4

# กำลังของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ

นายนันตชัย นนทนานันท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
น.ศ. 2532

ISBN 974-576-481-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015453
I15924117

# STRENGTH OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS SUBJECT TO REPEATED LOADS

Mr. Nantachai Nontananant

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

1989

ISBN 974-576-481-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กำลังของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ

โดย นายนันดชัย นนทนานันท์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ วัฒนา ธรรมมงคล)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิมิตชัย นนทนานันท์ : กำลังของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ (STRENGTH OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS SUBJECT TO REPEATED LOADS) : อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ 183 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนทั้งภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ และหลังการกระทำซ้ำ โดยพิจารณาอัตราส่วนของการอัดแรง และสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำเป็นตัวแปรหลัก การศึกษาได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10 x 18 ซม. ใช้ช่วงยาวทดสอบ 120 ซม. จำนวน 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 2 ชุด ซึ่งเป็นคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27 และ 0.59 ตามลำดับ ในแต่ละชุดจะใช้คาน 1 ตัวอย่างเพื่อทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์จนถึงขั้นวิบัติเพื่อใช้เป็นคานเปรียบเทียบ ส่วนคานที่เหลือได้ทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ โดยกำหนดขนาดของช่วงน้ำหนักบรรทุกที่ 20-50 %, 40-70 % และ 50-90 % ของกำลังประลัยจากการวิเคราะห์ หากไม่เกิดการวิบัติหลังจากการกระทำซ้ำเมื่อครบ 2,000,000 รอบ จะทดสอบต่อด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์จนกระทั่งคานวิบัติ

ผลการทดสอบบ่งชี้ว่า คานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนได้มีการเพิ่มขนาดของการแอ่นตัว และมีการขยายตัวของรอยแตกร้าวตามจำนวนรอบของการกระทำซ้ำที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่ปรากฏว่ามีคานตัวอย่างใดเกิดการวิบัติจากความล้าของการกระทำซ้ำ ผลจากการกระทำซ้ำทำให้คานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนเกิดการแอ่นตัวถาวร โดยที่ค่าการแอ่นตัวจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดของน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังประลัยของคานหลังการกระทำซ้ำมิได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธี Strain Compatibility และให้ค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ จึงนับได้ว่าคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนเมื่อผ่านการกระทำซ้ำจำนวนหนึ่งยังคงให้ค่ากำลังประลัยในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

NANTACHAI NONTANANANT : STRENGTH OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS SUBJECT TO REPEATED LOADS : PROF. EKASIT LIMSUWAN , Ph.D.183 pp.

In this study the behaviors of partially prestressed concrete beams have been considered under static and alternative loading with two variables ; partial prestress ratios and applied load ratios. Eight rectangular beams with 10 x 18 cm.in cross section and 120 cm. span length were catagarized into 2 series with partial prestressed ratios of 0.27 and 0.59,respectively. One beam from each series was tested under static monotonically increasing loading up to failure as a reference beam. The rest of them from each series were tested under alternative loading with ranges 20 - 50 % , 40 - 70 % and 50 - 90 % of analytical ultimate loads. After the test of 2,000,000 cycles without any defects then static loading tests would be commenced to failure for examining the effect of pre-history loading.

Test results indicated that deflection and crack were increased with number of loading cycles. But there was no evidience that the beams were failed due to fatigue under repeated loading. Even repeated loading had induced permanent deflection of the beams but the ultimate strength was not much influenced by such loading after 2,000,000 cycles. The results have shown good agreement of the ultimate strength with the results from strain compatibility analysis. However, the ultimate strength was slightly stronger than their reference beams so it can be proved that the partially prestressed concrete beam under repeated loading is conservative in strength.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ วัฒนา ธรรมมงคล ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร และศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก

ผู้เขียนขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้เงินอุดหนุนงานวิจัยนี้บางส่วน และขอขอบคุณบรรดาเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและห้องปฏิบัติการทดสอบ ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ รวมทั้ง นายกรวุฒิ ต้นเนียม และเพื่อนพ้องน้องพี่ทุกคนที่อุทิศกำลังกาย กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์อันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกถึงพระคุณในการอบรมให้การศึกษาแก่ผู้เขียนตลอดมา

นันตชัย นนทนานันท์

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ ..... 1

1.1 บทนำทั่วไป..... 1

1.1 งานวิจัยที่ผ่านมา ..... 2

1.1.1 คอนกรีตอัดแรงบางส่วน ..... 2

1.1.2 น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ ..... 4

1.2 วัตถุประสงค์ ..... 6

1.3 ขอบข่ายของงานวิจัย ..... 7

บทที่ 2 การทดสอบและผลการทดสอบ ..... 8

2.1 รายการการทดสอบ ..... 8

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ..... 9

2.2.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ ..... 9

2.2.2 การดึงลวดอัดแรง ..... 10

2.2.3 การหล่อและเก็บตัวอย่างทดสอบ ..... 11

2.2.4 การตัดลวดและบ่มตัวอย่างทดสอบ ..... 11

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ ..... 11

2.3.1 การเตรียมเพื่อการทดสอบ ..... 11

2.3.2 การทดสอบ ..... 13

2.3.2.1 การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตย์ ..... 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.2 การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ ..... 13

2.4 ผลการทดสอบ ..... 14

2.4.1 ผลการทดสอบของกลุ่มน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ ..... 15

2.4.1.1 กลุ่มตัวอย่างชุดที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27 15

2.4.1.2 กลุ่มตัวอย่างชุดที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59 ...18

2.4.2 ผลการทดสอบของกลุ่มน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ .....20

2.4.3 ผลการทดสอบของกลุ่มน้ำหนักบรรทุกสถิตย์หลังการกระทำซ้ำ ....22

2.4.3.1 กลุ่มตัวอย่างชุดที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27 ...22

2.4.3.2 กลุ่มตัวอย่างชุดที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59 ...23

บทที่ 3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....25

3.1 การวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำ .....25

3.1 การขยายตัวของรอยแตกร้าว .....25

3.2 การเพิ่มขนาดของการแอ่นตัว .....27

3.3 การเปลี่ยนแปลงความเครียดในลวดอัดแรง .....28

3.2 การวิเคราะห์หลังการกระทำซ้ำ .....29

3.2.1 พฤติกรรมของคาน.....29

3.2.2 กำลังของคาน.....32

บทที่ 4 สรุปผลงานวิจัย .....33

เอกสารอ้างอิง .....35

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบวัสดุ .....107

ภาคผนวก ข. สมการและตัวอย่างการคำนวณ.....117

ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบคานตัวอย่าง.....136

ประวัติผู้เขียน .....183

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

2.1 การแบ่งชุดทดสอบ และสัดส่วนน้ำหนักบรรทุก ..... 42

2.2 รายละเอียดของคานทดสอบ..... 43

2.3 ข้อมูลการดิ่งลวดในตัวอย่างทดสอบชุดที่ 1 ..... 44

2.4 ข้อมูลการดิ่งลวดในตัวอย่างทดสอบชุดที่ 2 ..... 45

2.5 ข้อมูลการเสื่อมสูญของการอัดแรง ..... 46

2.6 สัดส่วนการผสมคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ..... 47

2.7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ..... 47

3.1 กำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่าง ..... 48

3.2 ค่าคงที่ A และ B ของกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27..... 49

3.3 ค่าคงที่ A และ B ของกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59..... 49

3.4 เปรียบเทียบค่าความแกร่งสัมพัทธ์จากการทดสอบก่อนและหลังการกระทำซ้ำ ของกลุ่มทดสอบชุดที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27..... 50

3.5 เปรียบเทียบค่าความแกร่งสัมพัทธ์จากการทดสอบก่อนและหลังการกระทำซ้ำ ของกลุ่มทดสอบชุดที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59..... 50

3.6 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดแตกร้าว จากการทดสอบและจากการคำนวนของกลุ่ม ทดสอบที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27..... 51

3.7 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดแตกร้าว จากการทดสอบและจากการคำนวนของกลุ่ม ทดสอบที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59..... 51

3.8 เปรียบเทียบกำลังประลัย จากการทดสอบและจากการคำนวนของกลุ่ม ทดสอบที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27..... 52

3.9 เปรียบเทียบกำลังประลัย จากการทดสอบและจากการคำนวนของกลุ่ม ทดสอบที่มีอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59..... 52

ค.1 ผลการทดสอบคาน PP1 S1 ..... 137

ค.2 ผลการทดสอบคาน PP1 R1 ..... 139

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.3 ผลการทดสอบคาน PP1 R2 ..... 145

ค.4 ผลการทดสอบคาน PP1 R3 ..... 153

ค.5 ผลการทดสอบคาน PP2 S1 ..... 160

ค.6 ผลการทดสอบคาน PP2 R1 ..... 162

ค.7 ผลการทดสอบคาน PP2 R2 ..... 169

ค.8 ผลการทดสอบคาน PP2 R3 ..... 176

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญภาพ


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | ภาพจำลองของขอบเขตของอัตราส่วนของการอัดแรง..... | 53 |
| 2.1 | รูปหน้าตัดและการจัดเหล็กปลอก ..... | 54 |
| 2.2 | ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ..... | 55 |
| 2.3 | การดึงลวดและการเสริมเหล็กปลอก ..... | 56 |
| 2.4 | ตำแหน่งของเกจ และ การเตรียมแบบคาน ..... | 57 |
| 2.5 | ตัวอย่างที่เทคอนกรีตแล้ว ..... | 58 |
| 2.6 | การติดตั้งอุปกรณ์พร้อมทำการทดสอบ ..... | 59 |
| 2.7 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัว กับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคาน ตัวอย่าง PP1 R1, PP1 R2, และ PP1 R3 ..... | 60 |
| 2.8 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคาน ตัวอย่าง PP2 R1, PP2 R2, และ PP2 R3 ..... | 61 |
| 2.9 | เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง ที่มีค่าอัตราส่วนของการอัดแรงต่างกัน ..... | 62 |
| 2.10 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในคอนกรีตกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง PP1 R1, PP1 R2 และ PP1 R3 ..... | 63 |
| 2.11 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในคอนกรีตกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง PP2 R1, PP2 R2, และ PP2 R3 ..... | 64 |
| 2.12 | เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในคอนกรีตกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำ ของคานตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของการอัดแรงต่างกัน ..... | 65 |
| 2.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง PP1 R1, PP1 R2 และ PP1 R3 ..... | 66 |
| 2.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริม กับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง PP2 R1, PP2 R2 และ PP2 R3 ..... | 67 |

สารบัญภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

2.15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของการอัดแรงต่างกัน ..... 68

2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในลวดอัดแรงกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง PP1 R1, PP1 R2 และ PP1 R3 ..... 69

2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงในลวดอัดแรงกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่าง PP2 R1, PP2 R2, และ PP2 R3 ..... 70

2.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วนแรงในลวดอัดแรงกับจำนวนรอบของการกระทำซ้ำของคานตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของการอัดแรงต่างกัน ..... 71

2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP1 S1 จากการทดสอบ..... ..... 72

2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP1 R1 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำเปรียบเทียบกับรอบแรกของการกระทำซ้ำ..... 73

2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP1 R2 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำเปรียบเทียบกับรอบแรกของการกระทำซ้ำ..... 74

2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP1 R3 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำเปรียบเทียบกับรอบแรกของการกระทำซ้ำ..... 75

2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP2 S1 จากการทดสอบ..... ..... 76

2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP2 R1 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำเปรียบเทียบกับรอบแรกของการกระทำซ้ำ..... 77

2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP2 R2 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำเปรียบเทียบกับรอบแรกของการกระทำซ้ำ..... 78

2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP2 R3 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำเปรียบเทียบกับรอบแรกของการกระทำซ้ำ..... 79

2.27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP1 S1 และ PP2 S1 จากการทดสอบ ..... 80

สารบัญภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

2.28 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP1 R1 PP1 R2 และ PP1 R3 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ ..... 81

2.29 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน PP2 R1 PP2 R2 และ PP2 R3 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ ..... 82

2.30 ลักษณะการวิบัติของคาน PP1 S1 และ PP1 R1 ..... 83

2.31 ลักษณะการวิบัติของคาน PP1 R2 และ PP1 R3 ..... 84

2.32 ลักษณะการวิบัติของคาน PP2 S1 และ PP2 R1 ..... 85

2.33 ลักษณะการวิบัติของคาน PP2 R2 และ PP2 R3 ..... 86

3.1 การเปลี่ยนแปลงขนาด และ จำนวนของรอยแตกร้าว ภายใต้การกระทำซ้ำของคานตัวอย่างกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27..... 87

3.2 การเปลี่ยนแปลงขนาด และ จำนวนของรอยแตกร้าว ภายใต้การกระทำซ้ำของคานตัวอย่างกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59..... 88

3.3 แนวโน้มของการเพิ่มขนาดของการแอ่นตัว ภายใต้การกระทำซ้ำของคานตัวอย่างกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนของการอัดแรง 0.27..... 89

3.4 แนวโน้มของการเพิ่มขนาดของการแอ่นตัว ภายใต้การกระทำซ้ำของคานตัวอย่างกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนของการอัดแรง 0.59..... 90

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP1 S1 จากการคำนวนโดยวิธี Strain Compatibility..... 91

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP1 R1 จากการคำนวนโดยวิธี Strain Compatibility..... 92

3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP1 R2 จากการคำนวนโดยวิธี Strain Compatibility..... 93

3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP1 R3 จากการคำนวนโดยวิธี Strain Compatibility..... 94

3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP2 S1 จากการคำนวนโดยวิธี Strain Compatibility..... 95

สารบัญภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP2 R1 จากการคำนวณโดยวิธี Strain Compatibility..... 96

3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP2 R2 จากการคำนวณโดยวิธี Strain Compatibility..... 97

3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และ ความโค้งของคาน PP2 R3 จากการคำนวณโดยวิธี Strain Compatibility..... 98

3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP1 S1 จากการทดสอบเปรียบเทียบ กับ ผลจากการคำนวน..... 99

3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP1 R1 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ เปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวน.....100

3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP1 R2 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ เปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวน..... 101

3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP1 R3 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ เปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวน..... 102

3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP2 S1 จากการทดสอบเปรียบเทียบ กับ ผลจากการคำนวน..... 103

3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP2 R1 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ เปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวน..... 104

3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP2 R2 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ เปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวน..... 105

3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับ การแอ่นตัวของคาน PP2 R3 จากการทดสอบหลังการกระทำซ้ำ เปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวน..... 106

ก.1 ปริมาณคละของทราย..... 108

ก.2 ปริมาณคละของหิน..... 109

ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน PP1 S1 และ PP1 R3..... 110

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน PP1 R1 และ PP1 R2..... 111

ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน PP2 S1 และ PP2 R3..... 112

ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน PP2 R1 และ PP2 R2..... 113

ก.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคานทุกคาน..... 114

ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัย..... 115

ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของลวดอัดแรงที่ใช้ในงานวิจัย..... 116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย