

ผลการโอบรัดจากเหล็กเสริมที่มีต่อกำลังของบริเวณสมอียด  
สำหรับคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดภายหลัง

นาย สายันต์ ตีริมนตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

ISBN 974-567-527-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015893

I 10302074

EFFECTS OF HOOP CONFINEMENT ON STRENGTH OF  
POST-TENSIONED ANCHORAGE ZONES

Mr. SAYAN SIRIMONTREE

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 974-576-527-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลการโอบรัดจากเหล็กเสริมที่มีต่อกำลังของบริเวณสมอียด  
สำหรับคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดภายในหลัง  
โดย นาย สายันต์ ศิริมนตรี  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

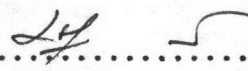
---

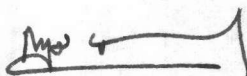
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
( ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เพนชัตริ )

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ )

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

  
.....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริ่งเดชา รัชตโพธิ์ )

สาयนต์ คิริมนตรี : ผลการโอบรัดจากเหล็ก เสริมที่มีต่อกำลังของบริ เวณสมอยึดสำหรับ  
คอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งลวดภายใน ( EFFECTS OF HOOP CONFINEMENT ON STRENGTH  
OF POST-TENSIONED ANCHORAGE ZONES ) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.เอกสิทธิ์ ลีสุวรรณ,  
149 หน้า

จากปัญหาการถ่ายแรงในบริเวณสมอยึดสำหรับคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งลวดภายใน ซึ่งก่อให้เกิด  
เกิดหน่วยแรงอันซับซ้อนทั้งหน่วยแรงดิ่งและหน่วยแรงอัด การควบคุมหน่วยแรงดิ่ง เป็นสิ่งจำเป็นมาก  
เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณสมอยึดในขณะถ่ายแรงและป้องกันการวิบัติแบบทันที รอยแตก-  
ร้าวอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนทำความเสียหายต่อสมอยึดจากผลของความชื้นหรือสารเคมี และทำให้  
การใช้งานของโครงสร้างไม่เป็นไปอย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการควบคุมหน่วยแรงดิ่งดังกล่าว  
ด้วยการพิจารณาผลการโอบรัดของเหล็ก เสริมที่มีต่อพฤติกรรมการถ่ายแรงของบริเวณสมอยึด จากการ  
ทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยให้ปริมาณเหล็ก เสริมโอบรัด เป็นตัวแปรหลัก และ  
ปริมาณเหล็ก เสริมตามยาวเป็นตัวแปรรอง แท่งตัวอย่างทดสอบหล่อ เป็นแท่งหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด  
35x35 ซม. ยาว 70 ซม. ตามมาตรฐานการทดสอบของอังกฤษ BS-4447 : 1973 หัวข้อที่ 7  
ประกอบด้วยแป้นสมอยึดขนาด 21x21 ซม. และท่อร้อยลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.1 ซม. โดยเสริม  
เหล็กโอบรัดในอัตรา 0 - 5.75 % ต่อปริมาตรของแท่งสมอยึด และเสริม เหล็กตามยาวด้วยอัตรา  
0 - 0.55 % ต่อหน้าตัด ตามลำดับ เพื่อปรับปรุงพฤติกรรมของบริเวณสมอยึดให้ทำงานร่วมกันระหว่าง  
คอนกรีต สมอยึด และเหล็กเสริมต่าง ๆ

ผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของแท่งตัวอย่างในช่วงก่อน เกิดการแตกร้าว ให้ความสัมพันธ์  
ระหว่างหน่วยแรงและความ เกรียด เป็นไปในเชิงเส้นตรง และเมื่อ เปรียบ เทียบผล กับการวิเคราะห์ทาง  
ไฟไนต์เอ เลเมนต์สามมิติ จะให้ค่าที่สอดคล้องกันดีมาก การโอบรัดของ เหล็ก เสริมจะ เริ่มมีประสิทธิภาพ  
หลังการแตกร้าวภายในซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อการแตกร้าวของคอนกรีต  
เปลือกนอกเหล็ก เสริมโอบรัด เริ่มสังเกตเห็นได้ การ เสริม เหล็กโอบรัดทำให้ตัวอย่างมีกำลังแตกร้าว  
ให้ความเหนียว และกำลังประลัยสูงขึ้น ปริมาณเหล็ก เสริมโอบรัดที่ 4 % โดยปริมาตรของแท่งสมอยึด  
จะทำให้การโอบรัดและการควบคุมการแตกร้าวในช่วงการใช้งานดีที่สุด โดยให้ความเหนียว และมีส่วน  
ความปลอดภัยต่อการวิบัติที่เพียงพอ เหล็ก เสริมตามยาวมีส่วนช่วยในการโอบรัดในช่วงการใช้งาน  
และช่วยในการกระจายแรงอัด เข้าสู่องค์อาคารได้ดียิ่งขึ้น จากการศึกษาวิจัยนี้ยังได้ เสนอวิธีการออกแบบอย่าง  
ง่าย ที่ให้ผลสอดคล้องกับพฤติกรรมของแท่งตัวอย่างจากการทดสอบนี้

ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา.....  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมโยธา.....  
ปีการศึกษา ..... 2531 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

SAYAN SIRIMONTREE : EFFECTS OF HOOP CONFINEMENT ON STRENGTH OF POST-TENSIONED ANCHORAGE ZONES. THESIS ADVISOR : PROF.EKASIT LIMSUWAN, Ph.D. , 149 PP.

As a result of complexity of stresses at the anchorage zone of post-tensioned concrete structures caused by tensile and compressive stresses in several directions, it is quite essential to control the tensile stresses in the zone. This is to prevent cracks which may lead to corrosion damages from moisture and salts penetration. This research dealt with stress control by means of hoop reinforcement as a major variable and longitudinal reinforcement as a secondary variable. Six specimens of 35x35 cm. cross-section with 70 cm. length as per British Standard (BS-4447 : 1973) were tested to failure. The hoop reinforcement varied from 0 - 5.75% while the longitudinal reinforcement varied from 0 - 0.55% . Interaction behavior among concrete, anchorage and reinforcement was monitored under external loading.

Test results prior to cracking of the specimens showed a linear relationship between stresses and strains in each direction of the anchorage zone. These test results agree closely with those obtained from 3-D linear elastic finite element analyses. Hoop action became effective as micro cracks originated and the effectiveness is magnified as cracks appeared on the concrete surfaces. Hoop reinforcement increased the cracking strength, ductility and ultimate strength of the specimens. The most appropriate percentage of hoop reinforcement was found to be 4% by volume of the anchorage zone, providing excellent overall performance in strength , ductility, and safety index. The longitudinal reinforcement partly helped the hoop action and offered effective transfer of prestressing from the anchorage zone to the structural member.

This research also presents a simplified method for structural design of anchorage zones to conform with the behavior observed in the tests.

ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา.....  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมโยธา.....  
ปีการศึกษา .....2531.....

ลายมือชื่อผู้บันทึก .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
2531

### กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่าน ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติวี รองศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริงเดชา รัชตโพธิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้เป็นอันมาก

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้เงินทุนอุดหนุนการวิจัยนี้บางส่วน และขอขอบคุณบริษัท ซีแพค จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ด้านเงินทุนวิจัยและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดสอบ รวมทั้ง คุณเจริญ จตุรศีล คุณ สุรวุฒิ คำดี คุณ กรวุฒิ ตันเนียม และ เพื่อนพี่น้องที่ทุกคนที่อุทิศกำลังกาย กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสิ้น สมบูรณ์

ท้ายสุดนี้สิ่งที่ผู้เขียนจะลืมเสียมิได้ คือพระคุณของ บิดา มารดา ผู้ซึ่งได้ให้การอบรมสั่งสอนและให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้มาจนถึงบัดนี้ สิ่งต่างๆเหล่านี้จะจดจำจารึกในจิตใจของผู้เขียนตลอดไป

สายันต์ ศิริมนตรี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
รายการตารางประกอบ .....	ณ
รายการรูปประกอบ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความนำ .....	1
1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	2
1.2.1 บริเวณสมอียด .....	2
1.2.2 หน่วยแรงในบริเวณสมอียด .....	2
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	3
1.4 วัตถุประสงค์ การดำเนินการ และขอบข่ายของการวิจัย .....	7
บทที่ 2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ .....	9
2.1 ระบบสมอียด .....	9
2.2 แท่งตัวอย่างทดสอบ .....	9
2.3 วัสดุ .....	10
2.3.1 คอนกรีต .....	10
2.3.2 เหล็กเสริม .....	10
2.2.3 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ .....	11
2.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	11
2.4.1 เหล็กเสริมโอบรัด .....	11
2.4.2 สมอียด .....	12
2.4.3 การหล่อตัวอย่างทดสอบ .....	12
2.5 การเตรียมการทดสอบ .....	13
2.6 ขั้นตอนการทดสอบ .....	14
2.7 ผลการทดสอบ .....	15
2.7.1 ชุดที่มีเหล็กเสริมโอบรัด .....	15
2.7.2 ชุดที่มีเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมโอบรัด .....	18

บทที่ 3 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	22
3.1 พฤติกรรมของแท่งตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุก .....	22
3.1.1 การหัดตัวในแนวแกน .....	22
3.1.2 การปองตัวด้านข้าง .....	24
3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด .....	25
3.2 หน่วยแรงดึงในคอนกรีตสำหรับตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	28
3.3 ผลของเหล็กเสริมโอบรัด .....	29
3.4 ผลของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมโอบรัด .....	32
3.5 กลไกการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ .....	33
3.6 กำลังของแท่งตัวอย่าง .....	35
3.6.1 ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	35
3.6.2 ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	37
3.7 การพิจารณาออกแบบเหล็กเสริมบริเวณสมอียด .....	38
3.7.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของบริเวณสมอียด .....	39
3.7.2 วิธีการออกแบบ .....	39
3.7.3 การออกแบบเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว .....	40
3.7.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ .....	41
3.7.5 ตัวอย่างการออกแบบ .....	42
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	44
4.1 สรุปผลการวิจัย .....	44
4.2 ข้อเสนอแนะ .....	46
เอกสารอ้างอิง .....	47
ประวัติผู้เขียน .....	149



รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ .....	49
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับแท่งตัวอย่างทดสอบ .....	50
ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยตามมาตรฐาน ASTM A370 - 80 ....	51
ตารางที่ 2.4 น้ำหนักแตกร้าวและน้ำหนักประลัยของแท่งตัวอย่างทดสอบ .....	52
ตารางที่ 3.1 การประเมินน้ำหนัก ณ จุดเบี่ยงเบนโดย ไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ .....	52
ตารางที่ 3.2 หน่วยแรงแบกทานใต้แผ่นเหล็กสมอยัดที่น้ำหนักแตกร้าวและน้ำหนักประลัย .....	53
ตารางที่ 3.3 กำลังของตัวอย่างทดสอบ .....	54
ตารางที่ 3.4 ประสิทธิภาพของเหล็กเสริมโอบรัด .....	55

## รายการรูปประกอบ

หน้า

รูปที่ 1.1	บริเวณสมอยึดตามหลักการของช่วงต์เวอเนงต์ (2,6) .....	56
รูปที่ 1.2	หน่วยแรงในบริเวณสมอยึด (2,6) .....	57
รูปที่ 1.3	ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากหน่วยแรงดึง (4) .....	58
รูปที่ 1.4	แผนผังเส้นโค้งการกระจายของความเค้นระเบิด (2,3) .....	59
รูปที่ 1.5	ลูกบาศก์สมมาตรตามวิธีการของ Guyon (2) .....	59
รูปที่ 1.6	แผนผังสามเหลี่ยมแทนการกระจายแบบเส้นโค้งของความเค้นระเบิด (2) ....	60
รูปที่ 1.7	แรงล้นเนื่องจากหน่วยแรงดึงในบริเวณสมอยึด (2) .....	60
รูปที่ 1.8	การพิจารณารูปลูกบาศก์สำหรับการออกแบบโดยวิธีของ Rhodes และ Turner (12) .....	61
รูปที่ 1.9	แผนผังการกระจายของความเค้นระเบิดเสนอโดย Rhodes และ Turner (12) .....	61
รูปที่ 1.10	ค่าสัมประสิทธิ์ B, C และ K ในสมการของ Rhodes และ Turner (12) .....	62
รูปที่ 2.1	ระบบสมอยึดที่ใช้ในงานวิจัย แบบ 12K13 .....	63
รูปที่ 2.2	ลักษณะของแท่งตัวอย่างทดสอบ .....	64
รูปที่ 2.3	แบบหล่อแท่งตัวอย่างทดสอบ .....	65
รูปที่ 2.4	ตำแหน่งของการติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าที่เหล็กเสริมโอบรัด .....	66
รูปที่ 2.5	การติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าที่เหล็กเสริมโอบรัด .....	67
รูปที่ 2.6	การเสริมเหล็กตามยาวพร้อมกับเหล็กเสริมปลอกเกลียว .....	68
รูปที่ 2.7	การติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าที่สมอยึด .....	69
รูปที่ 2.8	การเตรียมแบบหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบแบบไม่เสริมเหล็กก่อนเทคอนกรีต ...	69
รูปที่ 2.9	การเตรียมแบบหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบแบบเสริมเหล็กก่อนเทคอนกรีต .....	70
รูปที่ 2.10	แท่งตัวอย่างบริเวณสมอยึดสำหรับการทดสอบ .....	70
รูปที่ 2.11	การปรับผิวหน้าตัดของตัวอย่างด้านตรงข้ามกับส่วนที่ถ่ายน้ำหนัก .....	71

รูปที่ 2.12	การติดเกจวัดความเครียดแบบเชิงกลที่ผิวคอนกรีต .....	71
รูปที่ 2.13	แผนผังแสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ .....	72
รูปที่ 2.14	ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งเครื่องมือก่อนการทดสอบ .....	73
รูปที่ 2.15	การอ่านค่าจากเกจวัดความเครียดแบบเชิงกล .....	73
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุมของแท่งตัวอย่าง SPO ...	74
รูปที่ 2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุมของแท่งตัวอย่าง SP10 ..	75
รูปที่ 2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุมของแท่งตัวอย่าง SP12 ..	76
รูปที่ 2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุมของแท่งตัวอย่าง SP16 ..	77
รูปที่ 2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SPO .....	78
รูปที่ 2.21	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SP10 .....	79
รูปที่ 2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SP12 .....	80
รูปที่ 2.23	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SP16 .....	81
รูปที่ 2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SPO .....	82
รูปที่ 2.25	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SP10 .....	83
รูปที่ 2.26	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SP12 .....	84
รูปที่ 2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SP16 .....	85
รูปที่ 2.28	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่าง SP10 .....	86

รูปที่ 2.29	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่าง SP12 .....	87
รูปที่ 2.30	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่าง SP16 .....	88
รูปที่ 2.31	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP10 .....	89
รูปที่ 2.32	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP12 .....	90
รูปที่ 2.33	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP16 .....	91
รูปที่ 2.34	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่สมอยัดของตัวอย่าง ชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	92
รูปที่ 2.35	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวโอบรอบที่สมอยัด ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	93
รูปที่ 2.36	การปริแตกตามแนวท่อร้อยลวดที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	94
รูปที่ 2.37	ลักษณะการแตกร้าวหลังการวิบัติของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	95
รูปที่ 2.38	การแตกกระเปาะของคอนกรีตด้านข้างของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก .....	96
รูปที่ 2.39	การแตกบริเวณหัวสมอยัดหลังการวิบัติของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	97
รูปที่ 2.40	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุม ของแท่งตัวอย่าง SP12LO .....	98
รูปที่ 2.41	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุม ของแท่งตัวอย่าง SP12L10 .....	99
รูปที่ 2.42	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุม ของแท่งตัวอย่าง SP12L12 .....	100
รูปที่ 2.43	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SP12LO .....	101
รูปที่ 2.44	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SP12L10 .....	102

รูปที่ 2.45	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่าง SP12L12 .....	103
รูปที่ 2.46	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SP12L0 .....	104
รูปที่ 2.47	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SP12L10 .....	105
รูปที่ 2.48	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต ของแท่งตัวอย่าง SP12L12 .....	106
รูปที่ 2.49	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่าง SP12L0 .....	107
รูปที่ 2.50	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่าง SP12L10 .....	108
รูปที่ 2.51	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่าง SP12L12 .....	109
รูปที่ 2.52	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP12L0 .....	110
รูปที่ 2.53	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP12L10 .....	111
รูปที่ 2.54	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP12L12 .....	112
รูปที่ 2.55	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดตามยาวที่สมอียดของตัวอย่าง ชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	113
รูปที่ 2.56	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวโอบรอบที่สมอียด ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	114
รูปที่ 2.57	การปริแตกตามแนวทอร้อยลวดที่ผิวคอนกรีต ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	115
รูปที่ 2.58	ลักษณะการแตกร้าวหลังการวิบัติของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	116
รูปที่ 2.59	การแตกบริเวณหัวสมอียดหลังการวิบัติของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	117

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการหดตัวเฉลี่ย  
ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ..... 118

รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดในแนวแกนที่ผิวคอนกรีต  
ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ..... 119

รูปที่ 3.3 ก. กระจายของหน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่ผิวคอนกรีตของตัวอย่าง  
ชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด จากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ..... 120

รูปที่ 3.3 ข. การกระจายของหน่วยแรงอัดตามแนวแกนในคอนกรีต  
จากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ..... 121

รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการหดตัวเฉลี่ย  
ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว ..... 122

รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดในแนวแกนที่ผิวคอนกรีต  
ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว ..... 123

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต  
ที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ... 124

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต  
ที่ระยะ 30 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ... 125

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต  
ที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .. 126

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีต  
ที่ระยะ 30 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .. 127

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ  
10 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ..... 128

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ  
15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ..... 129

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ  
20 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด ..... 130

รูปที่ 3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ 25 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	131
รูปที่ 3.14	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ 35 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	132
รูปที่ 3.15	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ 10 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	133
รูปที่ 3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	134
รูปที่ 3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ 20 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	135
รูปที่ 3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่ระยะ 25 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	136
รูปที่ 3.19	การกระจายของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด จากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ .....	137
รูปที่ 3.20	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด .....	138
รูปที่ 3.21	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง ชุดที่เสริมเหล็กโอบรัดเปรียบเทียบกับไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ .....	139
รูปที่ 3.22	ค่าความเครียดสูงสุดที่เหล็กเสริมโอบรัดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริม ที่น้ำหนักในช่วงเบี่ยงเบน .....	140
รูปที่ 3.23	การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ของตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว .....	141
รูปที่ 3.24	การพัฒนาสถานะหน่วยแรง 3 แกน ของคอนกรีตใต้แผ่นเหล็กของสมอยิต .....	142
รูปที่ 3.25	การวิบัติโดยแรงเฉือนทำให้เกิดคอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยม ใต้แผ่นเหล็กของสมอยิต .....	143
รูปที่ 3.26	การแตกออกของคอนกรีตเปลือกนอกส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมโอบรัด .....	144

รูปที่ 3.27	แผนผังแสดงกำลังของตัวอย่างทดสอบ .....	145
รูปที่ 3.28	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของตัวอย่างกับปริมาณเหล็กเสริม .....	146
รูปที่ 3.29	ประสิทธิภาพของเหล็กเสริมโอบรัด .....	147
รูปที่ 3.30	การกระจายของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตบริเวณสมอชิดเมื่อแปรเปลี่ยน ขนาดของวงปลอกเกลียว จากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ....	148