

การวิเคราะห์กำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมด้วยแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Analysis of Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets

จอมพล พงศ์ธาดา¹ พุทธิภูมิ ธรรมสุข² และ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์³

*ที่ปรึกษาทางวิจัย

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการที่วิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งก่อนและหลังการเสริมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) เนื่องจากในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการรับแรงบิดของคานที่เสริมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ยังไม่เป็นที่แพร่หลายจึงเป็นที่มาของโครงการนี้โดยผลที่ต้องการการศึกษาและวิเคราะห์คือความเหมาะสมของแบบจำลองได้จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงประกอบด้วยค่าของกำลังรับแรงบิดที่จุดแตกหักกำลังรับแรงบิดที่จุดครากเหล็กกำลังรับแรงบิดสูงสุดและความสัมพันธ์ของแรงบิดและมุมบิดของนอกจากนี้ยังนำค่าจากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับสมการการทำนายของACI318-19และสมการการทำนายตามมาตรฐานของFIB(2002)โปรแกรมที่ใช้การศึกษาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโครงการนี้คือโปรแกรม ANSYS APDL 20R2แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้อ้างอิงข้อมูลมาจากการวิจัยของศิวกอร์จากการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบผลจากสมการทำนายของ ACI 318-19 กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความแตกต่างมากกว่า 19 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบผลจากสมการทำนายของFIBของไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าจากการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ไม่สามารถหาค่าในการเปรียบเทียบได้เนื่องจากเกิดการเสียหายบริเวณconstraintsการเปรียบเทียบความสัมพันธ์กำลังรับแรงบิดและมุมบิดพบว่าที่ค่าแรงบิดเดียวกันจะมีค่ามุมบิดที่แตกต่างกันประมาณ 10 เท่า ในกรณีที่ไม่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์ส่วนในกรณีที่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยค่ามุมที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างจากการทดสอบจริง 6 เท่า แบบจำลองในโครงการนี้ควรนำไปพัฒนาเพิ่มเพื่อให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: กำลังรับแรงบิด ; พอลิเมอร์เสริมเส้นใย ; แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ; ACI318-19

Abstract

This project demonstrates an analysis of torsional behavior of reinforced concrete (RC) beams both before and after strengthened with fiber-reinforced polymer (FRP) sheets. Due to lack of research of torsional behavior in beams strengthened with FRP sheets by finite element method, so there is a derivation of this project. The objective of this project is to study the appropriability of finite element models by comparing with the experimental results. The criteria to evaluate are cracking torsion, yielding torsion and ultimate torsion. The comparison of finite element models with ACI318-19 and FIB (2002) is also considered. The study result from finite element has performed by ANSYS APDL 20R2. The finite element model (FEM) from this project is referred the experimental data from Siwakorn's citation. The analysis results from RC beam are differ from ACI318-19 Equation more than 19%. The comparison between the analysis results from RC beam strengthened with FRP and FIB Equation are invalid because the critical zone occurs at constraints which out of the region of study. The relation between torsional moment and angle of twist of RC beam imply that at the same torsional moment, the angle of twist from experiment is differ from FEM around 10 times and for RC beam strengthened with FRP state that the experimental result is differ from FEM around 6 times. These FEM should be optimized and studied furthermore.

Key words: Torsional Strength ; FRP ; Finite Element Model ; ACI318-19

1. บทนำ

คานเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโครงสร้างอาคาร เพราะเป็นส่วนที่คอยแบกรับน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหลังถ้าเกิดความเสียหายหรือการวิบัติของส่วนนี้ก็จะทำให้อาคารเกิดการถล่มได้ ในปัจจุบันมีการศึกษาเพื่อป้องกันการวิบัติของโครงสร้างโดยการเสริมกำลังด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งที่เริ่มเป็นที่แพร่หลายในปัจจุบันจะเป็นการเพิ่มขนาดหน้าตัดให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การเสริมเหล็ก การใช้คอนกรีตเสริมกำลัง หรือจะเป็นการพันด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหรือเรียกว่า FRP โดยในปัจจุบันก็จะมีเส้นใย 2 ประเภท คือ เส้นใยแก้ว (GFRP) และเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ที่เป็นการแพร่หลายโดยส่วนใหญ่จะมีการใช้ CFRP เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีความแข็งแรงมากกว่า GFRP

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์โครงสร้างแต่ยังไม่ได้เป็นที่แพร่หลายที่มีการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หรือศึกษาเกี่ยวกับคานที่มีการรับแรงบิดทั้งที่มีและไม่มี การเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จึงเป็นที่มาของหัวข้อของโครงการนี้ที่มีการศึกษา การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์คานที่รับแรงบิดและยังมีการวิเคราะห์เกี่ยวกับความเหมาะสมของแบบจำลองว่ามีความใกล้เคียงกับตัวอย่างของคานทดสอบมากเพียงใด ซึ่งนอกจากนี้ยังมีการเทียบผลทดสอบจากงานของศิวกกร[1]ที่เป็นการทดลองจริงเพื่อประกอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งมีการคำนวณกำลังรับแรงบิดในสภาวะต่างๆตามสมการการทำนายกำลังรับแรงบิดตามมาตรฐาน ACI318-19 และ มาตรฐาน Fib (2002)[8]

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

(1)พัฒนาการใช้โปรแกรม ANSYS APDL ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (2)พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานที่มีการรับแรงบิดในกรณีที่มีและไม่มีเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (3) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองโดยมีการเสริมกำลังด้วย พอลิเมอร์เสริมเส้นใย

(4)ศึกษาข้อกำหนด ACI 318-19 ที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงบิด

(5)เปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลของค่าจากการทดสอบจริง

1.2 ขอบเขตของวิจัย

การศึกษาของโครงการนี้มุ่งเน้นในการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งที่มีและไม่มีเสริมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยสิ่งที่ต้องการศึกษา คือ (1) ความเหมาะสมของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ผล (2) แรงบิดที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆและมุมบิดที่เกิดขึ้นของแบบจำลอง (3) การเปรียบเทียบค่าของแบบจำลองกับค่าทดสอบจริง

2. คุณสมบัติวัสดุ

ในการศึกษานี้ได้มีการนำวิจัยของศิวกกรมาช่วยในการศึกษาดังนั้นจึงได้มีการนำค่าต่างๆของคุณสมบัติวัสดุมาใช้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการวิเคราะห์ของแบบจำลองได้โดยมีชนิดวัสดุ ดังนี้ 1.คอนกรีต 2.เหล็ก RB6 3.เหล็ก DB12 4.พอลิเมอร์เสริมเส้นใย ค่าดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง[1]

ประเภทวัสดุ	คอนกรีต	RB6	DB12	FRP
มาตรฐาน	มอก.15	มอก. 20-2543	มอก. 24-2548	SikaWarp - 230
กำลังรับแรงดึงคราก(MPa)	-	283	518	3493
กำลังรับแรงอัดประลัย(MPa)	28.5	-	-	-
มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	26.1	219,672	194,557	276,075
ความเครียดที่จุดคราก(m/m)	-	0.0014	0.0023	0.0155

3. ANSYS APDL

โปรแกรม ANSYS APDL 2020 เป็นโปรแกรมหลักที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ โดยในการใช้ ANSYS APDL ในการสร้างแบบจำลองในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 แบบจำลองและคุณสมบัติคอนกรีต

ในการใช้โปรแกรม Ansys APDL นั้นในการสร้างแบบจำลองสำหรับคอนกรีตจะใช้เป็น Solid 65 เอลิเมนต์โดยในแต่ละ node จะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทั้งในเอลิเมนต์จะมีค่าความสามารถของการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกหรือการแตกหักทั้ง 3 ทิศทาง ในการสร้างคอนกรีตนั้นจะมีค่าที่ต้องการค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น(linear isotropic) และการเปลี่ยนแปลงหลายทิศทางที่เท่ากัน (multi-linearisotropic) เพื่อให้ในการวิเคราะห์เพื่อทำให้รู้ถึงพฤติกรรมของคอนกรีต จากงานวิจัย[9]จะหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสามารถหาได้จากค่า

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad \text{กำลังแรงดึง } f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad \text{อัตราส่วนของบัว}$$

ของมีค่า 0.2 การกดด้านเดียวของคอนกรีตจะทำให้ค่า ความเค้น-ความเครียดของสร้างคอนกรีตนั้นเป็นไปตามสมการ

$$E_c = f/\varepsilon \quad \varepsilon_0 = 2f'_c/E_c \quad f = \frac{E_c \varepsilon}{1+(\varepsilon/\varepsilon_0)^2}$$

เมื่อ f คือ ความเค้น ที่ ความเครียด ε , ε_0 คือ ความเครียด ที่ค่าสูงสุด f'_c คือ กำลังรับแรงอัดคอนกรีต(MPa)

3.2 แบบจำลองและคุณสมบัติเหล็กเสริม

ในการสร้างเหล็กเสริมในโปรแกรม Ansys APDL จะใช้คำสั่งเป็น Link 180 ในเอลิเมนต์จะมีความสามารถของการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกและมี พันธะสมบูรณ์ (Perfect bond) หรือว่างคอนกรีตและเหล็กในการ Model เหล็กเสริมนั้นจะมีค่าที่ต้องการเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นคู่ (bilinear isotropic), elastic-perfectly plastic material มีค่า โมดูลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 219672 MPa อัตราส่วนของปัวซอง 0.3 ค่าความเค้นที่จุดคราก 518 MPa สำหรับเหล็กตามยาวและมีค่า 283 MPa เหล็กในแนวขวาง

3.3 แบบจำลองและคุณสมบัติของ FRP

ในการสร้างแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใย จะใช้เป็น Solid 186 ในปัจจุบันมีการศึกษาทำให้ได้ค่า คุณสมบัติของอีลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic properties) ของแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใย อัตราส่วนของปัวซอง $V_{xy} = V_{xz} = 0.22$ และ $V_{zy} = 0.3$ ตัวเชื่อมที่ใช้ระหว่างพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในการสร้าง จะใช้เป็น TARGE170 และ CONTA174

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุ	ชนิดเอลิเมนต์	คุณสมบัติของวัสดุ
1	Solid65	Linear Isotropic EX = 26100 MPa PRXY = 0.2
		Multilinear Isotropic
2	Link180 (เหล็กเสริมตามยาว)	Linear Isotropic EX = 194557 MPa PRXY = 0.3
		Bilinear Isotropic Yield Stress = 518 MPa
		Preprocessor>>Sections>>Link >>Add DB12; Area = 113 mm ²
3	Link180 (เหล็กเสริมตามขวาง)	Linear Isotropic EX = 219672 MPa PRXY = 0.3
		Bilinear Isotropic Yield Stress = 283 MPa
		Preprocessor>>Sections>>Link >>Add

		RB6; Area = 28.3 mm ²
4	Solid186 (Layered Structural Solid Element)	Layer Construction: Layered Solid
		Linear Orthotropic EX = 276075 MPa EY = 4500 MPa EZ = 4500 MPa PRXY = 0.22 PRYZ = 0.3 PRXZ = 0.22 GXY = 3090.02 MPa GYZ = 1730.77 MPa GXZ = 3090.02 MPa
5	TARGE170 , CONTA174	Contact Cohesion = 3.70 MPa
		Material Type
		Linear Isotropic EX = 4500 MPa PRXY = 0.3
		Multilinear Isotropic
		Strain 0.009

4. สมการการทำนายแรงการบิด

ในการวิเคราะห์แบบจำลองจะใช้สมการที่ได้จาก ACI 318-19 [3] ในการคำนวณค่าของการบิดที่แตกร้าและค่าสูงสุดโดยสมการที่ใช้มีดังนี้

สมการทำนายกำลังแรงบิดที่จุดแตกร้า

$$T_{cr} = (0.33\sqrt{f'_c}) \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa) A_{cp} คือพื้นที่ล้อมด้วยเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน(mm²) P_{cp} คือความยาวเส้นรอบวงภายนอกของหน้าตัดคาน(mm)

สมการทำนายกำลังแรงบิดสูงสุด

$$T_{max} = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot(\alpha) \leq 0.83 \sqrt{f'_c} \left(\frac{1.7A_{oh}^2}{P_h} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ A_0 คือพื้นที่ปิดของแรงเฉือนต่อหน่วยความยาว (mm²) A_t คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก(เส้นเดียว) (mm²) A_{oh} คือพื้นที่ปิดของเหล็กปลอก(mm²) f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต(MPa) P_h คือความยาวเส้นรอบวงของเหล็กปลอก (mm) f_{yt} คือกำลังอัดประลัยของเหล็กตามขวาง(MPa) s คือระยะเรียงของเหล็กปลอก(mm) α คือ มุมแนวรอยแตกคอนกรีต

(deg.) โดยปกติจะค่า 45 องศาเพื่อความง่ายในการคำนวณค่าสูงสุด

ข้อกำหนดของ ACI 318-19 การใช้สูตรในการคำนวณกำลังรับแรงบิดทั้งที่เป็นค่าที่จุดแตกร้าวหรือค่าสูงสุดของการบิดจะมีข้อกำหนดของการใช้สูตรคำนวณดังนี้ (1)ค่าของ $\sqrt{f'_c}$ หรือค่าของความทนต่อการรับแรงอัดที่ใช้ในการคำนวณ T_{th} และ T_{Cr} ไม่ควรเกิน 100 psi (2)สำหรับระยะเรียงตัวของเหล็กเสริมตามขวางกำหนดว่าระยะเรียงตัวมากที่สุดต้องมีค่าไม่เกินตัวที่น้อยกว่าระหว่าง $p_h/8$ กับ 300 มม. (3) มุมของเหล็กปลอกที่ควรจะเป็น 135 ไม่ควรเป็น 90 เพื่อช่วยในการป้องกันการเกิดการวิบัติจากการบิดของโครงสร้าง (4) ค่าของ F_y ของเหล็กนั้นต้องมีค่า ไม่เกิน 420 MPa หรือ 60000 psi จึงจะสามารถใช้สูตรการคำนวณกำลังรับการบิดดังกล่าวได้ [3]

ในปี ค.ศ. 2002 S. Panchacharam และ A. Belarbi[8] ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมด้วย FRP จากผลของการทำการทดลองทำให้ S.Panchacharam และ A. Belarbi นั้นต้องการทำนายการรับแรงบิดโดยเริ่มจากความการคำนวณหาความเครียดของ พอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยใช้สมการการทำนายค่าของการบิดสูงสุดเมื่อมีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยจากมาตรฐานของ fib ดังสมการนี้

สำหรับการเสริมแบบสมบูรณ์แบบ(complete wrap)

$$T_{u,frp} = 2\varepsilon_{ke,f}E_{fu} \frac{t_f b_f}{s_f} bh \cot(\alpha) \quad (4.3)$$

สำหรับการเสริมแบบตัวยูและเสริมด้วยตัวยึด

$$T_{u,frp} = \varepsilon_{ke,f}E_{fu} \frac{t_f b_f}{s_f} bh \cot(\alpha) \quad (4.4)$$

เมื่อ $\varepsilon_{ke,f}$ =ความเครียดขึ้นอยู่กับชนิดของFRP E_{fu} =มอดูลัสยืดหยุ่นของFRP(MPa) t_f =ความหนาของแผ่น FRP(mm) b_f =ความกว้างของแผ่นFRP(mm) s_f =ระยะเรียงระหว่างจากกึ่งกลางแถบ(mm) b, h =ขนาดของคาน(mm) α =มุมของการเกิดการแตกหัก ส่วนมากจะให้ เป็น เป็น 45 องศา

ค่าของ $\varepsilon_{ke,f}$ ดังนี้

สำหรับ CFRP

$$\varepsilon_{ke,f} = 0.17 \left(\frac{f_c}{E_f \rho_f} \right)^{2/3} \varepsilon_{fu} \quad (4.5)$$

$$= 0.65 \left(\frac{f_c}{E_f \rho_f} \right)^{2/3} \times 10^{-3} \quad (4.6)$$

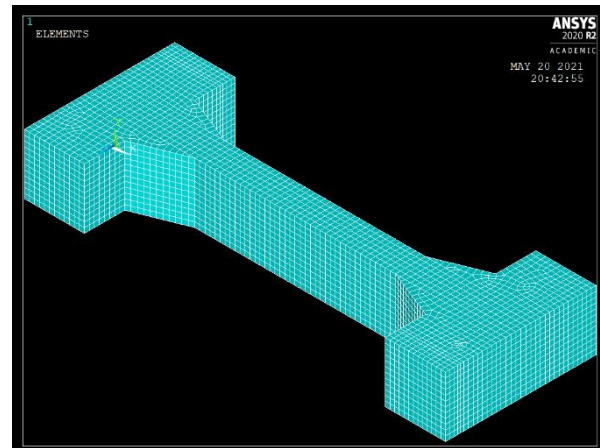
เมื่อ f_c =กำลังอัดประลัยของคอนกรีต(MPa) E_f =มอดูลัสยืดหยุ่นของ FRP(MPa) ρ_f =ปริมาณของแผ่น FRP หลังจากคำนวณค่ากำลังรับแรงบิดสูงสุดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้แล้ว จะสามารถคำนวณกำลังรับแรงบิดสูงสุด (T_u) ขององค์อาคารที่เสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ดังสมการ

$$T_u = T_{u,RC} + T_{u,FRP}$$

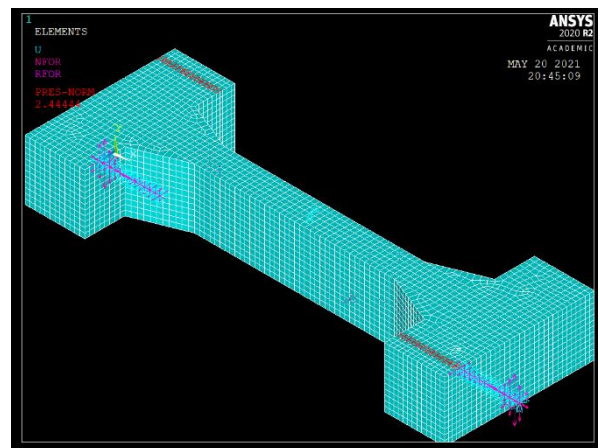
เมื่อ $T_{u,RC}$ คือ กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตเสริมเหล็ก

5. การวิเคราะห์ของแบบจำลองและผลการศึกษา

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และศึกษา ต้องมีการตรวจสอบว่าแบบจำลองที่ได้มีการสร้างนั้นมีความสมมาตรหรือไม่ โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นจะมีลักษณะดังรูป ในการใส่แรงกระทำต่อแบบจำลองเราจะใส่แรงกระทำเป็นแรงกระทำแบบพื้นที่บนคานของแบบจำลองเพื่อให้เกิดการบิดของแบบจำลองแรงที่ใส่ในแบบจำลองมีขนาดรวมกันทั้ง 2 ฝั่งมีค่าเท่ากับ ดังรูป 1 และ 2



ภาพที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 2 การใส่แรงกระทำและตำแหน่งของconstraints

5.1 การตรวจสอบความสมมาตรและความ

ถูกต้องของแบบจำลอง

เนื่องจากการศึกษานั้นต้องมีการนำผลที่จากการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม ANSYS APDL มาทำการเปรียบเทียบผลกับจากห้องทดสอบ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้มีการสร้างขึ้นนั้นจะต้องมีความเหมาะสมและสมมาตรสอดคล้องกับตัวอย่างการทดสอบ ในการตรวจสอบความสมมาตรของแบบจำลองนั้นต้องทำการหาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดที่สนใจทั้งสองฝั่งที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากการสร้างแบบจำลองนั้นได้สร้างให้ชิ้นส่วนมีความ

สมมาตรและให้แรงกระทำทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นควรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน รวมไปถึงมุมบิดของหน้าตัดทั้งสองฝั่งของช่วงคานที่สนใจก็ควรมีค่าที่ใกล้เคียง จึงจะเป็นการบอกถึงความสมมาตรของแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมที่ได้นั้นจะต้องนำค่ามา

เปลี่ยนเป็นมีดังนี้

(1) ไปยัง Solution>>Analysis Type>>Sol'n Controls (2) เลือกว่าจะตั้งค่า "Time at end of loadstep" เท่าไร ซึ่งในที่นี้เลือกตั้งไว้ 200 (3) เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เสร็จให้ตรวจสอบค่า Reaction รวมในแกน y ของแต่ละ load step นำมาหารครึ่งจะได้แรงที่กด ณ load step นั้นๆ (4) [(Area load*พื้นที่รับแรงกระทำ/Time at end of load step)*Time at load step] = Force at load step {N}

(5) Torsion at load step{kN.m} = Force{N}*300mm/10⁴-6

5.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการ ACI

318-19

จากที่กล่าวมาในข้างต้นเกี่ยวกับการใช้สูตรในการคำนวณของ ACI 318-19 นั้น ในส่วนของตัวแบบจำลองได้ผ่านข้อกำหนดการใช้ของ ACI 318-19 เพียงบ้างข้อทำให้สามารถใช้สูตรที่กล่าวมาในข้างต้นในการหาค่าของการบิดที่แตกร้าวย่างเดียว เพราะในการคำนวณการบิดที่แตกร้าวยเป็นการคำนวณโดยที่คอนกรีตเป็นตัวรับแรงบิดที่กระทำก่อนที่จะเกิดการแตกร้าวยและเหล็กเสริมจะมีการช่วยรับแรงบิดในส่วนที่คอนกรีตไม่สามารถรับได้

5.3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดจากการ

วิเคราะห์แบบจำลองและจากการทดสอบ

ในการสร้างแบบจำลองได้มีสร้างแบบจำลองขึ้น 2 แบบจำลองโดยจะมีการให้ค่าจำกัดความเพื่อช่วยในการแยกแยะประเภทของชิ้นงาน โดยแบ่งค่าจำกัดความเป็น 3 ตัว ตัวแรกจะมี B คือคานธรรมดา BF คือคานที่เสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตัวที่สอง มุมงอมาตรฐานเหล็กปลอก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 90 องศา ตัวที่สาม คือการบอกระยะห่างของเหล็กปลอก หน่วย มม. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 มม.

จากข้อมูลของการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์และงานวิจัยได้นำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบเพื่อดูความแตกต่างของค่าที่สนใจเป็นดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดจากการวิเคราะห์ แบบจำลองและจากการทดสอบ

กำลังรับแรงบิด (kN.m)			
แบบจำลอง		B-90-75	BF-90-75
จากโปรแกรม	T _{pro,cr}	4.89	5.2
	T _{pro,y}	-	-
	T _{pro,max}	6.51	-
จากการทดลอง	T _{exp,cr}	4.33	8.31
	T _{exp,y}	5.76	14.27
	T _{exp,max}	6.39	17.6
จาก ACI	T _{cr}	3.96	-
	T _{max,ACI}	4.54	-
จาก FIB	T _{max}	-	21.58

และมีความคลาดเคลื่อนจากการผลการทดสอบ สมการการทำหายกำลังรับแรงบิดตามมาตรฐาน ACI 318-19[3] และมาตรฐาน Fib (2002)[8] ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความคลาดเคลื่อนจากการผลการทดสอบ

diff %			
จากการทดลอง	T _{exp,cr}	11.45	59.8
	T _{exp,y}	-	-
	T _{exp,max}	1.84	-
จาก ACI	T _{cr}	19.02	-
	T _{max,ACI}	30.21	-
จาก FIB	T _{max}	-	-

**หมายเหตุ

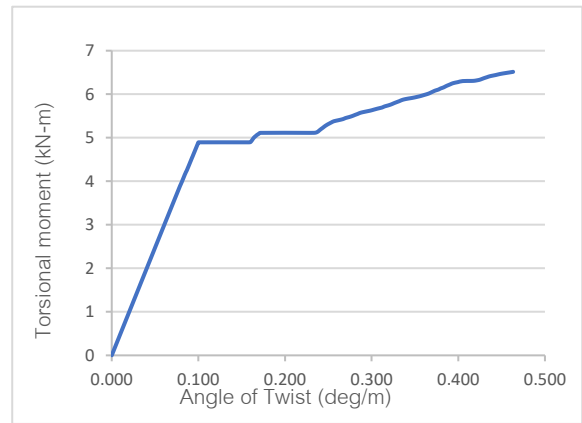
$$\text{diff \%} = \left| \frac{T_{pro} - T_{exp,aci,fib}}{T_{pro}} \right| \times 100$$

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 แสดงให้เห็นค่าที่จะการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์กำลังรับแรงบิดและมีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

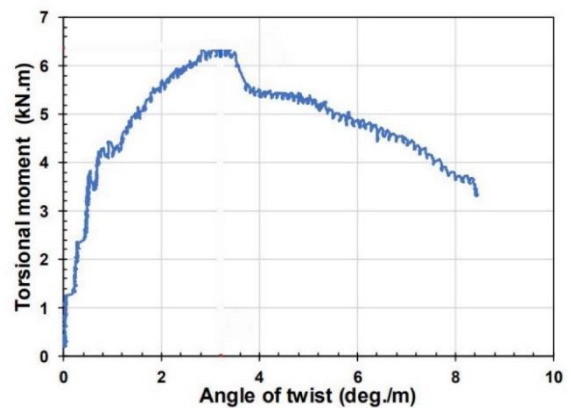
การเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกำลังรับแรงบิดที่ไม่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่ากำลังรับแรงบิดที่จุดแตกร้าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 11.45 เปอร์เซ็นต์และกำลังรับแรงบิดสูงสุดความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.84 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อนำค่าที่ได้จากโปรแกรมมาเทียบกับสมการทำนายกำลังรับแรงบิดตามมาตรฐาน ACI318-19 พบว่ากำลังรับแรงบิดที่จุดแตกร้าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 19.02 เปอร์เซ็นต์ กำลังรับแรงบิดสูงสุดมีความคลาดเคลื่อนสูงถึงอยู่ที่ 30.21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นมาจากการใช้สมการทำนายกำลังรับแรงบิด มาตรฐาน ACI318-19 จะมีข้อจำกัดของการใช้อยู่ว่าการใช้สมการนี้เหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกนั้นจะต้องมีค่า f_y ไม่เกิน 420 MPa แต่เนื่องจากการสร้างแบบจำลองนี้ได้ใช้ค่าของคุณสมบัติตามงานวิจัย[11] ค่าของ f_y ในเหล็กตามยาวจึงมีค่าสูงถึง 518 MPa ทำให้การใช้สมการนี้ไม่มีความเหมาะสมเพียงพอในการทำนายค่ากำลังรับแรงบิด ในส่วนที่เป็นกำลังรับแรงบิดที่จุดครากพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่สามารถหาค่าได้เพราะเมื่อทำการตรวจสอบเหล็กตามยาวหรือเหล็กปลอกแล้วพบว่าไม่เกิดการครากทำให้ไม่สามารถนำค่ามาเปรียบเทียบได้

การเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกำลังรับแรงบิดที่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับมาตรฐาน FIB (2002) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงบิดจากแบบจำลองที่มีการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าจากแบบจำลองไฟไนต์ที่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่สามารถวิเคราะห์ผลของกำลังรับแรงบิดได้ถึงค่าสูงสุดทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบค่าแรงบิดกับสมการทำนายของ FIB (2002) ได้ การเปรียบเทียบค่าการรับแรงบิดที่จุดแตกร้าวและการรับแรงบิดที่สูงสุดได้ในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างค่าที่ได้จากการสร้างแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่า จากแบบจำลองไฟไนต์ที่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่สามารถวิเคราะห์ผลของกำลังรับแรงบิดได้ถึงค่าสูงสุด ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงบิดที่จุดแตกร้าวได้เพียงค่าเดียวซึ่งพบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าที่แตกต่างกันถึง 59.8 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุที่ทำให้ค่ามีความแตกต่างมาก มาจากแบบจำลองที่เสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถวิเคราะห์ได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงบิดที่ใส่ เมื่อได้ตรวจสอบแบบจำลองพบว่ามีความเค้นสูงมากในบริเวณที่เป็นจุดเกิดการวิบัติจนบริเวณที่ศึกษา แต่ในการทดสอบจริงนั้นคานยังคงสามารถรับแรงบิดได้มากกว่าที่โปรแกรมวิเคราะห์ให้ไว้ อาจมีสาเหตุเนื่องจากในเอกสารอ้างอิง[1]ไม่ได้ระบุขนาดมิติและวัสดุ จึงต้องคาดการณ์เงื่อนไขที่ใช้สำหรับจุดรองรับเพื่อสร้างแบบจำลองจนส่งผลกับผลการวิเคราะห์ที่ได้

5.4 การเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงบิดกับมูมบิด

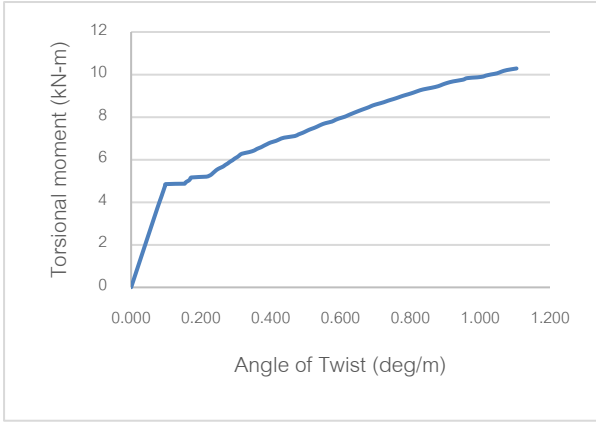


ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมูมบิดของแบบจำลองที่ไม่ได้เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



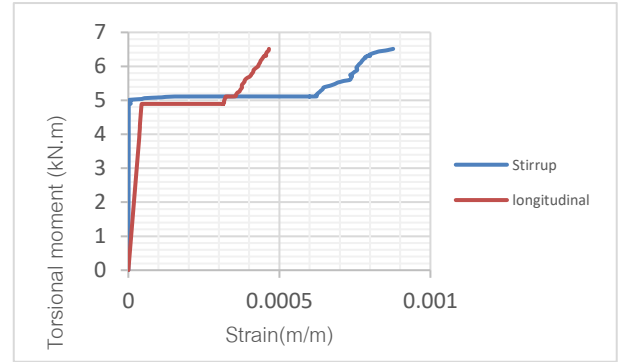
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมูมบิดของการทดสอบที่ไม่ได้เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย[1]

ภาพที่ 3 และ 4 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมูมบิดซึ่งเมื่อพิจารณาค่าของกำลังรับแรงบิดจะพบว่าค่ามีขนาดที่ใกล้เคียงกันแต่เมื่อสังเกตที่ค่าของมูมบิดจากทั้งสองภาพพบว่าค่าที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองยังไม่สมจริงมากเพียงพอซึ่งเป็นมาจากการสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองในขั้นตอนที่เป็นการสร้างพันธะระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นพันธะสมบูรณ์และในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองระหว่างที่ทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรมพบว่าโปรแกรมได้ให้ใส่ constraints เพิ่มในตำแหน่งตรงกลางแบบจำลองเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ถึงจะสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ซึ่งผลเหล่านี้ อาจจะเป็นไปได้ที่ทำให้ส่งต่อมูมบิดของแบบจำลอง

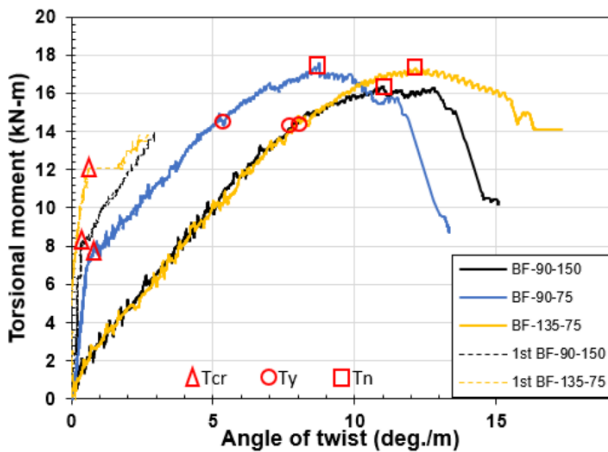


ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของแบบจำลองที่ได้เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

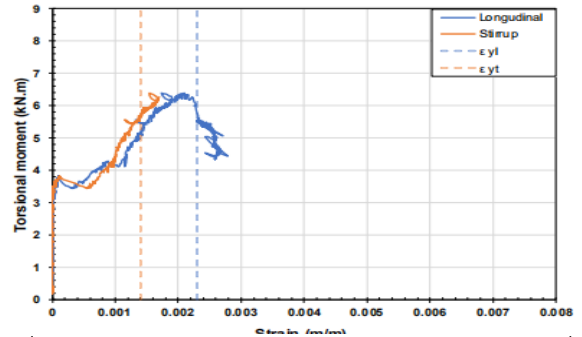
เคลื่อนที่ถึงจะสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้นอกจากนี้สาเหตุที่เส้นกราฟจากแบบจำลองนั้นไม่มีการโค้งลงมาจากค่าของเหล็กเสริมทั้ง 2 ชนิด ยังมีค่าไม่ถึงจุดครากจึงทำให้ไม่เกิดการโค้งลงมาจากเส้นกราฟดังนั้นได้มีการตรวจสอบเพื่อหาสาเหตุที่ได้ค่าเป็นเช่นนี้พบว่าคอนกรีตของแบบจำลองบริเวณที่มีการใน constraints ได้เกิดความเสียหายจากการรับแรงบิดทำให้ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองสิ้นสุดที่เท่านี้



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงบิดและเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของแบบจำลอง



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิดของการทดสอบที่ไม่ได้เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย[1]



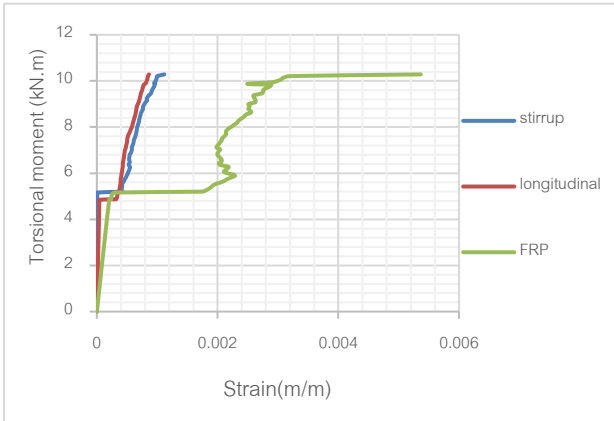
ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงบิดและเหล็กเสริมที่มีการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของการทดสอบ[1]

จากภาพที่ 5 และ 6 ที่แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและมุมบิดของแบบจำลองและการทดสอบจริงพบว่ามีความที่แตกต่างกันอยู่เนื่องด้วยในการวิเคราะห์ของแบบจำลองไม่สามารถวิเคราะห์ได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำที่ใส่ในแบบจำลองและมีการเสียหายของแบบจำลองนอกขอบเขตที่โครงการสนใจสาเหตุมาจากการวิบัติของคอนกรีตที่ตำแหน่งใส่ constraints ซึ่งไม่อยู่ในขอบเขตที่สนใจในการวิเคราะห์

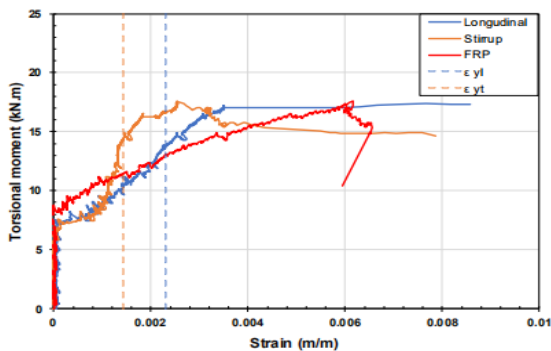
5.5 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริม

จากภาพที่ 7 และ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงบิดและความเครียดของเหล็กเสริมจากแบบจำลองและจากการทดสอบจริงจะพบว่าในส่วนที่เป็นค่าของกำลังรับแรงบิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่ในส่วนของความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกมีค่าที่ต่างกันมีสาเหตุมาจากการสร้างแบบจำลองได้มีการใส่ constraints เพิ่มในตำแหน่งตรงกลางแบบจำลองเพื่อป้องกันการ

จากภาพที่ 9 และ 10 ที่แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงบิดกับเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในแบบจำลองที่การเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่าที่เป็นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีความเครียดที่มากที่สุดใกล้เคียงกับการทดสอบจริงแต่การเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความเครียดเกิดขึ้นเร็วกว่าการทดสอบจริง ในส่วนที่เป็นเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกมีข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบได้อย่างแน่ชัด



ภาพที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงบิดกับเหล็กเสริมที่มีการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของแบบจำลองและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



ภาพที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงบิดกับเหล็กเสริมที่มีการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของแบบจำลองและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย[1]

6. สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการทดสอบของโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงและสมการการทำนายกำลังรับแรงบิดสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ผลวิเคราะห์ผลกำลังรับแรงบิดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเทียบกับสมการการทำนายกำลังรับแรงบิดของ ACI 318-19 จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ 19.2 เปอร์เซ็นต์ในกรณีที่เป็นการคำนวณกำลังรับแรงบิดที่จุดแตกหักและมีความคลาดเคลื่อน 30.21 เปอร์เซ็นต์ในกรณีที่เป็นการคำนวณกำลังรับแรงบิดสูงสุด

6.2 ผลวิเคราะห์ที่ได้แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงมีค่าความคลาดเคลื่อน 11.45 เปอร์เซ็นต์ในกรณีที่เป็นการคำนวณกำลังรับแรงบิดที่จุดแตกหักและมีความคลาดเคลื่อน 1.84 เปอร์เซ็นต์ในกรณีที่เป็นการคำนวณกำลังรับแรงบิดสูงสุด

6.3 เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ผลกำลังรับแรงบิดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเทียบกับการทดสอบจริงและสมการการทำนายกำลังรับแรงบิดของ FIB ไม่สามารถหาค่าจากแบบจำลองได้เนื่องจากในแบบจำลองสามารถวิเคราะห์ผลได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ไม่สามารถหาค่ากำลังรับแรงบิดสูงสุดได้

6.4 มุมของการบิดในแบบจำลองทั้งที่มีและไม่มีเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็ก มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริง

6.5 ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามและเหล็กปลอกของแบบจำลองทั้งที่มีและไม่มีเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดสอบจริง

6.6 ความเครียดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากแบบทดสอบมีค่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงแต่มีจุดเริ่มต้นของการเพิ่มเร็วกว่า

6.7 แบบจำลองที่ได้มีการสร้างขึ้นยังมีปัญหาเกี่ยวกับการใส่ constraints อยู่ซึ่งทำให้ค่าที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนในกรณีที่เป็นแบบจำลองที่ไม่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าของมุมบิดและความเครียดของเหล็กเสริมแตกต่างจากการทดสอบจริง ในกรณีที่เป็นแบบจำลองที่มีการเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่ามีการเสียหายของคอนกรีต บริเวณด้านข้างของ constraints ซึ่งทำให้ในการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรมนั้นสามารถวิเคราะห์ผลได้แค่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงบิดสูงสุดจากการทดสอบ จาก 2 กรณีของแบบจำลองพบว่าสาเหตุที่ทำให้ในการวิเคราะห์จากแบบจำลองไม่ได้ค่าตามที่ต้องการมีส่วนมาจากการใส่ constraints ซึ่งไม่ได้มีการสร้างเป็น steel plate เพื่อใช้ในการใส่ constraints เนื่องจากไม่มีข้อมูลในส่วนนี้ทำให้ทางผู้ทำโครงการต้องตั้งสมมติฐานเองในการใส่ constraints ทำให้เกิดความผิดพลาดของการวิเคราะห์ผลได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือและได้รับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและพัฒนาทักษะต่างๆ จากรองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศิวกร สร้อยศักดิ์ เจ้าของผลงานการวิจัย ที่ได้ให้คำปรึกษาคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพัฒนาการสร้างแบบจำลองของโครงการร่วมตลอดจนการแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ มาโดยตลอดระยะเวลาการทำโครงการ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] คิวกร สร้อยศักดิ์. (2562). “การเสริมกำลังรับแรงบิดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] อมร พิมาณมาศ และ ประกาศิต จันทนลิขิต. (ม.ป.ป.). “การใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังเสาอาคารต้านทานแผ่นดินไหว” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ACI Committee 318. (2019). “Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19).” American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI
- [4] Ameli, M., Ronagh, H. R., and Dux, P. F. (2007). “Behavior of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams under Torsion” J. Compos. Constr., 11(2): 192-200
- [5] Csikos, A., and Hegrdus, I. (1998). “Torsion of Reinforced Concrete Beams” Budapest: Technical University of Budapest
- [6] Darwin, D., Dolan, C. W., and Nilson, A. H. (2016). “Design of Concrete Structures” 15th ed. New York: McGraw-Hill
- [7] Kamara, M. E., Ph.D., and Rabbat, B. G., Ph.D., S.E. (2007). “Torsion Design of Structural Concrete Based on ACI 318-05”
- [8] Panchacharam, S., and Belarbi A. (2002). “Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites,” First FIB Congress, Osaka, Japan, October 13-19
- [9] Sayed, A. M., Wang X., and Wu, Z., M.ASCE (2013). “Modeling of Shear Capacity of RC Beams Strengthened with FRP Sheets Based on FE Simulation” J. Compos. Constr., 17(5): 687-701
- [10] Thongchom C., Lenwari A., and Aboutaha R. S. (2019). “Effect of Sustained Service Loading on Post-Fire Flexural Response of Reinforced Concrete T-Beams” ACI Structural Journal, pp. 243-254
- [11] Wight, J. K. (2016). “Reinforced Concrete: Mechanics and Design” 7thed. New Jersey: Pearson
- Wight, J. K., and Macgregor, J. G. (2012). “Reinforced Concrete: Mechanics and Design” 6thed. New Jersey: Pearson