

กำลังรับแรง เดือนของคานคอนกรีต เสริม เหล็ก ใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก



นายพิทยา เจนเกียรติฟู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-567-221-1

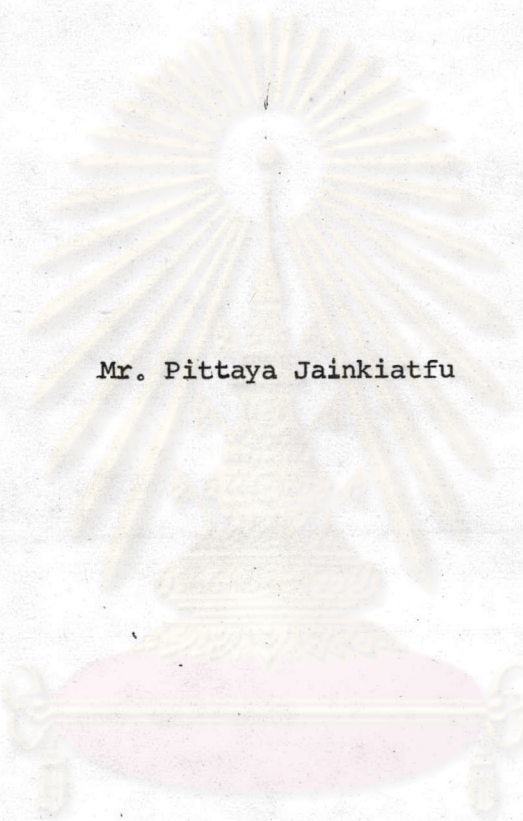
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

011967

116674018

SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

MADE OF VERY HIGH STRENGTH CONCRETE



Mr. Pittaya Jaikiatfu

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University


1986

ISBN-974-567-221-1

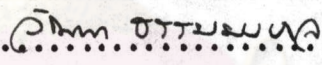
หัวข้อวิทยานิพนธ์      กำลังรับแรง เดือนของคานคอนกรีต เสริม เหล็ก ใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก  
โดย                              นายพิทยา เจนเกียรติสุข  
ภาควิชา                              วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลีมสุวรรณ

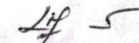


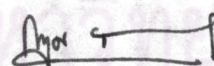
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

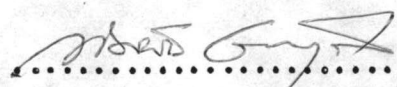
  
..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรราชัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..........ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ วัฒนา ธรรมมงคล)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลีมสุวรรณ)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. การุญ จันทรางศุ)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กำลังรับแรง เมื่อนของคานคอนกรีต เสริม เหล็ก ใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก
ชื่อนิสิต	นายพิทยา เจนเกียรติฟู
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ล้อมสุวรรณ
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2529



### บทคัดย่อ

ในมาตรฐานการก่อสร้างโดยทั่วไป ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบที่มีผลต่อด้านกำลังและพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างมักจะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต และเนื่องจากคุณสมบัติที่ต่างไปของคอนกรีตกำลังสูงมากจากคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดา จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการตรวจสอบความเป็นไปได้ของมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีต เสริม เหล็กทางด้านกำลังรับแรง เมื่อนเมื่อทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบคานคอนกรีต เสริม เหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 15x30 ซม. ยาวทั้งหมด 230 ซม. ช่วงคานยาว 210 ซม. โดยมีอัตราส่วนช่วงแรง เมื่อนต่อความลึกประสิทธิผล 3.91 ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว 5.69 % จำนวน 8 คาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก จำนวน 4 คาน และชุดที่ทำการแปรผันอัตราส่วนการเสริมเหล็กปลอก จาก 0.160-0.645 % จำนวน 4 คาน โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในงานวิจัยอยู่ในช่วง 672-801 กก./ซม<sup>2</sup>. ในการทดสอบ ทำการบันทึกน้ำหนักบรรทุก ณ จุดแตกร้าวและจุดวิบัติ ความเครียดของผิวคอนกรีตที่ผิวบนรับแรงอัดและในช่วงแรง เมื่อน ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอก การโค้งตัวและลักษณะการแตกร้าวจนกระทั่งวิบัติ

ผลการทดสอบบ่งชี้ว่า กำลังรับแรง เมื่อนของคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอกจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น สมการคำนวณของมาตรฐาน ACI ให้ค่ากำลังรับแรง เมื่อนต่ำกว่า 80 ถึง 114 % สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นโดยปริมาณการ เสริม เหล็กตามยาวมีค่าสูง แต่สมการของ Zsutty ยังคงสามารถคำนวณกำลังรับแรง เมื่อน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงและ ณ จุดประลัยของคานคอนกรีต เสริม เหล็ก ใช้คอนกรีตกำลังสูงมากได้ในด้านปลอดภัยอย่างน่าพอใจ

และเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอกใช้  
คอนกรีตกำลังสูงมาก ได้มีการนำเสนอสมการใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือน  
ณ จุดแตกร้าวนแนวทแยงและจุดประลัยของคาน สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของคานชุดที่เสริม  
เหล็กปลอกตั้ง กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบให้ค่าที่มากกว่ากำลังรับแรงเฉือนโดย  
มาตรฐาน ACI



ศูนย์วิทยพัชยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title      Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Made  
                         of Very High Strength Concrete

Name                Mr. Pittaya Jainkiatfu

Thesis Advisor    Associate Professor Ekasit Limsuwan, Ph.D.

Department        Civil Engineering

Academic Year    1986



#### ABSTRACT

In current codes, parameters used in structural design which affecting the strength and behavior of structural members are related to compressive strength of concrete. Being affected by different properties of very high strength concrete from ordinary concrete, it becomes necessary to check the validity of shear strength design methods when applied to reinforced concrete beams made of very high strength concrete. In this research, 8 rectangular reinforced concrete beams in 15x30 cm. and total length of 230 cm., span length 210 cm., shear span to effective depth ratio 3.91 and longitudinal tensile reinforcement ratio 5.69 % were tested. Experimental program were categorized into 2 series: First sery composed of 4 reinforced very high strength concrete beams without stirrups: Second sery composed of 4 reinforced very high strength concrete beams with web reinforcement ratio varies from 0.160-0.645 %. The specimens have compressive strength between 672-801 ksc. Loads at cracking and failure, strains of concrete surface at compressive top fiber and in shear span, strains of longitudinal tensile reinforcement and stirrup, deflections and crack patterns until failure were monitored and recorded during the test.

Test results indicate that shear strength of beams without stirrups increased with the increase of concrete strength. ACI Building Code Equations underestimate the shear strength by 80 to 114 %, particularly for higher concrete strength combined with high longitudinal-steel ratio. But Zsutty's equations can predict the shear strength at diagonal cracking and at ultimate closely enough to be used for reinforced very high strength concrete beams without stirrups. New equations are proposed to more accurately predict diagonal cracking and ultimate shear strength of slender reinforced very high strength concrete beams without stirrups. For beams with vertical stirrups, all test strengths exceeded those predicted following present ACI code procedures.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ



ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลีมสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ วัฒนา ธรรมมงคล รองศาสตราจารย์ ดร. การุญ จันทรางศุ และรองศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติศรี ที่ได้ให้คำแนะนำอัน เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นอย่างมาก

ผู้เขียนขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้ เงินอุดหนุนงานวิจัยนี้บางส่วน และขอขอบคุณ บริษัท คอนกรีตบางละมุง จำกัด ที่ได้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ รวมทั้งนายชัชวาลย์ เศรษฐบุตร นายไวพจน์ นาวานุกูล นายกรกฎ วิจิตรพงศ์ และเพื่อนพี่น้องที่ทุกคนที่อุทิศกำลังกาย กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยนี้ เสร็จสมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์อันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกถึงพระคุณในการอบรมให้การศึกษาแก่ผู้เขียนตลอดมา

พิทยา เจนเกียรติสุข

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	.....	ช
สารบัญ	.....	ณ
รายการตารางประกอบ	.....	ฎ
รายการรูปประกอบ	.....	ฏ
สัญลักษณ์	.....	ค
บทที่ 1 บทนำ	.....	1
1.1 งานวิจัยที่ผ่านมา	.....	2
1.1.1 คอนกรีตกำลังสูง	.....	2
1.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	.....	8
1.2 วัตถุประสงค์และขอบข่ายการวิจัย	.....	11
บทที่ 2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	.....	13
2.1 ตัวอย่างทดสอบ	.....	13
2.2 วัสดุ	.....	13
2.2.1 เหล็กเสริม	.....	13
2.2.2 คอนกรีตกำลังสูงมาก	.....	15
2.2.3 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ	.....	17
2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	.....	17
2.4 การเตรียมเพื่อการทดสอบ	.....	18
2.5 ขั้นตอนการทดสอบ	.....	19
2.6 ผลการทดสอบ	.....	19
2.6.1 คานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก	.....	20
2.6.2 คานชุดที่เสริมเหล็กปลอก	.....	23
2.6.3 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ	.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	30
3.1 การรับแรงดัดของคานคอนกรีต เสริม เหล็ก .....	30
3.1.1 โมเมนต์ดัดแตกร้าว .....	30
3.1.2 โมเมนต์ดัด ณ จุดที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคลาก ..	31
3.1.3 โมเมนต์ดัดปลาย .....	33
3.1.4 ระยะการโก่งตัว .....	38
3.2 การรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริม เหล็ก .....	42
3.2.1 พฤติกรรมของแรงเฉือนในคาน .....	42
3.2.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริม เหล็กไม่เสริม เหล็กปลอก	49
3.2.3 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริม เหล็กที่เสริม เหล็กปลอก	54
บทที่ 4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ .....	57
4.1 กำลังรับแรงดัด .....	57
4.2 กำลังรับแรงดึง .....	59
4.3 กำลังรับแรงเฉือน .....	59
4.3.1 น้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคาน	60
4.3.2 กำลังรับแรงเฉือนล้วนของคอนกรีตกำลังสูงมาก .....	62
4.3.3 กำลังรับแรงเฉือนของคานชุดที่ไม่เสริม เหล็กปลอก .....	63
4.3.4 กำลังรับแรงเฉือนของคานชุดที่เสริม เหล็กปลอก .....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	69
เอกสารอ้างอิง .....	71
ภาคผนวก .....	142
ประวัติผู้เขียน .....	147

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
2.01	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ .....	80
2.02	ผลการตรวจสอบคุณสมบัติและกำลังรับแรงดึงของหน้าตัด เหล็ก เสริม ...	81
2.03	การทดลองผสมคอนกรีตโดยสัดส่วนผสมต่าง ๆ กัน .....	82
2.04	สัดส่วนการผสมคอนกรีตกำลังสูงมากในงานวิจัยนี้ .....	83
2.05	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น .....	83
2.06	รายละเอียดจริงของคานตัวอย่าง .....	84
4.01	กำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตกำลังสูงมากและการ เปรียบ เทียบ ...	85
4.02	โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากและการ เปรียบ เทียบ ...	86
4.03	กำลังรับแรง เหนือฉนวนของคอนกรีตกำลังสูงมาก .....	87
4.04	กำลังรับแรง เหนือของคานทดสอบชุดไม่ เสริม เหล็กปลอก .....	88
4.05	การ เปรียบ เทียบหน่วยแรง เหนือทดสอบต่อหน่วยแรง เหนือจากการคำนวณ ของคานชุดไม่ เสริม เหล็กปลอก .....	89
4.06	ข้อมูลที่ใช้หาความสัมพันธ์ของสมการที่ใช้คำนวณหน่วยแรง เหนือของคาน ชุดที่ไม่ เสริม เหล็กปลอก .....	90
4.07	การ เปรียบ เทียบหน่วยแรง เหนือทดสอบต่อหน่วยแรง เหนือจากการคำนวณ โดยสมการที่เสนอของคานชุดที่ไม่ เสริม เหล็กปลอก .....	91
4.08	กำลังรับแรง เหนือของคานทดสอบชุดที่ เสริม เหล็กปลอก .....	92
4.09	การ เปรียบ เทียบหน่วยแรง เหนือทดสอบกับหน่วยแรง เหนือจากการคำนวณ ของคานชุดที่ เสริม เหล็กปลอก .....	93
ผ.01	ข้อมูลความ เกรียดที่ผิวคอนกรีตและ เหล็ก เสริมตามยาว ณ จุดกึ่งกลางคาน	144
ผ.02	ความต้านทานต่อแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำกับชิ้นส่วนคอนกรีตอื่น .....	144

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 รายละเอียดการ เสริม เหล็กของตัวอย่างทดสอบ .....	94
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียดของ เหล็ก เสริมที่ใช้ในงานวิจัย ..	95
2.3 ปริมาณคละของหิน .....	96
2.4 ปริมาณคละของทราย .....	97
2.5 แสดงแบบหล่อคานคอนกรีต .....	98
2.6 รายละเอียดตำแหน่งการติดตั้ง เกจชนิดไฟฟ้าบน เหล็ก เสริม .....	99
2.7 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง เกจที่มิดตัวอย่าง .....	100
2.8 แสดงการติดตั้ง เครื่องมือทดสอบ .....	100
2.9 ภาพถ่ายชุด เครื่องมือทดสอบพร้อมจะทำการทดสอบ .....	101
2.10 แสดงอุปกรณ์การอ่านค่าความ เครียด .....	102
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความ เครียดของแท่งคอนกรีต ทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน BO-5, BO-7, BO-28 และ BO-56 ..	103
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความ เครียดของแท่งคอนกรีต ทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน BW-D, BW-3D4, BW-D2 และ BW-D4 ..	104
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมาจากงานวิจัยนี้ .....	105
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังดึงแยกตัว ( $f_{SP}$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมาจากงานวิจัยนี้ .....	106
2.15 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วง แรงเฉือนของคาน BO-5 .....	107
2.16 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความ เครียด ของเหล็ก เสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-5 .....	107
2.17 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความ เครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วง แรงเฉือนของคาน BO-5 .....	108
2.18 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วง แรงเฉือนของคาน BO-7 ...	108
2.19 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความ เครียดของผิวคอนกรีตและความ เครียด ของเหล็ก เสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-7 .....	109
2.20 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความ เครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วง แรงเฉือนของคาน BO-7 .....	109

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

2.21	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BO-28	... 110
2.22	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-28	..... 110
2.23	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BO-28	..... 111
2.24	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BO-56	... 111
2.25	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-56	..... 112
2.26	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BO-56	..... 112
2.27	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-D	... 113
2.28	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-D	..... 113
2.29	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-D	..... 114
2.30	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-D	114
2.31	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-3D4	... 115
2.32	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-3D4	..... 115
2.33	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-3D4 (หยุดการอ่านภายหลัง 26 ดัน)	..... 116
2.34	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-3D4	..... 116

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.35 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-D2	... 117
2.36 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-D2	..... 117
2.37 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-D2	..... 118
2.38 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-D2	118
2.39 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-D4	... 119
2.40 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-D4	..... 119
2.41 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-D4	..... 120
2.42 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-D4	120
2.43 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก	..... 121
2.44 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก	..... 121
2.45 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตที่ผิวบนที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก	..... 122
2.46 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตผิวบนที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก	..... 122
2.47 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวเส้นบนของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก	..... 123
2.48 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวเส้นบนของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก	..... 123

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

2.49	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของ เหล็ก เสริมตามยาว เส้นล่าง ของคานขุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก .....	124
2.50	ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของ เหล็ก เสริมตามยาว เส้นล่าง ของคานขุดที่เสริมเหล็กปลอก .....	124
2.51	ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคานขุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก ...	125
2.52	ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคานขุดที่เสริมเหล็กปลอก ...	126
3.1	แรงอัดลัพธ์ของคอนกรีต เทนนิ่งแกนสะเทิน .....	127
3.2	หน้าตัดของคานคอนกรีต เสริม เหล็กตามยาวรับแรงดึง เมื่อรับโมเมนต์ ...	127
3.3	หน้าตัดของคานคอนกรีต เสริม เหล็กตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด เมื่อรับ โมเมนต์ .....	127
3.4	การกระจายหน่วยแรงอัดในบริเวณรับแรงอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI (318-83) .....	128
3.5	หน้าตัดของคานคอนกรีต เสริม เหล็กตามยาวรับแรงดึง เมื่อรับโมเมนต์ตัดประลัย	128
3.6	หน้าตัดของคานคอนกรีต เสริม เหล็กตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด เมื่อรับ โมเมนต์ตัดประลัย .....	129
3.7	กำลังของคอนกรีตถูกหน่วยแรงกระทำ 2 แกน โดย $f_u$ = กำลังของ คอนกรีตถูกหน่วยแรงกระทำแกนเดียว .....	129
3.8	กำลังของคอนกรีตภายใต้ระบบหน่วยแรง 2 มิติ .....	130
3.9	วงกลม Mohr ใช้ในการหาค่าหน่วยแรงเฉือนล้วนของคอนกรีต ...	130
3.10	แรงเฉือน การไหลของแรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือนในคานเนื้อเดียว คุณสมบัติสมำเสมอ .....	131
3.11	สภาพหน่วยแรงของชั้นส่วนสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ .....	131
3.12	ก. เส้นแสดงหน่วยแรงหลักในคานเนื้อเดียวคุณสมบัติสมำเสมอ ...	132
	ข. ทิศทางของรอยแตกร้าวในคานช่วงเดียว .....	132

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.13	หน่วยแรงเฉือนบนหน้าตัดคอนกรีต เสริมเหล็กแตร้าวในอุดมคติ	..... 132
3.14	การกระจายแรงเฉือนใหม่ภายหลังการเกิดรอยแตร้าวแนวทแยง	..... 133
3.15	การแปรผันในกำลังรับแรงเฉือนที่ขึ้นกับค่า $a/d$ ของคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	133
3.16	ชนิดของการวิบัติในความลึก, $a/d \leq 1.0$	..... 134
	ก. Arch action	..... 134
	ข. ชนิดของการวิบัติ	..... 134
3.17	ชนิดของการวิบัติในคานสั้น, $1.0 < a/d \leq 2.5$	..... 134
3.18	การวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยงหรือแบบ Tooth Cracking ในคานความยาวปานกลาง, $2.5 < a/d \leq 6.0$	..... 134
3.19	ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีเหล็กปลอกคอนกรีตระหว่างรอยแตร้าวทำหน้าที่เหมือน Struts	..... 135
3.20	แรงภายในในโครงข้อหมุนอุปมัย	..... 135
3.21	การกระจายแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอก	... 135
4.1	เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานจากการคำนวณและการทดสอบ	..... 136
4.2	เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตร้าว ( $f_r$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมากจากงานวิจัยนี้	..... 137
4.3	เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนล้วน ( $v_{ps}$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมากจากงานวิจัยนี้	..... 137
4.4	อิทธิพลของกำลังอัดประลัยต่อกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอก	..... 138
4.5	อิทธิพลของกำลังอัดประลัยต่อกำลังรับแรงเฉือนส่วนที่เหลือภายหลังการเกิดรอยแตร้าวแนวทแยง	..... 138



รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 สมการในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้คอนกรีต กำลังสูงมากไม่เสริมเหล็กปลอกในรูปแบบของสมการในมาตรฐาน ACI (318-83) .....	139
4.7 สมการในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้คอนกรีต กำลังสูงมากไม่เสริมเหล็กปลอกในรูปแบบของ Zsutty .....	140
4.8 ความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกตั้ง .....	141
ผ.1 แรงภายในที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแรงยึดเหนี่ยว .....	145
ผ.2 ชิ้นส่วนของคอนกรีตยื่น .....	145
ผ.3 ความเครียดที่หน้าตัดกึ่งกลางคานของคานทดสอบ .....	146

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

$a$	=	ช่วงแรงเฉือน (Shear Span)
	=	ความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เหนือแกนสะเทิน
$a_b$	=	ความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สภาวะวิบัติแบบสมดุลย์
$A_i$	=	พื้นที่หน้าตัดจากผิวนอกของคานถึงแนวที่พิจารณาหน่วยแรงเฉือน
$A_s, A'_s$	=	พื้นที่หน้าตัด เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด
$A_v$	=	พื้นที่หน้าตัด 2 ข้างของเหล็กปลอก
$b$	=	ความกว้างของหน้าตัดคาน
$\beta$	=	มุมที่เหล็กปลอกทำกับแนวราบ
$\beta_1$	=	อัตราส่วนความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เหนือแกนสะเทินต่อความลึกจากผิวบนรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน, $a/c$
$c$	=	ความลึกจากผิวบนรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน
$c_1, c_2, c_3, c_4$	=	ค่าคงที่
$c_b$	=	ระยะจากผิวบนรับแรงอัดถึงแกนสะเทินที่สภาวะวิบัติแบบสมดุลย์
$C, C_c$	=	แรงอัดลัพธ์ของบริเวณรับแรงอัด เหนือแกนสะเทิน
$C_d$	=	แรงภายในตัวค้ำยันรับแรงอัด ในแนวทแยง
$C_s$	=	แรงอัดของเหล็กเสริมตามยาวเส้นบน
$d$	=	ความลึกประสิทธิผล (Effective Depth)
$d'$	=	ระยะของจุดศูนย์กลางถ่วง เหล็กเสริมตามยาวรับแรงอัดจากผิวบนรับแรงอัด
$EI$	=	ความแข็งแกร่งต่อแรงดัด (Flexural Rigidity)
$E_c$	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
$E_s, E'_s$	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด
$\epsilon$	=	ความเครียด
$\epsilon_o$	=	ความเครียดที่ตำแหน่งกำลังอัดประลัยของคอนกรีต $\approx 0.002$
$\epsilon_s, \epsilon'_s$	=	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงและรับแรงอัด
$\epsilon_u$	=	ความเครียดที่ผิวบนรับแรงอัด ณ จุดวิบัติ
$\epsilon_y, \epsilon'_y$	=	ความเครียดคลากของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงและรับแรงอัด

สัญลักษณ์ (ต่อ)

$f_c, f'_c$	=	หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต
$f_r$	=	โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต
$f_s, f'_s$	=	หน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดใน เหล็กเสริม
$f_t$	=	กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต
	=	หน่วยแรง
$f_{t(max)}$	=	หน่วยแรงดึงหลัก (Principal Tensile Stress)
$f'_t$	=	หน่วยแรงดึงที่ระนาบทำมุม $\alpha$ กับแกนราบของคาน
$f_u$	=	กำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กเสริม (Ultimate Tensile Strength)
$f_y, f'_y$	=	กำลังคลาก (Yield Strength) ของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด
$f_{yw}$	=	กำลังคลากของเหล็กปลอก
$h$	=	ความลึกของหน้าตัดคาน
$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน
$I_{cr}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวแปลง
$I_e$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล
$jd$	=	แขนของแรงคู่ควมระหว่างแรงดึงและแรงอัดในหน้าตัดคาน
$k$	=	ค่าคงที่
$kd$	=	ความลึกของแกนสะเทินจากผิวบนรับแรงอัด
$k_1$	=	$\frac{\text{หน่วยแรงอัดเฉลี่ยในคอนกรีต}}{\text{หน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีต}}$
$k_2$	=	$\frac{\text{ระยะจากผิวบนรับแรงอัดถึงจุดที่แรงอัดลัทธิกระทำ}}{\text{ระยะจากผิวบนรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน}}$
$k_3$	=	$\frac{\text{หน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีต}}{\text{กำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก}}$
$L$	=	ความยาวช่วงคานระหว่างจุดรองรับ
$M$	=	โมเมนต์คัตที่หน้าตัดใด ๆ
$M_a$	=	โมเมนต์คัตสูงสุดขณะที่คำนวณระยะการโค้งตัว
$M_{cr}$	=	โมเมนต์คัตแตกร้าว

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

$M_{uf}$	=	โมเมนต์ตัดประลัยเนื่องจากแรงตัด
$M_y$	=	โมเมนต์ตัด ณ จุดที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคาน
$n, n'$	=	อัตราส่วน $\frac{E_s}{E_c}$ และ $\frac{E'_s}{E_c}$
$P$	=	น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานเหล็ก
$q$	=	การไหลของแรงเฉือน
$R$	=	อัตราส่วนของความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวโดยคอนกรีตส่วนที่ยึดจริง
$r$	=	อัตราส่วนการเสริมเหล็กปลอก (Web Reinforcement Ratio) = $A_w/b_s$
$S$	=	ระยะเรียงของเหล็กปลอกตามแนวราบ
	=	ความสูงของรอยแตกกว้างจากแรงตัดในช่วงแรงเฉือน
$S_{GL}$	=	ความสูงของรอยแตกกว้างจากแรงตัดในช่วงแรงตัด
$S'$	=	ความลึกประสิทธิผลของตัวค้ำยันในโครงข้อหมุนอุปมัย
$T$	=	แรงดึงในเหล็กเสริม
$T_s$	=	แรงลัพธ์ของเหล็กปลอก
$V, v$	=	แรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือน
$V_a$	=	แรงเฉือนต้านทานโดยแรงยึดประสานของมวลรวม
$V_c, v_c$	=	กำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกกว้างแนวทแยง
$V_{cz}$	=	แรงเฉือนต้านทานโดยคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกกว้าง
$V_d$	=	แรงเฉือนต้านทานโดยเหล็กเสริมตามยาว
$v_{PS}$	=	หน่วยแรงเฉือนล้วนของคอนกรีต
$V_s$	=	แรงเฉือนที่รับโดยเหล็กปลอก
$V_u, v_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือน ณ จุดประลัยของคานที่เสริมเหล็กปลอก
$V_{uo}, v_{uo}$	=	กำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือน ณ จุดประลัยของคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอก
$v'$	=	หน่วยแรงเฉือนบนระนาบทำมุม $\alpha$ กับแนวราบของคาน
$x$	=	ระยะวัดจากแกนสะเทินไปสู่ผิวรับแรงอัด
	=	ระยะทางตามความยาวคานจากจุดรองรับ
$X_t$	=	ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวนอกรับแรงดึง
$\bar{X}$	=	ระยะจากแนวแรงอัดลัพธ์ถึงแกนสะเทิน
$y$	=	ระยะการโค้งตัวในแนวตั้ง
$\bar{y}$	=	ระยะจากแกนสะเทินถึงจุดศูนย์กลางของพื้นที่ $A_i$

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

$\gamma$	=	มุมที่รอยแตกร้าวแนวทแยงทำกับแนวราบ
$\alpha$	=	มุมที่หน่วยแรงดึงทำกับแกนราบของคาน
$\eta$	=	ตัวคูณประกอบเมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความลึกที่ต่างกันของคาน
$\phi$	=	มุม เบี่ยงเบน (Curvature)
$\rho, \rho'$	=	ปริมาณ เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึง $\frac{A_s}{bd}$ และแรงอัด $\frac{A'_s}{bd}$
$\rho_b$	=	ปริมาณ เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงที่สภาวะวิบัติแบบสมดุลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย