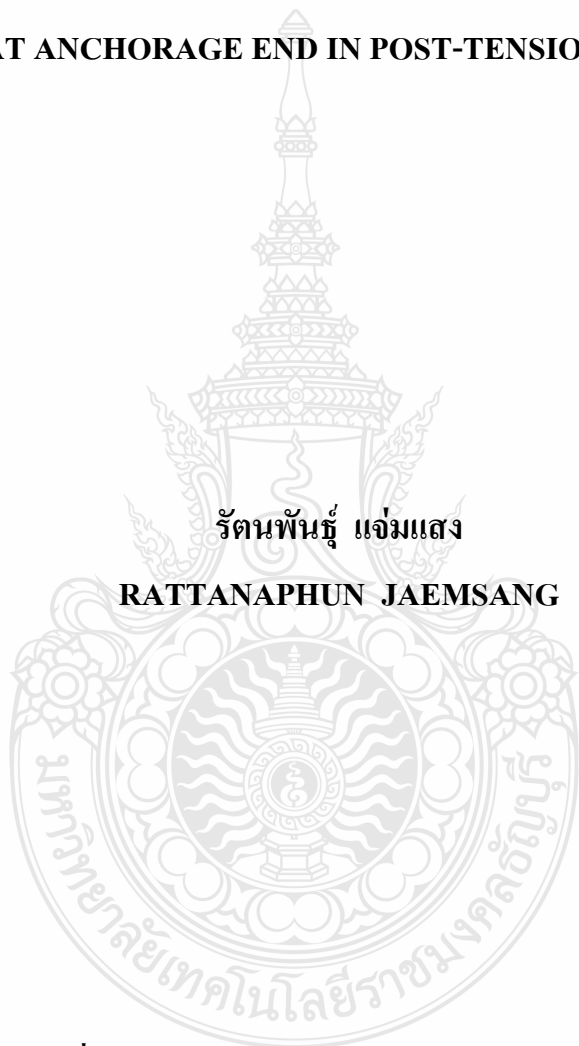


การเสริมเหล็กบริเวณรอยัดลวดอัดแรงที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่หัวสมอ  
ในพื้นที่คอนกรีตอัดแรง

**MILD STEEL REINFORCED EFFECT TO COMPRESSIVE STRENGTH  
AT ANCHORAGE END IN POST-TENSION SLAB**

รัตน์พันธุ์ แจ่มแสง

**RATTANAPHUN JAEMSANG**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

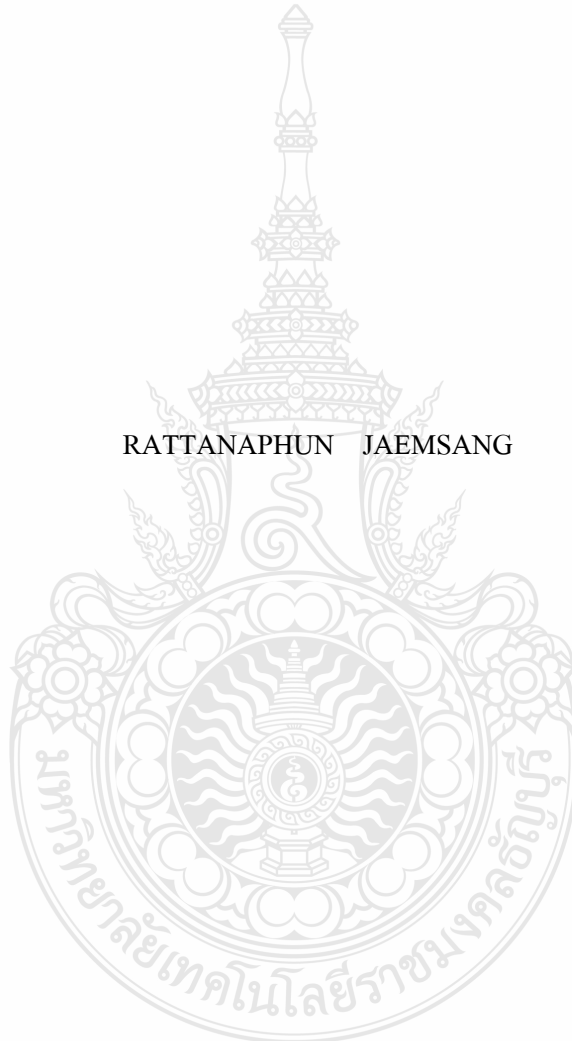
การเสริมหลักบริเวณสมอยึดลวดอัดแรงที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่หัวสมอ  
ในพื้นที่คอนกรีตอัดแรง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2553

**MILD STEEL REINFORCED EFFECT TO COMPRESSIVE STRENGTH  
AT ANCHORAGE END IN POST-TENSION SLAB**

RATTANAPHUN JAEMSANG



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ทำการศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อข้าพเจ้า

รัตนพันธุ์ แจ่มแสง





# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเสริมเหล็กบริเวณสมอยึดลวดอัดแรงที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่หัว  
สมอในพื้นที่คอนกรีตอัดแรง

MILD STEEL REINFORCED EFFECT TO COMPRESSIVE  
STRENGTH AT ANCHORAGE END IN POST-TENSION SLAB

ชื่อนักศึกษา

นายรัตนพันธุ์ แจ่มแสง

รหัสประจำตัว

124970401002-6

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. มาโนช รุจิภากร

วัน เดือน ปี ที่สอบ

10 ตุลาคม 2553

สถานที่สอบ

ห้อง E404 ชั้น 4 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาต)

กรรมการ

(ดร. สนธยา ทองอรุณศรี)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถาวร ชีรเวชญาณ)

กรรมการ

(ดร. มาโนช รุจิภากร)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเสริมเหล็กบริเวณสมอยึดลวดอัดแรงที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่หัวสมอในพื้นที่คอนกรีตอัดแรง
นักศึกษา	นาย รัตนพันธุ์ แจ่มแสง
รหัสประจำตัว	12970401002-6
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมโยธา แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. มาโนช รุจิภากร

### บทคัดย่อ

โครงสร้างพื้นที่คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังเป็นโครงสร้างที่มีความหนาน้อย จึงต้องออกแบบเหล็กเสริมบริเวณหัวสมอให้สามารถกระจายแรงไปสู่คอนกรีต งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบจากการเสริมเหล็กที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่หัวสมอ ในพื้นที่คอนกรีตอัดแรงโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการสร้างแบบจำลองบริเวณสมอยึดและทดสอบจากตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด ซึ่งทำการทดสอบจากรูปแบบการเสริมเหล็ก 5 รูปแบบ

จากผลการทดสอบทำให้ทราบถึงอัตราส่วนระหว่างกำลังของคอนกรีต ( $f_{cu}$ ) ต่อแรงอัดที่สมอรับได้  $P_j$  ดังนี้  $P_j = 185.58 f_{cu} + 13765$  เมื่อเสริมเหล็กแกนตั้งฉากแนวแรงอัดมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร,  $P_j = 204.49 f_{cu} + 12220$  เมื่อเหล็กแกนตั้งฉากแนวแรงอัดมีเหล็กปลอกทุกระยะ 10 เซนติเมตร,  $P_j = 183.09 f_{cu} + 12319$  เมื่อเสริมเหล็กแกนขนานแนวแรงอัดมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร,  $P_j = 203.78 f_{cu} + 10338$  เมื่อเสริมเหล็กแกนขนานแนวแรงอัดมีเหล็กปลอกทุกระยะ 10 เซนติเมตร, และ  $P_j = 184.87 f_{cu} + 8833.5$  เมื่อไม่เสริมเหล็กบริเวณสมอยึด และเมื่อนำรูปแบบของรอยร้าวที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์เทียบกับผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จึงทำให้ทราบถึงรูปแบบการกระจายแรงบริเวณสมอยึดและสามารถกำหนดสมการสำหรับหาแรงอัดประลัยของมสมอยึดชนิดนี้ ได้เป็น  $P_u = (\Phi t + \alpha/s + \beta e) f_{ci}$

โดยที่  $\Phi = 0.0115 t^2 - 0.676 t + 17.863$       $\alpha = -1.4354 s^2 + 40.097 s + 40.65$

$\beta = -0.0119 e^2 + 0.3689 e - 8.8675$       $t =$  ความหนาของพื้น      $s =$  ระยะห่างของเหล็กปลอก

$e =$  ระยะเยื้องศูนย์กลางของสมอยึด      $f_{ci} =$  กำลังอัดของคอนกรีตขณะอัดแรง

คำสำคัญ : คอนกรีตอัดแรง, บริเวณสมอยึดลวดอัดแรง , ไฟไนต์อีลิเมนต์

**Thesis Title :** MILD STEEL REINFORCED EFFECT TO COMPRESSIVE STRENGTH  
AT ANCHORAGE END IN POST-TENSION SLAB

**Student Name :** Mr.Rattanaphun Jaemsang

**Student ID :** 12970401002-6

**Degree Award :** Master of Engineering

**Study Program :** Civil Engineering  
(Structural Engineering)

**Academic Year :** 2010

**Thesis Adviser :** Dr. Marnoch Rujiparkorn

### ABSTRACT

As the post-tension slab structure is the structure with thin thickness, so the reinforced steel around the anchor zone is designed to distribute load to the concrete. This research is therefore conducted to study impact of the reinforced steel to compressive strength at the anchor in the post-tension slab by using finite element method to create model at the anchor zone and test a sample of concrete in anchor zone, applying to test 5 forms of reinforcing steel.

From the test result, it shows us the ratio between strength of concrete ( $f_{ci}$ ) and compressive strength of anchor ( $P_j$ ) as follow:  $P_j=185.58 f_{ci}+13765$  in case that the longitudinal rebar is placed perpendicular to the compressive force line with stirrup applied every 20 centimeters,  $P_j= 204.49 f_{ci}+12220$  in case that the longitudinal rebar is placed perpendicular to the compressive force line with stirrup applied every 10 centimeters,  $P_j=183.09 f_{ci}+12319$  in case that the longitudinal rebar is placed parallel to the compressive force line with stirrup applied every 20 centimeters,  $P_j=203.78 f_{ci}+ 10338$  in case that the longitudinal rebar is placed parallel to the compressive force line with stirrup applied every 10 centimeters,  $P_j=184.87 f_{ci}+8833.5$  in case of no reinforcing steel at the anchor. And when the form of crack is analyzed and compared to the analysis result from finite element method, then form of load distribution at anchor zone is understood, and then the equation to be determined compressive strength at the anchor is

$$P_u = (\Phi t + \alpha/s + \beta e) f_{ci} \quad \Phi=0.0115 t^2 - 0.676 t + 17.8 \quad \alpha = -1.4354 s^2 + 40.097s + 40.65$$

$\beta = -0.0119e^2 + 0.3689e - 8.8675$   $t$  = Thickness of Slabs = Spacing of stirrup  $e$  = eccentricity of the anchorage  $f_{ci}$  = Compressive Strength of Concert

Keywords : Pre-stress concrete , Anchor zone , Finite element

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. มาโนช รุจิภากร ที่ให้คำปรึกษาคำแนะนำความรู้ และประสบการณ์ที่เป็นแนวทางที่ให่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ด้วยดี ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศักดิ์ กร้ามาตร ดร. สันธยา ทองอรุณศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถาวร ชีรวชญาณ เป็นอย่างสูงที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา รวมทั้งเจ้าหน้าที่สำนักงานบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ช่วยเหลือแนะนำ อีกทั้งอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณบริษัทพิบูลย์คอนกรีต จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัดแจ่มแสงวิศวกรรมที่สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์รวมทั้งสถานที่ในการทำวิจัยทั้งหมด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดารวมทั้งครูบาอาจารย์ที่ให้ความรู้ความสั่งสอนขอขอบคุณภรรยาและเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจเสมอมา

รัตนพันธุ์ แจ่มแสง

10 ตุลาคม 2553



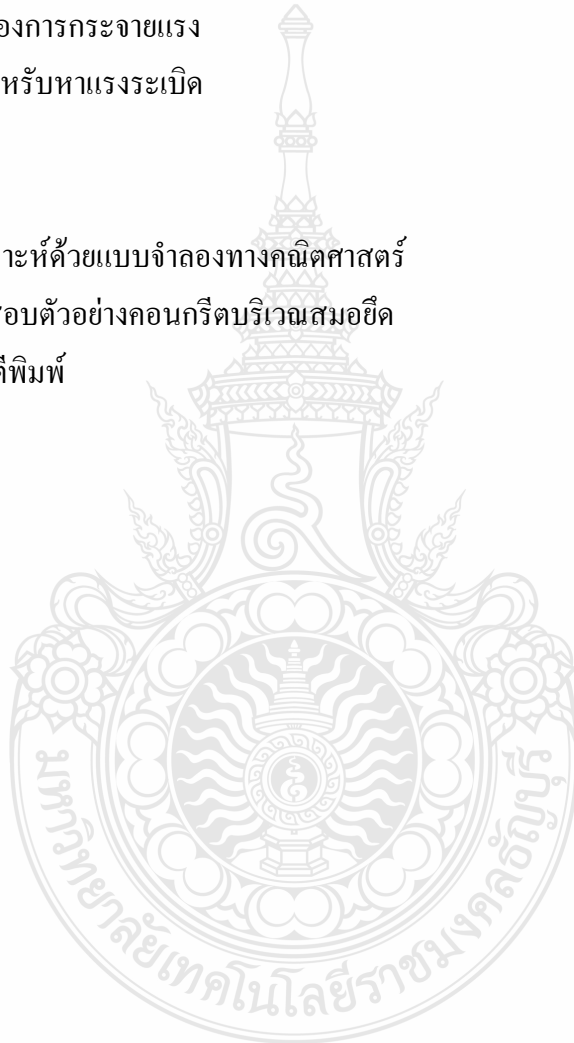


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.5 ข้อจำกัดของการศึกษา	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คอนกรีตอัดแรง	5
2.2 บริเวณสมอยึดของคอนกรีตอัดแรงชนิดค้ำเหล็กที่หลัง (Anchorage Zones )	7
2.3 Principle of Sant-Venant	11
2.4 ACI 318 Building Code and Commentary	13
2.5 ทฤษฎี เสาปลอกเกลียว	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	19
3.1 กรณีศึกษา	19
3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	20
3.3 ทดสอบจากตัวอย่างทดสอบ	23
3.4 สร้างสมการในการออกแบบ	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการทดสอบจากตัวอย่าง	37
4.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง	44
4.3 รูปแบบการกระจายแรง	50

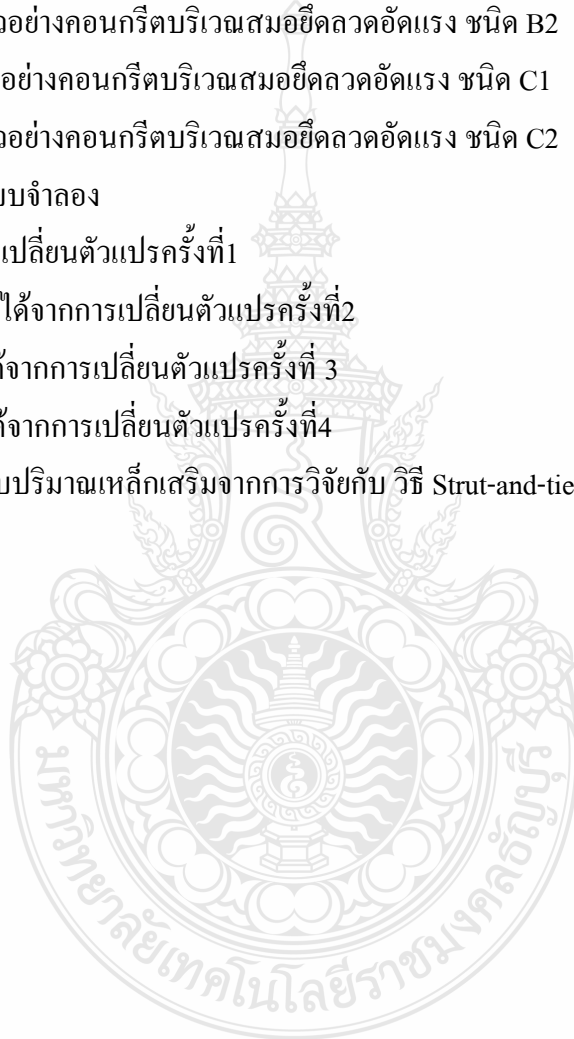
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างสมการออกแบบ	55
4.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธี strut-and-tie	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	63
5.1 ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง	63
5.2 รูปแบบของการกระจายแรง	63
5.3 สมการสำหรับหาแรงระเบิด	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	
ก ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
ข ผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด	74
ค บทความที่ตีพิมพ์	151
ประวัติผู้เขียน	177



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตใน ปริมาตร 1 ลบ.ม.	27
3.2 ผลการเทียบค่าการวัดระหว่าง Load Cell กับ เครื่องทดสอบคอนกรีต	28
4.1 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด A	37
4.2 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด B1	38
4.3 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด B2	39
4.4 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด C1	40
4.5 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด C2	41
4.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง	49
4.7 ค่า $\phi$ ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 1	55
4.8 ค่า $\phi$ และ $\alpha$ ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 2	56
4.9 ค่า $\alpha$ และ S ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 3	57
4.10 ค่า $\beta$ และ e ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 4	58
4.11 ตารางเปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมจากการวิจัยกับ วิธี Strut-and-tie	61



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษา	4
2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในพื้นคอนกรีตอัดแรง	5
2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง	6
2.3 Principle tensile stress contours	7
2.4 Post-tension beam end block	8
2.5 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของปริซึมรับแรง	9
2.6 แรงกระทำต่างๆ บริเวณปลายยึดสมอ	10
2.7 การรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนของวัตถุตามหลักการของ Saint-Venant	12
2.8 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด	14
2.9 Anchorage Zone	14
2.10 strut – and – tie model example	15
2.11 แรงภายในเสาปลอกเกลียว	16
3.1 การระเบิดของสมอยึดในกรณีศึกษาที่ 1	19
3.2 การระเบิดของสมอยึดในกรณีศึกษาที่ 2	20
3.3 แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ บริเวณสมอยึดลวดอัดแรง	21
3.4 แบบจำลองสมอยึดลวดอัดแรง	21
3.5 แบบจำลองของเหล็กปลอก	22
3.6 เปรียบเทียบความละเอียดของแบบจำลอง	23
3.7 ตัวอย่างชนิด A1	24
3.8 ตัวอย่างชนิด B1	24
3.9 ตัวอย่างชนิด B2	25
3.10 ตัวอย่างชนิด C1	25
3.11 ตัวอย่างชนิด C2	26
3.12 รูปตัวอย่างชนิดต่างๆ	26
3.13 เครื่องทดสอบคอนกรีต	28
3.14 การให้แรงอัดแก่สมอยึดลวดอัดแรง	29
3.15 แบบของเครื่องทดสอบตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง	30
3.16 เครื่องทดสอบตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง	31
3.17 วงจรบริดจ์ใน Load Cell	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 LVDT	33
3.19 การเทียบค่ากระบอกลูกไฮดรอลิก	34
3.20 ผลการเทียบค่ากระบอกลูกไฮดรอลิก	35
4.1 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด A	37
4.2 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด B1	38
4.3 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด B2	39
4.4 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด C1	40
4.5 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด C2	41
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีต และแรงกดในสมอยืด	42
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีตและแรงกดในสมอยืดที่ปรับปรุงค่าแล้ว	43
4.8 ลักษณะแบบจำลองชนิด A	44
4.9 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด A	44
4.10 ลักษณะแบบจำลองชนิด B1	45
4.11 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด B1	45
4.12 ลักษณะแบบจำลองชนิด B2	46
4.13 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด B2	46
4.14 ลักษณะแบบจำลองชนิด C1	47
4.15 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด C1	47
4.16 ลักษณะแบบจำลองชนิด C2	48
4.17 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด C2	48
4.18 ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	49
4.19 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยืด Type A	50
4.20 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยืดที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง	50
4.21 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยืด Type B1	51
4.22 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยืดที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง	51
4.23 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยืด Type B2	52
4.24 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยืดที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง	52
4.25 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยืด Type C1	53
4.26 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยืดที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอชืด Type C2	54
4.28 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอชืดที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง	54
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $t$ กับ $\Phi$	56
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง $s$ กับ $\alpha$	57
4.31 ความสัมพันธ์ ระหว่าง $e$ กับ $\beta$	58
4.32 แผนภาพอิสระของครึ่งส่วนบนของบริเวณปลายชืด	59
4.33 เปรียบเทียบการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกระหว่างผลการวิจัยกับ Strut-and-tie	60



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เมื่อโครงสร้างพื้นรับน้ำหนักบรรทุกทุกบริเวณช่วงกลางแผ่นพื้น จะเกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวบนของพื้นและเกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของพื้น (กลับกัน ในกรณีพื้นบริเวณเสา) แต่เนื่องจากคอนกรีตรับแรงอัดได้ดี แต่รับแรงดึงได้น้อยจึงต้องเสริมเหล็กเพื่อรับแรงดึงดังที่กระทำกันในกรณี โครงสร้างพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งคอนกรีตบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึงจะไม่ได้ช่วยรับแรง แตกต่างจากในกรณีของคอนกรีตอัดแรง ที่ให้แรงอัดแก่คอนกรีตด้วยลวดอัดแรงก่อนที่จะรับน้ำหนักบรรทุก แรงอัดนี้จะไปหักล้างกับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุก ทำให้เกิดเฉพาะหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตช่วยรับแรงได้ทั้งหน้าตัดและช่วยควบคุมรอยแตกร้าวของหน้าตัด

การพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดมากขึ้น คอนกรีตอัดแรงจึงได้รับการพัฒนาให้สามารถอัดแรงได้มากขึ้นเป็นผลให้ความหนาของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงลดลง ซึ่งมีผลต่อน้ำหนักบรรทุกของอาคาร อนึ่งการพัฒนาระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงได้มีสองแนวทางคือการใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูป (พื้นและคานคอนกรีตหล่อสำเร็จ) และพื้นหล่อในที่ (พื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง Post-tension Slab ) ซึ่งการใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีข้อดีที่ไม่ต้องใช้นั่งร้านและไม้แบบในการก่อสร้างแต่มีข้อจำกัดที่พื้นต้องเป็นระบบพื้นทางเดียว (One-way slab) และรอยต่อของโครงสร้างก็เป็นจุดอ่อนของโครงสร้าง แตกต่างจากในกรณีพื้นหล่อในที่อย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังที่สามารถออกแบบพื้นให้รับแรงได้ทั้งสองทาง (Two-way slab) อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้เป็นโครงสร้างพื้นไร้คานได้ ผลดีของโครงสร้างระบบพื้นไร้คานคือทำให้การก่อสร้างทำได้รวดเร็ว เพราะการตั้งนั่งร้านและไม้แบบทำได้สะดวก และเมื่อไม่มีคานจึงมีผลดีต่ออาคารที่มีจำนวนชั้นมากๆ เพราะสามารถลดความสูงต่อชั้นลงมาได้ จึงสามารถสร้างให้มีจำนวนชั้นมากขึ้นเมื่อมีความสูงเท่าเดิม

การก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังกระทำโดยการเตรียมไม้แบบวางเหล็กเสริม จากนั้นจึงติดตั้งลวดอัดแรงและสมอยึดลวดอัดแรง โดยการร้อยลวดอัดแรงในท่อ (Hollow Duct) เมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วจึงเทคอนกรีต และบ่มคอนกรีตจนมีกำลังอัดมากกว่าค่ากำลังอัดขณะถ่ายแรง ( $f_{cu}$ ) ที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำการอัดแรงโดยการดึงลวดอัดแรงที่ถูกร้อยอยู่ในท่อด้วยเครื่องไฮดรอลิกส์ เมื่อปล่อยเครื่องไฮดรอลิกส์ ลวดอัดแรงจะหดตัวกลับแต่ถูกยึดด้วยสลักลิ้มยึดลวดอัดแรงและถ่ายแรงอัดไปยังสมอยึดลวดอัดแรง แรงอัดที่ได้จากลวดอัดแรงนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดก่อนที่จะรับแรง และเมื่อถอดนั่งร้านออกน้ำหนักของพื้นและน้ำหนักบรรทุกที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในคอนกรีตก็จะถูกหักล้างไปด้วยแรงอัดจากลวดอัดแรง ซึ่งในการก่อสร้างเพื่อเร่งระยะเวลาในการก่อสร้างให้เร็วขึ้น จะทำการถอดนั่งร้านออกทันทีหลังจากที่ดึงลวดอัดแรงเสร็จดังนั้น ในช่วงขณะ

ดังนั้นสมอยึดลวดอัดแรงจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของพื้นคอนกรีตอัดแรงทั้งในแง่ระยะเวลาก่อสร้างและความหนาของพื้น ในด้านระยะเวลาในการก่อสร้างถ้าสมอยึดลวดอัดแรงมีการกระจายหน่วยแรงได้ดี ก็จะสามารถออกแบบให้ดึงลวดอัดแรงในขณะที่คอนกรีตมีกำลังต่ำได้ทำให้ถอดนั่งร้านได้เร็วขึ้นสามารถนำไม้แบบไปใช้งานต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนไม้แบบ ส่วนในแง่ความหนาของพื้นสมอยึดลวดอัดแรงจะเป็นตัวกำหนดความหนาน้อยที่สุดของพื้นซึ่งในปัจจุบันความหนาที่น้อยที่สุดของพื้นอยู่ที่ 18 cm เพราะถ้าคอนกรีตมีความหนาน้อยกว่านี้สมอยึดลวดอัดแรงจะไม่สามารถกระจายแรงออกไปได้ ด้วยข้อจำกัดในเรื่องนี้จึงไม่เหมาะที่นำพื้น Post-tension Slab ไปใช้ในอาคารที่มีช่วงเสาใกล้กัน ได้ เพราะเมื่อมีช่วงเสาใกล้กันก็ต้องการความหนาน้อยลงจึงเป็นการไม่คุ้มค่าที่จะใช้พื้นระบบนี้

การระเบิดของสมอยึดลวดอัดแรงพบได้บ่อยๆเนื่องจากความเร่งรีบในการก่อสร้าง โดยทำการดึงลวดขณะที่คอนกรีตยังไม่ได้กำลังอัด การเสริมเหล็กไม่ถูกต้อง และการเอียงศูนย์ของสมอยึดลวดอัดแรง โดยบริเวณสมอยึดลวดอัดแรงนี้จะมีแรงอัดกระทำมากที่สุดขณะที่ดึงลวดอัดแรง เพราะขณะอัดแรงยังไม่ได้อัดน้ำปูนหน้าตัดของบริเวณสมอยึดจึงยังเป็นช่องว่างอยู่ และขณะที่เครื่องไฮดรอลิกส์ดึงลวดอัดแรงจะใช้สมอยึดลวดอัดแรงเป็นจุดรองรับเพื่อดึงลวดอัดแรงให้ยืดออก ซึ่งหลังจากที่ปล่อยลวดอัดแรง ลวดอัดแรงจะหดตัวและดึงสลักลิ่มให้เข้าที่ซึ่งเกิดการสูญเสียแรงที่สลักลิ่มทำให้แรงอัดลดลงอีกทั้งเมื่อเวลาผ่านไปแรงอัดก็จะลดลงไปเพราะความล้าของคอนกรีตและลวดอัดแรง ดังนั้นการออกแบบบริเวณสมอยึด จึงต้องทำให้เกิดการกระจายแรงออกไปให้ได้มากที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเค้นเฉพาะจุดซึ่งจะทำให้เกิดการระเบิดของคอนกรีตบริเวณสมอยึดได้

มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบบริเวณสมอยึดลวดอัดแรงนี้ เป็นมาตรฐานของคานคอนกรีตอัดแรงที่กล่าวถึงวิธีการคำนวณหาแรงระเบิดแล้วนำแรงระเบิดนี้ไปคำนวณปริมาณเหล็กปลอกกันระเบิด โดยแรงระเบิดนี้คำนวณมาจากวิธี strut-and-tie model โดยจำลองสมอยึดเป็นเพียงแผ่นรับแรงกดซึ่งแรงกดนี้จะเกิดแรงอัดเฉพาะจุดที่บริเวณแผ่นรับแรง แต่ในบริเวณที่ห่างออกไปแรงกดนี้จะกระจายออกไปทั่วหน้าตัดตามหลักการของ Saint-Venant โดยมีแรงระเบิดเป็นตัวทำให้เกิดสมดุลของแรง แต่ในกรณีของพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง มีรูปแบบการกระจายแรงแตกต่างไปจากกรณีของคานคอนกรีตอัดแรง เพราะพื้นคอนกรีตอัดแรงมีความหนาน้อยกว่าความกว้างของพื้นมาก การระเบิดของพื้นจึงเกิดขึ้นที่ด้านบางของพื้นตรงกันข้ามกับกรณีของคานคอนกรีตอัดแรง และเหล็กปลอกยังมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตคือ [1] ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสัดส่วนโดยตรงจากความต้านทานปกติ (เมื่อไม่มีแรงดันกระทำรอบข้าง) อีกเท่ากับ 4.1 เท่าของแรงดันรอบข้าง อีกทั้งรูปร่างของสมอยึดลวดอัดแรงยังมีผลต่อการกระจายหน่วยแรงของคอนกรีต



## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายหน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณสมอียึดลวดอัดแรง

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของเหล็กเสริมต่อการกระจายหน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณสมอียึดลวดอัดแรง

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมศูนย์ ต่อการกระจายแรงในคอนกรีตบริเวณสมอียึดลวดอัดแรง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

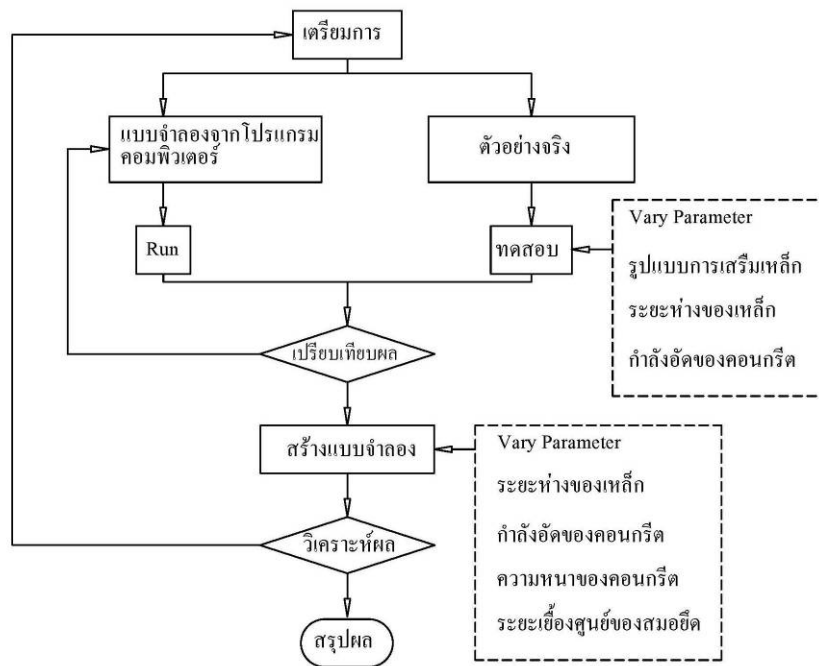
## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาผลกระทบจากการเสริมเหล็กบริเวณสมอียึดลวดอัดแรงต่อความสามารถรับแรงของสมอียึด เฉพาะบริเวณพื้นคอนกรีตอัดแรง(Post-tension Slab) ไม่รวมถึงผลจากแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ

1.3.2 ศึกษาผลกระทบจากการเสริมเหล็กต่อความสามารถรับแรงของสมอียึด ในช่วงกำลังอัดของคอนกรีตไม่เกิน 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ด้วยข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการทดสอบจากพื้นอาคารทั้งผืนได้จึงต้องสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของหน่วยแรง อนึ่งเพื่อปรับตั้งค่าของแบบจำลองจึงต้องนำผลทดสอบจากตัวอย่างคอนกรีตมาเปรียบเทียบผล จนได้แบบจำลองที่ถูกต้อง แล้วจึงสามารถนำแบบจำลองมาวิเคราะห์ผลต่อไป ดังมีขั้นตอนการศึกษาดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

## 1.5 ข้อจำกัดของการศึกษา

### 1.5.1 ขนาดของตัวอย่าง

เนื่องจากไม่สามารถทดสอบพื้นที่ทั้งผืนได้ จึงทดสอบด้วยการหล่อตัวอย่าง ขนาด 75x65 cm หน้า 20 cm เพื่อใช้ในการทดสอบ

### 1.5.2 การทดสอบโดยให้แรงอัดแทนการดึงลวดอัดแรง

สมอขีตที่เลือกมาทดสอบนี้เป็นชนิดร้อยลวดอัดแรง 3 เส้น แต่เนื่องจาก ลวดอัดแรง 3 เส้นรับแรงได้ไม่เกิน 45 t ซึ่งน้อยกว่าแรงอัดที่ต้องการทดสอบและแรงที่สูญเสียไปจากตัวยึดลวดอัดแรง ไม่สามารถวัดได้ จึงทำการทดสอบโดยให้แรงอัดแก่หัวสมอ แทนการดึงลวดอัดแรง

### 1.5.3 จำนวน อิลิเมนต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จำนวนอิลิเมนต์ในแบบจำลองจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการคำนวณ ด้วยข้อจำกัดในด้านเวลาจึงต้องลดจำนวนอิลิเมนต์ลงและลดรูปของแบบจำลองลง โดยจำลองตัวสมอขีตให้เป็นรูปทรงตัน และให้เหล็กปลอกกับเหล็กแกนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งช่วยลดจำนวนอิลิเมนต์และหน้าสัมผัสลงไปทำให้การวิเคราะห์ผลทำได้เร็ว

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบถึงรูปแบบการกระจายหน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณสมอขีตลวดอัดแรง

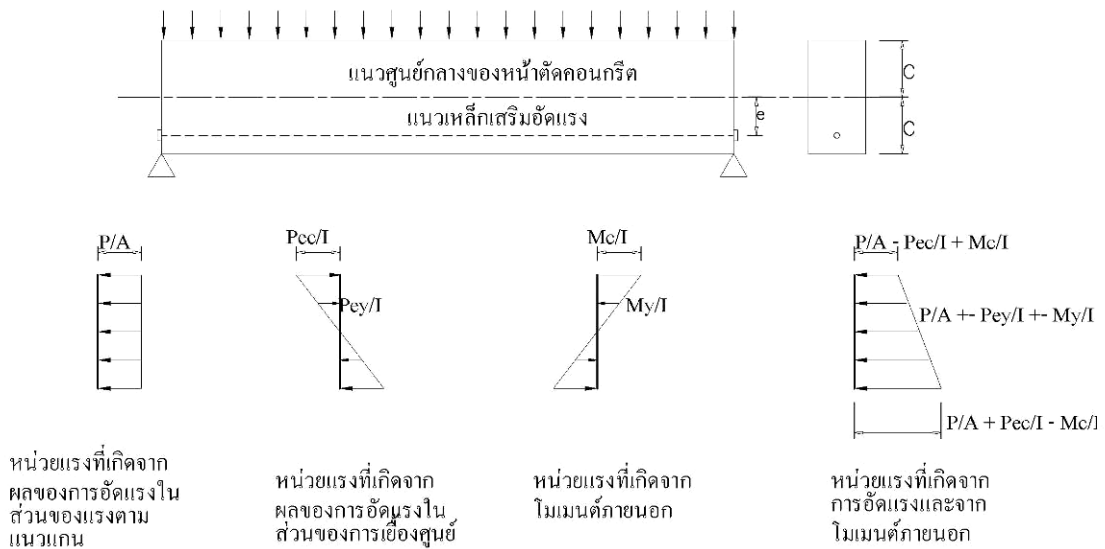
1.6.2 สามารถสร้างสมการสำหรับออกแบบเหล็กเสริมบริเวณสมอขีตลวดลวดอัดแรง

# บทที่ 2

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คอนกรีตอัดแรง

คอนกรีตอัดแรงอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกบริเวณที่เป็นโมเมนต์บวกจะเกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคานและหน่วยแรงอัดที่ผิวบนของคาน (กลับกันในกรณีของโมเมนต์ลบ) แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้น้อย การให้แรงอัดบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึงจึงเป็นการหักล้างหน่วยแรงดึงไปได้ทำให้เกิดเฉพาะหน่วยแรงอัดในคอนกรีต



รูปที่ 2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในพื้นคอนกรีตอัดแรง [2]

คอนกรีตอัดแรงแยกประเภทตามวิธีการอัดแรงได้ 2 แบบคือคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนและคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง

#### 2.1.1 คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

การดึงเหล็กจะกระทำก่อนหล่อคอนกรีต โดยที่เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ที่ระหว่างค้ำ (Fixed abutment) ที่ปลายทั้งสองข้างหลังจากที่ติดตั้งไม้แบบตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ก็จะหล่อคอนกรีตจนมีกำลังสูงถึงค่าที่ต้องการ จากนั้นก็ทำการตัดเหล็กเสริมอัดแรงที่ปลายทั้งสองด้าน เหล็กเสริมที่พยายามหดตัวลงคอนกรีตจึงถูกอัดโดยเหล็กเสริมอัดแรงนี้ การอัดแรงเกิดขึ้นโดยการถ่ายแรงผ่านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรง

### 2.1.2 คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง

คอนกรีตอัดแรงชนิดอัดแรงภายหลังมีขั้นตอนการก่อสร้างโดยการเสริมเหล็กและลวดอัดแรงสมอียดจากนั้นเทคอนกรีตบ่มจนได้กำลังอัดที่ต้องการจึงทำการดึงลวดอัดแรง โดยในกรณีพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดมีแรงยึดเกาะทำการอัดน้ำปูน (Grouting) เพื่อสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรงช่วยควบคุมรอยแตกร้าวเพิ่มแรงอัดประลัยให้สูงขึ้น และป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กอัดแรง ส่วนในระบบไร้การยึดเหนี่ยวจะไม่มีการอัดน้ำปูนแต่จะใช้สารป้องกันการกัดกร่อนเคลือบที่ผิวเหล็กแทน



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง

จะเห็นได้ว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงจะมีคุณลักษณะเด่นในแง่ความประหยัด เพราะสามารถใช้คอนกรีตได้ทั้งหมดทำให้พื้นมีความหนาน้อยและสามารถก่อสร้างในระบบพื้นไร้คานได้ แต่เนื่องจากขณะที่ดึงลวดอัดแรง แรงอัดทั้งหมดจะถูกถ่ายไปยังสมอียดลวดซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดแรงอัดมากที่สุดเพราะหลังจากที่ถ่ายแรงไปแล้วจะเกิดการสูญเสียแรงที่สลักลิ่มซึ่งคำนวณได้จากสมการ[2]

$$\Delta P_{anc} = \theta_{anc} L_{anc} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$L_{anc} = \sqrt{\frac{2A_s E_s \Delta_a}{\theta_{anc}}} \quad (2.2)$$

$\theta_{anc}$  = ค่าความลาดชันที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเข้าที่ของสมอียดและมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของ

ค่าความลาดชันของแนวการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด ( $\theta_{anc} = 2\theta_f$ )

$A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง

$E_s$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง

## 2.2 บริเวณสมอยึดของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง (Anchorage Zones)

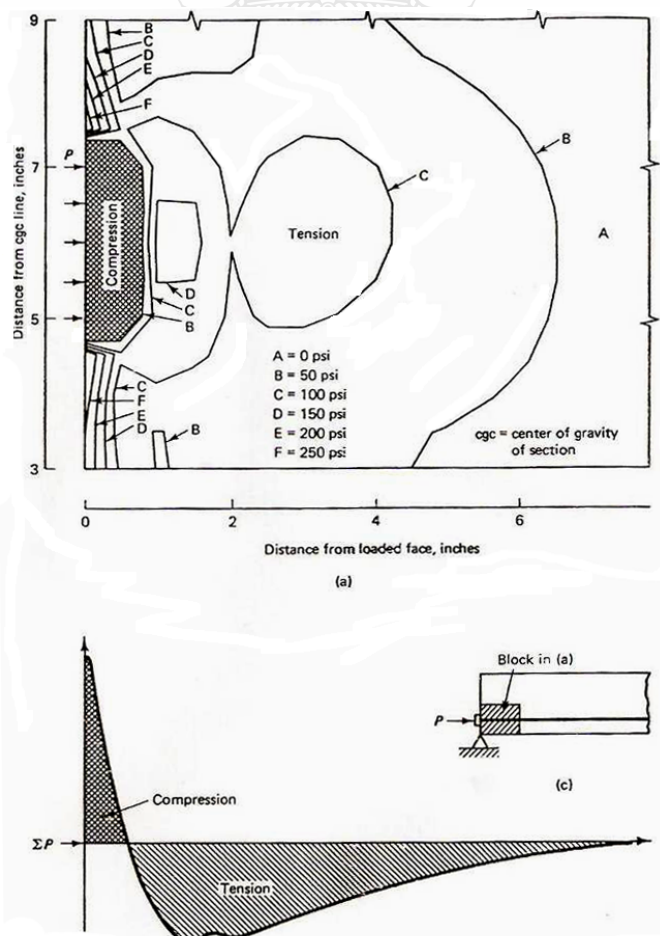
บริเวณสมอยึดของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง (Anchorage zones) สามารถแบ่งขอบเขตได้ตามปริมาณแรงอัดจากลวดอัดแรงที่ถ่ายแรงมายังสมอยึดลวดอัดแรง แรงอัดนี้จะกระจายเป็นเส้นตรงรอบหน้าตัด โดยรอบสมอยึด โดยระยะของการกระจายหน่วยแรงนี้เป็นไปตามหลักการของ St.Venant คือหน่วยแรงจะกระจายสม่ำเสมอจากสมอยึดเป็นระยะประมาณเท่ากับความลึก (h) ซึ่งเป็นระยะรวมของบริเวณสมอยึด (Anchorage zones) โดยบริเวณสมอยึดนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน[3]คือ

### 2.2.1 ส่วนทั่วไป (General Zone)

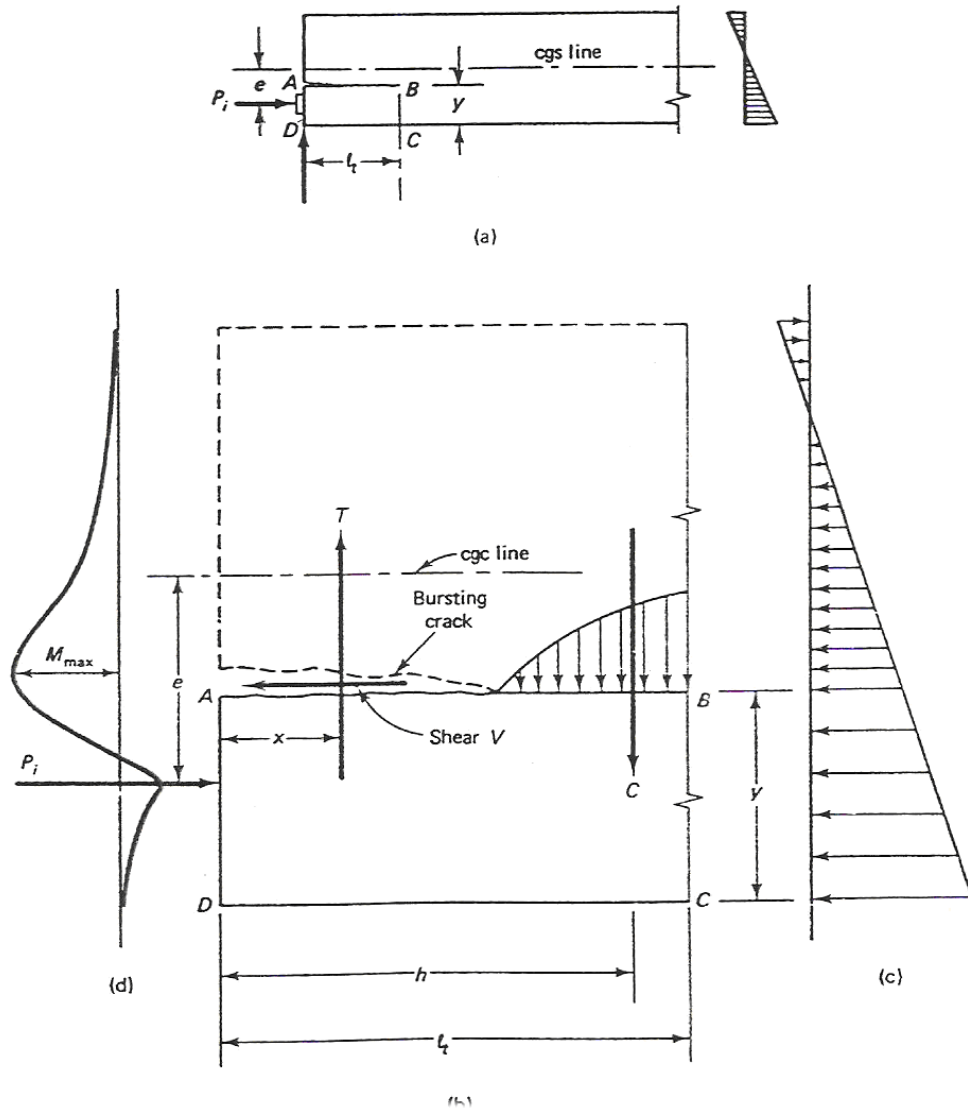
ส่วนทั่วไป ประกอบด้วยบริเวณทั้งหมดของบริเวณสมอยึด มีระยะเท่ากับความลึกของคานาในกรณีทั่วไป

### 2.2.2 ส่วนติดสมอ (Local Zone)

ส่วนติดสมอ คือปริซึมโดยรอบที่ติดกับสมอยึดและบริเวณที่ต้องเสริมเหล็กขอบเขตของ Local zone ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงรูปแบบของการกระจายหน่วยแรงอัดและแรงดึงในบริเวณ Local Zone



รูปที่ 2.3 Principle tensile stress contours



รูปที่ 2.4 Post-tension beam end block

### 2.2.3 การออกแบบบริเวณปลายยึดของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง

การออกแบบบริเวณปลายยึดในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง ประกอบด้วย การออกแบบ 2 ส่วนคือ การออกแบบขนาดของสมอยึดเพื่อป้องกันไม่ให้หน่วยแรงในคอนกรีตสูงเกินข้อกำหนด และการออกแบบเหล็กเสริมกันระเบิดในบริเวณปลายยึดนี้ [2]

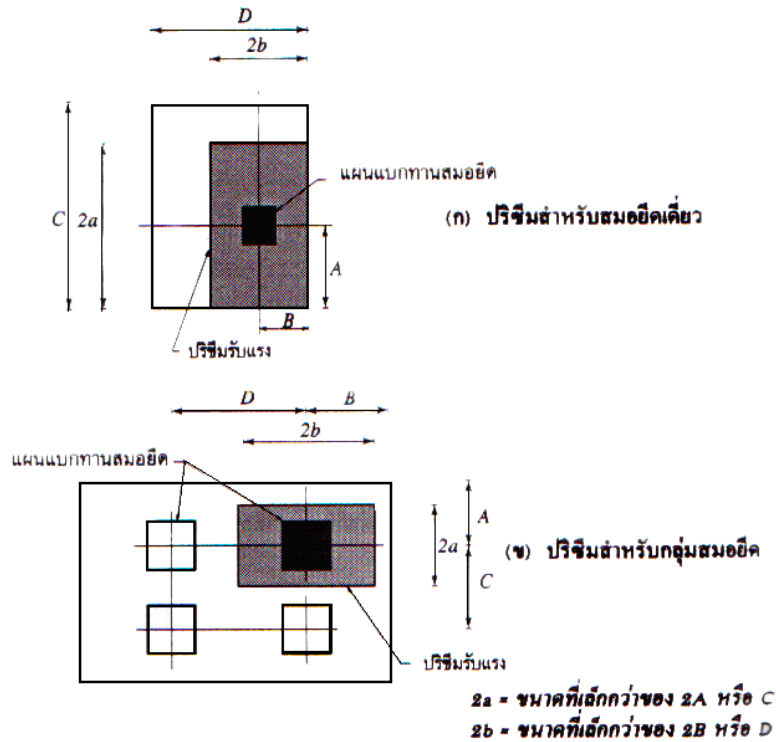
#### ก) การออกแบบขนาดของสมอยึด

สำหรับการออกแบบขนาดของสมอยึด เพื่อไม่ให้หน่วยแรงในคอนกรีตสูงเกินไป มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท ปี 2549 [4] ได้กำหนดหน่วยแรงแบกทานที่ยอมรับให้ของคอนกรีตหลังสมอยึดไว้ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$f_{cp} = 0.8f'_{ci}\sqrt{A_c/A_b} - 0.2 \leq 1.25f'_{ci} \quad (2.3)$$

ขณะใช้งาน  $f_{cp} = 0.6 f_{ci}' \sqrt{A_c / A_b} \leq f_{ci}'$  (2.4)

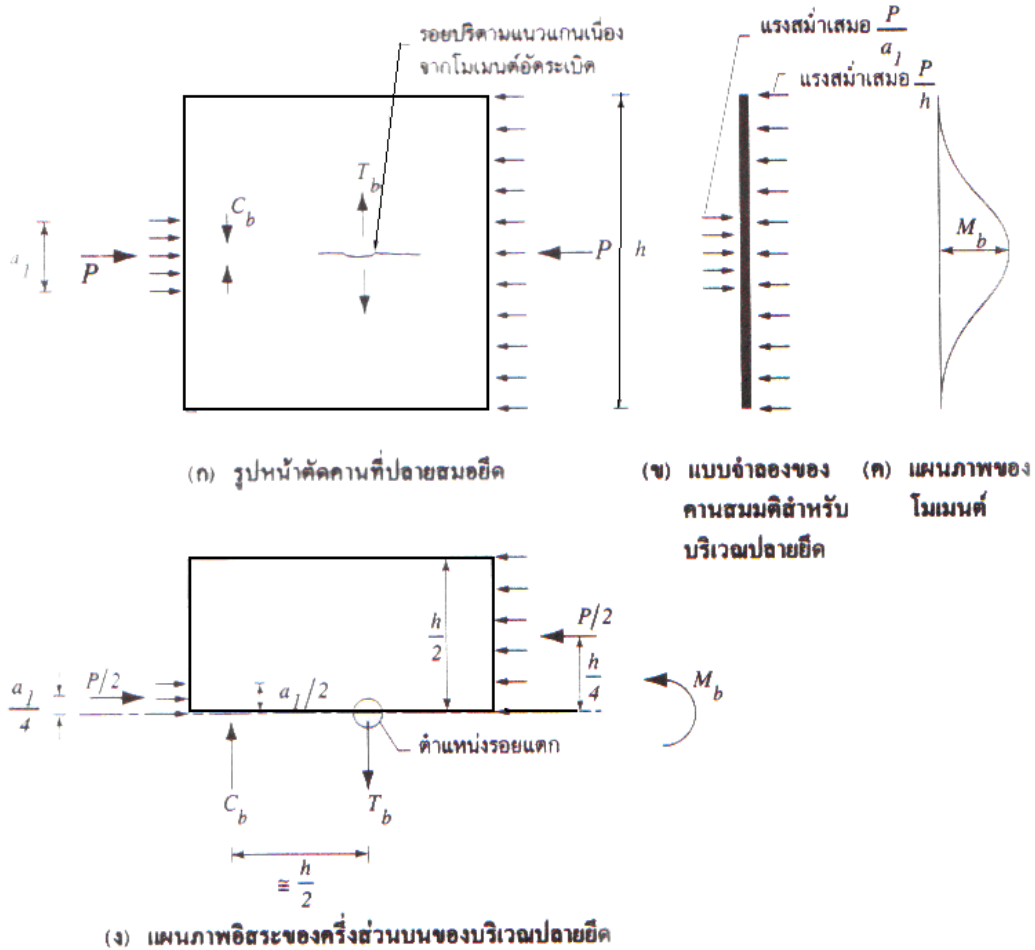
- โดยที่  $f_{cp}$  คือ หน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของคอนกรีตหลังสมอยึด  
 $f_{ci}'$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง  
 $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของปริซึมรับแรง  
 $A_b$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่รับแรงแบกทาน( ดูรูปที่ 2.5 )



รูปที่ 2.5 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของปริซึมรับแรง

ข) การออกแบบเหล็กเสริมกันระเบิด

การเกิดแรงดึงในทิศตั้งฉากมีสาเหตุมาจากการกระจายแรงที่ถ่ายจากสมอยึดสู่คอนกรีตในวงกว้างขึ้น โดยการกระจายทั้งในความลึกและความกว้าง ดังนั้นแรงดึงจึงเกิด 2 ทิศตามความลึกและความกว้างเช่นเดียวกัน พิจารณารูปที่ 2.5 แรงอัดจากสมอยึด P จะถ่ายผ่านคอนกรีตหลังสมอยึด และกระจายไปตามความลึกและความกว้าง การกระจายแรงอัดจะกระจายแรงอัดจะกระจายไปในแนวทแยง  $C_d$  และในที่สุดแรงอัดจะถูกกระจายจนเป็นแรงสมำเสมอแนวราบ  $C_u$  ในที่สุดถ้าพิจารณาโดยใช้แบบจำลองโครงถัก(Truss model) จะเห็นว่าการกระจายจากแรงอัด  $C_d$  ในแนวทแยงจนเป็นแนวราบ  $C_u$  นั้น ต้องมีแรงดึง  $T_b$  เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของแรงเกิดขึ้นได้  $T_b$  นี้เองที่ทำให้



รูปที่ 2.6 แรงกระทำต่างๆ บริเวณปลายยึดสมอ

การกระทำของแรงต่าง ๆ บริเวณปลายยึดสำหรับกรณีสมอียึดเดี่ยววางกลางหน้าตัด แสดงในรูปที่ 2.6 แรงอัดจากการอัดแรงที่ปลายคานจะถ่ายผ่านสมอียึดในรูปของแรงกระทำสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดสมอียึดและที่บริเวณห่างจากปลายคานไปเป็นระยะพอสมควรแรงกระทำบนหน้าตัดคานก็จะเป็นแรงกระทำสม่ำเสมออีกครั้งหนึ่งดังรูปที่ 2.6 (ก) แรงกระทำบนบริเวณปลายยึดนี้สามารถจำลองเป็นลักษณะของคานสมมติดังรูปที่ 2.6 (ข) จากแบบจำลองนี้จะสามารถหาโมเมนต์ตัด  $M_b$  ได้ดังรูปที่ 2.6 โมเมนต์ตัดนี้บางที่เรียกว่า โมเมนต์อัดระเบิด (Bursting moment) ถ้าพิจารณาครึ่งส่วนบนบริเวณปลายยึดดังรูปที่ 2.6 จะได้ว่าโมเมนต์อัดระเบิด  $M_b$  ถูกต้านด้วยโมเมนต์คู่ควบ ของแรง  $C_b - T_b$  ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแรงคู่ควบทั้งสองโดยประมาณเท่ากับ  $h/2$  ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ยอมรับได้ สำหรับการคำนวณในเรื่องนี้ จากการสมดุลของโมเมนต์จะได้ว่า



$$M_b = C_b \frac{h}{2} = T_b \left( \frac{h}{2} \right) \quad (2.5)$$

โดยค่าของโมเมนต์อัดกระเบิด  $M_b$  สามารถหาได้จากโมเมนต์คัตเนื่องจากแรงกระทำบนคานสมมติที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 (ข) หรืออาจพิจารณาจากรูปที่ 2.6 ง โมเมนต์อัดกระเบิดที่ระยะครึ่งหนึ่งของความลึกคานหาได้จาก

$$M_b = \frac{P}{2} \times \frac{h}{4} - \frac{P}{2} \times \frac{a_1}{4} = \frac{P}{8} (h - a_1) \quad (2.6)$$

แทนค่าในสมการที่ 2.5 ได้

$$T_b = \frac{P}{4} \left( 1 - \frac{a_1}{h} \right) \quad (2.7)$$

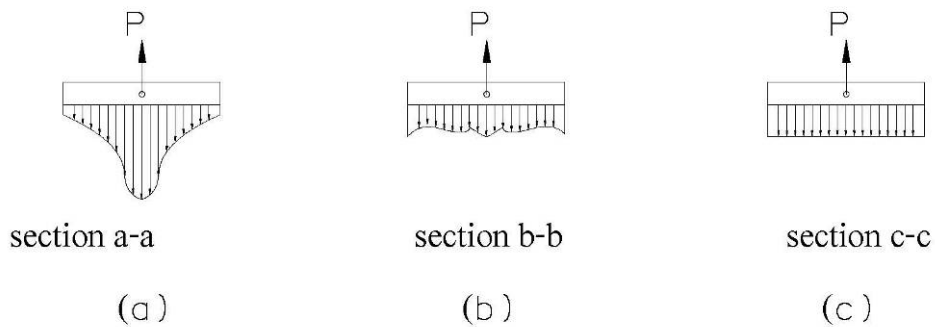
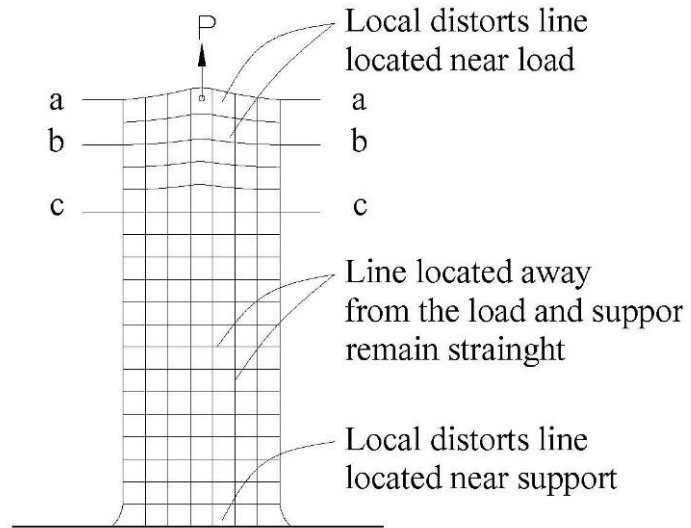
- โดยที่  $T_b$  คือ แรงดึงที่จะก่อให้เกิดรอยปริตามแนวแกน  
 $P$  คือ แรงอัดจากการอัดแรง  
 $a_1$  คือ ความกว้างของสมอยึดทิศทางเดียวกับความลึกของคาน  
 $h$  คือ ความลึกของคาน

เมื่อทราบแรงดึงที่ได้จากสมการที่ 2.6 แล้วก็สามารถหาปริมาณเหล็กเสริมกันปริ  $A_{sb}$  ได้จาก

$$A_{sb} = \frac{T_b}{f_s} \quad (2.8)$$

### 2.3 Principle of Saint-Venant

ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ระหว่างความเค้น และความเครียด ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเส้นตรงแล้วพิจารณาด้วยกฎของฮุก (Hook's law) จะพบว่ามีความสัมพันธ์แบบเป็นสัดส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด เมื่อนำหลักการนี้มาพิจารณาการทดสอบพฤติกรรมของแท่งวัสดุที่เหลี่ยมที่เปลี่ยนรูปร่างไปเมื่อได้รับแรง  $P$  กระทำผ่านศูนย์กลางตามแนวแกนดังรูปที่ 2.7 (a) โดยแท่งวัตถุที่ถูกยึดแน่นที่ปลายข้างหนึ่งและแรงกระทำผ่านรูที่อยู่บนปลายอีกข้างหนึ่ง เมื่อพิจารณาผลจากแรงกระทำจะพบว่าแท่งวัตถุมีการเปลี่ยนรูปร่างไป ดังแสดงได้จากการบิดเบี้ยวผิดรูปไปของเส้นแนวตั้ง และแนวราบที่วาดไว้บนผิวของแท่งวัตถุนี้ จุดหนึ่งที่ต้องสังเกตจากการทดสอบนี้คือ การเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะส่วน (Local deformation) ที่เกิดขึ้นแต่ละปลายมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากปลายมากขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรูปของวัตถุมีค่าเท่ากันและคงที่ตลอดทั่วบริเวณหน้าตัดช่วงกลางของแท่งวัตถุ



รูปที่ 2.7 การรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนของวัตถุตามหลักการของ Saint-Venant

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความเครียดมีความเค้นในวัตถุแท่ง จึงสามารถกล่าวได้ว่าความเค้นก็มีการกระจายตัวอย่างคงที่ตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดถ้าหน้าตัดที่พิจารณานั้นอยู่ห่างอย่างเพียงพอจากตำแหน่งที่แรงภายนอกกระทำต่อตัวอย่าง เช่นการพิจารณารูปร่างของการเปลี่ยนแปลงของการกระจายความเค้นที่กระทำบนหน้าตัด a-a b-b และ c-c ที่อยู่ห่างจากปลายมากเพียงพอสามารถกล่าวได้ว่าหน้าตัด c-c อยู่ห่างจากปลายมากเพียงพอจากแรงกระทำ P ทำให้ผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะส่วนที่เกิดขึ้นหายไป โดยระยะน้อยที่สุดจากปลายของแท่งวัตถุที่เพียงพอสามารถหาได้จากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ด้วยทฤษฎีอีลาสติก (Theory of elasticity) นอกจากนั้นผลลัพธ์ของการกระจายความเค้นในบริเวณนี้ จะมีค่าเหมือนกันกับการกระจายความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกเทียบเท่าสถิตอื่นที่กระทำกับที่บริเวณเดียวกันดังรูปที่ 2.7 (C)

## 2.4 ACI 318 Building Code and Commentary [5]

สืบเนื่องมาจาก ข้อกำหนดในปี 1999 และตรงกันกับ 1996 AASHO “Standard Specifications for Highway Bridges” และตามคำแนะนำในผลการวิจัยของ NCHRP 356 หลังจากการรับค่าจาก AASHO 1994 ทำให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับข้อกำหนดสำหรับบริเวณสมอยึดของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึง เหล็กที่หลัง (Post-tension tendon anchorage zones) คณะกรรมการ ACI 318 ได้ทำการแก้ไข ข้อกำหนดโดยทั่วไปให้ตรงกันกับข้อกำหนดของ AASHO ซึ่งข้อกำหนดของ AASHO นั้นเป็น ข้อกำหนดที่มีรายละเอียด และเป็นข้อกำหนดเพื่อวิเคราะห์และออกแบบการเสริมเหล็กที่ล้วนถือว่า ครบถ้วนมากกว่าข้อกำหนดทั่วไปของ ACI 318 ในข้อกำหนดบริเวณของสมอยึดเกิดจากการทดสอบ ACI 318 จึงได้ใช้ข้อกำหนดของ AASHO เป็นตัวอ้างอิง

### 2.4.1 Anchorage Zones

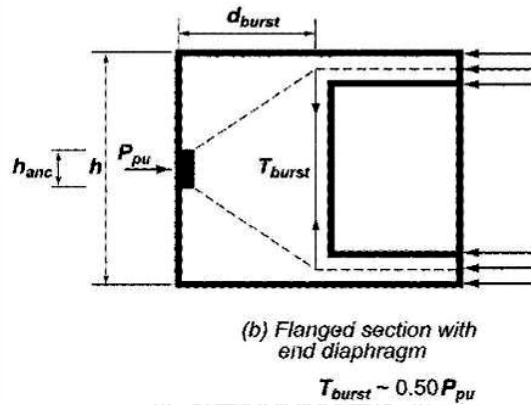
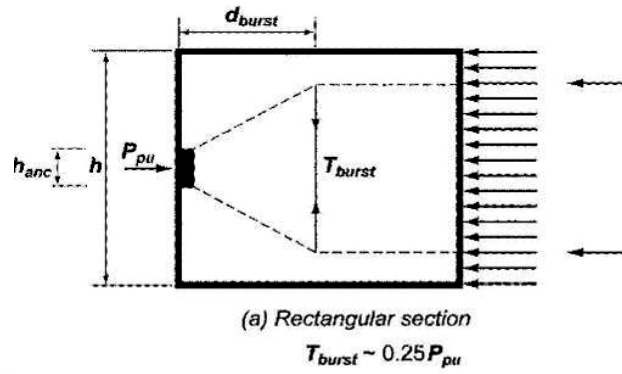
อาศัยหลักการของ Saint-Venant ขอบเขตของบริเวณสมอยึด (Anchorage zones) สามารถ หา โดยประมาณจากระยะที่มากที่สุดของพื้นที่หน้าตัดส่วนติดสมอและส่วนทั่วไปดังใน รูปที่ 2.8(a) เมื่อสมออยู่ส่วนปลายของชิ้นส่วน และถูกดึงหน่วยแรงดึงจะอยู่ด้านหลังอุปกรณ์หน่วยแรงดึงเหล่านี้ ก่อให้เกิดความไม่เข้ากันของการเสีรูปร่างหน้า (ดังแสดงในรูปที่ 2.8 b) และด้านหลังของสมอยึด ขอบเขตของแรงสามารถพิจารณาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (b)

### 2.4.2 Local Zone

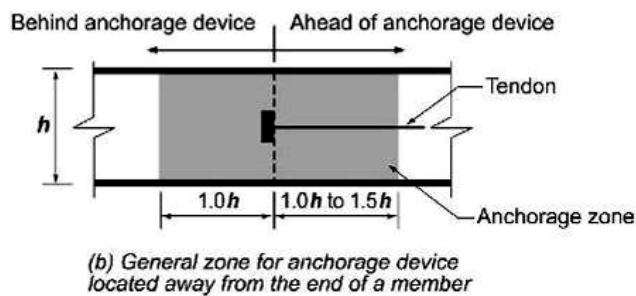
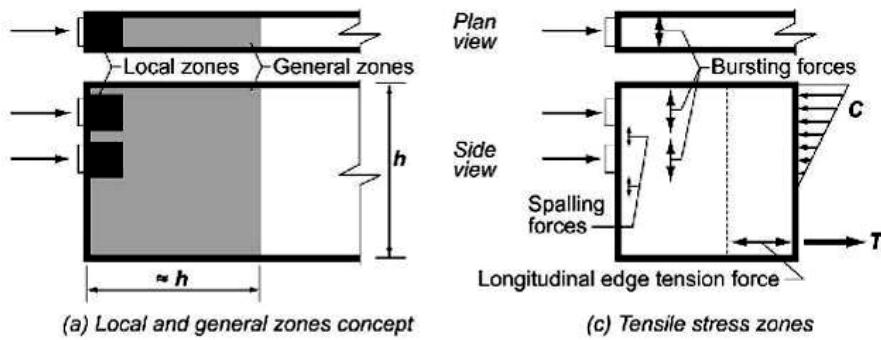
Local zone รับหน่วยแรงเฉพาะจุดซึ่งมีอยู่สูงมาก ที่ถูกส่งมาจากสมอยึดและมันจะถ่าย แรงไปถึงส่วนที่เป็นบริเวณสมอยึดพฤติกรรมของ Local zone ในส่วนใหญ่จะขึ้นกับ ลักษณะของ สมอยึดและขอบเขตที่ทำการเสริมเหล็ก แต่มีผลน้อยกับลักษณะของโครงสร้าง การออกแบบเกี่ยวกับ ส่วนติดสมอบางครั้งไม่สามารถทำได้ จนกว่าจะกำหนดชนิดของสมอดังนั้นการออกแบบจึงต้องทำ ช่วงที่ได้เขียนแบบแล้ว เมื่อกำหนดชนิดของสมอยึดได้แล้วผู้จัดทำวัสดุต้องทำการทดสอบคุณสมบัติ ตาม AASHO “Standard Specifications for Highway Bridges” Division II, Article 10.3.2.3 และ พิสูจน์ให้เห็นถึงเงื่อนไขในการใช้สมอยึดตัวนั้น การพิจารณาการออกแบบ Local Zone จะคำนึงถึง แรงกดที่มีค่าสูงและขอบเขตของเหล็กเสริมภายใต้เงื่อนไขของกำลังอัดของคอนกรีต ค่าความ ปลดปล่อยของแรงกดต้องไม่เกิน  $0.94f_{py}$  และต้องไม่เกิน  $0.8 f_{pu}$  ซึ่งอนุญาตให้ใช้ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ

$$P_u = (1.2) (0.80) f_{pu} A_{ps} = 0.96 f_{pu} A_{ps} \quad (2.9)$$

เมื่อ	$P_u$	คือ แรงอัดที่กระทำจากลวดอัดแรง
	$f_{pu}$	คือ หน่วยแรงอัดประลัยของลวดอัดแรง
	$A_{ps}$	คือ หน้าตัดของลวดอัดแรง



รูปที่ 2.8 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด



รูปที่ 2.9 Anchorage Zone

#### 2.4.4 Design methods

รายการของวิธีการออกแบบ เหล่านี้เป็นการออกแบบในแนวตั้งเดิม โดย มีการทำนาย หน่วยแรงเปรียบเทียบกับเมื่อการทดสอบ การใช้ Strut-and-tie model ช่วยเหลือได้มากในการ ออกแบบ General zone

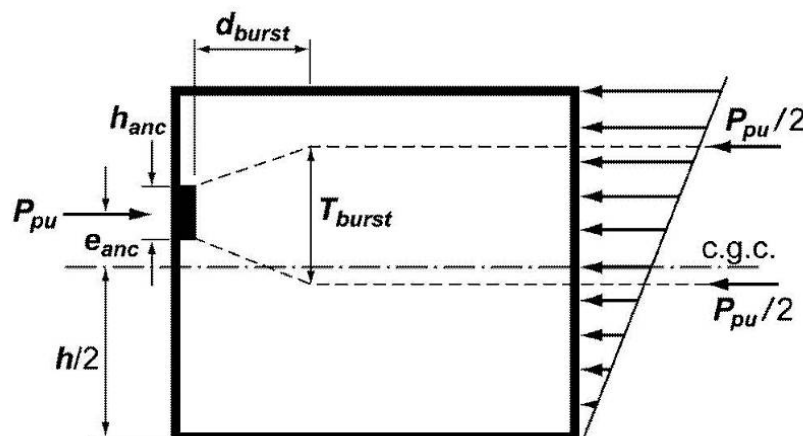
สำหรับหลายกรณีสมการอย่างง่ายของแรงระเบิด  $T$  และระยะเยื้องศูนย์กลาง อาจจะการหาค่า มาจากสมการที่ 2.9 ในรูปของสมการที่ 2.10 ข้อกำหนดแรงผลักดันเฉพาะเจาะจงควรมีการร่วมกัน พิจารณาถ้าเป็นลวดอัดแรงที่มากกว่าหนึ่ง

$$T_{burst} = 0.25 \sum P_{pu} \left( 1 - \frac{h_{anc}}{h} \right) \quad (2.10)$$

$$d_{burst} = 0.5(h - 2e_{anc}) \quad (2.11)$$

โดยที่

- $T_{burst}$  = แรงดึงที่ก่อให้เกิดการระเบิด
- $P_u$  = แรงอัดที่กระทำต่อลวดอัดแรง
- $h_a$  = ความกว้างความลึกของสมอยึด
- $e_{anc}$  = ระยะเยื้องศูนย์กลางของสมอยึด
- $h$  = ความลึกของหน้าตัด
- $d_{burst}$  = จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริม



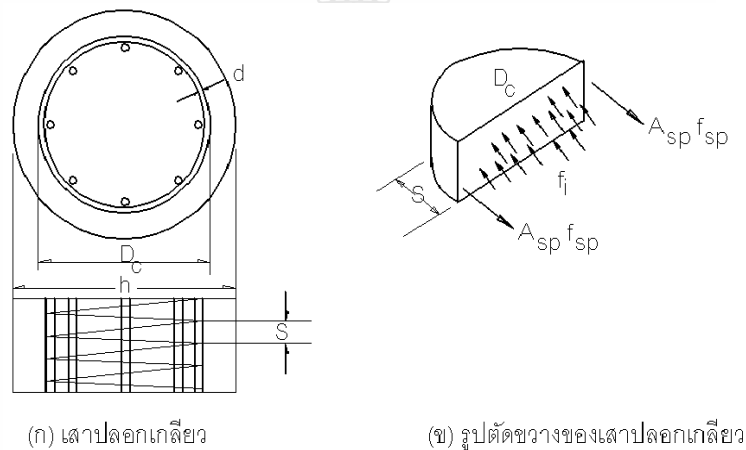
รูปที่ 2.10 strut – and – tie model example

## 2.5 ทฤษฎี เสาปลอกเกลียว [1]

ความต้านทานแรงอัดของส่วนคอนกรีตหุ้ม  $= (0.85f_c' A_g + A_c)$  ในเมื่อ  $A_c$  เป็นเนื้อที่ของแกนคอนกรีตที่วัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอกเกลียว ถ้าให้  $\rho_s$  เป็นอัตราส่วนของปริมาตรของเหล็กปลอกเกลียวต่อปริมาตรของแกนเสาที่วัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอกเกลียว นั่นคือ

$$\rho_s = \frac{A_{sp} \pi (D_c - d)}{\frac{\pi D_c^2}{4} s} \approx \frac{4A_{sp}}{D_c s} \quad (2.12)$$

โดยที่  $A_{sp}$  เป็นเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กปลอกเกลียว  $D_c$  เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตที่วัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอกเกลียว  $d$  เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกเกลียว และ  $s$  เป็นระยะของเหล็กปลอกเกลียวดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แรงภายในเสาปลอกเกลียว

เมื่อแบ่งครึ่งหน้าตัดขวางของเสา คสล. ปลอกเกลียวออกเป็นสองส่วน ดังรูปที่ 2.9 ข โดยให้  $f_{sp}$  เป็นหน่วยแรงดึงในปลอกเกลียว และ  $f_i$  เป็นหน่วยแรงของแกนเสาคอนกรีตที่พยายามดันหรือระเบิดออก ฉะนั้น โดยหลักการสมดุลของแรง จะได้

$$2 A_{sp} F_{sp} = f_i D_c S \quad (2.13)$$

นั่นคือ หน่วยแรงดันหรือระเบิดออกของแกนเสาคอนกรีต

$$f_i = 2 A_{sp} f_{sp} / D_c s = \rho_s f_{sp} / 2 \quad (2.14)$$

แต่จากการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก โดยให้มีแรงดันรอบข้างแท่งคอนกรีตตัวอย่าง นั้นพบว่า ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสัดส่วนโดยตรงจากความต้านทานปกติ (เมื่อไม่มีแรงดันกระทำรอบข้าง) อีกเท่ากับ 4.1 เท่าของแรงดันรอบข้างที่ใช้กระทำ ฉะนั้นอาจพิจารณาว่า เหล็กปลอกมีส่วนช่วยต้านแรงอัดตามแกนได้อีกเท่ากับ

$$\frac{4.1\rho_s f_{sp}}{2} A_c \text{ หรือประมาณเท่ากับ } 2\rho_s f_{sp} A_c$$

ฉะนั้นเมื่อพิจารณาให้ความต้านทานแรงอัดของส่วนคอนกรีตหุ้มมีค่าเท่ากับความต้านทานแรงอัดของเหล็กปลอกเกลียว นั่นคือ

$$0.85 f'_c (A_g - A_c) = 2\rho_s f_{sp} A_c \quad (2.15)$$

และเมื่อให้เหล็กปลอกเกลียวถูกดึงถึงจุดครากก่อนเกิดการวิบัติ นั่นคือให้  $f_{sp} = f_{sy}$  ซึ่งจะได้ ปริมาณเหล็กเสริมเกลียวที่ใช้

$$\rho_s = 0.425 \frac{f'_c (A_g - A_c)}{A_c f_{sy}} \quad (2.16)$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Project 1029) [6] ได้แบ่งบริเวณสมอชืดออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนติดสมอ (Local zone) และส่วนทั่วไปของบริเวณสมอชืด (General zone) วิธีออกแบบเหล็กเสริมในส่วน General zone คือการออกแบบโดยใช้สูตรประมาณค่าแรงระเบิด (Bursting force,  $T_{burst}$ ) ซึ่งใช้ในการคำนวณปริมาณเหล็กเสริมต่อไปดังสมการที่ 2.17

$$T_{burst} = 0.25 \sum P_{Pu} \left( 1 - \frac{a}{h - 2e} \right) + 0.5 \sum (P_u \sin \alpha) \quad (2.17)$$

$$d_{burst} = 0.5(h - 2e) + 5e \sin \alpha$$

Burdet [7] ได้ทำการศึกษาโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม MSC Patran และวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม ABAQUS โดยมีตัวแปรที่สำคัญของการคำนวณแรงระเบิดคืออัตราส่วนของความกว้างของแผ่นเหล็กสมอต่อความลึกของคาน

Wollmann [8] ได้ทำการทดลองพบว่าแรงกิริยาที่ฐานรองรับมีผลต่อค่าแรงระเบิดของสมอยึดเป็นอย่างมาก

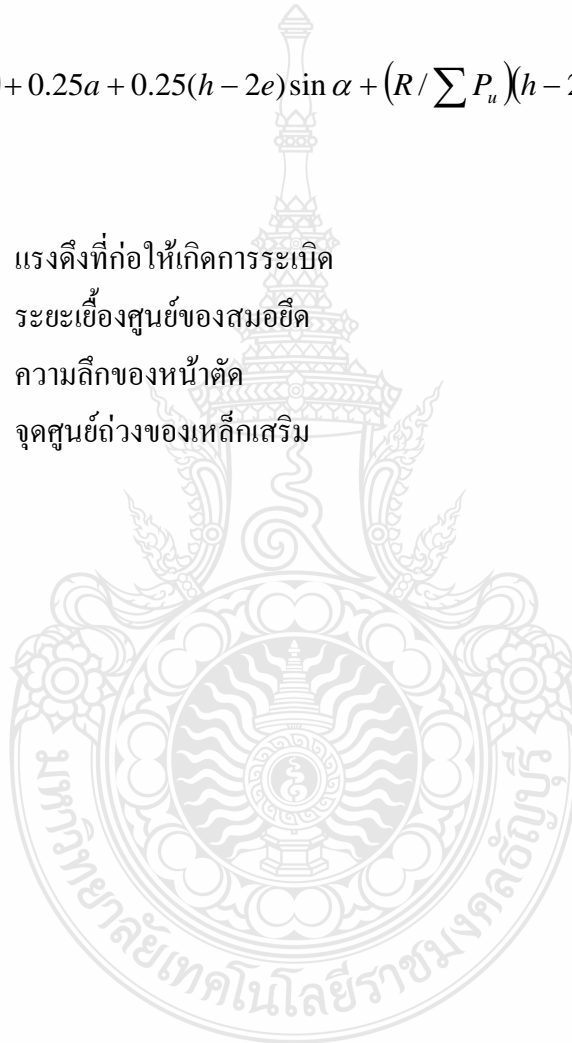
ทรงวุฒิ เสงพระธานี [9] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของบริเวณสมอยึดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยคำนึงถึงผลของแรงกิริยาที่ฐานรองรับจนปรับปรุงสมการของ NCHRP Project 1029 ได้ดังสมการที่ 2.18

$$T_{burst} = 0.25 \sum P_u [1 - a/(h - 2e)] + 0.4 \sum (P_u \sin \alpha) + R(0.25 - 5 \sin \alpha) \geq 0.125 \sum P_u \quad (2.18)$$

$$d_{burst} = 0.5(h - 2e) + 0.25a + 0.25(h - 2e) \sin \alpha + (R / \sum P_u)(h - 2e)(1.5 - 10 \sin \alpha) \quad (2.19)$$

โดยที่

- $T_{burst}$  = แรงดึงที่ก่อให้เกิดการระเบิด
- $e_{anc}$  = ระยะเยื้องศูนย์กลางของสมอยึด
- $h$  = ความลึกของหน้าตัด
- $d_{burst}$  = จุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริม





## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของบริเวณสมอชิดลวดอัดแรงจึงได้เตรียมการศึกษาโดยการเก็บข้อมูลจากกรณีศึกษา แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบวิธีการวิจัยโดยทำการทดสอบการรับแรงอัดประลัยจากตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอชิดลวดอัดแรง ควบคุมไปกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงรูปแบบจนสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต จนได้แบบจำลองที่ถูกต้องสามารถนำไปเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ จนกระทั่งสามารถสร้างสมการเพื่อหาแรงอัดประลัยของสมอชิดลวดอัดแรงได้

#### 3.1 กรณีศึกษา

เพื่อให้เข้าใจรูปแบบและปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการระเบิดของสมอชิดลวดอัดแรง จึงได้ทำการเก็บรวบรวมกรณีศึกษาทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งข้อมูลที่ได้จากกรณีศึกษานี้จะนำไปใช้ออกแบบวิธีการทดสอบกำลังอัดของสมอชิดต่อไป

##### 3.1.2 กรณีศึกษาที่ 1

อาคารหอพัก 7 ชั้น โครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง สมอชิดที่เกิดการระเบิดนี้อยู่บริเวณพื้นระเบียงของอาคารซึ่งเป็นพื้นยื่นของอาคาร โดยยื่นออกไปจากแนวเสา 2 m ลดระดับจากพื้นห้องเพื่อเป็นระเบียงทำให้พื้นมีความหนา 18 cm อัดแรงเมื่อคอนกรีตมีอายุ 5 วัน ทดสอบกำลังอัดจากตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ได้กำลังอัด 300 ksc รอยแตกกระจายตัวเป็นระยะ 15 cm โดยรอบสมอชิด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การระเบิดของสมอชิดในกรณีศึกษาที่ 1

### 3.1.2 กรณีศึกษาที่ 2

อาคารสำนักงาน 5 ชั้น โครงสร้างเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรง โดยพื้นหนา 20 cm สมอียัดที่เกิดการระเบิดนี้ อยู่บริเวณพื้นชั้นหนึ่งของอาคารซึ่งเป็นรอยต่อโครงสร้างพื้นจึงมีการเสริมเหล็ก รอยต่อระหว่างพื้นทำให้เหล็กหนาแน่นแต่การเทคอนกรีตที่ไม่ดีพอ จึงทำให้เกิดโพรงบริเวณนี้และทำการอัดแรงขณะที่คอนกรีตมีอายุ 6 วัน ทดสอบกำลังอัดจากตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ได้กำลังอัด 300 ksc รอยแตกกระจายตัวเป็นระยะ 7 cm โดยรอบสมอียัด ดังรูป ที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การระเบิดของสมอียัดในกรณีศึกษาที่ 2

จากกรณีศึกษาทั้ง 2 กรณีทำให้ทราบว่าแรงอัดที่ถ่ายให้แก่สมอียัดจะเกิดจากการดึงลวดอัดแรง ทั้งสามเส้นๆ ละ 15 ตัน ดังนั้นแรงอัดที่เกิดขึ้นในสมอียัดจึงไม่เกิน 45 ตัน เพราะถ้าดึงลวดเกินกำหนด ลวดจะขาดก่อน การระเบิดของสมอียัดอยู่ในช่วงระยะไม่เกิน 25 cm โดยรอบสมอียัด

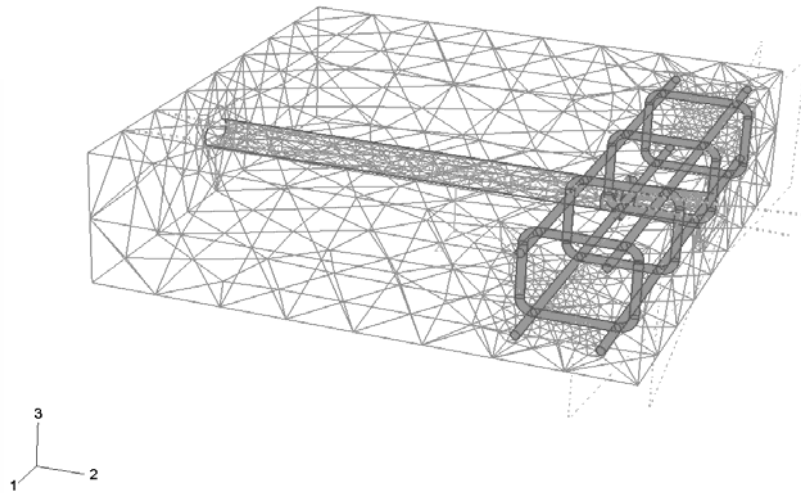
ดังนั้นจึงให้การทดสอบอยู่ในช่วงแรงอัดไม่เกิน 100 ตัน และให้ขนาดของตัวอย่างทดสอบมีขนาดกว้าง 65 cm ยาว 75 cm หนา 20 cm

## 3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Abaqus 6.6-3 ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองดังนี้

### 3.2.1 ขนาดตัวอย่าง

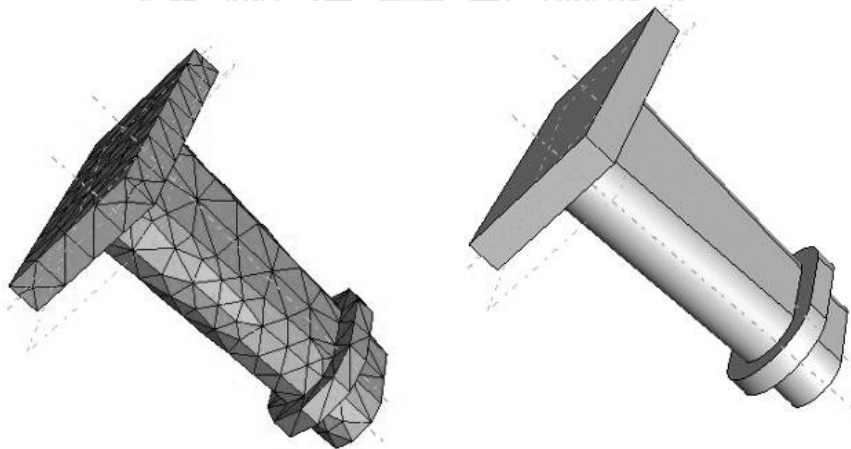
เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลของรูปแบบการกระจายแรงบริเวณสมอียัด ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองครั้งแรกจึงสร้างแบบจำลองที่ยังไม่ซับซ้อนก่อน โดยการจำลองสมอียัดเป็นเพียงแผ่นเหล็กทรงตันและไม่เสริมเหล็กปลอก ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบนี้พบว่าการกระจายหน่วย



รูปที่ 3.3 แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ บริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

### 3.2.2 สมอยึดลวดอัดแรง

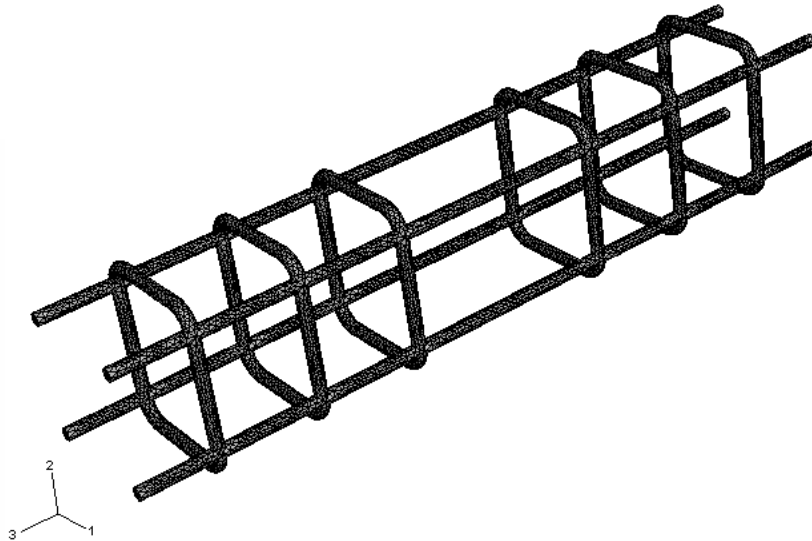
เพื่อลดจำนวนอิเลิเมนต์และผลจากการหาค่าด้านข้างที่ผนังของสมอยึด จึงสร้างแบบจำลองให้เป็นรูปทรงตันที่มีลักษณะรูปร่างภายนอกเสมือนจริง โดยไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของสมอยึดลวดอัดแรงกับคอนกรีต



รูปที่ 3.4 แบบจำลองสมอยึดลวดอัดแรง

### 3.2.3 เหล็กเสริม

ให้เหล็กปลอกกับเหล็กแกนเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อลดจุดต่อระหว่างเหล็กปลอกกับเหล็กแกนทำให้สร้างแบบจำลองได้ง่ายขึ้นโดยไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของเหล็กปลอก

### 3.2.4 ค่าคงที่ของวัสดุ

ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วยชิ้นส่วนสามชิ้นได้แก่ สมอยึดลวดอัดแรง, เหล็กกันระเบิด และคอนกรีต ซึ่งแต่ละชิ้นใช้วัสดุต่างกันและมีค่าคงที่ของวัสดุต่างกัันดังนี้

ก) เหล็ก ให้สมอยึดลวดอัดแรง เหล็กกันระเบิด (เหล็กแกนและเหล็กปลอก) มีค่าคงที่ของวัสดุดังนี้ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)  $E = 2.04 \times 10^6$  ksc อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)  $\nu = 0.36$

ข) ค่าคงที่ของคอนกรีต ให้คอนกรีตมีกำลังอัดคงที่ 280 ksc โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากสมการที่ 3.1

$$E = 15120\sqrt{f_c'} \quad (3.1)$$

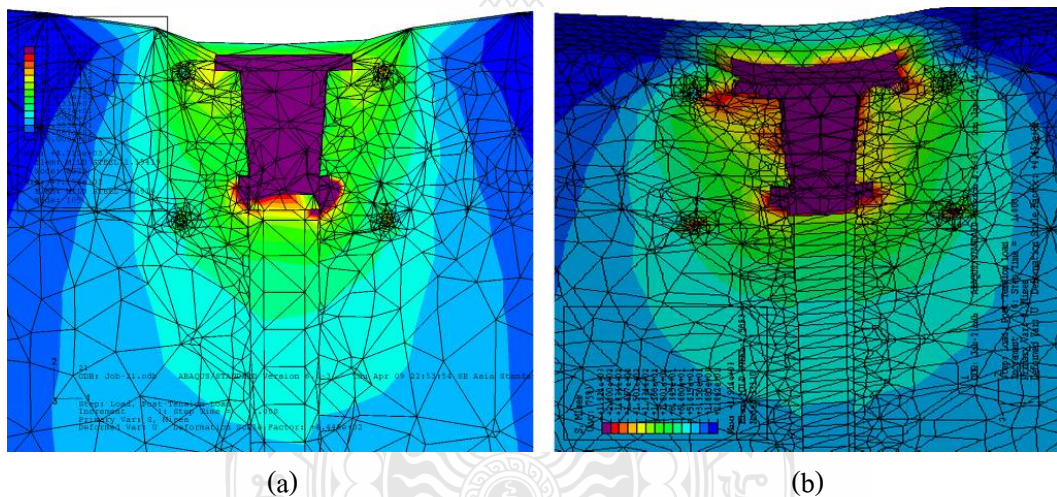
$$E = 15120\sqrt{280} = 253006$$

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)  $\nu = 0.15$

### 3.2.5 จำนวน Element

จำนวนอีลีเมนต์มีผลต่อความละเอียดของผลการวิเคราะห์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ความละเอียดของ อีลีเมนต์สองระดับเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 3.3 โดยที่แบบจำลองอีลีเมนต์ระดับต่ำ กำหนดให้มีระยะห่างของอีลีเมนต์เท่ากับ 10 cm มีจำนวนอีลีเมนต์ประมาณ 2,000 อีลีเมนต์ ส่วนแบบจำลองอีลีเมนต์ระดับสูงให้มีระยะห่างของอีลีเมนต์เท่ากับ 2 cm มีจำนวนอีลีเมนต์ประมาณ 50,000 อีลีเมนต์แบบจำลองอีลีเมนต์ความละเอียดระดับต่ำใช้เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพราะแบบจำลองความละเอียดต่ำใช้เวลาในการคำนวณสั้น ส่วนแบบจำลองความละเอียดระดับสูงจะใช้เพื่อวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าจริง ซึ่งใช้เวลามากกว่าในการประมวลผล

ผลของความละเอียดของอีลีเมนต์ทำให้ผลการวิเคราะห์ต่างกัน คืออีลีเมนต์ที่มีความละเอียดระดับสูงกว่าจะมีการกระจายของหน่วยแรงมากกว่าและรับแรงได้มากกว่า ส่วนเหตุผลที่เลือกอีลีเมนต์ขนาด 2 cm เพราะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของมวลรวมหยาบในคอนกรีต



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบความละเอียดของแบบจำลอง

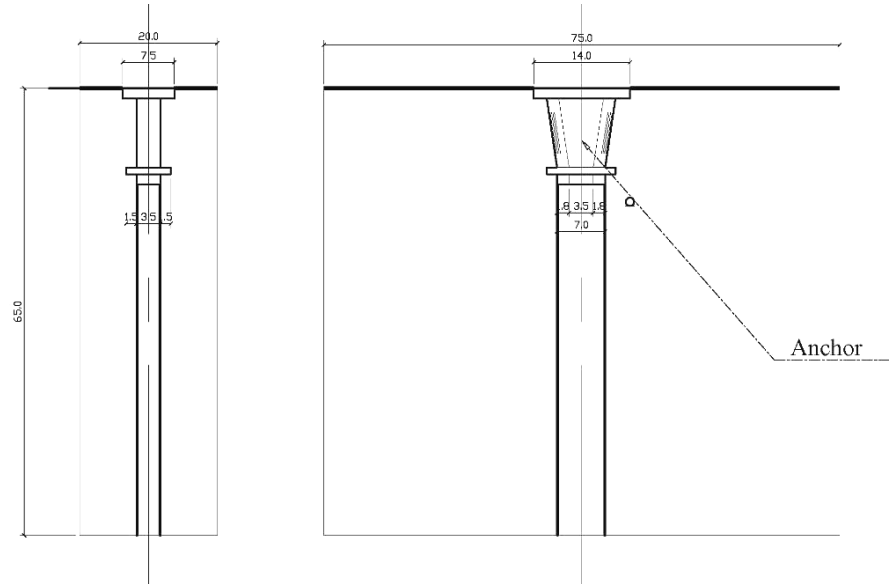
### 3.3 ทดสอบจากตัวอย่างทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดบริเวณสมอขีดที่มีการเสริมเหล็กแบบต่างๆ กับกำลังอัดของคอนกรีต การทดสอบจึงทำโดยการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 65x75 x20 cm ที่มีการเสริมเหล็กแตกต่างกัน 5 แบบเทียบกับการใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างๆ อย่างละ 3 ตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบว่าตัวอย่างทดสอบมีกำลังอัดเท่าไร จึงทำการเก็บตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง จากนั้นบ่มคอนกรีตจนได้อายุ แล้วจึงทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างเพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป

### 3.3.1 การเสริมเหล็ก

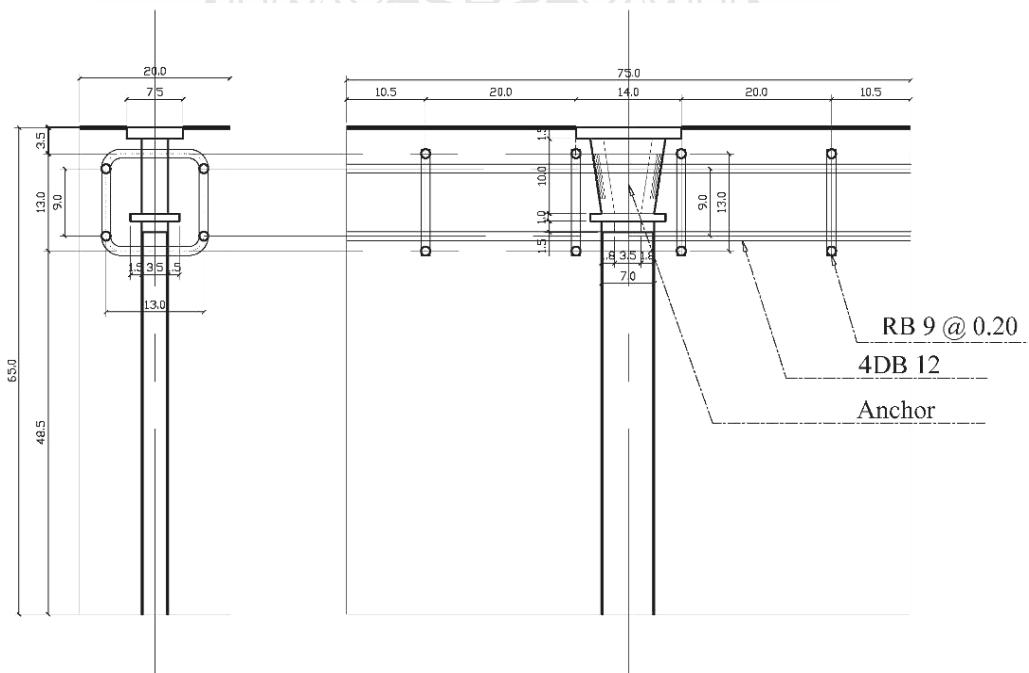
เพื่อศึกษาผลกระทบของเหล็กเสริมจึงทำการเสริมเหล็กปลอกในตัวอย่าง 5 แบบ ดังนี้

1) ตัวอย่างชนิด A ไม่เสริมเหล็กบริเวณสมอียด



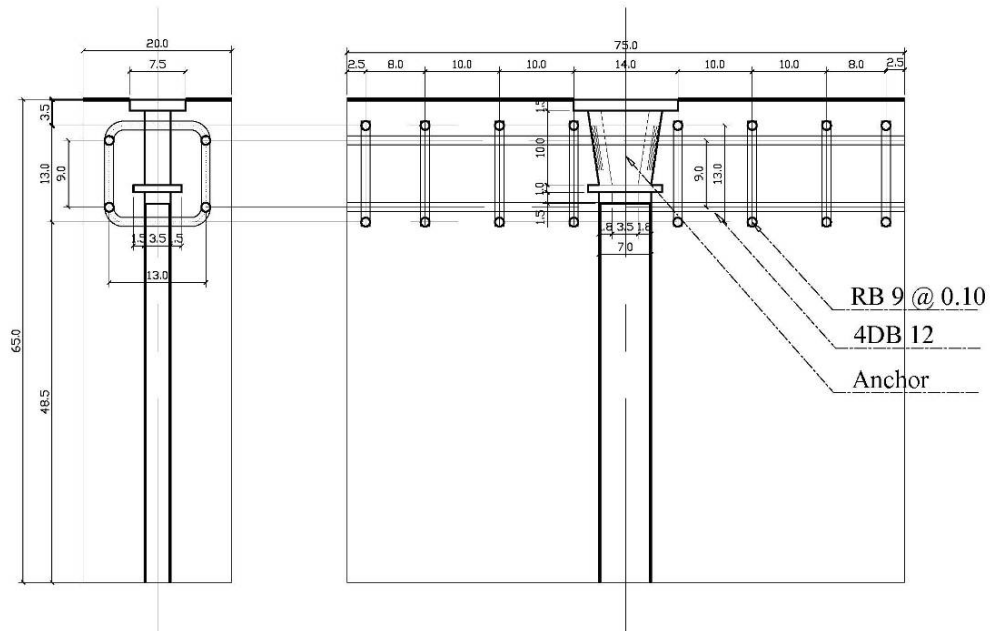
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชนิด A1

2) ตัวอย่างชนิด B1 เสริมเหล็กแกนด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 mm ตั้งฉากกับแนวแรงอัดมีเหล็กปลอกขนาด 9 mm ทุกระยะ 20 cm ดังรูปที่ 3.8



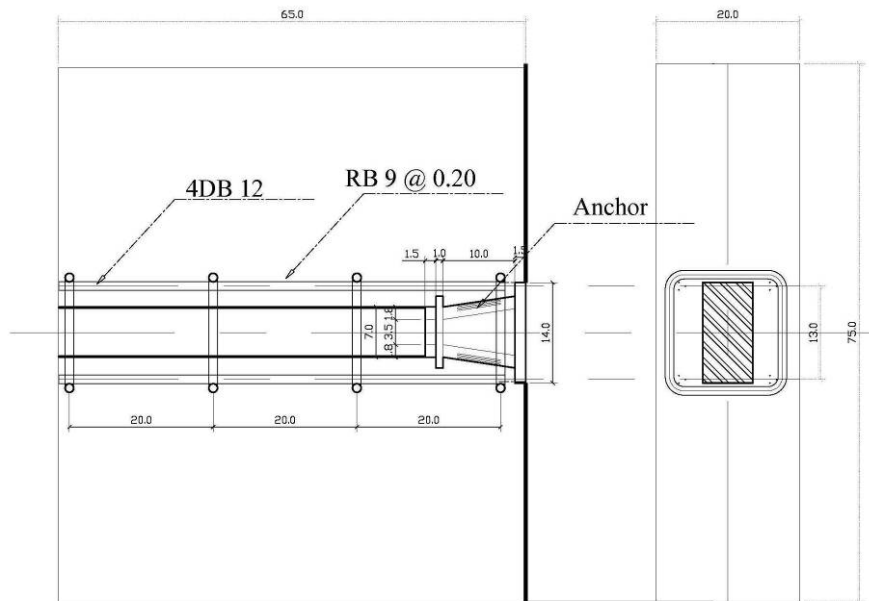
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชนิด B1

3) ตัวอย่างชนิด B2 เสริมเหล็กแกนด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 mm ตั้งฉากกับแนวแรงอัด มีเหล็กปลอกขนาด 9 mm ทุกระยะ 10 cm ดังรูป



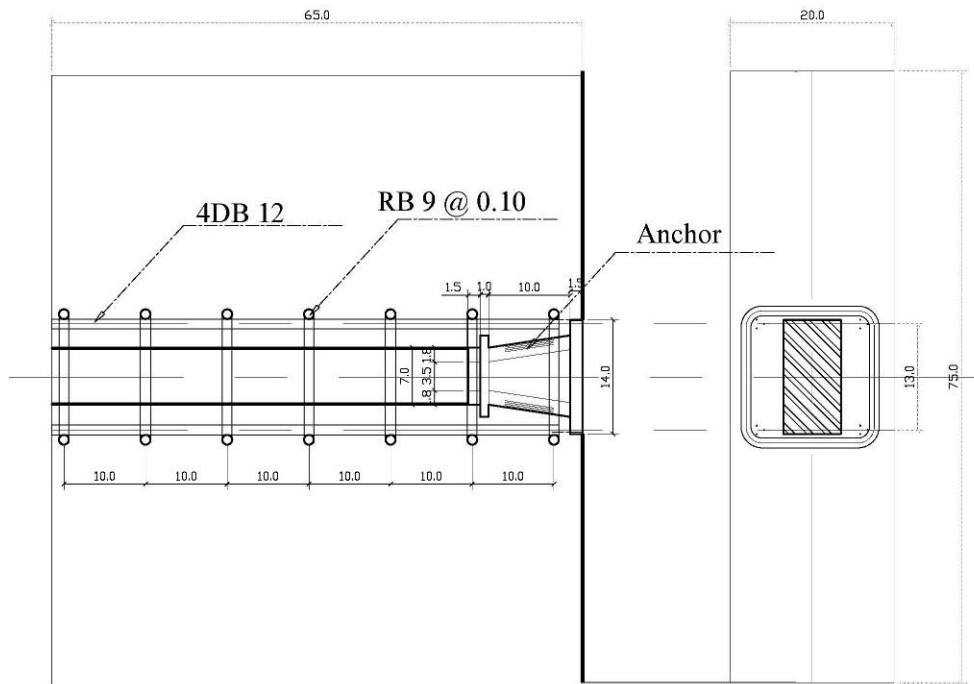
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างชนิด B2

4) ตัวอย่างชนิด C1 เสริมเหล็กแกนด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 mm ขนานแนวแรงอัด มีเหล็กปลอกขนาด 9 mm ทุกระยะ 20 cm ดังรูป

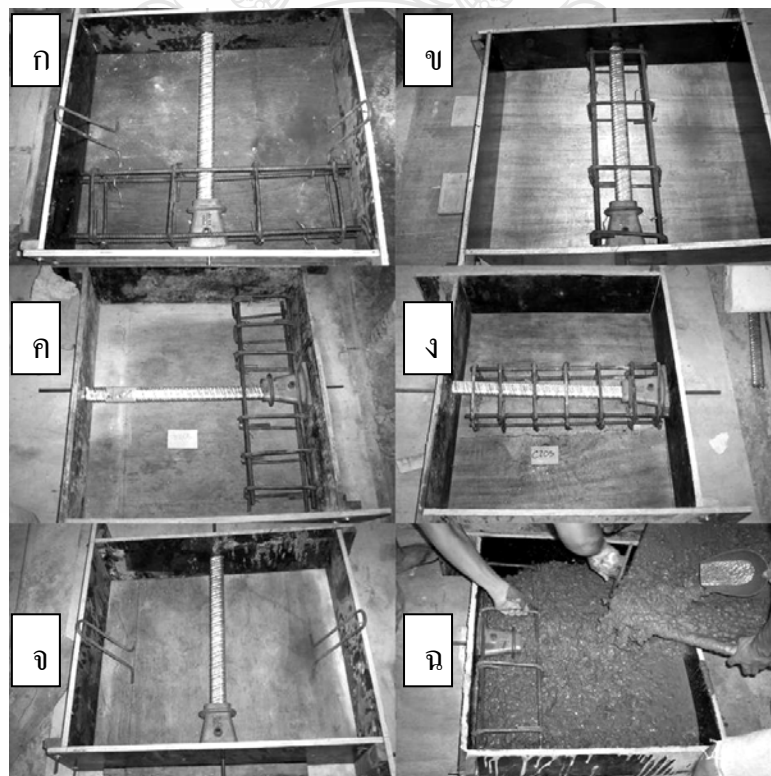


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชนิด C1

5) ตัวอย่างชนิด C2 เสริมเหล็กแกนด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 mm ขนานแนวแรงอัดมีเหล็กปลอกขนาด 9 mm ทุกระยะ 10 cm ดังรูป



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างชนิด C2



รูปที่ 3.12 รูปตัวอย่างชนิดต่างๆ



- ก) ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด ชนิด B1      ข) ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด ชนิด C1  
 ค) ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด ชนิด B2      ง) ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด ชนิด C1  
 จ) ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด ชนิด A      ฉ) การหล่อตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึด

### 3.3.2 กำลังของคอนกรีต

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดในสมอยึดกับกำลังอัดของคอนกรีตจึงต้องสร้างตัวอย่างที่มีกำลังอัด ต่างกันดังนี้ 60, 120, 240 และ 280 ksc และเพื่อให้ทราบว่าคุณสมบัติของตัวอย่างบริเวณหัวสมอมีกำลังอัดของคอนกรีตเท่าไร จึงทำการเก็บตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm จำนวน 3 ตัวอย่างต่อตัวอย่างทดสอบหนึ่งตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตแต่ละกำลังอัดมีอัตราส่วนผสมดังนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตในปริมาตร 1 ลบม.

กำลังอัด (ksc)	ซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	มวลรวมละเอียด (kg)	มวลรวมหยาบ (kg)	สารผสมเพิ่ม (kg)
60	146.5	216.3	847.6	1075.9	1.172
120	193.2	206.7	841.4	1068.1	1.545
240	296.2	192.4	820.0	1040.9	2.376
280	334.4	190.7	807.9	1025.6	2.67

เหตุผลที่ใช้กำลังของคอนกรีตในช่วง 60 – 280 ksc มีแนวคิดมาจากความต้องการที่จะอัดแรงให้เร็วที่สุดเพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้าง (ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไปในอนาคต) จึงได้ลดช่วงการทดสอบคอนกรีตให้มีกำลังอัดต่ำที่สุด 60 ksc แต่ยังคงการให้อัตราส่วนของมวลรวมมีค่าใกล้เคียงกันจึงออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง ค่าบางค่าของคอนกรีตกำลังต่ำนี้จะถูกตัดออกไม่นำมาวิเคราะห์ซึ่งจะกล่าวในผลการศึกษาต่อไป

การบ่มคอนกรีตทำโดยหลังจากที่คอนกรีตมีอายุได้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบหล่อออกจากนั้น ใช้น้ำยาบ่มคอนกรีตทาที่ผิวคอนกรีตโดยรอบผิวตัวอย่างซึ่งทั้งตัวอย่างขนาด 65x75x20 cm และ ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm อยู่ในบริเวณเดียวกันเพื่อเป็นการควบคุมตัวแปรให้กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองเท่ากัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบคอนกรีต

ก) การติดตั้ง Load Cell เพื่อปรับตั้งค่า

ข) การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

อนึ่งเพื่อให้ข้อมูลจากการทดสอบของตัวอย่างทรงกระบอกที่ทดสอบจากเครื่องทดสอบคอนกรีตมีค่าตรงกันกับที่ทดสอบจากตัวอย่างขนาด 65x75 x20 cm จึงเทียบค่าเครื่องทดสอบคอนกรีตด้วย Load Cell ได้ผลดังตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความผิดพลาดในการอ่านเข็มวัดของเครื่องทดสอบคอนกรีตจึงจัดว่าเครื่องมือทั้งสองชุดมีค่าการวัดเท่ากัน

ตารางที่ 3.2 ผลการเทียบค่าการวัดระหว่าง Load Cell กับ เครื่องทดสอบคอนกรีต

การทดสอบครั้งที่ 1		การทดสอบครั้งที่ 2		การทดสอบครั้งที่ 3	
Load Cell (kN)	เครื่องทดสอบ คอนกรีต (kN)	Load Cell (kN)	เครื่องทดสอบ คอนกรีต (kN)	Load Cell (kN)	เครื่องทดสอบ คอนกรีต (kN)
52	50	49	50	51	50
105	100	102	100	102	100
152	150	148	150	149	150
203	200	201	200	201	200
255	250	253	250	248	250
301	300	301	300	302	300
249	350	354	350	347	350
402	400	401	400	395	400
449	450	453	450	452	450

### 3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรงมีขั้นตอนดังนี้

#### ก) ติดตั้งตัวอย่าง

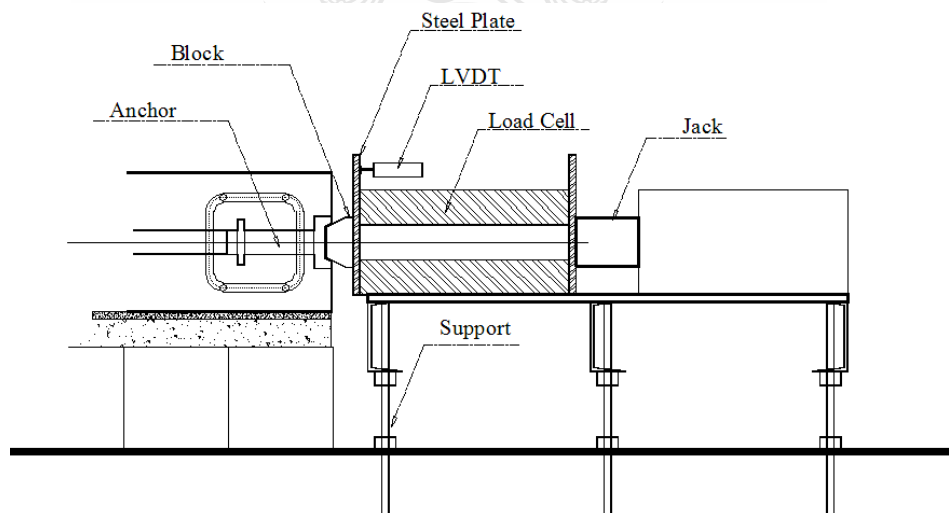
เนื่องจากตัวอย่างที่จะทำการทดสอบต้องติดตั้งให้ศูนย์กลางของสมอยึดตรงกับศูนย์กลางแนวแรงอัดจากกระบอกลไฮโดรลิก จึงใช้ปูนปลาสเตอร์เป็นตัวปรับระดับของตัวอย่างโดยการเทปูนปลาสเตอร์รองบริเวณฐานรองรับจากนั้นจึงยกตัวอย่างวางบนฐานรองรับด้วยรอกปรับระดับข้างไว้จนปูนปลาสเตอร์แข็งจึงปล่อยรอกออก แล้วใช้ปูนปลาสเตอร์อุดช่องว่างระหว่างฐานรองรับกับตัวอย่างคอนกรีตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงเค้นเฉพะจุดเนื่องจากความไม่เรียบของตัวอย่าง

#### ข) ติดตั้ง Load Cell

แรงอัดจากกระบอกลไฮโดรลิกจะถ่ายไปยัง Load Cell ผ่านแผ่นเหล็กหนา 2 cm เพื่อให้ Load Cell รับแรงได้เต็มหน้าตัดและแรงจาก Load Cell จะถ่ายไปยังแผ่นเหล็กและตัวยึดสลักลิ่มยึดลวดอัดแรงถึงจะถ่ายแรงไปยังสมอยึดลวดอัดแรงดังรูปที่ 3.14

#### ค) ติดตั้ง LVDT

เพื่อวัดค่าการหดตัวของสมอยึดจึงใช้ LVDT ติดตั้งโดยการวัดการเคลื่อนที่ของแผ่นเหล็กที่ติดกับตัวยึดสลักลิ่มยึดลวดอัดแรงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การให้แรงอัดแก่สมอยึดลวดอัดแรง

#### ง) ตั้งค่า Data logger

ทำการตั้งค่า Data logger และทุกครั้งที่ทำการติดตั้งก็จะทำการเทียบค่าจากเกจวัดความดัน เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการตั้งค่า Data logger ผิด

จ) ให้แรงอัดจากกระบอไฮโดรลิกส์

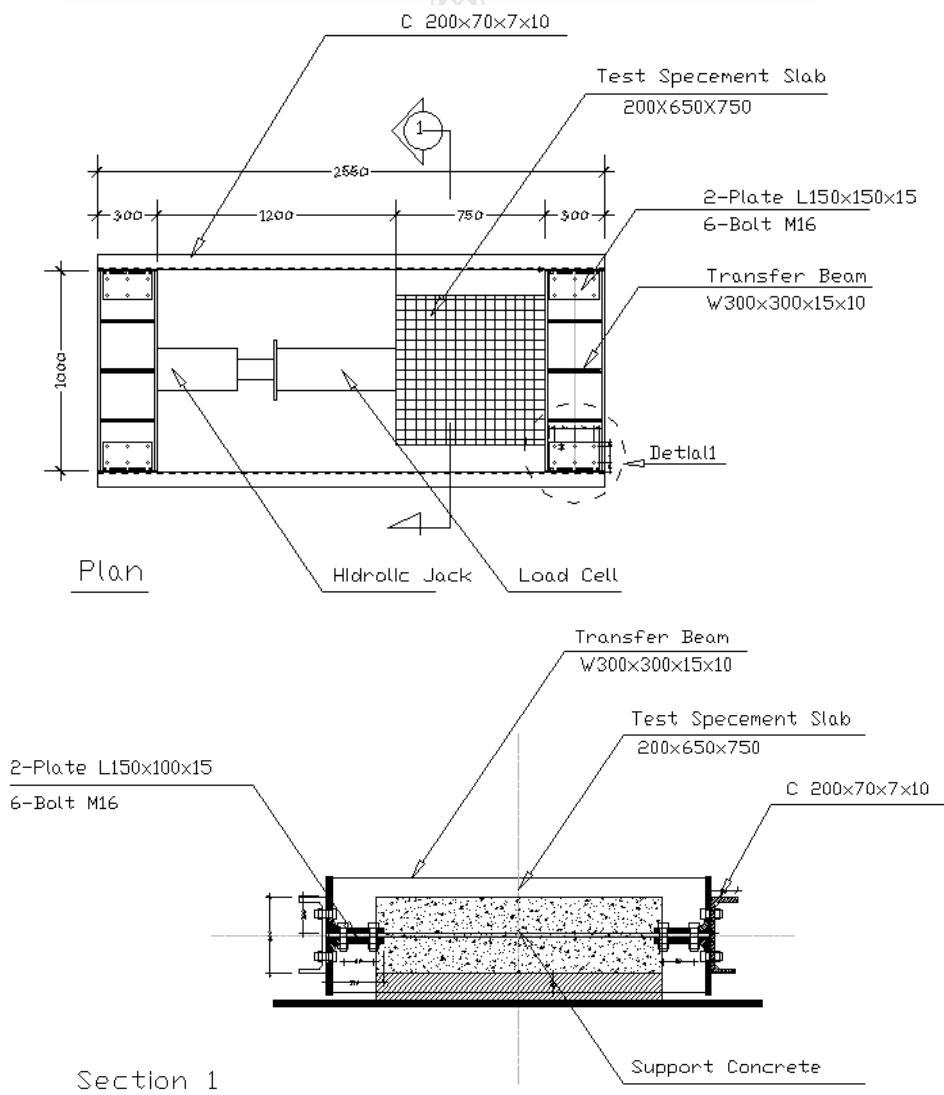
โดยการให้แรงอัดเป็นจังหวะทุกๆ 50 kN เพื่อสังเกตรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นและวัดค่าการทรุดตัวของสมอจนกระทั่งสมอยืดระเบิดออกหรือจนกระทั่งแรงอัดลดลง

### 3.3.4 อุปกรณ์การทดสอบ

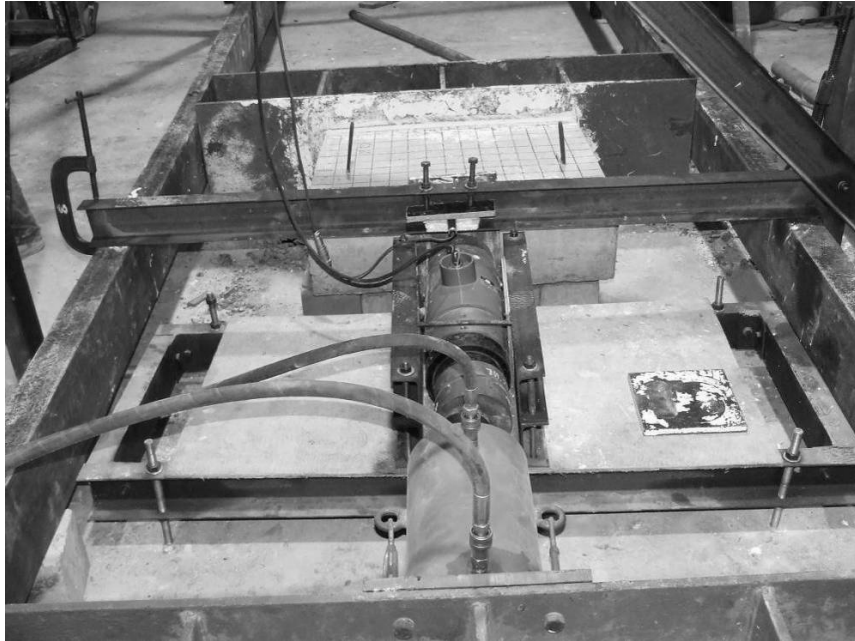
อุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของสมอยืดลวดอัดแรงมีรายละเอียดดังนี้

ก) โครงสร้างเหล็กสำหรับเป็นแท่นทดสอบ

โครงสร้างเหล็กสำหรับรับเป็นแท่นทดสอบนี้ได้ออกแบบและสร้างใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบนี้ โดยออกแบบให้สามารถรับแรงทดสอบได้ 100 t และควบคุม การโก่งตัวให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ด้วยการยึดโครงสร้างทั้งหมดไว้กับพื้นดังรูป



รูปที่ 3.15 แบบของเครื่องทดสอบตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยืดลวดอัดแรง



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

ข) เครื่องมือวัดแรงกด Data Logger

ในการทดสอบนี้ ได้วัดค่าแรงอัดโดย Load Cell เป็นตัววัดค่าของแรงกดและ Transducer เป็นตัววัดค่าการหดตัวของตัวอย่างและอ่านค่าด้วย Data Logger ซึ่งกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ (C) ของเครื่องวัดดังนี้

- Load Cell ภายในจะประกอบด้วย การนำเสตนเกจมาติดบนแท่งโลหะเมื่อรับน้ำหนักก็จะเกิดความเครียด ซึ่งเสตนเกจนั้นจะเป็นโลหะบางที่ผลิตจากกระบวนการที่คล้ายกับการทำวงจรรบนแผ่นปรินต์แล้วตัดลวดซึ่งเป็นโลหะที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำ ตามสมการที่ 3.2 ถึง 3.9 [6]

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{cD^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ R = ความต้านทาน       $\rho$  = สภาพต้านทานไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานจำเพาะ  
 A = พื้นที่หน้าตัด      L = ความยาวของตัวนำ  
 D = เส้นผ่านศูนย์กลาง      C = ค่าคงที่ของหน้าตัด

$$dR = \frac{cD^2 (ld\rho + \rho dl) - 2c\rho l dD}{(cD^2)^2} \quad (3.3)$$

หารสมการที่ 2 ด้วยสมการที่ 1 จะได้ว่า

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2\frac{dD}{D} + \frac{d\rho}{\rho}$$

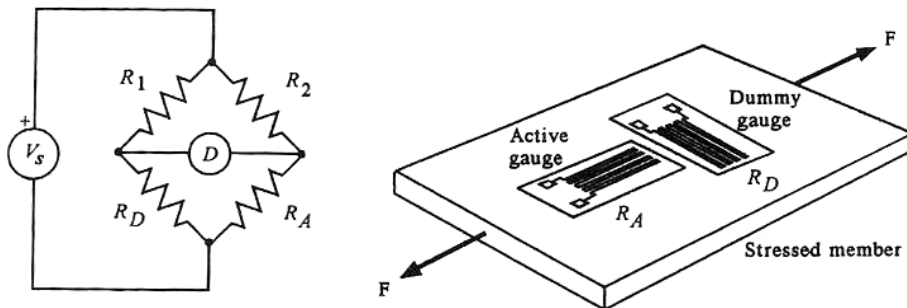
$$\frac{dR/R}{dl/l} = 1 - 2\frac{dD/D}{dl/l} + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (3.4)$$

$$\text{poisson's ratio} = \nu = -\frac{dD/D}{dl/l} \quad (3.5)$$

แทนค่า(4) ใน(3)  $\frac{dR/R}{dl/l} = 1 - 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (3.6)$

ค่าจากสมการที่ 3.6 คือค่า เกจเฟลเตอร์ซึ่งจะระบุมาจากโรงงานผู้ผลิต นั่นคือค่าเกจเฟลเตอร์เท่ากับสมการ

$$GF = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 - 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.17 วงจรบริดจ์ใน Load Cell

เมื่อวงจรไฟฟ้าหาได้จากสมการ

ความต้านทานของเสตนเกจที่ใช้ในการตรวจวัดเป็น

แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรบริดจ์จะมีค่าเท่ากับ

แทนค่า

$$R_1 = R_2 = R_D = R$$

$$R_A = R(1 + dR/R)$$

$$dV = V_s [R_D / (R_D + R_1) - R_A / (R_A + R_2)]$$

$$R_1 = R_2 = R_D = R \text{ และ } R_A = R(1 + dR/R)$$

$$dV = -V_s [(dR/R)/4 + 2(dR/R)]$$

$$\approx -(V_s/4) dR/R$$

$$GF = \frac{dR/R}{dl/l}$$

$$dR/R = GF/(dl/l)$$

เนื่องจาก

ดังนั้น

$$dV = -(V_s/4) GF/(dl/l) \quad (3.8)$$

เมื่อนำเสตนเกจมาติดเข้ากับแท่งโลหะจะได้รับความสัมพันธ์ของแรงได้จากสมการ

$$E = (\text{strain})/(\text{stress}) = (F/A)/(dl/l) \quad (3.9)$$

$$dl/l = F/EA$$

ซึ่ง Data logger ที่ใช้ในการทดสอบนี้กำหนดให้หาค่าตัวแปรหาได้จากสมการ

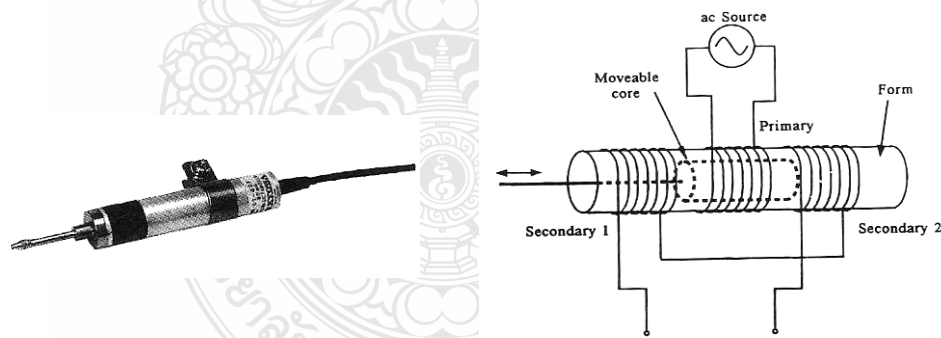
$$C = \frac{\text{Capacity}}{2000 \text{Rate output}} \quad (3.10)$$

เมื่อ Capacity = 981 ksc , Rate Output = 1 mv/v

ดังนั้น

$$C = \frac{981}{2000 * 1} = 0.49$$

- Transducer หรือ LVDT Linear Variable Different Transformer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ใช้หลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลง(Transformer) ทั่วๆไปแต่จะมีความแตกต่างกับหม้อแปลงที่แกนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้



รูปที่ 3.18 LVDT

ภายใน LVDT ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) หนึ่งขดและขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) อีกจำนวนสองขด ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองขดจะมีจำนวนรอบของการพันที่เท่ากันและจะต่ออนุกรมกันแต่ทิศทางของการพันจะตรงกันข้ามดังนั้นเอาต์พุตของ LVDT จะมีค่าเท่ากับ 0 V ถ้ามีแรงจากภายนอกมากจะทำให้แกนของหม้อแปลงเคลื่อนที่ไปจากเดิมไปทางซ้ายมือเส้นแรงแม่เหล็กที่เชื่อมกับขดลวดทุติยภูมิทางด้านซ้ายมือก็จะมีมากกว่าทางด้านขวามือขนาดเอาต์พุตของ LVDT จึงมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านซ้ายมือ

ซึ่ง Data logger ที่ใช้ในการทดสอบนี้กำหนดให้ค่าคงที่ของ LVDT  $C = 1$

- การเปรียบเทียบค่า Load cell กับเกจวัดความดันของกระบอกไฮดรอลิกส์

ทั้งนี้เพื่อให้เครื่องมือมีความเที่ยงตรงในการวัดมากขึ้นจึงได้เทียบค่า Load Cell กับเกจวัดความดันของกระบอกไฮดรอลิกส์ดั่งรูป โดยอาศัยหลักการที่ว่าระบบไฮดรอลิกส์ประกอบด้วยอุปกรณ์ปั๊มไฮดรอลิกส์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานของของไหลภายใต้ความดัน, วาล์วควบคุมความดัน, วาล์วควบคุมการไหล, เกจวัดความดัน และอุปกรณ์การทำงานทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของของไหลหรือน้ำมันให้เป็นพลังงานกล ความสัมพันธ์ของแรงที่ได้กับความดัน (อ่านได้จากเกจวัดความดัน) หาได้จากสมการ

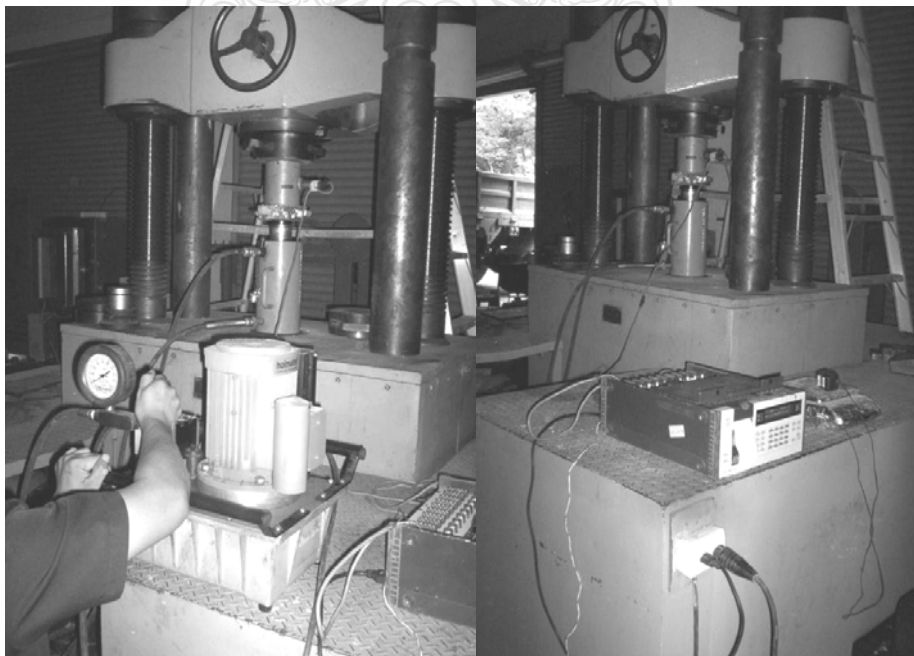
$$F = PA \quad (3.11)$$

เมื่อ  $F$  คือแรงที่อุปกรณ์ทำงาน

$P$  คือความดันของของเหลวในระบบ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ทำงาน

และเพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ถูกต้องซึ่งจะเป็นค่าเริ่มต้นในการวัด จึงนำชุดอุปกรณ์ ระบบไฮดรอลิกส์ ไปเทียบค่า ที่ สถาบัน AIT (Asian Institute of Technology)



รูปที่ 3.19 การเทียบค่ากระบอกไฮดรอลิกส์



## Asian Institute of Technology

Km. 42 Paholyothin Highway, Klong Luang, Pathumthani, Thailand 12120

P. O. Box 4 Klong Luang, Pathumthani, Thailand 12120. Tel.(66-2) 524-6427, 524-5527 Fax.(66-2) 524-5544

### STRUCTURAL ENGINEERING LABORATORY STRUCTURAL ENGINEERING FIELD OF STUDY SCHOOL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

**TYPE OF TEST :** CALIBRATION TEST

**TEST SPECIMEN :** The hydraulic jack consists of the "HOLMATRO" hydraulic cylinder of serial no. 021209 and the "HOLMATRO" hydraulic pump of serial no. 00004377 fitted with the "HOLMATRO" pressure gauge of serial no. 100.582.500 having a maximum capacity of 1,000 bar.

**CLIENT :** RAJAMANKALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

**DATE OF TEST :** November 18, 2008

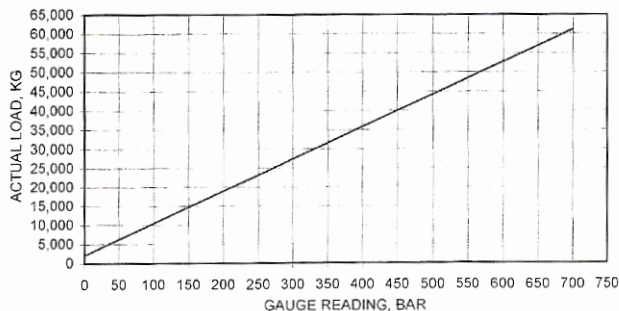
**TEST APPARATUS :** The test apparatus consists of a 100-ton standard load cell, "TML" type : CLC-100A serial no. L17035, and a portable data-logger TDS-302, serial no. 0902368, manufactured by "Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.".

**TEST RESULTS :**

Gauge Reading (bar)	Actual Load Readings (tonf)				Actual Load (kg)	Remarks
	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3	Average		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	The machine was calibrated in the range of 100 to 700 bar. The calibration equation should be used in the calibration range only.  kgf = kilogram - force kN = kilo - Newton
100	9.18	9.40	9.56	9.38	9,380	
150	14.99	15.18	15.27	15.15	15,147	
200	19.09	19.35	19.38	19.27	19,273	
250	23.14	23.20	23.43	23.26	23,257	
300	27.50	27.63	27.79	27.64	27,640	
350	31.55	31.74	31.81	31.70	31,700	
400	35.75	36.01	36.08	35.95	35,947	
450	39.90	40.25	40.18	40.11	40,110	
500	43.94	44.36	44.42	44.24	44,240	
550	48.24	48.47	48.53	48.41	48,413	
600	52.39	52.70	52.64	52.57	52,573	
650	56.59	56.78	56.97	56.78	56,780	
700	60.92	60.92	61.11	60.98	60,983	

**Note :** This results certify the adequacy and representative character of the test samples only.

CALIBRATION CURVE OF THE HYDRAULIC JACK



**THE CALIBRATION EQUATION :**

$$\text{Actual Load, kg} = \text{Gauge Reading, bar} \times 84.4029 + 2,042.1612$$

CHECKED & APPROVED BY :

DR. SUN SAYAMIPUK  
SENIOR LABORATORY SUPERVISOR  
November 19, 2008



รูปที่ 3.20 ผลการเทียบค่ากระบอกไฮดรอลิก

### 3.4 สร้างสมการที่ใช้ในการออกแบบ

เพื่อให้ได้สมการสำหรับออกแบบเหล็กเสริมกันระเบิดจึงได้สร้างแบบจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดประลัยกับกำลังของคอนกรีต โดยแบบจำลองนี้ได้สร้างขึ้นให้มีรูปแบบการกระจายแรงเหมือนกับที่เกิดขึ้นในการทดสอบจากตัวอย่างทดสอบ ซึ่งรูปแบบของการเสริมเหล็กมีผลต่อการกระจายแรง ซึ่งการเสริมเหล็กทำได้สองแบบคือเสริมเหล็กแกนขนานแรงอัด กับเสริมเหล็กตั้งฉากกับแรงอัดการเลือกว่าควรเสริมเหล็กในทิศทางใดต้องดูผลจากการกระจายหน่วยแรงเมื่อได้รูปแบบที่เหมาะสมแล้วจึงนำรูปแบบของการเสริมเหล็กนั้นไปศึกษาต่อ เมื่อได้รูปแบบของทิศทางการเสริมเหล็กได้แล้วจึงทำการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ โดยขอบเขตของตัวแปรกำหนดได้ดังนี้

#### 3.4.1 ระยะของเหล็กปลอก

ให้เป็นตัวแปรในการศึกษาโดยมีระยะห่างของเหล็กปลอก 10 cm, 15 cm และ 20 cm

#### 3.4.2 ความหนาของคอนกรีต

ช่วงที่ใช้งานพื้นคอนกรีตอัดแรงอยู่ในช่วง 18 – 28 cm เพราะถ้าพื้นคอนกรีตอัดแรงบางกว่า 18 cm เหล็กปลอกจะเหลือระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่า 1.5 cm และความหนามากที่สุดก็ไม่เกิน 28 cm เพราะถ้ามีความหนามากจะเพิ่มน้ำหนักให้แก่อาคาร ดังนั้นในกรณีที่มีพื้นที่กว้างมากก็มักจะออกแบบให้มีคานคอนกรีตอัดแรง ( Post-tension beam ) เพื่อให้พื้นมีช่วงที่แคบลง

#### 3.4.3 ค่าการเยื้องศูนย์

บริเวณสมอชิดลวดอัดแรงมักออกแบบให้ศูนย์กลางของสมอชิดอยู่ที่กึ่งกลางของพื้น เพื่อให้รับแรงอัดได้มากที่สุด แต่การติดตั้งสมอชิดมักเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 1-3 cm จากการคลาดเคลื่อนของการติดตั้งสมอชิดเอง และจากการเทคอนกรีตไม่ได้ความหนาตามที่กำหนด

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการที่ได้ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตและจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบจากตัวอย่าง

ได้ทำการทดสอบจากตัวอย่างคอนกรีตบริเวณหัวสมอทั้งหมด 5 ชนิด ได้ผลการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 ผลการทดลองชนิด A (ไม่เสริมเหล็ก)

ตัวอย่างชนิดนี้ทดสอบได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 และมีลักษณะการแตกร้าวจะแยกออกจากกันในทันทีดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด A

ตัวอย่างที่	กำลังของคอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)	ตัวอย่างที่	กำลังของคอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)
A005	53.87	16,309.89	A008	134.67	35,372.07
A006	55.55	17,329.26	A001	242.40	52,000.00
A007	66.37	20,387.36	A010	257.79	56,065.24
A003	76.95	25,891.95	A009	311.65	66,870.54
A004	107.73	30,581.04			



รูปที่ 4.1 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด A009

**4.1.2 ผลการทดลองชนิด B1** (เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 20 cm ) ตัวอย่างชนิดนี้ทดสอบได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 และมีลักษณะการแตกร้าวกระจายออกไปทางด้านข้างดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอชิดลวดอัดแรง ชนิด B1

ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)	ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)
B105	40.40	17,737.00	B108	124.08	39,755.35
B107	51.94	21,406.73	B109	236.63	56,065.24
B003	54.83	23,445.46	B110	290.49	66,258.92
B001	110.62	37,716.62			
B004	120.24	38,735.98			



รูปที่ 4.2 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด B108

**4.1.3 ผลการทดลองชนิด B2** (เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 10 cm ) ตัวอย่างชนิดนี้ทดสอบได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และมีลักษณะการแตกร้าวจะกระจายออกไปทางด้านข้างดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง ชนิด B2

ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)
B206	56.37	22,953.78
B205	62.52	23,445.46
B207	63.49	25,484.20
B208	115.43	38,735.98
B210	300.1	73,394.50

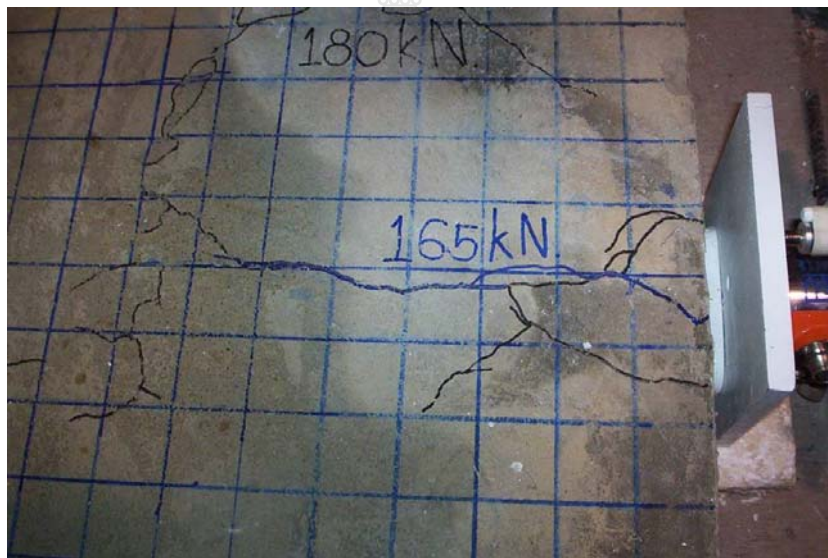


รูปที่ 4.3 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด B206

4.1.4 ผลการทดลองชนิด C1 (เหล็กแกนDB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอกRB 9 mm @ 20 cm) ตัวอย่างชนิดนี้ทดสอบได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4 และมีลักษณะการแตกร้าวดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง ชนิด C1

ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)	ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)
C106	49.06	20,387.36	C004	121.20	35,677.8
C107	50.98	22,222.22	C110	227.01	53,007.14
C105	66.37	22,426.10	C109	311.65	69,317.2
C003	81.76	27,522.94			
C108	108.69	34,148.83			



รูปที่ 4.4 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด C1

4.1.5 ผลการทดลองชนิด C2 (เหล็กแกน DB 12 ขนานกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 10 cm ) ตัวอย่างชนิดนี้ทดสอบได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5 และมีลักษณะการแตกร้าวดังรูปที่ 4.5

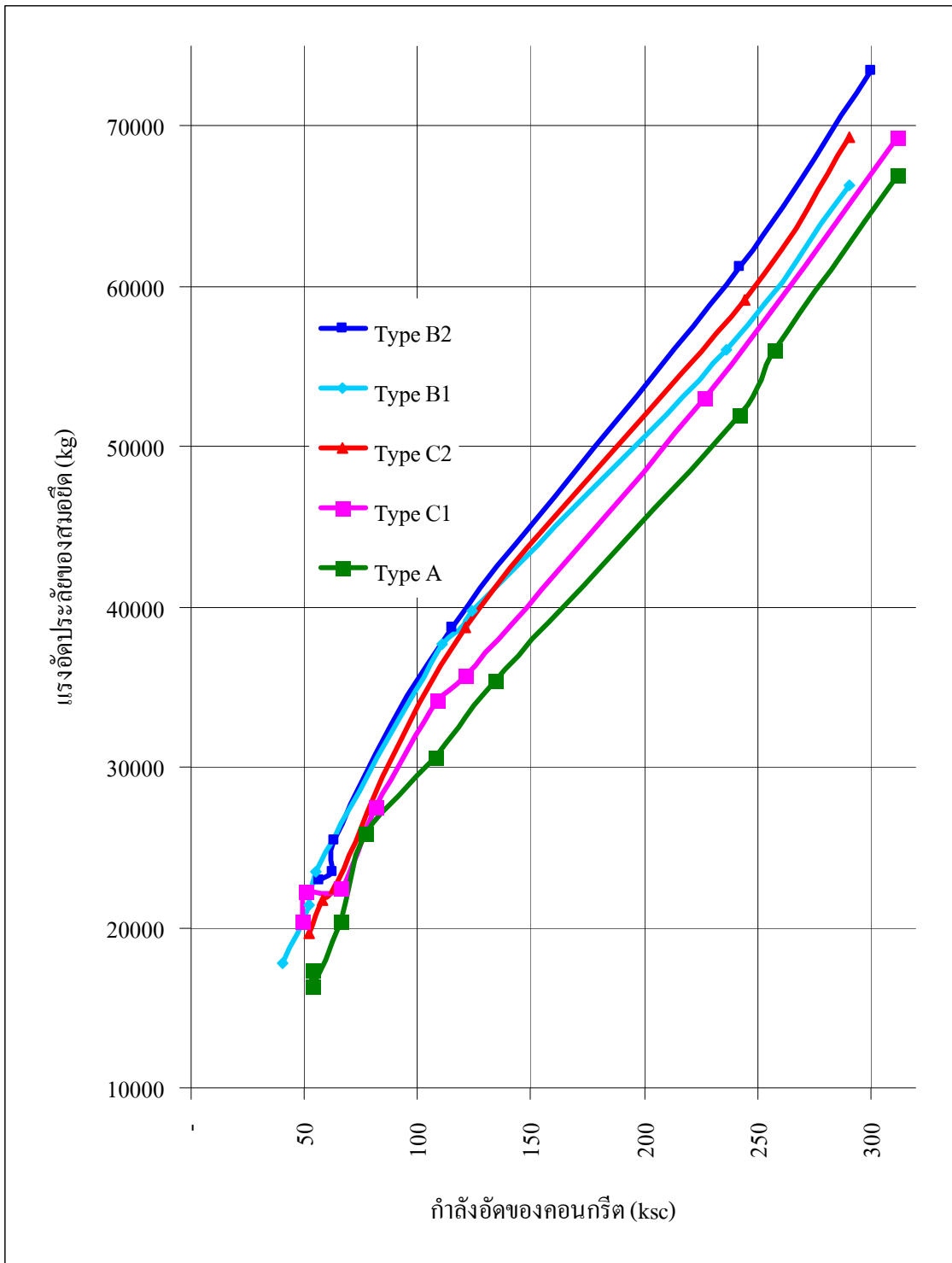
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณสมอียึดลวดอัดแรง ชนิด C2

ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)	ตัวอย่างที่	กำลังของ คอนกรีต (ksc)	แรงอัดประลัย (kg)
C207	57.94	19,673.80	C209	290.49	69,317.02
C206	57.71	21,712.54			
C205	63.49	22,426.10			
C208	121.20	38,735.98			
C210	224.32	59,123.34			



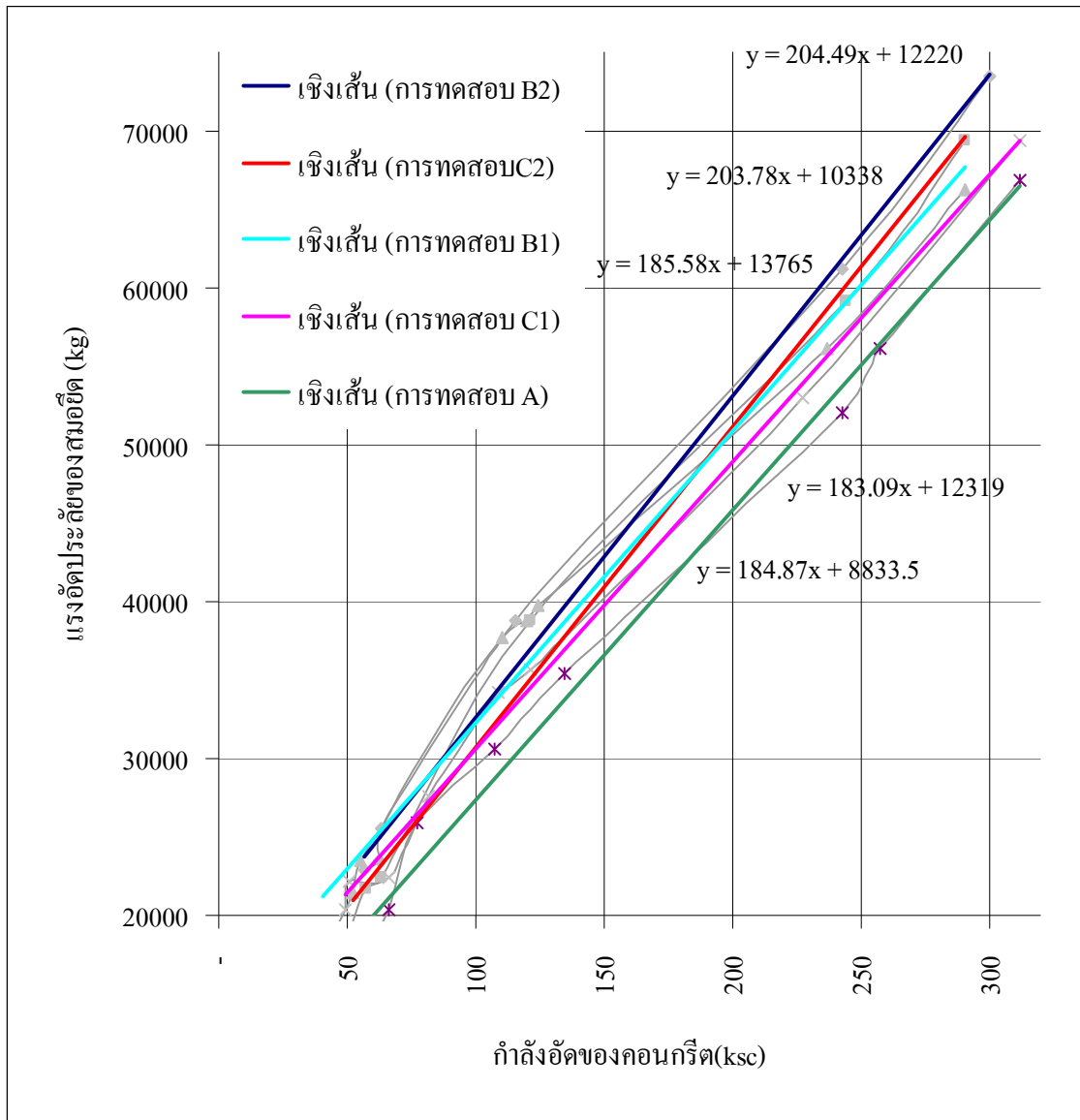
รูปที่ 4.5 รอยแตกของตัวอย่าง ชนิด C206

ผลการทดสอบสามสารทดแสดงได้ในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการใช้อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่แตกต่างกันในแต่ละกำลังอัดจึงต้องปรับปรุงรูปแบบของผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยต่อกำลังของคอนกรีตให้เป็นสมการเชิงเส้นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีตและแรงกดในสมอยืด





รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีตและแรงกดในสมอชิดที่ปรับปรุงค่าแล้ว

จากรูปที่ 4.7 ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ ระหว่างแรงอัดประลัยและกำลังของคอนกรีตดังนี้

$$\text{ตัวอย่างชนิด B2} \quad P_j = 204.49 f_{ci} + 12220 \quad (4.1)$$

$$\text{ตัวอย่างชนิด C2} \quad P_j = 203.78 f_{ci} + 10338 \quad (4.2)$$

$$\text{ตัวอย่างชนิด B1} \quad P_j = 185.58 f_{ci} + 13765 \quad (4.3)$$

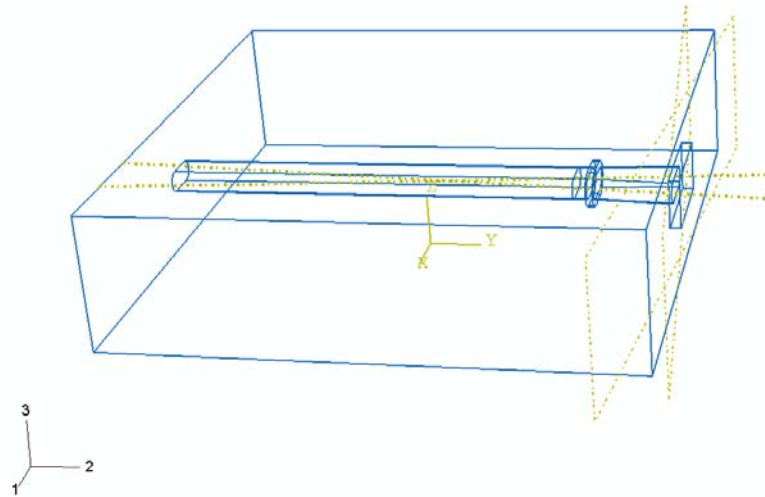
$$\text{ตัวอย่างชนิด C1} \quad P_j = 183.09 f_{ci} + 12319 \quad (4.4)$$

$$\text{ตัวอย่างชนิด A} \quad P_j = 184.87 f_{ci} + 8833.5 \quad (4.5)$$

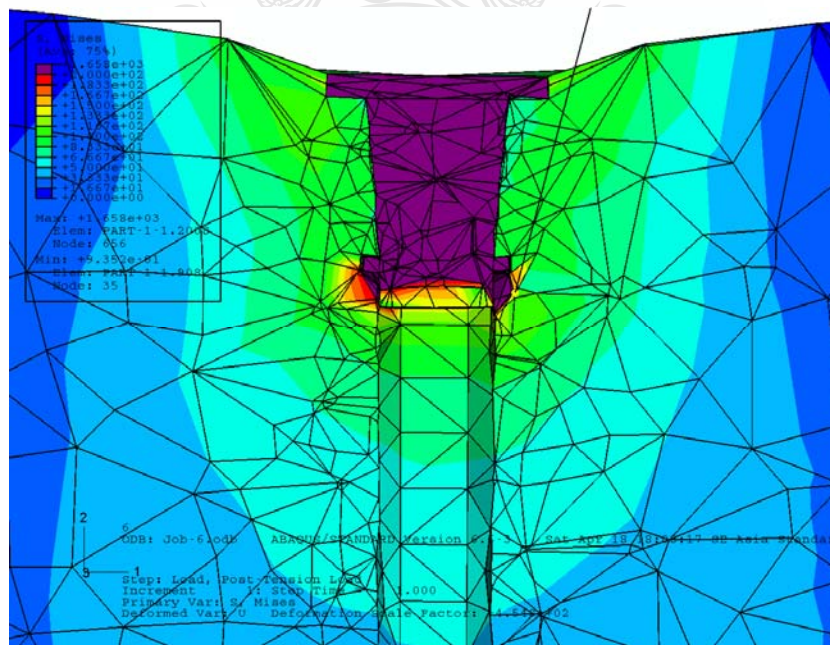
## 4.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

จากการสร้างแบบจำลองทั้งหมด 5 แบบได้แก่

4.2.1 แบบ A ขนาดกว้าง 60 x 60 หน้า 20 เซนติเมตร หัวสมอกว้าง 7.5 x 14 เซนติเมตร ไม่มีการเสริมเหล็กดังรูปที่ 4.8

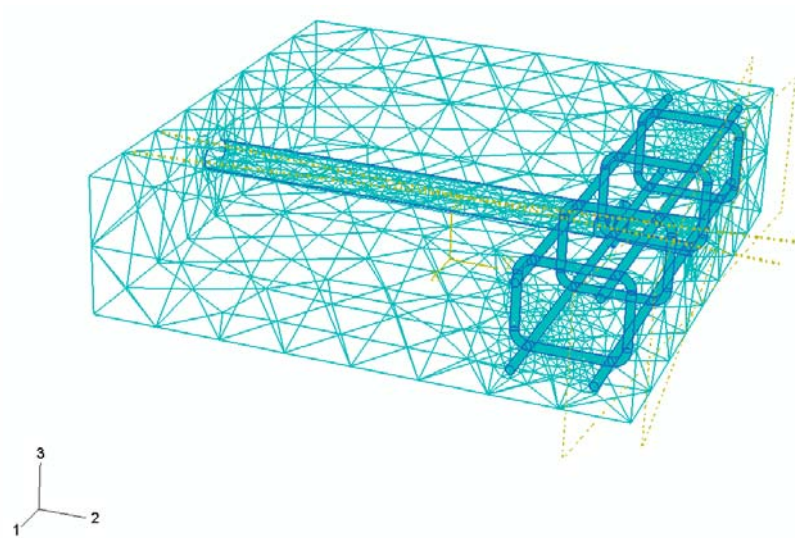


รูปที่ 4.8 ลักษณะแบบจำลองชนิด A

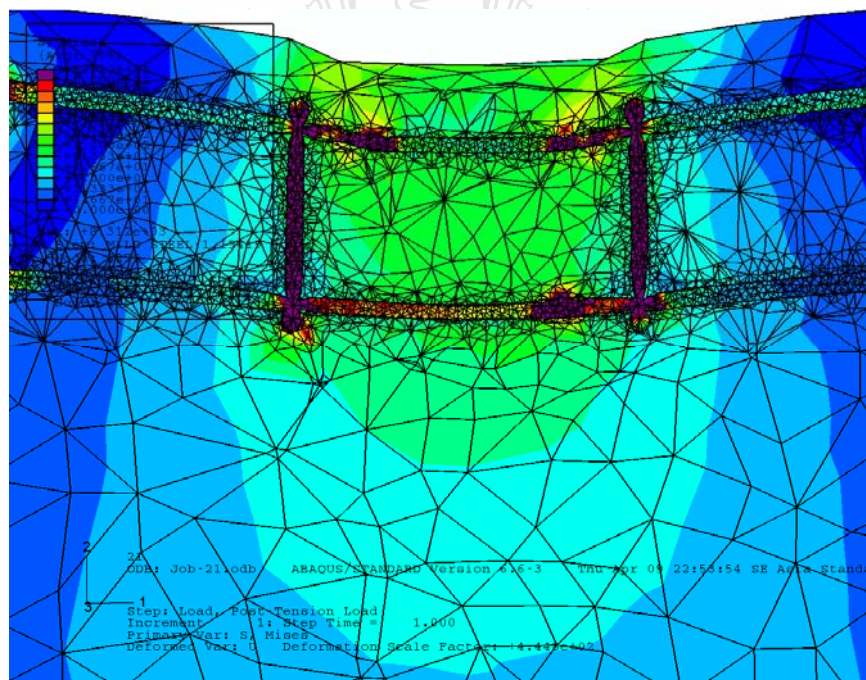


รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด A

4.2.2 แบบ B1 ขนาดกว้าง 60 x 60 หน้า 20 เซนติเมตร หัวสมอกกว้าง 7.5 x 14 เซนติเมตร เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 20 cm

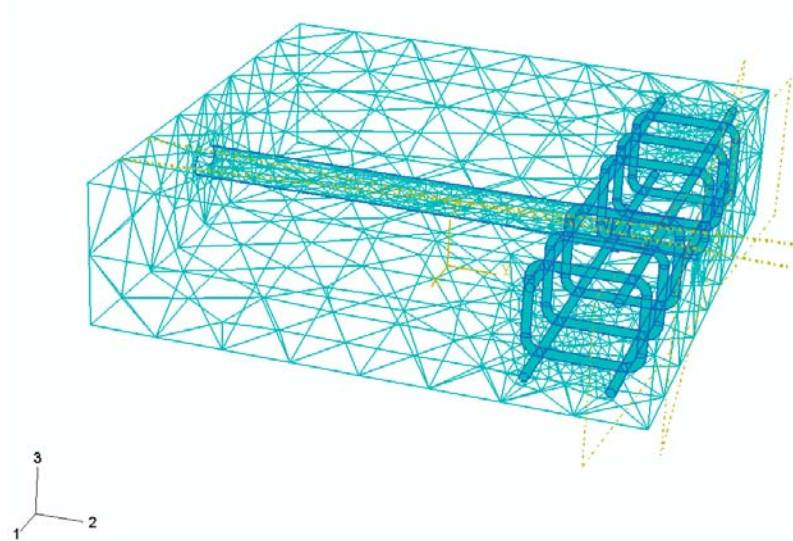


รูปที่ 4.10 ลักษณะแบบจำลองชนิด B1

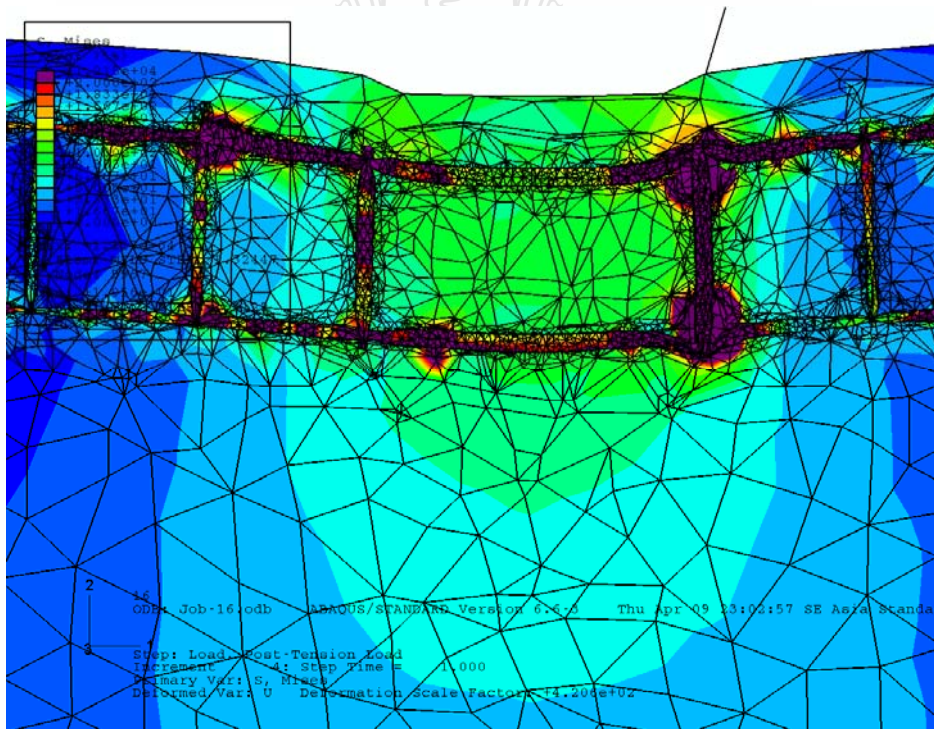


รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด B1

4.2.3 แบบ B2 ขนาดกว้าง 60 x60 หน้า 20 เซนติเมตร หัวสอกว้าง 7.5 x 14 เซนติเมตร เหล็กแกนDB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอกRB 9 mm @ 10 cm

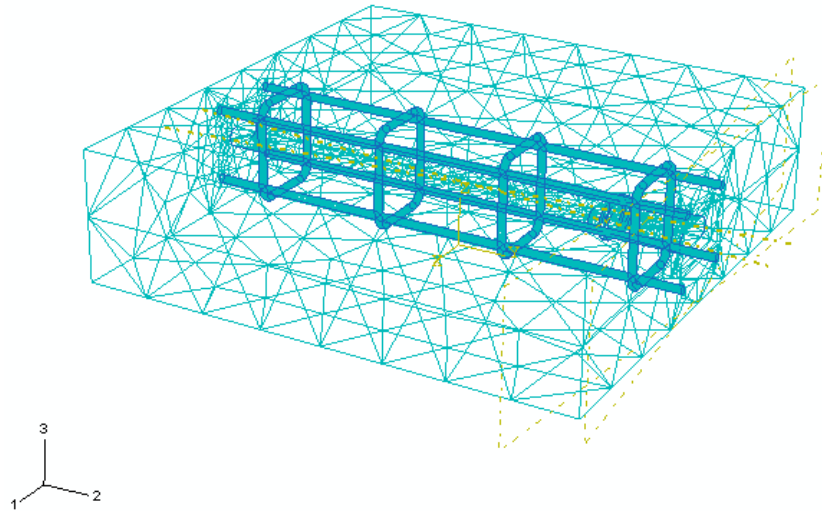


รูปที่ 4.12 ลักษณะแบบจำลองชนิด B2

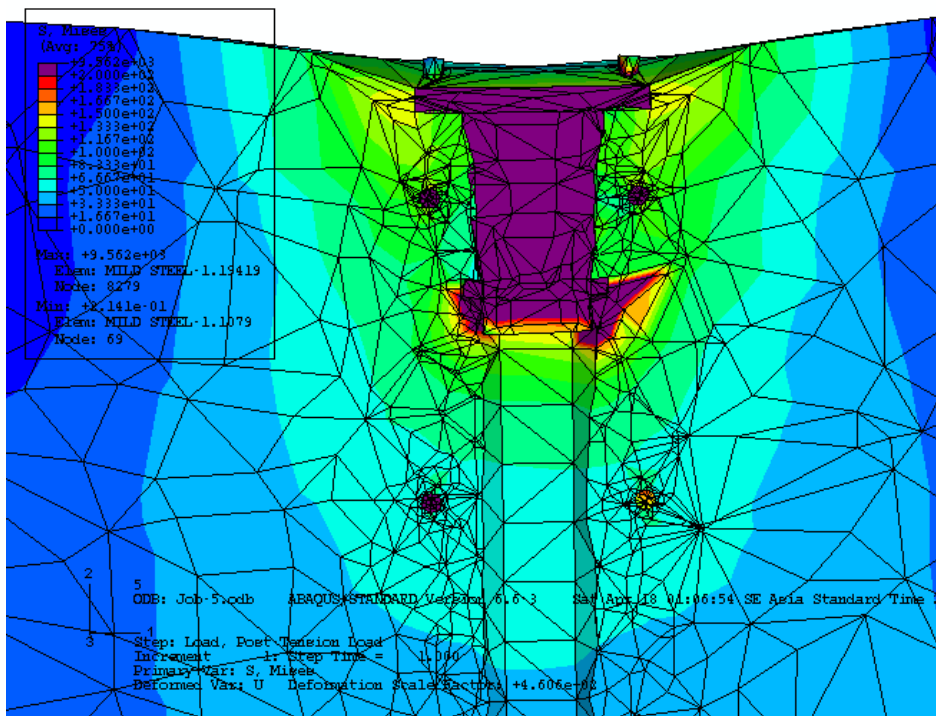


รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด B2

4.2.3 แบบ C1 ขนาดกว้าง 60 x60 หนา 20 เซนติเมตร หัวสมอกว้าง 7.5 x 14เซนติเมตร เหล็กแกนDB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอกRB 9 mm @ 20 cm

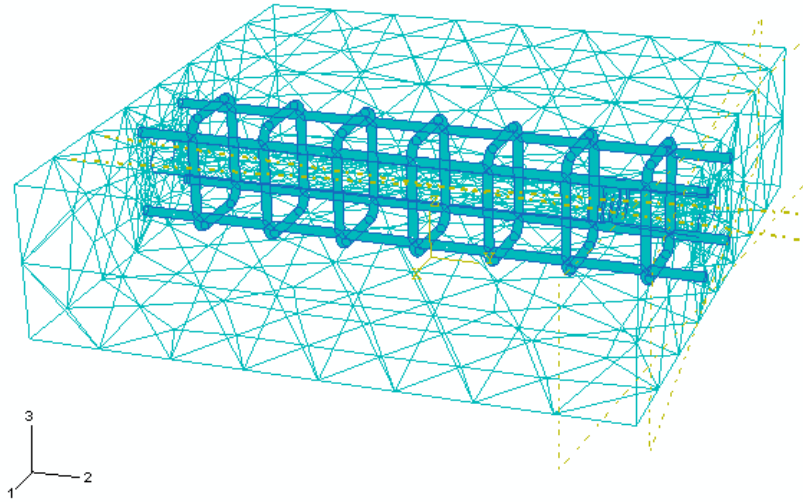


รูปที่ 4.14 ลักษณะแบบจำลองชนิด C1

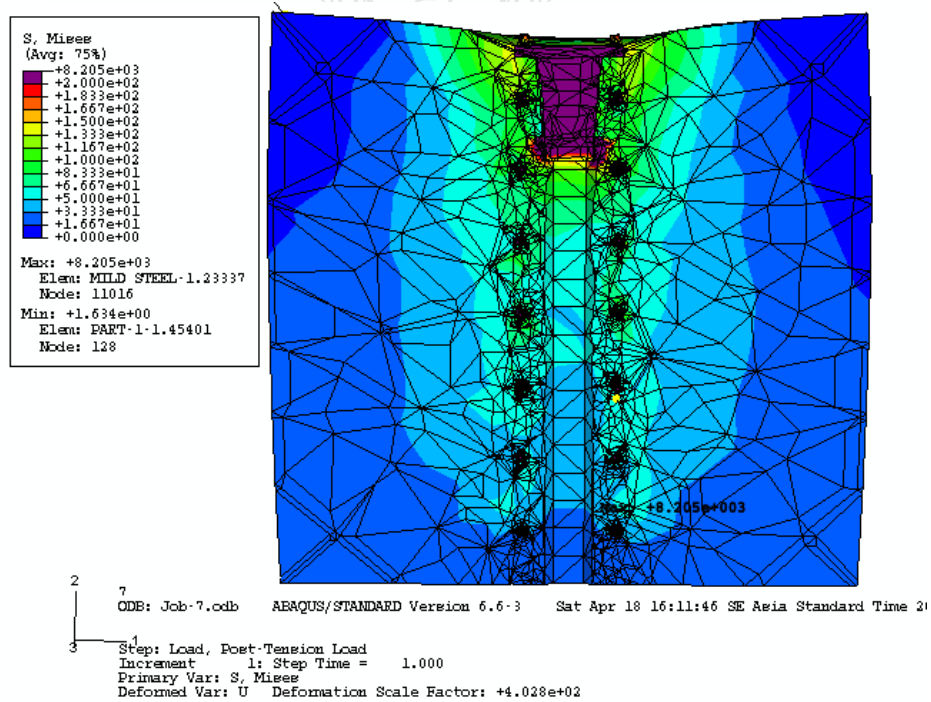


รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด C1

4.2.4 แบบ C2 ขนาดกว้าง 60 x 60 หน้า 20 เซนติเมตร หัวสมอกกว้าง 7.5 x 14 เซนติเมตร ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอกRB 9 mm @ 10 cm



รูปที่ 4.16 ลักษณะแบบจำลองชนิด C2

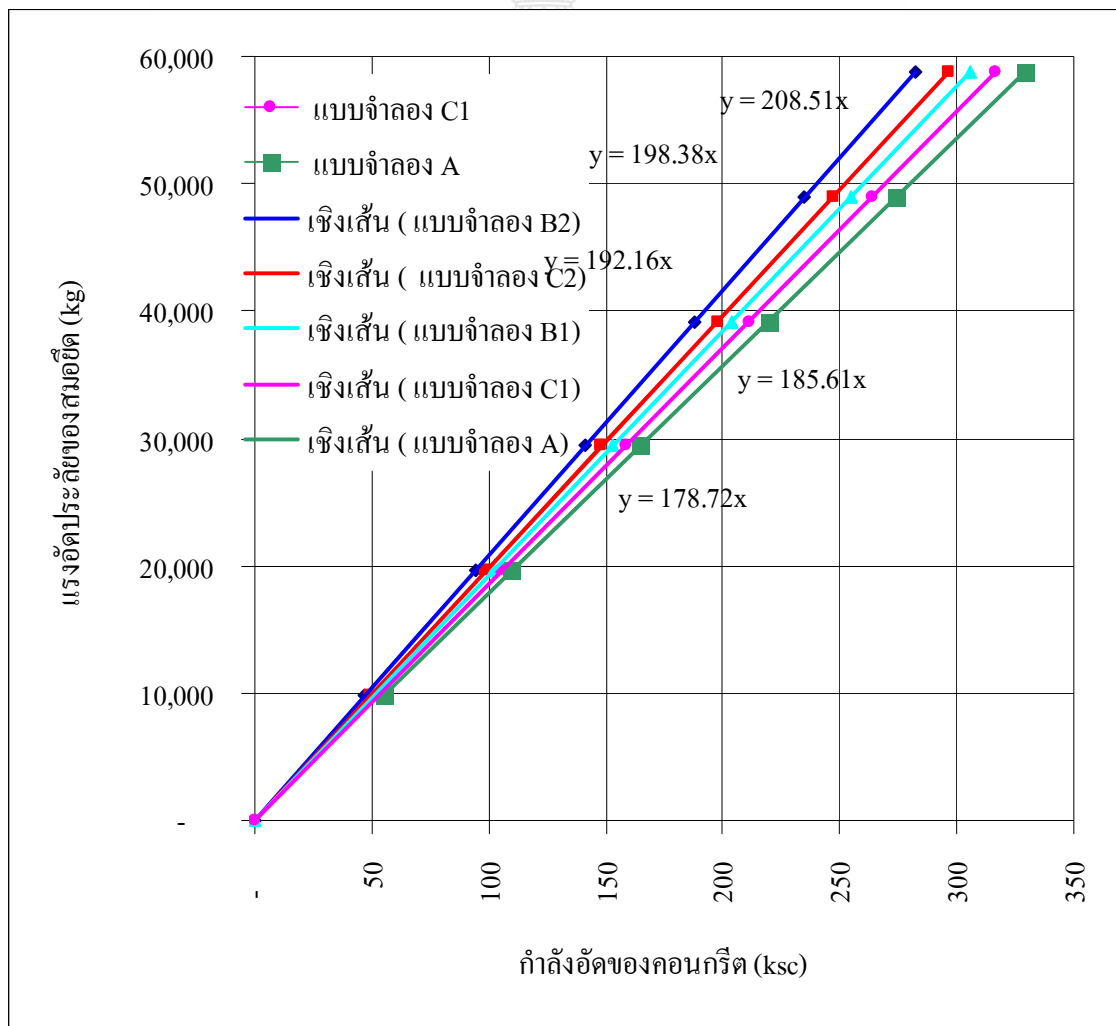


รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด C2

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 แบบมีผลดังตารางที่ 4.6 และมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดประลัยของสมอยึดกับกำลังของคอนกรีตดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

B2		B1		C2		C1		A	
47	9,800	51	9,800	49	9,800	53	9,800	55	9,800
94	19,600	102	19,600	99	19,600	106	19,600	110	19,600
141	29,400	153	29,400	148	29,400	158	29,400	165	29,400
188	39,200	204	39,200	198	39,200	211	39,200	219	39,200
235	49,000	255	49,000	247	49,000	264	49,000	274	49,000
282	58,800	306	58,800	296	58,800	317	58,800	329	58,800



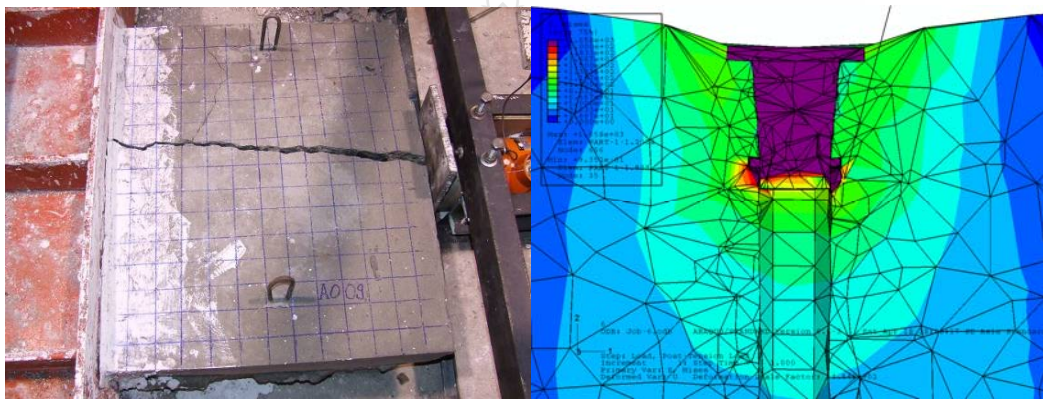
รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 4.3 รูปแบบการกระจายหน่วยแรง

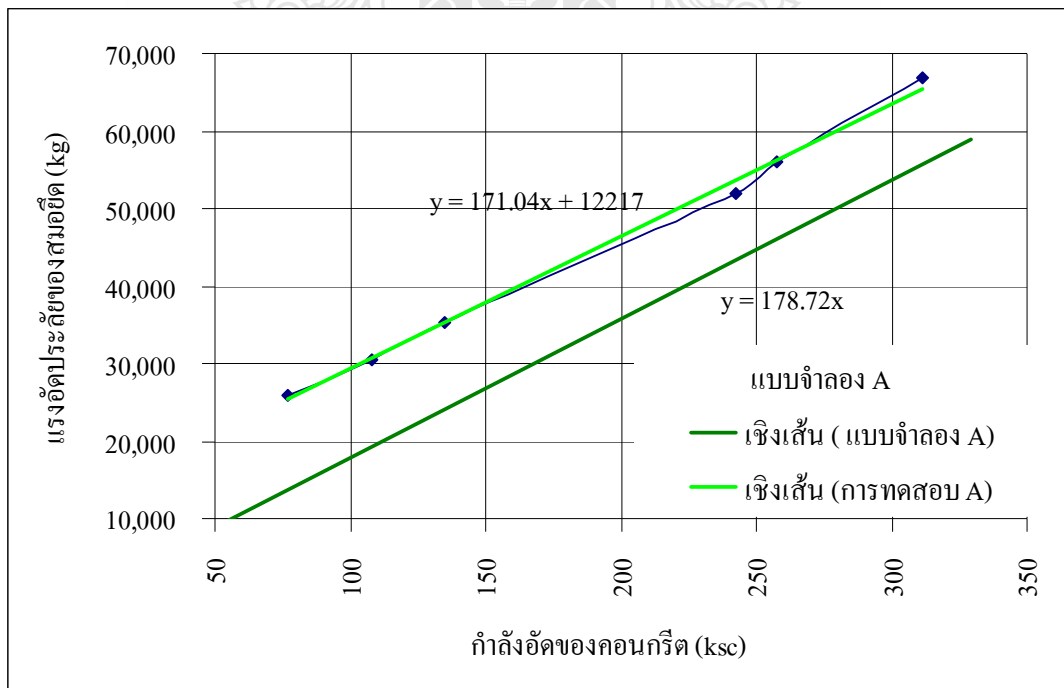
จากการศึกษาจากตัวอย่างคอนกรีตและจากแบบจำลองทำให้ทราบว่าแรงอัดประลัยของสมอยึดแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการเสริมเหล็กมีผลต่อการกระจายแรงในบริเวณสมอยึดการเสริมเหล็กที่แตกต่างกันจะมีรูปแบบการกระจายแรงแตกต่างกันไปดังนี้

#### 4.3.1 การกระจายแรงบริเวณสมอยึดเมื่อมีการเสริมเหล็กแบบ A (ไม่เสริมเหล็ก)

คอนกรีตจะเกิดหน่วยแรงเฉพาะจุดเมื่อชิ้นงานเสียหายจะแตกออกในทันทีทันใด เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดได้มากกว่าแบบจำลองอยู่ 12.27 ตัน



รูปที่ 4.19 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยึด Type A

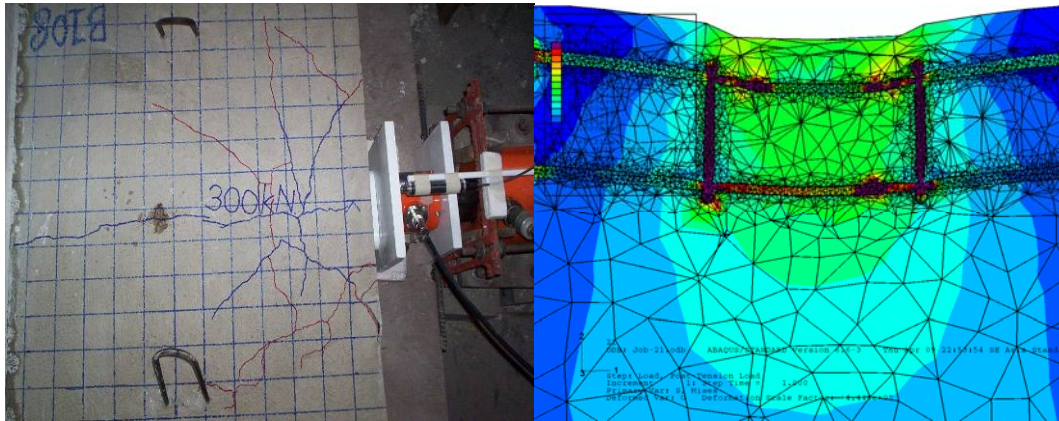


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยึดลวดอัดแรงที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง

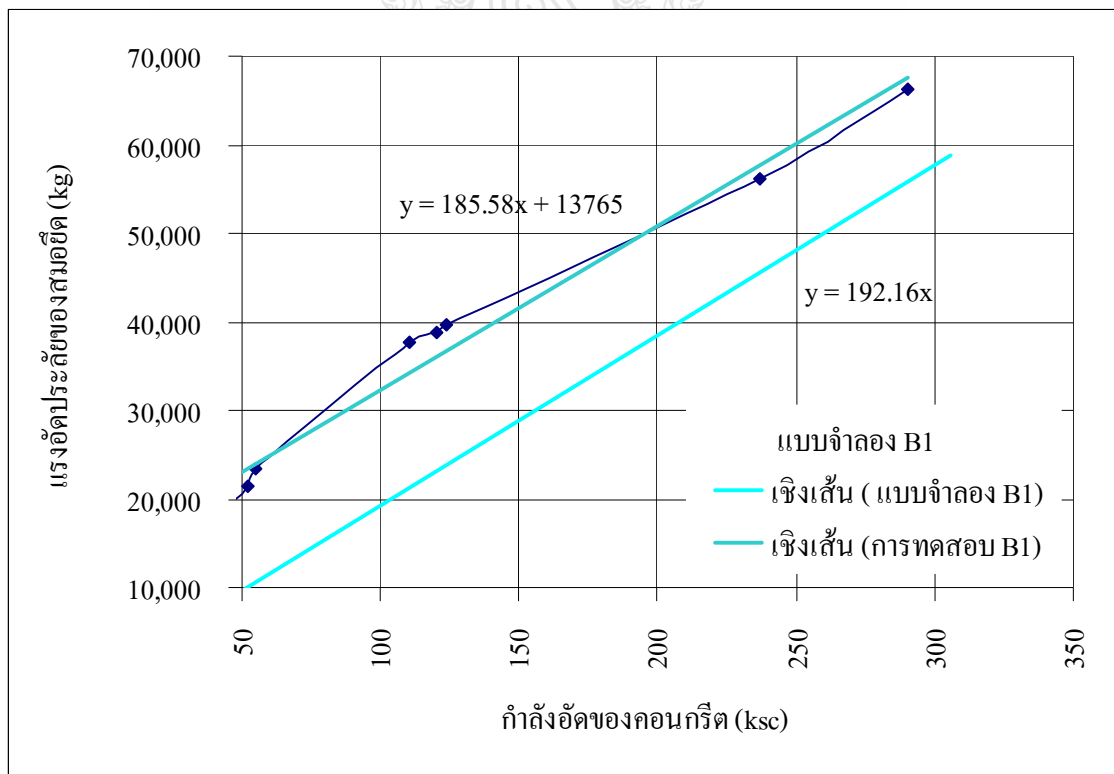


#### 4.3.2 การกระจายแรงบริเวณสมอยึดเมื่อมีการเสริมเหล็กแบบ B1

เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 20 cm หน่วยแรงถูกกระจายแรงออกไปทางด้านข้างของสมอ รอยแตกร้าวเป็นรูปกรวยอยู่ที่บริเวณเหล็กปลอกแรก เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดได้มากกว่าแบบจำลองอยู่ 13.7 ตัน



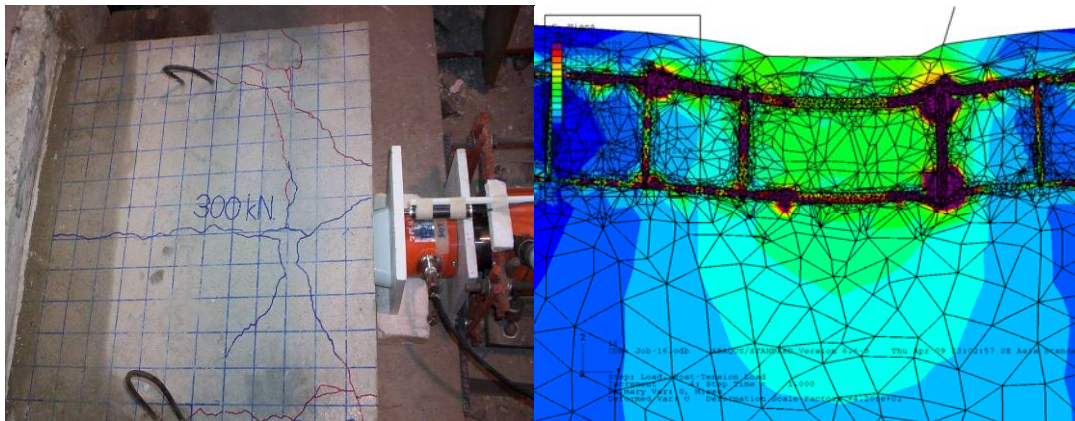
รูปที่ 4.21 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยึด Type B1



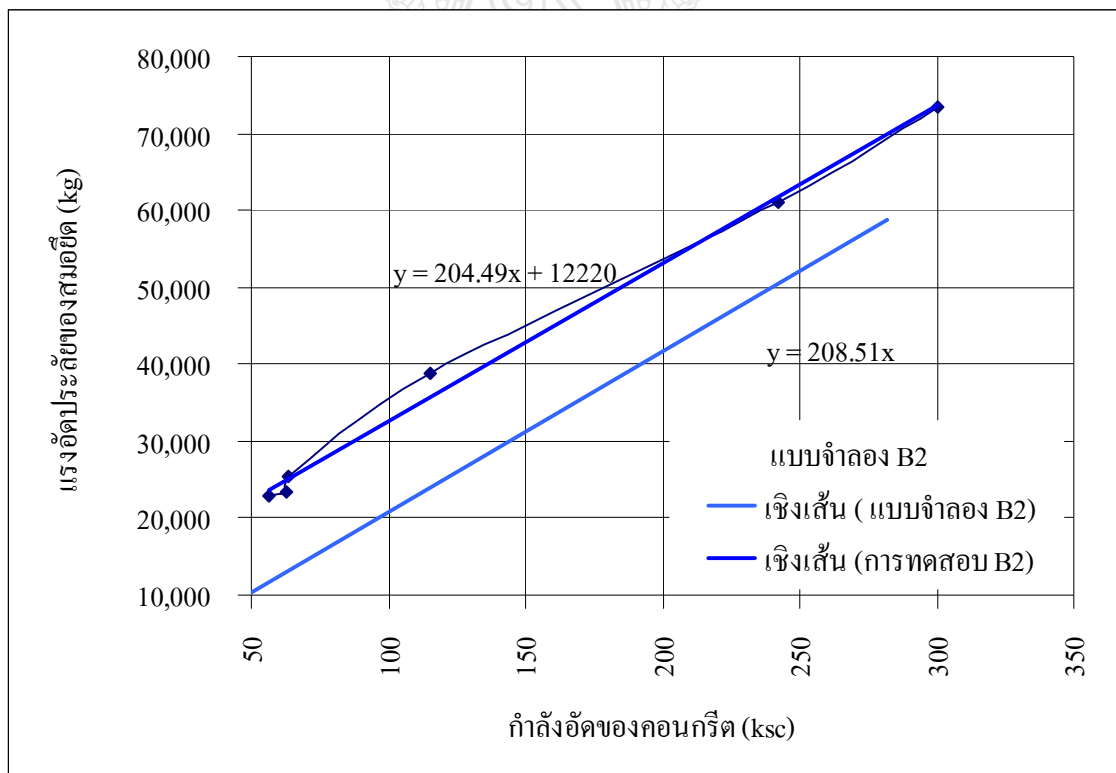
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยึดลวดอัดแรงที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง

### 4.3.3 การกระจายแรงบริเวณสมอยึดเมื่อมีการเสริมเหล็กแบบ B2

เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 10 cm หน่วยแรงถูกกระจายแรงออกไปทางด้านข้างของสมอ รอยแตกร้าวเป็นรูปกรวยอยู่ที่บริเวณเหล็กปลอกเส้นที่ 2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง และจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดได้มากกว่าแบบจำลองอยู่ 12.2 ตัน



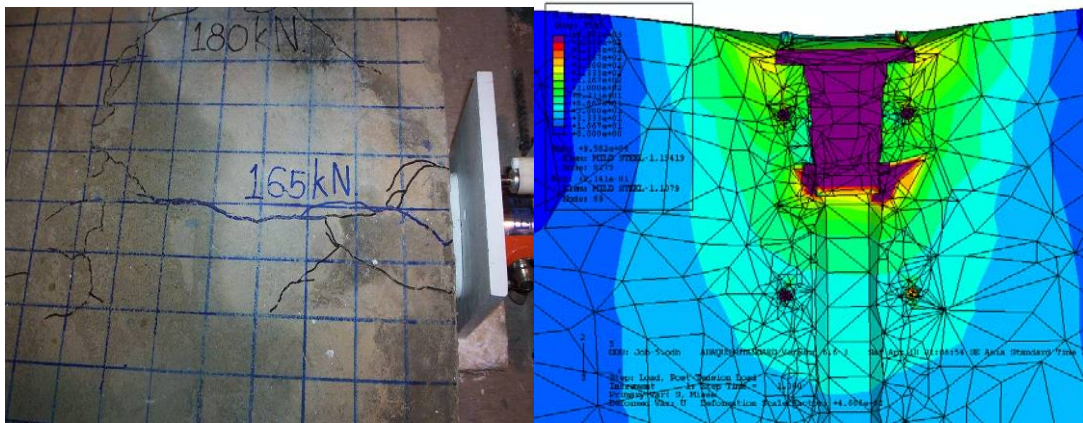
รูปที่ 4.23 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยึด Type B2



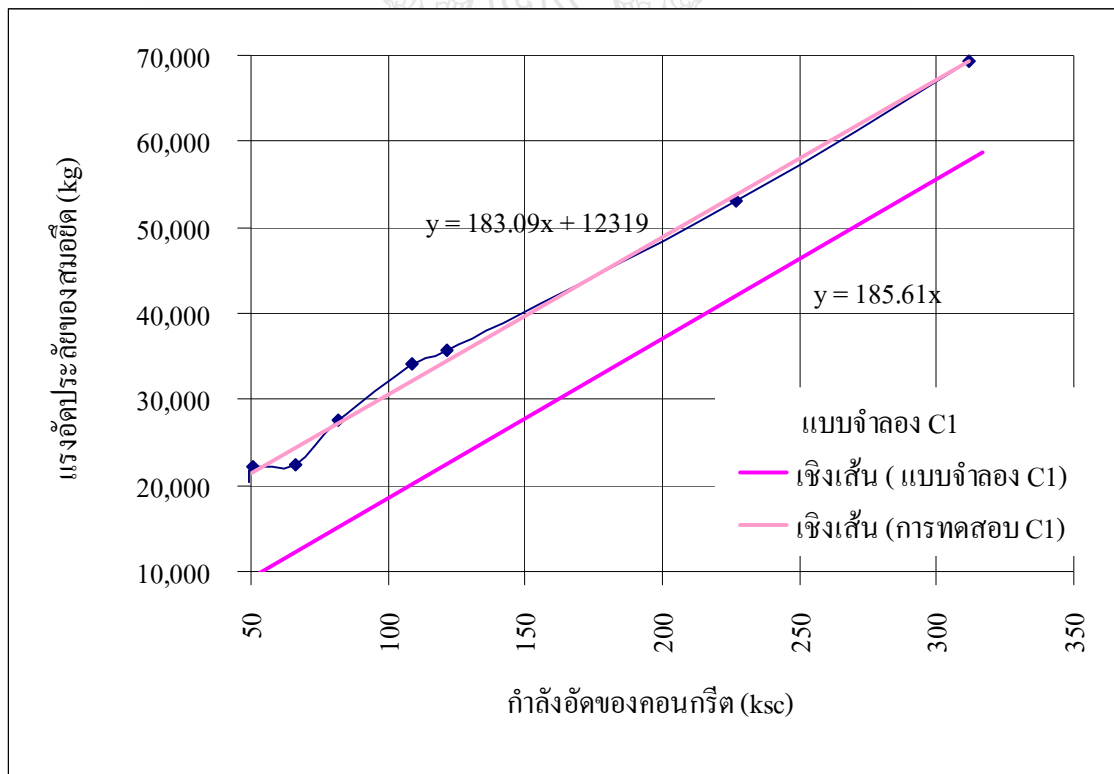
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยึดตลอดอัดแรงที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง

#### 4.3.4 การกระจายแรงบริเวณสมอยึดเมื่อมีการเสริมเหล็กแบบ C1

เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 20 cm หน่วยแรงถ่ายลงลึกไปตามแนวแรงการกระจายของหน่วยแรงอยู่ที่ระหว่างเหล็กปลอก ปลอกที่ 1 ถึงปลอกที่ 2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดได้มากกว่าแบบจำลองอยู่ 12.32 ตัน



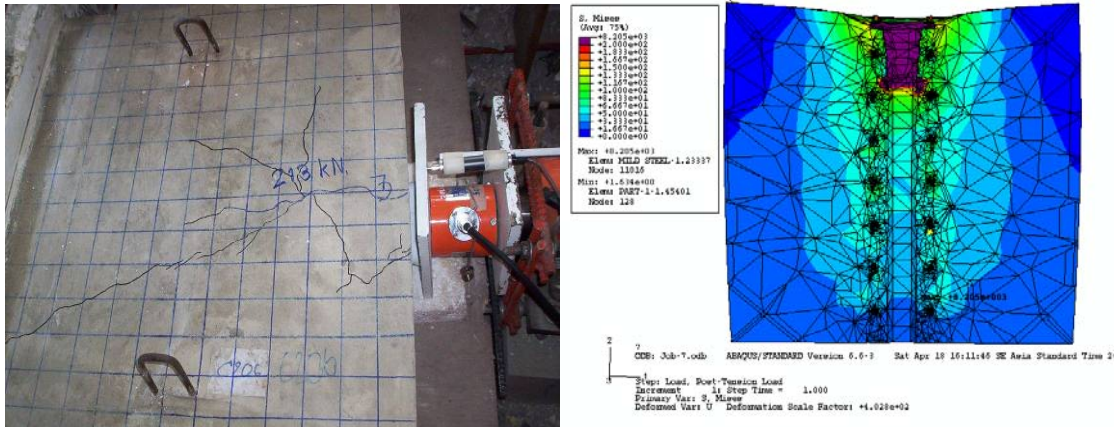
รูปที่ 4.25 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยึด Type C1



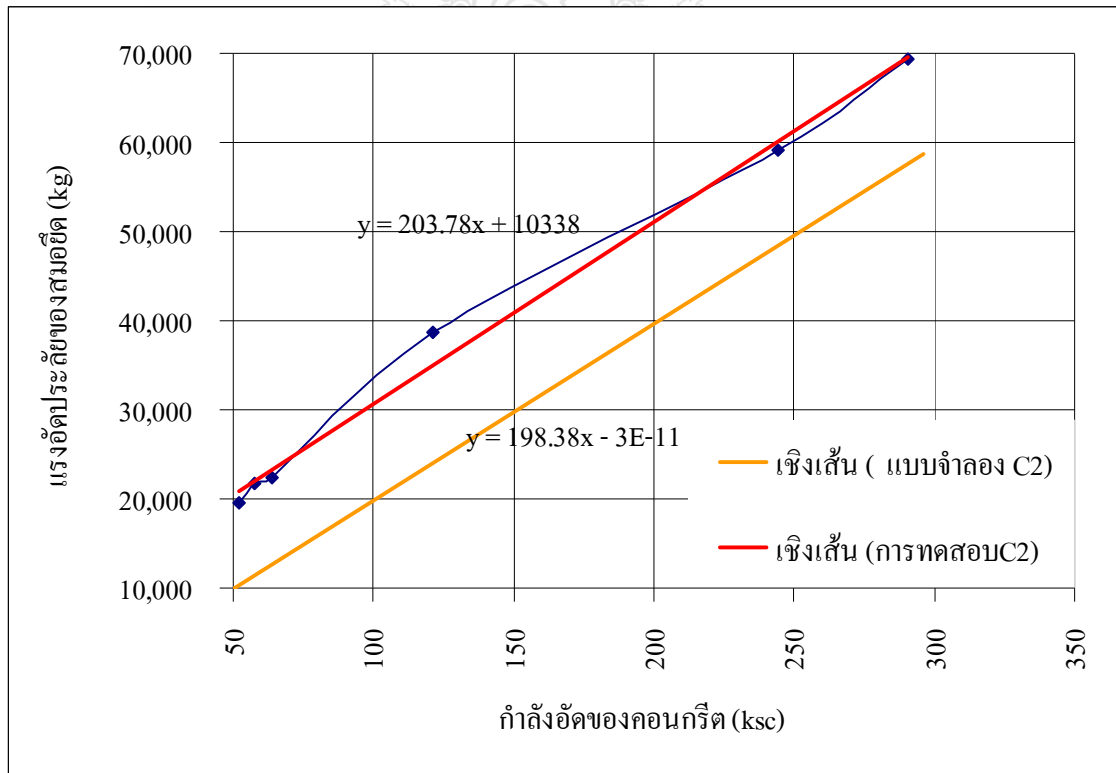
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยึดลาวอัดแรงที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง

#### 4.3.4 การกระจายแรงบริเวณสมอยึดเมื่อมีการเสริมเหล็กแบบ C2

เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 10 cm หน่วยแรงถ่ายลงลึกไปตามแนวแรงการกระจายของหน่วยแรงอยู่ที่ระหว่างเหล็กปลอก ปลอกที่ 1 ถึงปลอกที่ 5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดได้มากกว่าแบบจำลองอยู่ 10.3 ตัน



รูปที่ 4.27 ลักษณะการกระจายแรงบริเวณสมอยึด Type C2



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบแรงอัดประลัยในสมอยึดลวดอัดแรงที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและจากตัวอย่าง

ผลจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงอัดประลัยของสมอยึดลวดอัดแรงที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับการทดสอบจากตัวอย่างบริเวณสมอยึดพบว่ามีค่าแตกต่างกันอยู่ โดยเฉลี่ย 12 ตัน มีผลมาจากการค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดเป็นค่าแรงอัดประลัย ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่คอนกรีตมีรอยแตกแล้ว ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าค่าที่เป็นจริง ซึ่งควรใช้ค่ากำลังอัดที่คอนกรีตเริ่มแตกออกซึ่งยากที่จะวัดค่าได้ จึงจำเป็นต้องใช้ค่าแรงอัดสูงสุดที่สมอยึดรับได้เป็นตัวแทนค่าแรงอัดประลัยของสมอยึด

#### 4.4 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างสมการออกแบบ

จากการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายแรงจากแบบจำลองและการทดสอบจากตัวอย่างบริเวณสมอยึดพบว่าการเสริมเหล็กแบบ B ( เหล็กแกน DB 12 ตั้งฉากกับแนวแรงอัด เหล็กปลอก RB 9 mm @ 10 cm ) มีการกระจายแรงได้ดีจึงได้นำแบบจำลองชนิด B ที่ปรับปรุงจนเป็นที่ถูกต้องมาใช้ในการสร้างสมการออกแบบโดยการเปลี่ยนตัวแปรทั้งหมด 4 ครั้ง ได้แก่ การเปลี่ยนแรงกด ความหนา ระยะของเหล็กปลอกและค่าการเยื้องศูนย์ จนสามารถสร้างสมการออกแบบการเสริมเหล็กปลอกบริเวณสมอยึด

##### 4.5.1 เปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 1

วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสร้างแบบจำลองให้ความหนาคงที่ 20 cm เปลี่ยนแรงกดแล้วทำการคำนวณหาค่า  $\Phi$  (ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับกำลังอัดของคอนกรีต) ซึ่งให้เห็นว่าถ้าความหนาคงที่  $\Phi$  ก็จะคงที่ด้วยดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่า  $\Phi$  ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 1

P u	f <sub>c</sub> '	$\Phi$	t
9,800.00	55	8.94	20
19,600.00	110	8.94	20
29,400.00	165	8.94	20
39,200.00	219	8.94	20
49,000.00	274	8.94	20
58,800.00	329	8.94	20

#### 4.4.2 เปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 2

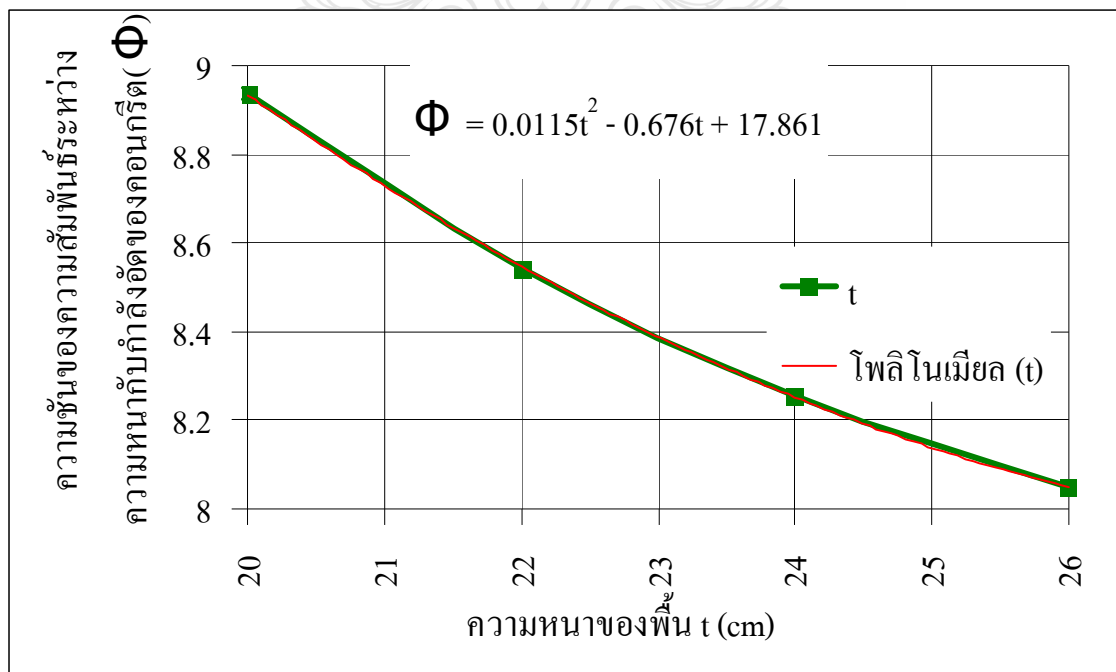
วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยให้แรงกดคงที่ระยะเหล็กปลอกคงที่ 10 cm แต่เปลี่ยนความหนาทั้งหมดสี่ค่าทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_u$  และ  $f_{ci}$  และหาค่า  $\Phi$  และ  $\alpha$  ได้ดังตารางที่ 4.29 ซึ่งให้เห็นว่าถ้าความหนาไม่คงที่  $\Phi$  แปรผกผันกับ  $t$  ในขณะที่  $s$  คงที่  $\alpha$  ก็คงที่ด้วย ดังนั้นจึงสามารถแยกหาความสัมพันธ์ของ  $\Phi$  กับ  $t$  ได้ดังสมการที่ 4.6

$$\Phi = 0.0115 t^2 - 0.676 t + 17.863 \quad (4.6)$$

เมื่อ  $\Phi$  คือความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับกำลังอัดของคอนกรีต  
 $t$  คือความหนาของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.8 ค่า  $\phi$  และ  $\alpha$  ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 2

$P_u$	$f_{ci}$	$\Phi$	$t$	$\alpha$	$s$
49,000	235	8.94	20	298	10
49,000	225	8.55	22	298	10
49,000	215	8.25	24	298	10
49,000	205	8.05	26	298	10



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีต ( $t$ ) กับความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับกำลังอัดของคอนกรีต ( $\Phi$ )

### 4.4.3 เปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 3

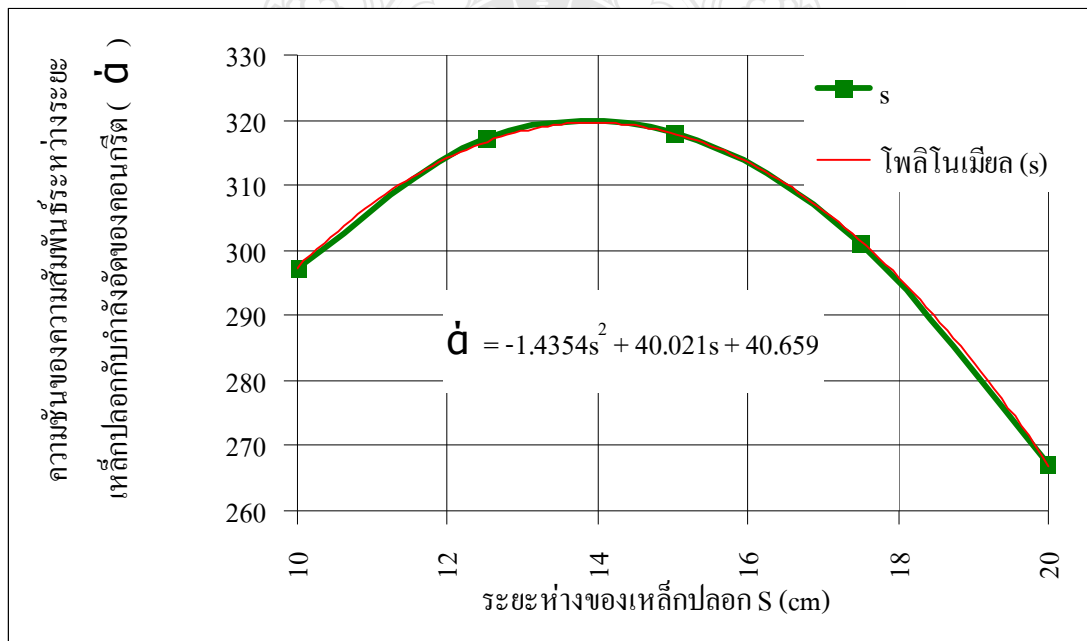
วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยให้แรงกดและความหนาของแบบจำลองคงที่ แต่เปลี่ยนระยะห่างของเหล็กปลอกทั้งหมด 5 ค่าทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_u$  และ  $f_c'$  คำนวณค่า  $\alpha$  และ  $S$  มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.30 ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ของ  $\alpha$  กับ  $S$  ได้ดังสมการที่ 4.7

$$\alpha = -1.4354 s^2 + 40.097 s + 40.65 \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเหล็กปลอกกับกำลังอัดของคอนกรีต  
 $S$  คือ ระยะห่างของเหล็กปลอก

ตารางที่ 4.9 ค่า  $\alpha$  และ  $S$  ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 3

$P_u$	$f_c'$	$\Phi$	$t$	$\alpha$	$s$
49,000	235	8.94	20	298	10
49,000	240	8.94	20	318	12.5
49,000	245	8.94	20	319	15
49,000	250	8.94	20	302	17.5
49,000	255	8.94	20	269	20



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเหล็กปลอก ( $S$ ) กับความชันของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเหล็กปลอกกับกำลังอัดของคอนกรีต ( $\alpha$ )

#### 4.4.4 เปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 4

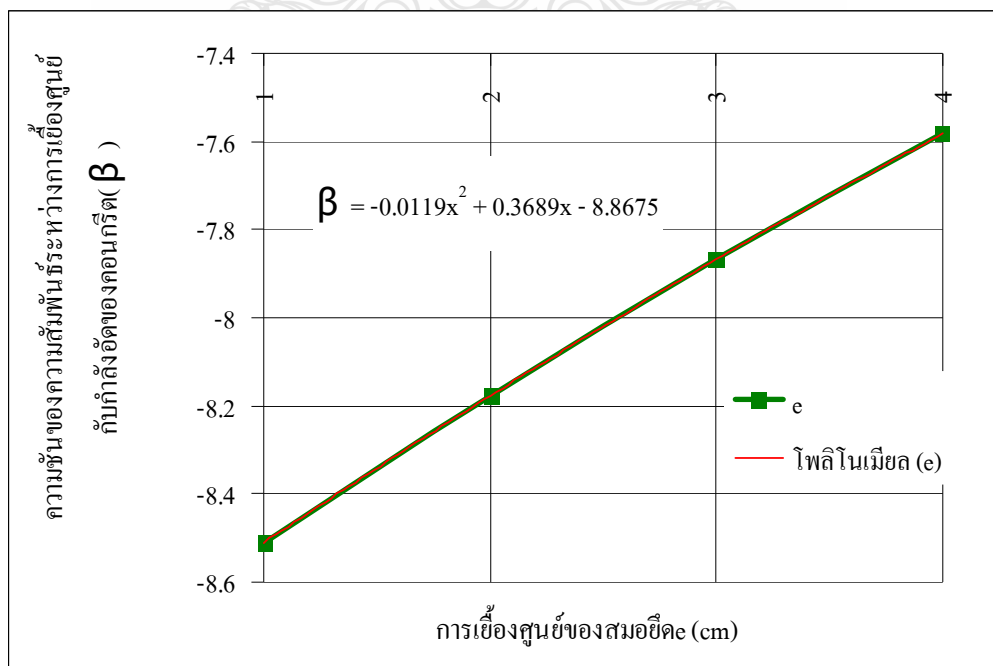
วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยให้แรงกด ความหนาของแบบจำลองและ ระยะเหล็กปลอกคองที่ แต่เปลี่ยนค่าการเยื้องศูนย์กลางทั้งหมด 5 ค่า ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_u$  และ  $f_{ci}$  นำค่า  $\beta$  และ  $e$  มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.31 ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ของ  $\beta$  กับ  $e$  ได้ดังสมการที่ 4.8

$$\beta = -0.0119 e^2 + 0.3689 e - 8.8675 \quad (4.8)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างการเยื้องศูนย์กลางของสมอกับกำลังอัดของคอนกรีต  
 $e$  คือ ค่าการเยื้องศูนย์กลางของสมอยึดลวดอัดแรง

ตารางที่ 4.10 ค่า  $\beta$  และ  $e$  ที่ได้จากการเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 4

$P_u$	$f_{c'}$	$\Phi$	$t$	$\alpha$	$s$	$\beta$	$e$
49,000	235	8.94	20	298	10	-	0
49,000	245	8.94	20	298	10	-8.51	1
49,000	255	8.94	20	298	10	-8.18	2
49,000	265	8.94	20	298	10	-7.87	3
49,000	275	8.94	20	298	10	-7.58	4



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการเยื้องศูนย์กลางของสมอยึด( $e$ )กับความชันของความสัมพันธ์ระหว่างการเยื้องศูนย์กลางกับกำลังอัดของคอนกรีต ( $\beta$ )



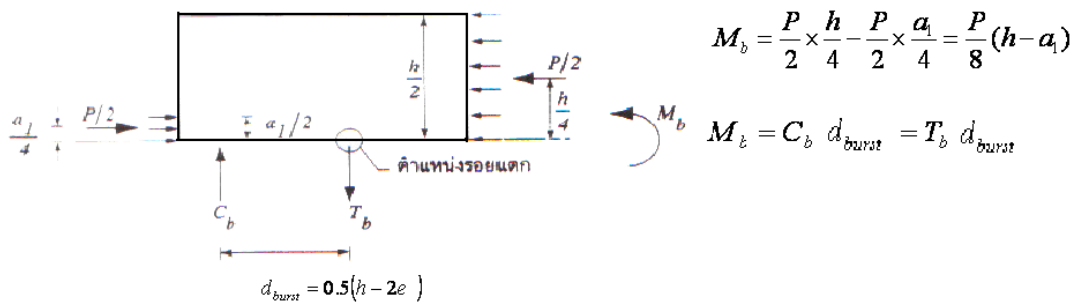
จากการเปลี่ยนตัวแปรทั้งหมด 4 ครั้งแล้วนำมาหาความสัมพันธ์ด้วยกราฟเส้นแนวโน้ม ทำให้ได้สมการสำหรับหาแรงอัดประลัยของสมอยึดดังแสดงในสมการที่ 4.9

$$P_u = (\Phi t + \alpha/s + \beta e) f_{ci} \quad (4.9)$$

โดยที่  $\Phi = 0.0115 t^2 - 0.676 t + 17.863$   
 $\alpha = -1.4354 s^2 + 40.097 s + 40.65$   
 $\beta = -0.0119 e^2 + 0.3689 e - 8.8675$   
 $t =$  ความหนาของพื้น  $s =$  ระยะห่างของเหล็กปลอก  
 $e =$  ระยะเยื้องศูนย์กลางของสมอยึด  $f_{ci} =$  กำลังอัดของคอนกรีตขณะอัดแรง

#### 4.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธี strut – and – tie

เนื่องจากก่อนที่จะทำวิจัยนี้ ยังไม่มีมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกกันระเบิดของพื้นคอนกรีตอัดแรง การออกแบบบริเวณสมอยึดจึงใช้วิธี strut – and – tie ในการหาปริมาณเหล็กเสริมโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงระเบิด ( $T_{burst}$ ) กับแรงอัดที่ปลายสมอยึด ( $P_u$ ) จากแผนภาพอิสระในรูปที่ 4.32 โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงระเบิดกับแรงอัดที่ปลายสมอยึดได้ดังสมการที่ 4.10



รูปที่ 4.32 แผนภาพอิสระของครึ่งส่วนบนของบริเวณปลายยึด

$$(T_{burst})(d_{burst}) = \frac{P}{8} (h - a) \quad (4.10)$$

โดยที่ ACI 318-08 กำหนด  $d_{burst} = 0.5(h - 2e)$

ดังนั้นแรงระเบิดหาได้จากสมการ  $(T_{burst}) = \frac{P(h - a)}{8 d_{burst}}$

โดยที่แรงระเบิดหาได้จากแรงดึงของคอนกรีตบริเวณสมอยัด ( $T_c$ ) บวกกับแรงดึงของเหล็กปลอก ( $T_s$ ) ดังสมการ 4.11

$$T_{burst} = T_c + T_s$$

$$T_s = T_{burst} - T_c \quad (4.11)$$

เมื่อแรงดึงของคอนกรีตบริเวณสมอยัด ( $T_c$ ) เท่ากับพื้นที่ของบริเวณที่เกิดรอยปริ ( $A$ ) คูณด้วยหน่วยแรงดึงของคอนกรีต

$$T_c = Af_{ci}$$

$$A = hd_{burst}$$

$$f_{ci} = 0.8\sqrt{f'_{ci}}$$

ดังนั้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกหาได้จากสมการ

$$T_s = T_{burst} - (hd_{burst})0.8\sqrt{f'_{ci}} \quad (4.12)$$

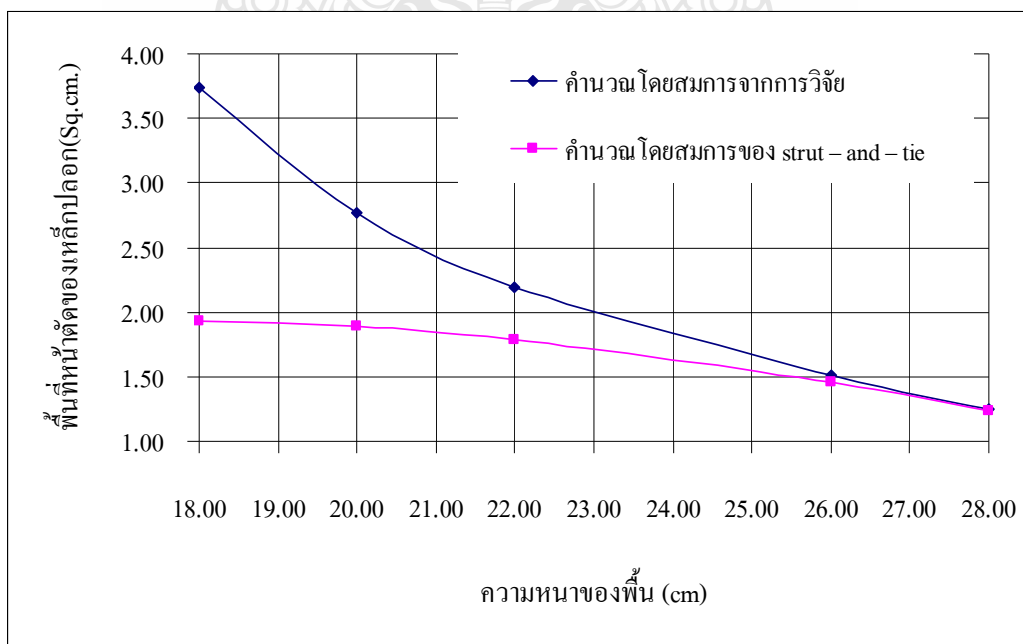
พื้นที่หน้าตัดของเหล็ก ( $A_s$ ) หาได้จากแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็ก ( $T_s$ ) หารด้วยกำลังรับแรงดึงของเหล็ก ( $f_s$ ) ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดหาได้ดังสมการ 4.12

$$A_s = \frac{T_s}{f_s} = \frac{T_{burst} - (hd_{burst})0.8\sqrt{f'_{ci}}}{f_s} \quad (4.13)$$

ซึ่งผลที่ได้จากสมการที่ 4.9 และ 4.12 หาได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตารางเปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมจากการวิจัยกับ วิธี Strut – and – tie

คำนวณ โดยสมการจากการวิจัย							คำนวณ โดยสมการของ ACI 318-08					
P u	a	h	e	s	D	As	d burst	( t-a)/d	T burst	Tc	Ts	As
<b>45041</b>	<b>7</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>17</b>	<b>50</b>	<b>3.74</b>	<b>9.0</b>	<b>1.22</b>	<b>6881</b>	<b>2259</b>	<b>4,623</b>	<b>1.93</b>
45041	7	18	1	11.9	50	5.34	8.0	1.38	7741	2008	5,734	2.39
45063	7	18	2	7.6	50	8.37	7.0	1.57	8852	1757	7,095	2.96
<b>45052</b>	<b>7</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>23</b>	<b>50</b>	<b>2.76</b>	<b>10.0</b>	<b>1.30</b>	<b>7321</b>	<b>2789</b>	<b>4,532</b>	<b>1.89</b>
45038	7	20	1	17.5	50	3.63	9.0	1.44	8132	2510	5,622	2.34
45059	7	20	2	12.6	50	5.05	8.0	1.63	9153	2231	6,922	2.88
<b>45011</b>	<b>7</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>29</b>	<b>50</b>	<b>2.19</b>	<b>11.0</b>	<b>1.36</b>	<b>7672</b>	<b>3374</b>	<b>4,298</b>	<b>1.79</b>
45011	7	22	1	23.5	50	2.71	10.0	1.50	8440	3067	5,372	2.24
45036	7	22	2	18.5	50	3.43	9.0	1.67	9382	2761	6,622	2.76
<b>45036</b>	<b>7</b>	<b>26</b>	<b>0</b>	<b>42</b>	<b>50</b>	<b>1.51</b>	<b>13.0</b>	<b>1.46</b>	<b>8228</b>	<b>4713</b>	<b>3,515</b>	<b>1.46</b>
45051	7	26	1	38	50	1.67	12.0	1.58	8916	4350	4,566	1.90
45106	7	26	2	32.5	50	1.96	11.0	1.73	9739	3988	5,751	2.40
<b>45032</b>	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>0</b>	<b>51</b>	<b>50</b>	<b>1.25</b>	<b>14.0</b>	<b>1.50</b>	<b>8444</b>	<b>5466</b>	<b>2,978</b>	<b>1.24</b>
45032	7	28	1	47	50	1.35	13.0	1.62	9093	5075	4,018	1.67



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกระหว่างผลการวิจัยกับ Strut – and – tie

จากรูปที่4.32 การเปรียบเทียบปริมาณเหล็กปลอกที่ได้จากวิธี Strut – and – tie กับจากสมการที่ได้จากการวิจัยให้ผลต่างกันในช่วงที่พื้นมีความหนาน้อยกว่า 26 cm ซึ่งมีอัตราส่วนความหนาของพื้นที่กับขนาดของสมอยึดน้อยกว่า 0.27 จึงมีพฤติกรรมการกระจายแรงแตกต่างไปจากในกรณีของคาน เพราะเมื่อพื้นคอนกรีตอัดแรงมีความหนาน้อยลง การกระจายหน่วยแรงดึงของคอนกรีตก็จะเกิดขึ้นน้อยลงด้วย ดังนั้นผลที่ได้จากการวิจัยนี้จึงให้ผลที่ถูกต้องกว่าวิธี Strut – and – tie



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบและจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

จากการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 5 ชนิด พบว่ามีความสามารถในการรับแรงอัดได้ไม่เท่ากันเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้

- 1) B2 เมื่อเหล็กแกนตั้งฉากแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 10 เซนติเมตร
- 2) C2 เมื่อเสริมเหล็กแกนขนานแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 10 เซนติเมตร
- 3) B1 เมื่อเหล็กแกนตั้งฉากแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร
- 4) C1 เมื่อเสริมเหล็กแกนขนานแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร
- 5) A เมื่อไม่เสริมเหล็กบริเวณสมอยึด

#### 5.2 รูปแบบของการกระจายแรง

เมื่อพิจารณาทั้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากตัวอย่างทดสอบ พบว่าหน่วยแรงอัดจะกระจายออกไปในทิศทางเดียวกับเหล็กแกน ซึ่งระยะห่างของเหล็กปลอกมีผลต่อการกระจายแรงถ้าเหล็กปลอกถี่ ก็จะกระจายแรงได้ดีกว่า

#### 5.3 สมการสำหรับหาแรงระเบิด

เนื่องจากการเสริมเหล็กชนิด B เป็นการเสริมเหล็กที่เหมาะสมที่สุดจึงได้นำลักษณะการเสริมชนิด B จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีผลลัพธ์แตกต่างกันอยู่ 15% จึงจัดได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำแบบจำลองไปวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นสมการออกแบบแล้วนำมาหาความสัมพันธ์ด้วยกราฟเส้นแนวโน้มทำให้ได้สมการสำหรับหาแรงอัดประลัยของสมอยึดชนิดที่ให้ในการวิจัยนี้ ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$P_u = (\Phi_{t+\alpha/s+\beta e}) f_{ci} \quad (5.1)$$

โดยที่  $\Phi = 0.0115 t^2 - 0.676 t + 17.863$  (5.2)

$$\alpha = -1.4354 s^2 + 40.097 s + 40.65 \quad (5.3)$$

$$\beta = -0.0119 e^2 + 0.3689 e - 8.8675 \quad (5.4)$$

t = ความหนาของพื้น โดยที่ความหนาของพื้นต้องไม่น้อยกว่า 18 cm

s = ระยะห่างของเหล็กปลอก โดยระยะห่างของเหล็กปลอกต้องไม่น้อยกว่า 10 cm

e = ระยะเยื้องศูนย์กลางของสมอียึด โดยระยะเยื้องศูนย์กลางต้องไม่เกิน 1 ใน 3 ของความหนาพื้น

f<sub>ci</sub> = กำลังอัดของคอนกรีตขณะอัดแรง อยู่ในช่วง 60 ksc – 320 ksc



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศ. วินิต ช่อวิเชียร .การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน.2542 หน้า 222
- [2] ดร นเรศ พันธราชธ.การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. ไลบารีนาย.2540
- [3] Edward G. Nawy,2003.Prestressed Concrete. p 144
- [4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.,2549,มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง.โอบอด กราฟฟิค.หน้า27
- [5] American Concrete Institute, 2008. BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE (ACI 318-08) AND COMMENTARY (ACI 318R-08).
- [6] American Association of State Highway Transportation Official(AASHTO).(2002) Standard Specifications for Highway Bridges, 1<sup>st</sup> Ed.
- [7] Burdet , O.A. (1990). Analysis and Design of Post-Tension Anchorage Zone Concrete Bridge, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin
- [8] Wallmann,GP (1992).Anchorage Zone in Post-Tensioned Concrete Structure , Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin
- [9] ทรงวุฒิ เสงพระธานี, 2549.การศึกษาพฤติกรรมของบริเวณสมอยึดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์. วิศวกรรมศาสตร์มก, เล่มที่60 : 26.
- [10] พรจิต ประทุมสุวรรณ ,2542,พื้นฐานหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติระบบไฮดรอลิกส์และนิวเมติกส์.

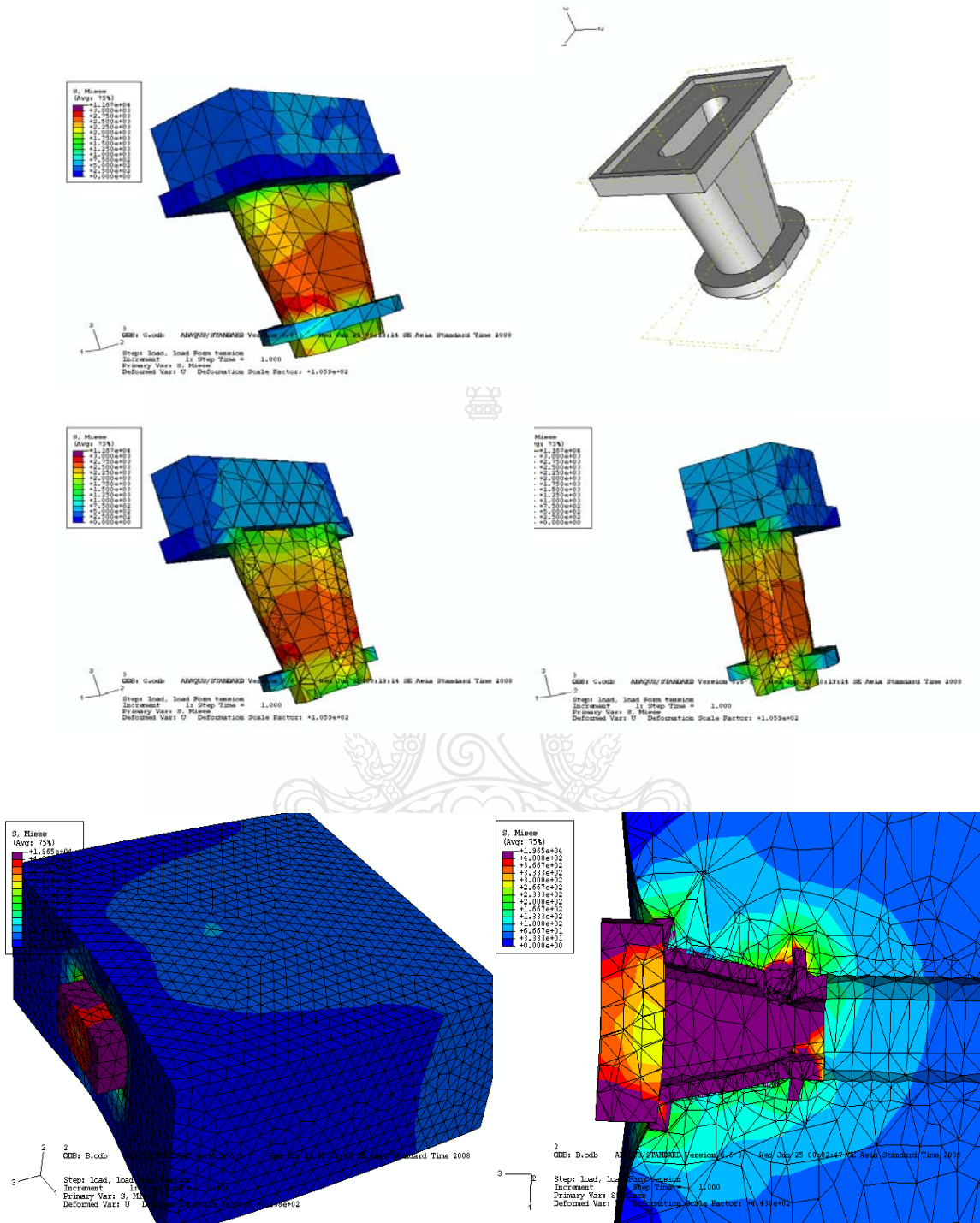
ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



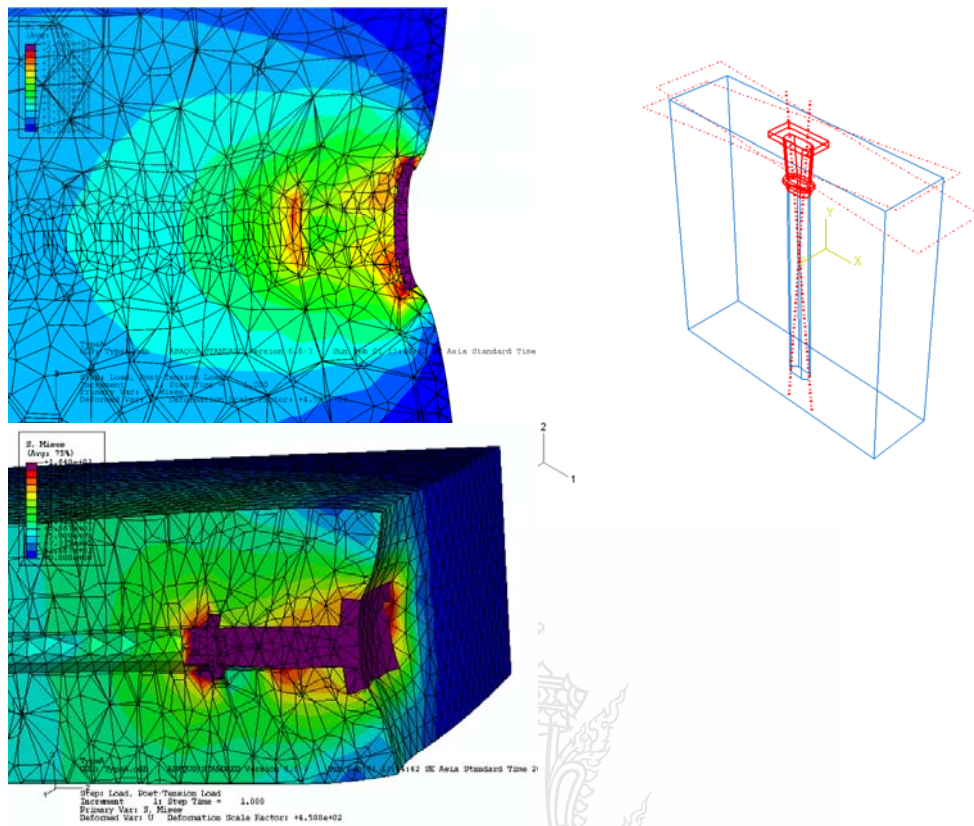


# 1 ผลการวิเคราะห์เมื่อสมอยึดมีช่องว่างอยู่ภายใน



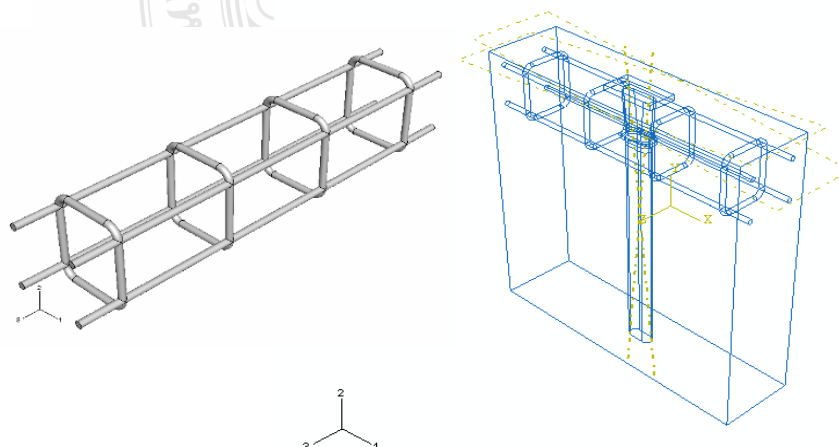
รูปที่ ก 1 การกระจายแรงของสมอยึดเมื่อสมอยึดมีช่องว่างอยู่ภายใน

## 2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Type A ไม่เสริมเหล็กบริเวณสมอยึด

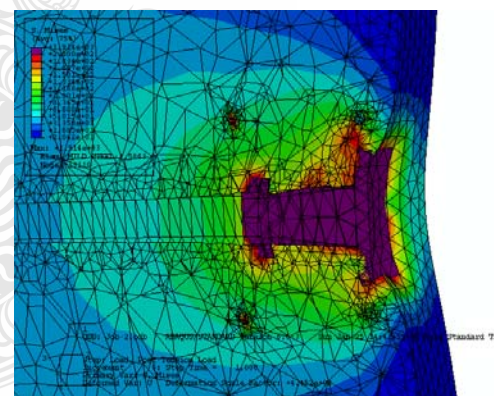
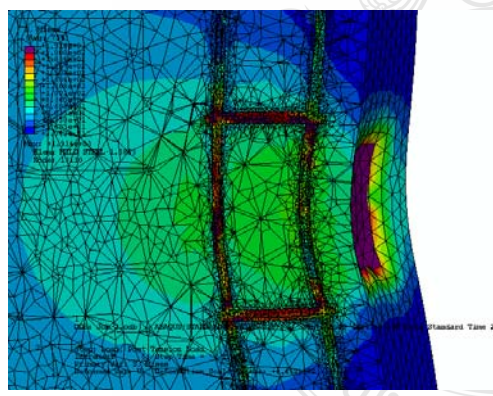
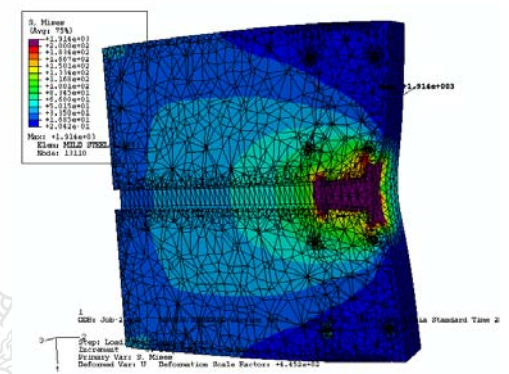
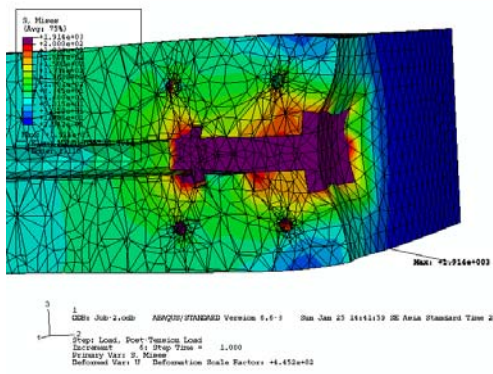
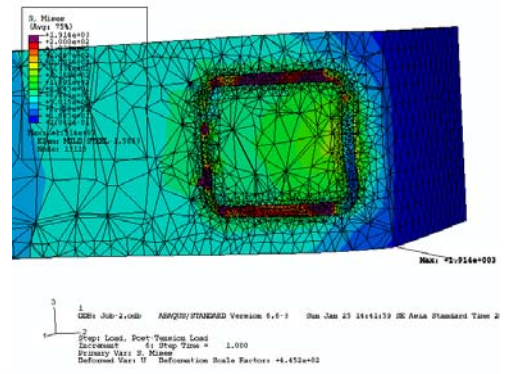
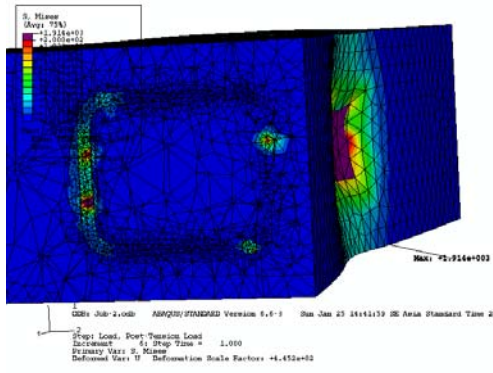


รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ Type A

## 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Type B1 เมื่อเหล็กแกนตั้งจากแนวแรงอัดโดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร

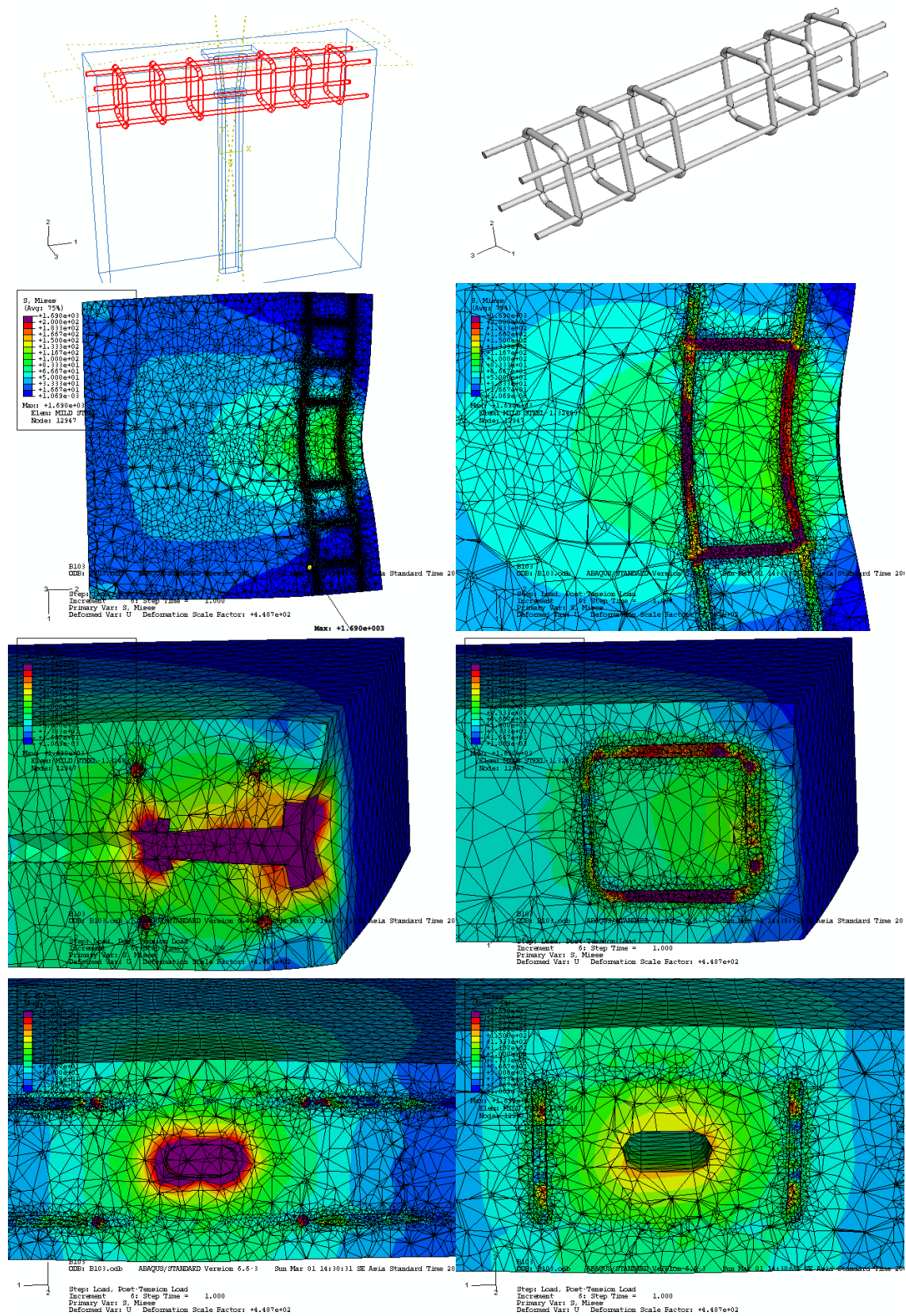


รูปที่ 3 แบบจำลอง Type B1



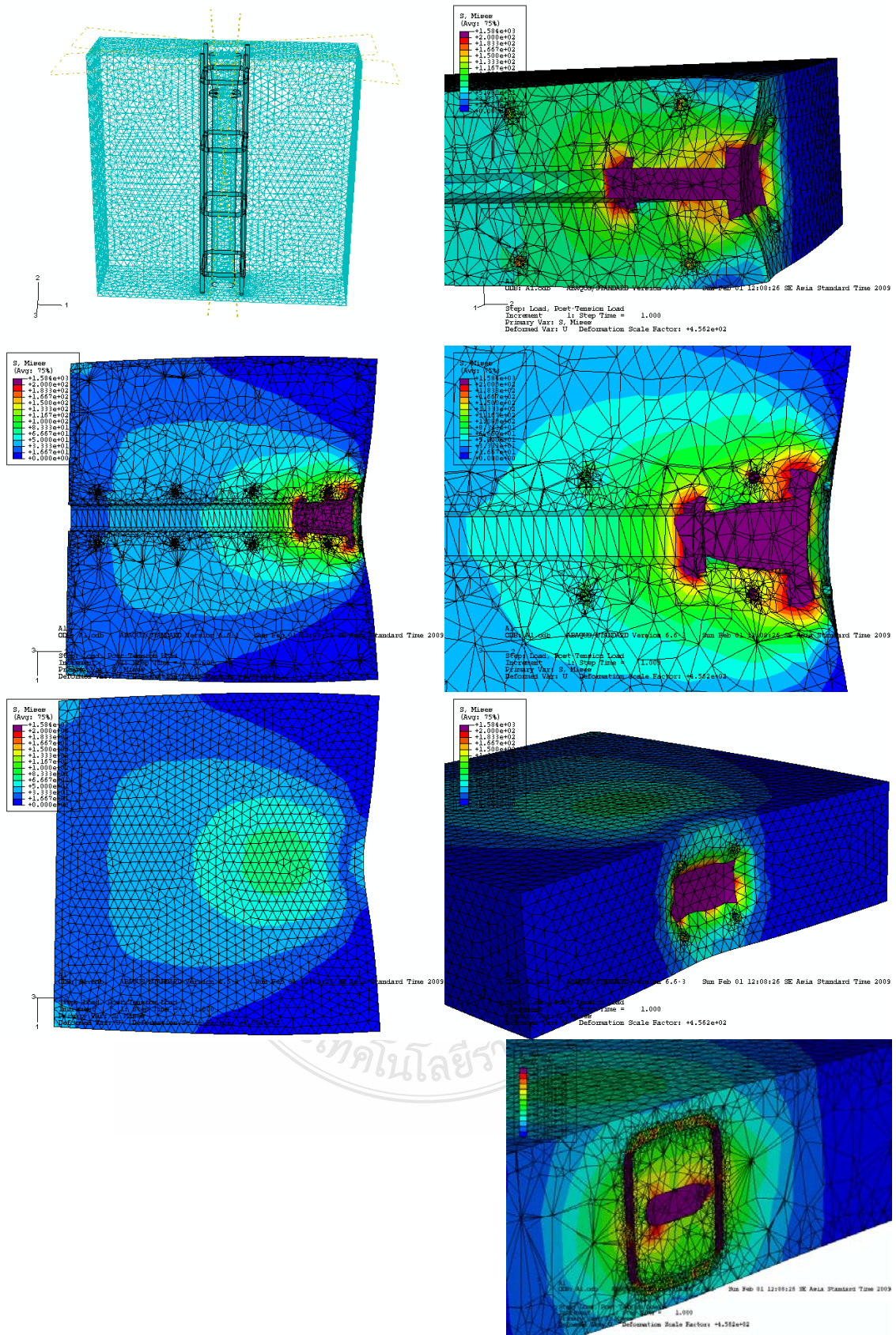
รูปที่ ก 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Type B1

4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง B2 เมื่อเหล็กแกนตั้งจากแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 cm



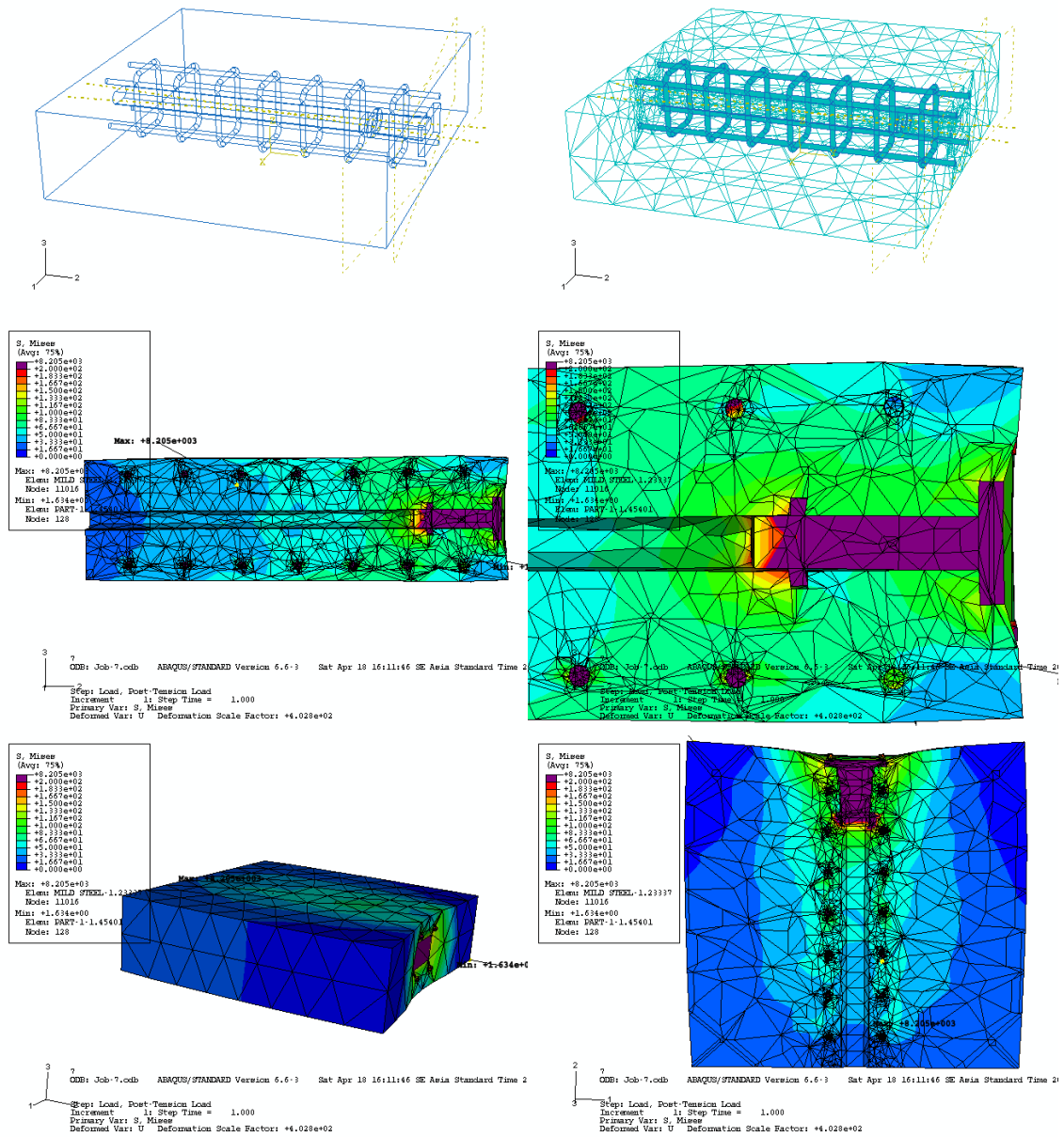
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Type B2

5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง C1 เมื่อเหล็กแกนขนานแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 20 cm



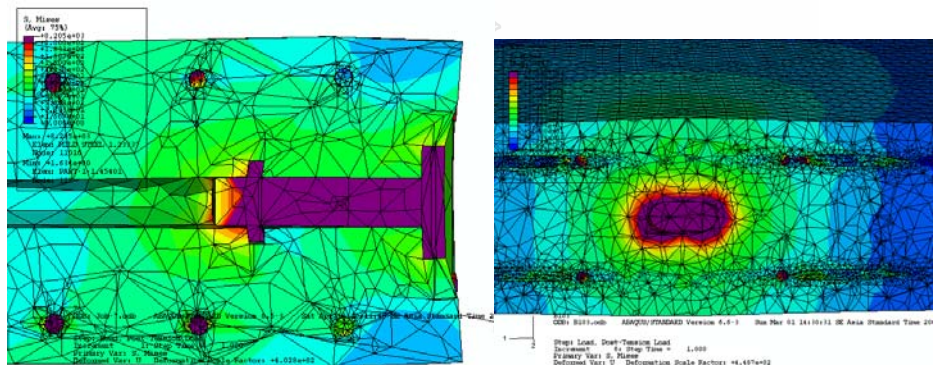
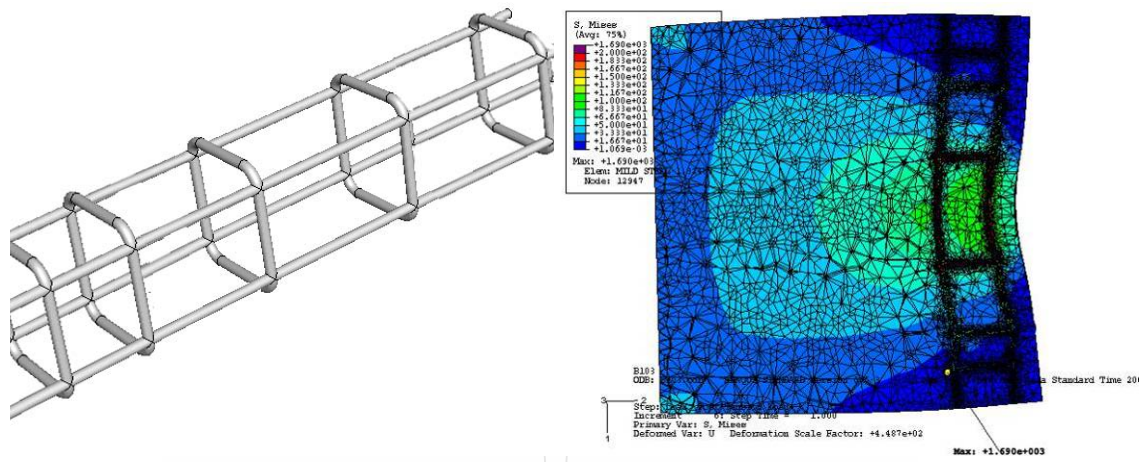
รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Type C1

6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง C2 เมื่อเสริมเหล็กแกนขนานแนวแรงอัด โดยมีเหล็กปลอกทุกระยะ 10 เซนติเมตร



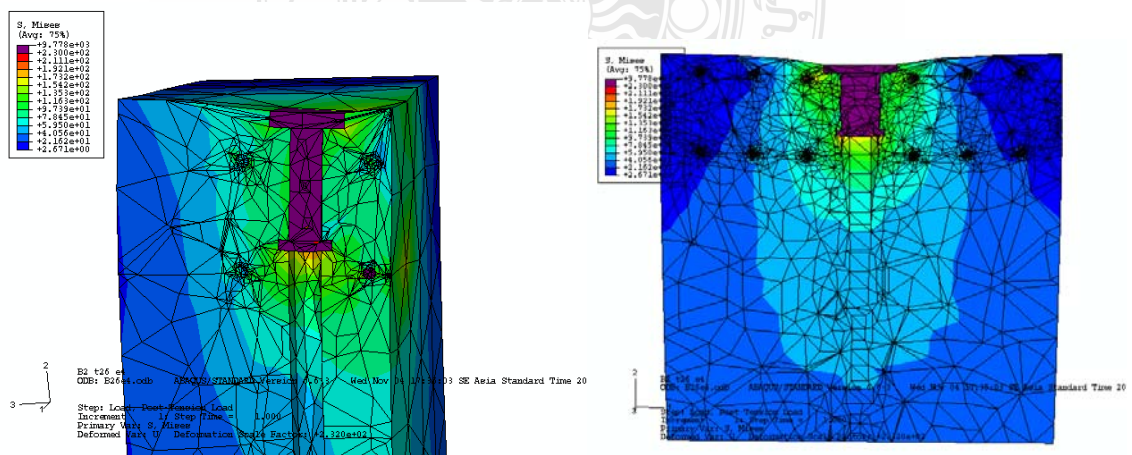
รูปที่ ก 7 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Type C2

7 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง B ระยะเหล็กปลอก 15 cm

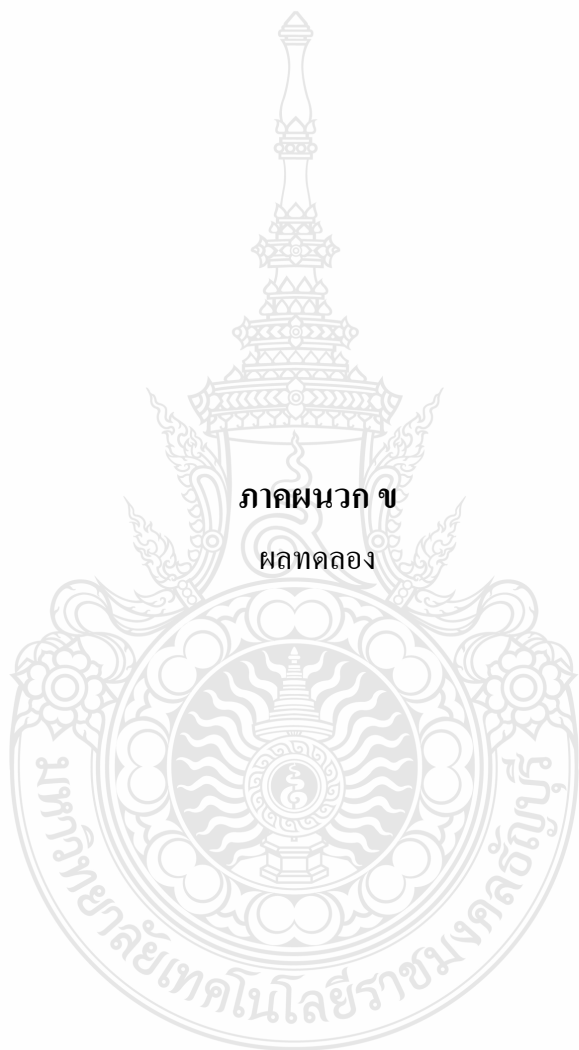


รูปที่ ก 8 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง B ระยะเหล็กปลอก 15 cm

8 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง B เมื่อเกิดการเอียงศูนย์



รูปที่ ก 9 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอียงศูนย์



**ภาคผนวก ข**

**ผลทดลอง**



## 1 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A010

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.1 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

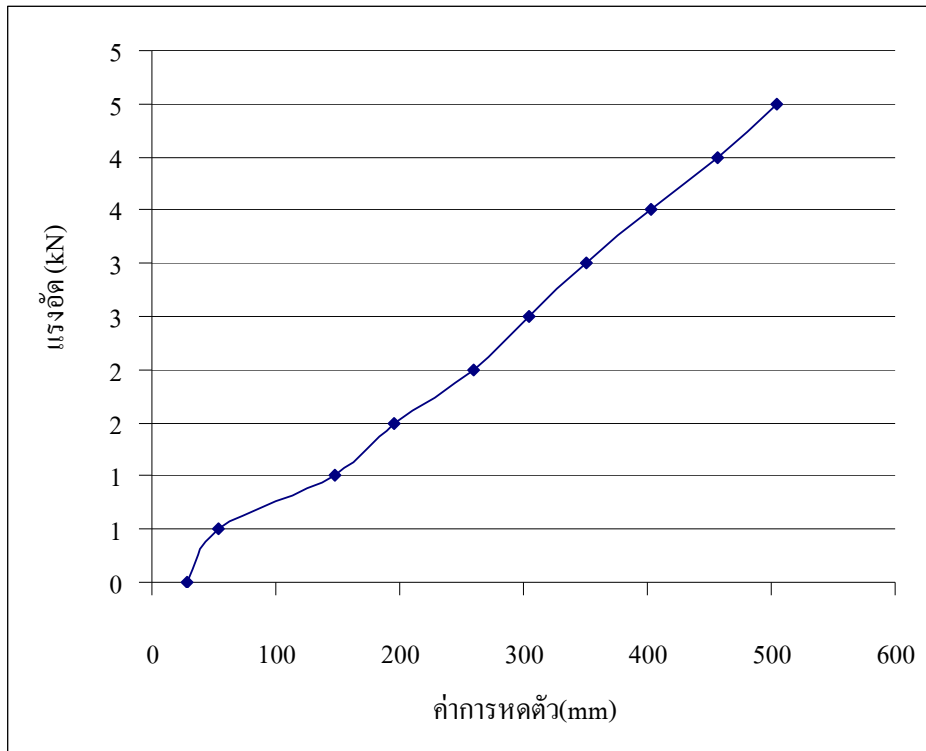
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง(cm)	สูง (cm)	พื้นที่ หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
A010	0.75	0.65	0.15	0.098		
A010/1	0.15	0.3	176.625	0.005	440	253.940
A010/2	0.15	0.3	176.625	0.005	450	259.712
A010/3	0.15	0.3	176.625	0.005	450	259.712
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 257.788ksc		

ตารางที่ ข. 1 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 1 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
28	10.0	10.0	0.000	403	13.5	10.0	3.500
54	10.5	10.0	0.500	456	14.0	10.0	4.000
148	11.0	10.0	1.000	505	14.5	10.0	4.500
196	11.5	10.0	1.500	540	15.0	10.0	5.000
259	12.0	10.0	2.000	550	15.5	10.0	5.500
305	12.5	10.0	2.500				
351	13.0	10.0	3.000				
				<b>แรงอัดสูงสุด</b>	<b>56065.2 kg</b>		



รูปที่ ข 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A010



รูปที่ ข 1.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A010

## 2 ผลการทดสอบตัวอย่าง A009

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552

อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.2 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

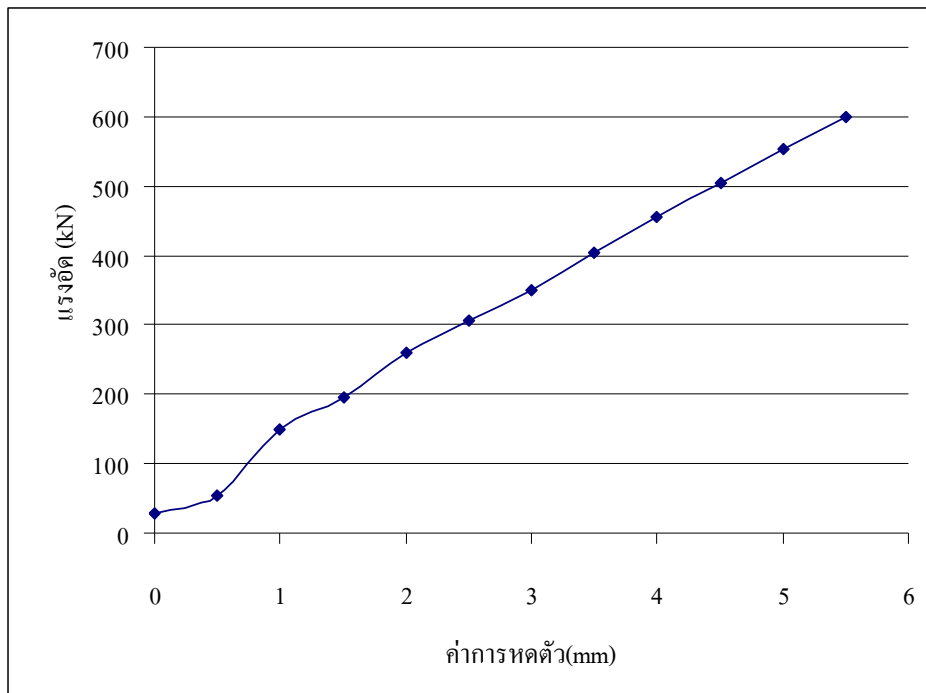
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด (cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
A009	0.75	0.65	0.15	0.098		
A009/1	0.15	0.3	176.625	0.005	540	311.654
A009/2	0.15	0.3	176.625	0.005	540	311.654
A009/3	0.15	0.3	176.625	0.005	540	311.654
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.016 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 311.654ksc		

ตารางที่ ข. 2 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

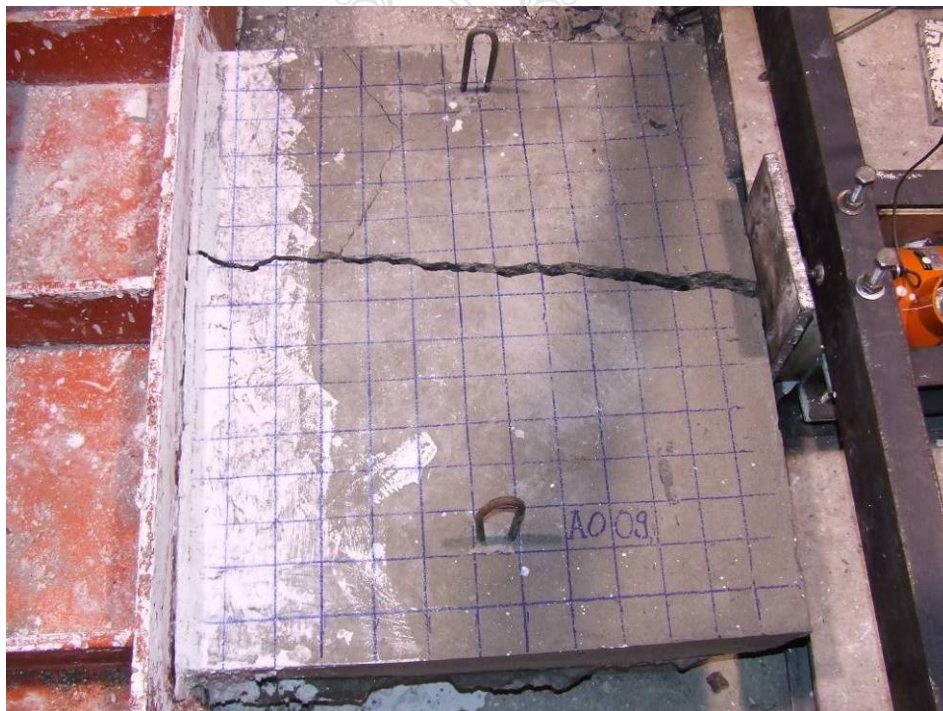
Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 2 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอชิดลาดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
28	2.0	2.0	0.000	403	5.5	2.0	3.500
54	2.5	2.0	0.500	456	6.0	2.0	4.000
148	3.0	2.0	1.000	505	6.5	2.0	4.500
196	3.5	2.0	1.500	554	7.0	2.0	5.000
259	4.0	2.0	2.000	600	7.5	2.0	5.500
305	4.5	2.0	2.500	656	8.0	2.0	6.000
แรงอัดสูงสุด					66870.5 kg		



รูปที่ ข 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A010



รูปที่ ข 2.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A009

### 3 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C210

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.3 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

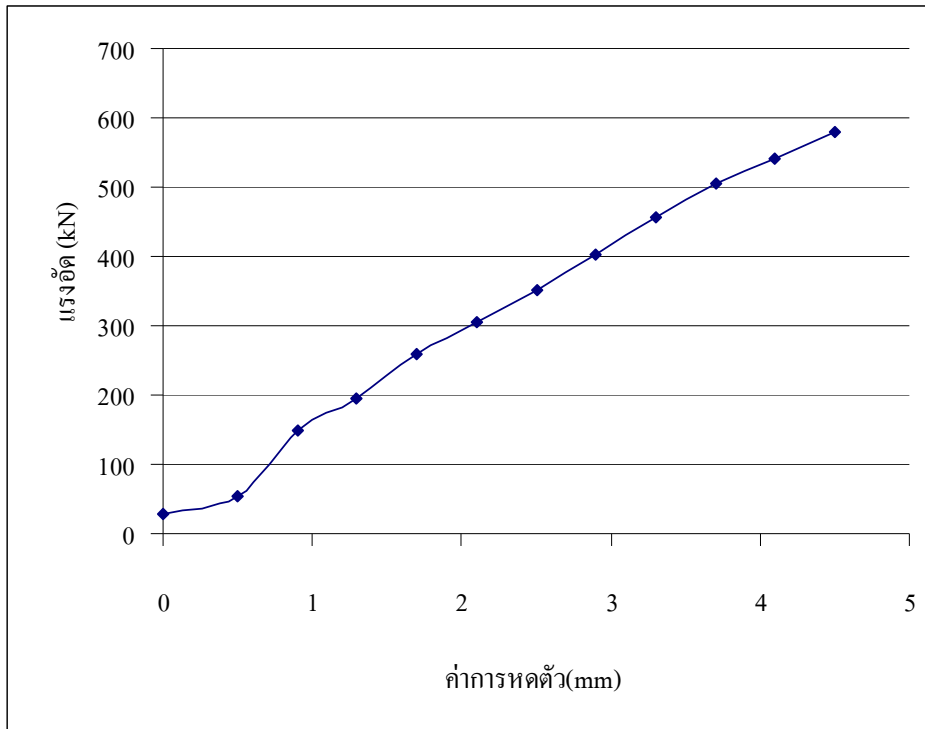
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
C210	0.75	0.65	0.15	0.098		
C210/1	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
C210/2	0.15	0.3	176.625	0.005	430	248.169
C210/3	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 244.322ksc		

ตารางที่ ข. 3 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 3 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	
28	1.5	1.5	0.000	351	4.0	1.5	2.500	
54	2.0	1.5	0.500	403	4.4	1.5	2.900	
148	2.4	1.5	0.900	456	4.8	1.5	3.300	
196	2.8	1.5	1.300	505	5.2	1.5	3.700	
259	3.2	1.5	1.700	540	5.6	1.5	4.100	
305	3.6	1.5	2.100	580	6.0	1.5	4.500	
				<b>แรงอัดสูงสุด</b>	<b>59123.3 kg</b>			



รูปที่ ข 3.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C210



รูปที่ ข 3.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C210

#### 4 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B210

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.4 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

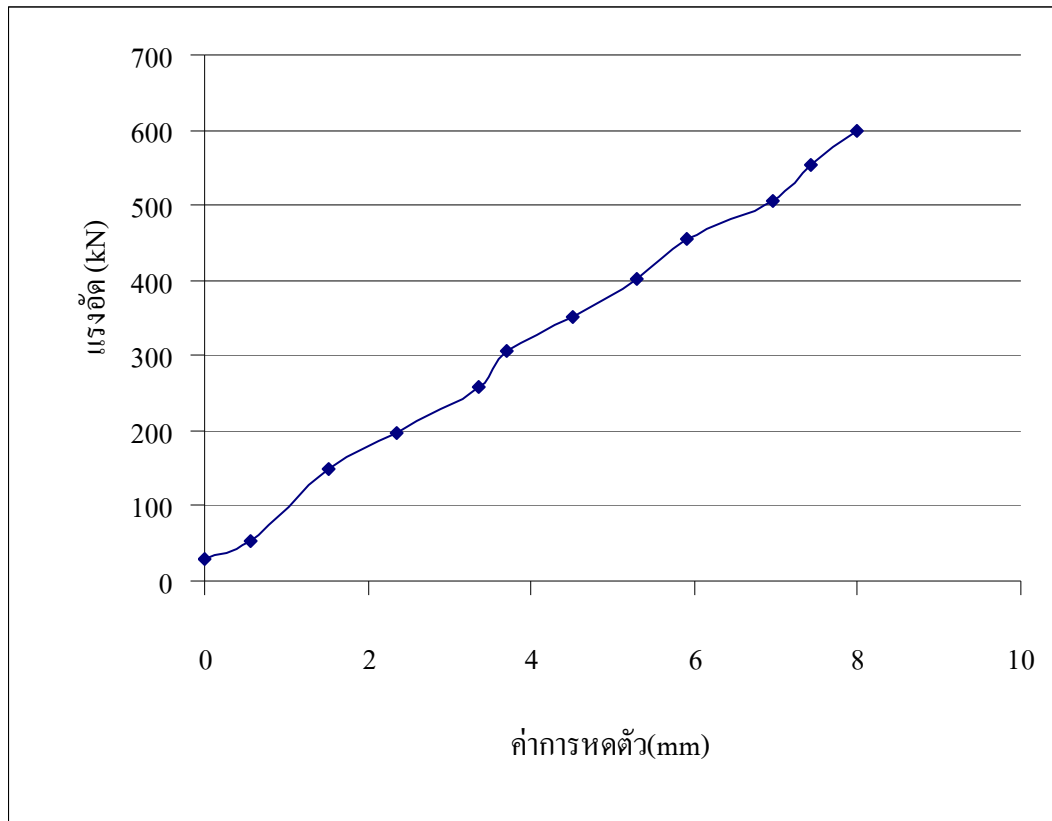
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัดหน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
B210	0.75	0.65	0.15	0.098		
B210/1	0.15	0.3	176.625	0.005	520	300.111
B210/2	0.15	0.3	176.625	0.005	520	300.111
B210/3	0.15	0.3	176.625	0.005	520	300.111
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 300.112ksc		

ตารางที่ ข. 4 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

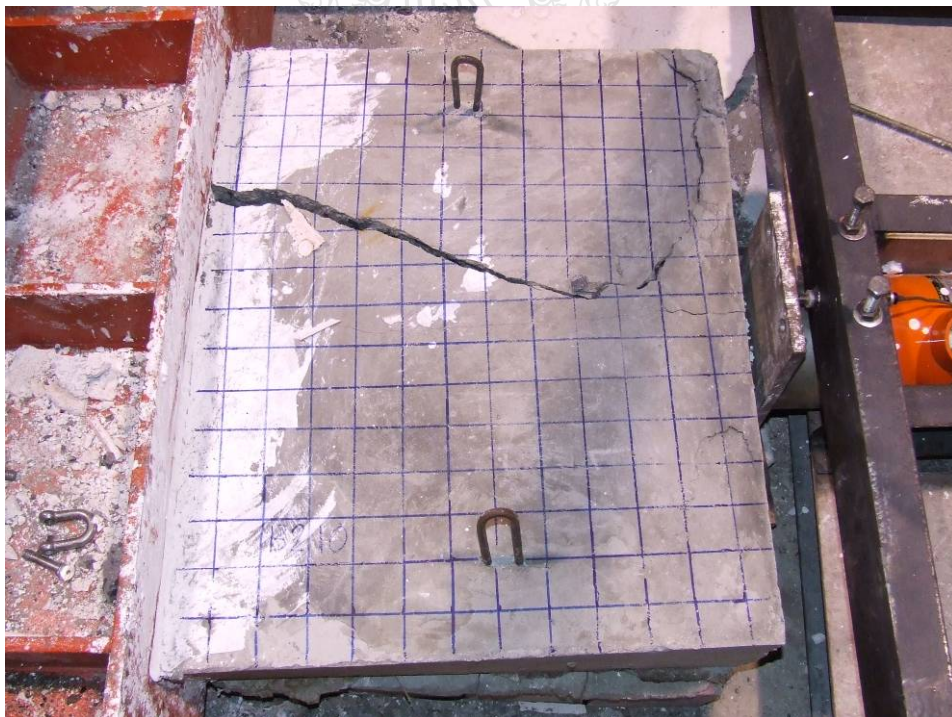
Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 4 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
148	-8.473	-10.0	1.527	456	-4.103	-10.0	5.897
196	-7.643	-10.0	2.357	505	-3.051	-10.0	6.949
259	-6.652	-10.0	3.348	554	-2.576	-10.0	7.424
305	-6.294	-10.0	3.706	600	-1.999	-10.0	8.001
351	-5.485	-10.0	4.515	650	-1.8	-10.0	8.200
403	-4.708	-10.0	5.292	720	-0.8	-10.0	9.200
แรงอัดสูงสุด				73394.5	kg		



รูปที่ ข 4.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B210



รูปที่ ข 4.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B210



## 5 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B110

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.5 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

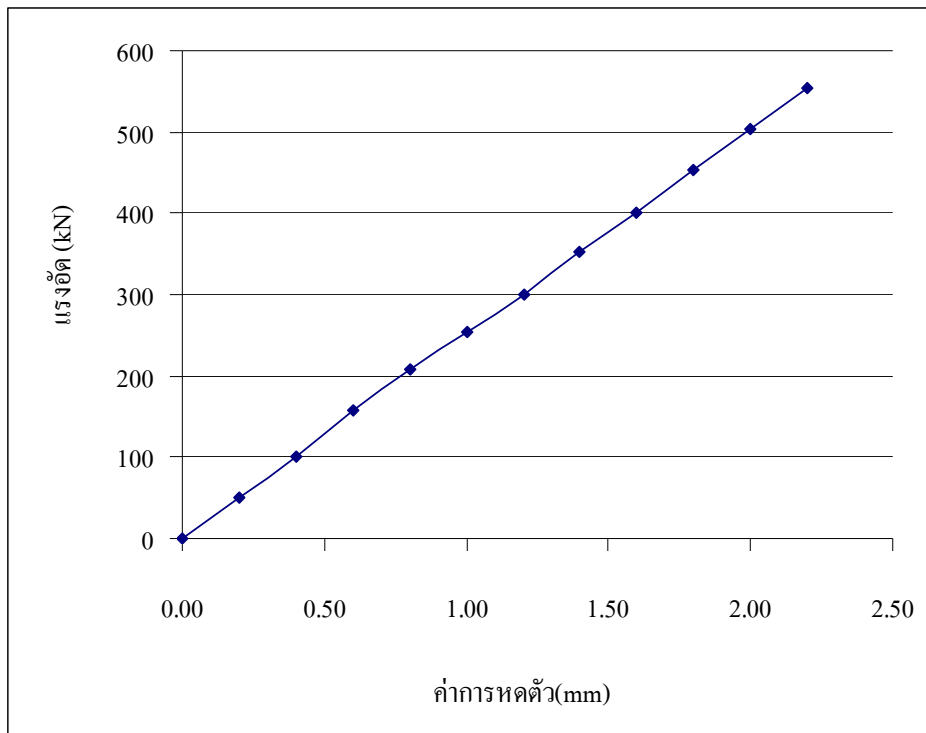
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B110	0.75	0.65	0.15	0.098		
B110/1	0.15	0.3	176.625	0.005	490	282.797
B110/2	0.15	0.3	176.625	0.005	520	300.111
B110/3	0.15	0.3	176.625	0.005	500	288.568
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>3</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 290.493ksc		

ตารางที่ ข. 5 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

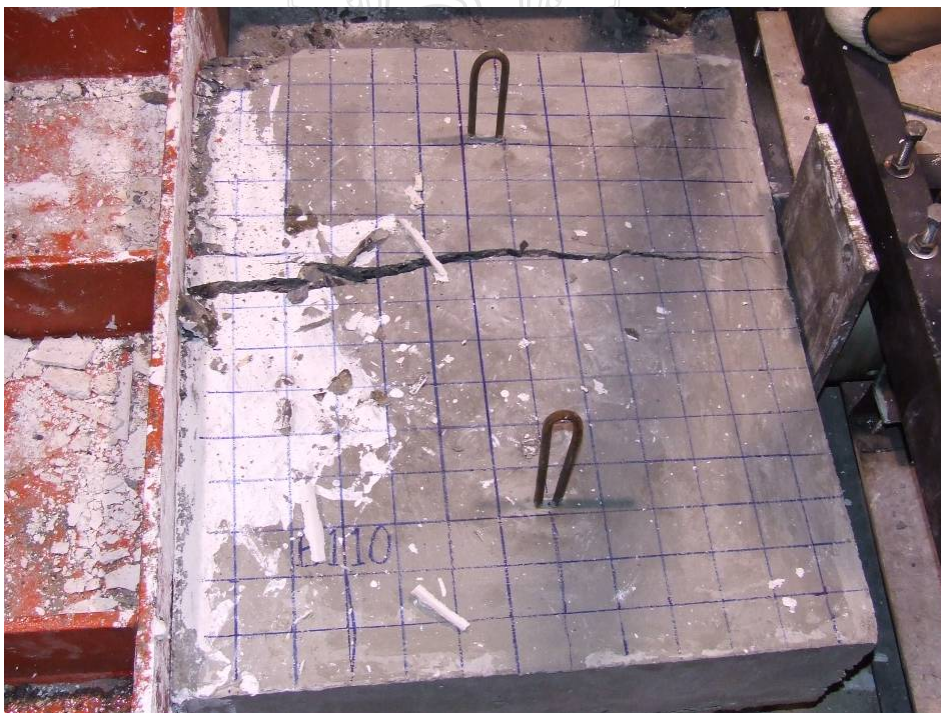
Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 5 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
50	1.200	1.0	0.200	353	2.400	1.0	1.400
101	1.400	1.0	0.400	401	2.600	1.0	1.600
157	1.600	1.0	0.600	454	2.800	1.0	1.800
207	1.800	1.0	0.800	504	3.000	1.0	2.000
255	2.000	1.0	1.000	554	3.200	1.0	2.200
301	2.200	1.0	1.200	650	3.400	1.0	2.400
				<b>แรงอัดสูงสุด</b>	<b>66258.9</b>	kg	



รูปที่ ข 5.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B110



รูปที่ ข 5.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B110

## 6 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C110

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552

อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.6 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

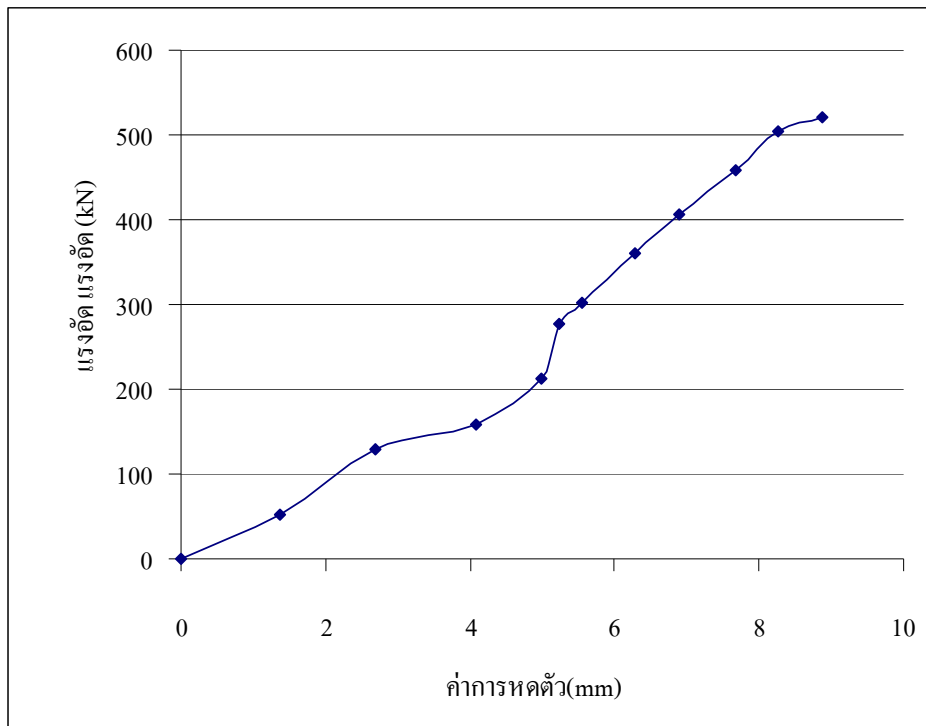
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
C110	0.75	0.65	0.15	0.098		
C110/1	0.15	0.3	176.625	0.005	390	225.083
C110/2	0.15	0.3	176.625	0.005	400	230.855
C110/3	0.15	0.3	176.625	0.005	390	225.083
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 227.008ksc		

ตารางที่ ข. 6 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 6 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลาดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
52	-9.100	-10.5	1.360	361	-4.171	-10.5	6.289
130	-7.762	-10.5	2.698	406	-3.562	-10.5	6.898
159	-6.370	-10.5	4.090	459	-2.782	-10.5	7.678
212	-5.462	-10.5	4.998	504	-2.204	-10.5	8.256
278	-5.220	-10.5	5.240	520	-1.588	-10.5	8.872
303	-4.917	-10.5	5.543	<b>แรงอัดสูงสุด</b>		<b>53007.1</b>	kg



รูปที่ ข 6.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C110



รูปที่ ข 6.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C110

## 7 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C109

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.7 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

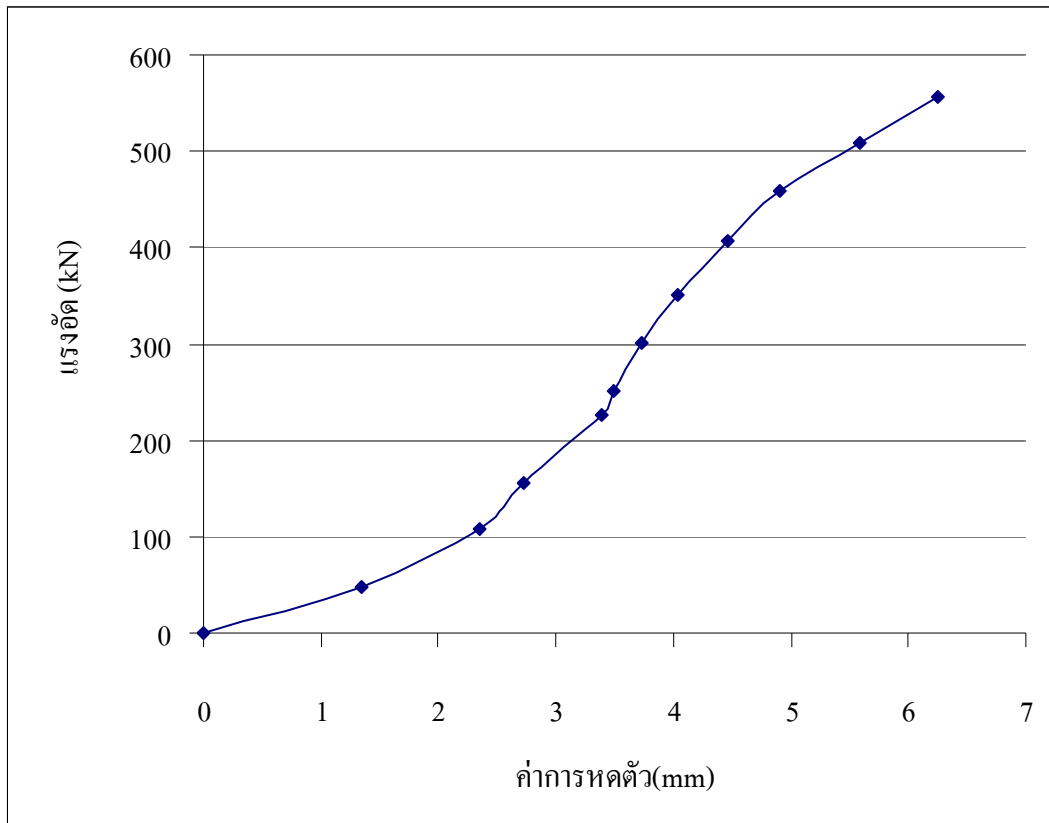
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่ หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
A010	0.75	0.65	0.15	0.098		
A010/1	0.15	0.3	176.625	0.005	440	253.940
A010/2	0.15	0.3	176.625	0.005	450	259.712
A010/3	0.15	0.3	176.625	0.005	450	259.712
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 257.788ksc		

ตารางที่ ข. 1 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 7 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
107	0.000	-2.4	2.351	350	1.691	-2.4	4.042
155	0.374	-2.4	2.725	407	2.111	-2.4	4.462
227	1.038	-2.4	3.389	459	2.559	-2.4	4.910
252	1.140	-2.4	3.491	509	3.229	-2.4	5.580
252	1.140	-2.4	3.491	557	3.906	-2.4	6.257
302	1.383	-2.4	3.734	680	4.775	-2.4	7.126
แรงอัดสูงสุด				69317.0	kg		



รูปที่ ข 7.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C109



รูปที่ ข 7.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C109

## 8 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B208

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.8 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

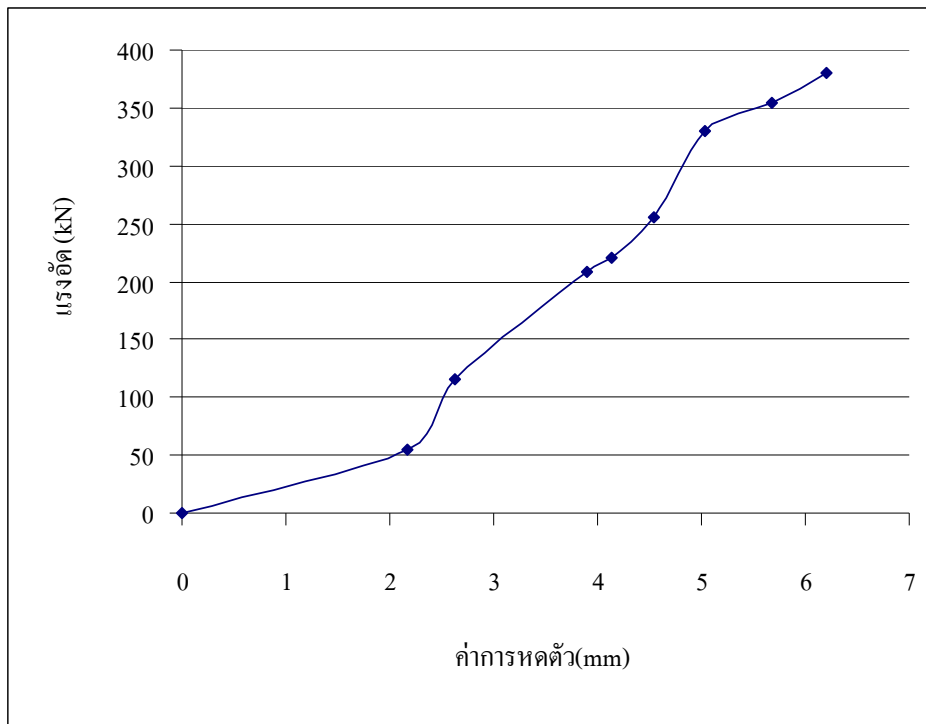
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
B208	0.75	0.65	0.15	0.098		
B208/1	0.15	0.3	176.625	0.005	200	115.427
B208/2	0.15	0.3	176.625	0.005	200	115.427
B208/3	0.15	0.3	176.625	0.005	200	115.427
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 115.428ksc		

ตารางที่ ข. 8 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 8 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลาดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหด ตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหด ตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหด ตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหด ตัว (mm)
0	0.000	0.0	0.000				
55	2.172	0.0	2.172	255	4.541	0.0	4.541
115	2.627	0.0	2.627	330	5.035	0.0	5.035
208	3.899	0.0	3.899	354	5.673	0.0	5.673
221	4.142	0.0	4.142	380	6.200	0.0	6.200
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>38736.0</b>	<b>kg</b>		



รูปที่ ข 8.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B208



รูปที่ ข 8.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B208



## 9 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B209

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 กันยายน 2552

อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.9 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

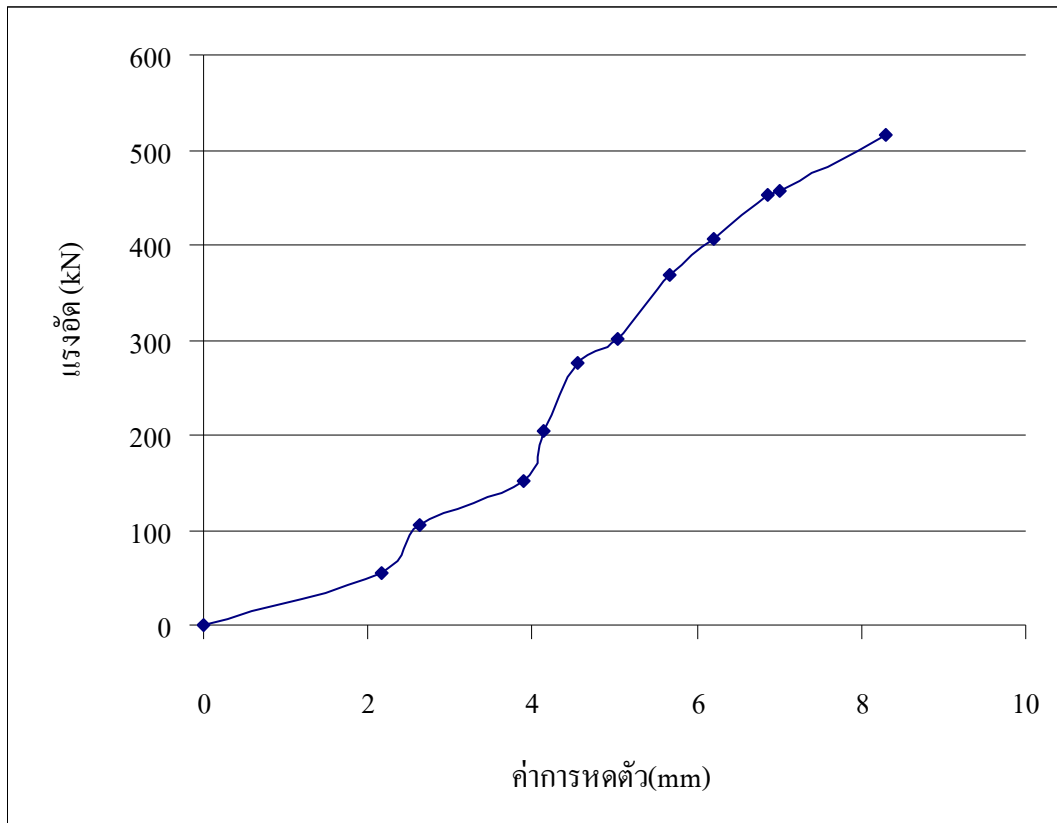
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัดหน้าตัด(cm)	ปริมาตร(m <sup>2</sup> )	แรงกด(kN)	หน่วยแรงอัด(ksc)
B209	0.75	0.65	0.15	0.098		
B209/1	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
B209/2	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
B209/3	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 242.398ksc		

ตารางที่ ข. 9 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

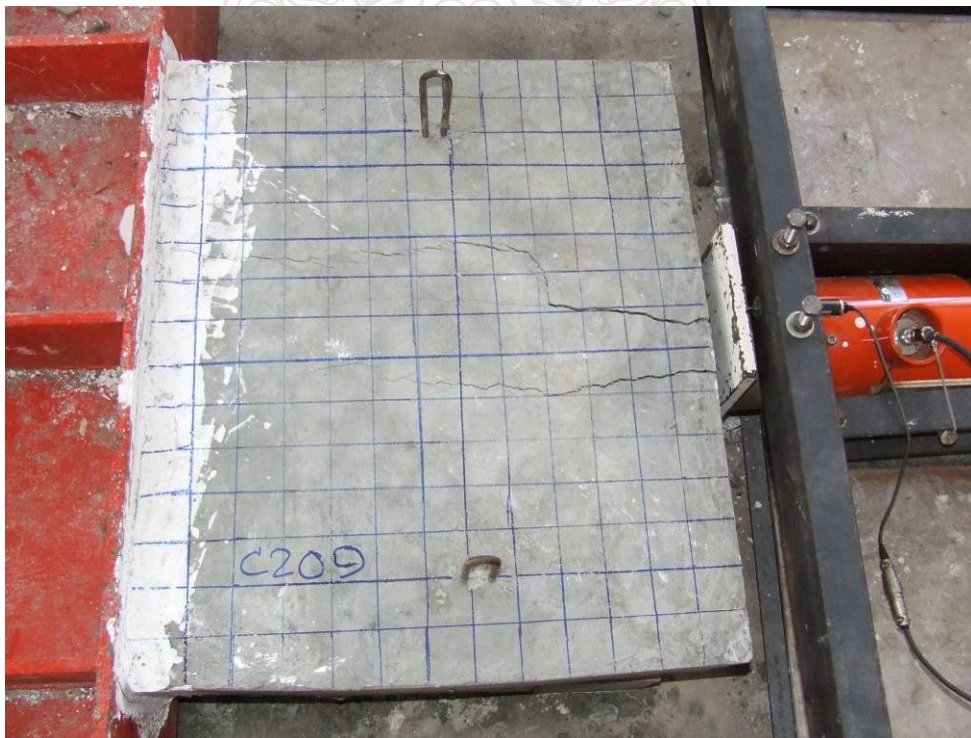
Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 9 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

แรงอัด(kN)	การหดตัว(mm)	ค่าแก้ไข(mm)	การหดตัว(mm)	แรงอัด(kN)	การหดตัว(mm)	ค่าแก้ไข(mm)	การหดตัว(mm)
0	0.000	0.0	0.000	301	5.035	0.0	5.035
54	2.172	0.0	2.172	369	5.673	0.0	5.673
106	2.627	0.0	2.627	407	6.200	0.0	6.200
152	3.899	0.0	3.899	453	6.862	0.0	6.862
205	4.142	0.0	4.142	456	7	0.0	7.000
276	4.541	0.0	4.541	516	8.295	0.0	8.295
301	5.035	0.0	5.035	600	8.941	0.0	8.941
				<b>แรงอัดสูงสุด</b>	<b>61162.1</b>	<b>kg</b>	



รูปที่ ข 9.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B209



รูปที่ ข 9.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B209

## 10 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C209

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 12 กันยายน 2552 วันทดสอบ 27 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 15 วัน

ตารางที่ ข.10 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

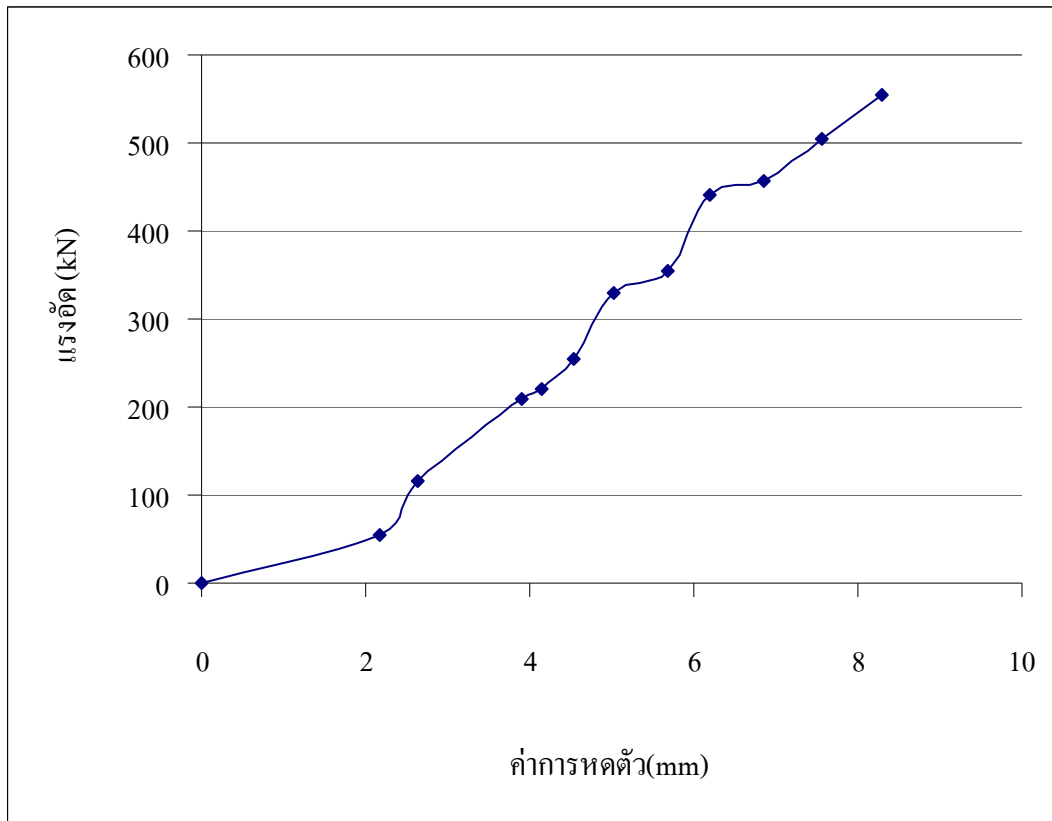
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
C209	0.75	0.65	0.15	0.098		
C209/1	0.15	0.3	176.625	0.005	500	288.568
C209/2	0.15	0.3	176.625	0.005	500	288.568
C209/3	0.15	0.3	176.625	0.005	510	294.340
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114				m <sup>2</sup>	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 290.493ksc	

ตารางที่ ข. 10 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

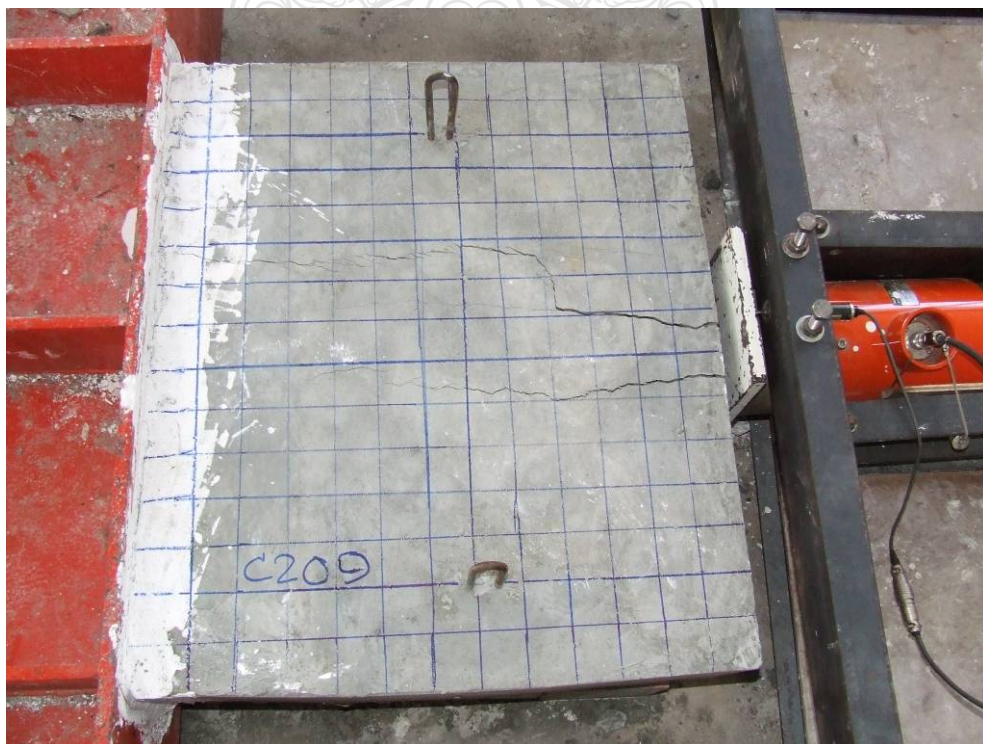
Cement	40	kg	Admixture	350	g
Water	19	kg	W/C	0.475	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	22	cm
Fine Aggregate	99	kg			

ตารางที่ ข. 10 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยืดลาวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
55	2.172	0.0	2.172	354	5.673	0.0	5.673
115	2.627	0.0	2.627	442	6.200	0.0	6.200
208	3.899	0.0	3.899	456	6.862	0.0	6.862
221	4.142	0.0	4.142	504	7.552	0.0	7.552
255	4.541	0.0	4.541	555	8.295	0.0	8.295
330	5.035	0.0	5.035	680	8.941	0.0	8.941
<b>แรงอัดสูงสุด</b>					<b>69317.0 kg</b>		



รูปที่ ข 10.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C209



รูปที่ ข 10.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C209

## 11 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C108

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 11 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 17 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.11 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

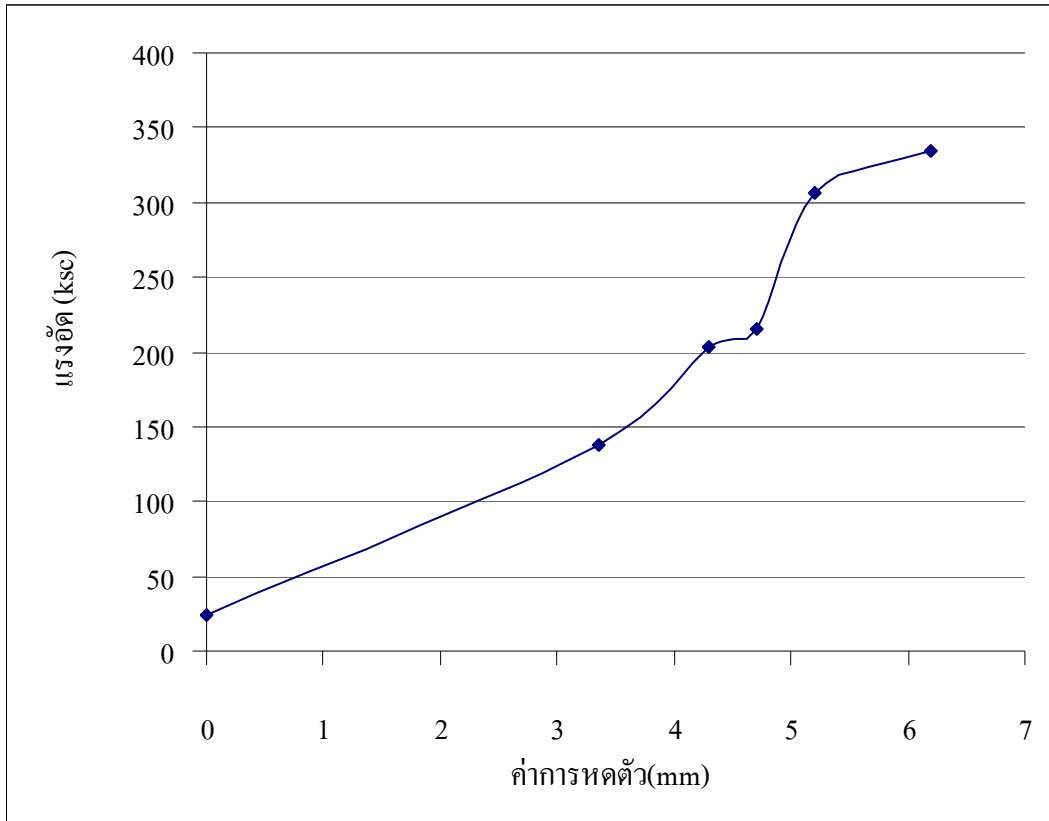
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C108	0.75	0.65	0.15	0.098		
C108/1	0.15	0.3	176.625	0.005	190	109.656
C108/2	0.15	0.3	176.625	0.005	190	109.656
C108/3	0.15	0.3	176.625	0.005	185	106.770
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 108.695ksc		

ตารางที่ ข. 11 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

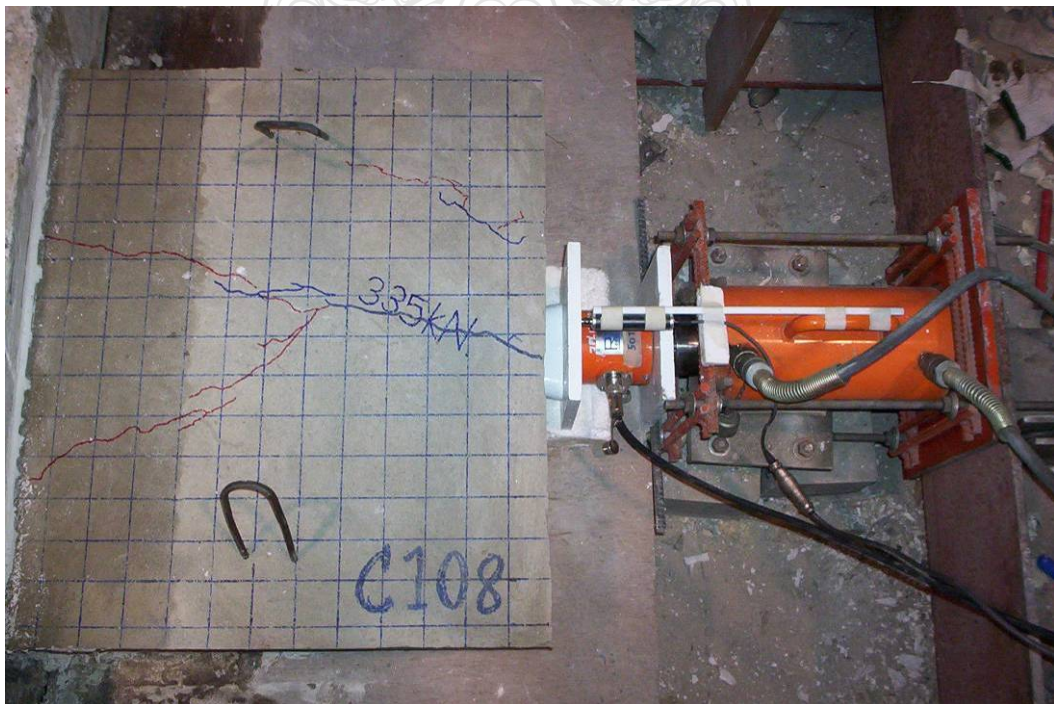
Cement	27	kg	Admixture	170	g
Water	21	kg	W/C	0.778	
Coarse Aggregate	127	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 11 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอชิดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหด ตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหด ตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหด ตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหด ตัว (mm)
24	1.300	1.3	0.000				
138	4.660	1.3	3.360				
204	5.600	1.3	4.300				
216	6.000	1.3	4.700				
307	6.500	1.3	5.200				
335	7.500	1.3	6.200				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>					<b>34148.8 kg</b>		



รูปที่ ข 11.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C108



รูปที่ ข 11.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C108

## 12 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B208

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 11 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 17 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.12 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

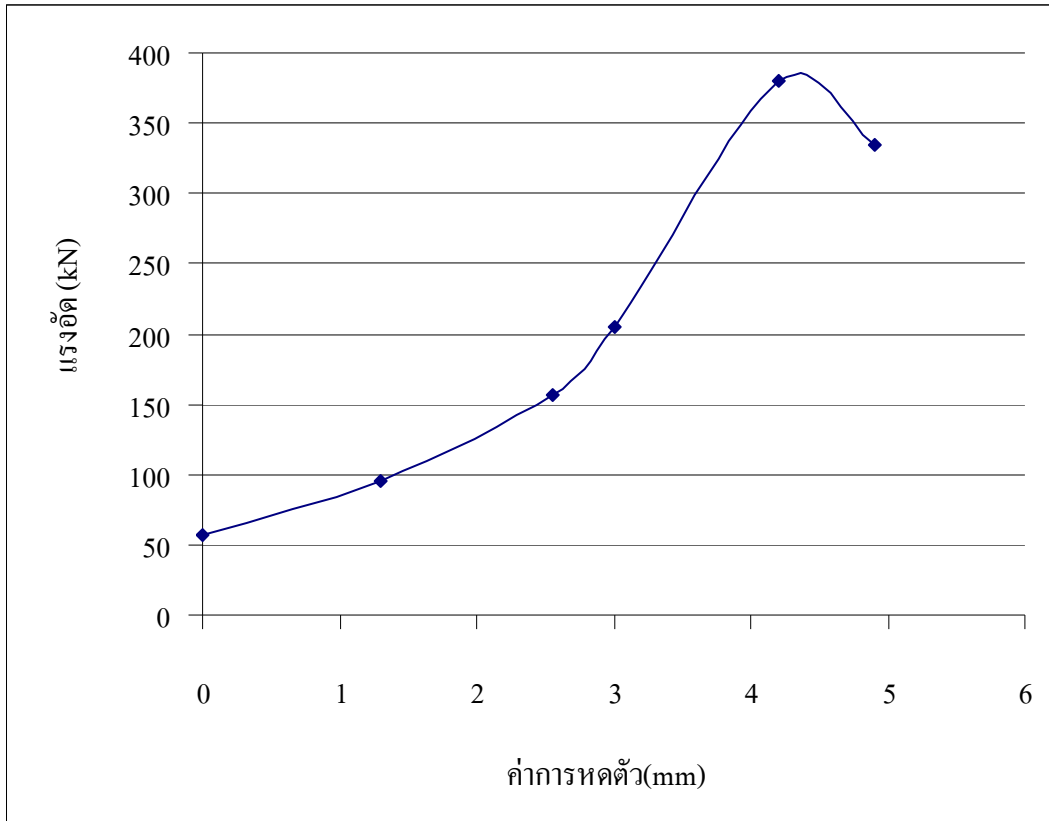
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B208	0.75	0.65	0.15	0.098		
B208/1	0.15	0.3	176.625	0.005	190	109.656
B208/2	0.15	0.3	176.625	0.005	190	109.656
B208/3	0.15	0.3	176.625	0.005	185	106.770
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 108.695ksc		

ตารางที่ ข. 12 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

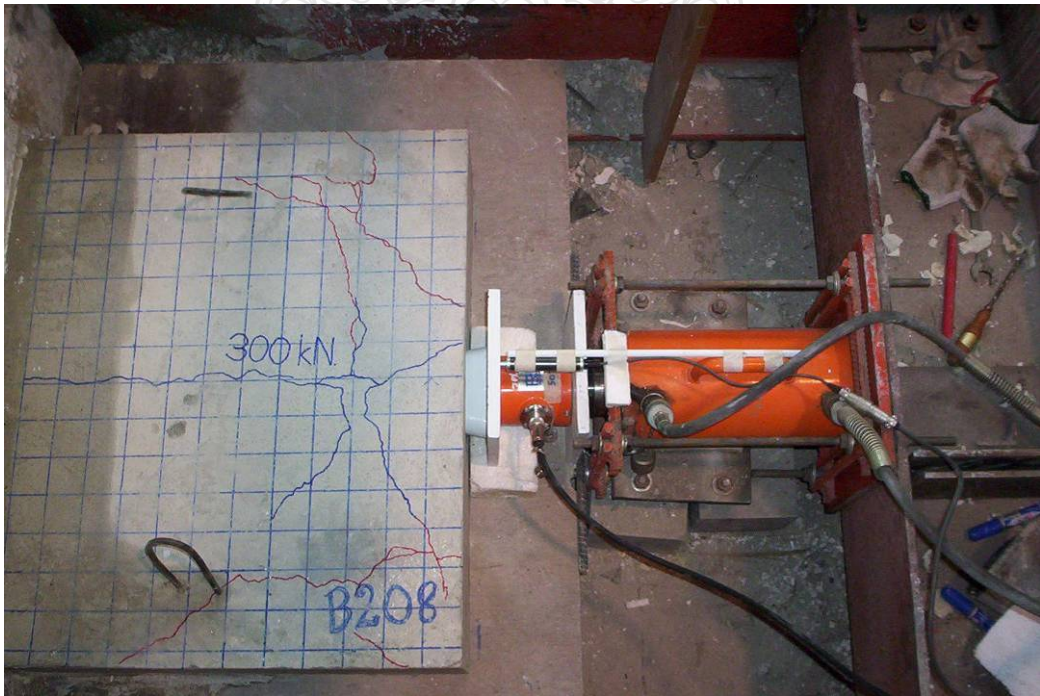
Cement	27	kg	Admixture	170	g
Water	21	kg	W/C	0.778	
Coarse Aggregate	127	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 12 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
57	5.600	5.6	0.000				
96	6.900	5.6	1.300				
156	8.150	5.6	2.550				
205	8.600	5.6	3.000				
380	9.800	5.6	4.200				
335	10.500	5.6	4.900				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>34148.8 kg</b>			



รูปที่ ข 12.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B208



รูปที่ ข 12.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B208



### 13 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B108

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 11 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 17 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.13 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

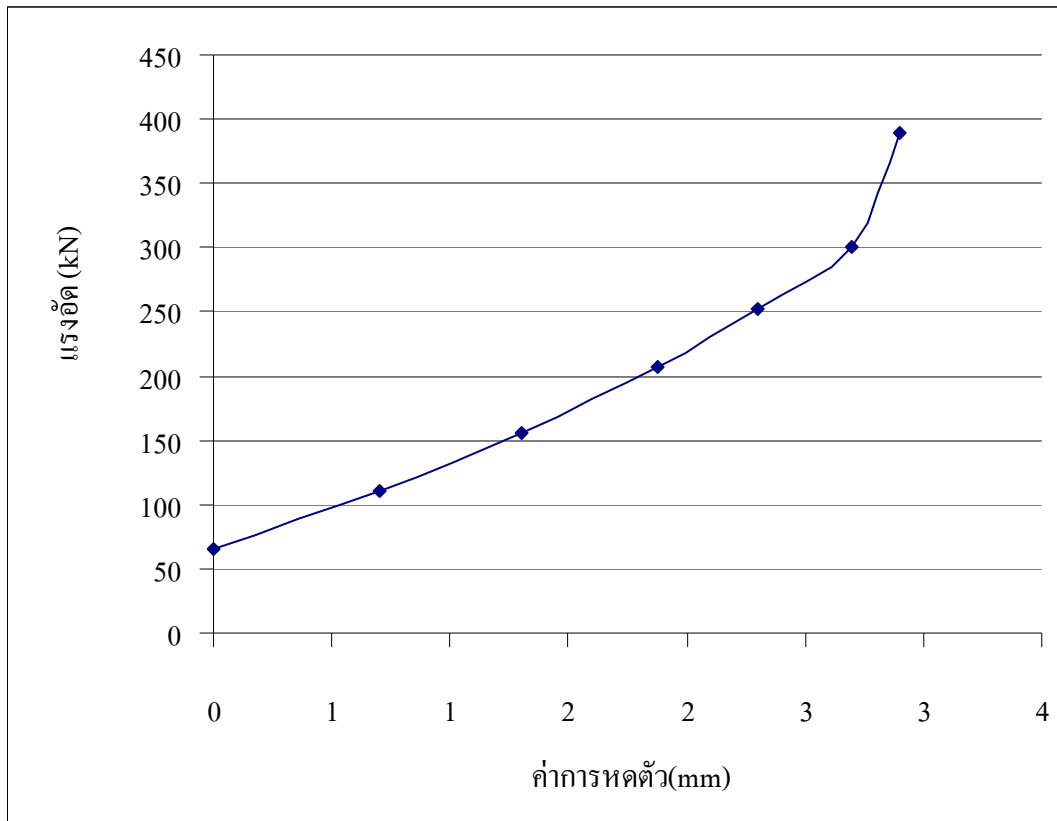
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
B108	0.75	0.65	0.15	0.098		
B108/1	0.15	0.3	176.625	0.005	215	124.084
B108/2	0.15	0.3	176.625	0.005	225	129.856
B108/3	0.15	0.3	176.625	0.005	205	118.313
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 124.085ksc		

ตารางที่ ข. 13 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

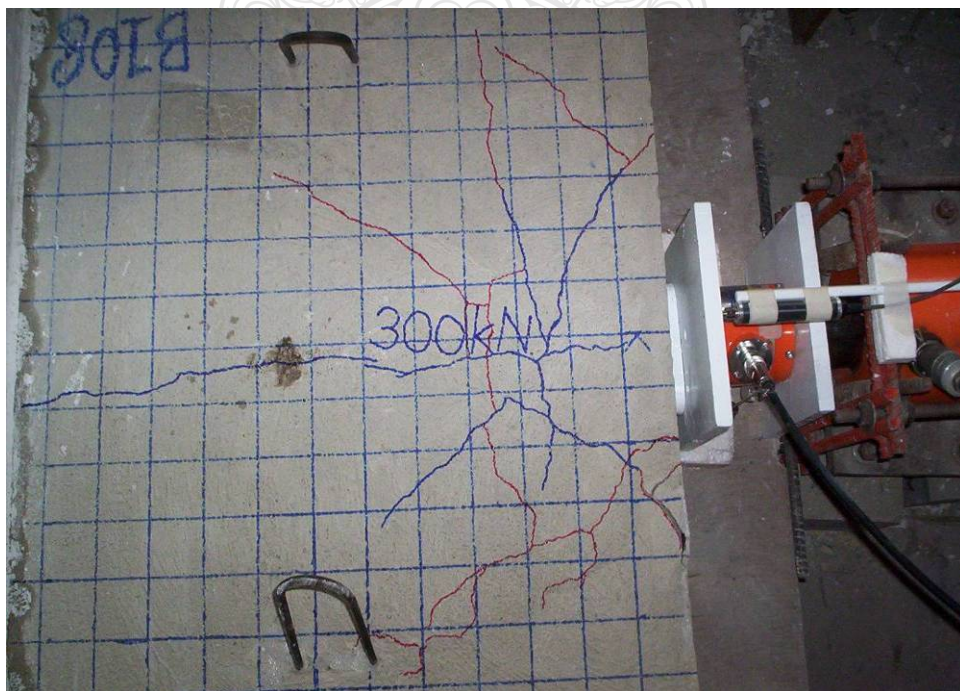
Cement	27	kg	Admixture	170	g
Water	21	kg	W/C	0.778	
Coarse Aggregate	127	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 13 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
66	5.600	5.6	0.000	390	8.500	5.6	2.900
111	6.300	5.6	0.700				
155	6.900	5.6	1.300				
207	7.479	5.6	1.879				
252	7.900	5.6	2.300				
300	8.300	5.6	2.700				
แรงอัดสูงสุด				39755.4 kg			



รูปที่ ข 13.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B108



รูปที่ ข 13.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B108

## 14 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A008

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 11 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 17 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.14 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

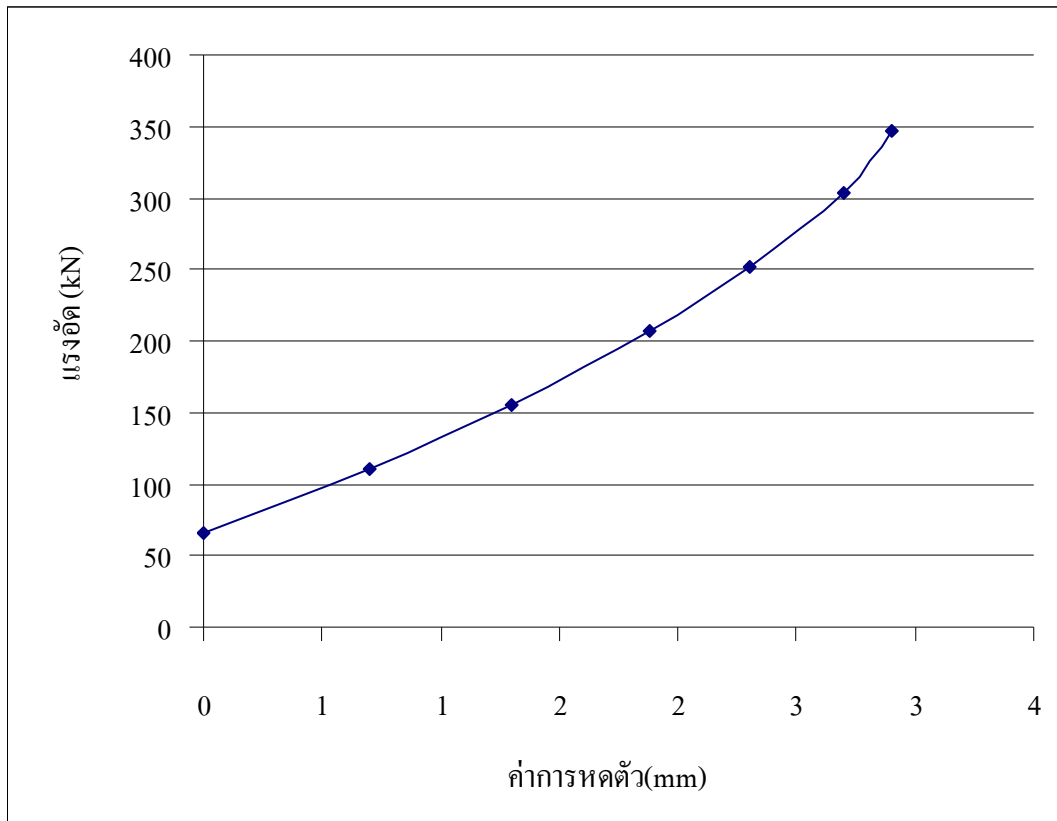
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
A008	0.75	0.65	0.15	0.098		
A008/1	0.15	0.3	176.625	0.005	230	132.741
A008/2	0.15	0.3	176.625	0.005	230	132.741
A008/3	0.15	0.3	176.625	0.005	240	138.513
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 134.666ksc		

ตารางที่ ข. 14 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

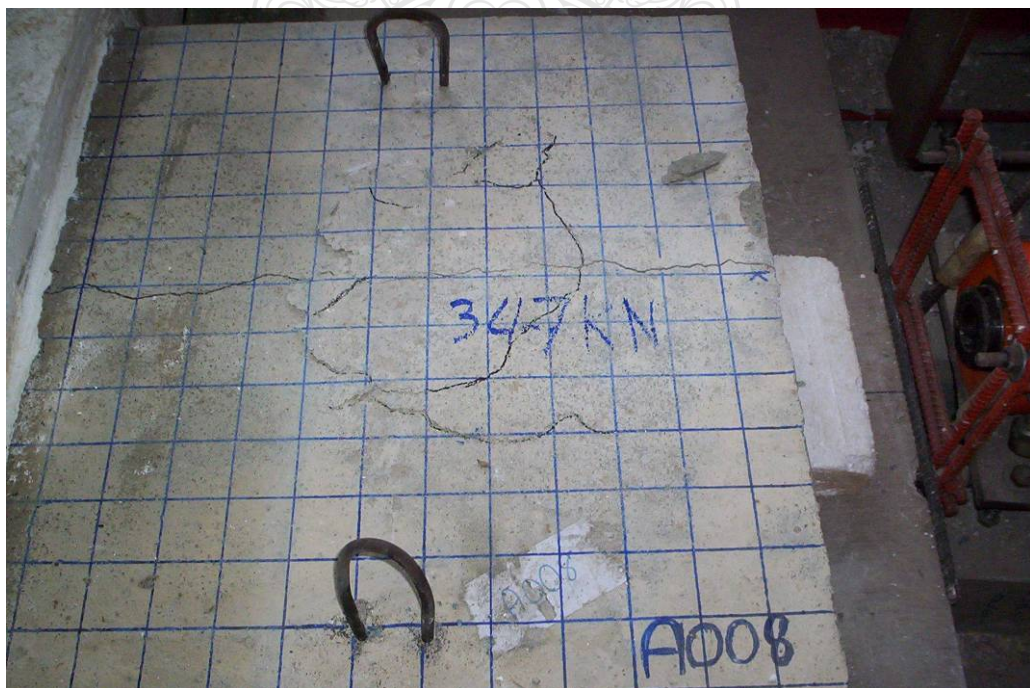
Cement	27	kg	Admixture	170	g
Water	21	kg	W/C	0.778	
Coarse Aggregate	127	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 14 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอชิดลาดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
66	5.600	5.6	0.000				
111	6.300	5.6	0.700				
155	6.900	5.6	1.300				
207	7.479	5.6	1.879				
252	7.900	5.6	2.300				
304	8.300	5.6	2.700				
347	8.500	5.6	2.900				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>35372.1 kg</b>			



รูปที่ ข 14.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A008



รูปที่ ข 14.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A008

### 15 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C208

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 11 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 17 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.15 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

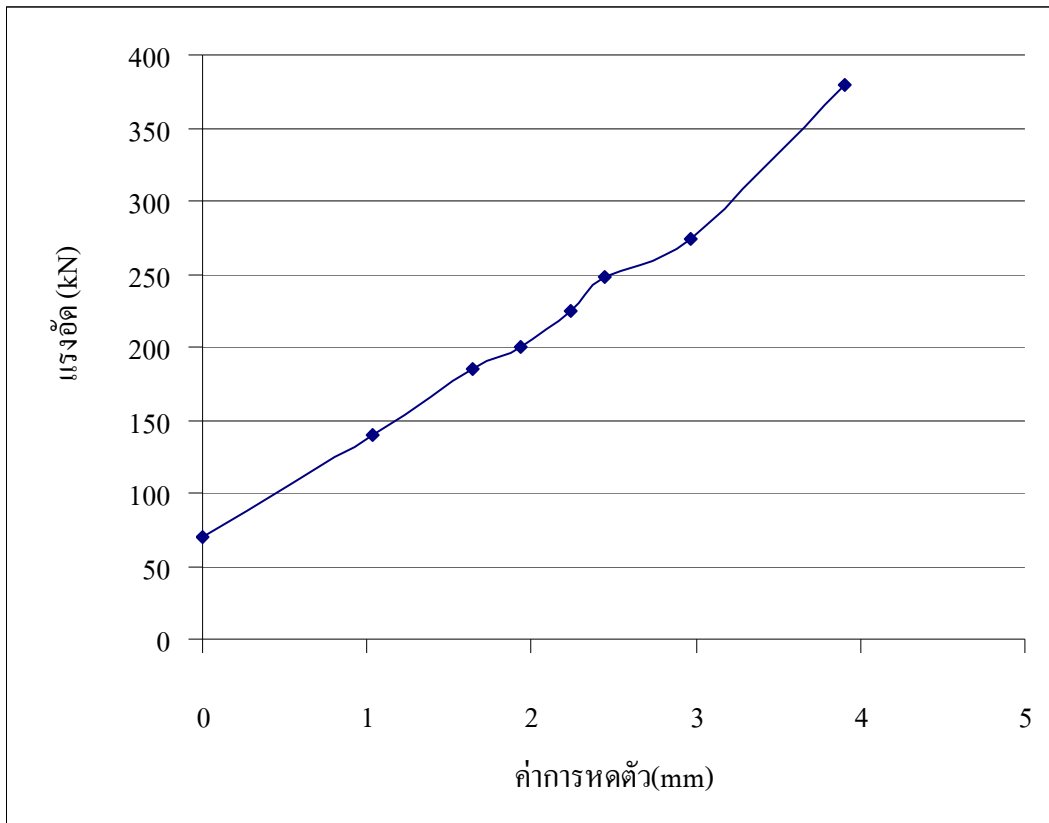
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
C208	0.75	0.65	0.15	0.098		
C208/1	0.15	0.3	176.625	0.005	215	124.084
C208/2	0.15	0.3	176.625	0.005	205	118.313
C208/3	0.15	0.3	176.625	0.005	210	121.199
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 121.199ksc		

ตารางที่ ข. 15 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

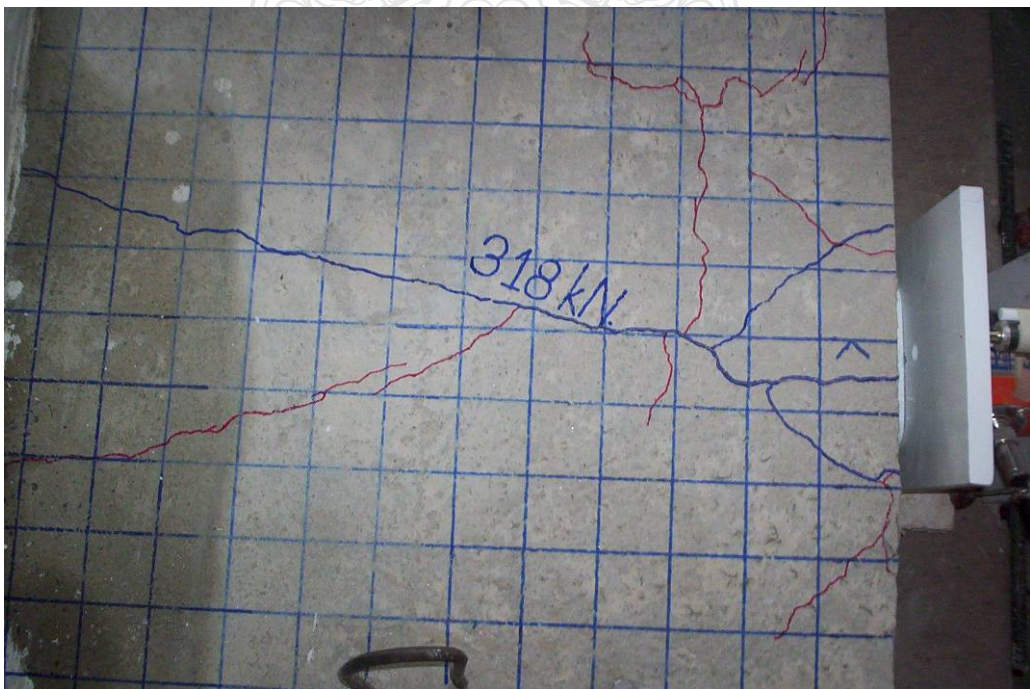
Cement	27	kg	Admixture	170	g
Water	21	kg	W/C	0.778	
Coarse Aggregate	127	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 15 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
70	1.760	1.76	0.000	380	5.660	1.76	3.900
140	2.800	1.76	1.040				
185	3.400	1.76	1.640				
200	3.700	1.76	1.940				
225	4.000	1.76	2.240				
248	4.200	1.76	2.440				
274	4.734	1.76	2.974				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>					<b>38736.0 kg</b>		



รูปที่ ข 15.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C208



รูปที่ ข 15.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C208

## 16 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C105

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.16 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

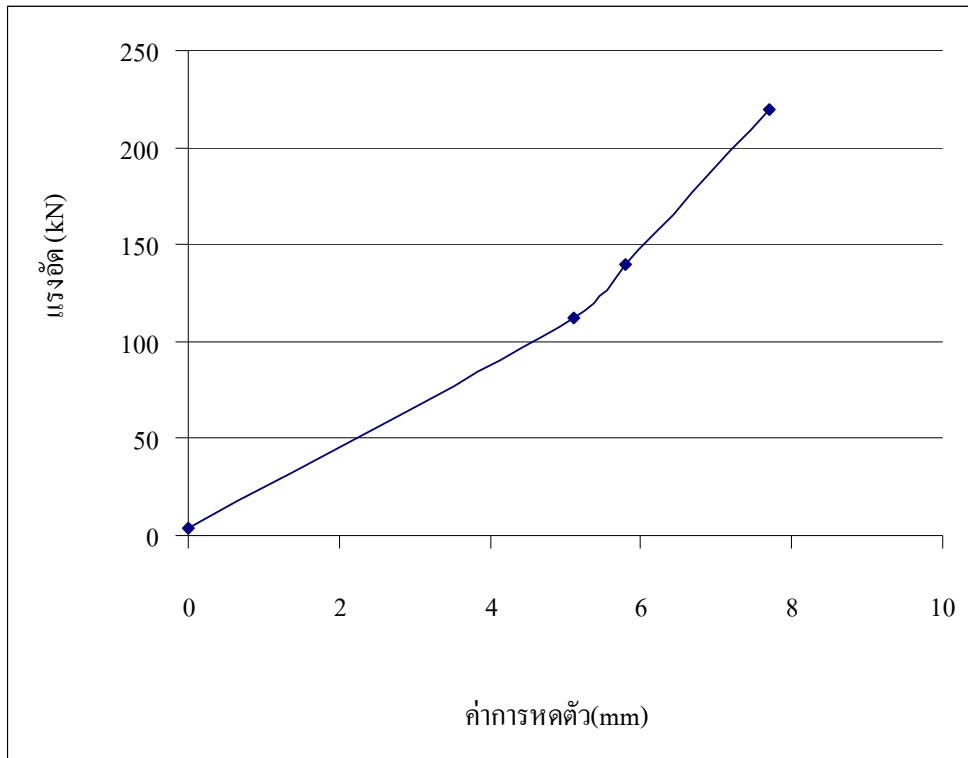
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C105	0.75	0.65	0.15	0.098		
C105/1	0.15	0.3	176.625	0.005	115	66.371
C105/2	0.15	0.3	176.625	0.005	115	66.371
C105/3	0.15	0.3	176.625	0.005	115	66.371
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 66.371ksc		

ตารางที่ ข. 16 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 16 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยืดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
4	-10.000	-10.00	0.000				
112	-4.900	-10.00	5.100				
140	-4.200	-10.00	5.800				
220	-2.300	-10.00	7.700				
แรงอัดสูงสุด				22426.1 kg			



รูปที่ ข 16.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C105



รูปที่ ข 16.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C105



## 17 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A007

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.17 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

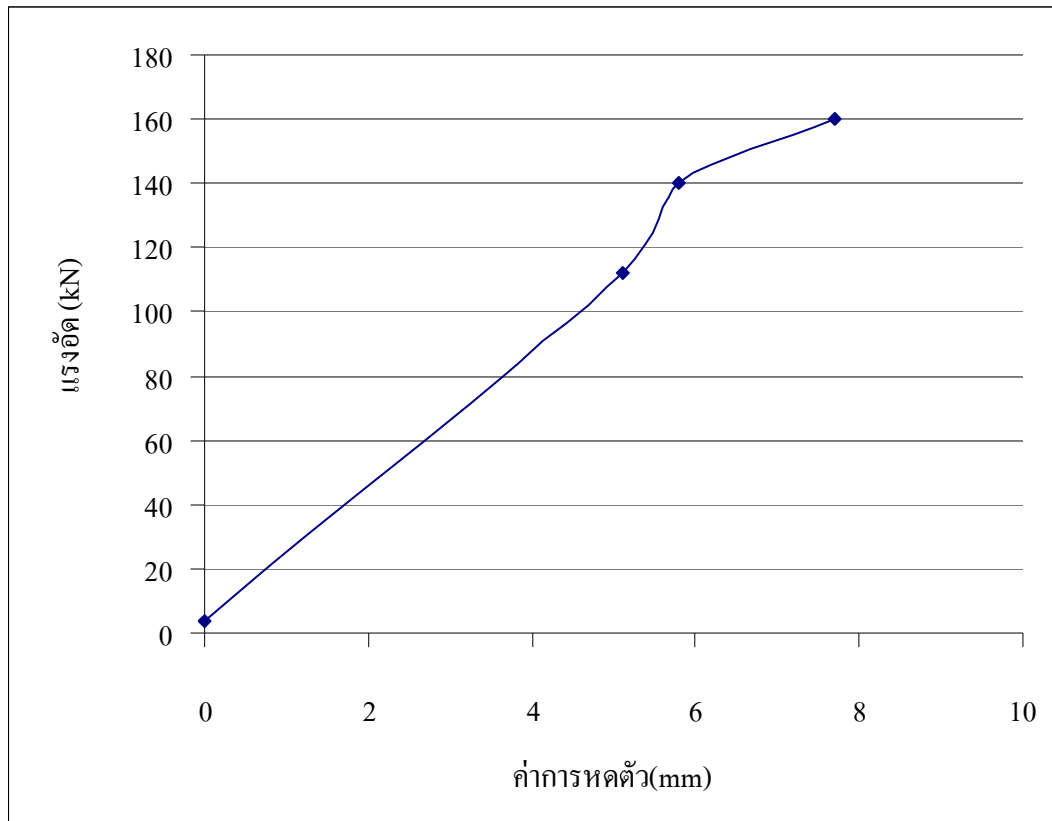
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
A007	0.75	0.65	0.15	0.098		
A007/1	0.15	0.3	176.625	0.005	120	69.256
A007/2	0.15	0.3	176.625	0.005	110	63.485
A007/3	0.15	0.3	176.625	0.005	115	66.371
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 66.371ksc		

ตารางที่ ข. 17 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

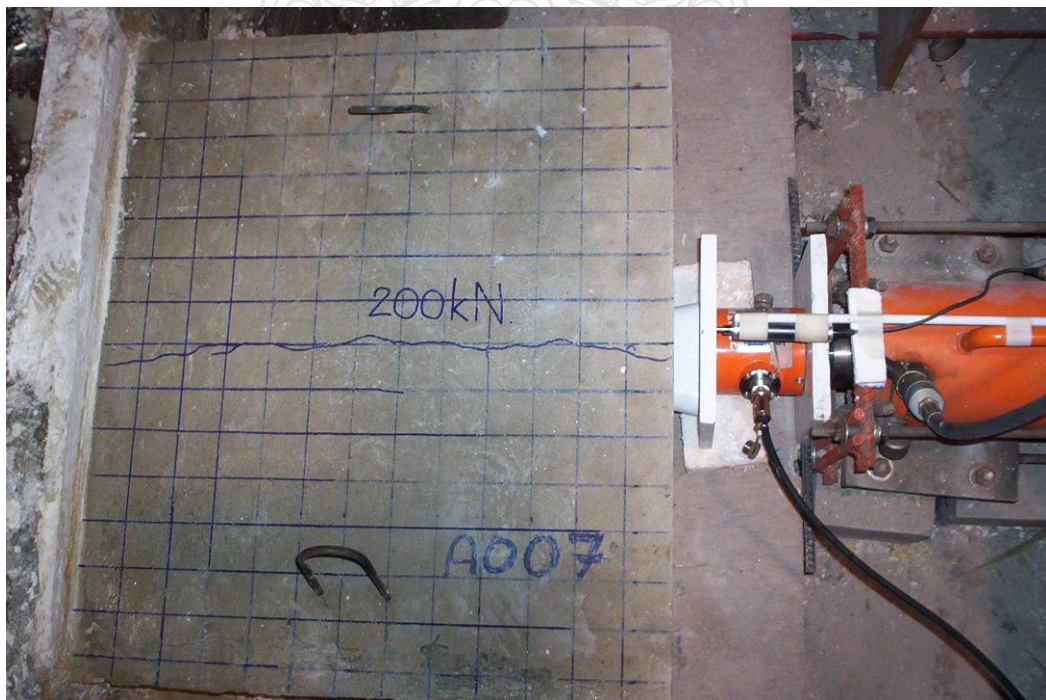
Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 17 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
4	-10.000	-10.00	0.000				
112	-4.900	-10.00	5.100				
140	-4.200	-10.00	5.800				
160	-2.300	-10.00	7.700				
200	-2.000	-10.00	8.000				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>20387.4 kg</b>			



รูปที่ ข 17.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A007



รูปที่ ข 17.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A007

## 18 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C106

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.18 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

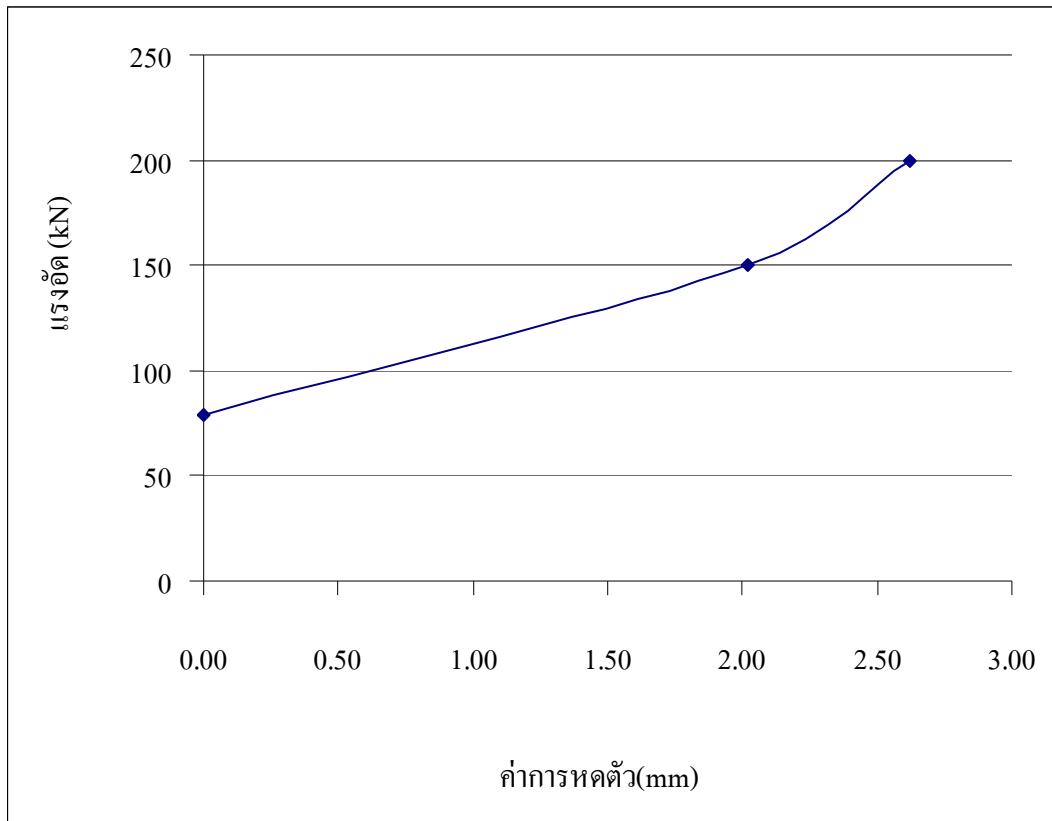
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C106	0.75	0.65	0.15	0.098		
C106/1	0.15	0.3	176.625	0.005	85	49.057
C106/2	0.15	0.3	176.625	0.005	85	49.057
C106/3	0.15	0.3	176.625	0.005	85	49.057
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 49.057ksc		

ตารางที่ ข. 18 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

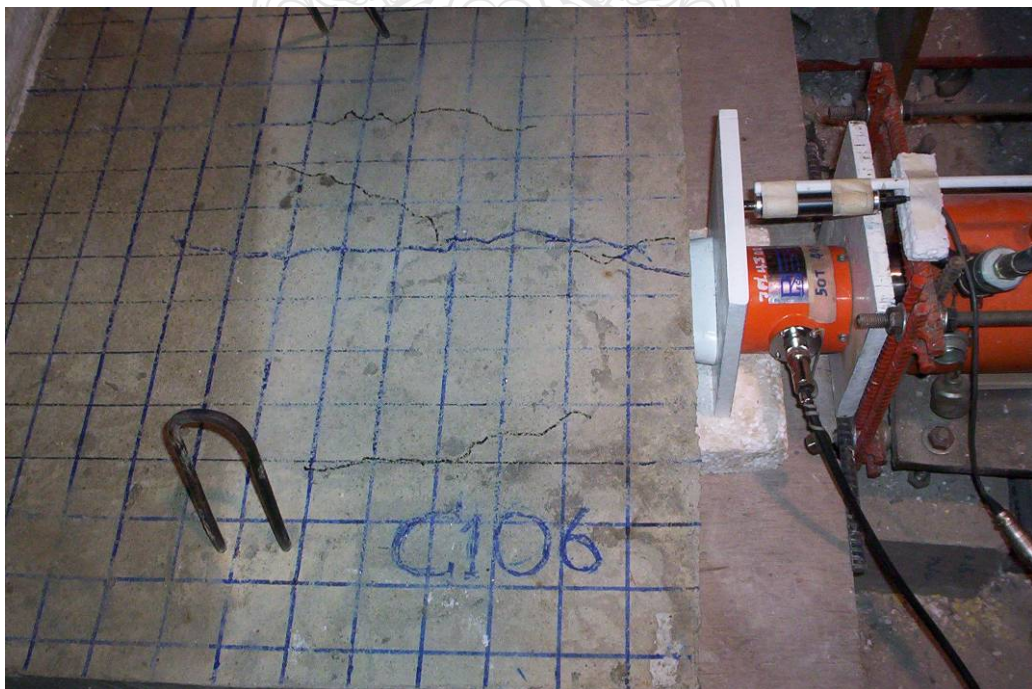
Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 18 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
79	8.13	8.130	0.000				
150	10.153	8.130	2.023				
200	10.748	8.130	2.618				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>20387.4 kg</b>			



รูปที่ ข 18.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C106



รูปที่ ข 18.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C106

## 19 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C107

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.19 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

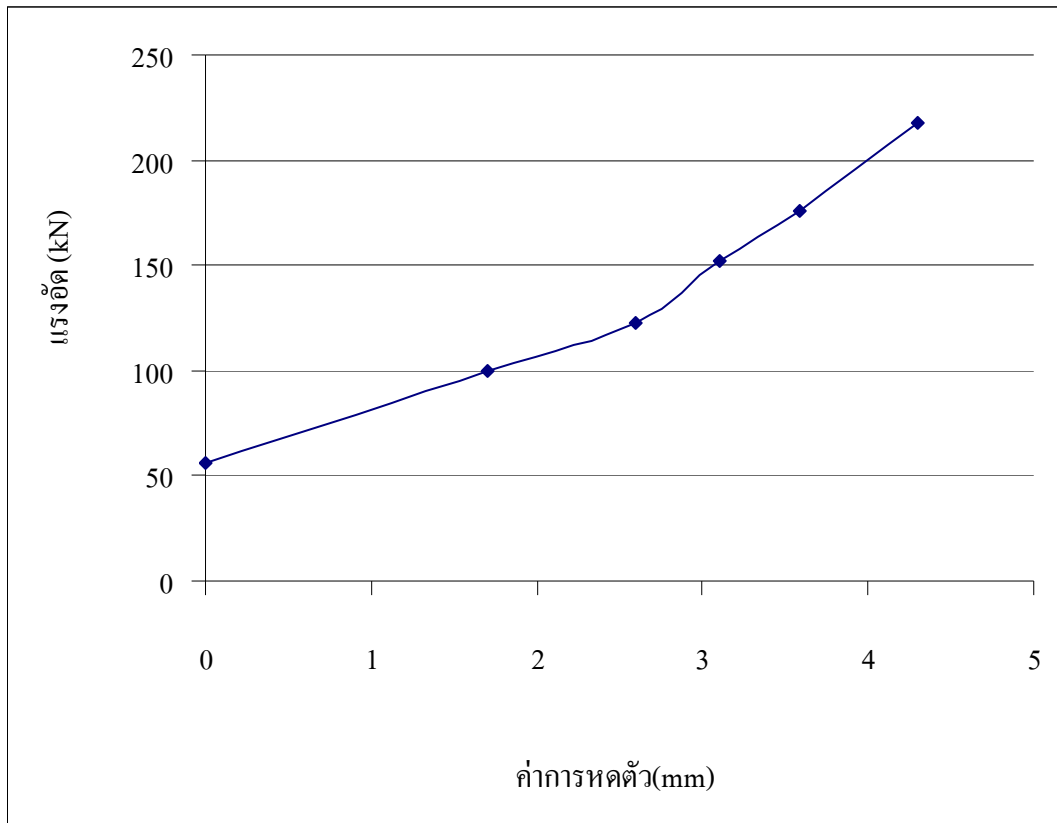
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C107	0.75	0.65	0.15	0.098		
C107/1	0.15	0.3	176.625	0.005	95	54.828
C107/2	0.15	0.3	176.625	0.005	85	49.057
C107/3	0.15	0.3	176.625	0.005	85	49.057
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 50.981ksc		

ตารางที่ ข. 19 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	23.5	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 19 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
56	5.600	5.600	0.000				
100	7.300	5.600	1.700				
123	8.200	5.600	2.600				
152	8.700	5.600	3.100				
176	9.190	5.600	3.590				
218	9.896	5.600	4.296				
แรงอัดสูงสุด				22222.2 kg			



รูปที่ ข 19.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C107



รูปที่ ข 19.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C107

## 20 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A006

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.20 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

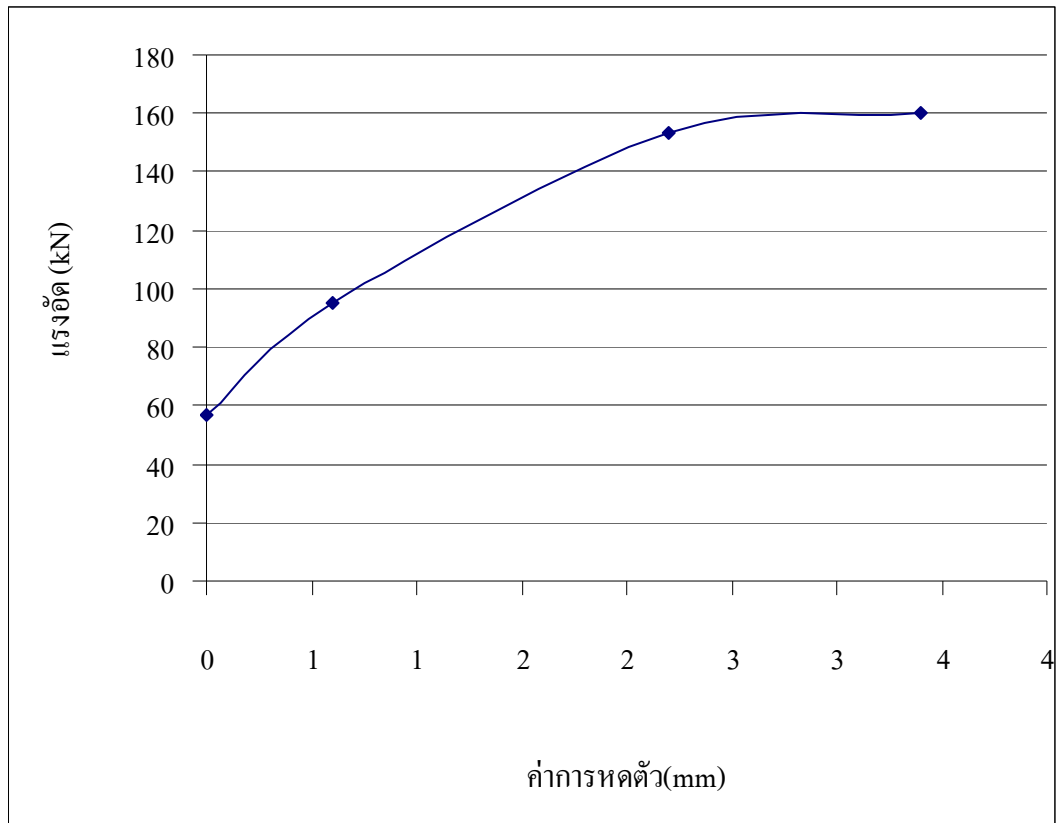
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
A006	0.75	0.65	0.15	0.098		
A006/1	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
A006/2	0.15	0.3	176.625	0.005	95	54.828
A006/3	0.15	0.3	176.625	0.005	95	54.828
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 53.867ksc		

ตารางที่ ข. 20 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 20 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
57	1.900	1.90	0.000				
95	2.500	1.90	0.600				
153	4.100	1.90	2.200				
160	5.300	1.90	3.400				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>16309.9 kg</b>			



รูปที่ ข 20.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A006



รูปที่ ข 20.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A006



## 21 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C205

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552

อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.21 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

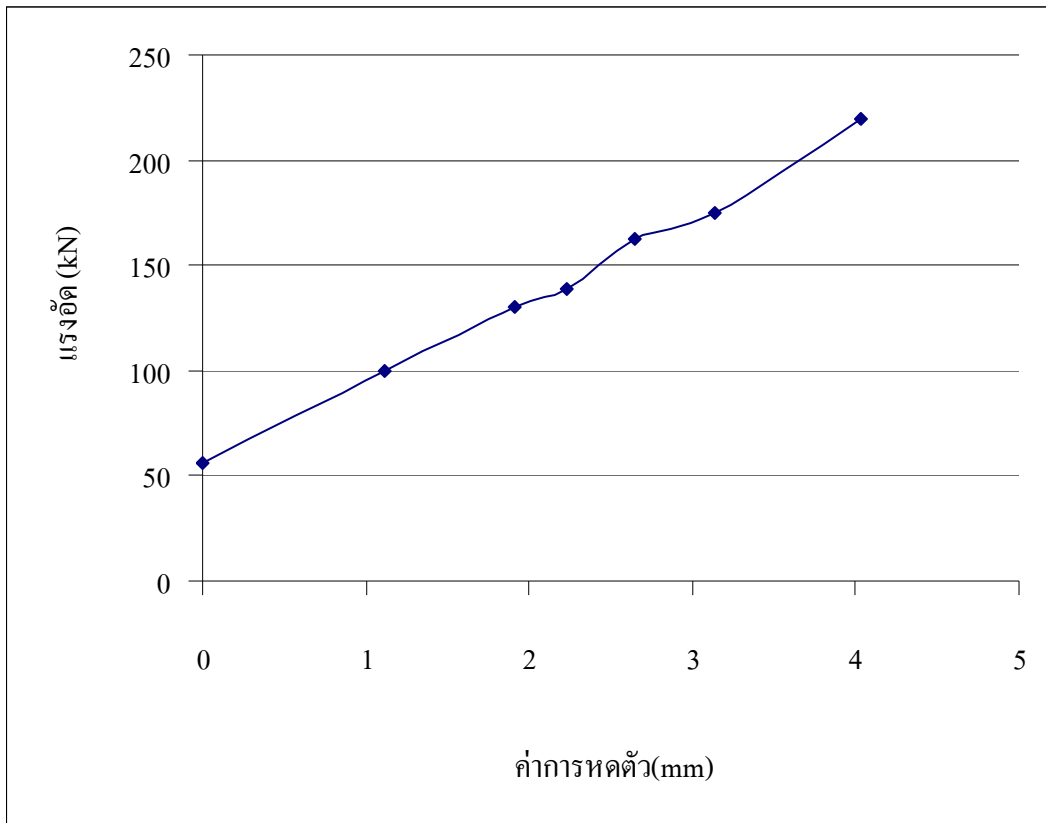
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C205	0.75	0.65	0.15	0.098		
C205/1	0.15	0.3	176.625	0.005	120	69.256
C205/2	0.15	0.3	176.625	0.005	110	63.485
C205/3	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 63.486ksc		

ตารางที่ ข. 21 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 21 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอชิดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
56	0.081	0.08	0.000				
100	1.196	0.08	1.115				
130	1.993	0.08	1.912				
139	2.308	0.08	2.227				
163	2.725	0.08	2.644				
175	3.216	0.08	3.135				
220	4.107	0.08	4.026				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>					<b>22426.1 kg</b>		



รูปที่ ข 21.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C205



รูปที่ ข 21.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C205

## 22 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C207

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

### ตารางที่ ข.22 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

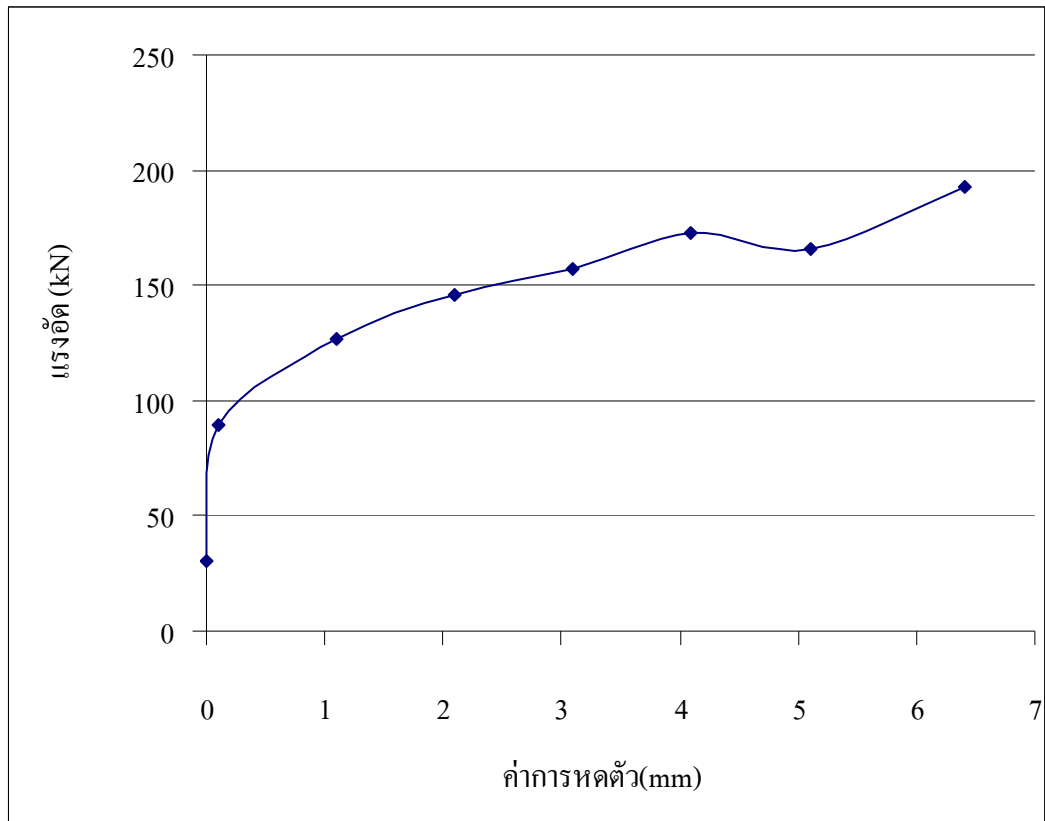
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง(cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C207	0.75	0.65	0.15	0.098		
C207/1	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
C207/2	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
C207/3	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 51.943ksc		

### ตารางที่ ข. 22 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

### ตารางที่ ข. 22 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
30	3.900	3.90	0.000	193	10.300	3.90	6.400
89	4.000	3.90	0.100				
127	5.000	3.90	1.100				
146	6.000	3.90	2.100				
157	7.000	3.90	3.100				
173	8.000	3.90	4.100				
166	9.000	3.90	5.100				
แรงอัดสูงสุด					19673.8 kg		



รูปที่ ข 22.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C207



รูปที่ ข 22.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C207

## 23 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C206

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 9 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 16 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.23 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

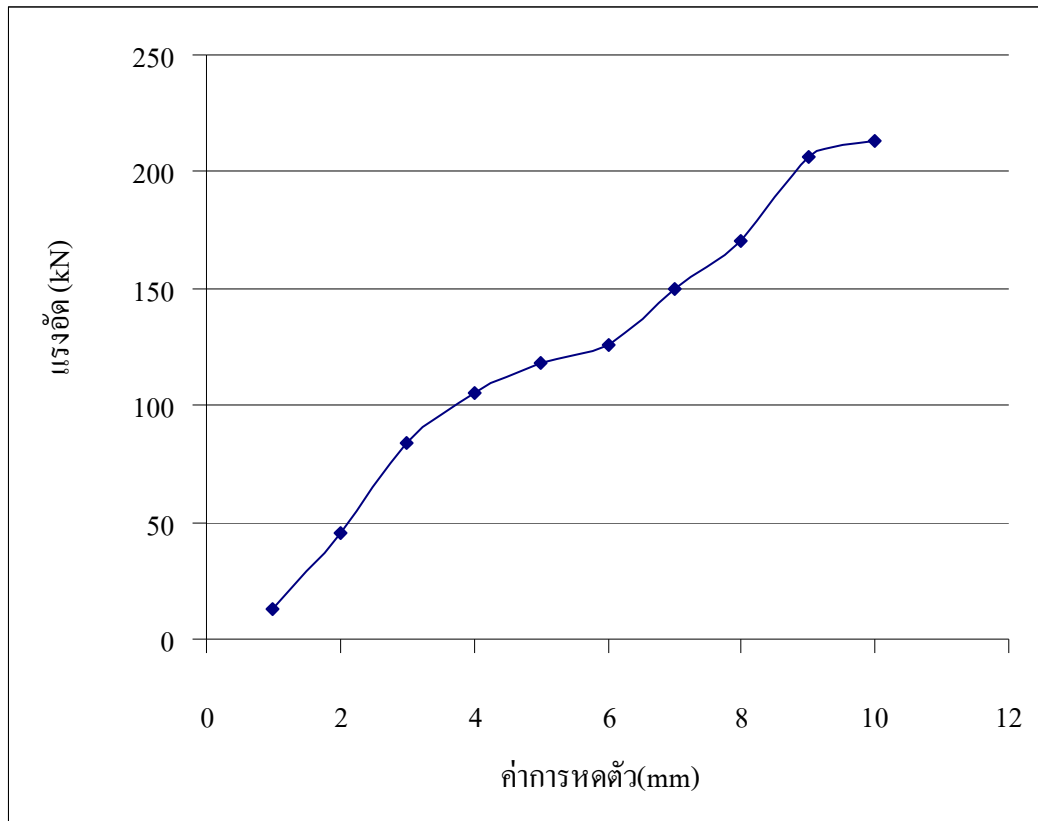
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
C206	0.75	0.65	0.15	0.098		
C206/1	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
C206/2	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
C206/3	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 57.714ksc		

ตารางที่ ข. 23 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	17	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 23 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
13	2.600	2.60	0.000	170	6.200	2.60	3.600
45	3.600	2.60	1.000	206	6.800	2.60	4.200
84	4.710	2.60	2.110	213	7.2	2.60	4.600
105	5.110	2.60	2.510				
118	5.300	2.60	2.700				
126	5.600	2.60	3.000				
150	5.900	2.60	3.300				
แรงอัดสูงสุด					21712.5 kg		



รูปที่ ข 23.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C206



รูปที่ ข 23.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C206

## 24 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A005

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 2 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 8 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.24 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

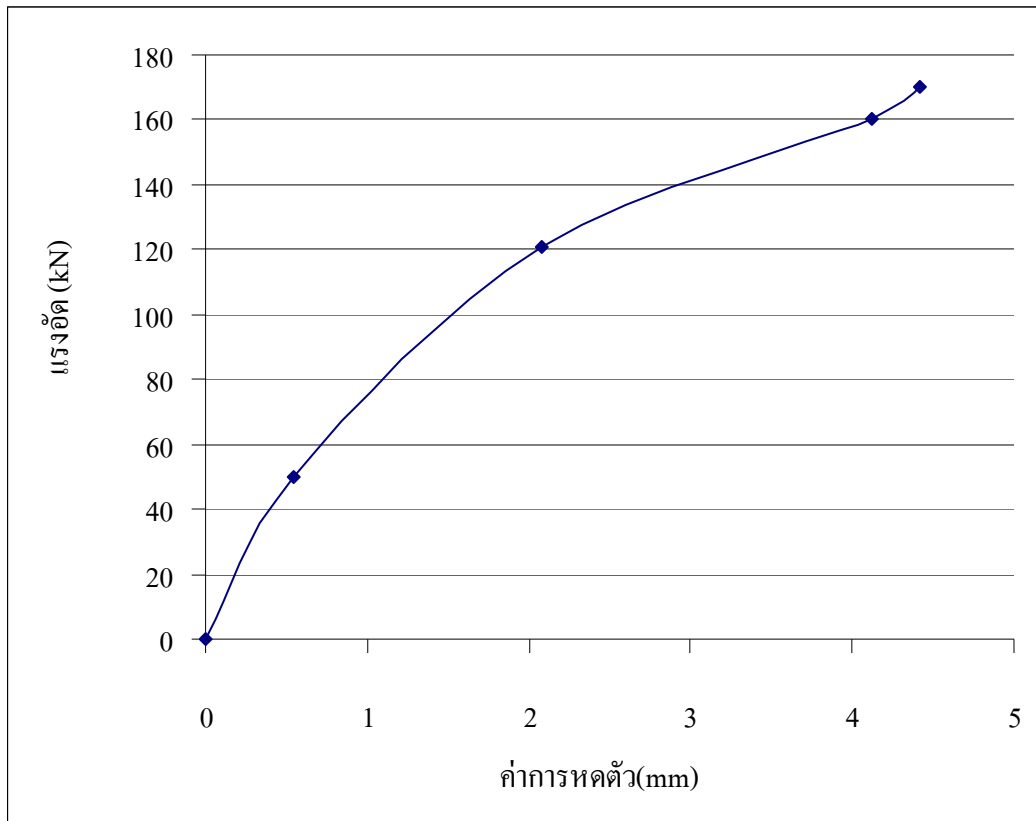
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
A005	0.75	0.65	0.15	0.098		
A005/1	0.15	0.3	176.625	0.005	95	54.828
A005/2	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
A005/3	0.15	0.3	176.625	0.005	95	54.828
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 53.867ksc		

ตารางที่ ข. 24 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

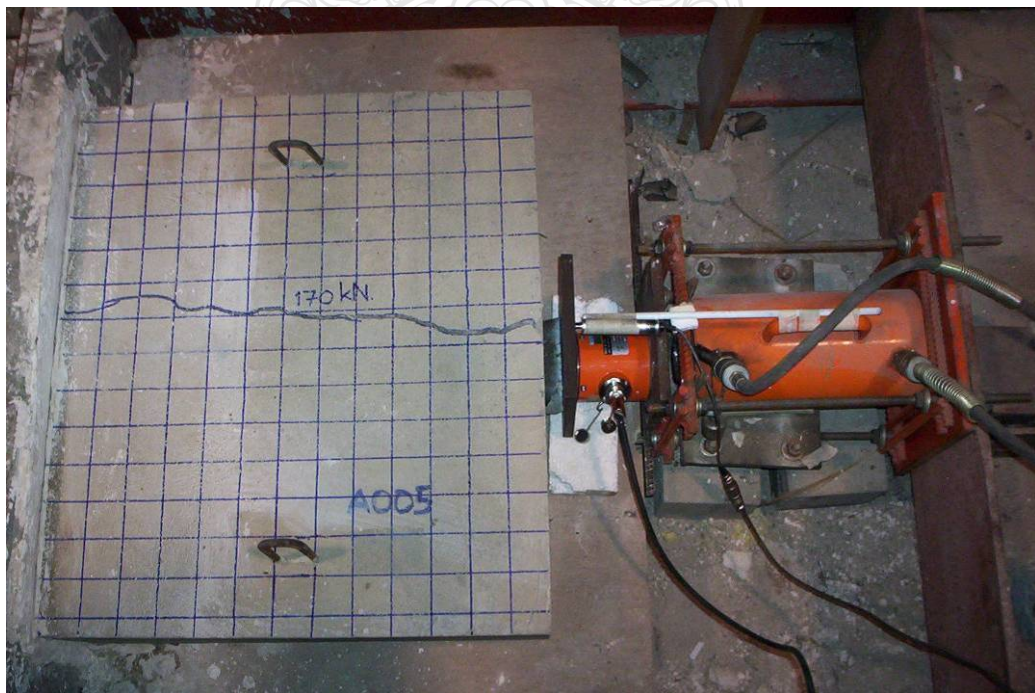
Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	23	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 24 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
0	-1.617	-1.62	0.000				
50	-1.067	-1.62	0.550				
121	0.460	-1.62	2.077				
160	2.500	-1.62	4.117				
170	2.800	-1.62	4.417				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>17329.3 kg</b>			



รูปที่ ข 24.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A005



รูปที่ ข 24.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A005



## 25 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B105

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 3 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 9 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.25 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

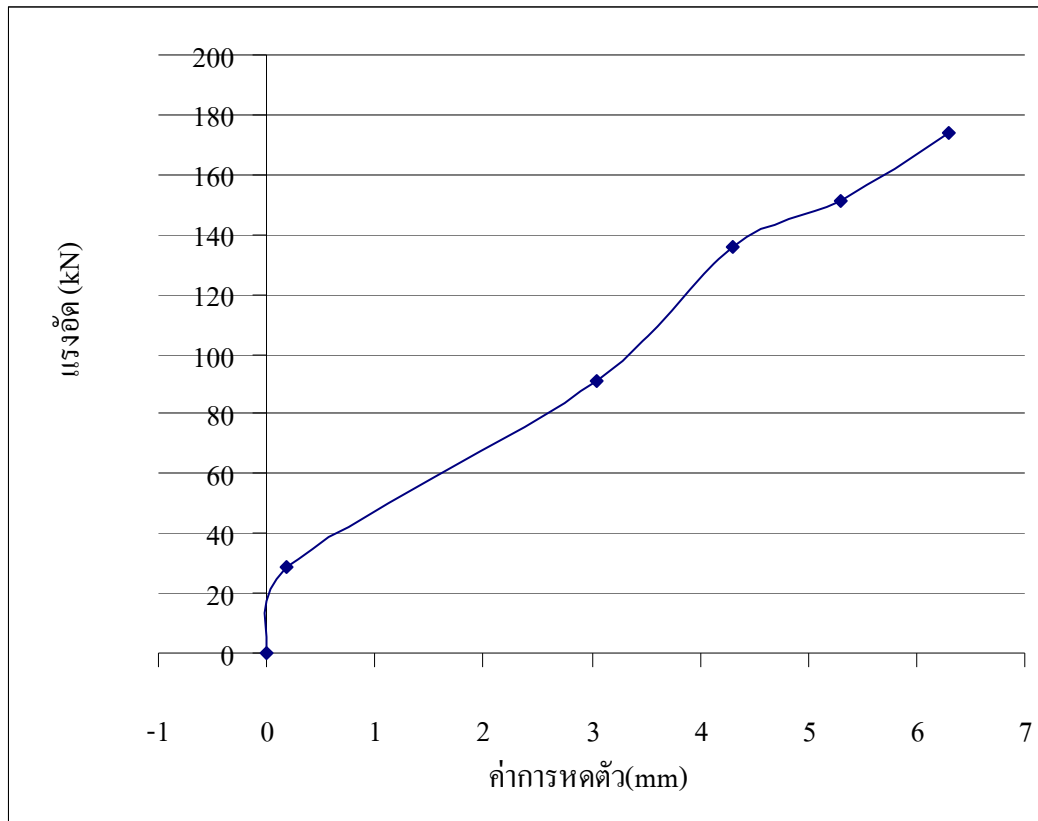
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B105	0.75	0.65	0.15	0.098		
B105/1	0.15	0.3	176.625	0.005	70	40.400
B105/2	0.15	0.3	176.625	0.005	70	40.400
B105/3	0.15	0.3	176.625	0.005	70	40.400
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 40.4ksc		

ตารางที่ ข. 25 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	20	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 25 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
29	0.180	0.00	0.180				
91	3.040	0.00	3.040				
136	4.300	0.00	4.300				
151	5.300	0.00	5.300				
174	6.300	0.00	6.300				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>17737.0 kg</b>			



รูปที่ ข 25.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B105



รูปที่ ข 25.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B105

## 26 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B109

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 3 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 9 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.26 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

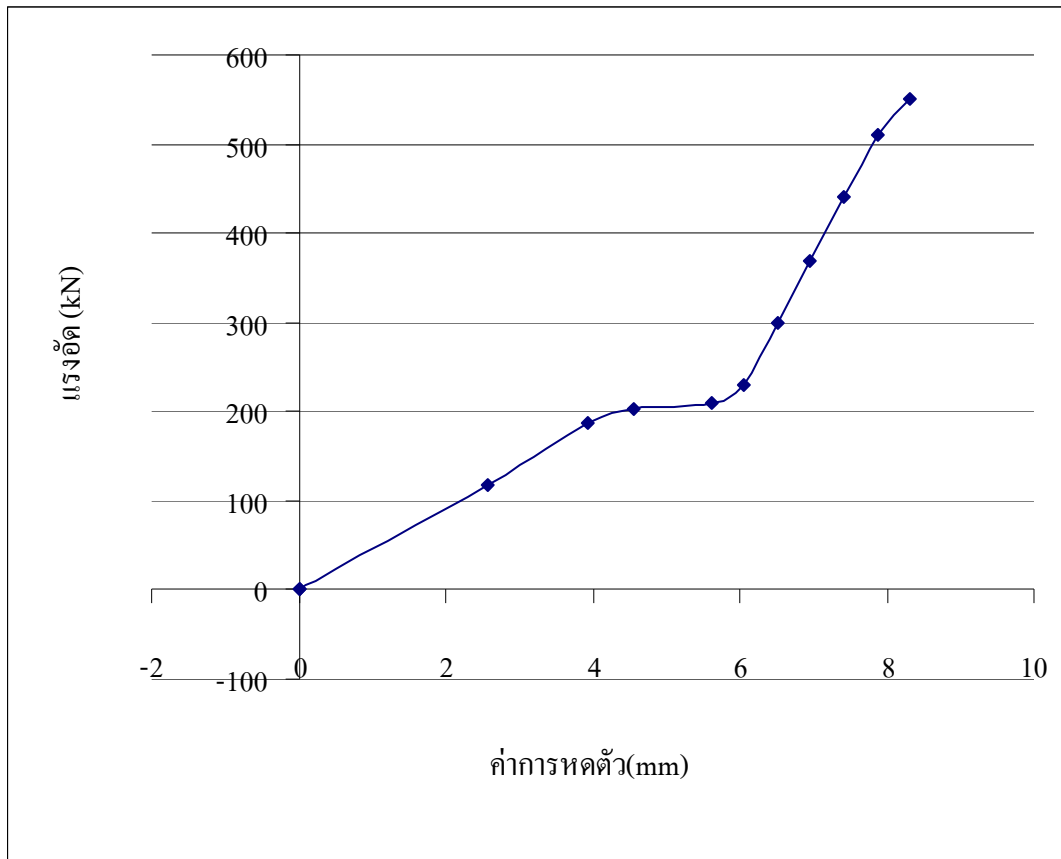
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B109	0.75	0.65	0.15	0.098		
B109/1	0.15	0.3	176.625	0.005	410	236.626
B109/2	0.15	0.3	176.625	0.005	410	236.626
B109/3	0.15	0.3	176.625	0.005	410	236.626
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 236.627ksc		

ตารางที่ ข. 26 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	18	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 26 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
2	-10.060	-10.060	0.000	300	-3.548	-10.060	6.512
118	-7.500	-10.060	2.560	370	-3.096	-10.060	6.964
188	-6.120	-10.060	3.940	440	-2.644	-10.060	7.416
204	-5.512	-10.060	4.548	510	-2.192	-10.060	7.868
210	-4.452	-10.060	5.608	550	-1.740	-10.060	8.320
230	-4.000	-10.060	6.060	550	-1.740	-10.060	8.320
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>56065.2 kg</b>			



รูปที่ ข 26.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B109



รูปที่ ข 26.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B109

## 27 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B107

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 3 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 9 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

### ตารางที่ ข.27 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

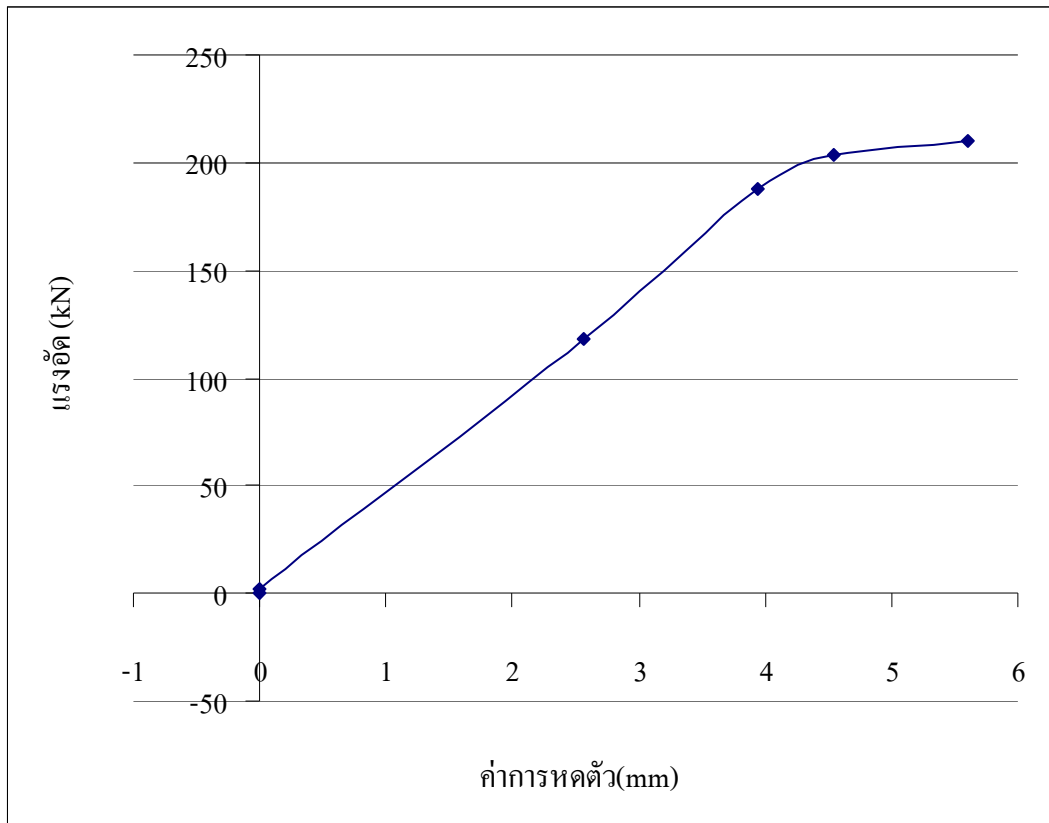
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
B107	0.75	0.65	0.15	0.098		
B107/1	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
B107/2	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
B107/3	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 51.943ksc		

### ตารางที่ ข. 27 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

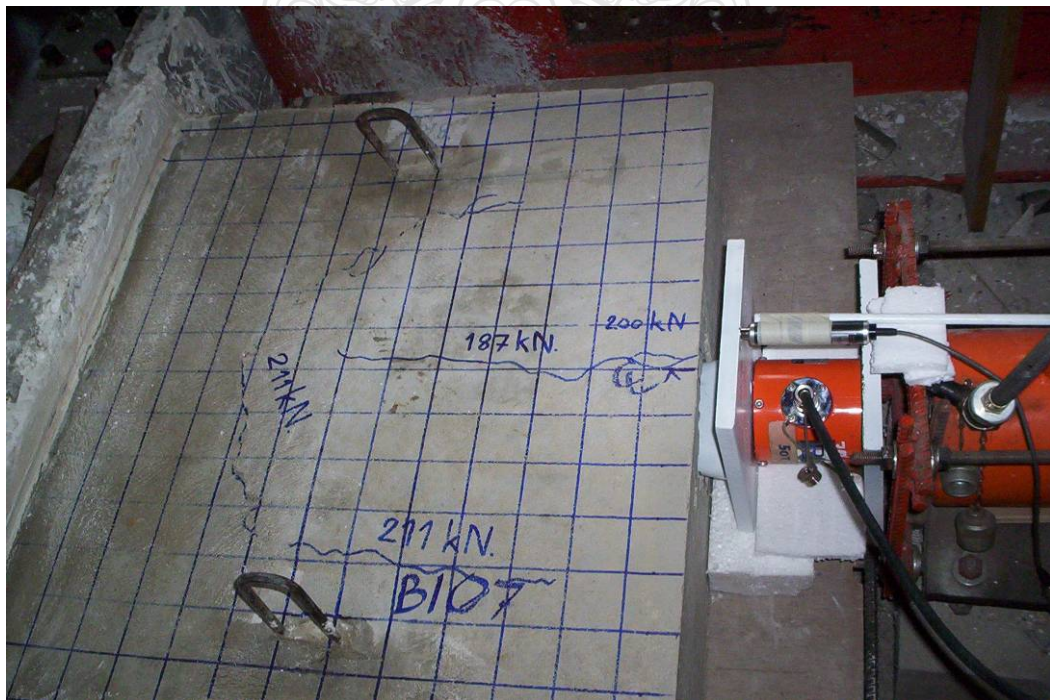
Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	18	cm
Fine Aggregate	100	kg			

### ตารางที่ ข. 27 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
0	-10.060	-10.060	0.000				
2	-10.060	-10.060	0.000				
118	-7.500	-10.060	2.560				
188	-6.120	-10.060	3.940				
204	-5.512	-10.060	4.548				
210	-4.452	-10.060	5.608				
แรงอัดสูงสุด				21406.7 kg			



รูปที่ ข 27.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B107



รูปที่ ข 27.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B107

## 28 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B205

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 3 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 9 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.28 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

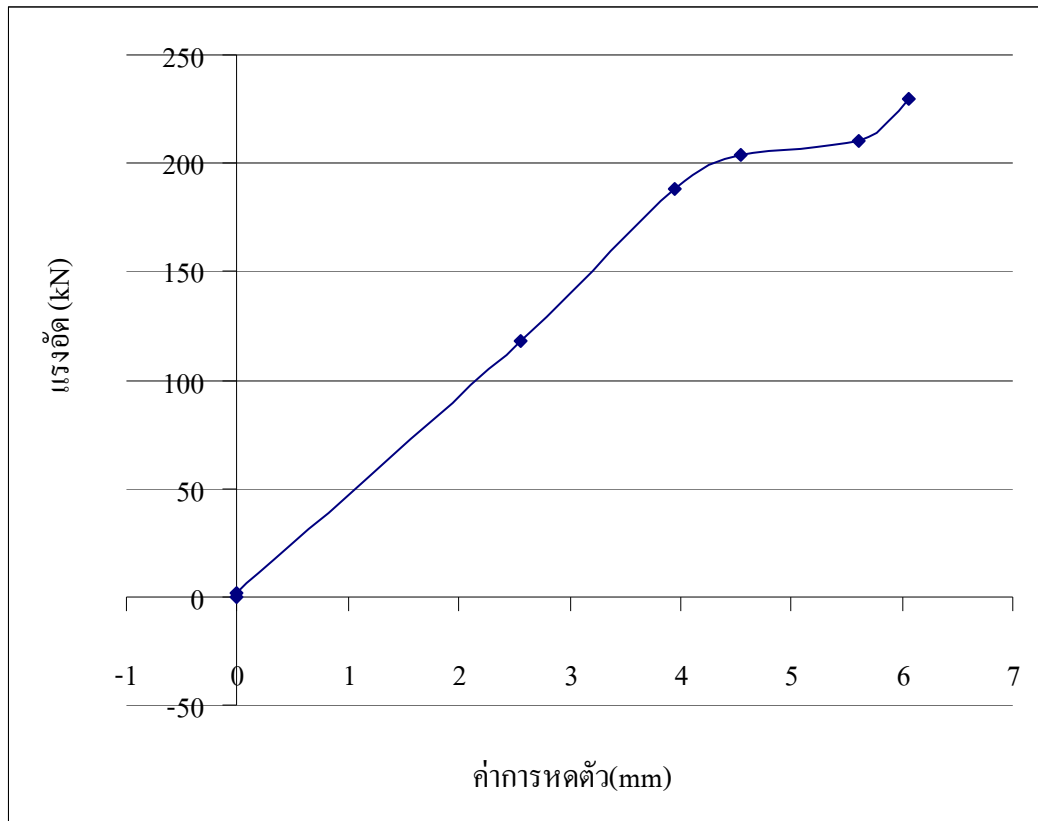
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B205	0.75	0.65	0.15	0.098		
B205/1	0.15	0.3	176.625	0.005	110	63.485
B205/2	0.15	0.3	176.625	0.005	115	66.371
B205/3	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 62.524ksc		

ตารางที่ ข. 28 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

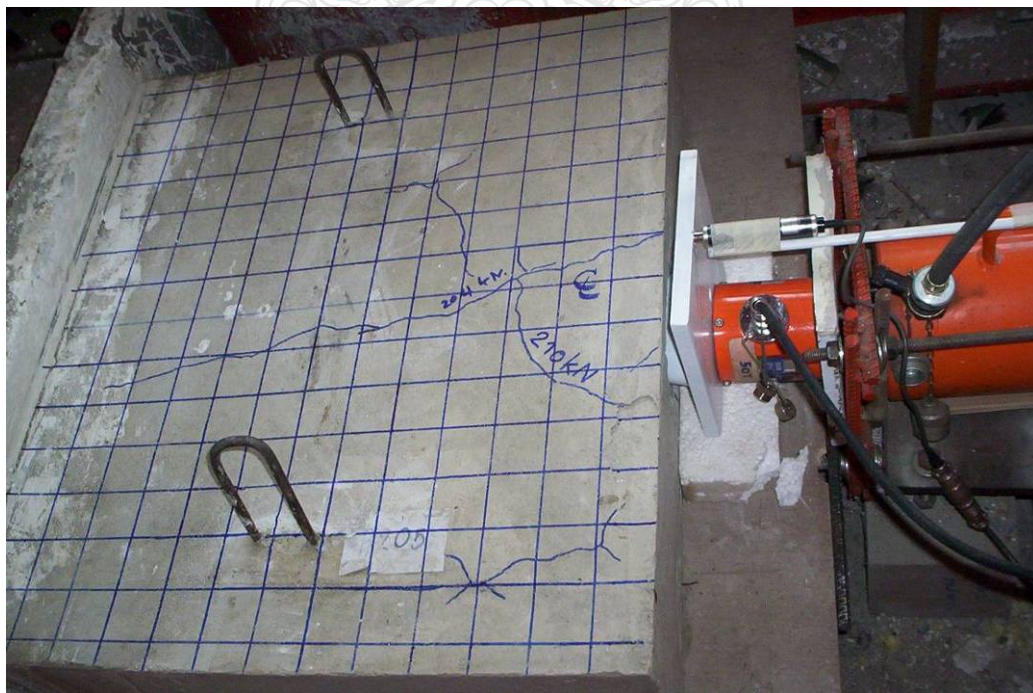
Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	18	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 28 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยืดลาวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
0	-10.060	-10.060	0.000				
2	-10.060	-10.060	0.000				
118	-7.500	-10.060	2.560				
188	-6.120	-10.060	3.940				
204	-5.512	-10.060	4.548				
210	-4.452	-10.060	5.608				
230	-4.000	-10.060	6.060				
แรงอัดสูงสุด				23445.5 kg			



รูปที่ ข 28.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B205



รูปที่ ข 28.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B205



## 29 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B206

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 3 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 9 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 6 วัน

ตารางที่ ข.29 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

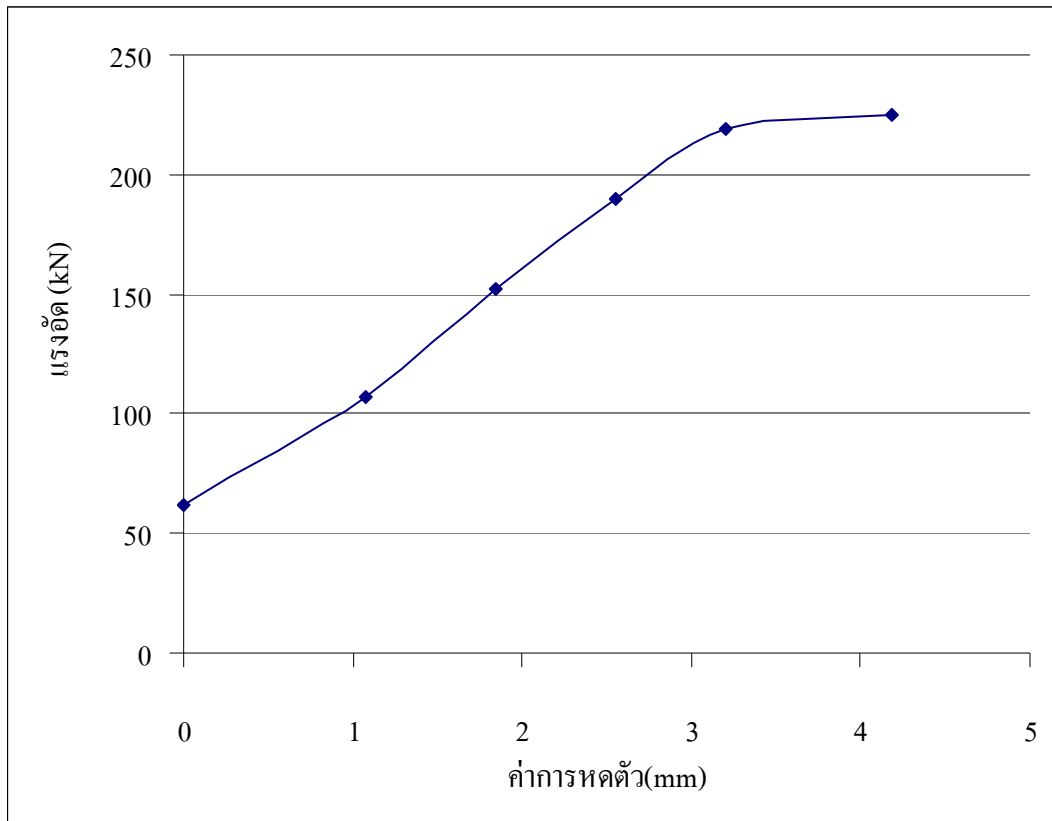
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B206	0.75	0.65	0.15	0.098		
B206/1	0.15	0.3	176.625	0.005	98	56.559
B206/2	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
B206/3	0.15	0.3	176.625	0.005	105	60.599
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 56.368ksc		

ตารางที่ ข. 29 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	21	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 29 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยืดลาวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
62	-7.686	-7.686	0.000				
107	-6.611	-7.686	1.075				
152	-5.846	-7.686	1.840				
190	-5.136	-7.686	2.550				
219	-4.487	-7.686	3.199				
225	-3.507	-7.686	4.179				
แรงอัดสูงสุด				22935.8 kg			



รูปที่ ข 29.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B206



รูปที่ ข 29.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B206

### 30 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B 207

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 3 พฤษภาคม 2552 วันทดสอบ 9 พฤษภาคม 2552  
อายุคอนกรีต 5 วัน

ตารางที่ ข.30 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

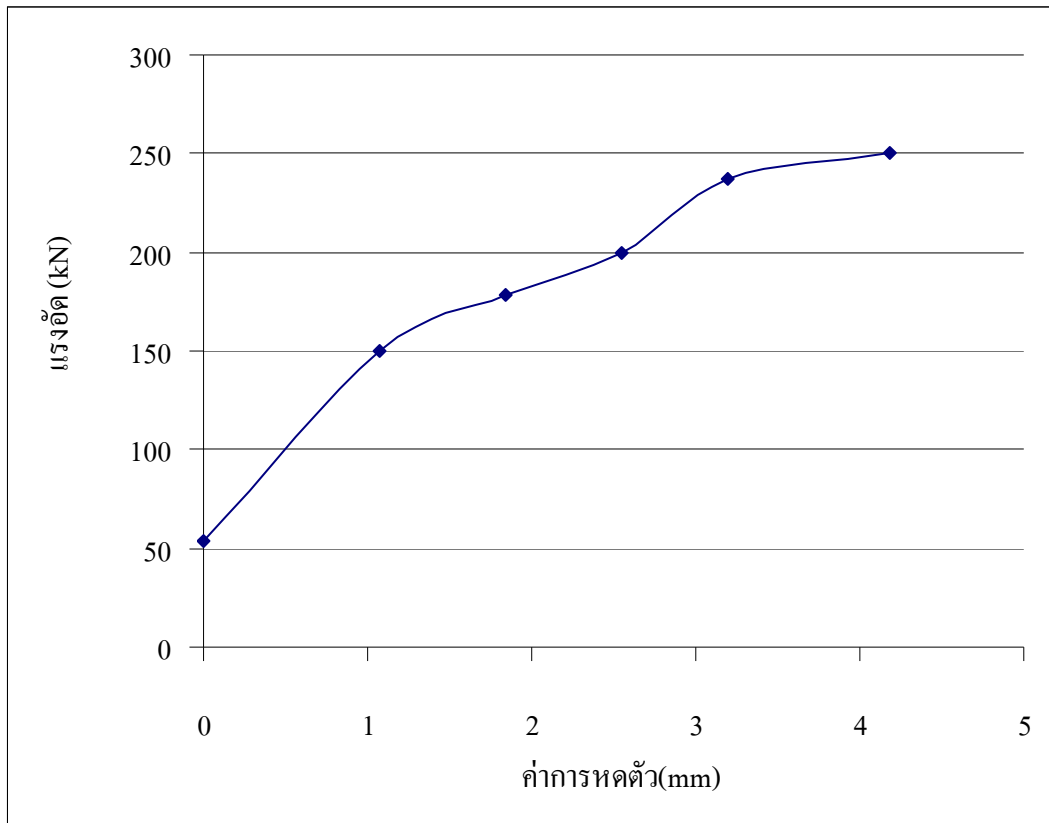
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
B207	0.75	0.65	0.15	0.098		
B207/1	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
B207/2	0.15	0.3	176.625	0.005	120	69.256
B207/3	0.15	0.3	176.625	0.005	110	63.485
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 63.486ksc		

ตารางที่ ข. 30 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

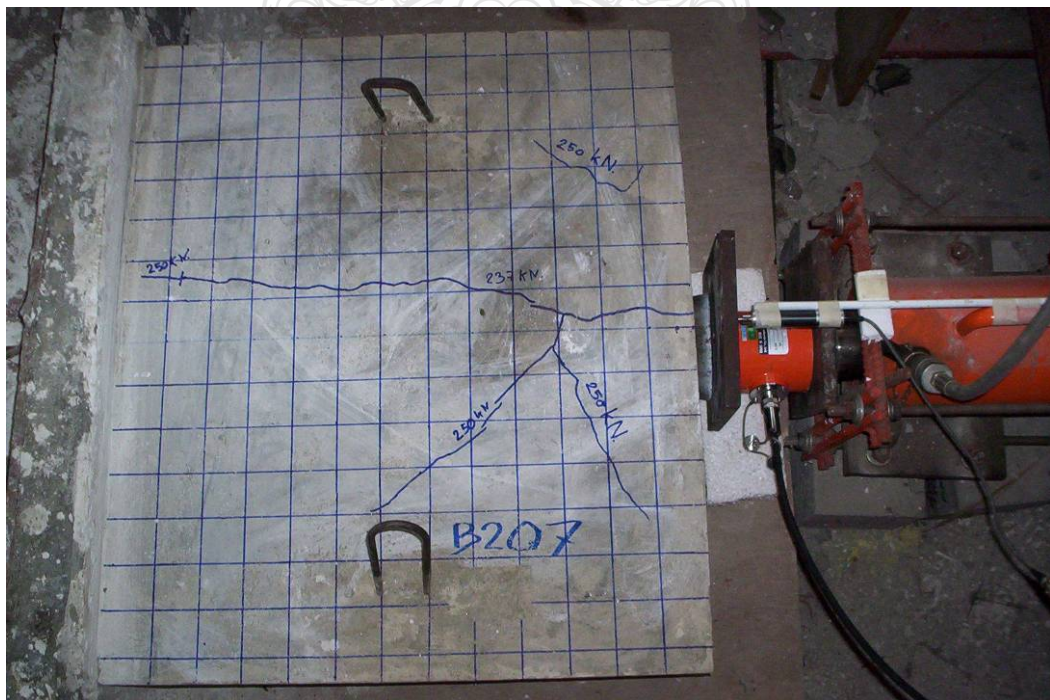
Cement	20	kg	Admixture	170	g
Water	22.5	kg	W/C	1.125	
Coarse Aggregate	125	kg	Slump	23	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 30 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
54	-7.686	-7.686	0.000				
150	-6.611	-7.686	1.075				
178	-5.846	-7.686	1.840				
200	-5.136	-7.686	2.550				
237	-4.487	-7.686	3.199				
250	-3.507	-7.686	4.179				
แรงอัดสูงสุด				25484.2 kg			



รูปที่ ข 30.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B207



รูปที่ ข 30.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B207

### 31 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A001

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 15 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 3 วัน

ตารางที่ ข.31 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

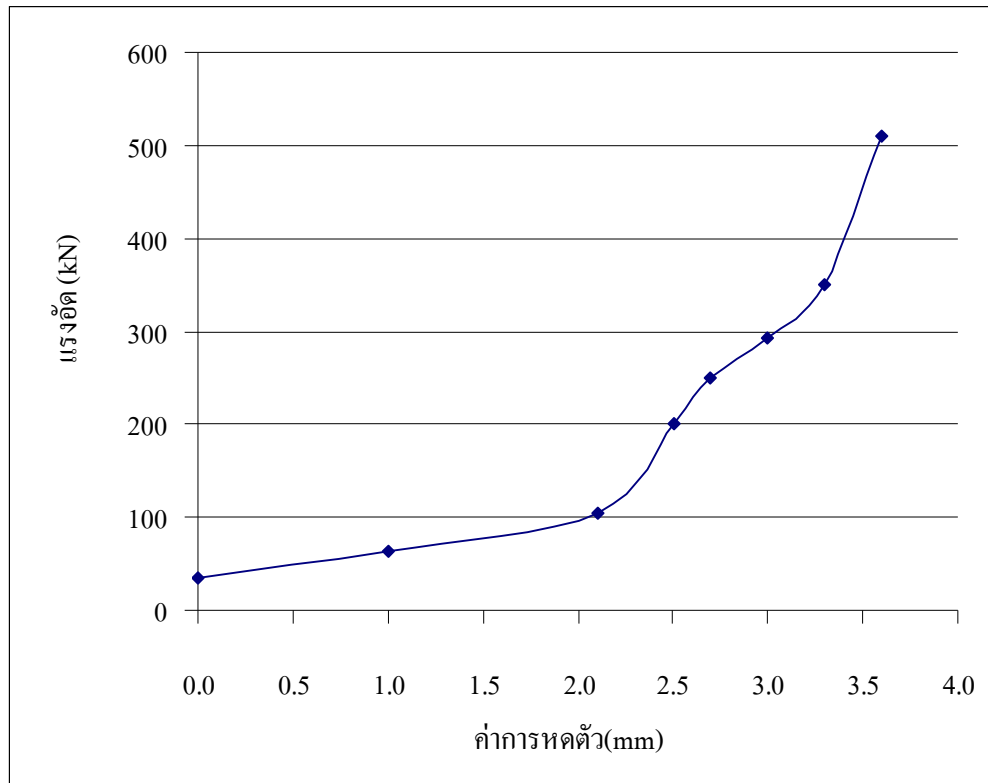
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
A001	0.75	0.65	0.15	0.098		
A001/1	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
A001/2	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
A001/3	0.15	0.3	176.625	0.005	420	242.397
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 242.398ksc		

ตารางที่ ข. 31 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	50	kg	Admixture	500	g
Water	22.83	kg	W/C	0.457	
Coarse Aggregate	135	kg	Slump	19	cm
Fine Aggregate	97.35	kg			

ตารางที่ ข. 31 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยืดลาวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
34	2.600	2.600	0.000	510	6.200	2.600	3.600
63	3.600	2.600	1.000				
105	4.710	2.600	2.110				
200	5.110	2.600	2.510				
250	5.300	2.600	2.700				
293	5.600	2.600	3.000				
350	5.900	2.600	3.300				
แรงอัดสูงสุด					52000.0 kg		



รูปที่ ข 31.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A001



รูปที่ ข 31.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A001

### 32 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A003

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 15 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 3 วัน

ตารางที่ ข.32 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

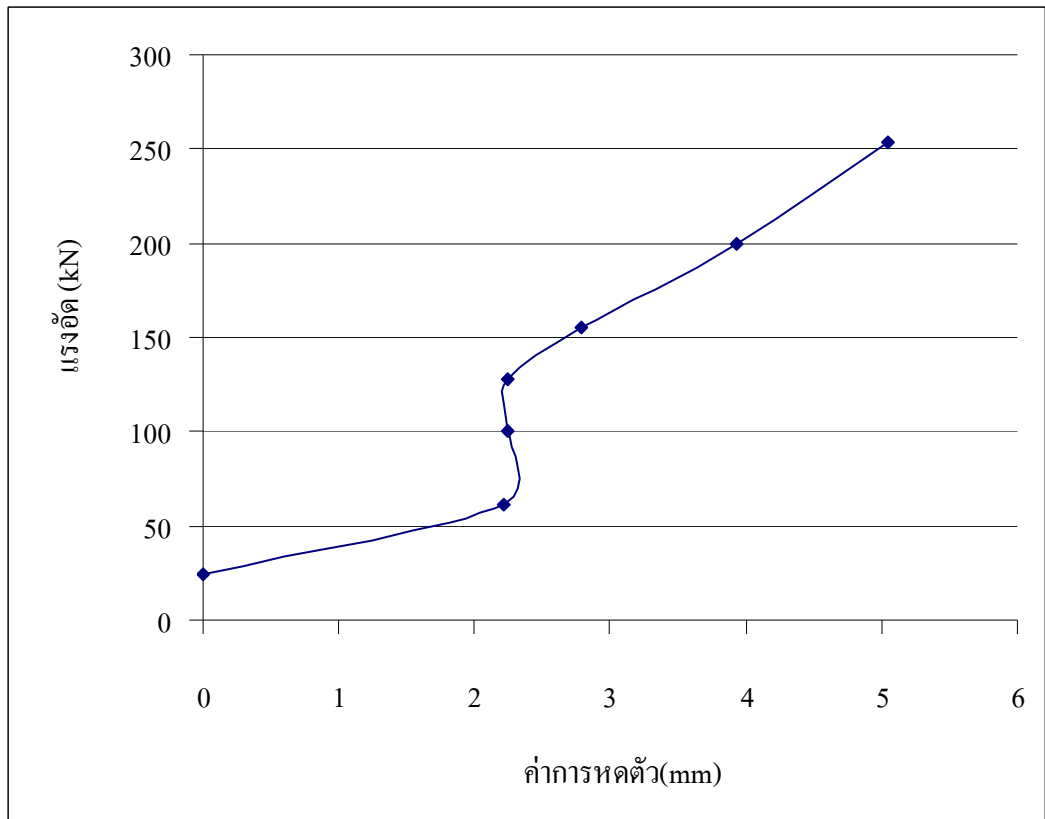
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
A003	0.75	0.65	0.15	0.098		
A003/1	0.15	0.3	176.625	0.005	120	69.256
A003/2	0.15	0.3	176.625	0.005	150	86.571
A003/3	0.15	0.3	176.625	0.005	130	75.028
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 76.952ksc		

ตารางที่ ข. 32 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	25	kg	Admixture	190	g
Water	22	kg	W/C	0.880	
Coarse Aggregate	100	kg	Slump	25	cm
Fine Aggregate	130	kg			

ตารางที่ ข. 32 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอชิดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
24	2.182	2.182	0.000	254	7.230	2.182	5.048
61	4.400	2.182	2.218				
100	4.428	2.182	2.246				
128	4.429	2.182	2.247				
155	4.971	2.182	2.789				
200	6.110	2.182	3.928				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>25891.9 kg</b>			



รูปที่ ข 32.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A003



รูปที่ ข 32.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A003



### 33 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง A004

ตัวอย่างชนิด A วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 15 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.33 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

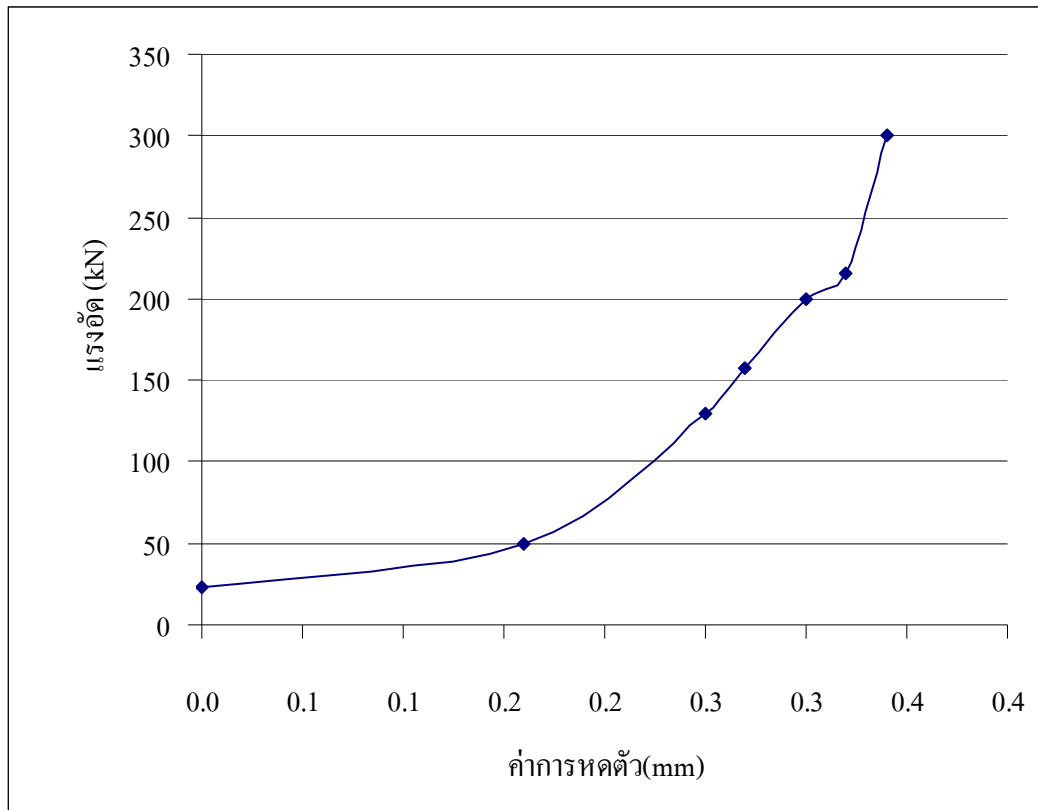
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
A004	0.75	0.65	0.15	0.098		
A004/1	0.15	0.3	176.625	0.005	180	103.885
A004/2	0.15	0.3	176.625	0.005	180	103.885
A004/3	0.15	0.3	176.625	0.005	200	115.427
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 107.733ksc		

ตารางที่ ข. 33 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	25	kg	Admixture	190	g
Water	22	kg	W/C	0.880	
Coarse Aggregate	100	kg	Slump	25	cm
Fine Aggregate	130	kg			

ตารางที่ ข. 33 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอขีดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ไข (mm)	การหดตัว (mm)
23	0.630	0.630	0.000	300	0.970	0.630	0.340
50	0.790	0.630	0.160				
130	0.880	0.630	0.250				
158	0.900	0.630	0.270				
200	0.930	0.630	0.300				
215	0.950	0.630	0.320				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>30581.0 kg</b>			



รูปที่ ข 33.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง A004



รูปที่ ข 33.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง A004

### 34 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B001

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 23 ธันวาคม 2551 วันทดสอบ 27 ธันวาคม 2551  
อายุคอนกรีต 4 วัน

ตารางที่ ข.34 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

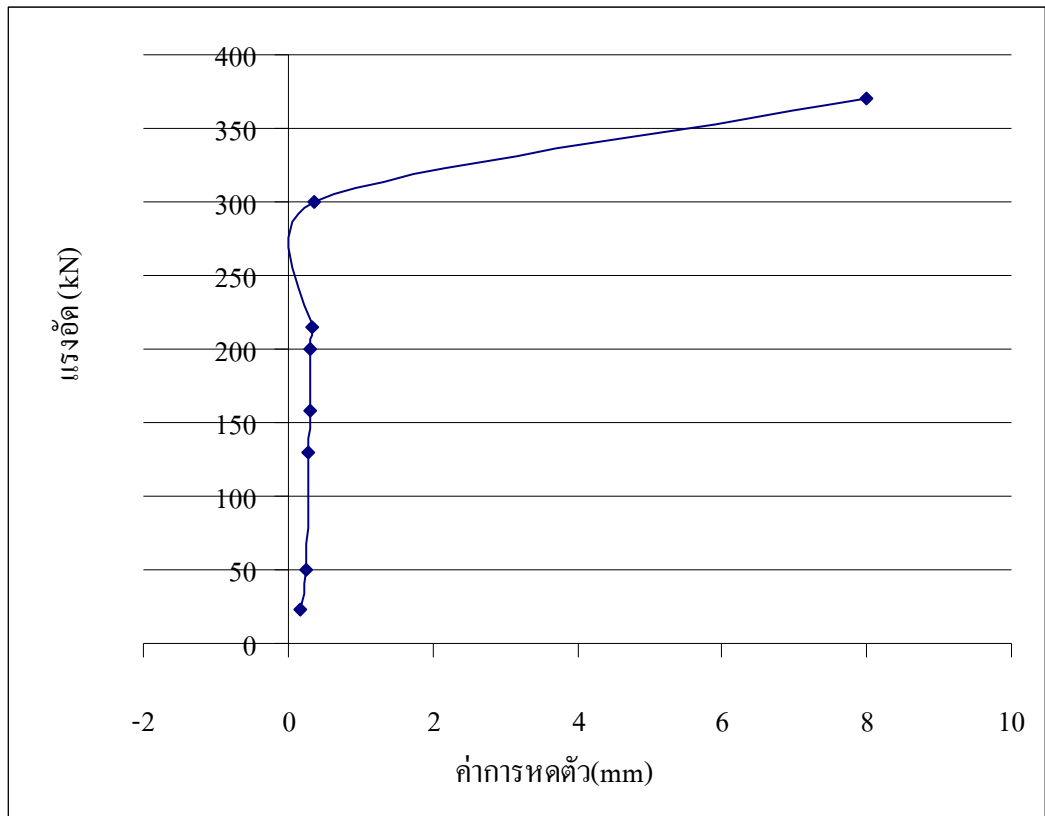
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B001	0.75	0.65	0.15	0.098		
B001/1	0.15	0.3	176.625	0.005	195	112.542
B001/2	0.15	0.3	176.625	0.005	190	109.656
B001/3	0.15	0.3	176.625	0.005	190	109.656
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 110.618ksc		

ตารางที่ ข. 34 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

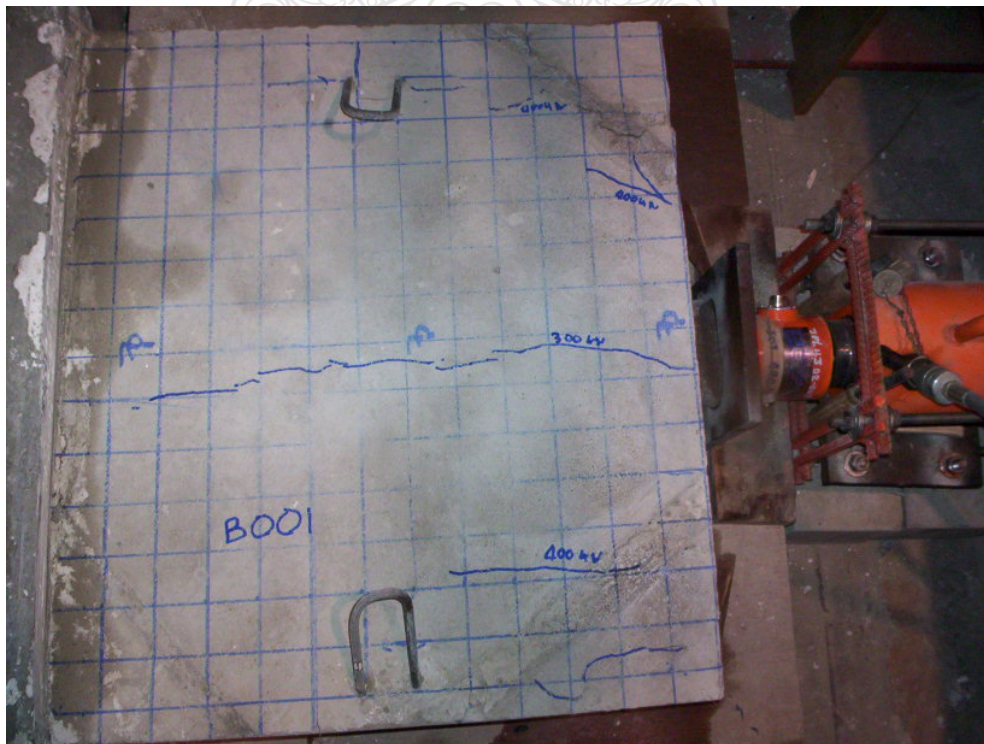
Cement	30	kg	Admixture	270	g
Water	25	kg	W/C	0.833	
Coarse Aggregate	130	kg	Slump	21.6	cm
Fine Aggregate	100	kg			

ตารางที่ ข. 34 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
23	0.630	0.630	0.000	215	0.950	0.630	0.320
50	0.790	0.630	0.160	300	0.970	0.630	0.340
130	0.880	0.630	0.250	370	1.000	0.630	0.370
158	0.900	0.630	0.270				
200	0.930	0.630	0.300				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>37716.6 kg</b>			



รูปที่ ข 34.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B001



รูปที่ ข 34.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B001

### 35 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B003

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 15 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 3 วัน

ตารางที่ ข.35 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

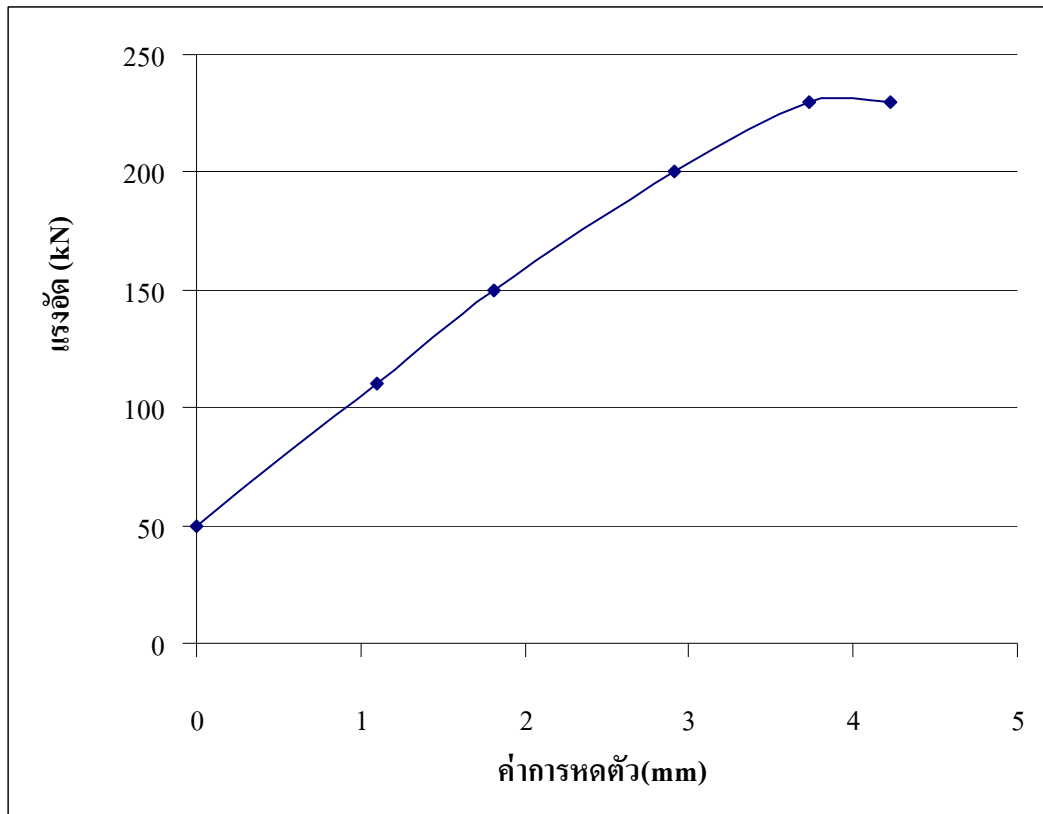
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B003	0.75	0.65	0.15	0.098		
B003/1	0.15	0.3	176.625	0.005	100	57.714
B003/2	0.15	0.3	176.625	0.005	95	54.828
B003/3	0.15	0.3	176.625	0.005	90	51.942
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 54.829ksc		

ตารางที่ ข. 35 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	25	kg	Admixture	190	g
Water	22	kg	W/C	0.880	
Coarse Aggregate	100	kg	Slump	25	cm
Fine Aggregate	130	kg			

ตารางที่ ข. 35 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
50	7.773	7.773	0.000				
110	8.868	7.773	1.095				
150	9.583	7.773	1.810				
200	10.685	7.773	2.912				
230	11.5	7.773	3.727				
230	12	7.773	4.227				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>23445.5 kg</b>			



รูปที่ ข 35.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B003



รูปที่ ข 35.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B003

### 36 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง B004

ตัวอย่างชนิด B วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 15 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 3 วัน

ตารางที่ ข.36 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

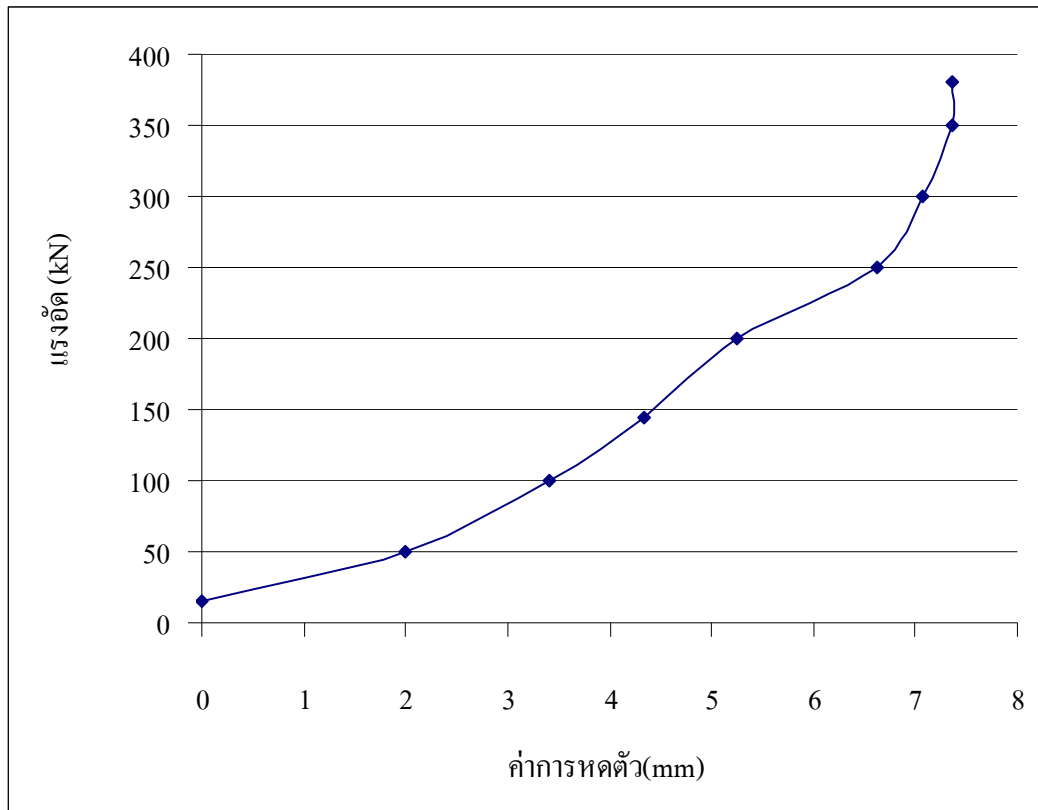
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc)
B004	0.75	0.65	0.15	0.098		
B004/1	0.15	0.3	176.625	0.005	210	121.199
B004/2	0.15	0.3	176.625	0.005	205	118.313
B004/3	0.15	0.3	176.625	0.005	210	121.199
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 120.237ksc		

ตารางที่ ข. 36 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	25	kg	Admixture	190	g
Water	22	kg	W/C	0.880	
Coarse Aggregate	100	kg	Slump	25	cm
Fine Aggregate	130	kg			

ตารางที่ ข. 36 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
15	1.135	1.135	0.000	300	8.200	1.135	7.065
50	3.135	1.135	2.000	350	8.500	1.135	7.365
100	4.550	1.135	3.415	380	8.500	1.135	7.365
145	5.478	1.135	4.343				
200	6.380	1.135	5.245				
250	7.760	1.135	6.625				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>					<b>38736.0 kg</b>		



รูปที่ ข 36.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง B004



รูปที่ ข 36.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง B004



### 37 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C003

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 19 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 3 วัน

ตารางที่ ข.37 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

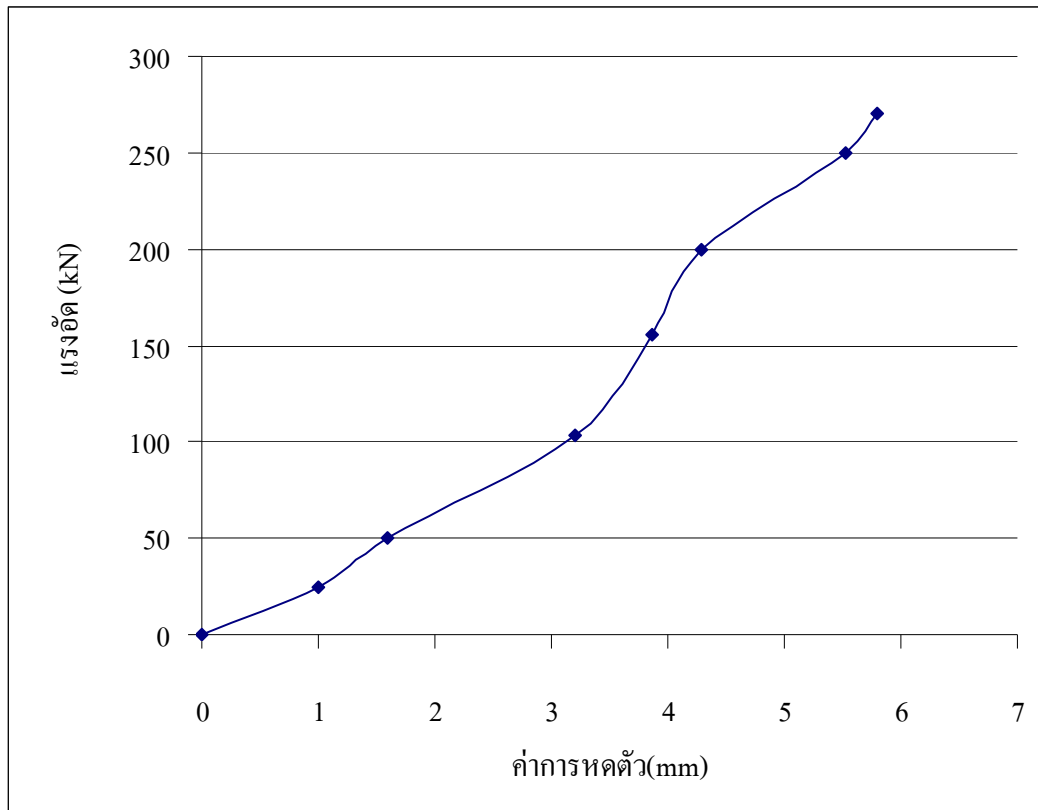
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด หน้าตัด(cm)	ปริมาตร (m <sup>3</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
C003	0.75	0.65	0.15	0.098		
C003/1	0.15	0.3	176.625	0.005	140	80.799
C003/2	0.15	0.3	176.625	0.005	145	83.685
C003/3	0.15	0.3	176.625	0.005	140	80.799
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.114 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 81.762ksc		

ตารางที่ ข. 37 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	25	kg	Admixture	190	g
Water	22	kg	W/C	0.880	
Coarse Aggregate	100	kg	Slump	25	cm
Fine Aggregate	130	kg			

ตารางที่ ข. 37 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
0	3	3.000	0.000	200	7.29	3.000	4.290
25	4	3.000	1.000	250	8.52	3.000	5.520
50	4.6	3.000	1.600	270.0	8.8	3.000	5.800
103	6.2	3.000	3.200				
156	6.859	3.000	3.859				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>				<b>27522.9 kg</b>			



รูปที่ ข 37.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C003



รูปที่ ข 37.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C003

### 38 ผลการทดสอบ ตัวอย่าง C004

ตัวอย่างชนิด C วันที่หล่อตัวอย่าง 13 มกราคม 2552 วันทดสอบ 19 มกราคม 2552  
อายุคอนกรีต 7 วัน

ตารางที่ ข.38 (ก) หน่วยแรงกดของคอนกรีต

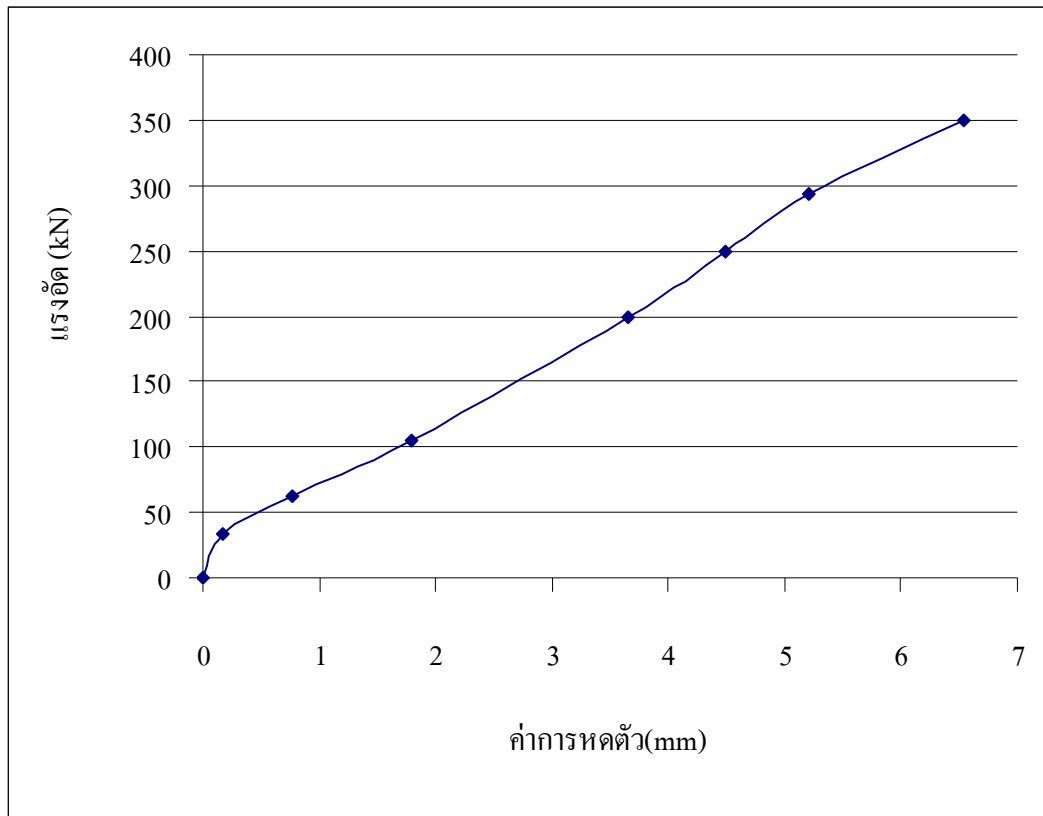
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	Φ (cm)	สูง หน้าตัด(cm)	พื้นที่หน้าตัด (m <sup>2</sup> )	แรงกด (kN)	หน่วยแรงอัด (ksc )
C004	0.75	0.65	0.15	0.098		
C004/1	0.15	0.15	176.6	0.017663	210	121.199
C004/2	0.15	0.15	176.6	0.017663	210	121.199
C004/3	0.15	0.15	176.6	0.017663	210	121.199
รวมปริมาตรคอนกรีต 0.151 m <sup>2</sup>				กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 121.199ksc		

ตารางที่ ข. 38 (ข) อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Cement	25	kg	Admixture	190	g
Water	22	kg	W/C	0.880	
Coarse Aggregate	100	kg	Slump	25	cm
Fine Aggregate	130	kg			

ตารางที่ ข. 38 (ค) ผลการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดลวดอัดแรง

แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)	แรงอัด (kN)	การหดตัว (mm)	ค่าแก้ (mm)	การหดตัว (mm)
0	3.700	3.700	0.000	293	8.905	3.700	5.205
34	3.874	3.700	0.174	350	10.235	3.700	6.535
63	4.466	3.700	0.766				
105	5.501	3.700	1.801				
200	7.347	3.700	3.647				
250	8.190	3.700	4.490				
<b>แรงอัดสูงสุด</b>					<b>35677.9 kg</b>		



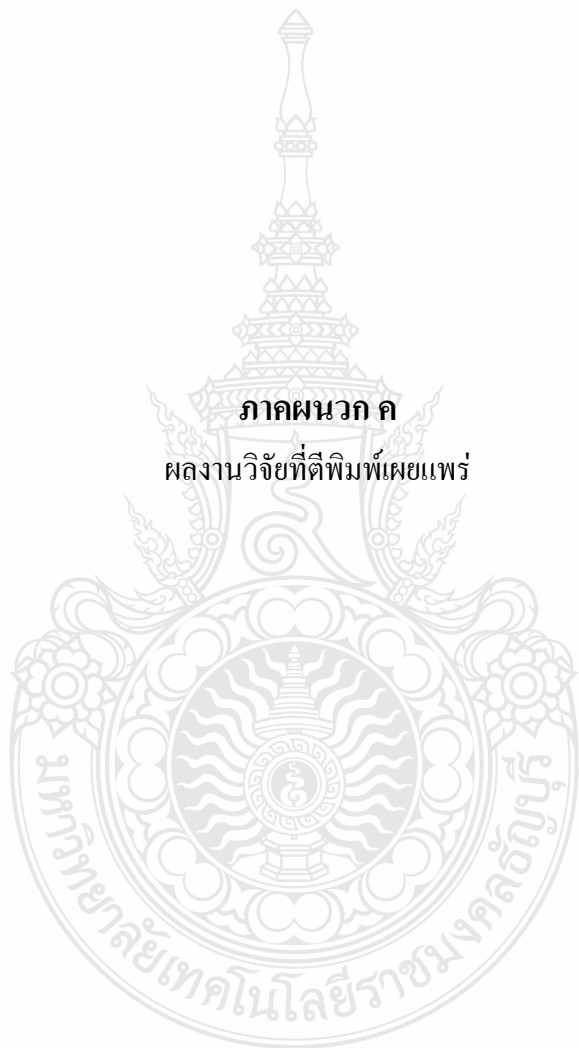
รูปที่ ข 38.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับแรงอัดของตัวอย่าง C004



รูปที่ ข 38.2 การแตกร้าวของตัวอย่าง C004

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายรัตนพันธุ์ แจ่มแสง
วัน เดือน ปีเกิด	8 สิงหาคม 2522
ที่อยู่	69/292/2 หมู่ 8 ต. บางกระสอบ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อ พ.ศ. 2544
ความชำนาญเฉพาะทาง	1 การออกแบบอาคาร 2 การก่อสร้างอาคารคอนกรีตอัดแรง
ประวัติการทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2547-2552	วิศวกรโครงการ บริษัท เดอะ โรยัลสวีท โอเทล จำกัด
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	กรรมการบริหาร บริษัท สุมิตรเอ็นจีเนียริ่ง จำกัด หุ้นส่วนผู้จัดการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด แจ่มแสงวิศวกร

### ผลงานวิจัย

รัตนพันธุ์ แจ่มแสง, มาโนช รุจิภากร , การศึกษาการเสริมเหล็กที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่หัวสมอในพื้นคอนกรีตอัดแรง **The Study of Mild Steel Reinforced Effect to Compressive Strength at Anchorage End in Post-tension Slab**, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 วันที่ 12-14 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี