ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246201

ชีดจำกัดรอยเคลื่อนตัวที่ถล่มจากการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวยาว

นายครรชนะ รัตนหงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b 00250653

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246201

ขีดจำกัดระยะเคลื่อนตัวที่สภาวะการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวยาว

นาย ครรชนะ รัตนพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5170239721

DRIFT LIMIT AT GRAVITY LOAD COLLAPSE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH LAP SPLICES

Mr. Kanchana Rattanapongs

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ขีดจำกัดระยะเคลื่อนตัวที่สภาวะการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวยาว
โดย	นายครรชนะ รัตนพงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติภูมิ รอดสิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติภูมิ รอดสิน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา)

ครรชนะ รัตนพงศ์ : ขีดจำกัดระยะเคลื่อนตัวที่สภาวะการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการต่อทาบเหล็กเสริมตามแนวยาว. (DRIFT LIMIT AT GRAVITY LOAD COLLAPSE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH LAP SPLICES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.วิทิต ปานสุข, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร. กิตติภูมิ รอดสิน, 142 หน้า.

246201

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวจำกัดในการรับแรงกระทำแบบวัฏจักรและพฤติกรรมการวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุก เสาทดสอบเป็นตัวแทนของเสาในอาคารในประเทศไทยที่มีความสูงระหว่าง 10 -15 ชั้น ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ปริมาณเหล็กปลอก และการต่อทาบเหล็กเสริมบริเวณจุดหมุนพลาสติก โดยเสา S1 และ S2s มีปริมาณเหล็กปลอก 0.2% ตามมาตรฐาน ACI318-05 และ เสา S3 มีปริมาณเหล็กปลอก 0.1% ซึ่งเป็นปริมาณน้อยสุดตามมาตรฐาน วสท. 1007-34 เสา S2s จะมีการต่อทาบปลายเหล็กเสริมโดยมีระยะต่อทาบ 600 มม. โดยปริมาณเหล็กเสริมตามยาว และสัดส่วนแรงอัดตามแนวแกนของเสามีค่าเท่ากันทุกต้นคือ 3.14% และ 0.2 ตามลำดับ การทดสอบเสาจะทดสอบโดยให้เสารับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรโดยเพิ่มเปอร์เซนต์การเคลื่อนตัวแต่รักษาน้ำหนักบรรทุกที่หัวเสาให้คงที่ การทดสอบจะทดสอบจนเสาไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ผลการทดสอบพบว่าเสาทุกต้นเกิดการวิบัติแบบเฉือน โดยการแตกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและการโก่งเดาะของเหล็กยืนเป็นจุดเริ่มต้นของการวิบัติโดยน้ำหนักบรรทุก เสาทุกต้นจะสูญเสียกำลังรับแรงด้านข้างที่การเคลื่อนตัวประมาณ 1.5 -2% เสา S1 เกิดการวิบัติจากน้ำหนักบรรทุกที่การเคลื่อนตัว 4% เมื่อมีการต่อทาบปลายเหล็กเสริมในเสา S2s ความสามารถในการเคลื่อนตัวจะลดลงมาเหลือ 3.5% เนื่องจากวิบัติของเหล็กเสริมบริเวณจุดต่อทาบ และในเสา S3 จะพบการฉีกขาดของเหล็กปลอกก่อนการวิบัติที่การเคลื่อนตัว 3% ดังนั้นสรุปได้ว่าการต่อทาบเหล็กเสริมและการใช้ปริมาณเหล็กปลอกน้อยสุดตามมาตรฐาน วสท. จะทำให้จะทำให้เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนตัวลดลง โดยจากการทดสอบพบว่าปริมาณเหล็กเสริมมีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสามาก และจากผลการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนการวิบัติจากน้ำหนักบรรทุก มีค่าประมาณสองเท่าของการเคลื่อนตัว ณ จุดที่เสาสูญเสียกำลังรับแรงด้านข้าง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5170239721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : SEISMIC / SHEAR-DAMAGED / LAP-SPLICED / CYCLIC LOADS

KANCHANA RATTANAPONGS : DRIFT LIMIT AT GRAVITY LOAD COLLAPSE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH LAP SPLICES.

: ADVISOR: WITHIT PANSUK, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST.PROF.KITTIPOOM RODSIN, Ph.D., 142 pp.

246201

The principal objective of this research is to investigate the cyclic behavior of non-ductile reinforced concrete columns and their collapse behavior under gravity load. The test specimens are representative of RC columns supported 10 to 15-story building in Thailand. The variables used in this study are amount of transverse reinforcement and lap-splice in plastic hinge region. The column S1 and S2s possess 0.2% transverse reinforcement ratio according to ACI318-05 and 0.1% transverse reinforcement ratio has been used in S3 according to E.I.T 1007-34. The splice length of 600 mm is used in specimen S2s. The longitudinal reinforcement ratio and axial load ratio of all columns are 3.14% and 0.2 respecitvely. All columns were subject to increasing lateral cyclic load while the axial load was kept constrant throuthout the test. The test program was terminated when the axial load could not be carried by the column. The test results revealed that all columns were failed by shear initiated by concrete cover spalling and following by bar buckling. The lateral resistance has significantly dropped when the columns subject to lateral displacement aound 1.5 - 2.0 % drift. For column S1, the gravity load collapse occurred at 4% drift and S2s at 3.5 % drift. The splice slip may result in reduction in the maximum drift of Specimen S2s. For column S3, the transverse reinforcement has broken and may result in the lowest maximum drift of 3%. Therefore, the use of lap-splice and very low amount of transverse reinforcement may affect the maximum drift at gravity load collapse. From the test result, the influence of amount of transverse reinforcement may be more pronounce. The results also revealed that the maximum drift at gravity load collapse was approximately twice the drift at lateral strength loss.

Department : Civil Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study : Civil Engineering ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010 ..... Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร. วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ ดร. กิตติภูมิ รอดสิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งกรุณาเสียสละเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี กรรมการสอบภายในมหาวิทยาลัยและ ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ ความรู้ และวิธีแก้ไขปัญหาต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ หน่วยงานและบุคคลต่างๆที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์และทุกๆขั้นตอนของการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยมีรายนามต่อไปนี้

คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง ที่ช่วยในการติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ต่างๆในงานวิจัย คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ และดูแลความเรียบร้อยต่างๆ

คุณกฤษฎา ภูมี และ คุณมนัส พึ่งบางกรวย ที่ช่วยทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนความช่วยเหลือทุกอย่าง

คุณไพโรจน์ อนันตะเศรษฐกูล ที่ช่วยในการทำอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

รุ่นพี่ และเพื่อนๆทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลที่มีความสำคัญมาก คือ บิดา มารดา ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มการศึกษาจนถึงปัจจุบัน และตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง.....ฌ

สารบัญภาพ.....ญ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....4

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 4

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย 5

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว 6

2.2 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร.....16

2.3 ขีดจำกัดระยะเคลื่อนตัวที่สภาวะการวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกของเสาคอนกรีต เสริมเหล็ก.....25

บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ..... 28

3.1 การกำหนดลักษณะเสาที่จะนำมาทดสอบ 28

3.2 ตัวอย่างทดสอบ.....29

3.3 การแปรผันเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบ.....31

3.4 คุณสมบัติของวัสดุ 34

3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ 37

3.6 ขั้นตอนการทดสอบ 45

3.7 การประเมินการรับแรงกระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่าง 50

3.8 การปรับแก้ผลการทดสอบและการคำนวณอัตราร้อยละการเคลื่อนด้านข้าง 54

3.9 การคำนวณการเสียรูปด้านข้างจากผลการทดสอบ..... 56

3.10 การสังเกตุค่าที่ได้จากผลทดสอบเสาตัวอย่าง..... 62

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบ 65
4.1 พฤติกรรมต่างๆของเสาคอนกรีตที่สังเกตได้ในระหว่างการทดสอบ 65
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้ง 106
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับการเสียรูปเนื่องแรงเฉือน..... 110
4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาตัวอย่างทดสอบ 114
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 123
5.1 สรุปผลการวิจัย.....123
5.2 ข้อเสนอแนะ.....126
รายการอ้างอิง..... 128
ภาคผนวก..... 131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 142

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเสาของ Park และคณะ (1982) 17
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเสาของ Ozceve และStaacioglu (1987) 19
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเสาของ Lukkunaprasit และ Sittipunt (2003) 20
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบของ Lynn(1996) 22
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเสาของ Murat Melek, John W.wallace, Joel P.Conte (2003/2004) 22
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของเสาของ Sezen และ Moehle (2006) 23
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเสาที่จะนำมาทดสอบ 32
ตารางที่ 3.2 สรุปการประเมินความสามารถของเสาตัวอย่างทดสอบ (กิโลนิวตัน) 53
ตารางที่ 3.3 สรุปรูปแบบการวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบ 53
ตารางที่ 3.4 สรุประยะเคลื่อนที่จากแรงดัดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของเสาตัวอย่างทดสอบ (มม.) 53
ตารางที่ 3.5 สรุปอัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำบรรทุกในแนวแกนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น 54
ตารางที่ 4.1 แรงกระทำด้านข้าง, โมเมนต์ดัดและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่าง S1 66
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละสถานะของตัวอย่าง S1 69
ตารางที่ 4.3 แรงกระทำด้านข้าง, โมเมนต์ดัดและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่าง S2s 80
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละสถานะของตัวอย่าง S2s 82
ตารางที่ 4.5 แรงกระทำด้านข้าง, โมเมนต์ดัดและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่าง S3 94
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของการเสียรูปด้านข้างในแต่ละสถานะของตัวอย่าง S3 96
ตารางที่ 4.7 สรุปกำลังรับแรงด้านข้างจากผลการทดสอบของเสาตัวอย่าง S1 S2s และ S3 116
ตารางที่ 4.8 สรุประยะเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบของเสาตัวอย่าง S1 S2s และ S3 117
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของอัตราการเคลื่อนที่ที่เกิดการวิบัติด้วยน้ำบรรทุกในแนวแกนที่ 121

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ความเสียหายของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นที่ 1 ของอาคาร Imperial County Services (Bertero V. V., NISEE-EQIIS Image Database) 2
รูปที่ 1.2 ความเสียหายของโรงพยาบาลในเหตุการณ์แผ่นดินไหว San Fernando ในปี 1971 (Steinbrugge K. V., NISEE Database) 2
รูปที่ 2.1 การโก่งตัวด้านข้างเนื่องจากผลของแรงดัด.....8
รูปที่ 2.2 (a) เสายื่น (b) โมเมนต์ (c) ค่าความโค้งที่จุดคราก (d) ค่าความโค้งสูงสุด (e) ค่าความโค้งที่สมดุล (f) การเสียรูป โดย Paulay และ Priestley (1992) 9
รูปที่ 2.3 การต่อทาบเหล็กเสริม (Paulay และ Priestley ,1992).....14
รูปที่ 2.4 ขนาดหน้าตัดและรูปแบบการเสริมเหล็ก (Park และคณะ ,1982) 16
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาต้นที่ 1- 4 (Park และคณะ ,1982) 17
รูปที่ 2.6 รูปแบบการเสริมเหล็ก ขนาดของหน้าตัดและรูปแบบการทดสอบ (Ozceve และ Staacioglu,1987).....18
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาและสภาพเสาหลังการทดสอบโดย (Ozceve และ Staacioglu,1987) 19
รูปที่ 2.6 รูปแบบการเสริมเหล็ก ขนาดของหน้าตัดและรายละเอียดของของอ โดย (Lukkunaprasit และ Sittipunt, 2003) 20
รูปที่ 2.7 รูปแบบการเสริมเหล็ก ขนาดของหน้าตัดและ รูปแบบการทดสอบ (Sezen และ Moehle, 2006).....23
รูปที่ 2.8 สภาพของเสาต้นที่ 1 ถึง 4 หลังการทดสอบ(Sezen และ Moehle, 2006) 24
รูปที่ 2.9 แผนภาพแรงอิสระ(Free body diagram) ของเสาหลังจากวิบัติแบบเฉือน (Elwood และ Moehle, 2005) 26
รูปที่ 3.1 ลักษณะการเสริมการเหล็กและขนาดของตัวอย่างทดสอบ S1 33
รูปที่ 3.2 ลักษณะการเสริมการเหล็กและขนาดของตัวอย่างทดสอบ S2s 33

รูปที่ 3.3 ลักษณะการเสริมการเหล็กและขนาดของตัวอย่างทดสอบ S3 34
รูปที่ 3.4 แสดงการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ทดสอบกำลังอัด 35

หน้า

รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริม 36
รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการเข้าแบบหล่อเสาคอนกรีต.....37
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S1.....39
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างทดสอบ S1.....40
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S2s.....41
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างทดสอบ S2s.....42
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบ S3.....43
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดบนเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่างทดสอบ S3.....44
รูปที่ 3.13 แบบจำลองการทดสอบ.....45
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบกับโครงข้อแข็งทดสอบ (Test Frame).....46
รูปที่ 3.15 แบบร่างการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบ.....47
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งระยะการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า.....48
รูปที่ 3.17 แสดงประวัติการรับแรงด้านข้างของเสาตัวอย่างทดสอบ (Loading scheme).....49
รูปที่ 3.18 แสดงตำหน่งของเหล็กเสริมตามยาว.....51
รูปที่ 3.19 แผนภาพแสดงความเครียดและแรงของหน้าตัด.....51
รูปที่ 3.20 การปรับแก้เนื่องจากการเคลื่อนที่และการหมุนของฐานราก.....55
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปแบบโค้งดัด.....57
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปจากรอยต่อเคลื่อน.....59
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างการคำนวณการเสียรูปแบบเฉือน.....61
รูปที่ 3.24 วิธีการหาค่าความเหนียวโดยการประมาณการตอบสนองด้านข้าง (Priestly,1992)..63
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง S1.....67
รูปที่ 4.2 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง S1 หลังการทดสอบ 68
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแต่องค์ประกอบกับร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาตัวอย่าง S1 69
รูปที่ 4.4 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของตัวอย่าง S1.....70
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 74

หน้า

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ของตัวอย่าง S1 76
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S1 76
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง ของตัวอย่าง S1 77
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S1 78
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงกับระยะ การเคลื่อนตัวใน แนวแกนของตัวอย่าง S1 79
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทาง ด้านข้างของตัวอย่าง S2s 81
รูปที่ 4.12 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง S2s หลังการทดสอบ 82
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแต่องค์ประกอบกับ ร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาตัวอย่าง S2s 83
รูปที่ 4.14 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของ ตัวอย่าง S2s 84
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S2s 88
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ของตัวอย่าง S2s 89
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S2s 90
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง ของตัวอย่าง S2s 91
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S2s 92
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงกับระยะ การเคลื่อนตัวใน แนวแกนของตัวอย่าง S2s 92
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนด้านข้างของความสูงกับแรงกระทำทาง ด้านข้างของตัวอย่าง S3 95

หน้า

รูปที่ 4.22 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง S3 หลังการทดสอบ.....95
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปด้านข้างในแต่องค์ประกอบกับ
ร้อยละอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ของเสาตัวอย่าง S3.....97
รูปที่ 4.24 ระดับความเสียหายในแต่ละอัตราการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความสูงของ
ตัวอย่าง S3.....97
รูปที่ 4.25 แสดงค่าความโค้งตามความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S3.....101
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว
ของตัวอย่าง S3.....102
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่าง S3.....103
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง
ของตัวอย่าง S3.....104
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราการเคลื่อนตัว(%drift) กับความเครียด
ในเหล็กเสริมตามขวางของตัวอย่าง S3.....105
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงกับระยะ
การเคลื่อนตัวใน แนวแกนของตัวอย่าง S3.....106
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของตัวอย่าง S1.....107
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของตัวอย่าง S2s.....108
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้งของตัวอย่าง S3.....109
รูปที่ 4.34 รูปแบบการเสียรูปจากแรงเฉือน.....110
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน
ของ เสาตัวอย่างทดสอบ S1.....111
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน
ของ เสาตัวอย่างทดสอบ S2s.....112
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน
ของเสาตัวอย่างทดสอบ S3.....113
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์เส้นโค้งขอบนอกระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับร้อยละ
การเคลื่อนด้านข้างต่อความสูง.....115
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์เส้นโค้งขอบนอกระหว่างอัตราการรับแรงกระทำทางด้านข้าง
(*Normalized) กับ*ร้อยละการเคลื่อนด้านข้างต่อความสูง..... 116

หน้า

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนในแนวแกนกับร้อยละการเคลื่อนด้านข้าง
ต่อความสูงของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3..... 119
รูปที่ 4.41 การวิบัติแบบเฉือนของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3..... ...121
รูปที่ 4.42 แสดงการวิบัติหลังการทดสอบของเสาตัวอย่างทดสอบ S1 S2s และ S3.....122