

การทดสอบคานประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูด หน้าตัดรูปร่างหน้าคู่ภายใต้แรงดัด

Experimental Study on Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Built-up Beams with Double Channel Sections under Flexure

ปรัชญา ก้านบัว*¹ สิทธิชัย แสงอาทิตย์¹ จักษดา ชำรงวุฒิ²

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Prachya Kanbua*¹ Sittichai Seangatith¹ Jaksada Thumrongvut²

¹Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

²Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Tel : 08-6877-4155 E-mail: prachya_m@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลทดสอบคานประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปร่างหน้าคู่ที่มีจุดรองรับอย่างง่ายภายใต้แรงดัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคาน และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กด้วยวิธี LRFD ตัวอย่างคานที่ใช้ทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบพัลทูดชั้น (PFRP) หน้าตัดรูปร่างหน้าคู่ซึ่งมีหน้าตัด 3 ขนาด ได้แก่ 2C76×22×6 mm, 2C102×29×6 mm และ 2C152×43×10 mm จำนวนตัวอย่างคานทั้งหมด 96 ตัวอย่าง โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคาน (L/d) ตั้งแต่ 6.6 ถึง 52.6 ตัวอย่างทดสอบมีจุดเชื่อมต่อ (connectors) ระหว่างหน้าตัดรูปร่างหน้า 3, 5 และ 9 จุด จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมของคานจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) เล็กน้อยจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ ลักษณะการวิบัติถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การวิบัติด้วยกำลังของวัสดุและการโก่งเดาะทางด้านข้างแบบองค์รวม โดยลักษณะการวิบัติขึ้นกับอัตราส่วน L/d และจำนวนจุดเชื่อมต่อ ซึ่งแนวโน้มของ

แรงโก่งเดาะแปรผันตรงกับจำนวนจุดเชื่อมต่อ และแปรผกผันกับความยาวของตัวอย่างคาน นอกจากนี้สมการการโก่งตัวของ Euler-Bernoulli สามารถทำนายการแอ่นตัวของคานในช่วง linear elastic ได้ใกล้เคียงและถูกต้องเพียงพอ เมื่อทำการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะระหว่างผลการทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากคานที่ใช้ทดสอบเกิด composite action ที่ไม่สมบูรณ์และคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันระหว่างเหล็กกับ PFRP ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงความแตกต่างดังกล่าวสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กด้วยวิธี LRFD ต้องคูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาพบว่าควรใช้ strength reduction factor เท่ากับ 0.4

คำหลัก: พลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูด คานประกอบ หน้าตัดรูปร่างหน้าคู่ แรงดัด

Abstract

This paper presents the results of the experimental study on pultruded fiber-reinforced plastic built-up double channel sections beams with simply supports under flexure. The objectives of this study are to

determine structural behaviors and modes of failure for the beams and to compare the results with LFRD steel design equations. The PFRP double channel beams used in this study were made of E-glass fiber and polyester resin and manufactured by a pultrusion process. Three different geometries of the beams were 2C76×22×6, 2C102×29×6 and 2C152×43×10 mm. The total of 96 specimens were tested. The span-to-depth ratios of the specimens (L/d) were in the range of 6.6 to 52.6. The tested beams had the connectors 3, 5 and 9 connectors, respectively Based on the test results, it was found that the behaviors of beams were linear elastic up to 80 - 95% of the failure load and then changing to nonlinear. The failure modes could be classified into 2 types; i.e. material failure and overall lateral buckling. The modes of failures depended on the L/d ratios and the number of connectors. The trends of the critical buckling moment were directly varied with the number of connectors and inversely varied with the span length. In addition, the Euler-Bernoulli deflection equation could be used to predict the deflections of beams with sufficient accuracy. By comparing the critical buckling moment between test results and the LFRD steel design equation, it was found that they were significantly different due to the imperfect composite action of the tested beams section and the different material properties of the steel and PFRP. Therefore, the steel design LFRD equation should be multiplied by a strength reduction factor of 0.4 to take care of the differences.

Keywords: pultruded fiber-reinforced plastic, built-up beams, double channel sections, flexure

1. บทนำ

ในปัจจุบันทวีปยุโรปและอเมริกาได้มีการนำวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยหลากหลายชนิดมาใช้แทนโครงสร้างเหล็กเนื่องจากมีข้อได้เปรียบเหล็กหลายประการ อาทิเช่น กำลังต่อน้ำหนัก การทนทานต่อการกัดกร่อน และสะดวกในการติดตั้ง [1-3] ทั้งนี้วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมี

หลากหลายชนิดเช่น วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber-Reinforced Plastic; CFRP) หรือวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-Reinforced Plastic; GFRP) เป็นต้น ซึ่งวัสดุเสริมเส้นใยดังกล่าวมักผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) [4] วัสดุ PFRP นี้ได้ถูกนำไปใช้ในโครงสร้างบางประเภท เช่น โครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่ง ใต้แก๊ส แทนชุดเจาะน้ำมัน ท่าเรือ โครงสร้างที่มีการกัดกร่อนสูง ใต้แก๊ส หอทำความเย็น (cooling tower) โรงงานอุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งโครงสร้างในบริเวณพื้นที่ๆ เข้าถึงยาก (hard-to-access area) และมีความลำบากในการก่อสร้างเนื่องจากพื้นที่ไม่อำนวย เช่น พื้นที่ๆ เป็นภูเขา ตลอดจนชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา เช่น หอสูง สะพาน รวาระเบียงและรั้วกันตึกต่างๆ [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นต้น



รูปที่ 1 สะพานข้ามทางรถไฟที่สร้างจากวัสดุ FRP (FRP Lleida Pedestrian Bridge 2001)

โดยทั่วไปการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างพลาสติกสามารถอ้างอิงได้จากคู่มือการออกแบบโครงสร้างพลาสติกของ ASCE [6] ซึ่งมีพื้นฐานการออกแบบโดยอาศัยหลักการของวิธี Working Stress Design (WSD) ซึ่งค่อนข้างล้ำสมัยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นฐานการออกแบบโดยวิธี Load Resistant Factor Design (LRFD) ที่ใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณ โดยมาตรฐานการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ได้รับการยอมรับมาตรฐานหนึ่งได้แก่ AISC-LRFD [7] ซึ่งกำหนดให้สมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปร่างต่างๆ ภายใต้แรงดัดอยู่ในรูปดังสมการที่ (1)

$$M_u \leq \phi M_n \quad (1)$$

โดยที่ M_u คือโมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (factored service moment) ϕ คือตัวคูณความต้านทาน (สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด) และ M_n คือกำลังโมเมนต์ระบุ (nominal moment strength)

ในกรณีคานมีการยึดรั้งด้านข้างไม่เพียงพอ เมื่อคานเกิดการโก่งเตาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอีลาสติก (elastic lateral-torsional buckling, elastic LTB) สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปรางน้ำ AISC/LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุ สามารถหาได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (2)$$

โดยที่ C_b คือสัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่โมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) L คือความยาวของคาน (span length) E คือโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) I_y คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง (moment of inertia about minor axis) G คือโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) J คือค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด (torsional section constant) และ C_w คือค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด (warping section constant)

สำหรับกรณีที่โมเมนต์ภายในไม่สม่ำเสมอสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ (non-uniform moment diagram) ตามสมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3)$$

โดยที่ M_{\max} คือโมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวคาน M_A คือโมเมนต์ที่จุด 1/4 ของความยาวคาน M_B คือโมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน และ M_C คือโมเมนต์ที่จุด 3/4 ของความยาวคาน

สำหรับค่าการโก่งตัวในแนวตั้งสามารถคำนวณได้โดยสมการของ Euler – Bernoulli Beam Theory ตามสมการที่ (4) ดังนี้

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (4)$$

โดยที่ Δ คือค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (mid span deflection) P คือแรงกระทำที่กึ่งกลางคาน
การใช้งานชิ้นส่วน PFRP มักใช้ในโครงสร้าง

ประเภทโครงข้อหมุน (truss) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยชิ้นส่วนดังกล่าวมักมีการยึดรั้งทางด้านข้างที่ไม่เพียงพอ ตลอดจนการนำสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของ AISC-LRFD มาประยุกต์ใช้กับวัสดุ PFRP อาจมีข้อจำกัดอยู่หลายองค์ประกอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัดที่มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อต่างกัน และนำผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของหน้าตัด

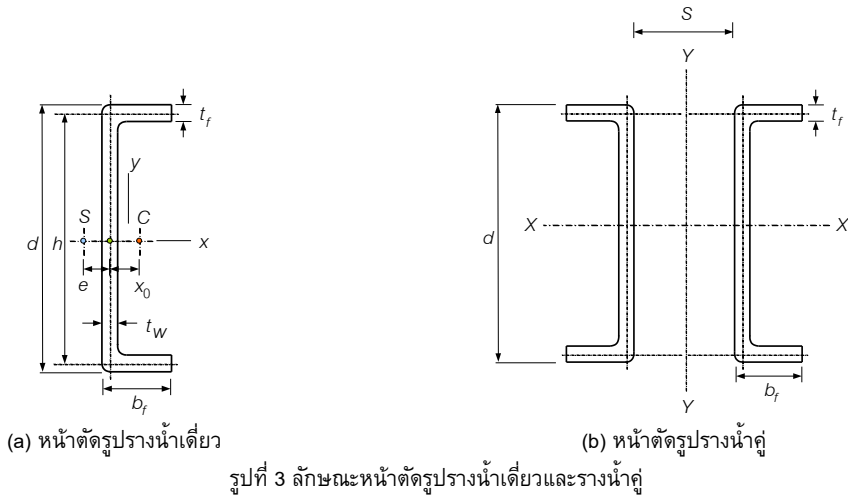


รูปที่ 2 สะพานที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วน FRP

(ctsbridges.co.uk)

2. ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นส่วนหน้าตัดรูปรางน้ำ ซึ่งถูกผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบพัลทรูชัน (pultrusion process) จาก E-glass fiber และ polyester resin โดยถูกนำมาประกอบเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่โดยใช้เหล็กกล่องเป็นตัวคั่น (spacer) และยึดเข้ากันด้วยสลักเกลียวผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็กกล่อง ดังรูปที่ 3 แสดงลักษณะหน้าตัดรูปรางน้ำและรางน้ำคู่ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดเฉลี่ยเท่ากับ 31.07 GPa หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 121.86 MPa และ หน่วยแรงดัดประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 509.73 MPa [8] โดยรายละเอียดคุณสมบัติของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและรูปรางน้ำคู่แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ตารางที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

Dimension $d \times b \times t$ (mm×mm×mm)	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h (mm)	e (mm)	x_0 (mm)
76×22×6	76	22	6	6	70	7.19	3.26
102×29×6	102	29	6	6	96	9.34	4.51
152×43×10	152	43	10	10	142	13.87	6.51

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและหน้าตัดรูปรางน้ำคู่

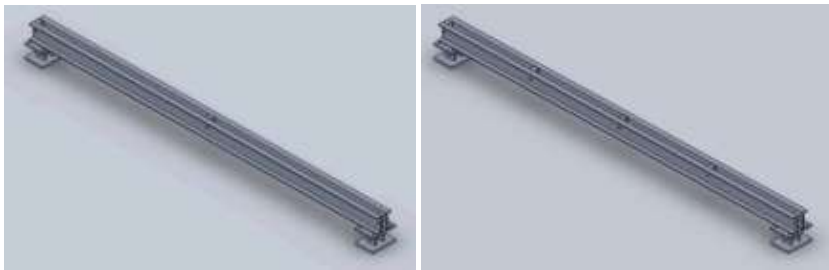
Dimension $d \times b \times t$ (mm×mm×mm)	Single C-section			Double C-section			
	Area (mm ²)	I_{x-x} (10 ⁶ mm ⁴)	I_{y-y} (10 ⁶ mm ⁴)	Area (mm ²)	I_{x-x} (10 ⁶ mm ⁴)	I_{y-y} (10 ⁶ mm ⁴)	s (mm)
76×22×6	648	0.46	0.02	1296	0.91	0.94	40
102×29×6	888	1.17	0.05	1776	2.33	2.23	56
152×43×10	2180	6.26	0.30	4360	12.52	12.14	80

ตัวอย่างทดสอบจำนวน 96 ตัวอย่างมีความยาวอยู่ในช่วง 0.50-4.00 m โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (span-to-depth ratio, L/d) อยู่ในช่วง 6.6-52.6 และติดตั้งจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 3 ถึง 9 จุด ดังแสดงในตารางที่ 3 ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกตั้งขึ้นโดยอยู่ในรูปแบบ “2Cd – L – S” เมื่อ d คือความลึกของหน้าตัด L คือความยาวของตัวอย่างทดสอบ และ S คือจำนวนจุดเชื่อมต่อ (connectors) โดยที่ S จะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3, 5, และ 9 จุด ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 ตัวอย่างเช่น 2C76 – 2.0 – 3 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดความลึกของหน้าตัด 76 mm ความยาว 2.0 m และมีจุดเชื่อมต่อ 3 จุด ก่อนการทดสอบตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่า Initial out-of-straightness โดยเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM

D3917 [9] พบว่า ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่ต้องพิจารณาผลของการโก่งตัวเริ่มต้น (initial crookedness) ที่มีผลต่อค่าแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ การติดตั้งตัวอย่างทดสอบแสดงเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบถูกวางอยู่บนจุดรองรับแบบหมุน และติดตั้งเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) บริเวณจุดรองรับทั้งสองข้าง ติดตั้ง Safety Rod ยึดด้านข้างเพื่อป้องกันการบิดและพลิกตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ ในการทดสอบแรงกระทำจะถูกถ่ายจากหัวกดลงสู่ศูนย์กลางตัวอย่างทดสอบโดยตรง ตลอดการทดสอบจะมีการวัดค่าการแอ่นตัวในแนวตั้งและการโก่งตัวทางด้านข้างด้วย Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

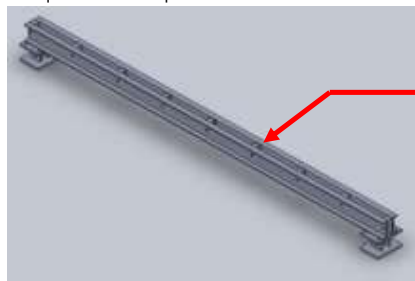
ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Specimens	(d×b×t) (mm)	L (m)	L/d	I_{y-y} (10^6 mm^4)	J (mm^4)	C_w (10^6 mm^6)	S	Number
2C76-0.5-S	76×22×6	0.5	6.6	0.94	8208	26.6	3	2
2C76-0.7-S	76×22×6	0.7	9.2	0.94	8208	26.6	3	2
2C76-1.0-S	76×22×6	1.0	13.2	0.94	8208	26.6	3	2
2C76-1.5-S	76×22×6	1.5	19.7	0.94	8208	26.6	3	2
2C76-2.0-S	76×22×6	2.0	26.3	0.94	8208	26.6	3, 5	4
2C76-2.5-S	76×22×6	2.5	32.9	0.94	8208	26.6	3, 5	4
2C76-3.0-S	76×22×6	3.0	39.5	0.94	8208	26.6	3, 5, 9	6
2C76-3.5-S	76×22×6	3.5	46.1	0.94	8208	26.6	3, 5, 9	6
2C76-4.0-S	76×22×6	4.0	52.6	0.94	8208	26.6	3, 5, 9	6
2C102-0.7-S	102×29×6	0.7	6.9	2.23	11088	116.1	3	2
2C102-1.0-S	102×29×6	1.0	9.8	2.23	11088	116.1	3	2
2C102-1.5-S	102×29×6	1.5	14.7	2.23	11088	116.1	3	2
2C102-2.0-S	102×29×6	2.0	19.6	2.23	11088	116.1	3, 5	4
2C102-2.5-S	102×29×6	2.5	24.5	2.23	11088	116.1	3, 5	4
2C102-3.0-S	102×29×6	3.0	29.4	2.23	11088	116.1	3, 5, 9	6
2C102-3.5-S	102×29×6	3.5	34.3	2.23	11088	116.1	3, 5, 9	6
2C102-4.0-S	102×29×6	4.0	39.2	2.23	11088	116.1	3, 5, 9	6
2C152-1.0-S	152×43×10	1.0	6.6	12.14	76000	1379.0	3	2
2C152-1.5-S	152×43×10	1.5	9.9	12.14	76000	1379.0	3	2
2C152-2.0-S	152×43×10	2.0	13.1	12.14	76000	1379.0	3, 5	4
2C152-2.5-S	152×43×10	2.5	16.5	12.14	76000	1379.0	3, 5	4
2C152-3.0-S	152×43×10	3.0	19.7	12.14	76000	1379.0	3, 5, 9	6
2C152-3.5-S	152×43×10	3.5	23.0	12.14	76000	1379.0	3, 5, 9	6
2C152-4.0-S	152×43×10	4.0	26.3	12.14	76000	1379.0	3, 5, 9	6



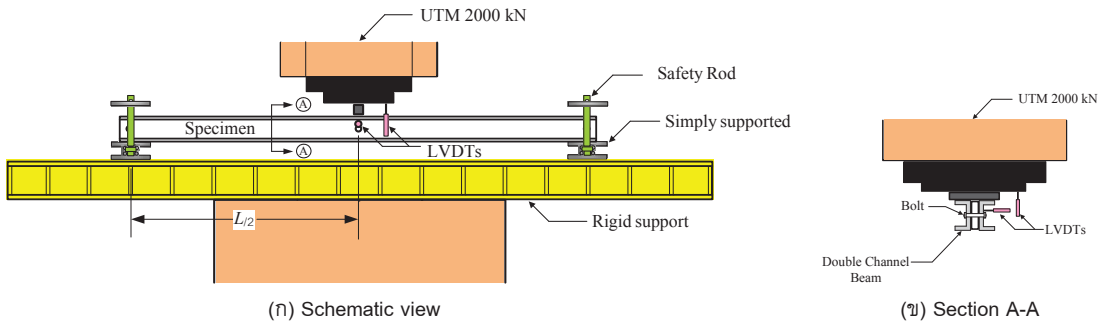
(ก) ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุด

(ข) ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 5 จุด



(ค) ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 9 จุด

รูปที่ 4 ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 3, 5 และ 9 จุด



รูปที่ 5 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

ก่อนการทดสอบตัวอย่างทดสอบจะถูกให้แรงกระทำก่อนเพื่อเตรียมความพร้อมของตัวอย่างทดสอบและจุดรองรับดังแสดงในรูปที่ 6 จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกทดสอบอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยสังเกตจากแรงกระทำจะมีค่าลดลงอย่างมากในขณะที่การเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างจะเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใด



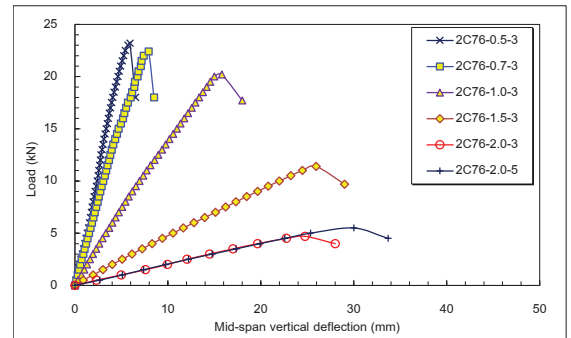
รูปที่ 6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบคาน CFRP

shear) ดังแสดงในรูปที่ 13 ส่วนการวิบัติของคานที่มีอัตราส่วน $L/d > 10$ จะมีลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะทางด้านข้างแบบองค์รวม (overall lateral buckling) ดังแสดงรูปที่ 14 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด

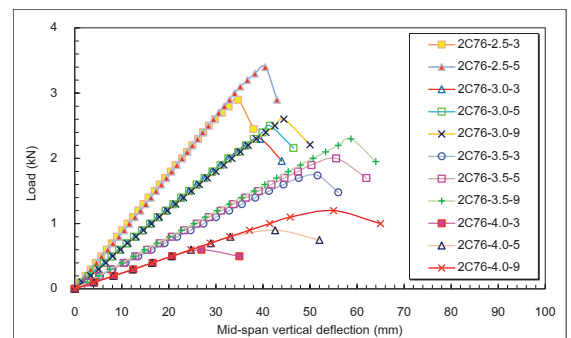
3. ผลการศึกษา

3.1 พฤติกรรมและลักษณะการวิบัติ

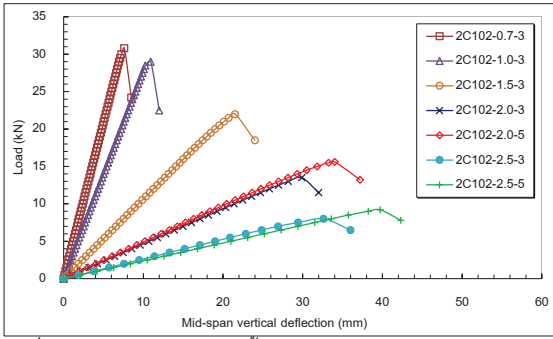
รูปที่ 7 ถึงรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคานจากรูปพบว่า คาน CFRP มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมของคานจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) เล็กน้อยจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ และลักษณะการวิบัติของคานถูกแบ่งโดยอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคาน (L/d) สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ จะเกิดการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) ซึ่งเกิดจากหน่วยแรงเฉือนตามขวาง (transverse



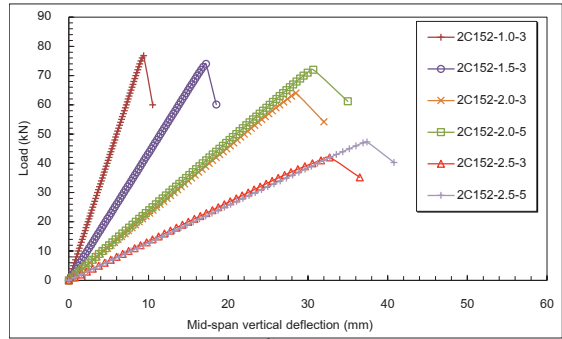
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของคาน CFRP ความยาว 0.5 ถึง 2.0 m.



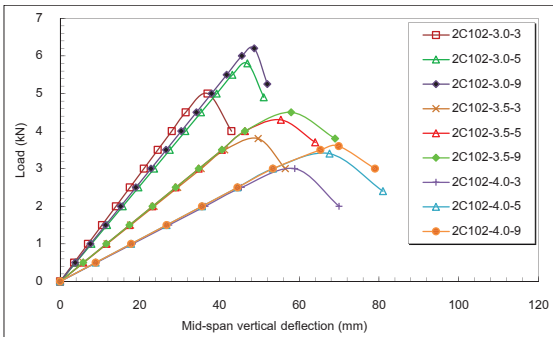
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของคาน CFRP ความยาว 2.5 ถึง 4.0 m



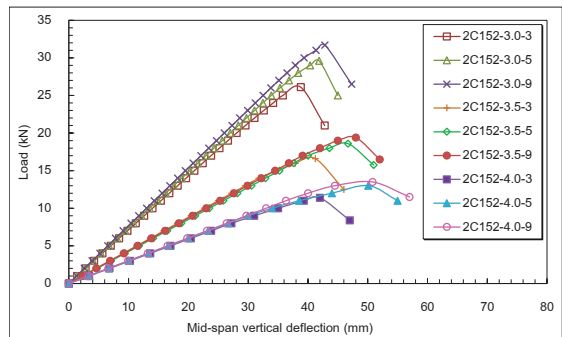
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของคาน 2C102 ความยาว 0.7 ถึง 2.5 m



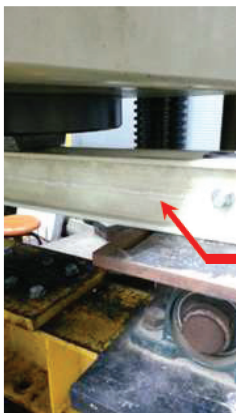
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของคาน 2C152 ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของคาน 2C102 ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m

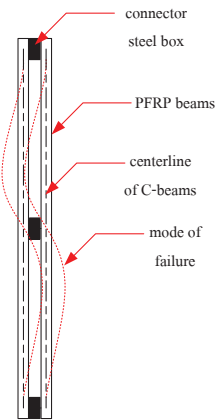
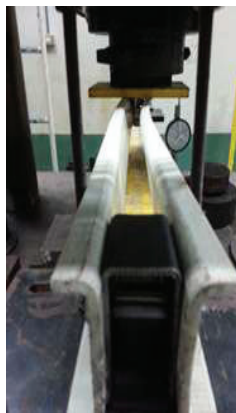


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของคาน 2C152 ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m



แนวการวิบัติที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือนตามขวาง

รูปที่ 13 ลักษณะการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure)



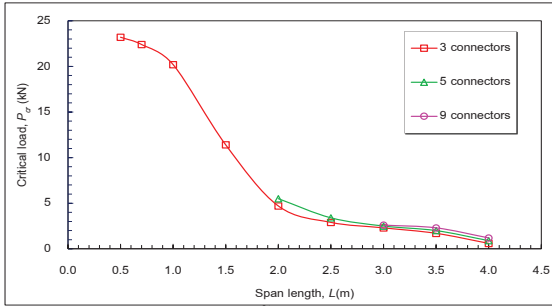
รูปที่ 14 ลักษณะการวิบัติแบบ overall lateral buckling

3.2 กำลังของคานที่ได้จากการทดสอบ

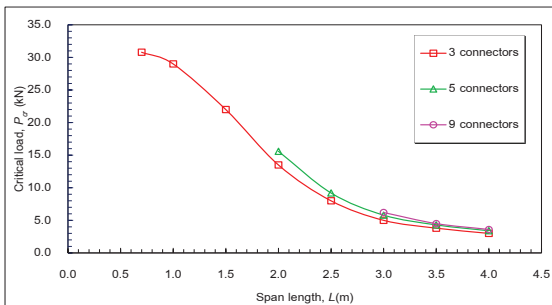
รูปที่ 15 ถึงรูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักสูงสุดเมื่อความยาวของคานเพิ่มขึ้นน้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับได้จะลดลงโดยพิจารณาจากตัวอย่างทดสอบที่

มีขนาดหน้าตัดเท่ากัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวเท่ากันพบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดหน้าตัด 2C152×43×10 mm สามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด 2C102×29×6 และ 2C76×22×6 mm ตามลำดับ นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นตามการเพิ่มจำนวนจุด

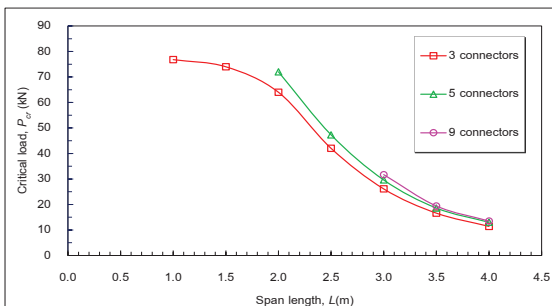
เชื่อมต่อ เพราะทำให้ความยาวไร้การยึดรั้ง (unbraced length) ของหน้าตัดประกอบมีค่าลดลงและการถ่ายแรงระหว่างหน้าตัดประกอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างได้มากขึ้นด้วย



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 2C76×22×6 mm



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 2C102×29×6 mm

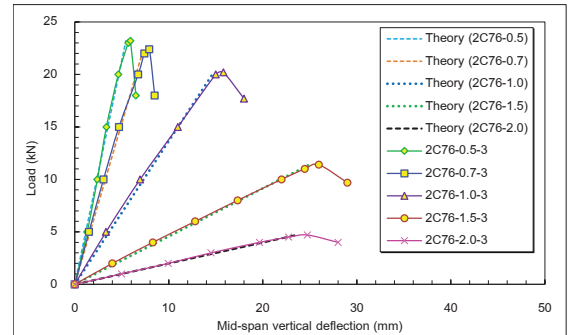


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 2C152×43×10 mm

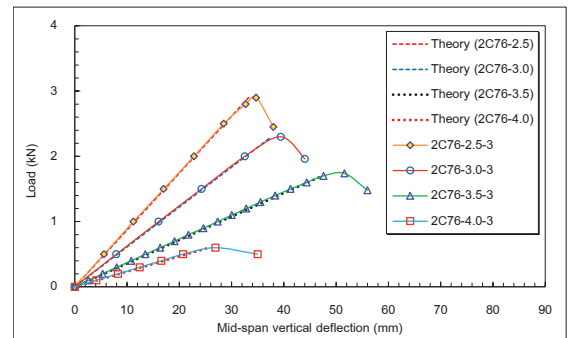
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่ได้จากการทดสอบ

รูปที่ 18 ถึงรูปที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน โดยระยะการแอ่นตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการที่ (4) จากรูปพบว่าระยะการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีของ

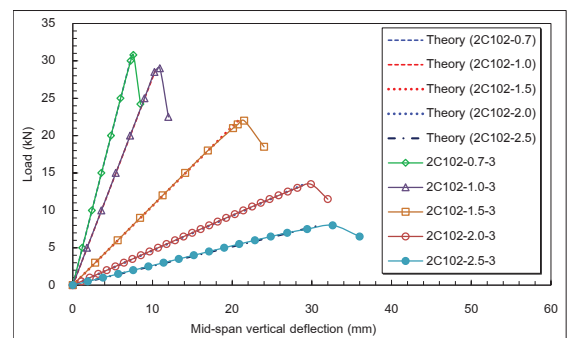
Euler-Bernoulli สามารถทำนายพฤติกรรมกรรมการแอ่นตัวของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยความแตกต่างของค่าที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีจะอยู่ในช่วง 5-10 % ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมที่เป็นแบบ nonlinear ในช่วงก่อนเกิดการวิบัติ



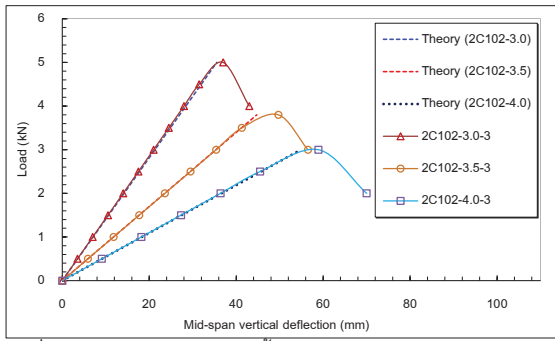
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ขนาดหน้าตัด 2C76 ความยาว 0.5-2.0 m



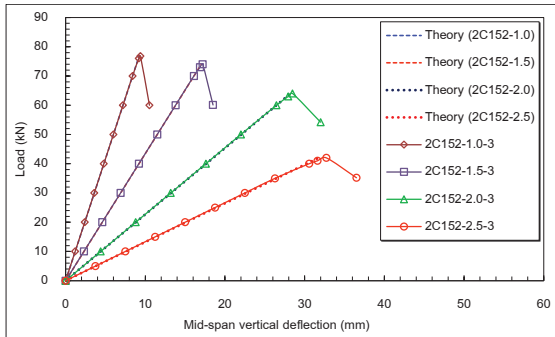
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ขนาดหน้าตัด 2C76 ความยาว 2.5-4.0 m



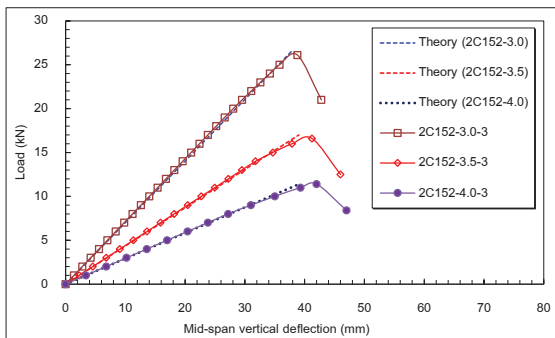
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ขนาดหน้าตัด 2C102 ความยาว 0.7-2.5 m



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ขนาดหน้าตัด 2C102 ความยาว 3.0-4.0 m



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ขนาดหน้าตัด 2C152 ความยาว 1.0-2.5 m

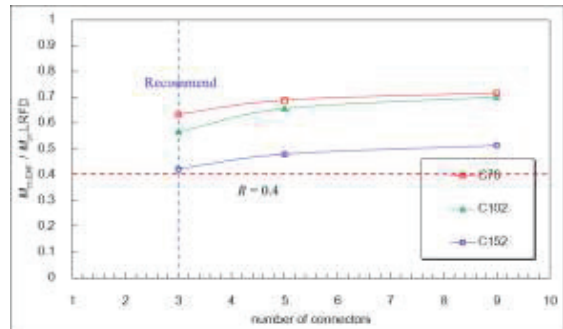


รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ขนาดหน้าตัด 2C152 ความยาว 3.0-4.0 m

3.4 การวิเคราะห์จำนวนจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสม

รูปที่ 24 แสดงอัตราส่วนระหว่าง ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) และจำนวนจุดเชื่อมต่อ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อจาก 3 จุด ไปเป็น 5 และ 9 จุดเชื่อมต่อ จะทำให้โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเข้าใกล้โมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการ LRFD มากขึ้น เนื่องจากความแกร่งของคานมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนจุด

เชื่อมต่อ โดยจุดเชื่อมต่อจะทำหน้าที่คล้ายกับการยึดรั้งทางด้านข้างบางส่วนและเป็นตัวถ่ายแรงระหว่างหน้าตัดทั้งสองฝั่งทำให้คานเกิด composite action ได้ดีขึ้น แต่ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าเพียงเล็กน้อยระหว่าง 5-15% เท่านั้นและมีแนวโน้มที่กราฟจะกลายเป็นเส้นตรง กล่าวคือกำลังของคานจะไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อที่มากเกินไป ด้วยเหตุผลข้างต้นจำนวนจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมจึงอยู่ที่ 3 จุดเชื่อมต่อเท่านั้น

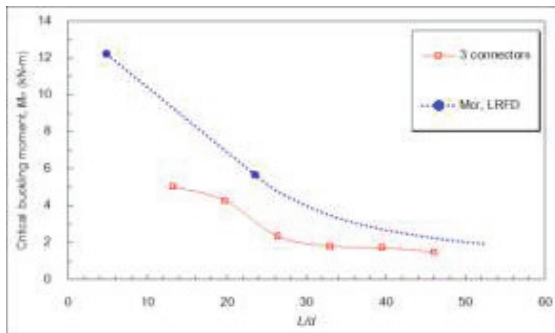


รูปที่ 24 อัตราส่วนระหว่าง $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ และจำนวนจุดเชื่อมต่อ

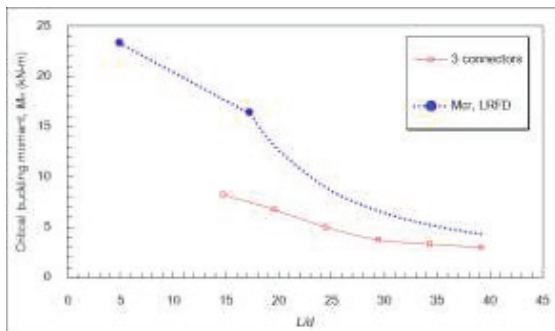
3.5 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

รูปที่ 25 ถึงรูปที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุดและมีจตุรรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (2) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) โดยมีอัตราส่วน L/d อยู่ในช่วง 10-50 เท่านั้นเนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ เป็นคานที่สั้นมากจนแทบไม่ได้มีการนำมาใช้งานและการวิบัติไม่ได้เกิดการโก่งเดาะจึงไม่นำมาพิจารณาค่าโมเมนต์โก่งเดาะและคานที่มีอัตราส่วน $L/d > 50$ เป็นคานที่ยาวมากและขาดเสถียรภาพจนแทบรับแรงกระทำไม่ได้จึงไม่นำมาพิจารณา จากรูปพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD จะมีอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.7 สาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์

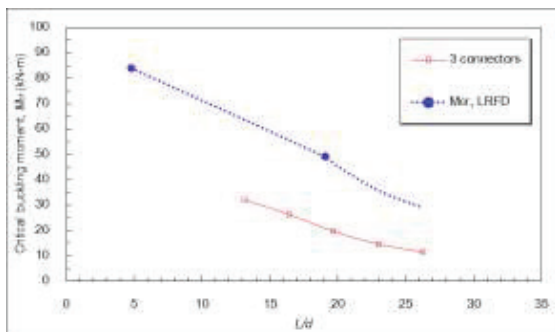
โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD เนื่องมาจากสมการของ LRFD นั้นถูกคำนวณมาจากวัสดุที่ทำจากเหล็ก รูปพรรณหน้าตัดเดี่ยว แต่คานที่ใช้ทดสอบนั้นทำจากวัสดุ FRP ซึ่งเป็นหน้าตัดประกอบ (composite section) ที่มีจุดเชื่อมต่อไม่ต่อเนื่องตลอดความยาวของคาน ทำให้การถ่ายเทแรงระหว่างหน้าตัดเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ คือ composite action เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ (สังเกตได้จาก การเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อจะทำให้โมเมนต์โก่งเดาะมีค่าเข้าใกล้สมการ LRFD มากขึ้น) จึงทำให้ได้ค่าโมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณจากสมการ LRFD ค่อนข้างมาก



รูปที่ 25 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC LRFD ของคานขนาด 2C76

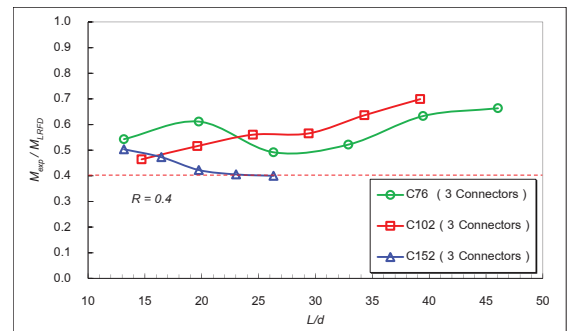


รูปที่ 26 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC LRFD ของคานขนาด 2C102

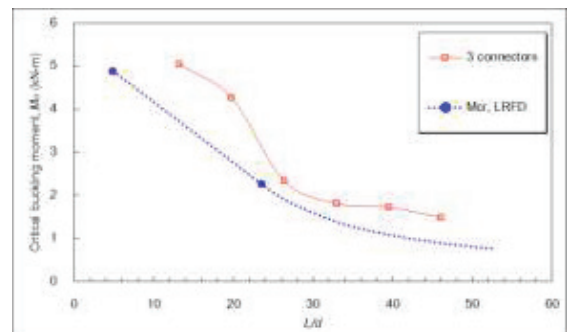


รูปที่ 27 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC LRFD ของคานขนาด 2C152

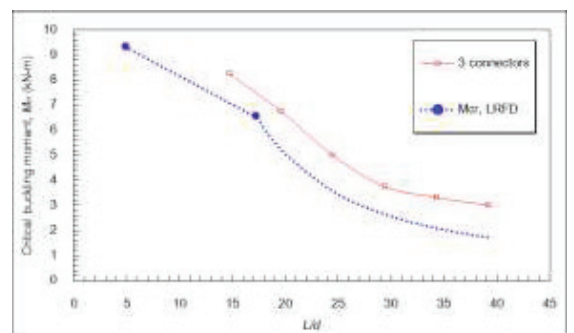
จากการเปรียบเทียบในข้างต้นเห็นได้ว่าโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบต่างจากโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD อย่างมาก ดังแสดงเป็นอัตราส่วนในรูปที่ 28 และเพื่อความง่ายต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงขอเสนอค่า strength reduction factor (R) เป็นค่าเดียวกับ 0.4 เพื่อลดกำลังของโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ลงดังรูปที่ 29 ถึงรูปที่ 31 โดยค่า $R = 0.4$ จะสอดคล้องแบบผกผันกับค่า Factor of safety เท่ากับ 2.5 ในมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างพลาสติกที่รับแรงดัดโดยวิธี ASD [6]



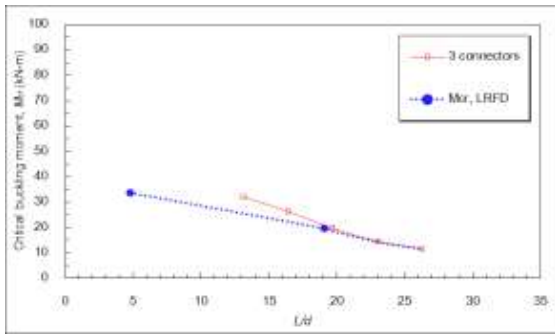
รูปที่ 28 การหาค่า strength reduction factor (R)



รูปที่ 29 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC LRFD ของคานขนาด 2C76 ที่มีค่า $R = 0.4$



รูปที่ 30 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC LRFD ของคานขนาด 2C102 ที่มีค่า $R = 0.4$



รูปที่ 31 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ AISC LRFD ของคานขนาด 2C152 ที่มีค่า $R = 0.4$

4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบคาน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ ภายใต้แรงดัดได้ผลสรุปว่า คานมีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนกระทั่ง 80-95% โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) ที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน L/d มากกว่า 40 นั้น น้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว จึงเป็นการใช้หน้าตัดของคานได้ไม่เต็มที่เพราะเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างอย่างรวดเร็ว สำหรับการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อนั้นทำให้คานสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอยู่ระหว่าง 5-15% เท่านั้น และการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อไม่ได้ทำให้เปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของคานโดยคานยังคงวิบัติแบบเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้าง ดังนั้นจำนวนจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่แนะนำจะอยู่ที่ 3 จุดเชื่อมต่อ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบและราคาของการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อเทียบกับกำลังที่ได้เพิ่มขึ้นอีก 5-15% ด้วย สำหรับสมการออกแบบยังคงใช้สมการออกแบบโครงสร้างเหล็กของ AISC LRFD ในการออกแบบได้ แต่จำเป็นต้องมี strength reduction factor (R) ซึ่งเท่ากับ 0.4 เข้ามาคูณเพื่อลดกำลังของสมการลงให้สามารถใช้กับวัสดุ PFRP หน้าตัดประกอบรูปรางน้ำคู่ได้ โดยทั้งหมดสามารถแบ่งเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

4.1 พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน PFRP

พฤติกรรมการรับแรงกระทำของคานจะมีลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมของคานจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) เล็กน้อยเนื่องจาก

การเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

4.2 ลักษณะการวิบัติของคาน PFRP

ลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามอัตราส่วน L/d โดยไม่ขึ้นกับจำนวนของจุดเชื่อมต่อ ดังนี้ กลุ่มที่ 1 วิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) เกิดขึ้นกับตัวอย่างคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ โดยการวิบัติเกิดจากหน่วยแรงเฉือนตามขวาง โดยจะมีการแตกในเนื้อวัสดุเป็นแนวยาวบริเวณกึ่งกลางของหน้าตัดคาน กลุ่มที่ 2 วิบัติโดยการโก่งเดาะทางด้านข้างแบบองค์รวม (overall lateral buckling) เกิดขึ้นกับตัวอย่างคานที่มีอัตราส่วน $L/d > 10$ เป็นการโก่งเดาะออกทางด้านข้างไปในทิศทางเดียวกันของหน้าตัดรางน้ำทั้ง 2 ที่นำมาประกอบกันเนื่องจากการยึดรั้งทางด้านข้างไม่เพียงพอ

4.3 กำลังของคาน PFRP ที่ได้จากการทดสอบ

กำลังของคานมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างคานมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อนั้นกำลังของคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนของจุดเชื่อมต่อ โดยจะแบ่งคานออกเป็น 3 ช่วงตามอัตราส่วน L/d ดังนี้

- 1) คานสั้น อัตราส่วน $L/d < 10$ กำลังของคานมีค่าสูง เนื่องจากวิบัติโดยกำลังของวัสดุโดยไม่เกิดการโก่งเดาะ
- 2) คานยาวปานกลาง อัตราส่วน L/d อยู่ระหว่าง 10 ถึง 30 เมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อจาก 3 จุดไปเป็น 5 และ 9 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 10% และ 15% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับจุดเชื่อมต่อแบบ 3 จุด
- 3) คานยาว อัตราส่วน $L/d > 30$ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อจาก 3 จุดไปเป็น 5 และ 9 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 15% และ 22% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับจุดเชื่อมต่อแบบ 3 จุด

4.4 เปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคาน PFRP

การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคานโดยใช้สมการของ Euler-Bernoulli สามารถทำนายค่าการแอ่นตัวได้ใกล้เคียงและถูกต้องเพียงพอในช่วง linear elastic โดยมีความแตกต่างอยู่ที่ประมาณ 5-10% ในช่วงก่อนเกิดการวิบัติ สาเหตุที่ค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่าสมการของ Euler-Bernoulli นั้นเกิดจากช่วงก่อนการวิบัติคานมีพฤติกรรมเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จึงทำให้การแอ่นตัวมีค่ามากกว่าสมการอยู่เล็กน้อย

4.5 เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD

เมื่อทำการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD พบว่ามีค่าต่ำกว่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.7 สาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะมีค่าต่ำกว่าสมการออกแบบของ LRFD เนื่องมาจากหน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณของสมการ LRFD นั้น ถูกคำนวณมาจากวัสดุที่ทำจากเหล็กรูปพรรณหน้าตัดเดี่ยว แต่คานที่ใช้ทดสอบทำจากวัสดุ FRP ซึ่งเป็นหน้าตัดประกอบ (composite section) ที่มีจุดเชื่อมต่อไม่ต่อเนื่องตลอดความยาวของคาน ทำให้ composite action เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องใช้ strength reduction factor เท่ากับ 0.4 เป็นตัวคูณลดกำลังของสมการออกแบบของ LRFD ลงเพื่อให้ใช้กับวัสดุ FRP หน้าตัดประกอบรูปร่างนี้ได้ ทั้งนี้ค่า strength reduction factor เท่ากับ 0.4 ได้มาจากค่าต่ำสุดของอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบของคานที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุดกับโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LRFD สาเหตุที่ใช้ตัวอย่างคานที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุดในการเปรียบเทียบนั้น เนื่องจากมีกำลังต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่มีจุดเชื่อมต่อ 5 และ 9 จุด ซึ่งจะช่วยให้สมการที่ใช้ในการออกแบบสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยและง่ายต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และสาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ในการวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bank, L.C. 2006. Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. John Wiley & Sons. New Jersey.
- [2] Thumrongvut, J. and Seangatith, S. 2011. Experimental study on lateral-torsional buckling of FRP cantilevered channel beams. Procedia

Engineering. Volume 14: 2438-2445.

- [3] Thumrongvut, J. and Seangatith, S. 2011. Responses of FRP cantilevered channel beams under tip point loads. Key Engineering Materials, Vol.471-472, pp. 578-583.
- [4] Berbero E.J. and DeVivo L. 1999. Beam-column design equations for wide-flange pultruded structural shapes. Journal of Composites for Construction. Volume 3 Number 4: 185-191.
- [5] Creative Pultrusions. 2004. The Pultex Pultrusion Design Manual of Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer Structural Profiles. Alum Bank. Pennsylvania.
- [6] ASCE Structural Plastic Design Manual. 1984. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No.63. ASCE. NY.
- [7] American Institute of Steel Construction, AISC. 2005. Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design. Chicago: 44-63.
- [8] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. 2552. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูด์หน้าตัดรูปรางน้ำ. รายงานฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [9] American Society for Testing and Materials. 2011. Annual Book of ASTM Standard. Standard specification for dimensional tolerance of thermosetting glass-reinforced plastic pultruded shapes. ASTM Standard No.D3917. PA.