



สมการจีนส่วนเทียบเท่าสำหรับการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสาไม้ปลายสอบ

พัชพงศ์ ธรรมวงศา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**EQUEATION OF EQUIVALENT MEMBER FOR DETERMINATION OF
CRITICAL LOAD OF TIMBER TAPERED COLUMNS**

PATCHAPONG THUMAWONGSA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
YEAR 2011**

COPY RIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง สมการชิ้นส่วนเทียบเท่าสำหรับการหาค่าน้ำหนักวิกฤตของเสาไม้ปลายสอบ

ผู้วิจัย นายพัชพงศ์ ธรรมวงศา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ พัทธสนานนท์)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติวิชัย)
..... คณบดี
(รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โภคา)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2554

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ที่ได้ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย อาจารย์ที่ให้วิชาความรู้ในการเรียนชั้นปีที่หนึ่งและปีที่สอง พร้อมทั้งให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ที่ได้ให้ความรู้แนวทาง และให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ให้ลุล่วง ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการค้นคว้าวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติขวิชัย อาจารย์ที่ให้วิชาความรู้ในการเรียนชั้นปีที่หนึ่งและปีที่สอง และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้งาน โปรแกรม ABAQUS ที่เป็นประโยชน์ อย่างยิ่งในวิทยานิพนธ์นี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ พัทธสนานนท์ อาจารย์ที่ให้วิชาความรู้ในการเรียนชั้นปีที่หนึ่งและปีที่สอง และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้งาน โปรแกรม ABAQUS ที่เป็นประโยชน์ อย่างยิ่งในวิทยานิพนธ์นี้

คณาจารย์ทุกท่านที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คณาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณาห่วงใย ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณกรมโยธาธิการและผังเมืองที่อนุญาตให้ผู้วิจัยลาศึกษาต่อ

และขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา บุคคลอันเป็นที่รัก ที่ได้เสียสละ ความห่วงใยทุนการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัย จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี


(นายพัชพงศ์ ธรรมวงศา)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : สมการชิ้นส่วนเทียบเท่าสำหรับการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสาไม้ปลายสอบ
 โดย : พิชพงศ์ ธรรมวงศา
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
 ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย

ศัพท์สำคัญ : น้ำหนักวิกฤต เสาไม้ปลายสอบ หน้าตัดเทียบเท่า ความยาวเทียบเท่า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมการหน้าตัดเทียบเท่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบเสาไม้ของสหรัฐอเมริกา และสมการความยาวเทียบเท่าที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนาจากการโค้งเคาะในช่วงยืดหยุ่นว่าจะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้หรือไม่ โดยศึกษาเสาหน้าตัดต้นปลายสอบด้านลึกและโค้งเคาะด้านลึก ที่มีสภาพการยึดรั้งพื้นฐาน 5 รูปแบบ คือ ยึดหมุดทั้งสองข้าง ยึดแน่นและยึดหมุด ยึดแน่นและปล่อยอิสระ ยึดแน่นทั้งสองข้าง ยึดแน่นและเลื่อนตามราง และศึกษาเสาที่มีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุ 2 รูปแบบ คือแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ผลการศึกษาพบว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่าไม้สามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้อย่างปลอดภัย ทั้งในกรณีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood หากประสงค์จะใช้สมการหน้าตัดเทียบเท่าประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบให้ปลอดภัยทั้งในกรณีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood จะต้องกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไว้ไม่เกินค่าผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A_{min}) และต้องทำการปรับลดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นในกรณีของความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุแบบ Ramberg Osgood เมื่อมีค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ในส่วนของสมการความยาวเทียบเท่า นั้น สามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยทั้งในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้อย่างปลอดภัยในทุกกรณี

ABSTRACT

TITLE : EQUATION OF EQUIVALENT MEMBER FOR DETERMINATION
OF CRITICAL LOAD OF TIMBER TAPERED COLUMNS

BY : PATCHAPONG THUMAWONGSA

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : CIVIL ENGINEERING

CHAIR : ASST. PROF. GRIENGSAK KAEWKULCHAI, Ph.D.

KEYWORDS : CRITICAL LOAD / TIMBER TAPERED COLUMNS / EQUIVALENT
CROSS SECTION / EQUIVALENT LENGTH

The main objective of this thesis is to verify that the equation defining an equivalent cross section of tapered columns proposed in the US timber design code and the equations defining an equivalent length proposed in this thesis are conservative to be used to determine the load carrying capacity of timber tapered columns in the inelastic buckling range because both types of equations were formulated on the basis of elastic behavior. This study considers tapered columns having taper and buckling in the depth direction only. Five support conditions are studied, i.e., hinge-roller, fixed-roller, fixed-free, fixed-fixed and fixed-guided. In addition, two types of stress-strain curve are considered, i.e., the elastic-perfectly plastic and Ramberg Osgood models. It was found that equation defining an equivalent cross section is unconservative to determine the load carrying capacity of timber tapered columns for both stress-strain curve in all cases. However, if this equation is to be employed, an upper limit for the maximum load equal to the multiple between yield stress (σ_y) and the smallest area (A_{min}) must be set. Moreover, the critical load value has to be reduced when the end ratio (r) is less than 0.6 together with using the Ramberg Osgood material model. On the other hand, the proposed equation defining an equivalent length is conservative in all cases when utilized to determine the load carrying capacity of timber tapered columns in both elastic and inelastic range.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 แนวทางและขั้นตอนการศึกษา	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	4
2.2 น้ำหนักวิกฤตของเสา	4
2.3 น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหุ่่น	5
2.4 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหุ่่น	16
2.5 การทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานการออกแบบ	19
2.6 บทสรุป	30
3 วิธีการดำเนินการศึกษาและเครื่องมือ	
3.1 บทนำ	31
3.2 กรณีที่จะทำการศึกษา	31
3.3 คุณสมบัติพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษา	31
3.4 วิธีดำเนินการศึกษา	36
3.5 การสร้างแบบจำลองของเสา	36
3.6 การหาน้ำหนักวิกฤตด้วยโปรแกรม ABAQUS	46
3.7 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 แนวทางการสรุปผลและการวิจารณ์ผลการศึกษา	47
3.9 บทสรุป	48
4 ผลการวิเคราะห์หาค่าพิกัดของเสา	
4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าพิกัดในช่วงยึดหยุ่น ของเสาปลายสอบ	49
4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าพิกัดในช่วงไม่ยึดหยุ่น	61
4.3 บทสรุป	70
5 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลที่ได้จากการศึกษา	
5.1 การยึดรั้งแบบปลายทั้งสองข้างยึดหมุน (Hinge-Roller)	72
5.2 การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller)	83
5.3 การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free)	91
5.4 การยึดรั้งแบบปลายยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed)	99
5.5 การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided)	107
5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตของเสาหน้าตัดเทียบเท่า กับเสาปลายสอบ	115
5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตของเสาความยาวเทียบเท่า กับเสาปลายสอบ	117
6 สรุปผลการศึกษา	
6.1 ผลการตรวจสอบสมการหน้าตัดเทียบเท่า	119
6.2 ผลการตรวจสอบสมการความยาวเทียบเท่า	120
6.3 กราฟออกแบบของเสา	121
6.4 ข้อเสนอแนะ	122
เอกสารอ้างอิง	123

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ก การทดสอบไม้ในห้องปฏิบัติการ	128
ข การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบ เนื่องจากการใช้ชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่มีขนาดแตกต่างกัน	133
ค ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหย่นของเสาปลายสอบ	136
ง ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่นของเสาปลายสอบ	144
จ ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่น ของเสาน้ำตัดเทียบเท่า	151
ฉ ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่น ของเสาความยาวเทียบเท่า	156
ช ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่นของเสาปลายสอบ	161
ซ ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่นของ เสาความยาวเทียบเท่า	172
ณ ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่นของ เสาน้ำตัดเทียบเท่า	183
ประวัติผู้วิจัย	194

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวประสิทธิผล	10
2.2 สมการแสดงตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าจากปลายด้านเล็กของ Criwell	20
2.3 สมการแสดงตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าจากปลายด้านเล็กของ นิธิตักดิ์ แก้วเสนา และคณะ	22
2.4 ค่า Design diameter (D) สำหรับเสากลมปลายสอบ	26
2.5 ค่า Design depth (d) สำหรับเสาสี่เหลี่ยมปลายสอบ	27
3.1 ลักษณะพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษาของเสาปลายสอบ เสาน้ำตัดเทียบเท่า เสาความยาวเทียบเท่า	32
3.2 การจำลองลักษณะการยึดรั้งที่ปลายด้านบนและล่างของเสาปลายสอบ	38
3.3 สมการแนะนำในการหาตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่า	40
3.4 ขนาดความลึก (d_c) ของเสาน้ำตัดเทียบเท่า	41
3.5 สมการความยาวเทียบเท่าของเสาปลายสอบในช่วงยึดหุ้ม (L_e)	44
4.1 น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหุ้มของเสาปลายสอบ	50
4.2 ค่า Bucking coefficient, k ตามลักษณะการยึดรั้ง ที่เสนอโดย นิธิตักดิ์ แก้วเสนา และคณะ	51
4.3 คำนำน้หนักวิกฤตของเสาปลายสอบที่คำนวณจากค่า Bucking coefficient, k	51
4.4 ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหุ้มของเสา ปลายสอบที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS (P_{cr}) กับน้ำหนักวิกฤต ในช่วง ยึดหุ้มของเสาปลายสอบที่คำนวณได้จากค่า Bucking coefficient, k (P_k)	52
4.5 ค่าความยาวเทียบเท่าที่ (L_e)	54
4.6 ค่าอัตราส่วนความยาวเทียบเท่าต่อความยาวเสาปลายสอบ ที่เป็นเสาดันแบบ (L_e/L) โดยที่ L เท่ากับ 400 เซนติเมตร	54
4.7 สมการความยาวเทียบเท่าของเสาปลายสอบในช่วงยึดหุ้ม	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.8	ความยาวเทียบเท่าของการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง แบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน แบบยึดแน่น ทั้งสองข้างและแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กเลื่อนตามราง	59
4.9	ความยาวเทียบเท่าของการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ	60
4.10	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้ง แบบยึดหมุนทั้งสองข้าง โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	62
4.11	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุน ทั้งสองข้าง โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	63
4.12	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาน้ำดัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้ง แบบยึดหมุนทั้งสองข้าง โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	65
4.13	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาน้ำดัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้ง แบบยึดหมุนทั้งสองข้าง โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	66
4.14	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้ง แบบยึดหมุนทั้งสองข้าง โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	68
4.15	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้ง แบบยึดหมุนทั้งสองข้าง โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ruberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	69
ข.1	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหมุนของเสาปลายสอบที่มีความยาว 400 ซม.	134
ข.2	ร้อยละของค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตที่วิเคราะห์ได้ เนื่องจากการใช้ขนาดชิ้นส่วนย่อย (Element) แตกต่างกัน	135
ข.1	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุน ทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.2	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	163
ข.3	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	164
ข.4	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	165
ข.5	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	166
ข.6	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุน ทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	167
ข.7	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	168
ข.8	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้ง แบบยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	169
ข.9	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มี การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	170
ข.10	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการ ยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	171

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ซ.1	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง(Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic 173
ซ.2	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบ เท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic 174
ซ.3	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic 175
ซ.4	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic 176
ซ.5	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic 177
ซ.6	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ 178
ซ.7	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ 179
ซ.8	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มี การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ 180
ซ.9	นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed- Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ 181

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ซ.10 วิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มี การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	182
ฅ.1 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มี การยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	184
ฅ.2 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	185
ฅ.3 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	186
ฅ.4 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed- Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	187
ฅ.5 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic	188
ฅ.6 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มี การยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	189
ฅ.7 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	190
ฅ.8 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มี การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	191

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ฉ.9 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed- Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$</p>	192
<p>ฉ.10 นำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ที่มีการยึดแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$</p>	193

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ลักษณะของเสาปลายสอบ	1
2.1	เสถียรภาพของสมดุล	4
2.2	ลักษณะของเสาตามสมมุติฐานของออยเลอร์	6
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นกับอัตราส่วนความชะลูด	12
2.4	เสาที่มีการโค้งงอเริ่มแรก	12
2.5	เส้นโค้งของน้ำหนักและการโค้งงอของเสาโค้งเริ่มแรก	15
2.6	ความสัมพันธ์ของ $\sigma - \epsilon$ สำหรับวัสดุหนึ่ง	16
2.7	กราฟของเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกน	19
2.8	จุดยึดครั้งที่ปลายที่เสนอโดย Criswell (1991) ก) ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น ข) ปลายด้านเล็กยึดแน่น ค) จูกรองรับอย่างง่าย	20
2.9	สภาพการยึดครั้งที่พิจารณา ก) แบบ A ยึดแน่น-จุดหมุน ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น ข) แบบ B ยึดแน่น-จุดหมุน ปลายด้านเล็กยึดแน่น ค) แบบ C ยึดแน่น-ตามราง ปลายใหญ่ยึดแน่น	21
2.10	ลักษณะของเสาปลายสอบของนิรศิกค์ แก้วเสนาและคณะ	21
2.11	เสาปลายสอบและเสาน้ำคัตเทียบเท่า	24
2.12	ตำแหน่งน้ำคัตเทียบเท่าตามมาตรฐานการออกแบบ ของ NDS1944-1986	24
3.1	รูปแบบของเสาที่จะทำการศึกษา	35
3.2	รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	35
3.3	การจำลองรูปแบบเสาปลายสอบ	37
3.4	รูปแบบการยึดครั้งที่เสาปลายสอบที่จะทำการศึกษา ก) ยึดหมุนทั้งสองข้าง ข) ยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก ค) ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก ง) ยึดแน่นทั้งสองข้าง จ) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก	39
3.5	ลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบกับเสาน้ำคัตเทียบเท่า	40
3.6	การจำลองรูปแบบ โดยใช้หลักการน้ำคัตเทียบเท่า	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 การจำลองรูปแบบของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่จะทำการศึกษา ก) ยึดหมุนทั้งสองข้าง ข) ยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก ค) ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก ง) ยึดแน่นทั้งสองข้าง จ) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก	43
3.8 ลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาค้นแบบกับเสาความยาวเทียบเท่า	43
3.9 การจำลองรูปแบบเสาโดยหลักการความยาวเทียบเท่า	45
3.10 การจำลองรูปแบบของเสาความยาวเทียบเท่าที่จะทำการศึกษา ก) ยึดหมุนทั้งสองข้าง ข) ยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก ค) ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก ง) ยึดแน่นทั้งสองข้าง จ) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก	45
3.11 ค่า P_{cr}	46
4.1 ลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาค้นแบบกับเสาความยาวเทียบเท่า	53
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller)	55
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed-Roller)	55
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free)	56
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed)	56
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided)	57
5.1 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาปลายสอบ , เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.3	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.29	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.3	108
5.30	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.4	109
5.31	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.5	110
5.32	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.6	111
5.33	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.7	112
5.34	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.8	113
5.35	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาน้ำัดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.9	114
ก.1	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของไม้	129
ก.2	การทดสอบไม้ตัวอย่างที่ 1	130
ก.3	การทดสอบไม้ตัวอย่างที่ 2	131
ก.4	การทดสอบไม้ตัวอย่างที่ 3	132
ค.1	การแบ่งชั้นส่วนบริเวณปลายฐานด้านใหญ่ของเสา	137
ค.2	node ปลายเสาด้านใหญ่	138

สารบัญภาพ (ต่อ)

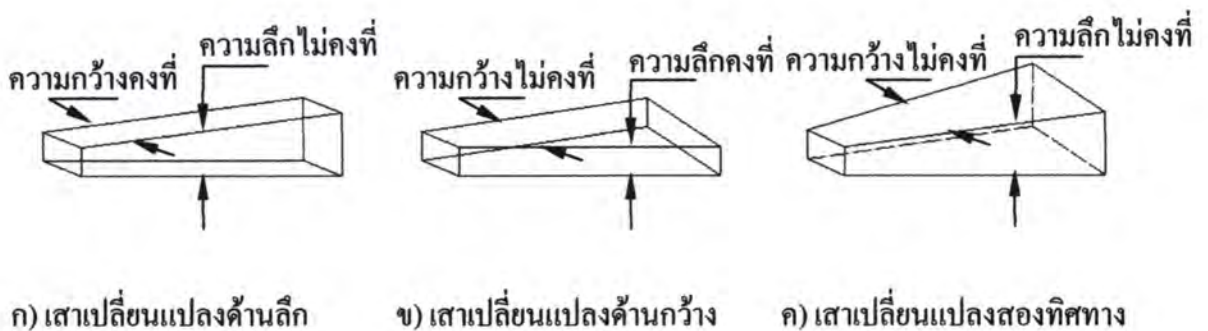
ภาพที่		หน้า
ค.3	ลักษณะที่น้ำหนักกระทำกับเสาปลายสอบ	140
ค.4	ลักษณะเสาปลายสอบที่เป็นเสาตัวอย่างการวิเคราะห์ในช่วงยืดหยุ่น	141
ค.5	ลักษณะเสาปลายสอบก่อนทำการวิเคราะห์	143
ค.6	ลักษณะเสาปลายสอบหลังทำการวิเคราะห์	143
ง.1	ลักษณะเสาปลายสอบที่เป็นเสาตัวอย่างการวิเคราะห์ในไม่ช่วงยืดหยุ่น	147
ง.2	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น ของเสาปลายสอบ	149
ง.3	ลักษณะเสาปลายสอบก่อนทำการวิเคราะห์	150
ง.4	ลักษณะเสาปลายสอบหลังทำการวิเคราะห์	150
จ.1	ลักษณะทางกายภาพของเสาหน้าตัดเทียบเท่า	152
จ.2	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤต ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า	154
จ.3	ลักษณะเสาหน้าตัดเทียบเท่าก่อนทำการวิเคราะห์	155
จ.4	ลักษณะเสาหน้าตัดเทียบเท่าหลังทำการวิเคราะห์	155
ฉ.1	ลักษณะทางกายภาพของเสาหน้าความยาวเทียบเท่า	157
ฉ.2	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤต ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า	159
ฉ.3	ลักษณะเสาความยาวเทียบเท่าก่อนทำการวิเคราะห์	160
ฉ.4	ลักษณะเสาความยาวเทียบเท่าหลังทำการวิเคราะห์	160

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำเสาที่มีลักษณะปลายสอบ (Tapered column) มาใช้ในงานก่อสร้างบ่อยครั้ง เช่น เสาคอนกรีตปลายสอบในงานเสาไฟฟ้าแรงสูง เสาเหล็กกลมปลายสอบรับโคมไฟ เกาะกลางถนนหรือป้ายแหล่งท่องเที่ยว หรือเสาไม้ที่ใช้ทั้งลำต้นเป็นเสาก็เป็นเสากลมปลายสอบเช่นเดียวกัน เสาปลายสอบนอกจากจะให้ความสวยงามด้านสถาปัตยกรรมแล้วยังสามารถช่วยลดวัสดุและน้ำหนักคงที่ในโครงสร้างด้วย ลักษณะของเสาปลายสอบจะมีหน้าตัดของปลายเสาทั้งสองข้างไม่เท่ากัน โดยจะมีการลดลงของหน้าตัดอย่างสม่ำเสมอจากปลายด้านใหญ่ไปสู่ปลายด้านที่เล็กกว่า การลดลงของหน้าตัดอาจลดลงทิศทางเดียวหรือทั้งสองทิศทางก็ได้ ภาพที่ 1.1 แสดงลักษณะของเสาปลายสอบชนิดต่างๆ



ภาพที่ 1.1 ลักษณะของเสาปลายสอบ

ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาปลายสอบ จะมีค่าอยู่ระหว่างความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาหน้าตัดคงที่ที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับปลายด้านเล็กกับด้านใหญ่ของเสาปลายสอบ ดังนั้น มาตรฐานการออกแบบเสาไม้ต่าง ๆ จึงได้กำหนดให้ใช้หลักการหน้าตัดคงที่เทียบเท่า (Equivalent Prismatic Member) โดยค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาไม้ปลายสอบหาได้จากสมการเส้นโค้งการออกแบบเสา (Column Curve) ของเสาหน้าตัดคงที่เทียบเท่านั่นเอง ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนิยามหน้าตัดเทียบเท่าที่ตำแหน่ง $L/3$ จากปลายเสาด้านเล็ก ซึ่งสามารถใช้กับ

เสาไม้ปลายสอบทุกสภาวะการยึดรั้ง แต่ในปัจจุบันมาตรฐานการออกแบบได้เสนอสมการสำหรับหาตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าโดยการพิจารณาสภาพการยึดรั้งที่ปลายของเสาด้วย อย่างไรก็ตามสมการหน้าตัดเทียบเท่าเหล่านี้มีพื้นฐานการพัฒนามาจากการโก่งเคาะในช่วงยึดหย่อน ซึ่งอาจไม่ปลอดภัยหากประยุกต์ใช้กับเสาที่มีพฤติกรรมการโก่งเคาะในช่วงไม่ยึดหย่อน เช่น เสาขาวปานกลาง เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่าดังกล่าวจะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหย่อนของเสาปลายสอบได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ และจากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ในปัจจุบันมีเพียงหลักการหน้าตัดเทียบเท่าที่ใช้ในการประยุกต์หาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาไม้ปลายสอบ ดังนั้นเพื่อให้มีแนวทางในการออกแบบเสาไม้ปลายสอบเพิ่มมากยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอหลักการความยาวเทียบเท่า (Equivalent Length) เพื่อใช้ในการหาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาไม้ปลายสอบเพิ่มเติมอีกแนวทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาไม้ปลายสอบทั้งในช่วงยึดหย่อนและไม่ยึดหย่อน

1.2.2 เพื่อตรวจสอบว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่าที่มาตรฐานการออกแบบเสาไม้ปลายสอบได้แนะนำไว้ ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนามาจากการโก่งเคาะในช่วงยึดหย่อน จะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยในช่วงไม่ยึดหย่อนของเสาไม้ปลายสอบได้หรือไม่

1.2.3 เพื่อนำเสนอหลักการความยาวเสาเทียบเท่า สำหรับใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบทั้งในช่วงยึดหย่อนและไม่ยึดหย่อน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 พิจารณาเฉพาะเสาไม้หน้าตัดตันที่มีปลายสอบในด้านลึง

1.3.2 ใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสาทั้งในช่วงยึดหย่อนและไม่ยึดหย่อน

1.3.3 ใช้ความโค้งงอเริ่มแรกของเสาไม่เกินหนึ่งส่วนหมื่นของความยาวเสา

1.3.4 ไม่พิจารณาการโก่งเคาะเฉพาะที่

1.3.5 ใช้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุ 2 แบบ ได้แก่ Elastic - Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

1.3.6 พิจารณาสภาพการยึดรั้ง 5 แบบ ได้แก่ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) ยึดแน่นและยึดหมุน (Fixed-Roller) ยึดแน่นและปล่อยอิสระ (Fixed-Free) ยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) และยึดแน่นและเลื่อนตามราง (Fixed-Guided)

1.4 แนวทางและขั้นตอนในการศึกษา

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม ABAQUS และสร้างแบบจำลองของเสาปลายสอบและเสาน้ำตัดคงที่ ในแต่ละกรณีการยึดรั้ง

1.4.3 ทดสอบตัวอย่างไม้เนื้อแข็ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่จะใช้ในการศึกษา ในกรณีรูปสมการของ Ramberg Osgood

1.4.4 วิเคราะห์หาคำนวณนักวิฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ ด้วยโปรแกรม ABAQUS

1.4.5 สร้างสมการความยาวเทียบเท่าสำหรับหาคำนวณนักวิฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ

1.4.6 สร้างแบบจำลองของเสาความยาวเทียบเท่าในโปรแกรม ABAQUS

1.4.7 สร้างแบบจำลองของเสาน้ำตัดเทียบเท่าในโปรแกรม ABAQUS โดยใช้ขนาดของหน้าตัดเทียบเท่าจากสมการหน้าตัดเทียบเท่าที่มาตรฐานการออกแบบเสาไม้ปลายสอบได้แนะนำไว้

1.4.8 วิเคราะห์หาคำนวณนักวิฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาความยาวเทียบเท่า และเสาน้ำตัดเทียบเท่า ด้วยโปรแกรม ABAQUS

1.4.9 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาคำนวณนักวิฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาทั้งสามประเภทในข้อ 1.4.8

1.4.10 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้จากการศึกษา

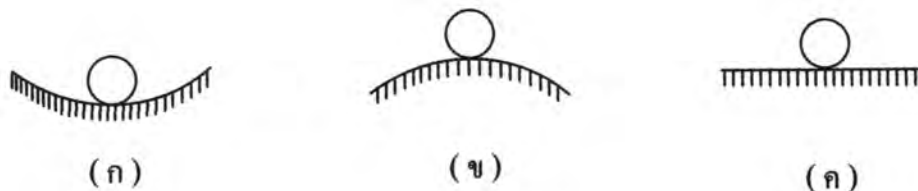
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เสาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับแรงอัด เช่น เสาในอาคารบ้านเรือนหรือก้านต่อระหว่างลูกสูบกับข้อเหวี่ยงในเครื่องจักรกล ปกติจะจำแนกประเภทของเสาออกเป็น เสาสั้น (short column) เสายาวปานกลาง (intermediate column) และเสายาว (long column) เนื่องจากมีพฤติกรรมในการรับแรงกดอัดไม่เหมือนกัน เสาสั้นจะหดตัวตามแนวแกนอย่างเดี๋ยวกและสามารถรับแรงกดอัดได้จนกระทั่งถึงหน่วยแรงอัดสูงสุดของวัสดุ ซึ่งการวิบัติเป็นลักษณะถูกอัดจนเสียรูป (crushing) ส่วนกำลังรับแรงกดอัดของเสายาวที่เร็วจะลดลงน้อยกว่าเสาสั้นเพราะเสามีการโก่งตัวออกทางข้างด้วย ทำให้ตลอดความยาวของเสาต้องรับทั้งโมเมนต์คดด้วยนอกเหนือจากแรงกดอัดตามแนวแกนที่กระทำ การวิบัติของเสายาวจะเกิดขึ้นที่ทุกหน่วยแรงในเสายังมีค่าอยู่ในช่วงพิกัดยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกของวัสดุ ซึ่งเรียกว่า การโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติก (elastic buckling) แต่ต่างจากส่วนเสาปานกลางที่เกิดการโก่งเคาะเช่นกัน แต่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นหรือช่วงอินอีลาสติก (inelastic buckling) อย่างไรก็ตาม จะพบว่า กำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าขึ้นอยู่กับ ขนาด ความยาวเสา ลักษณะการยึดปลาย และคุณสมบัติของวัสดุ (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

2.2 นำหนักวิกฤติของเสา



ภาพที่ 2.1 เติร์ภาพของการสมดุล (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

เสถียรภาพของเสาสามารถอธิบายได้จากสภาวะสมดุลของลูกบอลกลมที่อยู่ในลักษณะต่างๆ กัน จากภาพที่ 2.1 จะเห็นว่าสถานะเริ่มแรกของลูกกลมอยู่ในลักษณะสมดุลทั้งสามแบบ แต่ถ้าหากพิจารณาให้ถ่องแท้จะเห็นว่า ลักษณะสมดุลที่แสดงไว้นี้มีเสถียรภาพของการสมดุลแตกต่างกัน กล่าวคือในภาพที่ 2.1 (ก) ถ้ามีแรงเพียงเล็กน้อยกระทำต่อลูกกลม ลูกกลมนี้อาจเคลื่อนที่ไปตามแรงที่กระทำแต่ในที่สุดจะเคลื่อนกลับมายู่ที่ตำแหน่งเดิมได้ สภาวะสมดุลแบบนี้เรียกว่า การสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (stable) ซึ่งเปรียบได้กับเสาที่รับแรงอัดแล้วเกิดการโก่งตัว แต่หลังจากเอาแรงออกไป เสาสามารถคืนตัวกลับมายู่ในสถานะเดิมได้ ส่วนลูกกลมในภาพที่ 2.1 (ข) ถ้ามีแรงกระทำเพียงเล็กน้อย ลูกกลมจะเคลื่อนที่ออกจากสภาวะสมดุล โดยไม่เคลื่อนกลับมายังตำแหน่งเดิมอีกแต่อย่างใด เรียกสภาวะสมดุลลักษณะนี้ว่าการสมดุลแบบไร้ความมั่นคงหรือไร้เสถียรภาพ (unstable) ส่วนภาพที่ 2.1 (ค) เป็นอีกแบบหนึ่งของการสมดุลกล่าวคือ เมื่อมีแรงกระทำต่อลูกกลม ลูกกลมจะเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมและไปหยุดอยู่ที่หนึ่งซึ่งขึ้นกับขนาดของแรงที่กระทำ ลักษณะสมดุลแบบนี้จะอยู่ระหว่างลักษณะสมดุลของสองแบบแรกซึ่งเรียกว่าสมดุลแบบสะเทิน (neutral) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่รับแรงกดอัดจนถึงแรงวิกฤต (Critical Load) หมายความว่าเสาพร้อมที่จะเปลี่ยนจากวัสดุแบบสะเทินไปเป็นแบบไร้เสถียรภาพ หากมีแรงอัดกระทำเพียงเล็กน้อย (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

2.3 นำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Critical Load of Columns)

2.3.1 การคำนวณน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่น

การคำนวณน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาจะคำนวณหาจากสูตรของออยเลอร์ โดย Leonard Euler นักคณิตศาสตร์ชาวสวิส ได้นำสมการสำหรับหาน้ำหนักวิกฤตของเสาซึ่งเป็นเสาที่วิบัติในช่วงยืดหยุ่นโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ของเส้นโค้งการยืดหยุ่นของคาน $EId^2y/dx^2 = -M$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดภายในกับการโก่งตัวเพียงเล็กน้อยของคานดังภาพที่ 2.2 โดยที่ M คือ โมเมนต์ดัดภายใน, y คือ การโก่งตัวของคาน, E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น, x คือ ตำแหน่งที่พิจารณา และ I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคาน โดยมีสมมุติฐานดังนี้

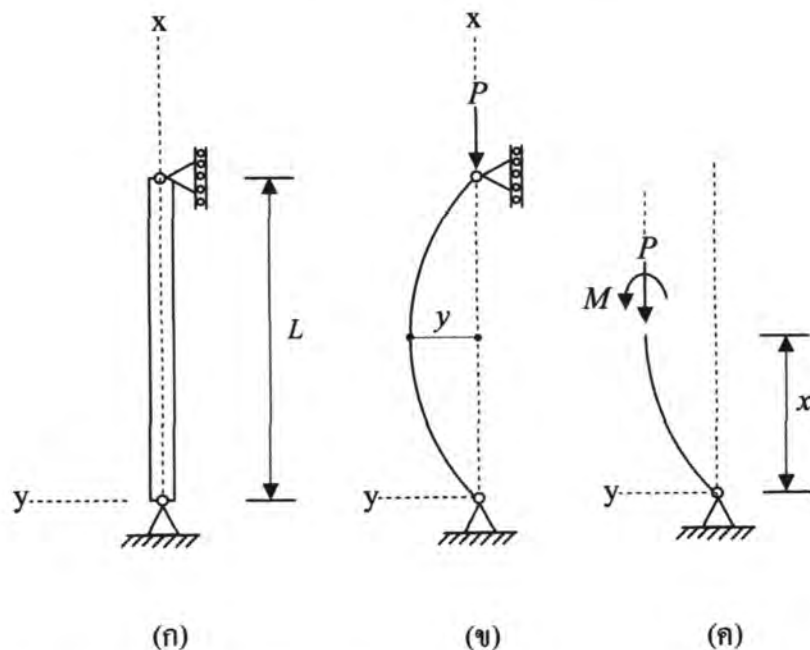
- (1) เสาจะต้องมีหน้าตัดเท่ากันและวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความยาวเสา
- (2) จุดยึดรั้งของเสาเป็นแบบอย่างง่าย คือ ปลายล่างยึดแบบจุดหมุน (Hinge) ส่วนปลายบนยึดแบบจุดหมุนและสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้เฉพาะในแนวตั้ง (Roller) เท่านั้น
- (3) เสาอยู่ในสภาพตรง แรงภายนอก (P) กระทำผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของเสา

(4) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียดของวัสดุเสาเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law)

(5) สมมุติให้การโก่งตัวของเสาเกิดน้อยมาก ดังนั้นจะได้ค่าความโค้ง ($1/\rho$) ซึ่ง ρ คือรัศมีความโค้งของการโก่งตัวของคาน ดังนี้

$$(1/\rho) = [d^2y/dx^2]/[1+(dy/dx)^2]^{1/2} \sim d^2y/dx^2$$

ทั้งนี้เพราะ $(dy/dx)^2$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ 1



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเสาตามสมมุติฐานของออยเลอร์

เสาตามภาพที่ 2.2 (ก) เป็นเสาตรงที่มีความยาวเท่ากับ L จุดยึดรั้งของเสาเป็นแบบอย่างง่าย คือ ปลายล่างยึดแบบบานพับ (Hinge) ส่วนปลายบนยึดแบบให้หมุนได้อย่างอิสระ และสามารถเคลื่อนขึ้นลงได้เฉพาะในแนวตั้ง (Roller) เท่านั้น และมีแรงภายนอก P กระทำผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของเสา, E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเสา, I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเสา สมมุติให้เสาเกิดการโก่งงอทางด้านข้างเท่ากับ y ตามภาพ 2.2 (ข) และเมื่อพิจารณาหน้าตัดที่ตำแหน่งเท่ากับ x จากปลายเสาข้าง จะพบว่ามีแรง P และโมเมนต์ M กระทำที่ตำแหน่งดังกล่าว ดังภาพที่ 2.2 (ค) จากสมการเส้นโค้งอีลาสติกจะได้

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M = -Py$$

หรือ

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P}{EI} y = 0$$

สมมติให้

$$k^2 = \frac{P}{EI}$$

ดังนั้นจะได้ สมการดิฟเฟอเรนเชียล เป็น

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = 0$$

ผลเฉลยของสมการคือ

$$y = e^{mx}$$

จะได้

$$y' = me^{mx}$$

$$y'' = m^2 e^{mx}$$

$$m^2 e^{mx} + k^2 e^{mx} = 0$$

$$m^2 + k^2 = 0$$

$$m^2 = -k^2$$

$$m = \pm ik$$

จะได้

$$y = e^{\pm ikx}$$

$$y = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx}$$

จากความสัมพันธ์ของ

$$e^{ikx} = \cos kx + i \sin kx$$

และ

$$e^{-ikx} = \cos kx - i \sin kx$$

จะได้

$$y = C_1(\cos kx + i \sin kx) + C_2(\cos kx - i \sin kx)$$

$$y = (C_1 + C_2) \cos kx + (C_1 - C_2) i \sin kx$$

โดยที่ C_1 และ C_2 คือ ค่าคงที่เพื่อจัดรูปสมการให้มีรูปแบบที่จะพิจารณาได้ง่ายขึ้น

กำหนดให้ $(C_1 - C_2) i = A$

และ $(C_1 + C_2) = B$

จะได้ $y = A \sin kx + B \cos kx$

ซึ่ง A และ B เป็นค่าคงที่สามารถหาค่าได้จากเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

(1) ที่ระยะ $x = 0$; $y = 0$ จะได้ $B = 0$

และ

$$y = A \sin kx$$

(2) ที่ระยะ $x = L$; $y = 0$ จะได้

$$A = \sin kL = 0$$

จากสมการอาจเป็นได้ว่า $A = 0$ หรือ $\sin kL = 0$ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้ ถ้า $A = 0$ แสดงว่าเสาไม่มีการโก่งตัวเลย ซึ่งเป็นไปไม่ได้ เพราะฉะนั้นจะได้ $\sin kL = 0$

$$\sin kL = 0 \text{ หรือ}$$

$$kL = n\pi \quad (n = 1, 2, 3,)$$

$$k = \frac{n\pi}{L}$$

$$k^2 = \frac{n^2 \pi^2}{L^2}$$

และจากที่กำหนด

$$k^2 = \frac{P}{EI}$$

จะได้
$$\frac{P}{EI} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2}$$

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (n = 1, 2, 3,) \quad (2.1)$$

และสมการเส้นโค้งอีลาสติกของเสาคือ

$$y = A \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (2.2)$$

แรงวิกฤตน้อยที่สุดที่ทำให้เสาเกิดการโก่งเคาะในช่วงอีลาสติก คือ เมื่อค่าของ $n = 1$ นั่นคือ

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.3)$$

สมการที่ (2.3) เรียกว่า สมการของออยเลอร์ และเรียกแรงวิกฤตที่ได้จากสมการนี้ว่า น้ำหนักวิกฤตของออยเลอร์ (Euler's Load)

เสาของออยเลอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีการยึดรูปแบบจุดหมุนทั้งสองข้าง แต่ถ้าเสามีการยึดรูปแบบอื่นๆ ก็สามารถวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตได้เช่นเดียวกัน โดยเริ่มจากพิจารณาสมการของเส้นโค้งอีลาสติกแล้วใช้เงื่อนไขการยึดรั้งคำนวณหาน้ำหนักวิกฤตของเสาในแต่ละกรณี ซึ่งจะให้ค่าที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการน้ำหนักวิกฤตของเสาที่มีปลายยึดรั้งแบบจุดหมุนดังนี้

กรณีปลายเสายึดหมุนทั้งสองข้าง(Hinge-Roller)
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.4)$$

กรณีปลายเสายึดแน่นทั้งสองข้าง(Fixed-Fixed)
$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.5)$$

กรณีปลายเสายึดแน่นและยึดหมุน(Fixed-Roller)
$$P_{cr} = \frac{2\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.6)$$

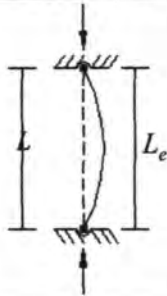
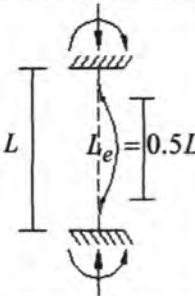
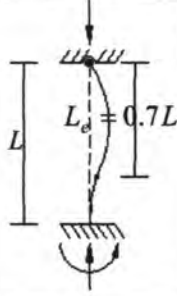
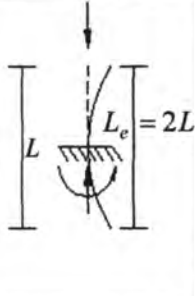
กรณีปลายเสายึดแน่นและปล่อยอิสระ(Fixed-Free)
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (2.7)$$

ถ้าหากพิจารณาสูตรของน้ำหนักวิกฤตของเสาที่มีเงื่อนไขปลายเสาแตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อจัดให้อยู่ในรูปน้ำหนักของออยเลอร์ จะได้ตัวหารเป็นค่าคงตัว (Constant) ตัวหนึ่งคูณกับความยาวเสา L ถ้าให้ L เป็นความยาวอิสระ (unsupported length) ซึ่งหมายถึงระยะของเสาระหว่างค้ำยัน (bracing) ค่าคงตัวเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความยาวประสิทธิภาพ K (effective length coefficient) สำหรับผลคูณของสัมประสิทธิ์กับความยาวอิสระ เรียกว่าความยาวประสิทธิภาพ L_e (effective length) ซึ่งหมายถึงระยะความยาวของเสาระหว่างจุดคดกลับ (inflection points) หรือจุดโมเมนต์คดในเสามีค่าเป็นศูนย์ อาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (สมโพธิ วิวิธเกยวงศ์, 2542)

$$L_e = KL \quad (2.8)$$

และสามารถสรุปค่าน้ำหนักวิกฤตสำหรับการยึดรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความยาวประสิทธิภาพ (สมโพธิ วิวิธเกยวงศ์, 2542)

เงื่อนไขปลายเสา	ยึดหมุน-ยึดหมุน	ยึดแน่น-ยึดแน่น	ยึดแน่น-ยึดหมุน	ยึดแน่น-อิสระ
ความยาวประสิทธิภาพ L_e				
สัมประสิทธิ์ของความยาวประสิทธิภาพ K	1.0	0.5	0.7	2.0
น้ำหนักวิกฤตโดยใช้ความยาวประสิทธิภาพในสูตรของออยเลอร์	$\frac{\pi^2 EI}{L^2}$ น้ำหนักออยเลอร์	$\frac{\pi^2 EI}{(0.5L)^2}$ 4 เท่าของน้ำหนักออยเลอร์	$\frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2}$ 2 เท่าของน้ำหนักออยเลอร์	$\frac{\pi^2 EI}{(2L)^2}$ (1/4) เท่าของน้ำหนักออยเลอร์

2.3.2 ขีดจำกัดสูตรของออยเลอร์ (Limitation of Euler's Formula)

จากสมการที่ (2.3)
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

จะได้หน่วยแรงวิกฤตคือ
$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI / A}{L^2}$$

เนื่องจาก ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด $I = A(r_g)^2$

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของเสา

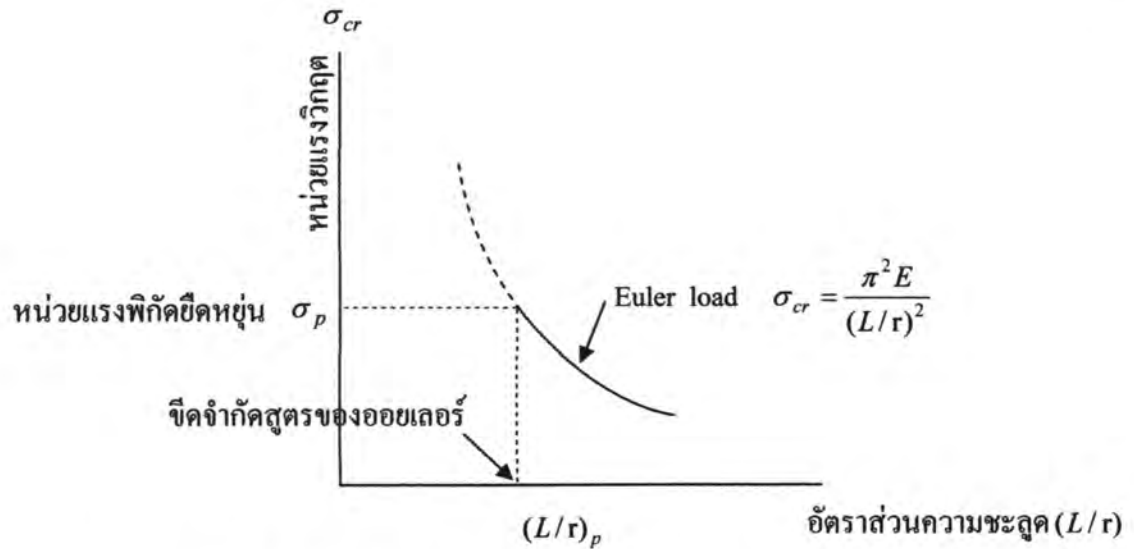
$r_g =$ รัศมีไจเรชั่นที่น้อยที่สุด

ฉะนั้น หน่วยแรงวิกฤตคือ
$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r_g)^2} \quad (2.9)$$

สมการ (2.9) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวิกฤตกับอัตราส่วนความชะลูด (L/r_g) ของเสา (slenderness ratio) สำหรับการโก่งเคาะของเสาในช่วงยืดหยุ่น แต่เนื่องจากสมมุติฐานการวิเคราะห์กำหนดว่า วัสดุมีคุณสมบัติตามกฎของฮุก นั่นคือ การวิเคราะห์กระทำภายใต้ขีดจำกัดยืดหยุ่น หน่วยแรงวิกฤตที่เกิดขึ้นภายในเสาดังกล่าวต้องมีค่าไม่เกินหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น σ_p ดังนั้นจากสมการที่ (2.9) หากแทนค่า σ_{cr} ด้วย σ_p ก็จะสามารถหาพิกัดต่ำสุดของค่าอัตราส่วนความชะลูดที่เสาจะเกิดการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่นได้ (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548) ดังนี้

$$(L/r_g)_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} \quad (2.10)$$

ถ้าหากเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่ได้จากสูตรของออยเลอร์กับอัตราส่วนความชะลูด ตามสมการที่ (2.10) จะมีลักษณะดังภาพที่ 2.3

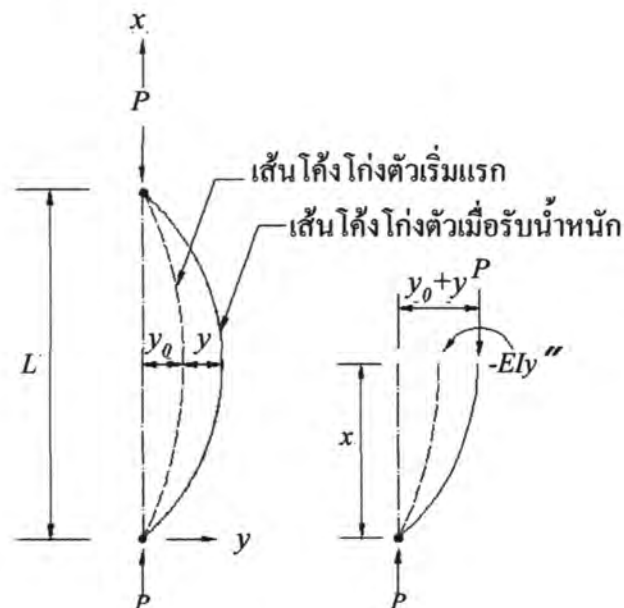


ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นกับอัตราส่วนความชะลูด

(วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

2.3.3 เสาที่มีการโค้งงอเริ่มแรก (Initially bent columns)

โดยปกติเสาที่ใช้ในงานทั่วไปจะโค้งงอบ้างเล็กน้อย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของเสาที่มีการโค้งงอเริ่มแรกโดยสมมติให้คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเสาเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law) แรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางรวมมวลของหน้าตัด และสมมติให้การโค้งที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าเล็กน้อย (small deflection)



ภาพที่ 2.4 เสาที่มีการโค้งงอเริ่มแรก

จากภาพที่ 2.4 เสามีความโค้งงอเริ่มแรก y_0 จูกรองรับแบบธรรมดา และสมมุติให้เส้นโค้งเริ่มแรกอยู่ในรูปของ เส้นโค้งไซน์

จะได้
$$y_0 = a \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.11)$$

และให้ y เป็นระยะแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นขณะที่แรง P กระทำกับเสา เมื่อเสายู่ในสมดุล ผลรวมของโมเมนต์ภายในและภายนอกที่ระยะ x ใดๆ เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$EIy'' + P(y_0 + y) = 0$$

แทนค่า y_0 จากสมการ (2.11) และ $K^2 = \frac{P}{EI}$

จะได้
$$y'' + K^2 y = -K^2 a \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.12)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการ (2.12) ประกอบด้วยสองส่วนคือ ฟังก์ชันเต็ม และผลเฉลยเฉพาะราย ดังนั้น

$$y = y_c + y_p \quad (2.13)$$

และ

$$y_c = A \sin Kx + B \cos Kx \quad (2.14)$$

โดยที่ A, B คือ ค่าคงที่ค่าๆหนึ่ง

$$y_p = C \sin \frac{\pi x}{L} + D \cos \frac{\pi x}{L} \quad (2.15)$$

โดยที่ C, D คือ ค่าคงที่ค่าๆหนึ่ง

แทน y_p ในสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.13) และจัดเทอมใหม่ จะได้

$$[C(K^2 - \frac{\pi^2}{L^2}) + K^2 a] \sin \frac{\pi x}{L} + [D(K^2 - \frac{\pi^2}{L^2})] \cos \frac{\pi x}{L} = 0$$

สมการข้างบนจะเป็นจริงได้ทุก ๆ ค่า x ถ้าตัวคูณควมของไซน์ และ โคไซน์ เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$C = \frac{a}{(\pi^2 / K^2 L^2) - 1}$$

และ $D \neq 0$, ฉะนั้น $K^2 - \frac{\pi^2}{L^2} = 0$

$$K^2 = \frac{\pi^2}{L^2}$$

หรือ $P = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$

เนื่องจากเสาชนิดนี้มีค่าการโค้งงอเริ่มแรก ฉะนั้นค่า P ไม่ควรจะเท่ากับ $\pi^2 EI / L^2$ ซึ่งเท่ากับน้ำหนักของออยเลอร์ ดังนั้น D จะต้องเท่ากับศูนย์

กำหนดให้

$$\alpha = P / P_E$$

ซึ่ง

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \text{Euler load}$$

ดังนั้น

$$C = \frac{a}{(1/\alpha) - 1} = \frac{\alpha a}{1 - \alpha}$$

แทนค่า C และ D ลงในสมการ (2.15)

$$y_p = \frac{a\alpha}{1-\alpha} \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.16)$$

และ

$$y = A \sin Kx + B \cos Kx + \frac{\alpha}{1-\alpha} a \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.17)$$

ค่าคงที่ A และ B ในสมการ (2.17) หาได้จากเงื่อนไขที่จุดรองรับของเสา คือ ที่ $x = 0$, $y = 0$ และที่ $x = L$, $y = 0$ ดังนั้น $B = 0$ และ $A \sin KL = 0$

ซึ่ง A อาจจะเป็นศูนย์หรือ $\sin kL = 0$ ถ้าให้ $\sin KL = 0$ แรง P จะเท่ากับ P_E ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่ต้องการ ดังนั้น A ต้องเท่ากับศูนย์ แทนค่า A และ B ลงในสมการ (2.16) จะได้

$$y = \frac{\alpha}{1-\alpha} a \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.18)$$

และการโก่งตัวรวมคือ

$$y_T = y_0 + y = \left(1 + \frac{\alpha}{1-\alpha}\right) a \sin \frac{\pi x}{L}$$

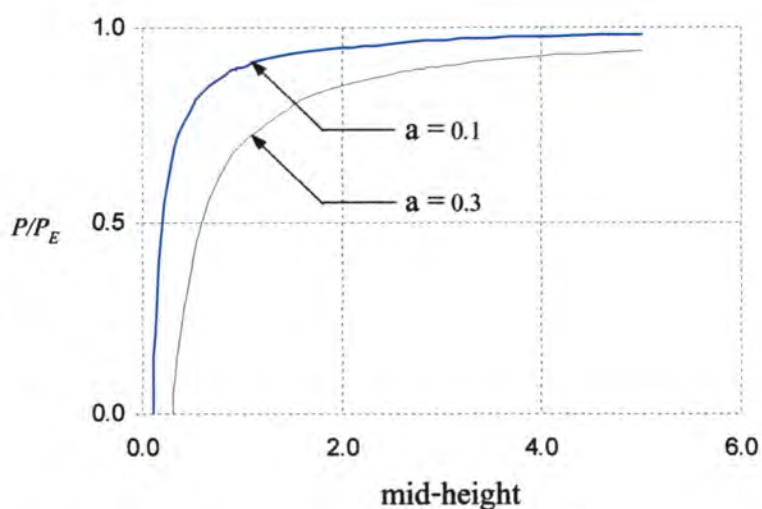
หรือ

$$y_T = \frac{a}{1-\alpha} \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.19)$$

และการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของเสา (δ) หาโดยแทน $x = L/2$ ในสมการ (2.19)

$$\delta = \frac{a}{1-\alpha} = \frac{a}{1-(P/P_E)} \quad (2.20)$$

ภาพที่ 2.5 แสดงถึงผลของสมการ (2.20) โดยกำหนดให้ a เท่ากับ 0.1 และ 0.3

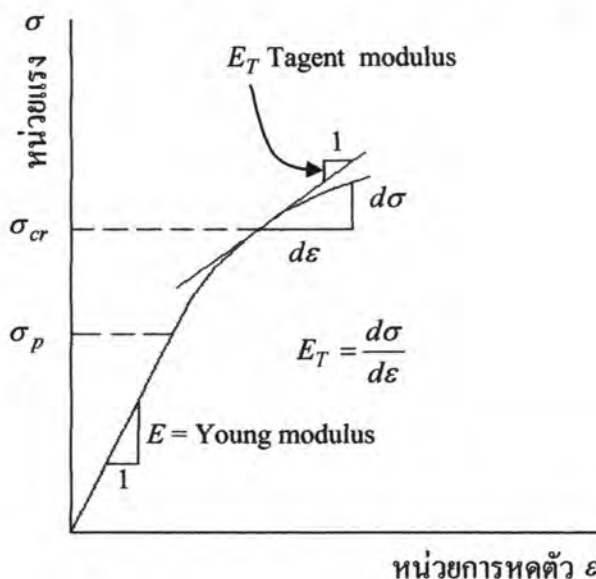


ภาพที่ 2.5 เส้นโค้งของน้ำหนักและการโก่งของเสาโค้งเริ่มแรก

จาก เส้นโค้งทั้งสองจะเห็นว่าเสาเริ่มโก่งทันทีที่ถูกแรง P กระทำ ในระยะแรกๆ การโก่งจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ และจะเพิ่มเร็วขึ้นในขณะที่แรง P มีค่าใกล้เคียงกับแรง P_E ณ ตำแหน่งที่แรง P เท่ากับ เสาโค้งที่มีค่า a มากกว่าจะโก่งมากกว่าเสาที่โค้งที่มี a น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ขณะที่ P เข้าใกล้ P_E น้ำหนัก P และค่าการโก่งจะเพิ่มขึ้นในขนาดที่ใกล้เคียงกัน ไม่ว่าค่า a จะต่างกันหรือไม่ และโดยทั่วไปแล้ว แรง P จะมีค่าน้อยกว่า Euler load (P_E) เสมอ

2.4 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Critical Load of Columns)

เสาที่โก่งเคาะในช่วงไม่ยืดหยุ่นจะเป็นเสาขาวปานกลาง (intermediate column) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเป็นหน่วยแรงรวมซึ่งเกิดจากหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงคด ซึ่งมีค่ามากกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่น อีกทั้งอัตราส่วนความชะลูดของเสาขาวปานกลางน้อยกว่าของเสาขาว สูตรของออยเลอร์จึงนำมาใช้กับเสาขาวปานกลางไม่ได้ การคาดคะเนน้ำหนักวิกฤตของเสาที่โก่งเคาะในช่วงไม่ยืดหยุ่นต้องพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับการหดตัวของวัสดุ ดังภาพที่ 2.6 (เพราะหากใช้สูตรของออยเลอร์จะได้ค่าที่ไม่ถูกต้องและมีค่าเกินกว่าความเป็นจริงไปมาก) จากภาพที่ 2.6 จะเห็นว่าหน่วยแรงอัดในช่วงไม่ยืดหยุ่นจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด รวมถึงค่าโมดูลัสของวัสดุก็ไม่คงที่โดยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามค่าของหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้น (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของ σ - ϵ สำหรับวัสดุหนึ่ง (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

น้ำหนักวิกฤตของเสาที่โก่งเคาะในช่วงไม่ยืดหยุ่น อาจพิจารณาได้จากทฤษฎีโมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus theory) และทฤษฎีโมดูลัสลด (Reduce modulus theory) ซึ่งเสนอโดย Freidrich Engesser ใน ค.ศ. 1889 และในปี ค.ศ. 1895 ตามลำดับ ดังนี้

2.4.1 ทฤษฎีโมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus theory)

สมมติฐานของทฤษฎีโมดูลัสสัมผัส คือ เสาจะยังไม่โก่งเคาะจนกว่าจะรับน้ำหนักวิกฤต และเมื่อเสาเกิดการโก่งเคาะ หน่วยแรงวิกฤตในเสาให้มีค่าขึ้นกับค่าโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) ทั้งนี้ค่าโมดูลัสสัมผัส เป็นค่าความชัน ณ จุด ๆ หนึ่ง บนเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด จากภาพที่ 2.6 จะเห็นว่ามีค่าเท่ากับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E ของวัสดุเมื่อหน่วยแรงอัดน้อยกว่าหรือเท่ากับหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่นแต่จะมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อหน่วยแรงอัดมากขึ้น จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่จุดคราก ภายได้สมมติฐานดังกล่าวของ Frederic Degasser จะได้น้ำหนักวิกฤตของเสาเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน โดยที่หน่วยแรงอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นคล้ายกับสมการของฮอยเลอร์ เพียงแต่แทนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E ด้วยค่าโมดูลัสสัมผัส E_T ดังนี้

$$\text{น้ำหนักวิกฤตของเสาในช่วงไม่ยืดหยุ่น} \quad P_{cr} = \pi^2 E_T I / L^2 \quad (2.21)$$

$$\text{หน่วยแรงวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น} \quad \sigma_{cr} = \pi^2 E_T / (L/r)^2 \quad (2.22)$$

ซึ่งเรียกว่าสูตร Tangent – Modulus

2.4.2 ทฤษฎีโมดูลัสลด (Reduce modulus theory)

สมมติฐานของทฤษฎีโมดูลัสลด คือ ขณะที่เสาเกิดการโก่งเคาะจะมีทั้งหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นทางด้านเว้าและลดลงทางด้านนูนของเสา หน่วยแรงอัดวิกฤตที่เพิ่มขึ้นให้เพิ่มตามค่าโมดูลัสสัมผัส E_T ส่วนหน่วยแรงวิกฤตที่ลดลงให้ลดลงตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E และได้กำหนด E_R เป็นโมดูลัสลด (Reduce modulus) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ E และ E_T น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นจะสามารถหาได้จากการแทน E ด้วย E_R ในสูตรของฮอยเลอร์ ดังนี้

$$\text{น้ำหนักวิกฤตของเสาในช่วงไม่ยืดหยุ่น} \quad P_{cr} = \pi^2 E_R I / L^2 \quad (2.23)$$

โดยที่ $E_R = 2EE_T / (E + E_T)$ สำหรับเสารูปตัว I หรือ WF และ

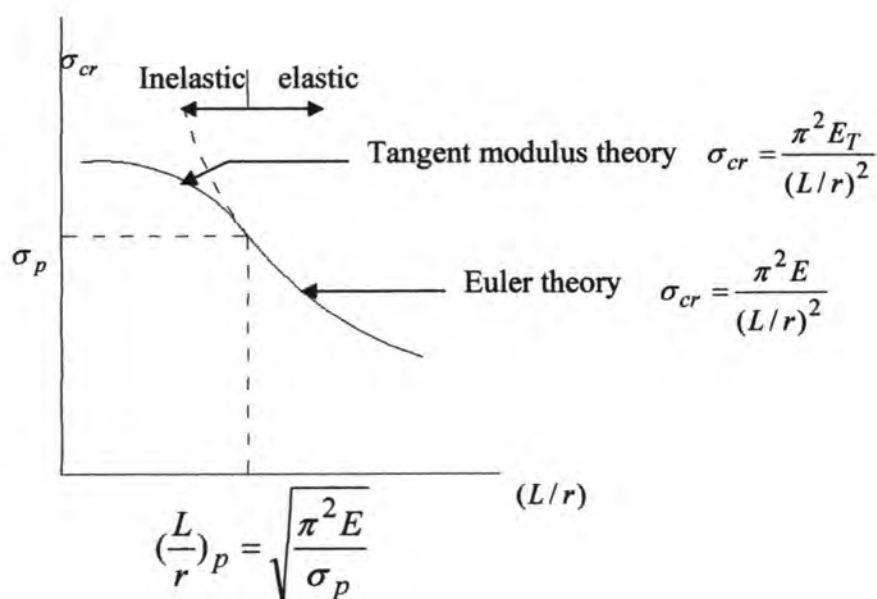
$E_R = 4EE_T / (\sqrt{E} + \sqrt{E_T})^2$ สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในปี ค.ศ 1947 F.R.Shanley ได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบทฤษฎีทั้งสองและได้ให้ผลสรุปว่า ทฤษฎีโมดูลัสสัมผัสให้ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้ถูกต้องมากกว่าแม้ค่าจะต่ำไปบ้างก็ตาม

การหาน้ำหนักวิกฤตสำหรับการโก่งเคาะของเสาในช่วงไม่ยืดหยุ่นโดยใช้ทฤษฎีโมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus theory) หรือทฤษฎีโมดูลัสลด (Reduce modulus theory) ตามที่กล่าวข้างต้นจะยังไม่สามารถคำนวณหาค่าได้ทันที เนื่องจากไม่ทราบค่าของโมดูลัสสัมผัส E_T สาเหตุเพราะค่าของ E_T ขึ้นกับหน่วยแรงวิกฤตที่เกิดขึ้นจริงบนหน้าตัด ดังนั้น การหาค่าน้ำหนักวิกฤตของเสาที่โก่งเคาะในช่วงไม่ยืดหยุ่นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยการสมมุติค่าหน่วยแรงวิกฤต (σ_{cr}) ขึ้นมาก่อน แล้วหาค่าโมดูลัสสัมผัส E_T จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของวัสดุ (Stress – strain curve) จากนั้นจึงนำค่าของ E_T ที่ได้ไปแทนลงในสมการ (2.23) เพื่อหาค่าของหน่วยแรงวิกฤต σ_{cr} ถ้าได้ค่า σ_{cr} เท่ากับค่าที่สมมุติไว้ในตอนแรก ก็แสดงว่าค่า σ_{cr} ที่สมมุตินั้นเป็นหน่วยแรงวิกฤตที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นก็นำค่า E_T ไปใช้คำนวณหาค่าแรงวิกฤต P_{cr} จากสมการ (2.21) แต่ถ้าค่าหน่วยแรงวิกฤต σ_{cr} ยังไม่ตรงหรือใกล้เคียงกับที่ได้สมมุติไว้ ก็ให้สมมุติค่า σ_{cr} ขึ้นมาใหม่แล้วทำซ้ำแบบเดียวกับที่กล่าวข้างต้นจนกว่าจะได้ใกล้เคียงกัน (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

2.4.3 Column curve

เมื่อนำสมการ (2.22) มาเขียนใหม่เป็น อัตราส่วนความชะงืด $L/r = \pi\sqrt{E_T/\sigma_{cr}}$ จะเห็นว่า หากนำค่าของ σ_{cr} และ E_T คู่หนึ่งแทนค่าลงไป จะได้ค่าอัตราส่วนความชะงืด (L/r) สำหรับค่าหน่วยแรงวิกฤตนั้นๆ ซึ่งเมื่อนำค่าของ σ_{cr} และ L/r แต่ละคู่ ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวิกฤต σ_{cr} กับอัตราส่วนความชะงืด ของเสาเมื่อโก่งเคาะในช่วงไม่ยืดหยุ่น จะได้กราฟของเสา (column curve) ในช่วงไม่ยืดหยุ่น ที่ต่อเนื่องมาจากช่วงยืดหยุ่น (elastic) ได้ที่ $(L/r)_p$ ที่ได้เคยแสดงไว้ในภาพที่ 2.3 ซึ่งเรียกว่า กราฟของเสา ดังภาพที่ 2.7 นั่นคือ หากทราบอัตราส่วน ความชะงืดของเสา จะหาค่าหน่วยแรงวิกฤตได้ทันทีจากกราฟนี้และทำให้ทราบน้ำหนักวิกฤตของเสาที่สามารถรับได้ เมื่อลดกำลังลงโดยใช้อัตราส่วนความปลอดภัยก็จะได้ค่าแรงอัดใช้งานสำหรับออกแบบเสานั้นๆ (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)



ภาพที่ 2.7 กราฟของเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกน (วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และ วรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร, 2548)

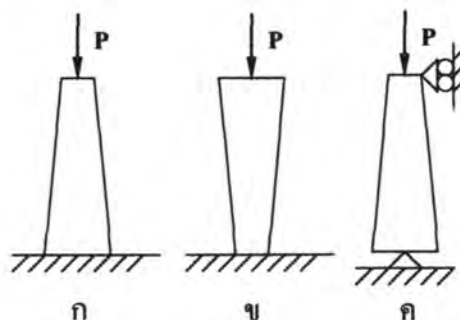
2.5 การทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานการออกแบบ

2.5.1 การทบทวนวรรณกรรม

2.5.1.1 การโค้งเคาะของเสาปลายสอบในช่วงยืดหยุ่น

การวิเคราะห์หาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาปลายสอบนั้น Timoshenko (1908) เป็นผู้นำเสนอคนแรกโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้ปัญหาสมการสมดุลของเสาที่เกิดการโค้งตัวเล็กน้อย หลังจากนั้นเป็นต้นมาได้มีการนำเสนอผลการวิจัยเกี่ยวกับเสาปลายสอบอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น Dinnik (1929); Bleich (1952); Gatewood (1954); Gere and Carter (1962); Fogel and Ketter (1962); Ermopoulos (1986) ได้ใช้วิธีการประมาณค่าทางตัวเลข (Numerical methods) เป็นเครื่องมือในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาปลายสอบ และ Salvadori (1949); Girijavallabhan (1969); Iremonger (1980) ได้ประยุกต์ใช้ finite difference ในการหาน้ำหนักบรรทุกทุกโค้งเคาะของเสาปลายสอบ หรือ Godden (1965); Wang (1967); Criswell (1991) ได้ใช้วิธีการของนิวมาร์ค (Newmark's method) ในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาปลายสอบ ต่อมาได้มีผู้วิจัยนำวิธี finite element and energy methods มาใช้ในการหาน้ำหนักบรรทุกทุกโค้งเคาะของเสาปลายสอบซึ่งได้แก่ Lee et al. (1972); Karabalis and Beskos (1983); Williams and Aston (1989); Smith (1988); Chan (1990) และที่สำคัญในปี ค.ศ.1991 Criswell ได้ใช้วิธีการของนิวมาร์ค (Newmark's method) เสนอสมการสำหรับหาค่าแห่งของหน้า

คัตของชิ้นส่วนเทียบเท่าจากการศึกษาด้วยวิธีทางตัวเลข โดยได้พิจารณาจตุรรองรับ 3 แบบ ได้แก่ แบบปลายด้านใหญ่ยึดแน่น แบบปลายด้านเล็กยึดแน่น และแบบจตุรรองรับอย่างง่าย ดังภาพที่ 2.8 โดยที่สมการของตำแหน่งหน้าตัดของชิ้นส่วนเทียบเท่าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนมิติที่ปลาย, r โดยที่ r ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 สำหรับสมการที่จะใช้ในการหาตำแหน่งหน้าตัดเทียบเท่า แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 (Criswell, 1991)



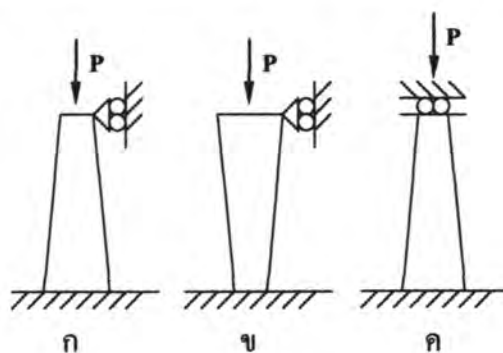
ภาพที่ 2.8 จุดยึดครั้งที่ปลายที่เสนอโดย Criswell ก) ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น ข) ปลายด้านเล็กยึดแน่น ค) จตุรรองรับอย่างง่าย (Criswell, 1991)

ตารางที่ 2.2 สมการแสดงตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าจากปลายด้านเล็ก (Criswell, 1991)

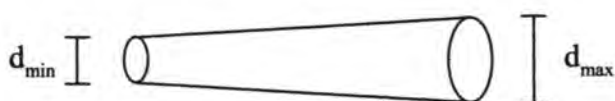
สภาพยึดครั้งที่ปลาย	ขนาดหน้าตัดเปลี่ยนแปลงใน 2 ทิศทาง	ขนาดหน้าตัดเปลี่ยนแปลงในด้านเล็ก	
		โก่งเคาะด้านเล็ก	โก่งเคาะด้านกว้าง
ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น (ก)	$0.52 + 0.18r$	$0.55 + 0.15r$	$0.63 + 0.07r$
ปลายด้านเล็กยึดแน่น (ข)	$0.12 + 0.18r$	$0.15 + 0.15r$	$0.23 + 0.07r$
จตุรรองรับอย่างง่าย (ค)	$0.32 + 0.18r$	$0.35 + 0.15r$	$0.43 + 0.07r$

ต่อมา นิธิศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ (2548) ได้พิจารณาเห็นว่า มาตรฐานการออกแบบที่มีในปัจจุบันไม่ได้พิจารณาเสาที่มีจุดยึดแบบหาค่าไม่ได้ทางสถิติศาสตร์ (Indeterminate column) เช่น เสาที่มีการยึดแบบยึดแน่น-ยึดหมุด (Fixed-Pinned) และเสาที่มีการยึดแบบยึดแน่น-เลื่อนตามราง (Fixed-Guided) เป็นต้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อประมาณค่าตำแหน่งหน้าตัดของชิ้นส่วนเทียบเท่าของเสาที่มีจตุรรองรับแบบหาค่าไม่ได้ทางสถิติศาสตร์จำนวน 3 แบบ ได้แก่ A แบบยึดแน่น-จุดหมุน โดยปลายด้านใหญ่ยึดแน่น แบบ B ยึดแน่น-จุดหมุน โดยปลายด้านเล็กยึดแน่น แบบ C ยึดแน่น-ตามราง ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.9

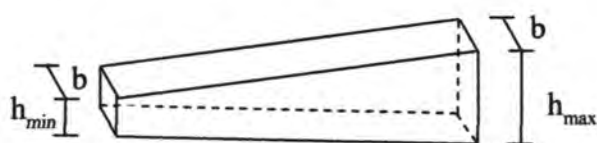
ซึ่งในแต่ละแบบจะมีการวิเคราะห์เสา 3 ชนิด คือ ชนิดที่ 1 เสาที่มีปลายสอบทั้งด้านเล็กและด้านกว้าง ชนิดที่ 2 เสาที่มีปลายสอบด้านเล็กแต่คงที่ด้านกว้าง ชนิดที่ 3 เสาที่มีปลายสอบด้านกว้างแต่คงที่ด้านเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งลักษณะจตุรกรรับและชนิดของเสา จะสามารถแบ่งรูปแบบการพิจารณาได้เป็น 9 กรณีคือ A1, B1, C1, A2, B2, C2, A3, B3 และ C3



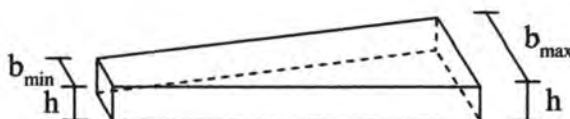
ภาพที่ 2.9 สภาพการยึดรั้งที่พิจารณา ก) แบบ A ยึดแน่น-จุดหมุน ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น ข) แบบ B ยึดแน่น-จุดหมุน ปลายด้านเล็กยึดแน่น ค) แบบ C ยึดแน่น-เลื่อนตามราง ปลายใหญ่ยึดแน่น (นิริศศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ, 2548)



ก) เสาชนิดที่ 1 เสากลมปลายสอบสม่ำเสมอทั้งสองทิศทาง



ข) เสาชนิดที่ 2 เสาสี่เหลี่ยมตันปลายสอบด้านเล็ก



ค) เสาชนิดที่ 3 เสาสี่เหลี่ยมตันปลายสอบด้านกว้าง

ภาพที่ 2.10 ลักษณะเสาปลายสอบที่นิริศศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ ได้ทำการศึกษา (นิริศศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ, 2548)

การศึกษาได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หา
น้ำหนักบรรทุกโก่งเคาะของเสาโดยวิธีของ Newmark ผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นสมการสำหรับ
หาตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าจากปลายด้านล่างได้ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการแสดงตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าจากปลายด้านล่าง (นิธิตักดิ์ แก้วเสนา
และคณะ, 2548)

สภาพการยึดครั้งที่ ปลาย	หน้าตัดเปลี่ยนแปลง ทั้งสองทิศทาง	หน้าตัดเปลี่ยนแปลง ด้านล่าง	หน้าตัดเปลี่ยนแปลง ด้านบน
A	$0.31+0.20r$	$0.34+0.17r$	$0.41+0.09r$
B	$0.31+0.20r$	$0.34+0.17r$	$0.41+0.09r$
C	$0.37+0.14r$	$0.38+0.13r$	$0.39+0.12r$

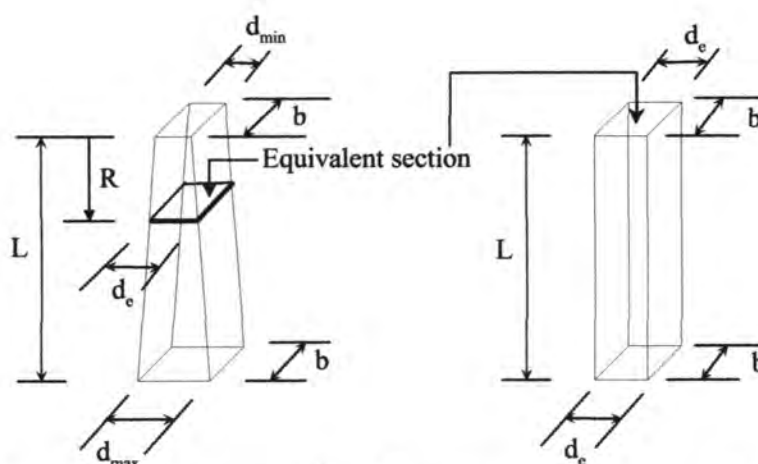
2.5.1.2 การโก่งเคาะของเสาปลายสอบในช่วงไม้อัดหุ่น

การศึกษาพฤติกรรมการโก่งเคาะในช่วงไม้อัดหุ่นของเสาปลายสอบ
เริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 1949 โดย Young (Young, 1949) ได้ศึกษาพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาโดยใช้
ทฤษฎีของ Engesser-Considere และใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ในการ
แก้ปัญหาการโก่งเคาะของเสาปลายสอบ โดยสมมติให้เสาเป็นเสาตรงและไม่พิจารณาผลของหน่วย
แรงคงค้างในวัสดุ (residual stress) ต่อมาในปี ค.ศ.1968 Appl and Smith (Appl and Smith, 1968)
ได้นำเสนอผลการศึกษาเสาปลายสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและ
ความเครียดแบบ Ramberg Osgood โดยใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ในการ
แก้ปัญหาการโก่งเคาะของเสาปลายสอบ และได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจำนวน
44 ตัวอย่าง พบว่าผลที่ได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลมีค่าสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง และในปี
ค.ศ.1984 Shiomi and Kurata (Shiomi and Kurata, 1984) ได้พัฒนาสมการสำหรับหาค่าลึงประลัย
ของเสาปลายสอบหน้าตัดรูปตัวไอ (I-shape) และหน้าตัดรูปกล่อง (box-shape) ของชิ้นส่วนคาน-เสา
ด้วยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาแล้วใช้วิธีเมทริกในการแก้ปัญหาการโก่งเคาะ โดยมี
สมมุติฐานว่า เสาเป็นเสาตรง พร้อมกับพิจารณาผลของหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ด้วย ต่อมา
ในปี ค.ศ.1995 Kim et al. (Kim, Lee and Chang, 1995) ได้พัฒนาโปรแกรมทางด้านไฟไนต์อีเลเมนต์
(finite element program) เพื่อศึกษาในด้านกำลังความแข็งแรงเสาปลายสอบ โดยพิจารณาผลของ
หน่วยแรงคงค้าง และมีรูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly

Plastic-strain hardening ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาปลายสอบจะมีความสัมพันธ์กับการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นของเสาเมื่อมีการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น และในเมื่อไม่นานมานี้ Gabriel Alejandro Jimenez Lopez (Gabriel Alejandro Jimenez Lopez, 1998) ได้ทำการศึกษาเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีเวยสอบเข้า โดยมีแรงกระทำตามแนวแกน และมีรูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear stress-strain curve) พร้อมทั้งพิจารณาผลของหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) และเสาที่มีการโก่งงอเริ่มแรกหนึ่งในหนึ่งพันห้าร้อยของความยาวเสา โดยได้วิเคราะห์หาลำตัวของเสาปลายสอบโดยวิธีการทางตัวเลข (Numerical solution) แล้วเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ AISC-1993 (AISC, 1993) ผลการศึกษาพบว่า กรณียของเสาที่มีการยึดรับแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง หากพิจารณาการโก่งเคาะด้านแกนหลัก (แกนที่แข็งแรงกว่า) มาตรฐาน AISC-1993 จะสามารถใช้ในการออกแบบได้ปลอดภัยทุกค่าความยาวเสา แต่ถ้าพิจารณาแกนรอง (แกนที่อ่อนแอกว่า) เสาสั้นจะปลอดภัย ส่วนเสายาวจะมีความไม่ปลอดภัยเล็กน้อย แต่ถ้ามมีการคำนวณที่เพียงพอมาตรฐาน AISC-1993 จะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยทุกช่วงความยาว

2.5.2 มาตรฐานการออกแบบ

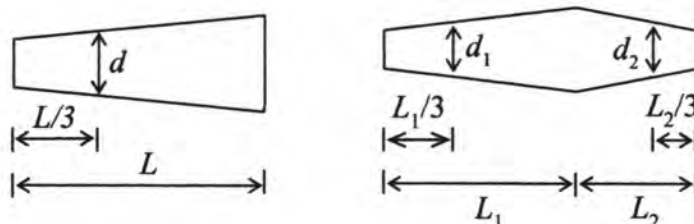
การหาน้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบจะไม่สามารถหาได้โดยตรงเนื่องจากหน้าตัดของเสาปลายสอบเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวเสา ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาปลายสอบ จะมีค่าอยู่ระหว่างความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาหน้าตัดคงที่โดยใช้ขนาดหน้าตัดที่ปลายด้านเล็กและด้านใหญ่ ดังนั้น มาตรฐานการออกแบบเสาไม้ต่างๆ จึงได้กำหนดให้ใช้หลักการหน้าตัดคงที่เทียบเท่า (Equivalent Prismatic Member) โดยค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาไม้ปลายสอบหาได้จากสมการเส้นโค้งการออกแบบเสา (Column Curve) ของเสาหน้าตัดคงที่เทียบเท่านั่นเอง ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนิยามหน้าตัดเทียบเท่าที่ตำแหน่ง $L/3$ จากปลายเสาด้านเล็ก ซึ่งสามารถใช้กับเสาไม้ปลายสอบทุกสภาวะการยึดรับ แต่ในปัจจุบันมาตรฐานการออกแบบได้เสนอสมการสำหรับหาค่าแรงของหน้าตัดเทียบเท่าโดยการพิจารณาสภาพการยึดรับที่ปลายของเสาด้วย ภาพที่ 2.11 แสดงเสาปลายสอบและเสาหน้าตัดเทียบเท่า



$$\text{น้ำหนักวิกฤตเสาปลายสอบ} = \text{น้ำหนักวิกฤตเสาหน้าตัดเทียบเท่า} = P_{cr} = \pi^2 EI_e / (KL)^2$$

ภาพที่ 2.11 เสาปลายสอบและเสาหน้าตัดคงที่เทียบเท่า

ในอดีต การออกแบบเสาไม้ปลายสอบจะใช้วิธีง่าย ๆ ในการหาขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนเทียบเท่า ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1944 ถึง 1986 The National Design Specification (NDS, 1944-1986) ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างไม้ของสหรัฐอเมริกา ได้นิยามขนาดหน้าตัดเทียบเท่าของเสาปลายสอบด้านเดียวหรือทั้งสองด้านที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมตันให้มีขนาดเท่ากับ d ซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดของปลายด้านเล็กบวกด้วยหนึ่งในสามของค่าความแตกต่างระหว่างขนาดปลายด้านใหญ่กับด้านเล็ก นั่นคือ $d = d_{min} + (1/3)(d_{max} - d_{min})$ สำหรับเสากลมปลายสอบด้านเดียวหรือทั้งสองด้าน กำหนดให้น้ำหนักวิกฤตมีค่าเท่ากับน้ำหนักวิกฤตของเสาสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและมีลักษณะการสอบของปลายเหมือนกัน ข้อกำหนดข้างต้นจะสามารถกำหนดตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าของเสาปลายสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมได้ที่ตำแหน่ง $L/3$ จากปลายด้านเล็กของเสาปลายสอบ ดังภาพที่ 2.12 ข้อกำหนดข้างต้นจะไม่คำนึงถึงลักษณะการยี่ตรงของเสา จึงทำให้น้ำหนักวิกฤตที่ได้มีค่าความปลอดภัยสูงมากสำหรับเสากลมที่มีปลายด้านใหญ่ยึดแน่นและปลายด้านเล็กปล่อยอิสระ



ภาพที่ 2.12 ตำแหน่งหน้าตัดเทียบเท่าของชิ้นส่วนเทียบเท่า (NDS, 1944-1986)

การกำหนดให้ใช้ตำแหน่ง $L/3$ จากปลายด้านเล็กของเสาปลายสอบ จะทำให้มีความปลอดภัยค่อนข้างมากเกินไป เมื่อใช้กับเสาปลายสอบที่มีปลายด้านใหญ่ยึดแน่น (Cantilever flagpole) ต่อมาในปี 1984 Engineering Design in Wood (Limit States Design) 1984 by Canadian Standards Association (CAS, 1984) ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบเสาไม้ของแคนาดาได้กำหนดระยะ d ของทั้งเสากลมและเสาสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่ง $0.45L$ จากปลายด้านเล็กซึ่งจะให้ค่าความปลอดภัยลดน้อยลงกว่ามาตรฐานของอเมริกาและในปีเดียวกันนั้น Criswell (1984) เสนอว่าสำหรับชิ้นส่วนที่มีอัตราส่วนมิติที่ปลาย, r (ขนาดมิติหน้าตัดที่ปลายด้านเล็กต่อปลายด้านใหญ่, d_{min}/d_{max}) อย่างน้อยเท่ากับ 0.5 ขนาดของหน้าตัดเทียบเท่าของ Catiliver flagpoles จะอยู่ ณ ตำแหน่ง $0.6L$ จากปลายแหลมด้านเล็กและสำหรับจตุรกรรับอย่างง่าย (Simple support) Criswell แนะนำให้ใช้ขนาดหน้าตัดเทียบเท่า $0.43L$ จากปลายแหลมด้านเล็ก

The National Design Specification 1991 (NDS, 1991) ได้แก้ไขข้อสมมุติฐานการใช้ตำแหน่ง $0.3L$ จากปลายแหลมด้านเล็ก สำหรับเสาที่มีการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัดในทิศทางด้านเล็กทิศทางเดียวและเกิดการโก่งเคาะทางด้านเล็ก โดยใช้สมการที่ปรับปรุงจากสมการของ Criswell (1991) ในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นสมการที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมิติและลักษณะการยึดครั้งที่ปลายในการคำนวณหาขนาดของหน้าตัดของชิ้นส่วนเทียบเท่า ดังแสดงในสมการที่ (2.24)

$$d = d_{min} + (d_{max} - d_{min})[a - 0.15(1 - d_{min}/d_{max})] \quad (2.24)$$

โดยที่ค่า a มีค่าขึ้นอยู่กับสภาพการยึดครั้งที่ปลายดังนี้

ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น ปลายด้านเล็กปล่อยอิสระหรือยึดครั้งอย่างง่าย $a = 0.70$

ปลายด้านเล็กยึดแน่น ปลายด้านใหญ่ปล่อยอิสระหรือยึดครั้งอย่างง่าย $a = 0.30$

ปลายทั้งสองข้างยึดครั้งอย่างง่าย

ปลายสอบด้านเดียว $a = 0.50$

ปลายสอบทั้งสองด้าน $a = 0.70$

สำหรับจตุรกรยึดแบบอื่น $d = d_{min} + (1/3)(d_{max} - d_{min})$

สมการที่ (2.24) จะช่วยลดความยุ่งยากและสับสนในการเลือกใช้ในตารางที่ 2.2 แต่จะให้ค่าผลลัพธ์ที่ไม่ปลอดภัยเล็กน้อยสำหรับเสากลมที่มีปลายสอบเปลี่ยนแปลงทั้งสองทิศทางกรณีจตุรกรรับแบบอื่นๆ นอกเหนือจากที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.8 NDS-1991 ยังคงใช้การคำนวณหาหน้าตัดเทียบเท่าที่ตำแหน่ง $L/3$ จากปลายด้านเล็ก

ASCE 1995 Standard for Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Engineering Wood Construction AF&PA/ASCE 16-95 (ASCE, 1995) ได้นำผลการศึกษาของ Criswell (1991) จากตารางที่ 2.2 กำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับหาขนาดของ the design diameter (D) ของเสากลมหรือ the design depth (d) สำหรับเสาสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาจากอัตราส่วนที่ปลายของเสาเป็นหลัก ดังนี้

สำหรับเสากลม ถ้าอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางกลางปลายด้านเล็ก (D_1) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางปลายด้านใหญ่ (D_2) น้อยกว่า $1/3$ ให้ใช้ the design diameter เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางปลายด้านเล็ก (D_1) แต่ถ้ามากกว่า $1/3$ ให้ใช้ the design diameter ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า Design diameter (D) สำหรับเสากลมปลายสอบ (ASCE, 1995)

กรณี	เงื่อนไขที่ปลาย	$X =$
1	เสาปลายยื่น “flagpole” ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น	$0.52+0.18D_1/D_2$
2	เสาปลายยื่น “flagpole” ปลายด้านเล็กยึดแน่น	$0.12+0.18D_1/D_2$
3	เสาปลายสอบด้านเดียวและมีปลายทั้งสองยึดครั้งอย่างง่าย	$0.32+0.18D_1/D_2$
4	เสาปลายสอบทั้งสองด้านและมีปลายทั้งสองยึดครั้งอย่างง่าย	$0.52+0.18D_1/D_2$
5	สำหรับจุดยึดครั้งนอกเหนือจากนี้	$1/3$
$D = D_1 + X(D_2 - D_1)$		

สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม ถ้าอัตราส่วนของความลึกปลายด้านเล็ก (d_1) ต่อความลึกปลายด้านใหญ่ (d_2) น้อยกว่า $1/3$ ให้ใช้ the design depth เท่ากับความลึกปลายด้านเล็ก (d_1) แต่ถ้ามากกว่า $1/3$ ให้ใช้ the design depth ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่า Design depth (d) สำหรับเสาที่เหลื่อมปลายสอบ (ASCE, 1995)

กรณี	เงื่อนไขที่ปลาย	$X =$	
		โก่งเคาะด้านเล็ก	โก่งเคาะด้านกว้าง
1	เสาปลายยื่น “flagpole” ปลายด้านใหญ่ยึดแน่น	$0.55+0.15d_1/d_2$	$0.63+0.07d_1/d_2$
2	เสาปลายยื่น “flagpole” ปลายด้านเล็กยึดแน่น	$0.15+0.15d_1/d_2$	$0.23+0.07d_1/d_2$
3	เสาปลายสอบด้านเดียวและมีปลายทั้งสองยึดรั้งอย่างง่าย, เสาปลายสอบด้านเดียวหรือทั้งสองด้านมีปลายทั้งสองยึดแน่นหรือด้านหนึ่งยึดแน่นอีกด้านยึดรั้งอย่างง่าย (ถ้าปลายด้านเล็กยึดแน่นให้ใช้กรณีที่ 2)	$0.35+0.15d_1/d_2$	$0.43+0.07d_1/d_2$
4	เสาปลายสอบทั้งสองข้างและปลายทั้งสองข้างยึดรั้งอย่างง่าย	$0.55+0.15d_1/d_2$	$0.63+0.07d_1/d_2$
5	สำหรับจุดยึดรั้งนอกเหนือจากนี้	$1/3$	
$d = d_1 + X(d_2 - d_1)$			

LRFD กำหนดให้ใช้ Design diameter (D), Design depth (d) ที่ได้จากตารางที่ 2.3 และ 2.4 สำหรับหา The adjusted compression resistance of column P'

$$P' = C_p A F_c^*$$

C_p = The column stability factor

$$C_p = \frac{1 + \alpha_c}{2c} - \sqrt{\left(\frac{1 + \alpha_c}{2c}\right)^2 - \frac{\alpha_c}{c}}$$

เมื่อ

$$\alpha_c = \frac{\phi_s P_e}{\lambda \phi_c P_0'}$$

$$P_e = \frac{\pi^2 E_{O5}' I}{(k_e L)^2} = \frac{\pi^2 E_{O5}' A}{\left(\frac{k_e L}{r}\right)^2}$$

- A = gross area
 F_c^* = parallel to grain compression strength multiplied by all applicable adjustment factor except C_p
 E_{05}' = adjustment of modulus of elasticity at the fifth Percent
 P_e = critical (Euler) buckling resistance about the axis Being considered
 P_o' = adjustment member axis parallel to grain resistance of zero length column (i.e., the limit obtained as length approaches zero)
 c = 0.80 for solid sawn member
 c = 0.85 for round pole and pile
 c = 0.90 for glued laminated member and structure composite lumber
 ϕ_c = resistance factor for compression = 0.90
 ϕ_s = resistance factor for stability = 0.8

สำหรับ NDS (1997) และ NDS (2001) ยังคงใช้ข้อกำหนดเดิมสำหรับเสาที่มีปลายสอบของมาตรฐานปี 1991

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้กำหนด มาตรฐาน สำหรับงานไม้ (วสท.1002-16, 2517) ในการออกแบบเสาไม้ ไว้ดังนี้

“4204 การคำนวณออกแบบเสาดันธรรมชาติ

- ก. สภาพปลายเสา สูตรคำนวณนี้ใช้กับเสาดันมีสภาพปลายยึดแบบหมุดหมุนทั้งสองข้างและสามารถใช้ได้กับเสาที่มีสภาพปลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- ข. หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับเสาดันธรรมชาติเป็นกิโลกรัมต่อพื้นที่หน้าตัดเป็นตารางเซนติเมตร มีค่าดังต่อไปนี้

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{2.727(L/r)^2} = \frac{3.619E}{(L/r)^2} \quad (2.25)$$

โดยค่าที่คำนวณได้จะต้องไม่มากกว่าค่าหน่วยแรงอัดตามเส้นที่ยอมให้ ในกรณีที่เสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า สูตรคำนวณนี้จะเป็น

$$\frac{P}{A} = \frac{0.30E}{(L/r)^2} \quad (2.26)$$

- ค. ให้ปรับค่าหน่วยแรงที่คำนวณได้ตามข้อ 4204 ข. ตามระยะเวลาการบรรทุกน้ำหนักดังที่ได้กำหนดไว้ในข้อ 2400 และ 2500

ฯลฯ

4206 เสากลม

- ก. น้ำหนักที่ยอมให้สำหรับเสาที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมจะต้องไม่มากกว่าเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน หรือคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{P}{A} = \frac{3.619E}{(L/r)^2} \quad (2.27)$$

โดยที่ค่า $\frac{P}{A}$ จะต้องมีค่าสูงไม่เกินค่า C ตามที่ได้มีการปรับค่าตามข้อ ข.

- ข. ค่า $\frac{P}{A}$ ที่ได้คำนวณจากข้อ 4206 ก. จะต้องปรับค่าหน่วยแรงตามระยะเวลารับน้ำหนักที่ได้กำหนดไว้ในข้อ 2400 และ 2500

4207 เสาปลายสอบ

ในการพิจารณาค่า d สำหรับคำนวณเสาปลายสอบ โดยปลายเสาจะสอบปลายเดียวหรือทั้งสองปลายก็ได้ ในกรณีเสากลมให้ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดบวกด้วย $1/3$ ของผลต่างระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่สุดและเล็กสุดของเสานั้น ในกรณีเสาเหลี่ยมให้ใช้ด้านเล็กสุดบวกด้วย $1/3$ ของผลต่างระหว่างด้านใหญ่สุดและเล็กสุดของเสานั้น”

เมื่อพิจารณาข้อกำหนดของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย จะเห็นว่า มีลักษณะคล้ายกับมาตรฐานสำหรับออกแบบโครงสร้างไม้ของสหรัฐอเมริกาที่ใช้ในการออกแบบเสาไม้ปลายสอบตั้งแต่ปี ค.ศ.1944 ถึง 1986 (NDS, 1944 – 1986) คือ ให้ใช้หน้าตัดเทียบเท่าที่ตำแหน่ง $L/3$ จากปลายเสาด้านเล็ก

2.6 บทสรุป

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ในส่วนของทฤษฎีได้อธิบายถึงความหมายของน้ำหนักวิกฤตของเสา ทฤษฎีการคำนวณหาน้ำหนักวิกฤตของเสาในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น ซึ่งได้แก่ สูตรของฮอยเลอร์ ทฤษฎีโมดูลัสสัมผัส ทฤษฎีโมดูลัสลด ตลอดจนผลของการโก่งตัวเริ่มแรกของเสา ชีดจำกัดของฮอยเลอร์ และกราฟกำลังของเสา ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ทบทวนวรรณกรรมที่ได้มีผู้ค้นคว้าวิจัยหรือได้เสนอแนวทางต่าง ๆ สำหรับการกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาปลายสอบไว้ เช่น Criswell (1991), นิธิศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ (2548) และท้ายสุดได้กล่าวถึงมาตรฐานในการออกแบบเสาปลายสอบ ซึ่งได้แก่ The National Design Specification, Engineering Design in Wood (Limit States Design) 1984 by Canadian Standards Association (CAS, 1984); ASCE Standard for Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Engineering Wood Construction by American Forest & Paper Association and American Society of Civil Engineer (AF&PA/ASCE, 1995) และมาตรฐานสำหรับงานไม้ โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.1002-16, 2517)

สำหรับบทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาและเครื่องมือที่จะใช้ในการดำเนินการศึกษาค้นคว้าวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการศึกษาและเครื่องมือ

3.1 บทนำ

ในบทที่ 2 ที่ผ่านมา ได้กล่าวถึงทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหาน้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบ สำหรับบทที่ 3 จะกล่าวถึง วิธีการและเครื่องมือในการดำเนินการศึกษา โดยจะอธิบายถึงลักษณะพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษา วิธีการดำเนินการศึกษา แบบจำลองของเสา การหาน้ำหนักวิกฤตของเสาด้วยโปรแกรม Abaqus การเปรียบเทียบผล การวิจารณ์และสรุปผลการศึกษา และสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาของบทที่ 3

3.2 กรณีที่จะทำการศึกษา

ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่า ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนาจากการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่น จะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ พร้อมกับนำเสนอหลักการความยาวเทียบเท่าเพื่อหาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกของเสาไม้ปลายสอบอีกแนวทางหนึ่ง ดังนั้นเสาที่จะทำการศึกษาจึงมีทั้งหมด 3 ประเภท คือ 1) เสาปลายสอบ 2) เสาหน้าตัดเทียบเท่า และ 3) เสาความยาวเทียบเท่า

3.3 คุณสมบัติพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษา

เสาทั้ง 3 ประเภทในหัวข้อ 3.2 จะมีคุณสมบัติพื้นฐานหลักที่จะทำการศึกษาได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ สภาพการยึดรั้ง อัตราส่วนที่ปลาย ความยาวเสา สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.1

สำหรับกรณีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้น เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาไม้ ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบ Ramberg Osgood ดังนั้นหากศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood เพียงรูปแบบเดียวก็น่าจะเพียงพอแล้ว แต่ด้วยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic เป็นรูปแบบที่มักถูกกล่าวอ้างถึงถึงเสมอในกรณีหากมีการศึกษาด้านกำลังหรือคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้น

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic เพิ่มเติมอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งหากมีวัสดุอื่นๆที่มีการกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และมีคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเสาเหมือนกับเสาที่จะทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ก็จะสามารถศึกษาพฤติกรรมการโก่งคดของเสาดังกล่าวจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลย

ตารางที่ 3.1 ลักษณะพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษาของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า เสาความยาวเทียบเท่า

ชนิดเสา	คุณสมบัติของวัสดุ	จุดยึดรั้ง	อัตราส่วนที่ปลายเสา, r	ความยาวเสา L (cm.)
เสาปลายสอบ	1. โมดูลัสยืดหยุ่น(E) เท่ากับ 13,600 กก./ตร.ซม. 2. หน่วยแรงเค้นที่จุลราก(σ_y) เท่ากับ 450 กก./ตร.ซม. 3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด มี 2 รูปแบบ คือ - Elastic-Perfectly Plastic - แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	1. ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge – Roller) 2. ยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก(Fixed – Roller) 3. ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed – Free) 4. ยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) 5. ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed – Guide) จำนวน 5 จุดยึดรั้งต่อหนึ่งรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	0.3 , 0.4 , 0.5 , 0.6 , 0.7 , 0.8 , และ 0.9 จำนวน 7 ค่าต่อหนึ่งจุดยึดรั้ง	40 , 60 ,80 , 100 , 120 , 140 , 160 , 180 , 200 , 220 , 240 , 260 , 280 , 300 , 320 , 340 , 360 , 380 และ 400 จำนวน 19 ค่าต่อหนึ่งค่าอัตราส่วนที่ปลายเสาค่าหนึ่ง

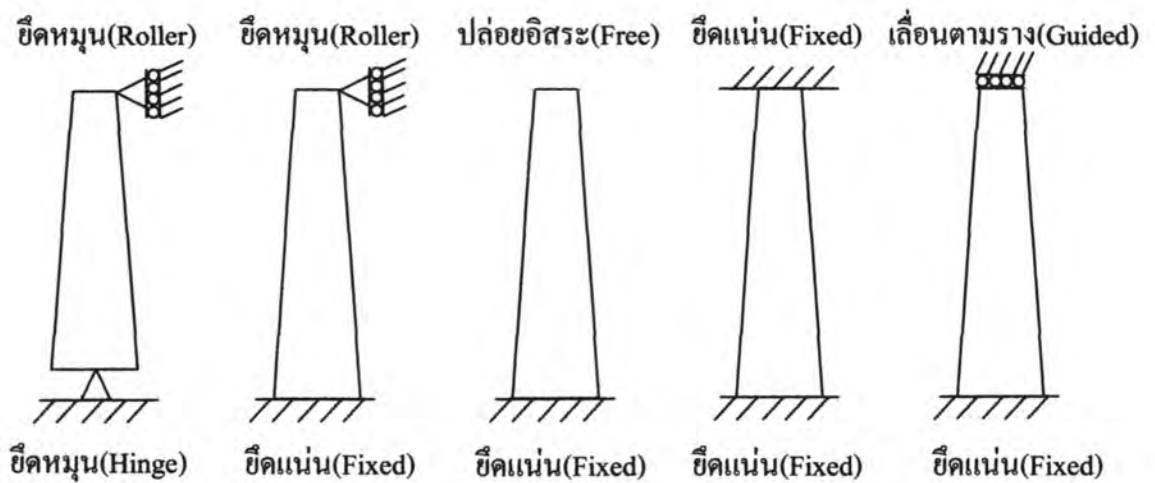
ตารางที่ 3.1 ลักษณะพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษาของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดคงที่เทียบเท่า
เสาความยาวเทียบเท่า (ต่อ)

ชนิดเสา	คุณสมบัติของวัสดุ	จุดยึดรั้ง	อัตราส่วนที่ ปลายเสา, r	ความยาวเสา L (cm.)
เสาหน้าตัด เทียบเท่า	<p>1. โมดูลัสยืดหยุ่น(E) เท่ากับ 13,600 กก./ตร.ซม.</p> <p>2. หน่วยแรงเค้นที่จุดราก(σ_y) เท่ากับ 450 กก./ตร.ซม.</p> <p>3. ความสัมพันธ์ระหว่างความ เค้นและความเครียด มี 2 รูปแบบ คือ</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elastic-Perfectly Plastic - แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	<p>1. ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge – Roller)</p> <p>2. ยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก(Fixed – Roller)</p> <p>3. ยึดแน่นด้านใหญ่- ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed – Free)</p> <p>4. ยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed)</p> <p>5. ยึดแน่นด้านใหญ่- เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed – Guide)</p> <p>จำนวน 5 จุดยึดรั้งต่อ หนึ่งรูปแบบของความ สัมพันธ์ระหว่างความ เค้นและความเครียด</p>	<p>0.3 , 0.4 , 0.5 , 0.6 , 0.7 , 0.8 , และ 0.9 จำนวน 7 ค่า ต่อหนึ่งจุด ยึดรั้ง</p>	<p>40 , 60 , 80 , 100 , 120 , 140 , 160 , 180 , 200 , 220 , 240 , 260 , 280 , 300 , 320 , 340 , 360 , 380 และ 400 จำนวน 19 ค่าต่อ หนึ่งค่าอัตราส่วน ที่ปลายเสาค่าหนึ่ง</p>

ตารางที่ 3.1 ลักษณะพื้นฐานของเสาที่จะทำการศึกษารูปแบบของเสาปลายสอบ เสาหน้าคดโค้งที่เทียบเท่า เสาความยาวเทียบเท่า (ต่อ)

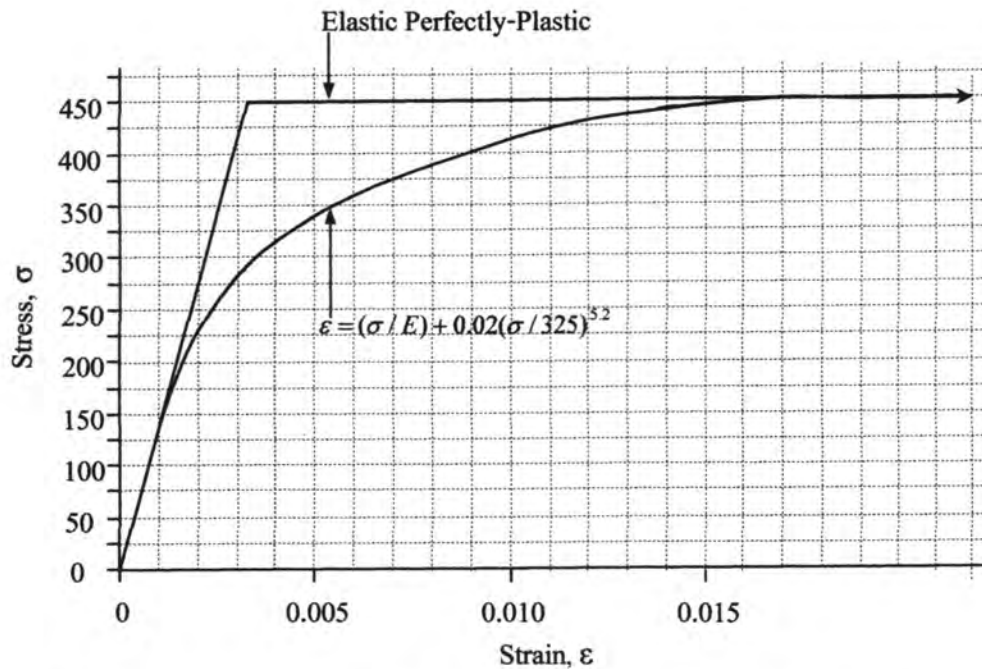
ชนิดเสา	คุณสมบัติของวัสดุ	จุดยึดจริง	อัตราส่วนที่ปลายเสา, r	ความยาวเสา L (cm.)
เสาความยาวเทียบเท่า	1. โมดูลัสยืดหยุ่น(E) เท่ากับ 13,600 กก./ตร.ซม. 2. หน่วยแรงเค้นที่จุดราก(σ_y) เท่ากับ 450 กก./ตร.ซม. 3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด มี 2 รูปแบบ คือ - Elastic-Perfectly Plastic - แบบ Ramberg Osgood $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$	1. ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge – Roller) 2. ยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก(Fixed – Roller) 3. ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed – Free) 4. ยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) 5. ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed – Guide) จำนวน 5 จุดยึดจริงต่อหนึ่งรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	0.3 , 0.4 , 0.5 , 0.6 , 0.7 , 0.8 , และ 0.9 จำนวน 7 ค่าต่อหนึ่งจุดยึดจริง	40 , 60 ,80 , 100 , 120 , 140 , 160 , 180 , 200 , 220 , 240 , 260 , 280 , 300 , 320 , 340 , 360 , 380 และ 400 จำนวน 19 ค่าต่อหนึ่งค่าอัตราส่วนที่ปลายเสาค่าหนึ่ง

สามารถแสดงรูปแบบเสาทั่วไปของเสาที่จะทำการศึกษาดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 รูปแบบของเสาที่จะทำการศึกษา

สำหรับรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood นั้น ได้รูปแบบมาจากการทดสอบไม้เนื้อแข็งในห้องปฏิบัติการจำนวน 3 ตัวอย่าง รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่จะทำการศึกษา

3.4 วิธีการดำเนินการศึกษา

วิธีดำเนินการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 การสร้างแบบจำลองเสา

3.4.2 การหาหน้าหนักวิกฤตของเสา ด้วยโปรแกรม ABAQUS

3.4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

3.4.4 การสรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

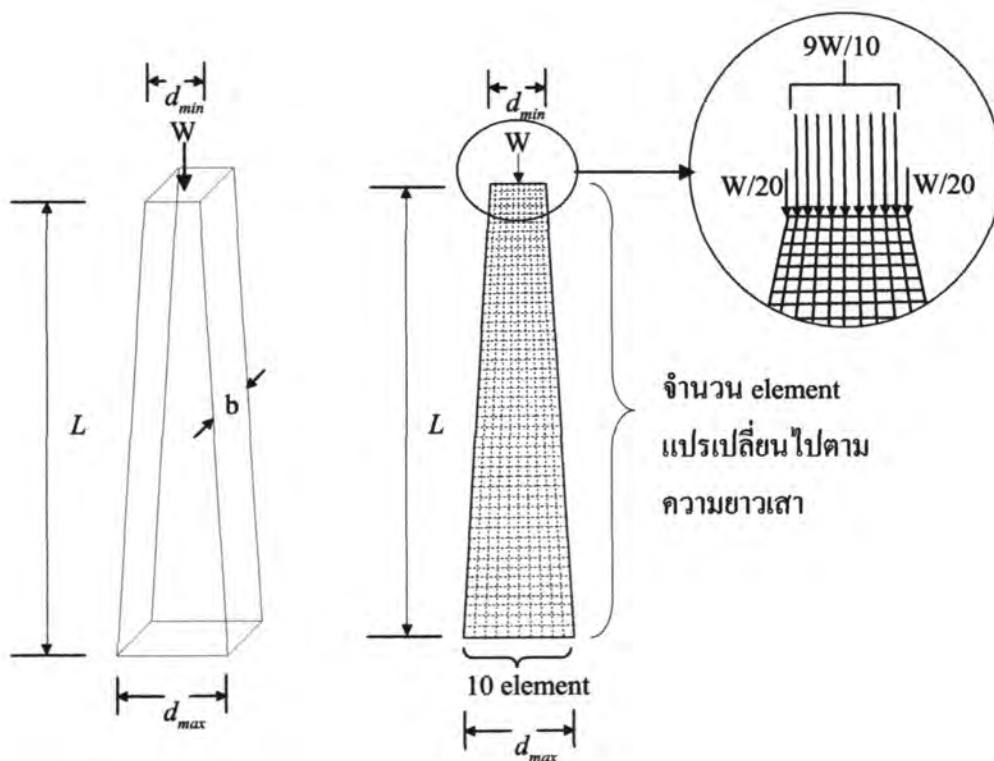
3.5 การสร้างแบบจำลองของเสา

การสร้างแบบจำลองของเสา ได้แก่ การกำหนดจุดต่อ (Node) ชิ้นส่วนย่อย (Element) การยึดตรึง (Boundary) คำสั่งให้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยหลักการหรือทฤษฎีใด น้ำหนักที่กระทำ (Load) และการแสดงผลการวิเคราะห์ รูปแบบเสาจะมีคุณลักษณะตรงตามลักษณะพื้นฐานของเสา ตามหัวข้อ 3.3 ทุกประการ ในการศึกษาจะเลือกใช้ชิ้นส่วนย่อย (Element) Solid Element 2D ชนิด Plan Stress 4 Node ชื่อ CPS4R ขนาดชิ้นส่วนย่อยที่ฐานเสาเท่ากับ 1.0×1.0 ซม. ขนาดของชิ้นส่วนที่ปลายเสาจะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนที่ปลายของเสา ความกว้างของชิ้นส่วนย่อยคงที่ 10 ซม. จำนวนชิ้นส่วนย่อยตามความลึกเท่ากับ 10 ชิ้นส่วนตลอดความยาวของเสา จำนวน Node ตามความลึกของเสาเท่ากับ 11 Nodes สามารถแสดงการจำลองเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า เสาความยาวเทียบเท่า ได้ดังนี้

3.5.1 การจำลองรูปแบบของเสาปลายสอบ

เสาปลายสอบที่จะทำการศึกษาคือ เสาปลายสอบด้านลึก หน้าตัดเสาด้านลึกจะลดลงด้วยอัตราส่วนคงที่จากปลายเสาด้านใหญ่ไปหาปลายเสาด้านเล็ก โดยมีความกว้างของเสาคงที่เท่ากับ 10 ซม. เสาจะถูกจำลองให้มีจำนวนชิ้นส่วนย่อย (Element) ตามความลึกของเสาเท่ากับ 10 Element จำนวนจุดต่อ (Node) ตามความลึกของเสาเท่ากับ 11 Nodes จำนวนชิ้นส่วนตามยาวของเสาจะแปรผันตามความยาวของเสา และมีคุณลักษณะตรงตามลักษณะพื้นฐานของเสาปลายสอบ ตามตารางที่ 3.1 ทุกประการ กำหนดให้น้ำหนักกระทำที่ปลายเสาด้านเล็ก ภาพที่ 3.3 แสดงการจำลองรูปแบบทางกายภาพและลักษณะที่น้ำหนักกระทำต่อเสาปลายสอบ โดยที่ L คือ ความยาวของเสาปลายสอบ, d_{min} คือ ปลายเสาด้านเล็ก, d_{max} คือ ปลายเสาด้านใหญ่, b คือ ความกว้างของเสาปลายสอบ, W คือ น้ำหนักที่กระทำกับปลายเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ

สำหรับตารางที่ 3.2 จะแสดงการจำลองลักษณะการยึดรั้งที่ Node ปลายด้านบน และด้านล่างของเสาปลายสอบ เพื่อให้ได้รูปแบบการยึดรั้งทั้ง 5 รูปแบบที่จะทำการศึกษา และภาพที่ 3.4 แสดงรูปแบบของการจำลองเสาปลายสอบที่จะทำการศึกษาต่อไป สำหรับรายละเอียดการจำลองรูปแบบเสาปลายสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง



ภาพที่ 3.3 การจำลองรูปแบบเสาปลายสอบ

หมายเหตุ

F ปล่อยอิสระ

L1 ด้านทานการเคลื่อนที่ในแกน X

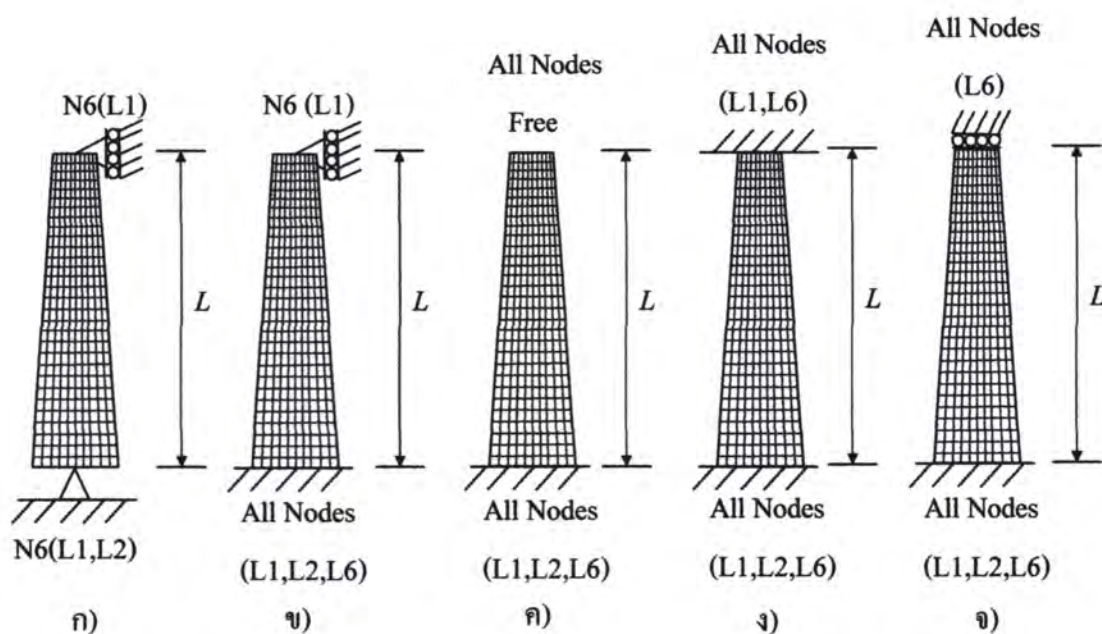
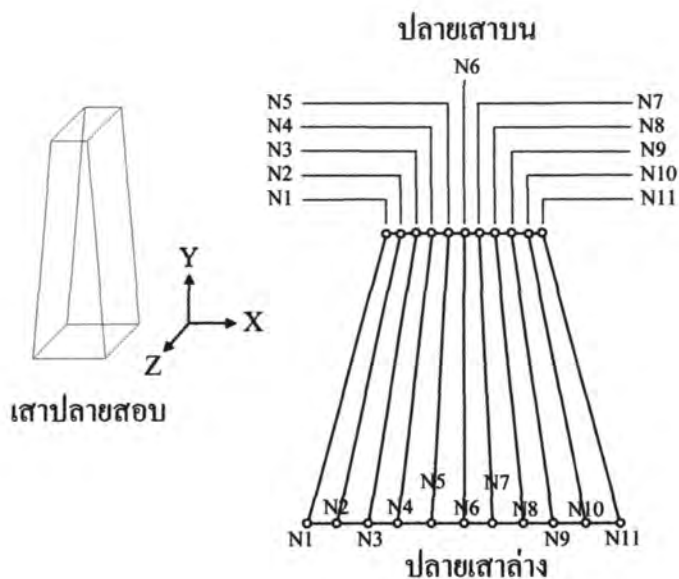
L2 ด้านทานการเคลื่อนที่ในแกน Y

L3 ด้านทานการเคลื่อนที่ในแกน Z

L4 ด้านทานการหมุนรอบแกน X

L5 ด้านทานการหมุนรอบแกน Y

L6 ด้านทานการหมุนรอบแกน Z



ภาพที่ 3.4 รูปแบบการยึดรั้งของเสาปลายสอบที่จะทำการศึกษา ก) ยึดหมุนทั้งสองข้าง

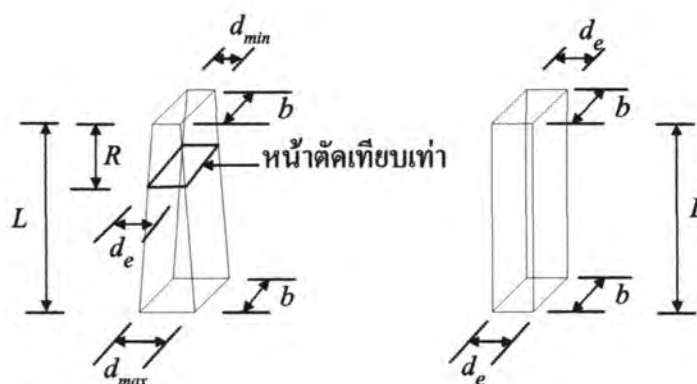
ข) ยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก ค) ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก

ง) ยึดแน่นทั้งสองข้าง จ) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก

3.5.2 การจำลองรูปแบบของเสาหน้าตัดเทียบเท่า

เสาหน้าตัดเทียบเท่า คือ เสาสี่เหลี่ยมตันหน้าตัดคงที่เท่ากับขนาดของหน้าตัดเทียบเท่าที่คำนวณได้จากสมการหน้าตัดเทียบเท่าที่มาตรฐานต่าง ๆ ได้แนะนำไว้ โดยมีความยาวเสา

เท่ากับความยาวเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ (เสาดันแบบ คือ เสาปลายสอบที่ต้องการหาน้ำหนักวิกฤต โดยใช้หลักการหน้าตัดเทียบเท่า) ภาพที่ 3.5 แสดงลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบและเสาหน้าตัดเทียบเท่า



ภาพที่ 3.5 ลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบกับเสาหน้าตัดเทียบเท่า

ตารางที่ 3.3 สมการแนะนำในการหาตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่า (R)

ผู้เสนอสมการ	รูปสมการ	จุดยึดรั้ง
Criswell (1991)	$R = 0.35 + 0.15r$ $R = 0.55 + 0.15r$	ยึดหมุนทั้งสองด้าน (Hinge – Roller) ยึดแน่นด้านใหญ่-อิสระด้านเล็ก(Fixed -Free)
นิริศศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ (2548)	$R = 0.34 + 0.17r$ $R = 0.38 + 0.13r$	ยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed – Roller) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed – Guided)
วิศวกรรมสถานแห่ง ประเทศไทย (2517)	$R = L/3$	ยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed – Fixed)

หมายเหตุ r คือ อัตราส่วนที่ปลายของเสาปลายสอบ (d_{min}/d_{max})
 d_{min} คือ ขนาดความลึกของหน้าตัดเสาปลายสอบด้านเล็ก
 d_{max} คือ ขนาดความลึกของหน้าตัดเสาปลายสอบด้านใหญ่
 L คือ ความยาวของเสาปลายสอบ

จากสมการในตารางที่ 3.3 สามารถหาค่าตำแหน่งหน้าตัดเทียบเท่า (R) ได้จากการแทนค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) ของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบลงในสมการดังกล่าว และสามารถหาขนาดความลึกของหน้าตัดเทียบเท่า (d_e) ได้จากสมการ

$$R = [d_e - d_{\min}] / [d_{\max} - d_{\min}]$$

$$d_e = R \cdot [d_{\max} - d_{\min}] + d_{\min}$$

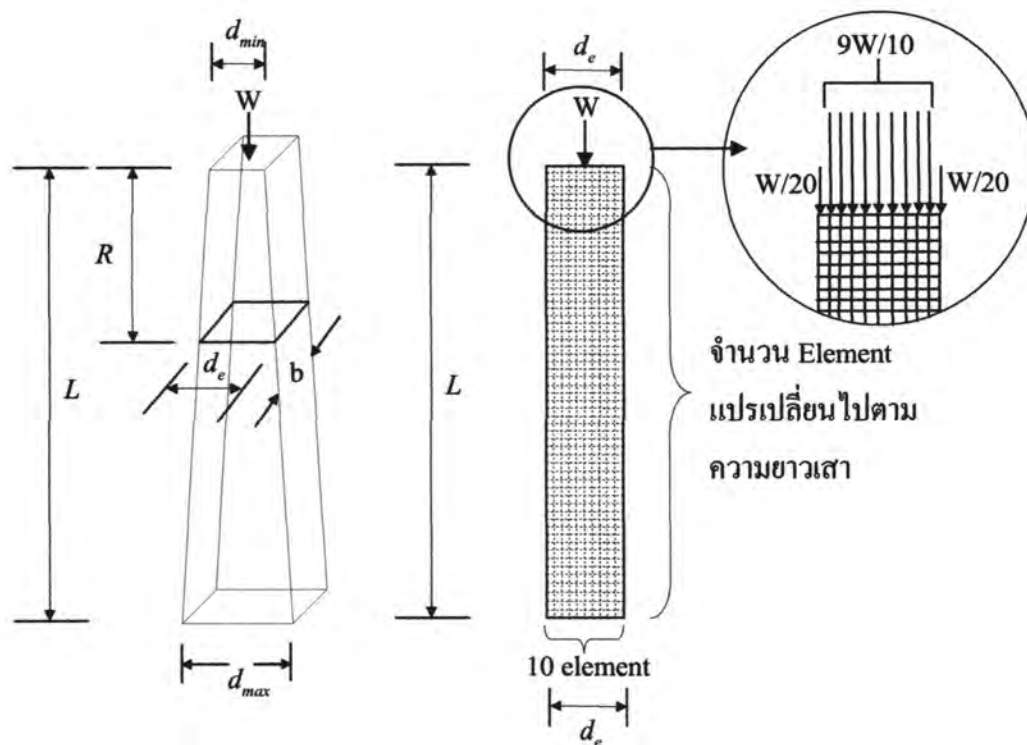
ค่า d_e ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขนาดความลึก (d_e) ของเสาหน้าตัดเทียบเท่า

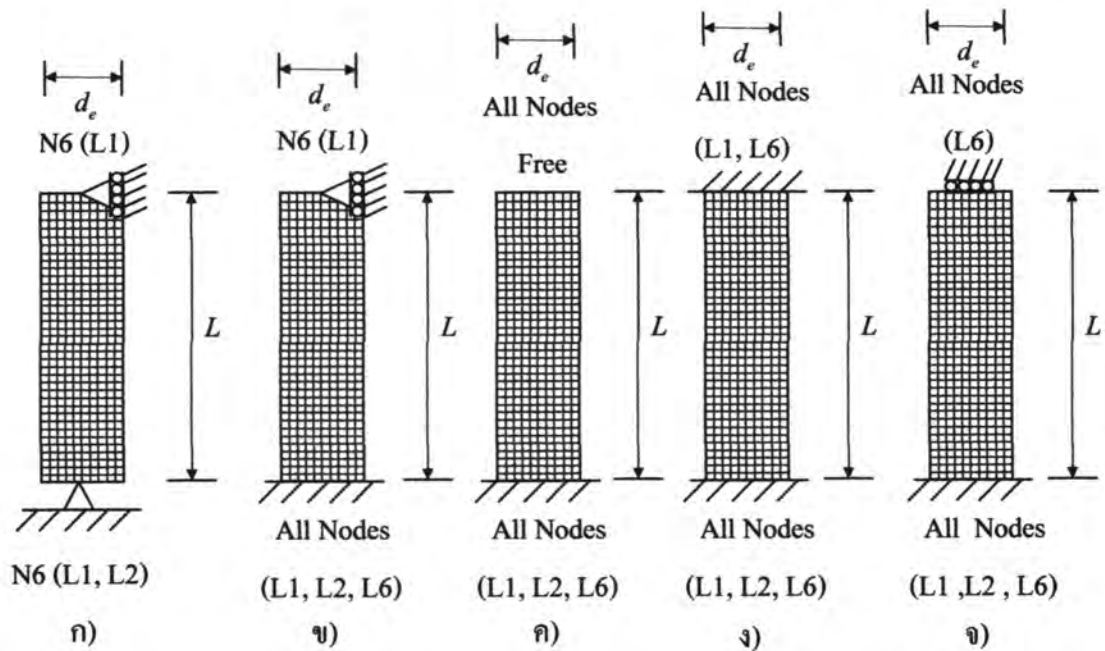
จุดยึดรั้ง	ความลึก (d_e) ของเสาหน้าตัดเทียบเท่า							
	r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9	r=1.0
ยึดหมุนทั้งสองด้าน (Hinge – Roller)	5.77	6.46	7.13	7.76	8.37	8.94	9.49	10.00
ยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed – Roller)	5.74	6.45	7.13	7.77	8.38	8.95	9.49	10.00
ยึดแน่นด้านใหญ่- ปลดข้ออิสระด้านเล็ก(Fixed -Free)	7.17	7.66	8.13	8.56	8.97	9.34	9.69	10.00
ยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed – Fixed)	5.10	5.80	6.50	7.20	7.90	8.60	9.30	10.00
ยึดแน่นด้านใหญ่- เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed – Guided)	5.93	6.59	7.23	7.83	8.41	8.97	9.50	10.00

เมื่อได้ขนาดด้านลึกของหน้าตัดเทียบเท่าแล้ว จะสามารถจำลองเสาหน้าตัดเทียบเท่าได้ โดยเสามีความกว้างของเสาคงที่เท่ากับ 10 ซม. เสาจะถูกจำลองให้มีชิ้นส่วนย่อยตามความลึกของเสาเท่ากับ 10 ชิ้น ส่วนจำนวนชิ้นส่วนตามยาวจะเท่ากับเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ โดยแปรผันตามความยาวของเสาดันแบบ และมีคุณลักษณะตรงตามลักษณะพื้นฐานของเสาตามตารางที่ 3.1 ทุกประการ กำหนดให้น้ำหนักกระทำที่ปลายเสาด้านบน สำหรับรายละเอียดการจำลองรูปแบบเสาหน้าตัดเทียบเท่าได้แสดงไว้ในภาพผนวก จ และภาพที่ 3.6 แสดงการจำลองรูปแบบทางกายภาพและลักษณะที่น้ำหนักกระทำต่อเสาหน้าตัดเทียบเท่า โดยที่ L คือ ความยาวของเสาหน้าตัด

เทียบเท่า d_e คือ ความลึกของหน้าตัดเทียบเท่า b คือ ความกว้างของเสาหน้าตัดเทียบเท่า W คือน้ำหนักที่กระทำกับปลายด้านบนของเสาหน้าตัดเทียบเท่า สำหรับการยัดรั้งที่ Node ปลายบนและปลายล่างของเสา เพื่อให้มีลักษณะการยัดรั้งทั้ง 5 รูปแบบ จะมีลักษณะเหมือนกับเสาปลายสอบทุกประการ และภาพที่ 3.7 แสดงรูปแบบของการจำลองเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่จะทำการศึกษาต่อไป



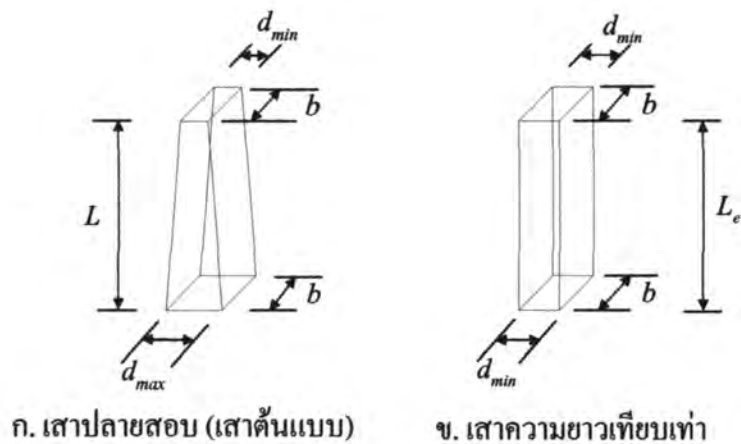
ภาพที่ 3.6 การจำลองรูปแบบของเสาโดยใช้หลักการหน้าตัดเทียบเท่า



ภาพที่ 3.7 การจำลองรูปแบบของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่จะทำการศึกษา ก) ขัดหมุนทั้งสองข้าง
ข) ขัดแน่นด้านใหญ่- ขัดหมุนด้านเล็ก ค) ขัดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก
ง) ขัดแน่นทั้งสองข้าง จ) ขัดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก

3.5.3 การจำลองรูปแบบของเสาความยาวเทียบเท่า

เสาความยาวเทียบเท่า คือ เสาสี่เหลี่ยมตันหน้าตัดคงที่เท่ากับหน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ และมีความยาวเสาเท่ากับความยาวค่าๆ หนึ่งซึ่งเรียกว่าความยาวเทียบเท่า (L_e) ภาพที่ 3.8 แสดงลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบกับเสาความยาวเทียบเท่า



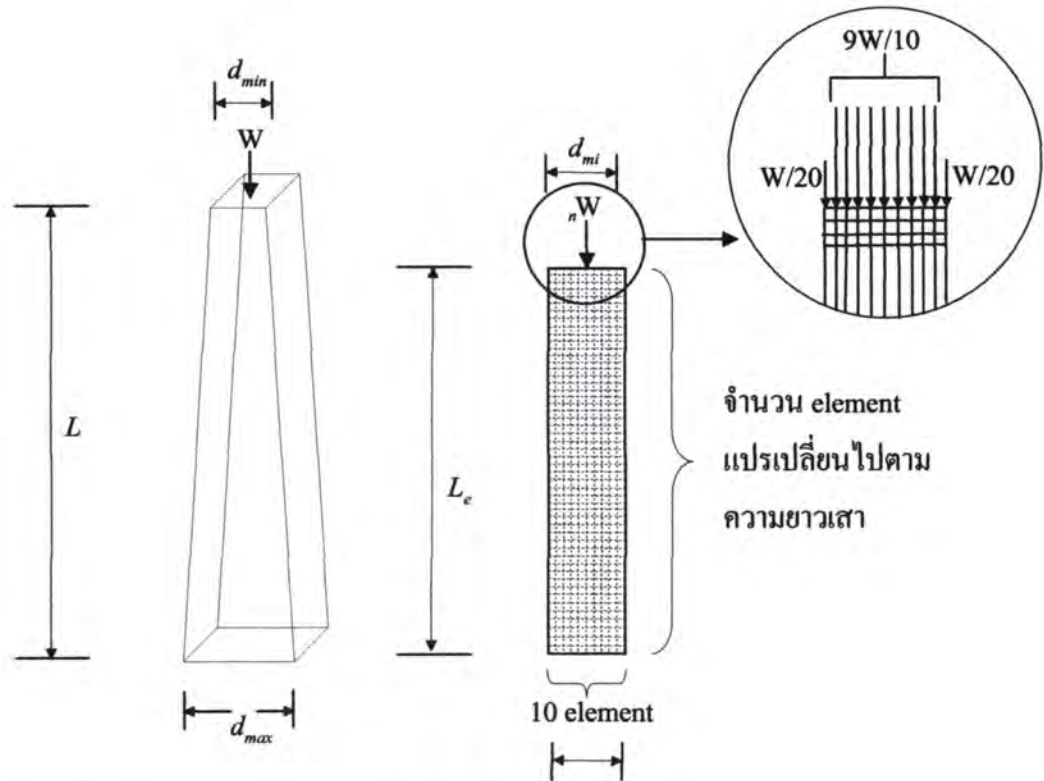
ภาพที่ 3.8 ลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบกับเสาความยาวเทียบเท่า

จากภาพที่ 3.8 ก. เสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ มีความลึกที่ปลายเสาด้านใหญ่เท่ากับ d_{\max} ความลึกที่ปลายเสาด้านเล็กเท่ากับ d_{\min} ความยาวเสาเท่ากับ L ความกว้างของเสาตรงที่ตลอดความยาวเสา เท่ากับ b จะสามารถจำลองรูปแบบเสาความยาวเทียบเท่า ดังภาพที่ 3.8 ข. ซึ่งเป็นเสาที่มีความลึกของหน้าตัดคงที่เท่ากับ d_{\min} ความกว้างของเสาตรงที่เท่ากับ b ความยาวเสาเท่ากับ L_e สำหรับค่าความยาวเทียบเท่า L_e ได้แสดงขั้นตอนและวิธีการคำนวณหาไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.3 ซึ่งสามารถแสดงสมการความยาวเทียบเท่าได้ตามตารางที่ 3.5

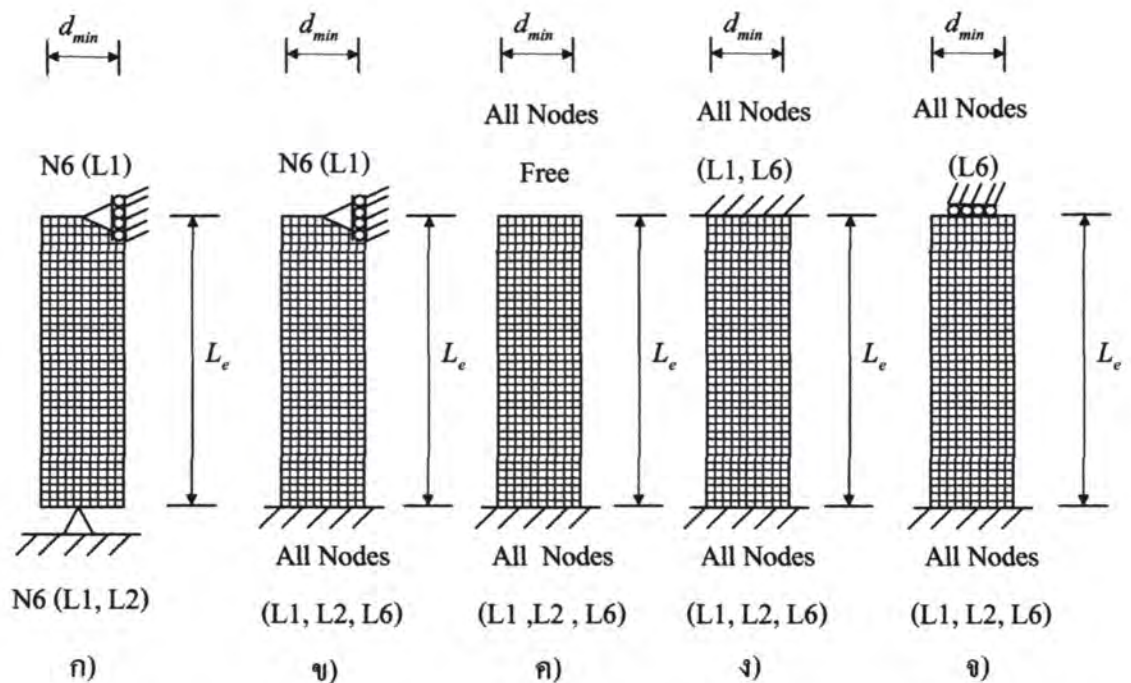
ตารางที่ 3.5 สมการความยาวเทียบเท่าของเสาปลายสอบในช่วงยึดหยุ่น

ลักษณะการยึดรั้ง	สมการความยาวเทียบเท่า
ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller)	$L_e = (0.9r+0.14)L$
ปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน(Fixed-Roller)	$L_e = (0.9r+0.14)L$
ปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ(Fixed-Free)	$L_e = (1.03r-0.02)L$
ยึดแน่นทั้งสองข้าง(Fixed-Fixed)	$L_e = (0.9r+0.14)L$
ปลายใหญ่ยึดแน่น - ปลายเล็กเลื่อนตามราง(Fixed-Guided)	$L_e = (0.9r+0.14)L$

จากตารางที่ 3.5 เมื่อแทนค่าอัตราส่วนที่ปลายเสาและค่าความยาวของเสาปลายสอบ จะได้ค่าความยาวเทียบเท่า L_e จะสามารถจำลองเสาความยาวเทียบเท่าได้ โดยจำลองให้เสามีความกว้างของเสาตรงที่เท่ากับ 10 ซม. เสาจะถูกจำลองให้มีชิ้นส่วนย่อยตามความลึกของเสาเท่ากับ 10 ชิ้น ส่วนจำนวนชิ้นส่วนตามยาวจะเท่ากับเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ โดยแปรผันตามความยาวของเสาดันแบบ และมีคุณลักษณะตรงตามลักษณะพื้นฐานของเสาตามตารางที่ 3.1 ทุกประการ กำหนดให้น้ำหนักกระทำที่ปลายเสาด้านบน สำหรับรายละเอียดการจำลองรูปแบบเสาความยาวเทียบเท่าได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ และภาพที่ 3.9 แสดงการจำลองรูปแบบทางกายภาพและลักษณะที่น้ำหนักกระทำต่อเสาความยาวเทียบเท่า โดยที่ L คือ ความยาวของเสาปลายสอบ L_e คือ ความยาวของเสาความยาวเทียบเท่า d_{\min} ความลึกของเสาความยาวเทียบเท่าซึ่งเท่ากับความลึกของปลายเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ b คือ ความกว้างของเสาความยาวเทียบเท่า W คือ น้ำหนักที่กระทำกับปลายด้านบนของเสาความยาวเทียบเท่า สำหรับการยึดรั้งที่ Node ปลายบนและปลายล่างของเสา เพื่อให้มีลักษณะการยึดรั้งทั้ง 5 รูปแบบ จะมีลักษณะเหมือนกับเสาปลายสอบทุกประการ และภาพที่ 3.10 แสดงรูปแบบของการจำลองเสาความยาวเทียบเท่าที่จะทำการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 3.9 การจำลองรูปแบบเสาโดยหลักการความยาวเทียบเท่า



ภาพที่ 3.10 การจำลองรูปแบบของเสาความยาวเทียบเท่าที่จะทำการศึกษา ก) ยึดหมุนทั้งสองข้าง

ข) ยึดแน่นด้านใหญ่- ยึดหมุนด้านเล็ก ค) ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก

ง) ยึดแน่นทั้งสองข้าง จ) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก

3.6 การหาน้ำหนักวิกฤตของเสาด้วยโปรแกรม ABAQUS

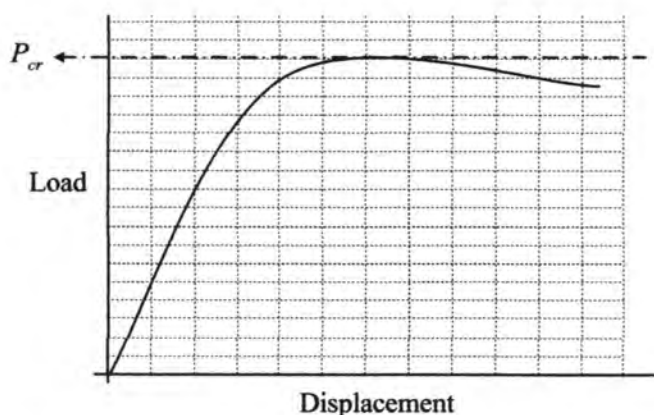
โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมทางด้านไฟไนต์อีเลเมนต์ (Finite Element) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรม ABAQUS เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสาทั้งในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น ดังนี้

3.6.1 การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

เมื่อจำลองรูปแบบเสาปลายสอบเรียบร้อยแล้วตามหัวข้อ 3.5 การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ กระทำได้โดยการป้อนคำสั่งให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์การโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่นด้วยวิธี EIGENVALUE โดยที่ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบคำนวณได้จาก ค่า EIGENVALUE คูณด้วยน้ำหนักที่กระทำกับเสาปลายสอบ ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างสมการความยาวเทียบเท่าของเสาปลายสอบต่อไป ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างและผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบไว้แล้วในภาคผนวก ก

3.6.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น

เมื่อจำลองรูปแบบเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า เสาความยาวเทียบเท่าเสร็จเรียบร้อยแล้วตามหัวข้อ 3.5 การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาดังกล่าว กระทำได้โดยการป้อนคำสั่งให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นด้วยวิธี LARGE DISPLACEMENT ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสา พิจารณาได้ค่าน้ำหนักสูงสุดของกราฟที่เขียนขึ้นระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับเสาและค่าการแอ่นตัวของเสา ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.11 ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างและผลการวิเคราะห์การหาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาทั้งสามประเภทไว้แล้วในภาคผนวก ข ถึง ฉ



ภาพที่ 3.11 ค่าน้ำหนักวิกฤต P_{cr}

3.7 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า หลักการหน้าตัดเทียบเท่าของเสาปลายสอบมีพื้นฐานการพัฒนามาจากการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่น หากจะประยุกต์ใช้กับเสาขาวปานกลางซึ่งมีพฤติกรรมการโก่งเคาะในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้หรือไม่จะต้องทำการตรวจสอบเสียก่อน โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ หรือในกรณีนำเสนอหลักการความยาวเทียบเท่า จะต้องทำการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เช่นเดียวกัน การเปรียบเทียบจะแสดงผลในรูปกราฟที่พล็อตระหว่างระหว่างค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ กับ อัตราส่วนความชะลูด (KL/r_g) โดยที่ P_{cr} คือ น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น, A คือพื้นที่หน้าตัดของปลายเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ, σ_y คือ หน่วยแรงครากมีค่าเท่ากับ 450 ksc., K คือ สัมประสิทธิ์การยึดรั้งที่ปลายเสา, L คือ ความยาวเสา, r_g คือ รัศมีจอร์จัน มีค่าเท่ากับ $\sqrt{I/A}$, I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของปลายเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ โดยเปรียบเทียบตามค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) และจะเปรียบเทียบทั้งกรณีที่ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบ Elastic–Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma/E) + 0.02(\sigma/325)^{5.2}$ ส่วนผลการเปรียบเทียบจะแสดงในบทที่ 5 ต่อไป

3.8 แนวทางการสรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

3.8.1 กรณีหลักการหน้าตัดเทียบเท่า

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบแล้ว หากกราฟของน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า อยู่ในขอบเขตของกราฟน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ แสดงว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่าสามารถประยุกต์ใช้กับช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย แต่หากกราฟของน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า อยู่นอกขอบเขตของกราฟน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ แสดงว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่าไม่ปลอดภัยสำหรับประยุกต์ใช้กับช่วงไม่ยืดหยุ่น ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถสรุปได้ว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่า ที่มาตรฐานการออกแบบเสาไม้ปลายสอบได้แนะนำไว้ ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนามาจากการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่น จะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้อย่างปลอดภัยได้หรือไม่

3.8.2 กรณีหลักการความยาวเทียบเท่า

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบแล้ว หากกราฟของน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า อยู่ในขอบเขตของกราฟน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ แสดงว่าหลักการความยาวเทียบเท่าสามารถประยุกต์ใช้กับช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย แต่หากกราฟของน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าอยู่นอกขอบเขตของกราฟน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ แสดงว่าหลักการความยาวเทียบเท่าไม่ปลอดภัยสำหรับประยุกต์ใช้กับช่วงไม่ยืดหยุ่น ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถสรุปได้ว่า สมการความยาวเทียบเท่าที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนามาจากการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่น จะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้อย่างปลอดภัยได้หรือไม่ และหากใช้ในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย หลักการความยาวเทียบเท่า ก็จะเป็นอีกแนวทางหนึ่ง สำหรับใช้ประยุกต์หาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกของเสาไม้ปลายสอบต่อไป

3.9 บทสรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึง คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุของเสาที่จะทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะการยึดรั้งจำนวน 5 รูปแบบ คือ 1) ยึดหมุนทั้งสองข้าง 2) ยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก 3) ยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก 4) ยึดแน่นทั้งสองข้าง 5) ยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก อัตราส่วนที่ปลายเสาจำนวน 7 ค่า ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9 ความยาวเสาจำนวน 19 ค่า ตั้งแต่ 40 ถึง 400 เซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จำนวน 2 รูปแบบ คือ Elastic Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ในส่วนวิธีการดำเนินการศึกษานั้น ได้กล่าวถึง การสร้างแบบจำลองของเสาปลายสอบ การสร้างแบบจำลองของเสาน้ำคัดเทียบเท่าจากสมการแนะนำของ Criswell (1991), นิธิศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ(2548) และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.1002-16, 2517) การสร้างแบบจำลองของเสาความยาวเทียบเท่าจากสมการความยาวเทียบเท่าที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบด้วยวิธี Eigenvalue การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาด้วยวิธี Large displacement การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาเพื่อตรวจสอบว่าสมการน้ำคัดเทียบเท่าหรือสมการความยาวเทียบเท่าสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วง ไม่ยืดหยุ่นหรือไม่ สุดท้ายได้กล่าวถึงสรุปผลที่จะได้รับจากการศึกษา

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสา

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการดำเนินการศึกษา ได้แก่ การสร้างแบบจำลองของเสา การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสาด้วยโปรแกรม ABAQUS สำหรับในบทที่ 4 จะแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสา ซึ่งวิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS ได้แก่ ผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ การตรวจสอบผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ การสร้างสมการความยาวเทียบเท่า ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

เมื่อจำลองรูปแบบเสาปลายสอบตามหัวข้อ 3.5 ให้มีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุของเสาตามตารางที่ 3.1 โดยกำหนดความยาวเสาเท่ากับ 400 เซนติเมตร เรียบร้อยแล้ว จึงให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์การโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่นด้วยวิธี EIGENVALUE ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ทั้งนี้ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างสมการความยาวเทียบเท่าของเสาปลายสอบต่อไป

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบจากโปรแกรม ABAQUS

จุดยึดรั้ง	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9
ยึดหมุน-ยึดหมุน (Hinge-Roller)	1276.0	1873.0	2543.0	3283.0	4093.0	4968.0	5909.0
ยึดแน่น-ยึดหมุน (Fixed-Roller)	2547.0	3775.0	5157.0	6683.0	8348.0	10147.0	12074.0
ยึดแน่น-ปล่อยอิสระ (Fixed-Free)	598.0	770.0	937.0	1100.0	1261.0	1419.0	1575.0
ยึดแน่น-ยึดแน่น (Fixed-Fixed)	4934.0	7337.0	10043.0	13003.0	16292.0	19810.0	23577.0
ยึดแน่น-เลื่อนตาม ราง(Fixed-Guided)	1410.0	1987.0	2634.0	3349.0	4133.0	4988.0	5916.0

4.1.1 การตรวจสอบผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลาย สอบ เมื่อวิเคราะห์ได้น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบเรียบร้อยแล้ว จะดำเนินการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS ว่า มีความน่าเชื่อถือเพียงใด โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตที่วิเคราะห์ได้กับน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบซึ่งคำนวณจากค่า Bucking coefficient, k ที่เสนอโดย นิธิศักดิ์ แก้วเสนาและคณะ(2548) สำหรับกรณีเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed-Roller) และยึดแน่นด้านใหญ่-เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed-Guided) และ เสนอโดย Criswell (1991) สำหรับกรณีเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free) โดยที่

$$P_k = k(EI_{max}/L^2)$$

P_k = น้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบที่คำนวณจากค่า k

k = Bucking coefficient แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

I_{max} = โมเมนต์อินเนอร์เซียหน้าตัดด้านปลายใหญ่
ของเสาปลายสอบ เท่ากับ 833.333 ซม.⁴

L = ความยาวของเสาปลายสอบ เท่ากับ 400 ซม.

ตารางที่ 4.2 ค่า Bucking coefficient, k ที่เสนอโดยนิริศศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ (2548) และ Criswell (1991)

จุดยึดรั้ง	ค่า Bucking coefficient, k						
	$r=0.3$	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	$r=0.8$	$r=0.9$
ยึดหมุน-ยึดหมุน (Hinge-Roller)	1.820	2.672	3.628	4.685	5.840	7.091	8.434
ยึดแน่น-ยึดหมุน (Fixed-Roller)	3.635	5.388	7.362	9.543	11.923	14.494	17.252
ยึดแน่น-ปล่อยอิสระ (Fixed-Free)	0.853	1.098	1.336	1.569	1.798	2.023	2.246
ยึดแน่น-เลื่อนตาม ราง(Fixed-Guided)	2.011	2.837	3.758	4.777	5.897	7.118	8.442

สามารถคำนวณหาน้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบได้ดังตารางที่ 4.3 สำหรับตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS (P_{cr}) กับน้ำหนักวิกฤตที่คำนวณได้จากค่า Bucking coefficient, k (P_k)

ตารางที่ 4.3 คำนวณน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่คำนวณจากค่า Bucking coefficient

จุดยึดรั้ง	ค่า Bucking coefficient, k						
	$r=0.3$	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	$r=0.8$	$r=0.9$
ยึดหมุน-ยึดหมุน (Hinge-Roller)	1289.17	1892.67	2569.83	3318.54	4136.67	5022.79	5974.08
ยึดแน่น-ยึดหมุน (Fixed-Roller)	2574.79	3816.50	5214.75	6759.62	8445.45	10266.58	12220.16
ยึดแน่น-ปล่อยอิสระ (Fixed-Free)	604.21	777.75	946.33	1111.37	1273.58	1432.96	1590.92
ยึดแน่น-เลื่อนตาม ราง(Fixed-Guided)	1424.46	2009.54	2661.92	3383.71	4177.04	5041.91	5979.75

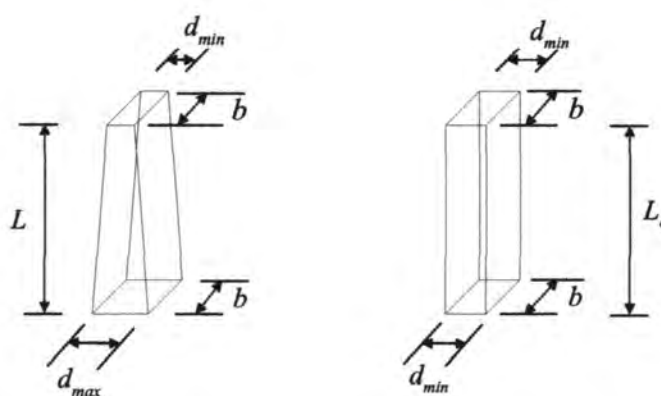
ตารางที่ 4.4 ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS (P_{cr}) กับ น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่คำนวณได้จากค่า Bucking coefficient, k (P_k)

P_{cr}	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)							
	r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9	r=1.0
จุดยึดรองรับแบบยึดหมุน-ยึดหมุน(Hinge-Roller)								
P_k	1289.17	1892.67	2569.83	3318.54	4136.67	5022.79	5974.08	6991.25
P_{cr}	1276.00	1873.00	2543.00	3283.00	4093.00	4968.00	5909.00	6914.00
ร้อยละ	-1.022	-1.039	-1.044	-1.071	-1.056	-1.091	-1.089	-1.105
จุดยึดรองรับแบบยึดแน่น-ยึดหมุน(Fixed-Roller)								
P_k	2574.79	3816.50	5214.75	6759.62	8445.45	10266.58	12220.16	14301.95
P_{cr}	2547.00	3775.00	5157.00	6683.00	8348.00	10147.00	12074.00	14128.00
ร้อยละ	-1.079	-1.087	-1.107	-1.133	-1.154	-1.165	-1.196	-1.216
จุดยึดรองรับแบบยึดแน่น-ปล่อยอิสระ(Fixed-Free)								
P_k	604.21	777.75	946.33	1111.37	1273.58	1432.96	1590.92	1747.46
P_{cr}	598.00	770.00	937.00	1100.00	1261.00	1419.00	1575.00	1730.00
ร้อยละ	-1.028	-0.996	-0.986	-1.023	-0.988	-0.974	-1.001	-0.999
จุดยึดรองรับแบบยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)								
P_k	1424.46	2009.54	2661.92	3383.71	4177.04	5041.91	5979.75	6991.25
P_{cr}	1410.00	1987.00	2634.00	3349.00	4133.00	4988.00	5916.00	6916.00
ร้อยละ	-1.015	-1.122	-1.049	-1.026	-1.054	-1.069	-1.066	-1.076

เมื่อพิจารณา ตารางเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS กับ น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่คำนวณได้จากค่า Bucking coefficient, k ปรากฏว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากที่สุดคือ ร้อยละ 1.216 แสดงว่าโปรแกรม ABAQUS สามารถวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบได้ผลการวิเคราะห์ ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้อง มีค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากที่สุดคือ ร้อยละ 1.216 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

4.1.2 การสร้างสมการความยาวเทียบเท่า

เสาความยาวเทียบเท่า คือ เสาสี่เหลี่ยมคี่หน้าคดโค้งที่เท่ากับหน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบที่เป็นเสาค้นแบบ และมีความยาวเสาเท่ากับความยาวค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าความยาวเทียบเท่า L_e ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาค้นแบบกับเสาความยาวเทียบเท่า



ก.เสาปลายสอบ (เสาค้นแบบ)

ข.เสาความยาวเทียบเท่า

ภาพที่ 4.1 ลักษณะของเสาปลายสอบที่เป็นเสาค้นแบบกับเสาความยาวเทียบเท่า

จากภาพที่ 4.1 ก. เสาปลายสอบที่เป็นเสาค้นแบบ มีความลึกที่ปลายเสาด้านใหญ่เท่ากับ d_{max} , ความลึกที่ปลายเสาด้านเล็กเท่ากับ d_{min} , ความยาวเสาเท่ากับ L , ความกว้างของเสาตรงที่ตลอดความยาวเสาเท่ากับ b จะสามารถจำลองรูปแบบเสาความยาวเทียบเท่า ดังภาพที่ 4.1 ข. ซึ่งเป็นเสาที่มีความลึกของหน้าตัดคดโค้งที่เท่ากับ d_{min} , ความกว้างของเสาตรงที่เท่ากับ b , ความยาวเสาเท่ากับ ความยาวเทียบเท่า L_e สำหรับค่าความยาวเทียบเท่า L_e สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

น้ำหนักวิกฤตที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เป็นน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (P_{cr}) น้ำหนักวิกฤตที่ได้มานั้นจะกำหนดให้มีค่าเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (P_{cr})_e ดังนี้

$$P_{cr} = (P_{cr})_e$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_e}{(KL_e)^2}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_e}{P_{cr}(K)^2}}$$

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีความยาว 400 ซม.สามารถคำนวณหาค่า L_e และอัตราส่วนความยาวเทียบเท่าต่อความยาวของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ (L_e/L) ซึ่ง L เท่ากับ 400 ซม.ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ ตามตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

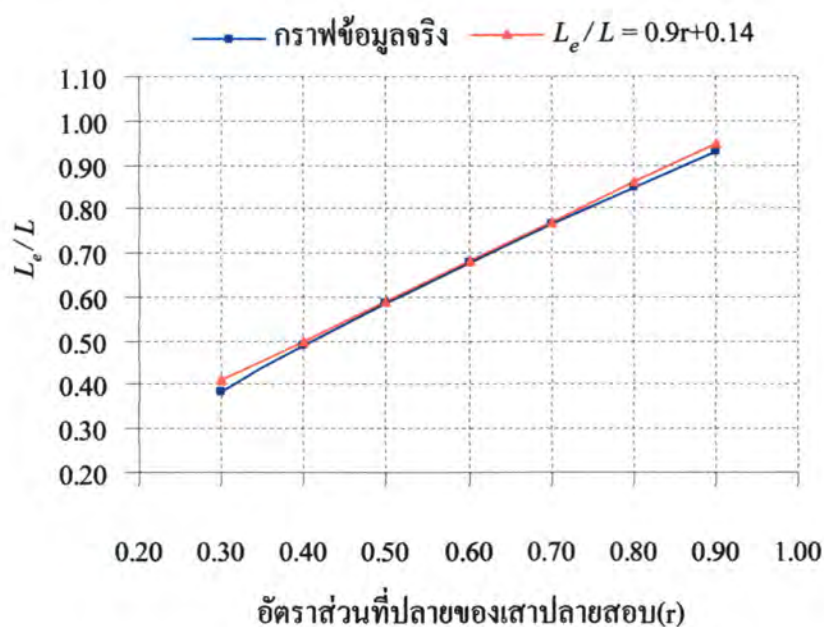
ตารางที่ 4.5 ค่าความยาวเทียบเท่าที่ (L_e)

จุดยึดรั้ง	ค่า Bucking coefficient, k						
	r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9
ยึดหมุน-ยึดหมุน(Hinge-Roller)	23.644	38.182	54.926	73.519	93.642	115.161	137.858
ยึดแน่น-ยึดหมุน(Fixed-Roller)	24.174	38.662	55.276	73.706	93.698	115.068	137.688
ยึดแน่น-ปล่อยอิสระ(Fixed-Free)	12.613	23.219	37.267	54.855	75.986	100.796	129.302
ยึดแน่น-ยึดแน่น(Fixed-Fixed)	24.459	38.989	55.632	74.248	94.102	115.521	138.203
ยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)	21.397	35.991	53.029	72.070	92.735	114.699	137.694

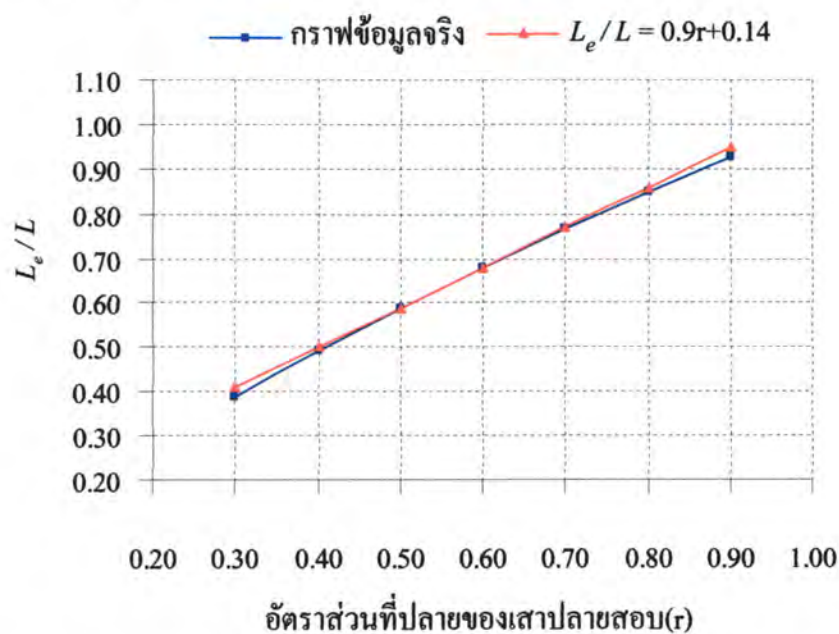
ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนความยาวเทียบเท่าต่อความยาวเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ (L_e/L) โดยที่ L เท่ากับ 400 เซนติเมตร

จุดยึดรั้ง	อัตราส่วน (L_e/L)						
	r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9
ยึดหมุน-ยึดหมุน(Hinge-Roller)	0.059	0.095	0.137	0.184	0.234	0.288	0.345
ยึดแน่น-ยึดหมุน(Fixed-Roller)	0.060	0.097	0.138	0.184	0.234	0.288	0.344
ยึดแน่น-ปล่อยอิสระ(Fixed-Free)	0.032	0.058	0.093	0.137	0.190	0.252	0.323
ยึดแน่น-ยึดแน่น(Fixed-Fixed)	0.061	0.097	0.139	0.186	0.235	0.289	0.346
ยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)	0.053	0.090	0.133	0.180	0.232	0.287	0.344

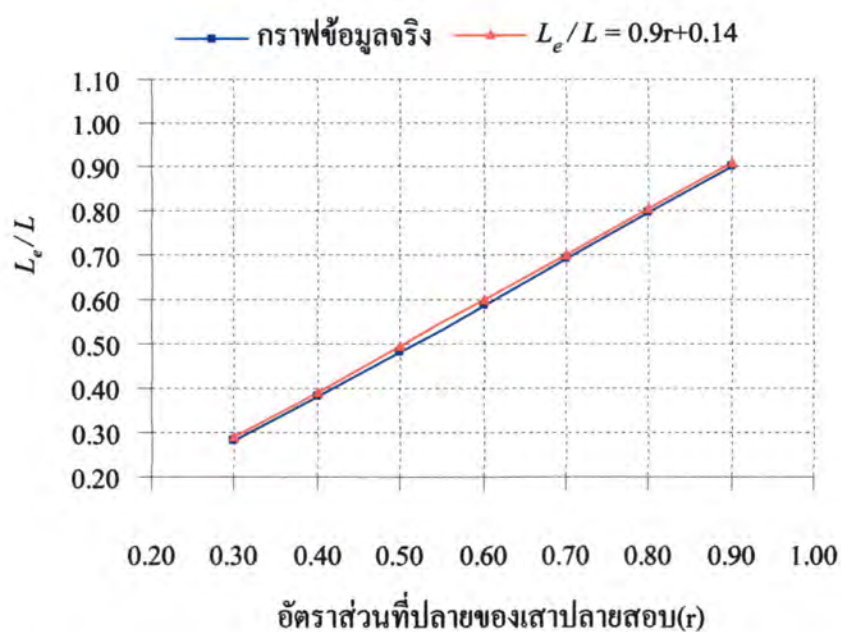
จากตารางที่ 4.6 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L_e / L กับอัตราส่วนที่ปลายเสา (r) ในรูปกราฟได้ดังภาพที่ 4.2 ถึง 4.6



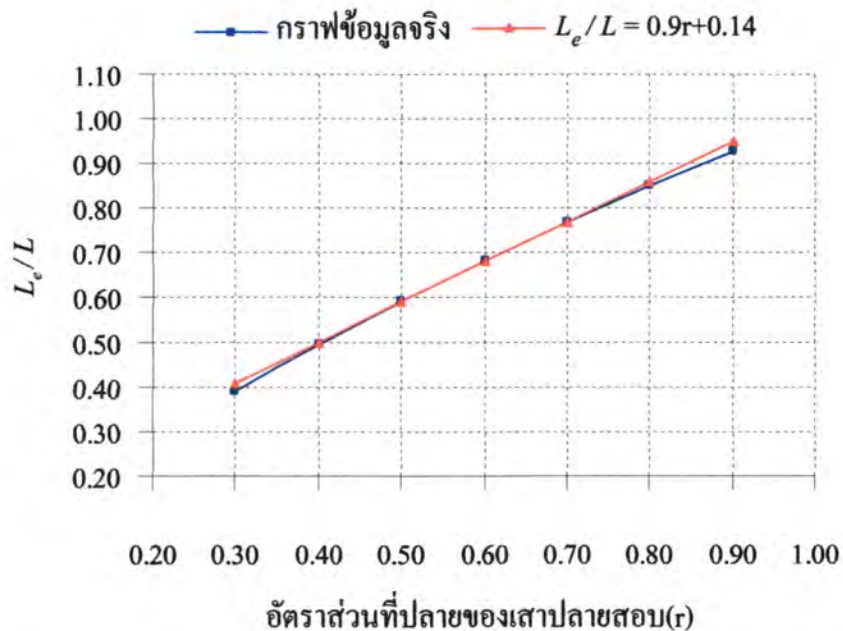
ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_e/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller)



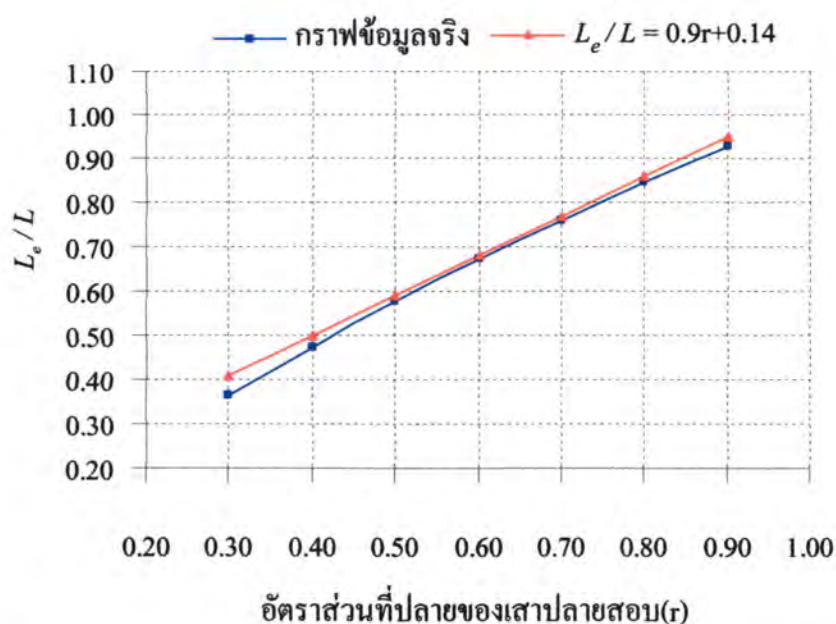
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_e/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed-Roller)



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_e/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r)
ที่มีการยึดแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free)



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_e/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r)
ที่มีการยึดแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed)



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_e/L กับ อัตราส่วนที่ปลายของเสา (r) ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided)

จากภาพที่ 4.2 ถึงภาพที่ 4.6 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L_e/L กับอัตราส่วนที่ปลายเสา (r) กราฟสีน้ำเงินเป็นกราฟเส้นโค้งสร้างจากข้อมูลจริงในตาราง 4.6 เพื่อให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายจึงปรับแก้เป็นกราฟเส้นตรงสีแดง ซึ่งมีรูปสมการคือ $L_e/L = 0.9r + 0.14$ สำหรับจุดยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) ยึดแน่นด้านใหญ่-ยึดหมุนด้านเล็ก (Fixed-Roller) แบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) แบบยึดแน่นด้านใหญ่-ด้านเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และมีรูปสมการคือ $L_e = (1.03r + 0.02)L$ สำหรับจุดยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free) ดังนั้นสามารถสรุป สมการความยาวเทียบเท่าของเสาปลายสอบในช่วงยึดหยุ่นได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมการความยาวเทียบเท่า ของเสาปลายสอบในช่วงยึดหยุ่น

ลักษณะการยึดรั้ง	สมการความยาวเทียบเท่า
ยึดหมุน-ยึดหมุน (Hinge-Roller)	$L_e = (0.9r+0.14)L$
ยึดแน่น-ยึดหมุน (Fixed-Roller)	$L_e = (0.9r+0.14)L$
ยึดแน่น-ปล่อยอิสระ (Fixed-Free)	$L_e = (1.03r+0.02)L$
ยึดแน่น-ยึดแน่น (Fixed-Fixed)	$L_e = (0.9r+0.14)L$
ยึดแน่น-เลื่อนตามราง (Fixed-Guided)	$L_e = (0.9r+0.14)L$

จากสมการความยาวเทียบเท่าในตารางที่ 4.7 สามารถคำนวณหาความยาวเทียบเท่าตามลักษณะการยึดรั้งได้ดังนี้ การยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) แบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) แบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) และแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ส่วนการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) สามารถคำนวณหาความยาวเทียบเท่าได้ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ความยาวเทียบเท่าของการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) แบบปลายใหญ่ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) แบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) และแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided)

ความยาวเสา ปลายสอบ	ความยาวเทียบเท่า L_e ; $L_e = (0.9r+0.14)L$						
L (ซม.)	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	16.40	20.00	23.60	27.20	30.80	34.40	38.00
60	24.60	30.00	35.40	40.80	46.20	51.60	57.00
80	32.80	40.00	47.20	54.40	61.60	68.80	76.00
100	41.00	50.00	59.00	68.00	77.00	86.00	95.00
120	49.20	60.00	70.80	81.60	92.40	103.20	114.00
140	57.40	70.00	82.60	95.20	107.80	120.40	133.00
160	65.60	80.00	94.40	108.80	123.20	137.60	152.00
180	73.80	90.00	106.20	122.40	138.60	154.80	171.00
200	82.00	100.00	118.00	136.00	154.00	172.00	190.00
220	90.20	110.00	129.80	149.60	169.40	189.20	209.00
240	98.40	120.00	141.60	163.20	184.80	206.40	228.00
260	106.60	130.00	153.40	176.80	200.20	223.60	247.00
280	114.80	140.00	165.20	190.40	215.60	240.80	266.00
300	123.00	150.00	177.00	204.00	231.00	258.00	285.00
320	131.20	160.00	188.80	217.60	246.40	275.20	304.00
340	139.40	170.00	200.60	231.20	261.80	292.40	323.00
360	147.60	180.00	212.40	244.80	277.20	309.60	342.00
380	155.80	190.00	224.20	258.40	292.60	326.80	361.00
400	164.00	200.00	236.00	272.00	308.00	344.00	380.00

ตารางที่ 4.9 ความยาวเทียบเท่าของการยึดแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ
(Fixed-Free)

ความยาวเสา ปลายสอบ	ความยาวเทียบเท่า L_e ; $L_e = (1.03r+0.02)L$						
L (ชม.)	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	11.56	15.68	19.80	23.92	23.9	32.16	36.28
60	17.34	23.52	29.70	35.88	35.88	48.24	54.42
80	23.12	31.36	39.60	47.84	47.84	64.32	72.56
100	28.90	39.20	49.50	59.80	59.80	80.40	90.70
120	34.68	47.04	59.40	71.76	71.76	96.48	108.84
140	40.46	54.88	69.30	83.72	83.72	112.56	126.98
160	46.24	62.72	79.20	95.68	95.68	128.64	145.12
180	52.02	70.56	89.10	107.64	107.64	144.72	163.26
200	57.80	78.40	99.00	119.60	119.60	160.80	181.40
220	63.58	86.24	108.90	131.56	131.56	176.88	199.54
240	63.58	94.08	118.80	143.52	143.52	192.96	217.68
260	75.24	101.92	128.70	155.48	155.48	209.04	235.82
280	80.92	109.76	138.60	167.44	167.44	225.12	253.96
300	86.70	117.6	148.50	179.40	179.40	241.20	272.10
320	92.70	125.44	158.40	191.36	191.36	257.28	290.24
340	98.48	133.28	168.30	203.32	203.32	273.36	308.38
360	104.04	141.12	178.20	215.28	215.28	289.44	326.52
380	109.82	148.96	188.10	227.24	227.24	305.52	344.66
400	115.60	156.8	198.00	239.20	239.20	321.60	362.80

เมื่อคำนวณได้ค่าความยาวเทียบเท่า L_e แล้ว จะสามารถจำลองเสาความยาวเทียบเท่าได้ ดังรายละเอียดที่ได้เคยแสดงไว้แล้วในหัวข้อ 3.5 ของบทที่ 3

4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น

4.2.1 เสาปลายสอบ

เมื่อจำลองรูปแบบเสาปลายสอบตามหัวข้อ 3.5 ให้มีลักษณะทางกายภาพ ดังภาพที่ 3.4 และคุณสมบัติวัสดุของเสาตามตารางที่ 3.1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นด้วยวิธี LARGE DISPLACEMENT ผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) กรณีที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 และกรณี Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

สำหรับผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบอื่นๆ พร้อมทั้งตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง และ ข ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ จะใช้เปรียบเทียบกับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าเพื่อตรวจสอบว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่าสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้หรือไม่ หรือใช้ในการเปรียบเทียบกับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าเพื่อตรวจสอบว่าหลักการความยาวเทียบเท่าที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้หรือไม่

ตารางที่ 4.10 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาว	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	14898	19576	24078	30150	32254	36940	41185
60	14389	19074	23514	29976	32169	36750	40970
80	14134	18715	23243	29947	32154	36544	40854
100	13968	18543	23176	29240	32019	36430	40784
120	13645	18370	22931	27442	31914	36349	40120
140	10278	15031	20281	25852	31338	36198	39426
160	7908	11592	15714	20238	25113	30254	34465
180	6263	9185	12463	16076	20005	24225	28283
200	5080	7452	10150	13046	16256	19711	23221
220	4197	6165	8369	10803	13458	16326	18320
240	3526	5184	7038	9086	11320	13736	15229
260	3004	4420	6000	7747	9653	11715	13111
280	2596	3813	5177	6683	8328	10108	11396
300	2264	3323	4512	5825	7259	8810	9986
320	1990	2919	3967	5121	6382	7746	8820
340	1763	2590	3515	4538	5656	6864	7843
360	1574	2311	3137	4049	5046	6125	7020
380	1413	2075	2816	3636	4531	5499	6317
400	1267	1873	2543	3244	4090	4964	5716

ตารางที่ 4.11 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้ง

สองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood

$$\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$$

ความยาว	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ						
	(กิโลกรัม)						
L (ซม.)	r=0.3	r=0.4	r=0.5	R=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9
40	14894	19607	24192	28659	30122	37234	41216
60	13734	18017	22083	25927	29546	32935	36080
80	11258	14929	18445	21797	24989	28025	30925
100	9119	12443	15464	18473	21349	24104	26729
120	7355	10081	12881	15523	18278	20829	22860
140	6043	8256	10624	13091	15533	17915	20219
160	5069	6929	8854	10913	13111	15299	17461
180	4347	5928	7571	9268	11051	13022	15002
200	3832	5189	6588	8056	9572	11140	12853
220	3445	4678	5875	7112	8435	9506	11219
240	3114	4288	5409	6466	7544	8742	9994
260	2794	3932	5036	6065	7006	7919	8999
280	2475	3559	4664	5715	6674	7251	8286
300	2183	3171	4235	5314	6336	6645	8045
320	1933	2819	3792	4825	5874	6871	7751
340	1721	2515	3395	4344	5341	6348	7308
360	1540	2254	3048	3912	4834	5794	6755
380	1386	2030	2748	3533	4378	5270	6189
400	1254	1836	2488	3198	3974	4796	5648

4.2.2 เสาหน้าตัดเทียบเท่า

เมื่อจำลองรูปแบบเสาหน้าตัดเทียบเท่าตามหัวข้อ 3.5 ให้มีลักษณะทางกายภาพ ดังภาพที่ 3.7 และคุณสมบัติวัสดุของเสาตามตารางที่ 3.1 เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นด้วยวิธี LARGE DISPLACEMENT ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) กรณีที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และกรณี Stress-Strain curve แบบ RambergOsgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.13

สำหรับผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบอื่นๆพร้อมทั้งตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของหน้าตัดเทียบเท่าได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ และ ฉ ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า จะใช้เปรียบเทียบกับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่เป็นเสาตันแบบ เพื่อตรวจสอบว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่าสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้หรือไม่

ตารางที่ 4.12 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้ง
สองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	25904	29067	32051	34943	37653	40275	42714
60	25866	28990	31989	34879	37601	40227	42660
80	25279	28738	31826	34556	37511	40130	42594
100	20516	26968	31170	34220	37271	39908	42460
120	14534	20334	26655	32886	36369	39415	42076
140	10725	15086	20103	27821	31624	36927	40794
160	8226	11587	15481	19980	24861	30154	35407
180	6502	9169	12261	15848	19773	24108	28623
200	5274	7434	9944	12861	16061	20105	23336
220	4356	6148	8226	10641	13294	16240	19342
240	3663	5169	6916	9036	11181	13560	16279
260	3121	4406	5896	7700	9534	11668	13885
280	2696	3801	5086	6640	8225	10053	12266
300	2350	3312	4433	5815	7168	8762	10443
320	2066	2912	3897	5123	6303	7704	9183
340	1831	2581	3453	4512	5585	6827	8138
360	1634	2303	3081	4030	4983	6092	7261
380	1467	2068	2766	3588	4474	5469	6519
400	1321	1867	2497	3248	4039	4937	5885

ตารางที่ 4.13 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood

$$\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$$

ความยาวเสา ปลายสอบ	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
L (ซม.)							
40	21001	24852	28498	32050	35376	38589	41579
60	16503	19829	23240	26676	29954	33117	36116
80	13032	16120	19177	22138	25164	28108	30914
100	10233	13106	15542	18564	21450	24162	26725
120	7956	10512	13118	15880	18323	20857	23236
140	6394	8400	10709	13245	16010	17914	20195
160	5369	6994	8780	10885	13330	15275	17435
180	4660	5998	7502	9167	11100	12991	14975
200	3967	5165	6545	7971	9477	11093	12845
220	3562	4550	5774	7054	8387	9762	11192
240	3120	4188	5352	6677	7490	8704	9970
260	2880	4006	4985	6392	6994	7901	8979
280	2534	3483	4623	5935	6604	7653	7995
300	2187	3123	4248	5368	6287	7356	8079
320	2028	2843	3772	4812	5903	6905	7765
340	1801	2528	3362	4311	5288	6346	7302
360	1609	2261	3012	3872	4775	5778	7302
380	1446	2033	2711	3492	4336	5250	6176
400	1307	1838	2453	3162	3933	4776	5642

4.2.3 เสาความยาวเทียบเท่า

เมื่อจำลองรูปแบบเสาความยาวเทียบเท่าตามหัวข้อ 3.5 โดยให้มีความลึกของหน้าตัดเสาเท่ากับความลึกของหน้าตัดเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ (d_{min}) ที่เป็นเสาดันแบบ และให้มีความยาวของเสาเท่ากับความยาวเทียบเท่า (L_e) ตามตารางที่ 4.8 และ 4.9 แล้วแต่กรณีของจุดยึดครึ่งส่วนลักษณะทางกายภาพดังภาพที่ 3.10 พร้อมทั้งคุณสมบัติวัสดุของเสาตามตารางที่ 3.1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นด้วยวิธี LARGE DISPLACEMENT ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดครึ่งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) กรณีที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.14 และกรณี Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.15

สำหรับผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดครึ่งแบบอื่นๆ พร้อมทั้งตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ และ ช ค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของความยาวเทียบเท่า จะใช้เปรียบเทียบกับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดันแบบ เพื่อตรวจสอบว่าหลักการความยาวเทียบเท่าสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้

ตารางที่ 4.14 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13507	17915	22521	27039	31536	36044	40567
60	13478	17980	22506	26999	31526	35535	40514
80	13422	17924	22439	26935	31423	35454	40338
100	13179	17781	21560	26955	31387	35330	40309
120	11710	17070	20040	25500	31194	34878	39975
140	8926	14044	17450	24423	30733	34125	38858
160	6883	10928	14820	19756	24560	28550	33571
180	5458	8676	12285	15772	19546	22920	27138
200	4424	7043	9868	12881	15323	18106	22297
220	3627	5828	8169	10548	12764	15080	18338
240	3077	4901	6871	8820	10880	12643	15345
260	2623	4179	6014	7660	9480	11040	13165
280	2263	3605	5210	6440	8139	9846	11360
300	1972	3142	4405	5729	7093	8590	9901
320	1734	2762	3873	5037	6237	7588	8706
340	1536	2448	3432	4464	5527	6613	7715
360	1371	2184	3062	3983	4932	5900	6884
380	1231	1961	2749	3576	4428	5298	6180
400	1108	1760	2482	3233	3997	4782	5592

ตารางที่ 4.15 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้อัดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้ง

สองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood

$$\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$$

ความยาวเสา ปลายสอบ	น้ำหนักวิกฤตในไม้อัดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
L (ซม.)							
40	11395	16707	21250	25899	30365	34947	39693
60	9958	13996	18108	22095	27760	30202	34276
80	8247	11690	15184	18705	23670	25781	29336
100	6888	9906	12786	15883	19882	22257	25360
120	5707	8386	10988	13837	17170	19303	22048
140	4689	7035	9355	11852	14880	16715	19195
160	3847	5870	7884	10079	12432	14378	16539
180	3277	4924	6558	8551	10833	12310	14204
200	2854	4278	5771	7345	9110	10531	12371
220	2519	3776	5087	6439	8134	9007	10616
240	2408	3310	4551	5744	7335	8206	9457
260	2337	3363	4355	5253	6788	7667	8517
280	2109	3167	4160	5105	6033	6951	7870
300	1879	2900	3913	4882	5829	6755	7667
320	1672	2615	3588	4558	5512	6448	7367
340	1492	2349	3253	4172	5095	6015	6930
360	1338	2114	2940	3791	4655	5525	6396
380	1205	1908	2659	3441	4237	5043	5856
400	1092	1724	2414	3100	3858	4600	5492

4.3 บทสรุป

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของเสา ซึ่งวิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS ได้แก่ ผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบด้วยวิธี Eigenvalue การตรวจสอบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตที่วิเคราะห์ได้กับน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบซึ่งคำนวณจากค่า Bucking coefficient, k ที่เสนอโดย นิธิศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ และ Criswell การสร้างสมการความยาวเทียบเท่า ผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ, เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ด้วยวิธี Large displacement เมื่อวิเคราะห์ได้น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาทั้งสามประเภทแล้ว ในบทต่อไปคือบทที่ 5 จะกล่าวถึงการตรวจสอบว่าสมการหน้าตัดเทียบเท่าหรือสมการความยาวเทียบเท่า ซึ่งพัฒนามาจากการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่น จะสามารถใช้ในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัยได้หรือไม่ โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าหรือเสาความยาวเทียบเท่า กับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดั้งเดิม หากน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าหรือเสาความยาวเทียบเท่าอยู่ในขอบเขตของเสาปลายสอบที่เป็นเสาดั้งเดิม แสดงว่า สมการหาดำเน้งหน้าตัดเทียบเท่าหรือสมการความยาวเทียบเท่า สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่น

บทที่ 5

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการศึกษา

จากบทที่ 4 ได้ทำการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึงผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่าที่ได้แนะนำไว้ในมาตรฐานการออกแบบเสาไม้ปลายสอบต่างๆ หรือสมการความยาวเทียบเท่าที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ ซึ่งทั้งสองสมการมีพื้นฐานการพัฒนาจากการโก่งเคาะในช่วงยืดหยุ่น จะใช้ประยุกต์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาไม้ปลายสอบได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า หรือเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

การเปรียบเทียบจะแสดงผลในรูปกราฟที่พล็อตระหว่างค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ กับ อัตราส่วนความชะลูด (KL / r_g) โดยที่ P_{cr} คือ น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่น, A คือพื้นที่หน้าตัดของปลายเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ, σ_y คือ หน่วยแรงครากมีค่าเท่ากับ 450 ksc. K คือ สัมประสิทธิ์การยึดรั้งที่ปลายเสา, L คือ ความยาวเสา, r_g คือ รัศมีจายเรชั่น มีค่าเท่ากับ $\sqrt{I / A}$, I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของปลายเสาด้านเล็กของเสาปลายสอบ โดยเปรียบเทียบตามค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) และจะเปรียบเทียบทั้งกรณีที่มีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\epsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ได้แสดงไว้ตามลักษณะการยึดรั้งของเสา รายละเอียดตามหัวข้อ 5.1 ถึง 5.5 ดังนี้

5.1 การยึดรั้งแบบปลายทั้งสองข้างยึดหมุน (Hinge - Roller)

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบในกรณีที่มีจุดยึดรั้งแบบปลายทั้งสองข้างยึดหมุน (Hinge - Roller) ได้แสดงไว้ตั้งแต่ภาพที่ 5.1 ถึงภาพที่ 5.7 สามารถอธิบายผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

กรณีความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic เมื่อพิจารณากราฟจากภาพที่ 5.1 ถึง 5.7 จะพบว่า ในช่วงที่ค่า (KL/r_g) มีค่ามากหรือเสามีความยาวมาก น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาทั้งสามประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อ (KL/r_g) มีค่าลดลงจนถึง (KL/r_g) ค่าๆ หนึ่ง กราฟของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าจะแยกตัวออกจากกราฟของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาปลายสอบและมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นต่ำกว่าเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาปลายสอบอย่างชัดเจน โดยที่หากอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าน้อย ค่าความแตกต่างระหว่างค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่ากับเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาปลายสอบจะมีค่ามาก ส่วนที่ค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่ามาก ค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นจะมีค่าน้อย ส่วนช่วงที่มีค่า (KL/r_g) น้อย กราฟของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะแยกตัวออกและมีค่าสูงกว่าเสาปลายสอบ เมื่อถึง (KL/r_g) ค่าๆ หนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาทั้งสามประเภทจะคงที่ แต่เสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นสูงกว่าเสาประเภทอื่นอย่างชัดเจน ส่วนเสาปลายสอบและเสาความยาวเทียบเท่าจะมีน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน โดยที่เสาปลายสอบจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นสูงกว่าเสาความยาวเทียบเท่าเล็กน้อย ส่วนเสาที่มีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะมีรูปแบบกราฟของเสาทั้งสามประเภทคล้ายคลึงกับแบบ Elastic-Perfectly Plastic แต่จะแตกต่างกันในจุดที่ รูปแบบ Ramberg Osgood กราฟจะไม่แสดงกรณีที่เสาทั้งสามประเภทมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ คงที่ สามารถอธิบายพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาทั้งสามประเภทได้ดังนี้

ในช่วงที่ค่า (KL/r_g) มีค่ามากหรือเสามีความยาวมาก น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาทั้งสามประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน หากพิจารณาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาโดยทั่วไป ซึ่งจะเกิดโก่งเคาะเมื่อหน่วยแรงรวมระหว่างหน่วยแรงดัดกันหน่วยแรงดัดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุ ในช่วงที่เสามีความยาวมากโมเมนต์ดัดจะมีอิทธิพลต่อการโก่งเคาะของเสา และช่วงที่เสามีความยาวปานกลางทั้งแรงตามแนวแกนและแรงดัดจะมีอิทธิพลต่อการโก่งเคาะของเสา ส่วนช่วงเสามีความยาวสั้น แรงตามแนวแกนเสามีอิทธิพลต่อ

การโก่งคดของเสา ดังนั้นในช่วงนี้ที่มีค่า (KL/r_g) มีค่ามากหรือเสามีความยาวมาก เสาจะเกิดการโก่งคดเนื่องจากอิทธิพลของโมเมนต์คดเป็นหลัก เมื่อเสามีความยาวเท่ากันโมเมนต์คดที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลให้น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ของเสาทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

ในช่วงที่ค่า (KL/r_g) มีค่าน้อยหรือเสามีความยาวสั้น น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำคดเทียบเท่าจะสูงกว่าเสาปลายสอบและเสาคความยาวเทียบเท่า โดยที่เสาปลายสอบจะมีน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นสูงกว่าเสาคความยาวเทียบเท่าเล็กน้อย ในช่วงนี้เมื่อเสารับน้ำหนักจะเกิดการโก่งตัวน้อย โมเมนต์คดจะเกิดน้อย แรงตามแนวแกนจะมีอิทธิพลต่อการวิบัติของเสา เสาจะวิบัติเมื่อน้อยแรงคดที่เกิดขึ้นในเสามีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุ กำลังรับน้ำหนักของเสาจะได้จากผลคูณของพื้นที่หน้าคดที่รับแรงกับหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุ เนื่องจากเสาน้ำคดเทียบเท่ามีพื้นที่หน้าคดมากกว่าเสาปลายสอบและเสาคความยาวเทียบเท่า จึงมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นสูงกว่าเสาปลายสอบและเสาคความยาวเทียบเท่าและเกิดที่ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ สูงกว่าหนึ่งมาก ส่วนเสาปลายสอบและเสาคความยาวเทียบเท่าซึ่งมีพื้นที่รับแรงเท่ากันคือเท่ากับพื้นที่ปลายเสาคด้านเล็กของเสาปลายสอบ จึงทำให้น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่เสาคความยาวเทียบเท่าเกิดที่ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ เท่ากับกับหนึ่ง ส่วนเสาปลายสอบเกิดที่ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ สูงกว่าหนึ่งเล็กน้อย ส่วนกรณีที่กราฟของความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Ramberg Osgood ไม่แสดงกรณีที่มีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าคงที่ ไม่ได้หมายความว่า ในช่วงที่ค่า (KL/r_g) มีค่าน้อยหรือเสามีความยาวสั้น เสาจะไม่มีพฤติกรรมดังกล่าว แต่ด้วยรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Ramberg Osgood เมื่อเสารับน้ำหนักจะเกิดการเสียรูปของเสามากกว่าแบบ Elastic-Perfectly Plastic การพัฒนาำลังของเสาเมื่อรับน้ำหนักจะน้อย ดังนั้นเสาที่มีความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Ramberg Osgood หากจะเกิดกรณี $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าคงที่หรือหน่วยแรงในเสาที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุ ความยาวของเสาจะต้องสั้นมากๆ และน้อยกว่า 40 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ กราฟจึงไม่แสดงผลว่าเกิดกรณีวิบัติที่มีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ คงที่

หากพิจารณาค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำคดเทียบเท่าหรือเสาคความยาวเทียบเท่าเปรียบเทียบกับเสาปลายสอบ ในช่วงที่ (KL/r_g) มีค่ามาก จะพบว่าเสาน้ำคดเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นใกล้เคียงกับเสาปลายสอบมากกว่าเสาคความยาวเทียบเท่า ทั้งนี้เนื่องจากสมการทั้งสองพัฒนามาจากการปรับกราฟกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบจากเส้นโค้งให้เป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่ากราฟของสมการหน้าคดเทียบเท่าได้รับการปรับให้ใกล้เคียงกับกราฟเส้นโค้งของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบมากกว่ากราฟของสมการความยาวเทียบเท่า จึงทำ

ให้กำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่ามีค่าใกล้เคียงกับกำลังของเสาปลายสอบมากกว่าเสาความยาวเทียบเท่า ส่วนในช่วงที่ (KL/r_g) มีค่าน้อย น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าสูงกว่าเสาปลายสอบมาก และน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าจะต่ำกว่าเสาปลายสอบเล็กน้อย และหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic กับแบบ Ramberg Osgood จะพบว่า ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะมีค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าหรือเสาความยาวเทียบเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาปลายสอบ สูงกว่าแบบ Elastic-Perfectly Plastic ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเสียรูปที่มากกว่าของแบบ Ramberg Osgood ทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาลดลงตามไปด้วย

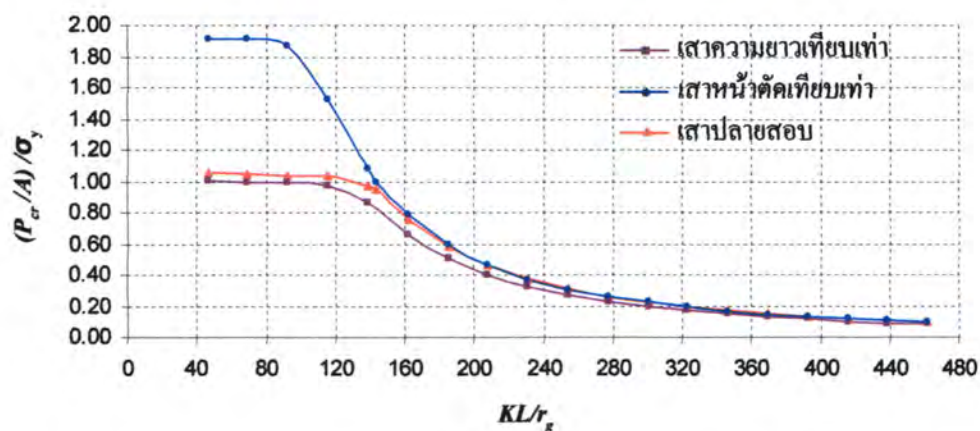
เมื่อพิจารณาเฉพาะความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Ramberg Osgood โดยพิจารณาจุดที่ทำให้น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดมีค่ามากกว่าเสาปลายสอบ จะพบว่า หากค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป จุดเริ่มต้นที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นสูงกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ เท่ากับหนึ่ง ส่วนค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา จะมีค่าประมาณ 0.4 ส่วนความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic จะเกิดที่ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ เท่ากับหนึ่งทุกค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทั้งนี้เนื่องมาจากความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะทำให้เสาเกิดการโก่งตัวและเกิดค่าโมเมนต์คดในเสามากกว่าแบบ Elastic-Perfectly Plastic อีกทั้งค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าน้อย จึงทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกนเสาลดลงอย่างมาก เป็นผลให้เสาทั้งสองเกิดการโก่งเคาะที่ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ต่ำมากกว่าแบบ Elastic-Perfectly Plastic ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) ตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไปไม่เกิดกรณีนี้เนื่องจากมีขนาดของหน้าตัดของเสาทั้งสองมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเสารับน้ำหนักจะเกิดการโก่งตัวน้อยกว่า จึงสามารถพัฒนากำลังได้จนค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ใกล้เคียงกับหนึ่ง ซึ่งผลดังกล่าวจะมีผลต่อการประยุกต์ใช้หลักการหน้าตัดเทียบเท่าในการหาลำดับรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาปลายสอบในหัวข้อต่อไป

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญสำหรับกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic ได้ว่า ในช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าและอยู่นอกขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ

ทุกค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ หรือทุกค่า (KL/r_g) ส่วนกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะได้ขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาความยาวเทียบเท่ามีค่าเช่นเดียวกับรูปแบบ Elastic – Perfectly Plastic แต่จะแตกต่างกันในจุดที่รูปแบบกราฟของความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะไม่แสดงกรณีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าคงที่ และตั้งแต่ค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังสูงกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ประมาณ 0.4

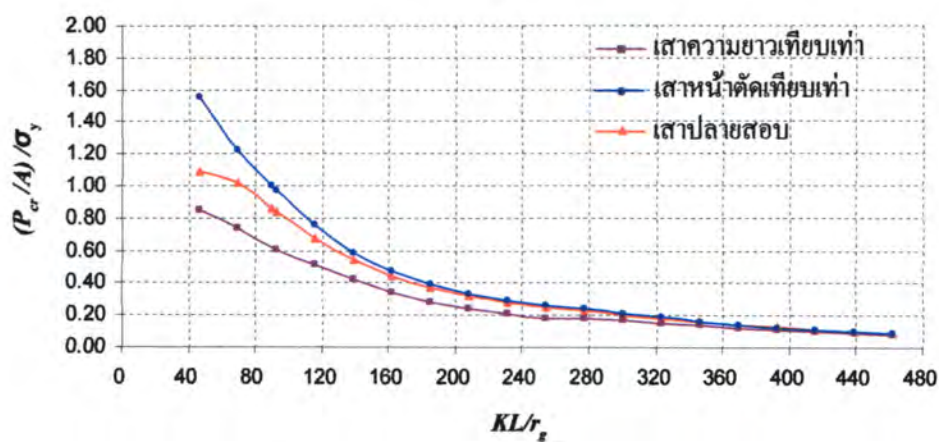
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง(Hinge-Roller) : $r = 0.3$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.3$

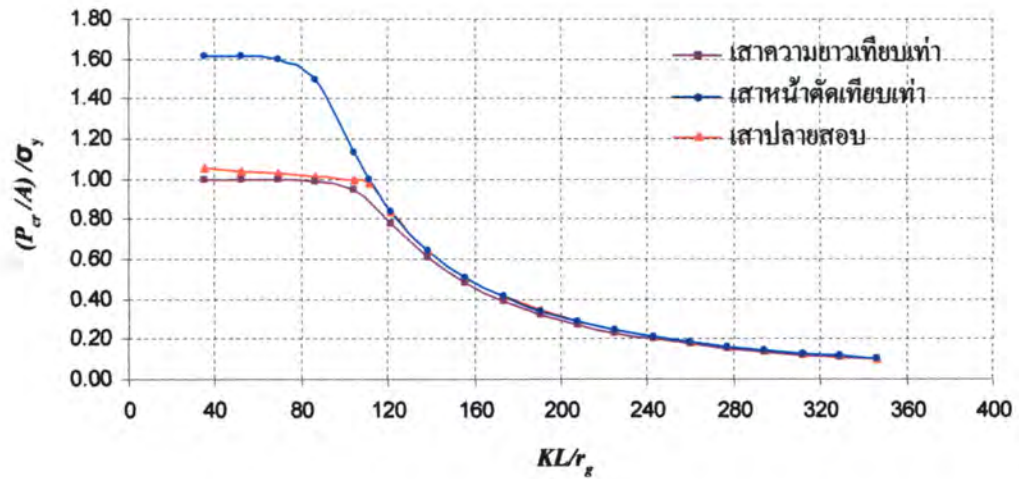
Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และ อัตราส่วนที่ปลาย เท่ากับ 0.3

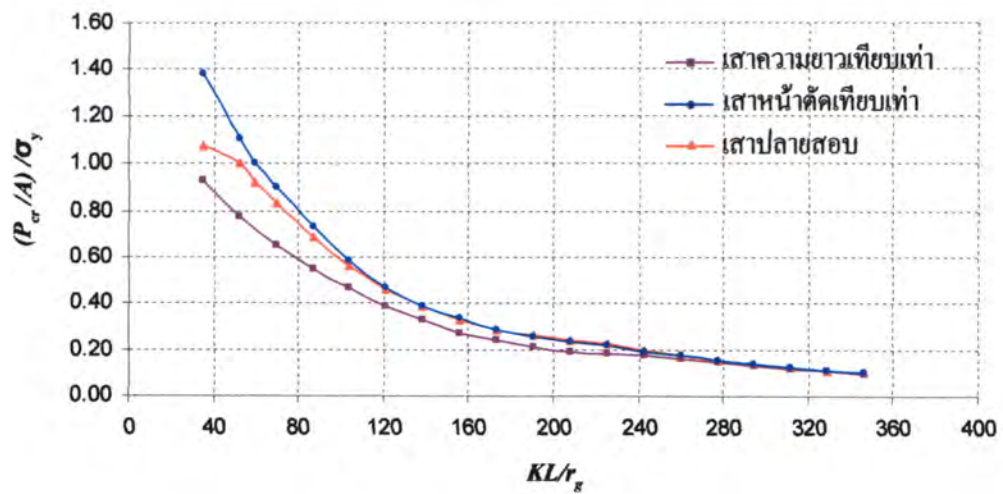
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง(Hinge-Roller) : $r = 0.4$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง(Hinge-Roller): $r = 0.4$

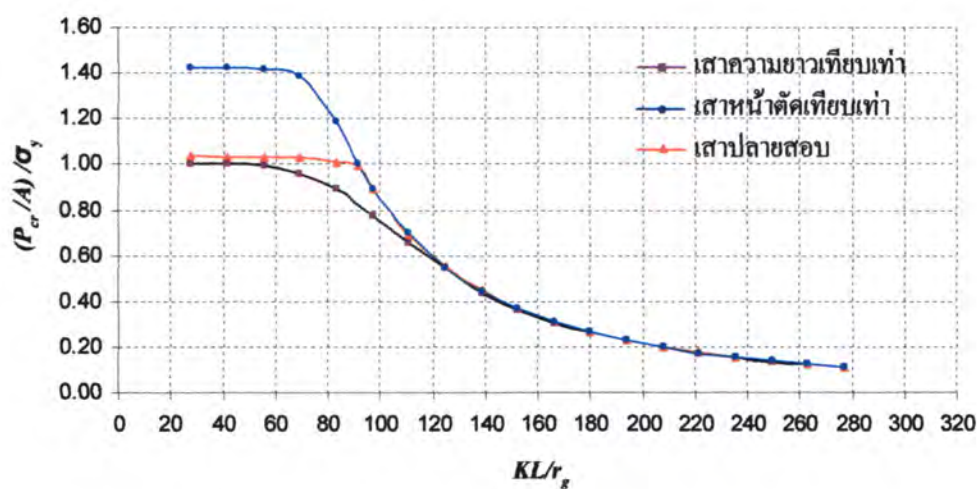
Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหมุนของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และ อัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.4

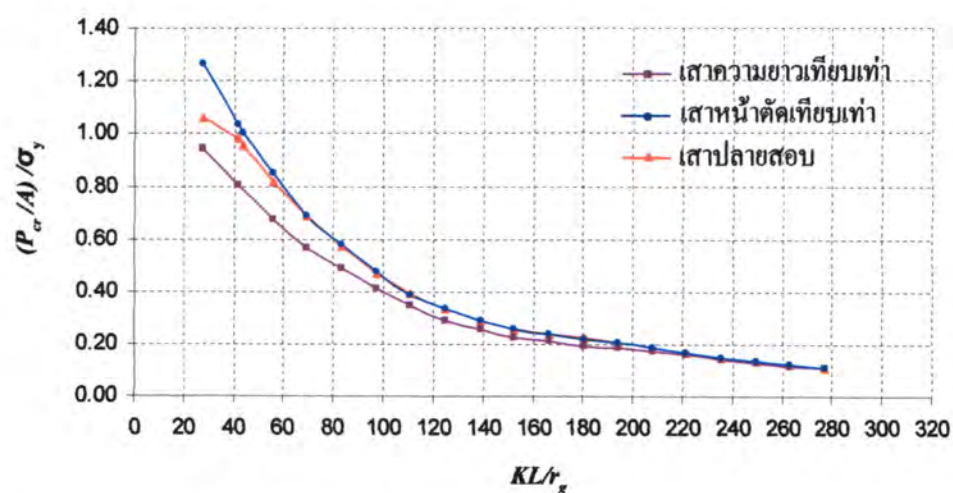
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.5$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.5$

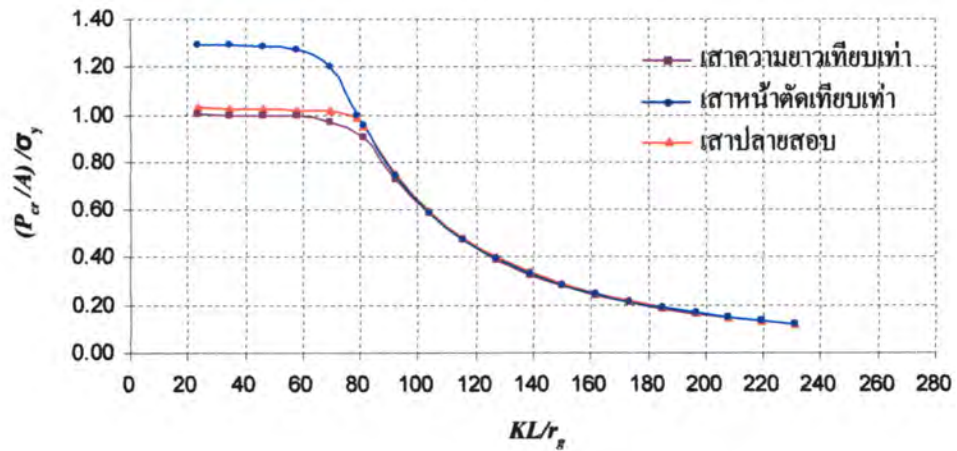
Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และ อัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.5

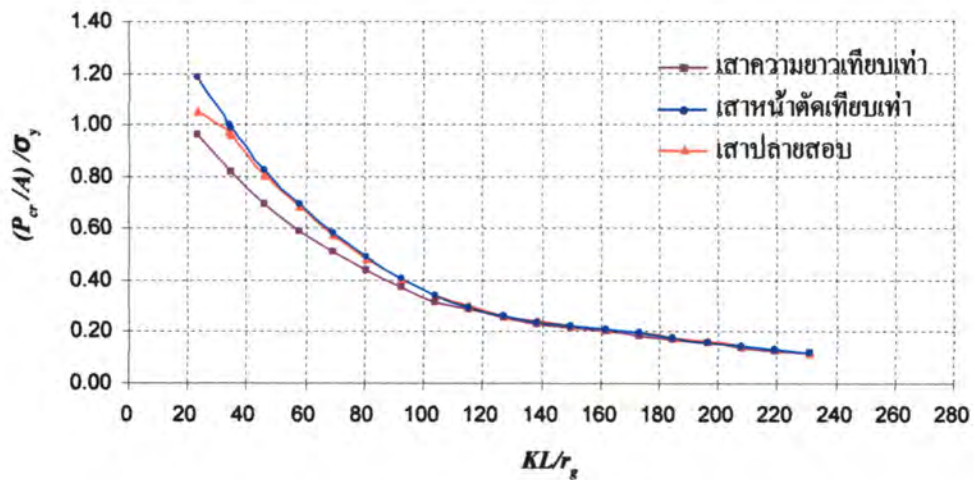
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.6$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.6$

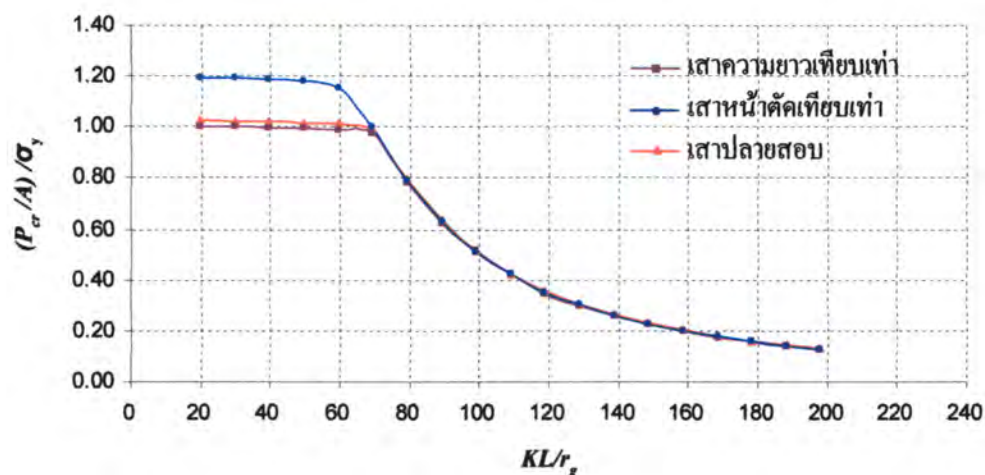
Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และ อัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.6

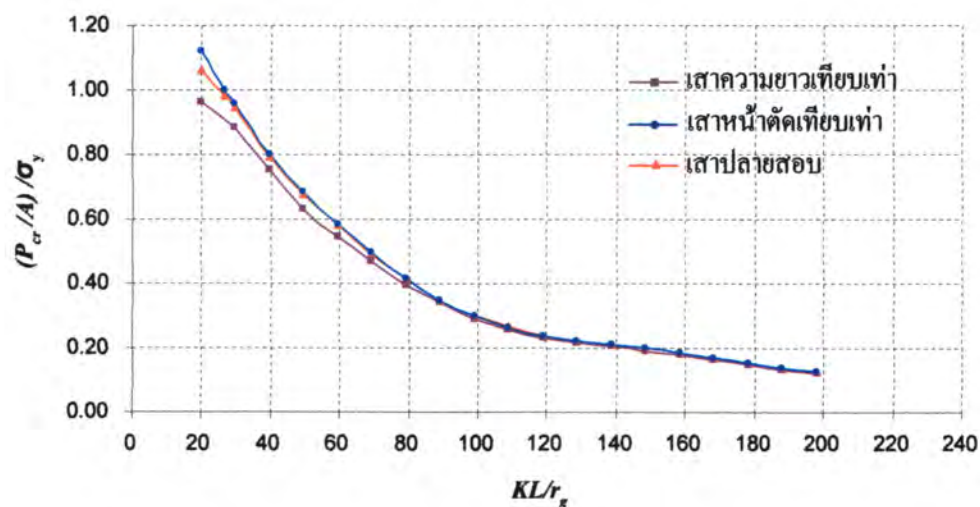
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.7$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.7$

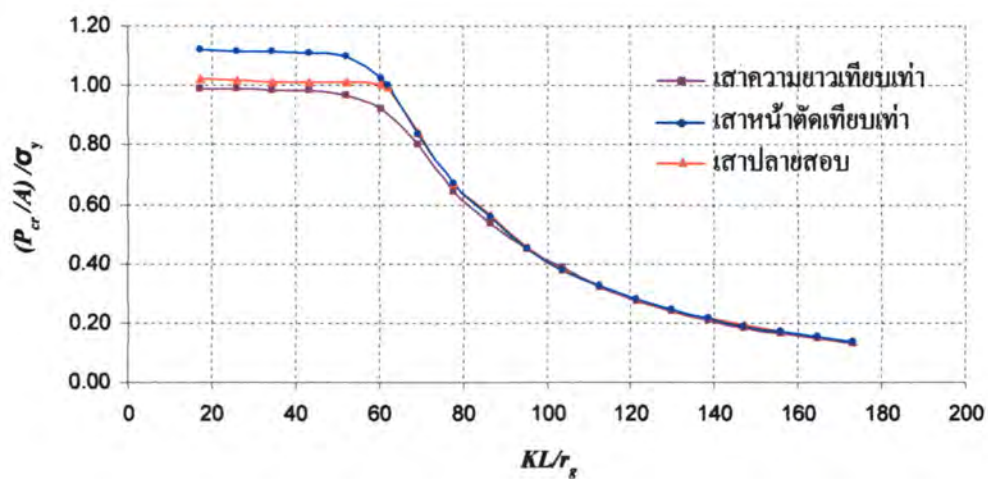
Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.7

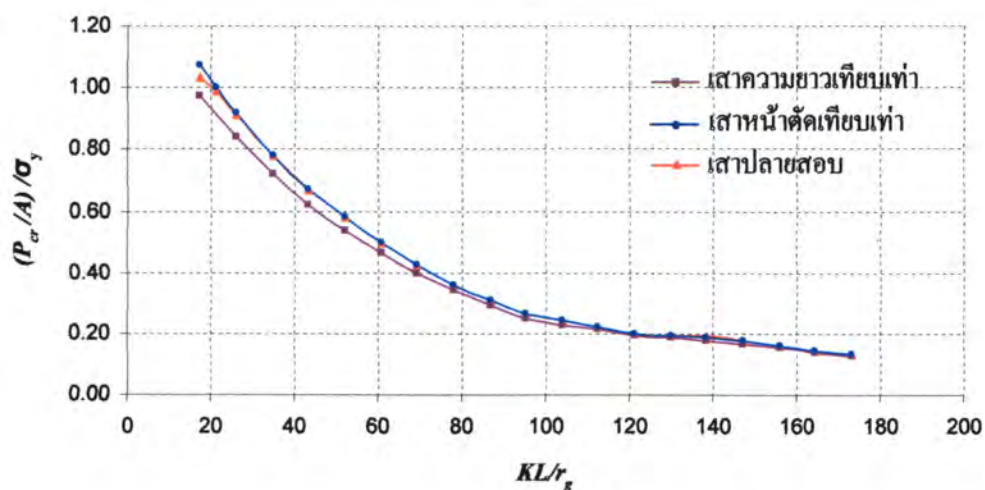
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.8$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.8$

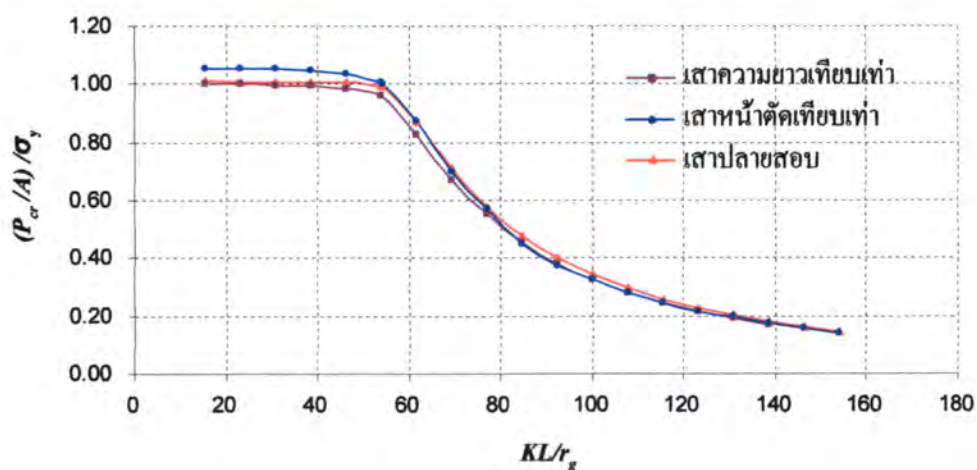
Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าดัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.8

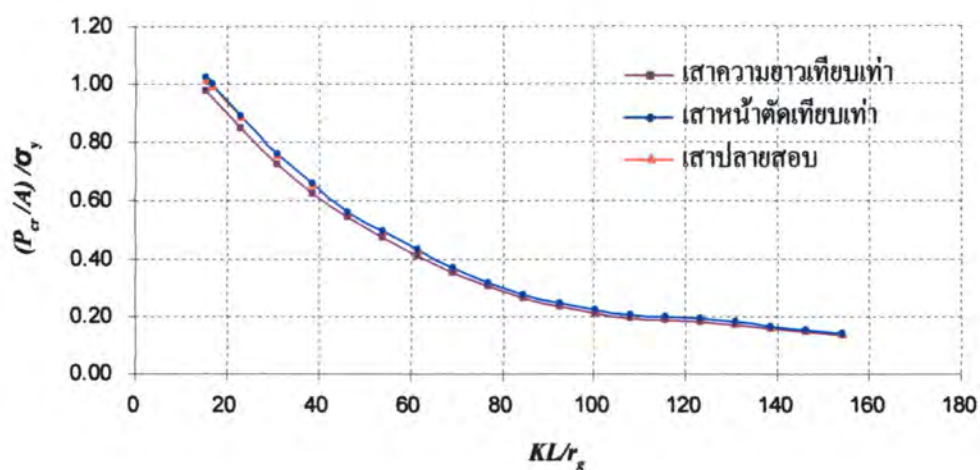
การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller): $r = 0.9$

Elastic-Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดหมุนทั้งสองข้าง(Hinge-Roller): $r = 0.9$

Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.9

5.2 การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed - Roller)

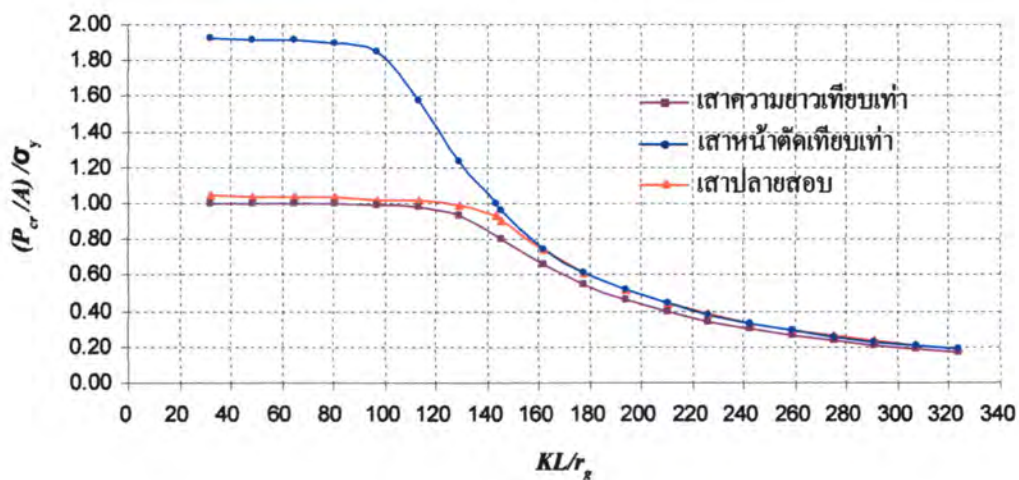
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบในกรณีที่มีจุดยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed - Roller) ได้แสดงไว้ตั้งแต่ภาพที่ 5.8 ถึงภาพที่ 5.14 ซึ่งพิจารณาโดยรวมแล้วจะมีรูปแบบและพฤติกรรมการโก่งเคาะคล้ายคลึงกับแบบเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) ที่เคยกล่าวมาแล้ว แต่จะมีข้อแตกต่างคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ เมื่อค่า (KL / r_g) ลดลง ของเสาที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed - Roller) จะมีค่าสูงกว่า นั่นคือ ที่ค่า (KL / r_g) เดียวกัน เสาที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed - Roller) จะมีกำลังรับน้ำหนักสูงกว่าการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุที่เสาที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed - Roller) ที่ฐานเสาด้านปลายใหญ่จะยึดแน่น เมื่อรับน้ำหนักฐานเสาจะไม่เกิดการหมุน การโก่งตัวของเสาจะเกิดน้อยกว่า จึงทำให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller)

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญสำหรับกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic จะได้ว่า ในช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าและอยู่นอกขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ทุกค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ หรือทุกค่า (KL / r_g) ส่วนกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะได้ขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาความยาวเทียบเท่ามีค่าเช่นเดียวกับรูปแบบ Elastic - Perfectly Plastic แต่จะแตกต่างกันในจุดที่รูปแบบกราฟของความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะไม่แสดงกรณีค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่าคงที่ และตั้งแต่ค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังสูงกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ ประมาณ 0.4

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหลวมปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.3$

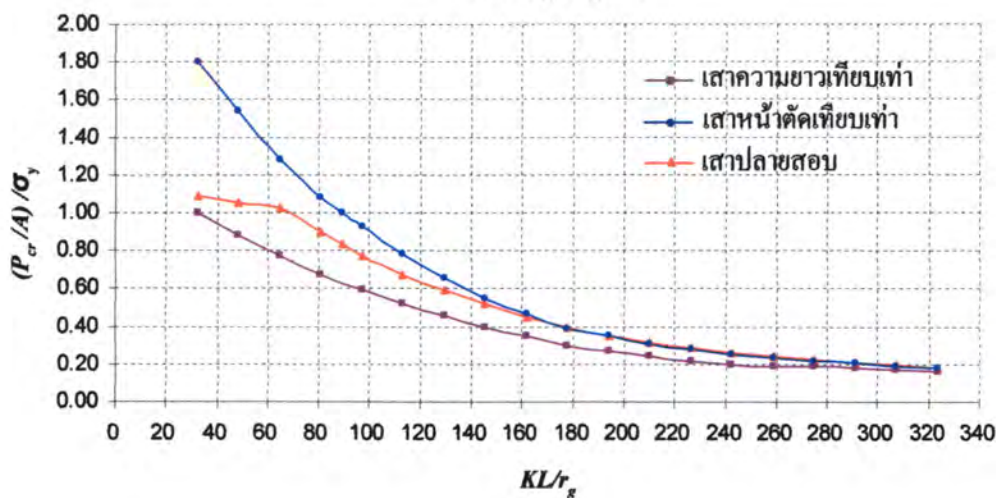
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหลวมปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.3$

Ramberg Osgood

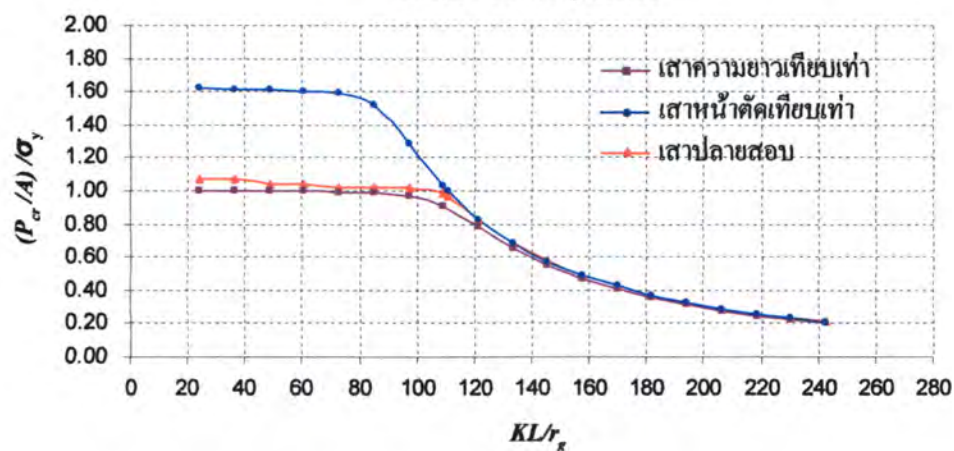


ภาพที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหลวม (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.3

การยัดรีงแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.4$

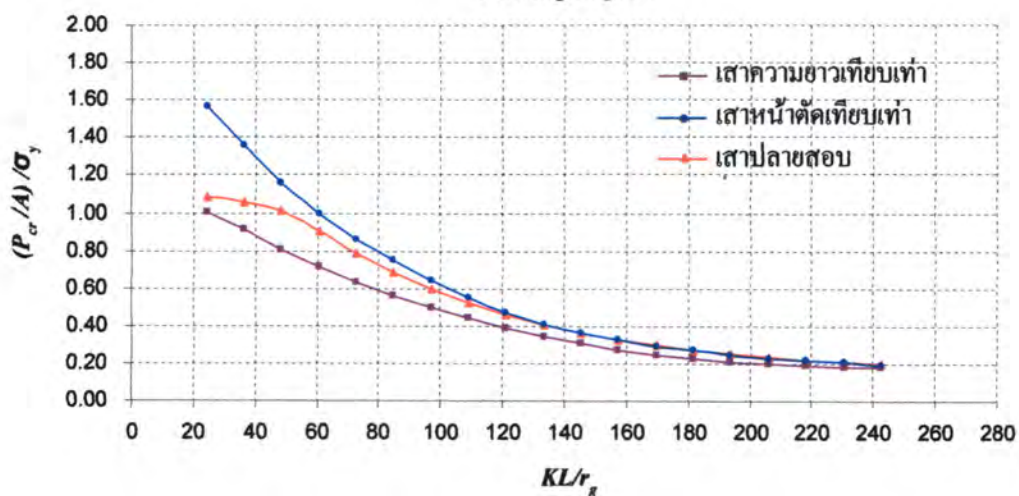
Elastic – Perfectly Plastic



การยัดรีงแบบยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.4$

Ramberg Osgood

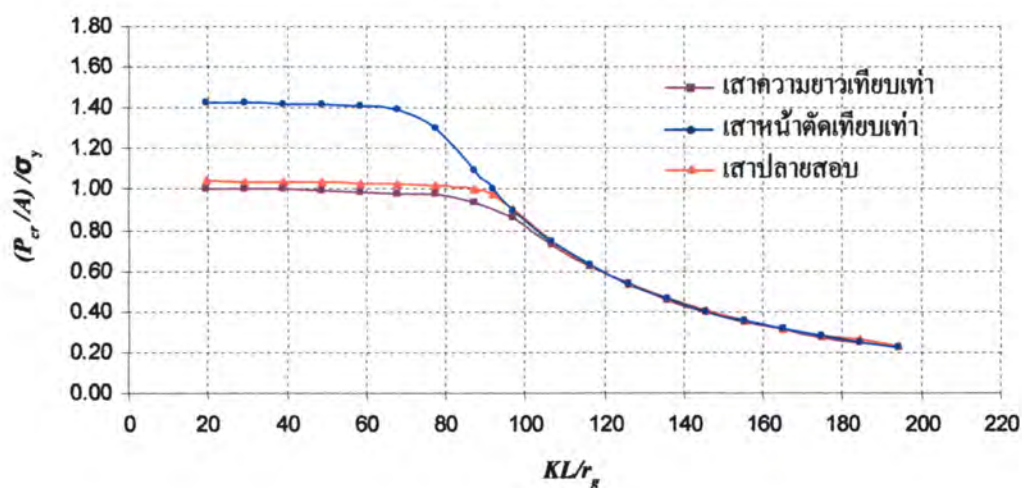


ภาพที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.4

การยัดรีงแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.5$

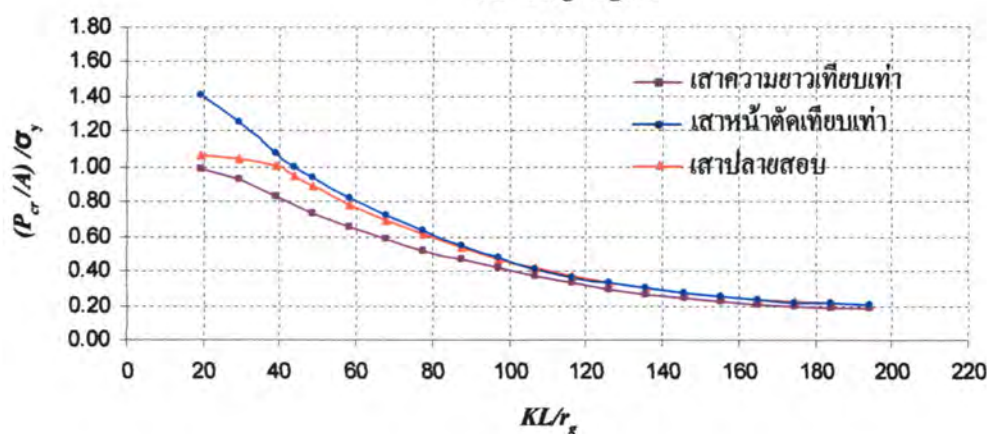
Elastic – Perfectly Plastic



การยัดรีงแบบยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.5$

Ramberg Osgood

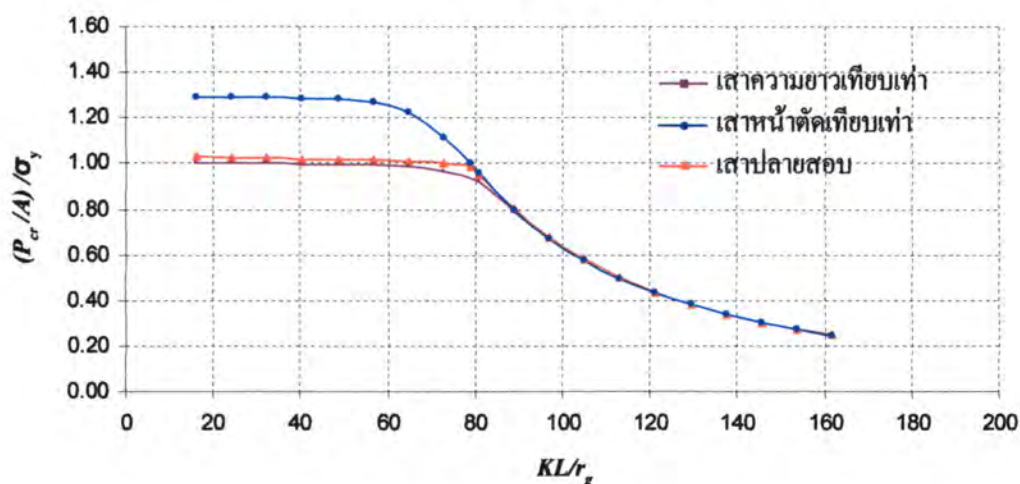


ภาพที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาคอนกรีตเทียบเท่า ที่มีการยึดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.5

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหลวมปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.6$

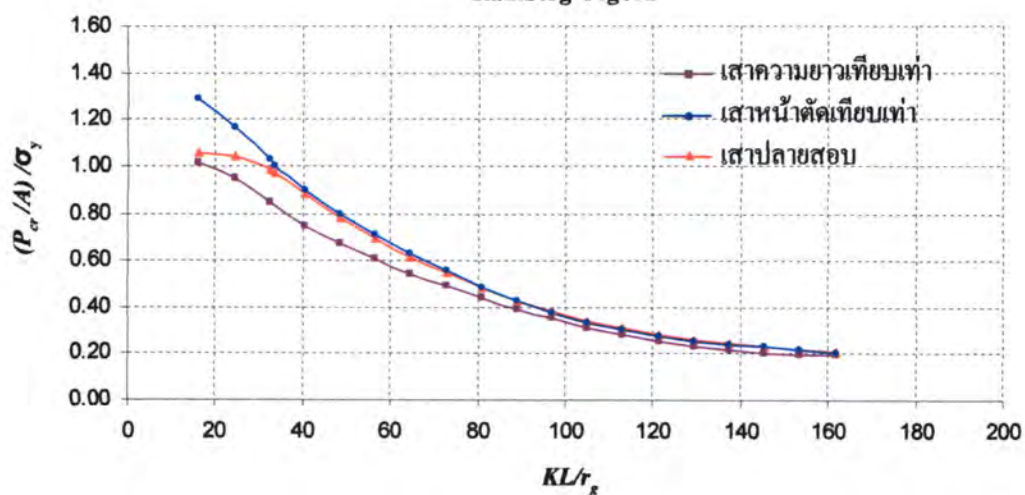
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหลวมปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.6$

Ramberg Osgood

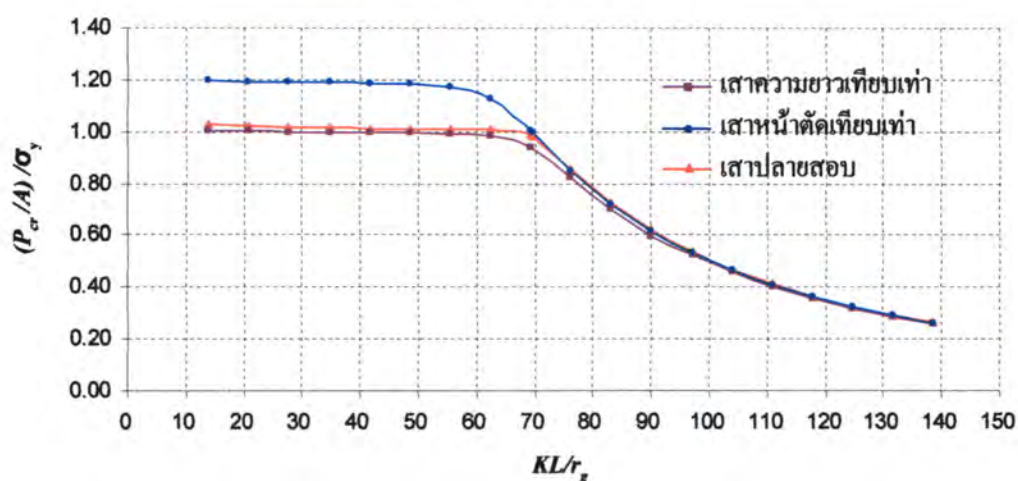


ภาพที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าดัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหลวม (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.6

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller): $r = 0.7$

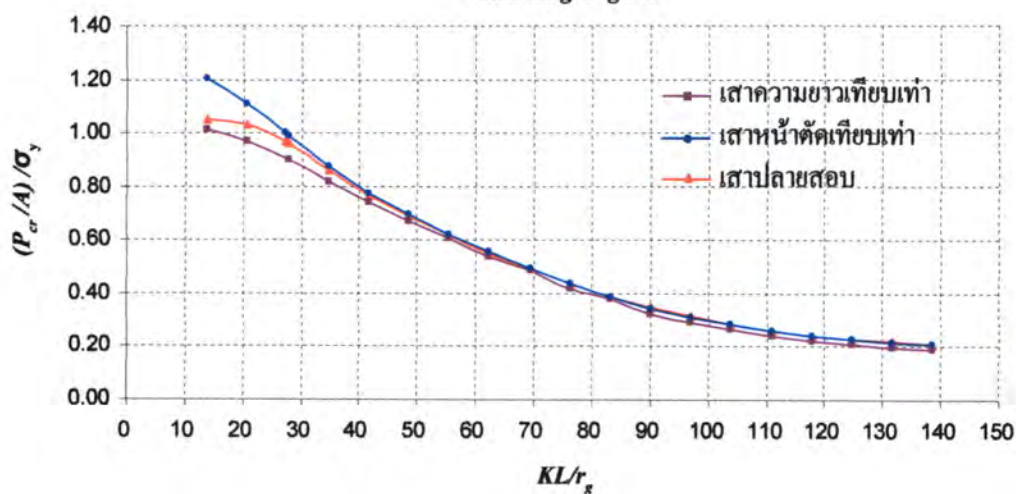
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller) : $r = 0.7$

Ramberg Osgood

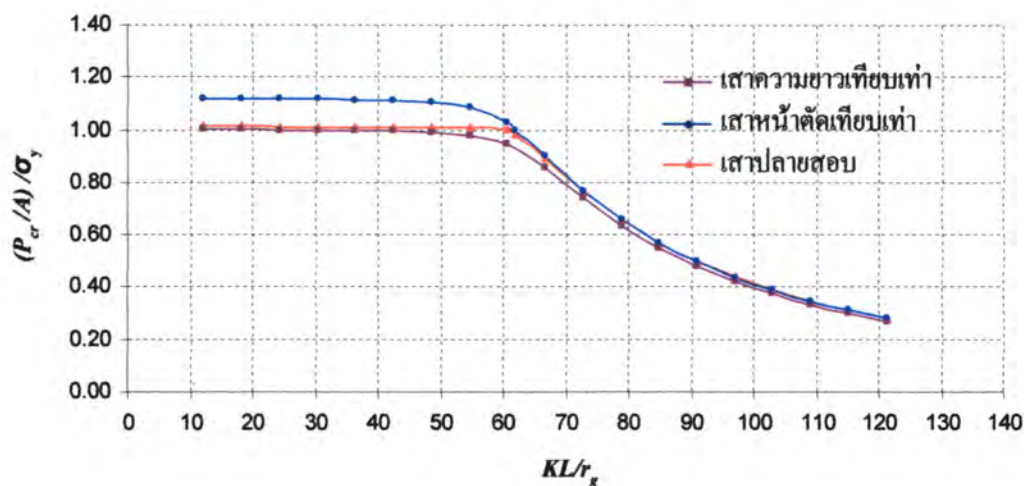


ภาพที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าดัดเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.7

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller) : $r = 0.8$

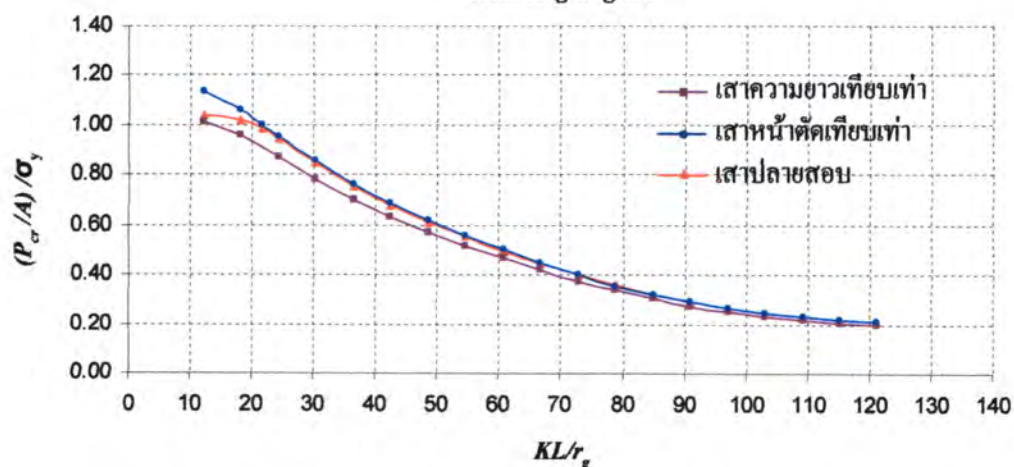
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller) : $r = 0.8$

Ramberg Osgood

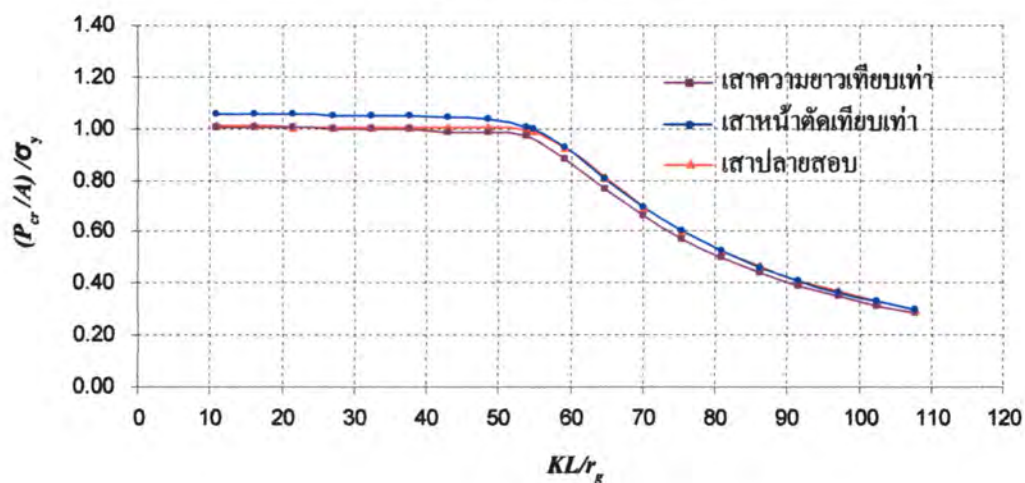


ภาพที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าคัตเทียบเท่า และเสาคความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.8

การยัดรีงแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller) : $r = 0.9$

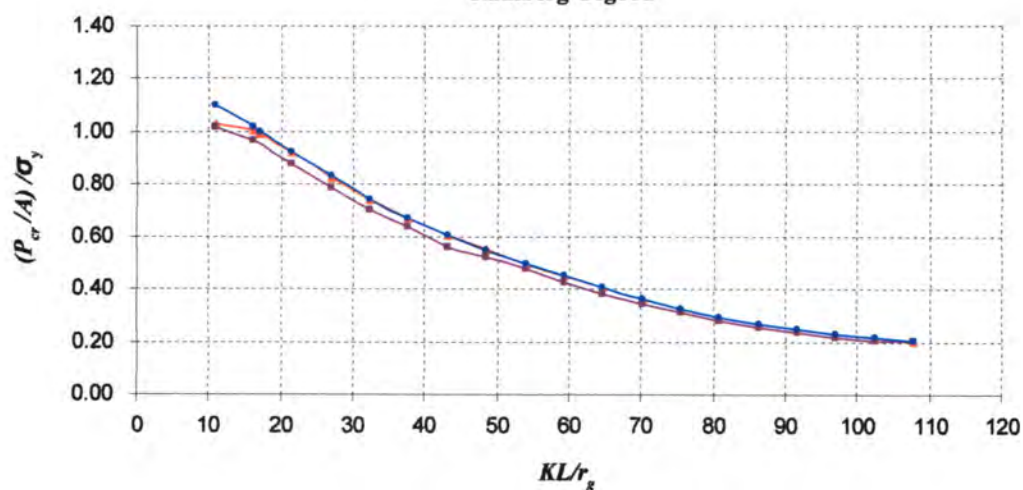
Elastic – Perfectly Plastic



การยัดรีงแบบยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ยึดหมุนปลายด้านเล็ก

(Fixed-Roller) : $r = 0.9$

Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าดัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยัดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed – Roller) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.9

5.3 การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed - Free)

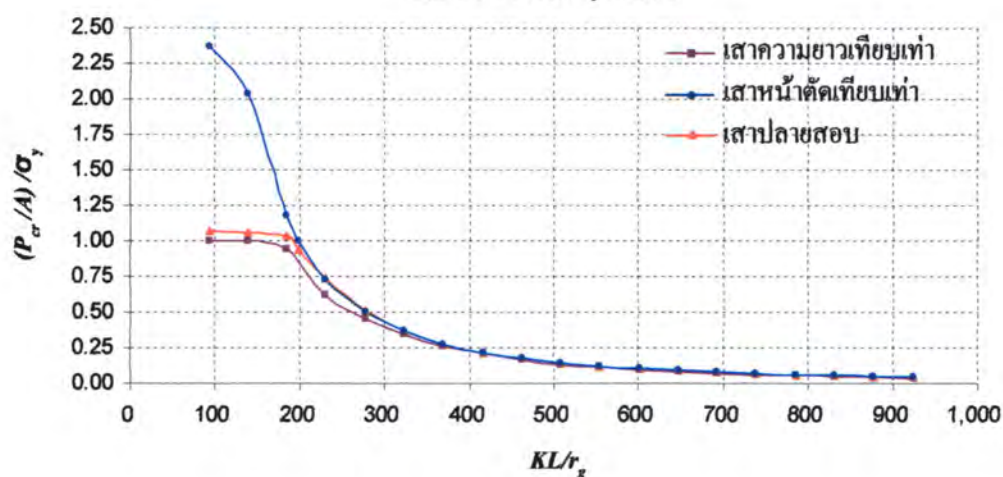
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบในกรณีที่มีจุดยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed - Free) ได้แสดงไว้ตั้งแต่ภาพที่ 5.15 ถึงภาพที่ 5.21 ซึ่งพิจารณาโดยรวมแล้วจะมีรูปแบบและพฤติกรรมการโก่งเดาะคล้ายคลึงกับแบบเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) หรือแบบอื่นๆ ที่เคยกล่าวมาแล้ว แต่จะมีข้อแตกต่างคือ ที่ค่า (KL/r_g) มีค่ามาก ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ จะมีค่าต่ำมาก ประมาณ 0.1 ซึ่งต่ำกว่าเสาที่มีการยึดรั้งแบบอื่นๆ นั่นคือ หากเสามีความยาวมากๆ เสาที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed - Free) จะมีกำลังรับน้ำหนักได้ต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจาก การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed - Free) จะมีการยึดแน่นที่ฐานล่าง แต่ปลายบนไม่มีการยึดรั้งเลย เมื่อรับน้ำหนักจะทำให้เสาเกิดการเสถียรภาพมากกว่าการยึดรั้งประเภทอื่นๆ จึงทำให้รับน้ำหนักตามแนวแกนได้น้อยกว่า ส่วนในกรณีที่ค่า (KL/r_g) มีค่าน้อย เสามีความยาวสั้น การโก่งตัวเกิดขึ้นน้อย เสาจึงสามารถพัฒนากำลังจนถึงค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ต่ำกว่าหนึ่งเล็กน้อย

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญสำหรับกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic จะได้ว่า ในช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าและอยู่นอกขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ทุกค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ หรือทุกค่า (KL/r_g) ส่วนกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะได้ขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาความยาวเทียบเท่ามีค่าเช่นเดียวกับรูปแบบ Elastic - Perfectly Plastic แต่จะแตกต่างกันในจุดที่รูปแบบกราฟของความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะไม่แสดงกรณีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าคงที่ และตั้งแต่ค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังสูงกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ประมาณ 0.4

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.3$

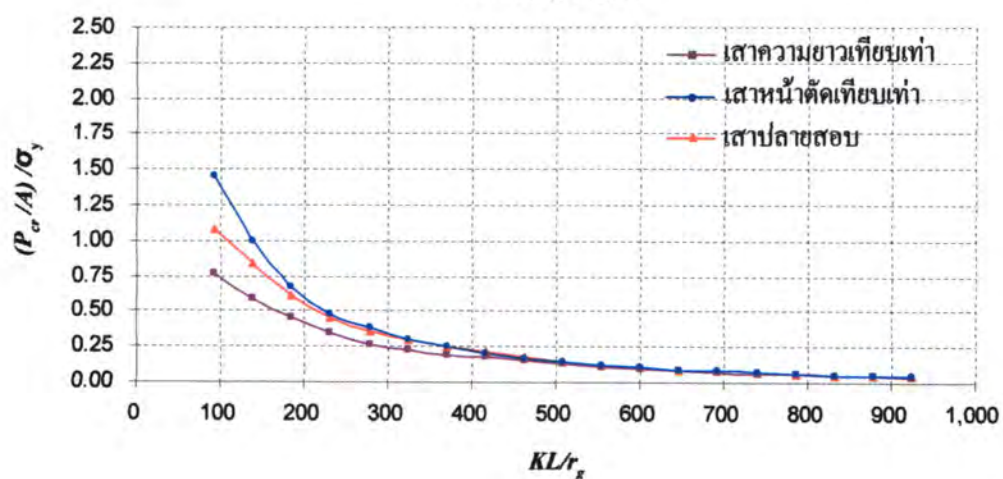
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.3$

Ramberg Osgood

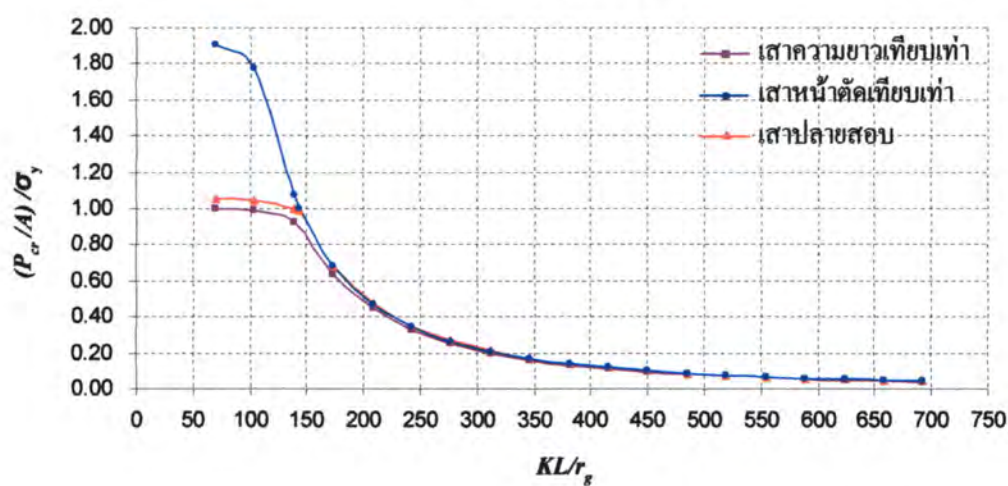


ภาพที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.3

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free): $r = 0.4$

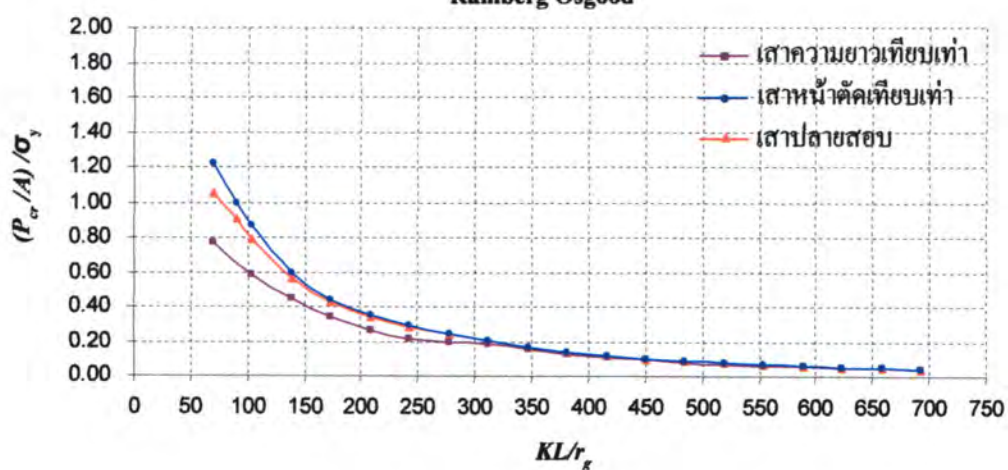
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.4$

Ramberg Osgood

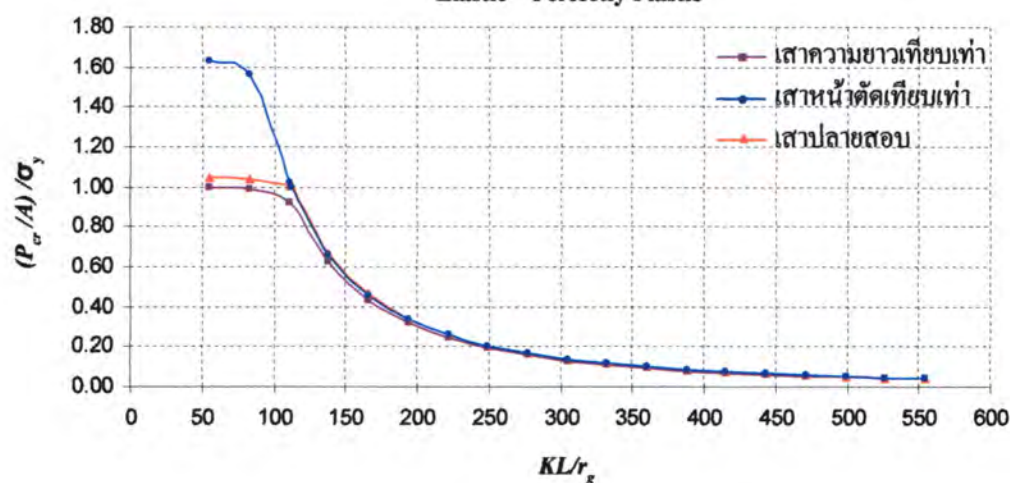


ภาพที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเหลี่ยมเท่า และเสาความยาวเหลี่ยมเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.4

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.5$

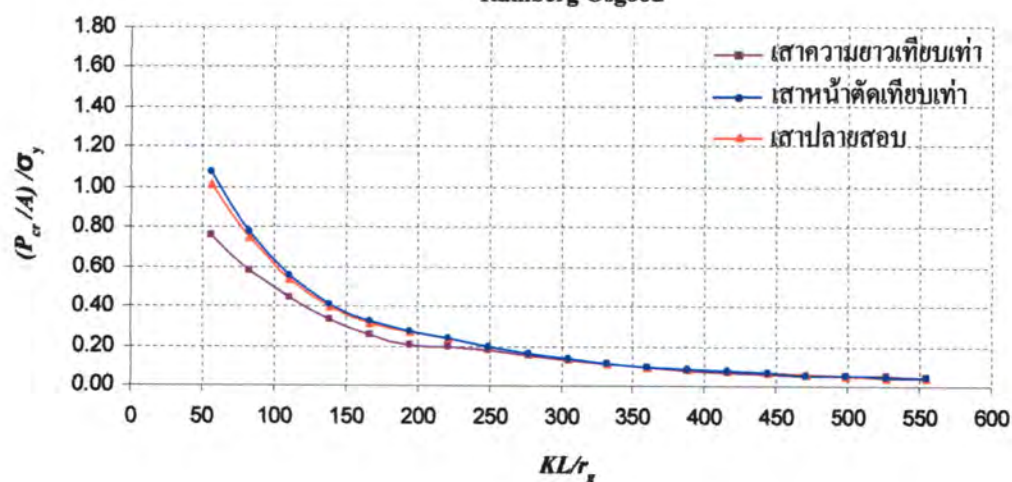
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.5$

Ramberg Osgood

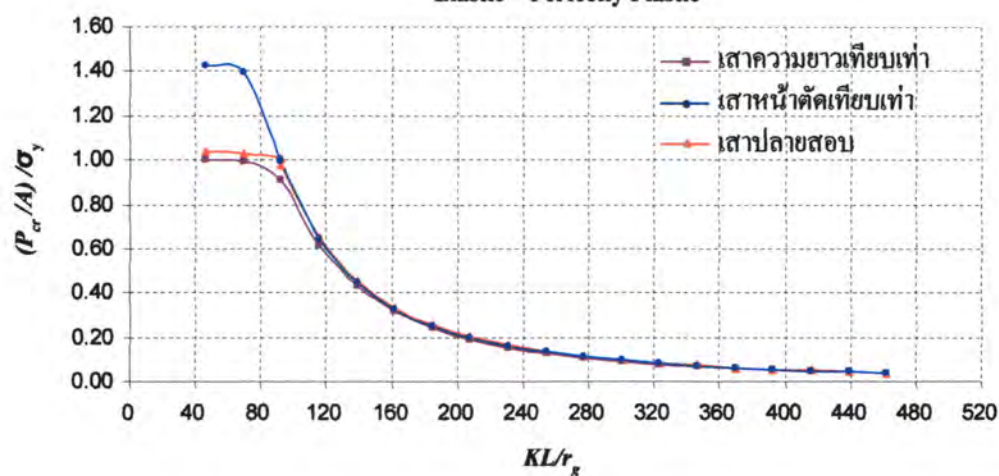


ภาพที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.5

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.6$

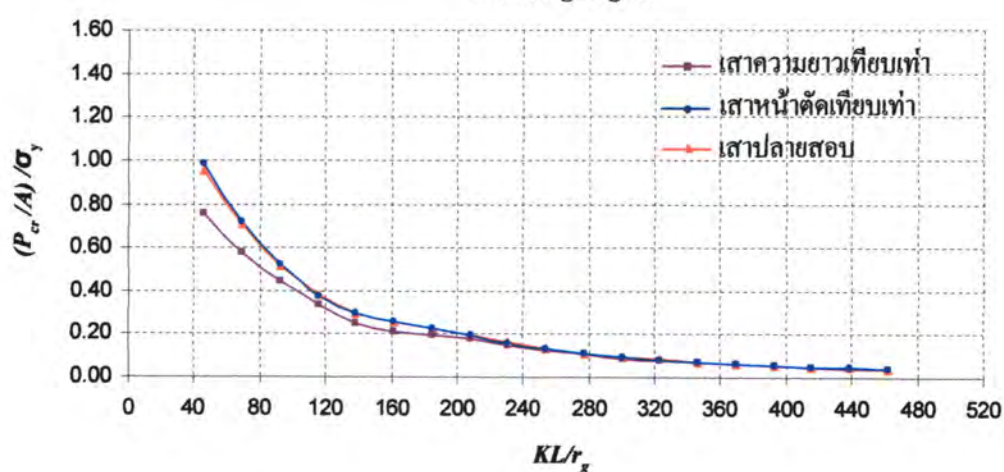
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.6$

Ramberg Osgood

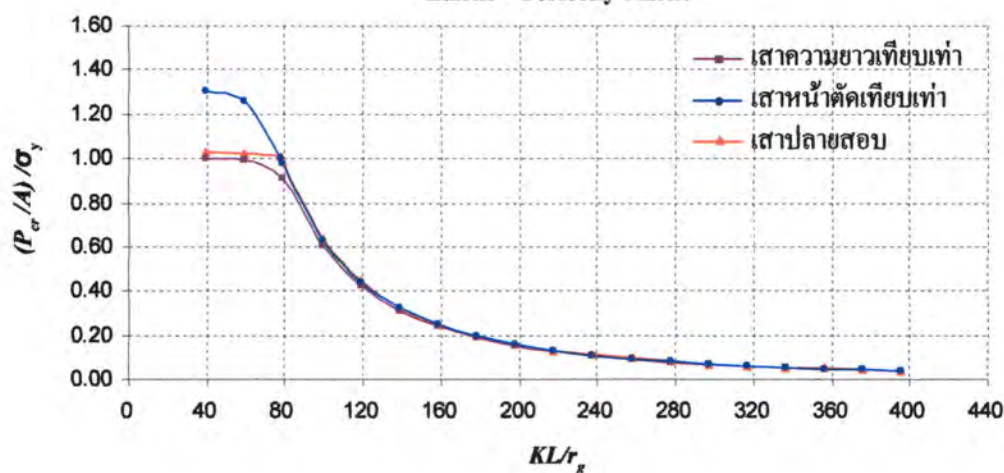


ภาพที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.6

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.7$

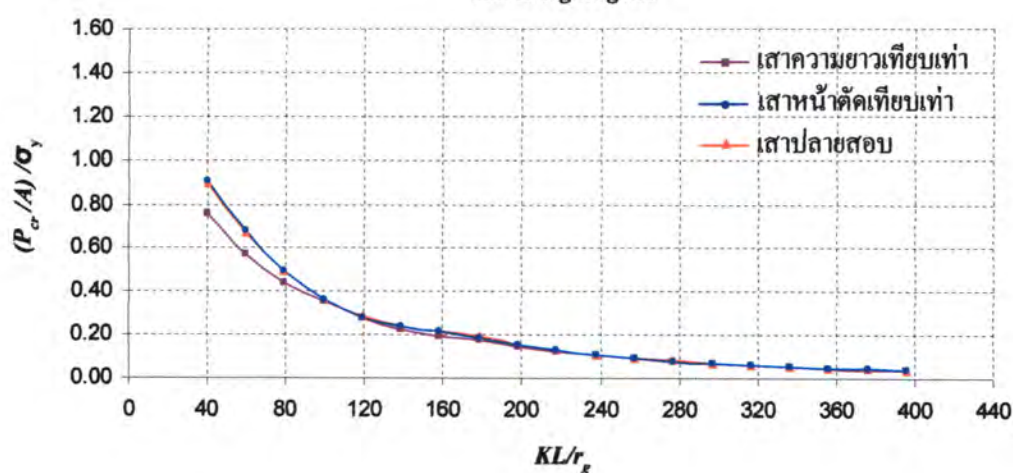
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.7$

Ramberg Osgood

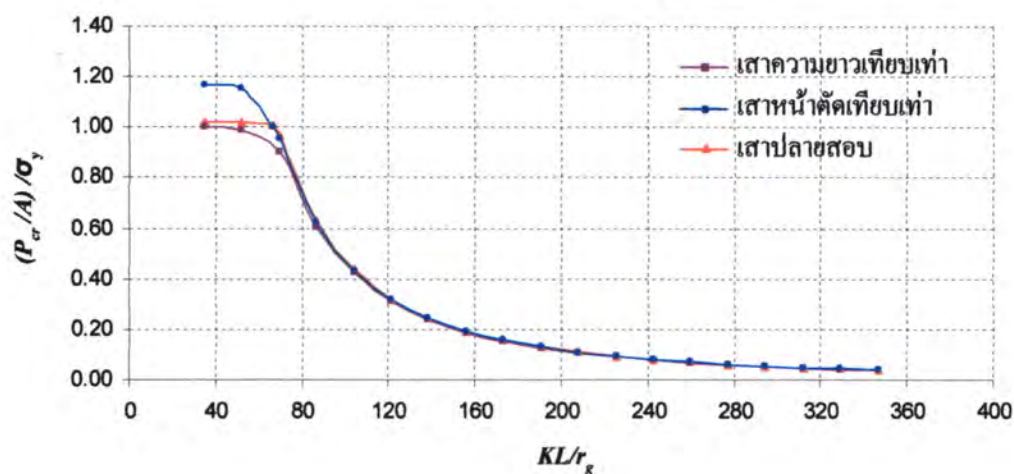


ภาพที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.7

การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.8$

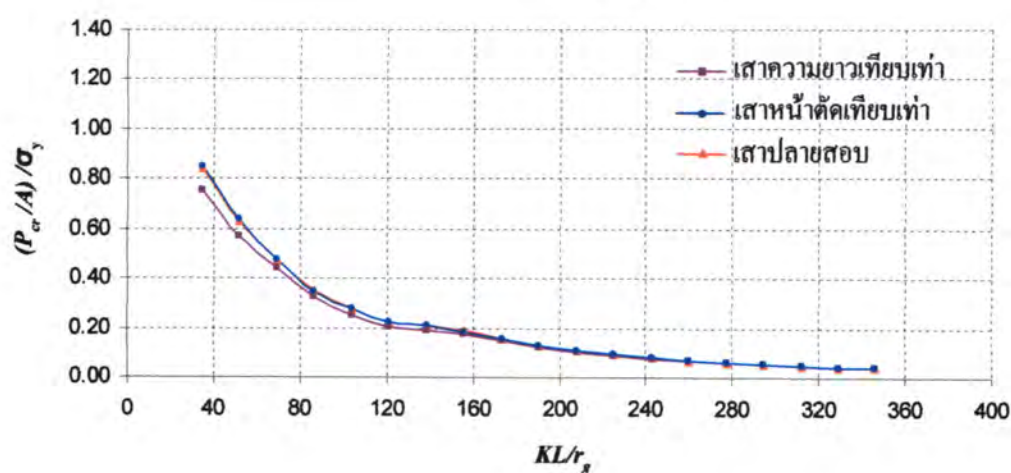
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.8$

Ramberg Osgood

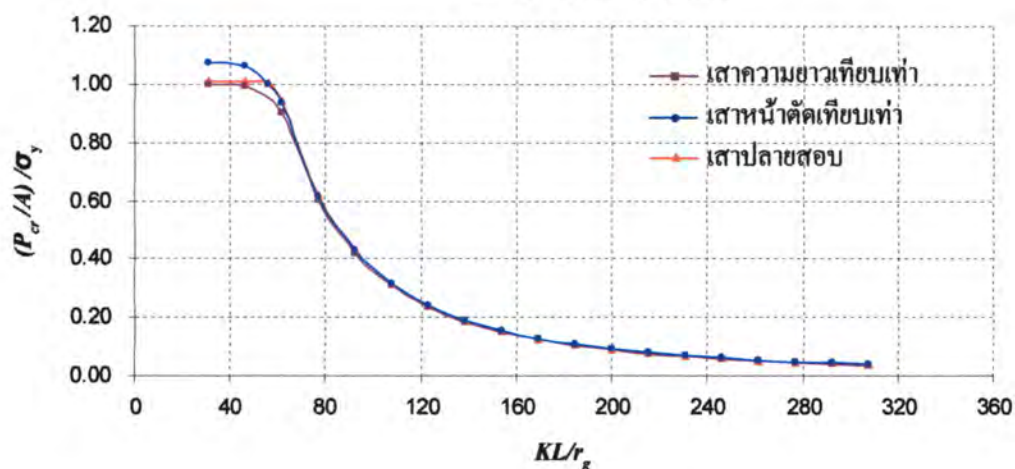


ภาพที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าคัตเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.8

การยัดรีงแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.9$

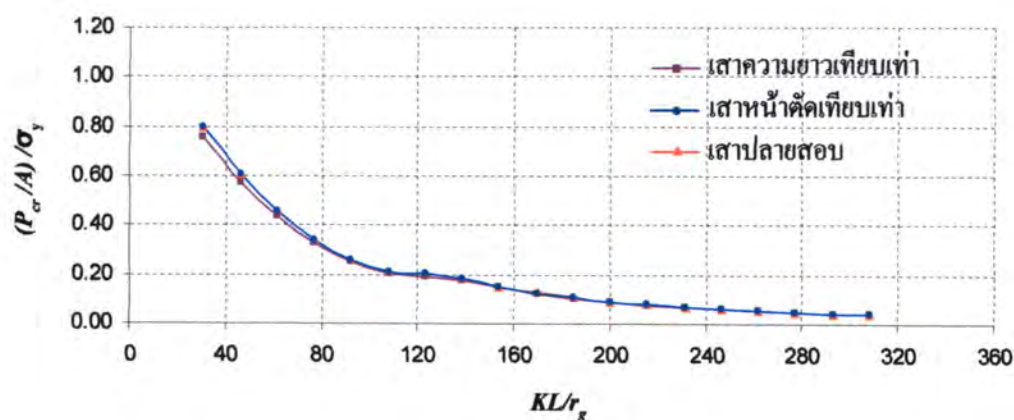
Elastic – Perfectly Plastic



การยัดรีงแบบ ยึดแน่นปลายด้านใหญ่-ปลายเล็กปล่อยอิสระ

(Fixed-Free) : $r = 0.9$

Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed – Free) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.9

5.4 การยึดรั้งแบบปลายทั้งสองยึดแน่น (Fixed – Fixed)

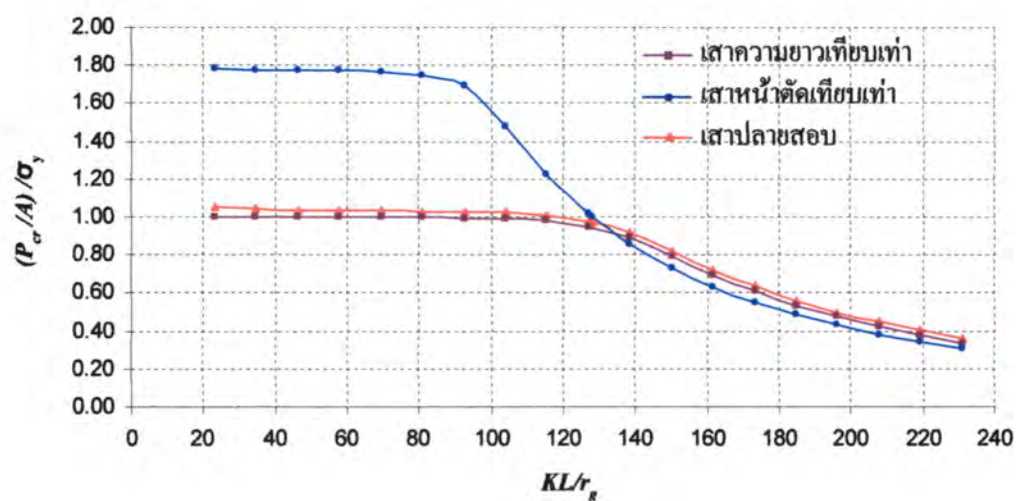
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่ากับเสาปลายสอบในกรณีที่มีจุดยึดรั้งแบบปลายทั้งสองยึดแน่น (Fixed - Fixed) ได้แสดงไว้ตั้งแต่ภาพที่ 5.22 ถึงภาพที่ 5.28 เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะมีรูปแบบและพฤติกรรมการโก่งเคาะคล้ายคลึงกับแบบเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) หรือแบบอื่นๆ ที่เคยกล่าวมาแล้ว แต่จะมีข้อแตกต่างคือ ที่ค่า (KL/r_g) มีค่ามาก ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ จะมีค่าสูงกว่าการยึดรั้งแบบอื่นๆ นั่นคือ หากเสามีความยาวมากๆ เสาที่มีการยึดรั้งแบบปลายทั้งสองยึดแน่น (Fixed - Fixed) จะมีกำลังรับน้ำหนักได้มากกว่าการยึดรั้งแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจาก การยึดรั้งแบบปลายทั้งสองยึดแน่น (Fixed - Fixed) จะมีการยึดแน่นปลายทั้งสองข้าง เมื่อรับน้ำหนักจะทำให้เสาเกิดการเสีรูปน้อยกว่าการยึดรั้งประเภทอื่นๆ จึงทำให้รับน้ำหนักตามแนวแกนได้มากกว่า แต่หากพิจารณาเฉพาะกรณีเสาหน้าตัดเทียบเท่าแล้วจะพบว่ากำลังรับน้ำหนักจะมีค่าต่ำกว่าเสาปลายสอบและเสาความยาวเทียบเท่าอย่างเห็นได้ชัดทั้งความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic – Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ซึ่งแตกต่างจากการยึดรั้งแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากสมการหน้าตัดเทียบเท่าของการยึดรั้งแบบปลายทั้งสองยึดแน่น (Fixed - Fixed) ไม่ได้พัฒนาารูปสมการจากการโก่งเคาะในช่วงยึดหยุ่นเหมือนกับการยึดรั้งรูปแบบอื่นๆ คือได้กำหนดให้ใช้ตำแหน่งของหน้าตัดเทียบเท่าที่ค่า $L/3$ ซึ่งให้ค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยึดหยุ่นที่ค่อนข้างที่ปลอดภัย จึงทำให้กำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่าต่ำกว่าเสาปลายสอบและเสาความยาวเทียบเท่าอย่างชัดเจน

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญสำหรับกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic จะพบว่า ในช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าและอยู่นอกขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยึดหยุ่นอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ทุกค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ หรือทุกค่า (KL/r_g) ส่วนกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะได้ขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาความยาวเทียบเท่ามีค่าเช่นเดียวกับรูปแบบ Elastic – Perfectly Plastic แต่จะแตกต่างกันในจุดที่รูปแบบกราฟของความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะไม่แสดงกรณีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าคงที่ และตั้งแต่ค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังสูงกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ประมาณ 0.8

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.3$

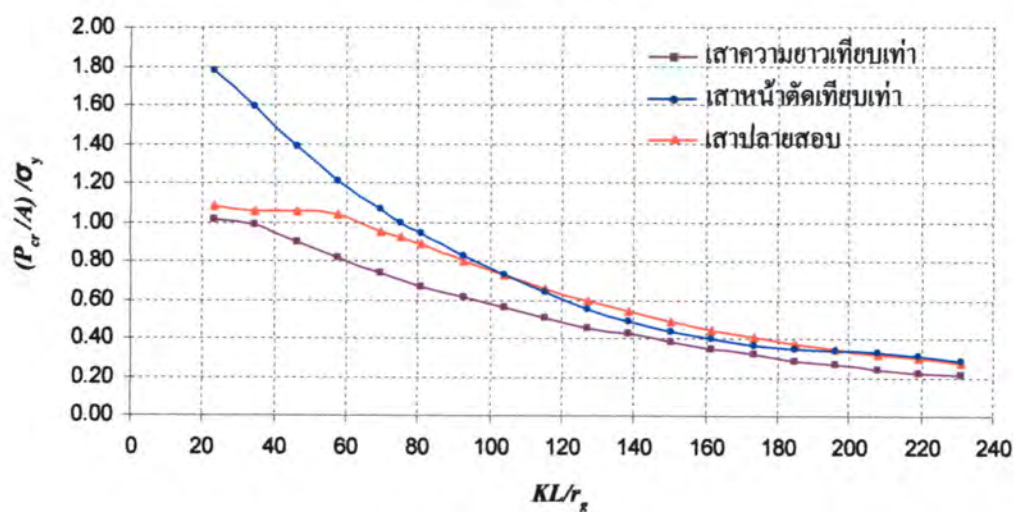
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.3$

Ramberg Osgood

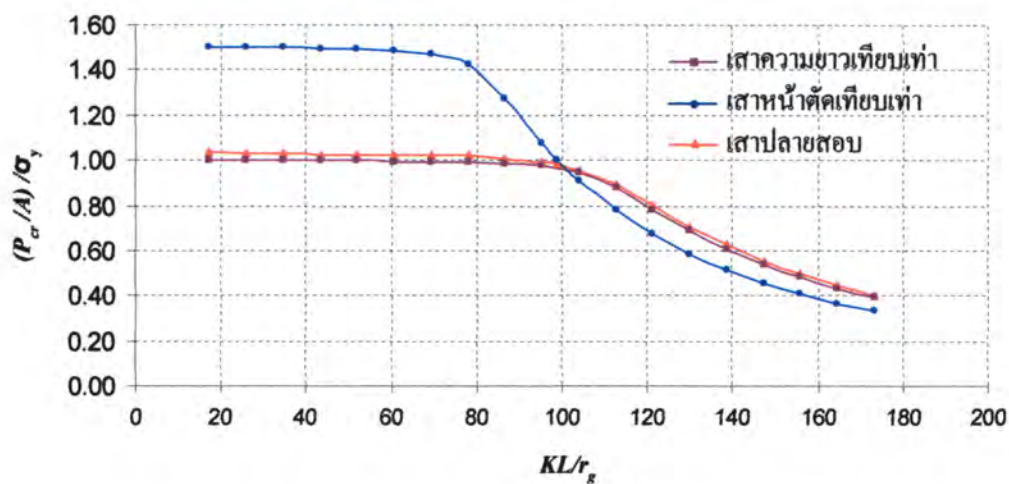


ภาพที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.3

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.4$

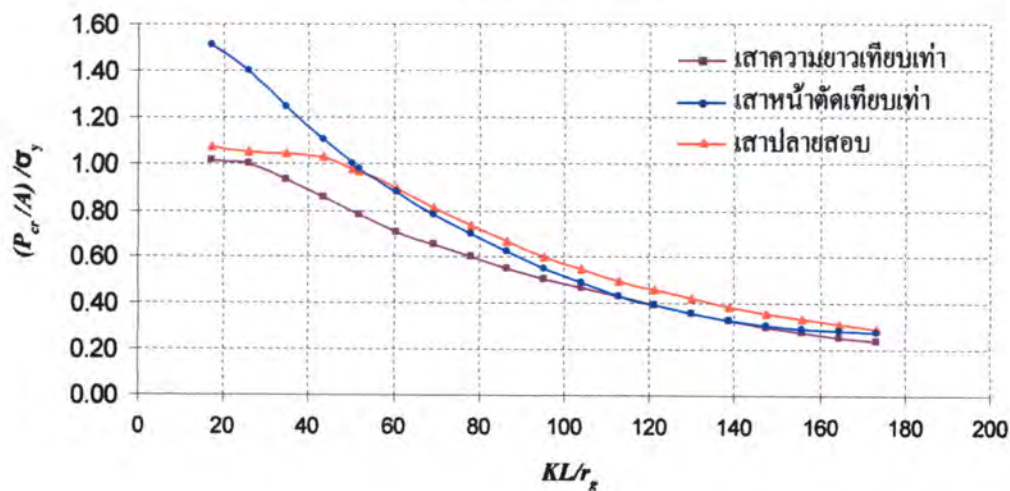
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.4$

Ramberg Osgood

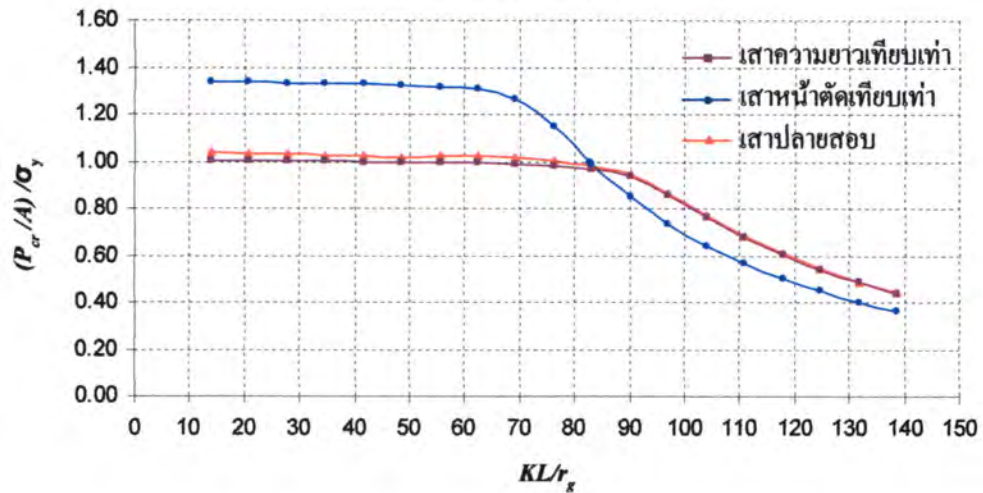


ภาพที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.4

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.5$

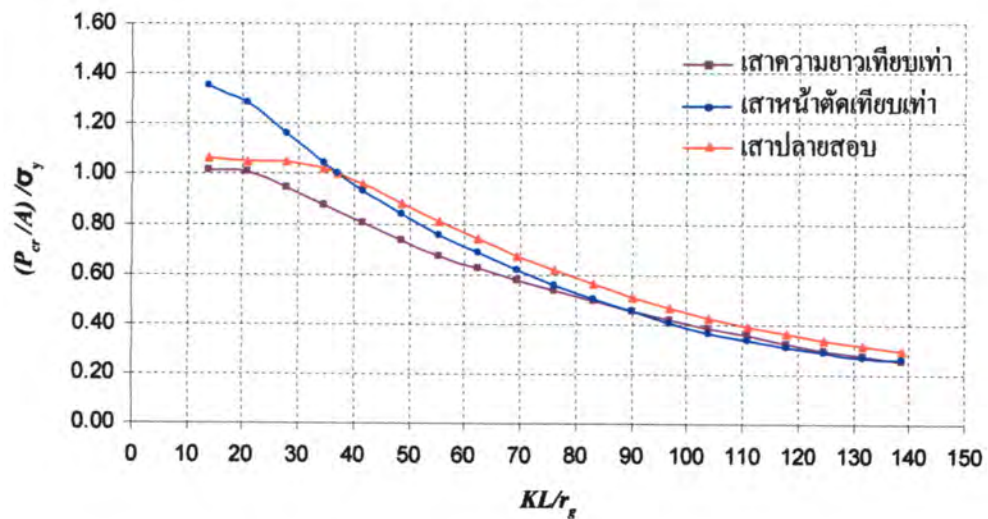
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.5$

Ramberg Osgood

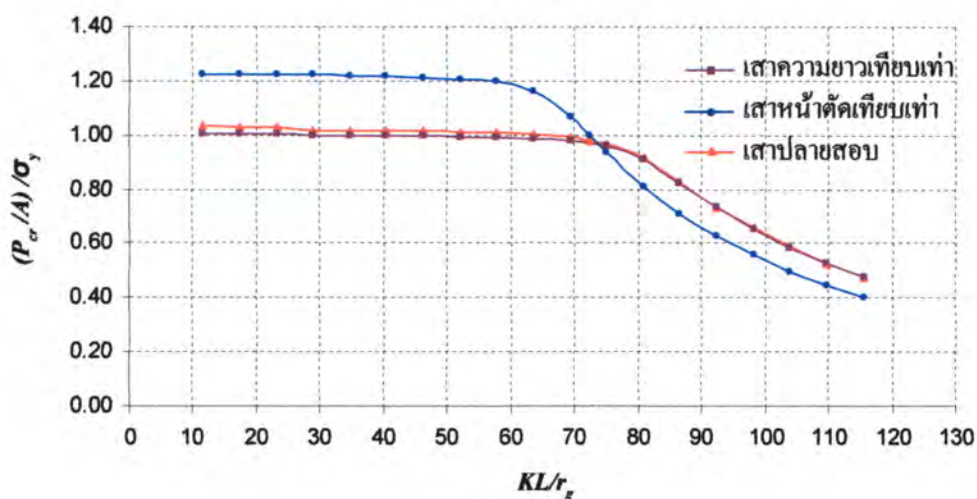


ภาพที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และ อัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.5

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.6$

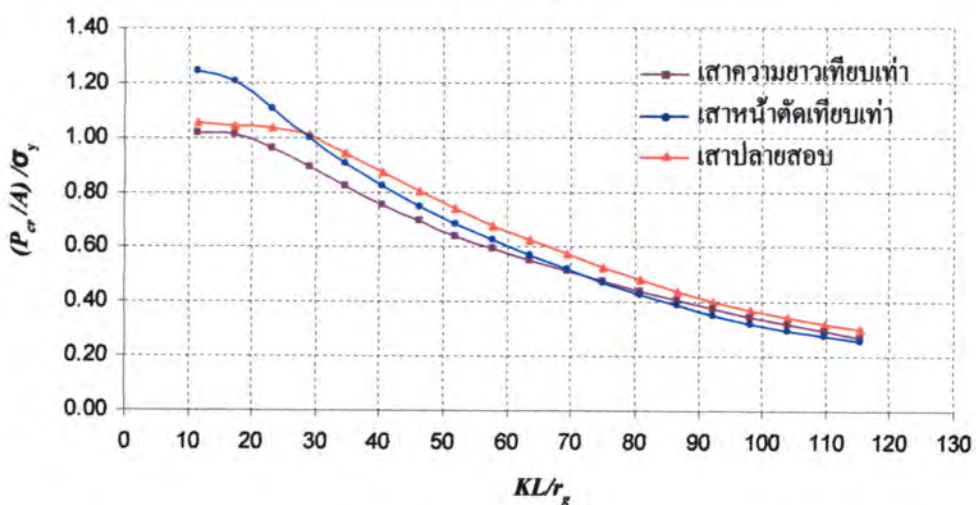
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.6$

Ramberg Osgood

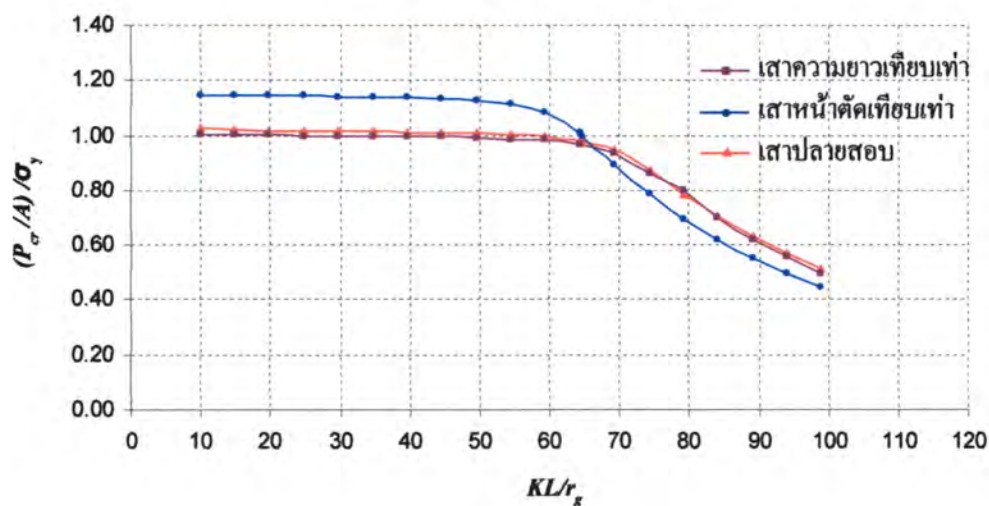


ภาพที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.6

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.7$

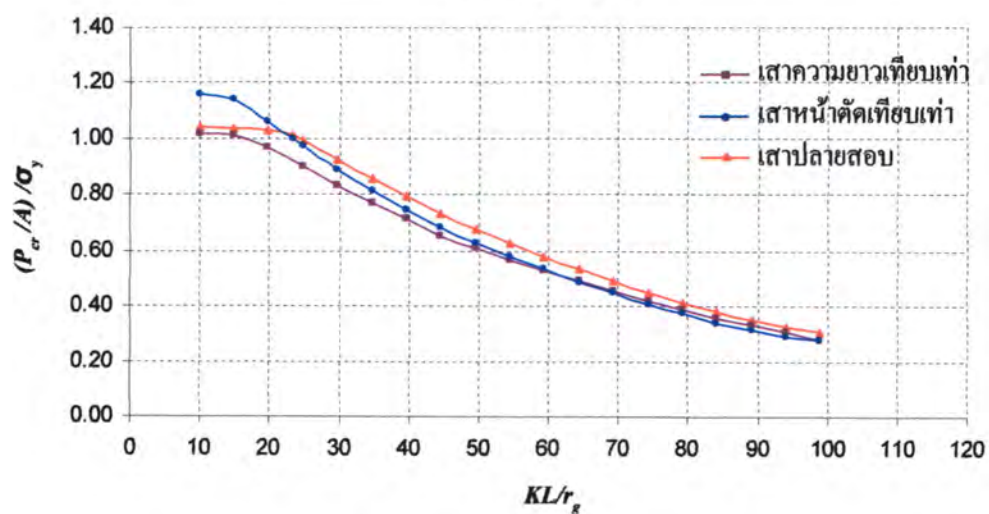
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.7$

Ramberg Osgood

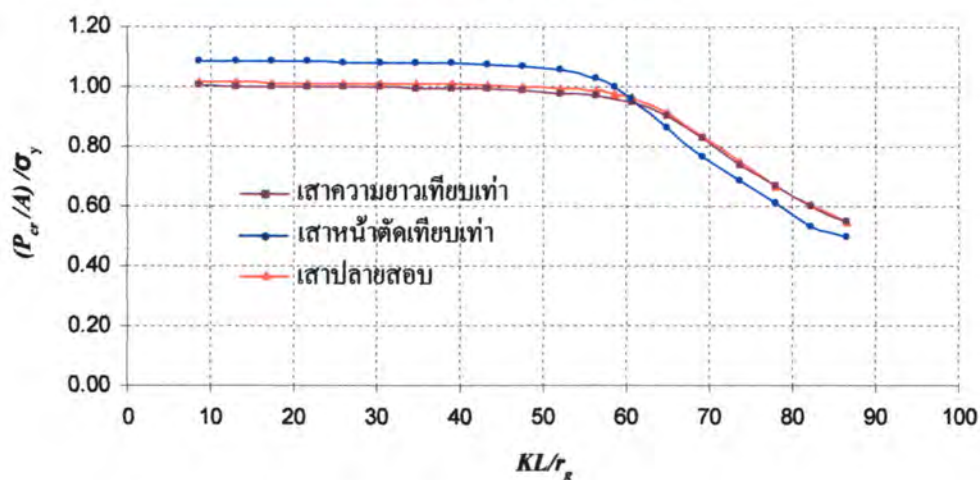


ภาพที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไมยึดหยุ่นของเสาลายสอบ เสาน้ำตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.7

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.8$

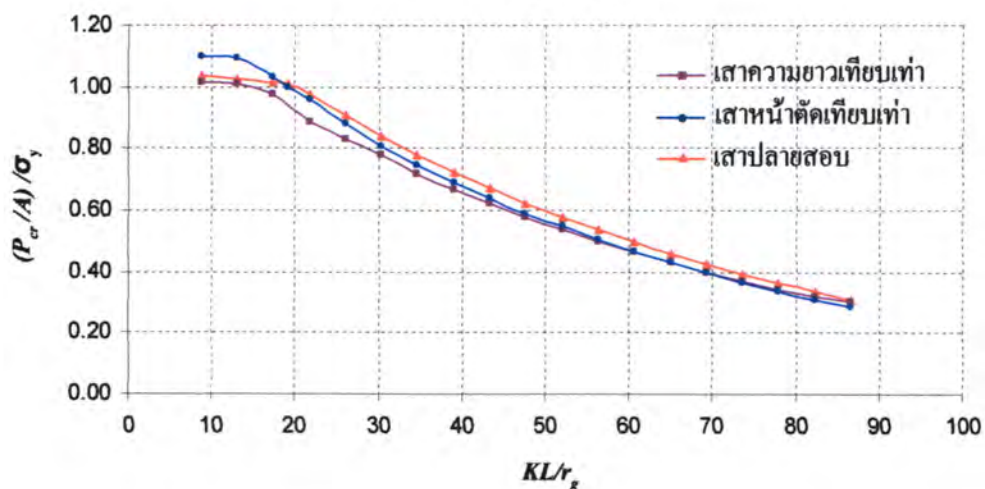
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.8$

Ramberg Osgood

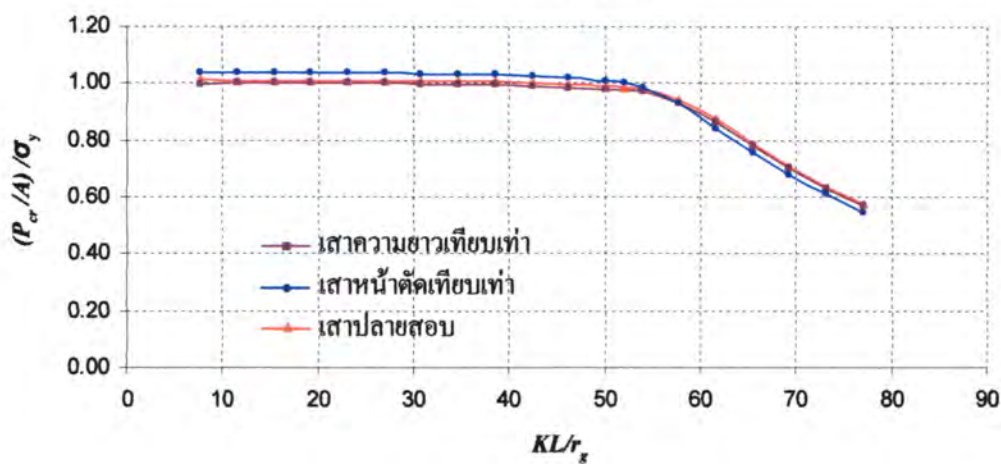


ภาพที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเหลี่ยม และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.8

การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.9$

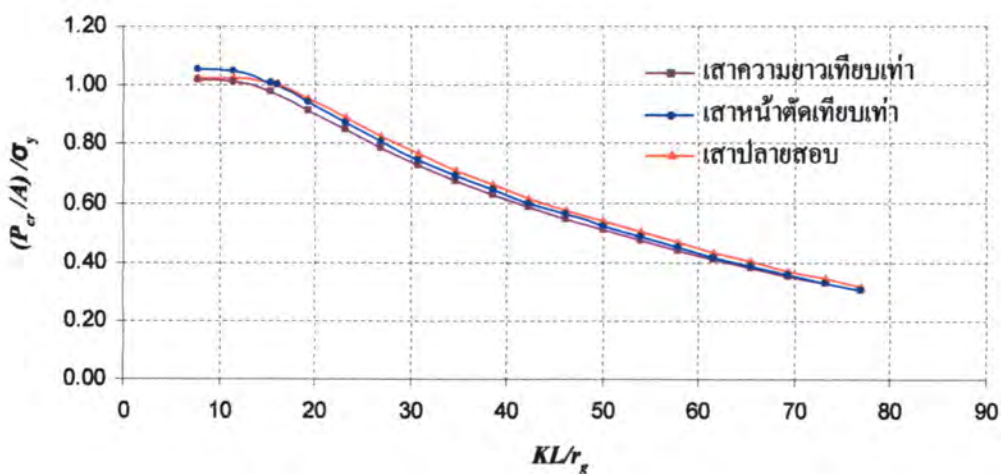
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

(Fixed-Fixed) : $r = 0.9$

Ramberg Osgood



ภาพที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาคอนกรีตเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน (Fixed – Fixed) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.9

5.5 การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed – Guided)

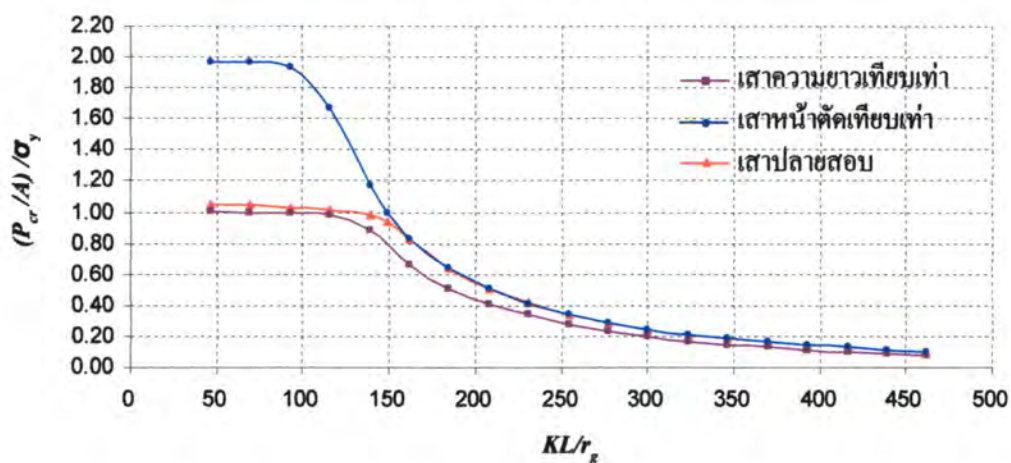
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่ากับน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบในกรณีที่มีจุดยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed - Guided) ได้แสดงไว้ตั้งแต่ภาพที่ 5.29 ถึงภาพที่ 5.35 ซึ่งพิจารณาโดยรวมแล้วจะมีรูปแบบและพฤติกรรมการโก่งเดาะคล้ายคลึงกับแบบเสาที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge - Roller) มากกว่าแบบอื่นๆ ที่เคยกล่าวมาแล้ว เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล (K) มีค่าเท่ากัน แต่กำลังรับน้ำหนักของเสาที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed - Guided) จะต่ำกว่าแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge - Roller) เล็กน้อย เนื่องจากปลายเสาด้านบนมีการเคลื่อนตัวได้ ทำให้เกิดการเสียรูปมากกว่าจึงทำให้กำลังรับน้ำหนักน้อยกว่า

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญสำหรับกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic จะได้ว่า ในช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าและอยู่นอกขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นอยู่ในขอบเขตของเสาปลายสอบ ทุกค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ หรือทุกค่า (KL / r_g) ส่วนกรณีความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะได้ขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าและเสาความยาวเทียบเท่ามีค่าเช่นเดียวกับรูปแบบ Elastic - Perfectly Plastic แต่จะแตกต่างกันในจุดที่รูปแบบกราฟของความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะไม่แสดงกรณีค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่าคงที่ และตั้งแต่ค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังสูงกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ ประมาณ 0.4

การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.3$

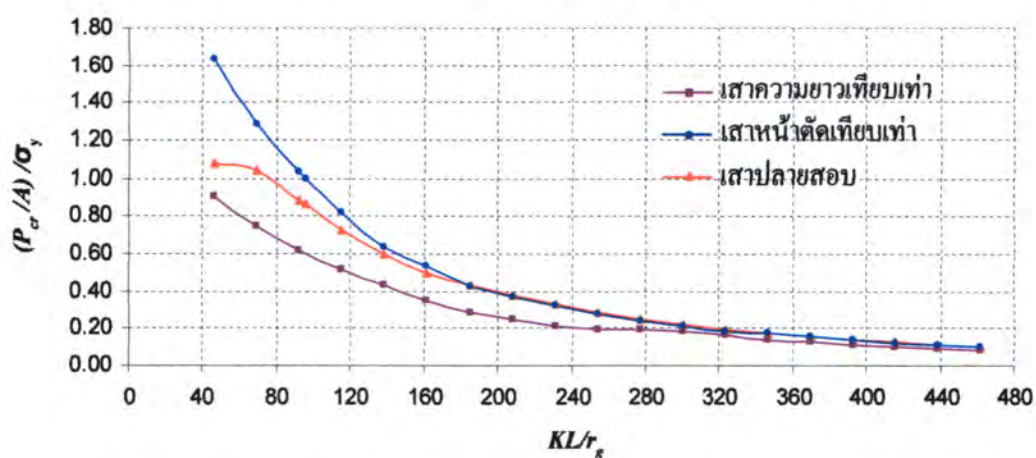
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.3$

Ramberg Oogood

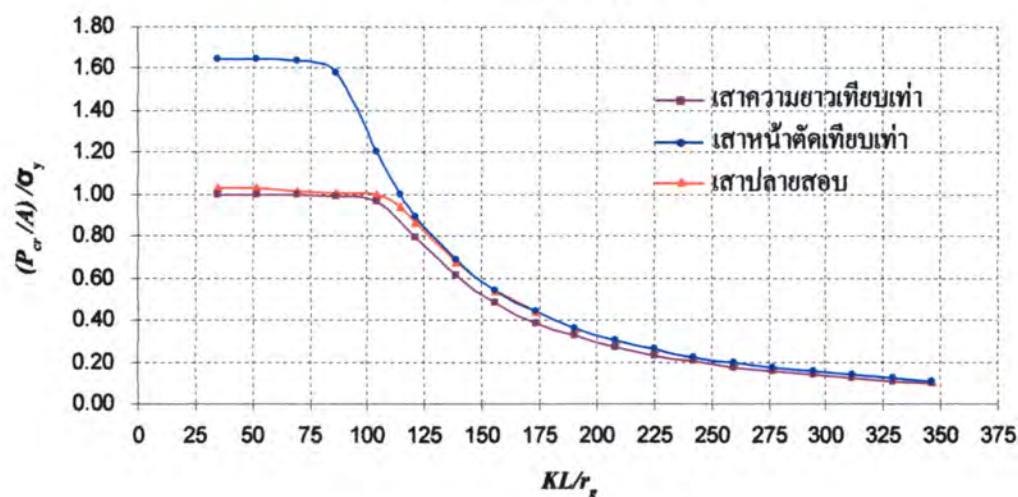


ภาพที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.3

การยัดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.4$

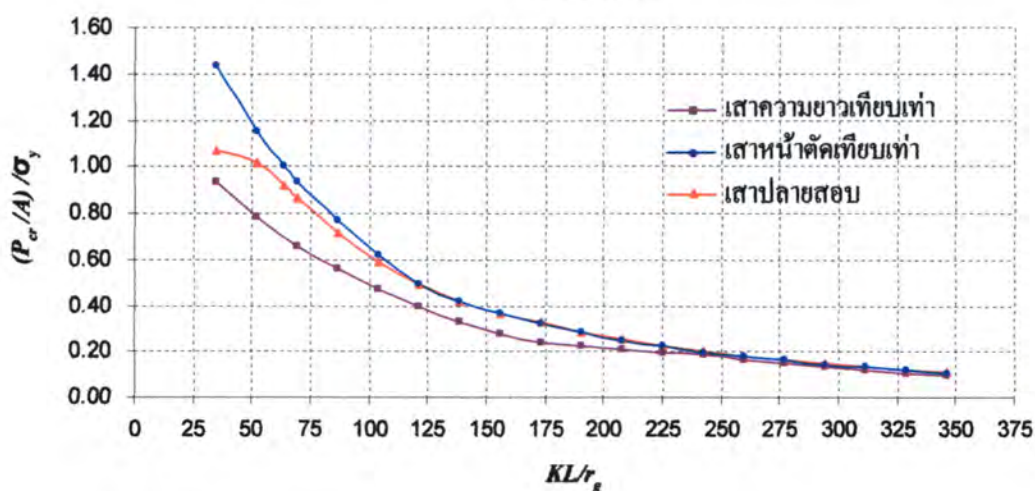
Elastic – Perfectly Plastic



การยัดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.4$

Ramberg Oogood

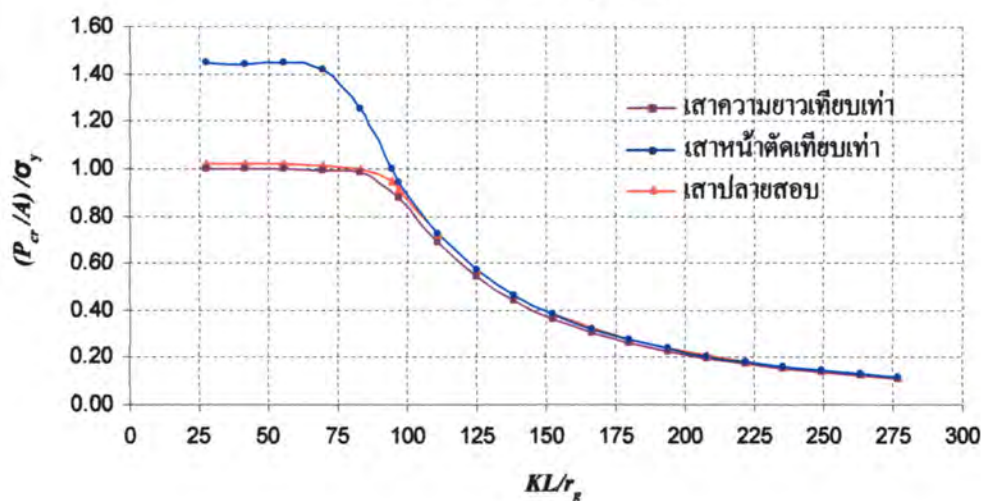


ภาพที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยัดรีงแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.4

การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.5$

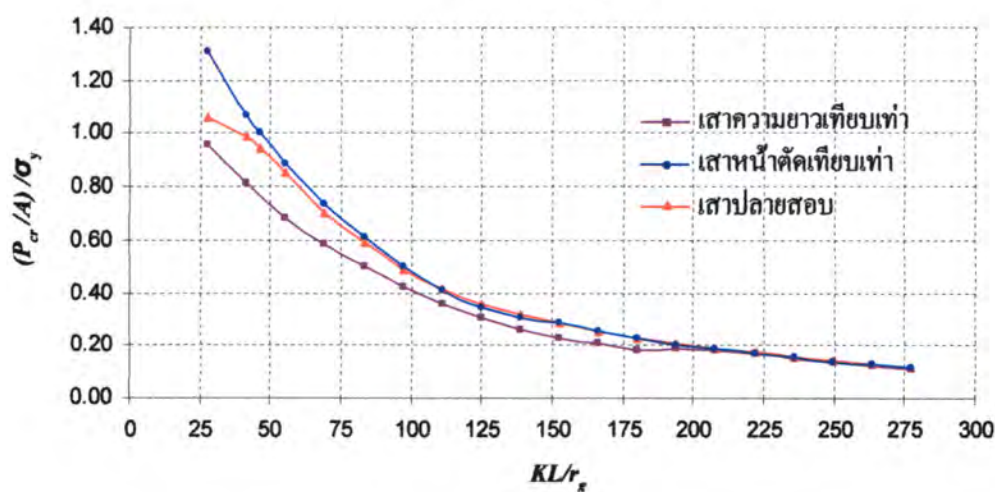
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.5$

Ramberg Oogood

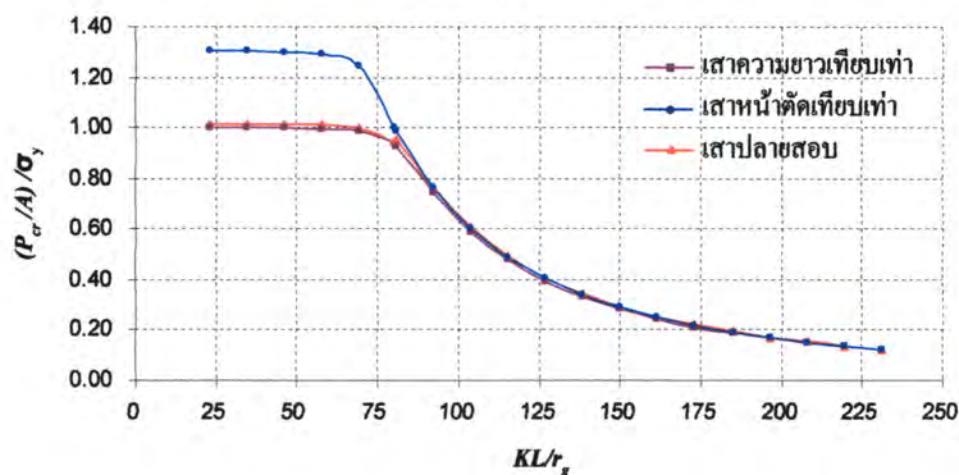


ภาพที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าคัตเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.5

การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.6$

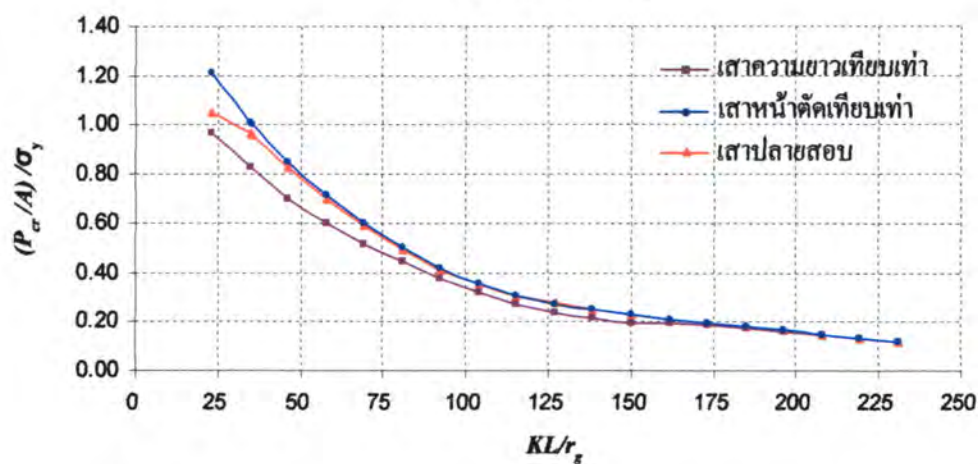
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.6$

Ramberg Oogood

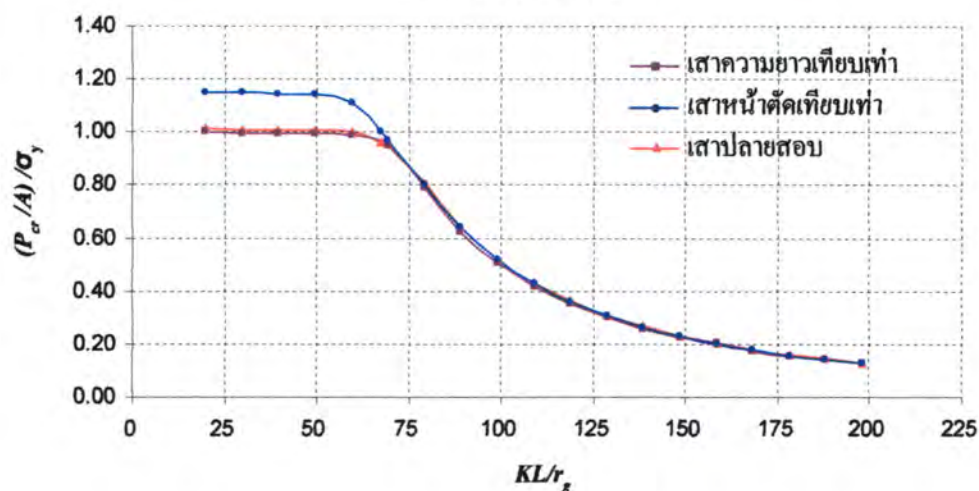


ภาพที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าคัตเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.6

การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.7$

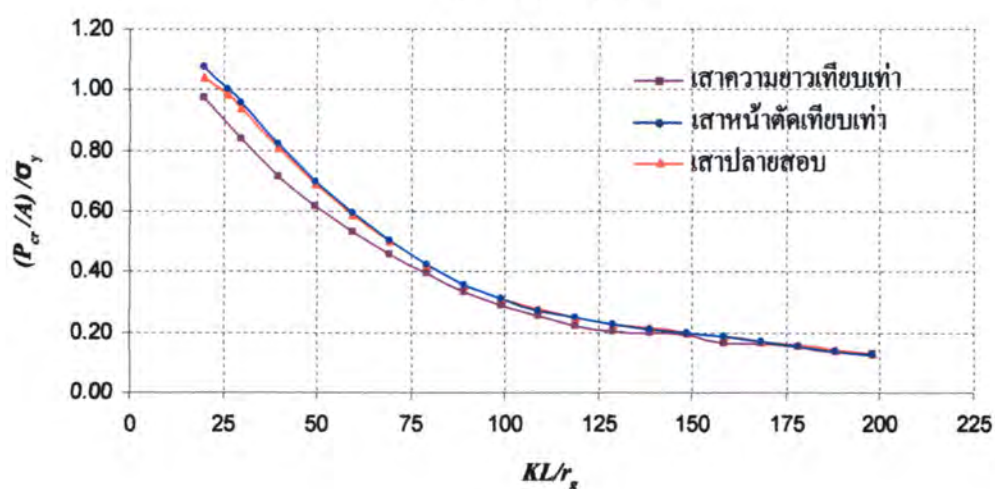
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.7$

Ramberg Oogood

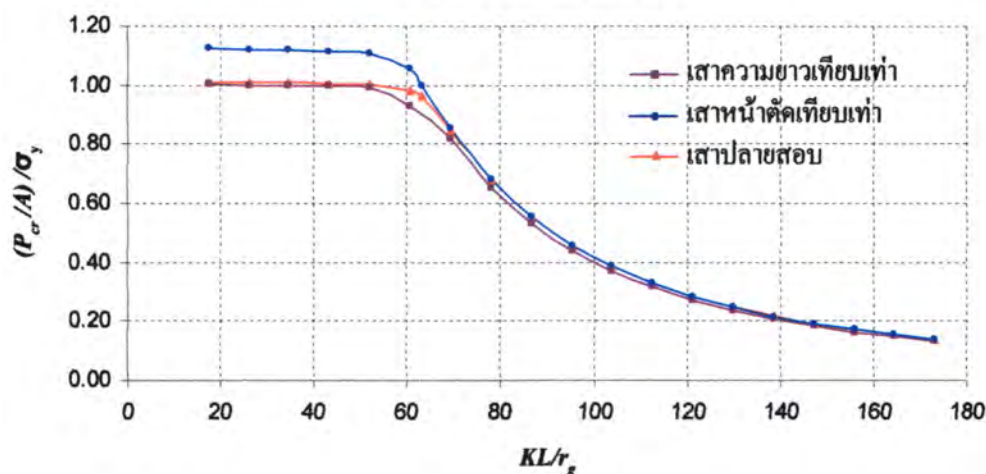


ภาพที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.7

การยัดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.8$

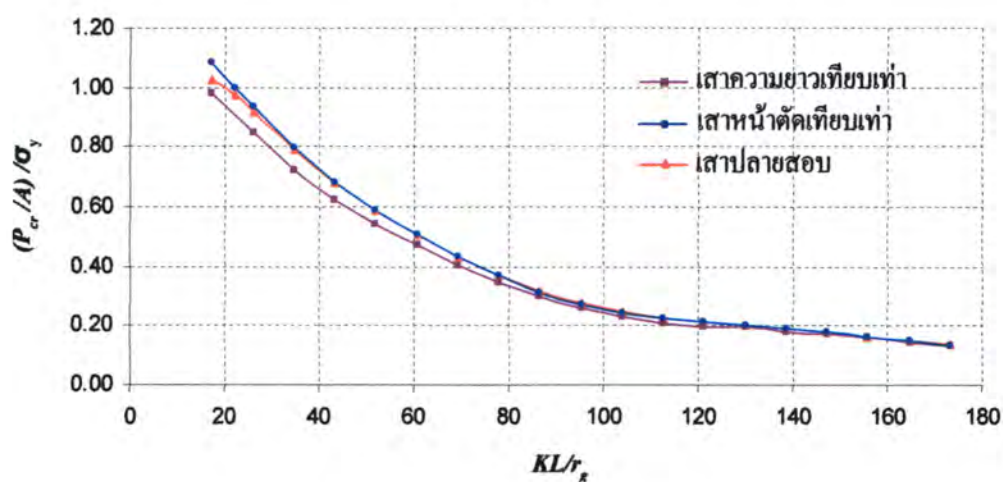
Elastic – Perfectly Plastic



การยัดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.8$

Ramberg Osgood

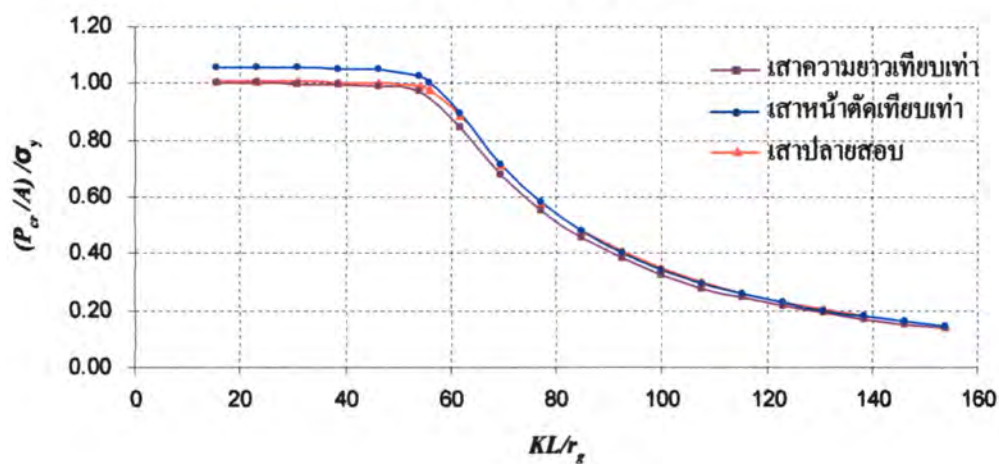


ภาพที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยัดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.8

การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.9$

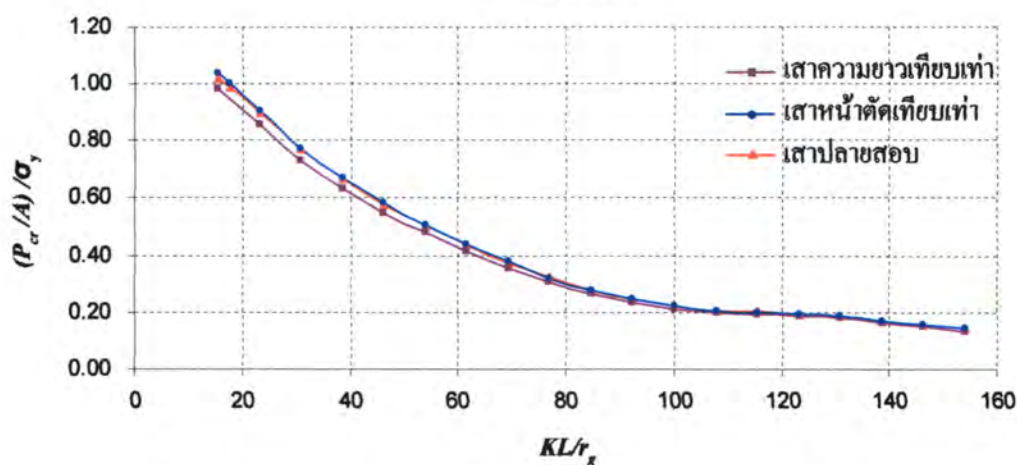
Elastic – Perfectly Plastic



การยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง

(Fixed-Guided) : $r = 0.9$

Ramberg Oogood



ภาพที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ เสาหน้าตัดเทียบเท่า และเสาความยาวเทียบเท่า ที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่ยึดแน่น-ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) และอัตราส่วนที่ปลายเท่ากับ 0.9

5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่ากับเสาปลายสอบ

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่ากับเสาปลายสอบพร้อมกับได้พิจารณาผลการเปรียบเทียบไว้แล้ว ในหัวข้อ 5.1 ถึง 5.5 จะสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่ากับเสาปลายสอบได้ดังนี้

กรณีความความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดแบบ Elastic – Perfectly Plastic จะพบว่า น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าอยู่ทั้งภายในและภายนอกขอบเขตน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ โดยมีจุดแบ่งขอบเขตคือจุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบหรือจุดที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนี้ ในช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าต่ำกว่าและอยู่ภายในขอบเขตของเสาปลายสอบ ส่วนช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าสูงกว่าและอยู่นอกขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ทุกอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทุกสภาพการยึดรั้ง

ส่วนกรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะได้ขอบเขตของน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาปลายสอบ เช่นเดียวกับรูปแบบ Elastic-Perfectly Plastic แต่จะมีข้อแตกต่างจากแบบ Elastic-Perfectly Plastic ในกรณีที่ หากอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบจะเกิดที่ค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ เท่ากับหนึ่ง แต่ถ้าอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าน้อยกว่า 0.6 ลงไป จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบจะเกิดที่ค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ ประมาณ 0.4 ทุกสภาพการยึดรั้ง ยกเว้นกรณีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง(Fixed-Fixed)จุดที่เสาหน้าตัดเทียบเท่ามีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบจะเกิดที่ค่า $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ ประมาณ 0.8

ดังนั้นเมื่อสมการหน้าตัดเทียบเท่าให้ค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่ามีค่าอยู่ทั้งภายในและภายนอกขอบเขตน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ แสดงว่า สมการหน้าตัดเทียบเท่าไม่สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่น ทั้งรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood

หากพิจารณากรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic ในช่วงที่ $(P_{cr} / A) / \sigma_y$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ซึ่งเป็นช่วงที่สมการหน้าตัดเทียบเท่าไม่สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่น ถ้าหากกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุด (P_{cr})

ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำตัดเทียบเท่าไว้ไม่เกินค่าที่เกิดจากผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) จะทำให้ค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ของเสาน้ำตัดเทียบเท่าเท่ากับหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ที่มีค่าเท่ากับหนึ่งจะอยู่ภายในขอบเขตค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ของเสาปลายสอบ ดังนั้นแสดงว่า ในกรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic เมื่อกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำตัดเทียบเท่าไว้ไม่เกินค่าที่เกิดจากผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ ($P_{cr} = A\sigma_y$) สมการเสาน้ำตัดเทียบเท่าจะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่น ทุกอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทุกสภาพการยึดรั้ง

หากพิจารณากรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood โดยใช้หลักการเดียวกันกับแบบ Elastic-Perfectly Plastic โดยกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำตัดเทียบเท่าไว้ไม่เกินค่าที่เกิดจากผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) จะทำให้สมการเสาน้ำตัดเทียบเท่าจะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นเช่นเดียวกับแบบ Elastic-Perfectly Plastic แต่จะใช้ได้เฉพาะช่วงที่อัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป ทุกสภาพการยึดรั้ง ส่วนช่วงที่อัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าน้อยกว่า 0.6 ลงมาจะใช้ไม่ได้ ทุกสภาพการยึดรั้ง เนื่องจากจุดที่เสาน้ำตัดเทียบเท่ามีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบจะมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ประมาณ 0.4 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า ช่วงที่ $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ มีค่าประมาณ 0.4 ถึง 1 เสาน้ำตัดเทียบเท่าจะมีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบ จึงทำให้ไม่ปลอดภัย ส่วนกรณีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) ซึ่งมีค่า $(P_{cr}/A)/\sigma_y$ ที่จุดที่เสาน้ำตัดเทียบเท่ามีกำลังมากกว่าเสาปลายสอบประมาณ 0.8 ก็สามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกัน แต่หากจะให้ใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงนี้ จะต้องลดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำตัดเทียบเท่าลงให้เท่ากับเสาปลายสอบ เมื่อพิจารณาแล้ว จะต้องลดค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำตัดเทียบเท่าดังนี้ อัตราส่วนที่ปลาย (r) เท่ากับ 0.3 ลดลงร้อยละ 16 , อัตราส่วนที่ปลาย (r) เท่ากับ 0.4 ลดลงร้อยละ 10 และอัตราส่วนที่ปลาย (r) เท่ากับ 0.5 ลดลงร้อยละ 6 ทุกสภาพการยึดรั้ง

ดังนั้นแสดงว่า ในกรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood เมื่อกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุด (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำตัดเทียบเท่าไว้ไม่เกินค่าที่เกิดจากผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A) ($P_{cr} = A\sigma_y$) สมการเสาน้ำตัดเทียบเท่าจะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่น ทุกสภาพการยึดรั้ง เมื่ออัตราส่วนที่ปลาย (r) ตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป ส่วนช่วงที่อัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่า

น้อยกว่า 0.6 ลงมา หากจะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย จะต้องลดค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุด ในช่วงไม่ยืดหยุ่น ($P_{cr} = A\sigma_y$) ของเสาหน้าตัดเทียบเท่าลงดังนี้ อัตราส่วนที่ปลาย(r) เท่ากับ 0.3 ลดลงร้อยละ 16 , อัตราส่วนที่ปลาย(r) เท่ากับ 0.4 ลดลงร้อยละ 10 และอัตราส่วนที่ปลาย(r) เท่ากับ 0.5 ลดลงร้อยละ 6 ทุกสภาพการยึดรั้ง

5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่ากับเสาปลายสอบ

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่ากับเสาปลายสอบพร้อมกับได้พิจารณาผลการเปรียบเทียบไว้แล้ว ในหัวข้อ 5.1 ถึง 5.5 จะสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่ากับเสาปลายสอบได้ดังนี้

น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในขอบเขตน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ทั้งรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ทุกอัตราส่วนที่ปลาย(r) ทุกสภาพการยึดรั้ง ดังนั้นสมการความยาวเทียบเท่าที่วิธานิพนธ์นี้นำเสนอ สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่น ทั้งรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ทุกอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทุกสภาพการยึดรั้ง

หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างหลักการความยาวเทียบเท่ากับหลักการหน้าตัดเทียบเท่าแล้ว จะพบว่า หลักการความยาวเทียบเท่ามีความสะดวกในการนำไปใช้หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบ ซึ่งมีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood มากกว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่า เนื่องจากสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย ทุกค่าอัตราส่วนความชะลูด (KL/r_g) ทุกค่าอัตราส่วนที่ปลาย(r) และทุกสภาพการยึดรั้ง โดยที่ไม่ต้องมีการกำหนดน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ไม่เกินค่าที่เกิดจากผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) และไม่ต้องมีการปรับลดกำลังของเสาความยาวเทียบเท่า เมื่ออัตราส่วนที่ปลาย(r) มีค่าน้อยกว่า 0.6 เหมือนกับหลักการหน้าตัดเทียบเท่า แต่หลักการความยาวเทียบเท่าจะมีข้อดีกว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่าตรงจุดที่สิ้นเปลืองวัสดุมากกว่า โดยเฉพาะช่วงที่มีอัตราส่วนที่ปลาย (r) ตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป หลักการหน้าตัดเทียบเท่าจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่าหลักการความยาวเทียบเท่า เนื่องจากกำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของเสาปลายสอบมากกว่าเสาความยาวเทียบเท่า และไม่ต้องมีการปรับลดกำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ยกเว้นกรณีการยึดรั้งแบบปลายทั้งสองข้างยึดแน่น(Fixed-Fixed) หลักการความยาวเทียบเท่าจะเหมาะสมในการใช้งาน

มากกว่าเนื่องจากกำลังของเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของเสาปลายสอบมากกว่า เสาหน้าตัดเทียบเท่า ทั้งนี้สมการหน้าตัดเทียบเท่าหรือสมการความยาวเทียบเท่าจะใช้ประยุกต์หา น้ำหนักบรรทุกทุกพลอคภัยของเสาไม้ปลายสอบได้โดยใช้กราฟออกแบบเสา (Column curve) ที่ กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบเสาไม้ปลายสอบต่าง ๆ ต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

6.1 ผลการตรวจสอบสมการหน้าตัดเทียบเท่า

จากการศึกษาและตรวจสอบสมการหน้าตัดเทียบเท่าตามตารางที่ 3.3 ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนาขึ้นมาจากการ โกงเคาะในช่วงยืดหยุ่นว่า จะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้หรือไม่ สามารถสรุปผลการศึกษาและผลการตรวจสอบได้ดังนี้

กรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic สมการหน้าตัดเทียบเท่าไม่สามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาไม้ปลายสอบในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย เมื่อกำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่ามีค่ามากกว่าผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ ดังนั้น หากกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าไว้ไม่เกินค่าผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) สมการหน้าตัดเทียบเท่าจะสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาไม้ปลายสอบในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย ทุกค่าอัตราส่วนความขรุขระ (KL/r_g) ทุกอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทุกสภาพการยึดรั้ง

กรณีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood สมการหน้าตัดเทียบเท่าสามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาไม้ปลายสอบในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย เมื่อค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป แต่จะไม่ปลอดภัยเมื่อค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6 ลงมา หากจะใช้สมการหน้าตัดเทียบเท่าในช่วงนี้ได้อย่างปลอดภัย จะต้องกำหนดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุด (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าไว้ไม่เกินค่าผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) แล้วปรับลดค่าน้ำหนักวิกฤตสูงสุด (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าลงตามค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) ดังนี้ อัตราส่วนที่ปลาย (r) เท่ากับ 0.3 ปรับลดลงร้อยละ 16, อัตราส่วนที่ปลาย (r) เท่ากับ 0.4 ปรับลดลงร้อยละ 10 และอัตราส่วนที่ปลาย (r) เท่ากับ 0.5 ปรับลดลงร้อยละ 6.0 ทุกสภาพการยึดรั้ง สมการหน้าตัดเทียบเท่าจึงจะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นที่มีค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6

6.2 ผลการตรวจสอบสมการความยาวเทียบเท่า

จากการศึกษาและตรวจสอบสมการความยาวเทียบเท่าตามตารางที่ 4.7 ซึ่งมีพื้นฐานการพัฒนาขึ้นจากการโค้งเคาะในช่วงยืดหยุ่นว่า จะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้หรือไม่ สามารถสรุปผลการศึกษาและผลการตรวจสอบได้ดังนี้

น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าจะมีค่าอยู่ภายในขอบเขตน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ทั้งรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ทุกค่าอัตราส่วนความชะลุด (KL/r_g) ทุกอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทุกสภาพการยึดรั้ง

สมการความยาวเทียบเท่าที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ สามารถใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกของเสาไม้ปลายสอบในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้อย่างปลอดภัย ทั้งในรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Elastic-Perfectly Plastic และแบบ Ramberg Osgood ทุกค่าอัตราส่วนความชะลุด (KL/r_g) ทุกอัตราส่วนที่ปลาย (r) ทุกสภาพการยึดรั้ง

หลักการความยาวเทียบเท่ามีความสะดวกในการนำไปใช้หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบมากกว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่า เนื่องจากสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย ทุกค่าอัตราส่วนความชะลุด (KL/r_g) ทุกค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) และทุกสภาพการยึดรั้ง โดยที่ไม่ต้องมีการกำหนดน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า ไม่เกินค่าที่เกิดจากผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) และไม่ต้องมีการปรับลดกำลังของเสาความยาวเทียบเท่า เมื่ออัตราส่วนที่ปลาย (r) มีค่าน้อยกว่า 0.6 เช่นเดียวกับหลักการหน้าตัดเทียบเท่า แต่หลักการความยาวเทียบเท่าจะมีข้อดียกว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่าตรงจุดที่สิ้นเปลืองวัสดุมากกว่า โดยเฉพาะช่วงที่มีอัตราส่วนที่ปลาย (r) ตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป หลักการหน้าตัดเทียบเท่าจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่าหลักการความยาวเทียบเท่า เนื่องจากกำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่าจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของเสาปลายสอบมากกว่าเสาความยาวเทียบเท่า และไม่ต้องมีการปรับลดกำลังของเสาหน้าตัดเทียบเท่า ยกเว้นกรณีการยึดรั้งแบบปลายทั้งสองข้างยึดแน่น (Fixed-Fixed) หลักการความยาวเทียบเท่าจะเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าหลักการหน้าตัดเทียบเท่า ทั้งนี้สมการหน้าตัดเทียบเท่าหรือสมการความยาวเทียบเท่าจะใช้ประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบได้โดยใช้กราฟออกแบบเสา (Column curve) ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบเสาไม้ปลายสอบต่างๆ ต่อไป

6.3 กราฟออกแบบของเสา (Column curve)

สมการหน้าตัดเทียบเท่าหรือสมการความยาวเทียบเท่า จะไม่ใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบโดยตรง การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบ ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแบบ Ramberg Osgood จะต้องนำค่าหน้าตัดเทียบเท่าหรือความยาวเทียบเท่า แทนค่าลงในสูตรของกราฟออกแบบเสาที่มาตรฐานต่างๆกำหนดไว้ เมื่อพิจารณาสูตรของกราฟออกแบบของเสา (Column curve) จะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ หน้าตัดเสา (A) และความยาวเสา (L) ปรากฏอยู่ในสูตรนั้นๆ

หากใช้หลักการหน้าตัดเทียบเท่าประยุกต์หาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบ จะทำได้โดยการแทนค่า หน้าตัดเสา (A) ด้วยหน้าตัดเทียบเท่า และแทนความยาวเสา (L) ด้วย ความยาวของเสาปลายสอบในสูตรกราฟออกแบบเสา หากค่าลึงรับน้ำหนักของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A) จะได้ว่า ค่าลึงรับน้ำหนักของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่คำนวณได้นั้นเป็นค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาปลายสอบ แต่ถ้าหากค่าลึงรับน้ำหนักของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A) จะได้ค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาปลายสอบ มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างหน่วยแรงคราก (σ_y) ของวัสดุกับพื้นที่หน้าตัดด้านเล็กของเสาปลายสอบ (A), ($P_{cr} = A\sigma_y$) แต่จะมีการปรับลดค่าลึงของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่คำนวณได้จากกราฟออกแบบลงเมื่อค่าอัตราส่วนที่ปลาย (r) น้อยกว่า 0.6

สำหรับการใช้หลักการความยาวเทียบเท่าประยุกต์หาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบ จะต้องแทนค่าหน้าตัดเสา (A) ด้วยหน้าตัดปลายด้านเล็กของเสาปลายสอบ และแทนค่าความยาวเสา (L) ด้วยความยาวเทียบเท่าลงในสูตรของกราฟออกแบบเสา คำนำน้หนักบรรทุกของเสาความยาวเทียบเท่าที่คำนวณได้จะเป็นน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาไม้ปลายสอบ

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาเสาที่มีปลายสอบทิศทางเดียวคือด้านลึกและเกิดการโก่งเคาะทางด้านลึก ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมทุกลักษณะการสอบของปลายเสา ควรทำการศึกษาในกรณีอื่น ๆ ด้วย เช่น เสาปลายสอบด้านลึกเกิดการโก่งเคาะทางด้านกว้าง หรือเสาที่มีปลายสอบสองทิศทาง โก่งเคาะด้านลึกหรือด้านกว้าง เป็นต้น

6.4.2 การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาเสาไม้ ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมทุกวัสดุ ควรทำการศึกษาในกรณีวัสดุอื่นเพิ่มเติม เช่น เสาเหล็ก เสาอลูมิเนียม เป็นต้น

6.4.3 การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาเฉพาะกรณีรับแรงกดอย่างเดียว แต่เสาในโครงสร้างจริงจะรับทั้งแรงกดและโมเมนต์คดพร้อมกัน หรือเสารับแรงเฉือนศูนย์ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในกรณีดังกล่าว

6.4.4 การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาเฉพาะกรณีเสาหน้าตัดตัน แต่เสาในโครงสร้างจริงจะมีการใช้งานเสากลมกลวงที่มีปลายสอบทั้งสองทิศทาง เช่น เสาเหล็กรับคองโคมส่องสว่างตามถนน หรือเสาเหล็กรับป้ายสัญญาณไฟจราจร จึงควรศึกษาในกรณีนี้เพิ่มเติมด้วย

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- นิติศักดิ์ แก้วเสนา และคณะ. 2548. “สมการแนะนำในการออกแบบสำหรับการโก่งเคาะของเสา
ขลุ่ยที่มีปลายแหลม”, ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10.
พัทธา : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วินิต ช่อวิเชียร, วรนิติ ช่อวิเชียร และวรสวรรษ ช่อวิเชียร. 2548. **กำลังวัสดุ กลศาสตร์วัสดุ**.
พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: หจก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์.
- วสท.1002-16. 2517. “มาตรฐานสำหรับงานไม้”, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม
ราชูปถัมภ์.
- สมโพธิ วิวิธเกววงศ์. 2542. **กลศาสตร์ของวัสดุ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Chajes, A. 1993. **Principles of Structural Stability Theory**. New Jersey: Waveland Press, Inc.
- AF&PA. 1991. “National Design Specification for Wood Construction”, **American Forest &
Paper Association**. <http://www.awc.org/standards/nds.html>. March 27, 2008.
- AF&PA. 1997. “National Design Specification for Wood Construction”, **American Forest &
Paper Association**. <http://www.awc.org/standards/nds.html>. March 27, 2008.
- AF&PA. 2001. “National Design Specification for Wood Construction”, **American Forest &
Paper Association**. <http://www.awc.org/standards/nds.html>. March 27, 2008.
- ASCE, 1995. “Standard for Load add Ristance Factor Design (LRFD) for Engineerig Wood
Construction”, **AF&PA/ASCE 16-95, Amemrican Social of Civil Engineering**.
New York.
- Appl, F. and Smith, J. 1968. “Buckling of inelastic, tapered pin-end columns”, **Journal of the
Engineerig Mechanics Division. Proceeding ASCE**. 94(EM2): 549-557.
- Bleich, F. 1952. **Buckling strength of metal structures**. New York: McGraw-Hill Book Co.,
Inc.
- Chan, S.L. 1990. “Buckling analysis of structures composed of tapered members”, **Journal of
Structural Engineering**. 116(7): 1893-1906.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Criswell, M.E. 1984. **Design of columns, Wood: Engineering Design Concepts**. Pennsylvania State University.
- Criswell, M.E. 1991. "New design equation for tapered columns", **Wood Design Focus**. 2(3): 4-7.
- CSA. 1984. **Engineering Design in Wood (Limit States Design), Canadian Standards Association**. Ontario: Canada.
- Dinnik, A. 1929. "Design of columns of varying cross-section", **ASME Transactions**. AMP-51-11, 51: 105-114.
- Ermopoulos, J.C. 1986. "Buckling of tapered bars under stepped axial loads", **Journal of Structural Engineering**. 112(6): 1346-1354.
- Fogel, C.M. and Ketter, R.L. 1962. "Elastic strength of tapered columns", **Journal of the Structural Division**. 88(ST5): 67-105.
- Gabriel, A.J.L. 1998. "Inelastic Stability of Tapered Structural Member", **PhD Dissertation**. The University of Minnesota.
- Gatewood, B.E. 1954. "Buckling loads for columns of variable cross section", **Journal of Aeronautical Sciences**. 21: 278-288.
- Gere, J.M. and Carter, W.O. 1962. "Critical buckling loads for tapered columns", **Journal of the Structural Division**. 88(ST1): 1-11.
- Girijavallabhan, C.V. 1969. "Buckling loads of nonuniform columns", **Journal of the Structural Division**. 95(ST11): 2419-2431.
- Godden, W.G. 1965. **Numerical analysis of beam and column structures**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.
- Iremonger, M.J. 1980. "Finite difference buckling analysis of non-uniform columns", **Computers and Structures**. 12: 741-748.
- Karabalis, D.L. and Beskos, D.E. 1983. "Static, dynamics and stability analysis of structures composed of tapered beams", **Computers and Structures**. 16(6): 731-748.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

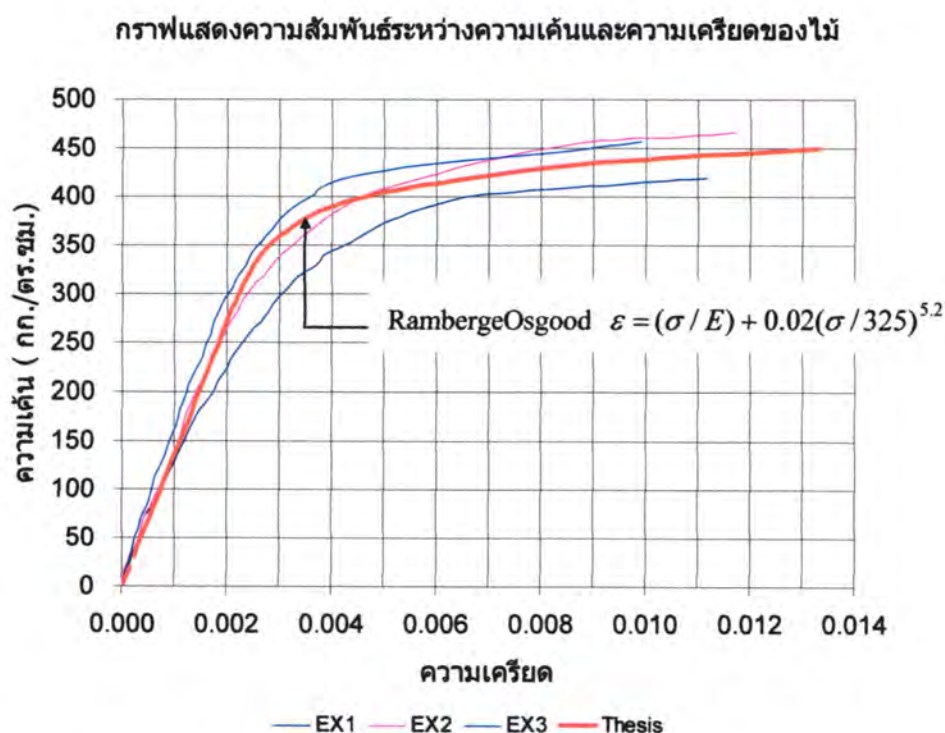
- Kim, M.C., Lee, G.C. and Chang, K.C. 1995. "Inelastic Buckling of Tapered Member with Accumulated Strain", **Structural Engineering and Mechanics**. 3(6): 611-622.
- Lee, G.C., Morrell, M.L. and Ketter, R.L. 1972. "Design of Tapered Members", **Welding Research Council Bulletin**. 173: 1-32.
- Salvadori, M.G. 1949. "Numerical computation of buckling loads by finite differences", **ASCE Transactions**. 116: 590-625.
- Shiomi, H. and Kurata, M. 1984. "Strength Formula for Tapered Beam-Columns", **Journal of Structural Engineering**. 110(7): 1630-1643.
- Smith, W.G. 1988. "Analytic solutions for tapered column buckling", **Computers and Structures**. 28(5): 677-681.
- Timoshenko, S.P. 1908. **Buckling of bars of variable cross-section**. Ukraine: Bulletin of the Polytechnic Institute.
- Wang, C.K. 1967. "Stability of rigid frames with non-uniform members", **Journal of the Structural Division**. 93(ST1): 275-294.
- Williams, F.W. and Aston, G. 1989. "Exact or lower bound tapered column buckling loads", **Journal of Structural Engineering**. 115(5): 1088-1100.
- Young, D. 1945. "Inelastic buckling of variable-section columns", **ASME. Transaction**. 67: 165-A169.

ภาคผนวก

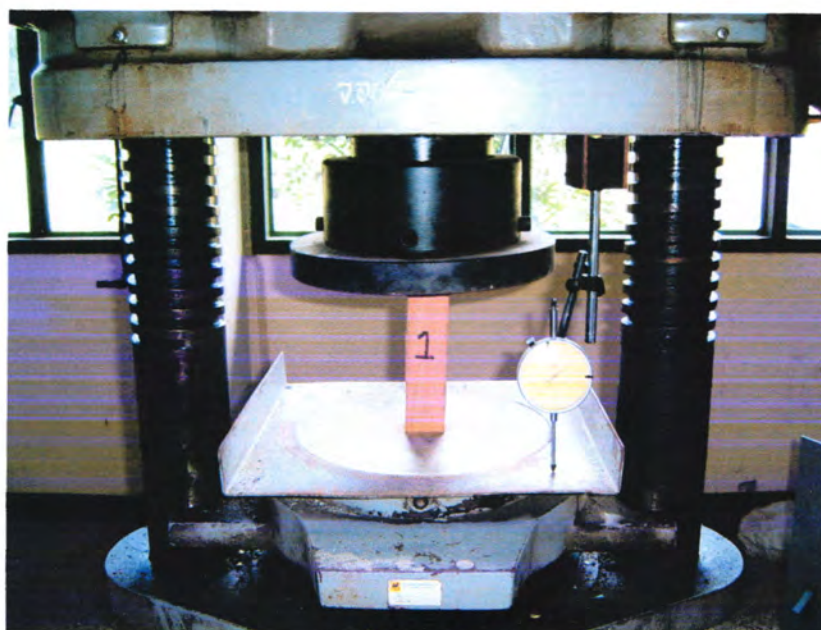
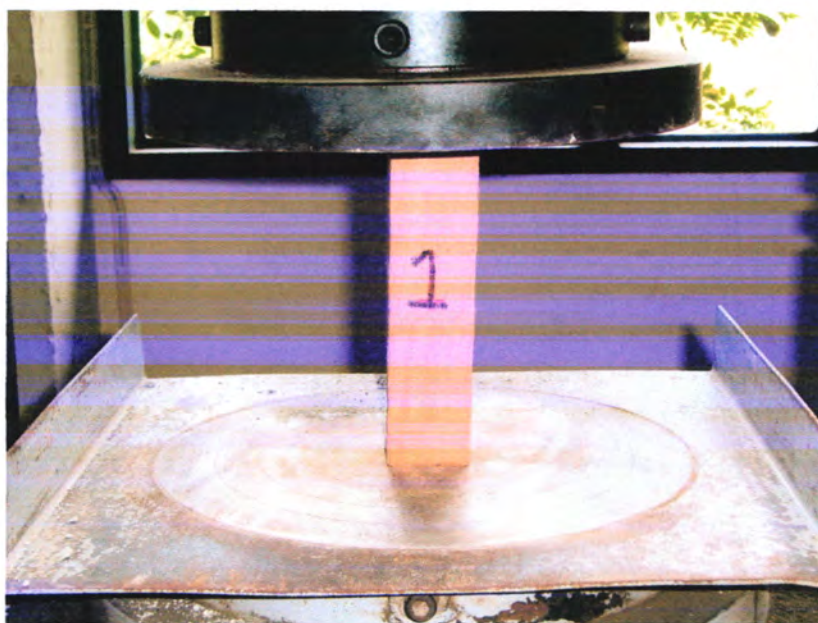
ภาคผนวก ก
การทดสอบไม้ในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบไม้ในห้องปฏิบัติการ

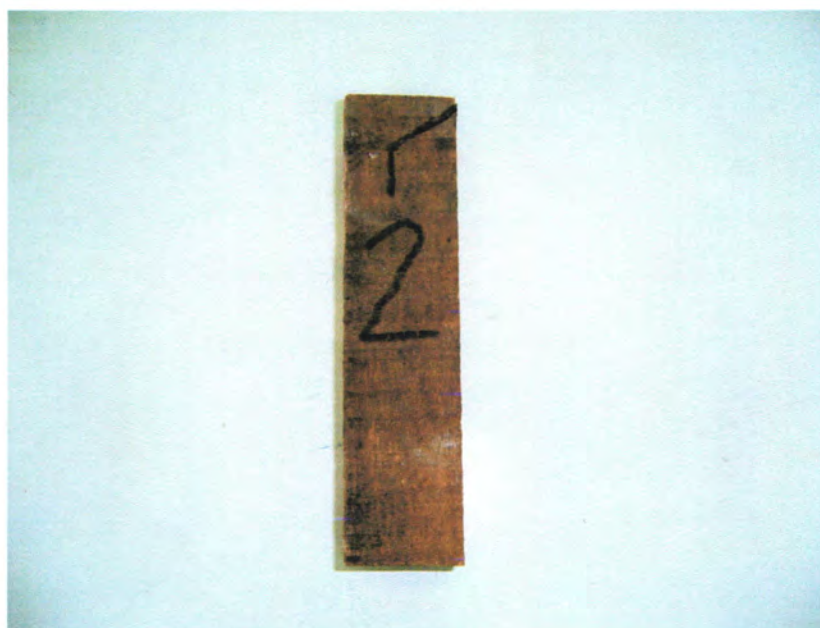
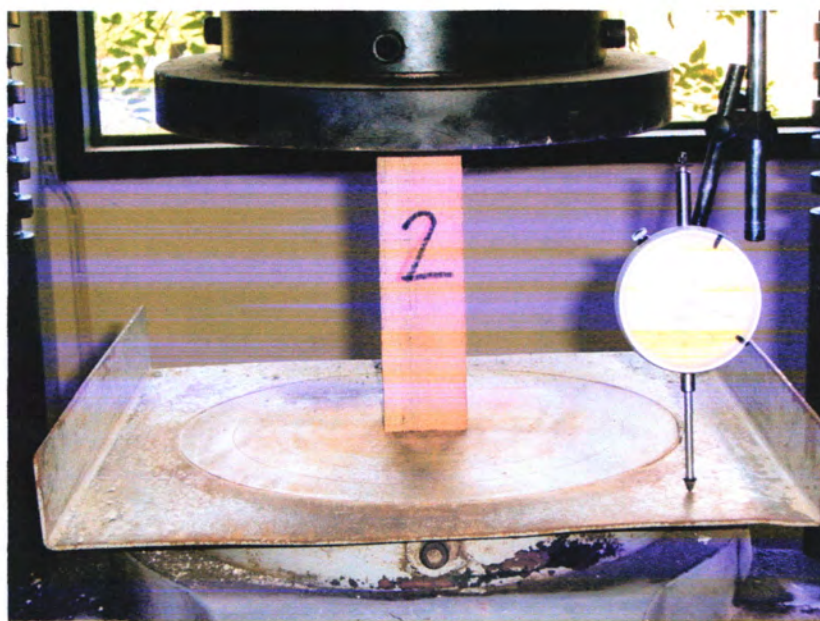
งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาหน้าหนักบรรทุกของเสาไม้ปลายสอบด้วยโปรแกรม ABAQUS ซึ่งในการจำลองรูปแบบเสาเพื่อให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์ผล ข้อมูลสำคัญที่จะต้องป้อนลงในโปรแกรม ABAQUS คือ รูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ไม้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบไม้ในห้องปฏิบัติการ เพื่หารูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของไม้สำหรับใช้เป็นตัวแทนของความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุที่จะทำการวิจัยครั้งนี้ ตัวอย่างไม้ที่ทดสอบเป็น ไม้เนื้อแข็ง ขนาด 5.00 ซม. x 5.00 ซม. ความยาว 15.00 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ผลการทดสอบสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของไม้ และสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของไม้ แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ ดังภาพที่ ก.1 และ ภาพที่ ก.2 ถึง ก.4 เป็นภาพถ่ายขณะทดสอบในห้องปฏิบัติการ



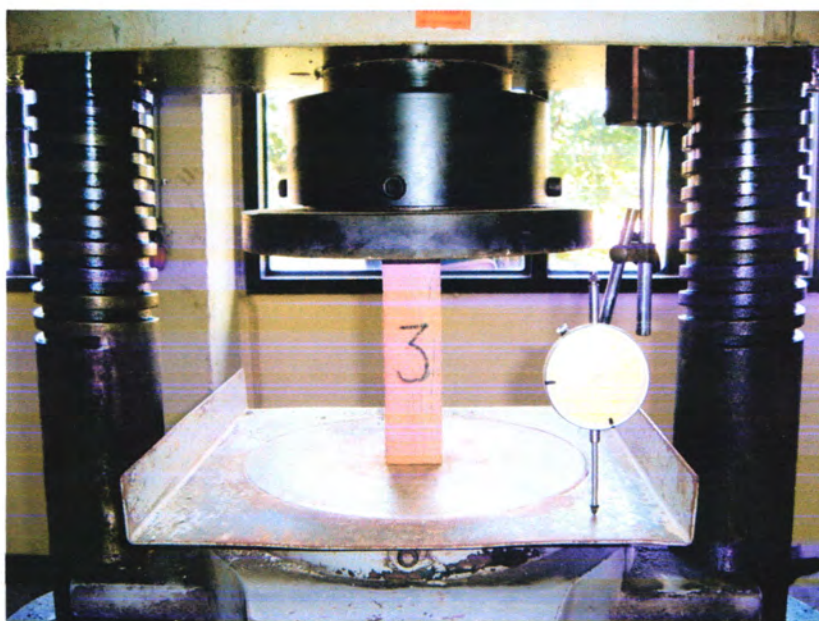
ภาพที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของไม้



ภาพที่ ก.2 การทดสอบไม้ตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ ก.3 การทดสอบไม้ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ ก.4 การทดสอบไม้ตัวอย่างที่ 3

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบ
เนื่องจากการใช้ชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่มีขนาดแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตของเสาปลายสอบเนื่องจากการใช้ชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่มีขนาดแตกต่างกัน

การแบ่งชิ้นส่วนย่อย (Element) หากแบ่งหยาบมากค่าที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่หากแบ่งอย่างละเอียด ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าถูกต้องแต่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่าการแบ่งอย่างหยาบ ในแรกเริ่มการดำเนินงานวิจัย จึงได้ทดลองให้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ ที่มีความยาว 400 ซม. โดยเปรียบเทียบระหว่างชิ้นส่วนที่มีขนาด 0.25×0.25 ซม. กับขนาด 1.00×1.00 ซม. ปรากฏผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ ข.1 ส่วนตาราง ข.2 จะแสดงร้อยละของค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตที่วิเคราะห์ได้เนื่องจากการใช้ขนาดชิ้นส่วนย่อย (Element) แตกต่างกันของชิ้นส่วนขนาด 0.25×0.25 ซม. และ 1.00×1.00 ซม.

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีความยาว 400 ซม.

ขนาดชิ้นส่วน (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)							
	r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9	r=1.0
จุดยึดครึ่งแบบยึดหมุน-ยึดหมุน(Hinge-Roller)								
0.25x0.25	1288.0	1890.0	2567.0	3314.0	4131.0	5015.0	5965.0	6979.0
1.00x1.00	1276.0	1873.0	2543.0	3283.0	4093.0	4968.0	5909.0	6914.0
จุดยึดครึ่งแบบยึดแน่น-ยึดหมุน(Fixed-Roller)								
0.25x0.25	2570.0	3810.0	5205.0	6746.0	8426.0	10241.0	12187.0	14260.0
1.00x1.00	2547.0	3775.0	5157.0	6683.0	8348.0	10147.0	12074.0	14128.0
จุดยึดครึ่งแบบยึดแน่น-ปล่อยอิสระ(Fixed-Free)								
0.25x0.25	604.0	778.0	946.0	1111.0	1273.0	1432.0	1590.0	1747.0
1.00x1.00	598.0	770.0	937.0	1100.0	1261.0	1419.0	1575.0	1730.0
จุดยึดครึ่งแบบยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)								
0.25x0.25	4980.0	7406.0	10137.0	13155.0	16444.0	19994.0	23797.0	27843.0
1.00x1.00	4934.0	7337.0	10043.0	13003.0	16292.0	19810.0	23577.0	27585.0
จุดยึดครึ่งแบบยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)								
0.25x0.25	1423.0	2007.0	2659.0	3380.0	4172.0	5035.0	5972.0	6981.0
1.00x1.00	1410.0	1987.0	2634.0	3349.0	4133.0	4988.0	5916.0	6916.0

ตารางที่ ข.2 ร้อยละของค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตที่วิเคราะห์ได้เนื่องจากการใช้ขนาดชิ้นส่วนย่อย (Element) แตกต่างกันของชิ้นส่วนขนาด 0.25 x 0.25 ซม.และ 1.00 x 1.00 ซม.

ร้อยละของค่าความแตกต่าง							
r=0.3	r=0.4	r=0.5	r=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9	r=1.0
จุดยึดรั้งแบบยึดหมุน-ยึดหมุน(Hinge-Roller)							
0.93	0.90	0.93	0.94	0.92	0.94	0.94	0.93
จุดยึดรั้งแบบยึดแน่น-ยึดหมุน(Fixed-Roller)							
0.89	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	0.93	0.93
จุดยึดรั้งแบบยึดแน่น-ปล่อยอิสระ(Fixed-Free)							
0.89	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	0.93	0.93
จุดยึดรั้งแบบยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)							
0.99	1.03	0.95	0.99	0.94	0.91	0.94	0.97
จุดยึดรั้งแบบยึดแน่น-เลื่อนตามราง(Fixed-Guided)							
0.92	0.93	0.93	1.16	0.92	0.92	0.92	0.93

จากตาราง ข.2 พบว่า ค่าความแตกต่างของน้ำหนักวิกฤตที่วิเคราะห์ได้จากการใช้ขนาดชิ้นส่วนย่อย (Element) ขนาด 0.25 x 0.25 ซม. และ ขนาด 1.0 x 1.0 ซม. มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 1.03 ซึ่งถือว่าเป็นที่น้อยสามารถยอมรับได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้ขนาด ชิ้นส่วนย่อย (Element) 1.0 x 1.0 ซม. ในการจำลองรูปแบบของเสาในการวิเคราะห์ห้าน้ำหนักวิกฤตทั้งในช่วงยึดหยุ่นและไม่ยึดหยุ่นต่อไป

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าพหุคูณในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

1. การจำลองรูปแบบเสาปลายสอบ

1.1 การกำหนดชิ้นส่วนย่อย (Element define)

เสาจะถูกแบ่งตามแนวความลึกเป็น 10 ชิ้นส่วน แต่ละชิ้นส่วนลึก 1.0 ซม. สูง 1.0 ซม. โดยมีความกว้างคงที่เท่ากับความกว้างของเสาเท่ากับ 10 ซม. ชิ้นส่วนที่ใช้คือ Solid element 2D 4 Node ชนิด Plane Stress ชื่อ CPS4R การกำหนดชื่อชิ้นส่วนตามแนวความลึก จะให้เพิ่มชิ้นที่ละ 1 จาก 1, 2, 3, 10 ส่วนในแนวดิ่งเพิ่มขึ้นทีละ 100 จาก 1, 101, 201, จนถึงปลายเสาด้านเล็กบนสุด ขนาดทางด้านลึกจะลดลงตามอัตราส่วนที่ปลายเสา ความสูงของชิ้นส่วนคงที่เท่ากับ 1 ซม. จำนวนแถวขึ้นอยู่กับความยาวของเสาเช่น เสายาว 200 ซม. ก็จะมี 200 แถว เป็นต้น ภาพที่ ค.1 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณปลายฐานด้านใหญ่ของเสา

แถวที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

แถวที่ 2 ชิ้นส่วนที่ 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110

แถวที่ 3 ชิ้นส่วนที่ 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210

x เปลี่ยนแปลงขนาดตามค่าอัตราส่วนที่ปลาย

	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ภาพที่ ค.1 การแบ่งชิ้นส่วนบริเวณปลายฐานด้านใหญ่ของเสา

ส่วนปลายเสาด้านเล็กบนสุด จะถูกแบ่งเป็น 10 ชั้นส่วนเช่นกันแต่ขนาดทางด้านลึกจะลดลงตามอัตราส่วนที่ปลายเสา เช่น ถ้าอัตราส่วนที่ปลายเสาเท่ากับ 0.5 จะได้ความลึกของหน้าตัดเสาที่ปลายเล็กบนสุดเท่ากับ 5 ซม. ดังนั้นชั้นส่วนที่ปลายเล็กบนสุดจะมีขนาด 0.50x1.0 ซม. ความสูงของชั้นส่วนคงที่เท่ากับ 1 ซม. การกำหนด Element จะกำหนดโดยใช้คำสั่ง *ELEMENT ตามด้วยชนิดของ Element , ชื่อ Element , พิกัด x-y และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ เช่น

```
*ELEMENT,TYPE=CPS4R
1,1,2,102,101
*MATERIAL,NAME=WOOD
*ELASTIC
1.36E5, 0.25
*PLASTIC
450,0
```

1.2 การกำหนดจุดต่อชั้นส่วน (node of element)

การกำหนดชื่อ Node จะให้เพิ่มชั้นที่ละ 1 จาก 1, 2, 3, 10 ตามแนวความลึก ส่วนในแนวดิ่งเพิ่มชั้นที่ละ 100 จาก 1, 101, 201, จนถึงปลายเสาด้านเล็กบนสุด Element Solid 2D CPS4R จะมี 4 node ทิศทางของ node ทวนเข็มนาฬิกา เช่น

Element ที่ 1 node 1 – 2 - 102 - 101
 Element ที่ 2 node 2 – 3 - 103 - 102
 Element ที่ 101 node 101 – 102- 202 – 201
 Element ที่ 102 node 102– 103- 203 – 202

ผังภาพที่ ค.2

201	202	203	204	205	206
Elem.101	Elem.102	Elem.103	Elem.104	Elem.105	
101	102	103	104	105	106
Elem.1	Elem.2	Elem.3	Elem.4	Elem.5	
1	2	3	4	5	6

ภาพที่ ค.2 จุดต่อชั้นส่วนย่อย (node) ของปลายเสาด้านใหญ่

การกำหนด node จะใช้คำสั่ง *NODE ตามด้วยชื่อ node , พิกัด x-y ของ node เช่น

```
*NODE
1 , -5.00 , 0
11 , 5.00 , 0
20001, -2.00 , 200
20011, 2.00 , 200
```

1.3 การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ (Property of Material)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ต้องกำหนดให้โปรแกรม คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) งานวิจัยนี้ได้กำหนดวัสดุเป็นไม้เนื้อแข็ง มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 136,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าอัตราส่วนของปัวซองของไม้มีเท่ากับ 0.25 คำสั่งที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุคือ *MATERIAL และ *ELASTIC ดังนี้

```
*MATERIAL, NAME=WOOD
*ELASTIC
1.36E5, 0.25
```

1.4 การกำหนดจุดยึดตรึง (Boundary)

การกำหนดจุดยึดตรึงจะกำหนดที่ Node ปลายเสาทั้งสองข้าง โดยการระบุ degree of freedom ที่ต้องการยึดตรึง ให้โปรแกรมทราบ สำหรับ degree of freedom (dof.) ต่างๆจะมีความหมายดังนี้

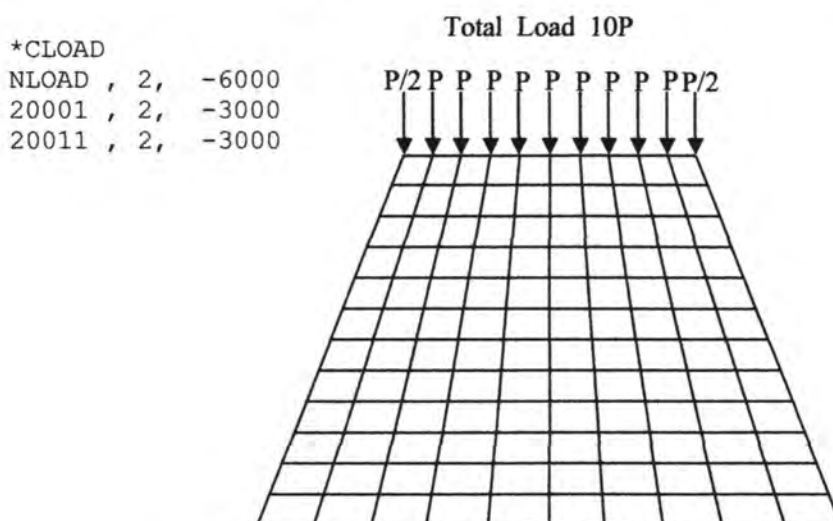
- dof. 1 คือ การเคลื่อนที่ของ node ในแนวแกนที่ 1 (แกน X)
- dof. 2 คือ การเคลื่อนที่ของ node ในแนวแกนที่ 2 (แกน Y)
- dof. 3 คือ การเคลื่อนที่ของ node ในแนวแกนที่ 3 (แกน Z)
- dof. 4 คือ การหมุนรอบแกนที่ 1 (แกน X)
- dof. 5 คือ การหมุนรอบแกนที่ 2 (แกน Y)
- dof. 6 คือ การหมุนรอบแกนที่ 3 (แกน Z)

การกำหนดจุดยึดตรึงใช้คำสั่ง *BOUNDARY ตามด้วย node และ dof. เช่นจุดยึดตรึงแบบจุดหมุน จะยึดตรึงไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X,Y แต่ยอมให้หมุนรอบแกน X,Y ได้นั้นคือต้องกำหนดให้โปรแกรมทราบว่า จะยึดตรึง dof 1,2 เช่น

```
*BOUNDARY
NODE, 1,2
```


1.5 น้ำหนักที่กระทำ (Load)

น้ำหนักกระทำจะกำหนดเป็น Point Load ให้กระทำที่ node ปลายเสาบนด้านเล็ก โดยมีทิศทางลงตามแนวดิ่ง (ทิศทาง -Y) คำสั่งที่ใช้คือ *CLOAD , node ที่น้ำหนักกระทำ , ทิศทางของน้ำหนัก และขนาดของน้ำหนัก ดังนี้ ภาพที่ ค.3 แสดงลักษณะที่น้ำหนักกระทำกับเสาปลายสอบ



ภาพที่ ค.3 ลักษณะที่น้ำหนักกระทำกับเสาปลายสอบ

1.6 การวิเคราะห์และแสดงผล

การวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่น จะใช้คำสั่ง *STEP , *BUCKLE เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์ผลเรียบร้อยแล้ว จะแสดงผลเป็นค่า EIGENVALUE mode ที่ 1 จะได้ น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่น คือ ผลคูณระหว่างน้ำหนักที่กระทำทั้งหมด (Total Load) กับ ค่า EIGENVALUE

คำสั่งวิเคราะห์

```
*STEP
*BUCKLE
1,
```

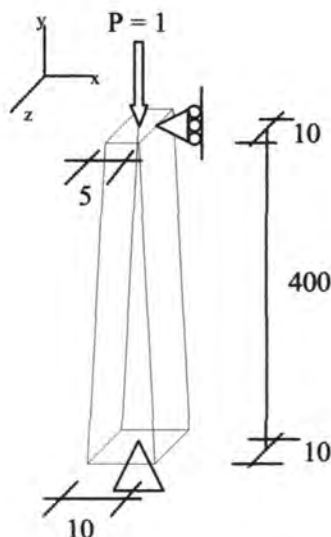
การแสดงผล

MODE NO	EIGENVALU
1	4934.2

จะได้ น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นเท่ากับ $1.0 \times 4934.2 = 4934.20$ กิโลกรัม

2. ตัวอย่างการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

เสาตัวอย่างเป็นเสาปลายสอบที่มีอัตราส่วนที่ปลายเสาเท่ากับ 0.5 จุดยึดรูปแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง ปลายด้านใหญ่มีความลึกคงที่เท่ากับ 10 ซม. ความกว้างของเสาคงที่ตลอดความยาวเสาเท่ากับ 10 ซม. Element จำลองรูปแบบเสาคือ Solid Element 2D ชนิด Plan Stress 4 Node ชื่อ CPS4R ขนาด 1.0x1.0 ซม. ความยาวเสา 400 ซม. วัสดุของเสาเป็นไม้เนื้อแข็งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 13,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยแรงเส้นที่จุดครากเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด แบบ Elastic-Perfectly plastic ดังภาพที่ ก.4



ภาพที่ ก.4 ลักษณะเสาปลายสอบที่เป็นเสาตัวอย่างการวิเคราะห์ในช่วงยืดหยุ่น

File Input.inp

```
*HEADING
Elastic Tapered HR-L400 r0.5 CPS4R1.0X1.0 thickness 10 cm.
**
*NODE
1,      -5.000, 0.00
11,      5.000, 0.00
40001,  -2.500, 400
40011,   2.500, 400
*NGEN, NSET=NBOTTOM

*NGEN, NSET=NTOP
40001, 40011, 1
*NGEN, NSET=NCOL
1, 40001, 100
2, 40002, 100
```

```

3, 40003, 100
4, 40004, 100
5, 40005, 100
6, 40006, 100
7, 40007, 100
8, 40008, 100
9, 40009, 100
10, 40010, 100
11, 40011, 100
*ELEMENT, TYPE=CPS4R
1, 1, 2, 102, 101
*ELGEN, ELSET=ECOL
1, 10, 1, 1, 400, 100, 100
*SOLID SECTION, ELSET=ECOL, MAT=WOOD
10.0
*MATERIAL, NAME=WOOD
*ELASTIC
1.36E5, 0.25
*BOUNDARY
6, 1, 2
40006, 1
*STEP
*BUCKLE
1,
*CLOAD
40006, 2, -1
*END STEP

```

เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์ผลเรียบร้อยแล้ว จะแสดงผลใน File.dat ดังนี้

```

E I G E N V A L U E      O U T P U T

BUCKLING LOAD ESTIMATE = ("DEAD" LOADS) + EIGENVALUE * ("LIVE"
LOADS) .
"DEAD" LOADS = TOTAL LOAD BEFORE *BUCKLE STEP.
"LIVE" LOADS = INCREMENTAL LOAD IN *BUCKLE STEP

MODE NO      EIGENVALUE

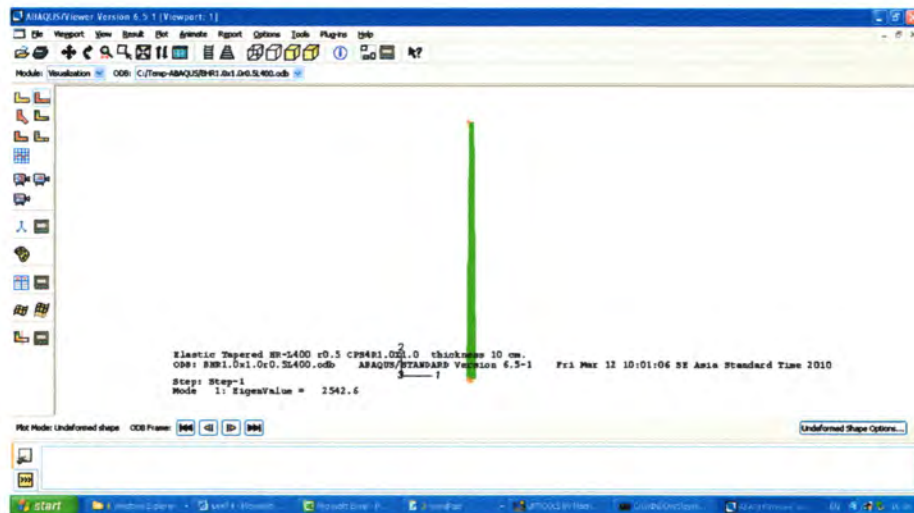
      1      2542.6

THE ANALYSIS HAS BEEN COMPLETED

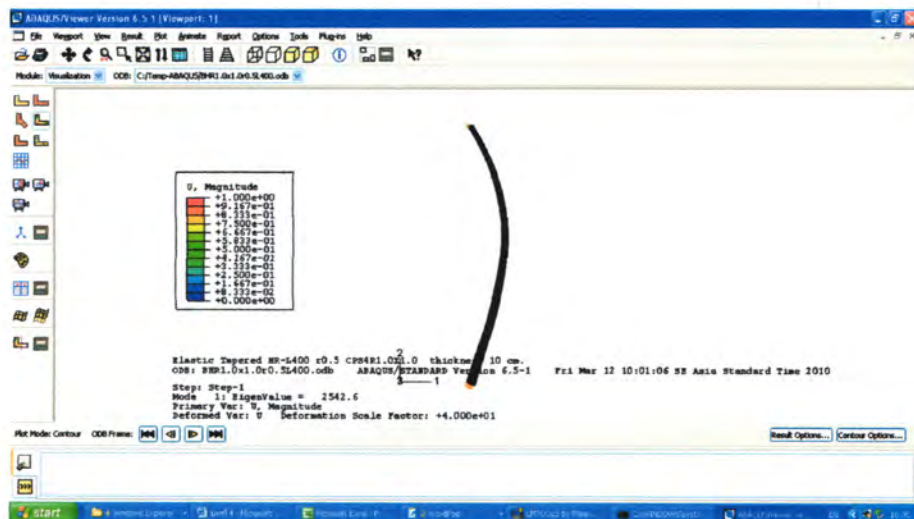
```

ANALYSIS COMPLETE

จะได้นำนักวิฤตในช่วงยืดหยุ่นเท่ากับ $1.0 \times 2542.6 = 2542.60$ กิโลกรัม
 ภาพที่ ค.5 และ ค.6 แสดงลักษณะเสาปลายสอบก่อนและหลังการวิเคราะห์



ภาพที่ ค.5 ลักษณะเสาปลายสอบก่อนทำการวิเคราะห์



ภาพที่ ค.6 ลักษณะเสาปลายสอบหลังทำการวิเคราะห์

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

1. การจำลองรูปแบบเสาปลายสอบ

การจำลองรูปแบบเสาปลายสอบสำหรับวิเคราะห์ในช่วงไม้ยึดหุ่น เสาปลายสอบจะมีลักษณะเหมือนกับในช่วงยึดหุ่นทุกประการ แต่มีข้อมูลที่ต้องกำหนดเพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ในช่วงไม้ยึดหุ่น ดังนี้

1.1 การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ต้องกำหนดให้โปรแกรม คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) งานวิจัยนี้ได้กำหนดวัสดุเป็นไม้เนื้อแข็ง มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 136,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าอัตราส่วนของปัวซองของไม้มีเท่ากับ 0.25 และเนื่องจากทำการวิเคราะห์ในช่วงไม้ยึดหุ่น จึงต้องกำหนดจุดคราก (Yield Point) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่จะทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมจากช่วงยึดหุ่นอีกหนึ่งรูปแบบคือ แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปแบบสมการคือ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$ ค่าสั่งที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุคือ *MATERIAL และ *ELASTIC ดังนี้

กรณีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบ Elastic-Perfectly plastic

*MATERIAL, NAME=WOOD

*ELASTIC

1.36E5, 0.25

*PLASTIC

450, 0

กรณีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปแบบ

สมการคือ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

*MATERIAL, NAME=WOOD

*ELASTIC

1.36E5, 0.25

*PLASTIC

90, 0

105, 1.13E-4

120, 2.29E-4

135, 3.48E-4

150, 4.74E-4

165, 6.07E-4

180, 7.50E-4

195, 9.08E-4

210, 1.08E-3

225, 1.28E-3

240, 1.51E-3

255, 1.77E-3

270, 2.08E-3
 285, 2.44E-3
 300, 2.86E-3
 315, 3.35E-3
 330, 3.92E-3
 345, 4.60E-3
 360, 5.38E-3
 375, 6.30E-3
 390, 7.36E-3
 405, 8.59E-3
 420, 1.00E-2
 435, 1.16E-2
 450, 1.35E-2

1.2 คำสั่งวิเคราะห์ผล

เนื่องจากพฤติกรรมของเสาเมื่อเสารับน้ำหนักถึงช่วงไม่ยืดหยุ่น เสาจะเกิดการโก่งตัวอย่างมาก การวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสา ทำได้โดยใช้ Large displacement Analysis โดยใช้คำสั่ง NLGEOM ซึ่งโปรแกรม ABAQUS ได้จัดเตรียมไว้สำหรับวิเคราะห์ในกรณี Large displacement Analysis ดังนี้

*STEP, NLGEOM

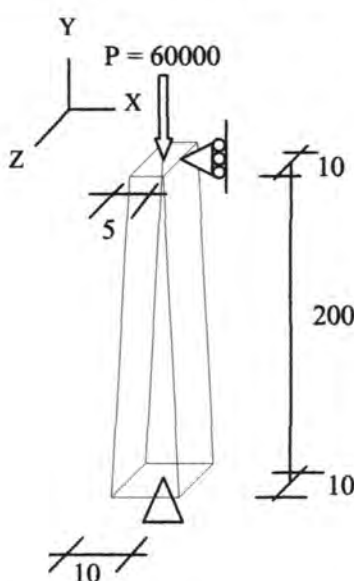
1.3 การโก่งงอเริ่มแรก

เสาจริงที่ใช้งานโครงสร้างทั่วไป จะไม่เป็นเสาตรงตามแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบ แต่จะมีการโก่งงอเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่า การโก่งงอเริ่มแรก ผลของการโก่งงอเริ่มแรกจะให้น้ำหนักที่มากกระทำกับเสาเกิดการเอียงศูนย์กลางออกจากแนวแกนของเสา ทำให้การรับน้ำหนักของเสา นอกจากจะรับน้ำหนักตามแนวแกนแล้ว จะต้องรับ โมเมนต์ดัดที่เกิดน้ำหนักกระทำเอียงศูนย์กลางเพิ่มขึ้นอีก และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงอัดตามแนวแกนเสาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แรงอัดตามแนวแกนจะทำให้เสาเกิดการโก่งตัวมากขึ้นกว่าเดิม โมเมนต์ดัดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลโดยตรงจากการเพิ่มขึ้นของแรงอัดตามแนวแกน (P-delta Effect) ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาลดลงอย่างมาก

ดังนั้นเพื่อให้เสาที่จะทำการศึกษามีพฤติกรรมขณะที่มีน้ำหนักมากกระทำ คล้ายคลึงกับพฤติกรรมของเสาจริง รูปแบบจำลองของเสาจึงต้องกำหนดให้มีค่าการโก่งงอเริ่มแรก เพื่อให้โปรแกรม ABAQUS ได้วิเคราะห์ ผลของแรงอัดตามแนวแกน (P-delta Effect) นั้นเอง ค่าการโก่งงอเริ่มแรกของเสาที่ยอมรับโดยทั่วไปคือหนึ่งส่วนหนึ่งพันของความยาวเสา ($L/1000$) สำหรับงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดแม่นยำมากยิ่งขึ้น จะใช้ค่าการโก่งงอเริ่มแรกเท่ากับหนึ่งส่วนหนึ่งหมื่นของความยาวเสา ($L/10000$) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

2 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าพิกัดจุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ

เสาดังกล่าวเป็นเสาปลายสอบที่มีจุดยึดครึ่งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง ปลายด้านใหญ่มีความลึกเท่ากับ 10 ซม. ความกว้างของเสาตรงที่ตลอดความยาวเสาเท่ากับ 10 ซม. Element จำลองรูปแบบเสาคือ Solid Element 2D ชนิด Plan Stress 4 Node ชื่อ CPS4R ขนาด 1.0×1.0 ซม. ความยาวเสา 200 ซม. อัตราส่วนที่ปลายเสาเท่ากับ 0.5 วัสดุของเสาเป็นไม้เนื้อแข็งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 13,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนของผิวของเท่ากับ 0.25 หน่วยแรงเส้นที่จุดครากเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร น้ำหนักกระทำที่ปลายเสาด้านเล็กเท่ากับ 60,000 กิโลกรัม และมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด แบบ Elastic-Perfectly plastic ดังภาพที่ ง.1



ภาพที่ ง.1 ลักษณะเสาปลายสอบที่เป็นเสาดังตัวอย่างการวิเคราะห์ในช่วงไม่ยืดหยุ่น

Input File.inp

```
*HEADING
Ine.Tapered column support is hinge-roller(Taper is
r0.5L200)
**
*NODE
1 , -5.00 , 0
11 , 5.00 , 0
20001, -2.50 , 200
20011, 2.50 , 200
*NGEN,NSET=NBOTTOM
1, 11, 1
*NGEN,NSET=NTOP
20001, 20011, 1
*NGEN,NSET=NLOAD
20002, 20010, 1
```



```

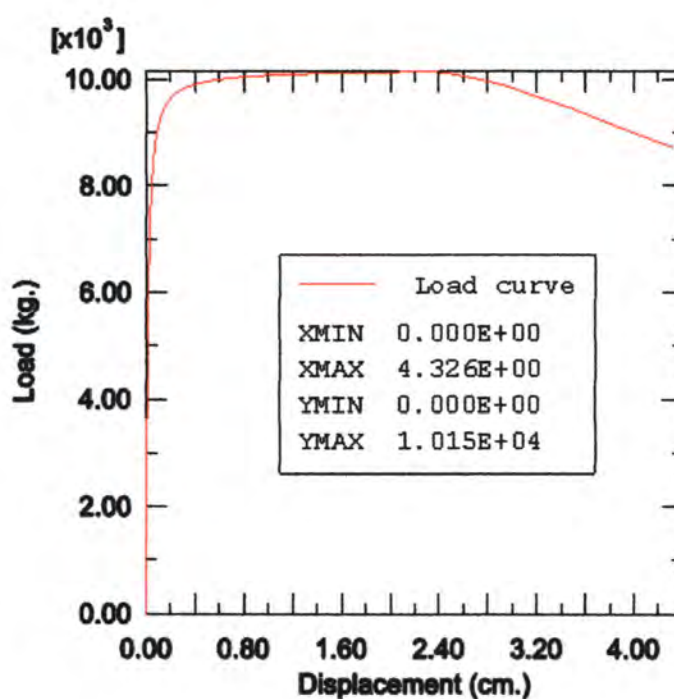
*NGEN,NSET=NCOL
1,20001,100
2,20002,100
3,20003,100
4,20004,100
5,20005,100
6,20006,100
7,20007,100
8,20008,100
9,20009,100
10,20010,100
11,20011,100
*NGEN,NSET=NDisp
6,20006, 100
*ELEMENT,TYPE=CPS4R
1,1,2,102,101
*ELGEN,ELSET=ECOL
1,10,1,1,200,100,100
*SOLID SECTION,ELSET=ECOL,MAT=WOOD
10.0
*MATERIAL,NAME=WOOD
*ELASTIC
1.36E5, 0.25
*PLASTIC
450,0
*ELEMENT,TYPE=B21
20001,1,2
*ELGEN,ELSET=EBEAM
20001,10,1,1
*BEAM SECTION,SECTION=REC,ELSET=EBEAM,MAT=MATBEAM
10.0,1.0
*MATERIAL,NAME=MATBEAM
*ELASTIC
1.36E10, 0.25
*BOUNDARY
6, 1,2
20006,1
*IMPERFECTION, FILE=IBT0.5L200, STEP=1
1, 1
*STEP,NLGEOM,INC=500
*STATIC,RIKS
0.01,,,0.01,
*CONTROLS, PARAMETERS=FIELD
,0.01,,
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
*CLOAD
NLOAD , 2, -6000
20001 , 2, -3000
20011 , 2, -3000
*NODE PRINT, NSET=NBOTTOM, TOTALS=YES
RF2
*NODE PRINT, NSET=NDisp
U1
***
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, OP=NEW
*OUTPUT, HISTORY, OP=NEW
*NODE OUTPUT, NSET=NBOTTOM
RF2

```

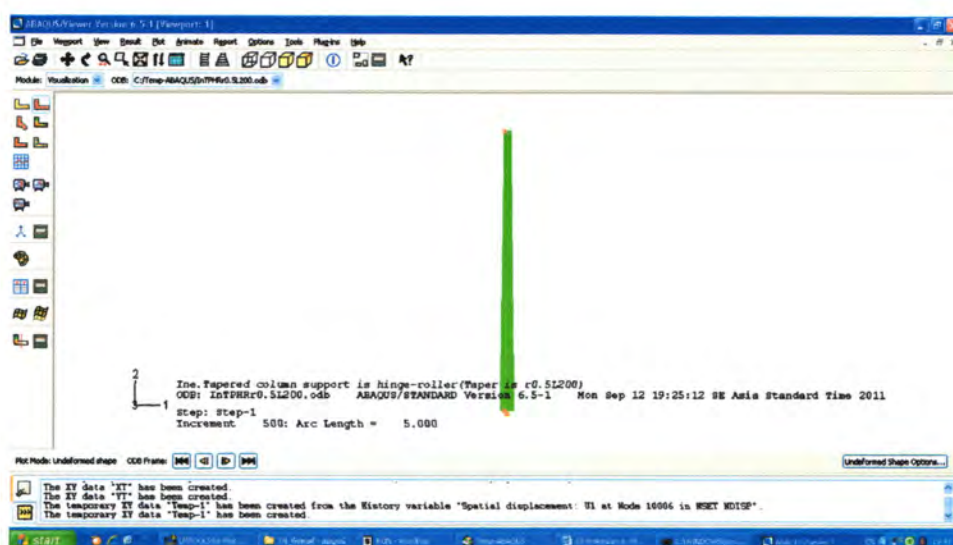
```
*NODE OUTPUT, NSET=NDISP
U1
*END STEP
```

เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปกราฟฟิก สามารถเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับการโก่งงอของเสาได้ดังภาพที่ ง.2 และ ภาพที่ ง.3, ง.4 แสดงลักษณะก่อนและหลังจากการรับน้ำหนัก

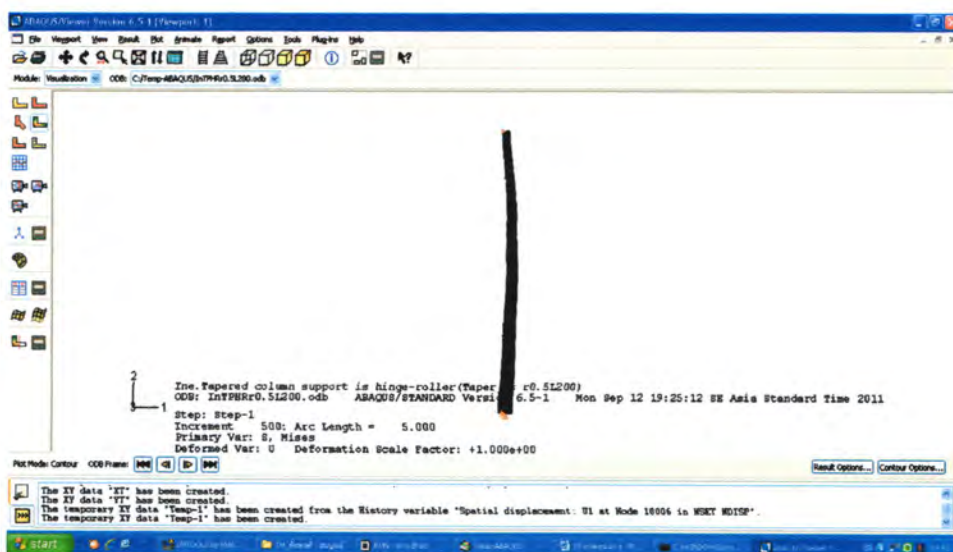
จากภาพที่ ง.2 จะได้ $P_{cr} = 10,150$ กิโลกรัม



ภาพที่ ง.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ



ภาพที่ ง.3 ลักษณะเสาปลายสอบก่อนทำการวิเคราะห์



ภาพที่ ง.4 ลักษณะเสาปลายสอบหลังทำการวิเคราะห์

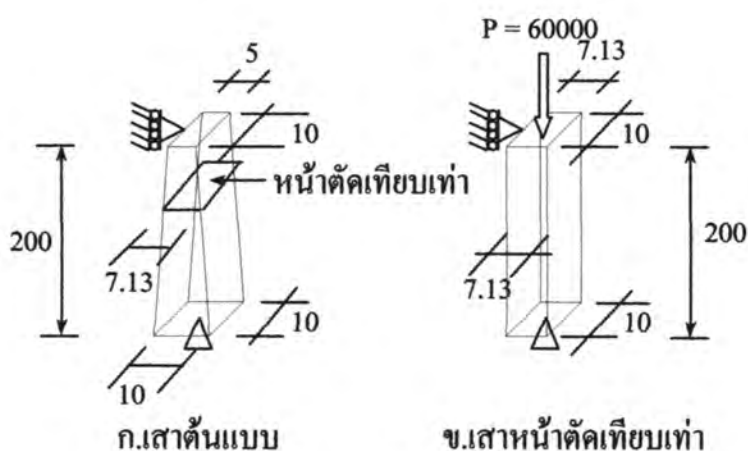
ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาคำนวณวิกฤตในช่วงไมยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า

เสาต้นแบบเป็นเสาปลายสอบที่มีอัตราส่วนที่ปลาย 0.5 จุดยึดครึ่งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง ปลายด้านใหญ่มีความลึกเท่ากับ 10 ซม. ความกว้างของเสาตรงที่ตลอดความยาวเสาเท่ากับ 10 ซม. Element จำลองรูปแบบเสา คือ Solid Element 2D ชนิด Plan Stress 4 Node ชื่อ CPS4R ขนาด 1.0x1.0 ซม. ความยาวเสา 200 ซม. วัสดุของเสาเป็นไม้เนื้อแข็งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 13,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.25 หน่วยแรงเค้นที่จุดครากเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด แบบ Elastic-Perfectly plastic

กรณีจุดยึดครึ่งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง และอัตราส่วนที่ปลาย 0.5 จะได้ขนาดของหน้าตัดเทียบเท่าเท่ากับ 7.13 ซม. สามารถจำลองรูปแบบเสาหน้าตัดเทียบเท่าได้ดังภาพที่ จ.1 โดยกำหนดให้มีการ โกงงอเริ่มแรกเท่ากับ $L/10,000$ น้ำหนักกระทำเท่ากับ 60,000 กิโลกรัม



ภาพที่ จ.1 ลักษณะทางกายภาพของเสาหน้าตัดเทียบเท่า

Input file.inp

*HEADING

Ine.equivalent section column support is hinge-
roller(Tapered column is r0.5L200)

**

*NODE

1 , -3.56 , 0

11 , 3.56 , 0

20001, -3.56 , 200

20011, 3.56 , 200

*NGEN,NSET=NBOTTOM

1, 11, 1

```

*NGEN,NSET=NTOP
20001, 20011, 1
*NGEN,NSET=NLOAD
20002, 20010, 1
*NGEN,NSET=NCOL
1, 20001, 100
2, 20002, 100
3, 20003, 100
4, 20004, 100
5, 20005, 100
6, 20006, 100
7, 20007, 100
8, 20008, 100
9, 20009, 100
10, 20010, 100
11, 20011, 100
*NGEN,NSET=NDisp
6, 20006, 100
*ELEMENT,TYPE=CPS4R
1,1,2,102,101
*ELGEN,ELSET=ECOL
1,10,1,1,200,100,100
*SOLID SECTION,ELSET=ECOL,MAT=WOOD
10.0
*MATERIAL,NAME=WOOD
*ELASTIC
1.36E5, 0.25
*PLASTIC
450,0
*ELEMENT,TYPE=B21
20001,1,2
*ELGEN,ELSET=EBEAM
20001,10,1,1
*BEAM SECTION,SECTION=REC,ELSET=EBEAM,MAT=MATBEAM
10.0,1.0
*MATERIAL,NAME=MATBEAM
*ELASTIC
1.36E10, 0.25
*BOUNDARY
6, 1,2
20006,1
*IMPERFECTION, FILE=IBT0.5L200, STEP=1
1, 1
*STEP,NLGEOM,INC=500
*STATIC,RIKS
0.01,,0.01,
*CONTROLS, PARAMETERS=FIELD
,0.01,,
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
*CLOAD
NLOAD , 2, -6000
20001 , 2, -3000
20011 , 2, -3000
*NODE PRINT, NSET=NBOTTOM, TOTALS=YES
RF2
*NODE PRINT, NSET=NDisp
U1
***

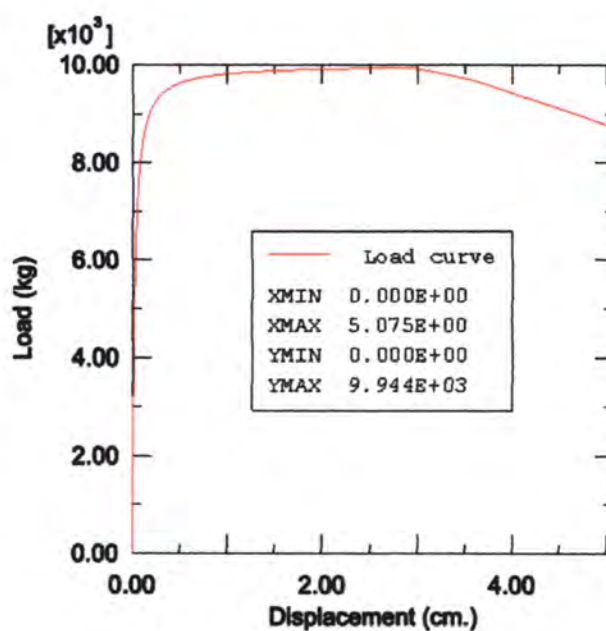
```

```

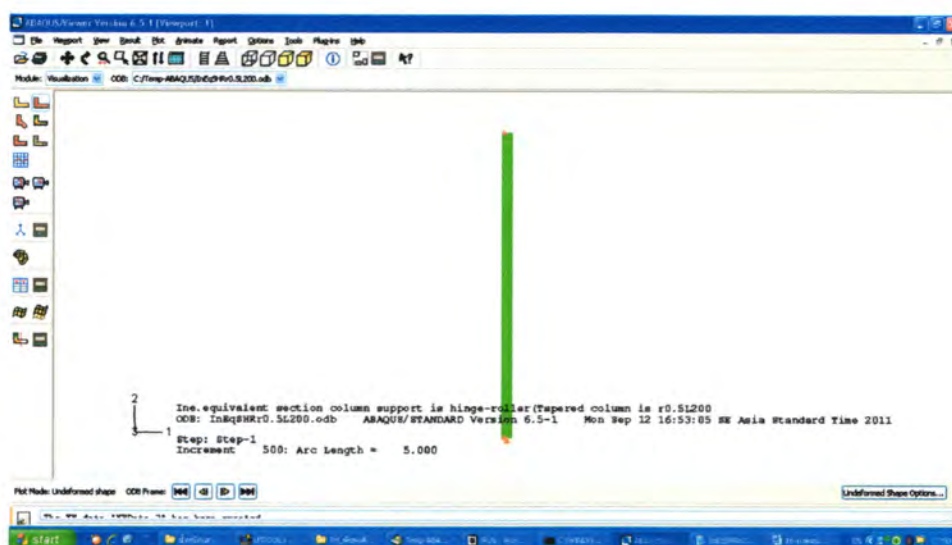
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, OP=NEW
*OUTPUT, HISTORY, OP=NEW
*NODE OUTPUT, NSET=NBOTTOM
RF2
*NODE OUTPUT, NSET=NDisp
U1
*END STEP

```

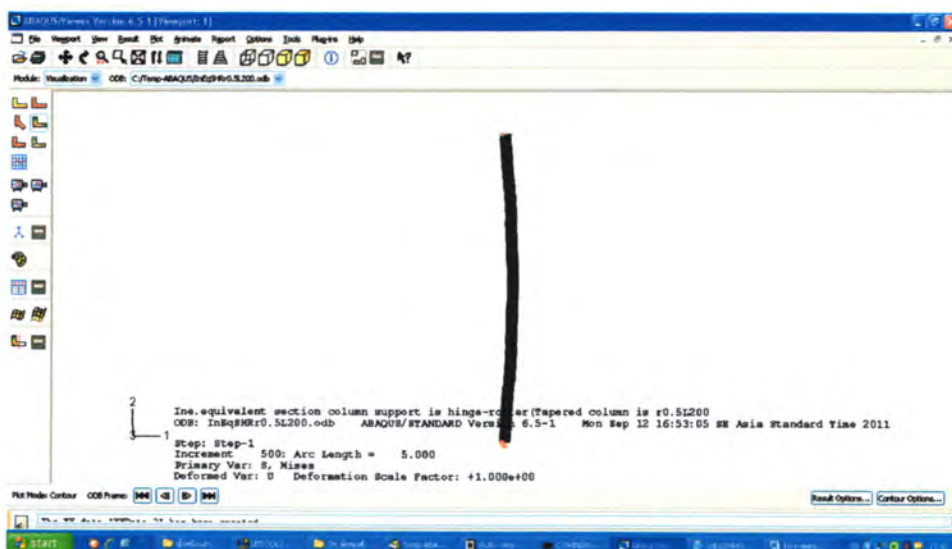
เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปกราฟฟิค สามารถเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับการโก่งของเสาได้ดังภาพที่ จ.2 ซึ่งน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำหนักตัดเทียบเท่าเท่ากับ 9,944 กิโลกรัม และภาพที่ จ.3, จ.4 แสดงลักษณะก่อนและหลังจากการวิเคราะห์



ภาพที่ จ.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาน้ำหนักตัดเทียบเท่า



ภาพที่ จ.3 ลักษณะเสาหน้าตัดเทียบเท่าก่อนทำการวิเคราะห์



ภาพที่ จ.4 ลักษณะเสาหน้าตัดเทียบเท่าหลังทำการวิเคราะห์

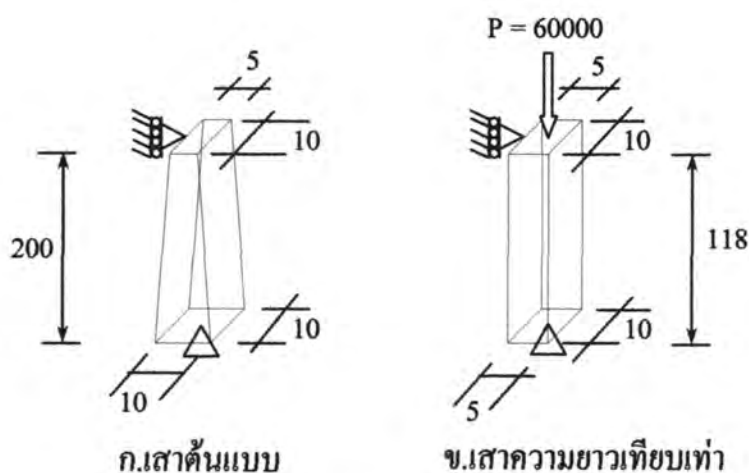
ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า

ตัวอย่างการวิเคราะห์น้ำหนักวิกฤตในช่วงไมยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า

เสาดัดแบบเป็นเสาปลายสอบที่มีอัตราส่วนที่ปลาย 0.5 จุดยึดครึ่งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง ปลายด้านใหญ่มีความลึกเท่ากับ 10 ซม. ความกว้างของเสาตรงที่ตลอดความยาวเสาท่เท่ากับ 10 ซม. Element จำลองรูปแบบเสาคือ Solid Element 2D ชนิด Plan Stress 4 Node ชื่อ CPS4R ขนาด 1.0×1.0 ซม. ความยาวเสา 200 ซม. วัสดุของเสาเป็นไม้เนื้อแข็งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 13,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.25 หน่วยแรงคั้นที่จุดครากเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด แบบ Elastic-Perfectly plastic

กรณีจุดยึดครึ่งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง และอัตราส่วนที่ปลาย 0.5 ที่ความยาวเสาดัดแบบ 200 ซม. จะได้ความยาวเทียบเท่าเท่ากับ 118.00 ซม. สามารถจำลองรูปแบบเสาความยาวเทียบเท่าได้ ดังภาพที่ ฉ.1 โดยกำหนดให้มีการโก่งงอเริ่มแรกเท่ากับ $L/10,000$ น้ำหนักกระทำเท่ากับ 60,000 กิโลกรัม



ภาพที่ ฉ.1 ลักษณะทางกายภาพของเสาความยาวเทียบเท่า

Input file.inp

```
*HEADING
Ine.equivalent section column support is hinge-
roller(Tapered column is r0.5L200)
**
*NODE
1 , -2.50 , 0
11 , 2.50 , 0
20001, -2.50 , 118
20011, 2.50 , 118
*NGEN,NSET=NBOTTOM
1, 11, 1
```

```

*NGEN,NSET=NTOP
20001, 20011, 1
*NGEN,NSET=NLOAD
20002, 20010, 1
*NGEN,NSET=NCOL
1,20001,100
2,20002,100
3,20003,100
4,20004,100
5,20005,100
6,20006,100
7,20007,100
8,20008,100
9,20009,100
10,20010,100
11,20011,100
*NGEN,NSET=NDisp
6,20006, 100
*ELEMENT,TYPE=CPS4R
1,1,2,102,101
*ELGEN,ELSET=ECOL
1,10,1,1,200,100,100
*SOLID SECTION,ELSET=ECOL,MAT=WOOD
10.0
*MATERIAL,NAME=WOOD
*ELASTIC
1.36E5, 0.25
*PLASTIC
450,0
*ELEMENT,TYPE=B21
20001,1,2
*ELGEN,ELSET=EBEAM
20001,10,1,1
*BEAM SECTION,SECTION=REC,ELSET=EBEAM,MAT=MATBEAM
10.0,1.0
*MATERIAL,NAME=MATBEAM
*ELASTIC
1.36E10, 0.25
*BOUNDARY
6, 1,2
20006,1
*IMPERFECTION, FILE=IBT0.5L200, STEP=1
1, 1
*STEP,NLGEOM,INC=500
*STATIC,RIKS
0.01,,,0.01,
*CONTROLS, PARAMETERS=FIELD
,0.01,,
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
*CLOAD
NLOAD , 2, -6000
20001 , 2, -3000
20011 , 2, -3000
*NODE PRINT, NSET=NBOTTOM, TOTALS=YES
RF2
*NODE PRINT, NSET=NDisp
U1
***

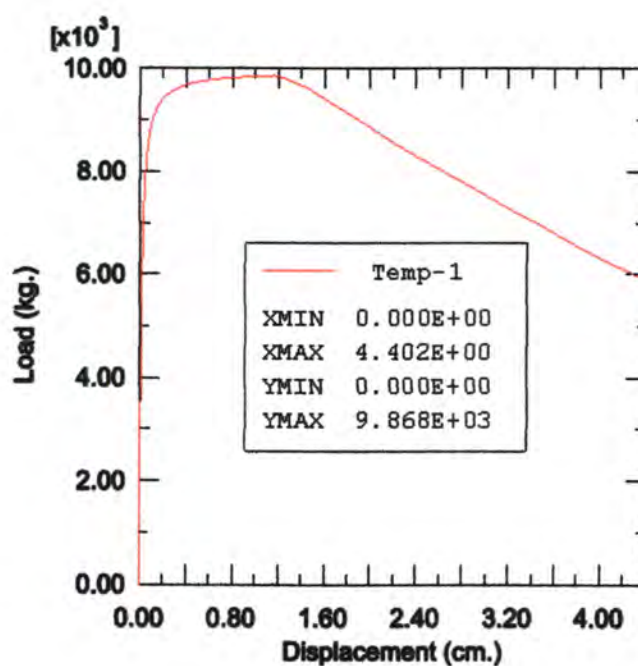
```

```

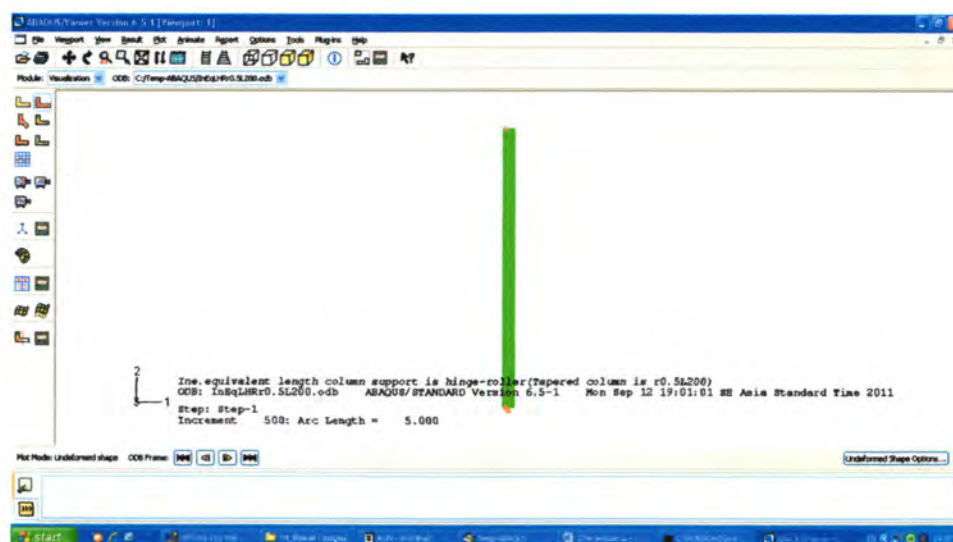
*OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT, OP=NEW
*OUTPUT, HISTORY, OP=NEW
*NODE OUTPUT, NSET=NBOTTOM
RF2
*NODE OUTPUT, NSET=NDisp
U1
*END STEP

```

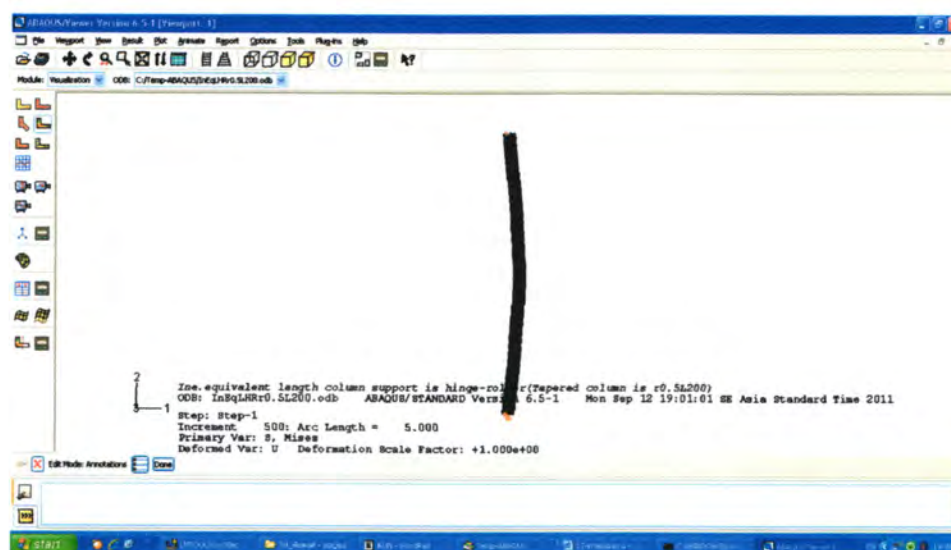
เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปกราฟฟิก สามารถเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับการโก่งงอของเสาได้ดังภาพที่ ๓.2 ซึ่งน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าเท่ากับ 9,868 กิโลกรัม และภาพที่ ๓.3, ๓.4 แสดงลักษณะก่อนและหลังจากการรับน้ำหนัก



ภาพที่ ๓.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า



ภาพที่ ๓.3 ลักษณะเสาความยาวเทียบเท่าก่อนทำการวิเคราะห์



ภาพที่ ๓.4 ลักษณะเสาความยาวเทียบเท่าหลังทำการวิเคราะห์

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์หาค่าพหุคูณในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสปลายสอบ

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้อัดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง
(Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาว L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	14254	19013	23310	27831	32490	36814	41163
60	14151	18708	23249	27730	32215	36556	40883
80	14024	18526	23153	27605	32161	36543	40815
100	13968	18275	23150	27568	32019	36430	40799
120	13200	17880	22680	27442	31914	36349	40750
140	10278	15031	20150	25852	31338	36198	40432
160	7908	11592	15650	20238	25113	30254	35460
180	6263	9185	12463	16076	20005	24225	28701
200	5080	7452	10150	13046	16256	20282	23392
220	4197	6165	8369	10803	13458	16326	19398
240	3526	5184	7038	9086	11320	13736	16327
260	3004	4420	6000	7747	9653	11715	13928
280	2596	3813	5177	6683	8328	10108	12018
300	2264	3323	4512	5825	7259	8810	10475
320	1990	2919	3967	5121	6382	7746	9211
340	1763	2590	3515	4538	5656	6864	8162
360	1574	2311	3137	4049	5046	6125	7283
380	1413	2075	2816	3636	4531	5499	6539
400	1267	1873	2543	3244	4090	4964	5903

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-
ยึดหลวมด้านเล็ก(Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-
Plastic

ความยาว <i>L</i> (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	<i>r</i> = 0.3	<i>r</i> = 0.4	<i>r</i> = 0.5	<i>r</i> = 0.6	<i>r</i> = 0.7	<i>r</i> = 0.8	<i>r</i> = 0.9
40	14110	19204	23457	27788	32373	36594	41016
60	14053	19197	23293	27691	32171	36510	40885
80	13997	18796	23289	27574	32138	36463	40813
100	13995	18693	23251	27512	31963	36293	40781
120	13818	18448	23146	27508	31823	36268	40750
140	13741	18346	23074	27442	31814	36261	40749
160	13378	18338	22952	27313	31773	36253	40725
180	12275	17873	22643	27143	31748	36248	40688
200	10050	14841	20126	25704	31156	36052	40316
220	8340	12344	16820	21711	26920	32322	37516
240	7023	10404	14196	18366	22879	27691	32720
260	5992	8880	12123	15697	19581	23755	28185
280	5172	7665	10468	13559	16925	20549	24419
300	4500	6683	9127	11826	14765	17935	21324
320	3965	5877	8028	10400	12991	15783	18771
340	3514	5209	7115	9220	11515	13993	16654
360	3135	4648	6349	8228	10277	12489	14859
380	2815	4173	5945	7388	9228	11216	13344
400	2541	3767	5146	6670	8331	10126	12048

ตารางที่ ข.3 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก(Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาว L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	14466	19063	23600	28023	32561	36783	40998
60	14309	18897	23431	27878	32168	36716	41003
80	13958	17956	22653	26485	31084	34888	38239
100	9924	12295	14965	17573	20133	22649	25108
120	6887	8550	10405	12218	13997	15752	17478
140	5025	6287	7650	8981	10289	11579	12850
160	3741	4817	5860	6879	7880	8868	9842
180	2958	3808	4633	5438	6229	7009	7780
200	2398	3087	3755	4407	5048	5680	6303
220	1983	2552	3105	3642	4173	4696	5211
240	1673	2147	2610	3062	3507	3947	4380
260	1423	1824	2224	2609	2989	3363	3734
280	1228	1580	1913	2251	2578	2901	3220
300	1071	1375	1666	1959	2246	2527	2805
320	942	1212	1465	1726	1978	2225	2466
340	836	1075	1298	1532	1754	1972	2185
360	746	954	1158	1333	1565	1752	1950
380	671	851	1038	1229	1406	1575	1750
400	606	771	939	1095	1270	1422	1581

ตารางที่ ข.4 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง
(Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาว L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	14178	18702	23354	27885	32313	36678	41034
60	14102	18610	23250	27797	32118	36543	40902
80	14022	18546	23231	27878	32051	36449	40893
100	13969	18443	23112	27543	32032	36436	40877
120	13928	18471	22997	27498	32021	36444	40852
140	13831	18456	22909	27466	31909	36448	40815
160	13914	18423	23049	27394	31876	36415	40795
180	13823	18420	23001	27347	31842	36367	40755
200	13642	18168	22956	27252	31735	36225	40744
220	13174	17942	22660	27120	31662	36082	40561
240	12425	17255	22104	26735	31428	35832	40309
260	11120	16159	21259	26173	30899	35527	40063
280	9770	14416	19469	24700	29847	34776	39515
300	8584	12730	17343	22332	27577	32900	38104
320	7581	11264	15389	19911	24781	29935	35410
340	6737	10017	13703	17761	22163	26879	31872
360	6022	8958	12261	15905	19869	24135	28682
380	5414	8054	11028	14311	17887	21742	25863
400	4892	7279	9967	12938	16175	19668	23406

ตารางที่ ข.5 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-
ปลายเล็กเคลื่อนตามราง(Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic
Perfectly-Plastic

ความยาว <i>L</i> (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	<i>r</i> = 0.3	<i>r</i> = 0.4	<i>r</i> = 0.5	<i>r</i> = 0.6	<i>r</i> = 0.7	<i>r</i> = 0.8	<i>r</i> = 0.9
40	14226	18623	23012	27464	31902	36362	40780
60	14108	18591	22940	27422	31855	36318	40754
80	13855	18327	22904	27380	31810	36284	40715
100	13760	18133	22820	27320	31793	36240	40657
120	13300	17902	22478	27031	31554	36044	40506
140	11174	15679	20543	25583	30084	35370	40018
160	8700	12279	16261	20648	25429	30575	36014
180	6907	9752	12925	16433	20283	24477	29016
200	5607	7916	10493	13343	16474	19889	23591
220	4640	6550	8681	11040	13632	16458	19524
240	3902	5508	7300	9283	11462	13839	16417
260	3326	4695	6223	7913	9770	11797	13994
280	2870	4050	5368	6825	8427	10174	12069
300	2500	3529	4677	5947	7343	8865	10516
320	2198	3103	4112	5228	6455	7793	9244
340	1948	2749	3643	4632	5719	6904	8190
360	1738	2453	3250	4132	5098	6159	7306
380	1560	2202	2971	3710	4580	5529	6558
400	1408	1987	2633	3348	4134	4990	5920

ตารางที่ ข.6 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ

$$\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$$

ความยาว	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ						
	(กิโลกรัม)						
L(ซม.)	r=0.3	r=0.4	r=0.5	R=0.6	r=0.7	r=0.8	r=0.9
40	14664	19355	23746	28358	33420	33420	41216
60	13734	18017	22082	25927	29870	29870	36080
80	11258	14929	18445	21797	24989	24989	30925
100	9119	12336	15464	18473	21349	21349	26729
120	7355	10081	12881	15523	18278	18278	22860
140	6043	8256	10624	13091	15533	15533	20219
160	5069	6929	8854	10913	13111	13111	17461
180	4347	5928	7571	9268	11051	11051	15002
200	3832	5189	6588	8056	9572	9572	12853
220	3445	4678	5875	7112	8435	8435	11219
240	3114	4288	5409	6466	7544	7544	9994
260	2794	4096	5036	6065	7006	7006	8999
280	2475	3559	4664	5715	6674	6674	8286
300	2183	3171	4235	5314	6336	6336	8045
320	1933	2819	3792	4825	5874	5874	7751
340	1721	2538	3395	4344	5341	5341	7308
360	1540	2254	3048	3912	4834	4834	6755
380	1386	2030	2748	3533	4378	4378	6189
400	1254	1836	2488	3198	3974	3974	5648

ตารางที่ ข.7 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-
ยึดหลวมด้านเล็ก (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood
ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาว <i>L</i> (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	<i>r</i> = 0.3	<i>r</i> = 0.4	<i>r</i> = 0.5	<i>r</i> = 0.6	<i>r</i> = 0.7	<i>r</i> = 0.8	<i>r</i> = 0.9
40	14667	19475	24063	28606	33049	37366	41609
60	14287	19019	23617	28128	32546	36699	40761
80	13825	18301	22577	26600	30369	33895	37182
100	12169	16239	20116	23774	27219	30461	33523
120	10499	14158	17695	21060	24236	27249	30100
140	9135	12363	15614	18736	21713	24524	27198
160	7998	10769	13758	16674	19469	22140	24667
180	7015	9455	12064	14789	17439	20100	22403
200	6134	8361	10591	13059	15547	17971	20299
220	5365	7402	9424	11512	13816	16104	18339
240	4769	6539	8422	10276	12260	14395	16507
260	4267	5880	7513	9251	10968	12859	14840
280	3836	5353	6791	8333	9933	11541	13332
300	3500	4895	6243	7575	9019	10500	12019
320	3253	4493	5794	6988	8260	9608	10987
340	3045	4206	5390	6560	7648	8862	10133
360	2844	3976	5077	6188	7222	8238	9396
380	2634	3751	4810	5877	6899	7805	8770
400	2419	3505	4602	5643	6617	7543	8322

ตารางที่ ข.8 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไมยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-ปล่อยอิสระด้านเล็ก (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาว <i>L</i> (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	<i>r</i> = 0.3	<i>r</i> = 0.4	<i>r</i> = 0.5	<i>r</i> = 0.6	<i>r</i> = 0.7	<i>r</i> = 0.8	<i>r</i> = 0.9
40	14626	18987	23600	25696	28196	30393	32348
60	11350	14263	23431	19091	21095	22875	24475
80	8241	10258	22653	13987	15641	17165	18570
100	6198	7656	14965	10245	11427	12623	13792
120	4921	6225	10405	7999	8897	10100	10565
140	4077	5146	7650	6915	7605	8163	8666
160	3433	4402	5860	6159	6938	7640	8255
180	2863	3696	4633	5277	6028	6744	7399
200	2354	3037	3755	4336	4960	5568	6154
220	1956	2521	3105	3599	4120	4630	5128
240	1648	2123	2610	3031	3472	3903	4326
260	1406	1811	2224	2587	2962	3331	3694
280	1214	1563	1913	2233	2557	2876	3190
300	1130	1363	1666	1946	2229	2507	2782
320	990	1198	1465	1711	1960	2205	2447
340	792	1100	1298	1517	1737	1954	2169
360	708	950	1158	1353	1550	1744	1935
380	637	850	1038	1215	1392	1566	1738
400	577	768	939	1093	1256	1417	1569

ตารางที่ ข.9 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม้ยึดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ

$$\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$$

ความยาว <i>L</i> (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยึดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	<i>r</i> = 0.3	<i>r</i> = 0.4	<i>r</i> = 0.5	<i>r</i> = 0.6	<i>r</i> = 0.7	<i>r</i> = 0.8	<i>r</i> = 0.9
40	14583	19289	23895	28499	32881	37308	41573
60	14319	18916	23647	28080	32635	37022	41524
80	14226	18811	23515	27964	32439	36552	41088
100	13998	18528	22952	27296	31302	35106	38672
120	12825	17357	21498	25440	29177	32722	36060
140	11964	16012	19896	23577	27057	30348	33472
160	10843	14629	18274	21736	24996	28080	31001
180	9781	13279	16707	19978	23078	26003	28773
200	8855	12024	15261	18369	21329	24137	26792
220	8040	10875	13925	16896	19734	22432	24991
240	7312	9889	12683	15510	18239	20846	23315
260	6640	9039	11530	14214	16833	19358	21778
280	6018	8279	10522	12997	15493	17943	20278
300	5506	7579	9674	11872	14249	16589	18869
320	5072	6927	8918	10894	13085	15326	17523
340	4686	6403	8222	10076	12016	14141	16243
360	4336	5968	7584	9346	11100	13041	15048
380	4025	5587	7068	8668	10327	12041	13939
400	3759	5240	6637	8078	9630	11200	12912

ตารางที่ ข.10 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาปลายสอบที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นด้านใหญ่-
เลื่อนตามรางด้านเล็ก (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg
Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาว <i>L</i> (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงยืดหยุ่นของเสาปลายสอบ (กิโลกรัม)						
	<i>r</i> = 0.3	<i>r</i> = 0.4	<i>r</i> = 0.5	<i>r</i> = 0.6	<i>r</i> = 0.7	<i>r</i> = 0.8	<i>r</i> = 0.9
40	14524	19220	23933	28367	32783	37062	41196
60	14108	18330	22323	26083	29637	33028	36277
80	12015	15678	19133	22393	25477	28417	31256
100	9796	12919	15886	18926	21742	24432	27055
120	8057	10572	13291	15978	18592	21130	23550
140	6788	8830	11004	13416	15832	18214	20515
160	5852	7535	9309	11214	13384	15564	17743
180	5098	6600	8042	9619	11307	13250	15250
200	4441	5861	7122	8406	9828	11337	13085
220	3828	5163	6426	7510	8679	9973	11339
240	3340	4538	5715	6852	7818	8893	10084
260	2935	4041	5168	6252	7218	8067	9066
280	2619	3614	4663	5752	6784	7685	8412
300	2357	3289	4276	5290	6315	7328	8195
320	2111	2966	3897	4889	5911	6928	7908
340	1898	2662	3514	4443	5435	6470	7512
360	1696	2392	3165	4013	4933	5919	6956
380	1529	2157	2896	3626	4467	5376	6349
400	1384	1953	2587	3287	4053	4884	5780

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้ง
สองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13507	17915	22521	27039	31536	35654	40567
60	13478	17980	22506	26999	31526	35535	40514
80	13422	17924	22439	26935	31423	35454	40338
100	13179	17781	21560	26884	31387	35330	40309
120	11710	17070	20040	26235	31194	34878	39975
140	8926	14044	17450	24423	30733	33144	38858
160	6883	10928	14820	19756	24560	28845	33571
180	5458	8676	12285	15772	19546	23120	27138
200	4424	7043	9868	12881	16328	19257	22297
220	3627	5828	8169	10548	13475	16118	18338
240	3077	4901	6871	8820	10880	13880	15345
260	2623	4179	6014	7660	9480	11523	13165
280	2263	3605	5210	6440	8139	9846	11360
300	1972	3142	4405	5729	7093	8590	9901
320	1734	2762	3873	5037	6237	7588	8706
340	1536	2448	3432	4464	5527	6613	7715
360	1371	2184	3062	3983	4932	5900	6884
380	1231	1961	2749	3576	4428	5298	6180
400	1108	1760	2482	3233	3997	4782	5592

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic
Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13526	18041	22554	27074	31580	36093	40618
60	13509	18018	22542	27039	31570	36047	40600
80	13480	17984	22496	26999	31523	36013	40577
100	13444	17920	22350	26895	31483	35948	40459
120	13387	17897	22230	26900	31432	35884	40388
140	13238	17789	22108	26809	31369	35798	40311
160	12653	17512	22070	26631	31210	35632	39988
180	10871	16435	21150	26146	31111	35228	39776
200	8954	14086	19365	24916	29578	34092	39459
220	7446	11801	16441	21325	25990	30871	35644
240	6270	9965	13938	18075	21983	26619	30962
260	5351	8513	12182	15481	18880	22873	26650
280	4618	7352	10300	13385	16561	19801	23085
300	4026	6410	8984	11679	14455	17287	20161
320	3540	5638	7904	10276	12720	15215	17747
340	3138	4997	7006	9110	11278	13491	15738
360	2800	4459	6252	8131	10066	12042	14049
380	2513	4004	5614	7301	9039	10814	12616
400	2270	3614	5068	6606	8162	9764	11431

ตารางที่ ข.3 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ(Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic
Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13495	17956	22485	27007	31417	36007	40522
60	13544	17858	22319	26776	31233	35690	40142
80	12712	16716	20679	24618	28563	32506	36445
100	8350	11449	14031	16619	19208	21800	24393
120	6125	7998	9786	11587	13390	15195	17001
140	4660	5875	7197	8522	9848	11175	12503
160	3510	4500	5507	6528	7540	8552	9571
180	2830	3557	4350	5153	5951	6755	7554
200	2285	2882	3529	4176	4819	5474	6122
220	1825	2383	2918	3449	3985	4552	5062
240	1550	2003	2451	2900	3351	3802	4251
260	1330	1701	2091	2465	2856	3240	3624
280	1143	1467	1801	2131	2465	2795	3126
300	996	1278	1570	1856	2148	2436	2722
320	875	1128	1381	1631	1886	2137	2393
340	776	999	1222	1446	1685	1894	2120
360	692	890	1091	1290	1495	1695	1926
380	622	799	973	1158	1345	1523	1540
400	561	722	937	1045	1218	1410	1405

ตารางที่ ข.4 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง(Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13535	18048	22545	27077	31591	36107	40364
60	13523	18038	22553	27063	31575	36084	40600
80	13504	17992	22524	27045	31552	36046	40577
100	13492	18002	22512	27015	31501	36087	40548
120	13463	17973	22488	26992	31487	36005	40512
140	13448	17910	22456	26955	31462	35930	40466
160	13405	17904	22423	26923	31461	35880	40414
180	13345	17869	22343	26744	31369	35865	40360
200	13207	17778	22293	26798	31297	35777	40282
220	12780	17594	22159	26681	31123	35678	40164
240	12008	17109	21805	26443	30970	35258	39971
260	10643	15864	21078	25868	30520	35055	39537
280	9345	14085	19373	24510	29401	34155	39326
300	8220	12396	17256	22213	27157	32448	37752
320	7225	10947	15291	19800	25134	29876	34886
340	6450	9723	13604	17651	22106	26632	31554
360	5725	8687	12188	15798	19534	23985	28450
380	5123	7805	10935	14209	17578	21698	25552
400	4540	7050	9880	12841	15676	19660	23106

ตารางที่ ข.5 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ
 Elastic Perfectly-Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในไม่ช่วงยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13519	18027	22533	27027	31564	36077	40589
60	13482	17993	22508	27003	31437	36029	40538
80	13439	17947	22528	26946	31449	35949	40446
100	13313	17862	22375	26871	31376	35862	40354
120	11965	17372	22092	26663	31163	35668	40193
140	9018	14266	19715	24997	29959	33430	39374
160	6930	11023	15426	20012	24812	29453	34212
180	5482	8730	12234	15900	19675	23523	27425
200	4681	6924	9923	12903	15973	19107	22287
220	3661	5852	8206	10672	13205	15809	18444
240	3087	4918	6898	8972	11109	13292	15508
260	2631	4192	5879	7647	9469	11330	13219
280	2267	3615	5070	6595	8166	9772	11276
300	1977	3150	4417	5746	7115	8514	9934
320	1738	2769	3883	5051	6546	7455	8732
340	1539	2553	3440	4475	5535	6649	7736
360	1373	2188	3069	3992	4943	5915	6901
380	1232	1964	2755	3583	4437	5310	6195
400	1113	1773	2487	3235	4050	4825	5592

ตารางที่ ข.6 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไมยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้ง
สองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูป
สมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไมยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	11395	17915	21250	25899	30365	35654	39693
60	9958	17980	18108	22095	27760	35535	34276
80	8247	17924	15184	18705	23670	35454	29336
100	6888	17781	12786	15883	19882	35330	25360
120	5707	17070	10988	13837	17170	34878	22048
140	4689	14044	9355	11852	14880	33144	19195
160	3847	10928	7884	10079	12432	28845	16539
180	3277	8676	6558	8551	10833	23120	14204
200	2854	7043	5771	7754	9110	19257	12371
220	2519	5828	5087	6882	8134	16118	10616
240	2408	4901	4776	6210	7335	13880	9457
260	2337	4179	4355	5864	6788	11523	8517
280	2109	3605	4160	5445	6448	9846	7870
300	1879	3142	3913	5006	6015	8590	7667
320	1672	2762	3588	4558	5642	7588	7367
340	1492	2448	3253	4172	5095	6613	6930
360	1338	2184	2940	3791	4655	5900	6396
380	1205	1961	2659	3441	4237	5298	5856
400	1092	1760	2414	3100	3858	4782	5492

ตารางที่ ข.7 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg
 Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13445	18121	22140	27359	31897	36482	41110
60	11948	16471	20896	25520	30556	34553	39084
80	10410	14568	18686	22901	28433	31262	35448
100	9063	12950	16523	20136	25839	28024	31835
120	7979	11351	14760	18183	23349	25097	28559
140	7039	10107	13213	16361	21182	22651	25822
160	6185	9018	11766	14728	19134	20493	22879
180	5408	8000	10588	13273	16987	18588	21242
200	4712	7067	9524	12009	15338	16784	19490
220	3995	6229	8400	10636	13233	15121	17374
240	3603	5484	7463	9490	11874	13572	15633
260	3279	4865	6632	8452	10229	12176	14055
280	2937	4405	5954	7547	9218	10913	12621
300	2696	4021	5436	6867	8339	9835	11356
320	2603	3701	4998	6303	7650	9015	10392
340	2537	3503	4662	5821	7062	8319	9587
360	2436	3435	4410	5422	6559	7719	8891
380	2292	3338	4262	5232	6173	7220	8300
400	2139	3197	4210	5242	6063	6979.7	8210

ตารางที่ ข.8 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain แบบ Ramberg
 Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	10457	13806	17153	20497	23840	27184	30527
60	8009	10542	13073	15601	18128	20656	23185
80	6201	8123	10044	11964	13883	15802	17721
100	4716	6140	7561	8984	11160	11833	13259
120	3584	4667	5753	6842	8788	9021	10112
140	3006	3807	4698	5591	6946	7381	8277
160	2638	3502	4364	5226	6087	6948	7808
180	2487	3258	4024	4789	5554	6317	7080
200	2150	2783	3416	4051	4685	5320	5955
220	1808	2334	2861	3389	3918	4448	4977
240	1530	1973	2416	2863	3310	3756	4203
260	1285	1686	2066	2338	2828	3209	3591
280	1130	1457	1785	2114	2443	2772	3102
300	986	1271	1557	1844	2131	2418	2705
320	868	1118	1370	1622	1874	2127	2380
340	769	991	1214	1438	1662	1886	2110
360	687	885	1084	1283	1483	1683	1883
380	617	794	1084	1152	1332	1511	1704
400	557	717	879	1040	1202	1364	1553

ตารางที่ ข.9 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	13698	18278	22856	27433	32007	36583	41160
60	13284	17977	22670	27239	31821	36404	40981
80	12175	16761	21312	25878	30449	35033	39577
100	11051	15370	19703	23999	28371	31988	36986
120	9987	14033	18095	22149	26209	29870	34379
140	9058	12790	16570	20363	24197	28112	31831
160	8269	11723	15224	18759	22454	25852	29417
180	7551	10796	14071	17349	20654	23973	27291
200	6844	9937	13006	16102	19210	22322	25435
220	6174	9162	12037	14938	17809	20783	23710
240	5733	8417	11144	13880	16618	19358	22113
260	5196	7722	10280	12857	15456	18052	20652
280	4709	7065	9470	11892	14335	16770	19234
300	4263	6457	8697	10978	13273	15572	17879
320	3862	5895	7993	10122	12200	14282	16605
340	3542	5382	7331	9321	11333	13384	15380
360	3281	4934	6731	8585	10435	12362	14255
380	3055	4585	6198	7906	9666	11425	13212
400	2860	4283	5780	7325	8755	10988	12229

ตารางที่ ข.10 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ
 Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาความยาวเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	12269	16865	21484	26050	30692	35241	39778
60	10055	14119	18264	22281	26435	30523	34606
80	8349	11831	15347	18911	22452	26064	29670
100	6983	10036	13138	16243	19414	22524	25628
120	5797	8513	11268	14024	16767	19561	22342
140	4766	7155	9582	12044	14490	16994	19457
160	3910	5980	8092	10250	12496	14612	16811
180	3317	4983	6823	8709	10608	12514	14441
200	2869	4298	5805	7387	9033	10708	12388
220	2610	3980	5111	6470	8077	9261	10685
240	2594	3766	4666	5773	7000	8246	9524
260	2465	3472	4174	5332	6340	7441	8563
280	2185	3305	4309	5251	6171	7002	8150
300	1930	3021	4079	5084	6037	6965	7882
320	1708	2694	3740	4749	5224	6508	7658
340	1518	2405	3349	4318	5086	6276	7324
360	1357	2155	3009	3896	4801	5715	6650
380	1220	1939	2712	3518	4344	5183	6031
400	1104	1753	2454	3186	4022	4758	5480

ภาคผนวก ฉ

ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า

ตารางที่ ๗.1 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรับแบบยึดหมุนทั้ง
สองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic-Perfectly Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	25904	29067	32051	34943	31536	40275	42714
60	25865	28990	31989	34891	31526	40227	42660
80	25278	28738	31826	34770	31423	40130	42594
100	20516	26968	31170	34296	31387	39908	42460
120	14533	20334	26655	32424	31194	39415	42076
140	10585	15086	20103	25792	30733	36927	40794
160	7982	11587	15826	19980	24560	30154	35407
180	6248	9169	12261	15848	19546	24108	28263
200	4992	7434	9944	12861	16328	20105	23219
220	4154	6148	8226	10641	13475	16240	18283
240	3510	5169	6916	9036	10880	13560	15196
260	2992	4406	5896	7700	9480	11668	13106
280	2586	3801	5086	6640	8139	10053	11330
300	2245	3312	4433	5815	7093	8762	9956
320	1963	2912	3897	5123	6237	7704	8780
340	1755	2581	3453	4512	5527	6827	8038
360	1554	2303	3081	4030	4932	6092	7015
380	1398	2068	2766	3588	4428	5469	6278
400	1250	1867	2497	3238	3997	4937	5681

ตารางที่ ๗.2 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดแบบปลายใหญ่
ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic-
Perfectly Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	25950	29114	32102	34918	37710	40331	42722
60	25908	29068	32051	34830	37668	40295	42690
80	25801	28979	31977	34758	37595	40240	42686
100	25614	28864	31891	34718	37541	40160	42614
120	24932	28598	31729	34560	37442	40089	42542
140	21303	27407	31281	34214	37283	39962	42435
160	16670	23133	29334	33108	36874	39724	42266
180	13006	18584	24586	30114	35617	39091	41901
200	10015	14786	20164	25872	31710	36982	40817
220	8280	12274	16741	21586	26812	32369	37596
240	7020	10365	14099	18211	22696	27611	32652
260	5990	8826	12030	15550	19405	23665	28121
280	5096	7625	10382	13426	16764	20466	24335
300	4488	6634	9050	11706	14622	17859	21263
320	3925	5834	7958	10295	12862	15715	18718
340	3488	5170	7052	9124	11401	13932	16599
360	3099	4621	6292	8142	10174	12435	14817
380	2789	4140	5649	7310	9135	11166	13307
400	2532	3738	5099	6599	8247	10081	12015

ตารางที่ ๗.3 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดแบบปลายใหญ่
ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic-
Perfectly Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	31972	34259	36654	38538	41123	42064	43432
60	27409	32032	35188	37684	39705	41522	43127
80	15833	19360	23011	26858	30875	34455	37852
100	9838	12274	14795	17323	19854	22470	24991
120	6804	8480	10284	12045	13811	15639	17405
140	4975	6227	7559	8854	10153	11499	12799
160	3692	4780	5860	6782	7776	8807	9803
180	2921	3774	4576	5360	6131	6961	7749
200	2375	3065	3708	4343	5023	5640	6278
220	1963	2525	3066	3591	4154	4663	5190
240	1658	2126	2577	3018	3461	3919	4363
260	1408	1806	2197	2573	2950	3341	3718
280	1217	1567	1895	2219	2545	2882	3207
300	1061	1364	1652	1934	2218	2511	2795
320	933	1200	1453	1701	1950	2208	2457
340	828	1063	1287	1507	1725	1957	2178
360	740	947	1149	1327	1542	1746	1943
380	665	845	1032	1208	1385	1568	1745
400	602	764	932	1091	1251	1416	1576

ตารางที่ ๗.4 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Elastic-Perfectly Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	24038	27057	30069	33080	36098	39109	42119
60	24007	27030	30045	33053	36078	39088	42097
80	23964	26992	29990	33027	36050	39040	42062
100	23900	26936	29961	32970	36010	39014	42024
120	23803	26869	29882	32932	35967	38906	41999
140	23585	26751	29776	32868	35911	38934	41943
160	22808	26500	29692	32779	35843	38875	41902
180	19981	25663	29400	32626	35729	38796	41826
200	16519	22939	28512	32293	35563	38684	41751
220	13737	19403	25873	31356	35193	38474	41624
240	11575	16423	22300	28800	34218	38068	41386
260	9878	14037	19158	25220	31731	37057	40944
280	8526	12127	16581	21946	28169	34642	39909
300	7432	10576	14475	19199	24792	31112	37551
320	6536	9303	12739	16914	21893	27651	34052
340	5792	8245	11294	15005	19445	24623	30535
360	5168	7358	10081	13398	17374	22028	27393
380	4638	6606	9052	12034	15611	19087	24665
400	4185	5964	8173	10866	14100	17898	22036

ตารางที่ ๗.5 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ
 Elastic-Perfectly Plastic

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	26639	29632	32529	35246	36240	40401	42844
60	26598	29530	32442	35174	36154	40311	42772
80	26125	29399	32509	35074	36072	40306	42775
100	22512	28407	31991	34892	35921	40137	42569
120	15891	21711	28201	33549	35006	39866	42431
140	11148	16048	21145	26727	30552	37918	41594
160	8660	12305	16241	20604	25332	30769	36286
180	6883	9728	12846	16311	20198	24475	29003
200	5572	7883	10410	13222	16336	19865	23556
220	4601	6516	8606	10932	13568	16432	19463
240	3887	5477	7233	9188	11342	13814	16350
260	3300	4667	6164	7831	9683	11774	13925
280	2855	4025	5316	6753	8339	10155	12013
300	2485	3507	4632	5884	7240	8847	10461
320	2182	3083	4072	5172	6321	7777	9200
340	1931	2732	3608	4583	5660	6890	8128
360	1722	2437	3219	4088	4945	6147	7266
380	1553	2188	2889	3670	4440	5518	6502
400	1397	1975	2608	3313	4055	4981	5893

ตารางที่ ๗.6 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบยึดหมุนทั้งสองข้าง (Hinge-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	21000	24852	28498	32050	35376	38589	41579
60	16503	19829	23240	26676	30187	33117	36116
80	13031	16120	19177	22238	25164	28108	30914
100	10233	13106	15542	18793	21450	24162	26725
120	7955	10512	13118	15724	18352	20857	22820
140	6393	8400	10709	13245	15586	17914	20195
160	5324	7028	8780	10885	13154	15275	17435
180	4545	5998	7502	9167	11073	12991	14975
200	3967	5165	6545	7971	9477	11093	12845
220	3562	4550	5774	7054	8387	9483	11192
240	3215	4188	5352	6432	7490	8704	9970
260	2880	4006	4985	5990	6994	7901	8979
280	2534	3483	4623	5688	6604	7156	8215
300	2187	3123	4220	5298	6287	7012	7990
320	1910	2800	3772	4812	5840	6865	7725
340	1690	2528	3362	4311	5288	6346	7302
360	1520	2250	3012	3872	4775	5778	6705
380	1366	2015	2711	3492	4336	5250	6176
400	1250	1831	2453	3162	3933	4776	5642

ตารางที่ ๗.7 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
ยึดแน่น- ปลายเล็กยึดหมุน (Fixed-Roller) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg
Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	24335	28247	31802	34887	37991	40736	44576
60	20834	24381	28070	31522	34978	38194	41166
80	17221	20788	24310	27664	31087	34316	37233
100	14648	17937	21124	24308	27494	30705	33545
120	12481	15541	18538	21422	24438	27416	30095
140	10540	13443	16308	19066	21876	24615	27183
160	8845	11549	14260	16960	19611	22184	24654
180	7419	9876	12402	15001	17514	20128	22388
200	6322	8440	10760	13183	15590	17991	20279
220	5276	7377	9331	11572	13819	16110	18315
240	4720	6522	8244	10155	12238	14389	16482
260	4118	5810	7413	9058	10847	12842	14818
280	3755	5287	6730	8208	9763	11474	13268
300	3440	4815	6220	7497	8907	10413	11974
320	3186	4425	5725	6931	8181	9556	10956
340	2934	4130	5310	6520	7583	8710	10107
360	2776	3880	4928	6168	7210	8205	9374
380	2588	3714	4746	5850	6788	7795	8750
400	2388	3448	4550	5548	6550	7515	8321

ตารางที่ ๗.๘ น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น- ปลายเล็กปล่อยอิสระ (Fixed-Free) โดยที่ Stress-Strain แบบ Ramberg
 Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	19619	21990	24276	26505	28545	30560	32341
60	13485	15571	17541	19473	21305	22918	24446
80	9006	10699	12487	14134	15700	17130	18523
100	6542	7834	9163	10079	11388	12554	13745
120	5120	6330	7200	7932	8857	10067	10519
140	4055	5225	6114	6888	7574	8123	8640
160	3365	4334	5281	6130	6898	7589	8227
180	2786	3642	4492	5236	5964	6690	7347
200	2289	3015	3659	4277	4940	5520	6119
220	1895	2510	3033	3548	4087	4593	5103
240	1615	2122	2553	2988	3423	3873	4306
260	1398	1800	2178	2550	2922	3307	3678
280	1210	1550	1880	2201	2522	2855	3176
300	1124	1347	1638	1918	2199	2490	2770
320	989	1175	1441	1687	1934	2190	2437
340	765	1072	1236	1495	1689	1941	2160
360	698	935	1139	1225	1530	1732	1928
380	615	845	1023	1198	1373	1555	1731
400	570	760	923	1081	1240	1404	1563

ตารางที่ ๗.๙ น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง (Fixed-Fixed) โดยที่ Stress-Strain curve แบบ Ramberg Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	23959	27255	30400	33481	36558	39300	41160
60	21483	25132	28803	32484	35954	37201	40981
80	18707	22360	26081	29783	33509	34439	39577
100	16311	19780	23386	27034	30731	31724	36986
120	14388	17585	20943	24438	28065	29099	34379
140	12715	15749	18904	22164	25575	26776	31831
160	11214	14126	17109	20241	23445	24756	29417
180	9841	12621	15527	18484	21590	22947	27291
200	8596	11241	14020	16920	19876	21256	25435
220	7500	9970	12637	15420	18327	19722	23710
240	6575	8836	11345	14031	16827	18226	22113
260	5903	7832	10181	12726	15435	16832	20652
280	5352	7043	9127	11541	14121	15508	32502
300	4900	6425	8221	10447	12900	14266	17879
320	4656	5901	7534	9465	11781	13131	16605
340	4555	5467	6952	8680	10758	12067	15380
360	4400	5240	6450	8042	9868	11106	14255
380	4174	5141	6031	7487	9171	10323	13212
400	3894	4998	5821	7002	8661	39300	12229

ตารางที่ ๗.10 น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่าที่มีการยึดรั้งแบบปลายใหญ่
 ยึดแน่น – ปลายเล็กเลื่อนตามราง (Fixed-Guided) โดยที่ Stress-Strain แบบ Ramberg
 Osgood ที่มีรูปสมการ $\varepsilon = (\sigma / E) + 0.02(\sigma / 325)^{5.2}$

ความยาวเสา ปลายสอบ L (ซม.)	น้ำหนักวิกฤตในช่วงไม่ยืดหยุ่นของเสาหน้าตัดเทียบเท่า (กิโลกรัม)						
	$r = 0.3$	$r = 0.4$	$r = 0.5$	$r = 0.6$	$r = 0.7$	$r = 0.8$	$r = 0.9$
40	22063	25809	29387	32761	33941	39119	42009
60	17345	20677	24018	27287	30213	33553	36564
80	13917	16866	19899	22850	25883	28615	31356
100	11060	13806	16614	19271	21913	24552	27125
120	8658	11151	13744	16242	18641	21213	23647
140	7180	8948	11273	13587	15865	18278	20597
160	5743	7556	9211	11285	13400	15615	17813
180	5024	6552	7788	9561	11212	13291	15290
200	4400	5815	6880	8244	9771	11299	13055
220	3789	5120	6378	7445	8623	9862	11289
240	3293	4478	5677	6822	7779	8794	10033
260	2880	3990	5144	6193	7110	8003	9011
280	2552	3554	4596	5660	6676	7623	8374
300	2320	3188	4223	5210	6220	7267	8138
320	2106	2925	3835	4832	5833	6880	7875
340	1873	2610	3505	4442	5365	6415	7462
360	1676	2388	3150	3990	4887	5887	6904
380	1515	2145	2860	3626	4332	5350	6305
400	1380	1950	2584	3277	3990	4866	5755

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ

นายพัชพงศ์ ธรรมวงศา

ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ.2532 – 2536

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2548 - 2554

วิศวกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ประวัติการวิจัย

การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13

พ.ศ. 2551

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2536 - 2537 ตำแหน่งวิศวกรโยธา

หจก. วรนิทัศน์ก่อสร้าง, บริษัท เพาเวอร์ พี จำกัด

พ.ศ. 2539 - 2545 วิศวกรโยธา 3 - วิศวกรโยธา 5

กรมโยธาธิการ

พ.ศ. 2545 - 2551 วิศวกรโยธา 5 - วิศวกรโยธา 6

กรมโยธาธิการและผังเมือง

พ.ศ. 2551 - ปัจจุบัน วิศวกรโยธาชำนาญการ

กรมโยธาธิการและผังเมือง

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

วิศวกรโยธาชำนาญการ

สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดหนองคาย

กรมโยธาธิการและผังเมือง

โทรศัพท์ 042-411052, 042-422826