

การศึกษาโมเดลโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยสำหรับการออกแบบในภาวะสุดขีด

นาย ไทบุญ ตันศิริอนุสรณ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-417-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF STRUCTURAL CONCRETE MODELS FOR LIMIT STATE DESIGN OF REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES IN THAILAND



Mr. Paiboon Tonsirianusorn

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 971-332-417-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโมเดลโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยสำหรับการออกแบบในภาวะ
สุดขีด

โดย นาย ไพบุลย์ ตันศิริอนุสรณ์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

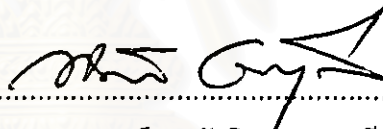
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

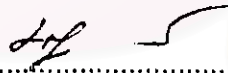
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ขุดวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. หักฉัตร เทพชาติ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)



..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. รัชชาติ สิทธิพันธุ์)

โทบูลย์ ดันศิริอนุสรณ์ : การศึกษาโมเดลโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยสำหรับการออกแบบในภาวะสุดขีด (STUDY OF STRUCTURAL CONCRETE MODELS FOR LIMIT STATE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN THAILAND) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ 191 หน้า ISBN 974-332-417-8.

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยทั่วไปยังคงใช้วิธีกำลังใช้งานหรือวิธีกำลังประลัยเป็นส่วนใหญ่ โดยอิงมาตรฐานการออกแบบของ ACI เป็นแนวทาง แต่การออกแบบด้วยวิธีภาวะสุดขีดได้รับความสนใจค่อนข้างน้อย ทั้งที่วิธีการและนิยามมาตรฐานใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศยุโรป และอีกหลาย ๆ ส่วนของโลก งานศึกษาวิจัยนี้จะศึกษาโมเดลของพฤติกรรมทางโครงสร้างขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อพัฒนาเป็นมาตรฐานการออกแบบในภาวะสุดขีด โดยเน้นข้อมูลตามปัจจัยและสภาพแวดล้อมของประเทศไทยเป็นอันดับแรก เกี่ยวกับวัสดุการออกแบบ และการก่อสร้าง การศึกษาวิเคราะห์โมเดล ตรวจสอบความแม่นยำ และความน่าเชื่อถือทางโครงสร้างที่ เป็นความมั่นคงแข็งแรง และความปลอดภัย เทียบกับมาตรฐานสากล

การศึกษานี้ได้แบ่งเนื้อหาของการศึกษาเป็นสี่ส่วน ได้แก่ โมเดลของกำลังวัสดุ ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง กำลังของโครงสร้างในภาวะสุดขีดประลัย และพฤติกรรมในภาวะสุดขีดบริการ ผลการศึกษาพบว่า วัสดุในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ คอนกรีตที่มีกำลังอัดจาก 200-1000 กก/ซม² หดสอบด้วยตัวอย่างทรงกระบอกและเหล็กเสริมที่ใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย กำลัง 3000 4000 และ 5000 กก/ซม² ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกจรตามสภาพการก่อสร้าง และน้ำหนักจรตามกฎหมายในประเทศไทยจะให้ค่า 1.30 และ 1.70 ตามลำดับ ค่าของส่วนความปลอดภัย สำหรับงานคอนกรีตเป็น 1.73 ในขณะที่ค่าของส่วนความปลอดภัยของเหล็กเสริมเป็น 1.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด และความเครียดจะเป็นสมการเส้นโค้งที่ให้ค่าความเครียดที่หน่วยแรงอัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีต ในขณะที่ค่าความเครียดสูงสุดที่ประลัยจะลดลงเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น การจำลองแบบการกระจายของหน่วยแรงดัด เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสมือน ให้ค่ากำลังดัดสอดคล้องกับการกระจายของหน่วยแรงจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 3% ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดของหน้าตัดองค์อาคารรับแรงดัดมีค่า 0.389 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะดูลย์ ในกรณีของแรงเฉือนการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบ สามารถคำนวณหากำลังเฉือน ประกอบด้วย ส่วนของหน้าตัดคอนกรีตและส่วนของเหล็กปลอกตามทฤษฎี Truss Analogy หน้าตัดรับแรงบิดการคำนวณกำลังบิดได้จากปริมาณเหล็กเสริมตามทฤษฎี Space Truss Analogy ในกรณีของเสาหรือองค์อาคารรับแรงอัดพบว่า กำลังอัดในหน้าตัดคอนกรีตคิดได้เพียงบางส่วนของกำลังอัดทรงกระบอกตามสัดส่วน $0.60 + 100\sigma_c$ แต่ต้องไม่เกิน 0.85 อนึ่งกำลังดัดในเสาจะมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับกรณีของแรงดัด โดยกรณีของเสายาวสามารถคำนวณออกแบบโดยใช้ค่าตัวขยายโมเมนต์จากการโก่งตัว สำหรับแรงยึดเหนี่ยวที่ใช้คำนวณระยะพัฒนาของเหล็กเสริม ในภาวะสุดขีดให้ค่าที่สอดคล้องกับวิธีการกำลังประลัย

การศึกษาพฤติกรรมในภาวะสุดขีดบริการที่เกี่ยวกับ การโก่งตัว การแตกร้าว การสั่นสะเทือน ความล้า อัตราการทรุด การคืบตัวและการหดตัว และความทนทานของโครงสร้าง สามารถทำนายและควบคุมให้อยู่ในขีดได้

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
 ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิติศ
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C815100 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD: LIMIT STATE DESIGN / REINFORCED CONCRETE / STRUCTURAL MEMBER

PAIBOON TONSIRIANUSORN : STUDY OF STRUCTURAL CONCRETE MODELS FOR LIMIT STATE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN THAILAND. THESIS ADVISOR : PROF. EKASIT LIMSUWAN , Ph.D., 191 pp. ISBN 974-332-417-8

Current design practice in Thailand for reinforced concrete structure are normally conformed to the Working Stress Design and Ultimate Strength Design referred to the ACI code. However, the Limit State Design are not yet familiar to most Thai engineering practice, even it is quite well-known to the European countries and many parts of the world. This studies concentrated on structural model for reinforced concrete elements in limit states. The research emphasised and concerned the data and conditions in Thailand related to the materials, design and construction. The study complied models for strengths and serviceability to analyze the accuracy and reliability and compare to the international standard, then Limit State Design can be developed.

The studies are separated in 4 major areas; strength of materials, structural reliability, ultimate limit state, and serviceability limit states. For materials, concrete strengths are varied from 200 to 1000 ksc and steel are varied from 3000 to 5000 ksc. Load factors for dead load and live load related to construction in Thailand are 1.30 and 1.70 respectively. Partial safety factors for concrete and steel are 1.73 and 1.16 respectively. Stress-strain relationship for concrete is non-linear curve and its peak strain increases with its strength whereas the maximum strain decreases with its strength. The results from calculation with simplified rectangular stress block, which is developed from the actual stress, are close to the actual stress distribution with difference about 3%. The maximum reinforcement ratio is specified to be 0.389 times of balanced steel ratio. For shear, the equation to predict shear strength has been developed and web reinforcement can be calculated accurately by Truss Analogy. For torsion, the equation to resist torsional strength has been developed by Space Truss Analogy. For compression, the ultimate stress ratio has found to be decreased with concrete strength. In long column design, the column magnifier is used. For bond stress, used to calculate development length, the result gives the value close to ultimate strength design method.

For model of serviceability limit state , this studies proposed limitations for deflection, cracking, vibration, fatigue, fire endurance, creep and shrinkage, and durability.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อผู้ผลิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดี มาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม และ อาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ ที่ได้กรุณาช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด ที่ได้ให้ ข้อมูลบางส่วนที่เป็นประโยชน์กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และ ขอขอบคุณสำหรับข้อเสนอแนะ ความช่วยเหลือ และ กำลังใจ ของเพื่อนๆ และ พี่ น้องทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

ท้ายที่สุดนี้ คุณประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้กับ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนมา รวมถึงผู้ที่มีพระคุณแก่ผู้เขียนทุกท่าน

ไพบุลย์ ดันศิริอนุสรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 วัตถุประสงค์	6
1.4 ขอบเขตการศึกษา	6
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2. วัสดุ และ กำลังของวัสดุ	9
2.1 คุณสมบัติของคอนกรีต	9
2.1.1 กำลังอัดของคอนกรีต	9
2.1.2 กำลังดึงของคอนกรีต	11
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเคียวของคอนกรีต	15
2.1.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	16
2.1.5 อัตราส่วนปิวส์ของ	18
2.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต	18
2.2.1 กำลังครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม	18
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเคียวของเหล็กเสริม	19
3. ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง	21
3.1 ทฤษฎีความน่าจะเป็น	21
3.1.1 ตัวแปรสุ่มและการกระจายของตัวแปรสุ่ม	21
3.1.2 ค่าสำคัญของกาการกระจาย	22
3.1.3 ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น	25
3.1.4 การจำลองฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น	26

สารบัญ (ต่อ)

3.2	วิธีการทางสถิติสำหรับค่าความปลอดภัยทางโครงสร้าง	28
3.3	ค่าดัชนีของความปลอดภัย	33
3.4	ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุก	36
3.4.1	น้ำหนักบรรทุกคงที่	36
3.4.2	น้ำหนักบรรทุกจร	37
3.5	ส่วนประกอบปลอดภัย	38
3.5.1	คอนกรีต	39
3.5.2	เหล็กเสริม	41
4.	สภาวะสุดท้ายที่คล้าย	55
4.1	โมเดลสำหรับการพิจารณาในสภาวะสุดท้าย	55
4.1.1	โมเดลของการกระจายหน่วยแรงอัดในหน้าตัดคอนกรีต	55
4.1.2	โมเดลของหน่วยแรงในเหล็กเสริม	55
4.1.3	ค่าความเครียดที่สภาวะสุดท้าย	57
4.1.4	ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีต	57
4.2	แรงดัด	58
4.2.1	กำลังดัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก	58
4.2.2	คุณสมบัติความเหนียวของชิ้นส่วน	60
4.2.3	อัตราส่วนเหล็กเสริมสมมูล	62
4.2.4	การวิเคราะห์	62
	ก. การกระจายหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า	62
	ข. การตรวจสอบผลของค่ากำลังดัดที่ใช้ออกแบบ	65
	ค. ค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมสูงสุด	70
	ง. ค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมต่ำสุด	73
4.2.5	การคำนวณออกแบบหน้าตัดคอนกรีตรับแรงดัด	75
4.3	แรงเฉือน	76
4.3.1	แรงเฉือนในคาน	76
	ก. หน่วยแรงเฉือนของคานคอนกรีต	76
	ข. กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็กปลอก	80
	ค. กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอก	81
	ง. ข้อเสนอเพื่อการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนทางเดียว	84

สารบัญ (ต่อ)

4.3.1 แรงเฉือนสองทิศทาง หรือ แรงเฉือนทงะดู	88
ก. พฤติกรรมของแผ่นพื้นที่บิดด้วยแรงเฉือนสองทิศทาง	88
ข. ข้อเสนอเพื่อการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนสองทาง	88
ค. การส่งผ่านของโมเมนต์ระหว่างเสาและพื้น	92
ง. กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดที่เสริมเหล็กปลอก	94
4.4 แรงบิด	96
4.4.1 ทฤษฎี Space Truss Analogy	96
4.4.2 สมการของการออกแบบสำหรับรับแรงบิด	98
4.4.3 หน้าตัดของเหล็กเสริม	98
4.4.4 การศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด	100
4.5 แรงอัด	102
4.5.1 เสาสั้น	102
ก. เสารับแรงอัดในแนวแกน	102
ข. การศึกษาพารามิเตอร์ k3	102
ค. เหล็กเสริมตามขวางและพฤติกรรมการโอบ	104
ง. เสารับน้ำหนักในแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด	107
จ. การศึกษาและเปรียบเทียบเชิงพฤติกรรม	111
ฉ. พิกัดควบคุมปริมาณเหล็กเสริม	111
ช. รูปการออกแบบเสาสั้น	115
4.5.2 เสายาว	116
ก. พฤติกรรมของเสาขูดคอนกรีตเสริมเหล็ก	116
ข. ตัวขยายโมเมนต์	116
ค. ค่าสถิติแฟนของเสา	120
ง. ความยาวประสิทธิผลของชิ้นส่วนรับแรงอัด	121
4.1 แรงยึดเหนี่ยวและระยะพัฒนากำลังของเหล็กเสริม	124
4.6.1 พฤติกรรมของระยะยึดรั้งและระยะทาบของเหล็กเสริม	127
4.6.2 ระยะยึดรั้งและระยะทาบของเหล็กเสริมรับแรงดึง	128
5. สภาพอะลุคชิตบริการ	134
5.1 การโก่งตัว	137
5.2 การแตกร้าว	142
5.3 การลั่นสะเทือน	147

สารบัญ (ต่อ)

5.4 ความล้ำ	149
5.5 การทนไฟ	153
5.6 ความคืบและการหดตัว	161
5.7 ความทนทาน	164
6. รูปและข้อเสนอนแนวทางกรออกแบบ	166
รายการอ้างอิง	174
ภาคผนวก	180
ประวัติผู้เขียน	191



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รายละเอียดของหัวข้อที่ทำการศึกษา	7
2.1 อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก กับ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ตามมาตรฐาน ISO3893	10
2.2 อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก กับ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ตามมาตรฐาน CEB-MC90	10
2.3 ค่ากำลังครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมคอนกรีต	19
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติกับค่าดัชนีของความปลอดภัย	34
3.2 ค่าดัชนีของความปลอดภัย β ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง ของ American National Standard.....	35
3.3 ค่าดัชนีของความปลอดภัย β ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของ Nordic Committee on Building Regulation	35
3.4 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของพื้นตามสถานะที่มี การควบคุมแบบที่ 1 (มีวิศวกรควบคุม)	44
3.5 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของพื้นตามสถานะที่มี การควบคุมแบบที่ 2 (ไม่มีวิศวกรควบคุม)	45
3.6 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานตามสถานะที่มี การควบคุมแบบที่ 1 (มีวิศวกรควบคุม)	46
3.7 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานตามสถานะที่มี การควบคุมแบบที่ 2 (ไม่มีวิศวกรควบคุม)	47
3.8 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของเสาตามสถานะที่มี การควบคุมแบบที่ 1 (มีวิศวกรควบคุม)	48
3.9 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ของเสาตามสถานะที่มี การควบคุมแบบที่ 2 (ไม่มีวิศวกรควบคุม)	49
3.10 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร	50
3.11 แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบปลอดภัยสำหรับพื้นคอนกรีต (สภาพการก่อสร้างที่มีวิศวกรควบคุม)	51
3.12 แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบปลอดภัยสำหรับพื้นคอนกรีต (สภาพการก่อสร้างที่ไม่มีวิศวกรควบคุม)	51
3.13 แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบปลอดภัยสำหรับคานคอนกรีต (สภาพการก่อสร้างที่มีวิศวกรควบคุม)	52

สารบัญตาราง(ต่อ)

3.14 แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบปลอดภัยสำหรับคานคอนกรีต (สภาพการก่อสร้างที่ไม่มีวิศวกรควบคุม)	53
3.15 แสดงการวิเคราะห์ค่าส่วนประกอบปลอดภัยของเหล็กเสริม	54
4.1 แสดงการวิเคราะห์ค่า α และค่า k'_3 ของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	63
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งตามกำลังอัดของคอนกรีต.....	69
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งตามกำลังดึงของเหล็กเสริม.....	69
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งตามปริมาณของเหล็กเสริม.....	70
4.5 ค่า ρ/ρ_b ที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อค่าดัชนีความเหนียวจากความโค้งมีค่าเท่ากับ 4	72
5.1 ค่าการโก่งตัวที่มากที่สุดจากการคำนวณที่ยอมให้ตาม ACI 318-95	141
5.2 ค่าความถี่วิกฤตในโครงสร้างที่รับการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเคลื่อนไหวของคน	148
5.3 พหามิติเตอร์ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง S และ N สำหรับเหล็กเสริมของ CEB-MC90	151

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงและกำลังอัดของคอนกรีต	14
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าวและกำลังอัดของคอนกรีต	14
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่กำลังอัดต่างๆ	16
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีต	18
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม	19
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมลักษณะเส้นตรงสองเส้น	20
3.1 ลักษณะการกระจายของตัวแปรสุ่ม	22
3.2 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวเลขสุ่มและตัวแปรสุ่ม	24
3.3 ฟังก์ชันของการกระจายสะสมของตัวเลขสุ่มและตัวแปรสุ่ม	24
3.4 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น	27
3.5 แสดงฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นของ $f_x(x)$ และ $f_y(y)$	29
3.6 ผลของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของ X และ Y	30
3.7 ผลของการกระจายของ X และ Y	30
3.8 แสดงการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือทางโครงสร้าง	31
3.9 ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักรวมทุกครั้งที่	36
3.10 ค่าตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร	38
3.11 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของกำลังอัดของคอนกรีต	40
3.12 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของหน้าตัดคอนกรีต	40
3.13 ส่วนประกอบปลอดภัยของคอนกรีต.....	41
3.14 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของกำลังครากของเหล็กเสริม	42
3.15 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม.....	42
3.16 ค่าส่วนประกอบปลอดภัยของเหล็กเสริม	43
4.1 โมเดลของหน่วยแรงอัดของคอนกรีต	56
4.2 โมเดลของหน่วยแรงในเหล็กเสริม	56
4.3 การกำหนดความเครียดที่สภาวะสุดท้าย	57
4.4 ค่าความเครียดที่สภาวะสุดท้ายของคอนกรีต	58
4.5 สภาวะเมื่อเกิดกำลังดัดประลัยของคาน	59
4.6 การเสียรูปของชิ้นส่วนรับแรงดัด	60
4.7 โมเดลของการกระจายหน่วยแรงอัดในหน้าตัดคอนกรีต	62
4.8 ค่า α ตามกำลังอัดของคอนกรีต	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

4.9 ค่า k_3' ตามกำลังอัดของคอนกรีต.....	64
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งตามกำลังอัดของคอนกรีต	66
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งตามกำลังดึงของเหล็กเสริม.....	67
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งตามปริมาณเหล็กเสริม	68
4.13 ค่าดัชนีความเหนียวจากความโค้ง n ของหน้าตัดที่แปรเปลี่ยนตาม p/ρ_b	71
4.14 สัดส่วนปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดตามสัดส่วนกำลังของคอนกรีตและเหล็กเสริม f_{ck}/f_{yk}	73
4.15 กราฟสำหรับคำนวณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กใดๆ	75
4.16 การกระจายของแรงเฉือน	76
4.17 สภาพของหน่วยแรงบนชิ้นส่วนที่เล็กลงๆ	77
4.18 ทิศทางการแตกร้าวในคานช่วงเดียว	78
4.19 เส้นแสดงหน่วยแรงหลักในคานที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอ	78
4.20 หน่วยแรงเฉือนบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กในจุดมคดที่แตกร้าว	79
4.21 ส่วนยื่นของคอนกรีตที่ทำหน้าที่เหมือน Strut	82
4.22 แรงภายในโครงข้อหมุนอุปมัย	82
4.23 กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับคอนกรีตกำลังปกติ	85
4.24 กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับคอนกรีตกำลังสูง	85
4.25 ลักษณะการวิบัติของแรงเฉือนสองทิศทาง	89
4.26 Truss Model สำหรับการส่งผ่านแรงเฉือนที่เสถียรใน	89
4.27 เปรียบเทียบหน้าตัดวิกฤตที่เสนอโดย ACI - CEB	91
4.28 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนที่เสนอโดย ACI - CEB	91
4.29 การส่งผ่านของโมเมนต์	93
4.30 การกระจายของหน่วยแรงเฉือน	94
4.31 หน้าตัดวิกฤตของหน้าตัดที่เสริมเหล็กปลอก	95
4.32 เปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดของคานหน้าตัดเต็มและคานหน้าตัดกลวง	96
4.33 Thin-Walled Tube and Space Truss Analogy	98
4.34 ส่วนของด้านข้างแนวตั้งของ Space Truss	99
4.35 เปรียบเทียบกำลังรับแรงบิดกับผลการทดสอบ	101
4.36 เปรียบเทียบการกระจายข้อมูลทางสถิติของ T_{test}/T_{calc}	101
4.37 ค่าพารามิเตอร์ k_3 ที่คอนกรีตกำลังต่างๆ	103
4.38 เปรียบเทียบกราฟหน้าหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว และ เสาปลอกเกลียว	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

4.39 แรงดันจากการโอบของเสา	105
4.40 การกระจายของความเครียดที่จุดต่างๆของเส้นโค้ง Interaction Curve	108
4.41 โดอะแกรมของความเครียดสำหรับการบิดของเสาเนื่องจากน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง	108
4.42 หน้าตัดเสากับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางที่สภาวะประลัย	109
4.43 Interaction Curve ตามลักษณะการเรียงเหล็กเสริม	112
4.44 Interaction Curve ตามลักษณะการกระจายหน่วยแรง	113
4.45 Interaction Curve ตามกำลังดึงของเหล็กเสริม	114
4.46 แรงกระทำและโมเมนต์ในเสาขุด	117
4.47 โมเมนต์ในเสาที่โก่งตัว	117
4.48 เปรียบเทียบสมการที่ใช้คำนวณ EI เปรียบเทียบกับ EI ที่ได้จากการวิเคราะห์ จาก โดอะแกรมของโมเมนต์และความโค้ง	121
4.49 ความยาวประสิทธิผลของเสา	122
4.50 Jackson and Moreland Alignment Chart	123
4.51 ระยะยัดรั้งของเหล็กเสริม	126
4.52 แรงและหน่วยแรงบนชิ้นส่วนคาน	126
4.53 การทดสอบการยึดเหนี่ยวโดยการดึงออกและการกระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยว	126
4.54 รอยแตกร้าวภายในที่เกิดขึ้นโดยการดึงที่ปลายทั้งสองข้างของเหล็กเสริมที่ฝัง อยู่ในคอนกรีต	129
4.55 แรงระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกแยกในรูปที่ 4.54	129
4.56 การแตกแยกรอบๆการต่อทาบ	129
4.57 รูปแบบบิดจากการแตกแยก	130
4.58 เหล็กเสริมตามขวาง	130
4.59 เปรียบเทียบสมการสำหรับคำนวณหาค่าแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยซึ่งต่อทาบและ ฝังอยู่ในคอนกรีตกับผลการทดสอบ	132
5.1 สภาวะต่างๆของหน่วยแรงและการแตกร้าวในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับน้ำหนัก บรรทุกใช้งาน	135
5.2 การหดตัวของชิ้นส่วนที่เสริมเหล็กไม่สมมาตร	136
5.3 การกระจายความเครียดและหน่วยแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเริ่มแรกและเมื่อรับน้ำหนัก บรรทุกระยะยาวในชิ้นส่วนรับแรงดัดเมื่อเกิดการคืบของคอนกรีต	139
5.4 การแปรเปลี่ยนตัวคูณ ζ ที่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการโก่งตัวระยะยาวที่กำหนดโดย ACI318-95	141

สารบัญญากาศ (ต่อ)

5.5 การแตกร้าวของแท่งปริซึมรับแรงตามแนวแกน	143
5.6 หน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมในแท่งปริซึมแตกร้าว	144
5.7 พฤติกรรมกำลังกับการเสียรูปของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงที่แสดงผลของ Tension Stiffening	145
5.8 โมเดลความสัมพันธ์ระหว่าง S และ N สำหรับคอนกรีตของ CEB-MC90	150
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S และ N สำหรับคอนกรีตของ CEB-MC90	151
5.10 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กข้ออ้อย	152
5.11 ความสามารถในการทนไฟของโครงสร้างสำหรับคานช่วงเดียว	154
5.12 ความสามารถในการทนไฟของโครงสร้างสำหรับคานต่อเนื่อง	155
5.13 ความสามารถในการทนไฟของโครงสร้างสำหรับเสา	156
5.14 จุดหนุ่มีภายในของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างการทดสอบการทนไฟ	157
5.15 จุดหนุ่มีภายในของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างการทดสอบการทนไฟ สำหรับอนวนคอนกรีตมวลเบา	158
5.16 กราฟการลดค่ากำลังของวัสดุกับค่าจุดหนุ่มี	159
5.17 กราฟการลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับค่าจุดหนุ่มี	160
5.18 เส้นโค้งการคืบตัวโดยทั่วไปของคอนกรีตที่รับหน่วยแรงอัดในแนวแกนคงที่	162
5.19 เส้นโค้งการหดตัวโดยทั่วไปของคอนกรีต	163