดลงไป 0.11 มม.

5.4.2 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยเหล็กต่อความกว้างรอยร้าว

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน 3 ขนาดคือ 20,30 และ40 กก./ลบ.ม.หรือหรือร้อยละ 0.83, 1.25 และ 1.67 จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กนั้นสามารถช่วยลดความกว้างรอยร้าวได้ ณ ที่แรงดัดเท่ากัน ในการเปรียบเทียบที่แรงดัดของกรณีตัวอย่างหน้าตัดลึก 200 มม. กำลังอัด 45 เมกะปาสคาลพบว่าที่แรงดัด 20 กิโลนิวตัน-เมตร ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม. มีขนาดความกว้างรอยร้าว 0.29 มม. ในขณะที่ ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 30 และ 40 กก./ลบ.ม. มีขนาดความกว้างรอยร้าวอยู่ที่ 0.1 และ 0.08 มม. โดยความกว้างรอยร้าวลดลงไปถึง 0.19 และ 0.21 ตามลำดับในตัวอย่างที่ขนาดความลึก 250 มม.พบว่าที่แรงดัด 30 กิโลนิวตัน-เมตร ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 20 กก./ลบ.ม.มีขนาดความกว้างรอยร้าวที่ 0.33 มม.แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไปที่ 30 และ 40 กก./ลบ.ม. พบว่าขนาดความกว้างรอยร้าวลดลงเหลือ 0.1 และ0.07 มม. ลดไปถึง 0.23 และ 0.26 มม. ตามลำดับ

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวของกรณีตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กไม่เท่ากัน

5.4.3 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกของหน้าตัดต่อความกว้างรอยร้าว

จากผลการวิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับควบคุมความกว้างรอยร้าวของตัวอย่างจำลองที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 30 กก./ลบ.ม.หรือร้อยละ 1.25 กำลังอัด 45 เมกะปาสคาลมีขนาดความลึก 150 200 และ 250 มม. ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและความกว้างรอยจากรูปที่ 16 จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มขนาดความลึกของหน้าตัดนั้นช่วยให้ตัวโครงสร้างสามารถรับแรงดัดได้มากขึ้นซึ่งหมายความว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดของคอนกรีตยังสามารถช่วยลดขนาดความกว้างรอยร้าวได้ จากการเปรียบเทียบของหน้าตัดความลึกที่ 200 มม. กับ 250 มม. ที่แรงดัด 30 กิโลนิวตัน-เมตร พบว่าที่หน้าตัดความลึก 200 มม. มีความกว้างรอยร้าว 0.32 มม. แต่ของหน้าตัดความลึก 250 มม. มีความกว้างรอยร้าว 0.1 มม. การเพิ่มขนาดความลึกของหน้าตัด 50 มม. ช่วยลดความกว้างรอยร้าวถึง 0.22 มม.

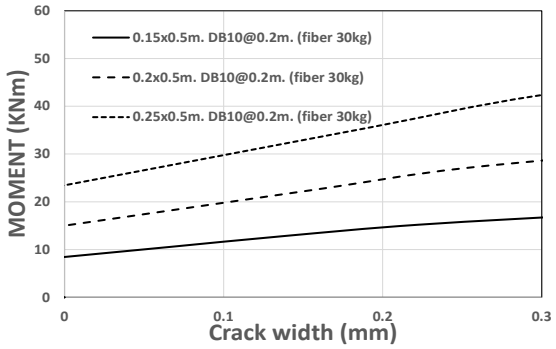
6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาความกว้างรอยร้าวระยะห่างระหว่างรอยร้าวของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงดัดแบบทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดัดสี่จุด เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของตัวชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น พบว่าชุดคำสั่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 14.9 เปอร์เซ็นต์

ในการวิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์แรงดัดและแรงตามแนวแกนสำหรับคว

รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความกว้างรอยร้าวของกรณีตัวอย่างจำลองที่มีขนาดความลึกไม่เท่ากัน

ไม่



แนวแกนได้ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนสูงสุด

การเพิ่มขนาดความลึกของหน้าตัด ปริมาณเส้นใยเหล็ก และปริมาณเหล็กเสริมคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการผสมเส้นใยเหล็กมีผลช่วยให้ขนาดความกว้างรอยร้าวมีขนาดเล็กลง โดยผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กมีผลช่วยให้ขนาดความกว้างของรอยร้าวมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบที่แรงดัดเท่ากัน แต่ในการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กยังมีข้อควรระวัง เนื่องจากปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ความกว้างรอยร้าวมีขนาดเล็กลงจริงแต่ปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปแทนที่เนื้อคอนกรีตทำให้ปริมาณเนื้อคอนกรีตมีน้อยลงซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดงเพราะปริมาณเนื้อคอนกรีตที่ลดลงส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเส้นส่งผลต่อขนาดความกว้างรอยร้าวน้อยที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะพฤติกรรมหลังการเกิดแตกร้าวของเหล็กเสริมนั้นแตกต่างกับเส้นใยเหล็กเมื่อเกิดการแตกร้าวเส้นใยเหล็กที่กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตสามารถช่วยรับแรงดัดต่อได้และช่วยยึดรั้งให้รอยแตกร้าวขยายตัวช้าลงแม้ว่าจะมีเส้นใยเหล็กบางเส้นรับแรงดัดจนขาดแต่ในกรณีของเหล็กเส้นนั้นเมื่อเหล็กเส้นรับแรงดัดจนเหล็กเส้นขาดออกจากกันแล้วทำให้

ความสามารถในการยึดรั้งรอยร้าวลดลงส่งผลให้ความกว้างรอยร้าวขยายตัวมากกว่าของกรณีเส้นใยเหล็ก

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีข้าพระเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำในการดาเนินการพัฒนาโปรแกรม และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาโครงงานวิจัยนี้ ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรม โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Kelpša, Š., Augonis, M., Daukšys, M. and Augonis, A., 2014, “Analysis of Crack Width Calculation of Steel Fibre and Ordinary Reinforced Concrete Flexural Members.”, **Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering.,** Vol. 16, pp. 50–57.

[2] Löfgren I., 2007, “Calculation of crack width and crack spacing.”, **Presented at Nordic Mini-Seminar: Fibre reinforced concrete**, November 15, Trondheim, Norway, 12 pp.

[3] BS EN 1992-1-1,2004, **Eurocode 2 Design of concrete structures - Part 1-1 General rules and rules for buildings**, British Standards Institution, London, pp. 118-126.

[4] The Concrete Society, 2007, **Guidance for the Design of Steel Fiber Reinforced Concrete**, Technical Report 63, A cement and concrete industry publication, Camberley, pp. 20-44.

[5] RILEM TC 162-TDF, 2003, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete.”, **Materials and Structure**, Vol. 36, pp. 560–567.

[6] Löfgren, I., 2005, Fiber-Reinforced Concrete for Industrial Construction-A Fracture Mechanics Approach to Material Testing and Structural Analysis., Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, pp. 87-96.

[7] เกณฑ กานต์งามสอน, ปิยธิดา โพธิเกษม, กิตติศักดิ์ ลีลาอัมพรสิน, บวรทัต รัตนจีน และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล (2564). พฤติกรรมและความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงดัดแบบทางเดียว. *ก รปร ชมวช ก รวศวกรรม ยธ หงช ต ครงท 26,* การ : ประชุมรูปแบบออนไลน์, วันที่ 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า BTL-02.

[8] ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช (2559). กำลังและความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายใต้การทำลายของเกลือคลอไรด์, หน้า 3-24.