

การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กเซลลูลาร์

นายจักรภัทร พันธรักษ์พงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.



9336278

CU Thesais 6070137521 thesis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43



6070137521\_9336278

ANALYSIS OF STRENGTH INTERACTION CURVES OF CELLULAR STEEL COLUMNS

Mr. Chakrapat Pantaragphong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University



9336278

CU Thesais 6070137521 thesis / recv : 31072562 06:03:27 / seq : 43



จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์ : การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กเซลลูลาร์. ( ANALYSIS OF STRENGTH INTERACTION CURVES OF CELLULAR STEEL COLUMNS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.อัครวัชร เล่นวารี

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของเสาเหล็กเซลลูลาร์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติโดยใช้โปรแกรม ABAQUS โดยในแบบจำลองได้คำนึงถึงความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตและหน่วยแรงคงค้ำ และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเสาเซลลูลาร์ด้วยสมการทำนายการโก่งเดาะแบบอิลาสติกสำหรับเสาเซลลูลาร์ ในการวิเคราะห์เสาเซลลูลาร์และเสาหน้าตัดตั้งต้นรับแรงอัดภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์สามารถสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดร่วมกัน จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองเสาหน้าตัดตั้งต้นกับการวิเคราะห์กำลังด้วยสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์อ้างอิงตามข้อกำหนด AISC-2016 พบว่า ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองให้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังด้านทานแรงอัดร่วมกับแรงดัดที่ใหญ่กว่าสมการตามข้อกำหนด และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ระหว่างหน้าตัดเซลลูลาร์และหน้าตัดตั้งต้น พบว่าเสาเหล็กเซลลูลาร์มีกำลังด้านทานแรงอัดร่วมกับแรงดัดต่ำกว่าเสาหน้าตัดตั้งต้นเมื่ออัตราส่วนความชะลูดมีค่าต่ำกว่า 1.0 แต่มีกำลังด้านทานแรงอัดร่วมกับแรงดัดสูงกว่าเสาหน้าตัดตั้งต้นเมื่ออัตราส่วนความชะลูดมีค่ามากกว่าเท่ากับ 1.0 นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการสร้างเส้นปฏิสัมพันธ์กำลังสำหรับเสาเหล็กเซลลูลาร์ซึ่งเมื่อตรวจสอบกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้กำลังด้านทานแรงอัดร่วมกับแรงดัดของเสาเซลลูลาร์ต่ำกว่าแนวทางการวิเคราะห์ที่เสนอเมื่ออัตราส่วนความชะลูดมีค่าต่ำกว่า 0.5 แต่เมื่ออัตราส่วนความชะลูดมีค่าเท่ากับ 1.0 ให้กำลังที่ใกล้เคียงแนวทางการวิเคราะห์ในบางกรณีของอัตราส่วนขนาดช่องเปิดและให้กำลังที่มากขึ้นสำหรับอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....



9336278

CU Thesisis 6070137521 thesisis / revv: 31072562 06:03:27 / seq: 43

# # 6070137521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD:

Chakrapat Pantaragphong : ANALYSIS OF STRENGTH INTERACTION CURVES OF CELLULAR STEEL COLUMNS. Advisor: Assoc. Prof. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D.

This research presents the analysis of strength interaction curves of cellular steel columns with 3D finite element (FE) model using ABAQUS program. The geometric imperfection and residual stresses are included in this analysis. The prediction of critical loads of cellular columns is validated by the elastic buckling of cellular column equation. In the analysis, the cellular and parent section of them are subjected to eccentric load to create the interaction curves. A comparison between the parent section of columns and the interaction curve from AISC-2016 showed that the FE interaction curve are larger than the standard one. In addition, when comparing the FE results of parent and cellular sections, the strengths from cellular columns are lower than the parent section ones when the slenderness ratio is lower than 1.0. However, the strengths of cellular section are higher than parent section ones when the slenderness ratio is greater than or equal to 1.0. Moreover, this research proposes a method to construct the interaction curves of cellular columns. The results shown that, the strength from FE models of cellular column are lower than proposed method with slenderness ratio lower than 0.5. However, when slenderness ration is equal to 1.0 , the results of FE model are greater than the proposed method in some cases of diameter ratio and more for slenderness ratio equal to 1.5 and 2.0 respectively.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายจักรภัทร พันธรักษ์พงษ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวาริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จนข้าพเจ้าจัดทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ฉะไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ อัสกุล กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องในสาขาวิศวกรรมโครงสร้างสำหรับคำแนะนำและกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบของพระคุณนายไพโรบลุย์ พันธรักษ์พงษ์ และนางลำพา พันธรักษ์พงษ์ ผู้เป็นบิดาและมารดา รวมถึงครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้กรุณาส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสทางการศึกษาและอบรมสั่งสอนตลอดจนเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มต้นการศึกษาจนถึงปัจจุบัน ขอขอบคุณนางสาวทิพสุดา ดั่งนิยม ผู้เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ท้ายที่สุดนี้ด้วยความช่วยเหลือจากทุกท่านเหล่านี้ ข้าพเจ้าจะจดจำตลอดไป และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา จุดประกายความคิด และเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไป

จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ณ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แนวทางดำเนินงานวิจัย .....	3
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัย.....	5
2.1 การวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบอิลาสติกรอบแกนหลักของเสาเซลลูลาร์ .....	5
2.2 การทดสอบเพื่อวัดหน่วยแรงค้ำในองค์อาคารเซลลูลาร์ .....	17
2.3 การวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะรอบแกนรองของเสาเซลลูลาร์ .....	22
2.4 การวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะรอบแกนหลักของเสาเซลลูลาร์ .....	27
2.5 ที่มาของสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ AISC-LRFD 1986.....	34
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย .....	38
3.1 การโก่งเดาะแบบอิลาสติกของเสา.....	38
3.2 การวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะของเสา .....	40



9336278

CU Thesisis 6070137521 thesis / rev: 31072562 06:03:27 / seq: 43

3.3 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคานเซลลูลาร์ตาม AISC Design Guide 31 .....47

3.4 การวิเคราะห์การโก่งเดาะของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด (web-post buckling) ตาม AISC Design Guide 31 .....52

3.5 การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบและแนวตั้งตาม AISC Design Guide 31.....54

3.6 การวิเคราะห์กำลังต้านทานโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดตาม AISC Design Guide 31 57

บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย.....58

4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเซลลูลาร์ด้วยโปรแกรม ABAQUS.....58

4.2 การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดตั้งต้น .....67

4.3 แนวทางการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ขององค์อาคารเซลลูลาร์ .....70

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....74

บทที่ 5 การอภิปรายผลการวิเคราะห์.....75

5.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....75

5.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ .....76

5.3 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาหน้าตัดตั้งต้น .....78

5.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์จากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างหน้าตัดเสาเซลลูลาร์และหน้าตัดตั้งต้น .....81

5.5 ผลแนวทางการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ขององค์อาคารเซลลูลาร์ .....84

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย .....87

6.1 สรุปผลการวิจัย.....87

6.2 ข้อเสนอแนะ .....89

บรรณานุกรม .....90

รายการสัญลักษณ์ .....92

ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์กำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติก ของหน้าตัดตั้งต้น .....95

ประวัติผู้เขียน .....97





9336278

CU IThesis 6070137521 thesis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43

## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 การตัดเหล็กรูปพรรณเพื่อประกอบองค์อาคารเซลลูลาร์ [1]..... 1

ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้องค์อาคารเซลลูลาร์ (a) Renault distribution centre (Swindon, UK), (b) Chicago O’Hare Airport (USA), (c) Ikea car park (Leeds, UK), (d) Porsche garage (Liverpool, UK), (e) supermarket (Reykjavik, Iceland). [2] ..... 2

ภาพที่ 2.1 การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ในเสาเซลลูลาร์ (a) รูปร่าง 3 มิติ (b) การบอกระยะใน 1 ส่วน (c) การแบ่งหมายเลขตามส่วนต่าง ๆ (d) จำนวนเอลิเมนต์สำหรับ  $d_o/h_w = 0.2$  (e) จำนวนเอลิเมนต์สำหรับ  $d_o/h_w = 0.7$  [3]..... 6

ภาพที่ 2.2 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  ที่พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตสำหรับเสาหน้าตัดเต็ม (a)  $b_f/t_f = 4$  และ (b)  $b_f/t_f = 25$  [3]..... 8

ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  และ  $b_f/t_f$  : (a)  $s/d_o = 1.11$  และ  $d_o/h_w = 0.6$ , (b)  $s/d_o = 2.5$  และ  $d_o/h_w = 0.6$  [3]..... 10

ภาพที่ 2.4 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  สำหรับเสาที่มี  $b_f/t_f = 4$  : (a)  $s/d_o = 1.11$ , (b)  $s/d_o = 1.25$ , (c)  $s/d_o = 1.67$ , (d)  $s/d_o = 2.0$  และ (e)  $s/d_o = 2.5$  [3]..... 12

ภาพที่ 2.5 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  สำหรับเสาที่มี  $b_f/t_f = 25$  : (a)  $s/d_o = 1.11$ , (b)  $s/d_o = 1.25$ , (c)  $s/d_o = 1.67$ , (d)  $s/d_o = 2.0$  และ (e)  $s/d_o = 2.5$  [3]..... 13

ภาพที่ 2.6 เรขาคณิตเทียบเท่าของเสาเซลลูลาร์ (a) รูปร่างดั้งเดิม (b) รูปร่างเทียบเท่าของตำแหน่งช่องเปิดเมื่อใช้ค่านวม  $I_{eq}$  (c) หน้าตัด A-A [3]..... 14

ภาพที่ 2.7 เปรียบเทียบกำลังการโก่งเดาะจากสมการที่ 2.4 (เส้น) กับผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์ (จุด) ระหว่างเสาเซลลูลาร์สองขนาดที่แตกต่างกัน [4]..... 16

ภาพที่ 2.8 นิยามสัญลักษณ์ที่ใช้ในเสาเซลลูลาร์ [4]..... 16

ภาพที่ 2.9 การลดกำลังการโก่งเดาะเนื่องจากผลกระทบของแรงเฉือนในเสาเซลลูลาร์ที่ขนาดของปีกแตกต่างกัน ( $h_w = 300$  mm,  $t_w = 10$  mm,  $t_f = 10$  mm,  $a = 100$  mm,  $b = 400$  mm). [4]..... 17

ภาพที่ 2.10 ตำแหน่ง strain gauge บนหน้าตัด [5]..... 18

ภาพที่ 2.11 ขนาดหน้าตัดตั้งต้น PS และองค์อาคารเซลลูลาร์กับ castellated [5]..... 18

ภาพที่ 2.12 กระบวนการผลิตและประกอบ (a) การตัดแผ่นตั้ง (b) การเชื่อมองค์อาคาร castellated ระหว่างท่อนบนและท่อนล่างเข้าด้วยกัน (c) การตัดเพิ่มของช่องเปิดวงกลมในตัวอย่าง CS2 [5].....19

ภาพที่ 2.13 (a) หน่วยแรงค้ำในหน้าตัดตั้งต้น PS (b) การเปรียบเทียบหน่วยแรงค้ำระหว่าง PS และที่เสนอโดยงานวิจัยอื่น ๆ [5].....20

ภาพที่ 2.14 หน่วยแรงค้ำในหน้าตัดรีร้อนรูปตัวไอ (a) เสนอโดย Young (b) เสนอโดย ECCS [5] .....20

ภาพที่ 2.15 หน่วยแรงค้ำในองค์อาคาร castellated (a) บริเวณระหว่างช่องเปิด (b) บริเวณระหว่างช่องเปิดหน้าตัดตัวที่ [5] .....21

ภาพที่ 2.16 หน่วยแรงค้ำในองค์อาคารเซลล์ลูลาร์ (a) บริเวณระหว่างช่องเปิด (b) หน้าตัดตัวที่ [5] .....22

ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างรูปร่างหน้าตัดตั้งต้นสำหรับ IPE300 (a) คานเซลล์ลูลาร์ (b) คาน castellated [6].....23

ภาพที่ 2.18 (a) หน่วยแรงค้ำสำหรับหน้าตัดเต็มรีร้อนเสนอโดย ECCS (b) หน่วยแรงค้ำบนหน้าตัดเซลล์ลูลาร์และ castellated สำหรับหน้าตัดตัวที่ (TS) และระหว่างช่องเปิด (WP) ที่เสนอโดย Delphine และ Jan ตามขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน [6].....25

ภาพที่ 2.19 เส้นโค้งการโก่งเดาะ Eurocode 3 [6].....25

ภาพที่ 2.20 ค่าความคลาดเคลื่อนของ  $N_{cr,2T}$  [6].....26

ภาพที่ 2.21 การบิดของแผ่นตั้งในขณะการโก่งเดาะ [6].....26

ภาพที่ 2.22 ค่าของ  $N_{Rd}$  เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะ [6] .....27

ภาพที่ 2.23 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณขนาดช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิด [7].....28

ภาพที่ 2.24 ตัวอย่างรูปร่างตามค่าแฟกเตอร์ต่าง ๆ [7].....30

ภาพที่ 2.25 (a) ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับเสาเซลล์ลูลาร์ (b) ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับเสา castellated [7].....31

ภาพที่ 2.26  $N_{Rd}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะอ้างอิงตามมาตรฐาน Eurocode 3 [7]...33

ภาพที่ 2.27  $N_{Rd}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะ โดย  $\bar{\lambda}$  มาจาก  $N_{cr,abq}$  [7].....34

ภาพที่ 2.28 ขั้นตอนการหาค่า  $M_1/M_p$  และ  $M_2/M_p$  [8].....36

ภาพที่ 2.29 การปรับเส้นโค้งของสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ AISC-LRFD [8].....37

ภาพที่ 3.1 เสาตรงภายใต้แรงอัด .....38

ภาพที่ 3.2 พฤติกรรมการรับน้ำหนักทั่วไปขององค์อาคารเหล็ก [7].....41

ภาพที่ 3.3 การกระจายของหน่วยแรงค้ำ (+ แรงดึง, - แรงอัด) [10].....42

ภาพที่ 3.4 หน่วยแรงค้ำที่ส่งผลต่อความเค้น-ความเครียด [11].....42

ภาพที่ 3.5 กราฟกำลังของเสาเมื่อหน่วยแรงค้ำมีการกระจายแบบต่าง ๆ ที่ปีก [10].....43

ภาพที่ 3.6 กราฟหน่วยแรงอัดวิกฤตขององค์อาคารรับแรงอัด (กรณีไม่มีชิ้นส่วนชะลุด) [10].....45

ภาพที่ 3.7 การโก่งเดาะที่เป็นไปได้ของ  $F_c$ : (a) การโก่งเดาะรอบแกนรอง, (b) การโก่งเดาะรอบแกนหลัก, (c) การโก่งเดาะเนื่องจากการบิด [12].....47

ภาพที่ 3.8 (a) สัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณแรงตามแนวแกนตามสมการที่ 3.22 (b) สัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณแรงดัดวิเรนดิลตามสมการที่ 3.23 [13].....49

ภาพที่ 3.9 สัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณการโก่งเดาะของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด [13].....54

ภาพที่ 4.1 แบบจำลองหน้าตัดที่ใช้เอลิเมนต์แบบเปลือกบางซึ่งแสดงโดยเส้นประ ส่วนเอลิเมนต์ที่มีการซ้อนทับแสดงด้วยแรงเงา .....58

ภาพที่ 4.2 เอลิเมนต์แบบ S8R.....59

ภาพที่ 4.3 การลู่เข้าของผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติก .....59

ภาพที่ 4.4 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองเสาเซลล์ลูลาร์.....60

ภาพที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตการรองรับและการยึดรั้งบริเวณแผ่นตั้ง.....61

ภาพที่ 4.6 ตัวแปรขนาดของเสาเซลล์ลูลาร์ .....62

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กที่ใช้ในแบบจำลอง [1] .....63

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชะลุดและความยาวของเสาเซลล์ลูลาร์ .....63

ภาพที่ 4.9 ความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต.....64

ภาพที่ 4.10 หน่วยแรงค้ำที่ใช้ในแบบจำลอง (ก) การแบ่งหน่วยแรงค้ำในแบบจำลอง (ข) หน่วยแรงค้ำที่เสนอโดย [5].....65

ภาพที่ 4.11 หน่วยแรงค้ำบริเวณแผ่นเอดตลอดความยาวของแบบจำลอง .....65



9336278

ภาพที่ 4.12 (ก) ตำแหน่งแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง (ข) ตำแหน่งแรงดัดเท่ากัน .....66

ภาพที่ 4.13 ตำแหน่งแรงอัดตามแนวแกน .....66

ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัว .....67

ภาพที่ 4.15 (ก) หน่วยแรงคงค้างที่ใช้อ้างอิงสำหรับหน้าตัดตั้งต้น (ข) การแบ่งหน่วยแรงคงค้างในแบบจำลอง .....68

ภาพที่ 4.16 แผนภูมิขั้นตอนการคำนวณสมการปฏิสัมพันธ์ของเสาเหล็กเซลลูลาร์ .....71

ภาพที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการที่ 2.4..75

ภาพที่ 5.2 การโค้งเดาะแบบอิลาสติกของตัวอย่างเสาเซลลูลาร์.....76

ภาพที่ 5.3 การกระจายหน่วยแรงแบบ Von Mises stress และการครากบริเวณหน้าตัดตัวที่ เมื่อรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์กลาง.....76

ภาพที่ 5.4 การกระจายหน่วยแรงแบบ Von Mises stress และการครากบริเวณหน้าตัดตัวที่ เมื่อรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง.....77

ภาพที่ 5.5 การกระจายหน่วยแรงแบบ Von Mises stress และการครากบริเวณหน้าตัดตัวที่ เมื่อรับแรงดัดเท่ากัน .....78

ภาพที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 45.3 .....79

ภาพที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.0 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 90.7 .....79

ภาพที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.5 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 136.0.....80

ภาพที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 2.0 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 181.4.....80

ภาพที่ 5.10 การวิบัติเนื่องจากการดัดของแบบจำลองหน้าตัดตั้งต้น .....81

ภาพที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 0.5 .....82

ภาพที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 1.0 .....82

ภาพที่ 5.13 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 1.5 .....83

ภาพที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความละเอียด 1 เท่ากับ 2.0 .....83

ภาพที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความละเอียดมีค่าเท่ากับ 0.5 .....84

ภาพที่ 5.16 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความละเอียดมีค่าเท่ากับ 1.0 .....85

ภาพที่ 5.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความละเอียดมีค่าเท่ากับ 1.5 .....85

ภาพที่ 5.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความละเอียดมีค่าเท่ากับ 2.0 .....86

ภาพที่ 5.19 การครากบริเวณหน้าตัดตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ .....86

ภาพที่ ก.1 การโค้งเดาะแบบอิลาสติกจากแบบจำลอง W300x150.....95

ภาพที่ ก.2 กำลังการโค้งเดาะแบบอิลาสติกจากหน้าตัดตั้งต้นและสมการที่ 3.10 .....96

## สารบัญตาราง

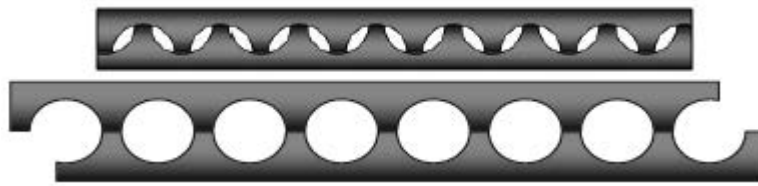
ตารางที่ 2.1 การควบคุมการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ [3].....	6
ตารางที่ 2.2 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาที่มีอัตราส่วน $A_f/A_w$ เดียวกัน [3].....	9
ตารางที่ 2.3 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลังที่มีอัตราส่วน $(h_w/t_w)$ เท่ากัน [3].....	11
ตารางที่ 2.4 ขนาดหน้าตัดตั้งต้นในหน่วยมิลลิเมตร [6].....	23
ตารางที่ 2.5 เส้นโค้งการโก่งเดาะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ $\Delta N_{Rd}$ [6].....	27
ตารางที่ 2.6 ขนาดหน้าตัดตั้งต้นที่ใช้วิเคราะห์ [7].....	28
ตารางที่ 2.7 ค่าแฟกเตอร์ $f_a$ และ $f_w$ ที่ใช้ใน [7].....	29
ตารางที่ 2.8 ค่าแฟกเตอร์ $f_H$ , $\alpha$ และ $f_w$ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [7].....	29
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดเสาเซลล์ลูลาร์ที่ใช้ศึกษา.....	61
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนความชะลุดระหว่าง $\lambda$ และ $Kl/r$ สำหรับแบบจำลองตั้งต้นที่ใช้วิเคราะห์.....	70
ตารางที่ 4.3 ค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ของเสา $\alpha$ ตามมาตรฐาน Eurocode 3.....	73
ตารางที่ ก.1 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสมการที่ 3.10 และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง.....	96

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

องค์อาคารเซลล์ลูลาร์คือองค์อาคารที่มีลักษณะเป็นหน้าตัดรูปตัวไอ (I-section) ที่มีช่องเปิดบริเวณแผ่นดัดเป็นวงกลมระยะห่างสม่ำเสมอตลอดความยาวขององค์อาคาร โดยทั่วไปกระบวนการประกอบองค์อาคารเซลล์ลูลาร์เริ่มจากการตัดบริเวณแผ่นดัดของหน้าตัดรีดร้อนตัวไอซึ่งเป็นหน้าตัดตั้งต้น (parent section) ตามครึ่งวงกลมหลังจากที่ถูกแบ่งครึ่งแล้วจะนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันอีกครั้งดังภาพที่ 1.1 โดยส่วนบริเวณระหว่างช่องเปิดเรียกว่าแผ่นดัดระหว่างช่องเปิด (web post) และบริเวณช่องเปิดเรียกว่าหน้าตัดตัวที (tee section)



ภาพที่ 1.1 การตัดเหล็กรูปพรรณเพื่อประกอบองค์อาคารเซลล์ลูลาร์ [1]

ในปัจจุบันการใช้องค์อาคารเซลล์ลูลาร์เริ่มเป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ด้วยรูปลักษณะภายนอกเป็นที่น่าดึงดูดแตกต่างจากรูปร่างทั่วไปขององค์อาคารเหล็ก ประกอบกับข้อดีของตัวองค์อาคารเองที่สามารถให้ท่อลอดผ่านบริเวณช่องเปิดได้อย่างสะดวก ทำให้สามารถลดความสูงของฝ้าเพดานภายในอาคารได้ อีกทั้งยังเป็นการประหยัดวัสดุในการเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดของโครงสร้างเพราะใช้เพียงเหล็กรูปพรรณหน้าตัดไอมาประกอบเป็นองค์อาคารเซลล์ลูลาร์ซึ่งทำให้มีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย (moment of inertia) รอบแกนหลักมากขึ้นกว่าหน้าตัดตัวไอที่ใช้เป็นต้นแบบ

โดยทั่วไปนิยมใช้องค์อาคารเซลล์ลูลาร์รับน้ำหนักในลักษณะแรงดัดมากกว่าแรงอัด อย่างไรก็ตาม เริ่มมีการนำมาใช้ในลักษณะคาน-เสามากขึ้นโดยองค์อาคารรับแรงดัดและแรงอัดตามแนวแกนร่วมกัน แม้ว่าจะยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่สามารถอ้างอิงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลางขององค์อาคารเซลล์ลูลาร์และหน้าตัดตั้งต้น เพื่อศึกษาผลกระทบของช่องเปิดต่อกำลังรับแรงอัดร่วมกับแรงดัด พร้อมทั้งเสนอแนวทางการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดร่วมกับแรงดัดขององค์อาคารเซลล์ลูลาร์โดยอ้างอิงสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด AISC-2016





ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้องค์อาคารเซลลูลาร์ (a) Renault distribution centre (Swindon, UK), (b) Chicago O'Hare Airport (USA), (c) Ikea car park (Leeds, UK), (d) Porsche garage (Liverpool, UK), (e) supermarket (Reykjavik, Iceland). [2]

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับเสาเซลลูลาร์ภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์เพื่อสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง
2. เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของเสาจากหน้าตัดตั้งต้นและหน้าตัดเซลลูลาร์
3. เสนอแนวทางการวิเคราะห์แรงอัดภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์ของเสาเซลลูลาร์และตรวจสอบด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

กำหนดขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1. ไม่มีการวิบัติบริเวณรอยเชื่อม
2. ไม่มีการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ขององค์อาคาร
3. คำนึงถึงหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) และความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตของเสา (geometric imperfection)

4. ไม่มีการวิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling)
5. พิจารณาการโก่งเดาะรอบแกนหลักเท่านั้น
6. ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ
7. คุณสมบัติเหล็กของแบบจำลองจะกำหนดให้มีหน่วยแรงครากเท่ากับ 2450 ksc มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $2 \times 10^6$  ksc และมีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3
8. ใช้หน้าตัด W300x150 เป็นหน้าตัดตั้งต้นสำหรับเสาเซลลูลาร์
9. สำหรับเสาเซลลูลาร์ พิจารณาอัตราส่วนขนาดช่องเปิด  $d_o/d$  มีค่าเท่ากับ 0.8 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ และพิจารณาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด  $s/d_o$  มีค่าเท่ากับ 1.1 1.3 และ 1.5 ตามลำดับ
10. อัตราส่วนความขรุขระ ( $\lambda$ ) ที่ใช้วิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ

1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์ห่ออากาศเซลลูลาร์รับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์
2. ผลกระทบของตัวแปรออกแบบ (ช่องเปิด) ต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเซลลูลาร์
3. สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังสำหรับวิเคราะห์และออกแบบเสาเหล็กเซลลูลาร์

#### 1.5 แนวทางดำเนินงานวิจัย

แนวทางการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการวิเคราะห์การโก่งเดาะรอบแกนหลัก (strong axis buckling) ของเสาเซลลูลาร์
2. ศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการวิเคราะห์การโก่งเดาะรอบแกนรอง (weak axis buckling) ของเสาเซลลูลาร์
3. ศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการจำลองหน่วยแรงคงค้างสำหรับวิเคราะห์ห่ออากาศเซลลูลาร์
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดและแรงอัดขององค์อาคารเซลลูลาร์
5. พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติสำหรับเสาเซลลูลาร์รับแรงกระทำเยื้องศูนย์



9336278

6. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมการทำนายการโก่งเดาะแบบอิลาสติกของเสาเซลลูลาร์
7. สร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเซลลูลาร์และพัฒนาสมการทำนายเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง
8. สรุปผลงานวิจัย เขียนบทความและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์



9336278

CU Thesais 6070137521 thesis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43

## บทที่ 2

### การทบทวนงานวิจัย

#### 2.1 การวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบบิลาสติกของเสาเซลลูลาร์

จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีผู้ศึกษาและทำวิจัยเกี่ยวกับการโก่งเดาะรอบแกนหลัก (major axis buckling) และปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเซลลูลาร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหลัก ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

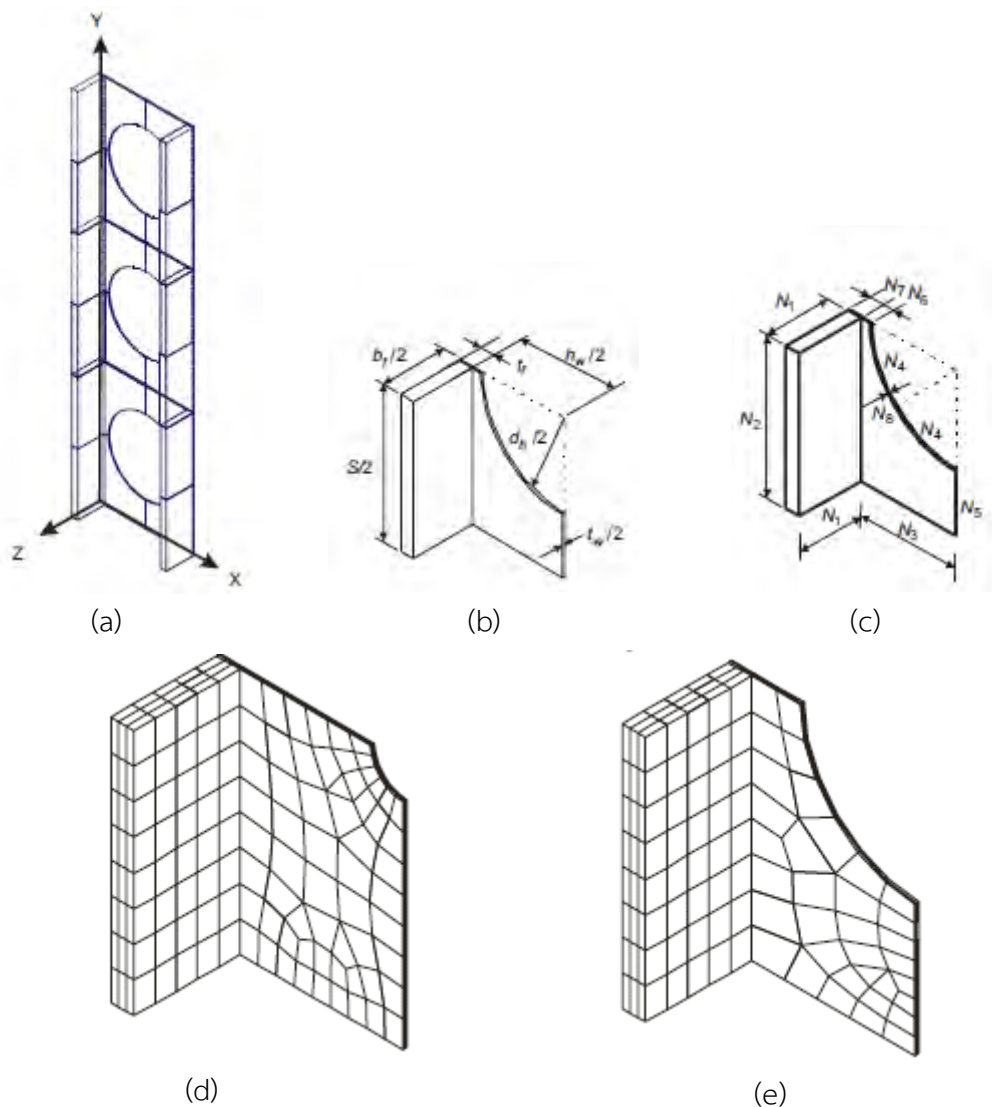
ในปี ค.ศ. 2008 งานวิจัยของ Sweedan และคณะ [3] ได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเรขาคณิตของเสาและขนาดช่องเปิดหน้าตัดเสาเซลลูลาร์ที่มีผลต่อการรับน้ำหนักที่ลดลงจากการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาการโก่งเดาะแบบบิลาสติกของเสาเซลลูลาร์ที่ชะลูด พร้อมทั้งเปรียบเทียบกำลังการโก่งเดาะแบบบิลาสติกที่ลดลงระหว่างผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการของออยเลอร์ แล้วเสนอตัวคูณลดค่ากำลัง (reduction factor) ซึ่งตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่  $A_f/A_w$   $b_f/t_f$   $d_o/h_w$  และ  $s/d_h$

เมื่อ	$A_f$	คือ พื้นที่ปีกเสา
	$A_w$	คือ พื้นที่แผ่นตั้ง
	$b_f$	คือ ความกว้างของปีก
	$t_f$	คือ ความหนาของปีก
	$d_o$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด
	$h_w$	คือ ความสูงของแผ่นตั้ง
	$s$	คือ ระยะห่างระหว่างช่องเปิด

ในงานวิจัยของ Sweedan และคณะ [3] ได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์การโก่งเดาะของเสาเซลลูลาร์ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์แบบ 8 จุดต่อสำหรับของแข็ง (SOLID45) ตารางที่ 2.1 แสดงการขึ้นรูปร่างของเสาเซลลูลาร์และการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ และภาพที่ 2.1 แสดงรูปร่างเอลิเมนต์โดยข้อจำกัดการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ในตารางที่ 2.1 ได้เลือกมาจากการลองปรับเปลี่ยนจำนวนเอลิเมนต์ให้มากขึ้นหรือน้อยลง จนกว่าจะได้ผลคำตอบที่แม่นยำและใช้เวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ที่มากกว่าภาพที่ 2.1 d และ e แสดงรูปร่างจำนวนการแบ่งเอลิเมนต์ สำหรับรูปร่างเสาเซลลูลาร์ที่ขนาดช่องเปิดเล็กและใหญ่ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การควบคุมการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ [3]

Mesh parameter	Description	Notes	Min. value	Max. value
N1	Number of divisions in half the flange clear width $(b_f/2 - t_w/2)$	Division size = $(b_f/2 - t_w/2)/N1$	5	5
N2	Number of divisions in half the spacing between perforations $(s/2)$		4	10
N3	Number of divisions in half the web clear height $(h/2 - t_f)$	$N3 = N4 + N6$ , subject to maximum and minimum limitations	6	10
N4	Number of divisions in $(1/8)$ of the perimeter of the circular opening		4	4
N5	Number of divisions in the clear distance along half the depth of the web past between perforations $(s/2 - d_o/2)$	$N5 = N2$ , subject to maximum and minimum limitations	4	10
N6	Number of divisions in the stem of the T-section located above and below the web hole $(h/2 - d_o/2 - t_f)$		2	6
N7	Number of divisions through the thickness of the flange		3	3
N8	Number of divisions through the thickness of the web		2	2



ภาพที่ 2.1 การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ในเสาเซลลูลาร์ (a) รูปร่าง 3 มิติ (b) การบอกระยะใน 1 ส่วน

(c) การแบ่งหมายเลขตามส่วนต่าง ๆ (d) จำนวนเอลิเมนต์สำหรับ  $d_o/h_w = 0.2$

(e) จำนวนเอลิเมนต์สำหรับ  $d_o/h_w = 0.7$  [3]

ในการวิเคราะห์กำลังการโก่งเดาะของเสาเซลลูลาร์ ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยดำเนินการหาค่าการโก่งเดาะวิกฤตเมื่อคำนึงถึงการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนของเสาเซลดหน้าตัดเต็มรูปร่างทั่วไปหลาย ๆ ขนาดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากนั้นจะนำมาหาตัวคูณลดกำลังจากการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน  $\beta_{FE}$  ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{cr-FE} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \beta_{FE} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียรเทียบเท่า

$kL$  คือ ความยาวการโก่งเดาะประสิทธิผล

เงื่อนไขขอบเขตของเสาที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้แก่ (P-P) (F-P) (F-F) และ (F-Free) เมื่อ P และ F คือ pin และ fix ตามลำดับ สำหรับเสาที่มีค่า  $k = 1.0, 0.7, 0.5$  และ  $2.0$  ตามลำดับ แบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องได้เลือกขนาดหน้าตัดหลาย ๆ ขนาดด้วยกันเพื่อให้ครอบคลุมขนาดที่มีใช้ในทางปฏิบัติ ผลการวิเคราะห์จะระบุด้วยพารามิเตอร์ไร้หน่วย  $A_f/A_w$  โดยพิจารณาในช่วงตั้งแต่ 0.2 และ 4.36 และจะพิจารณาอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของปีก  $b_f/t_f$  เท่ากับ 4 และ 25

นอกจากนี้ การลดลงของกำลังโก่งเดาะสำหรับเสาหน้าตัดเต็มสามารถคำนวณโดยใช้สมการของออยเลอร์ที่ได้ปรับปรุงโดย Engesser ซึ่งเป็นสมการที่คำนึงถึงการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน ดังสมการที่ 2.2

$$P_{cr} = \frac{P_e}{1 + \frac{nP_e}{AG}} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \beta \quad (2.2)$$

เมื่อ  $P_e$  คือ กำลังการโก่งเดาะของออยเลอร์

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดเสา

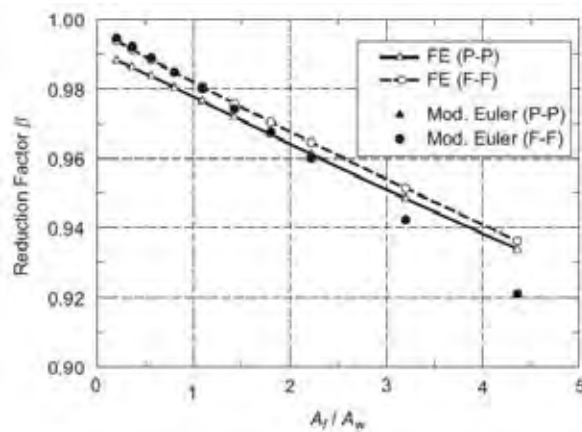
$G$  คือ โมดูลัสการเฉือนมีค่า  $= E/[2(1+\nu)]$

$\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง (poisson ratio)

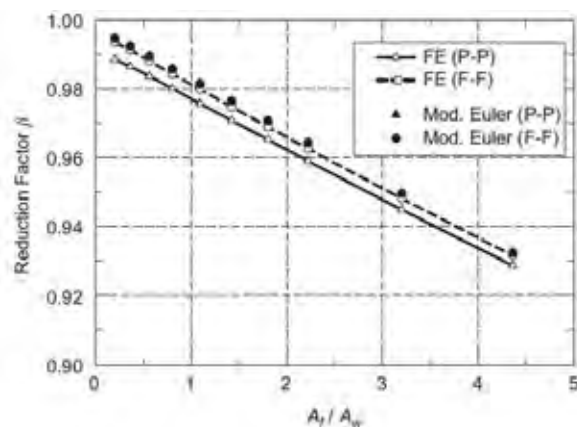
$n$  คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่แผ่นตั้ง  $A/A_w$

ภาพที่ 2.2 แสดงตัวคูณลดกำลัง  $\beta_{FE}$  และ  $\beta$  ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตั้งสมการที่ 2.1 และจากสมการของ Engesser ตั้งสมการที่ 2.2 ตามลำดับ เมื่อ  $h_w/t_w = 45$   $kL/h_w = 30$  กรณี  $b_f/t_f$  เท่ากับ 4 และ 25 พบว่าผลจากการเปรียบเทียบมีค่าความคลาดเคลื่อน 1.7% สำหรับกรณีที่เสามีเงื่อนไขขอบเป็น fixed-fixed สำหรับ  $b_f/t_f = 4$  และ  $A_f/A_w = 4.36$  ซึ่งการเบี่ยงเบนจากสมการของ Engesser จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $A_f/A_w$  มีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากค่าความคลาดเคลื่อนจะสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์โดยประมาณของ  $n$  หรือ  $A/A_w$  ในสมการของ Engesser สำหรับ  $A_f/A_w$  ที่มีค่ามากขึ้น

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการของ Engesser มีความใกล้เคียงและมีความแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาหาค่ากำลังการโก่งคดของเสาเซลลูลาร์ได้



(a)



(b)

ภาพที่ 2.2 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  ที่พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตสำหรับเสาหน้าตัดเต็ม

(a)  $b_f/t_f = 4$  และ (b)  $b_f/t_f = 25$  [3]



การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นถึงกำลังที่ลดลงของเสาเซลลูลาร์ดังนี้

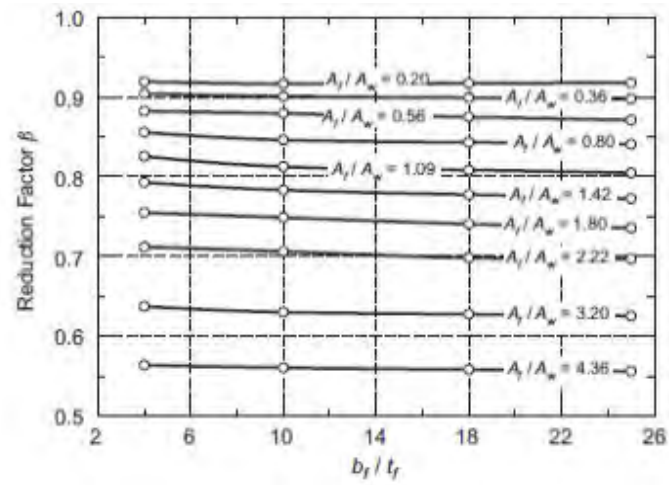
1. ผลของขนาดปีกคาน  $b_f/t_f$  ที่มีต่อตัวคูณลดกำลัง  $\beta$

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  พบว่าลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่ออัตราส่วน  $b_f/t_f$  เพิ่มขึ้น โดยจะเด่นชัดเมื่ออัตราส่วน  $A_f/A_w$  มีค่าสูงขึ้นดังภาพที่ 2.3 ในกรณีเสาที่มีอัตราส่วน  $d_o/h_w = 0.6$  และอัตราส่วน  $s/d_o = 1.11$  และ 2.50 ตามลำดับ

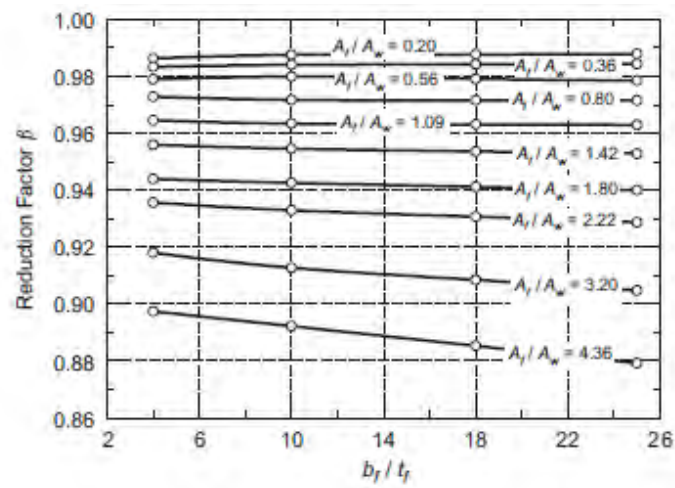
ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาที่มีอัตราส่วน  $A_f/A_w$  เดียวกัน [3]

$A_f/A_w$	Web dimensions (mm)		Flange dimensions (mm)		$b_f/t_f$	$d_o/h_w$	$s/d_o$	$\beta$
	$h_w$	$t_w$	$b_f$	$t_f$				
0.2	100	5	20	5	4	0.6	1.11	0.917
0.2	400	20	80	20	4	0.6	1.11	0.916
0.2	200	10	100	4	25	0.6	1.11	0.912
0.2	400	20	200	8	25	0.6	1.11	0.912
5.0	200	10	200	50	4	0.6	1.11	0.555
5.0	800	40	800	200	4	0.6	1.11	0.554
5.0	100	5	250	10	25	0.6	1.11	0.526
5.0	200	10	500	20	25	0.6	1.11	0.526
0.2	100	5	20	5	4	0.6	2.5	0.997
0.2	400	20	80	20	4	0.6	2.5	0.997
0.2	200	10	100	4	25	0.6	2.5	0.997
0.2	400	20	200	8	25	0.6	2.5	0.997
5.0	200	10	200	50	4	0.6	2.5	0.887
5.0	800	40	800	200	4	0.6	2.5	0.887
5.0	100	5	250	10	25	0.6	2.5	0.861
5.0	200	10	500	20	25	0.6	2.5	0.861





(a)



(b)

ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  และ  $b_f/t_f$  : (a)  $s/d_o = 1.11$  และ  $d_o/h_w = 0.6$ , (b)  $s/d_o = 2.5$  และ  $d_o/h_w = 0.6$  [3]



9336278

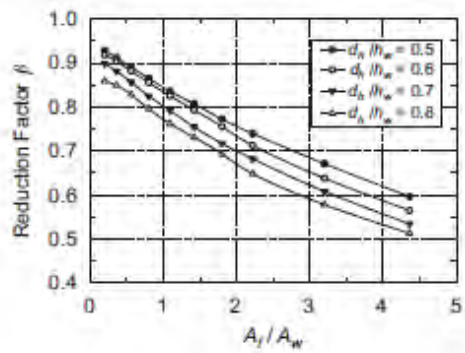
2. ผลของ  $A_f/A_w$  ที่มีต่อตัวคูณลดกำลัง  $\beta$

ตารางที่ 2.3 แสดงการแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  ซึ่งขึ้นกับ  $A_f/A_w$  โดยเลือกใช้ค่า  $b_f/t_f = 4$  และ 25 ตามลำดับและใช้ค่า  $s/d_o = 1.11, 1.25, 1.67, 2.0$  และ 2.5 ดังภาพที่ 2.4 และภาพที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  และ  $A_f/A_w$  ซึ่งแต่ละเส้นกราฟเป็นของค่า  $d_o/h_w = 0.5, 0.6, 0.7$  และ 0.8 ตามลำดับ

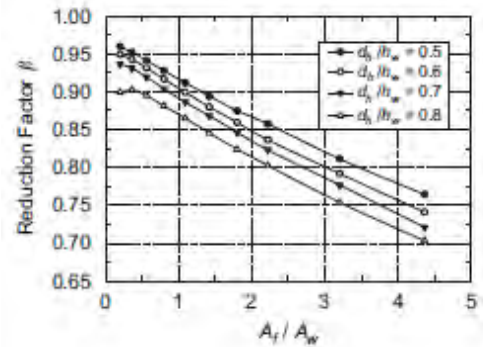
ตารางที่ 2.3 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลังที่มีอัตราส่วน  $(h_w/t_w)$  เท่ากัน [3]

$A_f/A_w$	Web dimensions (mm)		Flange dimensions (mm)		$h_w/t_w$	$b_f/t_f$	$d_o/h_w$	$s/d_o$	$\beta$
	$h_w$	$t_w$	$b_f$	$t_f$					
0.2	50	10	20	5	5	4	0.6	1.11	0.919
0.2	450	10	60	15	45	4	0.6	1.11	0.919
0.2	50	10	50	2	5	25	0.6	1.11	0.914
0.2	450	10	150	6	45	25	0.6	1.11	0.917
5	50	10	100	25	5	4	0.6	2.5	0.879
5	450	10	300	75	45	4	0.6	2.5	0.886
5	50	10	250	10	5	25	0.6	2.5	0.825
5	450	10	750	30	45	25	0.6	2.5	0.844

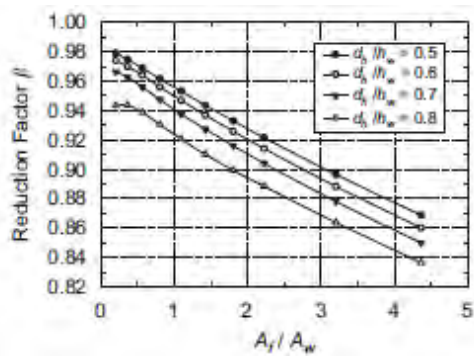
จากกราฟพบว่า ตัวคูณลดกำลังมีค่าต่ำลงเมื่อตัวแปร  $A_f/A_w$  มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก shear stiffness ที่ลดลงในแผ่นตั้งของเสา นอกจากนี้เสาที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ซึ่งระบุโดย  $d_o/h_w$  จะมีค่ากำลังการโก่งเดาะ (buckling capacity) ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเนื่องจาก shear stiffness ที่ลดลง ในทางกลับกันพบว่า ค่ากำลังการโก่งเดาะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างช่องเปิดมากขึ้น



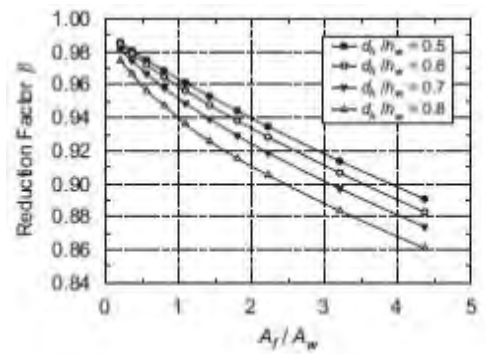
(a)



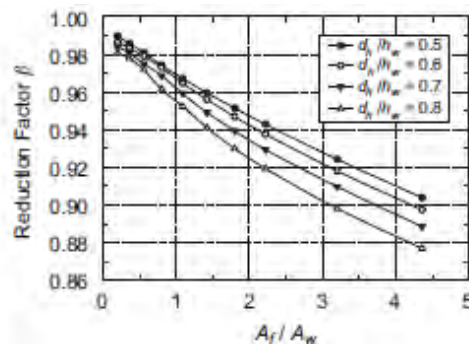
(b)



(c)

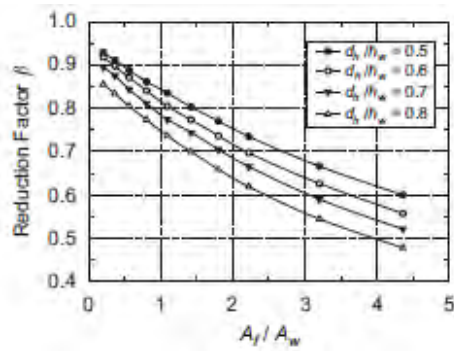


(d)

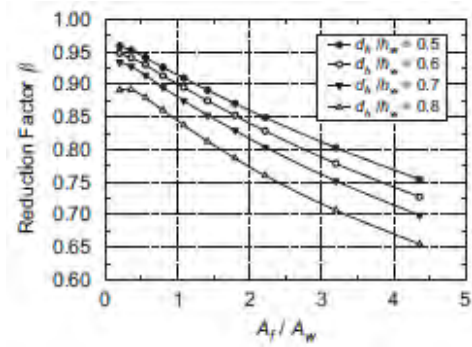


(e)

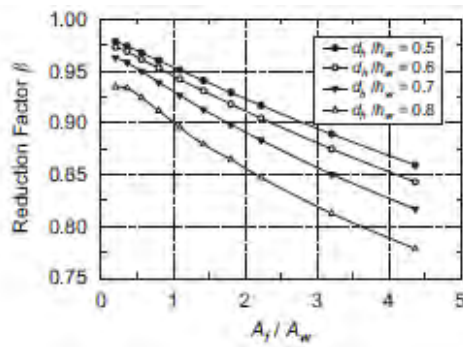
ภาพที่ 2.4 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  สำหรับเสาที่มี  $b_f/t_f = 4$  : (a)  $s/d_o = 1.11$ , (b)  $s/d_o = 1.25$ , (c)  $s/d_o = 1.67$ , (d)  $s/d_o = 2.0$  และ (e)  $s/d_o = 2.5$  [3]



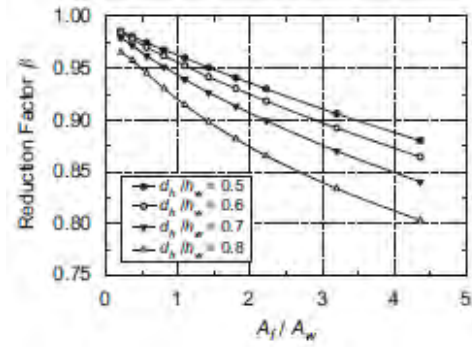
(a)



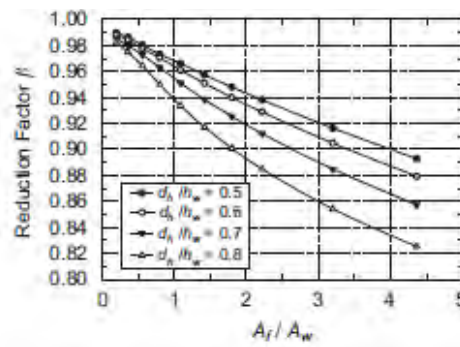
(b)



(c)

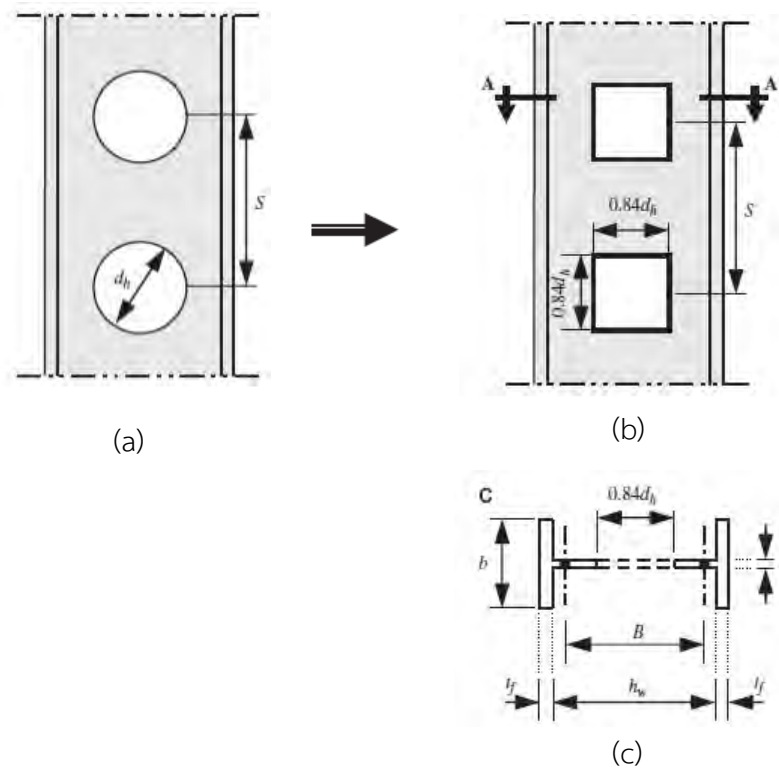


(d)



(e)

ภาพที่ 2.5 การแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  สำหรับเสาที่มี  $b_f/t_f = 25$  : (a)  $s/d_o = 1.11$ , (b)  $s/d_o = 1.25$ , (c)  $s/d_o = 1.67$ , (d)  $s/d_o = 2.0$  และ (e)  $s/d_o = 2.5$  [3]



ภาพที่ 2.6 เปรียบเทียบหน้าตัดของเสาเซลลูลาร์ (a) รูปร่างดั้งเดิม (b) รูปร่างเทียบเท่าของตำแหน่งช่องเปิดเมื่อใช้ค่านวน  $I_{eq}$  (c) หน้าตัด A-A [3]

จากตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  ที่กล่าวมาข้อ 1 และ 2 สามารถนำมาใช้กับสมการการโก่งเดาะของ ออยเลอร์ ตามที่ Sweedan และคณะ [3] เสนอได้ ดังนี้

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E (I_{eq} \beta)}{(KL)^2} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $\beta$  คือ ตัวคูณลดกำลังไร้หน่วยจากการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน  
 $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity)  
 $I_{eq}$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียที่ลดค่า (reduced second moment of area)  
 $K$  คือ สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล  
 $L$  คือ ความยาวเสา

สมการที่ 2.4 ได้ใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียที่ลดค่า  $I_{eq}$  ในการวิเคราะห์การโก่งเดาะโดย พิจารณาตำแหน่งช่องเปิดวงกลมเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมเทียบเท่าโดยสมมติให้มีขนาด  $0.84d_o$  ดังแสดง

ภาพที่ 2.6 ซึ่ง  $I_{eq}$  มาจากกระบวนการลองผิดลองถูกเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดเสา ขนาดช่องเปิด ระยะห่างช่องและความยาวเสา เพื่อหาขนาดช่องเปิดที่เทียบเท่าที่เหมาะสม

จากงานวิจัยของ Sweedan และคณะ [3] มีข้อสรุปได้ดังนี้

1. เสาที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ( $d_n/h_w$ ) จะพบการลดลงของกำลังรับการโก่งเดาะอย่างมีนัยสำคัญเนื่องมาจากการลดลงของ shear stiffness ในทางกลับกันกำลังรับการโก่งเดาะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างช่องเปิดเพิ่มมากขึ้น

2. ผลของอัตราส่วน  $h_w/t_w$  ไม่มีนัยสำคัญต่อตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  แต่ในทางกลับกัน ตัวคูณลดกำลัง  $\beta$  ลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่ออัตราส่วนปีกคาน  $b_f/t_f$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวคูณลดกำลังส่วนมากจะขึ้นอยู่กับค่าการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์  $A_f/A_w$  เนื่องมาจากการลดลงของ shear stiffness ในเสา

ในปี ค.ศ. 2015 Jian-zu Gu และ Shanshan Cheng [4] ได้เสนอสมการทำนายการโก่งเดาะรอบแกนหลักของเสาเซลล์ลูลาร์ในช่วงอีลาสติกโดยคำนึงถึงผลกระทบของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน และเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าจากสมการสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ดังภาพที่ 2.7 ได้ดังสมการ ต่อไปนี้

$$P_{cr} = P_{cr1} \left( 1 - \frac{\pi^2 E e^2 A_{tee}^2}{n^2 k_{sh} s I_{red}} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $P_{cr1}$  คือ กำลังโก่งเดาะของออยเลอร์นิยามตามสมการที่ 2.5

$A_{tee}$  คือ พื้นที่หน้าตัดตัวที

$I_{red}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดตัวที ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$k_{sh}$  คือ สติฟเนสการเฉือน (shear stiffness) คำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น

$G$  คือ โมดูลัสการเฉือน (shear modulus)

$n$  คือ จำนวนช่องเปิดหรือความยาวต่อระยะห่างช่องเปิดหาโดย  $l/s$

$s$  คือ ระยะห่างระหว่างช่องเปิด

$$P_{cr1} = \frac{\pi^2 EI_{red}}{l^2} \quad (2.5)$$

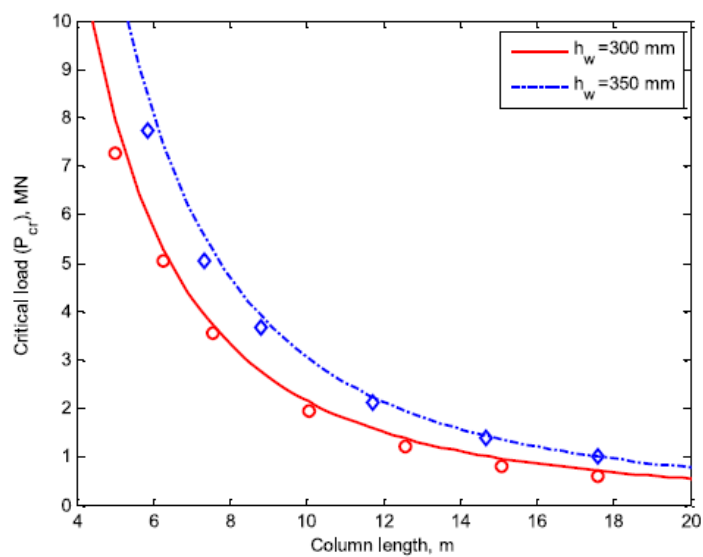


$$I_{red} = 2(I_{tee} + A_{tee}e^2) = 2 \left[ \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left( \frac{h_w + t_f}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_w}{12} [h_w^3 - (2a)^3] \quad (2.6)$$

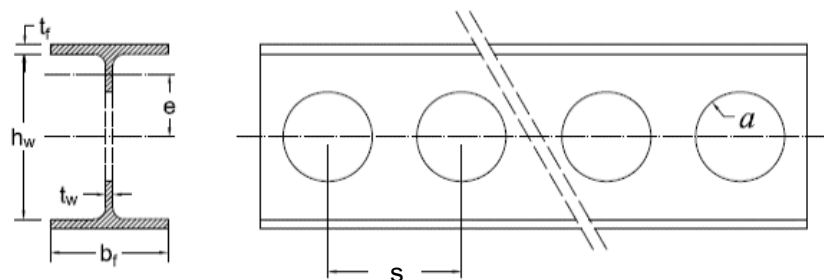
$$k_{sh} = \frac{Gt_w}{\frac{2s}{\sqrt{s^2 - 4a^2}} \arctan \frac{s+2a}{\sqrt{s^2 - 4a^2}} - \frac{\pi}{2}} \quad (2.7)$$

โดยนิยามตัวแปรต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 2.8

จากสมการที่ 2.4 ยังแสดงให้เห็นว่ากำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกรอบแกนหลักเมื่อคำนึงถึงการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน  $A_{tee}^2/I_{red}$  และ  $Ee^2/k_{sh}s$  มีค่ามากขึ้น และกำลังการโก่งเดาะจะมากขึ้นเมื่อค่า  $n$  มีค่าเพิ่มขึ้น

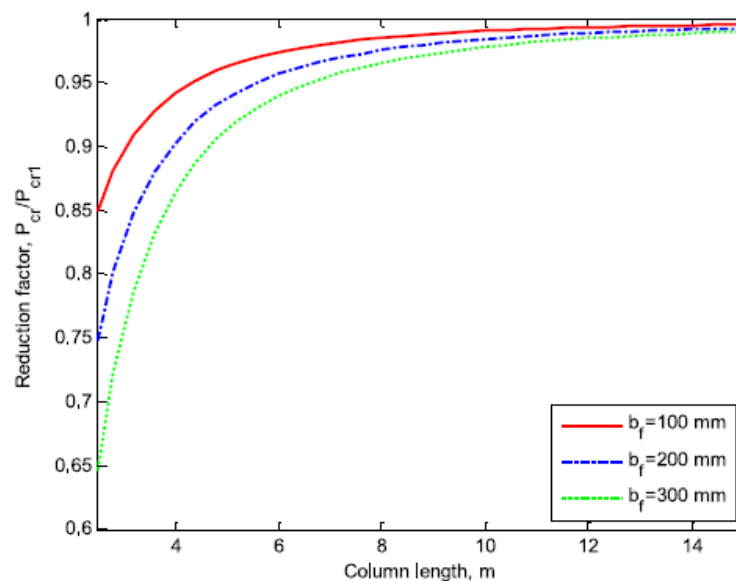


ภาพที่ 2.7 เปรียบเทียบกำลังการโก่งเดาะจากสมการที่ 2.4 (เส้น) กับผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์ (จุด) ระหว่างเสาเซลลูลาร์สองขนาดที่แตกต่างกัน [4]



ภาพที่ 2.8 นิยามสัญลักษณ์ที่ใช้ในเสาเซลลูลาร์ [4]

Jian-zu Gu และ Shanshan Cheng [4] ยังได้แสดงการแปรเปลี่ยนของตัวคูณลดกำลังตามความยาวของเสาเซลล์ูลาร์และขนาดปีกเสาที่ต่างกันสามขนาดจากการคำนวณตามสมการที่ 2.4 พบว่าผลกระทบจากแรงเฉือนที่มีต่อกำลังการโก่งเดาะของเสาจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดปีกคานกว้างขึ้นและจะลดลงเมื่อเสามีความยาวมากขึ้นดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การลดกำลังการโก่งเดาะเนื่องจากผลกระทบของแรงเฉือนในเสาเซลล์ูลาร์ที่ขนาดของปีกแตกต่างกัน ( $h_w = 300$  mm,  $t_w = 10$  mm,  $t_f = 10$  mm,  $a = 100$  mm,  $b = 400$  mm). [4]

## 2.2 การทดสอบเพื่อวัดหน่วยแรงค้ำในองค์อาคารเซลล์ูลาร์

ในปี ค.ศ. 2013 Delphine และคณะ [5] ได้วัดค่าหน่วยแรงค้ำในองค์อาคารเซลล์ูลาร์และองค์อาคาร castellated เนื่องมาจากความร้อนจากขบวนการตัดและเชื่อมประกอบอีกครั้ง ซึ่งทำให้มีการแปรเปลี่ยนของหน่วยแรงค้ำจากหน้าตัดรีดร้อนทั่วไป โดยหน่วยแรงค้ำนั้นจะส่งผลต่อกำลังรับการโก่งเดาะของเสา

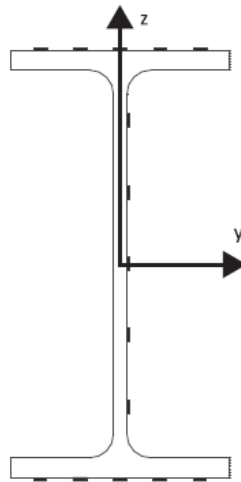
วิธีที่ Delphine และคณะ [5] ใช้คือการวัดค่าความแตกต่างของความเครียด (strain) ก่อนการตัดองค์อาคารต้นแบบและภายหลังจากนำมาประกอบเป็นองค์อาคารเซลล์ูลาร์และ castellated ซึ่งสามารถหาหน่วยแรงค้ำได้จากสมการที่ 2.8

$$\sigma_{res} = -E\varepsilon_{mea} \quad (2.8)$$



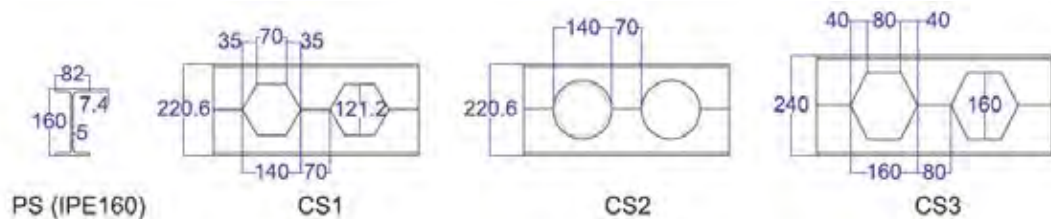
เมื่อ  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น  
 $\epsilon_{meas}$  คือ ความเครียดที่ได้จากการวัด

บริเวณที่ทำการวัดหน่วยแรงค้ำคือแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิดและตรงช่องเปิด ส่วนตำแหน่งที่ติดตั้ง strain gauge เพื่อวัดหน่วยแรงค้ำบนหน้าตัดได้แก่ 5 ตำแหน่งบนปีกคาน และ 5 ตำแหน่งบนแผ่นตั้ง (web) แสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ตำแหน่ง strain gauge บนหน้าตัด [5]

ตัวอย่างที่ Delphine และคณะ [5] นำมาใช้เป็นหน้าตัดตั้งต้นก่อนที่จะประกอบเป็น องค์อาคารเซลล์ลาร์และ castellated คือหน้าตัด IPE160 โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปร่างทั้งหมด 3 รูปร่าง แต่ละรูปร่างใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 2 ตัวอย่างดังแสดงภาพที่ 2.11 ซึ่งรูปร่าง CS1 และ CS3 เป็นช่องเปิดแบบหกเหลี่ยม ส่วนรูปร่าง CS2 เป็นช่องเปิดแบบวงกลม



ภาพที่ 2.11 ขนาดหน้าตัดตั้งต้น PS และองค์อาคารเซลล์ลาร์กับ castellated [5]

จำนวนหน้าตัดตั้งต้นในงานวิจัยนี้ได้แก่ IPE160 จำนวน 6 ตัวอย่างที่มีความยาว 12 เมตร จะถูกนำมาประกอบเป็นองค์อาคารเซลลูลาร์และ castellated ซึ่งขึ้นส่วนตัวอย่างขนาดความยาว 1 เมตร จากหน้าตัดตั้งต้นในแต่ละหน้าตัดจะถูกตัดเพื่อนำมาหาการกระจายหน่วยแรงค้ำตั้งเดิม

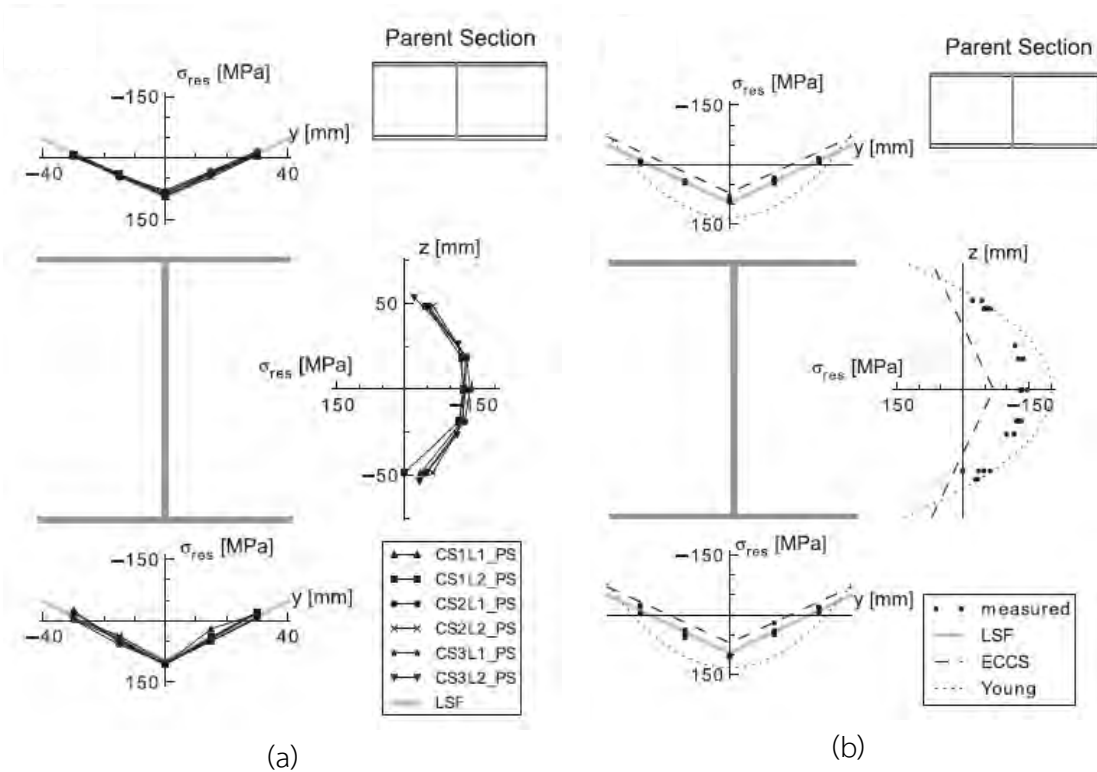
สำหรับรูปร่างตัวอย่าง CS1 และ CS3 จะผ่านกระบวนการผลิตตามมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยในขั้นตอนแรก หน้าตัดตั้งต้นจะถูกตัดตามแผ่นตั้งเป็นรูปหกเหลี่ยมด้วยกระบวนการตัดแบบแก๊สออกซิเจน (oxyfuel cutting process) หลังจากนั้นที่ตัดเรียบร้อยแล้วจะนำครึ่งส่วนบนและล่างของคานมาเชื่อมเข้าด้วยกันโดยใช้การเชื่อมแบบ MAG



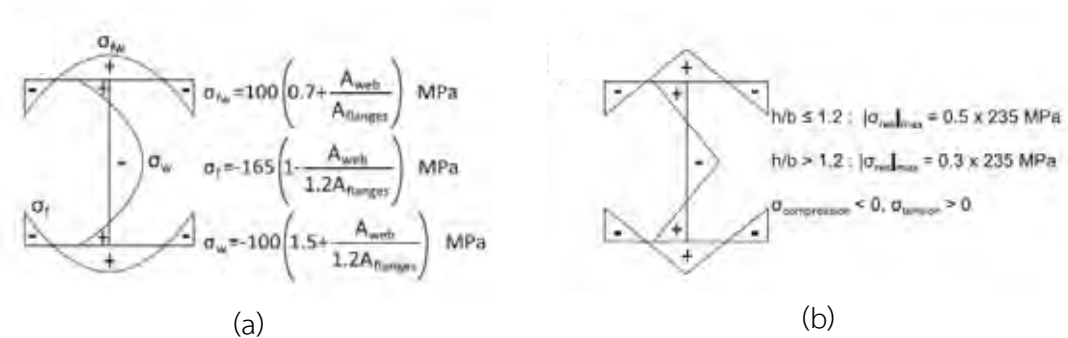
ภาพที่ 2.12 กระบวนการผลิตและประกอบ (a) การตัดแผ่นตั้ง (b) การเชื่อมองค์อาคาร castellated ระหว่างท่อนบนและท่อนล่างเข้าด้วยกัน (c) การตัดเพิ่มของช่องเปิดวงกลมในตัวอย่าง CS2 [5]

ส่วนตัวอย่าง CS2 ซึ่งมีช่องเปิดเป็นวงกลม โดยทั่วไปกระบวนการผลิตและประกอบ องค์อาคารเซลลูลาร์จะมีลักษณะคล้ายกับการประกอบขององค์อาคาร castellated แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยจะใช้กระบวนการผลิตที่แตกต่างออกไป โดยจะมีการตัดช่องเปิดเป็นวงกลมต่อจากองค์อาคาร castellated ในตัวอย่าง CS1 ดังภาพที่ 2.12 (c) ดังนั้น หน่วยแรงค้ำจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างออกไปจะสามารถตรวจวัดค่าได้ เนื่องจากความร้อนจากการตัดช่องเปิดเป็นวงกลมต่อจากองค์อาคาร castellated มีผลกระทบมากกว่ากระบวนการผลิตโดยทั่วไปที่ใช้กับตัวอย่าง CS1 และ CS3

ผลการวัดหน่วยแรงค้ำในหน้าตัดตั้งต้น พบว่ามีความสอดคล้องกับหน่วยแรงค้ำที่เสนอโดย Young และ ECCS ดังภาพที่ 2.13 อีกทั้งหน่วยแรงค้ำในหน้าตัดตั้งต้นทั้ง 6 ตัวอย่างมีความคล้ายคลึงกันมาก ซึ่ง [5] ยืนยันได้ว่าตัวอย่างหน้าตัดตั้งต้นทั้งหมดมาจากชุดเดียวกัน

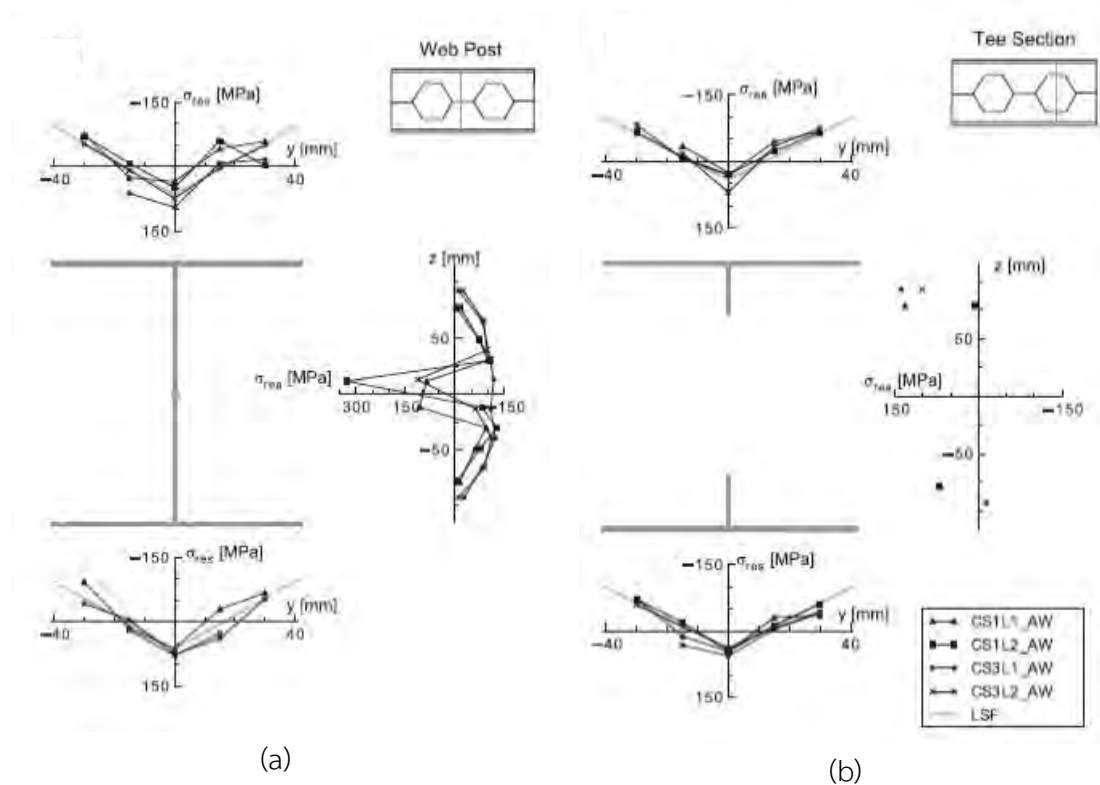


ภาพที่ 2.13 (a) หน่วยแรงคงค้างในหน้าตัดดั้งเดิม PS (b) การเปรียบเทียบหน่วยแรงคงค้างระหว่าง PS และที่เสนอโดยงานวิจัยอื่น ๆ [5]



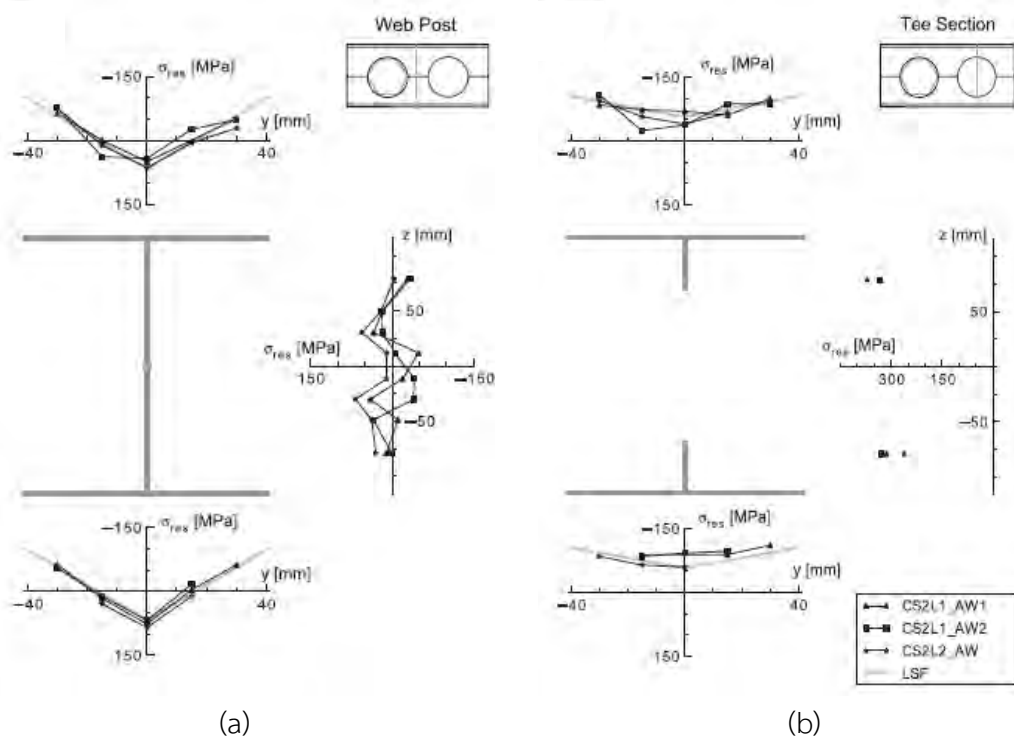
ภาพที่ 2.14 หน่วยแรงคงค้างในหน้าตัดรีดร้อนรูปตัวโอ  
(a) เสนอโดย Young (b) เสนอโดย ECCS [5]

ภาพที่ 2.15 แสดงผลการวัดหน่วยแรงคงค้างในองค์อาคาร castellated หลังการประกอบแล้ว พบว่ากระบวนการเชื่อมทำให้หน่วยแรงคงค้างเปลี่ยนแปลงไปเป็นที่เด่นชัด โดยหน่วยแรงคงค้างตรงบริเวณปลายปีกขององค์อาคารลดลงจากหน่วยแรงคงค้างเดิมจากหน้าตัดดั้งเดิม 50 MPa ในขณะที่ส่วนกลางของปีกก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเค้นอัดในปีกนี้ เป็นผลมาจากความเค้นดึงคงค้างบริเวณส่วนแผ่นตั้งที่เกิดจากการตัดและเชื่อมดัง



ภาพที่ 2.15 หน่วยแรงค้ำในของค้ำอาคาร castellated (a) บริเวณระหว่างช่องเปิด  
(b) บริเวณระหว่างช่องเปิดหน้าตัดตัวที่ [5]

ในส่วนขององค์อาคารเซลลูลาร์นั้น พบว่าหน่วยแรงค้ำที่วัดได้มีค่าแตกต่างไปจากหน่วยแรงค้ำขององค์อาคาร castellated เนื่องจากกระบวนการผลิตที่นำองค์อาคาร castellated มาตัดเป็นช่องเปิดเซลลูลาร์ต่อ ทำให้ความร้อนจากการตัดนั้นส่งผลกระทบต่อหน่วยแรงค้ำ โดยในส่วนปีกบริเวณหน้าตัดตัวที่จะรับความเค้นอัดทั้งหมด ส่วนบริเวณระหว่างช่องเปิดจะได้รับผลกระทบน้อยกว่า โดยหน่วยแรงค้ำที่ปีกยังคงเหมือนในองค์อาคาร castellated ดังภาพที่ 2.16 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการผลิตที่แตกต่างจากมาตรฐานทั่วไปจะส่งผลต่อหน่วยแรงค้ำในของค้ำอาคาร



ภาพที่ 2.16 หน่วยแรงค้ำงในองค้อาคารเซลลูลาร์

(a) บริเวณระหว่างช่องเปิด (b) หน้าตัดตัวที่ [5]

### 2.3 การวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะรอบแกนรองของเสาเซลลูลาร์

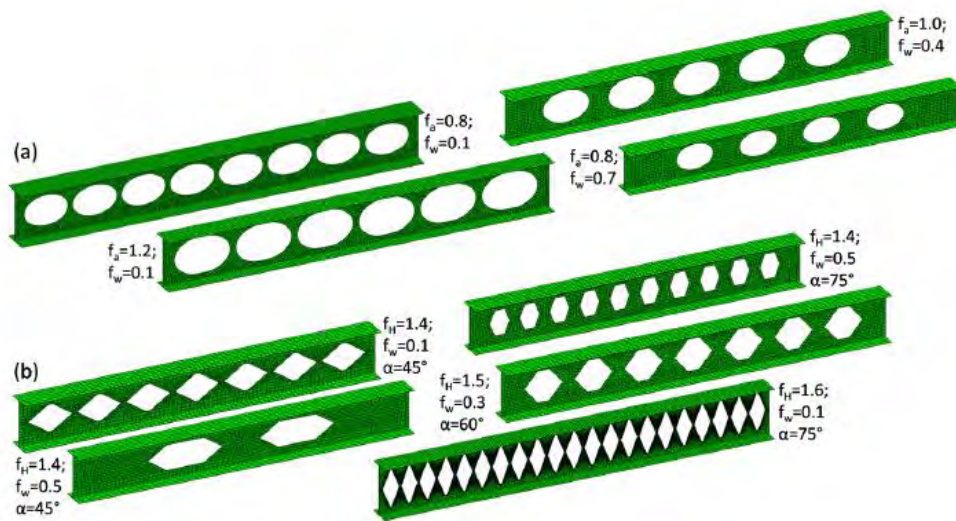
ในปี ค.ศ. 2016 Delphine และ Jan [6] ได้ศึกษาการโก่งเดาะของเสาเซลลูลาร์และ castellated รอบแกนรองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ABAQUS โดยได้สมมุติการกระจายหน่วยแรงค้ำงจาก Delphine และคณะ [5] เข้าไปในแบบจำลองด้วย จากนั้นเปรียบเทียบกำลังการโก่งเดาะจากไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการจากมาตรฐาน Eurocode 3 ที่ใช้สำหรับองค้อาคารหน้าตัดเต็ม (plain-webbed members) แล้วพิจารณากำลังการโก่งเดาะจากไฟไนต์เอลิเมนต์ขององค้อาคารเซลลูลาร์และ castellated ให้ค่าใกล้เคียงกับเส้นโค้งการโก่งเดาะเส้นใดมากที่สุดเ็นมาตรฐาน Eurocode 3 พร้อมทั้งเสนอวิธีการคำนวณ

ตารางที่ 2.4 แสดงหน้าตัดตั้งต้นที่ใช้ในการหากำลังการโก่งเดาะ โดยจะทำการเปลี่ยนขนาดช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิดตั้งตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2.17 รวมไปถึงมุมความกว้างสำหรับช่องเปิดในองค้อาคาร castellated ซึ่งใช้ทั้งหมด 980 รูปร่าง

ตารางที่ 2.4 ขนาดหน้าตัดตั้งต้นในหน่วยมิลลิเมตร [6]

	IPE300	IPE600	HE320A	HE650A	HE320M	HE650M
$h$ [mm]	300	600	310	640	359	668
$b$ [mm]	150	220	300	300	309	305
$t_w$ [mm]	7.1	12.0	9.0	13.5	21.0	21.0
$t_f$ [mm]	10.7	19.0	15.5	26.0	40.0	40.0

Delphine และ Jan [6] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่ากำลังต้านทานการโก่งเดาะโดยพิจารณาหน้าตัดตัวที่ (2T approach) เนื่องจากสมมุติให้การโก่งเดาะรอบแกนรองขององค์อาคารเซลล์ลูลาร์ และ castellated มีความใกล้เคียงกับการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดของหน้าตัดตัวเอช (I-section member) จึงพิจารณาใช้เงื่อนไขการออกแบบได้เช่นเดียวกับหน้าตัดตัวเอช แต่คุณสมบัติของหน้าตัดจะคำนวณโดยพิจารณาตรงกลางของช่องเปิดหรือหน้าตัดตัวที่แทน ซึ่งสำหรับมาตรฐาน Eurocode 3 ได้ให้วิธีการวิเคราะห์กำลังการโก่งเดาะ ดังนี้



ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างรูปร่างหน้าตัดตั้งต้นสำหรับ IPE300 (a) คานเซลล์ลูลาร์

(b) คาน castellated [6]

$$N_{Rd} = \frac{\chi A F_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.9)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (2.10)$$

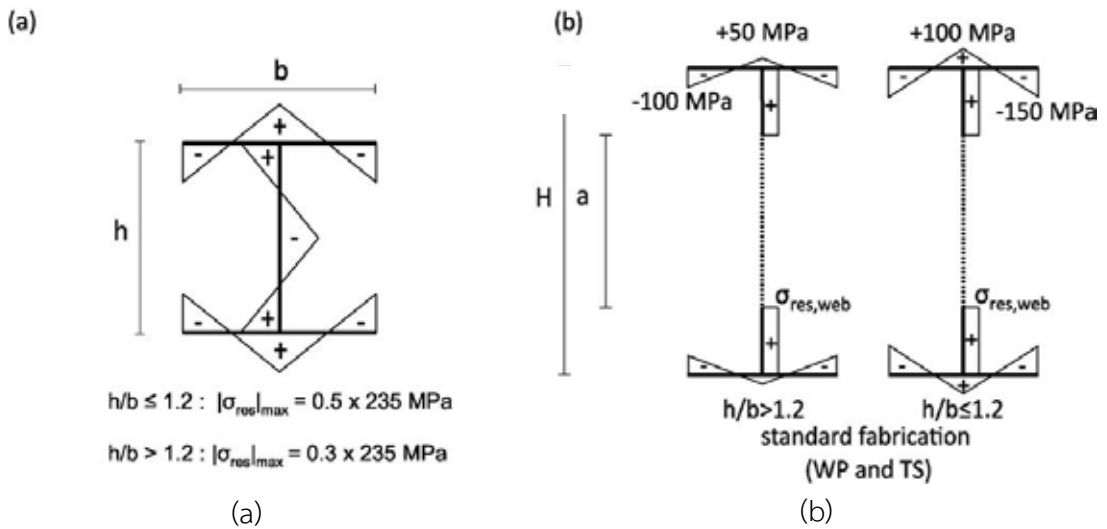
$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad (2.11)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{AF_y}{N_{cr}}} \quad (2.12)$$

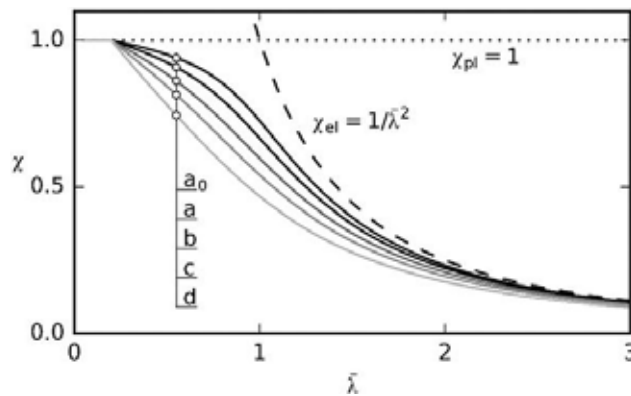
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$N_{Rd}$	คือ กำลังต้านทานการโก่งเดาะ
	$\chi$	คือ ตัวคูณลดกำลังเนื่องจากการโก่งเดาะ
	$\lambda$	คือ อัตราส่วนความขะลุขะ
	$N_{cr}$	คือ กำลังโก่งเดาะวิกฤต
	$EI_z$	คือ ความแกร่งเชิงตัดรอบแกนอ่อน
	$L$	คือ ความยาวเสา
	$\alpha$	คือ ตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ของเสา (imperfection factor)

สมการข้างต้นจะสอดคล้องกับเส้นโค้งการโก่งเดาะตามมาตรฐาน Eurocode 3 ดังภาพที่ 2.19 โดยแต่ละเส้นโค้งจะขึ้นกับค่า  $\alpha$  ซึ่งเป็นตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ของเสา แต่เนื่องจากผลของหน่วยแรงค้ำที่แตกต่างจากหน้าตัดรีร้อนทั่วไป ทำให้ยังไม่ทราบในเบื้องต้นว่าเส้นโค้งการโก่งเดาะควรจะเป็นเส้นใด Delphine และ Jan [6] จึงได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาเส้นโค้งการโก่งเดาะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับองค์อาคารเซลล์ลาร์และ castellated โดยเสนอหน่วยแรงค้ำที่ใช้สำหรับหน้าตัดแต่ละประเภทดังภาพที่ 2.18



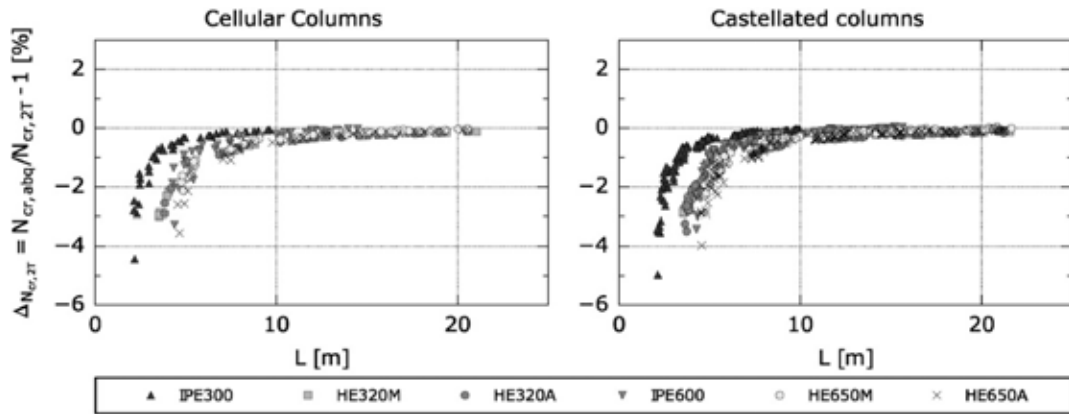
ภาพที่ 2.18 (a) หน่วยแรงค้ำงสำหรับหน้าตัดเต็มรีดร้อนเสนอโดย ECCS (b) หน่วยแรงค้ำงบนหน้าตัดเซลลูลาร์และ castellated สำหรับหน้าตัดตัวที่ (TS) และระหว่างช่องเปิด (WP) ที่เสนอโดย Delphine และ Jan ตามขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน [6]



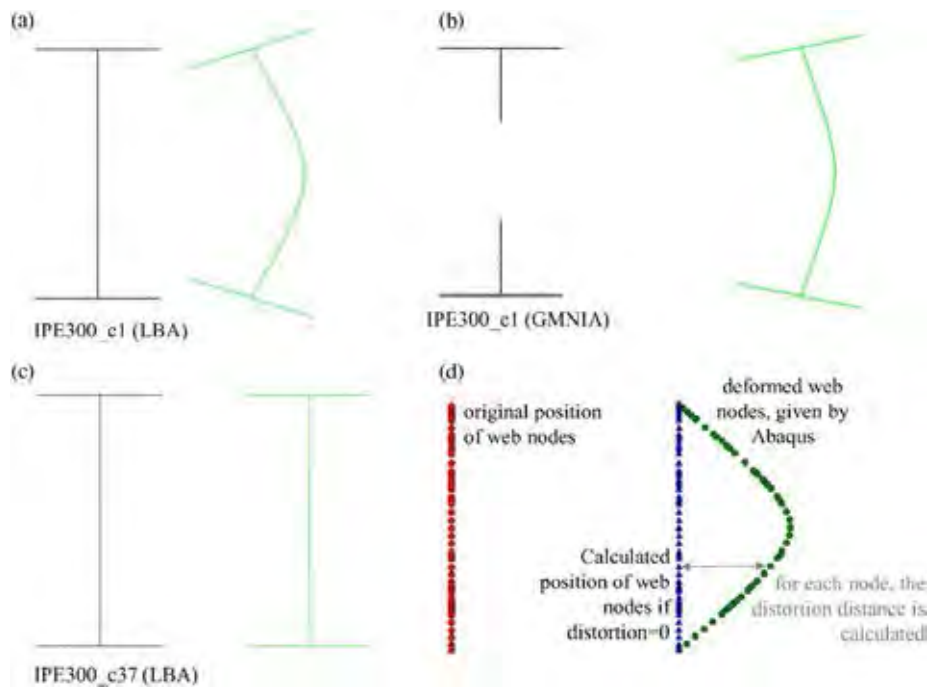
ภาพที่ 2.19 เส้นโค้งการโก่งเดาะ Eurocode 3 [6]

กำลังการโก่งเดาะจากไฟไนต์เอลิเมนต์  $N_{cr,abq}$  เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังการโก่งเดาะโดยใช้วิธีหน้าตัดตัวที่กับสมการที่ 2.13 ( $N_{cr,2T}$ ) พบว่าผลคำตอบจากการคำนวณด้วยวิธีหน้าตัดตัวที่มีความใกล้เคียงกันมากกับคำตอบที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีเสาที่ค่อนข้างยาวดังภาพที่ 2.20 แต่มีความคลาดเคลื่อนในเสาสั้น ซึ่งสามารถสังเกตสาเหตุได้ชัดเจนในบริเวณการเสียรูปของแผ่นดั่งดังภาพที่ 2.21 โดยมีลักษณะการบิดของแผ่นดั่ง (web distortion) ดังนั้น วิธีหน้าตัดตัวที่จึงไม่เหมาะสมในกรณีเสาสั้น แต่หากพิจารณาถึงกำลังการโก่งเดาะในช่วงพลาสติกเมื่อเป็นเสาสั้นแล้วจะพบว่าค่าที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับวิธีการออกแบบแบบหน้าตัดตัวที่ตามที่เสนอ



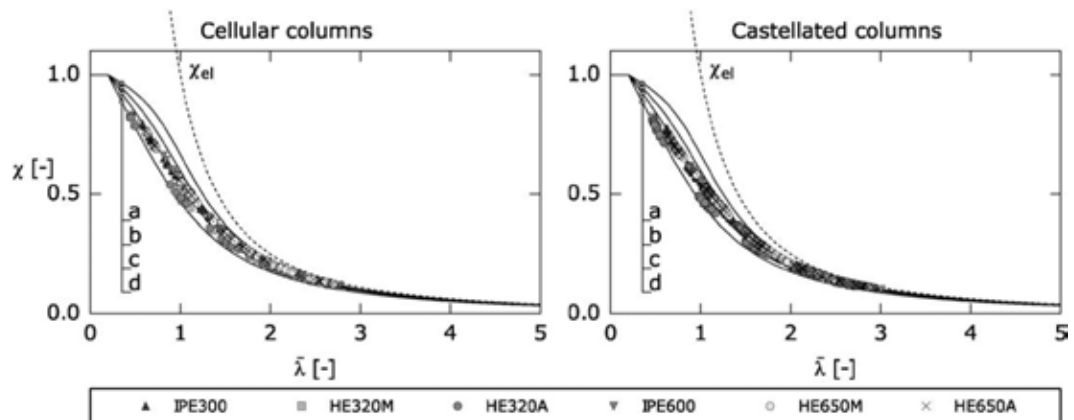


ภาพที่ 2.20 ค่าความคลาดเคลื่อนของ  $N_{cr,2T}$  [6]



ภาพที่ 2.21 การบิดของแผ่นตั้งในขณะการโก่งเดาะ [6]

ในการหาเส้นโค้งการโก่งเดาะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับองค์อาคารเซลล์ลูลาร์และ castellated จะใช้วิธีการคำนวณโดยให้  $N_{Rd}$  มีค่าเท่ากับ  $N_{Rd,abq}$  แล้วคำนวณ  $X_{abq}$  และ  $\bar{\lambda}$  จากสมการที่ 2.10 และ 2.12 ตามลำดับ ทำให้ค่าของ  $(\bar{\lambda}, X_{abq})$  สามารถเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะจากมาตรฐาน Eurocode 3 ได้ดังภาพที่ 2.22 โดยเส้นโค้งการโก่งเดาะที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดตามหน้าตัดตั้งต้นได้พร้อมทั้งค่าความคลาดเคลื่อน  $\Delta N_{Rd,min}$  แสดงดังตารางที่ 2.5



ภาพที่ 2.22 ค่าของ  $N_{Rd}$  เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะ [6]

Delphine และ Jan [6] ได้ให้เหตุผลที่การรับกำลังการโก่งเดาะที่แตกต่างกันในแต่ละหน้าตัดเป็นผลมาจากหน่วยแรงคงค้างที่สมมุติในแต่ละหน้าตัดที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.18

ตารางที่ 2.5 เส้นโค้งการโก่งเดาะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ  $\Delta N_{Rd}$  [6]

Parent section	$h/b$	$H/b$	Buckling curve	$\Delta N_{Rd,min}$ [%]
HE320A	$\leq 1.2$	$> 1.2$	d	-0.2
HE320M	$\leq 1.2$	$> 1.2$	d	0.1
IPE300	$> 1.2$	$> 1.2$	c	-2.7
HE650A	$> 1.2$	$> 1.2$	c	-3.3
HE650M	$> 1.2$	$> 1.2$	c	-3.3
IPE600	$> 1.2$	$> 1.2$	c	-1.6

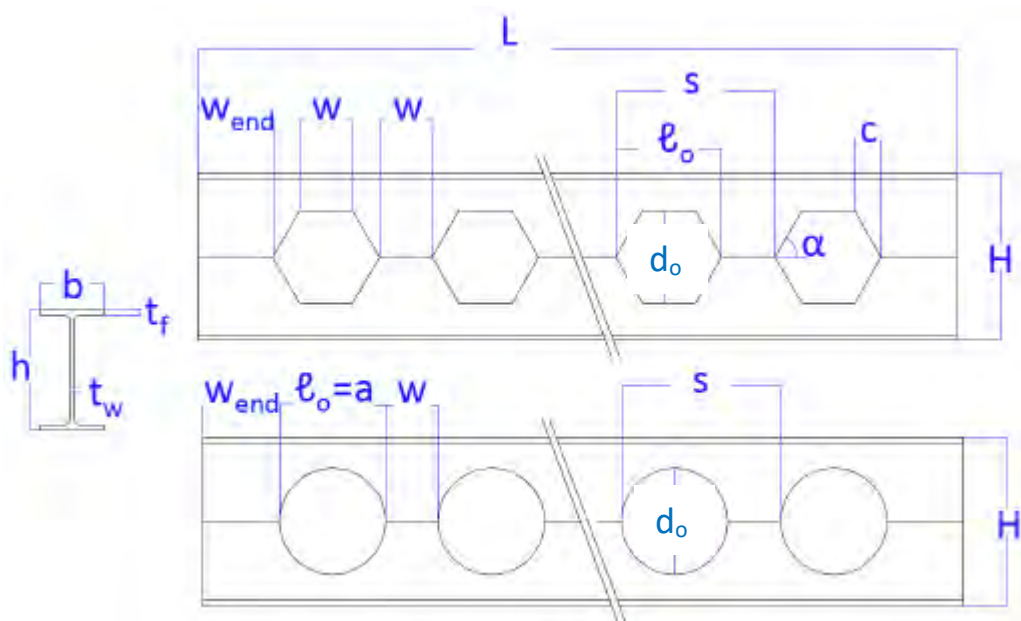
#### 2.4 การวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะรอบแกนหลักของเสาเซลลูลาร์

ในปี ค.ศ. 2015 Kinget [7] ได้ศึกษาการโก่งเดาะของเสาเซลลูลาร์และ castellated รอบแกนหลักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ABAQUS โดยได้สมมุติการกระจายของหน่วยแรงคงค้างจาก Delphine และคณะ [5] เข้าไปด้วย ซึ่งจะเปรียบเทียบกำลังการโก่งเดาะจากไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการต้านทานการโก่งเดาะ จากมาตรฐานของยุโรปที่ใช้สำหรับองค์อาคารหน้าตัดเต็ม โดยงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน Eurocode 3 แล้วพิจารณากำลังการโก่งเดาะจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเซลลูลาร์และ castellated ให้ค่าใกล้เคียงกับเส้นโค้งการโก่งเดาะใดมากที่สุด ในมาตรฐาน Eurocode 3 พร้อมทั้งเสนอวิธีการคำนวณ

หน้าตัดตั้งต้นที่ Kinget [7] ใช้วิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2.6 โดยมีการเปลี่ยนขนาดช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิด ตามพารามิเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.23

ตารางที่ 2.6 ขนาดหน้าตัดดั้งเดิมที่ใช้วิเคราะห์ [7]

Section name	h [mm]	b [mm]	$t_w$ [mm]	$t_f$ [mm]
IPE300	300	150	7.1	10.7
IPE600	600	220	12.0	19.0
HE320A	310	300	9.0	15.5
HE650A	640	300	13.5	26.0
HE320M	359	309	21.0	40.0
HE650M	668	305	21.0	40.0



ภาพที่ 2.23 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณขนาดช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิด [7]

สำหรับช่องเปิดวงกลมของเสาเซลลูลาร์ จะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิด  $d_o$  และระยะห่างระหว่างช่องเปิด  $w$  จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ โดย Kinget [7] เลือกใช้ค่าแฟกเตอร์  $f_a$  และ  $f_w$  ดังตารางที่ 2.7

$$d_o = f_a h \quad (2.14)$$

$$w = f_w l_o = f_w d_o \quad (2.15)$$

ตารางที่ 2.7 ค่าแฟกเตอร์  $f_a$  และ  $f_w$  ที่ใช้ใน [7]

factor	considered values		
$f_a$	0.8	1.0	1.2
$f_w$	0.1	0.4	0.7

ส่วนช่องเปิดรูปหกเหลี่ยมสำหรับเสา castellated รูปร่างเรขาคณิตจะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ 3 ค่า ได้แก่  $f_H$ ,  $\alpha$  และ  $f_w$  โดยความสูงของหน้าตัดคอคออาคาร  $H$  จะคำนวณจากแฟกเตอร์  $f_H$  ดังสมการที่ 2.16 และสามารถใช้ระบุความสูงของช่องเปิด  $a$  ได้ ค่า  $\alpha$  เป็นมุมของช่องเปิด ซึ่งจะใช้ระบุค่า  $c$  ดังสมการที่ 2.17 ส่วนแฟกเตอร์  $f_w$  จะใช้ระบุระยะห่างระหว่างช่องเปิด  $w$  ดังสมการที่ 2.18

$$H = f_H h = h + \frac{d_o}{2} \quad (2.16)$$

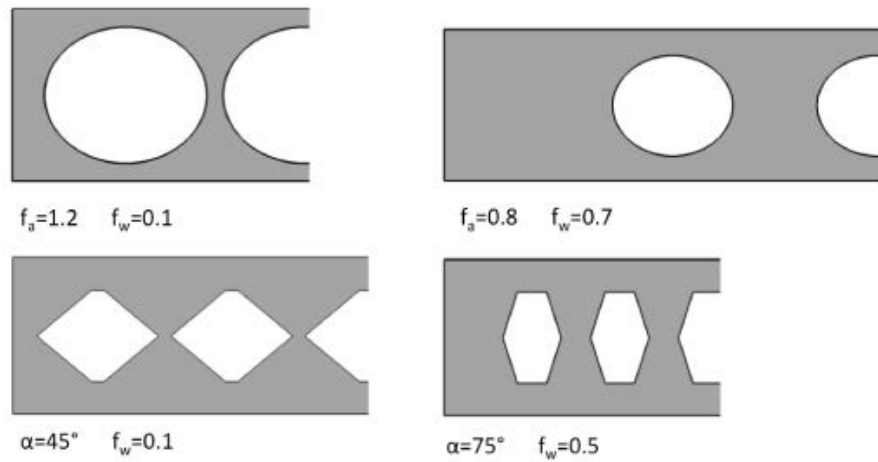
$$c = \frac{d_o}{2 \tan(\alpha)} \quad (2.17)$$

$$w = f_w l_0 = f_w (w + 2c) \quad (2.18)$$

ค่าแฟกเตอร์สำหรับรูปร่างเสา castellated ที่ Kinget [7] เลือกใช้แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่าแฟกเตอร์  $f_H$ ,  $\alpha$  และ  $f_w$  ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [7]

factor	considered values		
$f_H$	1.4	1.5	1.6
$\alpha$	45°	60°	75°
$f_w$	0.1	0.3	0.5



ภาพที่ 2.24 ตัวอย่างรูปร่างตามค่าแฟกเตอร์ต่าง ๆ [7]

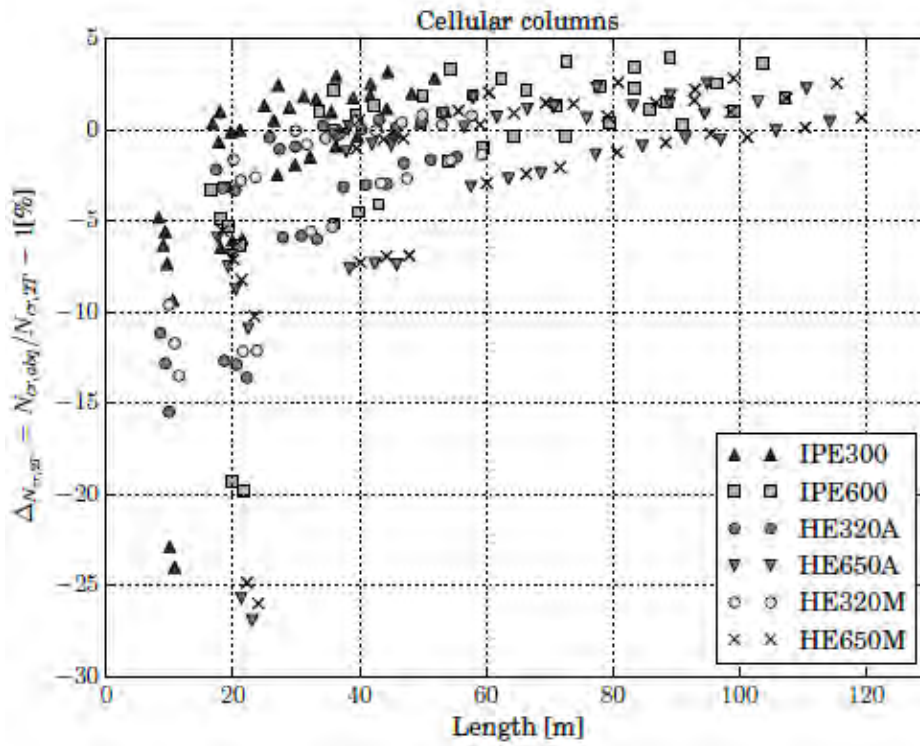
Kinget [7] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาเส้นโค้งการโก่งเดาะจากมาตรฐาน Eurocode 3 ที่เหมาะสมกับองค์อาคารเซลล์ลูลาร์และ castellated โดยใช้วิธีหน้าตัดตัวที่ในการคำนวณคุณสมบัติหน้าตัด และไม่มีการพิจารณาผลของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนของการโก่งเดาะรอบแกนหลัก โดยกำลังโก่งเดาะวิกฤตหาค่าได้ ดังนี้

$$N_{cr,2T} = \frac{\pi^2 EI_{y,2T}}{l_{cr}^2} \quad (2.19)$$

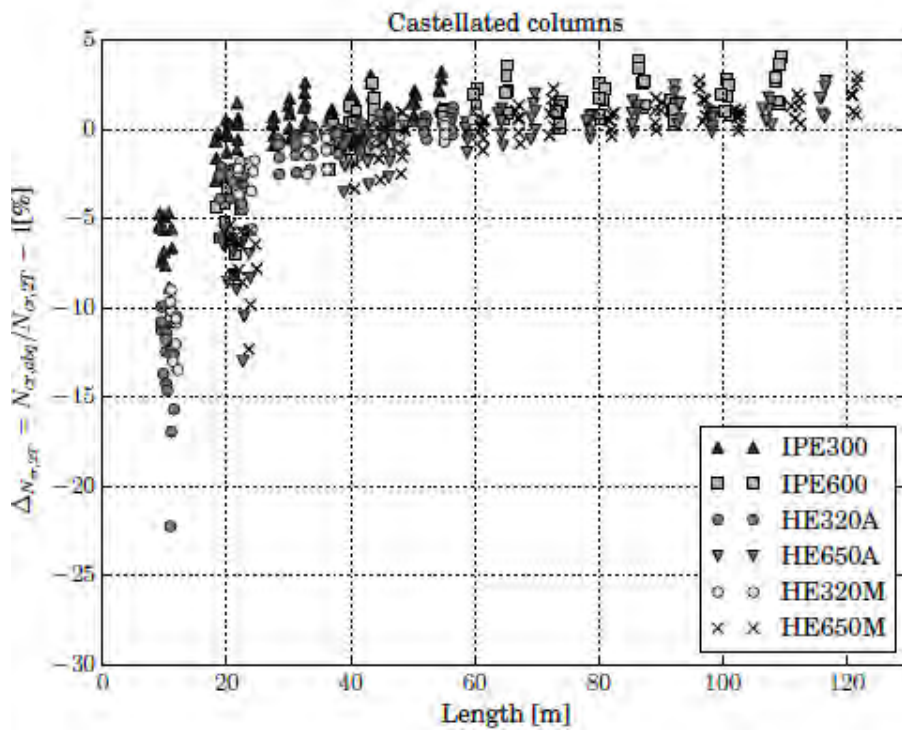
หลังจากที่คำนวณค่าการโก่งเดาะวิกฤตตามสมการที่ 2.19 จะมีการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการโก่งเดาะวิกฤตจากโปรแกรม ABAQUS และจากวิธีหน้าตัดตัวที่ตามสมการที่ 2.19 ด้วยสมการที่ 2.20

$$\Delta_{N_{cr,2T}} = \left( \frac{N_{cr,abq}}{N_{cr,2T}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2.20)$$

ภาพที่ 2.25 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของเสาเซลล์ลูลาร์และ castellated โดย Kinget [7] พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก เมื่อใช้วิธีหน้าตัดตัวที่ในการคำนวณค่าการโก่งเดาะวิกฤตทั้งเสาเซลล์ลูลาร์และ castellated



(a)



(b)

ภาพที่ 2.25 (a) ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับเสาเซลล์ลูลาร์

(b) ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับเสา castellated [7]

สำหรับเส้นโค้งการโก่งเดาะตามมาตรฐาน Eurocode 3 สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 2.21 และ 2.22 และค่ากำลังต้านทานการโก่งเดาะจาก ABAQUS  $N_{Rd,abq}$  คำนวณได้จากการคูณกันระหว่าง load proportionality factor (LPF) กับน้ำหนักเริ่มต้น  $N$  ที่กระทำกับองค์อาคาร

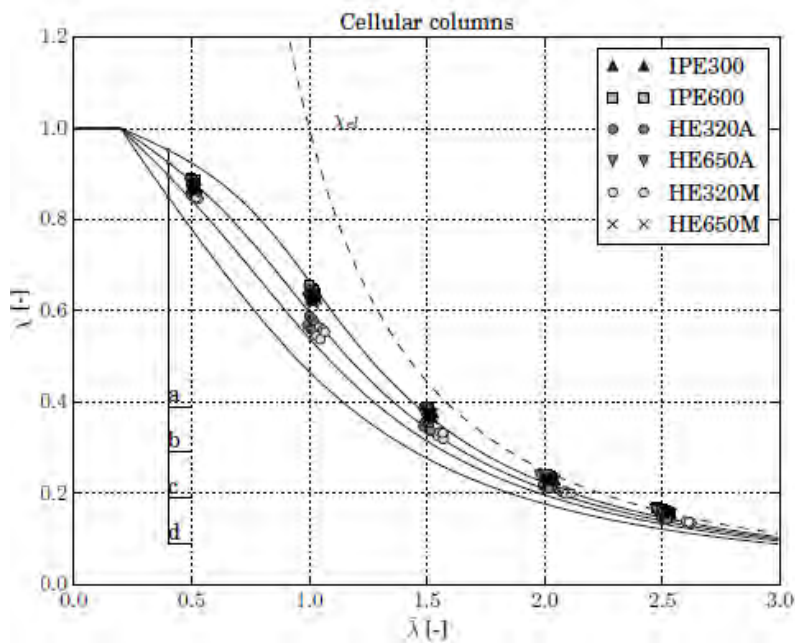
$$\lambda = \sqrt{\frac{F_y A_{2T}}{N_{cr,2T}}} \quad (2.21)$$

$$\chi_{abq} = \frac{N_{Rd,abq}}{F_y A_{2T}} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ อัตราส่วนความชะลุด

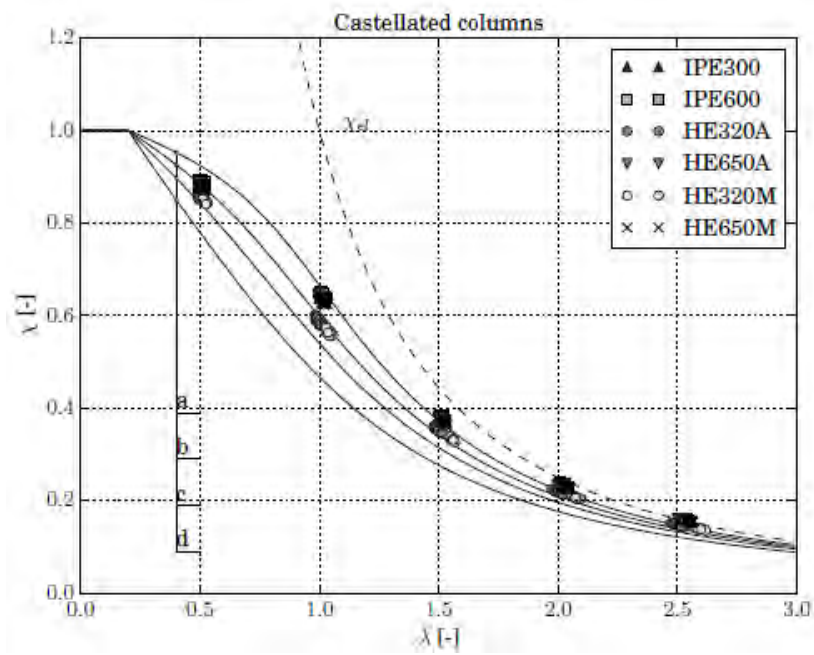
$\chi_{abq}$  คือ ตัวคูณลดกำลังเมื่อคำนวณโดยใช้  $N_{Rd,abq}$  จาก ABAQUS

Kinget [7] ได้ให้ความเห็นว่า ค่ากำลังต้านทานการโก่งเดาะวิกฤตจากวิธีหน้าตัดตัวที่  $N_{cr,2T}$  ซึ่งให้ค่าที่มากเกินไปกำลังการโก่งเดาะวิกฤตจาก ABAQUS  $N_{cr,abq}$  จึงควรจะมีวิธีคำนวณค่า  $N_{cr}$  ที่ให้ค่าประมาณใกล้เคียงกับ  $N_{cr,abq}$  มากกว่านี้



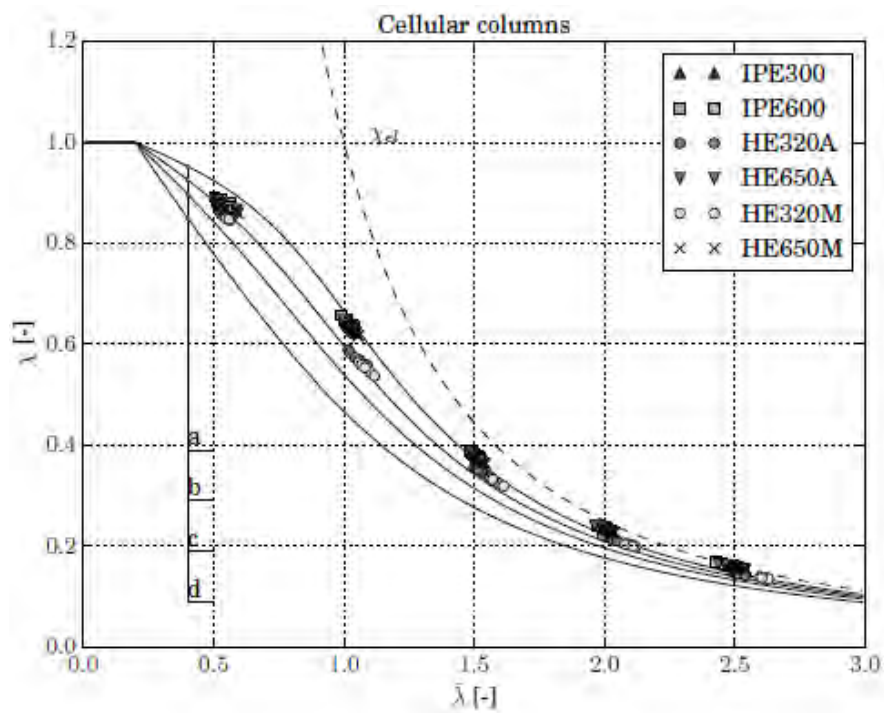
(a) สำหรับเสาเซลล์ลูลาร์





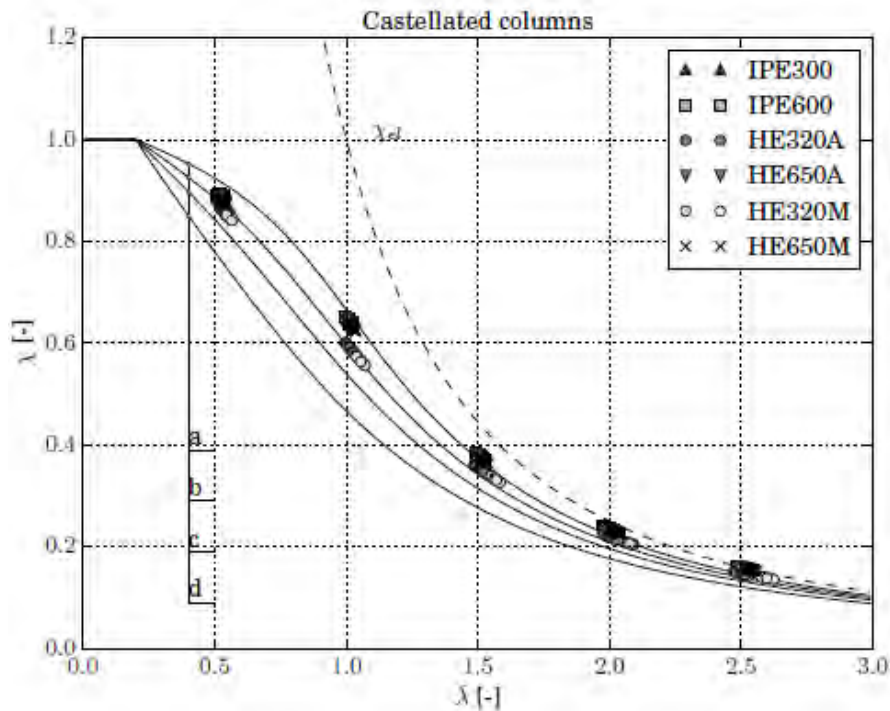
(b) สำหรับเสา castellated

ภาพที่ 2.26  $N_{Rd}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะอ้างอิงตามมาตรฐาน Eurocode 3 [7]



(a) สำหรับเสาเซลล์ลูลาร์





(b) สำหรับเสา castellated

ภาพที่ 2.27  $N_{Rd}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะ โดย  $\bar{\lambda}$  มาจาก  $N_{cr,abq}$  [7]

ภาพที่ 2.26 และภาพที่ 2.27 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะสำหรับเสา เซลลูลาร์และ castellated เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการโก่งเดาะตามมาตรฐาน Eurocode 3 ที่ อัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 โดยพบว่า เมื่ออัตราส่วนความชะลุด  $\bar{\lambda}$  มีค่า มากกว่าเท่ากับ 1.0 เส้นโค้งการโก่งเดาะ a เหมาะสมสำหรับหน้าตัดตั้งต้น IPE300 IPE600 HE650A และ HE650M และเส้นโค้งการโก่งเดาะ b เหมาะสมสำหรับหน้าตัดตั้งต้น HE320A และ HE320M ส่วนกรณีอัตราส่วนความชะลุด  $\bar{\lambda}$  มีค่าเท่ากับ 0.5 พบว่าเส้นโค้งการโก่งเดาะที่ต่ำลงมา จะเหมาะสมกว่า โดยหน้าตัดตั้งต้น IPE300, IPE600, HE650A และ HE650M เหมาะสมกับเส้นโค้ง การโก่งเดาะ b และหน้าตัดตั้งต้น HE320A และ 320M เหมาะสมกับเส้นโค้งการโก่งเดาะ c

## 2.5 ที่มาของสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ AISC-LRFD 1986

ในปี ค.ศ. 1991 Liew และคณะ [8] ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวกับความเป็นมาของสมการเส้น โค้งปฏิสัมพันธ์ ที่ใช้ในข้อกำหนด AISC-LRFD โดยได้ระบุถึงขั้นตอนการพัฒนาสมการ ที่มาจากการ ปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ของเส้นโค้งกำลังที่มาจากผลทดสอบ แบบอินอีลาสติก จาก Kanchanalai [9] โดยสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ AISC-LRFD ที่กล่าวถึงในบทความของ Liew และ คณะ [8] มีดังนี้

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) = 1.0 \quad \text{สำหรับ } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \quad (2.23)$$

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = 1.0 \quad \text{สำหรับ } \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 \quad (2.24)$$

เมื่อ  $P_u$  คือ กำลังแรงอัดตามแนวแกนปรับค่าที่ต้องการ

$P_n$  คือ กำลังแรงอัดตามแนวแกนระบุ

$M_{ux}$  และ  $M_{uy}$  คือ กำลังแรงดัดปรับค่าที่ต้องการรอบแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามลำดับ

$M_{nx}$  และ  $M_{ny}$  คือ กำลังแรงดัดระบุรอบแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามลำดับ

$\phi_b$  และ  $\phi_c$  คือ แฟกเตอร์ต้านทานสำหรับแรงอัดและแรงดัดตามลำดับ

โดยผลของแรงดัดลำดับสอง (second-order moment) แบบอีลาสติกสามารถคำนวณได้จาก

$$M_u = B_1 M_{m1} + B_2 M_{t1} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $M_{m1}$  และ  $M_{t1}$  คือ แรงดัดมากที่สุดลำดับหนึ่ง (first-order moment) เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง และมีการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ตามลำดับ

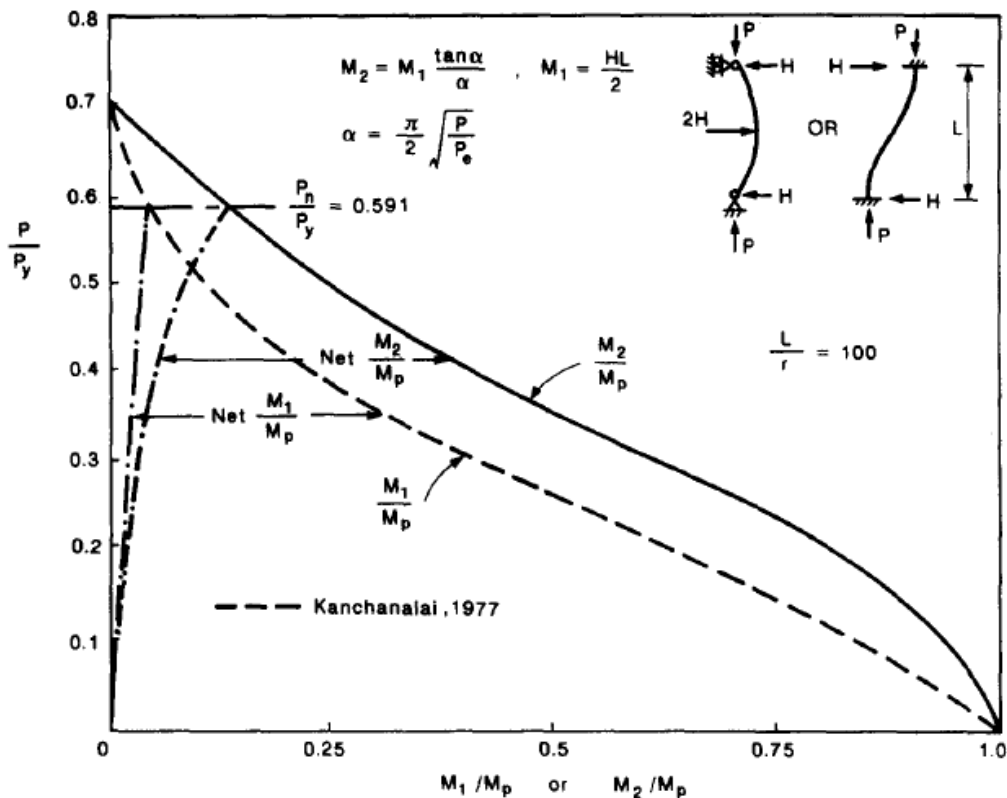
$B_1$  และ  $B_2$  คือ ตัวคูณขยายแรงดัดสำหรับ  $P-\delta$  และ  $P-\Delta$  ตามลำดับ

ขั้นตอนการพัฒนาสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ LRFD มีดังนี้

1. เส้นโค้งกำลังประลัยจากผลทดสอบของ Kanchanalai [9] จะถูกแสดงในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ โดยตัวแปรของแรงอัด  $P/P_y$  จะพล็อตระหว่างแรงดัดลำดับหนึ่ง  $M_1/M_p$  ผลการทดสอบสำหรับคาน-เสาจะมีการดัดรอบแกนรอง และมี  $L/r=100$  ดังแสดงในภาพที่ 2.28 องค์กรอาคารจะสมมุติให้มีความตรงอย่างสมบูรณ์ มีหน่วยแรงค้ำงอัด  $\sigma_{rc} = 0.3\sigma_y$  และหน่วยแรงคราก  $\sigma_y = 250 \text{ N/mm}^2$  โดยพฤติกรรมขององค์กรอาคารแบบอีลาสติก และอินอีลาสติกจะแสดงในภาพเดียวกัน

2. ตัวแปร  $M_1/M_p$  ซึ่งมาจากการวิเคราะห์แบบพลาสติก (plastic-zone analysis) จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดัดลำดับสองแบบอีลาสติก  $M_2/M_p$  ด้วยแฟกเตอร์ตัวคูณขยายแรงดัด สำหรับคาน-เสาจะถูกขยายแรงดัดด้วย  $\tan \alpha / \alpha$  เมื่อ  $\alpha = 0.5\pi\sqrt{P/P_e}$

3. จากสมการเส้นโค้งกำลังรับแรงอัด LRFD ของเสาที่องค์อาคารมี  $L/r = 100$  ได้ให้ค่ากำลังของเสาเท่ากับ  $0.591P_y$  แต่การวิเคราะห์แบบพลาสติกของ Kanchanalai [9] ได้ให้ค่ากำลังของเสาประมาณเท่ากับ  $0.71P_y$  ซึ่งความแตกต่างเกิดขึ้นมาจากสมการกำลังรับแรงอัดของเสา LRFD มีสมมุติฐานที่ว่า เสามีการโก่งตัวในเบื้องต้นประมาณ  $L/1500$  ส่วนการวิเคราะห์แบบอินอีลาสติกมีเฉพาะเสาตรงอย่างสมบูรณ์เท่านั้น เพื่อที่จะรวมผลความไม่สมบูรณ์ของเสาเข้าไปในสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ แรงดัดลำดับหนึ่งจะสมมุติให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับแรงอัด จากนั้นจะมีการคูณขยายแรงดัด ทำให้กลายเป็นแรงดัดลำดับสอง  $M_2/M_p$  ดังแสดงภาพที่ 2.28

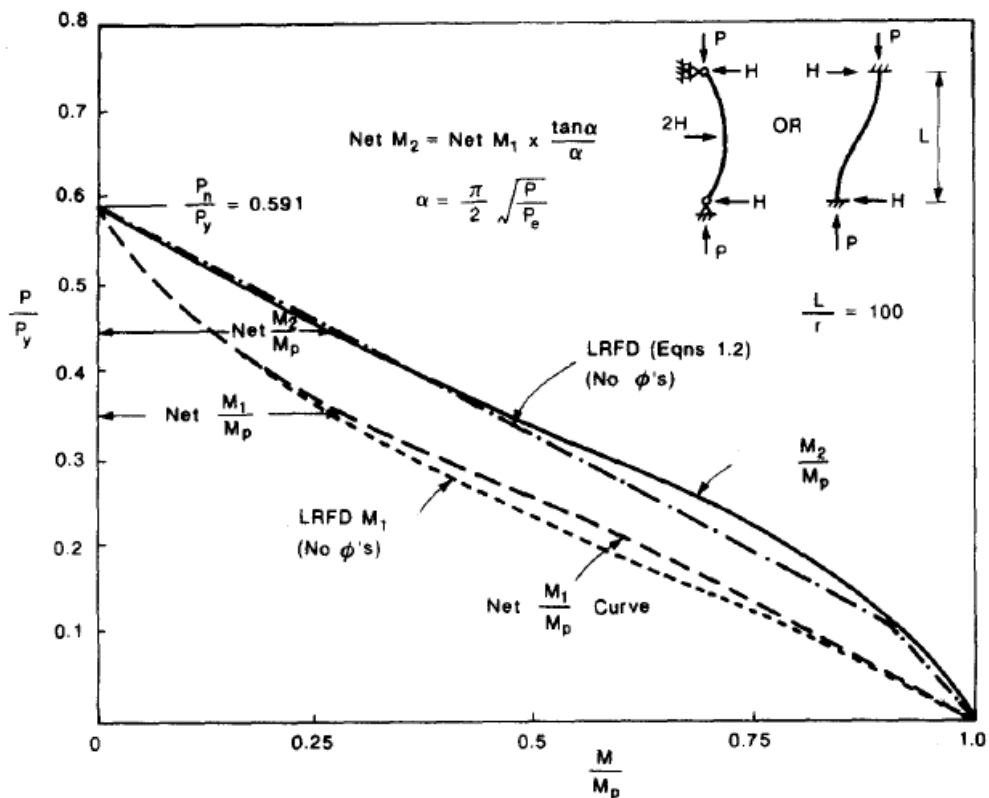


ภาพที่ 2.28 ขั้นตอนการหาค่า  $M_1/M_p$  และ  $M_2/M_p$  [8]

4. ผลการวิเคราะห์ถูกพล็อตในภาพที่ 2.29 โดยสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ LRFD มาจากการปรับเส้นโค้งของแรงดัดลำดับสอง และเส้นโค้งในลักษณะเดียวกันได้ถูกสร้างในหลากหลายกรณี รวมไปถึงการดัดรอบแกนหลักและแกนรอง โครงเฟรมสามารถเส (sway) ได้ และไม่เส (non-sway) และกรณีระบบโครงสร้างแบบเสาพิง (leaned column) โดยสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ LRFD ให้ค่าไม่เกินกว่า 5% แบบไม่อนุรักษ์ (unconservative) เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากแรงดัดรอบแกนหลัก และแกนรอง

การตัดรอบแกนรองของกรณี  $L/r = 100$  พบว่าเป็นกรณีที่วิกฤติที่สุดสำหรับผลทดสอบ คาน-เสา ดังแสดงในภาพที่ 2.28 และภาพที่ 2.29 ซึ่งสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ LRFD ซ้อนทับกับ เส้นโค้งจากการทดสอบได้ดีที่สุด โดยทั่วไป สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ LRFD จะซ้อนทับได้ดีในกรณี การตัดรอบแกนหลักที่มีค่า  $L/r$  จาก 0 ถึง 100 แต่จะให้ค่าอนุรักษ์ (conservative) สำหรับการตัด รอบแกนรองเมื่อมีค่า  $L/r$  จาก 0 ถึง 40 และจะค่อนข้างอนุรักษ์ เมื่อ  $L/r$  มากกว่า 120

5. ในขั้นตอนสุดท้าย สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ LRFD จะเพิ่มตัวคูณลดกำลัง  $\phi_b$  และ  $\phi_c$  เข้าไปในสมการ

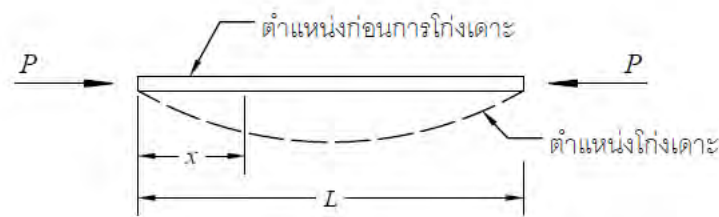


ภาพที่ 2.29 การปรับเส้นโค้งของสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ AISC-LRFD [8]

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

##### 3.1 การโก่งเดาะแบบอีลาสติกของเสา



ภาพที่ 3.1 เสาตรงภายใต้แรงอัด

Leonhard Euler ใน ค.ศ. 1757 ได้เสนอทฤษฎีการโก่งเดาะของเสาตรงยาวในช่วงอีลาสติก ภาพที่ 3.1 แสดงเสาตรงที่ปลายทั้ง 2 ข้างมีจุดรองรับเป็นแบบจุดหมุน (pin-ended) ภายใต้แรงอัดตามแกน  $P$  เสาเกิดการโก่งเดาะดังแสดงด้วยเส้นประ โมเมนต์ที่เกิดขึ้น ณ จุดใด ๆ บนเส้นประมีค่าเท่ากับ  $Py$  และจากความสมดุลของแรงจะได้

$$EI/\rho = Py(x) \quad (3.1)$$

โดย	$E$	= โมดูลัสยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.
	$I$	= โมเมนต์อินเนอร์เซีย	ซม <sup>4</sup>
	$\rho$	= รัศมีความโค้ง	ซม.
	$y(x)$	= ระยะโค้ง	ซม.

ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีความโค้ง ( $\rho$ ) กับระยะโค้ง ( $y$ ) เขียนได้ ดังนี้

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{d^2y/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้การโค้งมีค่าน้อยมาก สมการที่ 3.2 เขียนใหม่ได้

$$\frac{1}{\rho} = -d^2y/dx^2 \quad (3.3)$$

แทนค่าจากสมการที่ 3.3 ในสมการที่ 3.1 ได้

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI}y = 0 \quad (3.4)$$

แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับที่ 2 ในสมการที่ 3.4 โดยกำหนดให้

$$k^2 = \frac{P}{EI} \quad (3.5)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4 ได้

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2y = 0 \quad (3.6)$$

ซึ่งคำตอบทั่วไปได้แก่

$$y(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad (3.7)$$

จากสภาพจุดรองรับซึ่งกำหนดให้  $y=0$  ที่  $x=0$  จะได้  $B=0$  และจาก  $y=0$  ที่ระยะ  $x=L$  จะได้

$$A \sin kL = 0 \quad (3.8)$$

สมการที่ 3.7 เป็นจริงเมื่อ

ก.  $A=0$

ข.  $kL=0$

ค.  $kL=n\pi$  ซึ่งเป็นกรณีที่เสาคเกิดการโก่งเดาะ และเป็นกรณีที่สนใจโดยที่  $n$  มีค่าเท่ากับ 1,2,3...

แทนค่า  $k = n\pi/L$  ลงในสมการที่ 3.5 ได้

$$P = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} EI \quad (3.9)$$

พิจารณาสมการที่ 3.9 พบว่า  $P$  มีค่าต่ำสุดเมื่อ  $n=1$  ซึ่งเป็นกรณีที่เสาเกิดการโก่งเดาะแบบความโค้งเดียว (single curvature) ดังนั้น

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.10)$$

โดยที่  $P_e$  = น้ำหนักบรรทุกก้อยเลอร์ (Euler load) กก.

หรือในเทอมของหน่วยแรงอัด จะได้

$$F_e = \frac{P_e}{A} = \frac{\pi^2 EI}{AL^2} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (3.11)$$

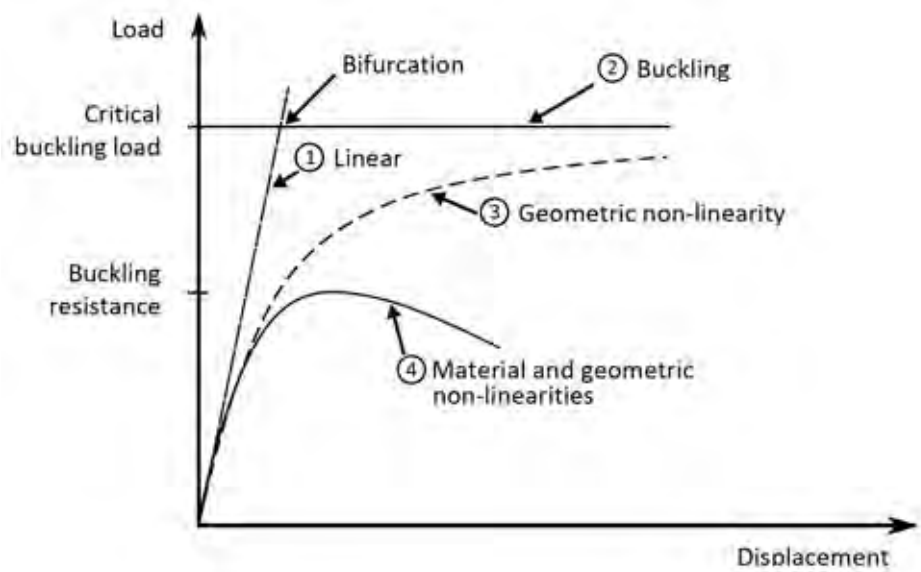
โดยที่  $F_e$  = น้ำหนักบรรทุกก้อยเลอร์ (Euler load) กก./ตร.ซม.

$r$  = รัศมีจโรเซชัน ซม.

## 3.2 การวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะของเสา

### 3.2.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสา

การโก่งเดาะของเสาสามารถแสดงได้จากกราฟระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการอ่อนตัวดังภาพที่ 3.2 โดยการตอบสนองแบบเชิงเส้นแสดงถึงองค์อาคารที่เป็นอีลาสติกและเสาตรงอย่างสมบูรณ์ ทำให้สามารถรับน้ำหนักได้ถึงจุดครากดั่งเส้นโค้งที่ 1 จากทฤษฎีการโก่งเดาะของเสาในช่วงอีลาสติก เมื่อเสารับน้ำหนักจนถึงจุดไบเฟอร์เคชัน (bifurcation point) ซึ่งเป็นจุดเส้นโค้งที่ 1 ตัดกับเส้นโค้งที่ 2 แล้ว จะเกิดการโก่งเดาะเกิดขึ้น แต่ในความเป็นจริงตัวองค์อาคารเองไม่ได้มีความสมบูรณ์แบบจนเป็นเสาตรงและมีผลของหน่วยแรงคงค้างที่ทำให้ตัวองค์อาคารไม่เป็นอีลาสติก หากเป็นความไม่สมบูรณ์ของเสาในกรณีไม่เป็นเสาตรง เส้นโค้งกำลังรับน้ำหนักจากที่เป็นเชิงเส้นจะเปลี่ยนมาเป็นไม่เชิงเส้น (non-linear) ดั่งเส้นโค้งที่ 3 และเมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมของเหล็กที่เป็น elastic-plastic แทนที่จะเป็นอีลาสติกอันเนื่องมาจากหน่วยแรงคงค้างในตัววัสดุเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นเส้นโค้งที่ 4 จึงเป็นเส้นโค้งระหว่างน้ำหนักที่กระทำและการโก่งตัวของเสาที่เหมาะสมที่สุดจากเส้นโค้งอื่น ๆ



ภาพที่ 3.2 พฤติกรรมการรับน้ำหนักทั่วไปขององค์อาคารเหล็ก [7]

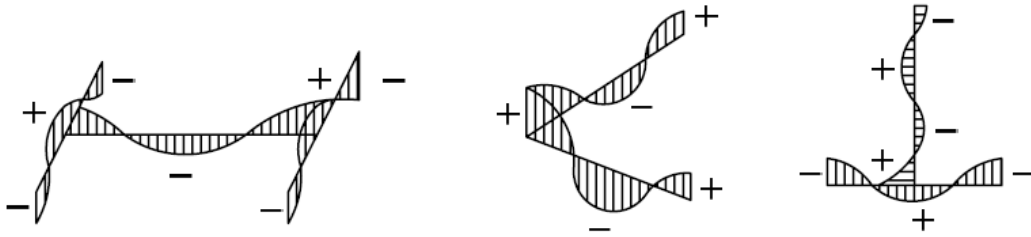
### 3.2.2 หน่วยแรงค้ำในองค์อาคารเหล็กที่ร้อน

เหล็กรูปพรรณที่ผ่านกระบวนการผลิตต่าง ๆ จนเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จแล้วจะมี หน่วยแรงที่เหลืออยู่ในองค์อาคารหลังจากผ่านขั้นตอนการผลิตเรียกว่าหน่วยแรงค้ำ ซึ่งเป็ผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดหน่วยแรงค้ำได้แก่

1. การเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเหล็กประกอบที่ร้อน
2. การดัดเย็น (cold bending) หรือการโก่ง (cambering) ในระหว่างการประกอบ (fabrication)
3. การทำรูด้วยการกระแทก (punching) และการตัดในระหว่างการประกอบ
4. การเชื่อม

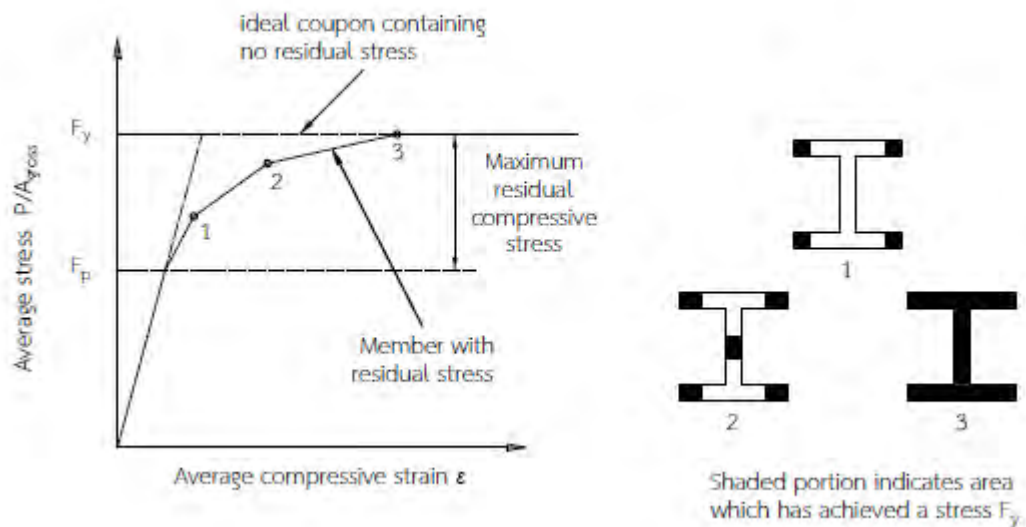
สำหรับหน้าตัด wide-flange หรือ H-beam ที่ผ่านกระบวนการที่ร้อนเสร็จเรียบร้อยแล้ว บริเวณปีกของคานซึ่งมีความหนาว่าส่วนอื่น ๆ จะมีการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยส่วนที่ติดกับแผ่นตั้งจะเย็นตัวช้ากว่าและส่วนที่ปลายปีกคาน (flange tips) จะเย็นตัวได้เร็วกว่าเนื่องจากสัมผัสกับอากาศได้ดีกว่า ซึ่งการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอนี้ส่งผลตามมาก็คือเกิดหน่วยแรงค้ำขึ้นในตัวองค์อาคาร โดยบริเวณปลายปีกคานและบริเวณส่วนกลางของแผ่นตั้งจะเป็นหน่วยแรงค้ำอัด ส่วนบริเวณที่ปีกคานมาต่อกับแผ่นตั้งจะรับหน่วยแรงค้ำดึงดังแสดงในภาพที่ 3.3





ภาพที่ 3.3 การกระจายของหน่วยแรงคงค้าง (+ แรงดึง, - แรงอัด) [10]

ในหน้าตัดเหล็กที่ร้อนทั่วไป หน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 โดยจะเปลี่ยนจากอิลาสติกแบบเชิงเส้นเป็นไม่เชิงเส้นแทน ซึ่งทำให้กำลังการรับน้ำหนักขององค์อาคารในช่วงอิลาสติกลดลง แต่หน่วยแรงคงค้างจะไม่ส่งผลต่อหน่วยแรงสูงสุดของเสา

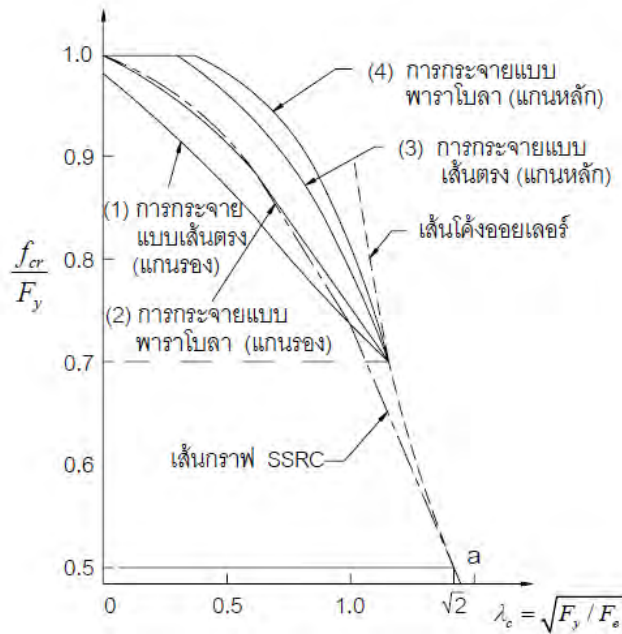


ภาพที่ 3.4 หน่วยแรงคงค้างที่ส่งผลต่อความเค้น-ความเครียด [11]

### 3.2.3 หน่วยแรงอัดวิกฤตที่กำหนดโดย SSRC (Structural Stability Research Council)

จากผลของหน่วยแรงคงค้างในตัวองค์อาคารดังกล่าวในหัวข้อที่แล้วที่ส่งผลทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสามีค่าน้อยลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับารกระจายของหน่วยแรงคงค้างว่าเป็นรูปแบบไหน โดยในความเป็นจริงลักษณะการกระจายนี้สามารถเป็นได้หลายรูปแบบเช่น เส้นตรง พาราโบลา เป็นต้น

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ภาพที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับพารามิเตอร์ความขลุดของเสา  $\lambda_c$  เมื่อหน่วยแรงค้ำมีการกระจายเป็นแบบเส้นตรงและเส้นโค้งพาราโบลา โดยมีค่า  $f_r=0.3F_y$  เมื่อ  $f_r$  คือหน่วยแรงค้ำ และ  $F_y$  คือหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของเหล็ก อีกทั้งกราฟยังแสดงให้เห็นว่าเสาที่มีอัตราส่วนความขลุดเท่ากันจะมีการโก่งรอบแกนรอง ทำให้เสามีหน่วยแรงอัดวิกฤติที่น้อยกว่าโก่งรอบแกนหลัก



ภาพที่ 3.5 กราฟกำลังของเสาเมื่อหน่วยแรงค้ำมีการกระจายแบบต่าง ๆ ที่ปีก [10]

จากความสัมพันธ์ของเส้นโค้งดังกล่าว Bleich ได้เสนอให้กำลังของเสาในช่วงอินีลาสติกแทนด้วยเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งสามารถเขียนในสมการที่ได้ ดังนี้

$$f_{cr} = F_y - \frac{F_p}{\pi^2 E} (F_y - F_p) (KL/r)^2 \quad (3.12)$$

โดยที่  $f_r = F_y - F_p$  กก./ตร.ซม.

ดังนั้น

$$f_{cr} = F_y \left[ 1 - \frac{f_r}{F_y} (F_y - f_r) \frac{(KL/r)^2}{\pi^2 E} \right] \quad (3.13)$$

เพื่อให้เส้นกราฟจากสมการที่ 3.13 สามารถใช้ได้อย่างประมาณ ทั้งในกรณีโก่งเตาะรอบแกนหลักและแกนรอง อีกทั้งเพื่อให้เส้นกราฟมีความต่อเนื่องอย่างราบเรียบจากเส้นกราฟออยเลอร์ SSRC

(Structural Stability Research Council) จึงกำหนดให้  $f_r=0.5F_y$  (จุด a ในภาพที่ 3.5 ) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.13 ได้

$$f_{cr} = F_y \left[ 1 - \frac{F_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (3.14)$$

สมการที่ 3.14 เรียกว่า สมการเส้นกราฟ SSRC และแทนด้วยเส้นประ ดังแสดงในภาพที่ 3.5

### 3.2.4 หน่วยแรงอัดวิกฤตตามข้อกำหนด AISC-2016

จากสมการที่ 3.14 หน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงอีลาสติกมีค่า  $f_{cr} = F_y \left[ 1 - \frac{F_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right]$

เมื่อให้  $\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e} = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{F_y/E}$  = พารามิเตอร์ความชะลูดของเสา (3.15)

จากหน่วยแรงอัดอีลาสติกจากสมการออยเลอร์  $F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2$  (3.5)

จะได้  $f_{cr} = F_y \left[ 1 - \frac{\lambda_c^2}{4} \right] = F_y \left[ 1 - \frac{F_y}{4F_e} \right]$  (3.16)

นอกจากนี้ SSRC ยังกำหนดให้พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกเป็นช่วงอินอีลาสติกเมื่อ  $f_{cr}=F_y/2$  (จุด a ในภาพที่ 3.5 ) ดังนั้น จากสมการที่ 3.5 แทนค่า  $F_y/2 = F_y(1-\lambda_c^2/4)$  และ  $\lambda_c = \sqrt{2}$  แต่อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนด AISC-2016 เลือกใช้  $\lambda_c = 1.5$  เป็นค่ากำหนดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการโก่งเดาะเสาดังกล่าวแทน

#### 3.2.4.1 หน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงอีลาสติก

เมื่อ  $\lambda_c > 1.5$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงอัดวิกฤตเขียนได้จากสมการออยเลอร์ (สมการที่ 3.5) ดังนี้  $f_{cr} = F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2$  แต่ข้อกำหนด AISC-2016 กำหนดให้ใช้

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (3.17)$$

พิจารณาค่า  $\lambda_c > 1.5$  และจากสมการที่ 3.15 ได้

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{F_y/E} = \sqrt{F_y/F_e} > 1.5$$

จะได้  $\frac{KL}{r} > 4.71\sqrt{E/F_y}$  หรือ  $F_y/F_e > 2.25$  (3.18)

ดังนั้นจึงสรุปว่า ข้อกำหนด AISC-2016 กำหนดให้หน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงอีลาสติกมีค่า  $F_{cr} = 0.877F_e$  เมื่อ  $\frac{KL}{r} > 4.71\sqrt{E/F_y}$  หรือเมื่อ  $F_y/F_e > 2.25$  ดังภาพที่ 3.6

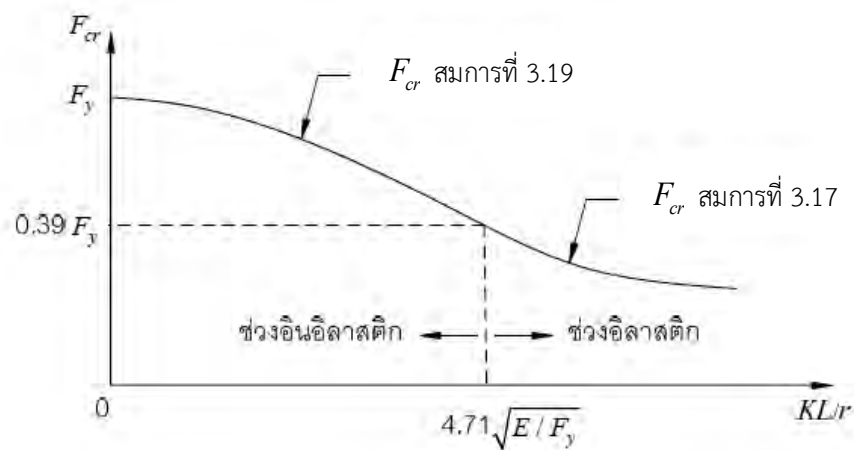
### 3.2.4.2 หน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงอีลาสติก

เมื่อ  $\lambda_c \leq 1.5$  (หรือเมื่อ  $\frac{KL}{r} \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$  หรือ  $F_y/F_e \leq 2.25$ ) เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติกซึ่งหน่วยแรงอัดวิกฤตเขียนได้จากสมการที่ 3.16 ดังนี้

$$f_{cr} = F_y \left[ 1 - \frac{F_y}{4F_e} \right]$$

แต่ข้อกำหนด AISC-2016 กำหนดให้ใช้

$$F_{cr} = (0.658)^{F_y/F_e} F_y \quad (3.19)$$



ภาพที่ 3.6 กราฟหน่วยแรงอัดวิกฤตขององค์อาคารรับแรงอัด (กรณีไม่มีชิ้นส่วนชะลูด) [10]

### 3.2.4.3 การโก่งเตาะเนื่องจากการบิด (torsional buckling)

เสากายใต้แรงตามแนวแกน ส่วนมากจะเกิดการโก่งเตาะเนื่องจากการดัด (bend buckling) อย่างไรก็ตาม ในกรณีของเสาน้ำตัดประเภทผนังบาง (thin-walled sections) เช่น เหล็กฉาก เหล็กตัวที เหล็กรูปรางน้ำ อาจเกิดการโก่งเตาะเนื่องจากการบิดได้ เพราะเหล็กรูปรางน้ำดังกล่าวมีค่าสติฟเนสการบิด (torsional stiffness) ต่ำ สำหรับหน้าตัดมีแกนสมมาตรสองแกนตามข้อกำหนด AISC-2016 ให้สมการดังนี้

หน่วยแรงอัดอติลัสติก เนื่องจากการบิด  $F_{ez}$  มีค่า

$$F_{ez} = \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \frac{1}{A\bar{F}_o^2} \quad (3.20)$$

- เมื่อ  $C_w$  = ค่าคงที่การบิดเบี้ยว  
 $J$  = ค่าคงที่เนื่องจากการบิด  
 $\bar{F}_o^2$  = รัศมีจโรเรชันสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางการเฉือน  
 $K_z = 1$  เมื่อปลายเสาทั้ง 2 ข้างมีความอิสระในการบิด (warping)  
 $= 0.5$  เมื่อปลายเสามีการยึดแน่น

อนึ่ง ในการคำนวณค่าหน่วยแรงอัดวิกฤตจากสมการที่ 3.17 และ 3.19 ค่า  $F_e$  จะเป็นค่าที่น้อยกว่าจากค่า  $F_{ex}$ ,  $F_{ey}$  และ  $F_{ez}$  ดังสมการที่ 3.21

$$F_e = \min(F_{ex}, F_{ey}, F_{ez}) \quad (3.21)$$

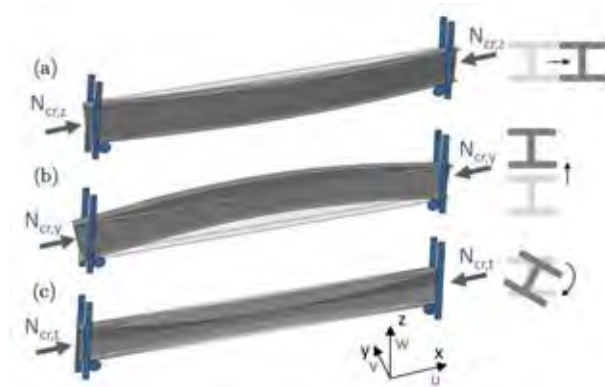
กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนจะคำนวณได้จาก

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3.22)$$

- เมื่อ  $F_{cr}$  = หน่วยแรงอัดวิกฤต กก./ตร.ซม.  
 $A_g$  = พื้นที่หน้าตัดรวม ตร.ซม.



9336278



ภาพที่ 3.7 การโก่งเดาะที่เป็นไปได้ของ  $F_c$ : (a) การโก่งเดาะรอบแกนรอง, (b) การโก่งเดาะรอบแกนหลัก, (c) การโก่งเดาะเนื่องจากการบิด [12]

### 3.3 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคานเซลลูลาร์ตาม AISC Design Guide 31

การรับแรงดัดของคานเซลลูลาร์นั้นไม่สามารถพิจารณาตามวิธีแบบหน้าตัดเต็มกับคานที่มีช่องเปิดได้ เนื่องจากช่องเปิดที่มีจำนวนมากทำให้พฤติกรรมการรับแรงที่เกิดขึ้นแตกต่างออกไป การที่คานมีช่องเปิดจำนวนมากนั้น ทำให้มีรูปแบบการวิบัติที่เพิ่มขึ้นจากหน้าตัดเต็ม ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบบริเวณระหว่างช่องเปิดและการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนบนและล่างของหน้าตัดตัวที่ อีกทั้งจำนวนช่องเปิดที่มีมากในคานเซลลูลาร์ทำให้การวิเคราะห์หากการโก่งตัวมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้น

หน่วยแรงเฉพะที่ที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างช่องเปิดและตรงตำแหน่งช่องเปิดทำให้เกิดรูปแบบการวิบัติที่แตกต่างจากหน้าตัดเต็ม ซึ่งสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาในการตรวจสอบกำลังรับแรงดัดของคานเซลลูลาร์คือ

1. การโก่งเดาะเฉพาะที่ของหน้าตัด
2. กำลังรับแรงดัดโดยรวม (overall beam flexural strength)
3. โมเมนต์ดัดวีเรนดีล (virendeel bending) บริเวณหน้าตัดตัวที่
4. การโก่งเดาะบริเวณระหว่างช่องเปิด (web-post buckling)
5. แรงอัดและแรงดึงตามแนวแกน
6. แรงเฉือนแนวราบ (horizontal shear)
7. แรงเฉือนแนวตั้ง (vertical shear)
8. การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

ขั้นตอนแรกในการออกแบบคานเซลล์ลาร์คือต้องคำนวณแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดโดยรวม (global forces) ก่อน จากนั้นจึงนำแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดโดยรวมมาพิจารณาเป็นแรงกระทำตรงบริเวณระหว่างช่องเปิดและช่องเปิดเรียกว่าเป็นแรงกระทำเฉพาะที่ (localized force) ที่ด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่ จากนั้นจึงตรวจสอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายใต้แรงกระทำเฉพาะที่

### 3.3.1 แรงดัดวิรัตน์

แรงดัดวิรัตน์เกิดจากการถ่ายเทของแรงเฉือนบริเวณช่องเปิด ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดเฉพาะที่ที่บริเวณหน้าตัดตัวที่ด้านบนและด้านล่างช่องเปิด ประกอบกับผลของโมเมนต์ดัดโดยรวมที่ทำให้เกิดแรงอัดที่ด้านบนและแรงดึงด้านล่างของหน้าตัดตัวที่ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างแรงอัดและแรงดึงกับโมเมนต์ร่วมกัน โดยส่วนมากการวิบัติเนื่องจากแรงดัดวิรัตน์มักจะเกิดกับองค์อาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่และมีความยาวไม่มากนักจนแรงเฉือนมีอิทธิพลสูง ขั้นตอนการตรวจสอบแรงดัดวิรัตน์มีด้วยกัน 3 ข้อ

1. คำนวณแรงตามแนวแกนเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดโดยรวมและแรงดัดวิรัตน์เนื่องมาจากแรงเฉือนที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่
2. คำนวณกำลังระบุ (nominal strength) ตามแนวแกนและแรงดัดของด้านบนและด้านล่างหน้าตัดตัวที่ตาม AISC Specification for Structural Steel Buildings (AISC-2016) บท D, E และ F
3. ตรวจสอบปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและแรงดัดวิรัตน์ตามสมการในบท H ของ AISC Specification

#### 3.3.1.1 การคำนวณแรงตามแนวแกนและแรงดัดวิรัตน์ในแต่ละช่องเปิด

1. การคำนวณแรงตามแนวแกนเนื่องจากโมเมนต์ดัดโดยรวมสามารถคำนวณได้โดยแบ่งโมเมนต์ออกเป็นแรงคู่ควบกระทำด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่ดังสมการที่ 3.10

$$P_r = \frac{M_r}{d_{effec}} \quad (3.23)$$

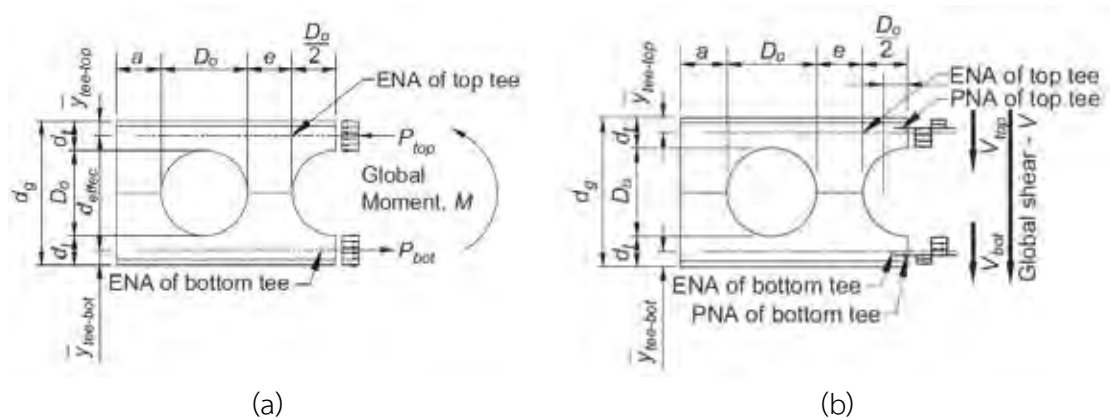
เมื่อ  $P_r$  = แรงอัดตามแนวแกนที่กระทำบริเวณส่วนบนและส่วนล่างหน้าตัดตัวที่  
 $M_r$  = โมเมนต์ดัดโดยรวมที่กระทำตรงตำแหน่งช่องเปิด  
 $d_{effec}$  = ระยะระหว่างจุดศูนย์ถ่วงของด้านบนและด้านล่างหน้าตัดตัวที่

2. การคำนวณแรงดัดวีรันดิลเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 3.24

$$M_{vr} = V_r \left( \frac{A_{tee}}{A_{net}} \right) \left( \frac{D_o}{4} \right) \quad (3.24)$$

เมื่อ  $M_{vr}$  = โมเมนต์ดัดวีรันดิลที่กระทำ  
 $A_{net}$  = พื้นที่รวมของหน้าตัดตัวที่  
 $A_{tee}$  = พื้นที่หน้าตัดตัวที่  
 $D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิด  
 $V_r$  = แรงเฉือนที่กระทำ  
 $e$  = ระยะระหว่างขอบของช่องเปิดที่อยู่ติดกัน

ในกรณีของแรงดัดโดยรวมเป็นบวกบริเวณด้านบนของหน้าตัดตัวที่จะเป็นแรงอัดและด้านล่างจะเป็นแรงดึง



ภาพที่ 3.8 (a) สัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณแรงตามแนวแกนตามสมการที่ 3.10

(b) สัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณแรงดัดวีรันดิลตามสมการที่ 3.24 [13]

### 3.3.1.2 การคำนวณกำลังรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดของหน้าตัดตัวที่

1. ในการคำนวณกำลังรับแรงตามแนวแกนของหน้าตัดตัวที่สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3.25)$$



เมื่อ  $A_g = A_{tee}$  และหน่วยแรงอัดวิกฤต  $F_{cr}$  สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ก. เมื่อ } \frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ หรือ } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$$

$$F_{cr} = (0.658)^{F_y/F_e} F_y \quad (3.26)$$

$$\text{ข. เมื่อ } \frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ หรือ } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (3.27)$$

- เมื่อ  $r$  = ค่าน้อยที่สุดของ  $r_x$  และ  $r_y$  ของหน้าตัดตัวที่
- $K_x = 0.65$  (กำหนดให้ปลายทั้งสองข้างของหน้าตัดตัวที่ยึดแน่น)
- $K_y = 1.0$
- $L$  = ระยะที่ปราศจากค้ำยันด้านข้าง  
=  $D_o/2$  สำหรับคานเซลล์ูลาร์
- $L_c = KL$
- $L_c = K_x L$
- $L_c = K_y L$

หน่วยแรงอัดการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติกสามารถหาได้จาก

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \quad (3.28)$$

2. การคำนวณกำลังรับแรงดัดของส่วนบนและล่างหน้าตัดตัวที่จะเป็นค่าน้อยที่สุดของกำลังรับแรงดัดจนถึงจุดครากและการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

ก. กำลังรับแรงดัดระบุ  $M_n$  สำหรับหน้าตัดที่รับแรงดัดจนเกิดการครากหาได้จาก

$$M_n = M_p \quad (3.29)$$

$$M_p = M_y \quad (3.30)$$

เมื่อ  $M_y = F_y S_{x-tee}$

= โมเมนต์คราก

$S_{x-tee}$  = โมดูลัสอีลาสติก (elastic section modulus) ของหน้าตัดตัวที่

ข. การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

เมื่อ  $L_b \leq L_p$  ไม่เกิดการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

เมื่อ  $L_p < L_b \leq L_r$

$$M_n = M_p - (M_p - M_y) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \quad (3.31)$$

เมื่อ  $L_b > L_r$

$$M_n = M_{cr} \quad (3.32)$$

เมื่อ  $L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.33)$

$$L_r = 1.95 \left( \frac{E}{F_y} \right) \frac{\sqrt{I_y J}}{S_x} \sqrt{2.36 \left( \frac{F_y}{E} \right) \frac{d S_x}{J} + 1} \quad (3.34)$$

$$M_{cr} = \frac{1.95E}{L_b} \sqrt{I_y J} (B + \sqrt{1 + B^2}) \quad (3.35)$$

$$B = 2.3 \left( \frac{d}{L_b} \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}} \quad (3.36)$$

$d$  = ความลึกของหน้าตัดตัวที่รับแรงดึง

สำหรับส่วนที่รับแรงอัดของหน้าตัดตัวที่หรือค่า  $B$  จากสมการที่ 3.36 สามารถคำนวณได้

จาก



9336278

$$B = -2.3 \left( \frac{d}{L_b} \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}} \quad (3.37)$$

### 3.3.1.3 การตรวจสอบด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่เมื่อรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนร่วมกัน

สมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดตัวที่สามารถคำนวณตามข้อกำหนด AISC ได้ดังนี้

สำหรับกรณีแรงอัดร่วมกับแรงดัด

ก. กรณี  $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.38)$$

ข. กรณี  $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.39)$$

เมื่อ	$P_c$	= กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกน
	$P_r$	= แรงอัดตามแนวแกนที่ปรับค่าตามต้องการ
	$M_c$	= กำลังต้านทานแรงดัด
	$M_r$	= แรงดัดกระทำที่ปรับค่าตามต้องการ
	$x$	= ดรรชนีกำกับซึ่งหมายถึงการดัดรอบแกนหลัก
	$y$	= ดรรชนีกำกับซึ่งหมายถึงการดัดรอบแกนรอง

### 3.4 การวิเคราะห์การโก่งเดาะของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด (web-post buckling) ตาม AISC Design Guide 31

การโก่งเดาะบริเวณระหว่างช่องเปิดเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนแนวราบที่กระทำผ่านระหว่างช่องเปิด ซึ่งกำลังประลัยบริเวณระหว่างช่องเปิดควบคุมด้วยหนึ่งในสองรูปแบบดังนี้

1. การวิบัติเนื่องจากแรงดัดโดยเกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณระหว่างช่องเปิด
2. แผ่นตั้งระหว่างช่องเปิดเกิดการโก่งเดาะ

รูปแบบการวิบัติจะขึ้นอยู่กับลักษณะเรขาคณิตและความหนาบริเวณระหว่างช่องเปิด สามารถคำนวณแรงที่กระทำตรงตำแหน่งช่องเปิดและกำลังต้านทานได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณแรงเฉือนแนวราบที่กระทำกับแผ่นตั้งบริเวณระหว่างช่องเปิด

$$V_{rh} = \left| \frac{M_{r(i+1)} - M_{r(i)}}{d_{effec}} \right| = \left| T_{r(i)} - T_{r(i+1)} \right| \quad (3.40)$$

2. แรงดัดที่กระทำระหว่างช่องเปิดได้คำนวณดังสมการที่ 3.41

$$M_{rh} = 0.90 \frac{D_o}{2} V_{rh} \quad (3.41)$$

3. โมเมนต์ดัดแบบอิลาสติก  $M_e$  ที่ตำแหน่ง  $0.9R$  ซึ่งเป็นหน้าตัดวิกฤตระหว่างช่องเปิด

$$M_e = \frac{t_w (S - D_o + 0.564 D_o)^2}{6} F_y \quad (3.42)$$

4. คำนวณค่า  $C1, C2$  และ  $C3$

$$C1 = 5.097 + 0.1464 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) - 0.00174 \left( \frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (3.43)$$

$$C2 = 1.441 + 0.0625 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) - 0.000683 \left( \frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (3.44)$$

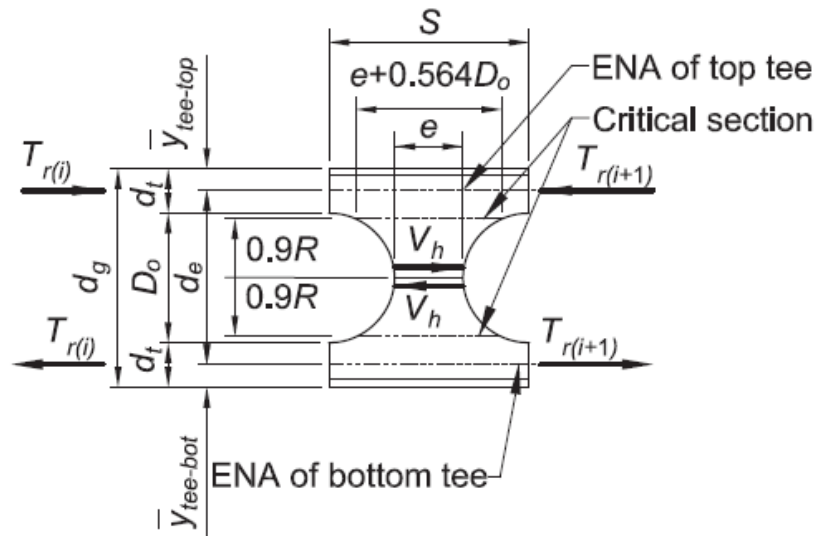
$$C3 = 3.645 + 0.0853 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) - 0.00108 \left( \frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (3.45)$$

5. คำนวณ  $M_{allow}/M_e$

$$\frac{M_{allow}}{M_e} = C1 \left( \frac{S}{D_o} \right) - C2 \left( \frac{S}{D_o} \right)^2 - C3 \quad (3.46)$$



9336278



ภาพที่ 3.9 สัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณการโก่งเดาะของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด [13]

### 3.5 การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบและแนวตั้งตาม AISC Design Guide 31

ในองค์อาคารเซลล์ลาร์รับแรงดัด แรงเฉือนแนวราบและแนวตั้งจะถูกรับโดยแผ่นตั้ง ในกรณีของคานที่มีช่องเปิดแรงเฉือนจะค่อนข้างวิกฤตเนื่องมาจากแรงเฉือนแนวตั้งจะถูกรับโดยพื้นที่สุทธิของหน้าตัดและแรงเฉือนแนวราบที่กระทำผ่านกึ่งกลางตามความยาวคานจะส่งผลกระทบต่อแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด

แรงเฉือนในแนวตั้งจะตรวจสอบโดยคำนวณแรงเฉือนโดยรวม (global shear force) ที่กระทำแต่ละช่องเปิดและถูกรับโดยพื้นที่สุทธิของช่องเปิดนั้น หรือคำนวณแรงเฉือนโดยรวมที่กระทำตรงตำแหน่งแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิดและถูกรับโดยพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด

แรงเฉือนแนวราบ  $V_{rh}$  ที่คำนวณมาจากการโก่งเดาะของแผ่นตั้งในหัวข้อ 3.3 สามารถนำมาใช้ตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบได้

#### 3.4.1 การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบ

กำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิดจะคำนวณตาม AISC Specification หัวข้อที่ J4.2 ซึ่งหาได้ดังนี้

$$V_n = 0.6F_y A_w \quad (3.47)$$

$$\text{เมื่อ } A_w = et_w$$

$t_w$  = ความหนาของแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด

### 3.4.2 การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนแนวตั้ง

กำลังต้านทานแรงเฉือนแนวตั้งจะคำนวณตรงตำแหน่งหน้าตัดตัวที่โดยใช้พื้นที่สุทธิและคำนวณตรงตำแหน่งระหว่างแผ่นตั้งโดยใช้หน้าตัดเต็มโดยคำนวณตาม AISC Specification หัวข้อ G2 แรงเฉือนที่กระทำตรงพื้นที่สุทธิควรจะแบ่งตามอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่ ส่วนแรงเฉือนที่กระทำตรงหน้าตัดเต็ม อัตราส่วน  $h/t_w$  ควรคำนวณโดยระยะระหว่างปีกคานหักออกด้วยความหนารอยเชื่อม และ  $d_t$  จะใช้สำหรับหน้าตัดสุทธิ  $k_v$  จะใช้ค่าเป็น 5.34 สำหรับหน้าตัดเต็มและ 1.2 สำหรับพื้นที่สุทธิของส่วนบนและล่างหน้าตัดตัวที่

#### 1. ที่หน้าตัดเต็ม

$$\frac{h}{t_w} = \frac{d_g - k_{top} - k_{bot}}{t_w}$$

คำนวณค่า  $C_{v1}$  :

$$\text{เมื่อ } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_{v1} = 1.0 \quad (3.48)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{h}{t_w} > 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_{v1} = \frac{1.10 \sqrt{k_v E / F_y}}{h/t_w} \quad (3.49)$$

## 2. ที่หน้าตัดสุทธิ

$$\frac{h}{t_w} = \frac{d_t}{t_w}$$

คำนวณค่า  $C_{v2}$ 

$$\text{เมื่อ } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_{v2} = 1.0 \quad (3.50)$$

$$\text{เมื่อ } 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_{v2} = \frac{1.10 \sqrt{k_v E / F_y}}{h / t_w} \quad (3.51)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_{v2} = \frac{1.51 k_v E}{(h / t_w)^2 F_y} \quad (3.52)$$

3. กำลังต้านทานแรงเฉือนของคานเซลล์ูลาร์  $V_n$  คือ

$$\text{สำหรับหน้าตัดสุทธิ : } V_{n-net} = 0.6 F_y (2d_{t-net} t_w) C_{v2} \quad (3.53)$$

$$\text{สำหรับหน้าตัดเต็ม : } V_{n-gross} = 0.6 F_y (d_g t_w) C_{v1} \quad (3.54)$$

### 3.6 การวิเคราะห์กำลังต้านทานโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดตาม AISC Design Guide 31

การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดของคาน castellated และเซลล์ูลาร์ ควรตรวจสอบตาม AISC Specification ในบท F หัวข้อที่ F2 ถึง F5 เหมือนหน้าตัดเต็มปีกกว้าง (wide-flange) ทั่วไป โดยสามารถใช้หน้าตัดสุทธิในการตรวจสอบกำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดได้



9336278

CU Thesais 6070137521 thesis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43



## บทที่ 4

### การดำเนินงานวิจัย

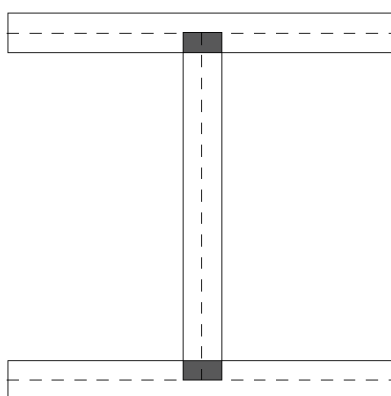
#### 4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเซลลูลาร์ด้วยโปรแกรม ABAQUS

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของเสาเหล็กเซลลูลาร์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ซึ่งศึกษาในกรณีเกิดการโก่งเดาะรอบแกนหลักเท่านั้น และมีการเปลี่ยนตัวแปรทางเรขาคณิตของช่องเปิดและอัตราส่วนความชะลูด ได้แก่ ระยะห่างระหว่างช่องเปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางช่องเปิด และความยาว เพื่อศึกษาผลการวิเคราะห์ในกรณีที่เสาเซลลูลาร์มีรูปร่างแตกต่างกัน โดยแบบจำลองคำนึงถึงความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตและหน่วยแรงคงค้ำด้วย

การรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ของแบบจำลองเสาเซลลูลาร์ ประกอบด้วยแรงอัดกระทำตรงศูนย์หนึ่งตำแหน่ง เยื้องศูนย์สี่ตำแหน่งบนหน้าตัด และรับเฉพาะแรงดัด (pure bending) เพื่อสามารถสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังได้ โดยจะอธิบายในหัวข้อ 4.1.4 ต่อไป

นอกจากนี้ ยังเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ระหว่างหน้าตัดเซลลูลาร์และหน้าตัดดั้งเดิม เพื่อศึกษาผลกระทบของช่องเปิดที่มีต่อการรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.2 ต่อไป

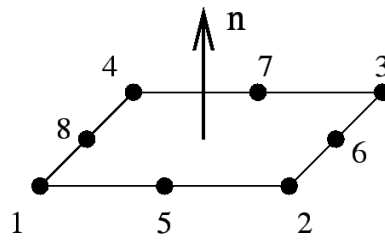
##### 4.1.1 ประเภทเอลิเมนต์และการแบ่งโครงข่าย (mesh)



ภาพที่ 4.1 แบบจำลองหน้าตัดที่ใช้เอลิเมนต์แบบเปลือกบางซึ่งแสดงโดยเส้นประ ส่วนเอลิเมนต์ที่มีการซ้อนทับแสดงด้วยแรงเงา

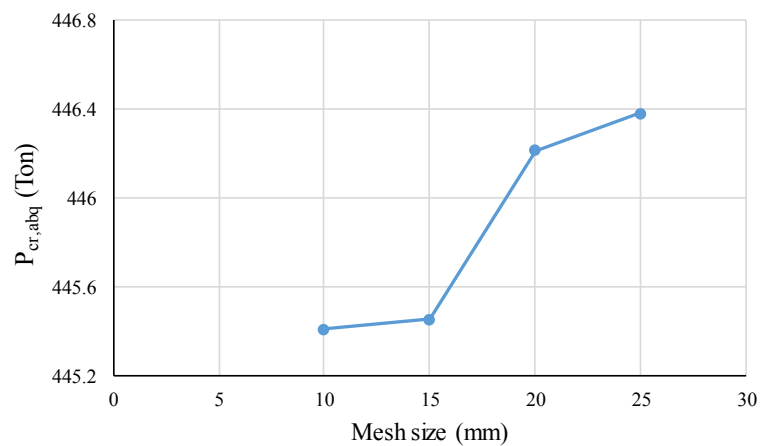
แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์จะสร้างขึ้นจากเอลิเมนต์แบบเปลือกบาง (shell element)

ซึ่งการใช้แบบจำลองประเภทนี้ จะมีการซ้อนทับกันของเอลิเมนต์ตรงตำแหน่งจุดตัดระหว่างปีกกับแผ่นดัดดังแสดงในภาพที่ 4.1 ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์จะไม่มี การพิจารณารอยพอก (fillet) ระหว่างปีกและแผ่นดัดของหน้าตัดองค์อาคารเซลล์ลูลาร์ เนื่องจากได้พิจารณาเป็นพื้นที่ส่วนซ้อนทับเรียบร้อยแล้ว



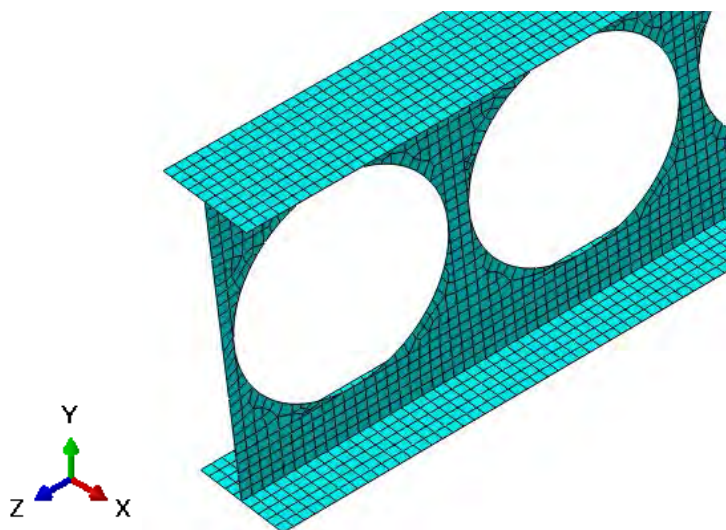
ภาพที่ 4.2 เอลิเมนต์แบบ S8R

ภาพที่ 4.2 แสดงประเภทเอลิเมนต์แบบเปลือกบาง S8R (quadratic shell element) ที่เลือกใช้แบบจำลอง ซึ่งมีทั้งหมด 8 จุดต่อ (node) ต่อเอลิเมนต์ โดยแต่ละจุดต่อจะมีลำดับชั้นความเสรี (Degree of freedom) 6 ลำดับชั้น ได้แก่ การเคลื่อนตัวและการหมุนตัวในทิศ  $x$   $y$  และ  $z$



ภาพที่ 4.3 การลู่เข้าของผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติก

ภาพที่ 4.3 แสดงการลู่เข้าของผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติก โดยทดลองปรับเปลี่ยนขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 25 mm 20 mm 15 mm และ 10 mm เพื่อศึกษาขนาดเอลิเมนต์ที่เพียงพอต่อความแม่นยำและระยะเวลาที่ใช้วิเคราะห์ของแบบจำลอง พบว่าขนาดเอลิเมนต์เพียง 15 mm เพียงพอต่อความแม่นยำของคำตอบและระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

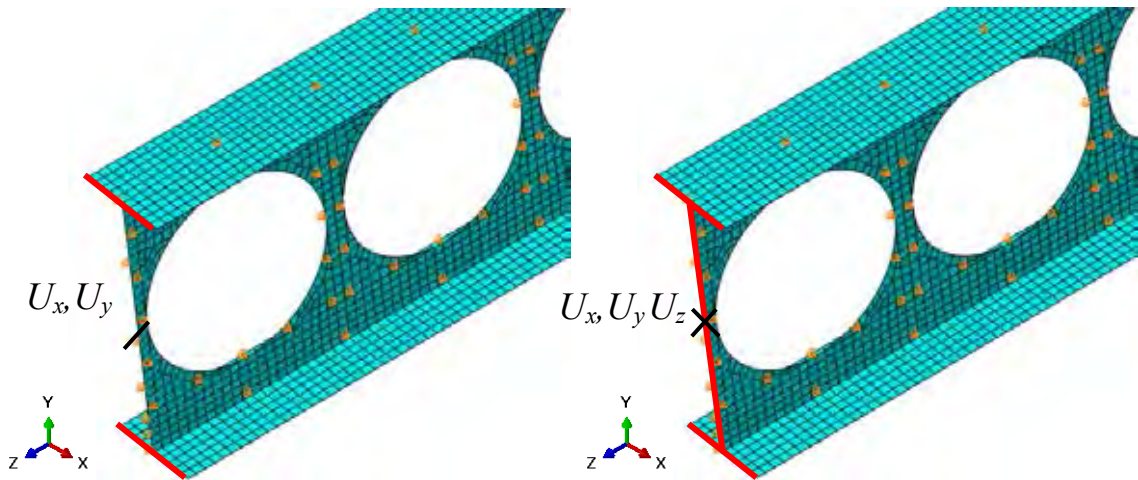


ภาพที่ 4.4 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองเสาเซลลูลาร์

#### 4.1.2 เงื่อนไขขอบเขตการรองรับ (boundary conditions)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเซลลูลาร์ จะมีการกำหนดจุดอ้างอิง (reference point) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดบริเวณปลายด้านบนและฐานของเสาเซลลูลาร์เพื่อเชื่อมจุดต่อบนหน้าตัดมายังจุดอ้างอิง จากนั้นจึงย้ายจุดอ้างอิงไปยังตำแหน่งระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการรองรับที่จุดอ้างอิงให้มีการรองรับแบบอย่างง่าย (simple support) ซึ่งตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ปลายเสาจะมีการยึดรั้งไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง  $U_1$  และ  $U_2$  หรือในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  ตามลำดับ และมีการหมุนตัวได้ ส่วนจุดอ้างอิงบริเวณฐานเสาจะมีการยึดรั้งไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง  $U_1$   $U_2$  และ  $U_3$  หรือในทิศทาง  $x$  ทิศทาง  $y$  และทิศทาง  $z$  ตามลำดับ และมีความสามารถในการหมุนตัวได้

ตรงบริเวณแผ่นตั้งตลอดความยาวของเสาเซลลูลาร์ จะมีการยึดรั้งไม่ให้มีการเคลื่อนตัวในทิศทาง  $U_1$  หรือทิศทาง  $x$  เพื่อให้เสาเซลลูลาร์เกิดการโก่งเดาะรอบแกนหลักอย่างเดียว เงื่อนไขขอบเขตการรองรับและการยึดรั้งบริเวณแผ่นตั้งแสดงดังภาพที่ 4.5



(ก.) ปลายด้านบนเสาค

(ข.) ปลายด้านล่างเสาค

ภาพที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตการรองรับและการยึดรั้งบริเวณแผ่นดั่ง

#### 4.1.3 รายละเอียดและคุณสมบัติแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยขนาดหน้าตัดเหล็ก รูปพรรณดั่งต้น อัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด อัตราส่วนขนาดช่องเปิด และอัตราส่วนความชะลูดอ้างอิงตามมาตรฐาน Eurocode 3

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดเสาคเซลลูลาร์ที่ใช้ศึกษา

หน้าตัด ดั่งต้น	ขนาดเหล็กรูปพรรณดั่งต้น				$d_o/d$	$s/d_o$	$\lambda$
	$b_f$ (mm)	$d$ (mm)	$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)			
W300x150	300	150	9	14	0.8	1.1	0.5
					1.0	1.3	1.0
					1.2	1.5	1.5
							2.0

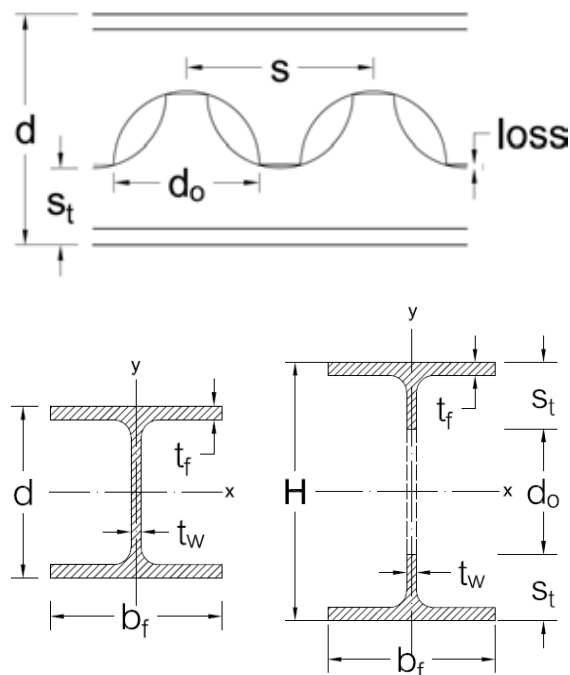
เสาคเหล็กเซลลูลาร์เกิดจากการนำเหล็กรูปพรรณดั่งต้น H หรือ I มาตัดแบ่งตามความยาวแนวกึ่งกลางเป็นครึ่งวงกลม เมื่อเชื่อมประกอบระหว่างท่อนล่างและท่อนบนเข้าด้วยกันจะมีช่องเปิดเป็นวงกลมระยะห่างสม่ำเสมอและมีหน้าตัดที่เปลี่ยนไปจากเหล็กรูปพรรณดั่งต้น โดยตัวแปรของหน้าตัดเสาคเซลลูลาร์สามารถคำนวณได้ดั่งสมการที่ 4.1-4.3 และตัวแปรต่าง ๆ แสดงดั่งภาพที่ 4.6

$$H = d + \frac{d_o}{2} - loss \quad (4.1)$$

$$loss = \frac{d_o}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{s-d_o}{2}\right)^2} \quad (4.2)$$

$$s_t = \frac{H-d_o}{2} \quad (4.3)$$

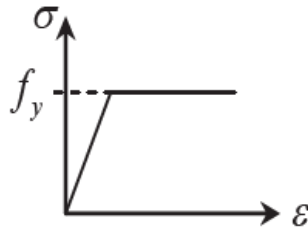
เมื่อ  $d$  คือความลึกของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต้นแบบ  $b_f$  คือ ความกว้างของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ  $t_w$  คือความหนาของแผ่นเอวหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ  $t_f$  คือ ความหนาของแผ่นปีกเหล็กรูปพรรณ สำหรับตัวแปรของเสาเซลลูลาร์ ได้แก่ ความลึกของหน้าตัดเซลลูลาร์ ( $H$ ) ความลึกของหน้าตัดรูปตัวที่ตามแนวกึ่งกลางช่องเปิด ( $s_t$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิด ( $d_o$ ) ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางช่องเปิด ( $s$ ) และส่วนที่หายไปของแผ่นตั้งเนื่องจากการตัดเป็นเซลลูลาร์ ( $loss$ )



ภาพที่ 4.6 ตัวแปรขนาดของเสาเซลลูลาร์

คุณสมบัติเหล็กของแบบจำลองจะกำหนดให้มีหน่วยแรงครากเท่ากับ 2450 ksc มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $2 \times 10^6$  ksc และมีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3 โดยกำหนดให้คุณสมบัติวัสดุมีความเป็นพลาสติกโดยสมบูรณ์ (perfectly plastic) ไม่พิจารณาความแข็งเพิ่มเนื่องจากความเครียด

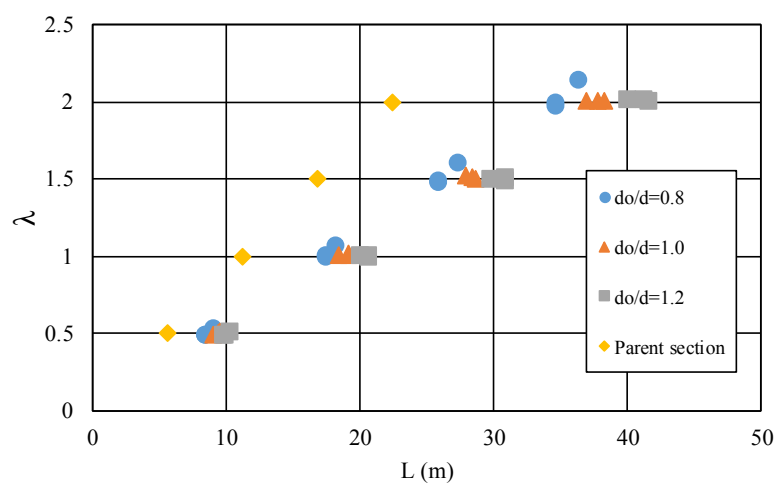
(strain hardening) หลังจากจุดครากไปแล้วดังภาพที่ 4.7 เพื่อเป็นการพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเชิงปลอดภัย



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กที่ใช้ในแบบจำลอง [1]

การคำนวณอัตราส่วนความขรุขระของเสาเซลลูลาร์ตามตารางที่ 4.1 ประกอบไปด้วยสมการทำนายกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกรอบแกนหลักซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Cheng และคณะ [4] และสมการอัตราส่วนความขรุขระซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน Eurocode 3 รายละเอียดการคำนวณจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2 ต่อไป

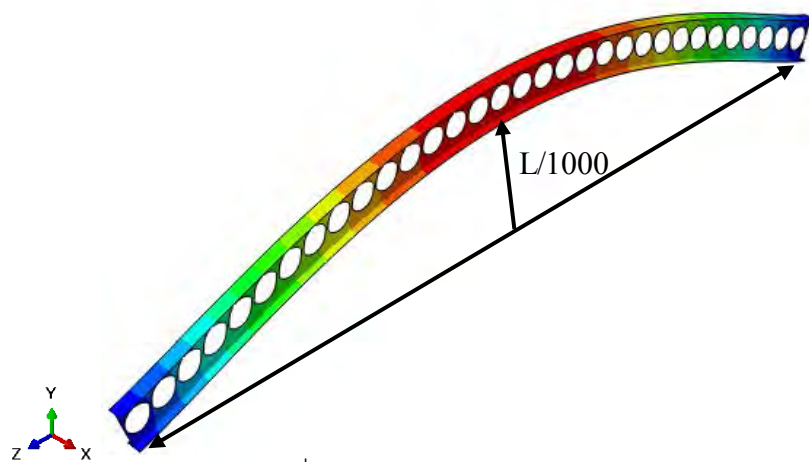
การเปรียบเทียบระหว่างความยาวของเสาเซลลูลาร์และอัตราส่วนความขรุขระแสดงดังภาพที่ 4.8 โดยพบว่าความยาวที่สั้นที่สุดสำหรับอัตราส่วนความขรุขระเท่ากับ 0.5 มีค่าอยู่ที่ประมาณ 8.4 m และความยาวที่มากที่สุดสำหรับอัตราส่วนความขรุขระ 2.0 มีค่าอยู่ที่ประมาณ 40 m นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความยาวระหว่างหน้าตัดตั้งต้นและหน้าตัดเซลลูลาร์ พบว่าที่อัตราส่วนความขรุขระค่าเดียวกันหน้าตัดเซลลูลาร์จะมีความยาวมากกว่าหน้าตัดต้นแบบประมาณ 2.8 m ถึง 20 m ตามอัตราส่วนความขรุขระที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความขรุขระและความยาวของเสาเซลลูลาร์

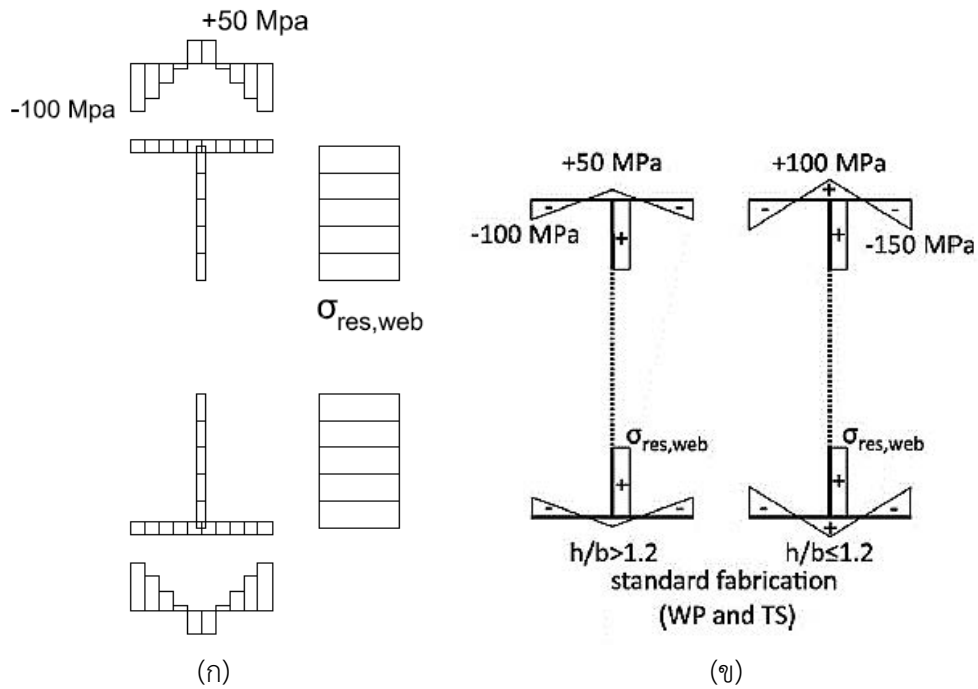
#### 4.1.4 การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางขององค์อาคารเซลล์ลูลาร์

การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลางขององค์อาคารเซลล์ลูลาร์ ประกอบด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบเชิงเส้น (linear buckling analysis) ด้วยการวิเคราะห์ Eigenvalue เพื่อนำรูปร่างการโก่งเดาะในโหมดที่ 1 มาเป็นความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตของแบบจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าตัวคูณขยาย  $L/1000$  ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ด้วยคำสั่ง \*IMPERFECTION ใน ABAQUS



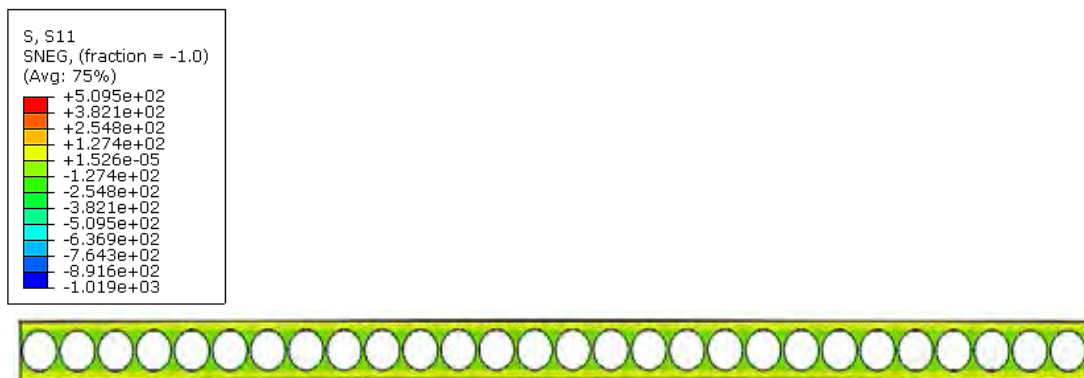
ภาพที่ 4.9 ความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิต

ขั้นตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (non-linear analysis) ด้วยวิธี Static, Riks โดยให้เสาเซลล์ลูลาร์รับน้ำหนักบรรทุกจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งในแบบจำลองได้อ้างอิงหน่วยแรงค้ำจาก Delphine และคณะ [5] โดยกำหนดหน่วยแรงค้ำลงในแบบจำลองด้วยคำสั่ง \*INITIAL CONDITION, TYPE=STRESS ซึ่งเป็นการแบ่งหน่วยแรงค้ำลงในแต่ละเอลิเมนต์บนหน้าตัดดังแสดงในภาพที่ 4.10 เมื่อ WP และ TP ย่อมาจากบริเวณระหว่างช่องเปิดและหน้าตัดตัวที่ตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 หน่วยแรงค้ำที่ใช้ในแบบจำลอง (ก) การแบ่งหน่วยแรงค้ำในแบบจำลอง (ข) หน่วยแรงค้ำที่เสนอโดย [5]

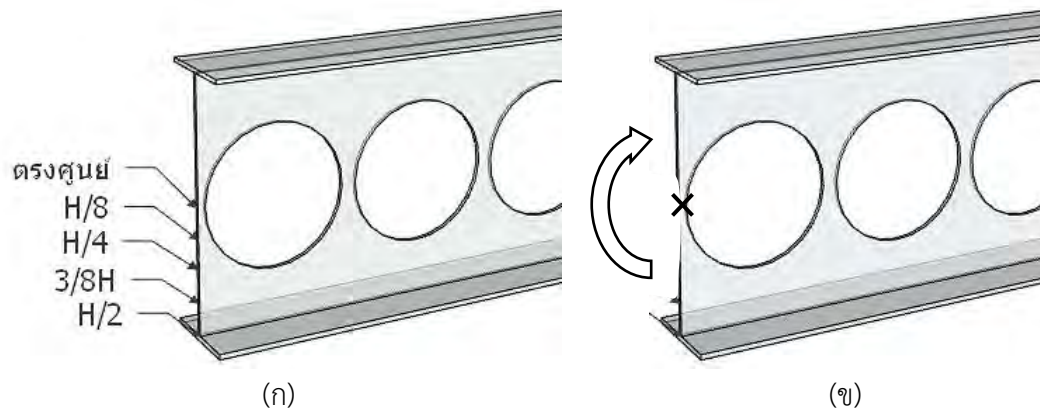
หน่วยแรงค้ำที่อ้างอิงจาก Delphine และคณะ [6] จะกำหนดค่าหน่วยแรงค้ำบนปีกมาเรียบร้อยแล้ว แต่หน่วยแรงค้ำตั้ง  $\sigma_{res,web}$  ที่ตำแหน่งเหนือและล่างช่องเปิดจะคำนวณจากสมดุลของแรงลัพธ์ค้ำบนหน้าตัดซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามขนาดช่องเปิด นอกจากนี้ หน่วยแรงค้ำที่อ้างอิงจาก Delphine และคณะ [6] ยังกำหนดให้หน่วยแรงค้ำเท่ากันทั้งบริเวณระหว่างช่องเปิดและหน้าตัดตัวที่ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 หน่วยแรงค้ำบริเวณแผ่นเอวตลอดความยาวของแบบจำลอง

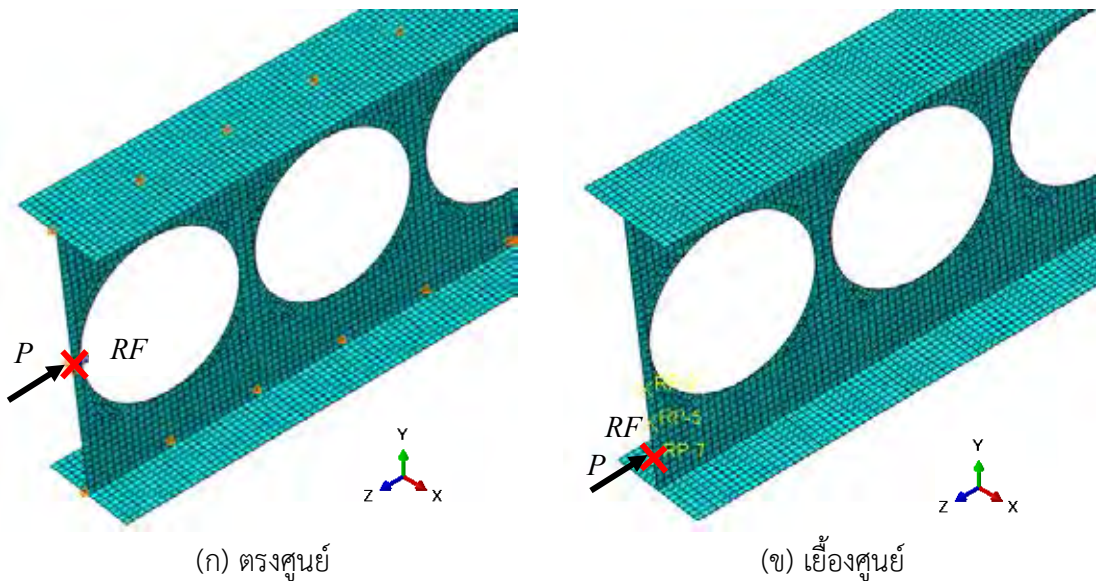


การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางขององค์อาคารเซลลูลาร์ จะกำหนดตำแหน่งแรงอัดให้กระทำตรงศูนย์กลางหนึ่งตำแหน่งและเยื้องศูนย์กลางี่ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 4.12 โดยแบ่งเป็นระยะ  $H/8$ ,  $H/4$ ,  $3/8H$  และ  $H/2$  เมื่อวัดจากแนวกึ่งกลางของหน้าตัดเสาเซลลูลาร์ และกำหนดให้แรงตัดเท่านั้นกระทำตรงตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดเท่ากันทั้งปลายเสาทั้งสองข้างของเสา



ภาพที่ 4.12 (ก) ตำแหน่งแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง (ข) ตำแหน่งแรงตัดเท่านั้น

ค่าแรงอัดตามแนวแกนที่กำหนดให้กระทำกับแบบจำลอง จะใช้ค่าขั้นต่ำจากการวิเคราะห์ Eigenvalue เพื่อเป็นการยืนยันว่าเสาเซลลูลาร์จะมีการโก่งเดาะเกิดขึ้น โดยกำหนดให้กระทำที่จุดอ้างอิงดังภาพที่ 4.13 เมื่อจุดอ้างอิงอยู่กึ่งกลางหน้าตัดและย้ายตามระยะเยื้องศูนย์กลาง

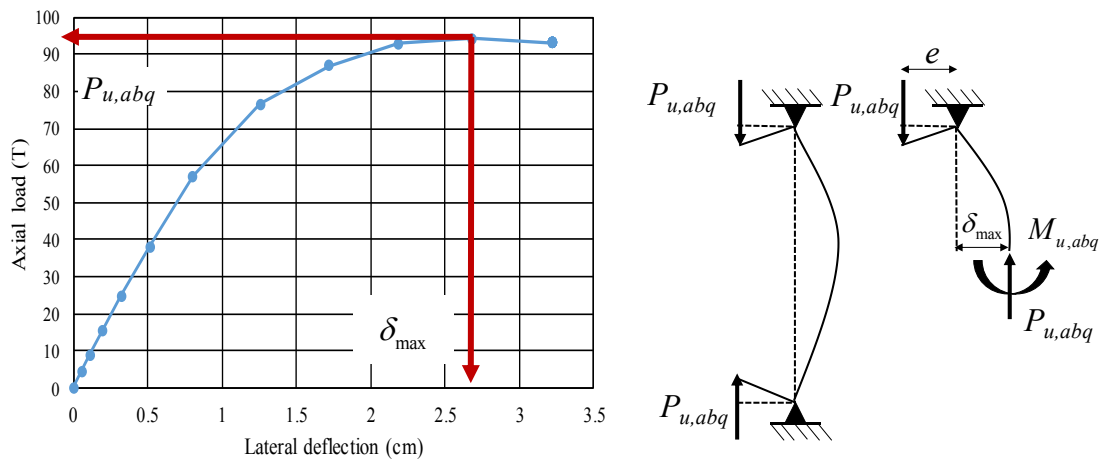


(ก) ตรงศูนย์กลาง

(ข) เยื้องศูนย์กลาง

ภาพที่ 4.13 ตำแหน่งแรงอัดตามแนวแกน

หลังจากเสร็จสิ้นการวิเคราะห์แบบจำลอง ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงอยู่ในรูปแบบเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัว (load-displacement curve) ดังภาพที่ 4.14 โดยหาค่ากำลังต้านทานการโก่งเดาะได้จากจุดที่แรงอัดตามแนวแกนสูงสุด และค่าการโก่งตัวเมื่อแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดเพื่อนำไปรวมกับระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัด



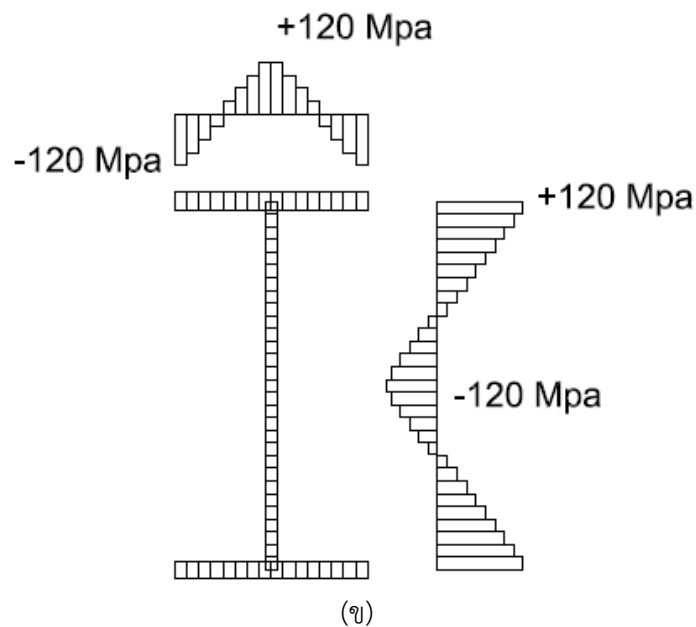
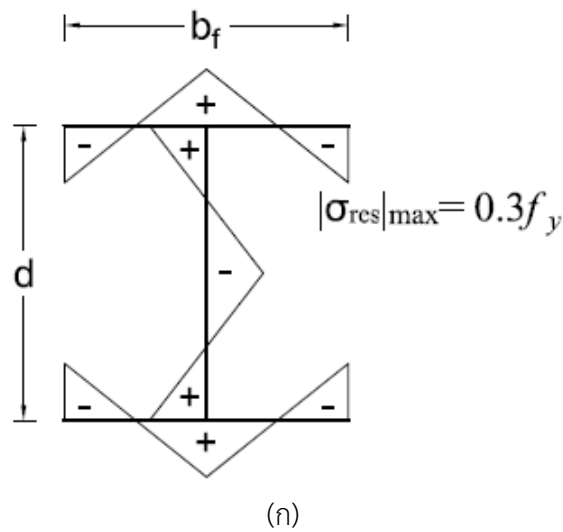
ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัว

กรณีโมเมนต์เนื่องจากแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของโมเมนต์อันดับสอง (second-order effect) ด้วย ดังนั้นค่าโมเมนต์จะมาจากผลคูณของแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดและผลรวมระหว่างระยะเยื้องศูนย์กลางกับการโก่งตัวตำแหน่งตรงกลางเสาเซลลูลาร์ดังสมการที่ 4.4 เมื่อ  $M_{u,abq}$  คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด  $P_{u,abq}$  คือแรงอัดตามแนวแกนสูงสุด  $e$  คือระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัดตามแนวแกน และ  $\delta_{max}$  คือระยะโก่งตัวตำแหน่งกึ่งกลางเสาเซลลูลาร์

$$M_{u,abq} = P_{u,abq} (e + \delta_{max}) \quad (4.4)$$

#### 4.2 การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดตั้งต้น

คุณสมบัติหน้าตัดตั้งต้นแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยแบบจำลองจะกำหนดประเภทและขนาดเอलिเมนต์ เงื่อนไขขอบเขตการรองรับ คุณสมบัติวัสดุ อัตราส่วนความชะลูด ขั้นตอนการวิเคราะห์และระยะเยื้องศูนย์กลางเช่นเดียวกับแบบจำลองเสาเซลลูลาร์ เพียงแต่หน่วยแรงคงค้างสำหรับหน้าตัดตั้งต้นจะอ้างอิงดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 (ก) หน่วยแรงค้ำที่ใช้อ้างอิงสำหรับหน้าตัดตั้งต้น

(ข) การแบ่งหน่วยแรงค้ำในแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของหน้าตัดตั้งต้น จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากหน้าตัดเซลล์ลาร์เพื่อศึกษาผลกระทบของช่องเปิด และนำไปเปรียบเทียบกับสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด AISC-2016 ซึ่งแรงอัด ( $P_{u,abq}$ ) และแรงดัด ( $M_{u,abq}$ ) ที่จุดวิบัติจะเป็นค่าจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกำลังต้านทานแรงอัด ( $P_n$ ) ของแบบจำลองจะคำนวณตามข้อกำหนด AISC-2016 เมื่อหน่วยแรงอัดวิกฤต ( $F_{cr}$ ) คำนวณด้วยสมการที่ 3.17 หรือ 3.19 ตามลำดับ

$$\text{เมื่อ } \frac{KL}{r} \leq 4.71\sqrt{E/F_y} \text{ หรือ } F_y/F_e \leq 2.25$$

$$F_{cr} = (0.658)^{F_y/F_e} F_y \quad (3.19)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{KL}{r} > 4.71\sqrt{E/F_y} \text{ หรือ } F_y/F_e > 2.25$$

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (3.17)$$

หน่วยแรงอัดอีลาสติก  $F_e$  สำหรับสมการที่ 3.17 และ 3.19 จะคำนวณจากสมการที่ 3.11 เนื่องจากแบบจำลองเสามีการยึดรั้งทางด้านข้างอย่างเพียงพอ ทำให้ไม่พิจารณาหน่วยแรงอัดจากการโก่งเดาะเนื่องจากการบิด

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.11)$$

กำลังต้านทานแรงอัด  $P_n$  ของแบบจำลองจะคำนวณได้ดังนี้

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3.22)$$

เมื่อ  $F_{cr}$  = หน่วยแรงอัดวิกฤต                      กก./ตร.ซม.  
 $A_g$  = พื้นที่หน้าตัดรวม                              ตร.ซม.

สำหรับกำลังต้านทานแรงดัด ( $M_n$ ) เมื่อหน้าตัดรับแรงดัดจนครากทั้งหมดและไม่พิจารณาการวิบัติจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเพราะมีการค้ำยันด้านข้างที่เพียงพอ กำลังต้านทานแรงดัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.5

$$M_n = F_y Z_x \quad (4.5)$$

เมื่อ  $Z_x$  = พลาสต์ิกโมดูลัส (plastic modulus) รอบแกนหลักของหน้าตัด

สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ใช้วิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของหน้าตัดตั้งต้น แสดงดังสมการที่ 4.6 และ 4.7

$$\text{กรณี } \frac{P_{u,abq}}{P_n} \geq 0.2$$

$$\frac{P_{u,abq}}{P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{u,abq}}{M_n} \right) \leq 1.0 \quad (4.6)$$

$$\text{กรณี } \frac{P_{u,abq}}{P_n} < 0.2$$

$$\frac{P_{u,abq}}{2P_n} + \left( \frac{M_{u,abq}}{M_n} \right) \leq 1.0 \quad (4.7)$$

สำหรับอัตราส่วนความชะลูดของหน้าตัดตั้งต้นตามตารางที่ 4.1 จะอ้างอิงตามมาตรฐาน Eurocode 3 เป็นหลักสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 เมื่อนำมาคำนวณกำลังต้านทานการโก่งเดาะตามข้อกำหนด AISC-2016 อัตราส่วนความชะลูดจะแสดงอยู่ในรูป  $Kl/r$  ซึ่งสามารถเปรียบเทียบระหว่าง Eurocode 3 และ AISC-2016 ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนความชะลูดระหว่าง  $\lambda$  และ  $Kl/r$  สำหรับแบบจำลองตั้งต้นที่ใช้วิเคราะห์

$\lambda$	$Kl/r$
0.5	45.3
1	90.7
1.5	136.0
2	181.4

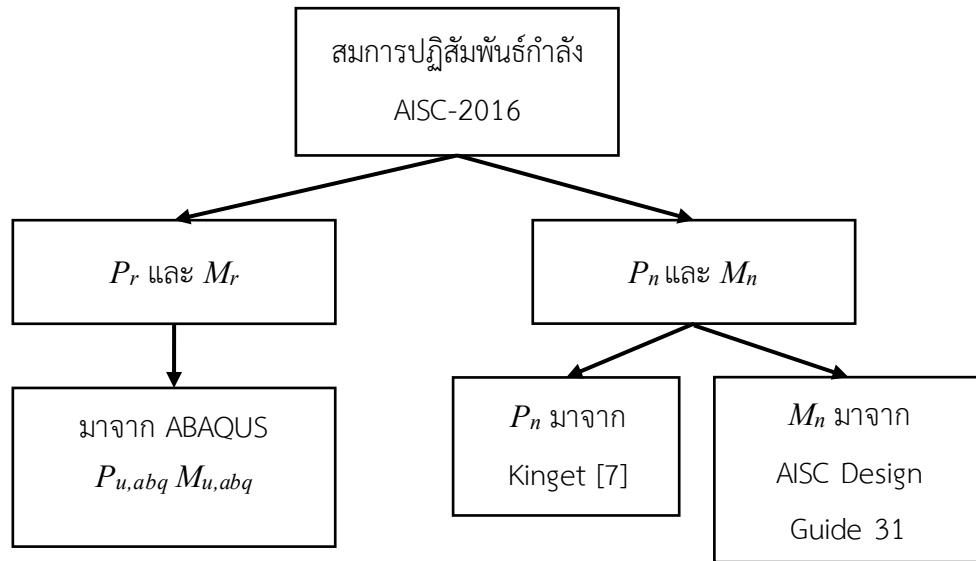
### 4.3 แนวทางการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางขององค์อาคารเซลลูลาร์

#### 4.3.1 สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง

ส่วนหนึ่งของวัตถุประสงค์สำหรับงานวิจัยนี้คือเสนอแนวทางวิธีการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางของเสาเซลลูลาร์ โดยงานวิจัยนี้จะอ้างอิงสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด AISC-2016 โดยกำลังต้านทานแรงอัด ( $P_n$ ) และแรงดัด ( $M_n$ ) ของแบบจำลองจะมาจากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.3.2 และ 4.3.3 ตามลำดับ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป ขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ด้วยแผนภูมิต่างภาพที่ 4.16



9336278



ภาพที่ 4.16 แผนภูมิขั้นตอนการคำนวณสมการปฏิสัมพันธ์ของเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์

สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC-2016 ที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเซลล์ลูลาร์มีดังนี้

$$\text{กรณี } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \right) \leq 1.0 \quad (4.8)$$

$$\text{กรณี } \frac{P_r}{P_c} < 0.2$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \right) \leq 1.0 \quad (4.9)$$

- เมื่อ
- $P_r$  = แรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ
  - $P_c$  = กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้  
=  $\phi_c P_n$  โดย  $\phi_c$  คือตัวคูณต้านทานสำหรับองค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน
  - $M_r$  = กำลังแรงดัดที่ต้องการ
  - $M_c$  = กำลังต้านทานแรงดัดที่สามารถรับได้  
=  $\phi_b M_n$  โดย  $\phi_b$  คือตัวคูณต้านทานสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด

$x$  = ตรีชนิกำกับซึ่งหมายถึงการดัดรอบแกนหลัก

แรงอัดตามแนวแกน ( $P_r$ ) และกำลังแรงดัดที่ต้องการ ( $M_r$ ) จะมาจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ค่าที่จุดวิบัติแทนด้วยแรงอัด ( $P_{u,abq}$ ) และแรงดัด ( $M_{u,abq}$ ) ตามลำดับ

กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกน ( $P_c$ ) และแรงดัด ( $M_c$ ) ตามข้อกำหนด AISC-2016 จะพิจารณาตัวคูณต้านทานสำหรับแรงอัดตามแนวแกนและแรงดัด ได้แก่  $\phi_c P_n$  และ  $\phi_b M_n$  ตามลำดับ แต่ในปัจจุบันเสาเซลลูลาร์ยังไม่มีมาตรฐานหรือข้อกำหนดในการออกแบบสำหรับแรงอัดตามแนวแกน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาตัวคูณลดกำลัง  $\phi_c$  อีกทั้งไม่พิจารณา  $\phi_b$  สำหรับองค์อาคารรับแรงดัดเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอ

#### 4.3.2 กำลังต้านทานการโก่งเดาะรอบแกนหลักของเสาเหล็กเซลลูลาร์

เสาเซลลูลาร์ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีการโก่งเดาะเฉพาะรอบแกนหลัก ดังนั้นกำลังต้านทานการโก่งเดาะของเสาเซลลูลาร์จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Kinget [7] ซึ่งกล่าวในหัวข้อ 2.4 สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกำลังต้านทานการโก่งเดาะมีดังนี้

$$P_n = \chi A_{2T} f_y \quad (4.10)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (2.10)$$

$$\phi = 0.5 [1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad (2.11)$$

กำลังต้านทานการโก่งเดาะวิกฤตสำหรับเสาเซลลูลาร์ จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Jian-zu Gu และ Shanshan Cheng [4] เนื่องจากการโก่งเดาะรอบแกนหลักต้องคำนึงถึงผลกระทบของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนเข้าไว้ด้วย ดังนั้นสมการกำลังต้านทานการโก่งเดาะวิกฤตคำนวณได้ดังนี้

$$P_{cr} = P_{cr1} \left( 1 - \frac{\pi^2 E e^2 A_{tee}^2}{n^2 k_{sh} s I_{red}} \right) \quad (2.4)$$

อัตราส่วนความชะลุดของแบบจำลองเสาเซลลูลาร์จะคำนวณดังสมการที่ 4.11 โดยกำลังการโก่งเดาะวิกฤตจะคำนวณด้วยสมการที่ 2.4



9336278

CU Thesisis 6070137521 thesisis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{2T} f_y}{P_{cr}}} \quad (4.11)$$

ผลการวิเคราะห์กำลังต้านทานการโก่งเดาะจาก Kinget และคณะ [7] แสดงดังภาพที่ 2.26a ภาพที่ 2.27a ได้ระบุว่าสำหรับหน้าตัดตั้งต้น IPE300 เหมาะสำหรับเส้นโค้งการโก่งเดาะ a และ b เมื่ออัตราส่วนความขรุขระมากกว่าเท่ากับ 1.0 และเท่ากับ 0.5 ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้หน้าตัด เหล็กรูปพรรณตั้งต้น W150x300 ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับ IPE300 ดังนั้นจะเลือกใช้เส้นโค้งการโก่งเดาะ a และ b สำหรับอัตราส่วนความขรุขระที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 และเท่ากับ 0.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ของเสา  $\alpha$  ตามมาตรฐาน Eurocode 3 ซึ่งใช้ในสมการที่ 2.11 โดยแต่ละค่า  $\alpha$  จะแทนเส้นโค้งการโก่งเดาะ

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ของเสา  $\alpha$  ตามมาตรฐาน Eurocode 3

เส้นโค้งการ โก่งเดาะ	$a_0$	a	b	c	d
ค่า $\alpha$	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

#### 4.3.3 กำลังต้านทานแรงดัดขององค์อาคารเซลล์ลาร์

สมการทำนายกำลังต้านทานแรงดัดขององค์อาคารเซลล์ลาร์ที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย จะคำนวณตามข้อกำหนด AISC Design Guide 31 ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 3.3 ประกอบไปด้วย 8 สิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาในการตรวจสอบกำลังรับแรงดัดขององค์อาคารเซลล์ลาร์ แต่เนื่องจากในแบบจำลองกำหนดให้รับแรงดัดล้วนเท่านั้นและไม่พิจารณาการโก่งเดาะเฉพาะที่ ประกอบกับมีการคำนวณด้านข้างอย่างเพียงพอ จึงทำให้พิจารณากำลังต้านทานแรงดัดในแบบจำลองเพียงรูปแบบเดียวได้แก่ กำลังรับแรงดัดของหน้าตัดตัวที่ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 3.3.1.2 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยสมการดังนี้

$$M_n = M_p \quad (3.29)$$

$$M_p = M_y \quad (3.30)$$

เมื่อ  $M_y = F_y S_{x-tee}$   
= โมเมนต์คราก

$S_{x-tee}$  = โมดูลัสอีลาสติก (elastic section modulus) ของหน้าตัดตัวที่



#### 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ จะตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกรอบแกนหลักที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS และสมการทำนายกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกรอบแกนหลักของเสาเซลลูลาร์ด้วยสมการที่ 2.4 ซึ่งอ้างอิงจาก Cheng และคณะ [4]

แบบจำลองที่ใช้เปรียบเทียบจะมาจากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นด้วยวิธี Eigenvalue เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติก โดยกำหนดให้แบบจำลองรับแรงกระทำตรงศูนย์กลางและโก่งเดาะรอบแกนหลัก รวมถึงไม่พิจารณาหน่วยแรงคงค้างและความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตของเสาแบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องประกอบด้วย 36 แบบจำลอง ขนาดหน้าตัดของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ผลการเปรียบเทียบจะแสดงอยู่ในรูปค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการทำนายกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกของเสาเซลลูลาร์ ดังสมการที่ 2.4 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังสมการที่ 4.12 เมื่อ  $P_{cr,abq}$  คือค่ากำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกของเสาเซลลูลาร์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

$$\Delta = \left( \frac{P_{cr,abq} - P_{cr}}{P_{cr}} \right) \times 100 \quad (4.12)$$

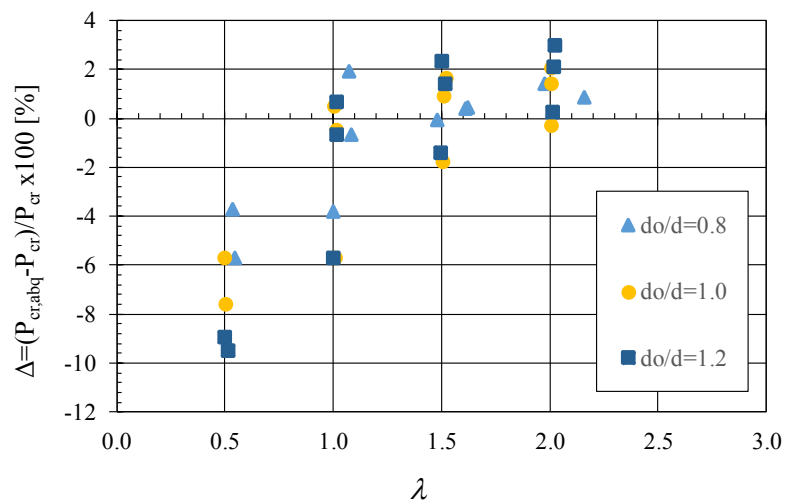
## บทที่ 5

### การอภิปรายผลการวิเคราะห์

#### 5.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

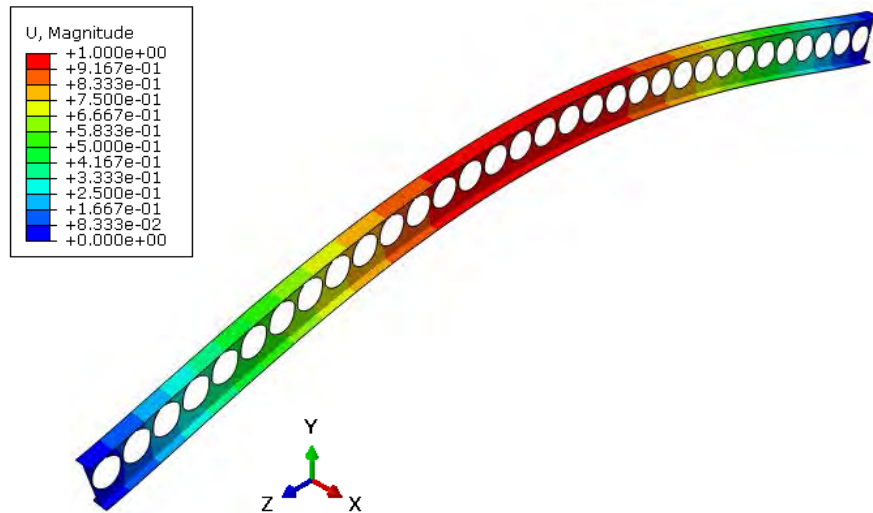
ภาพที่ 5.1 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงอยู่ในรูปค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการทำนายกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกตั้งสมการที่ 2.4

ผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเซลลูลาร์พบว่ามีความคลาดเคลื่อน โดยในกรณีอัตราส่วนความขะลุดเท่ากับ 1.5 จนถึง 2.0 มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3% ส่วนกรณีอัตราส่วนความขะลุดต่ำกว่า 1.0 ความคลาดเคลื่อนมีค่าประมาณ 10% เนื่องจากเมื่อเสามีค่าอัตราส่วนความขะลุดต่ำ การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างการโก่งเดาะเฉพาะที่และการโก่งเดาะโดยรวมของเสา (global buckling) [4] ทำให้กำลังต้านทานการโก่งเดาะที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าต่ำลง



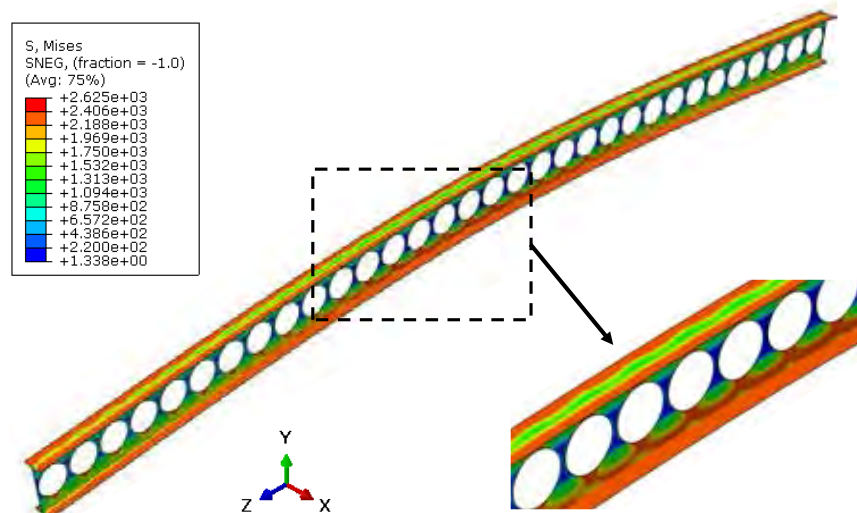
ภาพที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการที่ 2.4

## 5.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



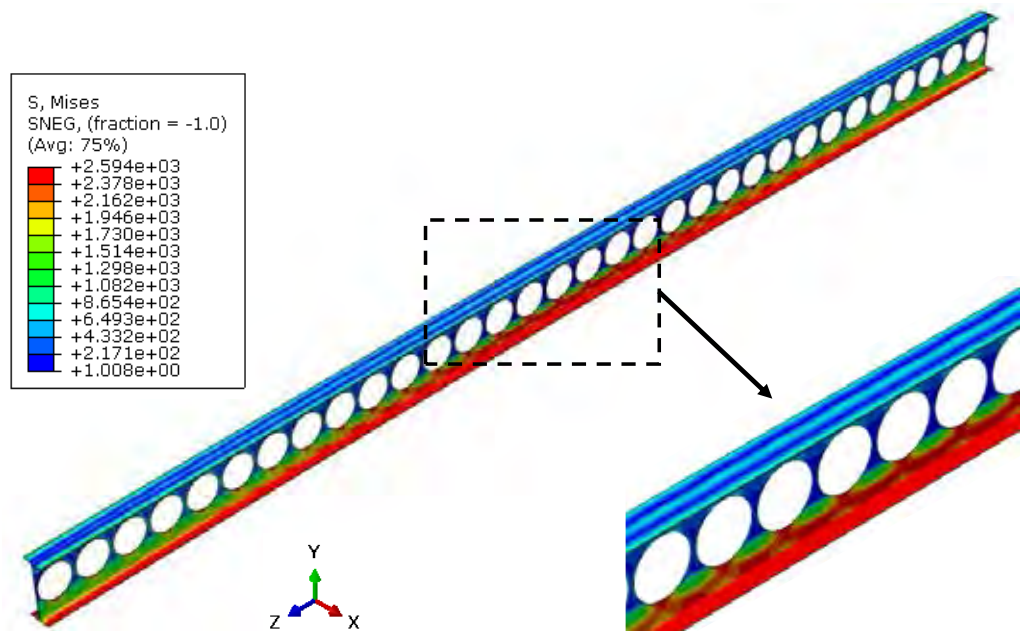
ภาพที่ 5.2 การโก่งเดาะแบบอิลาสติกของตัวอย่างเสาเซลล์ูลาร์

หัวข้อ 5.2 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเหล็กเซลล์ูลาร์ที่มีอัตราส่วนความขรุขระ ( $\lambda$ ) อัตราส่วนขนาดช่องเปิด ( $d_o/d$ ) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด ( $s/d_o$ ) เท่ากับ 0.5 0.8 และ 1.1 ตามลำดับ ภาพที่ 5.2 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบอิลาสติกแสดงดัง โดยมีการโก่งเดาะรอบแกนหลักในรูปครึ่งไซน์ และไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่



ภาพที่ 5.3 การกระจายหน่วยแรงแบบ Von Mises stress และการครากบริเวณหน้าตัดตัวที่เมื่อรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์

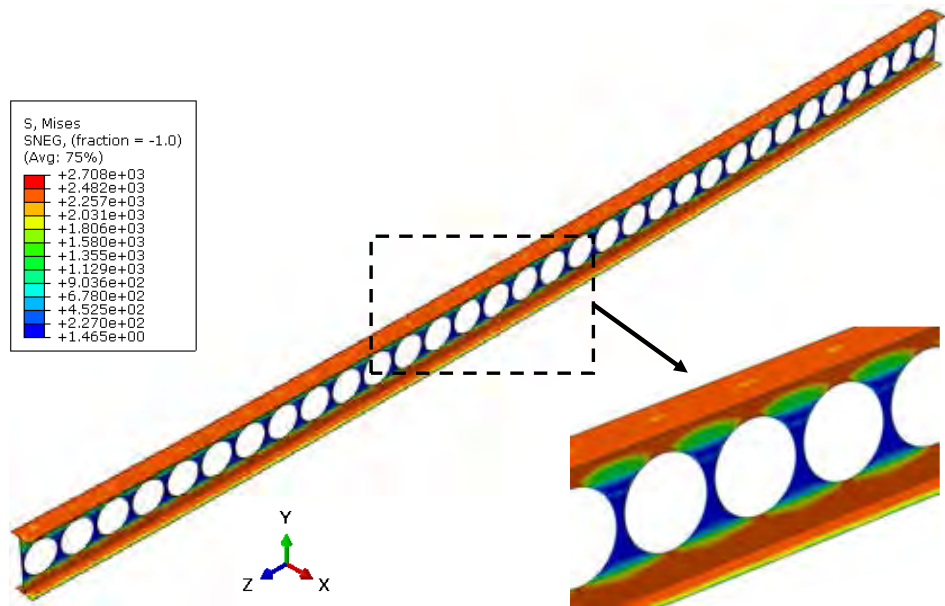
ภาพที่ 5.3 แสดงตัวอย่างเสาเซลลูลาร์เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นโดยให้รับแรงอัดกระทำตรงศูนย์กลางจนถึงจุดวิบัติ พบว่า Von Mises stress มีค่าเท่ากับ 2450 ksc. บริเวณกึ่งกลางเสาที่หน้าตัดตัวที่ตำแหน่งด้านล่างช่องเปิดทำให้มีการครากเกิดขึ้น แต่หน้าตัดตัวที่เหนือช่องเปิดมีเพียงการครากบางส่วนบริเวณปีก



ภาพที่ 5.4 การกระจายหน่วยแรงแบบ Von Mises stress และการครากบริเวณหน้าตัดตัวที่เมื่อรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลาง

ภาพที่ 5.4 แสดงตัวอย่างเสาเซลลูลาร์เมื่อรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางจนถึงจุดวิบัติ พบว่า บริเวณกึ่งกลางเสามีเพียงบางส่วนของบริเวณหน้าตัดตัวที่มีค่า Von Mises stress เท่ากับ 2450 ksc. ทำให้มีการคราก โดยหน้าตัดตัวที่ตำแหน่งส่วนล่างของช่องเปิดมีการครากทั้งหน้าตัด และตำแหน่งหน้าตัดตัวที่ส่วนบนของช่องเปิดไม่มีการครากเกิดขึ้น

ภาพที่ 5.5 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาเซลลูลาร์เมื่อรับแรงดัดเท่านั้น พบว่า แบบจำลองมีค่า Von Mises stress เท่ากับ 2450 ksc. ที่บริเวณหน้าตัดตัวที่ส่วนบนและส่วนล่างตลอดความยาวของตัวอย่างเสาทำให้มีการคราก และหน่วยแรง Von Mises stress บริเวณระหว่างช่องเปิดไม่มีการคราก

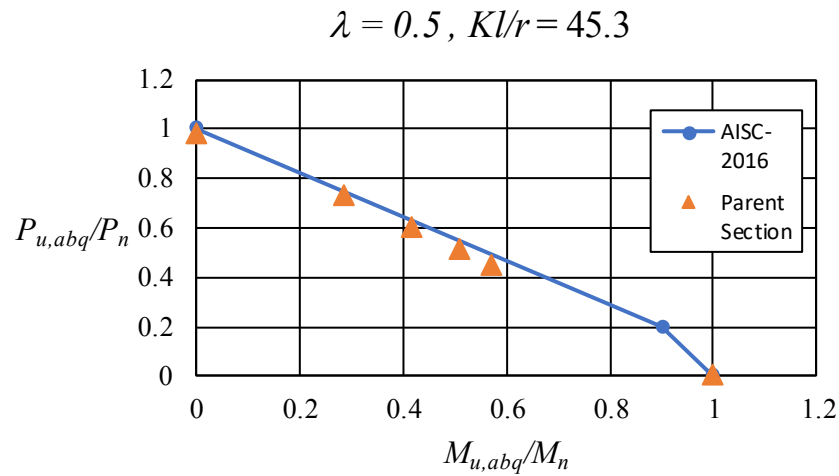


ภาพที่ 5.5 การกระจายหน่วยแรงแบบ Von Mises stress และการครากบริเวณหน้าตัดตัวที่เมื่อรับแรงดัดเท่านั้น

### 5.3 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาหน้าตัดตั้งต้น

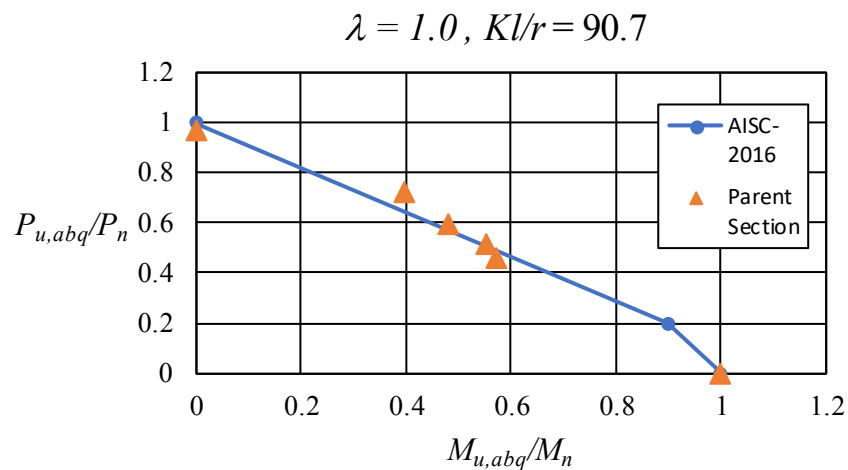
ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของหน้าตัดตั้งต้นจะแสดงอยู่ในความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{u,abq}/P_n$  และ  $M_{u,abq}/M_n$  โดยผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์และเส้นปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด AISC-2016 จะแสดงอยู่ในรูปจุดและเส้นตรงตามลำดับ ซึ่งจะแยกผลการวิเคราะห์ตามค่าของอัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  ตามมาตรฐาน Eurocode 3 หรือ  $Kl/r$  ตามข้อกำหนด AISC-2016

ภาพที่ 5.6 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเอียงศูนย์ที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 45.3 พบว่ากรณีแรงอัดกระทำเอียงศูนย์ผลการวิเคราะห์ให้กำลังมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์จากสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์โดยมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ในกรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์อัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  ให้ค่าต่ำกว่า 1.0 เล็กน้อย



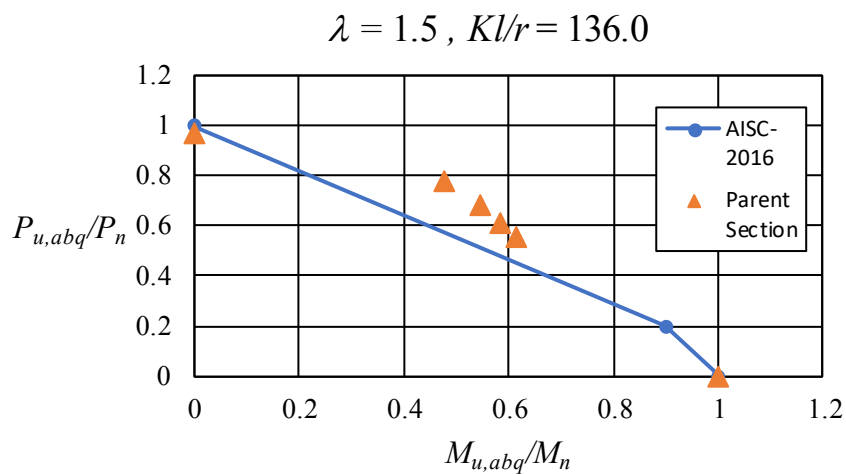
ภาพที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 45.3

ภาพที่ 5.7 แสดงผลการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.0 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 90.7 พบว่ากรณีแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ผลการวิเคราะห์มีค่ากำลังใกล้เคียงกับการวิเคราะห์จากสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ โดยมีความมากกว่าและต่ำกว่าเล็กน้อยในกรณีระยะเยื้องศูนย์มีค่าน้อย และมีความมากตามลำดับ ในกรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์อัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  ให้ค่าต่ำกว่า 1.0 เล็กน้อย

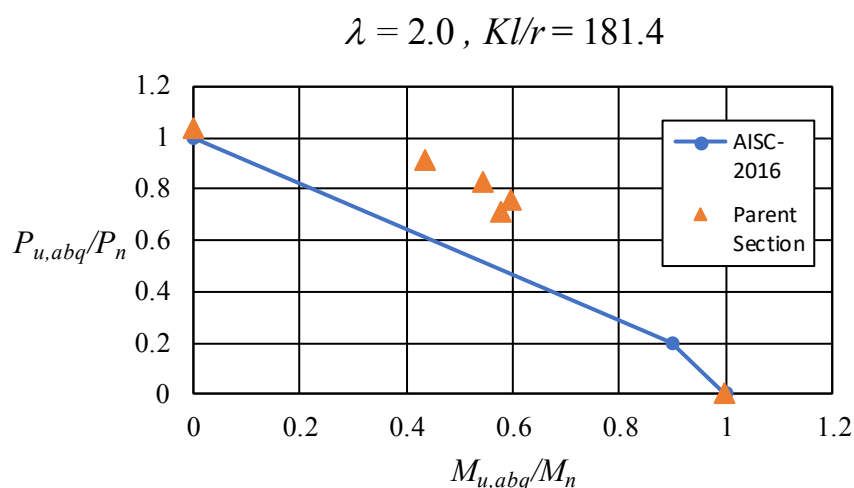


ภาพที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.0 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 90.7

ภาพที่ 5.8 และ ภาพที่ 5.9 แสดงผลการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.5 และ 2.0 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 136.0 และ 181.4 ตามลำดับ พบว่ากรณีแรงอัดกระทำเอียง ศูนย์ผลการวิเคราะห์อยู่นอกเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์โดยมีค่ามากขึ้นตามอัตราส่วนความชะลูดที่เพิ่มขึ้น ในกรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์อัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  ให้ค่าต่ำกว่าและมากกว่า 1.0 เล็กน้อยสำหรับ กรณีอัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ

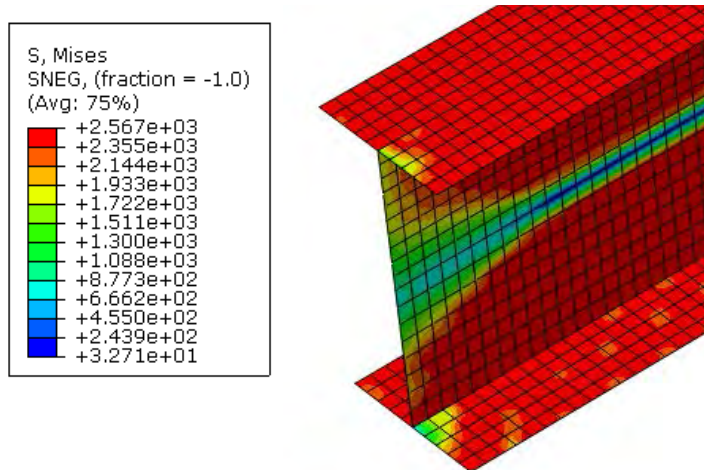


ภาพที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเอียงศูนย์ของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1.5 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 136.0



ภาพที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์กำลังแรงอัดกระทำเอียงศูนย์ของหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 2.0 หรือ  $Kl/r$  มีค่าเท่ากับ 181.4

ในกรณีแบบจำลองหน้าตัดตั้งต้นรับเฉพาะแรงดัด พบว่าให้กำลังที่เท่ากับการวิเคราะห์กำลังด้านทานแรงดัด ซึ่งอัตราส่วน  $M_{u,aba} / M_n$  มีค่าเท่ากันในทุก ๆ อัตราส่วนความขรุขระโดยมีค่าเท่ากับ 1.0 เนื่องจากมีการวิบัติแบบการครากทั้งหน้าตัดดังภาพที่ 5.10



ภาพที่ 5.10 การวิบัติเนื่องจากการดัดของแบบจำลองหน้าตัดตั้งต้น

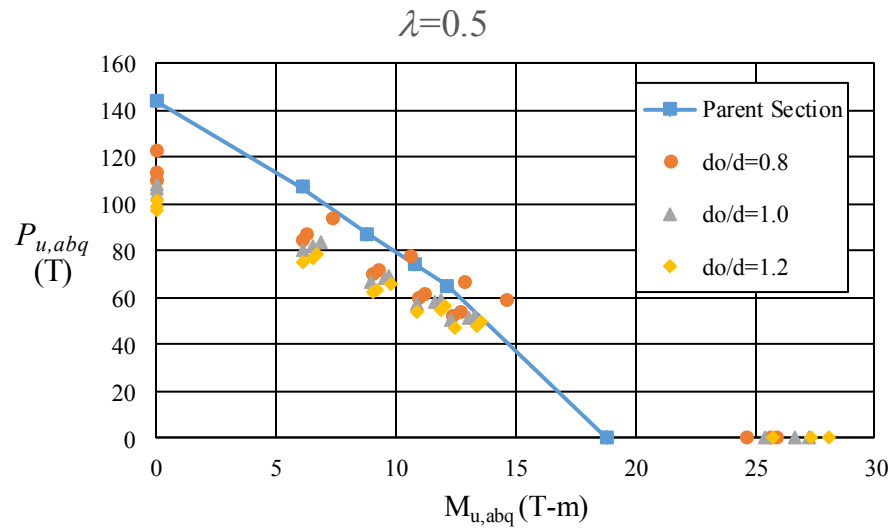
#### 5.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์จากแบบจำลอง

##### ไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างหน้าตัดเสาเซลลูลาร์และหน้าตัดตั้งต้น

ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของแบบจำลองหน้าตัดตั้งต้นและหน้าตัดเซลลูลาร์จะแสดงอยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัด  $P_{u,abq}$  และแรงดัด  $M_{u,aba}$  ที่จุดวิบัติ ซึ่งผลการวิเคราะห์จากหน้าตัดตั้งต้นและหน้าตัดเซลลูลาร์จะแสดงอยู่ในรูปเส้นตรงและจุดตามลำดับ โดยแยกตามอัตราส่วนความขรุขระและอัตราส่วนขนาดช่องเปิด  $d_o/d$

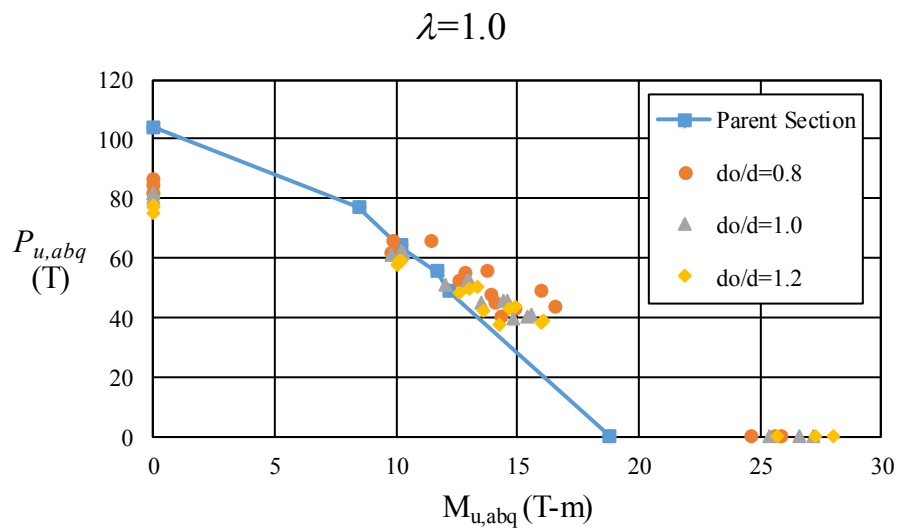
ภาพที่ 5.11 แสดงผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความขรุขระ  $\lambda$  เท่ากับ 0.5 พบว่าในทุก ๆ กรณีอัตราส่วน  $d_o/d$  ของหน้าตัดเซลลูลาร์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ให้ค่ากำลังต่ำกว่าผลการวิเคราะห์จากหน้าตัดตั้งต้น ยกเว้นบางกรณีที่มีค่ามากกว่าหน้าตัดตั้งต้นเล็กน้อย ส่วนกรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์ของหน้าตัดเซลลูลาร์ให้ค่ากำลังต่ำกว่าหน้าตัดตั้งต้นโดยแตกต่างกันที่สูงสุดประมาณ 34 ตัน





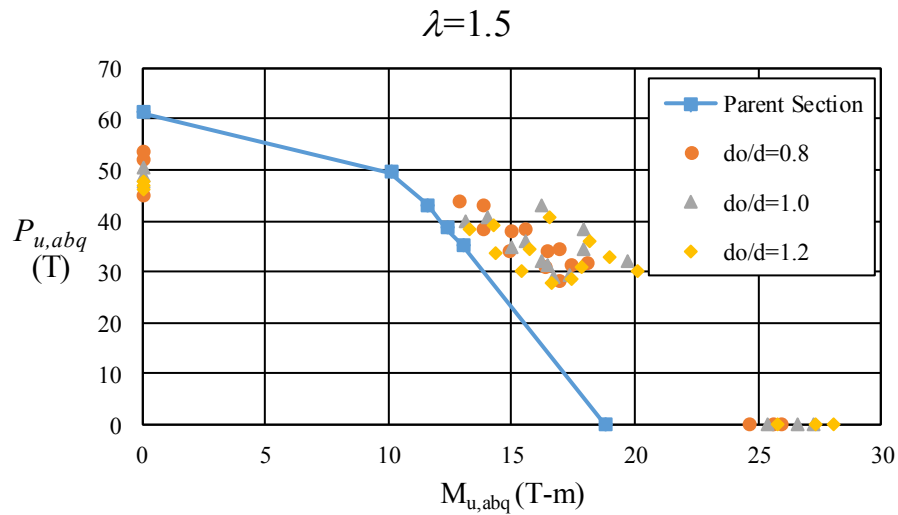
ภาพที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 0.5

ภาพที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 1.0 พบว่าหน้าตัดเซลล์ลาร์เมื่อรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ให้ผลการวิเคราะห์กำลังที่มากกว่าหน้าตัดดั้งเดิมสำหรับทุก ๆ อัตราส่วน  $d_o/d$  ยกเว้นในกรณีที่ระยะเยื้องศูนย์มีค่าน้อย ผลการวิเคราะห์จากหน้าตัดเซลล์ลาร์ให้ค่ากำลังต่ำกว่าหน้าตัดต้นแบบเล็กน้อยสำหรับทุก ๆ อัตราส่วน  $d_o/d$

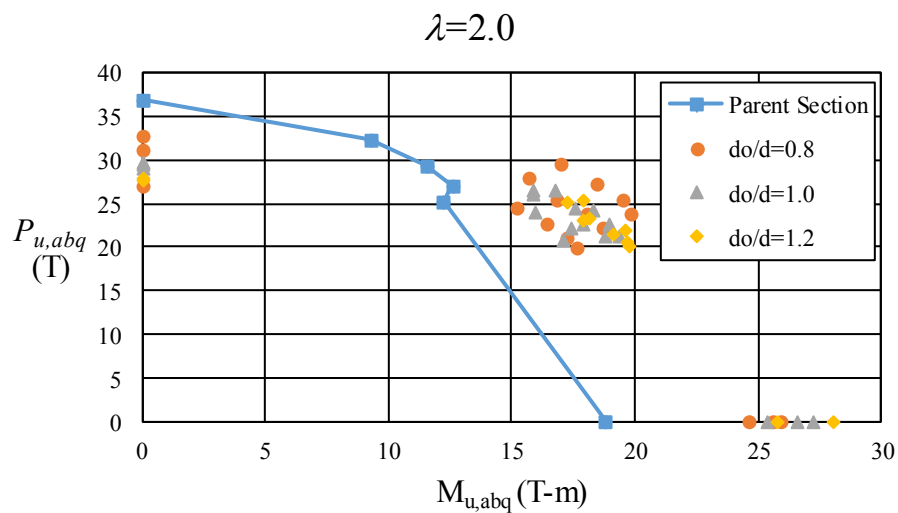


ภาพที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 1.0

กรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์กลางหน้าตัดเซลล์ูลาร์ให้ผลการวิเคราะห์กำลังที่ต่ำกว่าหน้าตัดต้นแบบ โดยมีความแตกต่างสูงที่สุดประมาณ 20 ตัน



ภาพที่ 5.13 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 1.5



ภาพที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 2.0

ภาพที่ 5.13 และภาพที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ พบว่าหน้าตัดเซลล์ูลาร์เมื่อรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางมีกำลังที่มากกว่าหน้าตัดตั้งต้นสำหรับทุก ๆ อัตราส่วน  $d_o/d$  ส่วนกรณีกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนหน้าตัดเซลล์ูลาร์ค่ากำลังต่ำกว่า

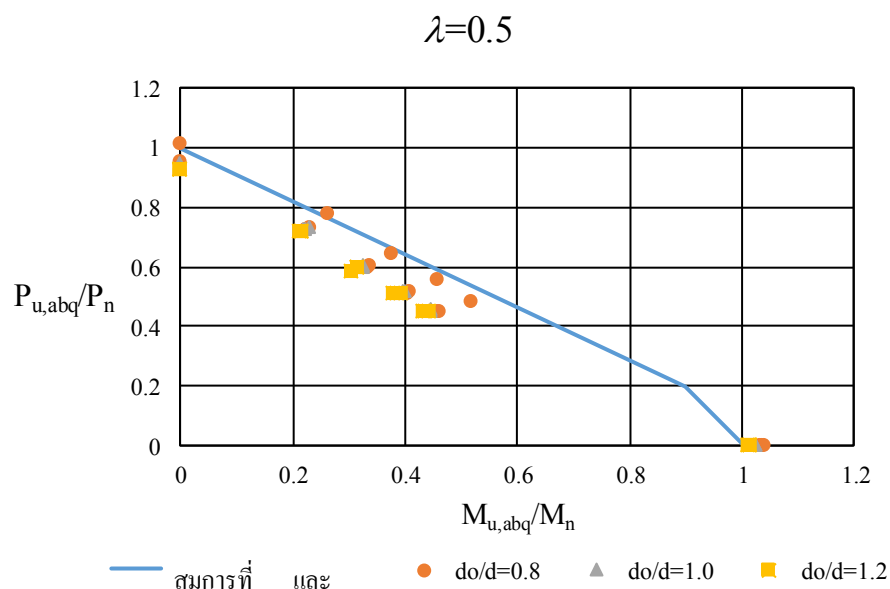
หน้าตัดตั้งต้น โดยมีความแตกต่างสูงที่สุดประมาณ 10 ตัน และ 16 ตัน สำหรับอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ

กรณีกำลังรับแรงดัดของหน้าตัดเซลล์ูลาร์สำหรับทุก ๆ อัตราส่วนความชะลูดและอัตราส่วน  $d_o/d$  พบว่ามีค่ากำลังมากกว่าหน้าตัดตั้งต้นสูงที่สุดประมาณ 9 ตัน-เมตร

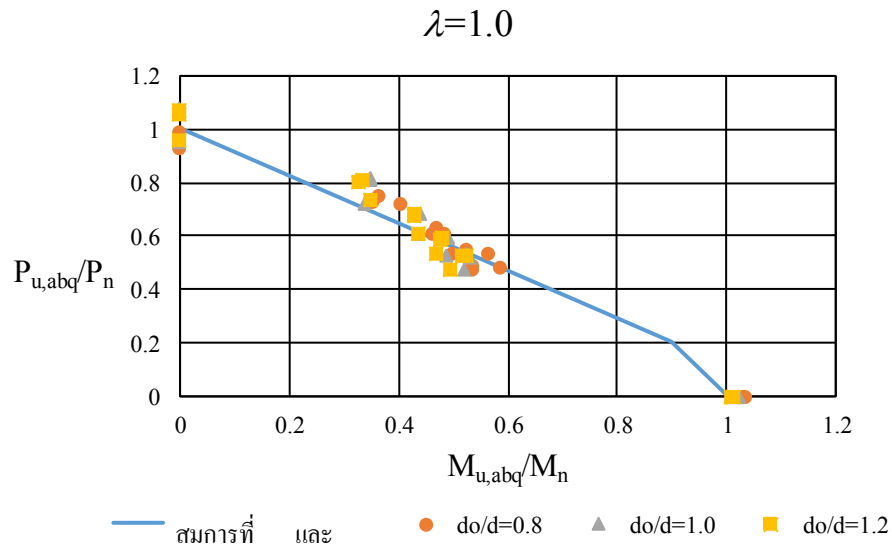
### 5.5 ผลแนวทางการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ขององค์อาคารเซลล์ูลาร์

ผลแนวทางการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ขององค์อาคารเซลล์ูลาร์จะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  และ  $M_{u,abq}/M_n$  โดยจะตรวจสอบผลแนวทางการวิเคราะห์ตามหัวข้อ 4.3 กับการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์และเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จะแสดงอยู่ในรูปจุดและเส้นตรงตามลำดับ ซึ่งจะแยกตามอัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  และอัตราส่วน  $d_o/d$

ภาพที่ 5.15 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนความชะลูดมีค่าเท่ากับ 0.5 พบว่าสำหรับทุกอัตราส่วน  $d_o/d$  และ  $s/d_o$  ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ากำลังต่ำกว่าแนวทางการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่นำเสนอ ส่วนกรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์พบว่าอัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  มีค่าต่ำกว่า 1.0 และสูงกว่า 1.0 เล็กน้อยในบางกรณี

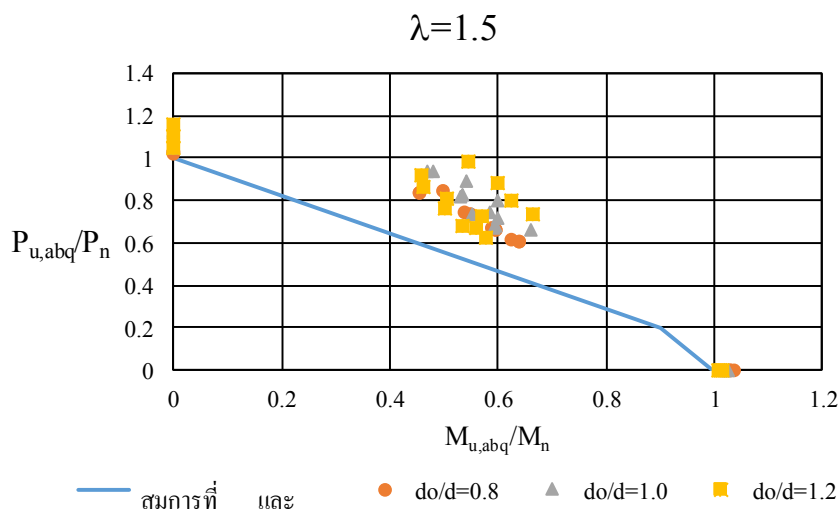


ภาพที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเท่ากับ 0.5

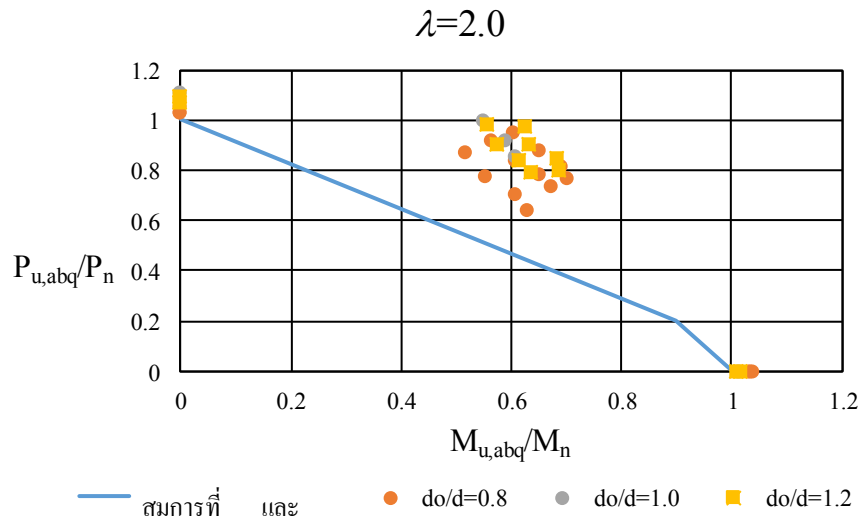


ภาพที่ 5.16 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเท่ากับ 1.0

ภาพที่ 5.16 แสดงผลการเปรียบเทียบสำหรับอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเท่ากับ 1.0 พบว่า ทุก ๆ อัตราส่วน  $d_o/d$  และ  $s/d$  ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์จากแบบจำลองให้ค่ากำลังสูงและต่ำกว่าแนวทางการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เล็กน้อยสำหรับระยะเยื้องศูนย์มีค่าน้อยและมีค่ามากตามลำดับ กรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์พบว่าอัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  มีค่าต่ำกว่าและมากกว่า 1.0 ในบางกรณี



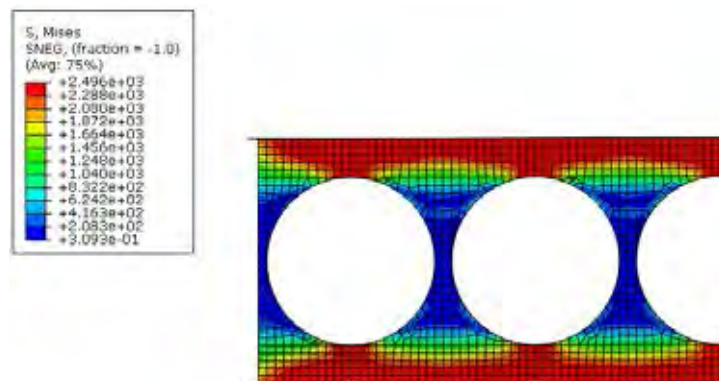
ภาพที่ 5.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเท่ากับ 1.5



ภาพที่ 5.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอสำหรับอัตราส่วนความชะลุดมีค่าเท่ากับ 2.0

ผลการเปรียบเทียบสำหรับอัตราส่วนความชะลุดมีค่าเท่ากับ 1.5 และ 2.0 แสดงดังภาพที่ 5.17 และภาพที่ 5.18 ตามลำดับ พบว่าทุก ๆ อัตราส่วน  $d_o/d$  และ  $s/d$  ผลการวิเคราะห์ที่กำลังรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์จากแบบจำลองให้ค่าสูงกว่าแนวทางการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ กรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์พบว่าอัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  มีค่ามากกว่า 1.0 เล็กน้อย

ส่วนกรณีรับแรงดัดเท่านั้นผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัด  $M_{u,abq}$  มีค่าเท่ากันทุก ๆ อัตราส่วนความชะลุด เนื่องจากรูปแบบการวิบัติยังคงรูปแบบเดิมคือมีการครากที่หน้าตัดตัวที่ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการทำนายกำลังรับแรงดัดตามข้อกำหนด AISC Design Guide 31 พบว่าอัตราส่วน  $M_{u,abq}/M_n$  มีค่ามากกว่า 1.0 เล็กน้อย



ภาพที่ 5.19 การครากบริเวณหน้าตัดตัวที่ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหน้าตัดเสาเซลลูลาร์ภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ด้วยโปรแกรม ABAQUS แบบจำลองได้พิจารณาความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตและหน่วยแรงคงค้าง นอกจากนี้ยังได้สร้างแบบจำลองสำหรับหน้าตัดตั้งต้นเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของช่องเปิดสำหรับหน้าตัดเซลลูลาร์ การนำผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองไปสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับแบบจำลองหน้าตัดตั้งต้น ผลการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ให้กำลังใกล้เคียงกับการวิเคราะห์สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ตามข้อกำหนด AISC-2016 ในกรณีอัตราส่วนความชะลูด  $KL/r$  มีค่าเท่ากับ 45.3 และ 90.7 ตามลำดับ และให้กำลังมากกว่าการวิเคราะห์ตามข้อกำหนดสำหรับอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 136.0 และ 181.4 ตามลำดับ
2. ผลการวิเคราะห์ที่จุดวิบัติของแรงอัดกระทำตามแนวแกนและแรงดัดจากแบบจำลองสำหรับหน้าตัดตั้งต้น ให้กำลังใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ตามข้อกำหนด AISC-2016 สำหรับกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัด
3. ผลการวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ ตรงศูนย์ และแรงดัดจากแบบจำลองมีความปลอดภัยเมื่อวิเคราะห์ตามข้อกำหนด AISC-2016
4. กรณีแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ของเสาหน้าตัดเซลลูลาร์ ผลการวิเคราะห์ให้กำลังต่ำกว่าหน้าตัดตั้งต้นที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 0.5 และให้ผลการวิเคราะห์กำลังที่ใกล้เคียงสำหรับอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 1.0 สำหรับอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 1.5 และ 2.0 ให้ผลการวิเคราะห์กำลังที่มากกว่าหน้าตัดตั้งต้น
5. แรงอัดกระทำตรงศูนย์ที่จุดวิบัติสำหรับเสาเซลลูลาร์ให้ผลการวิเคราะห์กำลังต่ำกว่าหน้าตัดตั้งต้นทุก ๆ อัตราส่วนความชะลูด โดยแตกต่างกันมากที่สุดและน้อยที่สุดประมาณ 34 ตัน และ 10 ตันตามลำดับ ส่วนแรงดัดที่จุดวิบัติหน้าตัดเซลลูลาร์ให้กำลังมากกว่าหน้าตัดตั้งต้นประมาณ 9 ตัน-เมตร ทุก ๆ อัตราส่วนความชะลูด

6. การวิเคราะห์แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางของเสาเซลลูลาร์จะอ้างอิงสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด AISC-2016 ดังสมการที่ 4.8 และ 4.9 โดยไม่พิจารณาตัวคูณต้านทานของแรงอัด ( $\phi_c$ ) และแรงคัต ( $\phi_b$ )

$$\text{กรณี } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \right) \leq 1.0 \quad (4.8)$$

$$\text{กรณี } \frac{P_r}{P_c} < 0.2$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \right) \leq 1.0 \quad (4.9)$$

สำหรับการวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกน  $P_n$  ของเสาเซลลูลาร์เมื่อพิจารณาเฉพาะการโก่งเดาะรอบแกนหลักจะมาจากงานวิจัยของ Kinget [7] ซึ่งอ้างอิงการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน Eurocode 3 ด้วยสมการที่ 4.10 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

$$P_n = \chi A_{2T} f_y \quad (4.10)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (2.10)$$

$$\phi = 0.5 [1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad (2.11)$$

อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  สำหรับเสาเซลลูลาร์จะคำนวณดังสมการที่ 4.11 โดยใช้กำลังต้านทานการโก่งเดาะวิกฤต  $P_{cr}$  จาก Jian-zu Gu และ Shanshan Cheng [4] ดังสมการที่ 2.4

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{2T} f_y}{P_{cr}}} \quad (4.11)$$

$$P_{cr} = P_{cr1} \left( 1 - \frac{\pi^2 E e^2 A_{tee}^2}{n^2 k_{sh} s I_{red}} \right) \quad (2.4)$$

ค่า  $\alpha$  ในสมการที่ 2.11 จะมาจากเส้นโค้งการโก่งเดาะ a และ b ที่อัตราส่วนความ  
 ชะลุดมากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 และเท่ากับ 0.5 ตามลำดับ ตามคำแนะนำของ  
 Kinget [7]

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงดัดจะอ้างอิงตาม AISC Design Guide 31 ดังสมการที่  
 3.29 โดยพิจารณาเฉพาะกำลังรับแรงดัดของหน้าตัดตัวที่

$$M_n = F_y S_{x-tee} \quad (3.29)$$

เมื่อตรวจสอบแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแทน  
 ค่า  $P_r$  และ  $M_r$  ในสมการที่ 4.8 และ 4.9 ด้วย  $P_{u,abq}$  และ  $M_{u,abq}$  ตามลำดับ พบว่า  
 สำหรับอัตราส่วนความชะลุด  $\lambda$  เท่ากับ 0.5 ให้กำลังแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ต่ำกว่าแนว  
 ทางการวิเคราะห์อ้างอิงตามข้อกำหนด AISC-2016 และเมื่ออัตราส่วนความชะลุดมีค่า  
 เท่ากับ 1.0 ให้กำลังที่ใกล้เคียงแนวทางการวิเคราะห์บางกรณีสำหรับอัตราส่วน  $d_o/d$   
 และให้กำลังที่มากขึ้นสำหรับอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 1.5 และ 2.0

7. กรณีแรงอัดกระทำตรงศูนย์ผลการวิเคราะห์ให้กำลังต่ำกว่าแนวทางการวิเคราะห์สำหรับ  
 อัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยมีค่าอัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  ต่ำกว่า 1.0  
 เล็กน้อย และให้กำลังใกล้เคียงกับแนวทางการวิเคราะห์เมื่ออัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ  
 1.5 และ 2.0 โดยมีค่าอัตราส่วน  $P_{u,abq}/P_n$  มากกว่า 1.0 เล็กน้อย ส่วนกรณีแรงดัดผล  
 การวิเคราะห์ให้กำลังมากกว่าแนวทางการวิเคราะห์ โดยมีค่าอัตราส่วน  $M_{u,abq}/M_n$   
 มากกว่า 1.0 เล็กน้อย

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบเสาเซลล์ลูลาร์ทั้งแรงอัดตามแนวแกนและแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์  
 เนื่องจากในอดีตยังขาดผลทดสอบ
2. ควรมีตัวคูณต้านทานของแรงอัด ( $\phi_c$ ) สำหรับเสาเซลล์ลูลาร์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการ  
 ออกแบบต่อไป




9336278



## บรรณานุกรม

- [1] วรเทพ แซ่ล่อง และปฐมเมศ พาณิชย์มาน, "การเปรียบเทียบกำลังออกแบบ Cellular Beam ตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10," วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม. อบ., vol. 8, no. 2, pp. 14-25, 2015.
- [2] D. Sonck, "Global buckling of castellated and cellular steel beams and columns," *Structural Engineering International*, vol. 24, no. 4, pp. 575-575, 2014.
- [3] A. M. Sweedan, K. M. El-Sawy, and M. I. Martini, "Identification of the buckling capacity of axially loaded cellular columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 4, pp. 442-454, 2009.
- [4] J.-z. Gu and S. Cheng, "Shear effect on buckling of cellular columns subjected to axially compressed load," *Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 416-420, 2016.
- [5] D. Sonck, R. Van Impe, and J. Belis, "Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members," *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 512-519, 2014.
- [6] D. Sonck and J. Belis, "Weak-axis flexural buckling of cellular and castellated columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 124, pp. 91-100, 2016.
- [7] L. Kinget, "Strong-axis flexural buckling of castellated and cellular," 2015.
- [8] J. R. Liew, D. White, and W. Chen, "Beam-column design in steel frameworks—Insights on current methods and trends," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 18, no. 4, pp. 269-308, 1991.
- [9] T. Kanchanalai, "The design and behavior of beam-columns in unbraced steel frames," 1977.
- [10] ทักษิณ เทพชาติรี และอัศววัชร เล่นวารีย์, พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก, 4 ed. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [11] G. Salmon, J. E. Johnson, and F. A. Malhas, "Steel Structures: Design and Behavior, 5th," *Edition. Editorial Harper Collins*, 2009.
- [12] M. Kerkhove, "Global buckling of eccentrically loaded cellular members," 2015.
- [13] AISC Steel Design Guide 31, Castellated and Cellular Beam Design, American Institute of Steel Construction, 2016.

9336278  CU IThesis 6070137521 thesis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43

## รายการสัญลักษณ์

<p><math>A</math> = พื้นที่หน้าตัดเสา</p> <p><math>A_j</math> = พื้นที่ปีกเสา</p> <p><math>A_g</math> = พื้นที่หน้าตัดรวม</p> <p><math>A_{net}</math> = พื้นที่รวมของหน้าตัดตัวที่</p> <p><math>A_{tee}</math> = พื้นที่หน้าตัดตัวที่</p> <p><math>A_w</math> = พื้นที่แผ่นตั้ง</p> <p><math>B</math> = ส่วนที่รับแรงอัดของหน้าตัดตัวที่</p> <p><math>B_1</math> = ตัวคูณขยายแรงสำหรับ <math>P-\delta</math></p> <p><math>B_2</math> = ตัวคูณขยายแรงสำหรับ <math>P-\Delta</math></p> <p><math>C_{v1}</math> = สัมประสิทธิ์การเฉือนของเอวสำหรับหน้าตัดเต็ม</p> <p><math>C_{v2}</math> = สัมประสิทธิ์การเฉือนของเอวสำหรับหน้าตัดสุทธิ</p> <p><math>C_w</math> = ค่าคงที่การบิดเบี้ยว</p> <p><math>D_o, d_o</math> = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิดวงกลม</p> <p><math>E</math> = โมดูลัสยืดหยุ่น</p> <p><math>EI_z</math> = ความแกร่งเชิงดัดรอบแกนอ่อน</p> <p><math>F_{cr}</math> = หน่วยแรงอัดวิกฤต</p> <p><math>F_e</math> = น้ำหนักบรรทุกทุกออยเลอร์</p> <p><math>F_y</math> = หน่วยแรงคราก</p> <p><math>G</math> = โมดูลัสการเฉือน</p>	<p><math>H</math> = ความลึกของหน้าตัดเซลล์ลูลาร์</p> <p><math>I</math> = โมเมนต์อินเนอร์เซีย</p> <p><math>I_{eq}</math> = โมเมนต์อินเนอร์เซียที่ลดค่า</p> <p><math>I_{red}</math> = โมเมนต์อินเนอร์เซียที่ลดค่าของพื้นที่หน้าตัดตัวที่</p> <p><math>I_{y,2T}</math> = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดตัวที่</p> <p><math>J</math> = ค่าคงที่เนื่องจากการบิด</p> <p><math>K</math> = สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพ</p> <p><math>L</math> = ความยาวเสา</p> <p><math>L_b</math> = ความยาวช่วงไร้อันตรกิริยาด้านข้าง</p> <p><math>L_p</math> = ความยาวคานสูงสุดช่วงไม่มีการค้ำยันด้านข้างภายใต้สภาวะการคราก</p> <p><math>L_r</math> = ความยาวคานสูงสุดช่วงไม่มีการค้ำยันด้านข้างภายใต้สภาวะการโก่งเดาะและบิดด้านข้างในช่วงอินอีลาสติก</p> <p><math>M_c</math> = กำลังต้านทานแรงดัดที่สามารถรับได้</p> <p><math>M_{cr}</math> = โมเมนต์วิกฤต</p> <p><math>M_e</math> = โมเมนต์ดัดแบบอีลาสติก</p> <p><math>M_n</math> = กำลังต้านทานแรงดัดระบุ</p>
--	---

$M_{lt}$	= แรงดัดมากที่สุดลำดับหนึ่งเมื่อมีการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง		แนวแกนที่สามารถรับได้
$M_{nt}$	= แรงดัดมากที่สุดลำดับหนึ่งเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง	$P_{cr,abq}$	= กำลังการโก่งเดาะวิกฤติจากแบบจำลอง ABAQUS
$M_p$	= โมเมนต์พลาสติก	$P_{cr1}$	= กำลังการโก่งเดาะวิกฤติเมื่อคำนวณด้วยโมเมนต์อินเนอร์เซียที่ลดค่าลงของพื้นที่หน้าตัดตัวที่
$M_r$	= โมเมนต์ดัดโดยรวมที่กระทำตรงตำแหน่งช่องเปิด, กำลังแรงดัดที่ต้องการ	$P_e$	= กำลังการโก่งเดาะของออยเลอร์
$M_{rh}$	= แรงดัดที่กระทำระหว่างช่องเปิด	$P_n$	= กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนระบุ
$M_u$	= กำลังแรงดัดปรับค่าที่ต้องการ, โมเมนต์ประลัย	$P_r$	= แรงอัดตามแนวแกนที่กระทำบริเวณส่วนบนและส่วนล่างหน้าตัดตัวที่, แรงอัดที่ต้องการ
$M_{u,abq}$	= แรงดัดประลัยจากแบบจำลอง ABAQUS	$P_u$	= กำลังแรงอัดตามแนวแกนปรับค่าที่ต้องการ, แรงอัดตามแนวแกนประลัย
$M_{vr}$	= โมเมนต์ดัดตัวแรนดิลที่กระทำ	$P_{u,abq}$	= กำลังแรงอัดตามแนวแกนประลัยจากแบบจำลอง ABAQUS
$M_y$	= โมเมนต์คราก	$S_{x-tee}$	= โมดูลัสสิริลัสติกของหน้าตัดตัวที่
$N_{cr}, P_{cr}$	= กำลังการโก่งเดาะวิกฤติ	$V_n$	= กำลังต้านทานแรงเฉือน
$N_{cr,abq}$	= กำลังการโก่งเดาะวิกฤติที่ได้จาก ABAQUS	$V_{n-net}$	= กำลังรับแรงเฉือนหน้าตัดสุทธิ
$N_{cr,2T}$	= กำลังการโก่งเดาะวิกฤติเมื่อคำนวณด้วยพื้นที่หน้าตัดตัวที่	$V_{n-gross}$	= กำลังรับแรงเฉือนหน้าตัดเต็ม
$N_{Rd}$	= กำลังต้านทานการโก่งเดาะอ้างอิงตามมาตรฐาน EC3	$V_r$	= แรงเฉือนที่กระทำ
$N_{Rd,abq}$	= กำลังต้านทานการโก่งเดาะที่ได้จาก ABAQUS		= แรงเฉือนแนวราบที่กระทำกับแผ่นตั้งระหว่างช่องเปิด
$P$	= แรงอัดตามแนวแกน	$V_{rh}$	
$P_c$	= กำลังแรงต้านทานอัดตาม	$Z_x$	= พลาสติกโมดูลัสรอบแกนหลัก



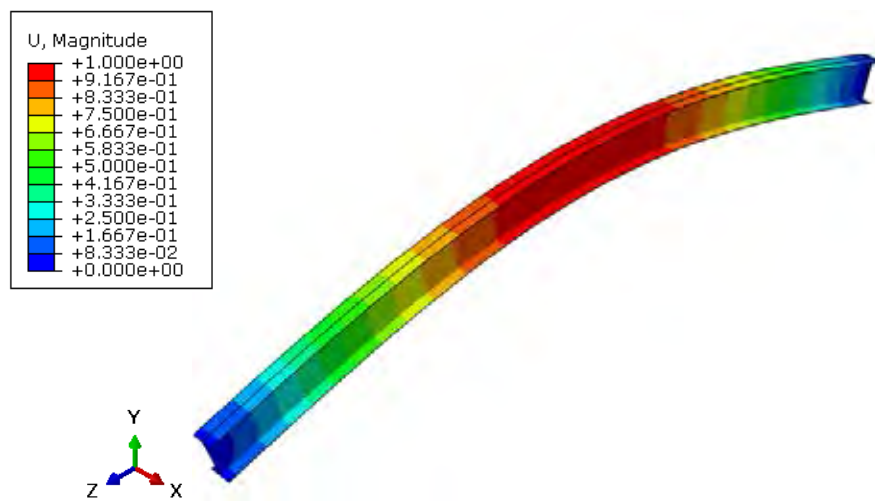
9336278

CU Thesisis 6070137521 thesisis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43

	ของหน้าตัด	$\bar{r}_o^2$	= รัศมีจเรชันสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางการเฉือน
$a$	= รัศมีช่องเปิดวงกลม	$s$	= ระยะห่างระหว่างช่องเปิด
$b_f$	= ความกว้างของปีก	$t_f$	= ความหนาของปีก
$d, h$	= ความลึกของหน้าตัดตั้งต้น	$t_w$	= ความหนาของแผ่นตั้ง
$d_{eff}$	= ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของด้านบนและด้านล่างหน้าตัดตัวที่	$\Delta$	= ค่าความแตกต่าง
	ที่	$\alpha$	= ค่าตัวประกอบความไม่สมบูรณ์ของเสา
$e$	= ระยะที่วัดจากกึ่งกลางหน้าตัดเซลล์ูลาร์ไปยังหน้าตัดตัวที่, ระยะระหว่างขอบของช่องเปิดที่อยู่ติดกัน, ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัดตามแนวแกนที่กระทำกับแบบจำลอง	$\beta$	= ตัวคูณลดกำลังจากการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน
$f_a$	= แฟกเตอร์ขนาดช่องเปิด	$\delta$	= ระยะโก่งตัวของเสาที่จุดกึ่งกลางความยาว
$f_w$	= แฟกเตอร์ระยะห่างระหว่างช่องเปิด	$\epsilon_{meas}$	= ความเครียดที่ได้จากการวัด
$h_w$	= ความสูงของแผ่นตั้ง	$\lambda$	= อัตราส่วนความชะลุด
$k_{sh}$	= สติฟเนสการเฉือน	$\nu$	= อัตราส่วนปัวซอง
$k_v$	= สัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของเอว	$\rho$	= รัศมีความโค้ง
$l_{cr}$	= ความยาวเสาสำหรับการโก่งเดาะวิกฤติ	$\phi_b$	= ตัวคูณต้านทานภายใต้แรงดัด
		$\phi_c$	= ตัวคูณต้านทานภายใต้แรงอัด
$loss$	= ส่วนที่เสียไปของแผ่นตั้งเนื่องจากการตัดเป็นเซลล์ูลาร์	$\chi$	= ตัวคูณลดกำลังเนื่องจากการโก่งเดาะ
$n$	= อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่แผ่นตั้ง, จำนวนช่องเปิด		
$r$	= รัศมีจเรชัน		

## ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์กำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติก ของหน้าตัดตั่งตัน

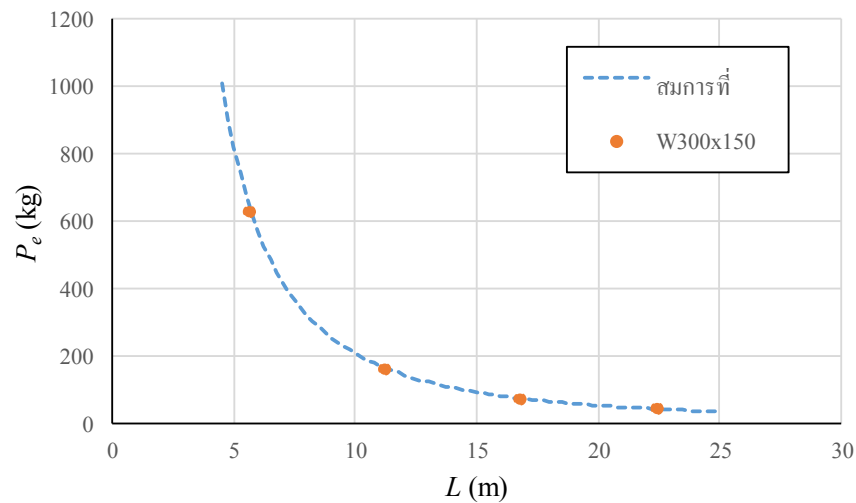
ภาพที่ ก.1 แสดงการโก่งเดาะแบบอิลาสติกจากแบบจำลองหน้าตัดตั่งตัน W300x150 ที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 0.5 โดยมีการโก่งเดาะเฉพาะรอบแกนหลักในรูปครึ่งไซน์ และไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ สำหรับอัตราส่วนความชะลูดอื่น ๆ เท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 ให้รูปร่างการโก่งเดาะเช่นเดียวกับอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 0.5



ภาพที่ ก.1 การโก่งเดาะแบบอิลาสติกจากแบบจำลอง W300x150

ภาพที่ ก.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกที่ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS ของหน้าตัดตั่งตัน W300x150 และสมการกำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกหรือน้ำหนักบรรทุกทุกออยเลอร์ตั้งสมการที่ 3.10 ที่อัตราส่วนความชะลูด  $\lambda$  เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ หรือมีความยาวเท่ากับ 5.61 m 11.21 m 16.82 m และ 22.42 m ตามลำดับโดยเส้นประและจุดหมายถึงค่ากำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกจากสมการที่ 3.10 และผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ตามลำดับ

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.10)$$



ภาพที่ ก.2 กำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกจากหน้าตัดตั้งต้นและสมการที่ 3.10

ผลการเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองหน้าตัดตั้งต้น W300x150 ได้ให้กำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกสอดคล้องกับสมการที่ 3.10 ที่ความยาว 5.61 m 11.21 m 16.82 m และ 22.42 m ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 4% และ 0.2% ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสมการที่ 3.10 และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองแสดงดังตารางที่ ก.1 เมื่อ  $P_{e,abq}$  เป็นผลการวิเคราะห์กำลังการโก่งเดาะแบบอิลาสติกจากแบบจำลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสมการที่ 3.10 และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

$\lambda$	$L$ (m)	$P_{e}$ สมการที่ 3.10 (kg)	$P_{e,abq}$ (kg)	ค่าความคลาด เคลื่อน (%)
0.5	5.61	650304	626430	-3.67
1	11.21	162576	161038	-0.95
1.5	16.82	72256	70738	-2.10
2	22.42	40644	40547	-0.24

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จักรภัทร พันธรักษ์พงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	16 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปี 2555 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนจิตรลดา ปี 2559 ปริญญาตรี (วศ.บ.) เกียรตินิยมอันดับ 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	80 ซ.สิทธิปัญญา ถ.สุทธิสาร เขตห้วยขวาง แขวงสามเสนนอก กทม. 10320

9336278



CD IThesis 6070137521 thesis / recv: 31072562 06:03:27 / seq: 43