

พฤติกรรมโก่งเดาะของคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากที่มีจุด รองรับแบบคานยื่น

Buckling Behavior of Cantilevered Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Angle Beams

จักขดา ฐำรงวุฒิ^{1,*}, คีตาณูชลี ชายทวีป¹, สัทธิชัย แสงอาทิตย์², ชานูชัย เจาะปก¹
ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹ และ จิรศักดิ์ สุพรหมวัน¹

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ในเมือง เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
สุรนารี เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

Jaksada Thumrongvut^{1,*}, Keetalchalee Chaytaweep¹, Sittichai Seangatith², Chanchai Ngohpok¹,
Saksith Pantawee¹ and Jeerasak Supromwan¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,
Nai-Muang, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Suranaree, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: jaksada.th@rmuti.ac.th

Received: Sep 30, 2022; Revised: Mar 28, 2023; Accepted: Mar 30, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากรูปตัว L แบบขาเท่ากันที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น โดยศึกษาพฤติกรรมโก่งเดาะของคานหน้าตัดฉากภายใต้แรงกระทำแบบจุดที่ปลายคาน จากนั้นนำหน้าคานโก่งเดาะที่ทดสอบได้จะถูกเปรียบเทียบกับหน้าคานโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการออกแบบของ AISC-LRFD เพื่อประเมินความเหมาะสมของสมการ ตัวอย่างคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากที่ใช้ทดสอบถูกผลิตจากเส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ โดยวิธีพัลทูดหน้าตัดมี 3 ขนาด ได้แก่ 50×6.4 mm 76×6.4 mm และ 102×6.4 mm โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างในช่วงระหว่าง 10–50 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน้าคานโก่งเดาะและระยะการแอ่นตัวพบว่า พฤติกรรมของตัวอย่างคานมีลักษณะแบบเชิงเส้นถึงค่าประมาณ 90–95% ของหน้าคานโก่งเดาะ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ สมการออกแบบของ AISC-LRFD ไม่เหมาะสมสำหรับทำนายหน้าคานโก่งเดาะของคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉาก สุดท้าย ตัวประกอบปรับแก้ที่เหมาะสมถูกนำเสนอสำหรับการคำนวณหน้าคานโก่งเดาะของคาน

คำสำคัญ: พลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูด, หน้าตัดฉาก, จุดรองรับแบบคานยื่น, พัลทูดชัน

Abstract

In this article, the experimental findings of cantilever beam testing of pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) angle sections are described. The buckling behaviors of PFRP angle section beams under tip concentrated loads are studied. Then, the experimental buckling loads are compared to the critical buckling loads predicted utilizing the AISC-LRFD design equation to evaluate the validity of the equation. The E-glass fiber-reinforced and polyester-resin-based PFRP angle beams tested in this investigation were produced using the pultrusion method. The beams had three different geometries: 50×6.4 mm, 76×6.4 mm, and 102×6.4 mm, and had span-to-width ratios ranging from 10 to 50. According to the load-deformation curves, the specimens have linear elastic responses to 90–95% of their buckling loads. The lateral-torsional buckling is the failure mode of the specimens. According to the findings of the tests, the AISC-LRFD equation provides an unsatisfactory prediction of the critical buckling loads of the pultruded FRP cantilever angle beams. Finally, an appropriate modification factor is provided to compute the buckling loads of PFRP angle beams.

Keywords: Pultruded Fiber-Reinforced Plastic (PFRP), Angle Section, Cantilever Beam, Pultrusion

1. บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชัน (Pultruded Fiber-reinforced Plastic; PFRP) คือ วัสดุประกอบที่ผลิตจากเส้นใยแก้วที่มีความสามารถรับแรงดึงสูง เส้นใยแก้วถูกผสมผสานเข้ากับวัสดุเชื่อมประสานจำพวกเรซิน (Resin) เช่น พลาสติกที่ถูกทำให้แข็งตัวด้วยความร้อน ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และ ไวนิลเอสเตอร์ (Vinylester) เป็นต้น โดยที่วัสดุทั้งสองชนิดยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเหมือนเดิม แต่คุณสมบัติของวัสดุผสมจะแตกต่างจากวัสดุพื้นฐานทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน [1] นอกจากนี้ วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวัสดุประเภทที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (Linear elastic to failure) โดยมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนสูง [2–3] ดังนั้น การเลือกรูปของชิ้นส่วนโครงสร้างจึงเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นที่ควบคุมการออกแบบ [4–5] วัสดุ PFRP มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีเชิงวิศวกรรมโยธา ได้แก่ น้ำหนักเบา อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมี ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [6–10] สามารถออกแบบและผลิตให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การใช้งานในแต่ละงานได้ โดยการเลือกชนิดของเรซิน เส้นใย และกำหนดทิศทางของการวางตัวของเส้นใย

ชิ้นส่วนหน้าตัดโครงสร้าง (Structural profile) ที่ทำจากวัสดุ PFRP ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างในต่างประเทศไม่ต่ำกว่า 30 ปี โดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกาและแถบยุโรป [11] วัสดุ PFRP ถูกนำไปใช้ในโครงสร้างบางประเภท ตัวอย่างเช่น โรงงานบำบัดน้ำเสีย หอทำความเย็น และโรงงานอุตสาหกรรมเคมี หรือโครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่งที่เกิดการกัดกร่อนโดยคลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่วิศวกรผู้ออกแบบยังไม่นำวัสดุ PFRP มาทดแทนเหล็กรูปพรรณในงานเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้างมากนัก เนื่องจากเหตุผลหลายประการ เช่น ขาดความเข้าใจพฤติกรรมทางกลของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP ตลอดจนขาดวิธีการออกแบบ กฎเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนที่ได้มาตรฐาน [12–14] และหนึ่งในชิ้นส่วนหน้าตัดโครงสร้างที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม ได้แก่ หน้าตัดฉาก (Angle section) โดยถูกประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น คานชอย โครงสร้างค้ำยัน และระบบโครงข้อหมุน เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาความพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชันหน้าตัดรูปต่าง ๆ ภายใต้อันตรึง เช่น WF (Wide flange), I และ C (Channel) เป็นต้น [15–20] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมทางโครงสร้างสำหรับคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชันหน้าตัดฉากยังมีจำนวนน้อย เมื่อเปรียบเทียบ

กับหน้าตัดอื่น ๆ [21–23] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดศึกษาตรวจสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชันหน้าตัดฉากที่มีจากรองรับแบบคานยื่นโดยเน้นพฤติกรรมโก่งคดภายใต้แรงคดที่มีผู้ศึกษาไม่มากนัก

2. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว ที่ถูกผลิตโดยวิธีพัลทูดชัน หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (FRP) โดยมีส่วนประกอบหลักคือ เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างหน้าตัดฉากมี 3 ขนาด ได้แก่ 50×6.4 mm 76×6.4

mm และ 102×6.4 mm ตารางที่ 1 แสดงมิติและพิสัยของหน้าตัดฉากที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) โดยตัวอย่างทดสอบจำนวน 30 ตัวอย่างมีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจากรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b) อยู่ในช่วงระหว่าง 10–50 โดยสัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ LXX-C-YY ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการต่อไปนี้ LXX หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดฉากที่มีความกว้างในหน่วย mm C หมายถึง ลักษณะของจากรองรับแบบคานยื่น และสุดท้าย YY หมายถึง ความยาวของตัวอย่างทดสอบในหน่วย m รูปที่ 1 แสดงลักษณะหน้าตัดฉากของคาน FRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 รายละเอียดและสมบัติของหน้าตัดฉาก

Specimens	$b \times t$ (mm $\times$ mm)	L (m)	L/b	y_w (mm)	y_z (mm)	$I_x = I_y$ (mm ⁴)	I_z (mm ⁴)	I_w (mm ⁴)
L50-C-0.5	50.8×6.35	0.5	9.8	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-1.0	50.8×6.35	1.0	19.7	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-1.5	50.8×6.35	1.5	29.5	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-2.0	50.8×6.35	2.0	39.4	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-2.5	50.8×6.35	2.5	49.2	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L76-C-1.0	76.2×6.35	1.0	13.1	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-1.5	76.2×6.35	1.5	19.7	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-2.0	76.2×6.35	2.0	26.2	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-2.5	76.2×6.35	2.5	32.8	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-3.0	76.2×6.35	3.0	39.4	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L102-C-1.0	101.6×6.35	1.0	9.8	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-1.5	101.6×6.35	1.5	14.8	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-2.0	101.6×6.35	2.0	19.7	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-2.5	101.6×6.35	2.5	24.6	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-3.0	101.6×6.35	3.0	29.5	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107

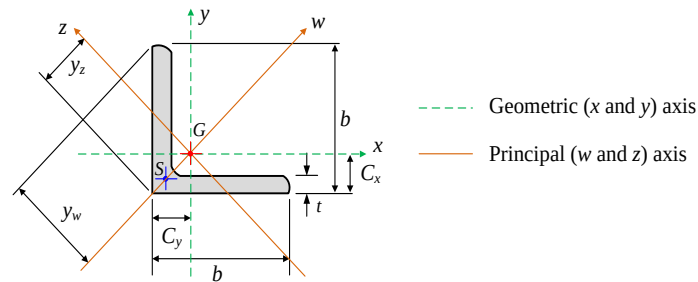
การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดฉากเพื่อกำหนดรับแรงดึงตามแนวแกน (F_L) และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย (E_L) กระทำตาม

มาตรฐาน ASTM D 3039 [24] จากการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงดึงตามแนวแกนเฉลี่ยและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 218 MPa และ 17.5 GPa ตามลำดับ

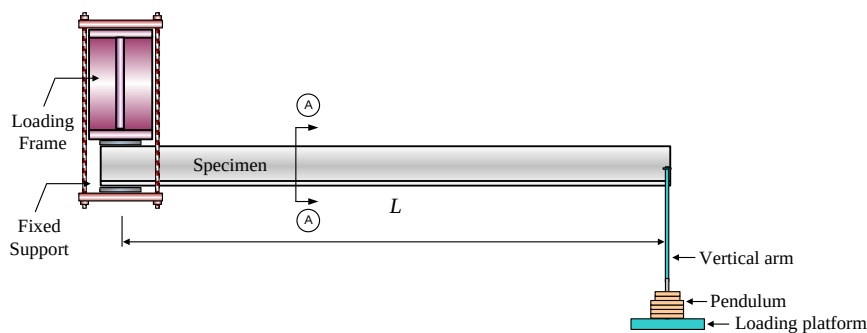
2.2 การทดสอบตัวอย่างคาน

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบคาน PFRP เข้ากับจตุรรองรับแบบคานอื่น โดยใช้แท่งไม้เซาะร่องขนาดเท่ากับหน้าตัดฉากที่ใช้ทดสอบในแต่ละขนาด เมื่อนำตัวอย่างคาน PFRP ติดตั้งเข้ากับร่องดังกล่าวและนำแท่งไม้ไปยึดเข้ากับ Universal Testing Machine (UTM) เพื่อจำลองปลายดังกล่าวให้มีลักษณะเสมือนจตุรรองรับแบบขึ้นแน่น (fixed support) ส่วนปลายด้านอื่นแบบอิสระ (free end) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำเพื่อให้แรงกระทำผ่านเอวของหน้าตัดที่จุด S และสอดคล้องกับการก่อสร้างจริงของคาน PFRP แบบคานอื่นที่ถูกยึดต่อเข้ากับชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ ที่ปีกหรือเอวของหน้าตัดด้วยสลัก

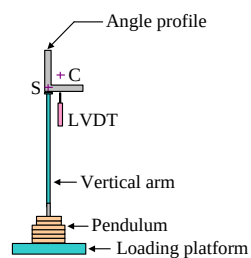
เกลียวและถูกกระทำผ่านจุดยึดดังกล่าว [1] สำหรับการแอนตัวแนวตั้งของคานถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) ติดตั้งที่ปลายคานด้านหนึ่งบริเวณปีกด้านล่างของหน้าตัด เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตรวจสอบความตรงในแนวราบของตัวอย่างคานโดยใช้ระดับน้ำเพื่อเตรียมความพร้อมของตัวอย่าง จากนั้น ทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างต่อเนื่องโดยตุ้มน้ำหนัก (ตุ้มน้ำหนักเหล็กที่ให้แรงกระทำมีค่าน้ำหนักอยู่ในช่วงระหว่าง 10, 5, 2, 1, 0.2 และ 0.1 kg) อุปกรณ์ KYOWA EDX-10 Series Data Acquisition ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลตลอดการทดสอบ จนตัวอย่างคานเกิดการวิบัติ



รูปที่ 1 ลักษณะคาน PFRP หน้าตัดฉาก



(a) Schematic view of PFRP angle beams with tip point load : Cantilever beam support



(b) Load application system (section A-A)

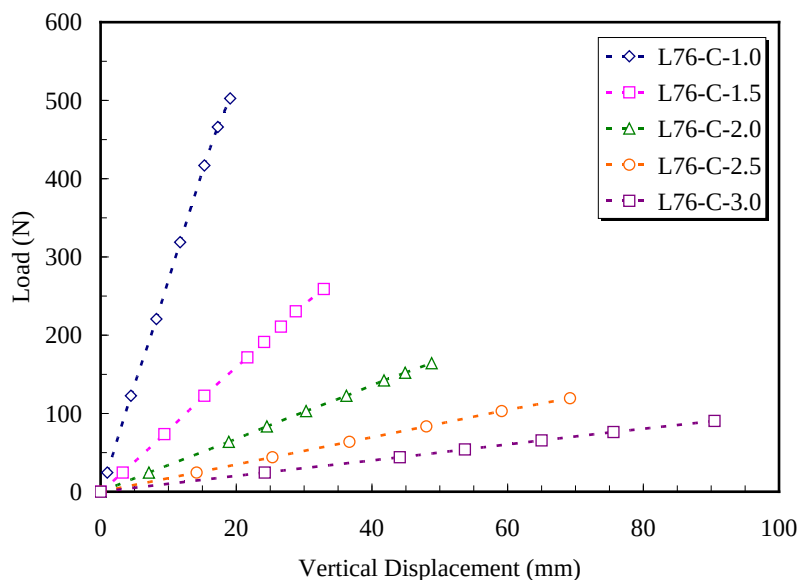
รูปที่ 2 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจตุรรองรับแบบคานอื่น

3. ผลทดสอบและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมโก่งเดาะและลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่งภายใต้แรงดัด จากรูปพบว่า พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างทดสอบในแนวดิ่งมีลักษณะเชิงเส้นถึงประมาณ 90–95% ของน้ำหนักโก่งเดาะ (Buckling load) จากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อยจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยมีลักษณะพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างคาน Pultruded Fiber-reinforced Plastic (PFRP) หน้าตัดรูปร่างนี้ที่ถูกทดสอบโดย

Thumrongvut and Seangatith [6] และ Shan and Qiao [16] ลักษณะการวิบัติโดยรวมของคาน PFRP ทั้ง 3 หน้าตัดภายใต้แรงดัดเป็นการวิบัติแบบเสียดสีรภาพในรูปแบบการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด (Lateral-torsional buckling) โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างและการบิดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบนี้สอดคล้องกับตัวอย่างทดสอบมีความชะลูด (L/b) สูง และทำให้ไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุและการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกของหน้าตัด โดยตัวอย่างคานที่มีความชะลูดมากกว่ามีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างคานที่มีความชะลูดน้อยกว่า [18],[25]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง

3.2 น้ำหนักโก่งเดาะและสมการ AISC-LRFD

ในบทความนี้กำหนดให้น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ (P_{EXP}) เป็นน้ำหนักบรรทุกสุดท้ายก่อนที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติในรูปแบบการโก่งเดาะ รูปที่ 5 แสดงแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b) ภายใต้แรงดัด จากรูปพบว่า เมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b) ลดลง ส่งผลให้น้ำหนักโก่งเดาะของตัวอย่างคาน

PFRP มีค่าเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thumrongvut and Seangatith [1] และ Shan and Qiao [5]

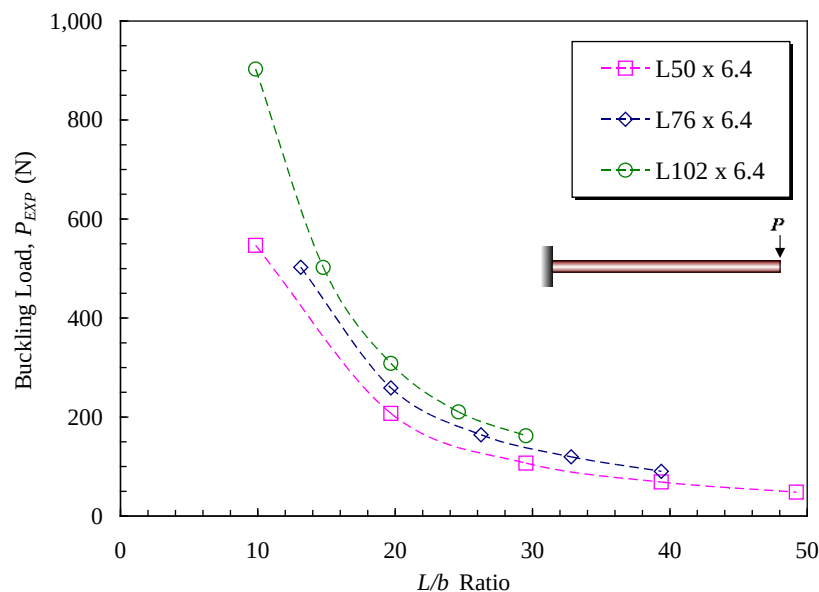
จากนั้นพิจารณาน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ (P_{EXP}) เปรียบเทียบกับสมการสำหรับคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะของชิ้นส่วนหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธี Load and Resistance Factored Design (LRFD) ซึ่งสาเหตุที่ใช้สมการของ AISC-LRFD สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบ เนื่องจากวิธี LRFD มีการนำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเป็นข้อมูลสำหรับการพิจารณาคำนวณ

ในส่วนของความต้านทาน (resistance) ของชิ้นส่วนโครงสร้างมากขึ้น (กำหนดสมการเพื่อใช้ในการคำนวณ) กล่าวคือ พฤติกรรมของโครงสร้างที่คำนวณจากวิธี LRFD มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างมากกว่าพฤติกรรมของโครงสร้างที่คำนวณจากวิธี

Allowable Stress Design (ASD) นอกจากนี้ จากวิจัยตั้งแต่ ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ผลการทดสอบชิ้นส่วนจากวัสดุ FRP จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธี LRFD เป็นส่วนมาก [11],[22],[26],[27]



รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของคาน FRP หน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b)

มาตรฐานออกแบบของ American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธี LRFD (AISC-LRFD) [26] ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะของชิ้นส่วนหน้าตัดฉาก (Single-angle member) ที่ถูกแรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Shear center) ของหน้าตัด โดย

น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น (Cantilevered configuration) สามารถคำนวณได้จากสมการปฏิสัมพันธ์ของผลรวมกำลังของแกนหลัก (principal axis) 2 แกน (รูปที่ 1) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$P_{LRFD} = \frac{\phi\sqrt{2}}{L} \left(\frac{1}{1/M_{nz} + 1/M_{nw}} \right) \quad (1)$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงดัด มีค่าเท่ากับ 0.90
 M_{nw} และ M_{nz} คือ กำลังรับแรงดัดรอบแกนหลัก (major axis)

และกำลังรับแรงดัดรอบแกนรอง (Minor axis) ตามลำดับ ดัง
 แสดงใน AISC-LRFD [28] (หัวข้อที่ 5.3.1) โดยน้ำหนักโก่ง
 เคาะของชิ้นส่วนหน้าตัดฉากที่คำนวณได้จากสมการ
 ออกแบบของ AISC-LRFD (P_{LRFD}) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 น้ำหนักโก่งเคาะและการเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

Specimens	$b \times t$ (mm $\times$ mm)	L (m)	L/b	P_{EXP} (N)	P_{LRFD} (N)	$\frac{P_{EXP}}{P_{LRFD}}$
L50-C-0.5	50.8 $\times$ 6.35	0.5	9.8	546.7	1,186.3	0.46
L50-C-1.0	50.8 $\times$ 6.35	1.0	19.7	207.3	460.1	0.45
L50-C-1.5	50.8 $\times$ 6.35	1.5	29.5	106.8	248.9	0.43
L50-C-2.0	50.8 $\times$ 6.35	2.0	39.4	68.8	157.0	0.44
L50-C-2.5	50.8 $\times$ 6.35	2.5	49.2	48.1	108.3	0.44
L76-C-1.0	76.2 $\times$ 6.35	1.0	13.1	502.6	1,062.6	0.47
L76-C-1.5	76.2 $\times$ 6.35	1.5	19.7	259.0	571.9	0.45
L76-C-2.0	76.2 $\times$ 6.35	2.0	26.2	164.2	359.4	0.46
L76-C-2.5	76.2 $\times$ 6.35	2.5	32.8	119.5	247.3	0.48
L76-C-3.0	76.2 $\times$ 6.35	3.0	39.4	90.4	180.8	0.50
L102-C-1.0	101.6 $\times$ 6.35	1.0	9.8	902.9	1,968.8	0.46
L102-C-1.5	101.6 $\times$ 6.35	1.5	14.8	502.2	1,051.0	0.48
L102-C-2.0	101.6 $\times$ 6.35	2.0	19.7	308.4	656.8	0.47
L102-C-2.5	101.6 $\times$ 6.35	2.5	24.6	210.2	450.2	0.47
L102-C-3.0	101.6 $\times$ 6.35	3.0	29.5	162.2	328.2	0.49

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบและผลการคำนวณจาก
 สมการออกแบบชิ้นส่วนหน้าตัดฉากของ AISC-LRFD
 โดยเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเคาะที่ได้จากการ
 ทดสอบ (P_{EXP}) และสมการออกแบบของ AISC-LRFD
 (P_{LRFD}) จากตารางพบว่า อัตราส่วนของน้ำหนักโก่งเคาะที่
 ได้จากการทดสอบและสมการออกแบบของ AISC-LRFD
 (P_{EXP}/P_{LRFD}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.43–0.46 สำหรับ
 คาน PFRP หน้าตัด 50 $\times$ 6.4 mm ในทำนองเดียวกันสำหรับ
 คาน PFRP หน้าตัด 76 $\times$ 6.4 mm และ 102 $\times$ 6.4 mm มี
 อัตราส่วน P_{EXP}/P_{LRFD} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.45–0.50 และ
 0.46–0.49 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสมการออกแบบของ
 AISC-LRFD ทำนายน้ำหนักโก่งเคาะสูงกว่าผลการ

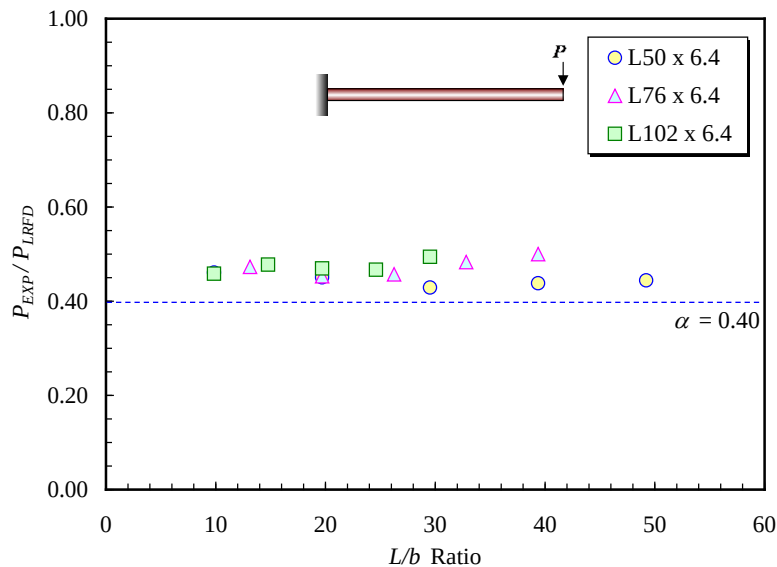
ทดสอบประมาณ 50–57% โดยหนึ่งในสาเหตุหลักมาจาก
 วัสดุ PFRP มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 17.5
 GPa ซึ่งมีความน้อยกว่าเหล็กโครงสร้างที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
 เชิงดิ่งเฉลี่ยประมาณ 200 GPa จึงทำให้มีการดัดตัวที่สูงอีก
 ด้วย จึงเป็นผลทำให้คาน PFRP เกิดการวิบัติแบบ Lateral-
 torsional buckling ได้ง่ายกว่าในเหล็กโครงสร้าง โดย
 ผลกระทบเรื่องนี้ควรได้มีการศึกษาต่อไปในอนาคต ดังนั้น
 ในเบื้องต้นนี้ สมการดังกล่าวควรถูกปรับแก้เพื่อความ
 เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในวัสดุ PFRP หน้าตัด
 ฉากภายใต้แรงดัด

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน
 P_{EXP}/P_{LRFD} และอัตราส่วน L/b จากรูปพบว่า อัตราส่วน

P_{EXP}/P_{LRFD} ทั้งหมดมีค่าในช่วงระหว่าง 0.43–0.50 เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานตัวประกอบปรับแก้ (modification factor; α) ที่เหมาะสมถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.40 ดังนั้นสมการปรับแก้ของ AISC-LRFD สามารถ

คำนวณได้ดังสมการที่ (2)

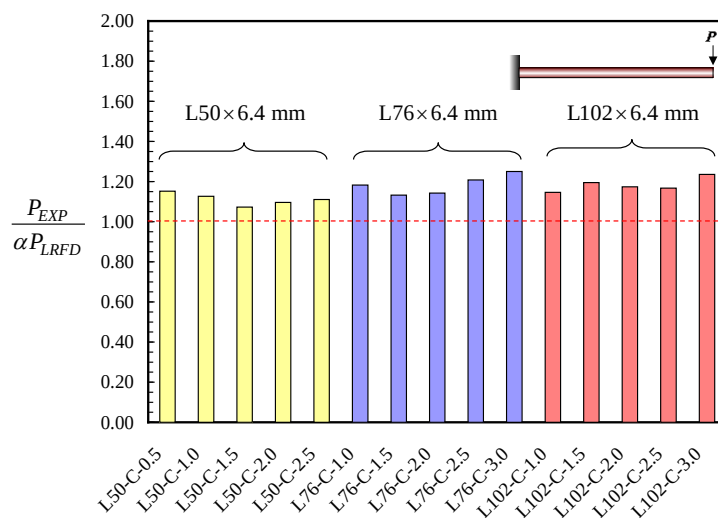
$$P_{mo,LRFD} = \alpha P_{LRFD} \quad (2)$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน P_{EXP}/P_{LRFD} และอัตราส่วน L/b

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบและสมการปรับแก้ของ AISC-LRFD ($P_{mo,LRFD}$) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า อัตราส่วน $P_{EXP}/P_{mo,LRFD}$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.16 ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation; COV) เท่ากับ 0.043 โดยอัตราส่วน $P_{EXP}/P_{mo,LRFD}$ มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงให้เห็น

ว่าน้ำหนักโก่งเดาะที่คำนวณได้จากสมการปรับแก้ของมาตรฐานออกแบบของ American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธี LRFD ที่ถูกนำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินน้ำหนักโก่งเดาะของคาน FRP หน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่นภายใต้แรงดัดได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 7 เปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบและสมการปรับแก้ของ AISC-LRFD

4. สรุปผล

1) พฤติกรรมรับน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แนวโค้งของตัวอย่างคาน Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) มีลักษณะแบบเชิงเส้นถึงค่าประมาณ 90-95% ของ น้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างจะ เปลี่ยนแปลงแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

2) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานเป็นการโก่งเดาะ ด้านข้างจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างและการบิดในเวลาเดียวกัน โดยน้ำหนักโก่งเดาะของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน L/b มีค่าเพิ่มขึ้น

3) เนื่องด้วยการทดสอบนี้มีตำแหน่งแรงกระทำที่ ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงของการก่อสร้างคาน PFRP แบบยื่น และการที่วัสดุ PFRP มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง น้อยกว่าเหล็กโครงสร้างราว 11.4 เท่า ดังนั้น สมการ ออกแบบชิ้นส่วนหน้าตัดฉากของ AISC-LRFD จึงไม่ เหมาะสำหรับทำนายน้ำหนักโก่งเดาะของคาน PFRP หน้า ตัดฉากโดยตรง ดังนั้น ในเบื้องต้น ผู้วิจัยจึงเสนอตัว ประกอบปรับแก้ที่เหมาะสม (modification factor) เท่ากับ 0.40 โดยพบว่า น้ำหนักโก่งเดาะที่คำนวณได้จากสมการ ปรับแก้ของ AISC-LRFD สามารถประเมินน้ำหนักโก่ง เดาะของคาน PFRP หน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น ภายใต้อิทธิพลแรงคดได้อย่างปลอดภัย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน จาก สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่สัญญา FRB650059-NMA-20

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Thumrongvut and S. Seangatith, "Experimental Study on Lateral-Torsional Buckling of PFRP Cantilevered Channel Beams," *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 2438–2445, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.306.
- [2] R. J. Brooks and G. J. Turvey, "Lateral Buckling of Pultruded GRP I-Section Cantilevers," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1–4, pp. 203–215, 1995, doi: 10.1016/0263-8223(95)00018-6.
- [3] L. Xie, Y. Bai, Y. Qi, C. Caprani and H. Wang, "Effect of Width-Thickness Ratio on Capacity of Pultruded Square Hollow Polymer Columns," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 171, no. 11, pp. 842–854, 2018, doi: 10.1680/jstbu.16.00227.
- [4] T. M. Roberts and H. Al-Ubaidi, "Flexural and Torsional Properties of Pultruded Fiber Reinforced Plastics I-Profiles," *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 1, pp. 28–34, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(28).
- [5] S. Seangatith and J. Thumrongvut, "Experimental Investigation on Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-Point Loading," *Advanced Materials Research*, vol. 335–336, pp. 1321–1326, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1321.
- [6] J. Thumrongvut and S. Seangatith, "Responses of PFRP Cantilevered Channel Beams under Tip Point Loads," *Key Engineering Materials*, vol. 471–472, pp. 578–583, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.578.
- [7] D. C. T. Cardoso, K. A. Harries and E. M. Batista, "Compressive Strength Equation for GFRP Square Tube Columns," *Composites Part B: Engineering*, vol. 59, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.057.
- [8] F. Ascione, L. Feo, M. Lamberti, F. Minghini and N. Tullini, "A Closed-Form Equation for the Local Buckling Moment of Pultruded FRP I-Beams in Major-Axis Bending," *Composites Part B:*

- Engineering*, vol. 97, pp. 292–299, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.04.069.
- [9] F. Nunes, J. R. Correia and N. Silvestre, “Structural Behaviour of Hybrid FRP Pultruded Columns. Part 1: Experimental Study,” *Composite Structures*, vol. 139, pp. 291–303, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.058.
- [10] F. Nunes, N. Silvestre and J. R. Correia, “Structural Behaviour of Hybrid FRP Pultruded Columns. Part 2: Numerical Study,” *Composite Structures*, vol. 139, pp. 304–319, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.059.
- [11] C. E. Bakis, L. C. Bank, V. L. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla and T. C. Triantafillou, “Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 2, pp. 73–87, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73).
- [12] J. Thumrongvut and S. Seangatith, “Experimental Evaluation on Fixed End Supported PFRP Channel Beams and LRFD Approach,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 105–107, pp. 1671–1676, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.105-107.1671.
- [13] S. Seangatith, J. Thumrongvut and C. Chatwivat, “Experimental Investigation on Axially Loaded PFRP Compression Members Having Double C-Sections,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 548–549, pp. 510–514, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.510.
- [14] J. Thumrongvut and S. Seangatith, “Influences of Concentric and Eccentric Loads on Buckling of Fixed-End Supported Pultruded FRP Channel Beams,” *Advanced Materials Research*, vol. 1119, pp. 721–725, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.721.
- [15] J. T. Mottram, “Lateral-Torsional Buckling of a Pultruded I-Beam,” *Composites*, vol. 23, no. 2, pp. 81–92, 1992, doi: 10.1016/0010-4361(92)90108-7.
- [16] P. Qiao, G. P. Zou and J. F. Davalos, “Flexural-Torsional Buckling of Fiber Reinforced Plastic Composite Cantilever I-Beams,” *Composite Structures*, vol. 60, no. 2, pp. 205–217, 2003, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00304-5.
- [17] L. Y. Shan and P. Z. Qiao, “Flexural-Torsional Buckling of Fiber-Reinforced Plastic Composite Open Channel Beams,” *Composite Structures*, vol. 68, no. 2, pp. 211–224, 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.03.015.
- [18] J. Thumrongvut and S. Seangatith, “An Experimental Study on The Performance of Fixed-End Supported PFRP Channel Beams under Flexure,” *Advanced Materials Research*, vol. 702, pp. 31–36, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.702.31.
- [19] Y. Pekbey and E. Ghanbari, “Flexural-Torsional Buckling of FRP Thin-Walled Composite with Various Sections,” *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 21, no. 4, pp. 537–549, 2014, doi: 10.1515/secm-2013-0227.
- [20] T. T. Nguyen, T. M. Chan and J. T. Mottram, “Lateral-Torsional Buckling Resistance by Testing for Pultruded FRP Beams under Different Loading and Displacement Boundary Conditions,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 60, pp. 306–318, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.12.025.
- [21] A. Zureick and R. Steffen, “Behavior and Design of Concentrically Loaded Pultruded Angle Struts,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 406–416, 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:3(406).
- [22] M. B. Sirjani and Z. Razzaq, “Unsymmetric and Biaxial Bending of FRP Angle Sections,” *Journal of Reinforced*

- Plastics and Composites*, vol. 24, no. 18, pp. 1979–1984, 2005, doi: 10.1177/0731684405054377.
- [23] J. Thumrongvut, “Testing and Characterization of Simply Supported Pultruded FRP Angle Beams Using Bending Tests,” *Key Engineering Materials*, vol. 777, pp. 548–553, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.777.548.
- [24] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM D3039-08, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2008.
- [25] J. Thumrongvut, N. Pakwan and S. Krathumklang, “Flexural-torsional Buckling of Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Angle Beams Under Eccentric Loading,” *Materials Science Forum*, vol. 982, pp. 201–206, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.982.201.
- [26] J. Thumrongvut, “Lateral-Torsional Buckling of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Cantilever Angle Beams,” Presented at *8th Conference on Smart Structures and Materials (SMART 2017)*, Madrid, Spain, Jun. 5–8, 2017, pp. 471-479.
- [27] J. Qureshi, “A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures,” *Fibers*, vol. 10, no. 3, 2022, Art. no. 27, doi: 10.3390/fib10030027.
- [28] Specification for Load and Resistance Factor Design of Single-Angle Members, S351L, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL., USA, November 10, 2000.