

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.1 การวิบัติของโครงสร้างเหล็กรับแรงอัด

เมื่อเสารับน้ำหนักหรือแรงกดอัด หากหน่วยแรงอัดบนหน้าตัดของเสายังไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ (Proportional Limit) เมื่อน้ำหนักลดลง เสาจะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมได้ แต่ถ้าหากเสารับน้ำหนักหรือแรงกดอัดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงน้ำหนักหรือแรงกดอัดวิกฤต (Critical Load) เสาจะเกิดการวิบัติ ซึ่งกำลังรับน้ำหนักและลักษณะวิบัติของเสาขึ้นกับประเภทของเสาว่าเป็น เสาสั้น เสายาว ชะลุด ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนความชะลุดของเสา และสัดส่วนของหน้าตัด

เสาสั้น สามารถรับน้ำหนักได้จนกระทั่งหน่วยแรงอัดวิกฤตบนหน้าตัดของเสาเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก หรือเลยเข้าไปถึงช่วงการแข็งตัวเพิ่ม (Strain-Hardening) ของวัสดุที่ใช้ก็ได้ ลักษณะการวิบัติของเสาสั้นจึงเกิดแบบคราก (Yielding Failure) โดยหน้าตัดเสาถูกกดอัดจนเสียรูป (Crushing) แต่ไม่มีการโก่งตัวออกด้านข้าง

เสายาวปานกลาง การวิบัติของเสาเป็นลักษณะผสมผสานระหว่างการคราก (Yielding Failure) กับการโก่งเดาะ (Buckling Failure) โดยหน่วยแรงอัดวิกฤตเฉลี่ยบนหน้าตัดมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งหน้าตัดบางส่วนอาจต้องรับหน่วยแรงอัดวิกฤตสูงถึงหน่วยแรงที่จุดคราก และบางส่วนอาจต้องรับหน่วยแรงอัดวิกฤตไม่ถึงหน่วยแรงที่จุดคราก การวิบัติของเสายาวปานกลางจะเป็นแบบการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก (Elastic Buckling)

เสายาว การวิบัติของเสาจะเป็นลักษณะการโก่งเดาะอย่างเดียว (Buckling Failure) โดยหน่วยแรงอัดวิกฤตเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตลอดทั้งหน้าตัดมีค่าไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุ เสายาวจะวิบัติแบบการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก (Elastic Buckling)

2.2 รูปแบบพื้นฐานเกี่ยวกับการโก่งเดาะ

เมื่อชิ้นส่วนเหล็กผนังบางรับแรงอัด ซึ่งมาจากแรงอัดหรือแรงดัด ชิ้นส่วนจะเกิดแรงอัดตามแนวแกน (In-plane compressive stress) แต่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดหน่วยแรงในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบ (Out of plane) เนื่องจากชิ้นส่วนมีค่าความต้านทานการดัดต้านทานให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับระนาบ ซึ่งการเคลื่อนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก เมื่อแต่ละชิ้นส่วนของแผ่นบางประกอบเป็นหน้าตัดจะสามารถเกิดการโก่งเดาะในรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.2.1 การเกิดการโก่งเดาะทั้งหมด (Global buckling) เป็นรูปแบบการโก่งเดาะหน้าตัดทั้งหมด เกิดการดัดงอออกทางด้านข้าง (Flexural buckling) หรือ หน้าตัดเกิดการบิดแบบทันทที่ทันใดโดยไม่มีการดัดร่วมเข้ามา (Torsion buckling) หรือการดัดออกทางด้านข้างร่วมกับการบิดพร้อมกัน (Flexural torsion buckling) การเกิดการโก่งเดาะดังกล่าวนี้หน้าตัดยังคงรูปเดิมไม่มีการบิดเบี้ยว ในบางกรณีจะเรียกว่าการโก่งเดาะออยเลอร์ (Euler buckling) ระยะครึ่งช่วงคลื่น (Half wave length) จะเท่ากับระยะที่ปราศจากการยึดรั้ง (Unbraced length) ขององค์อาคาร

2.2.2 การเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) เป็นรูปแบบการโก่งเดาะที่เกิดกับชิ้นส่วนแผ่นบาง ตรงตำแหน่งที่เกิดการดัดจะไม่เกิดการเลื่อนของหน้าตัด (Translation) แต่เกิดการหมุนได้ ระยะช่วงคลื่น (Half-wave length) ของการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ จะมีค่าค่อนข้างสั้นไม่เกินกว่ามิติที่มากที่สุดของหน้าตัดรับแรงอัด

2.2.3 การโก่งเดาะบิดเบี้ยว (Distortional Buckling) เป็นรูปแบบการโก่งเดาะที่เกิดผสมกันระหว่างการโก่งเดาะเฉพาะที่และการโก่งเดาะทั้งหมด โดยที่ชิ้นส่วนแผ่นบาง เช่น Web หรือ Flange จะมีการบิดหรือหมุนรอบจุดหนึ่ง เช่น จุดเชื่อมต่อระหว่าง Web และ Flange และชิ้นส่วนแผ่นบางจะเกิดการโก่งเดาะร่วมด้วย ระยะครึ่งช่วงคลื่นของการโก่งเดาะ (Half wave length) จะอยู่ระหว่างค่าระยะครึ่งช่วงคลื่นของการโก่งเดาะทั้งหมด และการโก่งแบบเฉพาะที่

2.3 การหาค่าการโก่งเดาะของเสาเหล็ก

การโก่งเดาะของเสาเหล็กแบ่งลักษณะการโก่งเดาะเป็น 3 ชนิด

2.3.1 การโก่งเดาะเนื่องจากการดัด (Flexural Buckling) เป็นการโก่งเดาะที่เกิดจากความชะลูดของเสาที่รับแรงอัดร่วมศูนย์จะวิบัติด้วยรูปแบบการโก่งเดาะจากการดัดทั้งหมด การโก่งเดาะวิฤตแบบอีลาสติก สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 ของออยเลอร์ (Euler)

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{KL/r^2} \quad (2.1)$$

- เมื่อ F_e คือ หน่วยแรงโก่งเดาะของเสาในช่วงอีลาสติก
 E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก
 K คือ ตัวคูณความยาวประสิทธิผล แสดงดังรูปที่ 2.1
 L คือ ความยาวที่ปราศจากการค้ำยัน
 r คือ รัศมีไจเรชั่นของหน้าตัดทั้งหมด
 KL/r คือ ผลของอัตราส่วนความชะลูด

Buckled shape of column shown by dashed line					
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0
Recommended design value K	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10
End condition key					
	Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free				

รูปที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ของความยาวประสิทธิผล K สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัด

2.3.2 การโก่งเดาะเนื่องจากการบิด (Torsion Buckling) เป็นการโก่งเดาะที่วิบัติเนื่องจากการบิดแบบทันทีทันใด ส่วนมากจะเกิดกับหน้าตัดเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นเช่น หน้าตัดที่เป็นหน้าตัดปิด และหน้าตัดที่มีสมมาตรแบบจุดที่เป็นรูปกากบาท ซึ่งมีสมการในการหาหน่วยแรงโก่งเดาะวิกฤตสำหรับหน้าตัดที่มีการโก่งเดาะเนื่องจากการบิดดังสมการที่ 2.2

$$F_t = \frac{1}{Ar_o^2} (GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2}) \quad (2.2)$$

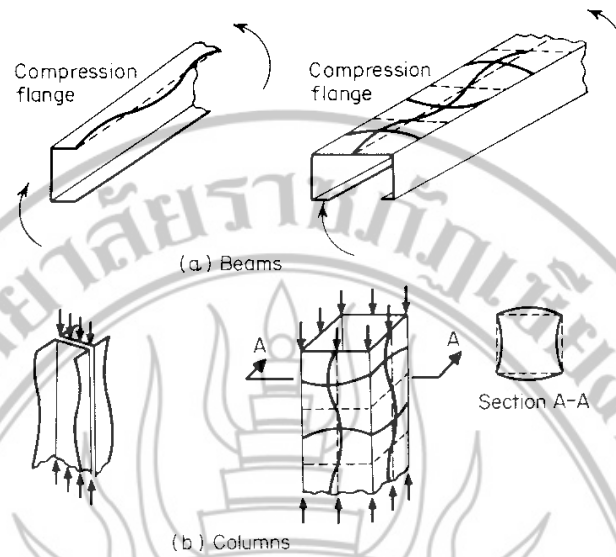
เมื่อ	A	คือ พื้นที่หน้าตัดเต็ม
	r_o	คือ รัศมีไจเรชันแบบโพลาร์ของหน้าตัดรอบจุดศูนย์กลางแรงเฉือน
	G	คือ ค่าทอูลัสแรงเฉือน
	J	คือ ค่าคงที่การบิด Saint-Venant ของหน้าตัด
	E	คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก
	C_w	คือ ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยวหน้าตัด
	$K_t L_t$	คือ ความยาวประสิทธิผลสำหรับการบิด

2.3.3 การโก่งเดาะเนื่องจากการดัดและการบิด (Flexural And Torsional Buckling) เป็นการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดรอบแกนหลักแกนหนึ่ง และเกิดการบิดรอบจุดศูนย์กลางแรงเฉือนพร้อมกัน ส่วนมากจะเกิดกับหน้าตัดที่มีแกนสมมาตรแกนเดียว เช่น หน้าตัดรางน้ำ หน้าตัดรูปหมวก หน้าตัดเหล็กรูปฉาก หน้าตัดรูปตัวที ซึ่งหน้าตัดเหล่านี้มีจุดศูนย์กลางมวล และจุดศูนย์กลางแรงเฉือนไม่ตรงกัน หน่วยแรงโก่งเดาะเนื่องจากการดัดและการบิดในช่วงอีลาสติกของเสาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$F_e = \frac{1}{2\beta} [(F_{ex} + F_t) - \sqrt{F_{ex} + F_t - 4\beta F_{ex} F_t}] \quad (2.3)$$

เมื่อ	F_{ex}	คือ ค่าที่คำนวณได้จากสมการ Euler รอบแกน X
	F_t	คือ ค่าที่ได้จากสมการที่ 2.1
	β	คือ $1 - (x_o / r_o)^2$
	x_o	คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัด
	r_o	คือ รัศมีไจเรชันแบบโพลาร์ของหน้าตัดรอบจุดศูนย์กลางแรงเฉือน

2.4 การโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling)



รูปที่ 2.2 การโก่งเดาะของเหล็กแผ่นบาง

เป็นรูปแบบการโก่งเดาะของชิ้นส่วนแผ่นบางชิ้นรับแรงอัดที่ความหนาไม่มากนักเมื่อเทียบกับความกว้างของหน้าตัด การเกิดการโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) มักจะเกิดขึ้นก่อนที่หน้าตัดของเหล็กเกิดการครากดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้กำลังรับน้ำหนักน้อยลงไม่เป็นไปตามที่คาดคะเนไว้ แต่การโก่งเดาะเฉพาะแห่งจะไม่ได้เป็นตัวกำหนดกำลังรับน้ำหนัก หากชิ้นส่วนแผ่นบางมีชิ้นส่วนรองรับที่ปลายทั้งสองข้างจะทำให้ชิ้นส่วนนั้นถูกเสริมความแข็งแรงด้วยชิ้นส่วนข้างเคียง เรียกว่า Post Buckling Strength ทำให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักมากขึ้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

David et. al. (2018) การวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการเกิดการโก่งเดาะและพฤติกรรมการเกิดการวิบัติของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัดสี่ประกอบ โดยทำการศึกษาผลของขนาดหน้าตัดทั้งหมด 16 ขนาด เสาเหล็กหน้าตัดสี่ประกอบยึดติดแบบหลัง-หลังโดยใช้สกรูยึด การวิจัยนี้เป็นการทดสอบเกี่ยวกับพฤติกรรม การโก่งเดาะและการพฤติกรรมการวิบัติเสาเหล็กที่ขึ้นรูปเย็นหน้าตัดสี่ประกอบโดยใช้ตัวยึดสกรูแบบเจาะรู ด้วยระยะห่างที่กำหนดตามความยาวเสา 1.83 เมตร (6 ฟุต) การทดสอบเหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหา จำนวนผลกระทบของรูปแบบอุปกรณ์ยึดต่อการกระทำแบบกับแต่ละขนาดของตัวอย่างทดสอบ การศึกษา พฤติกรรมการวิบัติและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการออกแบบที่มีข้อควรพิจารณาเฉพาะสำหรับโครงสร้าง แผ่นบาง

Caveiro et. Al. (2016) การวิจัยนี้ทดสอบเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็น หน้าตัดประกอบและหน้าตัดปกติภายใต้แรงอัดกระทำ โดยการทดสอบแบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กลุ่มคือ หน้า ตัดแบบเดี่ยว หน้าแบบหนึ่งแบบเปิดแบบเปิดและหน้าตัดแบบปิด โดยพิจารณาจากเงื่อนไขการยึดรั้งที่จุด รองรับ คือ แบบยึดหมุนและการยึดแน่น ผลการทดสอบเสาเหล็กหน้าตัดเดี่ยวค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จาก การออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-3: 2004 และ AISI S100-07 ใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ จากการศึกษาสำหรับเสาเหล็กหน้าตัดประกอบพบว่าค่าที่ได้จากการออกแบบตามมาตรฐานไม่ปลอดภัย

Ji-Hua Zhu & BenYoung (2005) ชิ้นส่วนอลูมิเนียมใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปนิยมนำมาใช้งาน โดยวิธีการเชื่อมต่อชิ้นส่วนด้วยการเชื่อม การวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบชิ้นส่วนรับแรงอัดหน้าตัดกลมที่มีการ ยึดรั้งแบบยึดแน่น เพื่อศึกษาผลของการเชื่อมซึ่งแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือ ชิ้นส่วนที่มีรอยเชื่อมและ ชิ้นส่วนที่ไม่มีรอยเชื่อม ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการ ออกแบบ 3 มาตรฐานคือ AA, AS/NZS และ EC9 และประเมินความเชื่อถือได้ของการออกแบบการเชื่อม ชิ้นส่วนรับแรงอัด ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าที่ได้จากการทดสอบชิ้นส่วนรับแรงอัดที่มี รอยเชื่อมตามมาตรฐานการออกแบบความปลอดภัยมากกว่าชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่มีรอยเชื่อม โดยที่ มาตรฐาน AA และ EC9 มีความน่าเชื่อถือได้มากกว่า AS/NZS สำหรับชิ้นส่วนอลูมิเนียมกำลังสูงที่มีรอย เชื่อมรับแรงอัด