

การประเมินระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตช่วงเดียวเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

DEFLECTION PREDICTION OF SIMPLY-SUPPORTED CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP) BARS

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช *

Assist.Prof. Chatshawal Poonlappanish

ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์ **

Nuttawat Chutarat

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบค่าประเมินระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ช่วงเดียวซึ่งคำนวณด้วยค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลต่างกัน 6 สมการ กับผลตรวจวัดพฤติกรรมโก่งตัวของคานทดสอบขนาดเท่าจริงที่ทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ third point loading จำนวน 1 ตัวอย่าง ผลวิจัยพบว่าสมการ Bischoff and Gross (2011) ประเมินค่าการโก่งตัวได้แม่นยำที่สุด มีค่าความคลื่อนเฉลี่ย (avg. error) เท่ากับ 3.7% ส่วนสมการ ACI 440.1R-06 และ Yost et al. (2003) ให้แนวโน้มค่าผลคำนวณระยะโก่งตัวที่มากกว่าผลวัดเล็กน้อยเหมาะสำหรับใช้เป็นค่าประเมินกรณีเพื่อความปลอดภัย (conservative)

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว , การประเมินค่าระยะโก่งตัว, คานคอนกรีต

ABSTRACT

The paper investigates the accuracy of deflection predictions of simply supported concrete beams reinforced with GFRP bars. By comparing the deflection calculated from six effective moment of inertia expressions with the measured deflection values of a full-scale beam subjected to third point loading, the results indicate that the deflection calculated from Bischoff and Gross (2011)'s expression shows the most accurate with the average error of 3.7%. The ACI 440.1R-06 and Yost et al. (2003)'s expressions predicted overly conservative value .

Keywords: GFRP bar reinforced concrete, Deflection prediction, Concrete beam

* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

** อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

1. บทนำ

ปัจจุบันวงการก่อสร้างไทยเริ่มนำวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ขึ้นรูปเหมือนแท่งเหล็กเส้น (rebars) มาใช้เสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตแทนที่เหล็กกล้าในปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนดีเยี่ยม ไม่เกิดสนิม ได้โครงสร้างคอนกรีตที่เพิ่มความทนทาน เสื่อมสภาพช้าลงกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) อย่างไรก็ตาม GFRP เป็นวัสดุยืดหยุ่นสมบูรณ์ แตกหักฉับพลันไม่ครากตัวขณะพืบัติ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (35- 50 GPa) ต่ำกว่าเหล็กกล้า (200 GPa) ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริม GFRP โกงตัวเสียรูปมากกว่าและเกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่กว่าโครงสร้าง คสล.ปกติ

Vijay and GangaRao (2001) เปรียบเทียบข้อมูลผลทดสอบการโก่งตัวคานคอนกรีตเสริม GFRP จำนวน 77 ตัวอย่าง กับผลคำนวณด้วยสมการที่เสนอโดย ACI 318-99 และ ACI-440.1R-01 พบว่าผลการคำนวณไม่น่าพึงพอใจ ทำให้สมาคมคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ปรับปรุงวิธีประเมินค่าระยะโก่งตัวของคานเสริม FRP ในคู่มือ ACI-440.1 สี่ครั้งในช่วงเวลา 2 ทศวรรษ งานวิจัยนี้ได้จัดทำตัวอย่างโครงสร้างคานช่วงเดียวชนิดคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP ขนาดเท่าจริง (full scaled) จำนวน 1 ตัวอย่าง ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโก่งตัวขณะใส่น้ำหนักบรรทุกทดสอบแบบ third point loading นำไปศึกษาเปรียบเทียบกับผลคำนวณค่าระยะโก่งตัวด้วยค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล (effective moment of inertia, I_e) แตกต่างกัน 6 สมการ ผลวิจัยจะเป็นตัวอย่างกรณีศึกษาเชิงปฏิบัติ เพื่อคัดเลือกวิธีการประเมินค่าระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริม GFRP ที่ให้ผลคำนวณแม่นยำใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่ตรวจวัดได้จากโครงสร้างจริง

2. ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของหน้าตัดคาน

การคำนวณค่าระยะโก่งตัวของคานคอนกรีต ใช้สูตรคำนวณค่าการโก่งตัวของคานที่มาจากทฤษฎีอิลาสติก โดยนำค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล (effective moment of inertia, I_e) แทนในพจน์สติฟเนสของสูตร ขณะเริ่มต้นรับน้ำหนักบรรทุกหน้าตัดคานยังไม่แตกร้าว ค่า I_e เท่ากับค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียรวม (gross moment of inertia, I_g) จากนั้นจะแปรค่าลดลงต่อเนื่องไปสู่ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียแตกร้าว (cracking moment of inertia, I_{cr}) ขณะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อเนื่อง

Branson (1965) เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ต้นแบบอันดับแรก เพื่ออธิบายการแปรค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียจากค่า I_g ไปสู่ค่า I_{cr} ด้วยสมการ (1) โดย ACI 318-71 และ ACI 440.1R-01 ได้นำสมการนี้ไปใช้คำนวณค่าระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริม FRP ในระยะเริ่มจัดทำคู่มือแนะนำการออกแบบ

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

M_a คือ โมเมนต์ดัดกระทำ (applied moment) สูงสุดที่เกิดในองค์อาคาร ค่า I_g และ I_{cr} คำนวณค่าด้วยสมการ (2) (3) และ (4) ส่วนค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว M_{cr} คำนวณด้วยสมการ (5) b, h, d คือ ระยะความกว้าง ความลึก และความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคาน A_f คือ พื้นที่หน้าตัดวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อรับแรงดึง ρ_f คืออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อรับแรงดึงต่อเนื้อที่ประสิทธิผลของหน้าตัดคาน $\left(\rho_f = \frac{A_f}{b d}\right) E_f E_c$ คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไฟเบอร์เสริมกำลังและคอนกรีต n_f คือ อัตราส่วนโมดูลาร์ระหว่างไฟเบอร์เสริมกำลังและ

คอนกรีต $(n_f = \frac{E_f}{E_c})$ f'_c คือ ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต y_t คือ ระยะจากแกนสะเทินไปยังศูนย์กลางของเนื้อคอนกรีตรับแรงดึง $\lambda = 1$ คือ ตัวคูณสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ

$$I_g = \frac{bd^3}{12} \quad (2)$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (3)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f \quad (4)$$

$$M_{cr} = \frac{0.62\lambda \sqrt{f'_c} I_g}{y_t} \quad (5)$$

นักวิจัยหลายคนได้นำเสนอวิธีการปรับค่าผลคำนวณใกล้เคียงกับผลวัดจากคานทดสอบมากขึ้น แนวคิดหนึ่งคือการเพิ่มตัวคูณปรับแก้ β_d ลงในสมการเพื่อลดอิทธิพลของแรงดึงรั้ง (tension stiffening) ระหว่างวัสดุ FRP กับเนื้อคอนกรีตที่แตกร้าวดังสมการ (6) ACI 440.1R-03 ได้แนะนำสมการนี้ในเอกสารคู่มือควบคุมกับเสนอสมการ (7) สำหรับประเมินค่า β_d โดยแนะนำให้ใช้ค่า α_b (bond-dependent coefficient) = 0.5 ใช้คำนวณทั้งกรณีคานคอนกรีตเสริม FRP และคาน คสล.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (6)$$

$$\beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_f}{E_s} + 1\right) \quad (7)$$

Yost et al. (2003) วิเคราะห์ข้อมูลผลทดสอบคานคอนกรีตเสริม GFRP จำนวน 48 ชิ้น พบว่าค่า α_b ที่ได้ต่ำกว่า 0.5 อย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าค่า α_b ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน (ρ_f/ρ_{fb}) โดย ρ_{fb} คืออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อรับแรงดึงต่อเนื้อที่ประสิทธิภาพของหน้าตัดคานที่ทำให้เกิดสภาวะความเครียดสมดุล (the balanced reinforcement ratio) และเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความถดถอย ได้ค่า α_b ดังสมการ (8)

$$\alpha_b = 0.064 \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) + 0.13 \quad (8)$$

ACI 440.1R-06 แนะนำสมการ (9) เพื่อคำนวณค่า β_d รูปแบบอย่างง่าย ซึ่งวิเคราะห์จากผลทดลองจำนวนมากจากงานวิจัยของ Toutanji and Saafi (2000) และ Yost et al. (2003)

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1.0 \quad (9)$$

Bischoff (2005); Bischoff and Scanlon (2007) เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ของค่า I_e สมการใหม่รวมทั้งเสนอค่าตัวประกอบ γ เพื่อเฉลี่ยค่า flexibility $(1/E_c I)$ จากสภาพแตกร้าวของหน้าตัดตลอดความยาวคานให้ได้ค่าสติเฟนเฉลี่ยเพื่อใช้คำนวณระยะโก่งตัวดังแสดงไว้ในสมการ (10) ค่า γ ขึ้นกับรูปแบบน้ำหนักบรรทุกรูปแบบจุดรองรับ ดังแสดงในตารางที่ 1 ในภายหลัง ACI 440.1R-15 ได้แนะนำสมการดังกล่าวสำหรับคำนวณระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริม FRP

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \quad \text{เมื่อ} \quad M_a > M_{cr} \quad (10)$$

Bischoff and Gross (2011) เสนอให้ลดค่าโมเมนต์แตกร้าวในสมการค่า I_e เพื่อพิจารณาผลจากหน่วยแรงดึงภายในคอนกรีตขณะหดตัวภายใต้การยึดรั้ง (f_{res} , shrinkage restraint stress) กับวัสดุเสริมกำลังหรือยึดรั้งจุด

รองรับขององค์อาคาร โดย Scanlon and Bischoff (2008) ประมาณค่า $f_{res} \approx f_r/3$ สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก และ $f_{res} \approx f_r/5$ สำหรับคอนกรีตเสริม FRP ทำให้ค่าโมเมนต์แตกร้าวที่ปรับค่าลดลง (M'_{cr}) เหลือ $0.67M_{cr}$ และ $0.80M_{cr}$ ตามลำดับ จนได้สมการ (11)

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M'_{cr}}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)} \quad \text{เมื่อ} \quad M_a > M'_{cr} \quad (11)$$

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวอย่างคานทดสอบ

เป็นคานช่วงเดี่ยวยาว 5 m มีระยะช่วงคาน 4.8 m รับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่นสม่ำเสมอ จำแนกเป็น DL = 14.82 kN/m และ LL = 12.80 kN/m คุณสมบัติวัสดุประกอบด้วย กำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c) = 20 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย GFRP (f_{fu}^*) = 550 MPa ใช้ค่า C_E ตัวคูณลดกำลังดึงจากสภาพแวดล้อมที่สัมผัส = 0.70 ออกแบบคานตามวิธีของ ACI 440.1R-15 กำหนดให้เสริมแรงทางเดียวและพืบัติโดยแรงอัดในคอนกรีต ได้ขนาดหน้าตัดคานกว้าง 250 mm ลึก 550 mm เสริมแท่ง GFRP ตามแนวยาว ด้านบน $\varnothing 10$ mm. จำนวน 2 เส้น ด้านล่าง $\varnothing 25$ mm. จำนวน 5 เส้น เสริมปลอก GFRP แนวตั้ง $\varnothing 6$ mm. ระยะเรียง 180 mm มีค่าโมเมนต์ดัดออกแบบ (ϕM_n) = (0.65)(238) = 154.7 kN-m $M_{cr} = 34.95$ kN-m $I_g = 3.466 \times 10^9$ mm⁴ $I_{cr} = 7.648 \times 10^8$ mm⁴ $\left(\frac{I_g}{I_{cr}} \right) = 4.532$ และ $\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) = 1.64$

3.2 วิธีการทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ใช้วิธีใส่น้ำหนักบรรทุกทดสอบแบบ third point loading ด้วยแรงกด P ที่กึ่งกลางคานกระจายแรงออกเป็นสองจุด ขณะทดสอบจะเพิ่มแรงกดคราวละ 1,000 kg และจะหยุดทุก 2,000 kg เพื่อวาดรอยร้าว ตัวคานติดตั้ง Dial Gauge จำนวน 3 ตัว เพื่อวัดระยะโก่งตัว Dial Gauge#1 และ Dial Gauge#2 ติดตั้งที่กึ่งกลางคานด้านล่างตามแนวยาว วัด offset จากแนวเส้นกึ่งกลางตามแนวขวางด้านล่างละ 5 cm. ส่วน Dial Gauge#3 ติดตั้งที่ด้านล่างคาน ห่างจากกึ่งกลางคานตามแนวยาวออกมา 30 cm. ดังในรูปที่ 1 ทำการทดสอบจนคานพืบัติ ได้ข้อมูลทดสอบ load – deflection ดังตารางที่ 1

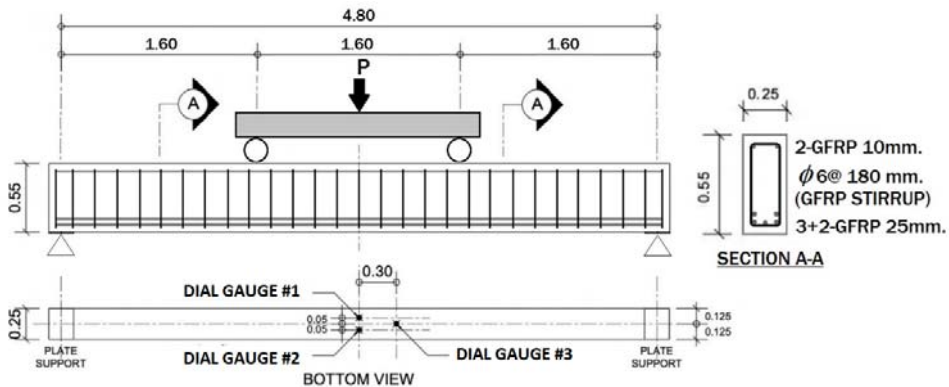
3.3 การคำนวณค่าระยะโก่งตัว

กรณีคานรับน้ำหนักบรรทุกแบบ third-point loading คำนวณด้วยสมการ (12) และใช้สมการ (13) คำนวณค่าโมเมนต์ดัดกระทำสูงสุด (applied moment, M_a)

$$\Delta = \frac{23}{1296} \left(\frac{PL^3}{E_c I_e} \right) \quad (12)$$

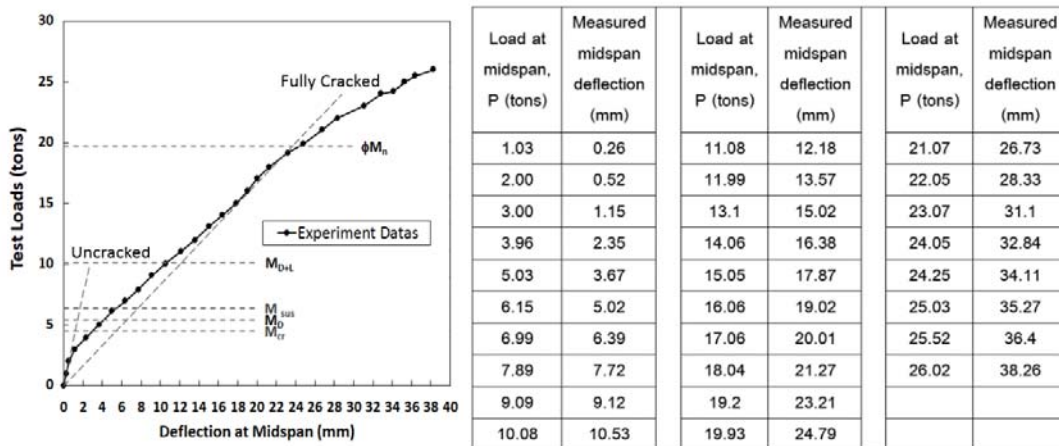
$$M_a = \frac{PL}{6} \quad (13)$$

โดย P คือค่าแรงกดรวมที่กึ่งกลางคาน L คือระยะช่วงคาน E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของสูตรค่า I_e ทั้ง 6 สมการที่งานวิจัยนำมาศึกษาเปรียบเทียบ ตัวอย่างที่กำกับ พร้อมแหล่งอ้างอิง



รูปที่ 1 รายละเอียดของชิ้นงานคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP การจัดวางชิ้นงาน น้ำหนักบรรทุกทดสอบ และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมโก่งตัว

ตารางที่ 1 ข้อมูลผลวัด load – deflection ของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกคานทดสอบ

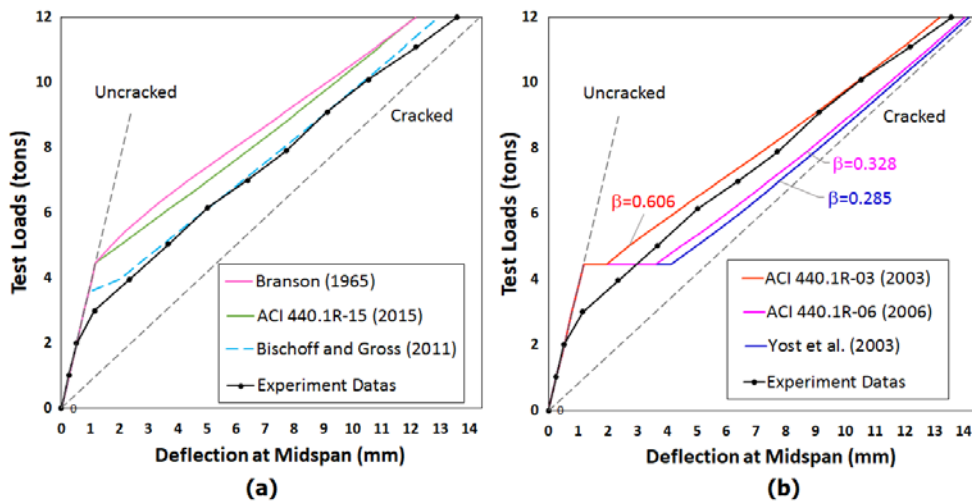


4. วิเคราะห์ผล

ในรูปที่ 2 (a) แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าผลวัด load-deflection ของคานทดสอบ กับเส้นกราฟ load-deflection ที่คำนวณด้วยค่า I_{e1} , I_{e5} และ I_{e6} ค่า I_{e1} และ I_{e5} เป็นสมการจากแบบจำลองต้นแบบของ Branson (1965) และ Bischoff (2005) ที่กำหนดค่า M_{cr} ด้วยผลคำนวณตามสมการ (5) ในขณะที่ I_{e6} เป็นสมการค่า I_e ของ Bischoff (2005) ที่ลดค่าโมเมนต์แตกร้าวลง ($M'_{cr} = 0.80M_{cr}$) ข้อมูลในตารางที่ 3 ชี้ว่าผลคำนวณ deflection ด้วย I_{e6} ให้ผลสอดคล้องดีที่สุด ตามด้วยผลคำนวณโดย I_{e5} และ I_{e1} ทั้งสามสมการให้ผลประเมินน้อยกว่าผลวัด คานทดสอบคิดเป็นค่า avg. error 3.7%(-) 26.1%(-) และ 30.5%(-) ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบ สมการ I_e ของ Bischoff (2005) ให้ผลคำนวณ deflection ที่ใกล้เคียงกว่า Branson (1965) แต่ค่าระยะต่างกันเพียงเล็กน้อย (ไม่เกิน 0.7 mm.) ปัจจัยที่มีนัยสำคัญเป็นสาเหตุทำให้ผลคำนวณต่างไปจากผลวัดคานทดสอบมาก คือ I_{e1} และ I_{e5} กำหนดค่าโมเมนต์แตกร้าวลของหน้าตัดคานสูงกว่าค่าจากพฤติกรรมของโครงสร้างจริง หน้าตัดคานทดสอบที่แตกร้า

ตารางที่ 2 แสดงค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล 6 สมการ ที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบ

Source	Effective Moment of Inertia	abbreviation
Branson (1965) ACI 440.1R-01	$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$	I_{e1}
Modified Branson (1965) ACI 440.1R-03	$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$ $\beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_f}{E_s} + 1\right), \alpha_b = 0.5$	I_{e2}
Yost et al. (2003) ACI 440.1R-06	$\beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_f}{E_s} + 1\right), \alpha_b = 0.064 \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) + 0.13$ $\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1.0$	I_{e3} I_{e4}
Bischoff (2005) ACI 440.1R-15	$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)}$ เมื่อ $M_a > M_{cr}$	I_{e5}
Bischoff and Gross (2011)	$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M'_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)}$ เมื่อ $M_a > M'_{cr}$ $M'_{cr} = 0.80 M_{cr}$ for FRP-reinforced concrete	I_{e6}



รูปที่ 2 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าผลวัด load-deflection ของคานทดสอบ กับเส้นกราฟผลคำนวณค่า deflection
(a) คำนวณด้วย I_{e1} I_{e5} และ I_{e6} (b) คำนวณด้วย I_{e2} I_{e3} และ I_{e4}

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าผลวัด deflection ของคานทดสอบ และผลคำนวณด้วยค่า I_e ของ 6 สมการ

Experiment	Load deflection (mm)	Branson(1965)		ACI 440.1R-03		Yost (2003)		ACI 440.1R-06		Bischoff (2005)		Bischoff and Gross (2011)	
		Deflection (mm)	Ratio	Deflection (mm)	Ratio	Deflection (mm)	Ratio	Deflection (mm)	Ratio	Deflection (mm)	Ratio	Deflection (mm)	Ratio
M_{cr}	2.95	1.18	0.40	1.94	0.66	4.13	1.40	3.59	1.22	1.18	0.40	2.67	0.91
$1.5 M_{cr}$	5.88	3.91	0.66	5.27	0.90	7.36	1.25	6.99	1.19	4.58	0.78	5.81	0.99
$2.0 M_{cr}$	8.92	7.40	0.83	8.76	0.98	10.29	1.15	10.06	1.13	7.86	0.88	8.87	0.99
$2.5 M_{cr}$	12.26	10.88	0.89	11.99	0.98	13.09	1.07	12.93	1.05	10.97	0.89	11.85	0.97
avg. Error		30.5% (-)		12.2% (-)		21.8% (+)		14.7% (+)		26.1% (-)		3.7% (-)	

ก่อน ทำให้ค่า deflection ของคานทดสอบเพิ่มขึ้นด้วยอัตราสูงนำหน้าค่าผลค่านวณประมาณ 1.8 mm. ก่อนค่า I_e ของหน้าตัดคานซึ่งค่านวณจากสมการทั้งคู่จะเริ่มแตกร้า

ในรูปที่ 2 (b) แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าผลวัด load-deflection ของคานทดสอบ กับเส้นกราฟ load-deflection ที่ค่านวณด้วยค่า I_{e2} I_{e3} และ I_{e4} ทั้งสามสมการนำค่าตัวคูณปรับแก้ β_d คุณพจน์ค่า I_g ของ Branson (1965) เท่ากับ 0.606 0.285 0.328 ตามลำดับ ผลค่านวณค่า deflection ภายหลังจากหน้าตัดคานแตกร้า มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลผลวัดของคานทดสอบมากขึ้น จากข้อมูลในตารางที่ 3 ผลค่านวณ deflection ด้วย I_{e2} มีค่าต่ำกว่าผลวัดคานทดสอบคิดเป็น avg. error 12.2%(-) ในขณะที่ผลค่านวณด้วย I_{e4} และ I_{e3} ได้ค่าสูงมากกว่า มี avg. error เท่ากับ 14.7%(+) และ 21.8%(+) จากรูปที่ 2 (b) ค่า I_e ของทั้งสามสมการไม่ได้ให้แนวเส้นกราฟ load-deflection ใกล้เคียงผลวัดคานทดสอบมากนัก อย่างไรก็ตามค่า β_d ของ I_{e3} และ I_{e4} ได้มาจากการสอบเทียบกับข้อมูลทดสอบคานจำนวนมาก มีความน่าเชื่อถือ และให้แนวโน้มค่าผลค่านวณค่า deflection ในด้าน conservative จึงเหมาะสมสำหรับใช้ประเมินค่าระยะโก่งตัวของคานที่ให้ค่ากรณีเพื่อความปลอดภัย

5 สรุปผล

5.1) จากกรณีศึกษาพบว่าสมการค่า I_e ที่เหมาะสมใช้ประเมินค่าการโก่งตัวของคานทดสอบ GFRP ได้แม่นยำที่สุดคือ Bischoff and Gross (2011) มีค่าความคลื่อนเฉลี่ยของผลค่านวณ (avg. error) เท่ากับ 3.7% (-) ลำดับถัดมาได้แก่ ACI 440.1R-03 ACI 440.1R-06 และ Yost et al. (2003) ซึ่งมีค่า avg. error เท่ากับ 12.2%(-) 14.7%(+) 21.8%(+) ตามลำดับ

5.2) สมการค่า I_e ของ Branson (1965) และ Bischoff (2005) ให้ผลค่านวณค่าระยะโก่งตัวต่ำกว่าผลวัดคานทดสอบ โดยมี avg. error 30.5%(-) และ 26.1%(-) ทั้งสองสมการไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเนื่องจากมีค่าความคลื่อนเฉลี่ยของผลค่านวณสูง และมีผลค่านวณ deflection ไม่ conservative ปัจจัยหลักที่เป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากการกำหนดค่าประเมินโมเมนต์ดัดแตกร้าของหน้าตัดคานในสมการ I_e สูงเกินจุดแตกร้าของผลวัดคานทดสอบ

5.3) ผลค่านวณ deflection ด้วยสมการค่า I_e ที่เสนอโดย ACI 440.1R-06 และ Yost et al. (2003) ให้แนวโน้มผลค่านวณค่า deflection มากกว่าผลวัดคานทดสอบเล็กน้อย เหมาะสมสำหรับใช้ประเมินค่าระยะโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริม GFRP กรณีเพื่อความปลอดภัย (conservative) หรือเป็นค่าประเมินที่ขีดจำกัดบน

6. ข้ออภิปรายและเสนอแนะ

6.1) เนื่องจากบทความนำเสนอข้อมูลเปรียบเทียบกรณีศึกษาของผลทดสอบคานคอนกรีตเสริม GFRP เพียง 1 ตัวอย่าง วิเคราะห์ผลจากข้อมูลทดสอบจำนวนจำกัด ข้อสรุปของกรณีศึกษานี้จึงควรใช้เป็นเพียงข้อเสนอแนะหรือข้อมูลสนับสนุนสำหรับการเลือกประยุกต์ใช้งานเท่านั้น

6.2) ควรเพิ่มตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริม GFRP ที่ออกแบบด้วยคุณสมบัติการเสริมกำลังที่ต่างออกไป เช่นหน้าตัดคานที่มีอัตราส่วน $\left(\frac{I_g}{I_{cr}}\right)$ หรือ $\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right)$ ในช่วงค่าอื่นๆ หรือคานพิบัติจากแรงดึงเป็นหลัก

7. บรรณานุกรม

ACI Committee 440. (2001). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1 R-01)*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA.

ACI Committee 440. (2003). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1 R-03)*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA.

ACI Committee 440. (2006). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1 R-06)*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA.

ACI Committee 440. (2015). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1 R-15)*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA.

Bischoff, P. H. (2005). Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 5, pp. 752-762.

Bischoff, P. H. and Scanlon, A. (2007). Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement. *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 1, pp. 68-75.

Bischoff, P.H., and Gross, S.P. (2011a). Equivalent Moment of Inertia Based on Integration of Curvature. *Journal of Composite*, Vol. 15, No. 3, pp. 263-273.

Bischoff, P.H., and Gross, S.P. (2011b). Design Approach for Calculating Deflection of FRP-Reinforced Concrete. *Journal of Composite*, Vol. 15, No. 4, pp. 490-499.

Branson, D. E. (1965). Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams. *HPR Report No. 7*, Part 1, pp. 1-78. Alabama Highway Department.

Scanlon, A., and Bischoff, P. H. (2008). Shrinkage Restraint and Loading History Effects on Deflection of Flexural Members. *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 4, pp. 498-506

Toutanji, H. A., and M. Saafi. (2000). Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-reinforced Polymer (GFRP) Bars. *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 5, pp. 712-719.

Yost, J.R., Gross, S.P., and Dinehart, D.W. (2003). Effective Moment of Inertia for GFRP Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, pp. 732-739.

Vijay, P.V. and GangaRao HVS. (2001). Bending Behavior and Deformability of Glass Fiber- Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 6, pp. 834-842.