

การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งกึ่งอิลาสติก-พลาสติก อันดับที่สอง



นาย อลงกรณ์ ก้าวตระกูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

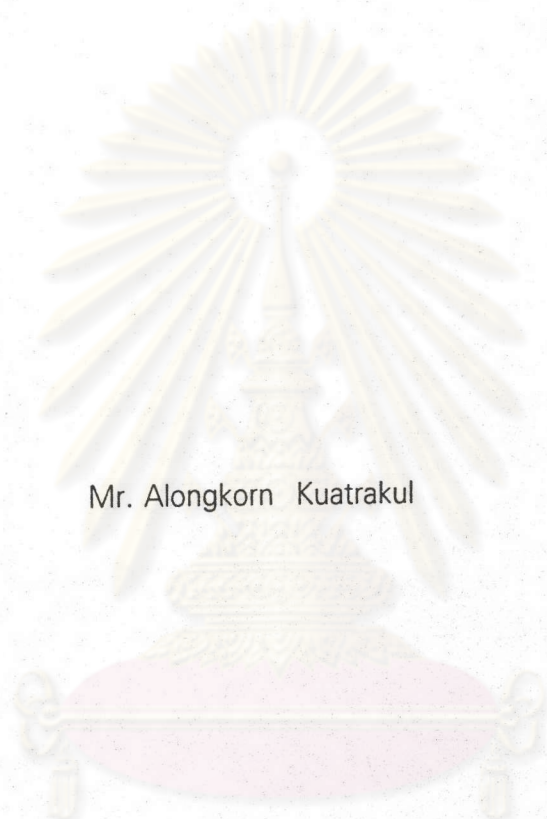
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-632-949-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SECOND ORDER ELASTIC-PLASTIC ANALYSIS OF SEMI-RIGID STEEL FRAMES



Mr. Alongkorn Kuatrakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-949-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งเชิงอิลาสติก-พลาสติก  
อันดับที่สอง

โดย นาย อลงกรณ์ ก้าวตระกูล  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

*Sanit S.*

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ฤงสูววรรณ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*สุธรรม สุริยมงคล*

.....ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม สุริยมงคล )

*ทศพร อ.*

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี )

*ทศพร อ.*

.....กรรมการ  
( อาจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุสม )

*ธีรพงศ์ ส.*

.....กรรมการ  
( อาจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉวีไชย )

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



อลงกรณ์ ก้าวตระกูล : การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งเชิงอิลาสติก - พลาสติก  
อันดับที่สอง (SECOND ORDER ELASTIC - PLASTIC ANALYSIS OF SEMI-RIGID  
STEEL FRAMES) อาจารย์ที่ปรึกษา : คำสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี, 127 หน้า.  
ISBN 974-632-949-9

งานวิจัยเล่นหหลักการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งโดยอาศัยการวิเคราะห์เชิง  
อิลาสติก-พลาสติกอันดับที่สอง ซึ่งพิจารณา เมตริกซ์ stiffness ขององค์อาคารคานเสา โดยคำนึงถึงผลของแรง  
ในแนวแกนในรูปของฟังก์ชันเส้นตรง และมีส่วนมูดูลานให้ชิ้นส่วนมีการเคลื่อนที่น้อย ในการวิเคราะห์  
โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งเชิงอิลาสติก-พลาสติกอันดับที่สองเป็นการแก้สมการไม่เชิงเส้นหลายตัวแปร  
โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นของนิวตัน-แรพสันและค่า stiffness พลัสการตรวจสอบการลู่เข้าของ  
คำตอบกระทำโดยกำหนดค่ายูคลีเดียนนอร์มของแรงให้ได้ค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด คำน้หนักบรรทุกทุกประลัย  
คำนวณหาได้จาก การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกโดยตรง และได้คำนึงถึงผลของโมเมนต์พลาสติกที่ลดลง เนื่องจาก  
แรงในแนวแกนตามความสัมพันธ์ที่เสนอโดย AISC

การศึกษาพบว่า ผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา  
ค่าตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่วิเคราะห์ได้มีค่าเบี่ยงเบนในระดับร้อยละ 2 จากการศึกษาพบว่า  
การใช้ข้อต่อที่มีคุณสมบัติการรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกัน จะทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย  
ของโครงสร้างข้อต่อกึ่งแข็งมีค่าแตกต่างจากโครงสร้างข้อต่อแข็งไม่มากนัก และพบว่า โครงสร้างมีความไว  
ต่อคุณสมบัติของข้อต่อ โดยข้อต่อที่มีความอ่อนตัวสูงจะมีค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำ และมีค่าการเปลี่ยน  
ตำแหน่งสูง และจะมีลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกแตกต่างกันในลำดับท้าย เนื่องจากผลของข้อต่อกึ่งแข็ง  
ที่มีต่อการกระจายของโมเมนต์ในโครงสร้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2538 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... อรรถ กิติมา  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ทักษิณ เทพชาตรี  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C415012 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: STEEL FRAME / SEMI - RIGID CONNECTION / ELASTIC / PLASTIC /

SECOND - ORDER

ALONGKORN KUATRAKUL : SECOND ORDER ELASTIC - PLASTIC ANALYSIS OF  
SEMI - RIGID STEEL FRAMES. THESIS ADVISOR : PROF. THAKSIN THEPCHATRI  
Ph.D. 127 pp. ISBN 974-632-949-9

This research presents a second order elastic-plastic analysis of semi-rigid steel frames. Beam-column member stiffness is formulated in the form of stability functions including axial force effect. Small displacement theory is considered. The analysis is carried out using the load control Newton-Raphson method in conjunction with tangent stiffness approach for solving simultaneous nonlinear equations. Convergence is accomplished by specifying Euclidian norms of forces to be smaller than convergence criteria required. Direct increment method is used in computing the ultimate load factor. Reduced plastic moment capacity due to axial force effect is considered by using AISC proposed expressions.

Results obtained from the present analysis have shown to be in close agreement with existing results. Proposed predicted ultimate load factors are about 2 percent deviated from the others. It has been shown that for a frame using top and seat angle with double web angle connection having moment capacity of connections in excess of their adjoining members, the ultimate load capacity of such frame will not differ much from the rigidly - jointed frame. In addition, the ultimate load capacity of the semi-rigid frame is found to be rather sensitive to connection types used. It is also found that the connection flexibility, which influences the distribution of moments in the frame, causes plastic hinge locations to form in different sequences.

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์รวมถึงการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วยรองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล อาจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพ็ชรสุขุม และอาจารย์ ดร. อธิพงษ์ แสนจันทร์มิไชย ซึ่งได้ให้คำแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ ครอบครัว ซึ่งได้ให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อลงกรณ์ ก้าวตระกูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฐ
สัญลักษณ์ .....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความนำ .....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	2
1.3 งานที่ทำในงานวิจัยนี้ .....	4
1.4 วัตถุประสงค์ .....	4
1.5 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินการวิจัย .....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และแนวคิด .....	6
2.1 ความนำ .....	6
2.2 สมมุติฐาน .....	7
2.3 พฤติกรรมของข้อต่อ .....	8
2.4 รูปแบบของข้อต่อ .....	11
2.5 สตีเฟนสขององค์อาคาร .....	19
2.6 การรวมสตีเฟนส .....	23
2.7 การวิเคราะห์อันดับที่สอง โดยวิธีของนิวตัน - แรพสัน .....	25
2.8 การแก้สมการโดยวิธีการกำจัดแบบเกาซ์ , วิธีActive Column และ วิธีการเก็บข้อมูลแบบSkyline.....	26
2.9 การเกิดจุดหมุนพลาสติก .....	28
2.10 ผลของแรงในแนวแกนต่อค่าโมเมนต์พลาสติก ( Mp ) และการ ย้อนกลับของโมเมนต์ .....	29

2.11 การเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์สติเฟเนสของชั้นส่วนเมื่อเกิดจุดหมุน พลาสติก .....	30
2.12 การวิเคราะห์อีลาสติก - พลาสติกอันดับที่สอง .....	34
<b>บทที่ 3</b> ขั้นตอน และวิธีการวิจัย .....	36
3.1 ความนำ .....	36
3.2 องค์ประกอบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	36
3.3 ขั้นตอนการก่อนการประมวลผล .....	37
3.4 ขั้นตอนการประมวลผล .....	37
3.5 ขั้นตอนหลังการประมวลผล .....	38
<b>บทที่ 4</b> การวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผล .....	39
4.1 ความนำ .....	39
4.2 รายงานการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่1 .....	40
4.3 รายงานการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่2 .....	41
4.4 รายงานการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่3 .....	42
4.5 รายงานการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่4 .....	43
4.6 รายงานการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่5 .....	44
4.7 รายงานการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลตัวอย่างที่6 .....	45
<b>บทที่ 5</b> สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผล.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50



รายการอ้างอิง .....	51
ภาคผนวก .....	54
ภาคผนวก ก รายการตารางประกอบ .....	55
ภาคผนวก ข รายการรูปประกอบ .....	68
ภาคผนวก ค การหาฟังก์ชันเสถียรภาพ .....	113
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการหาค่า Initial Stiffness , Ultimate Moment Capacity และ Shape Function ของข้อต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle Connection .....	124
ประวัติผู้เขียน .....	127

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	ขนาดและคุณสมบัติขององค์อาคารของโครงสร้างในตัวอย่างที่1 .....	55
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในตัวอย่างที่1 .....	55
ตารางที่ 4.3	ขนาดและคุณสมบัติขององค์อาคารของโครงสร้างในตัวอย่างที่2 .....	55
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในตัวอย่างที่2 .....	56
ตารางที่ 4.5	ค่าตัวแปร( Parameter ) ของข้อต่อในตัวอย่างที่3 .....	56
ตารางที่ 4.6	ขนาดและคุณสมบัติขององค์อาคารของโครงสร้างในตัวอย่างที่3 .....	57
ตารางที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในตัวอย่างที่3 .....	57
ตารางที่ 4.8	ค่าตัวแปร( Parameter ) ของข้อต่อในตัวอย่างที่4 .....	58
ตารางที่ 4.9	ขนาดและคุณสมบัติขององค์อาคารของโครงสร้างในตัวอย่างที่4 .....	58
ตารางที่ 4.10	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในตัวอย่างที่4 .....	59
ตารางที่ 4.11	รายละเอียดทางกายภาพของข้อต่อในตัวอย่างที่5 .....	60
ตารางที่ 4.12	ค่าตัวแปร( Parameter ) ของข้อต่อในตัวอย่างที่5 .....	60
ตารางที่ 4.13	ขนาดและคุณสมบัติขององค์อาคารของโครงสร้างในตัวอย่างที่5 .....	61
ตารางที่ 4.14	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในตัวอย่างที่5 .....	61
ตารางที่ 4.15	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งในตัวอย่างที่5 .....	62
ตารางที่ 4.16	ค่าตัวแปร( Parameter ) ของข้อต่อในตัวอย่างที่6 .....	63
ตารางที่ 4.17	ขนาดขององค์อาคารในโครงสร้าง ตัวอย่างที่ 6 .....	64
ตารางที่ 4.18( ก )	คุณสมบัติขององค์อาคาร( เส้า ) ตัวอย่างที่ 6.....	65
ตารางที่ 4.18( ข )	คุณสมบัติขององค์อาคาร( คาน ) ตัวอย่างที่6.....	66
ตารางที่ 4.19	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 6 .....	67
ตารางที่ 4.20	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งกับ โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งในตัวอย่างที่ 6 .....	67

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงชนิดของงานก่อสร้างตามข้อกำหนดของ AISC - ASD และ AISC - LRFD .....	68
รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของโครงระนาบในรูปของความสัมพันธ์ ของน้ำหนักบรรทุก และการเปลี่ยนตำแหน่ง .....	69
รูปที่ 2.2 แสดงวิธีการวิเคราะห์และสมมุติฐานในการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็ก .....	70
รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนรูปร่างของข้อต่อ .....	70
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมเปลี่ยน ( $\theta_r$ ) ในข้อต่อประเภทต่าง ที่นิยมใช้ทั่วไป .....	71
รูปที่ 2.5 แสดงพฤติกรรมของข้อต่อของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมเปลี่ยน .....	72
รูปที่ 2.6 แสดงพฤติกรรมของข้อต่อในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกหรือลดน้ำหนักบรรทุก .....	72
รูปที่ 2.7 รูปแบบทั่วไปของข้อต่อ .....	73
รูปที่ 2.8 แสดง Model ของข้อต่อ .....	74
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $m$ กับ $\theta_r$ ของข้อต่อรูปแบบ Three Parameter Power Model .....	75
รูปที่ 2.10 แสดงค่ามาตรฐานของข้อต่อใช้เหล็กฉาก .....	76
รูปที่ 2.11 ข้อสมมุติฐานของ Moderate Thick Plate และ Mechanism ของ Web Angle ในช่วง Ultimate .....	77
รูปที่ 2.12 Characteristic Curves สำหรับหาค่า Initial Stiffness ของข้อต่อแบบ Single Web Angle .....	77
รูปที่ 2.13 รูปแบบการเปลี่ยนรูปร่างของเหล็กฉากบนและเหล็กฉากล่างในช่วงอิลาสติก .....	78
รูปที่ 2.14 พฤติกรรมของเหล็กฉากบน ( Top Angle ) .....	78
รูปที่ 2.15 Characteristic Curves สำหรับหาค่า Initial Stiffness ของข้อต่อแบบ Top and Seat Angle .....	79
รูปที่ 2.16 พฤติกรรมของเหล็กฉากบนในช่วงกำลังประลัย ( Ultimate State ) .....	79
รูปที่ 2.17 รูปแบบการเสียรูปของข้อต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle ในช่วงอิลาสติก .....	80

รูปที่ 2.18 Characteristic Curves สำหรับหาค่า Initial Stiffness ของข้อต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle โดยแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง $D_{ts}$ กับ $\beta_t'$ .....	80
รูปที่ 2.19 Characteristic Curves สำหรับหาค่า Initial Stiffness ของข้อต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle โดยแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง $D_{ts}$ กับ $\beta_w'$ .....	81
รูปที่ 2.20 พฤติกรรมการกระจายน้ำหนักกระทำในช่วงกำลังประลัย ( Ultimate State ) .....	81
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของค่า Shape Parameter เทียบกับผลการทดสอบ .....	82
รูปที่ 2.22 องค์อาคารคาน - เสาค มีข้อต่อกิ่งแข็งที่ปลายทั้งสอง .....	82
รูปที่ 2.23 Hybrid Beam Element .....	83
รูปที่ 2.24 องค์อาคารวางในระบบโคออดิเนตโกลบอล .....	84
รูปที่ 2.25 การวิเคราะห์อันดับที่สองใช้นิวตัน - แรพสัน .....	84
รูปที่ 2.26 การกระจายของหน่วยแรง และการเกิดจุดหมุนพลาสติก .....	85
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับการโก่งของหน้าตัดใด ๆ .....	85
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับพลาสติกโมเมนต์ กับแรงในแนวแกนสำหรับหน้าตัดรูปตัว I รอบแกนเอก .....	86
รูปที่ 2.29 องค์อาคารเมื่อเกิดจุดหมุนพลาสติกที่ปลาย .....	87
รูปที่ 2.30 การวิเคราะห์อีลาสติก - พลาสติกอันดับที่สอง .....	88
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทำการวิเคราะห์ .....	89
รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำตัวอย่างที่ 1.....	90
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวตั้งเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาตัวอย่างที่ 1.....	90
รูปที่ 4.3 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 1.....	91
รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำตัวอย่างที่ 2 .....	91
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวตั้งเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาตัวอย่างที่ 2 .....	92

รูปที่ 4.6 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 2 .....	92
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่ข้อต่อกับมุมเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 3 .....	93
รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำตัวอย่างที่ 3 .....	94
รูปที่ 4.9 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 3 .....	95
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาตัวอย่างที่ 3 .....	95
รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำตัวอย่างที่ 4 .....	96
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่ข้อต่อกับมุมเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 4 .....	96
รูปที่ 4.13 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 4 .....	97
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาตัวอย่างที่ 4 .....	97
รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำตัวอย่างที่ 5 .....	98
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่ข้อต่อกับมุมเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 5 .....	99
รูปที่ 4.17 รายละเอียดของข้อต่อ ตัวอย่างที่ 5 .....	100
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาตัวอย่างที่ 5.....	101
รูปที่ 4.19 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 5 .....	102
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงของโครงสร้างที่ใช้ข้อต่อแบบ Moment Connection ตัวอย่างที่ 5 .....	103
รูปที่ 4.21 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างเหล็กข้อแข็งกับ โครงสร้างเหล็กข้อต่อกึ่งแข็งใช้ข้อต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle ตัวอย่างที่ 5 .....	104
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงของโครงสร้างที่ใช้ข้อต่อแบบ Shear Connection ตัวอย่างที่ 5 .....	105
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่ข้อต่อกับมุมเปลี่ยน ตัวอย่างที่ 6 .....	106

รูปที่ 4.24 ลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำตัวอย่างที่ 6 .....	107
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงของโครงสร้างเหล็กข้อแฉ่งเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ ผ่านมาตัวอย่างที่ 6 .....	108
รูปที่ 4.26 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวอย่างที่ 6 .....	109
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกกับอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวราบเทียบกับความสูงเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างเหล็กข้อแฉ่งกับ โครงสร้างเหล็กข้อต่อกิ่งแข็งตัวอย่างที่ 6 .....	110
รูปที่ 4.28 ลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติกเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างเหล็กข้อแฉ่งกับ โครงสร้างเหล็กข้อต่อกิ่งแข็งตัวอย่างที่ 6 .....	111
รูปที่ 4.29 รายละเอียดของข้อต่อตัวอย่างที่ 6 .....	112

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด
[a]	เมตริกซ์แปลง ( Transformation Matrix )
[D]	เมตริกซ์ทะแยง
f	หน่วยแรง
$f_y$	หน่วยแรงคดง
$g_c$	ระยะจากขอบเหล็กฉากถึงจุดศูนย์กลางแนว สลักเกลียว
I	โมเมนต์ของความเฉื่อย
K	ระยะจาก Angle Heel ถึง Toe ของ Fillet
[K]	เมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้าง
$[K_g]^i$	เมตริกซ์สติฟเนสขององค์อาคาร i ใน โคออดิเนตโกลบอล
[K(r)]	เมตริกซ์สติฟเนสขององค์อาคารที่คำนึงถึง ผลของแรงในแนวแกนต่อค่าสติฟเนสของ โมเมนต์และแรงเฉือนในโคออดิเนต โกลบอล
[K(v)]	เมตริกซ์สติฟเนสขององค์อาคารที่คำนึงถึง ผลของแรงในแนวแกนต่อค่าสติฟเนสของ โมเมนต์และแรงเฉือนในโคออดิเนต ประจำตัว
l	ความยาวเหล็กฉาก
L	- ความยาว - เมตริกซ์สามเหลี่ยมล่าง
M	โมเมนต์
$M_a$	โมเมนต์ที่ปลาย a ขององค์อาคาร
$M_p$	โมเมนต์พลาสติก
$M_u$	โมเมนต์สูงสุดของข้อต่อ
$M_y$	โมเมนต์คดง
n	ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function)

P	แรงในแนวแกน
$P_y$	แรงคลาก
$\{Q\}$	เวกเตอร์ของแรงคงค้าง ( Unbalanced Force Vector )
$R_{ki}$	สตีเฟนเนสเริ่มต้นของข้อต่อ
$R_{kt}$	สตีเฟนเนส ณ จุดใดๆ ของข้อต่อ
$\{R\}$	เวกเตอร์ของแรงกระทำ ในโคออดิเนตโกลบอล
$\{r\}$	เวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออดิเนตโกลบอล
$r_i$	การเปลี่ยนตำแหน่งที่ d.o.f. i
S	- แรงเฉือน - เมตริกซ์สามเหลี่ยมบน
$\{s\}$	เวกเตอร์ของแรงกระทำในโคออดิเนต ประจำตัว
$s_i$	แรงที่ปลายที่ dof i ขององค์อาคาร
t	ความหนาของเหล็กฉาก
W	เส้นผ่านศูนย์กลางของน็อต
e	การเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน
v	การเปลี่ยนตำแหน่งในแนวเฉือน
$\{v\}$	เวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่ง ในโคออดิเนตประจำตัว
$Z_p$	โมดูลัสพลาสติก
$\Phi_i$	ฟังก์ชันเสถียรภาพ( Stability Functions )
$\theta$	มุมหมุน
$\lambda$	ตัวประกอบน้ำหนักบรรทุก