The strengthening of cellular beam with ring stiffeners

*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา
** E-mail : 6410120035@email.psu.ac.th*

งานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังของคานเหล็กที่มีช่องเปิดวงกลมที่เสริมกำลังด้วยครีบวงแหวน เนื่องจากปัจจุบันการศึกษากำลังของคานดังกล่าวมีผลการศึกษาค่อนข้างจำกัด โดยทำการศึกษาด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นจำนวน 120 แบบจำลอง ซึ่งครอบคลุมตัวแปรด้านมิติของคานและครีบวงแหวน พบว่า ครีบวงแหวนสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสำหรับคานที่มีการเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนของช่องเปิดเทียบกับความสูง 0.8 และ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิดเทียบกับขนาดช่องเปิด 1.1 ซึ่งเพิ่มกำลังได้สูงสุดถึงร้อยละ 259 ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนของความสูงคานเทียบกับความกว้างปีก 2.2 และอัตราส่วนของความหนาครีบวงแหวนเทียบกับความหนาเอว 1.3 โดยการเสริมครีบวงแหวนด้วยหน้าตัดอัดแน่นมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุที่ใช้เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ระดับความชะลูดเดียวกันความหนาของครีบวงแหวนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มกำลังที่สูงขึ้น ทั้งนี้สำหรับคานที่มีอัตราส่วนของความสูงเทียบกับความกว้างปีก 2.6 หรือ แผ่นเอวค่อนข้างชะลูด อัตราการเพิ่มกำลังจากการเสริมกำลังมีแนวโน้มน้อยกว่าคานที่หน้าตัดมีความชะลูดน้อย อาจเกิดจากลักษณะความชะลูดของหน้าตัดทำให้มีความเสี่ยงในการวิบัติจากการโก่งเดาะมาก

คำสำคัญ: คานเหล็กที่มีช่องเปิดวงกลม, ครีบวงแหวน, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

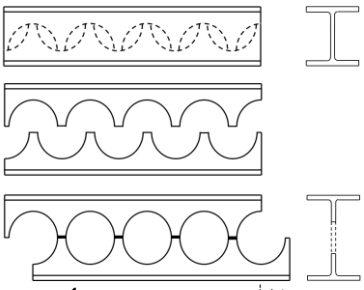
Abstract

This study was to determine parameters which affect the structural strength of the cellular steel beam with strengthening by ring stiffeners. Because these studies are quite limited in the literature. A total of 120 nonlinear finite element models, covering geometrics of cellular beam and ring stiffener, are used in this study. The analysis results showed ring stiffeners can provide high strength for reinforced beams with opening ratio 0.8 and spacing ratio 1.1. The maximum strength is 259% (cellular beam with height ratio 2.2 and thickness of ring stiffener ratio 1.3). The most effective strengthening is compact section. For same slenderness section, thick rings have higher strength than thin rings. For beams with height ratio 2.6 (high slender section), the rate of reinforcement tends to be less than beams whose sections are small slenderness. This may be due to the slenderness of section, making they failed by web-post buckling.

Keywords: cellular beam, ring stiffeners, finite element model

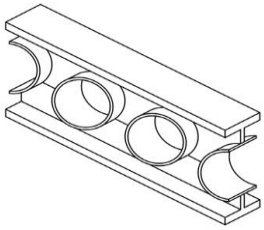
1.

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าขึ้นจึงมีการพัฒนาชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้าง และตอบสนองความต้องการทางสถาปัตยกรรม โดยการตัดคานเหล็กรูปพรรณหน้าตัด I หรือ H แล้วนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันใหม่ [1] แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเรียกคานลักษณะนี้ว่า คานเหล็กที่มีช่องเปิดช่วงซ้ำ มีผลให้การเดินระบบท่อไม่ต้องลอดผ่านท้องคาน ประหยัดวัสดุเหล็กเนื่องจากคานเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดที่บริเวณแผ่นเอวจะมีวัสดุเหล็กสำหรับรับแรงเฉือนเกินความจำเป็น และเมื่อหน้าตัดคานลึกขึ้นทำให้คานสามารถรับแรงดัดได้สูงขึ้น



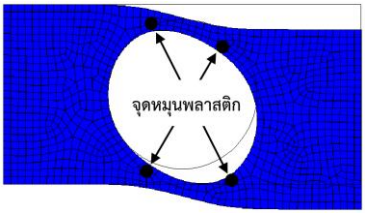
1 กระบวนการผลิตคานที่มีช่องเปิด

เมื่อพิจารณาคานเหล็กที่มีช่องเปิด พบว่านอกเหนือจากการออกแบบคานเหล็กตามปกติ ในการออกแบบคานเหล็กที่มีช่องเปิดจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมเฉพาะที่เกิดจากการกระจายแรงผ่านช่องเปิด ผลการศึกษา [2-4] พบว่าลักษณะการวิบัติที่พบมาก คือ การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดเวียเรนดีล และ การโก่งเดาะที่แผ่นเอว ปัจจุบันมีการเพิ่มกำลังของคานโดยการเสริมแผ่นเหล็กที่มีรูปร่างคล้ายวงแหวนรอบช่องเปิด เรียกว่า ครีบวงแหวน (ring stiffener) แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งทำให้หน้าตัดบริเวณที่ติดกับช่องเปิดมีกำลังต้านทานการโก่งเดาะที่แผ่นเอวบริเวณช่องเปิด และกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเวียเรนดีลสูงขึ้น



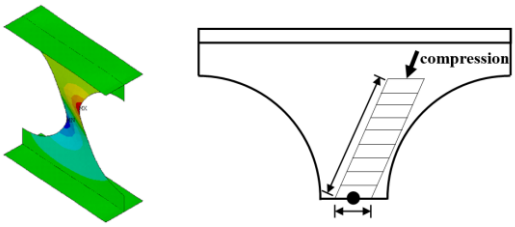
2 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยครีบวงแหวน

โมเมนต์ดัดเวียเรนดีลเป็นการดัดงอเนื่องจากการส่งถ่ายแรงเฉือนที่หน้าตัดตัวทีบนและล่างของช่องเปิด พบว่าพฤติกรรมดังกล่าวทำให้เกิดจุดหมุดพลาสติกที่ตำแหน่งมุมทั้ง 4 ของช่องเปิด แสดงดังรูปที่ 3 โดยตำแหน่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปแบบแรงกระทำที่เกิดขึ้นและรูปทรงของคาน ซึ่งแม้รูปทรงของช่องเปิดจะแตกต่างกันแต่มีลักษณะของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เป็นรูปแบบเดียวกัน [5-6] โดย Chung et al. [7] ได้เสนอสมการอย่างง่ายในการทำนายกำลังรับน้ำหนักจากการต้านทานแรงดัดของหน้าตัดตัวทีที่หน้าตัดวิกฤติ ต่อมา Panedpojaman et al. [8] ได้เสนอเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ในการตรวจสอบการวิบัติจากโมเมนต์ดัดเวียเรนดีลของคานที่มีช่องเปิดช่องเปิดวงกลมแบบขยาย



3 ลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดเวียเรนดีล

การโก่งเดาะที่แผ่นเอวดังรูปที่ 4 เป็นพฤติกรรมเนื่องมาจากแรงอัดที่เกิดจากการส่งถ่ายแรงเฉือนระหว่างช่องเปิดทำให้เกิดพฤติกรรมเสาเสมือนขึ้นในแผ่นเอว มักเกิดในคานที่มีระยะห่างของช่องเปิดแคบ ซึ่งโมเมนต์ดัดเวียเรนดีลจะมีผลมากในช่วงเริ่มต้นรับน้ำหนัก และการโก่งเดาะที่แผ่นเอวจะส่งผลมากในช่วงท้ายก่อนคานวิบัติ [9] โดย Ellobody [10] ได้ศึกษาคานที่มีช่องเปิดช่วงช้ำรูปหกเหลี่ยมด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมีการวิเคราะห์ผลของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดด้วย พบว่า ผลของการโก่งเดาะที่แผ่นเอวทำให้กำลังรับน้ำหนักของคานลดลงเป็นอย่างมาก โดยสามารถคำนวณกำลังต้านทานการโก่งเดาะของแผ่นเอวได้ตามคู่มือการออกแบบ SCI P355 [11] ซึ่งต่อมา Panedpojaman et al. [12] ได้ปรับแก้ความยาวประสิทธิผลของเสาเสมือน และเสนอสมการทำนายกำลังรับแรงเฉือนของคานเหล็กที่มีช่องเปิดวงกลมสมมาตรและไม่สมมาตรที่กึ่งกลางความสูงคาน ให้สามารถทำนายกำลังรับน้ำหนักได้แม่นยำขึ้น



4 ลักษณะการวิบัติจากการโก่งเดาะที่แผ่นเอวและเสาเสมือนที่แผ่นเอว

การเสริมวงแหวนรอบช่องเปิดวงแหวนเหล็กทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักของคาน ลดพฤติกรรมการวิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะที่แผ่นเอว และทำให้จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของช่องเปิดเปลี่ยนตำแหน่งไป [13] แต่เพิ่มความหนาของวงแหวนขึ้นอีกก็จะส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย [14] โดยการออกแบบมีข้อแนะนำตามคู่มือการออกแบบ SCI P355 [11] อย่างไรก็ตามผลการศึกษาด้านพฤติกรรมและประสิทธิภาพการเสริมกำลังช่องเปิดด้วยครีบวงแหวนมีค่อนข้างจำกัด ดังนั้นการศึกษานี้จึงศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่มีช่องเปิดรูปวงกลมที่เสริมกำลังด้วยครีบวงแหวน เพื่อให้ได้ข้อแนะนำในการออกแบบครีบวงแหวน

2.

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ANSYS แบบจำลองใช้เอลิเมนต์แบบเปลือกบาง (shell element) หรือ SHELL181 ซึ่งเหมาะในการจำลองโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนาไม่มาก เอลิเมนต์ที่ใช้มี 4 โหนด แต่ละโหนดมี 6 ลำดับขั้นความอิสระ (DOF) ได้แก่ การเคลื่อนตัวและการหมุนในทิศทาง x, y และ z โดยเอลิเมนต์ดังกล่าวสามารถรองรับการเคลื่อนตัวหรือการหมุนของโหนดรวมถึงความเครียดในเอลิเมนต์ระดับสูงจากการเสียรูปอย่างมากได้ ขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้คือ $H/25$ [15] ซึ่งเป็นขนาดที่ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลเฉลยในรูปน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการแอ่นตัว ทั้งนี้ในการศึกษานี้พิจารณาความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัด ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามระดับความไม่สมบูรณ์ไม่อาจระบุเป็นค่าที่แน่นอนได้ การศึกษานี้จึงได้ประมาณค่าความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดโดยใช้ลักษณะการโก่งเดาะโหมดที่ 1 (first buckling mode) จากการวิเคราะห์ eigenvalue และเนื่องจากโดยทั่วไปยิ่งหน้าตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น ความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดก็จะเพิ่มขึ้น จึงขยายความไม่สมบูรณ์โดยใช้ตัวคูณขยาย $H/500$ [16] โดย H คือ ความลึกของคาน ทั้งนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาไม่พิจารณาหน่วยแรงคงค้างที่เกิดจากการเชื่อม แต่การกำหนดความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดสามารถชดเชยผลของหน่วยแรงคงค้างได้ระดับหนึ่ง [17]

คุณสมบัติของวัสดุเหล็กที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองกำหนดให้มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นพลาสติกโดยสมบูรณ์ (perfectly plastic) หลังจากจุดคราก การวิเคราะห์แบบจำลองเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear analysis) ร่วมกับวิธีการหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ในการวิเคราะห์จะค่อยๆให้น้ำหนักบรรทุกจนเกิดการวิบัติ โดยในแต่ละน้ำหนักบรรทุกที่ให้โปรแกรมจะแบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ เพื่อให้สามารถหาผลเฉลยได้โดยง่าย

2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ก่อนทำการศึกษาเชิงพารามิเตอร์จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ANSYS โดยการเปรียบเทียบผลทดสอบจากงานวิจัยในอดีตและผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีช่องเปิด รายละเอียดของคานเหล็กที่มีช่องเปิดซึ่งใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5 โดยที่ H คือ ความลึกของคาน, d_o คือ ขนาดของช่องเปิด, b_f คือ ความกว้างของปีกคาน, t_f คือ ความหนาของปีกคาน, t_w คือ ความหนาของเอวคาน, s คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของช่องเปิด, L คือ ความยาวช่วงของคาน, LO คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับกับช่องเปิดวิกฤต, LP คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับด้านซ้ายกับแรงกระทำ, $f_{y,f}$ คือ หน่วยแรงครากของแผ่นปีก และ $f_{y,w}$ คือหน่วยแรงครากของแผ่นเอว การเปรียบเทียบแสดงในรูปแรงเฉือนวิบัติดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนวิบัติจากแบบจำลองต่อแรงเฉือนวิบัติจากการทดสอบที่ 0.99 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายกำลังของคานเหล็กที่มีช่องเปิด

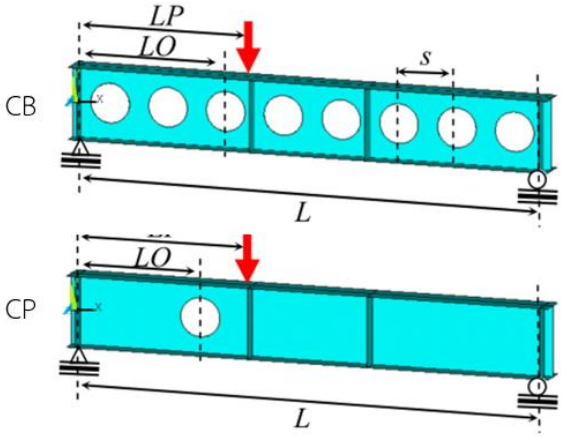
1 ตัวอย่างทดสอบที่นำมาตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวอย่าง	H มม.	bf มม.	t_w มม.	t_f มม.	s มม.	do มม.	L ม.	LO ม.	LP ม.	$f_{y,f}$ MPa	$f_{y,w}$ MPa	ทดสอบโดย
CB1	289.8	133.2	5.7	7.8	300	200	3.10	1.40	1.550	310	328	[18]
CB2	289.8	133.2	5.7	7.8	300	200	5.50	1.68	1.833, 3.67	323	354	
CB3	309.3	133.2	5.7	7.8	300	225	3.80	1.75	1.900	320	347	
CB4	309.3	133.2	5.7	7.8	300	225	5.60	1.72	1.867, 3.73	343	394	
CB5	435.0	101.6	5.8	7.0	450	300	3.80	1.68	1.900	350	370	
CB6	435.0	101.6	5.8	7.0	450	300	4.20	1.18	1.400, 2.80	337	343	
CB7	394.5	113	9.4	14.1	389	286	2.83	1.42	1.415	285	285	[19]
CP1	400	200	8.0	12.0	-	210	1.80	0.385	1.800	259.8	259.8	[20]
CP2	400	200	8.0	12.0	-	250	1.80	0.385	1.800	259.8	259.8	
CP3	400	200	8.0	12.0	-	290	1.80	0.385	1.800	259.8	259.8	
CP4*	303.4	165.0	8.0	10.20	900	231	1.50	0.300	0.600, 0.900	337.5	299	[21]
CP5	206.4	133.4	6.00	8.23	-	114.3	1.52	0.457	0.760	350.9	375.1	[22]
CP6*	204.2	133.4	6.33	7.52	228.6	114.3	1.52	0.686	0.760	296.5	304.7	
CP7*	206.4	133.4	5.94	8.15	171.7	114.3	1.52	0.629	0.760	313	370.9	
CP8	206.4	133.4	6.22	8.20	-	114.3	2.54	0.762	1.016	310.3	359.9	
CP9*	206.4	133.4	6.25	8.18	228.6	114.3	2.54	1.448	1.524	295.1	399.9	
CP10*	206.4	133.4	6.30	8.28	171.7	114.3	2.54	1.390	1.524	330.9	370.9	
CP11	431.0	183.4	7.01	10.74	-	118.6	2.03	0.539	1.015	297.2	320.6	[23]

*หมายเหตุ * กรณีตัวอย่างมี 2 ช่องเปิด*

2 ผลการเปรียบเทียบแรงเฉือนวิบัติ

ตัวอย่าง	แรงเฉือนวิบัติ		FE/Exp.
	Exp.	FE	
CB1	59.8	69.2	1.157
CB2	54.0	60.7	1.124
CB3	56.0	66.0	1.178
CB4	58.5	67.1	1.147
CB5	75.5	84.0	1.113
CB6	96.5	98.3	1.018
CB7	108.5	116.9	1.077
CP1	210	175.9	0.838
CP2	200	159.3	0.797
CP3	155.0	124.4	0.803
CP4*	137.0	111.8	0.816
CP5	131.4	139.8	1.064
CP6*	115.2	90.0	0.781
CP7*	123.0	107.6	0.875
CP8	84.4	91.6	1.085
CP9*	58.6	55.6	0.949
CP10*	61.8	62.1	1.005
CP11	375.9	338.4	0.900
ค่าเฉลี่ย			0.985
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.1407



5 ลักษณะของตัวอย่างที่เปรียบเทียบ CB และ CP [8]

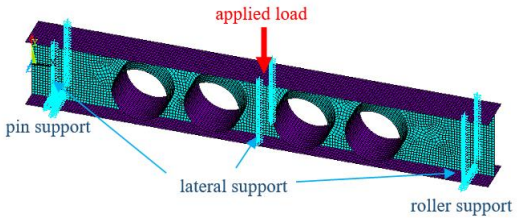
3.

การศึกษาด้านพฤติกรรมการวิบัติและกำลังต้านทานการวิบัติของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวงแหวน ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหน้าตัดคานซึ่งกำหนดความหนาของแผ่นเอวเท่ากับ 6.5 มม. ความสูงของแผ่นเอวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่แผ่นปีกมีขนาดคงที่ความกว้าง 150 มม. หนา 9 มม. โดยคานมีการรองรับอย่างง่าย (simple support) มีการควบคุมไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้าง โดยให้น้ำหนักบรรทุก 1 จุดที่กึ่งกลางคาน ในตำแหน่งที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำจะมีการเสริมด้วยแผ่นตั้งด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 6 คุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองเป็นแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์หลังจากเกิดการคราก ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 2 โดยกำหนดให้มีค่าความเค้นครากเท่ากับ 335 MPa และโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 200 GPa โดยในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมด 120 แบบจำลอง ประกอบด้วยคานที่มีช่องเปิดวงกลมที่ไม่การเสริมกำลัง 12 แบบจำลอง และคานที่มีช่องเปิดวงกลมที่เสริมกำลังด้วยครีบวงแหวน 108 แบบจำลอง ซึ่ง

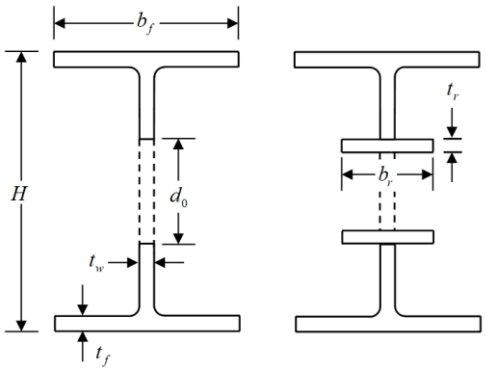
ครอบคลุมตัวแปรดังนี้ (พิจารณารูปที่ 7 ประกอบ) โดยที่ b_r คือ ความกว้างของครีบวงแหวน และ t_r คือ ความหนาของครีบวงแหวน

- ความสูงคานเทียบกับความกว้างของปีก 3 อัตราส่วน (H/b_f) ได้แก่ 1.8, 2.2 และ 2.6
- ขนาดของช่องเปิดเทียบกับความสูงคาน 2 อัตราส่วน (d_o/H) ได้แก่ 0.6, 0.8
- ระยะห่างระหว่างช่องเปิดเทียบกับขนาดของช่องเปิด 2 อัตราส่วน (s/d_o) ได้แก่ 1.1 และ 1.3
- ความชะลูดของครีบวงแหวนตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 [24] จำนวน 3 หน้าตัด ($b_r/2t_r$) ได้แก่ หน้าตัดอัดแน่น ($b_r/2t_r$=6.85), หน้าตัดไม่อัดแน่น ($b_r/2t_r$=19.4) และหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด ($b_r/2t_r$=26.0)
- ความหนาของครีบวงแหวนเทียบกับความหนาของแผ่นเอว 3 อัตราส่วน (t_r/t_w) ได้แก่ 0.7, 1.0 และ 1.3

ทั้งนี้อัตราส่วน H/b_f , d_o/H และ s/d_o เป็นช่วงอัตราส่วนที่มีการใช้งานทั่วไปในคานเหล็กที่มีช่องเปิดช่วงซ้ำรูปวงกลม (cellular beam)



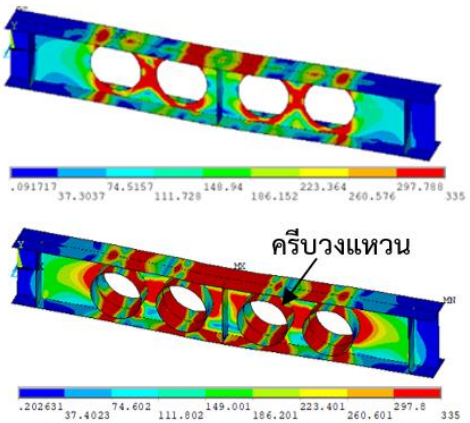
6 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเชิงพารามิเตอร์



7 ส่วนประกอบของคานที่มีช่องเปิด

4.

พฤติกรรมการวิบัติของคานเหล็กโดยมากมีความใกล้เคียงดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8 ในกรณีที่คานที่ไม่เสริมกำลังจะเกิดการวิบัติด้วยพฤติกรรมการโก่งเดาะที่แผ่นเอวเป็นหลัก และการเสริมกำลังด้วยครีบวงแหวนช่วยต้านทานความเค้นที่แผ่นเอวระหว่างช่องเปิด ซึ่งทำให้สามารถต้านทานแรงเฉือนได้มากขึ้นและไม่เกิดการวิบัติด้วยการโก่งเดาะที่แผ่นเอว ดังนั้นในการออกแบบกำลังต้านการโก่งเดาะที่แผ่นเอว SCI P355 [11] จึงกำหนดให้ความยาวประสิทธิผลของเสาเสมือนสำหรับการโก่งเดาะลดลง เนื่องจากคานที่เสริมกำลังด้วยครีบวงแหวนสามารถต้านทานการโก่งเดาะที่แผ่นเอวได้ดี จึงส่งผลให้คานสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้จนเกิดการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดเวียเรนดีล และโมเมนต์ดัด



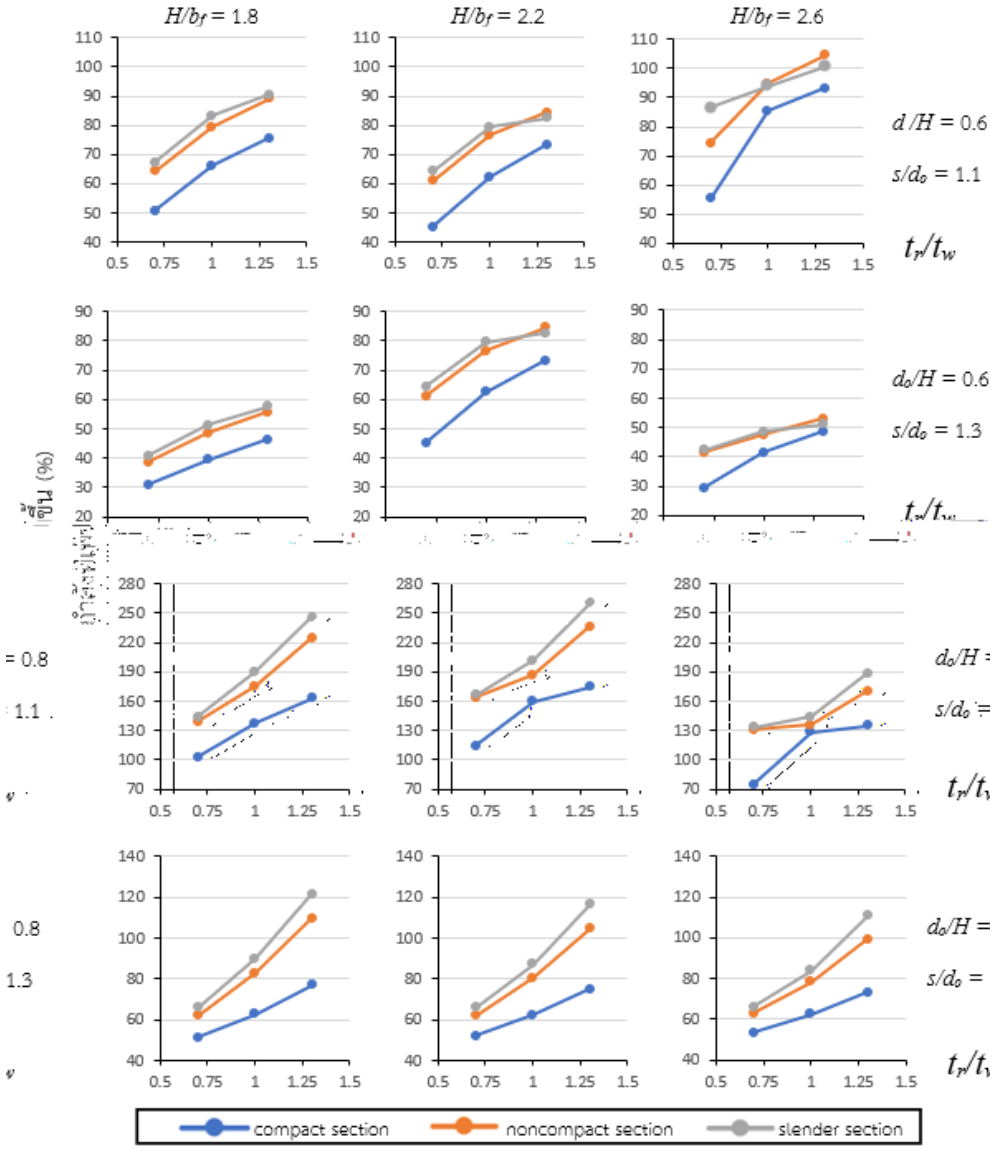
8 เปรียบเทียบการวิบัติและ Von Mises Stress ของแบบจำลองที่ไม่เสริมกำลัง และแบบจำลองที่เสริมครีบวงแหวน

ผลที่ได้จากการศึกษาเชิงพารามิเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้านมิติ กับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักของคานที่มีการเสริมกำลังด้วยครีบวงแหวนเมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีการเสริมกำลัง ดังรูปที่ 9 โดยในการศึกษานี้พบว่า

ครีบวงแหวนสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสำหรับคานเหล็กที่มีค่าอัตราส่วน d_o/H=0.8 และ s/d_o=1.1 โดยคานดังกล่าวหากไม่เสริมกำลังจะมีความเสี่ยงในการวิบัติด้วยโมเมนต์ดัดเวียเรนดีล (เนื่องจากหน้าตัดเหนือช่องเปิดมีขนาดเล็ก) และ การโก่งเดาะที่แผ่นเอว (เนื่องจากแผ่นเอวระหว่างช่องเปิดมีขนาดเล็ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังสามารถช่วยเพิ่มกำลังต้านทานได้ทั้งสองรูปแบบการวิบัติ พฤติกรรมการต้านทานการโก่งเดาะที่แผ่นเอวได้อธิบายแล้วข้างต้น ส่วนการต้านทานโมเมนต์ดัดเวียเรนดีลเนื่องจากการเสริมกำลังจะเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเหรือช่องเปิดทำให้สามารถต้านทานโมเมนต์ดัดเวียเรนดีลได้สูงขึ้น ทั้งนี้ครีบวงแหวนสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสุดร้อยละ 259 สำหรับคานเหล็กที่ค่าอัตราส่วน H/b_f =2.2 และ t_r/t_w =1.3

การเสริมกำลังด้วยหน้าตัดประเภทอัดแน่นมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยครีบวงแหวนที่มีหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูด สามารถเพิ่มกำลังได้เฉลี่ยร้อยละ 75.6, 96.2 และ 101.9 ตามลำดับ (ปริมาณวัสดุของครีบวงแหวนที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูดมีปริมาณวัสดุเป็น 2.83 และ 3.80 เท่าของหน้าตัดอัดแน่น ตามลำดับ) การเพิ่มปริมาณวัสดุมากขึ้นแต่อัตราการเพิ่มกำลังลดลง ในบางกรณีหน้าตัดชะลูดซึ่งใช้ปริมาณวัสดุมากกว่ากลับมีกำลังที่น้อยกว่าหน้าตัดไม่อัดแน่น ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ของครีบวงแหวน อย่างไรก็ตามที่ระดับความชะลูดเดียวกันความหนาของครีบวงแหวน (พิจารณาจากค่าอัตราส่วน t_r/t_w) ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มกำลังที่สูงขึ้น

ทั้งนี้สำหรับคานที่มีค่าอัตราส่วน H/b_f =2.6 (เป็นคานที่มีหน้าตัดแผ่นเอวค่อนข้างชะลูด) อัตราการเพิ่มกำลังจากการเสริมกำลังมีแนวโน้มน้อยกว่ากรณี H/b_f =1.8 และ 2.2 อาจเกิดจากลักษณะความชะลูดของหน้าตัดทำให้มีความเสี่ยงในการวิบัติจากการโก่งเดาะมากกว่าหน้าตัดอื่น



9 ความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านมิติกับกำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

5.

การศึกษาเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังของคานเหล็กที่มีช่องเปิดวงกลมที่เสริมกำลังด้วยครีบวงแหวน โดยทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำนวน 120 แบบจำลอง ครอบคลุมตัวแปร ได้แก่ ขนาดของหน้าตัดคาน, ขนาดของช่องเปิด, ระยะห่างระหว่างช่องเปิด และอัตราส่วนความชะลูดของครีบวงแหวน แล้วแสดงผลที่ได้ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านมิติและการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักของคานที่มีการเสริมกำลังด้วยครีบวงแหวนเทียบกับคานที่ไม่เสริมกำลัง ผลการศึกษาพบว่า คานที่ไม่เสริมกำลังมักวิบัติด้วยพฤติกรรมการโก่งเดาะที่แผ่นเอวเป็นหลัก ซึ่งการเสริมกำลังด้วยครีบวงแหวนช่วยต้านทานความเค้นที่แผ่นเอวระหว่างช่องเปิดทำให้สามารถต้านทานแรงเฉือนได้มากขึ้นและไม่เกิดการวิบัติด้วยการโก่งเดาะที่แผ่นเอว โดยครีบวงแหวนสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสำหรับคานที่มีการเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนของช่องเปิดเทียบกับความสูง 0.8 และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างช่องเปิดเทียบกับขนาดช่องเปิด 1.1 ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสุดถึงร้อยละ 259 สำหรับคานเหล็กที่ค่าอัตราส่วนของความสูงคานเทียบกับความกว้างปีก 2.2 และมีอัตราส่วนของความหนาครีบวงแหวนเทียบกับความหนาเอว 1.3 โดยการเสริมกำลังด้วยหน้าตัดอัดแน่นมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้น โดยครีบวงแหวนที่มีหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูด สามารถเพิ่มกำลังได้เฉลี่ยร้อยละ 75.6, 96.2 และ 101.9 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณวัสดุของครีบวงแหวนที่มีหน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชะลูดมีปริมาณวัสดุเป็น 2.83 และ 3.80 เท่าของหน้าตัดอัดแน่น ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ระดับความชะลูดเดียวกัน ความหนาของครีบวงแหวนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มกำลังที่สูงขึ้น ทั้งนี้สำหรับคานที่มีอัตราส่วนของความสูงคานเทียบกับความกว้างปีก 2.6 หรือแผ่นเอวค่อนข้างชะลูด อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจากการเสริมครีบวงแหวนมีแนวโน้มน้อยกว่าคานที่แผ่นเอวมีความชะลูดน้อย อาจเกิดจากลักษณะความชะลูดของหน้าตัดที่สูงจึงมีความเสี่ยงในการวิบัติจากการโก่งเดาะมาก

ขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ส่งเสริมการทำวิจัยในครั้งนี้

[1] Boyer, J.P. (1964). Castellated Beams-New Development. AISC Engineering Journal, 1, pp. 104-108

[2] Kerdal, D. and Nethercot, D.A. (1984). Failure modes for castellated beams. Journal of Constructional Steel Research, 4(4), pp. 295-315

[3] Lawson, R.M., Lim J., Hicks S.J. and Simms W.I. (2006). Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. Journal of Constructional Steel Research, 62(6), pp. 614-629.

[4] Chung, K.F., Liu, T.C.H. and Ko, A.C.H. (2003). Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment-shear interaction curve. Journal of Constructional Steel Research, 59(9), pp. 1177-1200.

[5] Tsavdaridis, K.D. and D'Mello, C. (2012). Optimization of novel elliptically based web opening shapes of perforated steel beams. Journal of Constructional Steel Research, 76, pp. 39–53.

[6] Tsavdaridis, K.D. and D'Mello, C. (2012). Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses. Journal of Structural Engineering, 138(10), pp. 1214-1230.

[7] Chung, K.F., Liu, T.C.H. and Ko, A.C.H. (2001). Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. Journal of Constructional Steel Research, 57(5), pp. 467-490.

[8] Panedpojaman, P., Thepchatri, T. and Limkatanyu, S. (2015). Novel simplified equations for Vierendeel design of beams with (elongated) circular openings. Journal of Constructional Steel Research, 112, pp. 10-21.

[9] Hechler, O., Mueller C. and Sedlacek, G. (2004). Investigations on beams with multiple regular web openings. Fifth International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete, Mpumalanga, South Africa, 18-23 July 2004, pp. 270-281.

[10] Ellobody, E. (2011). Interaction of buckling modes in castellated steel beams. Journal of Constructional Steel Research, 67(5), pp. 814-825.

[11] Lawson, R.M. and Hicks, S.J. (2011). SCI P355: Design of composite beams with large opening. Berkshire, UK: Steel Construction Institute.

[12] Panedpojaman, P., Thepchatri, T. and Limkatanyu, S. (2014). Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. Thin-Walled Structures, 76, pp. 92-104.

[13] Zeytinci, B.M. (2021). A practical design formulation for perforated beams with openings strengthened with ring type stiffeners subject to Vierendeel actions. Journal of Building Engineering, 43(4), pp. 1-16.

[14] Al-Thabhawee, H. W. and Al-Kannoon, M. A. (2018). Improving Behaviour of Castellated Beam by Adding Spacer Plat and Steel Rings, Journal of University of Babylon, 26(4), pp. 331-344.

[15] Sae-Long, W. and Panedpojaman, P. (2015). Design Strength Comparison of Cellular Beam Based on EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10 Codes. UBU engineering journal, 8(2), pp. 14-24.

[16] Lawson, R.M., Oshatogbe, D. and Newman, G.M. (2006). FBeam 2006 design guide: Design of FABSEC cellular beams in non-composite and composite applications for both normal temperature and fire engineering conditions. Wetherby, UK: Fabsec Limited publication.

[17] Nseir, J., Lo, M. et al. (2012). Lateral torsional buckling of cellular steel beams. Proceedings of the structural stability research council annual stability conference (SSRC2012), Texas, USA.

[18] Warren, J. (2001). Ultimate load and deflection behaviour of cellular beams. MSc thesis, University of Natal. South Africa.

[19] Erdal, F. and Saka, MP. (2013). Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. Journal of Constructional Steel Research, 80, pp. 355–68.

[20] Ru, JP. (2005). Experimental studies on aseismic behaviors of connections and moment resisting frame with opening on beam web. Journal of Harbin Institute of Technology, 38(8), pp. 1303-1309.

[21] Tsavdaridis, K.D., D' Mello C. and Hawes M. (2009). Experimental study of ultra-shallow floor beams with perforated steel sections. National Specialist Contractors Council 2009, Malmo, Sweden, 2-4 September 2009, pp. 312-319.

[22] Redwood, R.G. and McCutcheon, J.O. (1968). Beam tests with unreinforced web openings. Journal of the Structural Division (ASCE), 94(1), pp. 1-17.

[23] Redwood R.G., Baranda H. and Daly M.J. (1978). Tests of thin-webbed beams with unreinforced holes. Journal of the Structural Division (ASCE), 104(3), pp. 577-95.

[24] American Institute of Steel Construction (2016). ANSI/AISC 360-16: Specification for structural steel buildings. Illinois, USA: American Institute of Steel Construction.