



พฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นหน้าตัดรูปรางน้ำ

Structural behaviors of pfrp compression members having c-sections

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์¹⁾ สิทธิชัย แสงอาทิตย์^{*1)} และ จักษดา อัมรวงศ์²⁾

ChanonChatwivat¹⁾ Sittichai Seangathit^{*1)} and JaksadaThumrongvut²⁾

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

²⁾ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹⁾School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

²⁾Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

Received August 2012

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่รองรับแบบหมุดภายใต้แรงอัดในแนวแกน โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนรับแรงอัด และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบของ ASCE และ AISC-LRFD ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เป็นชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ประกอบขึ้นจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นหน้าตัดรูปรางน้ำ โดยมี 3 ขนาดหน้าตัดได้แก่ 76×22×6 mm 102×29×6 mm และ 152×43×10 mm จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 57 ตัวอย่าง โดยมีค่าอัตราส่วนความละเอียดอยู่ในช่วง 21.2 ถึง 187.3 จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบแบบสั้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงหน่วยแรงอัดประลัย (ultimate compressive stress) ซึ่งแตกต่างกับตัวอย่างทดสอบแบบยาวที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 80-90% ของหน่วยแรงโก่งเดาะวิกฤติ (critical buckling stress) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทางออกแบบทั้งสอง พบว่าสมการออกแบบทั้งสองทำนายหน่วยแรงโก่งเดาะวิกฤติของชิ้นส่วนรับแรงอัดได้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คำสำคัญ : เสาคู พัลทูดชั้น วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ แรงอัดในแนวแกน

Abstract

This paper presents the experimental study on the PFRP compression members having C-sections with pinned-pinned supports under axial compression. The objectives of this study are to investigate the structural behaviors and the modes of failure of the compression members and to compare the obtained results with

*Corresponding author. Tel.: +66-8-1872-7050

Email address: sitichai@sut.ac.th

those obtained from the ASCE and AISC-LRFD design equations. The specimens were built-up from single PFRP C-section, having three cross-sectional dimensions of 76×22×6 mm, 102×29×6 mm, and 152×43×10 mm. A total of 57 specimens with slenderness ratio ranging from 21.2 to 187.3 were tested. For short compression members, the behaviors are linear up to the crushing failure load. For long compression members, the linear elastic responses are in the range of 80-90% of the buckling load. By comparing the test results with those obtained from the design equations, it was found that the design equations are acceptable for predicting the critical buckling stress of the PFRP compression members.

Keywords : Column, Pultrusion, PFRP, Double c-section, Axial compression

1. บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูด (pultruded fiber-reinforced plastic หรือ PFRP) คือวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยซึ่งผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบ Pultrusion [1] โดยในช่วงกว่าสามสิบปีที่ผ่านมา วัสดุชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในต่างประเทศมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา สำหรับในประเทศไทย วัสดุชนิดนี้เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้น โดยมีบริษัทที่ผลิตวัสดุ PFRP ขายในเชิงพาณิชย์ เช่น บริษัท หิรัญ เอส เสวี จำกัด จังหวัดนครปฐม เป็นต้นวัสดุ PFRP มักถูกผลิตให้มีหน้าตัดและรูปร่างเช่นเดียวกับเหล็กรูปพรรณ เช่น หน้าตัดรูปตัวไอ (I-shapes) หน้าตัดฉาก (angles) และหน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel) เป็นต้น[2-4] เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PFRP กับวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น เหล็กและอลูมิเนียมแล้ว พบว่า วัสดุ PFRP มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง[5] มีความต้านทานการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี[6] และมีกรรมวิธีในการผลิตให้เข้ากับงานที่ต้องการและติดตั้งได้ง่าย[7] เป็นต้น จากสมบัติเด่นดังกล่าว วัสดุชนิดนี้จึงถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างภายใต้สภาวะแวดล้อมและสารเคมีและมีน้ำหนักเบาเป็นหลัก เช่น โครงสร้างของหอทำความเย็น (cooling tower) สะพานในพื้นที่ทุรกันดาร โครงสร้างทางเดินและบันไดในโรงบำบัดน้ำเสีย (water treatment

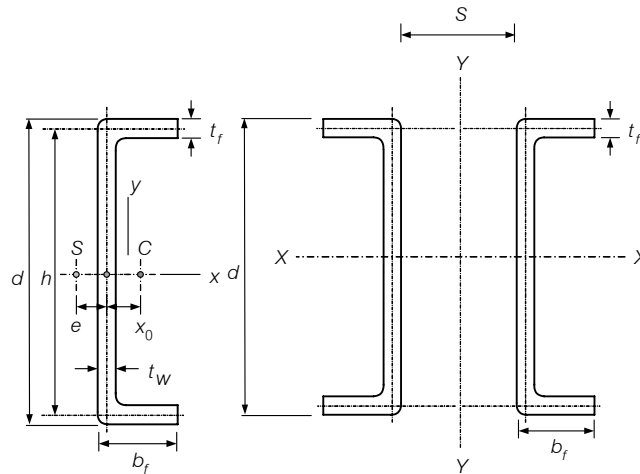
plant) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัสดุ PFRP มีความแตกต่างกันตามผู้ผลิตทำให้วิศวกรผู้ออกแบบยังคงประสบปัญหาการขาดแคลนมาตรฐานการออกแบบ (design code) ที่น่าเชื่อถือ โดยปัจจุบันพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างวัสดุ PFRP ยังคงอ้างอิงมาตรฐานของ ASCE Structural Plastic Design Manual [8] ที่ใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1984 และในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีในการผลิตได้ถูกพัฒนาอย่างมาก ดังนั้น วิศวกรจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมและสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุ PFRP ภายใต้แรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยการศึกษาและวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดที่ผลิตจากวัสดุ PFRP (PFRP compression member) และมีความชะลูด (slender) มาก เช่น โครงข้อหมุนของสะพานขนาดเล็กและระบบค้ำยันของโครงเฟรม เป็นต้น โดยมักถูกออกแบบโดยใช้ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเดียวและคู่ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้ง่ายโดยใช้สลักเกลียว (bolt) ได้ง่ายในกรณีดังกล่าว ASCE Structural Plastic Design Manual กำหนดให้ใช้สมการสำหรับการหาค่าแรงวิกฤติ (critical load) ของชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดที่มีจุดรองรับแบบหมุดในรูปของสมการของ Euler ตามสมการที่ (1) และในการออกแบบ

กำหนดให้ส่วนความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 3.0 โดยที่ E_L คือ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus of elasticity) ที่ได้จากการทดสอบแรงดัดของหน้าตัด (full-section flexural test) และ K คือ แฟคเตอร์ความยาวประสิทธิผล (effective length factor) สำหรับ

จตุรกรรับแบบต่าง ๆ ซึ่งใช้ค่าเดียวกับการออกแบบเหล็ก รูปพรรณ

$$\sigma_{ult,Euler} = \frac{\pi^2 E_L}{(KL/r)^2} \quad (1)$$



(a) หน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

(b) หน้าตัดรูปรางน้ำคู่

รูปที่ 1 ลักษณะหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและรางน้ำคู่

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคู่มือออกแบบของ ASCE อยู่บนพื้นฐานของ Working Stress Design (WSD) ซึ่งค่อนข้างล้าสมัยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นฐานการออกแบบ Load Resistant Factor Design (LRFD) ที่ใช้การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยมาตรฐานการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ได้รับการยอมรับมากมาตรฐานหนึ่งสำหรับเหล็กรางน้ำคู่คือ AISC-LRFD section E2 [9] ซึ่งกำหนดให้สมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดอยู่ในรูป

$$P_u = \phi P_n = \phi \sigma_{cr} A_g \quad (2)$$

เมื่อ

P_n คือกำลังรับแรงอัดในแนวแกน (axial compression strength)

σ_{cr} คือ หน่วยแรงอัดวิกฤติ (critical compressive stress)

สำหรับการโก่งเดาะแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic buckling)

$$\sigma_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) f_y \quad (3)$$

เมื่อ $\lambda_c \leq 1.5$ สำหรับการโก่งเดาะแบบยืดหยุ่น (elastic buckling)

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) f_y \quad (4)$$

เมื่อ $\lambda_c > 1.5$ โดยที่ f_y คือ หน่วยแรงคราก (yielding stress) และ λ_c คือ ค่าพารามิเตอร์ความชะลูด (slenderness ratio parameter) ซึ่งหาได้จาก

$$\lambda_c = \left(\frac{KL}{r\pi} \right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (5)$$

เมื่อ

E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

KL คือ ความยาวประสิทธิผล (effective length)

r คือ ค่าร้อยละของรัศมีจายเรชั่น (radius of gyration) ของหน้าตัด

ในส่วนการศึกษาวิจัยพบว่า Lue et al. [10-11] ได้นำเสนอผลการทดสอบและประเมินผลทางทฤษฎีการโก่งเดาะของเสาประกอบ (built-up column) เหล็กรูปพรรณ โดยพบว่า เสาเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดมีพฤติกรรมแบบคอมโพสิต (composite) หรือแบบประกอบ (built-up) ตามมาตรฐานการออกแบบได้นั้น หน้าตัดทั้งสองต้องได้รับการยึดแน่นหนาเพียงพอ เช่น การเชื่อมไฟฟ้าหรือการใช้สลักเกลียวที่มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อที่เพียงพอ เพื่อให้จุดเชื่อมต่อมีความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนที่เกิดขึ้นหรือเกิด composite action ระหว่างกันในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปรางหรือเกิดการโก่งเดาะ อย่างไรก็ตาม หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง FRP ในลักษณะดังกล่าวจะไม่สามารถเชื่อมต่อได้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดในการยึดหน้าตัดเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้วิศวกรไม่สามารถใช้สมการออกแบบทั้งของ ASCE และ AISC ได้โดยตรง ดังนั้น จากข้อจำกัดของการประกอบชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัด FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดในแนวแกน และนำผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ ASCE และ AISC-LRFD เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของหน้าตัดของชิ้นส่วน FRP ที่ใช้ในงานวิจัยกับเหล็กรูปพรรณ และเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาสมการ

ออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าวให้มีความปลอดภัยและทันสมัยต่อไป

2. ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นส่วนหน้าตัดรูปรางน้ำ ซึ่งถูกผลิตโดยกระบวนการผลิตพัลทรูชัน (pultrusion process) จาก E-glass fiber และ polyester resin โดยถูกนำมาประกอบเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่โดยใช้เหล็กกล่องเป็นตัวคั่น (spacer) และยึดเข้ากันด้วยสลักเกลียวผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็กกล่อง สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกศึกษาโดย หวังแก้ว บุญสวน และคณะ [12] โดยมีค่าเฉลี่ยของ σ_{ult} และ E เท่ากับ 181.1 MPa และ 34.2 GPa ตามลำดับค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด E_L ของหน้าตัดเท่ากับ 25.2 GPa ดังที่แสดงรายละเอียดและสมบัติของทั้ง 3 หน้าตัดในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตัวอย่างทดสอบมีความยาวอยู่ในช่วง 0.25-2.00 m โดยมีอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) บนพื้นฐานของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวอยู่ในช่วง 21.2 ถึง 187.3 เนื่องจากลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเสาที่ได้จากการทดสอบเป็นแบบอิสระต่อกันโดยตัวอย่างทดสอบเสาที่ศึกษาไม่มี composite action เกิดขึ้น ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3

ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 57 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

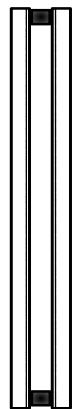
1. ตัวอย่างทดสอบที่ติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง
2. ตัวอย่างทดสอบที่ติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีจุดเชื่อมต่อที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

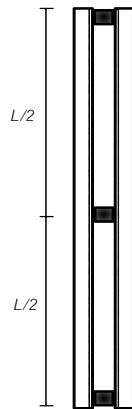
Dimension (mm×mm×mm)	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h (mm)	e (mm)	x_0 (mm)
$d \times b \times t$							
76×22×6	76	22	6	6	70	7.2	3.3
102×29×6	102	29	6	6	96	9.3	4.5
152×43×10	152	43	10	10	142	13.9	6.5

ตารางที่ 2 สมบัติของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและหน้าตัดรูปรางน้ำคู่

Dimension (mm×mm×mm)	Single C-section				Double C-section				
	Area	I_{x-x}	I_{y-y}	r_{min}	Area	I_{x-x}	I_{y-y}	r_{min}	S
	(mm ²)	(10 ⁶) (mm ⁴)	(10 ⁶) (mm ⁴)	(mm)	(mm ²)	(10 ⁶) (mm ⁴)	(10 ⁶) (mm ⁴)	(mm)	(mm)
$d \times b \times t$									
76×22×6	648	0.46	0.02	6.0	1296	0.91	0.87	25.9	38
102×29×6	888	1.17	0.05	8.0	1776	2.33	1.98	33.4	50
152×43×10	2180	6.26	0.30	11.8	4360	12.52	11.04	50.3	75



2Cd-L-N-0



2Cd-L-N-L/2

(a) ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 (b) ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

รูปที่ 2 แผนภาพตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2

ก่อนการทดสอบตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่า e หรือ initial out-of straightness โดยเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM D3917 [13] พบว่า ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่า e ต่ำกว่า $L/240$ ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังนั้น จึงไม่พิจารณาผลของการโก่งตัวเริ่มต้น (initial crookedness) ต่อค่าแรงสูงสุดที่วัดได้

ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Column number	L (mm)	K Factor	KL/r
2C76-1.0-2-0	1000	0.9	149.5
2C76-1.0-3-L/2	1000	1.0	166.1
2C76-0.7-2-0	700	1.0	93.3
2C76-0.4-2-0	400	1.0	53.1
2C76-0.25-2-0	250	1.0	33.2
2C102-1.5-2-0	1500	0.9	168.5
2C102-1.5-3-L/2	1500	1.0	187.3
2C102-1.0-2-0	1000	0.9	112.4
2C102-1.0-3-L/2	1000	1.0	124.8
2C102-0.7-2-0	700	1.0	87.4
2C102-0.4-2-0	400	1.0	49.9
2C102-0.25-2-0	250	1.0	31.2
2C152-2.0-2-0	2000	0.9	152.8
2C152-2.0-3-L/2	2000	1.0	169.8
2C152-1.5-2-0	1500	0.9	114.6
2C152-1.5-3-L/2	1500	1.0	127.3
2C152-0.7-2-0	700	1.0	59.4
2C152-0.4-2-0	400	1.0	33.9
2C152-0.25-2-0	250	1.0	21.2

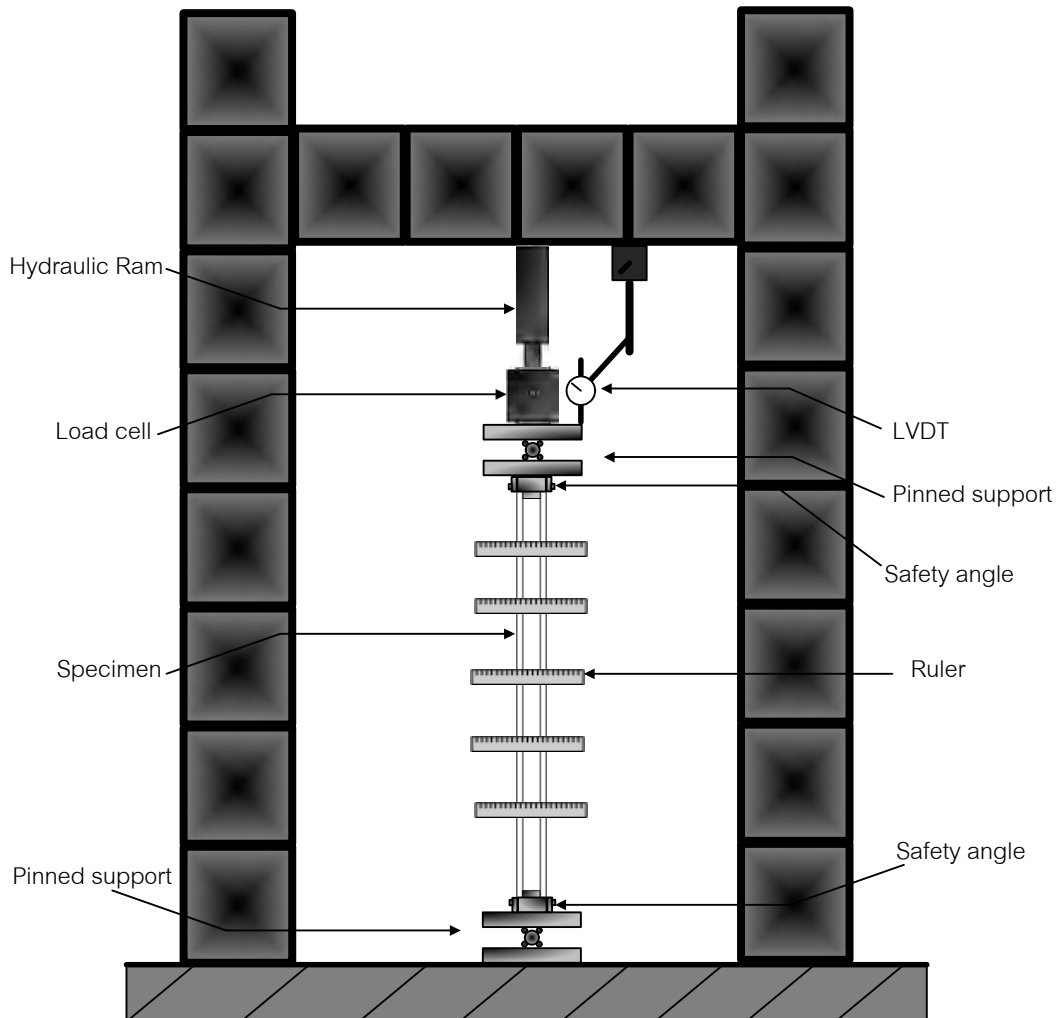
ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบซึ่งประกอบไปด้วยชื่อตัวอย่างทดสอบ ความยาว แพลเตอร์ ความยาวประสิทธิภาพ และอัตราส่วนความชะลูด ชื่อ

ตัวอย่างทดสอบถูกแสดงอยู่ในรูป “ $2Cd-L-N-S$ ” เมื่อ d คือความลึกของหน้าตัดรูปร่างน้ำเดียว L คือความยาวของตัวอย่างทดสอบ N คือ จำนวนของจุดเชื่อมต่อ และ S คือระยะที่มีการติดจุดเชื่อมต่อระหว่างกลาง ตัวอย่างเช่น 2C76-1.0-3-L/2 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดความลึกของหน้าตัดรูปร่างน้ำเดียว 76 mm ความยาว 1.0 m ติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 3 จุด โดยจุดเชื่อมต่อระหว่างหัวและท้ายอยู่ที่ระยะ $L/2$ รูปที่ 2 แสดงแผนภาพตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ โดยจุดรองรับที่ปลายทั้งสองข้างเป็นหมุด (pin) ที่หมุนได้ รอบแกนรองของหน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ และหลังจากติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับให้ตรงตามแนวตั้งแล้ว ปลายตัวอย่างทดสอบจะถูกยึดไว้ด้วยเหล็กฉากทั้งสองด้านเพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบเลื่อนออกจากจุดรองรับ ในกรณีของการโก่งเดาะทางด้านข้าง ในกรณีเสายาว จะทำการติดไม้บรรทัดจำนวน 5 ชิ้นที่ระยะ $L/6$ เพื่อบันทึกการโก่งตัวทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้น ให้แรงกระทำในแนวแกนกับตัวอย่างทดสอบโดยใช้ระบบไฮดรอลิกที่ติดตั้งไว้ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำ P ดังกล่าวจะถูกถ่ายผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (bearing plate) กระทำต่อหน้าตัดรูปร่างน้ำเดียว โดยตรงหน้าตัดละ $P/2$ ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อจำลองลักษณะการใช้งานจริงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัด และมักพบในโครงข้อหมุน และระบบยึดรั้ง จากนั้น ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนถูกวัดจาก Linear Variable Differential Transducer (LVDT) ซึ่งติดตั้งที่ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนถูกบันทึกโดย MW100 YOKOGAWA data acquisition unit สำหรับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างบันทึกจากการอ่านค่าบนไม้บรรทัดที่ติดตั้งไว้บนตัวอย่างทดสอบโดยใช้กล้องวัดมุม Theodolite อย่างไรก็ตามก่อนการทดสอบตัวอย่าง

ทดสอบจะถูกให้แรงกระทำก่อนเพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมของตัวอย่างทดสอบและจู่รองรับ สุดท้าย ตัวอย่างทดสอบจะถูกทดสอบอย่างต่อเนื่องจนไม่สามารถรับแรงได้

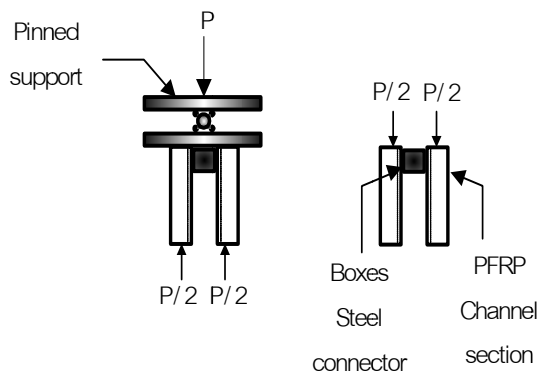
โดยสังเกตจากแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้นเลย ในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้นมาก



รูปที่ 3 ภาพกราฟฟิคแสดงรายละเอียดการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปวงรี



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบPFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดในแนวแกน



รูปที่ 5 แรงกระทำถ่ายผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทานกระทำต่อหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวโดยตรง

3. ผลและวิจารณ์การทดสอบ

3.1 พฤติกรรมและลักษณะการวิบัติ

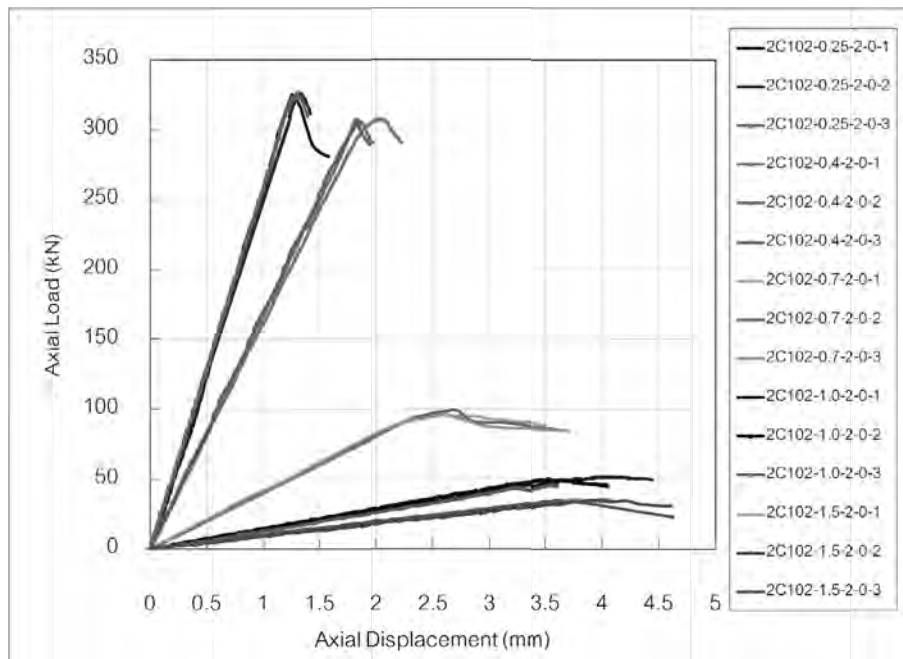
รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่ติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างดังที่แสดงในรูป 2a โดยพบว่า พฤติกรรมรับแรงอัด

ของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบแบบสั้นและแบบยาว โดยตัวอย่างทดสอบแบบสั้นมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดวิบัติ โดยการวิบัติเกิดจากการแตกของขอบบริเวณเอว (web crushing) ของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเป็นการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติของวัสดุ (material failure) จากนั้นความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนตัวอย่างทดสอบแบบยาวมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของแรงโก่งเดาะวิกฤติ (critical buckling load) จากนั้นจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นศูนย์ที่แรงโก่งเดาะวิกฤติ จากนั้นเมื่อผ่านแรงโก่งเดาะวิกฤติแล้วแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบจะมีค่าคงที่ และสุดท้ายความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบจะค่อย ๆ ลดลง

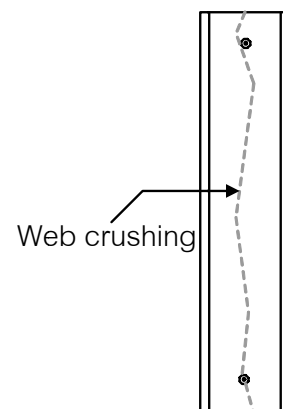
รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบแบบยาวจากรูป พบว่า ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ individual opposite buckling เนื่องจากการขาดการยึดรั้งที่เพียงพอ ดังนั้น เพื่อปรับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบแบบยาวให้เป็นแบบ individual parallel buckling ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาตัวอย่างทดสอบโดยการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบยาว ดังที่แสดงในรูป 2b โดยจากการทดสอบ พบว่าลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ individual parallel buckling ดังแสดงในรูปที่ 9 อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบยาวของทั้งสองกลุ่มมีลักษณะที่เหมือนกัน โดยแรงโก่งเดาะวิกฤติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4 เนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่ามากทำให้จุดเชื่อมต่อที่ติดตั้งเพิ่มไม่สามารถถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างหน้าตัดรางน้ำเดี่ยวและก่อให้เกิด composite

action อย่างสมบูรณ์ได้ นอกจากนี้จากการทบทวนวรรณกรรมของ Lue et al. [3] พบว่า เสาคู่รูปพรรณหน้าตัดรูปร่างน้ำคูลูกภายใต้แรงอัดมีพฤติกรรมแบบคอมโพสิต (composite) ได้นั้น หน้าตัดทั้งสองต้องได้รับ

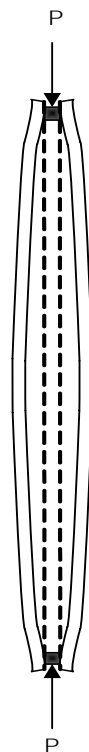
การยึดแน่นหนาเพียงพอ เช่น การเชื่อมไฟฟ้าหรือการใช้สลักเกลียวที่มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อน้อยมาก ซึ่งหน้าตัดของชิ้นส่วน FRP ในลักษณะนี้จะทำได้ยากและไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ



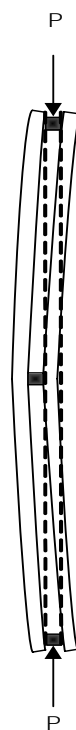
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ



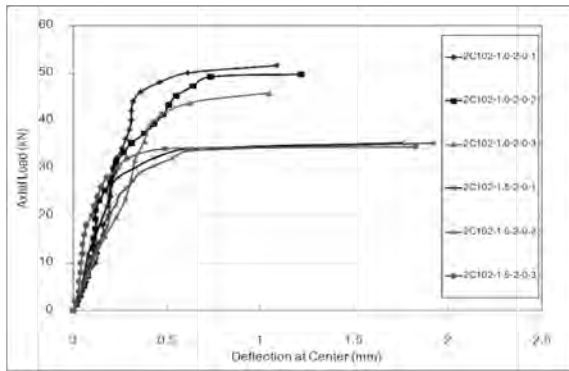
รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติโดยวัสดุของตัวอย่างทดสอบเสาแบบสั้น



รูปที่ 8 ลักษณะการบิดตัวของตัวอย่างทดสอบยาวแบบ individual opposite buckling

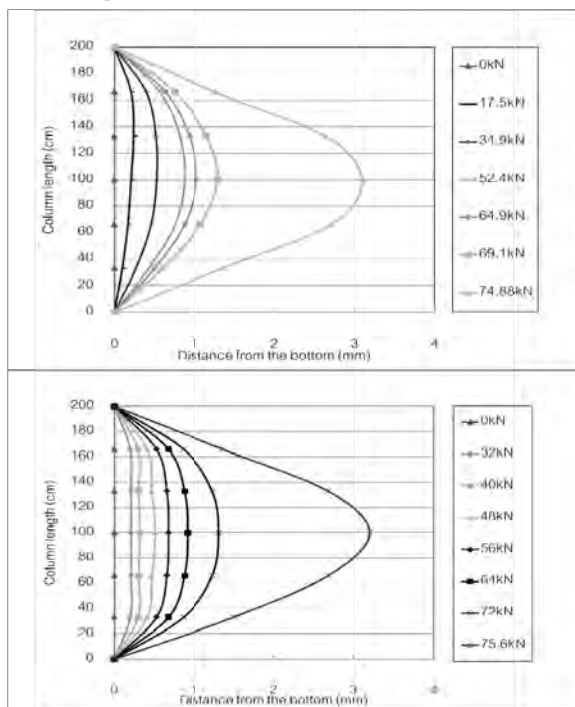


รูปที่ 9 ลักษณะการบิดตัวของตัวอย่างทดสอบยาวแบบ individual parallel buckling



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบแบบยาว

รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบแบบยาว จากรูปพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของแรงโก่งเดาะวิกฤติ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นในรูป geometrical nonlinear จนกระทั่งมีความชันประมาณศูนย์ ซึ่งแสดงถึงการวิบัติโดยการโก่งเดาะ



รูปที่ 11 ลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบยาวในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2

รูปที่ 11 แสดงตัวอย่างแผนภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบแบบยาวภายใต้แรงอัดในแนวแกนต่าง ๆ ของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 จากรูป พบว่า ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่มมีลักษณะโก่งเดาะแบบสมมาตรรอบกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบและเมื่อแรงอัดในแนวแกนที่มีค่าน้อย ค่าการโก่งตัวทางด้านข้างมีค่าน้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นถึงแรงโก่งเดาะวิกฤติ ค่าการโก่งตัวทางด้านข้างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

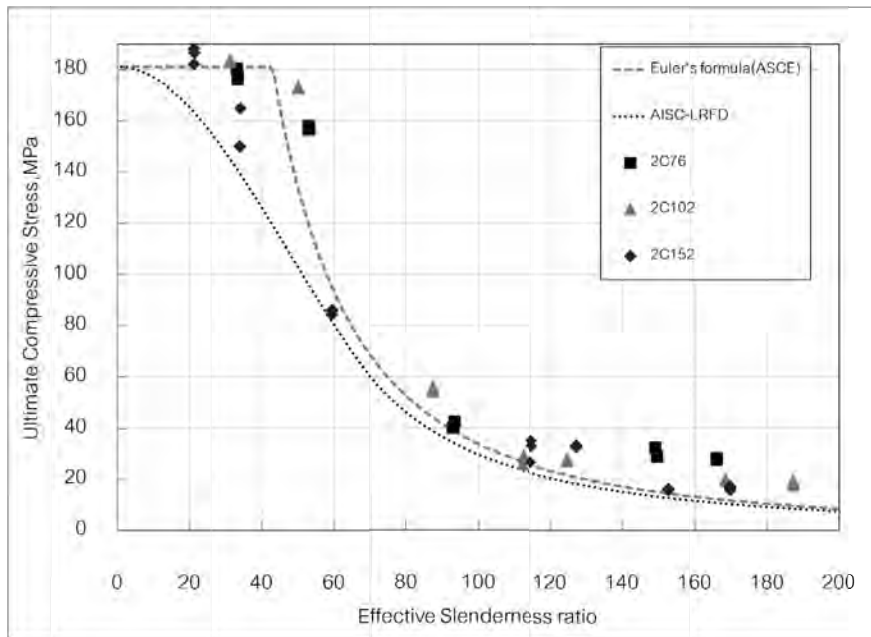
จากลักษณะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ซึ่งมีลักษณะการวิบัติแบบ individual opposite buckling แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้จตุรรองรับแบบยึดแน่นบางส่วน (partially fixed) ดังนั้นค่า K สำหรับการโก่งเดาะของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปวงรีในกรณีนี้ควรมีค่าน้อยกว่า 1.0 ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทางทฤษฎีพบว่าจากลักษณะการวิบัติและการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบและเพื่อความปลอดภัยต่อการนำค่าดังกล่าวไปใช้คำนวณออกแบบ ค่า K สำหรับจตุรรองรับของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีค่าประมาณ 0.9 ซึ่งแตกต่างจากลักษณะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 ที่มีลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling มีลักษณะการโก่งตัวแบบตัวอย่างทดสอบที่ใช้จตุรรองรับแบบหมด ดังนั้นค่า K ของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ควรมีค่าประมาณ 1.0 จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทางทฤษฎีพบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1.0 เนื่องจากการที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบไม่เกิด composite action และการถ่ายเทแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ทำให้หน้าตัดดังกล่าวมีค่า moment of inertia ไม่คงที่ตลอดทั้งหน้าตัด อย่างไรก็ตามจากลักษณะการวิบัติและการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบรวมถึงเพื่อความปลอดภัยต่อการนำค่า

ดังกล่าวไปใช้คำนวณออกแบบ ค่า K ของจตุรรองรับใน ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ควรมีค่าเท่ากับ 1.0

3.2 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

รูปที่ 12 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงอัดในแนวแกนและอัตราส่วนความชะลุด

ประสิทธิผล (KL/r) ของตัวอย่างทดสอบที่พิจารณาจาก หน้าตัดรูปร่างนี้เปรียบเทียบกับสมการออกแบบ ของ AISC-LRFD และ ASCE ซึ่งสมการออกแบบทั้งสอง ให้ค่าจุดเปลี่ยนของความชะลุดของตัวอย่างทดสอบแบบ สั้นและแบบยาวเท่ากับ 61 และ 42 ตามลำดับ จากรูป พบว่า สำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ($KL/r \leq 61$)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดประลัยและอัตราส่วนความชะลุดประสิทธิผล

เส้นกราฟของสมการออกแบบของ AISC-LRFD จะอยู่ใต้ ผลการทดสอบค่อนข้างมากโดยมีสัดส่วนของค่าหน่วย แรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ในช่วง 1.04-2.35 ซึ่งแสดงว่าสมการดังกล่าวมีความปลอดภัยใน การใช้งานค่อนข้างสูงในกรณีของตัวอย่างทดสอบแบบ ยาว ($KL/r > 61$) เส้นกราฟของสมการออกแบบของ AISC-LRFD จะอยู่ใต้ผลการทดสอบโดยมีสัดส่วนของค่า หน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ ในช่วง 1.01-2.62 ซึ่งแสดงว่าสมการดังกล่าวมีความ ปลอดภัยค่อนข้างสูงต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงโก่ง เคาะวิกฤติ

ในขณะที่สมการออกแบบของ ASCE พบว่า สำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ($KL/r \leq 42$) มีสัดส่วน

ของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตาม สมการอยู่ในช่วง 0.86-1.03 และตัวอย่างทดสอบแบบ ยาว ($KL/r > 42$) มีสัดส่วนของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ในช่วง 0.88-2.30 มี ผลการทดสอบบางส่วนที่ต่ำกว่าเส้นกราฟ ซึ่งน่าจะเกิด จากการความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) และสำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้นการที่ ตัวอย่างทดสอบมีความยาวเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบ ที่ใช้หาค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุ อย่างไรก็ตาม สมการ ดังกล่าวมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรง โก่งเคาะวิกฤติ แต่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าสมการของ AISC-LRFD

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

Column Number	$P_{ult,avg}$ (kN)	$\sigma_{ult,avg}$ (MPa)	$P_{cr,LRFD}$ (kN)	$P_{cr,ASCE}$ (kN)	K factor	$\frac{P_{cr,EXP}}{P_{cr,LRFD}}$	$\frac{P_{cr,EXP}}{P_{cr,ASCE}}$	Mode of failure
2C76-1.0-2-0	39.2	30.24	13.22	15.08	0.64	2.29	2.01	IO
2C76-1.0-3-L/2	36.37	28.06	10.71	12.20	0.66	2.62	2.30	IP
2C76-0.7-2-0	53.37	41.18	21.86	24.92	0.78	1.88	1.65	CIP
2C76-0.4-2-0	204.03	157.43	66.94	76.33	0.70	2.35	2.06	C
2C76-0.25-2-0	231.14	178.35	122.88	181.13	1.05	1.45	0.98	C
2C102-1.5-2-0	34.93	19.67	10.41	11.87	0.70	1.89	1.66	IO
2C102-1.5-3-L/2	32.76	18.45	8.43	9.62	0.72	2.19	1.92	IP
2C102-1.0-2-0	49.01	27.59	23.42	26.71	0.89	1.18	1.03	IO
2C102-1.0-3-L/2	40.13	22.59	18.97	21.63	0.98	1.19	1.04	IP
2C102-0.7-2-0	97.50	54.89	38.72	44.50	0.90	1.42	1.23	CIP
2C102-0.4-2-0	307.25	173.00	103.39	135.21	0.88	1.67	1.28	C
2C102-0.25-2-0	325.68	183.38	145.50	181.13	1.37	1.26	1.01	C
2C152-2.0-2-0	70.40	16.15	12.67	14.45	0.85	1.27	1.12	IO
2C152-2.0-3-L/2	71.92	16.49	10.27	11.71	0.84	1.01	0.88	IP
2C152-1.5-2-0	142.00	32.37	22.53	25.69	0.80	1.44	1.26	IO
2C152-1.5-3-L/2	143.68	32.95	18.25	20.81	0.79	1.14	1.00	IP
2C152-0.7-2-0	373.07	85.57	81.93	95.55	1.06	1.04	0.89	CIP
2C152-0.4-2-0	676.57	155.18	139.80	181.13	1.37	1.11	0.86	C
2C152-0.25-2-0	809.63	185.69	163.70	181.13	2.01	1.13	1.03	C

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะคือ individual opposite buckling (IO), individual parallel buckling (IP), วิบัติโดยการแตกบริเวณเอวและตามด้วย individual opposite buckling (crushing and following with individual opposite buckling) (CIP) และวิบัติโดยการแตกบริเวณเอว (crushing)(C) จากตาราง พบว่า เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดเดียวกัน หน่วย

แรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความชะลูดลดลง นอกจากนี้ การติดตั้งจุดเชื่อมต่อบริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อแรงโก่งเดาะวิกฤติเนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อไม่เพียงพอสำหรับการถ่ายเทแรงเฉือนที่เกิดขึ้นส่งผลให้หน้าตัดไม่เกิด composite action ดังนั้น แรงโก่งเดาะวิกฤติที่ได้จากการทดสอบเป็นแรงโก่งเดาะวิกฤติของชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเต้า อย่างไรก็ตาม การติดตั้งจุด

เชื่อมต่อเพิ่มเติมที่บริเวณกึ่งกลางทำให้ลักษณะการวิบัติเปลี่ยนไปอย่างมาก

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้าง PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดในแนวแกนได้ผลสรุปที่สำคัญดังนี้

1. พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ซึ่งมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยมีลักษณะการวิบัติเนื่องจากวัสดุ และตัวอย่างทดสอบแบบยาว ซึ่งมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของแรงโก่งเดาะวิกฤติ จากนั้น พฤติกรรมจะคงที่และค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้น ลักษณะการวิบัติเป็นแบบการโก่งเดาะของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวในรูปแบบ individual opposite buckling

2. การติดตั้งจุดเชื่อมต่ออย่างง่ายเข้ากับช่วงตัวอย่างทดสอบเพื่อการค้ำยันขึ้นส่วนประกอบของตัวอย่างทดสอบ พบว่าตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติเปลี่ยนไปอย่างมากในรูปแบบ individual parallel buckling แต่ไม่ส่งผลให้รับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีความมากจึงทำให้ผลของการถ่ายแรงเฉือนและ composite action เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ดังนั้นความสามารถในการรับแรงจึงขึ้นอยู่กับชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

3. ลักษณะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่ระยะการโก่งตัวสูงสุดมีลักษณะการโก่งตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า K ของตัวอย่างทดสอบจึงแปรเปลี่ยนตามลักษณะการวิบัติ โดยค่า K ของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ควรมีค่าประมาณเท่ากับ 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ

4. จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบของ AISC-LRFD และ ASCE พบว่าสมการของ AISC-LRFD มีปลอดภัยค่อนข้างสูงต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงอัดประลัย ในขณะที่สมการของ ASCE พบว่า สมการมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงอัดประลัยแต่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าสมการของ AISC-LRFD อย่างไรก็ตามมีผลการทดสอบบางส่วนที่ต่ำกว่าเส้นกราฟเนื่องจากความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและสาขาวิศวกรรมโยธาสำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Barbero EJ, Devivo L. Beam-column design equations for wide-flange pultruded structural shapes. J Compos Constr. 1999; 3(4): 185-191.
- [2] Mottram JT. Determination of critical load for flange buckling in concentrically loaded pultruded columns. Compos Part B. 2004; 35: 35-47.
- [3] Loughlan J. The buckling of composite stiffened box sections subjected to compression and bending. Compos Struct J. 1996; 35(1): 101-116.
- [4] Turvey GJ. Lateral buckling tests on rectangular cross-section pultruded GRP cantilever beams. Compos Part B. 1996; 27B: 34-42.

- [5] Vanevenhoven LM, Shield CK, Bank LC LRFD factors for pultruded wide-flange columns. *J StructEng-ASCE*.2010; 136(5): 554-564.
- [6] Nagaraj V, and Gangarao VStatic behavior of pultruded GFRP beams.*J Compos Constr*. 1997; 1: 120-129.
- [7] Barbero EJ, Fu SH, Raftoyiannis I Ultimate bending strength of composite beams. *J Mater Civil Eng*. 1991;3(4): 292-306.
- [8] ASCE Structural Plastic Design Manual. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No. 63. ASCE: NY; 1984.
- [9] American Institute of Steel Construction, AISC. Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design.Chicago; 2005.
- [10] Lue DM, Yen T, Liu JL. Experimental investigation on built-up columns. *J Constr Steel Res*. 2006: 1325-1332.
- [11] Liu JL, Lue DM, Liu JL.Investigation on slenderness ratios of built-up compression members.*J Constr Steel Res*. 2009: 237-248.
- [12] Boonsuan W, Seangatith S, Wongchavalitkul S. Behaviors and properties of pultruded fiber reinforced plastic produced in thailand under compression, shear and flexure. *Proceeding of the14th National Convention of Civil Engineering*. 2009 13-15 May. Nakhonratchasima Thailand. (In Thai).
- [13] American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standard, Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes. ASTM Standard No. D3917. PA; 2011.