

การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กที่มีรอยต่อระหว่างคานและเสาเป็นแบบกึ่งข้อแข็ง



นายสถาพร นีรันดโรภาส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พศ. 2531

ISBN 974-569-597-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016038

i 10301409

ANALYSIS OF STEEL FRAMES WITH SEMI-RIGID BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS

Mr. Sathaporn Nirundaropas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduated School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-569-597-1



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กที่มีรอยต่อระหว่างคานและเสา เป็น
แบบกึ่งข้อแข็ง

โดย

นายสถาพร นิรัชโรภาส

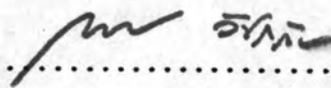
ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

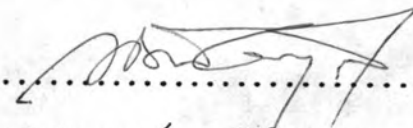
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

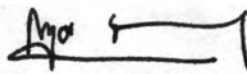
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรราชัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



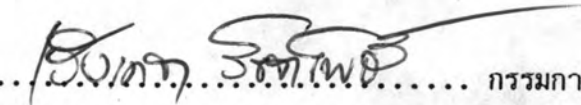
ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทงชาติวี)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทราชศุ)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริ่งเดชา รัชตโน้)



กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)



สถาพร นิรันดร์โรภาส : การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กที่มีรอยต่อระหว่างคานและเสา เป็นแบบกึ่งข้อแข็ง (ANALYSIS OF STEEL FRAMES WITH SEMI-RIGID BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ, 162 หน้า.

การศึกษานี้เป็นวิธีการวิเคราะห์โครงแบบกึ่งข้อแข็ง ซึ่งสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างที่มีรอยต่อที่มีลักษณะแบบ ข้อหมุน ข้อแข็ง และแบบกึ่งข้อแข็ง ในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็ง ใช้วิธีทำซ้ำเข้าช่วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นตามวิธีการรวมสถิติเนสโดยตรงหลาย ๆ ครั้งกลับไปกลับมา โดยการสมมติให้ความสัมพันธ์ของรอยต่อมีสมการโมเมนต์และมุม เปลี่ยนเป็นสมการเชิงเส้นในแต่ละรอยต่อที่ทำการคำนวณ วิธีการทำซ้ำจะสิ้นสุดลงเมื่อค่ามุม เปลี่ยนที่ได้จากสมการเชิงเส้นที่สมมติค่าสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์จริงของรอยต่อ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็งจะได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของรอยต่อที่ได้สมมติขึ้น เป็นครั้งสุดท้าย

ในการศึกษาได้หาสมการความสัมพันธ์โมเมนต์กับมุม เปลี่ยนของรอยต่อในโครงสร้างเหล็ก 4 ประเภท คือ แบบ Single Web Angle, Header Plate, Top and Seat Angle และ End Plate ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของรอยต่อจะอยู่ในรูปของสมการพหุนาม โดยขึ้นอยู่กับขนาดหรือสัดส่วนของรอยต่อ เช่น ความหนาของเหล็กฉาก ความยาวของเหล็กฉาก ความหนาของแผ่นเหล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียว ฯลฯ ค่าสัมประสิทธิ์และระดับชั้นของสมการพหุนามหาได้จากการ เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ผ่านมา

โครงสร้างแบบ คาน โครงข้อแข็ง และ โครงข้อหมุน ได้ใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อการวิเคราะห์หาผลของรอยต่อแบบกึ่งข้อแข็งที่มีต่อพฤติกรรมโครงสร้าง การวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย ผลของการศึกษาพบว่า โครงสร้างประเภทคานและประเภทโครงข้อแข็งจะเกิดโมเมนต์ในองศาอาคารมากขึ้นขึ้นอยู่กับเฟลกซ์อิพิดิตีของรอยต่อ กล่าวคือถ้ารอยต่อที่มีสถิติเนสสูงโมเมนต์ลมที่ปลายองศาอาคารจะสูงกว่ากรณีที่มีสถิติเนสต่ำ อนึ่งการแอ่นตัวและการเคลื่อนที่จะขึ้นกับสถิติเนสของรอยต่อเช่นกัน สำหรับโครงข้อหมุนเมื่อรอยต่อมีสถิติเนสมากขึ้น แรงเฉือนและโมเมนต์ในองศาอาคารจะมีค่ามากขึ้นแต่แรงในแนวแกนและการแอ่นตัวของโครงสร้างจะลดลง จากการศึกษาจะพบว่ารอยต่อแบบ Single Web Angle, Header Plate และ Top and Seat Angle จะมีพฤติกรรมเชิงข้อหมุนมากกว่า แต่แบบ Top and Seat Angle จะมีขีดความสามารถในการรับแรงคดโค้งมากกว่า 2 แบบแรก สำหรับรอยต่อแบบ End Plate เป็นรอยต่อที่มีความแข็งมากที่สุด แต่ความแข็งยังไม่มากพอที่จะเป็นรอยต่อแบบข้อแข็งได้

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิติ *นิรันดร์โรภาส*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ*



SATHAPORN NIRUNDAROPAS : ANALYSIS OF STEEL FRAMES WITH SEMI-RIGID BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS. THESIS ADVISOR : PROF. EKASIT LIMSUWAN, Ph.D., 162 PP.

This study concerns the analysis of frames with semi-rigid connections and may be applied to frames with any combinations of pinned, rigid or semi-rigid connections. An iterative method is employed in the analysis procedure. The iterative method utilizes repeated modifications to the moment-rotation function, assumed to be linear for all connections in each cycle of iteration. When a suitable set of rotations have been arrived at for the connections, a single analysis is performed based on the linear relationships assumed for the connections in the final cycle.

The moment and rotation relationships for 4 types of steel framing connections were investigated : single web angle, header plate, top and seat angle and end plate connections. The actual relationships are in the form of polynomial functions of the size or dimension of the connections, such as angle thickness, angle length, plate thickness, bolt diameter etc. The coefficients and the degree of the polynomials were determined from past experimental data.

Beams, frames and trusses with various types of connections were analyzed to examine the effects of semi-rigid connections on structural behavior. A computer program was employed to analyze such structures. It was found that the negative moment for beams and rigid frames were influenced by connection flexibility ; the stiffer the joint, the more negative moment at the joint. The deformations were also controlled by the connection stiffness. For trusses, stiffer connections produced more shears and moments while reducing the axial forces. The behavior of single web angle, header plate and top and seat angle connections were closed to that of a pinned connection. However, the top and seat angle connections had greater moment resistance than the single web angle and header plate. The end plate connection had the highest stiffness but were not as stiff as a rigid connection.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิสิต *Ekasit Limsuwan*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Ekasit Limsuwan*



กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี รองศาสตราจารย์ ดร. การุญ จันทรางศุ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เริงเดชา รัชตโพธิ์ ซึ่งได้ให้ความกรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ข้าพเจ้า

ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ่มสุวรรณ ผู้ซึ่งให้โอกาส กำลังใจ และให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในแนวความคิดต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้าอย่างมากมาย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ นอกจากความรู้ทางด้านวิชาการที่ได้รับแล้วข้าพเจ้ายังรู้สึกประทับใจกับน้ำใจของเพื่อน ๆ และผู้ให้ความช่วยเหลือหลายคน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณวิโรจน์ เมฆาการุญ คุณผลฤกษ์ คลังบุญครอง ที่ซึ่งให้ความช่วยเหลือในการค้นหาเอกสารอ้างอิงหลายฉบับในต่างประเทศ คุณนิพนธ์ เนยเมืองปักข์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ และยังมีผู้ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าอีกมากมายซึ่งไม่สามารถจะกล่าวไว้ในที่นี้ได้ ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณบุคคลเหล่านี้เป็นอย่างยิ่ง

ท้ายนี้ สิ่งที่มีความผูกพันกับข้าพเจ้ามาโดยตลอดคือ มารดาบิดาและทุก ๆ คนในครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ได้เปิดโอกาสให้กับข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียนจนกระทั่งบัดนี้ ซึ่งพระคุณของมารดาบิดา ข้าพเจ้าย่อมมิอาจจะชดใช้ได้หมด และก็จะเป็นที่อยู่ในจิตใจของข้าพเจ้าตลอดไป



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความนำ.....	1
1.2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 พฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคานและเสา	
2.1 ความนำ.....	5
2.2 รอยต่อแบบ Single Web Angle.....	7
2.3 รอยต่อแบบ Header Plate.....	8
2.4 รอยต่อแบบ Top and Seat Angle.....	9
2.5 รอยต่อแบบ End Plate.....	10
บทที่ 3 สมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อ	
3.1 วิธีการหาสมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อ.....	12
3.2 สมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Single Web Angle.....	17
3.3 สมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Header Plate.....	25
3.4 สมการความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle.....	36

3.5	สมการความสัมพันธ์ของ โมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ End Plate.....	47
บทที่ 4	การวิเคราะห์โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็ง	
4.1	ความนำ.....	57
4.2	ลติเฟนสของชิ้นส่วนที่ปลายเป็นรอยต่อที่มีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น..	58
4.3	การวิเคราะห์โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็งที่มีพฤติกรรมของรอยต่อเป็นแบบ ไร้เชิงเส้น.....	65
4.4	ความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็ง.....	67
บทที่ 5	ผลกระทบของรอยต่อแบบกึ่งข้อแข็งต่อโครงสร้าง	
5.1	ลักษณะของรอยต่อและวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างการศึกษาโครงสร้างที่มี รอยต่อต่างกัน.....	71
5.2	ตัวอย่างการศึกษาโครงสร้างที่มีรอยต่อต่างกัน.....	75
บทที่ 6	บทวิจารณ์และบทสรุป	
6.1	บทวิจารณ์.....	92
6.2	บทสรุป.....	93
	เอกสารอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก ก	โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการนำไปใช้งาน	
ก.1	ความนำ.....	100
ก.2	รูปแบบการทำงานของโปรแกรม.....	100
ก.3	การประยุกต์ใช้โปรแกรม.....	103
ก.4	ตัวอย่างการใช้โปรแกรม.....	107
ก.5	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ.....	114
ภาคผนวก ข	แผนผังสายงานของโปรแกรม SOLUTION.....	118
ภาคผนวก ค	ตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรม SOLUTION.....	120
ภาคผนวก ง	รายละเอียดโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็ง.....	122
ภาคผนวก จ	โมเมนต์ตัดที่ปลายยึดแน่นของชิ้นส่วน.....	160
ประวัติผู้ศึกษา.....		162



	หน้า
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดรอยต่อแบบ Single Web Angle..... 19
ตารางที่ 3.2	ค่ายกกำลังของระยะเกจ (g) ของรอยต่อแบบ Single Web Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Lipson (17)..... 19
ตารางที่ 3.3	ค่ายกกำลังของความยาวเหล็กฉาก (d) ของรอยต่อแบบ Single Web Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Lipson (17)..... 20
ตารางที่ 3.4	ค่ายกกำลังของความหนาเหล็กฉาก (t) ของรอยต่อแบบ Single Web Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Lipson (17)..... 21
ตารางที่ 3.5	รายละเอียดรอยต่อแบบ Header Plate ของ Kennedy และ Hafez (18)..... 26
ตารางที่ 3.6	รายละเอียดรอยต่อแบบ Header Plate ของ Somner (9).... 27
ตารางที่ 3.7	ค่ายกกำลังของความหนาแผ่นเหล็ก (t) ของรอยต่อแบบ Header Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Kennedy (18) และ Somner (9)..... 28
ตารางที่ 3.8	ค่ายกกำลังของระยะเกจ (g) ของรอยต่อแบบ Header Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Kennedy (18) และ Somner (9)... 29
ตารางที่ 3.9	ค่ายกกำลังของความยาวแผ่นเหล็ก (d) ของรอยต่อแบบ Header Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Kennedy (18) และ Somner (9)..... 30
ตารางที่ 3.10	รายละเอียดรอยต่อแบบ Top and Seat Angle ของ Hechtman (19)..... 37
ตารางที่ 3.11	รายละเอียดรอยต่อแบบ Top and Seat Angle ของ Maxwell (20)..... 38
ตารางที่ 3.12	ค่ายกกำลังของความหนาเหล็กฉาก (t) ของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Maxwell (20)..... 39

ตารางที่ 3.13	ค่ายกกำลังของความลึกคาน (d) ของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Hechtman (19).....	40
ตารางที่ 3.14	ค่ายกกำลังของเส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียว (f) ของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Hechtman (19).....	41
ตารางที่ 3.15	ค่ายกกำลังของความยาวเหล็กฉาก (l) ของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle โดยใช้ผลการทดสอบของ Maxwell (20).....	42
ตารางที่ 3.16	รายละเอียดรอยต่อแบบ End Plate ของ Ostrander (22)...	48
ตารางที่ 3.17	รายละเอียดรอยต่อแบบ End Plate ของ Phillips และ Packer (21).....	49
ตารางที่ 3.18	ค่ายกกำลังของความลึกคาน (d) ของรอยต่อแบบ End Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Ostrander (22).....	49
ตารางที่ 3.19	ค่ายกกำลังของความหนาแผ่นเหล็ก (t_p) ของรอยต่อแบบ End Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Ostrander (22) และ Phillips (21).....	51
ตารางที่ 3.20	ค่ายกกำลังของความ Stiffeners (t_s) ของรอยต่อแบบ End Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Ostrander (22).....	52
ตารางที่ 3.21	ค่ายกกำลังของความหนาปีกเสา (t_f) ของรอยต่อแบบ End Plate โดยใช้ผลการทดสอบของ Ostrander (22)	53
ตารางที่ 4.1	ผลการคำนวณโครงสร้างในรูปที่ 4.8.....	69
ตารางที่ 5.1	สมการโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Single Web Angle , Header Plate , Top and Seat Angle และ End Plate ที่ใช้ในตัวอย่างที่ 5.1 , 5.2 , 5.3 และ 5.4.....	72
ตารางที่ 6.1	สมการโมเมนต์และมุมเปลี่ยนและตัวคูณมาตรฐานของรอยต่อแบบ Single Web Angle , Header Plate , Top and Seat Angle และ End Plate.....	94
ตารางที่ ก.1	สัญลักษณ์ของขนาดรอยต่อที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เปรียบเทียบกับที่ใช้ใน	

	โปรแกรม.....	105
ตารางที่ ก.2	Nodal Coordinate ของตัวอย่างที่ ก.2.....	107
ตารางที่ ก.3	Boundary Condition ของตัวอย่างที่ ก.2.....	107
ตารางที่ ก.4	Element Connectivity ของตัวอย่างที่ ก.2.....	108
ตารางที่ ก.5	Element Connection ของตัวอย่างที่ ก.2.....	108
ตารางที่ ก.6	Material Property ของตัวอย่างที่ ก.2.....	109
ตารางที่ ก.7	Nodal Load ของตัวอย่างที่ ก.2.....	109
ตารางที่ ก.8	Concentrated Load ของตัวอย่างที่ ก.2.....	109
ตารางที่ ก.9	Uniformed Load ของตัวอย่างที่ ก.2.....	110
ตารางที่ ก.10	Connection Data ของตัวอย่างที่ ก.2.....	110



	หน้า
รูปที่ 2.1	ลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างของรอยต่อ..... 6
รูปที่ 2.2	เส้นโค้งของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อต่าง ๆ..... 6
รูปที่ 2.3	ลักษณะรูปร่างและเส้นโค้งของ โมเมนต์กับมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Single Web Angle..... 7
รูปที่ 2.4	ลักษณะรูปร่างและเส้นโค้งของ โมเมนต์กับมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Header Plate..... 8
รูปที่ 2.5	ลักษณะรูปร่างและเส้นโค้งของ โมเมนต์กับมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle..... 10
รูปที่ 2.6	ลักษณะรูปร่างและเส้นโค้งของ โมเมนต์กับมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ End Plate..... 11
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างเส้นโค้งของรอยต่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสลักเกลียวต่างกัน 14
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างการหาค่ายกกำลัง (a_j) ที่ค่า 0 ต่างกัน..... 15
รูปที่ 3.3	ตัวแปรที่มีผลกับรอยต่อแบบ Single Web Angle..... 18
รูปที่ 3.4	โมเมนต์มาตรฐานและมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Single Web Angle 23
รูปที่ 3.5	เปรียบเทียบเส้นโค้งของ โมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Single Web Angle ที่ได้จากการทดสอบและจากสมการที่ 3.8..... 23
รูปที่ 3.6	ตัวแปรที่มีผลกับรอยต่อแบบ Header Plate..... 25
รูปที่ 3.7	โมเมนต์มาตรฐานและมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Header Plate.... 31
รูปที่ 3.8	เปรียบเทียบเส้นโค้งของ โมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Header Plate ที่ได้จากการทดสอบและจากสมการที่ 3.10..... 32
รูปที่ 3.9	ลักษณะของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle จากการทดสอบที่ผ่านมา..... 36
รูปที่ 3.10	ตัวแปรที่มีผลกับรอยต่อแบบ Top and Seat Angle..... 37
รูปที่ 3.11	โมเมนต์มาตรฐานและมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Top and Seat

	Angle.....	43
รูปที่ 3.12	เปรียบเทียบเส้นโค้งของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ Top and Seat Angle ที่ได้จากการทดสอบและจากสมการที่ 3.12.....	44
รูปที่ 3.13	ตัวแปรที่มีผลกับรอยต่อแบบ End Plate.....	47
รูปที่ 3.14	โมเมนต์มาตรฐานกับมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ End Plate.....	54
รูปที่ 3.15	เปรียบเทียบเส้นโค้งของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อแบบ End Plate ที่ได้จากการทดสอบและจากสมการที่ 3.14.....	55
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อที่มีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น.....	58
รูปที่ 4.2	ชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ปลายเป็นรอยต่อที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและมีการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อรับแรงกระทำใด ๆ.....	59
รูปที่ 4.3	คานเสมือนและน้ำหนักบรรทุกกระทำใด ๆ.....	59
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ในระบบโลคัล.....	62
รูปที่ 4.5	สตีเฟเนสของชิ้นส่วนในระบบโกลบัล.....	63
รูปที่ 4.6	แกนอ้างอิงในระบบโลคัลและโกลบัล.....	64
รูปที่ 4.7	ลักษณะการสมมติเฟลกซิบิลิตี้ของรอยต่อเพื่อหาคำตอบจากการวิเคราะห์	66
รูปที่ 4.8	โครงสร้างแบบกึ่งข้อแข็งในตัวอย่างที่ 4.1.....	68
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อในตัวอย่างที่ 4.1..	68
รูปที่ 5.1	เส้นโค้งโมเมนต์และมุมเปลี่ยนของรอยต่อที่ใช้ในตัวอย่างที่ 5.1-5.4.	73
รูปที่ 5.2	โครงข้อหมุนตัวอย่างที่ 5.1.....	76
รูปที่ 5.3	โมเมนต์ไดอะแกรมของโครงข้อหมุนตัวอย่างที่ 5.1.....	77
รูปที่ 5.4	ไดอะแกรมของแรงในแนวแกนของโครงข้อหมุนตัวอย่างที่ 5.1.....	78
รูปที่ 5.5	ไดอะแกรมของแรงเฉือนของโครงข้อหมุนตัวอย่างที่ 5.1.....	79
รูปที่ 5.6	ไดอะแกรมของการแอ่นตัวของโครงข้อหมุนตัวอย่างที่ 5.1.....	80
รูปที่ 5.7	ตัวอย่างที่ 5.2 โครงข้อแข็ง FRAME 1 , FRAME 2 และ FRAME 3	82
รูปที่ 5.8	ไดอะแกรมของโมเมนต์ของโครงข้อแข็ง FRAME 1 , FRAME 2 ตัวอย่างที่ 5.2.....	83

รูปที่ 5.9	ไดอะแกรมของโมเมนต์ของโครงข้อแข็ง FRAME 3 ตัวอย่างที่ 5.2..	84
รูปที่ 5.10	ตัวอย่างที่ 5.3 โครงข้อแข็ง FRAME 4.....	85
รูปที่ 5.11	ไดอะแกรมของโมเมนต์ของโครงข้อแข็ง FRAME 4 ตัวอย่างที่ 5.3..	86
รูปที่ 5.12	ตัวอย่างที่ 5.4 โครงข้อแข็ง FRAME 5 , FRAME 6 และ FRAME 7	88
รูปที่ 5.13	ไดอะแกรมของโมเมนต์ของโครงข้อแข็ง FRAME 5 และ FRAME 6 ตัวอย่างที่ 5.4.....	89
รูปที่ 5.14	ไดอะแกรมของโมเมนต์ของโครงข้อแข็ง FRAME 7 ตัวอย่างที่ 5.4..	90
รูปที่ 5.15	การเคลื่อนที่ในแนวราบของขั้วทางด้านขวาของโครงข้อแข็ง FRAME 5 , FRAME 6 และ FRAME 7 ตัวอย่างที่ 5.4.....	91
รูปที่ ก.1	ผังงานการทำงานร่วมกันของโปรแกรมต่าง ๆ.....	101
รูปที่ ก.2	โครงข้อหมุนในตัวอย่างที่ ก.1	104
รูปที่ ก.3	ตัวอย่างที่ ก.2 โครงข้อแข็ง FRAME 8.....	106
รูปที่ ก.4	ข้อมูลและผลการวิเคราะห์โครงข้อแข็ง FRAME 8.....	111
รูปที่ ก.5	ลักษณะการสมมติเฟลกซิบิลิตีของรอยต่อเพื่อหาคำตอบจากการวิเคราะห์ โดยวิธีที่แก้ไขใหม่.....	115
รูปที่ ก.6	เปรียบเทียบจำนวนรอบและจำนวนเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยวิธีต่าง ๆ	117

สัญลักษณ์

- A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน
 E = โมดูลัสความยืดหยุ่น
 F_i = สัมประสิทธิ์การยึดแน่นที่ปลาย i
 F_j = สัมประสิทธิ์การยึดแน่นที่ปลาย j
 $\{f\}$ = แรงภายในที่ปลายของชิ้นส่วน
 I = โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วน
 L = ความยาวของชิ้นส่วน
 M = โมเมนต์ที่กระทำกับรอยต่อ
 m = โมเมนต์ภายในที่ปลายของชิ้นส่วน
 $[S]$ = สติฟเนสของชิ้นส่วนในระบบโกลบัล
 $[S_L]$ = สติฟเนสของชิ้นส่วนในระบบโลคัล
 $[T]$ = Transformation Matrix
 u = แรงแนวนแกนที่ปลายของชิ้นส่วน
 v = แรงเฉือนที่ปลายของชิ้นส่วน
 x = การเคลื่อนที่ในแนวแกน x ของขั้วที่ปลายชิ้นส่วนในระบบโลคัล
 y = การเคลื่อนที่ในแนวแกน y ของขั้วที่ปลายชิ้นส่วนในระบบโลคัล
 Z = เฟล็กซิบิลิตีของรอยต่อ
 θ = มุมหมุนที่ปลายชิ้นส่วน
 ϕ = มุมเปลี่ยนของรอยต่อ
 Ψ = มุมที่แกนในระบบโลคัลกระทำกับแกนในระบบโกลบัล