

การวิเคราะห์พฤติกรรมเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงเสริมด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Experimental investigation and Finite Element Analysis for GFRP reinforced hollow concrete column under axial loading

ปารณัท คูหาทอง^{1,*} สายันต์ ศิริมนตรี² และ ชนະชัย ทองโถม³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: Paranat.koo@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวง (Hollow concrete column) เสริมด้วยแท่งวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-reinforced Polymer, GFRP) โดยทำการทดสอบเสาตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน เสามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มม. เสริมกำลังตามขวางด้วย GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. มีระยะเรียง 150 มม. ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางของรูกลวง (0, 65 และ 80 มม.) และวัสดุเสริมแรงตามยาว (GFRP และ เหล็ก) หลังจากทดสอบซอฟต์แวร์ Abaqus ถูกใช้เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างและปรับแบบจำลองจะทำได้โดยใช้ผลการทดสอบเชิงทดลองเป็นแบบจำลองควบคุม พฤติกรรมไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อนของคอนกรีตได้รับการกำหนดโดยใช้ concrete damaged plastic model และพฤติกรรมของ GFRP เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น จากผลการทดสอบพบว่าความทนทานการเสียรูปของ HCC จะเพิ่มขึ้น 6% ตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกลวงที่เพิ่มขึ้น และความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังตามยาวด้วยเหล็กมีค่าสูงกว่าเสาที่เสริมกำลังตามยาวด้วยแท่ง GFRP 3%

คำสำคัญ: เสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวง, วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังเส้นใยแก้ว, อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสู่ภายนอก, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงกระทำตามแนวแกน

Abstract

This article presents, the behavior of a hollow concrete column (HCC) reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) was investigated. We investigated five sample columns with axial compression. The diameter of the column is 250 mm. GFRP with a 6 mm diameter is used for transverse reinforcement. The columns have a spacing of 150 mm. The research variables were inner core diameter (0, 65, and 80 mm.) and longitudinal

reinforcing materials (GFRP and Steel). After the experimental tests, the Abaqus software was used to create finite element models. The experimental results served as the control model for the modeling and calibration processes. Concrete Damaged Plasticity Model (CDPM) defined the complex nonlinear behavior of concrete, and the GFRP reinforcement was assumed to be linearly elastic. According to the test results, the deformation capacity of HCC increased by 6% as the diameter of the hollow holes increased and The column reinforced with steel had a maximum axial compressive strength that was 3% higher than the column reinforced with GFRP.

Keywords: Hollow concrete column, Glass fiber-reinforced polymer, Inner-to-outer-diameter ratio, finite element analysis, axial loading

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยปกติแล้วจะมีอายุการใช้งาน 50 ปี โดยเฉลี่ย หากเสาใดเสาหนึ่งเกิดการวิบัติอาจจะทำให้โครงสร้างทั้งหมดเกิดการพังทลายลงมาได้ ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลทำให้เสาเกิดการวิบัติซึ่งปัญหาส่วนมากที่เกิดขึ้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ โครงสร้างเกิดการกัดกร่อน ปัญหาการกัดกร่อนเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย การกัดกร่อนลดอายุการใช้งานของโครงสร้างและสร้างความเสียหาย ไปจนถึงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานลดลงเนื่องจากการเสื่อมประสิทธิภาพ โดยภายในโครงสร้างจะมีแนวโน้มในการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น การใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass fiber-reinforced polymer, GFRP) ทดแทนเหล็กเสริมภายในเป็นวิธีแก้ปัญหสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อความทนทานในสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อน ดังนั้นการศึกษาจึงมุ่งเน้นไปที่การทำความเข้าใจและจำลองพฤติกรรมตามแนวแกนของชิ้นส่วนคอนกรีตที่มี GFRP ภายใน ในบรรดาเสาเหล่านั้นเสา

คอนกรีตทรงกระบอกกลวง (Hollow concrete column, HCC) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธา เช่น ตอม่อสะพาน เสาไฟฟ้า และเสาเข็มลงดิน เนื่องจาก HCC มีความทนทานต่อการรับแรงอัดตามแกนและโมเมนต์ดัดได้ดีกว่า อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดต่อมวลมากกว่า น้ำหนักของตัวเสาลดลงและมีความประหยัดมากกว่าเสาคอนกรีตตัน [1,2] อย่างไรก็ตาม การออกแบบเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงที่มีความแข็งแรงและความเหนียวเพียงพอ นั้น จำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบถึงตัวแปรที่สำคัญ เช่น ระยะเรียงของวัสดุเสริมกำลังตามขวาง และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [2]

แบบจำลองการวิเคราะห์จำนวนมากสำหรับการทำนายความแข็งแรงและความเหนียวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอยู่ในงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่แล้ว [3-4] อย่างไรก็ตาม การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมกำลังด้วย GFRP นั้นไม่ได้ตรงไปตรงมาโดยใช้สูตรและแนวทางการออกแบบของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของ GFRP เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก เนื่องจากเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมด้วยวัสดุเสริมกำลังตามขวางด้วยเหล็กมีพฤติกรรมแตกต่างไปจากคอลัมน์ที่ถูกเสริมด้วย GFRP และหากใช้แบบจำลองเหล่านี้กับเสาที่มีการเสริมกำลังด้วย GFRP ความแข็งแรง ความเครียด และการตอบสนองของโครงสร้างอาจถูกประเมินอย่างไม่ถูกต้อง หนึ่งในความท้าทายที่วิศวกรรมมักเผชิญคือการประเมินกำลังรับแรงอัดสูงสุดและความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริม GFRP อย่างแม่นยำ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือวิธีการทดสอบในการวิเคราะห์ เช่น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) [5]

นักวิจัยหลายคนทำงานเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วย GFRP ภายใต้รูปแบบการรับแรงอัดที่แตกต่างกัน [6-8] จากการวิจัยเหล่านี้ พบว่า FEM คาดการณ์ประสิทธิภาพโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วย GFRP ได้อย่างแม่นยำ FEM จัดการกับข้อบกพร่องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างชัดเจน FEM ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับการทดลองโดยการสร้างตัวอย่างเพื่อทำนายประสิทธิภาพความเสียหายที่ซับซ้อนของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วย GFRP ได้อย่างแม่นยำ [9] เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเพื่อเพิ่มความเร็วในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตั้งสมมติฐานบางประการ แต่ก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกันที่ต้องใช้ผลการทดสอบจากการทดลองจริงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ ดังนั้น FEM ที่มีความรู้พื้นฐานด้านการจำลองจึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิจัยปัญหาทางวิศวกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้แรงอัดตามแกน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองพร้อมปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสม

1.2.3 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วโดยลดการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1.2.4 เพื่อศึกษาสมการทำนายกำลังรับแรงอัดตามแกนของเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมกำลังตามยาว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS ของพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงอัดตามแกนของเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงซึ่งเป็นเสาสั้น (Short Column) โดยใช้ GFRP เปรียบเทียบกับการเสริมกำลังด้วยเหล็กและเสริมกำลังตามขวางด้วย GFRP ที่ระยะเรียง 150 มม. และขนาดรูกลวงของเสาเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. 80 มม. และไม่มีรูกลวง รวมถึงยังมีการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดผ่านสมการของงานวิจัยในอดีต

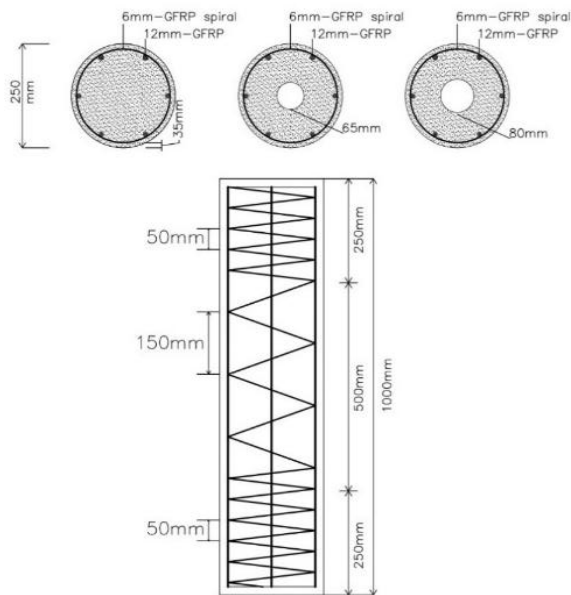
2. ทฤษฎีและการทดสอบ

2.1 รายละเอียดเสาตัวอย่าง

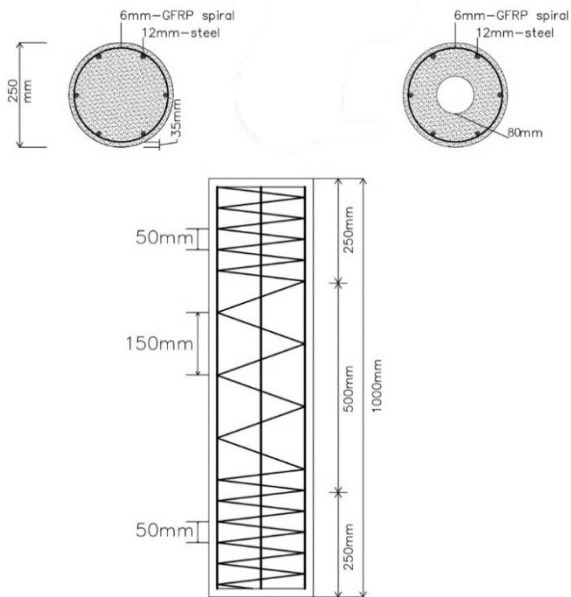
เสาที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 ตัวอย่าง จากรายละเอียดเสาตัวอย่างของข้อมูลจากตารางที่ 1 แสดงวัสดุเสริมแรงตามยาวได้แก่ GFRP และเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางภายในได้แก่ขนาด 65 มม. และ 80 มม. ระยะเรียงของวัสดุเสริมแรงตามขวาง ได้แก่ 150 มม. อัตราส่วนวัสดุเสริมกำลังตามเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ 1.38%, 1.48% และ 1.54% เสาตัวอย่าง 5 เสา เป็นการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ได้แก่ 65 มม. 80 มม. และไม่มีรูกลวง โดยเสาตัวอย่างทั้ง 5 เสาใช้วัสดุเสริมกำลังตามยาวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 12 มม. และวัสดุเสริมกำลังตามขวางเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 6 มม. เท่ากันทุกเสาดังรูปที่ 1-2

ตารางที่ 1 รายละเอียดเสาตัวอย่าง

สัญลักษณ์แทนเสาตัวอย่าง	ชนิดของวัสดุเสริมกำลังตามยาว	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มม.)	i/o	Inner Concrete - Wall Thickness (มม.)	อัตราส่วนวัสดุเสริมกำลัง (%)
250G-I65-S150-R1.48	GFRP	65	0.260	51.5	1.48
250G-I80-S150-R1.54	GFRP	80	0.320	44.0	1.54
250G-I0-S150-R1.38	GFRP	0	0.000	0.0	1.38
250ST-I65-S150-R1.48	Steel	65	0.260	51.5	1.48
250ST-I0-S150-R1.38	Steel	0	0.000	0.0	1.38



รูปที่ 1 รายละเอียดของเสาตัวอย่างเสริมกำลังตามยาวด้วยพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว



รูปที่ 2 รายละเอียดของเสาตัวอย่างเสริมกำลังตามยาวด้วยเหล็ก

2.2 วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว

GFRP ตามยาวและตามขวางถูกจำลองเป็นเส้นลวดที่เปลี่ยนรูปได้ 3 มิติ และองค์ประกอบความเค้นที่เปลี่ยนรูปได้ 3 มิติ ตามลำดับ พฤติกรรมของ GFRP ตามยาวและตามขวางถูกจำลองโดยพิจารณาว่าเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นแบบไอโซโทรปิกจนถึงการวิบัติ [10,11] คุณสมบัติของ GFRP ที่ใช้สำหรับการทำการทดสอบและ FEM ได้แก่ f_{FRP} กำลังรับแรงดึงสูงสุดของ GFRP และ E_{FRP} โมดูลัสยืดหยุ่นของ GFRP แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 พฤติกรรมความยืดหยุ่นของ GFRP ถูกกำหนดโดยใช้พารามิเตอร์สองตัว ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนของปัวซองซึ่งใช้เป็น 0.25 สำหรับ GFRP [12] GFRP ตามยาวกำลังรับแรงอัดถือว่ามีความเท่ากัน 50% ของค่าความต้านทานแรงดึงที่ไม่มีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากัน [13] พื้นที่ระหว่างคอนกรีตและ GFRP ถูกกำหนดโดยใช้ข้อจำกัด embedded region

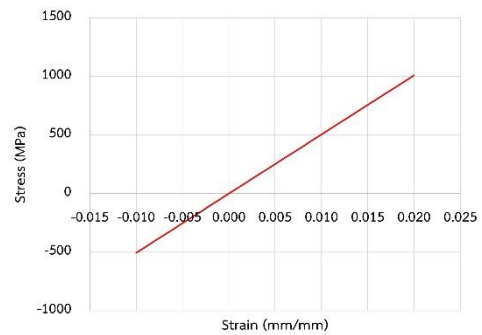
พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นของ GFRP ตามยาวและตามขวางที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขแสดงดังรูปที่ 3-4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแท่ง GFRP ตามยาว

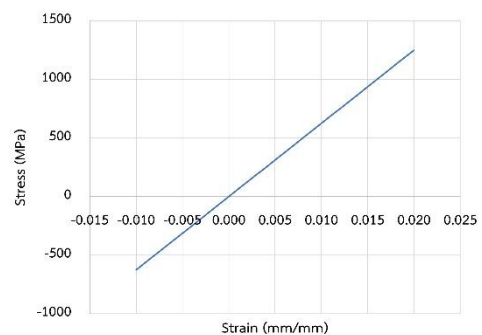
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (มม.)	f_{FRP} (MPa)	P_{FRP} (MPa)	E_{FRP} (MPa)
1	12.0	1,038.05	1,173.92	50,493.42
2	12.0	973.89	1,100.82	50,493.42
3	12.0	974.58	1,101.70	50,493.42
ค่าเฉลี่ย	12.0	995.14	1,126.12	50,493.42

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ GFRP ตามขวาง

ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (มม.)	f_{FRP} (MPa)	P_{FRP} (MPa)	E_{FRP} (MPa)
1	6.0	1,017.23	287.78	62,502.04
2	6.0	1,037.37	293.23	62,502.04
3	6.0	976.96	276.25	62,502.04
ค่าเฉลี่ย	6.0	1,010.75	285.68	62,502.04



รูปที่ 3 พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วตามยาว



รูปที่ 4 พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วตามขวาง

2.3 คุณสมบัติของคอนกรีต

การจำลองพฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตถือเป็นงานที่ท้าทายเนื่องจากมีลักษณะที่ซับซ้อน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 19.2 MPa พฤติกรรมของคอนกรีตถูกจำลองโดยใช้พารามิเตอร์สองตัว ได้แก่ ยัง

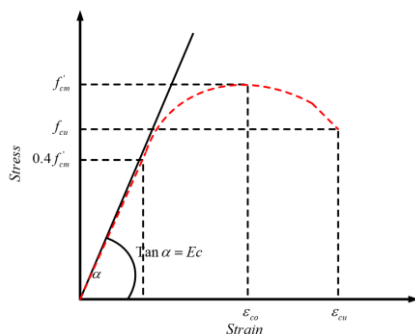
โมดูลัส (young's modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ยังโมดูลัสสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (1) และอัตราส่วนปัวซองคือ 0.2 [14] ในงานวิจัยนี้แบบจำลองคอนกรีตการเสียหายแบบพลาสติก (concrete damaged plastic model, CDPM) ถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมที่ไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีต โมเดลนี้สามารถจำลองธรรมชาติที่ซับซ้อนของคอนกรีตโดยพิจารณาถึงการแตกร้าวและการบดอัดของคอนกรีต ดังนั้นจึงเป็นแบบจำลองที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการจำลองความไม่เชิงเส้นของคอนกรีต CDPM พิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต เช่น พฤติกรรมแรงดึง พฤติกรรมแรงอัด พฤติกรรมพลาสติก และพฤติกรรมการเสียหายของคอนกรีต

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

โดยที่ f'_c คือแรงอัดของคอนกรีตที่ทดสอบที่ 28 วัน พฤติกรรมพลาสติกของคอนกรีตตามที่กำหนดในคู่มือผู้ใช้ ABAQUS 6.14 มีการพิจารณาพารามิเตอร์ห้าตัวที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตดังต่อไปนี้มุมการขยาย (dilation angle Ψ), พารามิเตอร์ความหนืด (viscosity parameter), การเยื้องศูนย์ (eccentricity ε), อัตราส่วนของความเค้นในแกนสองแกนต่อแกนเดียว (the ratio of biaxial to uniaxial stresses σ_{bo}/σ_{co}) และ the shape factor of yielding surface K_c พารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ได้รับการปรับเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟเชิงทดลองตาม Eurocode 2 กราฟความเค้นอัด-ความเครียดสำหรับคอนกรีต ดังรูปที่ 5 ส่วนที่ยืดหยุ่นของกราฟความเค้น-ความเครียดสามารถรับได้ถึง 40% ($0.40 f'_c$) ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต สำหรับการคำนวณความเค้นอัดในแกนเดียวของคอนกรีต (σ_c) แบบจำลองถูกนำมาใช้ในการวิจัยปัจจุบันตามที่นำเสนอโดยสมการ (2) [15]

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})} \quad (2)$$

เมื่อ ε_{co} คือความเครียดที่การรับกำลังสูงสุด ค่าของ ε_{co} สามารถใช้เป็น 0.002 [16] ε_c เป็นความเครียดที่การรับกำลังที่จุดใดๆ



รูปที่ 5 กราฟความเค้นอัด-ความเครียดสำหรับคอนกรีต

การโอบรัดเนื่องจาก GFRP ตามขวางทำให้เกิดการเสริมความสามารถในการรับแรงอัดและความเหนียวของคอนกรีตดังรูปที่ 6 สังเกตได้ว่าความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้นและลดลงช้าหลังจากกำลัง

รับแรงอัดสูงสุด จากสมการ (3) ใช้เพื่อวัดกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต (f'_{cc}) ช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่นการโอบรัดของคอนกรีตคิดเป็น $0.5 f'_{cc}$

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (3)$$

เมื่อ f_l คือความเครียดจากการโอบรัดของวัสดุโพลีเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วตามขวางที่สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (4)

$$f_l = \frac{2E_f \varepsilon_{h,rupt} t}{D} \quad (4)$$

เมื่อ E_f คือโมดูลัสยืดหยุ่นของ GFRP ตามขวาง $\varepsilon_{h,rupt}$ คือความเครียดการแตกของ GFRP ตามขวาง t คือความหนาของ GFRP ตามขวาง เช่นเดียวกับจากการโอบรัดของ GFRP ตามขวางที่ถูกคำนวณโดยใช้โมเดลของ Mander และคณะ ดังสมการ (5) [16]

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(f'_{cc} / f'_c - 1 \right) \right] \quad (5)$$

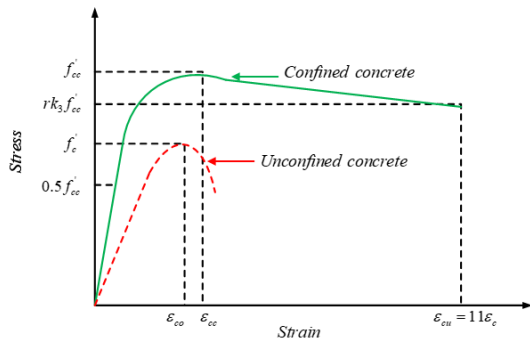
กลไกความเสียหายของคอนกรีตแสดงไว้ ดังรูปที่ 7 ความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนและความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของคอนกรีตลดลงหลังจากเกิดรอยแตกร้าวที่ไม่สามารถกู้คืนได้ ความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนของคอนกรีตที่ลดลงเกิดจากทั้งรอยแตกร้าวที่มีอยู่เดิมและรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการรับแรง สามารถคำนวณพารามิเตอร์ความเสียหายที่สอดคล้องกับความเครียดของแรงอัดและแรงดึง เช่น d_c และ d_t ตามลำดับ สามารถคำนวณพารามิเตอร์ความเสียหายจากการอัด (d_c) จากสมการ (6)

$$d_c = \frac{(1 - \eta_c) \varepsilon_c^{in} E_o}{\sigma_c + (1 - \eta_c) \varepsilon_c^{in} E_o} \quad (6)$$

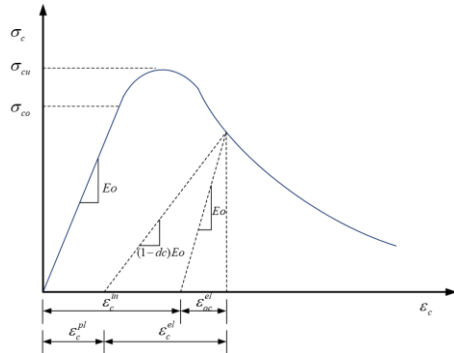
เมื่อ ε_c^{in} คือความเครียดไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีตที่กำลังรับแรงอัด E_o คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต η_c คือความเครียดพลาสติกจำนวนหนึ่งของคอนกรีตภายใต้แรงอัด (ε_c^{pl}) และ σ_c คือ กำลังอัดในแนวแกนเดียวของคอนกรีต ค่าของ η_c สามารถถือว่าเป็น 0.6 สังเกตได้จากรูปที่ 3.8 ว่าความเสียหายของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ ε_c^{in} กล่าวอีกนัยหนึ่งแรงที่ลดลงจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ε_c^{in} เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ความเสียหายจากแรงดึงของคอนกรีตสามารถแสดงได้จากสมการ (7)

$$d_t = \frac{(1 - \eta_t) \varepsilon_t^{in} E_o}{\sigma_t + (1 - \eta_t) \varepsilon_t^{in} E_o} \quad (7)$$

เมื่อ ε_t^{in} คือความเครียดไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีตในแรงดึง η_t คือค่าแรงดึงพลาสติกจำนวนหนึ่งของคอนกรีต (ε_t^{pl}) และ σ_t คือค่าความต้านทานแรงดึงในแกนเดียวของคอนกรีต ค่าของ η_t สามารถหาได้เป็น 0.4



รูปที่ 6 แบบจำลองความเค้น-ความเครียดคอนกรีตโอบรัดและไมโอบรัด

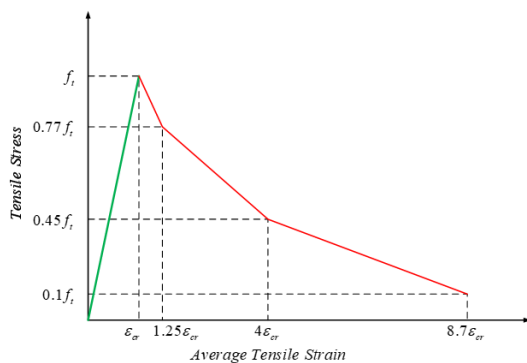


รูปที่ 7 พฤติกรรมการเสียหายของคอนกรีตใน CDPM สำหรับคอนกรีตธรรมดา

สำหรับนิยามพฤติกรรมแรงดึงของคอนกรีตนั้น งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการเสริมความต้านทานแรงดึงดังรูปที่ 8 [17] ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของคอนกรีต (f_t) คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงโดยสมการ (8) [18] และความเครียดที่ f_t หรือที่เรียกว่าความเครียดจากการแตกร้าว (ϵ_{cr}) คำนวณโดยใช้สมการ (9) [19]

$$f_t = 0.40\sqrt{f'_c} \quad (8)$$

$$\epsilon_{cr} = 0.000065 f_t^{0.54} \quad (9)$$



รูปที่ 8 แบบจำลองสำหรับนิยามการเสริมความต้านทานแรงดึง

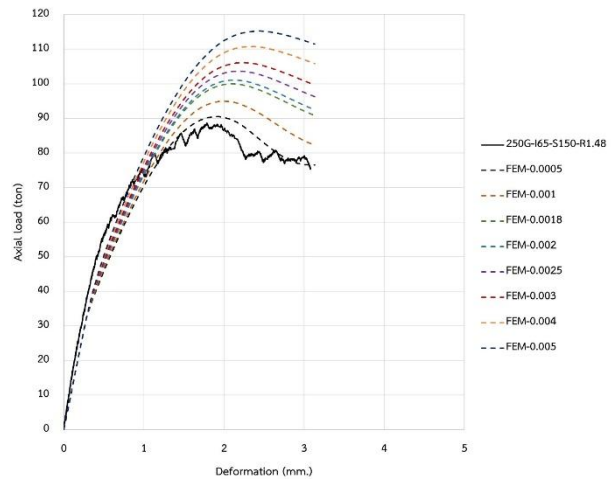
2.4 Calibration of Control Model

การเปรียบเทียบและการตรวจสอบความถูกต้องของ FEM นั้นจำเป็นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองได้อย่างแม่นยำ ด้วยเหตุนี้จึงใช้ตัวอย่าง 250G-I65-S150-R1.48 จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น FEM ได้รับการตรวจสอบเพื่อดูผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของมุมการขยาย (dilation angle) ค่าปัจจัยรูปร่าง (shape factor) พารามิเตอร์ความหนืด (viscosity

parameter) และ Mesh size แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการเปรียบเทียบแล้วจะถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองควบคุมเพื่อดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.4.1 พารามิเตอร์ความหนืด (viscosity parameter)

ระยะเวลาเริ่มต้นและระยะเวลาสูงสุดของการเพิ่มขึ้นของอินคริเมนต์ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ความหนืดที่ใช้ในแบบจำลองเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืดที่ 0.0005, 0.001, 0.0018, 0.002, 0.0025, 0.003, 0.004 และ 0.005 [20,21,22] ด้วยแบบจำลองควบคุม ความแตกต่างของกราฟระหว่างแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุม 250G-I65-S150-R1.48 ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความหนืดแสดงไว้ในรูปที่ 9 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งใช้ค่าความหนืด 0.0005 (90.47 ตัน), 0.001 (94.95 ตัน), 0.0018 (99.95 ตัน), 0.002 (101.03 ตัน), 0.0025 (103.63 ตัน), 0.003 (106.09 ตัน), 0.004 (110.74 ตัน) และ 0.005 (115.21 ตัน) มีความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดเทียบกับผลการทดลองที่ 88.6 ตัน คิดเป็น 2.11%, 7.17%, 12.81%, 14.03%, 16.96%, 19.73%, 24.99% และ 30.03% ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้ค่าความหนืดที่ 0.0005 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองมากที่สุด

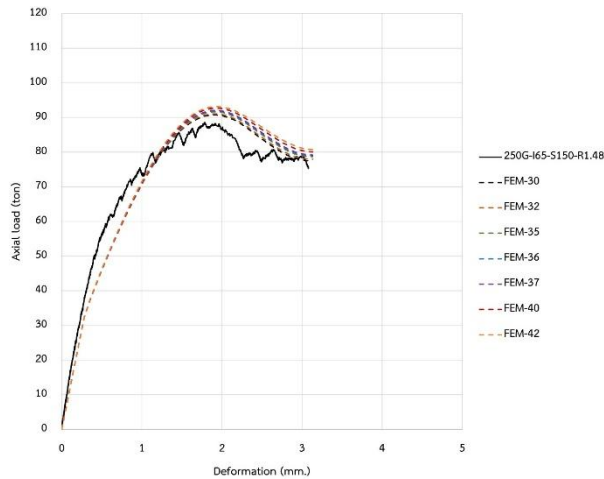


รูปที่ 9 แรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความหนืด

2.4.2 มุมการขยาย (dilation angle)

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมการขยายตัวต่อแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนสำหรับแบบจำลองควบคุม มีขนาดเล็กกว่าผลกระทบของพารามิเตอร์ความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 10 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้มุมการขยายตัวที่ 30°, 32°, 35°, 36°, 37°, 40° และ 42° [20,21,22] แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งใช้มุมการขยาย 30° (90.74 ตัน), 32° (91.10 ตัน), 35° (91.67 ตัน), 36° (91.87 ตัน), 37° (92.07 ตัน), 40° (92.70 ตัน) และ 42° (93.16 ตัน) มีความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดเทียบกับ

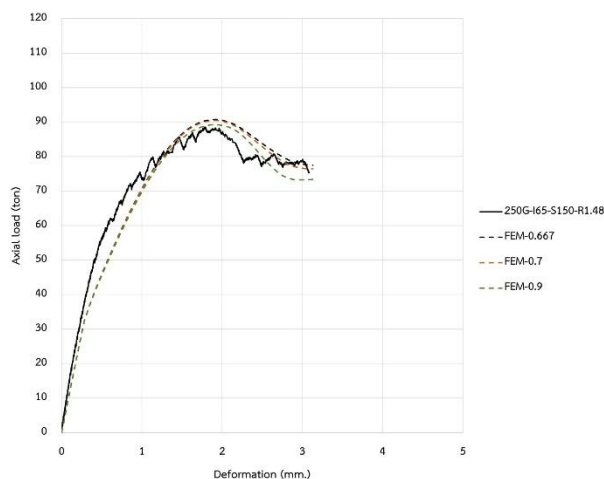
ผลการทดลองที่ 88.6 ตัน คิดเป็น 2.42%, 2.83%, 3.46%, 3.69%, 3.91%, 4.63% และ 5.15% ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้มุมการขยายที่ 30° ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองมากที่สุด



รูปที่ 10 แรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมการขยาย

2.4.3 ค่าปัจจัยรูปร่าง (shape factor)

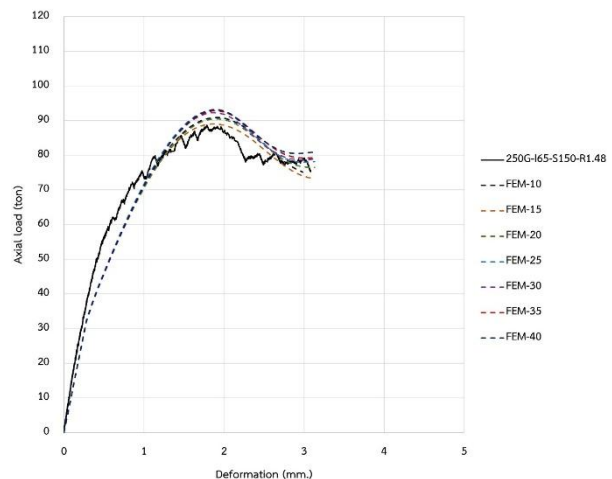
ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยรูปร่างต่อแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนสำหรับแบบจำลองควบคุมไม่เด่นชัดเท่ากับพารามิเตอร์อื่น อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและละเอียดมากขึ้นจึงต้องมีการปรับเทียบค่าปัจจัยรูปร่าง แสดงในรูปที่ 11 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ค่าปัจจัยรูปร่างที่ 0.667, 0.7, 0.9 และ 1.0 [20,21,22] แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งใช้ค่าปัจจัยรูปร่าง 0.667 (90.74 ตัน), 0.7 (90.47 ตัน) และ 0.9 (89.24 ตัน) มีความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดเทียบกับผลการทดลองที่ 88.6 ตัน คิดเป็น 2.42%, 2.11% และ 0.72% ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้ค่าปัจจัยรูปร่างที่ 0.9 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองมากที่สุด



รูปที่ 11 แรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยรูปร่าง

2.4.4 Mesh Size

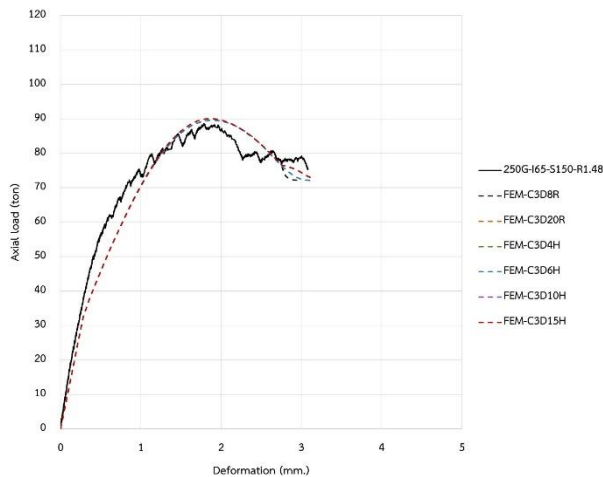
การเลือก Mesh size ที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อผลลัพธ์เชิงวิเคราะห์ที่แม่นยำ Mesh size ที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์เชิงวิเคราะห์เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้การใช้ Mesh size ที่มีขนาดเล็กเกินไปทำให้เวลาในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นโดยไม่ก่อให้เกิดการปรับปรุงความแม่นยำที่ ดังรูปที่ 12 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ค่า Mesh size ที่ 10 มม, 15 มม, 20 มม, 25 มม, 30 มม, 35 มม, และ 40 มม. แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งใช้ค่า Mesh size 10 มม. (90.87 ตัน), 15 มม. (89.02 ตัน), 20 มม. (90.47 ตัน), 25 มม. (93.04 ตัน), 30 มม. (92.29 ตัน), 35 มม. (92.80 ตัน), และ 40 มม. (93.15 ตัน) มีความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดเทียบกับผลการทดลองที่ 88.6 ตัน คิดเป็น 2.56%, 0.47%, 2.11%, 5.01%, 4.17%, 4.75%, และ 5.13% ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้ Mesh size ที่ 15 มม.



รูปที่ 12 แรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง Mesh size

2.4.5 Mesh Element Type

การเลือก Mesh Element Type ที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อผลลัพธ์เชิงวิเคราะห์ที่แม่นยำ ประเภทองค์ประกอบที่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดภายในเวลาวิเคราะห์ต่ำถือเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 13 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ Mesh Element Type ชนิด C3D8R, C3D20R, C3D4H, C3D6H, C3D10H และ C3D15H แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งใช้ชนิด Mesh Element Type C3D8R (89.59 ตัน), C3D20R (90.05 ตัน), C3D4H (89.59 ตัน), C3D6H (89.59 ตัน), C3D10H (90.05 ตัน) และ C3D15H (90.05 ตัน) มีความแตกต่างของค่าความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดเทียบกับผลการทดลองที่ 88.6 ตัน คิดเป็น 1.12%, 1.64%, 1.12%, 1.12%, 1.64%, และ 1.64% ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้ Mesh Element Type ชนิด C3D8R ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองและใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 13 แรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุม
ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง Mesh Element Type

2.5 สมการทำนายผล

ปัจจุบัน CSA S806-12 ได้อนุญาตให้ใช้แท่งไฟเบอร์ (FRP bar) ในการเสริมกำลังตามยาวของเสาที่รับแรงตามแนวแกนเท่านั้นโดยไม่พิจารณาผลกระทบของ FRP ในการรับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุด Afifi และคณะสันนิษฐานว่ากำลังรับแรงอัดของแท่ง GFRP เท่ากับ 35% ของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของแท่ง GFRP ดังสมการ (10) [23] Mohamed และคณะได้เสนอทฤษฎี linear-elastic สำหรับแท่ง GFRP ซึ่งกำลังรับแรงอัดของแท่ง GFRP จะเท่ากับการคูณความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่โหลดสูงสุดครั้งแรก ซึ่งเท่ากับ $2,000 \mu\epsilon$ ด้วยโมดูลัสยืดหยุ่นของแท่ง GFRP ดังสมการ (2) [24] Ajarmeh และคณะได้เสนอว่าระดับความเครียดในสมการ (11) ต่ำกว่าความเครียดจริงที่วัดได้ในการศึกษาส่งผลให้ค่า P_n ที่คาดการณ์ไว้ต่ำกว่าโหลดที่ทำให้เสาตัวอย่างเกิดการวิบัติ และได้เปลี่ยนความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่โหลดสูงสุดครั้งแรกของแท่ง GFRP คือ $2,500 \mu\epsilon$ ดังสมการ (12) และเสนอให้พื้นที่คอนกรีตถือว่ามีความเท่ากัน 0.85 ของกำลังอัดคอนกรีตที่ใกล้เคียงกับเสาคอนกรีตตัน ตามคำแนะนำใน ACI 318-11 [25]

$$P_{pre} = 0.85 \times f'_c \times (A_g - A_{FRP}) + 0.35 \times f_{u,FRP} \times A_{FRP} \quad (10)$$

$$P_{pre} = 0.85 \times f'_c \times (A_g - A_{FRP}) + 0.002 \times E_{FRP} \times A_{FRP} \quad (11)$$

$$P_{pre} = 0.85 \times f'_c \times (A_g - A_{FRP}) + 0.0025 \times E_{FRP} \times A_{FRP} \quad (12)$$

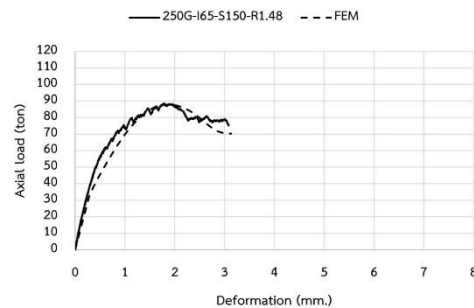
โดยที่ A_g คือพื้นที่หน้าตัดรวมของเสา, A_{FRP} คือพื้นที่หน้าตัดของการเสริมแรงตามยาวของ FRP, f'_c คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต, E_{FRP} คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของการเสริมแรงตามยาวของ FRP และ $f_{u,FRP}$ คือความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแท่ง GFRP

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคุม (250G-I65-S150-R1.48)

หลังจากการเปรียบเทียบและการตรวจสอบความถูกต้องของ FEM สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆผ่านการทดสอบแบบจำลอง ได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองที่ส่งผลให้ค่าจากแบบจำลองมีความ

ใกล้เคียงค่าจากการทดสอบได้แก่ พารามิเตอร์ความหนืด มุมการขยาย ค่าปัจจัยรูปร่าง Mesh size และ Mesh Element Type มีค่า 0.0005, 30°, 0.9, 10 มม. และชนิด C3D8R ตามลำดับ กราฟแสดงแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุม (250G-I65-S150-R1.48) มีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 14 ผลลัพธ์ของ FEM แสดงความแตกต่างเพียง 0.79% ในแรงอัดตามแกนสูงสุด และ 4.02% ในการเสียรูปตามแนวแกนแรงอัดตามแกนสูงสุดจากผลลัพธ์ของงานทดลอง จากผลของแบบจำลองสามารถพิสูจน์ได้ว่าค่าจากผลของแบบจำลองและการทดลอง มีค่าแรงอัดตามแกนสูงสุดและการเสียรูปตามแนวแกนแรงอัดตามแกนสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากันโดยประมาณ อย่างไรก็ตามพฤติกรรมหลังแรงอัดตามแกนสูงสุดของแบบจำลองไม่ได้บรรจบกับเส้นโค้งการทดลองอย่างเหมาะสม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างพฤติกรรมหลังจุดสูงสุดนี้อาจเกิดจากลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้นของแท่ง GFRP เนื่องจากไม่สามารถพิจารณาความเสียหายสำหรับแท่ง GFRP เหล่านี้ได้

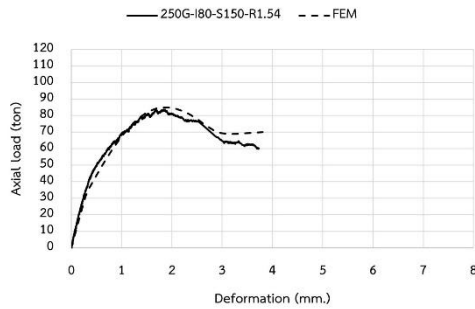


รูปที่ 14 แรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองควบคุม
250G-I65-S150-R1.48

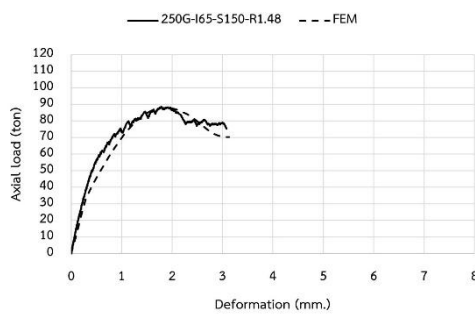
3.2 พฤติกรรมการรับแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกน

แบบจำลองของเสาทั้งหมดแสดงให้เห็นพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนและการเสียรูปตามแนวแกนเชิงเส้นในช่วงเริ่มต้น ตามด้วยพฤติกรรมไม่เชิงเส้นระยะสั้นก่อนถึงช่วงการรับแรงอัดสูงสุด พฤติกรรมความไม่เชิงเส้นระยะสั้นของกราฟบ่งบอกได้ถึงจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าวเล็กน้อยของผิวคอนกรีตภายนอก และความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนจะลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการแตกร้าวของคอนกรีต โดยการเคลื่อนตัวขึ้นของพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนและการเสียรูปตามแนวแกนครั้งที่สองนั้นสามารถมองเห็นได้ต่อมา ซึ่งเกิดจากผลของการโอบรัดโดยการเสริมกำลังด้วย GFRP ตามขวาง ดังรูปที่ 15-19 พฤติกรรมการรับแรงอัด-การเสียรูปของเสาในแบบจำลองทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำที่สมเหตุสมผลในช่วงก่อนจุดสูงสุด อย่างไรก็ตามในช่วงหลังจากจุดสูงสุดจนถึงการวิบัติ ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากการทดลอง ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในช่วงหลังจากจุดสูงสุดนั้นเกิดจากการที่ไม่ได้กำหนดเกณฑ์ความเสียหายสำหรับการเสริมกำลัง GFRP เนื่องจากเป็นวัสดุเสริมกำลังเชิงเส้น ความแตกต่างที่สำคัญสำหรับการเสริมกำลังด้วยเหล็กนั้นเกิดจากการเปรียบเทียบและการตรวจสอบความถูกต้องของ

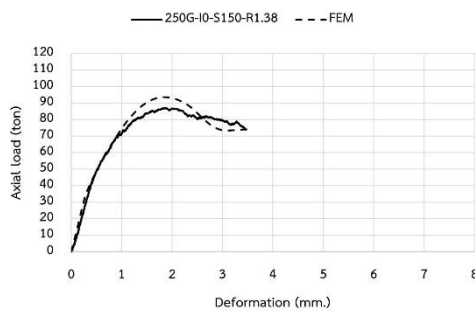
FEM ที่ดำเนินการกับแบบจำลองควบคุมโดยใช้แท่ง GFRP ไม่ใช่แท่งเหล็ก
ดังรูปที่ 18-19



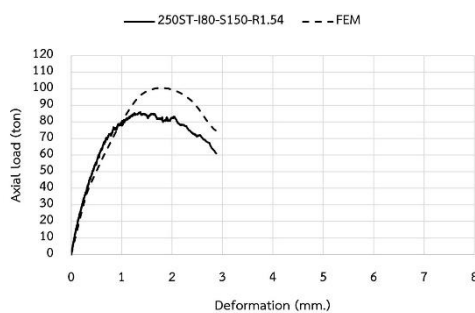
รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ของแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกน
ของแบบจำลอง 250G-I80-S150-R1.54



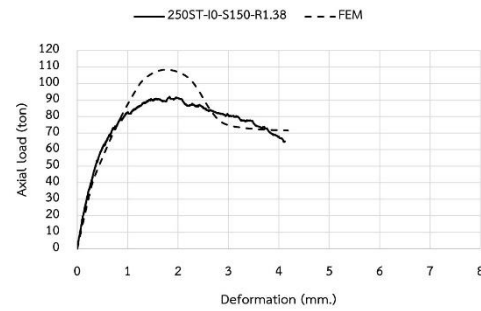
รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ของแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกน
ของแบบจำลอง 250G-I65-S150-R1.48



รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ของแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกน
ของแบบจำลอง 250G-I0-S150-R1.38



รูปที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ของแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกน
ของแบบจำลอง 250ST-I80-S150-R1.54



รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ของแรงอัดตามแกนกับการเสียรูปตามแนวแกน
ของแบบจำลอง 250ST-I0-S150-R1.38

3.3 ความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดและการเสียรูปตาม แนวแกนที่สอดคล้องกัน

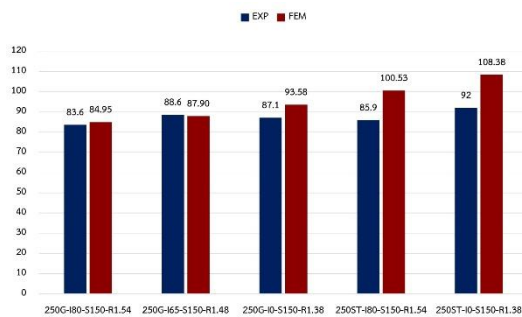
ผลของการรับแรงอัดตามตามแนวแกนสูงสุดและการเสียรูปตาม
แนวแกนที่แรงอัดตามแกนสูงสุดที่ได้จากการทดลองและ FEM ของเสา
ทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4-5 ความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุด
ของเสา 250G-I80-S150-R1.54, 250G-I0-S150-R1.38, 250ST-I80-S150-
R1.54, 250ST-I0-S150-R1.38, ที่ได้จากการแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าจาก
การทดสอบ 1.62%, 7.44%, 17.03% และ 17.81% ตามลำดับ ในขณะที่
ความสามารถในการรับแรงอัดตามตามแนวแกนสูงสุดของเสา 250G-I65-
S150-R1.48 ที่ได้จากการแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าจากการทดสอบ -
0.79% ในส่วนของความสามารถการเสียรูปตามแนวแกนที่แรงอัดตามแกน
สูงสุดของเสา 250G-I65-S150-R1.48 และ 250ST-I80-S150-R1.54 ที่ได้
จากการแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดสอบ 4.02% และ 10.77%
ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถการเสียรูปตามแนวแกนที่แรงอัดตามแกน
สูงสุดของเสา 250G-I80-S150-R1.54, 250G-I0-S150-R1.38 และ 250ST-
I0-S150-R1.38 ได้จากการแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าจากการทดสอบ -
0.24%, -0.02% และ -2.71% ตามลำดับ การเปรียบเทียบระหว่างการรับ
แรงอัดตามตามแนวแกนสูงสุดและการเสียรูปตามแนวแกนที่แรงอัดตามแกน
สูงสุดที่ได้จากการทดลองและจาก FEM แสดงไว้ดังรูปที่ 20-21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า FEM นั้นการรับแรงอัดตามตามแนวแกนสูงสุดและการเสียรูปตาม
แนวแกนที่แรงอัดตามแกนสูงสุดของเสาคอนกรีตทรงกระบอกกลวงมีค่า
ใกล้เคียงกับการทดลอง ส่วนความคลาดเคลื่อนของเสาที่เสริมกำลังตามยาว
ด้วย GFRP มีค่าน้อย ความแตกต่างที่มากสำหรับแบบจำลองนี้เกิดจาก
คุณสมบัติของเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับ GFRP ที่ใช้ในการทดสอบหรือการ
กำหนดพารามิเตอร์ความเสียหายของคอนกรีต

ตารางที่ 4 การรับแรงอัดจากการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

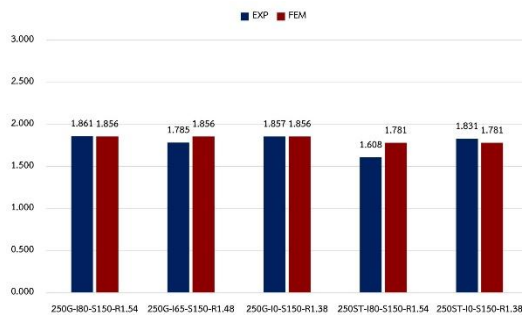
Specimen	Ultimate Axial Load-Carrying Capacity (ton)		
	EXP	FEM	เปอร์เซ็นต์ต่าง
250G-I80-S150-R1.54	83.6	84.95	1.62
250G-I65-S150-R1.48	88.6	87.90	0.79
250G-I0-S150-R1.38	87.1	93.58	7.44
250ST-I80-S150-R1.54	85.9	100.53	17.03
250ST-I0-S150-R1.38	92	108.38	17.81

ตารางที่ 5 ค่าการเสียรูปจากการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Specimen	Deformation at Ultimate Axial-Load Carrying Capacity (mm)		
	EXP	FEM	เปอร์เซ็นต์ต่าง
250G-I80-S150-R1.54	1.861	1.856	0.24
250G-I65-S150-R1.48	1.785	1.856	4.02
250G-I0-S150-R1.38	1.857	1.856	0.02
250ST-I80-S150-R1.54	1.608	1.781	10.77
250ST-I0-S150-R1.38	1.831	1.781	2.71



รูปที่ 20 ความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุด

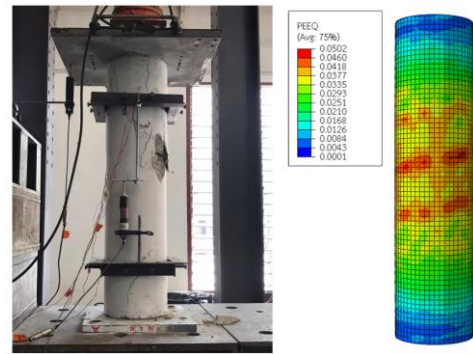


รูปที่ 21 ความสามารถในการเสียรูปตามแนวแกนที่แรงอัดตามแกนสูงสุด

3.4 ลักษณะการวิบัติ

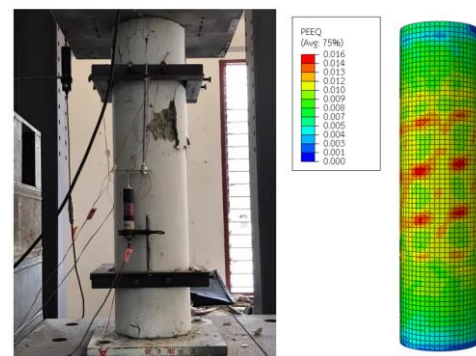
การสร้างแบบจำลองรอยแตกร้าวที่สังเกตได้ในตัวอย่างระหว่างการศึกษาทดลองนั้นดำเนินการโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทิศทางของความเครียดเชิงพลาสติกเทียบเท่า (PEEQ) ตั้งฉากกับการพัฒนาของรอยแตกร้าวในคอนกรีต ดังนั้น จึงได้วาดแบบจำลองของความเครียดเชิงพลาสติกเทียบเท่าของตัวอย่างที่ศึกษาเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของรอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติในตัวอย่างเหล่านี้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแบบจำลองความเครียดของตัวอย่างทั้งหมดเพื่อสร้างภาพและวิเคราะห์การก่อตัวของความเครียดตามแนวแกนที่จุดการพัฒนาของรอยแตกร้าว ยิ่งไปกว่านั้นความเครียดเชิงพลาสติกเทียบเท่ายังเป็นความเครียดในวัสดุที่ไม่สามารถย้อนกลับได้และเกี่ยวข้องกับการเสียรูปเชิงพลาสติก มักใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลาสติก เช่น การเสียรูปที่อาจเกิดขึ้นก่อนจะเกิดการวิบัติ เส้นชั้นของความเครียดเชิงพลาสติกเทียบเท่า [17]

ในเสา 250G-I80-S150-R1.54 เกิดรอยร้าวที่บริเวณหัวเสาและกลางเสา บริเวณกลางเสาคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนออกจากกันอย่างชัดเจน FEM แสดงให้เห็นการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางคอนกรีตที่บริเวณช่วงบนของเสาเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 22



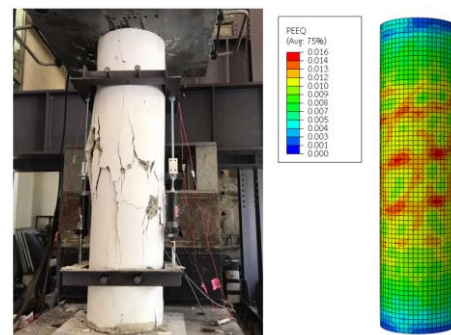
รูปที่ 22 ลักษณะการเสียรูปจากการทดลองและแบบจำลองของเสา 250G-I80-S150-R1.54

เสา 250G-I65-S150-R1.48 เกิดรอยร้าวที่บริเวณหัวเสาและกลางเสา บริเวณกลางเสาคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนออกจากกันอย่างชัดเจน FEM แสดงให้เห็นการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 23



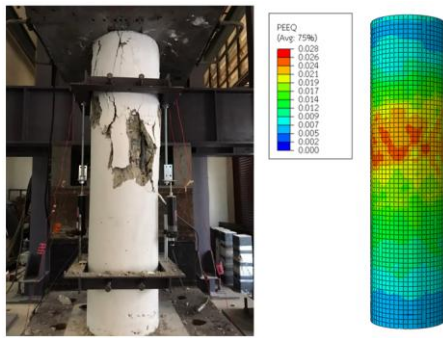
รูปที่ 23 ลักษณะการเสียรูปจากการทดลองและแบบจำลองของเสา 250G-I65-S150-R1.48

เสา 250G-I0-S150-R1.38 เกิดรอยร้าวที่บริเวณหัวเสาและกลางเสา บริเวณกลางเสาคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนออกจากกันอย่างชัดเจน FEM แสดงให้เห็นการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 24



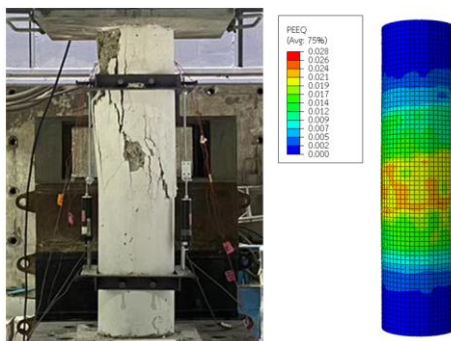
รูปที่ 24 ลักษณะการเสียรูปจากการทดลองและแบบจำลองของเสา 250G-I0-S150-R1.38

เสา 250ST-I80-S150-R1.54 เกิดรอยร้าวที่บริเวณหัวเสาและกลางเสา บริเวณกลางเสาคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนออกจากกันอย่างชัดเจนและเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งงอ FEM แสดงให้เห็นการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางคอนกรีตที่บริเวณช่วงบนของเสาเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 ลักษณะการเสียรูปจากการทดลองและแบบจำลอง
ของเสา 250ST-I80-S150-R1.54

เสา 250ST-I0-S150-R1.38 เกิดรอยร้าวที่หัวเสาและที่กลางเสา บริเวณกลางเสาคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนออกจากกันอย่างชัดเจน แต่ FEM แสดงให้เห็นการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางของเสาเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 ลักษณะการเสียรูปจากการทดลองและแบบจำลอง
ของเสา 250ST-I0-S150-R1.38

3.5 สมการทำนายกำลังรับแรงอัดตามแกนของเสาคอนกรีตทรงกระบอก กลวง

การทำนายกำลังรับแรงอัดตามแกนสูงสุดครั้งแรกของแบบจำลองที่
เสนอในปัจจุบันและแบบจำลองความจุตามแนวแกนต่างๆ เสา HCC ที่ศึกษา
ในปัจจุบันซึ่งเสริมด้วยแท่ง GFRP ความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย
สำหรับแบบจำลองความจุตามแนวแกนจากค่าความสามารถในการแรงอัด
ตามแกนสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วย GFRP ทั้ง 3 ตัวอย่าง คือ 19.39%,
3.04% และ 3.73% ตามลำดับ โดยพบว่าสมการ (11) มีความแม่นยำสูงสุด
โดยค่าคลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยที่ 3.04% ดังตารางที่ 6 การเปรียบเทียบ
สมการทำนายกำลังรับแรงอัดตามแกนของเสาดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ความแตกต่างเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยค่าการรับแรงอัดตามแกนสูงสุด

Column Specimen	Percentage Difference (Equation vs. Exp)		
	สมการ (10)	สมการ (11)	สมการ (12)
250G-I65-S150-R1.48	15.45	3.50	5.47
250G-I80-S150-R1.54	18.95	1.12	3.21
250G-I0-S150-R1.38	23.77	4.51	2.50
AVG	19.39	3.04	3.73

ตารางที่ 7 สมการทำนายกำลังรับแรงอัดตามแกนสูงสุด

Column Specimen	EXP	สมการ (10)	สมการ (11)	สมการ (12)
250G-I65-S150-R1.48	88.6	102.29	85.50	83.76
250G-I80-S150-R1.54	83.6	99.44	82.66	80.91
250G-I0-S150-R1.38	87.1	107.81	91.02	89.28

4. บทสรุป

ศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS ของ
พฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงอัดตามแกนของเสาคอนกรีต
ทรงกระบอกกลวง รวมถึงยังมีการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดผ่านสมการของ
งานวิจัยในอดีต สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความทนทานการเสียรูปของ HCC จะเพิ่มขึ้น 6% ตามขนาดของเส้น
ผ่านศูนย์กลางของรูกลวงที่เพิ่มขึ้น และความสามารถในการรับแรงอัดตาม
แกนสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังตามยาวด้วยเหล็กมีค่าสูงกว่าเสาที่เสริมกำลัง
ตามยาวด้วยแท่ง GFRP 3%
2. FEM ที่เสนอสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างของ HCC
เสริมแรงด้วย GFRP ได้อย่างแม่นยำ
3. FEM ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากการทดลอง การตอบสนอง
ของการรับแรงอัดตามแนวแกน-การเสียรูปตามแนวแกนของ FEM ของเสา
ที่เสริมกำลังด้วย GFRP สอดคล้องกับเส้นโค้งจากการทดลองโดยเฉพาะ
อย่างยิ่งในช่วงก่อนจุดสูงสุด
4. การวิเคราะห์ FEM ของส่วนประกอบโครงสร้างสามารถทำได้โดยใช้
Abaqus แทนที่จะต้องดำเนินการทดลองที่มีค่าใช้จ่ายสูง
5. สมการทำนายกำลังรับแรงอัดตามแกนของ HCC เสริมกำลังด้วย
GFRP เป็นวัสดุเสริมแรง สมการ (11) มีความแม่นยำสูงโดยมีค่าความ
คลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยที่ 3.04% ของกำลังรับแรงอัดตามแกนสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ชนะชัย ทองโถม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในวิจัยทุก
ด้าน ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณบริษัท จี
เอฟอาร์ที คิงส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้การสนับสนุนพอลิเมอร์เสริมกำลัง
ด้วยเส้นใยแก้วในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kusumawardaningsih, Y., & Hadi, M. N. (2010). Comparative
behaviour of hollow columns confined with FRP
composites. Composite Structures, 93(1), 198-205.
- [2] Hoshikuma, J. I., & Priestley, M. J. N. (2000). Flexural
behavior of circular hollow columns with a single layer of
reinforcement under seismic loading. Ssrp, 13.

- [3] Bousalem, B., & Chikh, N. (2007). Development of a confined model for rectangular ordinary reinforced concrete columns. *Materials and structures*, 40(6), 605-613.
- [4] Chung, H. S., Yang, K. H., Lee, Y. H., & Eun, H. C. (2002). Stress-strain curve of laterally confined concrete. *Engineering structures*, 24(9), 1153-1163.
- [5] Isleem, H. F., Tayeh, B. A., Alaloul, W. S., Musarat, M. A., & Raza, A. (2021). Artificial neural network (ANN) and finite element (FEM) models for GFRP-reinforced concrete columns under axial compression. *Materials*, 14(23), 7172.
- [6] Elchalakani, M., Karrech, A., Dong, M., Ali, M. M., & Yang, B. (2018, June). Experiments and finite element analysis of GFRP reinforced geopolymer concrete rectangular columns subjected to concentric and eccentric axial loading. In *Structures* (Vol. 14, pp. 273-289). Elsevier.
- [7] Hany, N. F., Hantouche, E. G., & Harajli, M. H. (2016). Finite element modeling of FRP-confined concrete using modified concrete damaged plasticity. *Engineering Structures*, 125, 1-14.
- [8] Ibrahim, A. M., Fahmy, M. F., & Wu, Z. (2016). 3D finite element modeling of bond-controlled behavior of steel and basalt FRP-reinforced concrete square bridge columns under lateral loading. *Composite Structures*, 143, 33-52.
- [9] Shi, Y., Swait, T., & Soutis, C. (2012). Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact. *Composite structures*, 94(9), 2902-2913.
- [10] Raza, A., Khan, Q. U. Z., & Ahmad, A. (2019). Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model in ABAQUS. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 1745341.
- [11] Ibrahim, A. M., Fahmy, M. F., & Wu, Z. (2016). 3D finite element modeling of bond-controlled behavior of steel and basalt FRP-reinforced concrete square bridge columns under lateral loading. *Composite Structures*, 143, 33-52.
- [12] Elchalakani, M., Karrech, A., Dong, M., Ali, M. M., & Yang, B. (2018, June). Experiments and finite element analysis of GFRP reinforced geopolymer concrete rectangular columns subjected to concentric and eccentric axial loading. In *Structures* (Vol. 14, pp. 273-289). Elsevier.
- [13] Hadi, M. N., & Youssef, J. (2016). Experimental investigation of GFRP-reinforced and GFRP-encased square concrete specimens under axial and eccentric load, and four-point bending test. *Journal of Composites for Construction*, 20(5), 04016020.
- [14] Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 223, 704-728.
- [15] Desayi, P., & Krishnan, S. (1964, March). Equation for the stress-strain curve of concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 61, No. 3, pp. 345-350).
- [16] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [17] Wahalathantri, B., Thambiratnam, D., Chan, T., & Fawzia, S. (2011). A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. In *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing* (pp. 260-264). Queensland University of Technology.
- [18] Wu, J. Y., Li, J., & Faria, R. (2006). An energy release rate-based plastic-damage model for concrete. *International journal of Solids and Structures*, 43(3-4), 583-612.
- [19] Qingfu, L., Wei, G., & Yihang, K. (2020, March). Parameter calculation and verification of concrete plastic damage model of ABAQUS. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 794, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- [20] Raza, A., Khan, Q. U. Z., & Ahmad, A. (2019). Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model in ABAQUS. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 1745341.
- [21] Raza, A., Ali, B., Masood, B., & ur Rehman, A. (2021, February). Axial performance of GFRP composite bars and spirals in circular hollow concrete columns. In *Structures* (Vol. 29, pp. 600-613). Elsevier.
- [22] Ahmad, A., Bahrami, A., Alajarmeh, O., Chairman, N., & Yaqub, M. (2023). Investigation of circular hollow concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals. *Buildings*, 13(4), 1056.
- [23] Afifi, M. Z., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2014). Strength and axial behavior of circular concrete columns reinforced with CFRP bars and spirals. *Journal of Composites for Construction*, 18(2), 04013035.

- [24] Tobbi, H., Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2014). Strength model for concrete columns reinforced with fiber-reinforced polymer bars and ties. *ACI Structural Journal*, 111(4), 789-798.

- [25] AlAjarmeh, O. S., Manalo, A. C., Benmokrane, B., Karunasena, W., & Mendis, P. (2020). Effect of spiral spacing and concrete strength on behavior of GFRP-reinforced hollow concrete columns. *Journal of Composites for Construction*, 24(1), 04019054.