

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง 3156

การทำนายการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยวิธีการลดค่าโมดูลัสของคานคอนกรีต

PREDICTING DEFLECTIONS DUE TO CREEP OF REINFORCED  
CONCRETE BEAMS BY REDUCING MODULUS OF CONCRETE BEAMS



1110409

อมสิน ดำริห์  
OMSIN DAMRI

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 110409  
วัน,เดือน,ปี..... -2 พ.ย. 2553

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-093-121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREDICTING DEFLECTIONS DUE TO CREEP OF REINFORCED  
CONCRETE BEAMS BY REDUCING MODULUS OF CONCRETE BEAMS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2010**

**KMITL-2010-EN-M-093-121**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำนายการแอ่นตัวเนื่องจากครีปของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการลดค่าโมดูลัสของคานคอนกรีต

Thesis Title Predicting Deflections Due to Creep of Reinforced Concrete Beams by Reducing Modulus of Concrete Beams

นักศึกษานายอมสิน คำริห์

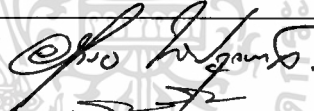



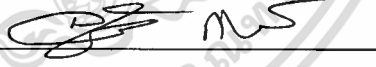
รหัสประจำตัว 48061506

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-093-121

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.อำนวยการ พานิชกุลพงศ์	
ผศ.ศักดิ์ชัย สกานูพงษ์	
รศ.ดร.ปิติ สุคนธ์สุขกุล	
ผศ.ดร.คมสัน มาลีสี	
ผศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพุธที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2553 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ 17 เดือน ๕ ปี พ.ศ. 53  
ลงชื่อ.....

ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ได้รับอนุญาตทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดหรือข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการลดค่าโมดูลัสของคานคอนกรีต
นักศึกษา	นายออมสิน คำริห์
รหัสนักศึกษา	48061506
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. สุวัฒน์ ธิรเศรษฐ์

### บทคัดย่อ

โครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยล้วนแล้วแต่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอาคารบางแห่งมีการใช้งานระยะเวลานานย่อมส่งผลกระทบต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้าง เนื่องมาจากการคืบของคอนกรีตและส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ลดลงตามมาด้วย การจะทราบถึงพฤติกรรมการลดลงของโมดูลัสยืดหยุ่นจะต้องใช้เวลานาน ในการศึกษานี้ได้หาวิธีการทดสอบให้น้อยลง โดยใช้คานคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาและคานคอนกรีตน้ำหนักเบา เนื่องจากคอนกรีตน้ำหนักเบา มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน เมื่อทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ทฤษฎีการล้าประกอบกับวิธีการคำนวณการแอ่นตัวของคานคอนกรีต ที่ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงจะสามารถทำนายกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้

<b>Thesis Title</b>	Predicting Deflections Due to Creep of Reinforced Concrete Beams by Reducing Modulus of Concrete Beams Due to Creep of Concrete
<b>Student</b>	Mr. Omsin Damri
<b>Student ID.</b>	48061506
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Suwat Teeraset

### ABSTRACT

Building structure in Thailand mostly are reinforced concrete. When some buildings have been used for a long time, carrying load capacity of the buildings will be effected. This is because the creep of the concrete and results in the decreasing of the elastic modulus. It takes time to obtain the behavior of the elastic modulus reduction. In this study, to find an alternative method reducing the time of determination by applying normal weight concrete beam and lightweight concrete beam. Because lightweight concrete has lower elastic modulus than normal weight concrete but has been carried loads for period of time. When analyzing by the creep theory consist deflection calculation, to effect of change in elastic, the load capacity and deflection of reinforced concrete beam can be predicted.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผศ. สุวัฒน์ ภิรเศรษฐ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ต่างๆ อันมีค่าอย่างยิ่ง ของการทำวิจัยมา โดยตลอดจนวิทยานิพนธ์สำเร็จจบลงด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ รศ. อำนวย พานิชกุล ประธานกรรมการสอบ ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี ผศ. ศักดิ์ชัย สกานพงษ์ กรรมการ และรศ.ดร. ปิติ สุคนธ์สุขกุล กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งห้าท่าน ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

และกว่าการทำวิจัยครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงลงไปได้ ครอบครัวของมีความลำบากยิ่งกว่าข้าพเจ้าหลายเท่าตัว ทั้งให้การสนับสนุนทางด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์แก่ข้าพเจ้าเสมอมา ซึ่งความดีอันใดที่พึงมีจากการทำวิจัยครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ครอบครัวของข้าพเจ้าทุกประการ แต่ความผิดพลาดใดที่เกิดขึ้นในการทำวิจัยครั้งนี้ข้าพเจ้าขอรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ ที่คอยความช่วยเหลือให้กำลังใจเสมอมา และที่ขาดเสียไม่ได้คือ น้องๆ โครงการงานทางวิศวกรรมโยธาปีการศึกษา 2551 ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี จนการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงเป็นที่เรียบร้อย

อมลสิน คำริห์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การเสียชีวิตตามการเวลาของคอนกรีต.....	5
2.2 การคืบของคอนกรีต.....	6
2.2.1 การคืนกลับของการคืบในคอนกรีต.....	8
2.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	9
2.3.1 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	9
2.3.2 การทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคืบของคอนกรีต.....	10
2.4 ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต.....	12
2.5 คานคอนกรีต.....	14
2.5.1 นิยาม.....	14
2.5.2 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	14
2.5.3 การแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่รับแรงดัด.....	16
2.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง.....	17
2.5.5 การวิเคราะห์การแ่นตัวทันที.....	18
2.5.6 การวิเคราะห์การแ่นตัวระยะยาว.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 คอนกรีตมวลเบา.....	22
2.7 การควบคุมคุณภาพคอนกรีต.....	22
2.7.1 การทำคอนกรีต.....	24
2.7.2 การบ่ม.....	25
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
4.1 การทดสอบตัวอย่างทรงกระบอก.....	47
4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	47
4.1.2 วิธีการทดสอบ.....	47
4.2 วิธีการทำนายเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	51
4.3 วิธีการเตรียมหล่อตัวอย่างคาน.....	57
4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	57
4.3.2 การหล่อคานตัวอย่างคาน.....	57
4.4 วิธีการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ.....	65
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลและสรุปข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 1.....	67
5.2 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 1 S.....	68
5.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 2 L.....	70
5.4 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 2 L-S.....	71
5.5 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 3 L.....	73
5.6 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 3 L-S.....	74
5.7 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.8 ข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก. ....	82
ภาคผนวก ก-1 วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต.....	83
ภาคผนวก ก-2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา.....	86
ภาคผนวก ก-3 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	86
ภาคผนวก ก-4 การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	88
ภาคผนวก ก-5 การคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำ.....	90
ภาคผนวก ก-6 การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน.....	91
ภาคผนวก ข. ....	95
ภาคผนวก ข-1 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก.....	96
ภาคผนวก ข-2 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกของคาน.....	149
ภาคผนวก ข-3 การคำนวณค่า kd โดยใช้โปรแกรม Visual C++.....	178
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	205
ประวัติผู้เขียน.....	214

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอนตัวที่คำนวณได้.....	22
2.2 ลักษณะการใช้งานกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา.....	23
3.1 ตัวคูณประกอบสำหรับหาค่าการแอนตัวระยะยาวภายใต้น้ำหนักบรรทุกค้าง.....	44
4.1 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่วันต่างๆ.....	51
4.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโฟมซีเมนต์ทรงกระบอกกับหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัดประลัย.....	52
5.1 การเปรียบเทียบระยะแอนตัวผลการคำนวณกับผลการทดสอบ.....	76
5.2 การเปรียบเทียบระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบของ.....	76
คานคอนกรีตเสริมเหล็กกลมผสม 2 ชั้นและ 3 ชั้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา	
5.3 การเปรียบเทียบระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นจากผลการคำนวณของ.....	76
คานคอนกรีตเสริมเหล็กกลมผสม 2 ชั้นและ 3 ชั้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา	
ก.1 แสดงค่าส่วนเพื่อกำลังอัด.....	83
ข.1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน.....	96
ข.2 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1.....	96
ข.3 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2.....	98
ข.4 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3.....	99
ข.5 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4.....	101
ข.6 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5.....	102
ข.7 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก $1,600 \text{ kg/m}^3$ .....	104
ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.8 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก $1,600 \text{ kg/m}^3$ .....	104
ทรงกระบอก อายุ 7 วัน	
ข.9 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก $1,600 \text{ kg/m}^3$ .....	105
ทรงกระบอก อายุ 3 วัน	
ข.10 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก $1,600 \text{ kg/m}^3$ .....	105
ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	
ข.11 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก $1,600 \text{ kg/m}^3$ .....	107
ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.12 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก $1,600 \text{ kg/m}^3$ .....	108
ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.13 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....110 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	
ข.14 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....111 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....113 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....113 ทรงกระบอก อายุ 7 วัน	
ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....114 ทรงกระบอก อายุ 3 วัน	
ข.18 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....114 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	
ข.19 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....116 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.20 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....117 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	
ข.21 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....119 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	
ข.22 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....120 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.23 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....122 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.24 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....122 ทรงกระบอก อายุ 7 วัน	
ข.25 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....123 ทรงกระบอก อายุ 3 วัน	
ข.26 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....123 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.27 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....125 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.28 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....126 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	
ข.29 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....128 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	
ข.30 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....129 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.31 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....131 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.32 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....131 ทรงกระบอก อายุ 7 วัน	
ข.33 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....132 ทรงกระบอก อายุ 3 วัน	
ข.34 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....132 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	
ข.35 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....134 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.36 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....135 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	
ข.37 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....137 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	
ข.38 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....138 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.39 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....140 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.40 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....140 ทรงกระบอก อายุ 7 วัน	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.41 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....141 ทรงกระบอก อายุ 3 วัน	
ข.42 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....141 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	
ข.43 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....143 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.44 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....144 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	
ข.45 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....146 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	
ข.46 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....147 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.47 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน .....149	
ข.48 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1 .....149	
ข.49 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2 .....151	
ข.50 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3 .....152	
ข.51 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4 .....154	
ข.52 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5 .....155	
ข.53 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....157 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.54 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....157 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	
ข.55 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....159 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.56 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....160 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	
ข.57 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....162 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.58 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,850 \text{ kg/m}^3$ .....163 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.59 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ .....165 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน	
ข.60 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ .....166 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1	
ข.61 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ .....167 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2	
ข.62 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ .....168 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3	
ข.63 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ .....170 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4	
ข.64 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก $1,950 \text{ kg/m}^3$ .....171 ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5	
ข.65 แสดงการหาค่า Neutral Axis ของคาน 3 ชั้น .....180	
ข.66 แสดงการหาค่า ระยะ 3 ชั้นที่โมดูลัสยืดหยุ่นต่างกัน .....188	
ข.67 แสดงการหาค่า Neutral Axis ของคาน 2 ชั้น .....194	
ข.68 แสดงการหาค่า ระยะ 2 ชั้นที่โมดูลัสยืดหยุ่นต่างกัน .....201	

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเสีรูปตามกาลเวลาของคอนกรีต.....	6
2.2 ผลการคืบต่อความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่สภาวะน้ำหนัก บรรทุกใช้งาน.....	7
2.3 การหดตัวแบบอีลาสติกและการคืบของคอนกรีต.....	8
2.4 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	9
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเวลา.....	11
2.6 เส้นโค้งความเค้น – ความเครียดในอุดมคติ สำหรับคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว.....	13
2.7 เส้นโค้งความเค้น – ความเครียดสำหรับคอนกรีตรูปทรงกระบอกให้แรงกระทำตาม แนวแกนที่มีหน่วยแรงอัดต่างกัน.....	13
2.8 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก.....	15
2.9 การเสีรูปของชิ้นส่วนรับแรงคด.....	18
2.10 การคำนวณ โมเมนต์ของความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัด.....	19
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $I_c$ กับค่า $M_a/M_{cr}$ .....	20
2.12 ผลการคืบของคอนกรีตต่อค่าความ โคง.....	20
2.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบตามกาลเวลา.....	21
2.14 ผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มซึ่งมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต.....	25
3.1 ผลของการคืบต่อค่าความ โคงของ Sozen และ Corley .....	27
3.2 โมเมนต์คดและผลของหน่วยแรงคึงในคอนกรีตของ Yu และ Winter.....	29
3.3 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเกิดการคืบและหลังเกิดการคืบ.....	31
3.4 หน้าตัดแปลงร้าวที่เสริมเหล็กรับแรงคึงก่อนการคืบและหลังการคืบ.....	32
3.5 หน้าตัดแปลงร้าวที่เสริมทั้งเหล็กรับแรงคึงและเหล็กรับอัดก่อนการคืบและหลังการคืบ.....	34
3.6 การกระจายความเครียดตลอดความลึกหน้าตัดแตกร้าว ของ Clarke, Scholz, Alexander.....	38
3.7 ค่า $\phi_{cr}$ เทียบกับ $\phi_{cr}$ ของแท่งคอนกรีต สำหรับความแตกต่างของ $x$ , ของ Clarke และคณะ.....	38
3.8 ระยะเวลาต่างๆของการกระจายหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุก ใช้งาน.....	40
3.9 กระบวนการสำหรับการคำนวณการเอนตัวระยะสั้น.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก.....	48
4.2 คอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	48
4.3 การผสมคอนกรีตโฟม.....	49
4.4 การหล่อแท่งคอนกรีตผสมโฟมซีเมนต์รูปทรงกระบอก.....	50
4.5 แท่งคอนกรีตผสมโฟมซีเมนต์ ที่ทดสอบเพื่อหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่น.....	50
4.6 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตกับเวลา.....	52
4.7 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นของ โฟมซีเมนต์กับหน่วยน้ำหนัก .....	53
4.8 กราฟกำลังอัดประลัยของ โฟมซีเมนต์กับหน่วยน้ำหนัก.....	53
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 40% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา(เฉลี่ย เพ็ชรสูงเนิน.2548).....	54
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลี่ย เพ็ชรสูงเนิน.2548).....	55
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักบรรทุกประลัย.....	56
4.12 แบบไม้หล่อคานคอนกรีต.....	58
4.13 แบบไม้หล่อคานคอนกรีต (ต่อ).....	58
4.14 การเสริมเหล็กและผูกเหล็กปลอก.....	59
4.15 รูปแบบคาน และการเสริมเหล็กคานทดสอบ.....	60
4.16 รูปแบบคาน และการเสริมเหล็กคานทดสอบ (ต่อ).....	61
4.17 ทดสอบความชื้นเหลวของคอนกรีต (Slump Test).....	61
4.18 หล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา.....	62
4.19 ผสม โฟมซีเมนต์ตามหน่วยน้ำหนัก.....	62
4.20 หล่อคานลูกผสมทั้ง 2 ชั้น และ 3 ชั้น.....	63
4.21 เก็บตัวอย่างลูกปูน.....	63
4.22 ตัวอย่างคานทดสอบที่ถอดแบบข้าง.....	64
4.23 บ่มชิ้นตัวอย่างคานทดสอบ 28 วัน.....	64
4.24 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ.....	65
4.25 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูทิตเห็นใบเซ็บบริเวชันดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 1.....	67
5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 1	68
5.3 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 1 S.....	68
5.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 1 S	69
5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 1 S	70
5.6 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 2 L.....	70
5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 2 L	71
5.8 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 2 L-S.....	71
5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 2 L-S	72
5.10 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 3 L.....	73
5.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 3 L	74
5.12 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 3 L-S.....	74
5.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 3 L-S	75
5.14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ..... กับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำของคาน B 3 L-S	76
ก.1 แสดงหน่วยแรง และความเครียดในหน้าตัดคาน.....	87
ก.2 แสดงแผนภาพของแรงเฉือน และแผนภาพของ โมเมนต์ค้ด.....	90
ก.3 แสดงน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำ และแผนภาพของ โมเมนต์ค้ด.....	91
ก.4 หน้าตัดแปลงร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงค้ด.....	92
ข.1 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสขี้ดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1.....	97
ข.2 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสขี้ดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.3 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3.....	100
ข.4 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4.....	102
ข.5 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5.....	103
ข.6 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....	106
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.7 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....	108
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.8 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....	109
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.9 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....	111
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.10 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m <sup>3</sup> .....	112
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.11 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....	115
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.12 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....	117
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.13 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....	118
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.14 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....	120
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.15 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m <sup>3</sup> .....	121
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.16 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....	124
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.17 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....	126
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.18 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....127 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.19 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....129 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.20 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m <sup>3</sup> .....130 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.21 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....133 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.22 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....135 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.23 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....136 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.24 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....138 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.25 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m <sup>3</sup> .....139 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.26 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....142 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.27 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....144 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.28 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....145 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.29 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....147 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.30 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m <sup>3</sup> .....148 ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.31 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,400 kg/m <sup>3</sup> .....150	

เอกสารนี้ ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1 การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.32 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,400 kg/m <sup>3</sup> ..	152
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.33 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,400 kg/m <sup>3</sup> .....	153
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.34 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,400 kg/m <sup>3</sup> .....	155
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.35 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,400 kg/m <sup>3</sup> .....	156
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.36 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....	158
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.37 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....	160
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.38 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....	161
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.39 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....	163
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.40 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m <sup>3</sup> .....	164
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	
ข.41 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m <sup>3</sup> .....	166
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1	
ข.42 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m <sup>3</sup> .....	168
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2	
ข.43 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m <sup>3</sup> .....	169
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3	
ข.44 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m <sup>3</sup> .....	171
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4	
ข.45 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m <sup>3</sup> .....	172
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.46 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 3 ชั้น.....	173
ข.47 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ Neutral Axis ในคาน 3 ชั้น.....	175
ข.48 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 3 ชั้น.....	181
ข.49 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ 3 ชั้น ในคาน.....	183
ข.50 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 2 ชั้น.....	190
ข.51 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ Neutral Axis ในคาน 2 ชั้น.....	191
ข.52 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 2 ชั้น.....	195
ข.53 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ 2 ชั้น ในคาน.....	197



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการใช้คอนกรีต และเหล็กเสริมที่มีกำลังสูง เช่น การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้น้ำตักคานที่ได้รับการออกแบบมีความลึกน้อยลง และยังเป็นการลดปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด แต่ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะยังไม่สมบูรณ์จนกว่าจะผ่านสองหลักเกณฑ์คือการตรวจสอบกำลัง และความสามารถในการใช้งานที่ประกอบด้วยการตรวจกำลังรับ โมเมนต์คัต แรงเฉือนรวมถึงกำลังรับ โมเมนต์บิด ส่วนการตรวจสอบความสามารถในการใช้งานคือการแอ่นตัว การแตกร้าว การสนิมเสเทือนและอื่นๆ โดยส่วนมากการตรวจสอบความสามารถในการใช้งานมีความสำคัญที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของการแอ่นตัว เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องรับแรงปกติกระทำเป็นเวลานาน จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ เช่น น้ำหนักคาน พื้น และผนัง หรือน้ำหนักบรรทุกจรถาวร คอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนเสเทิน ซึ่งรับหน่วยแรงอัดจะเกิดการคืบ และเกิดการหดตัวของไฟเบอร์ต่างๆซึ่งมีผลทำให้ความโค้งของชิ้นส่วนที่คานเพิ่มขึ้น และคานเกิดการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นจากการแอ่นตัวทันที เมื่อคานมีแรงปกติกระทำการแอ่นตัวทันที รวมกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการคืบในคอนกรีต เรียกว่าการแอ่นตัวระยะยาว ผลของการคืบทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบ ถึงแม้ว่าการคืบที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งานทั่วไป จะไม่ลดกำลังขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีผลต่อพฤติกรรม เนื่องจากการคืบขึ้นอยู่กับเวลาดังนั้นการแอ่นตัวตัวสุดท้ายของคาน อาจจะมีมากกว่าการแอ่นตัวทันทีสองถึงสามเท่า ดังนั้นผู้ออกแบบจะต้องคำนึงการแอ่นตัวสุดท้ายนี้ไม่ว่าจะเป็นในคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตอัดแรง จะต้องตรวจว่าโครงสร้างยังคงใช้งานได้และการแอ่นตัวสุดท้ายต้องน้อยกว่าค่าที่ยอมให้

จากการวิจัยที่ผ่านมา โดยส่วนใหญ่ได้ทำการทดสอบและทำการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ในรูปแบบต่างๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ และน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุด พบว่าระยะแอ่นตัวที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับระยะแอ่นตัว ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกันดี จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตต้องใช้เวลาคงทดลองระยะยาวแต่ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้หาวิธีการทดสอบให้น้อยลง เพื่อศึกษาผลการคืบและการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น โดยใช้

คอนกรีตน้ำหนักธรรมดาและคอนกรีตโฟมซีเมนต์ เนื่องจากคอนกรีตโฟมซีเมนต์มีค่า โมดูลัสยืดหยุ่น น้อยกว่าคอนกรีตน้ำหนักปกติที่กำลังอัดเท่ากัน โดยเทียบให้เป็นค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต น้ำหนักธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผล โดยใช้ทฤษฎีการคืบ และการวิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวของคอนกรีต เพื่อหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงและสามารถ ทำนายการแอ่นตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ถูกจัดทำขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีการคืบสำหรับใช้ทำนาย โมดูลัสยืดหยุ่นที่ลดลงภายใต้ น้ำหนักค้างที่กำลังอัด 240 กก/ซม<sup>2</sup> โดยใช้ น้ำหนักค้างที่ระดับแตกต่างกันของน้ำหนักประลัยของคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาหาการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีการเปลี่ยนค่า โมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากผลการคืบ โดยใช้คอนกรีตธรรมดาปกคลุมเหล็กเสริมรับแรงดึงและคอนกรีต โฟม ใ้รับแรงอัด
3. เพื่อศึกษาหาวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนคอนกรีตธรรมดาที่มีการเปลี่ยนค่า โมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากการคืบ โดยใช้คอนกรีต โฟมที่กำลังอัดเทียบเท่ากันที่หน่วยน้ำหนักแตกต่างกัน
4. เพื่อศึกษาหาแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาแบบจำลองทำนายการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น ที่ใช้ คอนกรีตธรรมดากับคอนกรีต โฟมภายในคานหนึ่งตัว
5. เพื่อศึกษาความสอดคล้องของการแอ่นตัว ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีต โฟม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้มีดังต่อไปนี้

1. พิจารณาผลการคืบ ภายใต้ น้ำหนักค้าง 25% และ 50% ของน้ำหนักประลัยของคอนกรีต
2. ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ใช้คอนกรีตธรรมดากับคอนกรีต โฟมเป็น ค่า การแอ่นตัวระยะยาวที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีต โฟมที่หน่วยน้ำหนักแตกต่างกัน แต่มีกำลังอัดเทียบเท่า กัน
4. พิจารณาแต่คานที่เสริมรับแรงดึง (Single Reinforced Beam)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. พิจารณาแต่คานแบบจูดรองรับแบบธรรมดา (Simple Beam)
6. พิจารณาแต่ผลของน้ำหนักกระทำแบบสถิต (Static Load)
7. ใช้เหล็กเสริมความยาวมาตรฐาน SD40 และเหล็กเสริมตามขวางมาตรฐาน SR24

#### 1.4 สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แรงภายในหน้าตัดใด ๆ ของคานจะต้องสมดุลกับแรงที่มากระทำ
2. หน้าตัดของคานทั้งก่อนและในขณะที่มีแรงกระทำบนคาน ต้องยังคงเป็นระนาบ
3. วัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปตามกฎของฮุก นั่นคือหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรง
4. การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์
5. ทิศกำลังต้านแรงดึงของคอนกรีตได้แนวแกนสะเทินที่  $10\% f_c'$
6. หน่วยแรงและความเครียดที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูป เนื่องจากการคืบยังเป็นเชิงเส้น
7. พิจารณาแต่ผลการคืบของคอนกรีต

#### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษานี้จะทำการศึกษิตตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้วางไว้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมและสมมติฐานต่าง ๆ รวมถึงรายงานการวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นความรู้พื้นฐาน และแนวทางในการทำวิจัย
2. เตรียมการทดสอบโดยมีการควบคุมให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน ทุกตัวอย่างเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรต้นที่มีต่อผลต่อตัวแปรตามได้อย่างสะดวก
3. ทำการทดสอบคานตัวอย่างและเก็บข้อมูลการทดสอบ
4. นำข้อมูลที่ได้อมาวิเคราะห์ พร้อมกับเปรียบเทียบผลที่ได้กับทฤษฎีและผลงานวิจัยที่ผ่านมา
5. สรุปผลการทดสอบพร้อมอธิบายลักษณะการวิจัยที่เกิดขึ้น
6. จัดทำบทสรุป รายงานผลการทดสอบพร้อมข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่อการศึกษาครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์แล้ว ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจะมีดังต่อไปนี้

1. ทำให้สามารถทำนายการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการลดค่าโมดูลัสของคานคอนกรีต ที่อยู่ภายใต้น้ำหนักค้าง 25% และ 50% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยของแท่งคอนกรีต
2. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ใส่เหล็กปลอก กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใส่เหล็กปลอก
3. ทำให้ทราบถึงความแตกต่างของค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตโฟม เมื่อทำการทดสอบจะได้การแอ่นตัวถูกต้องตามทฤษฎีหรือไม่
4. ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อแบบจำลองที่ใช้ ในการทำคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตโฟม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การเสถียรภาพตามกาลเวลาของคอนกรีต

การเสถียรภาพ (deformation) และการแอ่นตัว (deflection) ของชิ้นส่วนคอนกรีต เป็นสิ่งที่เชื่อได้ว่าปรากฏขึ้นตามพฤติกรรมของหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุที่เป็นการควบคุมได้โดยตรงที่มีวัสดุต่างๆเป็นส่วนประกอบ การเสถียรภาพที่เกิดขึ้นประกอบด้วย ความเครียดจากการหดตัว (shrinkage strain) เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนเปิดออกมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเป็นผลทำให้ผิวหน้าแห้ง ส่วนความเครียดยืดหยุ่นเริ่มต้น (initial elastic strain) เกิดขึ้นเมื่อมีน้ำหนักมากระทำเริ่มแรก และความเครียดจากการคืบ (creep strain) เกิดขึ้นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกค้างตลอดเวลา

การคืบ (creep) เป็นสิ่งที่ทราบกันดีว่ามีความเครียดเพิ่มขึ้นภายในวัสดุภายใต้น้ำหนักค้างตลอดเวลา การเสถียรภาพเริ่มต้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเรียกว่าความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain) ในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นหรือการเสถียรภาพที่ขึ้นอยู่กับการคืบเนื่องจากน้ำหนักค้างเรียกว่าความเครียดจากการคืบ (creep strain) การคืบไม่สามารถหาได้โดยตรงนอกจากจะใช้วิธีลบค่าความเครียดยืดหยุ่น และความเครียดจากการหดตัว (shrinkage strain) ออกจากการเสถียรภาพทั้งหมด (total deformation) ถึงแม้ว่าการหดตัว (shrinkage) และการคืบ (creep) จะเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ขึ้นแก่กันก็ตาม แต่ก็สามารถรวมความเครียดตามกาลเวลา (time-dependent deformation) เข้าด้วยกันตามสมการ (2.1)

$$\begin{aligned} \text{ความเครียดรวม } \varepsilon_t = & \text{ความเครียดยืดหยุ่น } \varepsilon_e + \text{ความเครียดจากการหดตัว } \varepsilon_{sh} \\ & + \text{ความเครียดจากการคืบ } \varepsilon_{cr} \end{aligned} \quad (2.1)$$

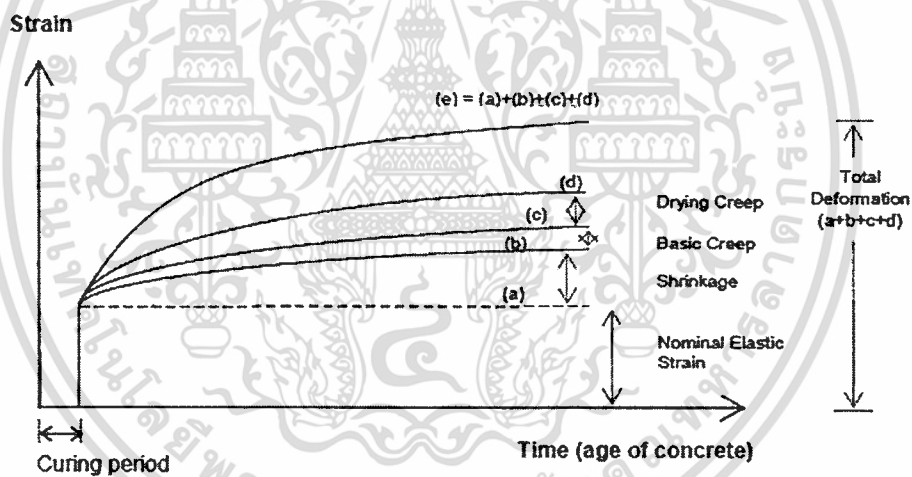
การหดตัว (shrinkage) เป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ส่วนของโครงสร้างเกิดการเสถียรภาพตามกาลเวลาเช่นเดียวกัน การหดตัวของคอนกรีตในลักษณะนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาต่างกันของช่วงอายุคอนกรีตที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำ การลดปริมาตรเมื่อคอนกรีตสูญเสียน้ำ ในทางตรงกันข้ามหากความชื้นเข้าสู่คอนกรีตจะเกิดการขยายตัว (swelling) ดังนั้นการขยายตัวของคอนกรีตจึงเกิดจากการออกหรือเข้าของความชื้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามคอนกรีตจะไม่ขยายตัวสู่ปริมาตรเดิมเมื่อมันหดตัวถึงที่สุดแล้วและได้รับความชื้นกลับมา

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงต่อหน่วยการหดตัวภายใต้จุดพิภักัดสัดส่วน (proportional limit) โดยส่วนมากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดของคอนกรีตไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) เนื่องจากมีการคืบเกิดขึ้นอยู่ ถึงแม้ว่าจะเป็นระยะเริ่มต้นของการรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นการที่จะบ่งบอกถึงขอบเขตระหว่างความเครียดยืดหยุ่นเริ่มต้นและความเครียดจากการคืบที่เกิดขึ้นก่อนจึงเป็นการอธิบายได้ยาก สำหรับวัสดุประสงค์ในทางปฏิบัติที่จริงแล้ว ไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวที่ทำให้เกิดการเสยรูปเริ่มต้นที่เป็นผลจากการพิจารณาหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบที่ความเครียดหยุ่นและการคืบที่ถือว่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายหลังอยู่ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกค้าง โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับชนิดของมวลรวมและกำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 2.1 แสดงกราฟการเสยรูปที่แตกต่างกัน เป็นกราฟที่ประกอบด้วยความเครียดเทียบกับเวลาหลังจากการรับน้ำหนักบรรทุก เส้นแนวราบ (a) แสดงถึงความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain) ขณะที่เส้น โค้งแรก (b) ที่อยู่เหนือเส้นแนวราบแสดงถึงความเครียดจากการหดตัว (shrinkage strain) ส่วนการคืบ (creep) และการคืบตัวแห้ง (drying creep) แสดงตามเส้น โค้ง (c) และ (d) ตามลำดับ การเสยรูปทั้งหมดแสดงตามเส้นที่สูงสุด (e) ในกราฟ



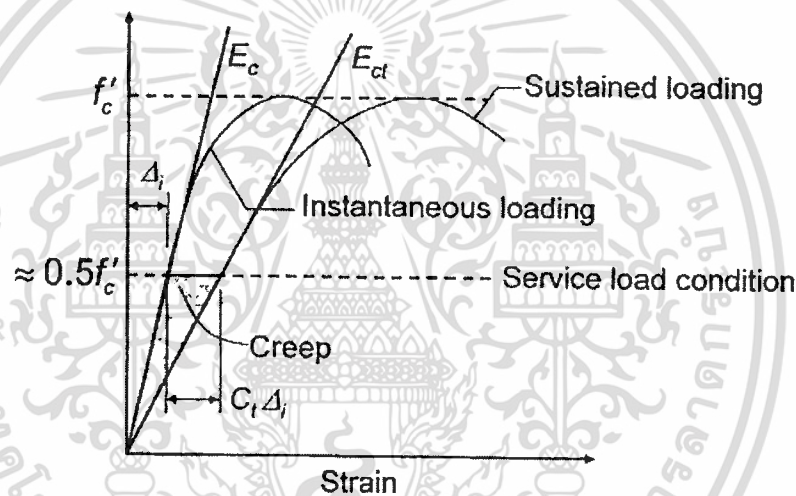
รูปที่ 2.1 การเสยรูปตามกาลเวลาของคอนกรีต

## 2.2 การคืบของคอนกรีต

โดยส่วนใหญ่แล้วคอนกรีตในสภาพใช้งานอาจมีการเสยรูปตามกาลเวลา โดยมีสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1.) การเสยรูปที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load Dependent Deformation) ได้แก่การคืบ (Creep) 2.) การเสยรูปที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load Independent Deformation) ได้แก่การหดตัว (Shrinkage) แต่ในงานวิจัยนี้พิจารณาการเสยรูปตามกาลเวลา เนื่องจากการคืบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืบของคอนกรีต คือ การเสีรูปร่างของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักหรือแรงกดที่บรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน โดยมีข้อสันนิษฐานว่าการคืบของคอนกรีตเกิดจากการหดตัวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต การไหลหนืดของซีเมนต์เพสต์ การไหลของผลึกในวัสดุผสม และการซึมของน้ำจากซีเมนต์เจต เมื่อมีน้ำหนักหรือแรงภายนอกกระทำต่อคอนกรีต การเสีรูปร่างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นทันที และการเสีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะเริ่มเกิดทันทีแต่ต่อเนื่องด้วยอัตราที่ลดลงตลอดเวลาที่คอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุก โดยการเสีรูปร่างทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 1.5 ถึง 4 เท่า ของการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นทันที หนึ่ง เมื่อน้ำหนักหรือแรงอัดที่กระทำซึ่งทำให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าไม่เกิน  $0.5 f'_c$  การคืบของคอนกรีตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ดังภาพที่ 1 การคืบของคอนกรีตจะลดลงเมื่อคอนกรีตกำลังต้านทานแรงอัดสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 ผลการคืบต่อความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

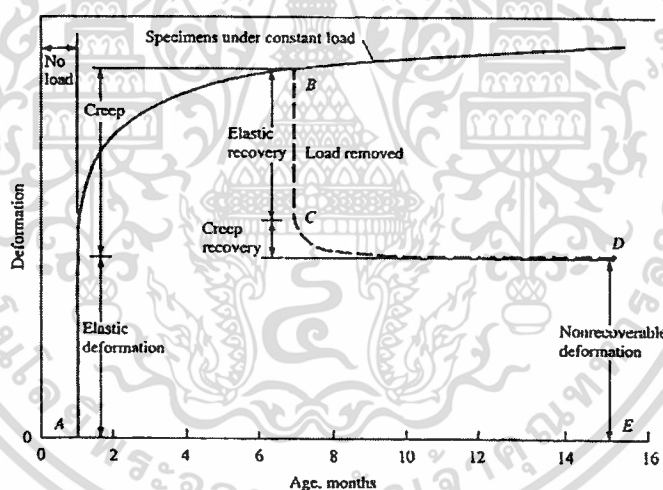
กลไกการคืบแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1.) การคืบพื้นฐาน (Basic Creep) คืบการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นภายใต้กำลังอัดคงที่ ซึ่งปราศจากการสูญเสียความชื้น 2.) การคืบแห้ง (Drying Creep) ส่วนใหญ่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและขนาดของชิ้นส่วน

ปัจจัยที่มีผลต่อการคืบของคอนกรีต, ขนาดของแรง, อายุและกำลังของคอนกรีตเมื่อได้รับแรง, ระยะเวลาที่คอนกรีตรับแรง ซึ่งการคืบยังมีผลมาจากปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของคอนกรีตและสภาวะที่ได้รับ เช่น ประเภทปริมาณและขนาดใหญ่อุดของมวลรวม, ชนิดของซีเมนต์,

ปริมาณซีเมนต์เพสต์, ขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนคอนกรีต, อัตราส่วนปริมาณการต่อพื้นผิวของชิ้นส่วนของคอนกรีต, ปริมาณเหล็กเสริม, สภาพการบ่ม, อุณหภูมิและความชื้น

### 2.2.1 การคืนกลับของการคืบในคอนกรีต

พฤติกรรมการคืบของคอนกรีต จะมีความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปหรือระยะการหดตัวของคอนกรีตกับระยะเวลาที่น้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำค้างไว้ รูปที่ 2.3 แสดงผลการคืบโดยแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการหดตัวของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานภายใต้แรงอัด จะเห็นว่าหลังจากการหดตัวเบื้องต้น การคืบจะเริ่มขึ้นทันทีในปริมาณค่อนข้างมากในตอนแรก แล้วก็ลดลงเรื่อยๆ ประมาณร้อยละ 75 ของการคืบจะเกิดขึ้นในปีแรก และจะเกิดต่อไปเรื่อยๆจนสิ้นสุดประมาณสิ้นปีที่สามหรือสี่ ถ้าเอาแรงออก (เส้นประ BC) จะเกิดการยืดตัวกลับแบบอีลาสติกตามด้วยการยืดตัวกลับจากการคืบ แต่อย่างไรก็ตามจะมีการหดตัวแบบถาวรคงอยู่ สังเกตได้จากระยะระหว่าง จุด D กับ จุด E



รูปที่ 2.3 การหดตัวแบบอีลาสติกและการคืบของคอนกรีต

ถึงแม้ว่าการคืบที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งานทั่วไปจะไม่ลดกำลังขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีผลต่อพฤติกรรม เช่น เนื่องจากการคืบขึ้นอยู่กัเวลา ดังนั้นการแ่นตัวสุดท้ายของคานอาจจะมากกว่าการแ่นตัวเบื้องต้นประมาณสองถึงสามเท่า ส่วนในคอนกรีตอัดแรง เมื่อเกิดการคืบขึ้นในองค์อาคาร จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมลดของแรงอัดทำให้้องค์อาคารเกิดการแตกร้าวและแ่นตัวมากขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งาน และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดคงที่ เมื่อการคืบในคอนกรีตเกิดขึ้น เหล็กเสริมซึ่งยึดเหนี่ยวติดกับเนื้อคอนกรีตก็จะหดตัวตามไปด้วย ทำให้แรงที่เหล็กเสริมต้องรับเพิ่มขึ้นตามแรงที่เนื้อคอนกรีตรับลดลงเนื่องจากการคืบ

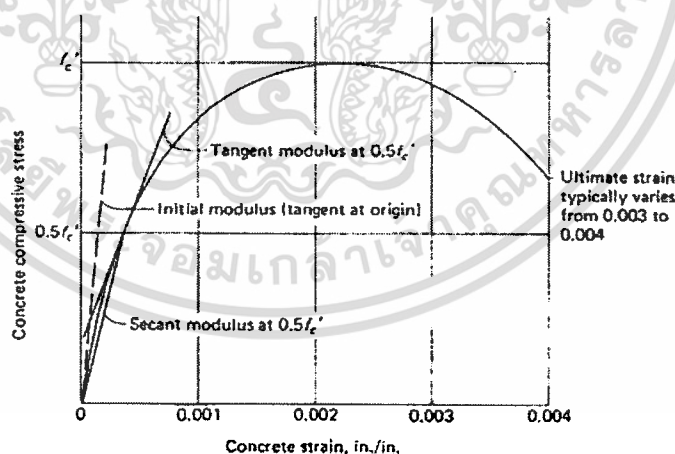
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาดเห็นาใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

### 2.3.1 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต  $E_c$  เป็นตัวบ่งบอกหรือแสดงถึงความต้านทานการเสีรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อน้ำหนักหรือแรงกดกระทำ พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานแลกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ อาจสมมติว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic material) โดยมีความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกค้างเป็นเวลานาน (long-term loading) ต้องพิจารณาความเครียดเนื่องจากการคืบ (creep strain) ด้วย เพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดน้อยลงตามลำดับ ทำให้คอนกรีตเกิดการเสีรูปมากขึ้นและจะมีการเสีรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำ

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวของเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปเส้นสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลาในรูปที่ 2.1 แต่สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ 3 วิธีการต่างๆดังนี้ สำหรับงานวิจัยนี้จะหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Secant Modulus



รูปที่ 2.4 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

1. Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสซึ่ง ได้จากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นให้สัมผัสกับเส้นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวที่จุดเริ่มต้นนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าที่สมมุติว่าคอนกรีตเป็นเสมือน

วัสดุยืดหยุ่น (elastic) เช่นเดียวกับเหล็ก โดยคิดว่าไม่มีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือเอาแรงกระทำ นั่นคือไม่คิดการหดตัวแบบพลาสติกหรือการคืบของคอนกรีต

2. Secant Modulus คำนวณจากความลาดเส้นเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 40 % ถึง 50 % ของหน่วยแรงอัดสูงสุด บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เพราะเป็นค่าที่ได้รวมถึงการหดตัวแบบพลาสติกหรือการคืบของคอนกรีต

3. Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากสัมผัสจุดใดๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีนี้เป็นค่าที่แท้จริงของคอนกรีตทุกระดับของหน่วยแรงอัด

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตามสมการ (2.1)

$$E_c = w^{1.5} 4270 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ซม}^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กก./ซม<sup>2</sup>  
 $w$  = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตัน/ลบ.ม  
 $f'_c$  = กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเมื่ออายุ 28 วัน กก./ซม<sup>2</sup>

สำหรับคอนกรีตธรรมดา (หน่วยน้ำหนัก  $w = 2.323$  ตัน/ลบ.ม) จะได้ว่า

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต} = E_c = 15100 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ซม}^2$$

### 2.3.2 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคืบของคอนกรีต

การคาดคะเนการคืบของคอนกรีตที่เวลาใดๆ อาจพิจารณาได้จากสมการที่ 2.4 ซึ่งเป็นสมการของค่าสัมประสิทธิ์การคืบที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Creep Coefficient) โดย Branson เสนอไว้สำหรับคอนกรีตที่มีค่าขุบตัวไม่เกิน 10 ซม. ความชื้นสัมพัทธ์ 40% โดยได้รับ การบ่มชื้นและรับน้ำหนักหลังจากที่หล่อเสร็จแล้ว 7 วัน

การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เวลาต่างๆจะใช้สมการซึ่งเป็นสมการอ้างอิงที่ได้จากมาตรฐาน ACI 209R-92

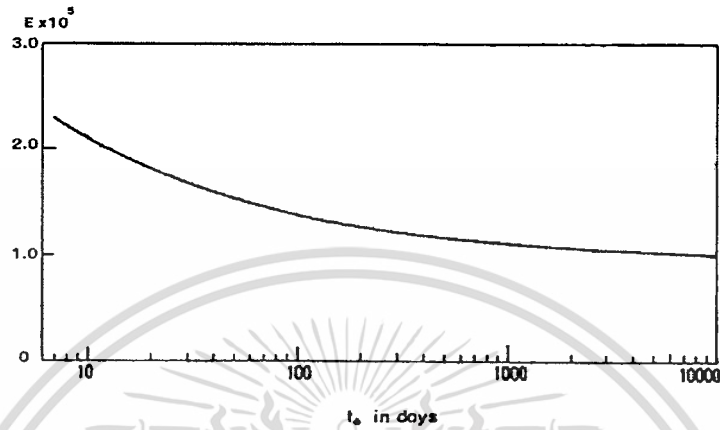
$$E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1 + \phi(t)} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E_{ce} =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ณ เวลา  $t$

$E_{ci} =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำปกติใช้ที่การบ่ม 28 วัน

$\phi(t) =$  สัมประสิทธิ์การคืบ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเวลา

สมการที่อ้างอิงโดย ACI-209 (1992)

$$\phi(t) = \phi_{\infty}(t) \frac{(t-t_0)^{0.6}}{10 + (t-t_0)^{0.6}} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\phi(t) =$  สัมประสิทธิ์การคืบ ณ เวลา  $t$

$$\phi_{\infty}(t) = C_u K_a K_h K_{th} K_s K_f K_e$$

$C_u =$  สัมประสิทธิ์การคืบสูงสุด มีค่าระหว่าง 1.30 ถึง 4.15 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.35

$K_a =$  สัมประสิทธิ์ด้านอายุเมื่อน้ำหนักกระทำ

$$K_a = 1.25t_i^{-0.118} \text{ สำหรับบ่มคอนกรีตด้วยความชื้น}$$

$$K_a = 1.13t_i^{-0.095} \text{ สำหรับบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ}$$

$t_i =$  อายุของคอนกรีตเมื่อน้ำหนักกระทำครั้งแรก (วัน)

( $K_a = 1.00, 0.95, 0.83,$  และ  $0.74$  สำหรับบ่มด้วยความชื้นน้ำหนักระทำ 7, 10, 30, และ 90 วันตามลำดับ  $1.00, 0.95, 0.83,$  และ  $0.74$  สำหรับบ่มด้วยความชื้นน้ำหนักระทำ 7, 10, 30, และ 90 วันตามลำดับ  $K_a = 1.00, 0.90, 0.82,$  และ  $0.74$  สำหรับบ่มด้วยไอน้ำน้ำหนักระทำ 1 ถึง 3, 10,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30, และ 90 วัน ตามลำดับ 1.00, 0.90, 0.82, และ 0.74 สำหรับบ่มด้วยไอน้ำน้ำหนักกระทำ 1 ถึง 3, 10, 30, และ 90 วัน ตามลำดับ)

$K_h$  = สัมประสิทธิ์ด้านความชื้นสัมพัทธ์

$$K_h = 1.27 - 0.0067H \text{ เมื่อ } H > 40\% , H = 1$$

เมื่อ H คือความชื้นสัมพัทธ์ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

( $K_h = 1.00, 0.87, 0.73,$  และ  $0.60$  สำหรับ  $\leq 40, 60, 80$  และ  $100\%$  ความชื้นสัมพัทธ์)

$K_{th}$  = สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นที่สุดของชั้นส่วน

$$K_{th} = 1.00 \text{ สำหรับ } 6 \text{ นิ้วหรือน้อยกว่า และ } 0.90 \text{ สำหรับ } 12 \text{ นิ้ว}$$

$K_s$  = สัมประสิทธิ์การยุบตัว

$$K_s = 0.82 + 0.00264 \cdot S_f$$

เมื่อ  $S_f$  คือ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตในหน่วย มม.

( $K_s = 0.95$  สำหรับ 2 นิ้ว,  $1.00$  สำหรับ 2.7 นิ้ว,  $1.02$  สำหรับ 3 นิ้ว,  $1.09$  สำหรับ 4 นิ้ว, และ  $1.16$  สำหรับ 5 นิ้วของค่ายุบตัว)

$K_f$  = สัมประสิทธิ์ความละเอียด

$$K_f = 0.88 + 0.0024 \cdot \rho_a$$

เมื่อ  $\rho_a$  คือ อัตราส่วนระหว่างมวลรวมละเอียดกับมวลรวมหยาบ

( $K_f = 0.95$  สำหรับ 30%,  $1.00$  สำหรับ 50%, และ  $1.05$  สำหรับ 70% โดยน้ำหนัก)

$K_e$  = สัมประสิทธิ์ปริมาณอากาศ

$$K_e = 0.46 + 0.09a$$

เมื่อ  $a$  คือเปอร์เซ็นต์ปริมาณอากาศ

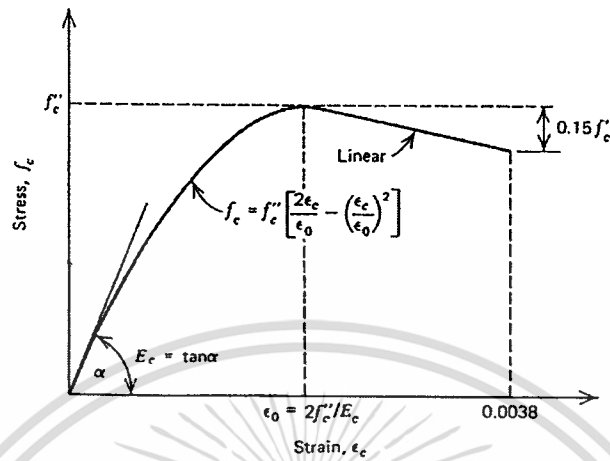
( $K_e = 1.00$  สำหรับ 6%,  $1.09$  สำหรับ 7%, และ  $1.17$  สำหรับ 8% ปริมาณอากาศ)

## 2.4 ความเค้น – ความเครียดของคอนกรีต

สภาวะคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีความเค้นในทิศทางเดียวเท่านั้น คือความเค้นมีแกนเดียว เพราะว่าสถานการณ์เกี่ยวกับโครงสร้างส่วนใหญ่ในคอนกรีตความเค้นมีทิศทางจำนวน

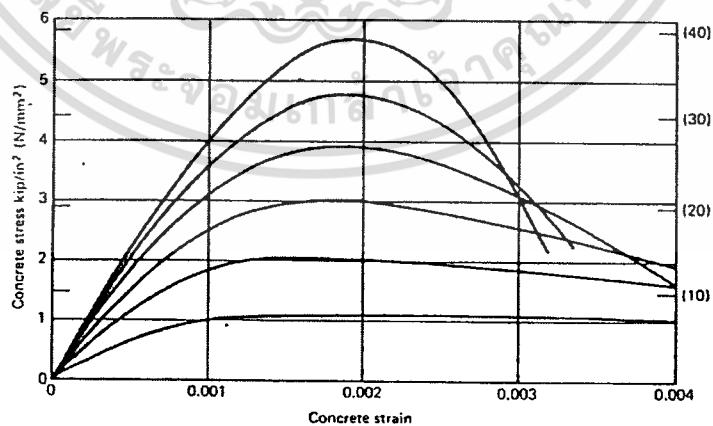
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากมาย แต่ทว่าในสมมติฐานของโครงการวิจัยนี้จะพิจารณาให้คอนกรีตมีสภาวะความเค้นแกนเดียวดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 เส้น โคง้ความเค้น – ความเครียดในอุดมคติ สำหรับคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 2.7 แสดงเส้น โคง้ความเค้น – ความเครียดของคอนกรีตที่ให้แรงกระทำตามแนวแกน โดยทั่วไปที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังรับแรงกระทำตามแนวแกนไม่เท่ากัน การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะปฏิบัติอย่างละเอียด เส้น โคง้พาราโบลาคีรี 2 อย่างกว้างที่ได้เกือบจะเป็นเส้นตรงจนถึงประมาณครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดเส้น โคง้จะค่อยๆ ลดลง ยอดของเส้น โคง้ของคอนกรีตกำลังสูงจะค่อนข้างแหลมแต่ถ้าคอนกรีตกำลังต่ำเส้น โคง้ที่ได้จะมีลักษณะยอดแบน



รูปที่ 2.7 เส้น โคง้ความเค้น – ความเครียดสำหรับคอนกรีตรูปทรงกระบอก ให้แรงกระทำตามแนวแกนที่มีหน่วยแรงอัดต่างๆกัน

ความเครียดที่ค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 0.002 หลังจากค่าความเค้นสูงสุดคอนกรีตยังสามารถทนทานอยู่ได้แม้ว่าจะเกิดรอยร้าวขนานกับทิศทางที่แรงกระทำกับคอนกรีตและคอนกรีตจะวิบัติที่ความเครียดประมาณ 0.003 - 0.004 การทดสอบคอนกรีตกับเครื่องทดสอบอาจล้มเหลวหากอัตราการเพิ่มแรงกระทำเร็วเกินไปจนเกิดการระเบิดขึ้นก่อน เพราะคอนกรีตไม่สามารถดูดซับพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือทดสอบได้ทัน เพราะฉะนั้นการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจำเป็นต้องเป็นไปตามมาตรฐานของการทดสอบ

## 2.5 กานคอนกรีตเสริมเหล็ก

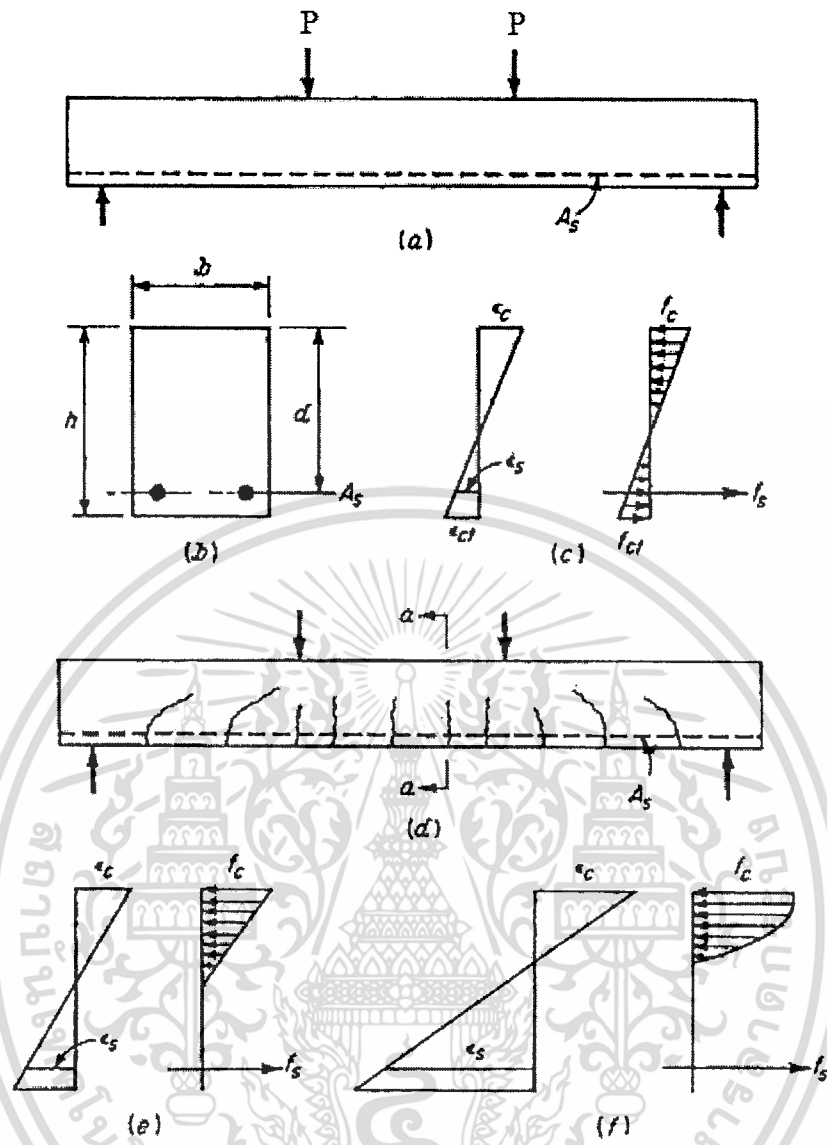
### 2.5.1 นิยาม

กานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่อยู่ใต้อานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Main reinforcement) เรียงไปตามแนวความยาวของกานเพื่อรับหรือต้านโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง เช่น น้ำหนักแผ่นจากผนัง กำแพง น้ำหนักแผ่นจากพื้นอาคาร หรือน้ำหนักที่กระทำแบบจุด เช่น จากคานชอย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเหล็กเสริมทางขวางในตัวกานเพื่อใช้ต้านทานแรงเฉือนส่วนเกินที่เกินกว่าคอนกรีตเองจะรับได้ทั้งนี้ เพราะน้ำหนักบรรทุกที่กระทำจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดหรือแรงเฉือนด้วยเสมอ (Shear Center) เป็นผลให้เกิดหน่วยแรงภายในต่างๆ ในตัวกานคือ หน่วยแรงดัด หน่วยแรงบิด และหน่วยแรงเฉือน ในการคำนวณออกแบบจะต้องเลือกใช้ขนาดรูปตัดของคอนกรีตและปริมาณเหล็กเสริมตลอดจนระยะเรียงเหล็กเสริมให้เหมาะสมเพียงพอให้กานนั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ โดยไม่เกิดการแอ่นหรือโก่งตัวมากเกินไปหรือมีรอยร้าวกว้างมากในสภาวะที่รับน้ำหนักบรรทุกใช้งานปกติทั่วไปกานคอนกรีตเสริมเหล็กมีรูปตัดเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความลึกของกานมากกว่าความกว้าง

### 2.5.2 พฤติกรรมของกานคอนกรีตเสริมเหล็ก

กานคอนกรีตล้วนไม่มีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดเนื่องจากกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตนั้นต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดมาก ดังนั้นกานคอนกรีตล้วนจะพังด้วยแรงดัดที่น้ำหนักบรรทุกต่ำมากทำให้กำลังรับแรงอัดไม่ถูกใช้อย่างเต็มที่ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงมีการใช้เหล็กเสริมกำลังบนด้านรับแรงดัดใกล้กับผิวนอกสุดของด้านรับแรงดัด โดยมีระยะหุ้มเพื่อป้องกันผลกระทบจากไฟไหม้และการกัดกร่อน ดังนั้นแรงดัดส่วนใหญ่ในกานคอนกรีตจึงถูกต้านทานโดยเหล็กเสริม ในขณะที่คอนกรีตจะถูกใช้ให้รับแต่แรงอัด การทำงานร่วมกันของวัสดุทั้งสองชนิดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อไม่มีการเลื่อนไถลระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยการใช้เหล็กข้ออ้อยที่ให้กำลังยึดเหนี่ยวสูง และถ้าจำเป็นก็จะใช้การงอข้อที่ปลายเหล็กเสริม รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของกานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้การรับน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก

เมื่อน้ำหนักบรรทุกบนคานค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงระดับที่ทำให้คานพัง คานจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันไปตามขนาดของน้ำหนักรบรรทุก ที่น้ำหนักเบาซึ่งหน่วยแรงดึงในคอนกรีตยังไม่ถึงค่าโมดูลัสแตกหักหน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตจะช่วยกันต้านทานโมเมนต์ ด้านหนึ่งจะรับแรงดึงและอีกด้านหนึ่งของแกนสะเทินจะรับแรงอัด นอกจากนั้นเหล็กเสริมซึ่งจะมีหน่วยแรงดึงเท่ากับคอนกรีตที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะมีหน่วยแรงดึงด้วย ที่สภาวะนี้หน่วยแรงในคอนกรีตจะมีค่าน้อยและเป็นสัดส่วนกับความเครียด การกระจายของหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและในเหล็กเสริมตลอดทั้งความลึกของหน้าตัดเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.8c

เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนหน่วยแรงดึงเพิ่มถึงกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ก็จะเกิดการแตกร้าวจากแรงดึงขึ้นและขยายตัวขึ้นด้านบนอย่างรวดเร็วถึงบริเวณแกนสะเทิน ซึ่งจะขยับขึ้นเนื่องจากรอยร้าวเช่นกัน รูปแบบการกระจายของรอยร้าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.8d ในคานที่ได้รับ การออกแบบมาอย่างดี ความกว้างของรอยร้าวจะเล็กมาก (ขนาดเส้นผม) จนไม่มีปัญหาของการกัดกร่อนหรือความสวยงาม ในหน้าตัดที่เกิดการแตกร้าวเช่นหน้าตัด  $a-a$  ในรูปที่ 2.8d คอนกรีตจะไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นเหล็กจึงรับแรงดึงทั้งหมด ที่น้ำหนักบรรทุกไม่มากนักถ้าหน่วยแรงอัดในคอนกรีตไม่เกิน  $f_c'/2$  หน่วยแรงและความเครียดจะยังเป็นสัดส่วนกันอยู่ การกระจายหน่วยแรงและความเครียดที่หน้าตัดแตกร้าวจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.8e เมื่อน้ำหนักยังคงเพิ่มขึ้นอีกหน่วยแรงและความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นสัดส่วนกันดังในรูปที่ 2.8f

จนในที่สุดเมื่อถึงกำลังของคานการพังทลายจะเป็นในแบบใดแบบหนึ่งในสองแบบดังนี้หนึ่งถ้าใช้เหล็กเสริมในปริมาณน้อยที่น้ำหนักบรรทุกค่าหนึ่งเหล็กจะเกิดการคราก ซึ่งจะยึดออกเป็นปริมาณมากและรอยร้าวจากแรงดึงในคอนกรีตจะแยกออกจนเห็น ได้อย่างชัดเจนและแผ่ขึ้นด้านบนพร้อมกับการแอ่นตัวของคาน เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นความเครียดในบริเวณรับแรงอัดที่เหล็กก็จะ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับของกำลังบีบอัดในคอนกรีต การพังทลายจากแรงอัดครั้งที่สอง นั้นจะเกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกมากกว่าที่ทำให้เหล็กครากเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการถึงจุดครากของเหล็กจะเป็นตัวกำหนดกำลังของคานที่มีเหล็กปริมาณน้อย การวิบัติจากการครากจะค่อยๆ เกิดและถูกสังเกตเห็น ได้เช่นการที่รอยร้าวกว้างและยาวขึ้น และการแอ่นตัวมีมากขึ้น

ในทางกลับกันถ้าเหล็กในคานมีปริมาณมากคอนกรีตอาจทนแรงอัดไม่ไหวก่อนที่เหล็กจะเริ่มคราก ทำให้คอนกรีตพังจากการบีบอัดเมื่อความเครียดมากขึ้นจนถึงประมาณ 0.003-0.004 ในหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวิบัติจากแรงอัดของคอนกรีตจะเกิดขึ้นทันทีทันใด โดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า ด้วยเหตุนี้เองจึงควรกำหนดขนาดของคานเพื่อให้เมื่อต้องรับน้ำหนักเกินแล้ว การวิบัติจะเริ่มโดยการครากในเหล็กเสริม

### 2.5.3 การแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่รับแรงดัด

ในการคำนวณออกแบบส่วน โครงสร้างที่รับแรงดัด เช่น คานหรือแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียว นอกจากจะต้องพิจารณาออกแบบให้มีกำลังความแข็งแรงเพียงพอแล้ว ยังต้องพิจารณาให้ส่วนของโครงสร้างนั้นมีความสามารถในสภาวะใช้งานด้วยซึ่งในที่นี้จะหมายถึงการ โกงตัวที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในแนวตั้งหรือในแนวนอนจากตำแหน่งเดิมส่วนของ โครงสร้างนั้นต้องมีขนาดที่เหมาะสมและไม่มีการดโก่งตัวมากเกินไป หรือมีการเปลี่ยนรูปลักษณะในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุก ใช้งานจนดูจะเป็นเหตุให้ไม่สามารถใช้งาน ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น มีการดกท้องข้างมาก หรือเกิดการสั่นไหวตัวง่าย ซึ่งมีผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้พบเห็นและผู้ใช้อาคาร ตลอดจนมีผลกระทบต่อชิ้นส่วนทั้งที่ไม่ใช่โครงสร้าง (nonstructural elements) และที่เป็นโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(structural elements) เมื่อนำมาประกอบและยึดติด กล่าวคือ ทำให้ผนังกำแพงที่กันห้องหรือเพดานเกิดการแตกร้าวเสียหาย วงกบวงกรอบของประตู หน้าต่างเกิดการบิดงอและไม่สามารถเปิด-ปิดได้ พื้นผิวหลังคาเกิดการ โกงเป็นแอ่งรับน้ำ (ponding) เป็นต้น

การแอ่นตัวของคานประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกจะเกิดขึ้นทันทีภายใต้น้ำหนักกระทำ (initial elastic หรือ instantaneous หรือ immediate หรือ short-term deflection) และส่วนที่สองซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัว (shrinkage) และการคืบ (creep) จะเกิดต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหลายปี หลังจากส่วนแรก การแอ่นตัวในส่วนที่สอง ซึ่งเรียกว่า “การแอ่นตัวระยะยาว” (long-term deflection) เมื่อถึงจุดสูงสุดจะมีค่าประมาณสองเท่าของส่วนแรก

**2.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง**

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีการความเครียดสอดคล้อง และหลักการสมดุลของแรงในหน้าตัด โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

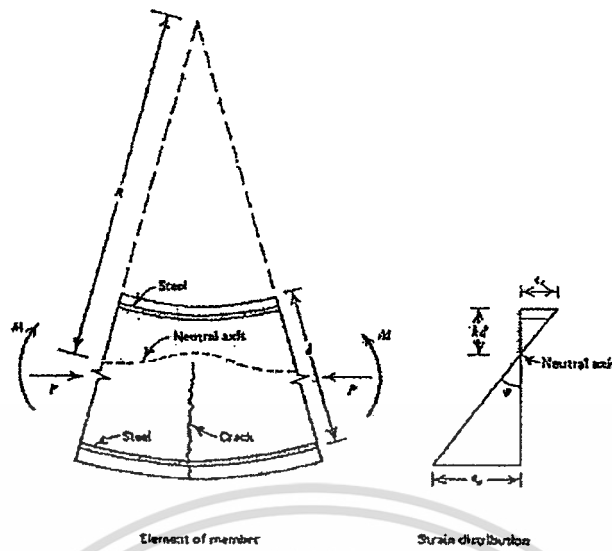
1. หน้าตัดของโครงสร้างจะเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการดัด ซึ่งจะทำให้การกระจายความเครียดสอดคล้องบนหน้าตัดเป็นเส้นตรง
2. คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้จนกระทั่ง ที่ผิวนอกสุดมีค่าหน่วยแรงดึงเท่ากับ โมดูลัสแตกร้าว ( $f_r$ ) หลังจากนั้นคอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทิน (Neutral Axis) จะไม่สามารถรับแรงดึงได้อีกต่อไป
3. เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเครียดในเหล็กเสริมและคอนกรีตจะมีค่าเท่ากัน
4. แรงอัดในคอนกรีตและแรงดึงในเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากัน ตามกฎสมดุลและโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่ขณะใดๆ จะเท่ากับ โมเมนต์ดัด ที่กระทำบนหน้าตัด
5. สามารถทราบความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตเหล็กเสริม

ความโค้งของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งแสดงในรูปที่ สามารถหาได้จากความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมและคอนกรีต ดังสมการที่

$$\phi = \frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_s + \epsilon_c}{d} \tag{2.5}$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง

$$\phi = \frac{M}{EI} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.9 การเสวยรูปของชิ้นส่วนรับแรงดัด

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง โมเมนต์ดัดและความโค้งในทางทฤษฎี จะเริ่มจากการสมมุติให้หน้าตัดมีความโค้งค่าหนึ่ง และจึงทำการคำนวณเพื่อหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมและคอนกรีต ที่ทำให้แรงอัดในคอนกรีตเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริม ซึ่งค่าแรงอัดและแรงดึงนี้เองจะทำให้เกิด โมเมนต์ของแรงคู่ควบสำหรับค่าความโค้งที่สมมุติไว้

2.5.5 การวิเคราะห์การแอ่นตัวทันที

การแอ่นตัวทันทีมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท ให้พิจารณาหาระยะ โคง่ตัวทันทีที่มากที่สุด โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก ของการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับส่วน โครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียว และรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานดังนี้

$$\text{ระยะโคง่ทันที } \Delta_i = K \frac{M_o L^2}{E_c I_e} \tag{2.7}$$

เมื่อ  $E_c =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดา กก./ซม.<sup>2</sup> = 15100√f<sub>c</sub>' กก./ซม.<sup>2</sup>  
 $I_e =$  โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของรูปตัด, ซม.<sup>4</sup>  
 $= (M_{cr} / M_o)^3 I_g + [1 - (M_{cr} / M_o)^3] I_{cr} \leq I_g$  (2.8)

$M_{cr} =$  โมเมนต์ดัดแตกร้าว = f<sub>r</sub> I<sub>g</sub> / y, กก.-ซม.

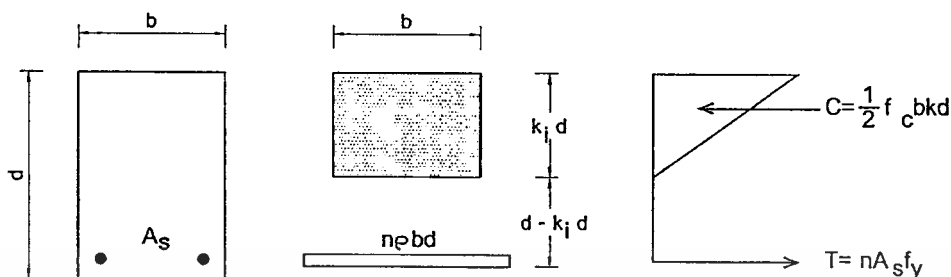
(ค่าโมดูลัสแตกร้าว f<sub>r</sub> = 2.0√f<sub>c</sub>' กก./ซม.<sup>2</sup>)

$M_o =$  โมเมนต์ดัดมากที่สุดที่กระทำอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน กก.-ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_g$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด ซม.<sup>4</sup>

$I_{cr}$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงร้าว ซม.<sup>4</sup>



รูปที่ 2.10 การคำนวณ โมเมนต์ของความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัด

การคำนวณค่า  $I_e$  สำหรับส่วนโครงสร้าง ค.ส.ล. รูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวยุติวิเคราะห์ได้ดังนี้

จากทฤษฎีเส้นตรง ระยะแกนสะเทิน  $k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n$

จากรูปหน้าตัดร้าวเปลี่ยนพื้นที่  $I_{cr} = b(kd)^3 / 3 + nA_s(d - kd)^2$  (2.9)

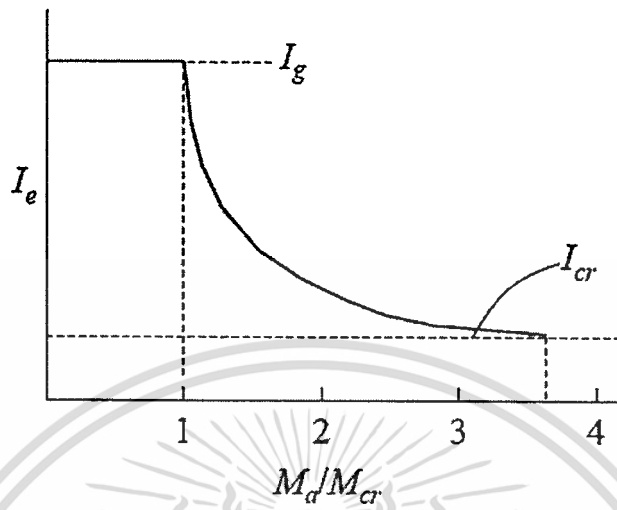
หน้าตัดประสิทธิผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของคาน เนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมที่ไม่เท่ากันและการแตกร้าวที่แตกต่างกัน รวมทั้งความไม่คงที่ของเนื้อวัสดุ ส่งผลให้การคาดคะเนระยะแอ่นตัวให้ถูกต้องเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ

ในบริเวณที่แรงคดต่ำจนไม่มีการแตกร้าวในคาน โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล ( $I_e$ ) จะมีค่าเท่ากับ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมด ในบริเวณที่แรงคดสูงจนเกิดการแตกร้าวมาก โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกร้าวรวมกับค่าของเหล็กเสริมที่แปลงเป็นเนื้อคอนกรีต การที่จะหาโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลที่ทุกตำแหน่งจะต้องใช้เวลามาก มาตรฐานการออกแบบจึงยอมให้ใช้ค่าโดยประมาณสำหรับคานยื่น คานช่วงเดียว และคานต่อเนื่องในบริเวณระหว่างตำแหน่งที่โมเมนต์เปลี่ยนค่า (inflection points)

สมการที่ 2.6 จะใช้ได้ดีเมื่อ  $1 \leq M_o / M_{cr} \leq 3$  แต่ถ้า  $M_o / M_{cr} > 3$  แสดงว่าการแตกร้าวมีมากเกินไป ควรจะใช้  $I_e = I_{cr}$  เลย แต่ถ้า  $M_o / M_{cr} < 1$  ก็แสดงว่า ไม่มีการแตกร้าวขึ้นในหน้าตัด ดังนั้นใช้  $I_e = I_g$  วิธีการในการคำนวณค่า  $I_g$  และ  $I_{cr}$  ที่ระบุโดย ACI นั้นจะใช้ได้กับการคำนวณระยะ โกงตัวของคานก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงจุดคราก และไม่สามารถที่จะใช้ในการคำนวณระยะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

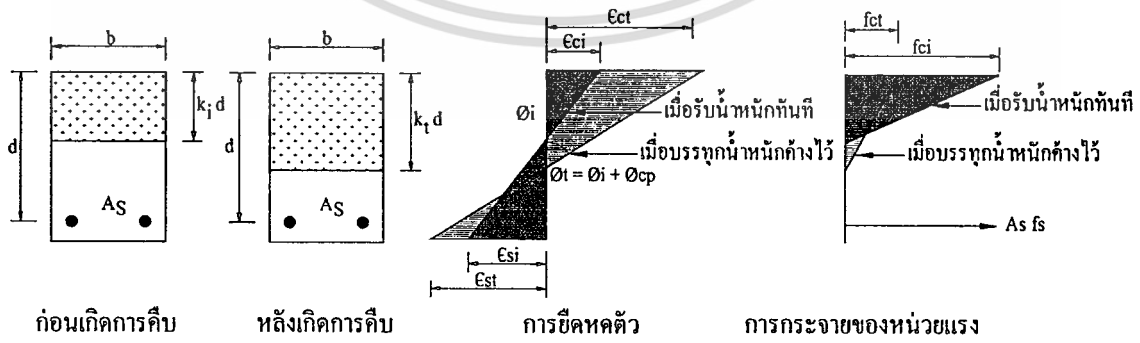
โก่งตัวของคานในช่วงภายหลังการร้าวของเหล็กเสริมได้ เนื่องจากวิธีการนี้จะสมมุติให้ค่าโมเมนต์คดของคานมีค่าคงที่ภายหลังที่เหล็กเสริมร้าว



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของ  $I_e$  ตามอัตราส่วน  $M_a / M_{cr}$

2.5.6 การวิเคราะห์การแอ่นตัวระยะยาว

เมื่อคานมีแรงปฏิกิริยาทำเป็นเวสนามานเช่นแรงตายตัวเนื่องจากน้ำหนักคาน แรงตายตัวอื่นๆ หรือแรงจรถาวร คอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินซึ่งรับหน่วยแรงอัดจะเกิดการคืบ และเกิดการหดตัวของไฟเบอร์ต่างๆ ซึ่งมีผลทำให้ความโค้งของอิลิเมนต์ของคานเพิ่มขึ้น และคานเกิดการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นจากการแอ่นตัวทันทีทันใดเมื่อคานมีแรงปฏิกิริยา การแอ่นตัวทันที  $\Delta$ , รวมกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการคืบและการหดตัวในคอนกรีต เรียกว่าการแอ่นตัวระยะยาว  $\Delta$ , การแอ่นตัวระยะยาวที่เพิ่มขึ้นในระยะแรกจะค่อนข้างมาก และจะมีอัตราลดลงภายหลัง 5 ปีผ่านไป



รูปที่ 2.12 ผลการคืบของคอนกรีตต่อค่าความโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์โดยละเอียดจะได้จากการพิจารณารูปแสดงหน่วยการยึดหดตัวของหน้าตัด ดังรูปที่ 2.11 เนื่องจากโมเมนต์คดบนพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ การคืบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความเครียดและหน่วยแรงอัดในหน้าตัด กล่าวคือแกนสะแทนเลื่อนต่ำลง ความโค้ง  $\phi$  มีค่ามากกว่า  $\phi$  และหน่วยแรงอัดที่ผิวบนลดลงจาก  $f_{ci}$  เป็น  $f_{ct}$  แต่จะสมมุติว่าไม่มีผลกระทบต่อการยึดตัวของเหล็กเสริม

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ให้พิจารณาระยะโก่งที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลาเนื่องจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีต โดยจากการดูระยะโก่งทันทีที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกค้ำ ( $\Delta_i$ ) ด้วยตัวประกอบเนื่องจากการล้า (creep factor :  $\lambda$ ) นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{ค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา} \quad \Delta_t &= \lambda \Delta_i \\ \text{ตัวคูณประกอบเนื่องจากการล้า} \quad \lambda &= \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \end{aligned} \tag{2.10}$$

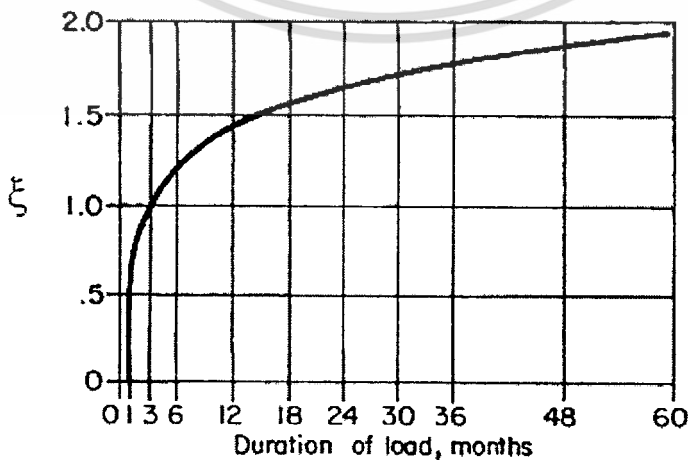
โดยที่  $\rho'$  = อัตราส่วน  $As'/bd$  โดยให้พิจารณาที่กึ่งกลางคานสำหรับคานช่วงเดียวหรือคานต่อเนื่อง และพิจารณาที่ฐานรองสำหรับคานยื่น เมื่อมีเหล็กเสริมรับแรงอัด แม้ว่าการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลังจะไม่ต้องการเหล็กเสริมนี้ก็ตาม

$\xi$  = ตัวประกอบตามกาลเวลาที่มีน้ำหนักบรรทุกค้ำ (time-dependent factor) ซึ่งมีค่าดังนี้

เมื่อบรรทุกค้ำนาน 5 ปี หรือมากกว่า	$\xi = 2.0$
12 เดือน	$\xi = 1.4$
6 เดือน	$\xi = 1.2$
3 เดือน	$\xi = 1.0$

เมื่อระยะเวลาของการบรรทุกน้ำหนักค้ำไม่ตรงตามที่กำหนด ให้หาค่าของ  $\xi$  โดยใช้การเทียบส่วนแบบเชิงเส้น

$$\text{ดังนั้น ระยะโก่งทั้งหมด (Total long-term deflection)} = \Delta_i + \Delta_t \tag{2.11}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบตามกาลเวลา  $\xi$  ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพิภวะการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ในสภาวะใช้งานต่างๆ ที่กำหนดโดย ว.ส.ท. และ ACI ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นตัวที่คำนวณได้

ชนิดขององค์อาคาร	ระยะแอ่นที่พิจารณา	พิภวะระยะแอ่น
1. หลังคา ซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมากเกินไป	ระยะแอ่นตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	L/180
2. พื้น ซึ่งไม่รองรับหรือไม่ยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างแต่คาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมากเกินไป		L/360
3. หลังคาหรือพื้น ซึ่งรองรับหรือยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมากเกินไป	ระยะแอ่นตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง(เป็นผลรวมของระยะแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้างทั้งหมด กับระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)	L/480
4. หลังคาหรือพื้น ซึ่งรองรับหรือยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมากเกินไป		L/240

## 2.6 คอนกรีตมวลเบา

การทดสอบเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเหล็กต้องใช้ระยะเวลาหลายปี จึงจะได้ผลการทดสอบที่สามารถสรุปถึงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จึงมีการคิดค้นจะทำให้คอนกรีตมีค่า โมดูลัสยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไปจากคอนกรีตธรรมดา ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงนำเอาคอนกรีตที่เรียกว่า “คอนกรีตมวลเบา” มาใช้ในการทดสอบ แต่คอนกรีตมวลเบาก็มีข้อจำกัดในด้านการผลิตที่จะทำให้น้ำหนักเบาลงกว่าคอนกรีตธรรมดา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยทั่วไปหากจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนักสามารถแบ่ง ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ลักษณะการใช้งานกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา

ลักษณะการใช้งาน	น้ำหนัก	ระยะเวลา บ่ม	กำลังต้านทาน แรงอัด
งานโครงสร้าง	1,400 ถึง 1,800	28 วัน	ไม่ต่ำกว่า 170
งานกำแพงกันรั้วและใช้เป็นวัสดุทนไฟ	1,800 ถึง 2,050	28 วัน	ไม่ต่ำกว่า 120
งานฉนวนกันความร้อน	315 ถึง 1,100	28 วัน	7 ถึง 70

อย่างไรก็ตาม ถ้าจะแบ่งคอนกรีตเบาออกเป็นประเภท ตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต ก็สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา คอนกรีตฟรูนหรือโฟมคอนกรีต คอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด สำหรับโครงการวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะ “คอนกรีตฟรูนหรือโฟมคอนกรีต”

คอนกรีตฟรูนหรือโฟมคอนกรีต เป็นคอนกรีตเบาอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้น้ำหนักเบาด้วยวิธีทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตประเภทนี้เป็นคอนกรีตที่ได้จากการทำให้เกิดฟองอากาศ หรือที่เรียกว่า “ โฟม ” ขนาด 0.1 ถึง 1.0 mm. ในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตฟรูนมีรูพรุนจากฟองอากาศและมีมวลแตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา คือไม่ใช้มวลรวมหยาบในการผลิต บางครั้งจึงเรียกว่า Aerated Mortar ซึ่งเป็นการเรียกตามลักษณะของคอนกรีต ใช้กันในอังกฤษและอเมริกาแต่ในประเทศในทวีปยุโรปจะเรียกตามกรรมวิธีการผลิต โดยจะเรียกว่า Form Concrete โดยทั่วไปองค์ประกอบของคอนกรีตฟรูนนี้ผลิตโดยใช้ Autoclave Aerated Concrete

วิธีการผลิตคอนกรีตฟรูนหรือโฟมคอนกรีตมี 2 วิธี

วิธีแรกเป็นวิธีทางเคมี โดยใช้ผลของการทำปฏิกิริยาเคมี-ทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อคอนกรีต ในขณะที่ยังมีสภาพ Plastic

วิธีที่สองเป็นการทำให้เกิดฟองอากาศ (Foaming Agent) แล้วผสมลงในส่วนผสมคอนกรีต ให้ฟองอากาศกระจายในส่วนผสมของซีเมนต์และทรายละเอียดที่ยังอยู่ในสภาพ Plastic จากนั้นก็ปล่อยให้แข็งตัวเนื่องจากคอนกรีตฟรูนมีโพรงที่เกิดจากการแทรกตัวของฟองอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง มีน้ำหนักเบาหน่วยน้ำหนักประมาณ 200 ถึง 300 kg/m<sup>3</sup>

ข้อแตกต่างระหว่างคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา กับคอนกรีตธรรมดา

1. คอนกรีตเบาดูดซึมน้ำได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากมีรูพรุนมากกว่า
2. คอนกรีตมวลเบาหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5-40 %
3. คอนกรีตมวลเบาอาจล้ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา
4. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าประมาณ  $\frac{1}{2}$  ถึง  $\frac{3}{4}$  เท่าของคอนกรีตธรรมดา เมื่อมีค่ากำลัง

ต้านทานแรงอัดประลัยเท่ากัน

5. สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาประมาณ  $7 \times 10^{-6}$  ถึง  $14 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

## 2.7 การควบคุมคุณภาพคอนกรีต

### 2.7.1 การทำคอนกรีต

1. อัตราส่วนผสมวัสดุ เมื่อใช้มวลรวมอย่างเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสม ต่างกัน จะให้กำลังของคอนกรีตต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใช้ปริมาณน้ำผสม เพื่อเพิ่มความสามารถได้ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ยิ่งมาก กำลังของคอนกรีตยิ่งลดลง ยึดหดตัวตัวมากและมีรูโพรงมากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง

2. การซังหรือดวงส่วนผสม หากใช้การดวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการซังส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

3. การผสมคอนกรีต จะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่มีทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

4. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะที่ลำเลียงหรือเท จะมีผลทำให้กำลังของ คอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

5. การใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในการผสมคอนกรีตมวลเบาจะต้องใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมโดยไม่เหลวเกินไปและไม่เหนียวเกินไป ซึ่งอัตราส่วนจะส่งผลต่อกำลังอัด ของคอนกรีตอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ  $w/c = 0.5$

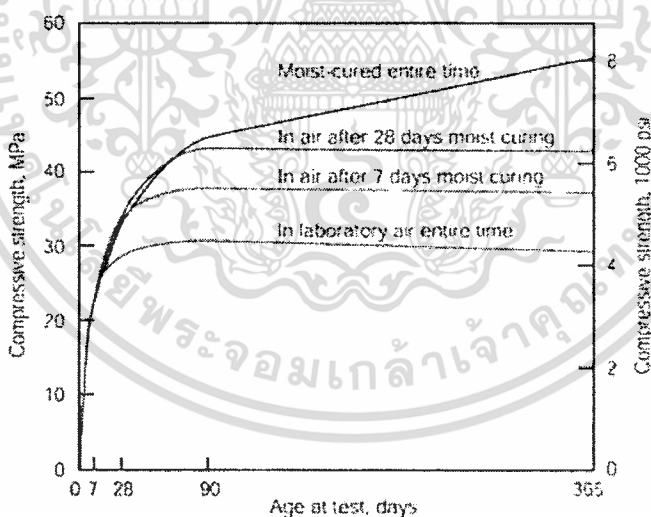
6. การผสมโฟมเพื่อทำคอนกรีตมวลเบาจะต้องผสมให้โฟมเข้ากับเนื้อคอนกรีตให้ดีและจะต้องใส่โฟมที่มีเม็ดละเอียดจริงเพื่อจะได้กำลังอัดที่ดีที่สุด

## 2.7.2 การบ่ม (Curing)

การบ่ม (Curing) คือ การรักษาความชื้นและอุณหภูมิของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตยังมีอายุในช่วงเริ่มต้น เพื่อให้คอนกรีตมีโอกาสพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการ เช่น กำลังความคงทน ความทึบน้ำ ความต้านต่อการสึกกร่อน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น คอนกรีตควรได้รับการบ่มทันทีหลังจากเทและตกแต่งผิวคอนกรีตเสร็จ

การบ่มคอนกรีตที่เพียงพอและเหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง มีความทึบน้ำ มีความต้านทานต่อความเค้นและการสึกกร่อนมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกถ้าได้รับการบ่มที่ดีหลังจากนั้นกำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ดังรูปที่ 2.13 แสดงกำลังที่เพิ่มขึ้นสำหรับคอนกรีตที่มีช่วงเวลาการบ่มขึ้นที่ต่างกัน

กรรมวิธีการบ่มขึ้นอยู่กับสภาพคอนกรีตและสภาพแวดล้อมสำหรับงานทั่วไปใช้การบ่มแบบธรรมดาที่เพียงพอแต่ในกรณีอากาศร้อนหรือเย็นต้องใช้กรรมวิธีการบ่มด้วยวิธีพิเศษ หากขาดความชื้นกำลังของคอนกรีตจะยังคงเพิ่มขึ้นอีกระยะหนึ่งเพราะคอนกรีตยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ภายในเนื้อคอนกรีตหลังจากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของคอนกรีตตกลงมาเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ กำลังคอนกรีตจะไม่เพิ่มขึ้นอีกดังนั้นเราจึงควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดจนกว่าคอนกรีตมีคุณสมบัติตามต้องการ



รูปที่ 2.14 ผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มขึ้นที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยส่วนใหญ่งานวิจัยในอดีตทั้งในเชิงวิเคราะห์ และเชิงทดลองได้เน้นการทำนายพฤติกรรม การแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกระยะสั้น โดยวิธีการวิเคราะห์เป็นที่ ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง สำหรับพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนัก บรรทุกค้าง เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรทดลอง ได้มี ผู้ทำการวิจัยไว้ส่วนหนึ่งแล้วซึ่งมีความสำคัญต่อการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก จึงได้รวบรวมและคัดย่อ ผลงานวิจัยมาพอสังเขป

#### 3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Washa และ Fluck (1952) ได้ศึกษาผลกระทบของเหล็กเสริมรับแรงอัดต่อการคืบ (Creep) ของ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการทดสอบคาน 30 ตัวที่มีฐานรองรับแบบธรรมดาภายใต้น้ำหนักของตัว คานเอง และน้ำหนักบรรทุกอย่างสม่ำเสมอจากก้อนคอนกรีตเป็นเวลา  $2\frac{1}{2}$  ปี คาน 30 ตัวแบ่งเป็น คาน ที่มีเฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง 10 ตัว คานที่มีเหล็กเสริมรับแรงอัดปริมาณครึ่งหนึ่งของเหล็กเสริมรับ แรงดึง 10 ตัว และคานที่ปริมาณเหล็กรับแรงอัดเท่ากับเหล็กเสริมรับแรงดึง 10 ตัว คานทุกไม่มีการ เสริมเหล็กปลอก และเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยค่าการวัด อัตราส่วนของค่าการแอ่นตัวทั้งหมดที่ เวลา  $2\frac{1}{2}$  ปี ต่อค่าการแอ่นตัวทันทีที่เวลาเป็นศูนย์ จากการทดสอบได้ผลสรุปดังนี้

1. เหล็กเสริมรับแรงอัดในคานคอนกรีตเหล็กช่วงเดียว ช่วยลดการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบ การเสริมเหล็กรับแรงอัดเท่ากับปริมาณเหล็กรับแรงดึงทำให้การแอ่นตัวเนื่องจากการคืบลดลงประมาณ ครึ่งหนึ่งของคานที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด ส่วนการเสริมเหล็กรับแรงอัดเท่ากับครึ่งหนึ่งปริมาณ เหล็กรับแรงดึงทำให้การแอ่นตัวเนื่องจากการคืบลดลงประมาณ 1 ใน 3 ของคานที่ไม่มีเหล็กรับแรงอัด

2. หลังจาก  $2\frac{1}{2}$  ปีของการรับน้ำหนักบรรทุกค้าง การแอ่นตัวเนื่องจากการคืบเฉลี่ยสำหรับคาน ที่ไม่มีเหล็กรับแรงอัดจะมีค่าการแอ่นตัวเป็น 2 เท่าของการแอ่นตัวทันที ในขณะที่ค่าเฉลี่ยสำหรับคาน ที่เต็มไปด้วยเหล็กรับแรงอัดการแอ่นตัวมีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการแอ่นทันที

3. โค้งของการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบสำหรับคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด โค้งการแอ่นตัว จะอยู่ในระดับขนานกับแนวราบ ก่อนโค้งการแอ่นตัว สำหรับคานที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด โดย สิ้นสุดที่  $\frac{1}{2}$  ปี ของการรับน้ำหนักบรรทุกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความเครียดเนื่องจากการคืบที่ระดับของเหล็กรับแรงดึง มีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.009% กับ 0.024% ซึ่งเป็นค่าที่จำนวนน้อยเมื่อเทียบกับความเครียดอัดเนื่องจากการคืบ มีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.043% กับ 0.177%

5. การเสริมเหล็กเสริมรับแรงอัดเท่ากับจำนวนเหล็กรับแรงดึง ความเครียดอัดเนื่องจากการคืบ มีค่าลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 60% ส่วนการเสริมเหล็กเสริมรับแรงอัดเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนเหล็กรับแรงดึง ความเครียดอัดเนื่องจากการคืบมีค่าลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 40%

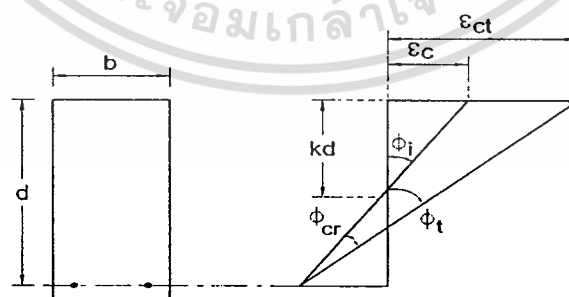
6. การใช้เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่มีผล ทำให้ความเครียดดึง เนื่องจากการคืบลดลง

7. หลังจาก  $2\frac{1}{2}$  ปีของการรับน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำ ค่าเฉลี่ยความเครียดอัดเนื่องจากการคืบ สำหรับคานที่ไม่มีเหล็กรับอัดอยู่ประมาณ 4 และมากกว่า  $\frac{1}{4}$  เท่าของค่าความเครียดทันที ในขณะที่ค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยความเครียดอัดเนื่องจากการคืบสำหรับคานที่เต็มไปด้วยเหล็กรับอัดอยู่ประมาณ 2 และมากกว่า  $\frac{1}{3}$  เท่าของค่าความเครียดทันที

8. หลังจากการรับน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำ  $2\frac{1}{2}$  ปี การแอ่นตัวเนื่องจากการคืบสำหรับคานที่มีอัตราส่วน L/D เท่ากับ 70 มีการแอ่นตัวมากกว่า 4 ถึง 6 เท่า ของคานที่มีอัตราส่วน L/D เท่ากับ 20

Sozen และ Corley (1966) ได้ทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีฐานรองรับแบบธรรมดา ซึ่งไม่มีเหล็กรับแรงอัดเป็นจำนวน 4 ตัว แต่จะนำมาเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์เพียง 3 ตัว วันและอีก 1 ตัวใช้ในการศึกษาผลของการหดตัว (Shrinkage)

คานทั้ง 3 ตัวนี้มีน้ำหนักกระทำห่างจากปลายทั้งสองข้างเป็นระยะ  $\frac{L}{4}$  ของความยาวคาน น้ำหนักที่กระทำ P มีค่าเท่ากับ 1016 กก. สำหรับคานทุกตัวโดยใช้เวลาในการทดสอบ 23 เดือน จากการศึกษาโดย Sozen และ Corley สมมติให้ความเครียดที่ระดับเหล็กมีค่าคงที่ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลของการคืบต่อค่าความโค้งของ Sozen และ Corley

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืบ (Creep) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความเค้นและหน่วยแรงอัดในหน้าตัดมีผลให้แกนสะเทิน (Neutral axis) เลื่อนต่ำลง ความโค้ง  $\phi_t$  ได้จากผลรวมระหว่าง  $\phi_i$  กับ  $\phi_{cr}$

$$\phi_t = \phi_i + \phi_{cr} \quad (3.1)$$

$$\phi_i = \frac{M}{EI_c} = \frac{\varepsilon_c}{kd} \quad (3.2)$$

$$\phi_{cr} = \frac{C_r \varepsilon_c}{d} = \frac{C_r}{d} \phi_i kd = kC_r \phi_i \quad (3.3)$$

ในคานารูปสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด เหล็กเสริมรับแรงอัดทำหน้าที่ชะลอการหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากการคืบ (Creep) ขณะที่โมเมนต์มีค่าคงที่แรงอัดในพื้นที่หน้าตัดจะแบ่งกันรับระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต ทำให้หน่วยแรงอัดที่ผิวบนของคานาเมื่อ  $t = 0$  มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดในกรณีคานาเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว และจากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบเป็น

$$C_r = 3 \frac{\rho'}{\rho} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 Sozen และ Corley ได้ใช้คำนวณหาการแอ่นตัวของคานา กับตัวอย่างคานาของผู้วิจัยรายอื่นที่ใช้อ้างอิง เมื่อเปรียบเทียบผลการแอ่นตัวระหว่างค่าที่ได้จากการวัด กับค่าที่ได้จากการคำนวณพบว่าให้ค่าสอดคล้องกัน แต่สำหรับคานาที่มีอัตราส่วนร้อยละของเหล็กเสริมต่อการแอ่นตัวที่ได้จากการคำนวณโดยส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าการแอ่นตัวที่ได้จากการวัด ซึ่งเป็นไปได้ว่าค่าความแตกต่างนี้เกิดจากผลหน่วยแรงดึงในคอนกรีต และเงื่อนไขการรับน้ำหนักบรรทุกทุก เป็นต้น

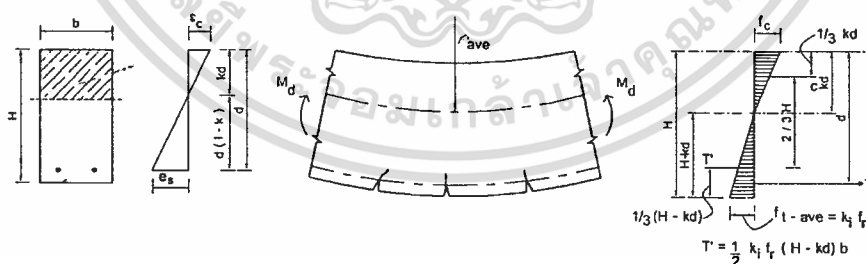
- เมื่อ  $M$  : โมเมนต์ค้ด  
 $E$  : โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต  
 $I_c$  : โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงแล้ว  
 $kd$  : ความลึกจากผิวบนสุดของหน้าตัดถึงแกนสะเทิน  
 $d$  : ความลึกประสิทธิภาพ

- $b$  : ความกว้างคาน  
 $\phi_i$  : ความโค้งที่เกิดทันที  
 $\phi_{cr}$  : ความโค้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการคืบ  
 $\phi_t$  : ความโค้งรวมทั้งหมด  
 $\epsilon_c$  : ความเครียดที่ผิวบนของคาน  
 $\epsilon_{c_i}$  : ความเครียดที่ผิวบนของคานเนื่องจากการคืบ  
 $C_i$  : สัมประสิทธิ์การคืบ  
 $\rho$  : อัตราส่วนของเนื้อที่เหล็กเสริมด้านทานแรงดึงต่อเนื้อที่ประสิทธิผลของคอนกรีต  
 $\rho'$  : อัตราส่วนของเนื้อที่เหล็กเสริมด้านทานแรงอัดต่อเนื้อที่ประสิทธิผลของคอนกรีต

Yu และ Winter (1960) ได้เสนอวิธีการหาค่าการแอ่นตัว 4 วิธี โดยแบ่งเป็น 2 วิธีสำหรับการแอ่นตัวทันทีและอีก 2 วิธีสำหรับการหาแอ่นตัวระยะยาว โดยมีรายละเอียดดังนี้

วิธีการ A เป็นการคำนวณหาการแอ่นตัวทันทีภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงร้าวในสมการหาการแอ่นตัว

วิธีการ B เป็นการคำนวณหาการแอ่นตัวทันทีภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยคิดผลของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตดังรูปที่ 3.2 ทำให้ได้โมเมนต์ต้านทานเนื่องจากหน่วยแรงดึงของคอนกรีตแล้วนำไปใช้เป็นตัวประกอบในการปรับแก้เพื่อหาค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ความเฉื่อยตามความยาวคาน ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 โมเมนต์คดและผลของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตของ Yu และ Winter

$$\psi = 1 - \frac{M'}{Md} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M' = 0.10(fc')^{2/3}bH(H - kd) \quad (3.6)$$

$$I_{avg} = \frac{I_{cr}}{1 - \frac{M'}{M_d}} = \frac{I_{cr}}{\psi} \quad (3.7)$$

- เมื่อ  $\psi$  : ค่าตัวประกอบในการปรับ  
 $M'$  : โมเมนต์ต้านทานเนื่องจากหน่วยแรงดึงของคอนกรีต  
 $M_d$  : โมเมนต์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน  
 $I_{cr}$  : โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงรูป  
 $I_{avg}$  : ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์อินเนอร์เซียตามความยาวคาน  
 $fc'$  : กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อยู่ 28 วัน  
 $b$  : ความกว้างคาน  
 $H$  : ความลึกทั้งหมดของคาน  
 $kd$  : ความลึกจากผิวบนสุดของหน้าตัดถึงแกนสะเทิน

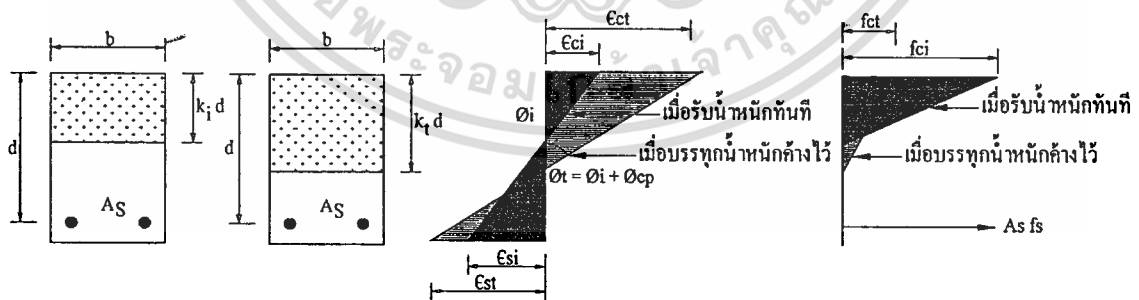
วิธีการ C เป็นการคำนวณหาการแอ่นตัวระยะยาว ที่ประกอบด้วยการแอ่นตัวทันทีรวมกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการคืบและการหดตัวในคอนกรีต เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกค้ำคานคอนกรีตจะเกิดการคืบ ผลของการคืบทำให้โมดูลัสของความยืดหยุ่นคอนกรีตลดลง เรียกว่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้ำ  $E'_{ct}$  ที่ขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต ช่วงระยะเวลาของการรับน้ำหนักบรรทุก และระยะเวลาของน้ำหนักบรรทุกค้ำ เนื่องจากการที่โมดูลัสของคอนกรีตลดลงทำให้ได้ค่าอัตราส่วนโมดูลัส  $n'_{ct}$  เพิ่มขึ้นและทำให้ความลึกของแนวแกนสะเทินต่ำลง เพื่อนำไปคำนวณหาโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงรูปมาใช้เป็นตัวประกอบในการหาค่าการแอ่นตัวตามสมการทั่วไป

วิธีการ D เป็นการคำนวณหาการแอ่นตัวระยะยาว โดยใช้ค่าตัวคูณประกอบที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการรับน้ำหนักบรรทุกค้ำ และเงื่อนไขของการเสริมเหล็กคูณกับค่าการแอ่นตัวทันทีได้จากวิธีที่ A

จากการใช้ทั้ง 2 วิธีการแรกในการหาคำนวณค่าการแอ่นตัวทันที ด้วยการเปรียบเทียบผลของการทดสอบคาน 90 ตัวอย่าง วิธีที่ 2 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองกว่าวิธีที่ 1 อันเนื่องมาจากผลของการคืบและผลหน่วยแรงดึงในคอนกรีต และจากการใช้อีก 2 วิธีการในการคำนวณค่าการแอ่นตัวระยะ ด้วยการเปรียบเทียบผลของการทดสอบคาน 68 ตัวอย่าง วิธีที่ 4 ให้ผลที่

ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองกว่าวิธีที่ 3 ซึ่งเป็นไปได้ว่ามีผลมาจากกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและเหล็กเสริม การคืบ ระดับของการแตกร้าว ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ เป็นต้น

Samra (1989), (1997) ได้ทำการศึกษาข้อมูลผลการวิจัยของ Sozen and Corley, Washa and Fluck และ Bakoss et al. โดยให้เหตุผลว่าสาเหตุของการคืบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ส่วนที่สำคัญคือ การเพิ่มขึ้นในความเครียดในคอนกรีต และการเพิ่มขึ้นในความลึกของแนวแกนสะเทินที่การเคลื่อนที่ลงสำหรับโมเมนต์บวก พิจารณาที่หน้าตัดคานที่แสดงในรูปที่ 3.3 ของความเครียดเริ่มแรก  $\epsilon$ , และการกระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทันที  $f_{ci}$  หลังจากเวลาผ่านไป  $t$  เส้นการกระจายเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงที่ผิวบนของคานที่เกิดการอัดทำให้ความเครียดเริ่มแรก  $\epsilon$ , เพิ่มขึ้นรวมผลเนื่องจากการคืบเป็น  $\epsilon_{ci}$  และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทันที  $f_{ci}$  ลดลงเหลือหน่วยแรงสุดท้ายหลังจากการคืบ  $f_{ct}$  การกระจายของหน่วยแรงเริ่มแรกยังเป็นเชิงเส้นและยังคงเป็นเชิงเส้นหลังจากการคืบ การแ่นตัวเป็นการพิจารณาภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ที่หน่วยแรงในคอนกรีตถือว่ายังคงอยู่ในขีดจำกัดสัดส่วนสำหรับสัมประสิทธิ์การคืบหาได้จากข้อกำหนดของ ACI (1971) โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอวิเคราะห์หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้น ส่วนการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้ให้ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันสำหรับคานช่วงเดียว ยกเว้นในคานต่อเนื่องที่ค่าการแ่นตัวจากการคำนวณ มีค่ามากเกินไปกว่าค่าที่วัดได้ อันเนื่องมาจากรูปแบบการรับน้ำหนักบรรทุก และในบริเวณระหว่างตำแหน่งที่โมเมนต์เปลี่ยนค่า (Inflection points) ทำให้มีผลต่อโมเมนต์อินเนอร์เซียที่ในการคำนวณการแ่นตัว แต่ในการศึกษาครั้งนี้ค่าการแ่นตัวระยะยาวที่ได้จากคำนวณยังไม่คิดผลของการหดตัว (Shrinkage)



(ก) ก่อนการคืบ

(ข) หลังการคืบ

(ค) การยืดหดตัว

(ง) การกระจายหน่วยแรง

รูปที่ 3.3 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเกิดการคืบและหลังเกิดการคืบ

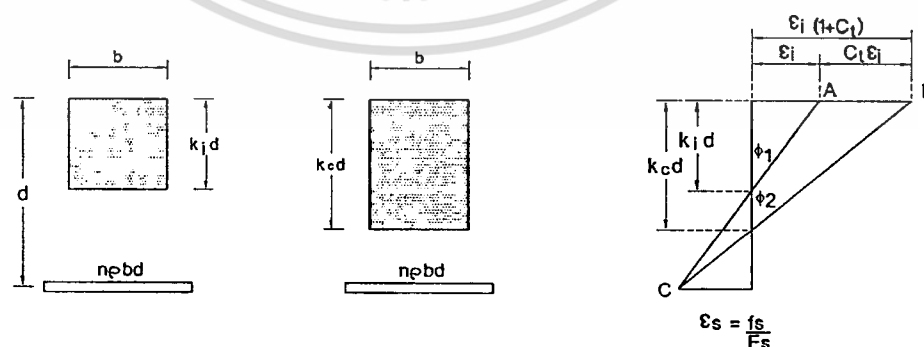
และ (1997) ได้ทำการศึกษผลการวิจัยของ Pulmono and Shin เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการปรับปรุงวิธีวิเคราะห์หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้น ให้มีจำนวนรอบในการกระทำซ้ำให้น้อยลง โดยสมมติหน่วยแรงสุดท้าย  $f_{ci} = 0.6 f_{ci}$  และทำตามขั้นตอนที่นำเสนอ จนกว่าโมเมนต์ที่กระทำภายนอกสมดุลกับโมเมนต์ที่คำนวณได้ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การคืบหาได้จากข้อกำหนดของ ACI (1992) และที่การคำนวณการแอ่นตัวระยะยาวได้รวมผลของการหดตัว (Shrinkage) ส่วนการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้ให้ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันดี โดยการทำนายในคานาที่เสริมเหล็กของแรงอัดจะมีความถูกต้องอย่างมาก

Pretorius (1985) ได้เสนอวิธีการสำหรับหาค่าการแอ่นตัวระยะยาว เพื่อเปรียบเทียบการแอ่นตัวกับการหาการแอ่นระยะยาวตามมาตรฐานของ ACI (318-83) ตามสมการ 3.8 จากข้อมูลผลการวิจัยของ Sozen and Corley , Washa and Fluck และ Bakoss etal.

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (3.8)$$

- เมื่อ  $\lambda$  : ตัวคูณประกอบเนื่องจากการคืบ (Creep factor)  
 $\xi$  : ตัวประกอบตามกาลเวลาที่น้ำหนักบรรทุกค้าง (Time – dependent Factor)  
 $\rho'$  : อัตราส่วนของเนื้อที่เหล็กเสริมด้านทานแรงอัดต่อเนื้อที่ประสิทธิผลของคอนกรีต

ส่วนวิธีการที่เสนอโดย Pretorius สำหรับหาค่าการแอ่นตัวระยะยาวของคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กรับแรงดึง เป็นการพิจารณาการกระจายของความเครียดภายในหน้าตัดจากรูปที่ 3.4 ซึ่งได้ข้อกำหนดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 หน้าตัดแปลงร้าวที่เสริมเหล็กรับแรงดึงก่อนการคืบและหลังการคืบ

1. ที่ผิวบนสุดของคอนกรีต เป็นสมมติว่าการคืบเริ่มจาก A ไปจุด B มีค่าเท่ากับ  $C, \varepsilon_i$  เมื่อ  $C_i$  เป็นค่าตัวประกอบการคืบ
2. ความเครียดของเหล็กเสริมที่จุด C เป็นค่าคงที่ที่มีอยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นความเครียดอัดในคอนกรีต
3. การเปลี่ยนส่วนโค้งจาก  $\phi_1$  ไปเป็น  $\phi_2$  เป็นการรวมผลของการคืบ (Creep) และการหดตัว (Shrinkage) ที่ผลทั้งหมดทำให้ความลึกของแนวแกนสะเทินเปลี่ยนจาก  $k_1 d$  ไปเป็น  $k_c d$

$$k_c = \frac{k_1(1+C_i)}{1+k_1C_i} \quad (3.9)$$

พิจารณาหน้าตัดแปลงร้าวรูปที่ 3.4 แรงภายในหน้าตัดยังคงสมดุลย์หาโมเมนต์ของพื้นที่รอบแนวแกนสะเทินใหม่ เพื่อหาอัตราส่วนโมดูลัสภายใต้เงื่อนไขการคืบ

$$n_c = \frac{-k_c^2}{2\rho(1-k_c)} \quad (3.10)$$

สำหรับโมเมนต์อินเนอร์ซีเรียระยะยาวหาได้ตามสมการ

$$(I_{cr})_\infty = \frac{k_c^2}{2} - \frac{k_c^3}{6} \quad (3.11)$$

และ

$$(EI_{cr})_\infty = \frac{k_c^2}{2} - \frac{k_c^3}{6} = \frac{Es}{n_c} \quad (3.12)$$

การแอ่นตัวระยะยาวหาได้ตามสมการ

$$\Delta_\infty = \Delta_i \frac{(EI_{cr})_i}{(EI_{cr})_\infty} \Delta_i R \quad (3.13)$$

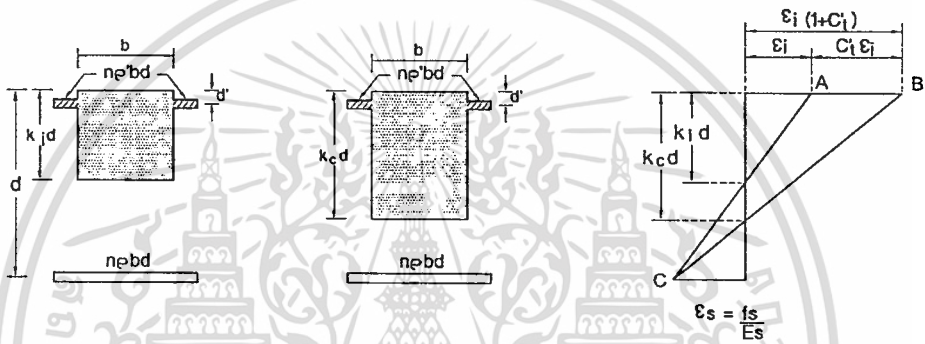
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$R = \frac{(EI_{cr})_i}{(EI_{cr})_\infty} = \frac{(1 + k_i C_i)^2}{1 + \frac{2k_i C_i}{(3 - k_i)}} \quad (3.14)$$

เป็นการพิจารณาแบบเดียวกัน กับวิธีการก่อนหน้า ที่การเพิ่มของเหล็กรับแรงอัด เพื่อเป็นการสกัดกั้น การคืบของคอนกรีตในบริเวณที่รับแรงอัด

แกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กรับแรงอัด



รูปที่ 3.5 หน้าตัดแปลงร้าวที่เสริมทั้งเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับอัดก่อนการคืบและหลังการคืบ

ความลึกแนวแกนสะเทินเปลี่ยนจาก  $k_i d$  เป็น  $k_c d$

$$k_c = \frac{k_i (1 + C_i')}{(1 + k_i C_i')} \quad (3.15)$$

หาโมเมนต์ของพื้นที่รอบแกนสะเทินใหม่ เพื่อหาอัตราส่วนโมดูลัสภายใต้เงื่อนไขการการคืบ

$$n_c = \frac{k_c^2}{2\rho(1 - k_c) - \rho'(k_c - d')} \quad (3.16)$$

สำหรับ โมเมนต์อินเนอร์เชียระยะยาวหาได้ตามสมการ

$$(EI_{cr})_\infty = (I_{cr})_\infty = \frac{Es}{n_c} \quad (3.17)$$

การแอ่นตัวระยะยาวทำได้ตามสมการ

$$\Delta_{\infty} = \Delta i \frac{(EI_{cr})_i}{(EI_{cr})_{\infty}} \Delta_i R' \quad (3.18)$$

โดยที่

$$R = \frac{(1 + k_i C_i')^2}{1 + \frac{2k_i C_i'}{(3 - k_i)}} \quad (3.19)$$

$C_i'$  เป็นค่าที่ได้จากการทดลองตามสมการต่อไปนี้

$$C_i' = C_i \left(1 - \frac{\rho'}{2\rho}\right) \quad (3.20)$$

การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณตามวิธีการที่เสนอกับค่าที่วัดได้ เป็นค่าที่มีความสอดคล้องสำหรับการแอ่นตัวระยะยาว โดยส่วนมากค่าที่ปรับแก้ไม่เกิน 10% ของค่าที่วัดได้ ส่วนวิธีการตามมาตรฐาน ACI (318-83) ค่ามีการใกล้เคียงมากกับค่าวัดได้ ยกเว้นสำหรับคานที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/D) เท่ากับ 70 จะได้ค่าการแอ่นตัวสูงซึ่งอยู่นอกขอบเขตที่กำหนด โดยวิธีการตามมาตรฐาน ACI ได้พัฒนามาจากข้อมูลที่เหมือนกัน สำหรับความแตกต่างระหว่างวิธีการที่เสนอกับวิธีการตามมาตรฐาน ACI ขณะที่วิธีการตามมาตรฐาน ACI ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงอัดเพียงอย่างเดียว ทำให้ได้ค่าการแอ่นตัวสูงกว่าวิธีการที่เสนอเนื่องมาจากผลการใช้ตัวคูณประกอบเนื่องจากการคืบก่อนข้างสูงกว่าวิธีการที่เสนอ

Clarke, Scholz, Alexander (1988) ได้เสนอวิธีการสำหรับการคำนวณการแอ่นตัวระยะ เนื่องจากการคืบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำทดสอบคานที่มีทั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงเท่ากับเหล็กเสริมรับแรงอัดจำนวน 2 ตัว และคานที่เสริมเหล็กเสริมรับแรงดึงจำนวน 2 ตัว คานทั้ง 4 ตัวนั้นมีน้ำหนักกระทำห่างจากปลายทั้ง 2 ข้างเป็นระยะ  $\frac{1}{3}$  ของความยาวคาน น้ำหนักที่กระทำ P มีค่าเท่ากับ 500 กก. สำหรับคานทุกตัว โดยใช้เวลาในการทดสอบ 6 เดือนและศึกษาข้อมูลผลการวิจัยของ Sozen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and Corley, Wash and Fluck และ Bakess et al เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณการแอ่นตัวระยะยาวของนักวิจัยรายอื่น ดังต่อไปนี้

วิธีการของ Branson (1966) ได้เสนอสมการสำหรับใช้คำนวณการแอ่นตัวระยะยาวตามสมการ 3.21 โดยไม่รวมผลการหด (Shrinkage)

$$\Delta_t = (1 + k_\phi \phi_{cr}) \Delta_i \quad (3.21)$$

เมื่อ

$$k_\phi = \frac{0.85}{1 + 50\rho'} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $k_\phi$  : เป็นค่าตัวคูณลดในการคำนวณระยะแอ่นตัวระยะยาว

$\phi_{cr}$  : เป็นค่าสัมประสิทธิ์การคืบที่สัมพันธ์กับการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนของแท่งปริซึมที่ช่วงระยะเวลา  $t$

วิธีการของ Mayer's (1967) ได้ใช้สมการรูปเดียวกับของ Branson ในการคำนวณการแอ่นตัวระยะยาว แต่ได้ปรับปรุงตัวคูณลด  $k_\phi$  ตามสมการ 3.23

$$k_\phi = \frac{\sqrt{100\rho n_o}}{12(1 + \rho'/\rho)} \quad (3.23)$$

เมื่อ  $n_o$  : อัตราส่วนโมดูลัส

$\rho'/\rho$  : อัตราส่วนของเหล็กรับแรงอัดต่อเหล็กรับแรงดึงที่หน้าตัดของความยาวช่วงที่เกิดโมเมนต์สูงสุด

วิธีการของ BS 8110 ได้ใช้วิธีการอัตราส่วนโมดูลัส การแอ่นตัวระยะยาวทั้งหมด ไม่รวมการหดตัว (Shrinkage) เป็นการคำนวณโดยใช้ค่าโมดูลัสคอนกรีตที่ลดลงตามสมการ 3.24

$$E_{cr} = \frac{1}{(1 + \phi_{cr})} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $E_{co}$  : โมดูลัสของคอนกรีต ณ เวลาที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ  
 $E_{ct}$  : โมดูลัสของคอนกรีตในช่วงระยะเวลา  $t$   
 $\phi_{ct}$  : ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ

วิธีการของ ACI 318-83 ได้ใช้หลักการที่เหมือนกับวิธีการของ Branson ด้วยการใช้ตัวคูณลด  $\lambda$  คูณกับการแอนตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (3.25)$$

สำหรับค่า  $\xi$  แทนผลรวมของการคืบและการหดตัว ระยะแอนตัวทั้งหมดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้างคำนวณได้จากสมการ 3.26

$$\Delta_t = (1 + \lambda)\Delta_i \quad (3.26)$$

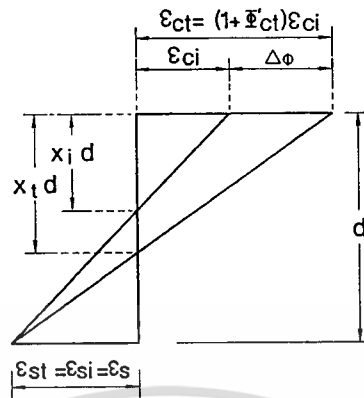
- เมื่อ  $\lambda$  : ตัวคูณประกอบเนื่องจากการคืบ (Creep Factor)  
 $\xi$  : ตัวประกอบตามกาลเวลาที่น้ำหนักบรรทุกคงค้าง  
 $\rho'$  : อัตราส่วนของเนื้อที่ของเหล็กพร้อมรับแรงอัดต่อเนื้อประสิทธิผลของคอนกรีต

วิธีการของ Clarke, Scholz, Alexander (1988) ได้เสนอสมการสำหรับใช้คำนวณการแอนตัวระยะยาวโดยไม่รวมผลการหด (Shrinkage) ตามสมการ 3.27

$$\Delta_t = (1 + x\phi_{ct}')\Delta_i \quad (3.27)$$

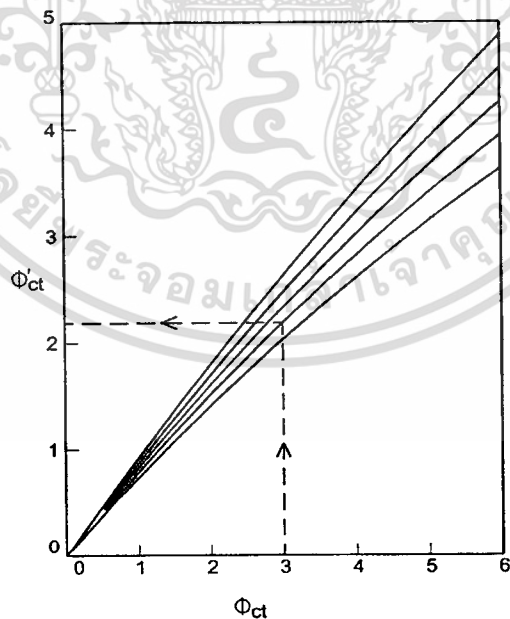
ได้กล่าวถึงความแตกต่างที่สัมพันธ์กัน ของการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบ  $\phi_{ct}$  กับ  $\phi_{ct}'$  โดยที่  $\phi_{ct}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การคืบของกรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนของแท่งคอนกรีตที่ได้จากการวัดค่าหรือคำนวณได้จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง ขณะที่  $\phi_{ct}'$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การคืบที่ผิวบนสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุด โดยให้  $\Delta_i$  เป็นผลของการคืบที่เพิ่มขึ้นจาก  $\phi_{ct} = 0$  ไปจนถึง  $\phi_{ct}$  ณ เวลา  $t$  โดยอาศัยความสัมพันธ์ของช่วงเวลา  $t$  ทั้งหมด ที่มีอัตราส่วนของหน่วยแรงแตกต่างกัน  $s = (f_c)_t / (f_c)$ , ตามช่วงเวลาที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งแนวแกนสะเทิน  $x$ , ตามรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การกระจายความเค้นตลอดความลึกหน้าตัดแตกร้าว ของ Clarke, Scholz, Alexander

จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องดังกล่าวทำให้ได้กราฟดังรูปที่ 3.7 เพื่อให้หาค่า  $\phi'_{ct}$  สำหรับใช้คำนวณการแอ่นตัวระยะยาว สำหรับการเปรียบเทียบตัวคูณของการแอ่นตัวทันทีของ Branson ( $0.85\phi$ ), Mayer ( $1/12\sqrt{100\rho n_s}\phi$ ) และที่นำเสนอ  $(x_i, \phi')$  มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเฉพาะหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึง ที่ตัวคูณลดของ Branson ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแนวแกนสะเทิน ขณะที่การแอ่นตัวเนื่องจากการคืบสูงสุด



รูปที่ 3.7 ค่า  $\phi'_{ct}$  เทียบกับ  $\phi_{ct}$  ของแท่งคอนกรีต สำหรับความแตกต่างของ  $x_i$  ของ Clarke และคณะ

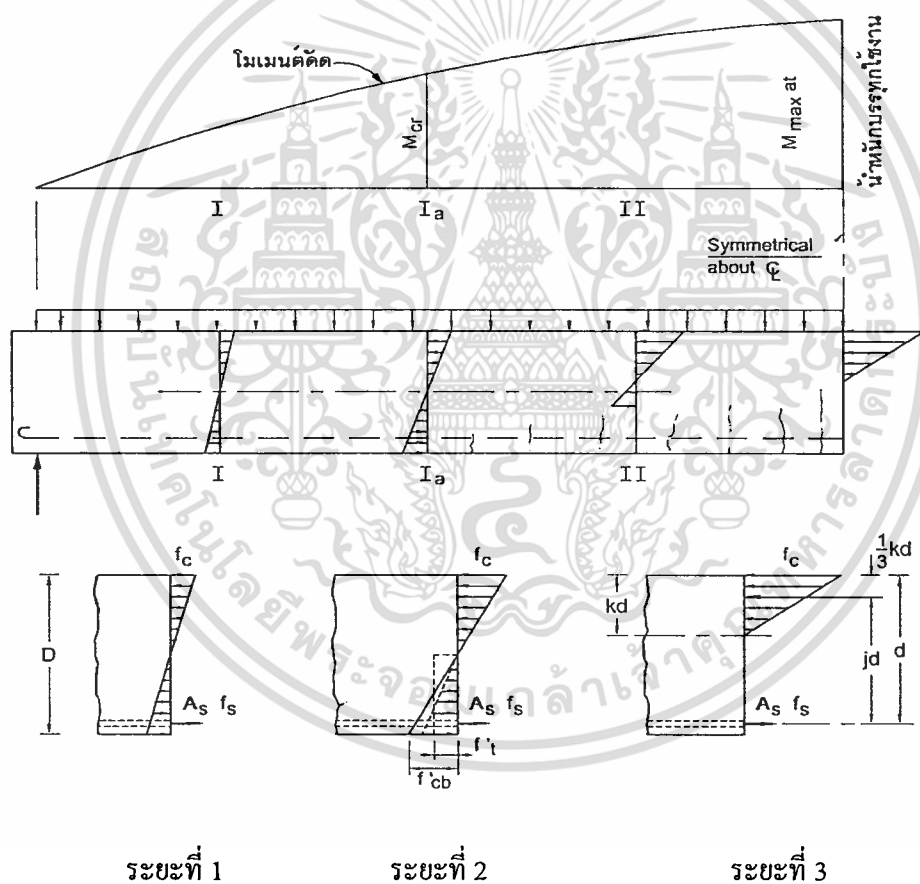
ให้เปรียบด้วยวิธีการของ Mayer กับวิธีการที่เสนอแต่ยังมีความแตกต่างในค่าการแอ่นตัวระยะสุดท้าย เนื่องด้วยวิธีการของ Mayer ใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียปราศจากการแตกร้าวในการหาค่าแอ่นตัวทันที ขณะที่วิธีการที่เสนอ ใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียแตกร้าว ซึ่งจะทำให้ค่าการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบรวมกับค่าการแอ่นตัวทันที ของน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำมีค่าการแอ่นตัวค่อนข้างสูง สำหรับวิธีการที่เสนอ ส่วนการเปรียบเทียบผลที่ทำการทดสอบของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการวัดค่าเทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากวิธีการคำนวณที่เสนอมีความสอดคล้องกันดี ทั้งการแอ่นตัวทันทีและการแอ่นตัวระยะยาว สำหรับการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการวัดค่าเทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากวิธีการคำนวณด้วยวิธีการต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้ วิธีการของ Branson เนื่องจากตัวคูณลด  $k_c$  ที่ได้มีค่าสูง ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการแอ่นตัวมีค่าถึง 69% เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ วิธีการที่เสนอค่าการแอ่นตัวที่ได้มีความถูกต้อง 4 ตัวอย่างจาก 10 ตัวอย่าง มีค่าความคลาดเคลื่อน 8.3% เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ วิธีการของ BS 8110 ค่าการแอ่นตัวที่ได้มีความถูกต้อง 5 ตัวอย่างจาก 10 ตัวอย่าง มีค่าความคลาดเคลื่อน 8.7% เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ และวิธีการของ Mayer ค่าการแอ่นตัวมีความคลาดเคลื่อนทั้งหมด 10 ตัวอย่าง อยู่ที่ 12.8% เมื่อเทียบกับค่าวัดได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับบทความอื่นวิธีการคำนวณที่เสนอให้สอดคล้องกันดีกับค่าการแอ่นตัวที่วัดได้

Banson และ คณะกรรมการ ACI (1966) ได้จัดประชุมและทำการศึกษาค้นคว้าของตัวประกอบที่มีความสำคัญต่อการแอ่นตัวระยะสั้นและการคำนวณการแอ่นตัวระยะยาว เช่น โมเมนต์อินเนอร์เซีย ตัวคูณประกอบ และเงื่อนไขการเสริมเหล็ก เพื่อเป็นการทบทวนข้อกำหนดของวิธีการต่างๆของนักวิจัยที่ได้เคยทำไว้และตามมาตรฐานของแต่ละหน่วยงาน สำหรับการคำนวณระยะแอ่นตัวทันทีและการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบ

ตัวประกอบหลักที่มีผลต่อพฤติกรรมการระยะแอ่นตัวระยะสั้นขององค์อาคารคือ ขนาดและการแผ่กระจายของน้ำหนักบรรทุก ช่วงยาว สภาพการยึดรั้ง คุณสมบัติของหน้าตัดที่ประกอบด้วยอัตราส่วนร้อยละของเหล็กเสริม คุณสมบัติของวัสดุ จำนวนและขอบเขตของการแตกร้าวจากการคืบ

การแอ่นตัวระยะยาวโดยส่วนมากมีผลมาจากการคืบ (creep) และการหดตัว (shrinkage) ของคอนกรีตที่เกิดขึ้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงที่คงที่ของความเครียด และการกระจายหน่วยตลอดความลึกและช่วงยาวของคาน ตัวประกอบหลักที่มีผลต่อการแอ่นตัวระยะยาวคือ หน่วยแรงในคอนกรีต จำนวนของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด ขนาดขององค์อาคาร เงื่อนไขการบ่ม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อายุของคอนกรีต ณ ช่วงเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก และระยะเวลาของการรับน้ำหนักบรรทุก

การตอบสนองของการแอ่นตัวคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ระยะต่างๆของหน้าตัดตามความยาวที่อยู่ภายใต้องค์ประกอบของหน่วยแรงที่แตกต่างกันของช่วงการตัดตามรูปที่ 3.8 ตำแหน่งที่มีโมเมนต์ตัดจำนวนน้อยในคอนกรีตมีผลทั้งแรงดึงและแรงอัด ตำแหน่งที่มีโมเมนต์จำนวนมากในคอนกรีตมีผลการลดลงของแรงดึงที่ผิวบนสุด และรอยแตกกว้างเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งมีระยะห่างไม่คงที่ และตำแหน่งที่มีโมเมนต์จำนวนมากที่สุดแรงดึงในคอนกรีตหมดไป รอยแตกสูงขึ้นใกล้กับแนวแกนสะเทิน และมีการขยายออก อย่างไรก็ตาม คอนกรีตคอนกรีตระหว่างรอยแตกยังคงมีหน่วยแรงดึง เนื่องจากข้อเท็จจริงนี้หน่วยแรงดึงในเหล็กที่อยู่ระหว่างรอยแตกมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่รอยแตกทั่วไป ซึ่งอัตราส่วนของหน่วยแรงเหล่านี้อาจจะต่ำกว่า 60% ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวประกอบ

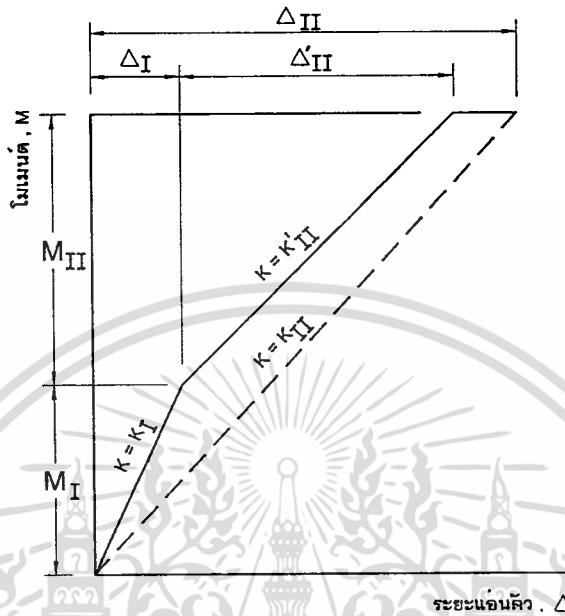


รูปที่ 3.8 ระยะต่างๆของการกระจายหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้หน้าหนักบรรทุกใช้งาน

การแอ่นตัวภายใต้หน้าหนักบรรทุกที่กระทำระยะสั้น (Deflection under short time loading) ได้นำเสนอวิธีการของ Yu and winter แล้วและวิธีการส่วนที่เหลือสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CEB (1961) ได้แนะนำให้คำนวณการแอ่นตัวออกเป็น 2 ส่วน ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระบวนการสำหรับการคำนวณการแอ่นตัวระยะสั้น

ส่วนที่ I

$$M_I = M_{cr} = \text{โมเมนต์แตกร้าว}$$

$$K_I = E_c I_g \tag{3.28}$$

ที่  $E_c = 18000\sqrt{R}$  เมื่อ  $R$  กำลังคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ กก./ซม<sup>2</sup>

$I_g =$  โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด

ส่วนที่ II

$$M_{II} = M - M_I \text{ ที่ } M \text{ โมเมนต์สูงสุดที่น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{II} = E_s A_s d^2 (1 - 2q) \left(1 - \frac{2}{3}q\right) \quad (3.29)$$

มีค่าเทียบเท่าความแข็งเชิงคด (flexural rigidity) สำหรับหน้าตัดร้าว

$\Delta_{II}$  หาโดยใช้  $M$  และ  $K_{II}$

$$K_{II}'' = 0.75 K_{II} \quad (3.30)$$

$\Delta_{II}$  หาโดยใช้  $M_{II}$  และ  $K_{II}''$

$$\Delta = \Delta_I + \Delta_{II} \leq \Delta_{II} \quad (3.31)$$

วิธีการนี้เป็นการพิจารณาพฤติกรรมของหน้าหน้าบรทุกเริ่มแรกก่อนที่คานามีรอยแตก และพฤติกรรมของการรับน้ำหนักบรทุกอีกครั้งหลังจากที่คานามีรอยแตก

ACI 318-63 สมาคมคอนกรีตสหรัฐอเมริกา ที่การแอ่นตัวระยะสั้นคำนวณโดยใช้โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด เมื่อ  $\rho_f y$  มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 500 และใช้โมเมนต์อินเนอร์เซียหน้าตัดแปลงร้าว เมื่อ  $\rho_f y$  มีค่ามากกว่า 500 เมื่อพิจารณาอัตราส่วน  $\rho$  สำหรับคานาเคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึง และ  $(\rho - \rho')$  สำหรับคานาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดและเหล็กรับแรงดึงส่วน  $(\rho_w - \rho_f')$  สำหรับคานารูปตัวที่มากกว่า  $0.18 \frac{f_c'}{f_y}$  อัตราส่วนนี้มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุลย์โดยทฤษฎีอิลาสติก และน้อยกว่า 1.5 เท่าที่อัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุลย์โดยทฤษฎีกำลังประลัย สำหรับคานาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงขอบเขตเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมอยู่ที่  $\rho = 0.18 \frac{f_c'}{f_y}$  และ  $\rho_f y = 0.18 f_c' = 450$  และ  $540$  เมื่อ  $f_c' = 2500$  และ  $3000$  ปอนด์/นิ้ว ตามลำดับดังนั้น ACI ค่าของ  $\rho_f y = 500$  สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังสูงที่เป็นเกณฑ์กำหนดในการควบคุม

Branson (1963) ได้ทำการศึกษาเสนอสูตรที่ได้จากการทดลองสำหรับโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผล ที่ทุกหน้าตัดของคานาที่เป็นฟังก์ชันของโมเมนต์ คุณสมบัติของหน้าตัด และกำลังของคอนกรีต ในรูปแบบที่ประกอบด้วยผลของขอบเขตของรอยแตก สูตรที่แสดงสำหรับค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลตลอดความยาวช่วงทั้งหมดของคานาช่วงเดียว การรับน้ำหนักบรทุกชนิดสม่ำเสมอ และคานาสีเหลี่ยมผืนผ้าหรือคานารูปตัวที่ คำนวณตามสมการ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{eff} = \left( \frac{M_{cr}^3}{M_{max}} \right) I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (3.32)$$

สมการ ( 3.30) ใช้เมื่อ  $M_{max}$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $M_{cr}$  โดยสมการ 3.30 มีขอบเขตดังนี้ เมื่อ  $M_{max} < M_{cr}$  แสดงว่าไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในหน้าตัดใช้  $I_e = I_g$  แต่ค่า  $M_{max} \gg M_{cr}$  แสดงว่าการแตกร้าวมีมากเกินไปควรใช้  $I_e = I_{cr}$

การแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำระยะยาว (Deflection under long time loading)

การแอ่นตัวตามกาลเวลาขององค์อาคารรับแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีผลจากน้ำหนักบรรทุกค้างเท่านั้น ทำให้เกิดการแอ่นตัวเนื่องจากการคืบ (Creep deflection) โดยปกติมีค่ามากกว่า 2 ถึง 3 เท่าของการแอ่นตัวทันที เป็นการรวมผลการแอ่นตัวได้จากรวมผลอื่นในช่วงระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกค้าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น อายุของคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกค้าง น้ำหนักค้างที่กระทำ ขนาดขององค์อาคาร และคุณภาพของคอนกรีต โดยค่าต่างเหล่านี้เป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์การคืบ ( $C_r$ ) ผลของการคืบทำให้โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงตารางที่ 3.1 ได้สรุปวิธีการต่างๆ สำหรับใช้คำนวณการแอ่นระยะยาวและตรวจความถูกต้องสำหรับการทำนายการแอ่นตัวระยะยาวที่ 20 ปี

ตารางที่ 3.1 ตัวคูณประกอบสำหรับหาค่าการแอ่นตัวระยะยาวภายใต้น้ำหนักบรรทุกค้าง

ลำดับ	วิธีการ	$As' = 0$	$As' = 0.5As$	$As' = As$	โมเมนต์อินเนอร์เซีย สำหรับการคำนวณการ แอ่นตัวระยะสั้น
1	PCA	2.8			หน้าตัดทั้งหมด ( $I_g$ )
2	CRSI	3.0		1.5** 1.0***	หน้าตัดทั้งหมด ( $I_g$ )
3	Yu and Winter วิธีการ D	1.95	1.21	0.82	หน้าตัดแปลงร้าว ( $I_{cr}$ )
4	CEB	2.0			หน้าตัดทั้งหมด ( $I_g$ ) หน้าตัดแปลงร้าว ( $I_{cr}$ )
5	ACI CODE	2.0	1.2	0.8	หน้าตัดทั้งหมด ( $I_g$ ) เมื่อ $\rho_{fy} \leq 500$ หน้าตัดแปลงร้าว ( $I_{cr}$ ) เมื่อ $\rho_{fy} > 500$
6	Branson	1.7	1.2	0.8	หน้าตัดประสิทธิผล ( $I_e$ ) ที่รวมผลของขอบเขตของ รอยแตกร้าว

\*ตัวคูณประกอบทั้งหมดสำหรับหาค่าการแอ่นตัว เนื่องจากการคืบเท่านั้น

\*\*คานช่วงเดียว

\*\*\*คานต่อเนื่อง

การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ ด้วยวิธีการต่างๆที่เสนอใช้เทียบกับข้อมูลผลการทดสอบของ Wash และ Fluck สำหรับคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าช่วงเดียวและคานต่อเนื่อง Yu และ Winter สำหรับรูปคานรูปตัวที สำหรับวิธีการของ PCA และ CRSI ใช้โมเมนต์อินเนอร์เซียหน้าตัดทั้งหมด ( $I_g$ ) ได้ค่าค่อนข้างต่ำทั้งการแอ่นระยะสั้นและการแอ่นตัวระยะยาว ส่วนวิธีการของ ACI ค่า  $\rho_{fy}$  มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 795 ถึง 1650 ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดที่จำกัดอยู่ที่ 500 สำหรับการ ใช้โมเมนต์อินเนอร์เซียหน้าตัดทั้งหมด ( $I_g$ ) และค่าการคำนวณ  $M_{cr}/M_{max}$  มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.23 ถึง 0.44 แต่การใช้โม่เมนต์อินเนอร์เซียหน้าตัดทั้งหมดมีความถูกต้องในการอำนวยความสะดวกแก่ตัวของคานที่ไม่มีรอยแตกร้าวหรือมีรอยแตกร้าวเพียงเล็กน้อย

วิธีการของ Yu และ Winter วิธีการ B และ CEB มาตรฐาน ACI และ Branson ผลที่ได้จากการคำนวณส่วนมากมีความผิดพลาดไม่เกิน 20% สำหรับการทำนายการแอ่นตัวระยะสั้น วิธีการของ Yu และ Winter วิธีการ D มาตรฐาน ACI และ Branson มีความถูกต้องมากมีความผิดพลาดไม่เกิน 20% สำหรับการทำนายการแอ่นตัวระยะยาว

สรุปวิธีการของ Yu และ Winter วิธีการ B และ D มาตรฐาน ACI และ Branson ได้ความพอใจจากคณะกรรมการสำหรับการทำนายการแอ่นตัวระยะการแอ่นตัวระยะยาว เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง และเป็นไปตามเงื่อนไขของวิธีการต่าง ๆ

สมพงษ์ ชื่นประไพ, จิระศักดิ์ ไพราม, ศุภชัย ศิลาประจวบ (2546 : 11) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบาเป็นที่นิยมน้อยกว่าแพร่หลายในงานก่อสร้าง ซึ่งการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาที่มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติที่ดี ได้นำอัตราส่วนผสมกับโม่ทราย และน้ำในอัตราส่วนที่ต่างกันคือ 1 : 0.5 : 3, 1 : 0.5 : 4, 1 : 0.5 : 5 โดยปริมาตรและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับรวมไปถึงระยะเวลาที่ต่างกัน คือ 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความถ่วงจำเพาะ จากผลการทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของซีเมนต์ : ทราย : โม่ : 1 : 0.5 : 4 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน คอนกรีตมวลเบาผสมโม่สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้ 3.24 เมกกะปาสกาล ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.97 ซึ่งผ่านมาตรฐาน มอก. ความหนาแน่น 1,090.96 กก./ลบ.ม. และมีความถ่วงจำเพาะในอากาศ 1.12

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่  $fc' 180 \text{ ksc}$  และ  $fc' 200 \text{ ksc}$  คือ จากการทดสอบแท่งคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากการออกแบบพบว่าคอนกรีตเบาที่  $fc' 180 \text{ ksc}$  จะรับกำลังอัดได้ 3.04 เมกกะปาสกาล และคอนกรีตเบาที่  $fc' 200 \text{ ksc}$  จะรับกำลังอัดได้ 5.04 เมกกะปาสกาล

จิรพจน์ คุระเอียด, มนตรี โอหสี, วรวิทย์ พัฒนแก้ว (2547 : 12) ได้ทำการหาค่าการรับน้ำหนักแบกทาน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ที่ได้จากการออกแบบ และทดสอบจริง ตลอดจนหน่วยน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโม่ซีเมนต์ โดยการนำโม่มาประยุกต์ใช้เพื่อ เป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ ลดมลภาวะ และได้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบามั่นคงแข็งแรง โดยการนำปูนซีเมนต์ทราย และ โม่ป่นละเอียด ในอัตราส่วนผสม 1:0.5:4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ปั่นขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม

ขยายโพลีเมอร์ นำมาใช้แทนหินในการทำผสมคอนกรีต คอนกรีตที่ได้เรียกว่า คอนกรีตมวลเบาโพลีเมอร์ การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโพลีเมอร์ในงานวิจัยนี้ ทำการออกแบบโดยวิธี Strength Design Method (SDM) ตาม มาตรฐาน ACI 318-89 และทดสอบการรับน้ำหนักแบกทาน ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโพลีเมอร์ ตามมาตรฐาน ASTM C78 ,ทดสอบ การรับแรงอัดประลัยตาม มาตรฐาน ASTM C39 และทดสอบการรับแรงยึดเหนี่ยวตามมาตรฐาน ASTM A305 จากการทดสอบ การรับน้ำหนักแบกทานของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโพลีเมอร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง สามารถรับน้ำหนักแบกทาน แบบเป็นจุดเฉลี่ยเท่ากับ 4,138 กก. การทดสอบค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตมวลเบาโพลีเมอร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยเฉลี่ยผลการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยว เท่ากับ 60.138 กก./ซม.<sup>2</sup> และจากการออกแบบได้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 59.88 กก./ซม.<sup>2</sup> ได้อัตราส่วน ความปลอดภัยเฉลี่ย 0.996

จากการทดสอบข้างต้นทำให้ทราบถึง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการออกแบบเท่ากับ 1.56 และจากการทดสอบ 2.82 มีความแตกต่าง 44.44% และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาโพลีเมอร์ ได้หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,880 กก./ซม.<sup>3</sup> ซึ่งตรงตามมาตรฐาน ACI 631 A51

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาและวิจัยนี้ จะกล่าวถึงวิธีการทำนายเพื่อหาค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก 50% และ 25% ของน้ำหนักบรรทุกประลัย โดยทำการทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตโฟมที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ นำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้ไปใช้เป็นส่วนสัมพันธ์ในการคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และเครื่องมือวัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมหล่อตัวอย่างคาน การหล่อตัวอย่างคานและการบ่ม วิธีการหล่อตัวอย่างแท่งทดสอบมาตรฐานรูปทรงกระบอกและการบ่ม จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การทดสอบตัวอย่างทรงกระบอก

##### 4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก . 15-2532 กระทรวงอุตสาหกรรม เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้กับงาน โครงสร้างทั่วไป
2. ทรายที่ใช้เป็นทรายน้ำจืด ตามมาตรฐาน ASTM C-33
3. หินที่ใช้เป็นหินปูนขนาด  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM C-33
4. น้ำยาโฟม
5. เกจวัดความเครียด
6. เครื่องมือวัดการหดตัวของคอนกรีต (Strain gage, Dial gage)
7. เครื่อง UTM
8. แบบเหล็กรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.
9. เครื่องผสมคอนกรีต
10. เครื่องใส่โฟม

##### 4.1.2 วิธีการทดสอบ

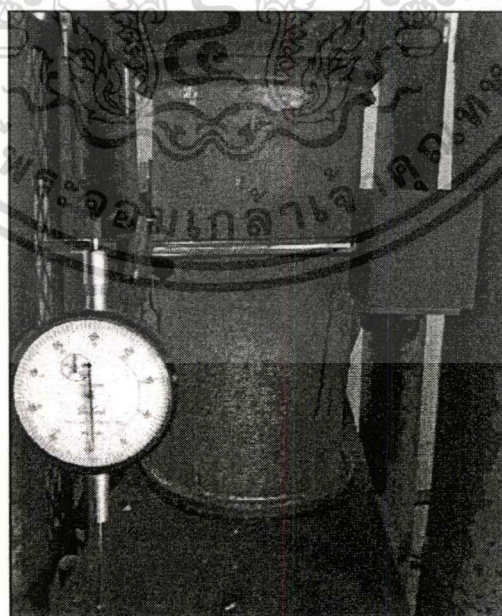
1. คำนวณส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัย  $f_c' = 240$  ksc. แล้วทำการหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำการบ่มที่ 28 วัน จำนวน 5 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก

2. นำ (Strain gage, Dial gauge) ติดที่แท่งคอนกรีตทรงกระบอก ทำการกดอัดเพื่อหาค่าการหดตัว แล้วนำไปคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ( $E_c$ ) รวมทั้งเปรียบเทียบค่ากำลังอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบ กับที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.2 คอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาและเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ ) กับระยะเวลา ตามการทดสอบกับทฤษฎี แล้วทำการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ที่ระยะเวลา 1 ปี โดย

- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นค่าแรก ( $E_1$ ) เป็นค่าที่ได้จากการค้ำแรงกระทำไว้ที่ 50% ของ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

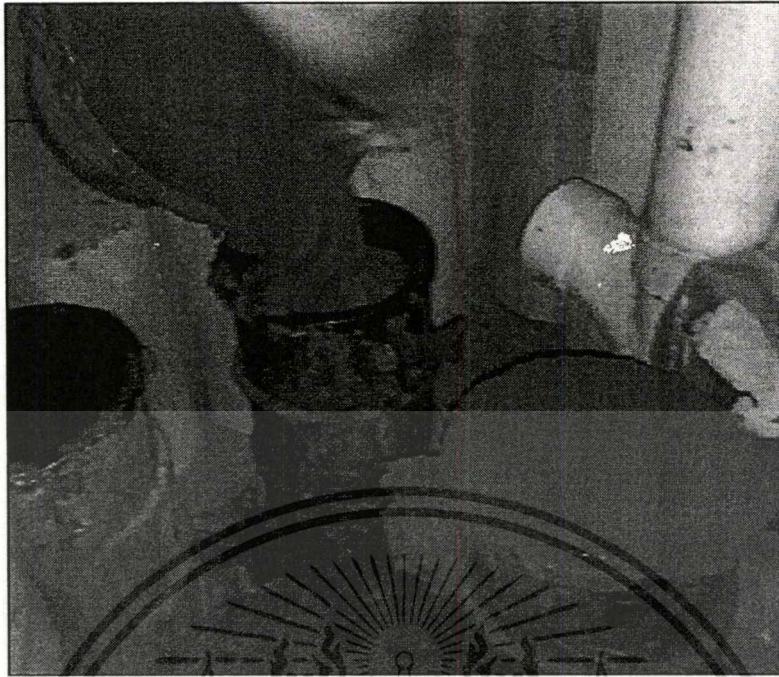
- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นค่าที่สอง ( $E_2$ ) เป็นค่าที่ได้จากการค้ำแรงกระทำไว้ 25 % ของ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

4. หล่อตัวอย่างคอนกรีตผสม โฟมซีเมนต์ไม่ผสมมวลรวมหยาบ รูปทรงกระบอก จำนวน 15 ตัวอย่าง ของแต่ละหน่วยน้ำหนัก รวม 75 ตัวอย่าง โดยมีหน่วยน้ำหนักที่ 1,600 1,700 1,800 1,900 และ 2,000  $\text{kg/m}^3$  โดยประมาณ ทำการบ่ม และทดสอบที่ 3, 7, 28 วัน



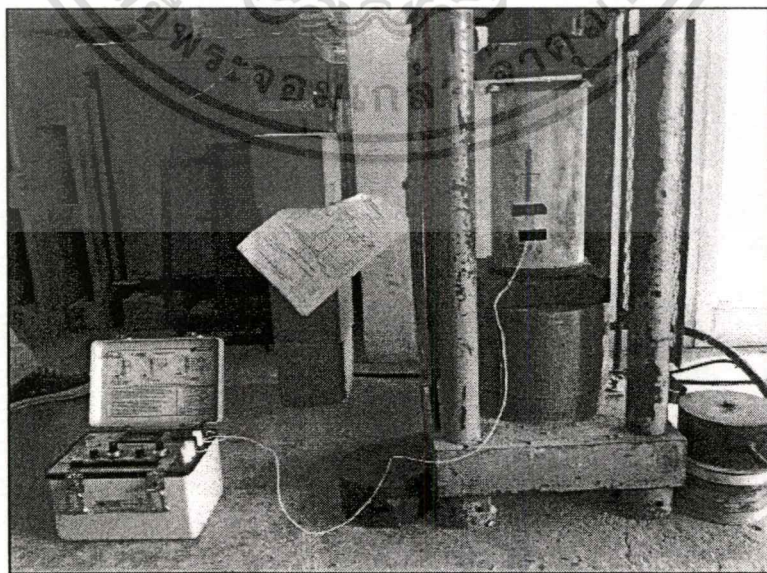
รูปที่ 4.3 การผสมคอนกรีต โฟมซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การหล่อแท่งคอนกรีตผสม โฟมซีเมนต์รูปทรงกระบอก

5. นำแท่งคอนกรีตผสม โฟมซีเมนต์ที่ได้ทำการบ่มไว้แล้วข้างต้น มาทำการทดสอบการกดอัด เพื่อหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและค่ากำลังอัดประลัย ของคอนกรีตผสม โฟมซีเมนต์ในแต่ละหน่วยน้ำหนัก โดยนำ Strain gage มาทำการติดที่แท่งคอนกรีตผสม โฟมซีเมนต์ และเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านค่าการหดตัว จากนั้นจึงทำการกดอัด แล้วบันทึกค่าการหดตัวเป็นระยะๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.5 แท่งคอนกรีตผสม โฟมซีเมนต์ ที่ทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์โดยทำการเขียนกราฟระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตโพรซีเมนต์ ซึ่งจะนำค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ระยะเวลา 1 ปี ( $E_1, E_2$ ) มาทำการหาค่าหน่วยน้ำหนักที่เหมาะสม โดยจะต้องให้ค่ากำลังอัดประลัย  $f_c'$  มีค่าประมาณ 240 ksc. จะได้ 2 หน่วยน้ำหนัก เพื่อนำไปเป็นส่วนผสมของคานคอนกรีตผสมโพรซีเมนต์ต่อไป

## 4.2 วิธีการทำนายเพื่อหาค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

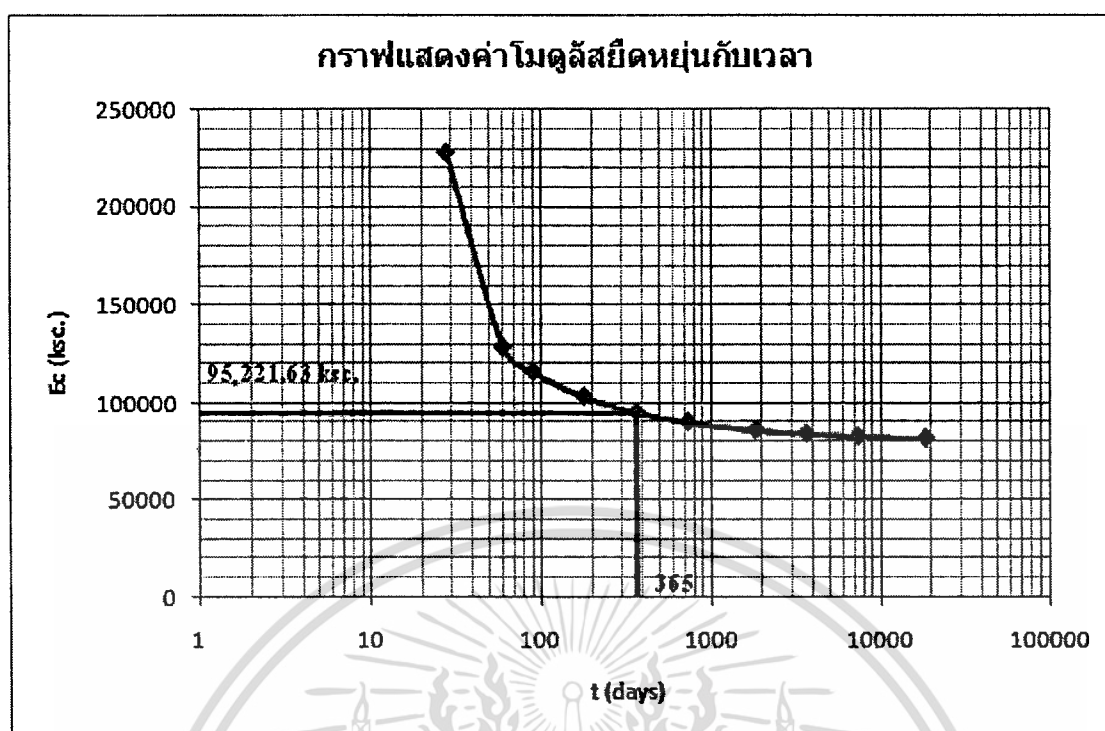
1. ในการที่จะทำนายกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเวลาผ่านไปนั้น จะใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่เปลี่ยนของคอนกรีตทรงกระบอกหน่วยแรงอัด 240 ksc ที่คำนวณได้จากสมการ  $E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1 + \Phi(t)}$  ดังค่าที่แสดงในตารางที่ (4.1) มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลา ดังรูปที่ (4.6)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่วันต่างๆ

หน่วยแรงอัด (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (ksc)				
	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน	365 วัน
240	227,699.20	128,395.52	115,994.98	103,150.75	95,221.63

หน่วยแรงอัด (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (ksc)				
	730 วัน	1,825 วัน	3,650 วัน	7,300 วัน	18,250 วัน
240	90,195.33	86042.20	84,087.02	82,782.99	81,702.27

2. จากรูปที่ (4.6) เมื่อต้องการทำนายกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ 365 วัน จำเป็นต้องทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ 365 วัน ที่หน่วยแรงอัด 240 ksc คือให้ลากเส้นตรงขึ้นไปจนชนกับเส้นหน่วยแรงอัด 240 ksc อ่านค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 50 % ( $E_1$ ) ของน้ำหนักบรรทุกประลัย เท่ากับ 95,221.63 ksc.

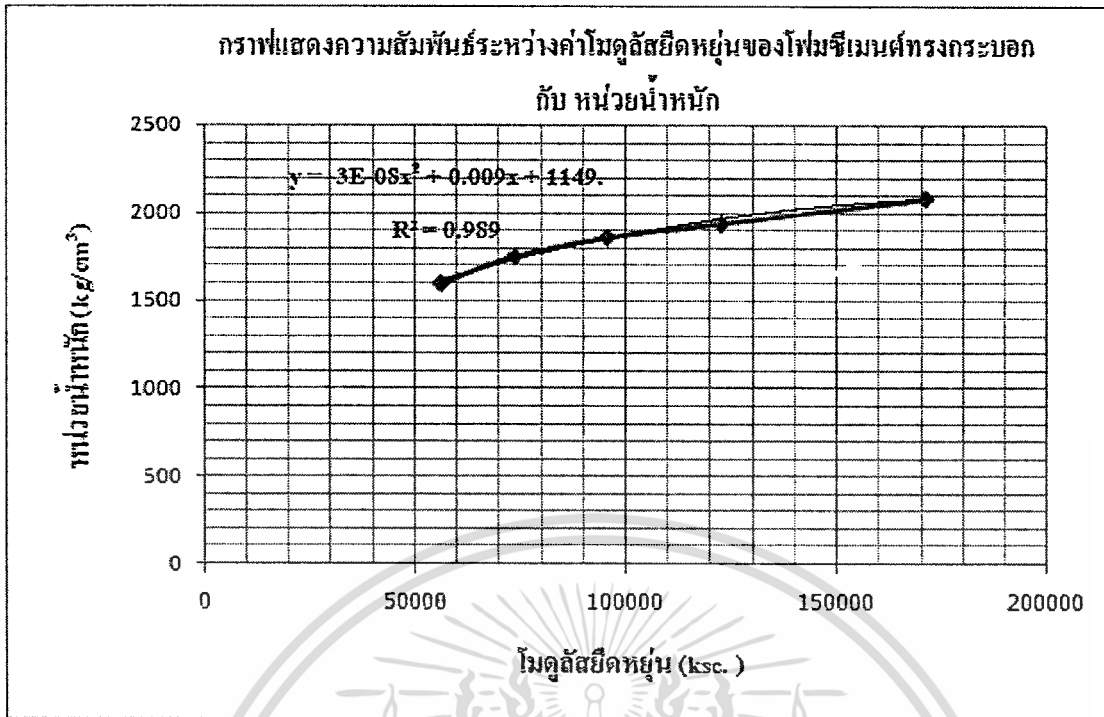


รูปที่ 4.6 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตกับเวลา

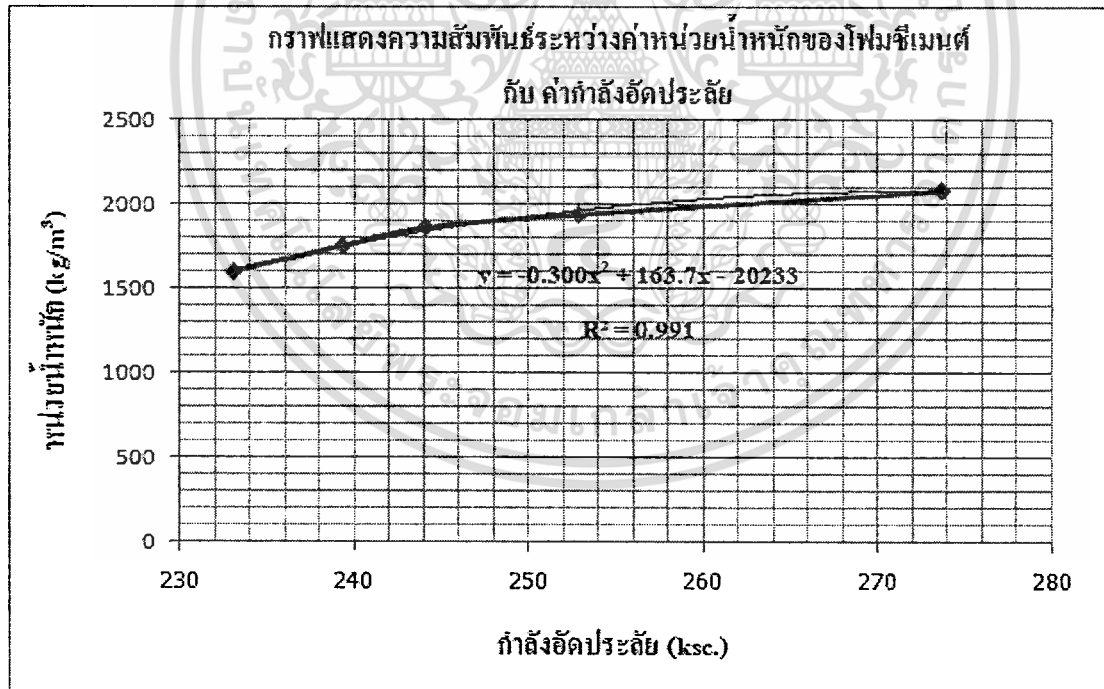
3. จากการทดสอบกำลังอัด โฟมซีเมนต์ทรงกระบอก ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหน่วยน้ำหนัก 1,600, 1,750, 1,860, 1,940, 2,080  $\text{kg/m}^3$  ดังตารางที่ 4.2 นำค่าไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของโฟมซีเมนต์ทรงกระบอกกับหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.7 และระหว่างกำลังอัดประลัยของโฟมซีเมนต์ทรงกระบอกกับหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ โฟมซีเมนต์ทรงกระบอกกับหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัดประลัย

หน่วยน้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )	กำลังอัดประลัย (ksc.)	โมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตมวลเบา (ksc.)
1,600	233.13	56,221.71
1,750	239.99	73,666.88
1,860	244.19	95,561.86
1,940	252.95	122,483.00
2,080	273.75	171,005.77



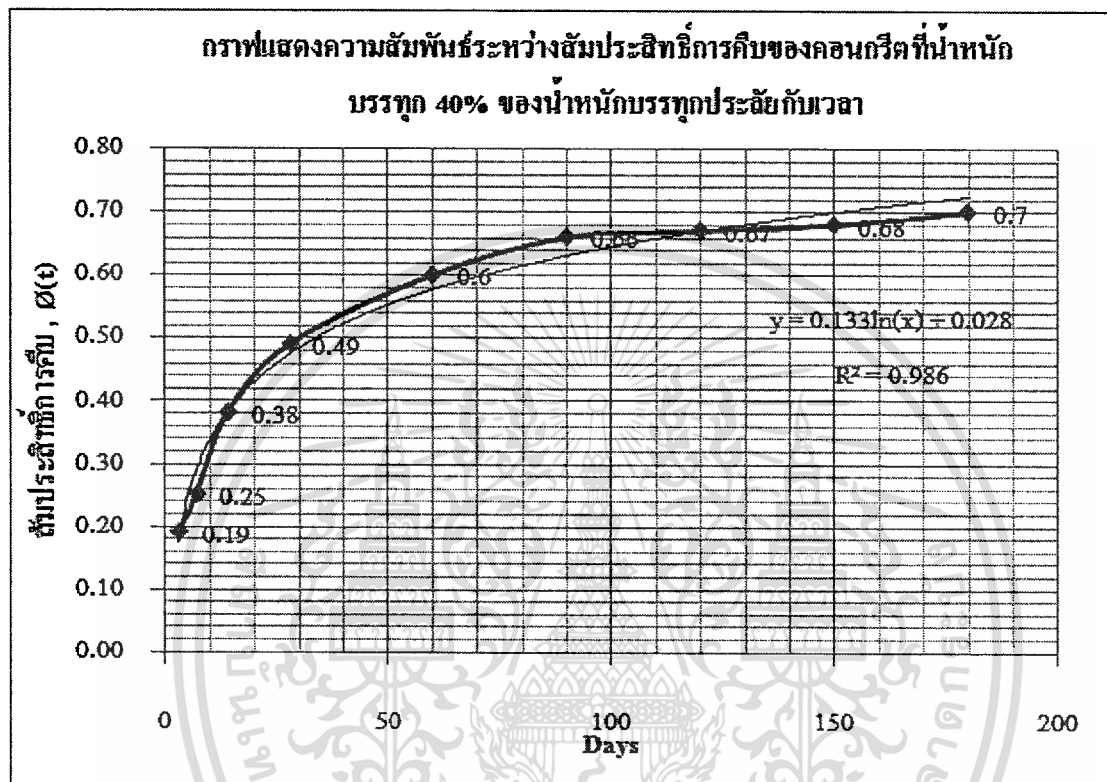
รูปที่ 4.7 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นของโพลีเมอร์กับหน่วยน้ำหนัก



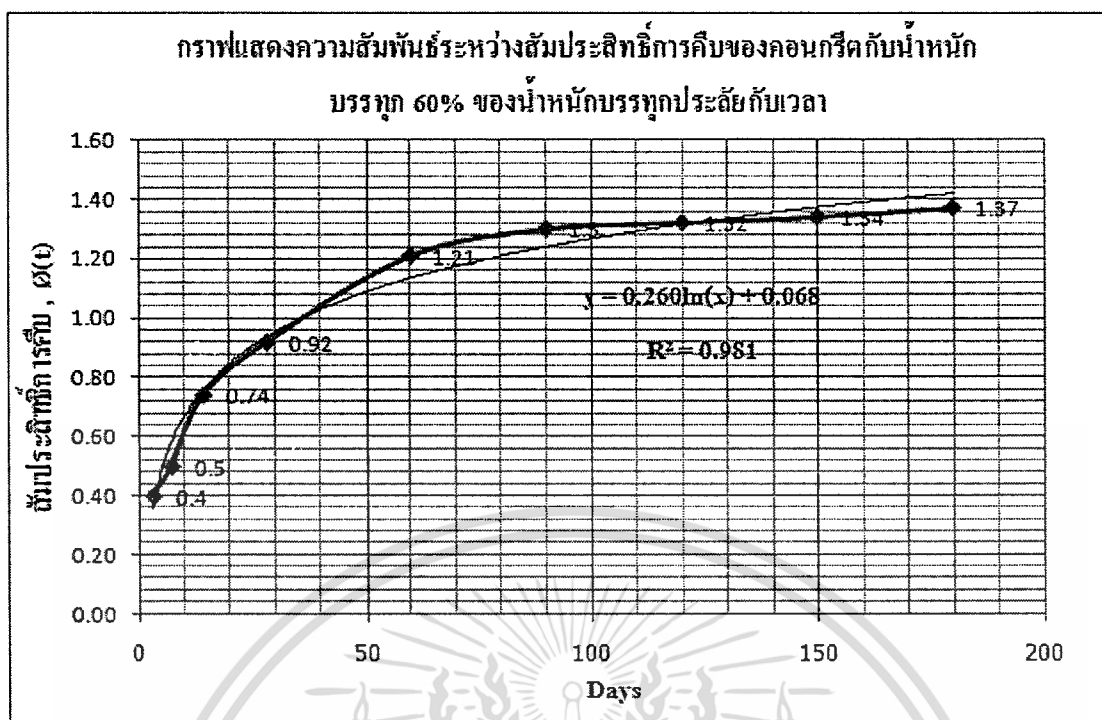
รูปที่ 4.8 กราฟกำลังอัดประลัยของโพลีเมอร์กับหน่วยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก 40 % และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (กราฟรูปที่ 4.9 และ กราฟรูปที่ 4.10) สามารถหาสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 40 % และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เวลา 365 วัน

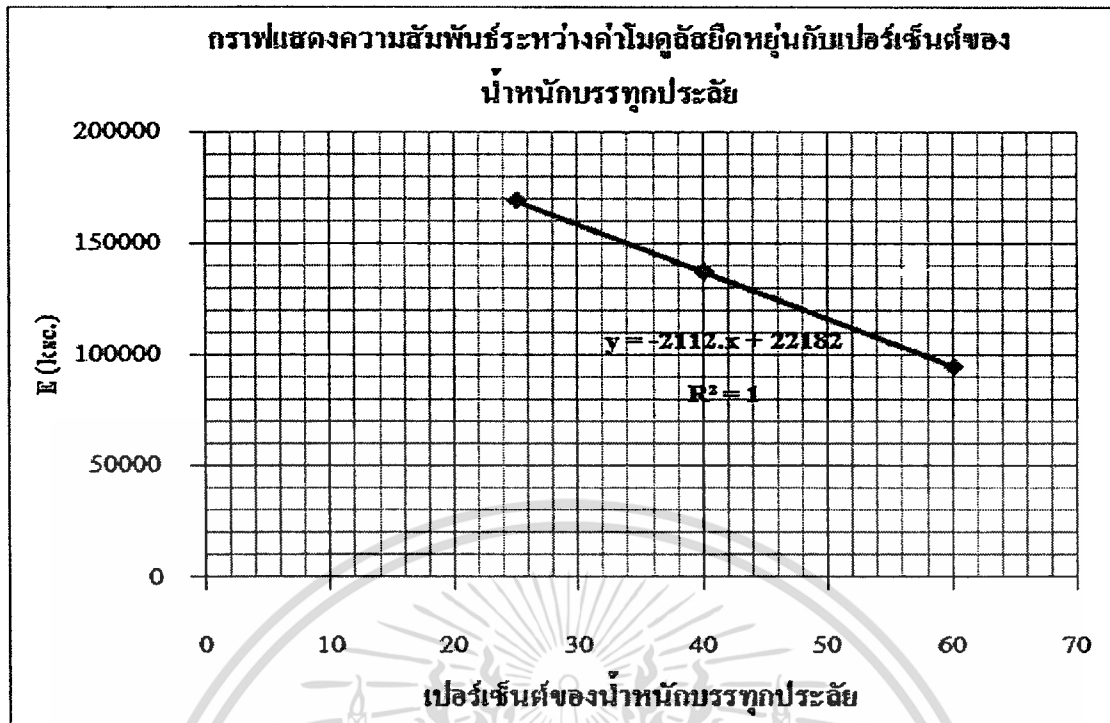


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 40% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. 2548)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตกับน้ำหนักบรรทุก 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเวลา (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน, 2548)

5. จากกราฟจะได้สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก 40 % และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เวลา 365 วัน เท่ากับ 0.8, 1.6 ตามลำดับ จากนั้นหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 40 % และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยจากสมการ  $E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1 + \Phi(t)}$  จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 40 % และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยได้เท่ากับ 137,324 ksc., 95,070 ksc. ตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย (กราฟรูปที่ 4.11) จากกราฟจะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 25% ( $E_2$ ) ของน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 169,007.8 ksc.



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า โมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของ  
น้ำหนักบรรทุกประลัย (เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน, 2548)

6. จากกราฟจะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 25 % ( $E_2$ ) และ 50% ( $E_1$ ) ของ  
น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 169,007.8 ksc. และ 95,221.63 ksc. ตามลำดับ และจากกราฟรูปที่ 4.7  
จะได้ค่าหน่วยน้ำหนักของโฟมซีเมนต์เท่ากับ  $1850 \text{ kg/m}^3$  และ  $1950 \text{ kg/m}^3$  ตามลำดับ

7. เมื่อได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดาและโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก  
25 % ( $E_2$ ) และ 50% ( $E_1$ ) ของน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 227,699.2 ksc., 169,007.8 ksc. และ  
95,221.63 ksc. ตามลำดับ นำค่าทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาแนวระดับของแต่ละชั้น โดยการ  
วิเคราะห์จะใช้โปรแกรม VISUAL C++

### 4.3 วิธีการเตรียมหล่อตัวอย่างคาน

#### 4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

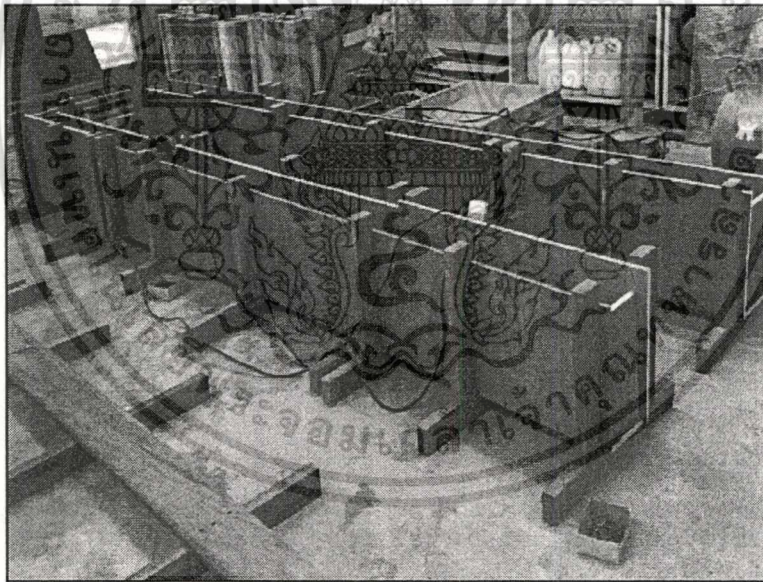
1. ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายข้าง ผิดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก . 15-2532 ทรายขุดอุตสาหกรรม เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้กับงาน โครงสร้างทั่วไป
2. ทรายที่ใช้เป็นทรายน้ำจืด ตามมาตรฐาน ASTM C-33
3. หินที่ใช้เป็นหินปูนขนาด  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM C-33
4. เหล็กเสริมตามแนวยาว สำหรับแรงดึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเหล็กข้ออ้อย ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24-2547 ทรายขุดอุตสาหกรรมมีชั้นคุณภาพ SD-40 กำลังครากมีค่าไม่น้อยกว่า 4,000 กก/ชม<sup>2</sup> กำลังรับแรงดึงประลัยไม่น้อยกว่า 5,700 กก/ชม<sup>2</sup> และมีค่าการยึดหดตัวไม่น้อยกว่า 18%
5. เหล็กปลอกที่ใช้เป็นเหล็กเส้นกลม ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 20-2547 ทรายขุดอุตสาหกรรมมีชั้นคุณภาพ SR-24 กำลังครากมีค่าไม่น้อยกว่า 2,400 กก/ชม<sup>2</sup> และมีค่าการยึดหดตัวไม่น้อยกว่า 21%
6. ไม้แบบทำด้วยไม้อัดหนา 15 มม. ทำการยึดโครงด้วยไม้ขนาด 11/2" x 3" ทุกระยะ 0.50 ม.
7. พลาสติก สำหรับบ่มคาน
8. เครื่องผสมคอนกรีตโฟม
9. เครื่องใส่โฟม
10. เกจวัดความเครียด

#### 4.3.2 การหล่อตัวอย่างคาน

1. ประกอบแบบไม้ เพื่อเป็นแบบหล่อคานทั้ง 3 ประเภท ขนาด 15x 30 เซนติเมตร. ยาว 3 เมตร. จำนวนทั้งหมด 8 คาน



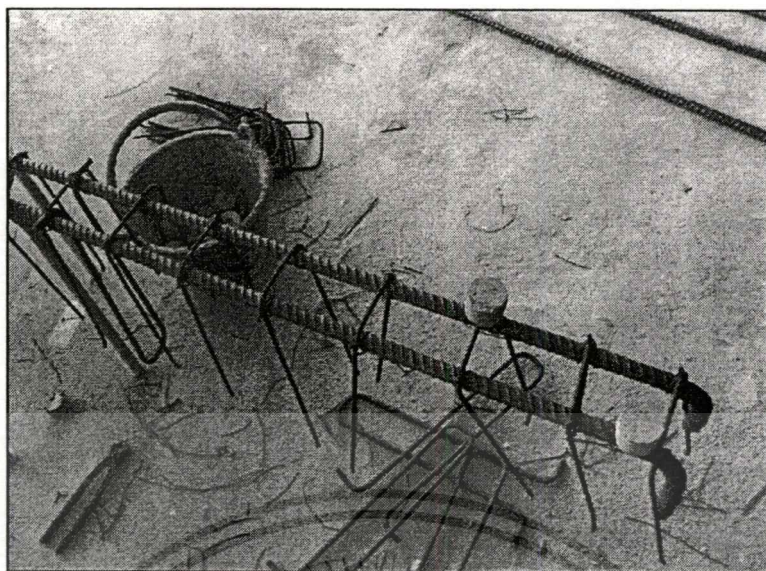
รูปที่ 4.12 แบบไม้หล่อคานคอนกรีต



รูปที่ 4.13 แบบไม้หล่อคานคอนกรีต (ต่อ)

2. เหล็กเสริมจะใส่เฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยตัดเหล็กให้ได้ความยาวตาม  
ต้องการและทำการผูกเหล็กด้วยลวดผูกเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



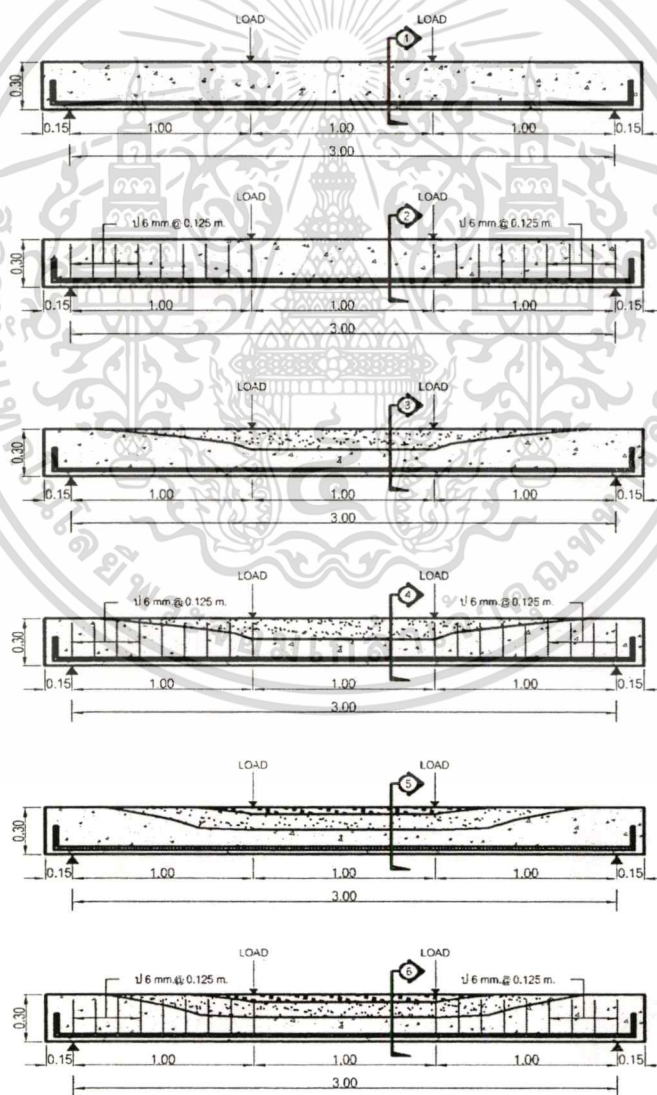
รูปที่ 4.14 การเสริมเหล็กและผูกเหล็กปลอก

3. ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด ชนิด ไฟฟ้าที่เหล็กเสริม โดยจะต้องทำให้ผิวของเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการติดเกจวัดความเครียด ชนิด ไฟฟ้าให้เรียบ และสะอาดก่อนทำการติดตั้ง
4. ทำการตรวจสอบระยะหุ้ม ระยะเรียงของเหล็กปลอก และตำแหน่งของเกจวัดความเครียดชนิดไฟฟ้า ก่อนทำการเทคอนกรีต
5. หล่อคานทั้งหมด 8 ตัวอย่าง โดยมีลักษณะดังนี้
  - คานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็ก 2-DB 20 กำลังอัดประลัย ( $f_c$ ) 240 ksc. ไม่เสริมเหล็กปลอกจำนวน 1 คาน
  - คานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็ก 2-DB 20 กำลังอัดประลัย ( $f_c$ ) 240 ksc. เสริมเหล็กปลอกจำนวน 2 คาน
    - คานลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย ( $f_c$ ) 240 ksc. และชั้นบนเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ , ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  ไม่เสริมเหล็กปลอก จำนวน 1 คาน
    - คานลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย ( $f_c$ ) 240 ksc. และชั้นบนเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ , ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  เสริมเหล็กปลอก RB 6 @ 12.50 cm. เว้นระยะ L/3 จำนวน 1 คาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

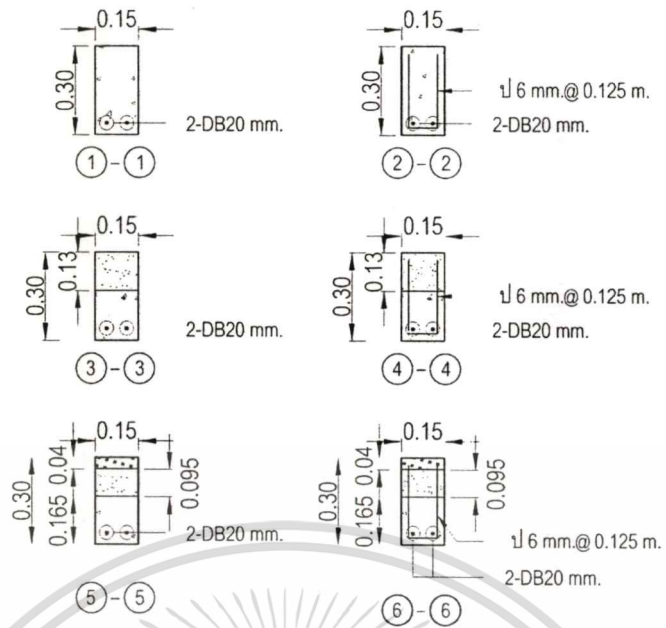
- คานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย ( $f'c$ ) 240 ksc. และชั้นถัดมาเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_2$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %)  $169,000 \text{ kg/cm}^2$  ชั้นบนสุดเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_1$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  เสริมเหล็กปลอก RB 6 @ 12.5C cm. เว้นระยะ  $L/3$  ช่วงกึ่งกลางคาน จำนวน 2 คาน

- คานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย ( $f'c$ ) 240 ksc. และชั้นถัดมาเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_2$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %)  $169,000 \text{ kg/cm}^2$  ชั้นบนสุดเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_1$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  ไม่เสริมเหล็กปลอก จำนวน 1 คาน

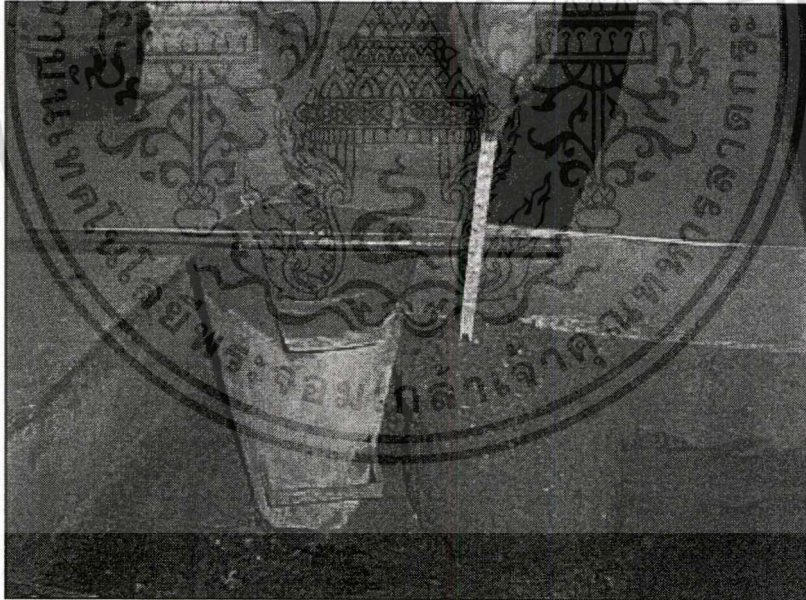


รูปที่ 4.15 รูปแบบคาน และการเสริมเหล็กคานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปแบบคาน และการเสริมเหล็กคานทดสอบ (ต่อ)



รูปที่ 4.17 ทดสอบความชื้นเหลวของคอนกรีต (Slump Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

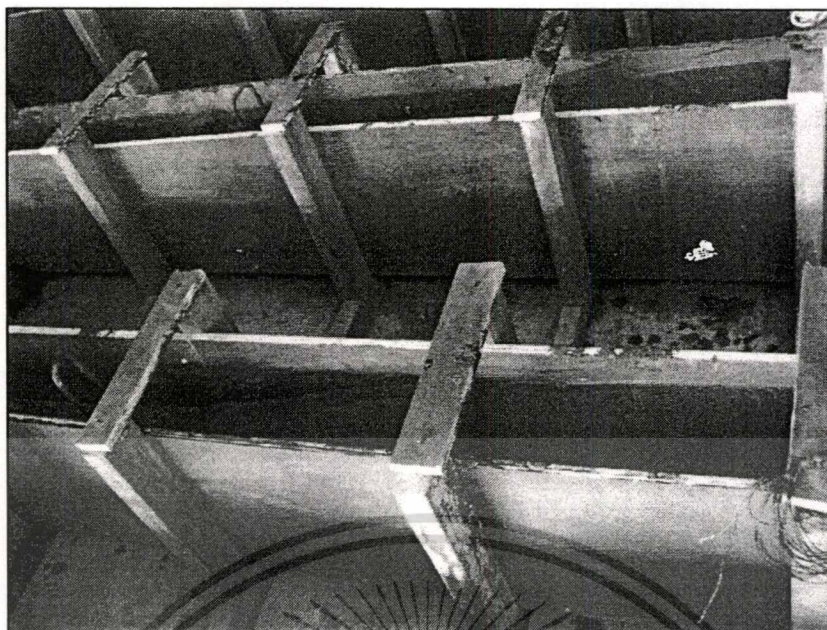


รูปที่ 4.18 หล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา



รูปที่ 4.19 ผสมโพลีเมอร์ซีเมนต์ตามหน่วยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

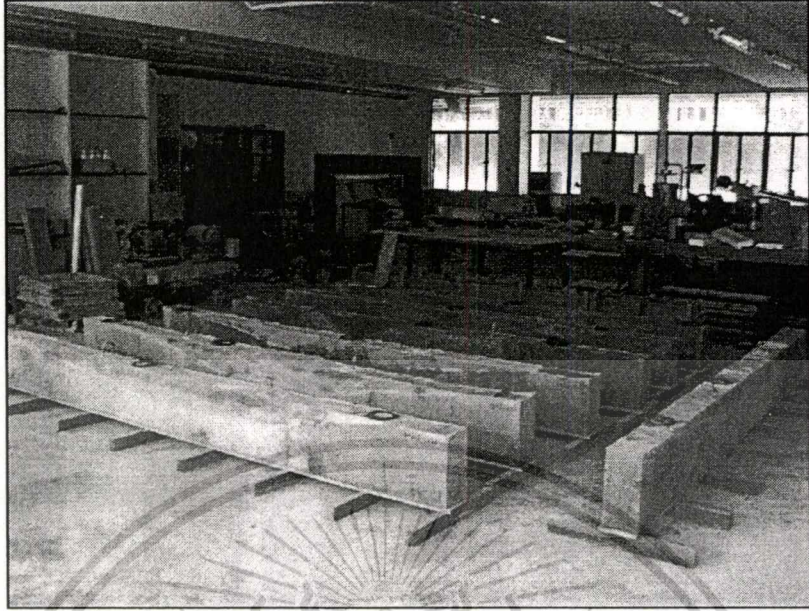


รูปที่ 4.20 หล่อกานลูกผสมทั้ง 2 ชั้น และ 3 ชั้น

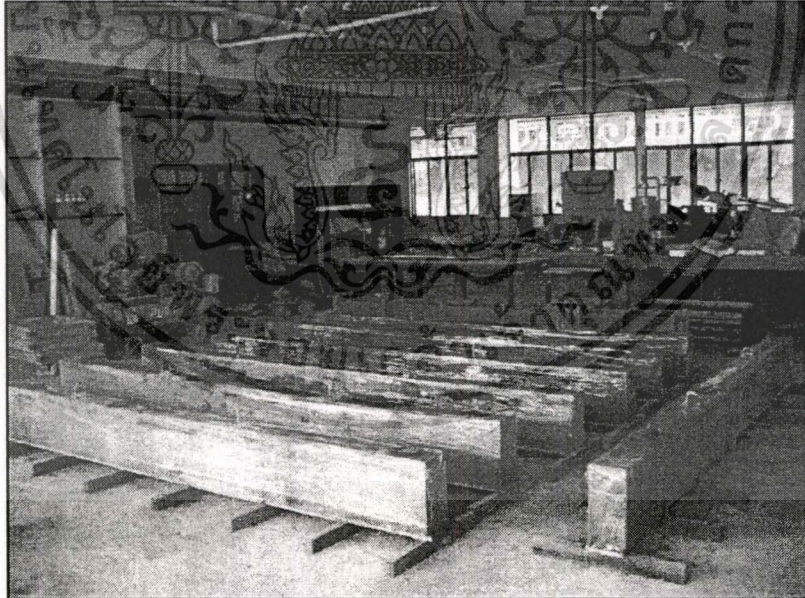


รูปที่ 4.21 เก็บตัวอย่างลูกปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างคานทดสอบที่ถอดแบบข้าง



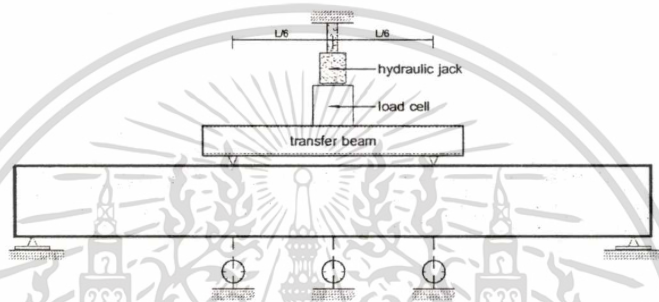
รูปที่ 4.23 บ่มขึ้นตัวอย่างคานทดสอบ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 วิธีการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคานมีดังนี้

1. ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยจุดรองรับของคานทั้งสองด้านจะเป็นแบบหมุด
2. ติดตั้ง dial gauge ใต้ตัวอย่างทดสอบ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคาน จำนวน 1 ตัวและที่ระยะเท่ากับ  $L/6$  ถัดจาก dial gauge ตัวแรกไปทางด้านซ้ายและด้านขวา จำนวนด้านละ 1 ตัว เพื่อวัดระยะแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.24 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.25 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการต่อสายไฟจากมาตรวัดความเครียดเข้ากับ strain gauge indicator

4. การทดสอบตัวอย่างคานจะกระทำแบบ four-points loading test โดยใช้เหล็กตัวไอ (I-beam) ถ่ายแรงจาก hydraulic ram ลงสู่คานตัวอย่าง

5. ดำเนินการทดสอบโดยใช้ hydraulic pump อัดน้ำมัน hydraulic ไปยัง hydraulic ram อย่างช้าๆ บินที่ค่าน้ำหนักบรรทุก การเอนตัวของคานตัวอย่างจาก dial gague ทั้ง 3 ตัว และค่าความเครียดจาก strain gauge indicator

6. ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องโดยทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างสม่ำเสมอ ขณะทำการทดสอบจะสังเกตรอยเริ่มร้าว ที่คานทดสอบพร้อมทั้งจดค่าน้ำหนักไว้ที่รอยแตกนั้นๆ ทดสอบจนกระทั่งเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ รวมเวลาในการทดสอบคานแต่ละตัวประมาณ 24 ชั่วโมง ต่อหนึ่งคานทดสอบ



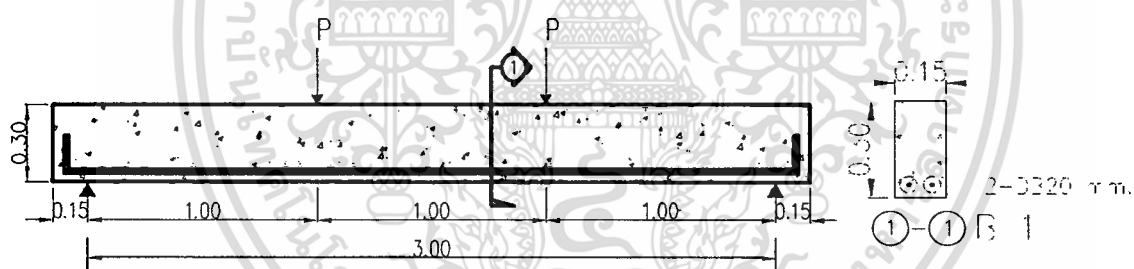
## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและสรุปข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่ได้ พบว่าคานตัวอย่างทั้งหมดมีการแอ่นตัวแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและระยะแอ่นตัวของคานตัวอย่างแต่ละตัว โดยระยะแอ่นตัวของคานตัวอย่างเป็นการเปรียบเทียบระยะแอ่นตัวสุดท้ายที่ได้จากการทดสอบกับระยะแอ่นตัวสุดท้ายที่ได้จากทฤษฎี ดังนี้

#### 5.1 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 1

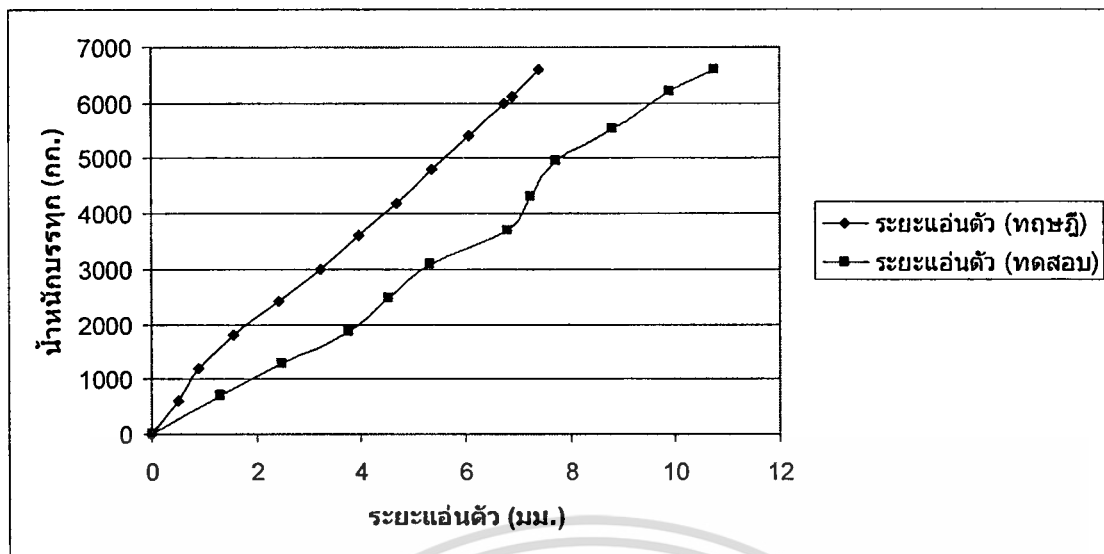
คานตัวอย่าง B 1 เป็นคานควบคุม (controlled beam) ที่ใช้เปรียบเทียบผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลูกผสม 2 ชั้นและ 3 ชั้น ที่มีคอนกรีตโฟมเพื่อใช้ทดแทนคอนกรีตที่เกิดการคืบขึ้นแล้ว มีลักษณะเป็นคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็ก กำลังอัดประลัย  $f_c'$  240 ksc. ไม่เสริมเหล็กปลอก โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 1

ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะแอ่นตัวของคาน ซึ่งนับว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของคาน จากกราฟโดยส่วนใหญ่เห็นได้ว่าเส้นกราฟในช่วงแรกก่อนเกิดรอยแตกร้าวในคาน ลักษณะกราฟจะเป็นเส้นตรง ภายหลังจากความแข็งแกร่ง (stiffness) ของคานลดลงเนื่องจากการแตกร้าวของหน้าตัด ความชันของเส้นกราฟลดลง และจากรูปที่ 5.2 ผลการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอก ได้ระยะแอ่นตัว 10.75 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 7.39 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 31.26% เนื่องมาจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ 109 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ซม<sup>2</sup> ทำให้ความแข็งแกร่งลดลง จึงทำให้คานเกิดระยะแอ่นตัวเพิ่มขึ้น

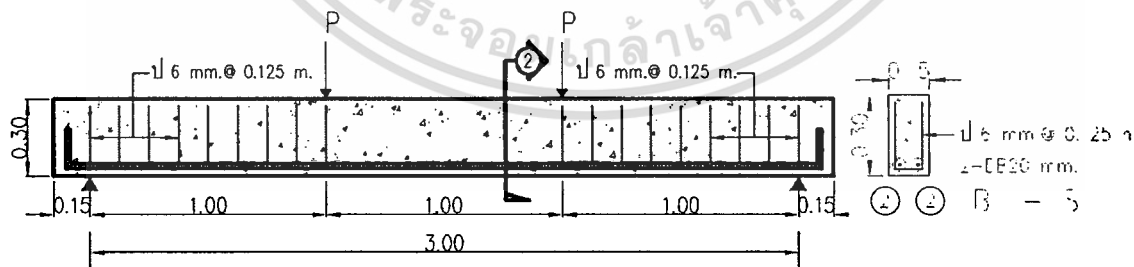
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแฉกตามทฤษฎีกับระยะแฉกที่ทดสอบ กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 1

### 5.2 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 1 S

คานตัวอย่าง B 1 S เป็นคานควบคุม (controlled beam) ที่ใช้เปรียบเทียบผลของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้นและ 3 ชั้น ที่มีคอนกรีตโพมเพื่อใช้ทดแทนคอนกรีตที่เกิดการคืบขึ้นแล้ว มีลักษณะเป็นคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็ก กำลังอัดประลัย  $f'_c$  240 ksc. เสริมเหล็กปลอก โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.3

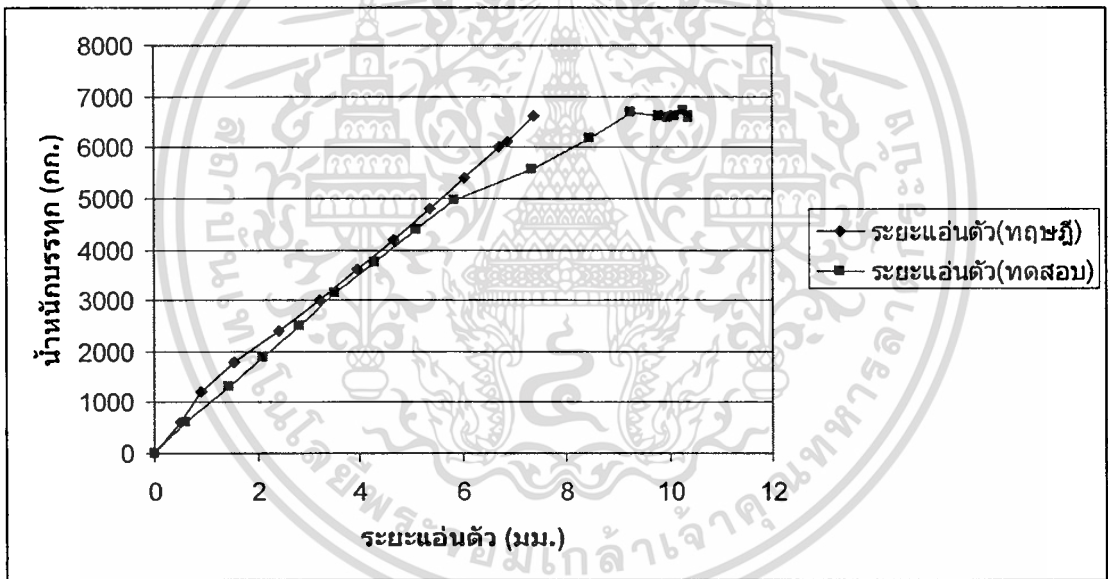


รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 1 S

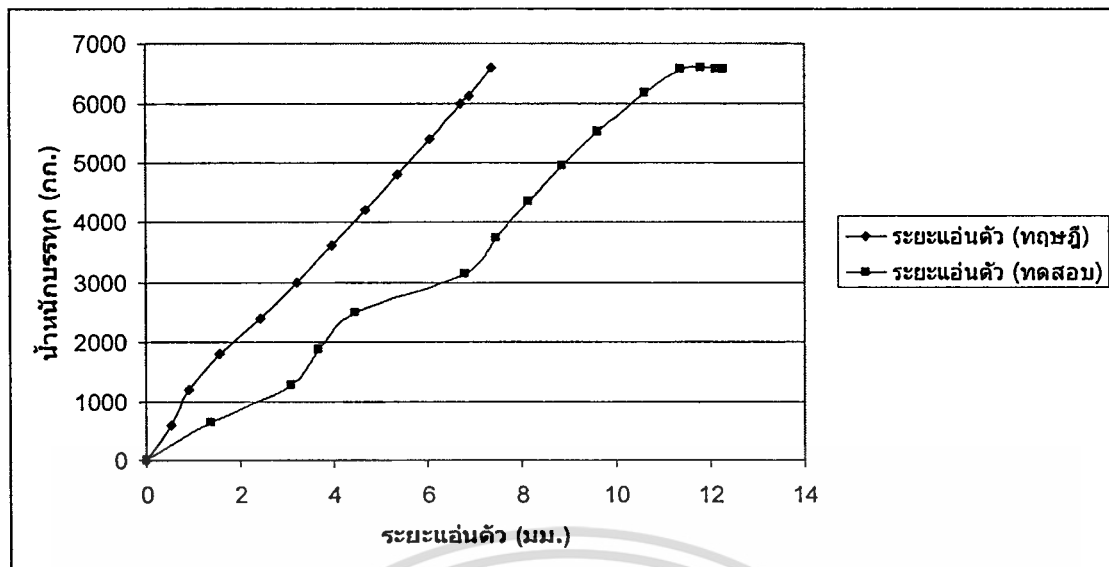
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.4 ผลการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอก ได้ระยะแอนตัว 10.38 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 7.39 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 28.80% เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ 114 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ซม<sup>2</sup> จึงทำให้คานเกิดระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น และจากเส้นกราฟรูปที่ 5.4 สำหรับคานที่เสริมเหล็กปลอก ความแข็งแรงของคานเพิ่มขึ้น ระยะแอนทันทีที่พื้นใดลดลง

จากรูปที่ 5.5 ผลการทดสอบคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอก ลักษณะของกราฟคล้ายกับรูปที่ 5.2 ได้ระยะแอนตัว 12.28 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 7.39 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 39.82% เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ 109 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ซม<sup>2</sup> ทำให้ความแข็งแรงลดลง จึงทำให้คานเกิดระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น



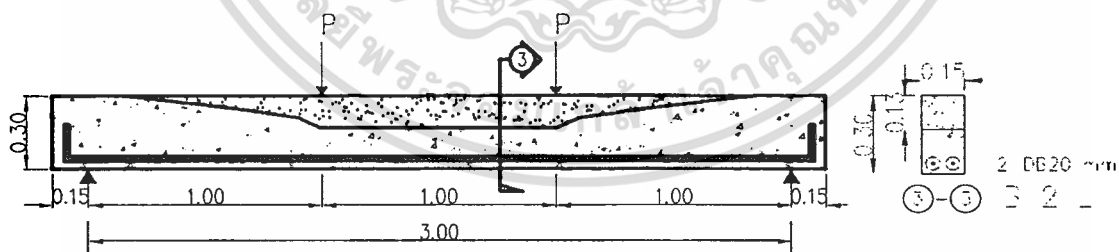
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 1 S



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแฉ่นตัวตามทฤษฎีกับระยะแฉ่นตัวที่ทดสอบ กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 1 S

### 5.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 2 L

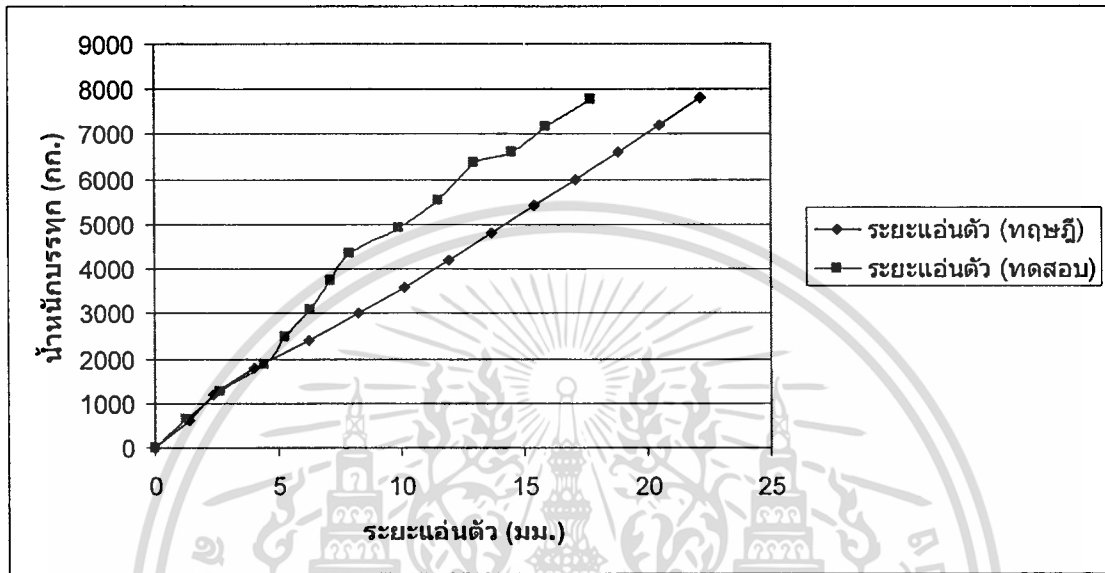
คานตัวอย่าง B 2 L เป็นคานลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย  $f_c'$  240 ksc. และชั้นบนเป็นโฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_f$  ที่มึน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  ไม่เสริมเหล็กปลอก โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 2 L

จากรูปที่ 5.7 ผลการทดสอบคานคอนกรีตลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอก ระยะแฉ่นตัว 17.70 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 22.16 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 25.19% เมื่อทำการเปรียบกับคานคอนกรีตธรรมดา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

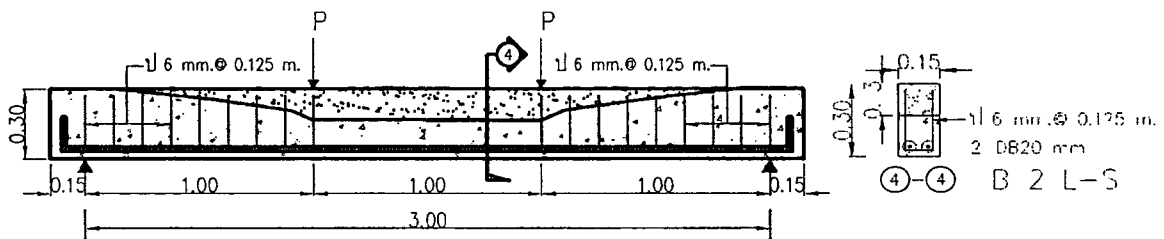
เสริมเหล็ก ไม่เสริมเหล็กปลอกตามผลการทดสอบ คานคอนกรีตลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็ก ไม่เสริมเหล็กปลอก มีระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น 1.65 เท่า เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ 136 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ซม<sup>2</sup> ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงทำให้คานเกิดระยะแอนตัวลดลง



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 2 L

5.4 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 2 L-S

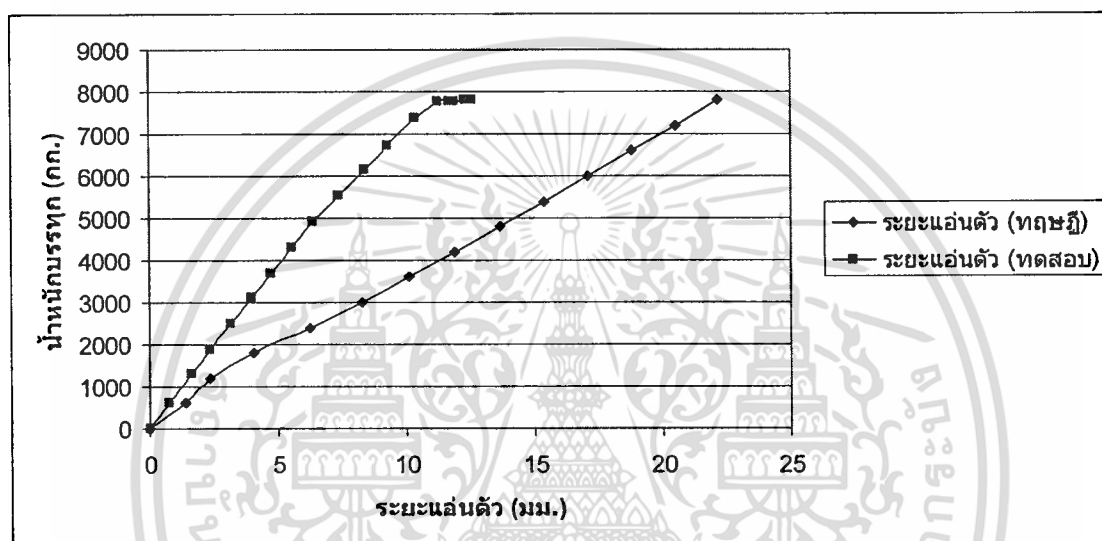
คานตัวอย่าง B 2 L-S เป็นคานลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็ก โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย  $f_c' 240$  ksc. และชั้นบนเป็นโพนซีเมนต์ที่มีค่าน้ำหนัก 1,850 kg/m<sup>3</sup> และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_s$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %) 95,220 kg/cm<sup>2</sup> เสริมเหล็กปลอก โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 2 L-S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

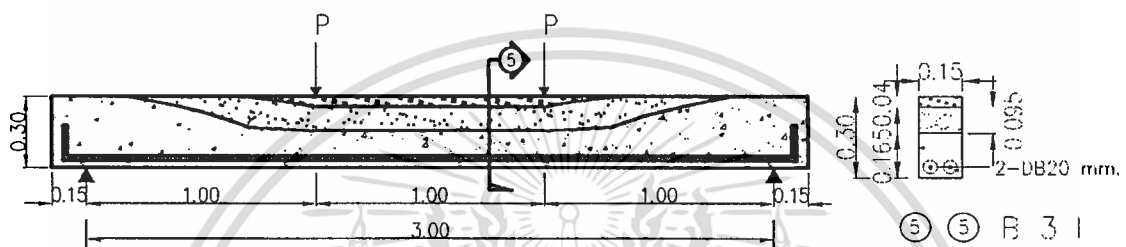
จากรูปที่ 5.9 ผลการทดสอบคานคอนกรีตลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอก ระยะแอนตัว 12.59 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 22.16 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 76.01% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอกตามผลการทดสอบ คานคอนกรีตลูกผสม 2 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอกมีระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น 1.21 เท่า เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ 194 กก/ชม<sup>2</sup> ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ชม<sup>2</sup> อีกประการหนึ่งที่ทำให้คานแอนตัวลดลงอาจมาแบบจำลองของคานที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตของแรงที่กระทำภายในแต่ละชั้น



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 2 L-S

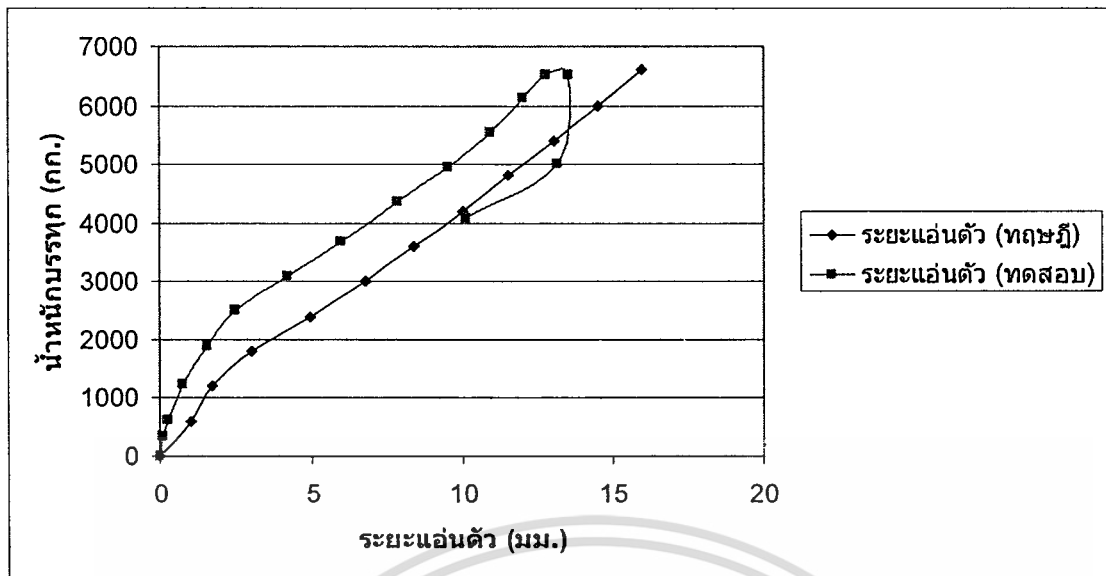
### 5.5 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 3 L

คานตัวอย่าง B 3 L เป็นคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย  $f_c' 240$  ksc. และชั้นถัดมาเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_2$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %)  $169,000 \text{ kg/cm}^2$  ชั้นบนสุดเป็น โฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_1$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  ไม่เสริมเหล็กปลอก โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 3 L

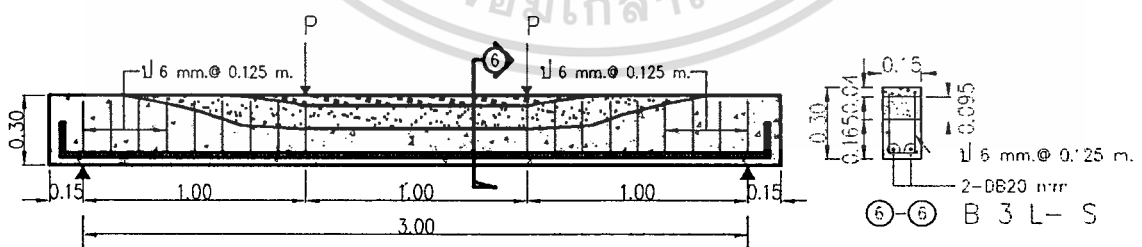
จากรูปที่ 5.11 ผลการทดสอบคานคอนกรีตลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอก ระยะแอนตัว 13.55 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 15.97 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 17.86% เมื่อทำการเปรียบกับคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอกตามผลการทดสอบ คานคอนกรีตลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอกมีระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น 1.26 เท่า เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ  $152 \text{ กก/ซม}^2$  สำหรับคอนกรีต โฟมชั้นกลาง และมีค่าเท่ากับ  $78 \text{ กก/ซม}^2$  สำหรับคอนกรีต โฟมชั้นบนสุด ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ใช้รูปแบบที่  $120 \text{ กก/ซม}^2$  และ  $60 \text{ กก/ซม}^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 3 L

#### 5.6 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง B 3 L-S

คานตัวอย่าง B 3 L-S เป็นคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก โดยชั้นล่างสุดของคานเป็นคอนกรีตกำลังอัดประลัย  $f'_c$  240 ksc. และชั้นถัดมาเป็นโฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_2$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 25 %)  $169,000 \text{ kg/cm}^2$  ชั้นบนสุดเป็นโฟมซีเมนต์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_1$  ที่มีน้ำหนักคงค้างที่ 50 %)  $95,220 \text{ kg/cm}^2$  ไม่เสริมเหล็กปลอก โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.12

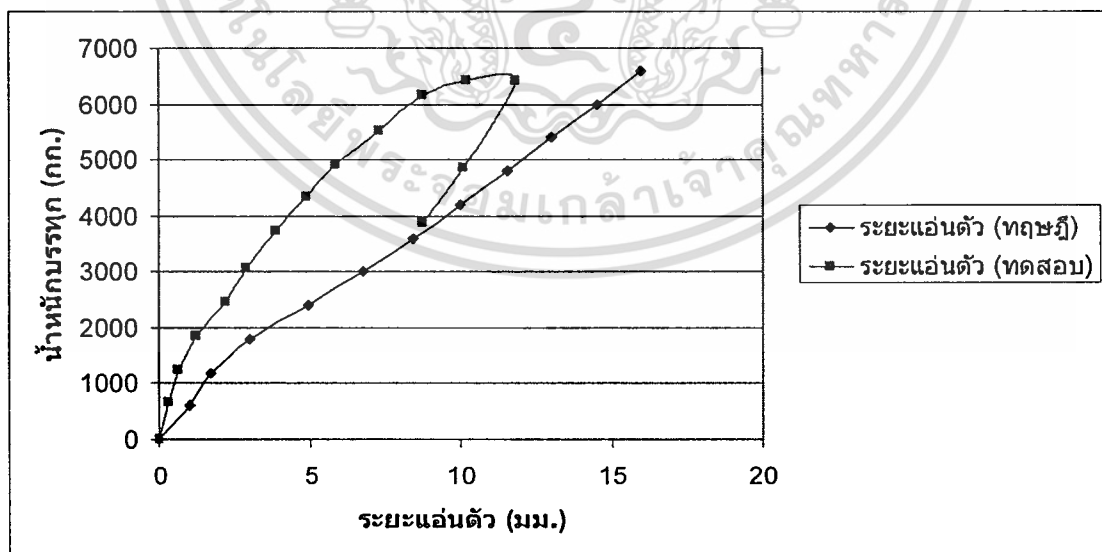


รูปที่ 5.12 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน B 3 L-S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.13 ผลการทดสอบคานคอนกรีตลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอก ระยะแอนตัว 11.85 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 15.97 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 34.77% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอกตามผลการทดสอบ คานคอนกรีตลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอกมีระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น 1.17 เท่า เนื่องมาจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าเท่ากับ 125 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับคอนกรีตโฟมชั้นกลาง และมีค่าเท่ากับ 78 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับคอนกรีตโฟมชั้นบนสุด ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ซม<sup>2</sup> และ 60 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ

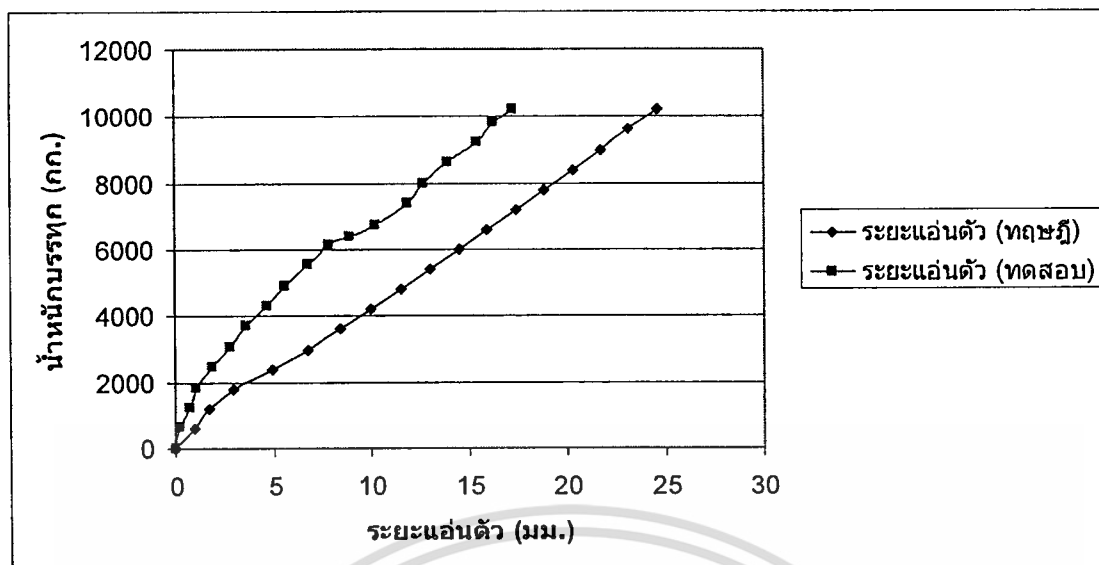
จากรูปที่ 5.14 ผลการทดสอบคานคอนกรีตลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอก ระยะแอนตัว 11.25 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 15.97 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 41.95% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอกตามผลการทดสอบ คานคอนกรีตลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอกมีระยะแอนตัวเพิ่มขึ้น 1.12 เท่า เนื่องมาจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานมีค่าลดลงเหลือ 107 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับคอนกรีตโฟมชั้นกลาง และมีค่าเท่ากับ 102 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับคอนกรีตโฟมชั้นบนสุด ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและมากกว่าที่ใช้ออกแบบที่ 120 กก/ซม<sup>2</sup> และ 60 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การหาค่ากำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของคาน จากผลการทดสอบคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็กเสริมเหล็กปลอก จะได้ค่าแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 10,221 มีค่าระยะแอนตัวของคานก่อนที่จะวิบัติอยู่ที่ 17.23 มม. ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 24.60 มม. เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 42.77%



รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอนตัวตามทฤษฎีกับระยะแอนตัวที่ทดสอบ

กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 3 L-S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแฉ่นตัวตามทฤษฎีกับระยะแฉ่นตัวที่ทดสอบ  
กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำของคาน B 3 L-S

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบระยะแฉ่นตัวผลการคำนวณกับผลการทดสอบ

ชื่อคาน	B 1	B 1 S	B 1 S	B 2 L	B 2 L-S	B 3 L	B 3 L-S	B 3 L-S
คำนวณ (มม.)	7.39	7.39	7.39	22.16	22.16	15.97	15.97	15.97
ทดสอบ(มม.)	10.75	10.38	12.28	17.70	12.59	13.55	11.85	11.25
%	31.26	28.80	39.83	-25.19	-76.01	-17.85	-34.77	-41.95

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบระยะแฉ่นตัวที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ลูกผสม 2 ชั้นและ 3 ชั้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

ชื่อคาน	B 2 L/B 1	B 2 L-S/B 1 S	B 3 L/B 1	B 3 L-S/B 1 S	B 3 L-S/B 1 S
อัตราส่วน	1.65	1.21	1.26	1.17	1.12

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบระยะแฉ่นตัวที่เพิ่มขึ้นจากผลการคำนวณของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ลูกผสม 2 ชั้นและ 3 ชั้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

ชื่อคาน	B 2 L/B 1	B 2 L-S/B 1 S	B 3 L/B 1	B 3 L-S/B 1 S	B 3 L-S/B 1 S
อัตราส่วน	3.00	3.00	2.16	2.16	2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.7 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาและคานคอนกรีตลูกผสม 2 ชั้น และ 3 ชั้นเพื่อหาระยะแ่นตัวของคานที่ใส่เหล็กปลอก และไม่ใส่เหล็กปลอก ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกแบบสองจุด ผลสรุปที่สำคัญได้ดังนี้

5.7.1 ระยะแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลูกผสม 2 ชั้น และ 3 ชั้นจากผลการทดสอบโดยส่วนมากจะมีค่าน้อยกว่าระยะแ่นตัวที่ได้จากการคำนวณ จากการเปรียบเทียบที่แสดงในตารางที่ 5.1

5.7.2 ระยะแ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลูกผสม 2 ชั้น และ 3 ชั้นที่กำหนดคอนกรีตในแต่ละชั้นให้มีค่าโมดูลัสยืดลดลงเนื่องจากการคืบ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็ก ระยะแ่นตัวที่ได้มีค่าน้อย เนื่องจากในงานวิจัยส่วนมากจะมีค่ามากกว่าการแ่นตัวทันที 2-3 เท่า

5.7.3 จากการติดตามวัดความเครียดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของหน่วยแรง (stress block) ทำให้ทราบหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น และลดลงทำให้วิเคราะห์ได้ว่าการที่คานแ่นตัวน้อยลงและแ่นตัวเพิ่มขึ้น เนื่องการผันแปรกำลังอัดของคอนกรีตโพม

5.7.4 เนื่องจากในการออกแบบคานต้องการให้ได้ค่าเนวเกินสะเทินที่มีความลึกเพื่อใช้ในการออกแบบความลึกของคอนกรีตโพมละชั้น และต้องการความสมดุลของแรงภายในหน้าตัด  $C=T$  ให้มีค่าใกล้เคียงกัน จึงได้ออกแบบให้ใช้เหล็กเสริม DB-20 มม. ซึ่งอาจจะทำให้คานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแ่นตัวน้อยลง

5.7.5 เนื่องจากคอนกรีตแต่ละชั้นอาจจะมีการเลื่อนไถลระหว่าง จึงได้ทำการเสริมเหล็กปลอกด้วยคว่ำระหว่างชั้นแต่ละชั้นที่ระยะห่าง 30 ซม. เพื่อป้องกันการเลื่อนไถลระหว่างชั้น ซึ่งอาจจะทำให้คานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแ่นตัวน้อยลง

5.7.6 จากรูปแบบจำลองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลูกผสม 2 ชั้น และ 3 ชั้น เมื่อนำมาหล่อเป็นชิ้นส่วนตัวอย่างคาน ในแต่ละชั้นนั้นมีเงื่อนไขขอบเขตของแรง ซึ่งนี้อาจจะอีกสาเหตุให้คานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแ่นตัวน้อยลง

5.7.7 การคำนวณระยะ โกงตัวตามวิธี โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลที่เสนอโดย ACI คำนึงถึงพฤติกรรมการ โกงตัวในช่วงที่เหล็กเสริมมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง

5.7.8 คานที่เสริมเหล็กปลอก ความแข็งแรงของคานเพิ่มขึ้น ระยะแ่นทันทีที่ทันใดลดลง โดยเหล็กปลอกสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

## 5.8 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลและแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยและทำนายการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ดังนี้

5.8.1 ในการทดสอบน้ำหนักบรรทุก การยกอุปกรณ์และคานทดสอบขึ้นลงแต่ละครั้งทำได้ยากและใช้คนจำนวนมาก ดังนั้นในการออกแบบเพื่อการทดสอบต่อไปควรมุ่งถึง ขนาด ทั้งความยาวและความลึก โดยออกแบบให้เหมาะสมกับเครื่องมือทดสอบที่อยู่

5.8.2 การ set โปรแกรมทดสอบ ผู้ทดสอบควรทำการศึกษาวิธีการ และขั้นตอนของโปรแกรมให้เข้าใจอย่างละเอียดก่อนทำการทดสอบเพื่อจะได้ไม่เกิดข้อผิดพลาดขณะทำการทดสอบ และควรมีความละเอียดในการปรับค่าต่างๆ และจดค่าบันทึกค่าน้ำหนักต่าง

5.8.3 ควรเพิ่มจำนวนคาน โดยห่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โฟมซีเมนต์ ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงของหน่วยน้ำหนักต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบค่าระยะการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตธรรมดา



## บรรณานุกรม

- [1] G.W.Washa, and P.G. Fluck, "Effect of Compressive Reinforcement on the Plastic Flow of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 49(2) pp. 89-108, Oct 1952.
- [2] Wei-Wen Yu, and George Winter, "Instantaneous and Long-Time Deflections of Reinforced Concrete Beams under Working Load," ACI Journal, Vol. 57(1), pp. 29-50, July 1960.
- [3] William G. Corley, and Mete A. Sozen, "Time-Dependent Deflections of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 63, pp. 373-386, March 1966.
- [4] Dan E. Branson, and ACI Committee 435, "Deflections of Reinforced Concrete Flexural Members," ACI Journal, Vol. 63, pp. 637-673, June 1966.
- [5] Pieter C. Pretorius, "Deflections of Reinforced Concrete Members: A Simple Approach," ACI Journal, Vol. 82, pp. 805-812, June 1985.
- [6] G. Clarke, H Scholz, and M. Alexander, "New Method to Predict the Creep Deflection of Cracked Reinforced Concrete Flexural Members," ACI Materials Journal, Vol. 85, pp. 95-101, March-April 1988.
- [7] Raed M. Samra, "Predicting Deflections of Reinforce Concrete Beams Analytically" Journal of Structural Engineering, Vol. 115(5), pp. 1158-1168, Oct 1989.
- [8] Raed M. Samra, "Time-Dependent of Reinforced Concrete Beams Revisited" Journal of Structural Engineering, Vol. 123(6), pp. 823-830, Jun 1997.
- [9] ต่อกุล กาญจนาลัย, พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก. กรุงเทพฯ, หจก. สำนักพิมพ์พีลิก เซ็นเตอร์, 2528.
- [10] ศรีกริช หิรัญมาศ, การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [11] วินิต ช่อวิเชียร, การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [12] วินิต ช่อวิเชียร, คอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [13] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1000.38, กรุงเทพฯ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2544.

- [14] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 20-2543). เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม , กรุงเทพฯ, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [15] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 24-2536). เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย, กรุงเทพฯ, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [16] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 409-2525). วิธีการทดสอบความต้านทานของแท่งคอนกรีต, กรุงเทพฯ, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [17] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา. กรุงเทพฯ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2544.
- [18] เฉลิม เพ็ชรสูงเนิน. “การศึกษาการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ถูกทำลายภายใต้น้ำหนักคงค้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2548.



## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ก-1 วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

ก-2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

ก-3. การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ก-4. การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ก-5. การคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำ

ก-6. การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน

## ก-1 วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

กำหนดกำลังอัดประลัยเฉลี่ย  $f_c'$  ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม.

- มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

- กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 3.15
- มวลรวมหยาบขนาดโตสุด 20 มม. (3/4") มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ค่าการดูดซึมน้ำ 0.5%
- มวลรวมละเอียดความถ่วงจำเพาะ 2.65 ค่าการดูดซึมน้ำ 0.7% ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.80
- แนวทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไป เห็นว่าควรใช้ค่าความยุบตัว 8-10 ซม.
- กำหนดให้ใช้ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 20 มม.

- การออกแบบ

### ขั้นตอนที่ (1)

ในการออกแบบจะต้องออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดของงานที่กำหนดไว้ ดังสมการ

$$f_{cr} = f_c' + k_s$$

โดยที่

$f_c'$  = กำลังอัดที่กำหนดไว้ในแบบ

$k_s$  = ส่วนเผื่อซึ่งประกอบด้วย

$k$  = ค่าคงที่

$s$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัด จากก้อนตัวอย่าง 30 ค่า หรือมากกว่า หรือ ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าส่วนเผื่อกำลังอัด

ค่ากำลังอัดที่กำหนด $f_c'$	กำลังอัดที่ต้องเพิ่ม
น้อยกว่า 210	70
210 - 350	85
350 หรือมากกว่า	100

ดังนั้นกำลังที่ต้องผลิต ( $f_{cr}$ ) = 240 + 85 = 325 กก./ตร.ซม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนที่ (2) ปริมาณน้ำที่ใช้และน้ำหนักซีเมนต์

- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเป็น 20 มม. ค่าความขุบตัว 8-10 ซม. ไม่ต้องใช้สารกักกระจายฟองอากาศจะได้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ = 200 ลิตร/ลบ.เมตร ของคอนกรีต

- คอนกรีตที่ต้องการกำลัง 325 กก./ตร.ซม. และคอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ จะได้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก ที่ต้องใช้ = 0.52

- น้ำหนักซีเมนต์ที่ต้องการ =  $200/0.52 = 385$  กก.

### ขั้นตอนที่ (3) หาปริมาตรซีเมนต์

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรซีเมนต์} &= \text{น้ำหนักซีเมนต์/ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์} \\ &= 385/3.15 \\ &= 123 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ (4) หาปริมาตรทราย

$$\begin{aligned} \text{โดยทั่วไปจะใช้ปริมาตรปูน+ปริมาตรทราย} &= 40\% \text{ โดยปริมาตร หรือ } 400 \text{ ลิตร} \\ \text{ปริมาตรทราย} &= 400-123 \\ &= 277 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ (5) หาน้ำหนักทราย

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักทราย} &= \text{ปริมาตรทราย} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของทราย} \\ &= 277 \times 2.65 \\ &= 735 \text{ กก.} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ (6) หาปริมาตรหิน

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรหิน} &= 1000 - \text{ปริมาตรซีเมนต์} - \text{ปริมาตรน้ำ} - \text{ปริมาตรทราย} \\ &= 1000 - 123 - 200 - 277 \\ &= 400 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ (7) หาน้ำหนักของหิน

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักหิน} &= \text{ปริมาตรหิน} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของหิน} \\ &= 400 \times 2.70 \\ &= 1080 \text{ กก.} \end{aligned}$$

สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม. คอนกรีตเป็นดังนี้

ซีเมนต์ 385 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำ	200	ลิตร
ทราย	735	กก.
หิน	1080	กก.
รวม	2390	กก.

- การออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร 1:2:4

คือ ใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน หิน 4 ส่วน โดยปริมาตร ซึ่งสามารถแปลงเป็นส่วนผสม โดยน้ำหนักได้ดังนี้

กำหนดให้ หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ = 1400 กก./ลบ.ม.  
 หน่วยน้ำหนักของทราย = 1450 กก./ลบ.ม.  
 หน่วยน้ำหนักของหิน = 1500 กก./ลบ.ม.

การคำนวณ

ปูน 1 ถุง 50 กก. มีปริมาตร =  $50/1400 = 0.036$  ลบ.ม.

ทราย 2 ส่วน มีปริมาตร =  $0.036 \times 2 = 0.072$  ลบ.ม.

น.น. ทราย =  $0.072 \times 1450 = 104$  กก.

หิน 4 ส่วน มีปริมาตร =  $0.036 \times 4 = 0.144$  ลบ.ม.

น.น. หิน =  $0.144 \times 1500 = 216$  กก.

ปริมาณน้ำสำหรับปูน 1 ถุง เพื่อให้ยุบตัว 10 ซม. = 35 ลิตร ( $f_c' = 240$  ksc.)

น้ำหนักส่วนผสมเมื่อใช้ปูน 1 ถุง =  $50 + 104 + 216 + 35$  กก. = 405 kg.

หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = 2400 กก./ลบ.ม.

ต้องใช้ปริมาณปูน =  $2400/405 = 6.0$  ถุง = 300 กก./ลบ.ม.

สรุป ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม.

ปูนซีเมนต์ = 300 กก./ลบ.ม.

ทราย = 624 กก./ลบ.ม.

หิน = 1296 กก./ลบ.ม.

น้ำ = 210 กก./ลบ.ม.

ค่ายุบตัวประมาณ  $8 \pm 10$  ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก-2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

หน่วยน้ำหนักออกแบบ  $1,600 \text{ kg/m}^3$ ,  $1,700 \text{ kg/m}^3$ ,  $1,800 \text{ kg/m}^3$ ,  $1,900 \text{ kg/m}^3$ ,  $2,000 \text{ kg/m}^3$

1. อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียด = 1 : 1
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) = 0.3
3. น้ำยาสำหรับทำให้เกิดโฟมที่ใช้ผสมในคอนกรีตมวลเบา 2% โดยปริมาณน้ำ

## ก-3 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

แสดงรายการคำนวณเพื่อตรวจสอบแรงเฉือน

$$\begin{aligned} \text{Allowable shear stress; } V &= 0.29\sqrt{f_c'} \\ &= 0.29\sqrt{240} \\ &= 4.49 \text{ ksc.} \end{aligned}$$

จาก  $V = P/A$

$$P = 4.49 \times 15 \times 26 = 1,752 \text{ kg.}$$

ซึ่งแรงเฉือนที่ยอมให้ด้านทานได้เพียง  $1,752 \text{ kg.} < 3,100 \text{ kg.}$  (แรงกระทำ P ที่กระทำลงคาน)

ดังนั้นจึงต้องใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

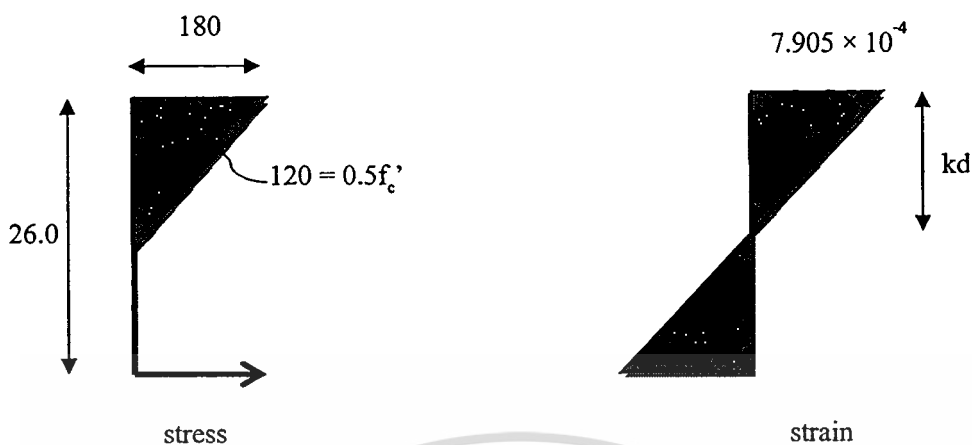
$$\begin{aligned} A_v &= \frac{V_s S}{f_v d} \\ &= \frac{1348(12.5)}{1200(26)} \\ &= 0.54 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

ใช้ RB  $\emptyset$  6 mm. @ 12.50 cm.

ระยะห่างมากที่สุด  $d/2 = 26/2 = 13$  ใช้ 12.50 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ ก.1 แสดงหน่วยแรง และความเครียดในหน้าตัดคาน

$$\frac{\epsilon_s}{d - kd} = \frac{\epsilon_c}{kd}$$

$$\epsilon_s = \frac{7.905 \times 10^{-4} (26 - kd)}{kd}$$

$$\frac{1}{2} f'_c bkd = A_s f_s$$

$$\frac{1}{2} (180)(15)(kd) = A_s \epsilon_s E$$

$$1350kd = 6.28 \times \left( \frac{7.905 \times 10^{-4} (26 - kd)}{kd} \right) 2.04 \times 10^{-6}$$

$$1350kd^2 = 263,308.6 - 10,127.25kd$$

$$1350kd^2 + 10,127.25 - 263,306.6 = 0$$

$$kd = 10.71 \text{ cm.}$$

ตรวจสอบค่า Stress ในเหล็กเมื่อใช้เหล็ก DB-20

$$\frac{180}{227,699.2} = 7.905 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_s = \frac{7.905 \times 10^{-4} (26 - kd)}{kd}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_s = 1.129 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_s = 2,302.4 \text{ ksc.}$$

#### ก-4 การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

คอนกรีต  $f_c' = 240$  ksc. ที่อายุ 365 วัน โดยรับน้ำหนักบรรทุก 50% ของน้ำหนักบรรทุก  
ประลัย

จาก 
$$E_{ci} = 4,270 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'}$$

ที่  $w_c = 2.408 \text{ tons/m}^3$

เพราะฉะนั้น 
$$E_{ci} = 4,270 (2.408^{1.5}) \sqrt{240} = 247,182.7842 \text{ ksc.}$$

จาก 
$$\phi_\infty(t) = C_u K_a K_h K_{th} K_s K_f K_e$$

ที่  $C_u = 2.35$

$K_a = 0.843617083$  สำหรับการบ่มขึ้นที่อายุ 28 วัน

$K_h = 1.00$  สำหรับสัมประสิทธิ์ด้านความชื้นสัมพัทธ์

$K_{th} = 1.00$  สำหรับความหนาแน่นที่สุดของชิ้นส่วน 6 นิ้ว

$K_s = 1.05$  สำหรับค่าการยุบตัว 3.42 นิ้ว

$K_f = 1.00$  สำหรับอัตราส่วนระหว่างมวลรวมละเอียดกับมวลรวมหยาบ 69.4%

$K_e = 1.00$  สำหรับปริมาณอากาศ 6%

เพราะฉะนั้น 
$$\begin{aligned} \phi_\infty(t) &= (2.35)(0.843617083)(1.00)(1.00)(1.05)(1.00)(1.00) \\ &= 2.081625151 \end{aligned}$$

จาก 
$$\phi(t) = \phi_\infty(t) \frac{(t-t_0)^{0.6}}{10 + (t-t_0)^{0.6}}$$

ที่  $t = 365$  วัน

$t_0 = 28$  วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}\phi(t) &= 2.081625151 \left[ \frac{(365-28)^{0.6}}{10+(365-28)^{0.6}} \right] \\ &= 1.595868152\end{aligned}$$

จาก

$$E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1+\phi(t)}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}E_{ce}(t) &= \frac{247,182.78}{1+1.595868152} \\ &= 95221.62 \text{ ksc.}\end{aligned}$$

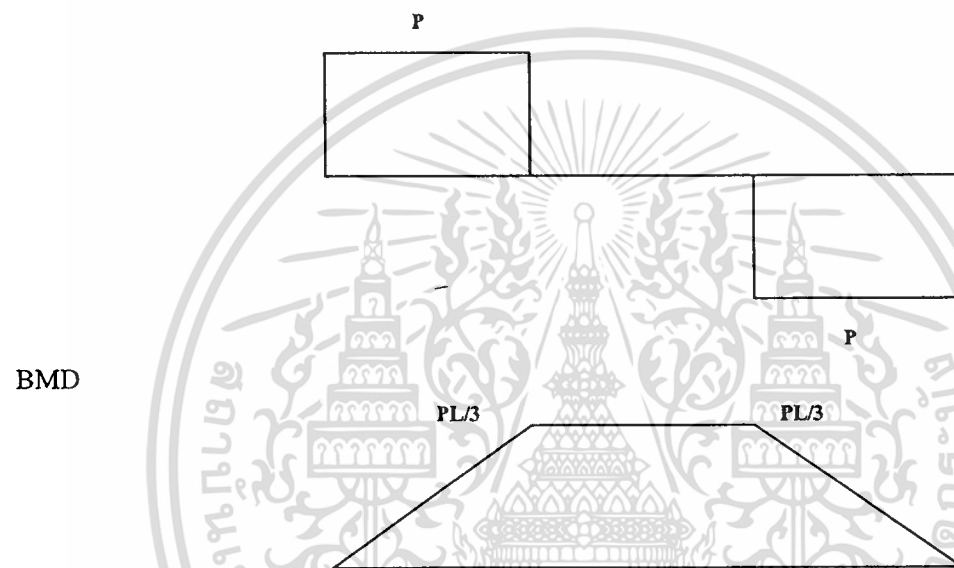
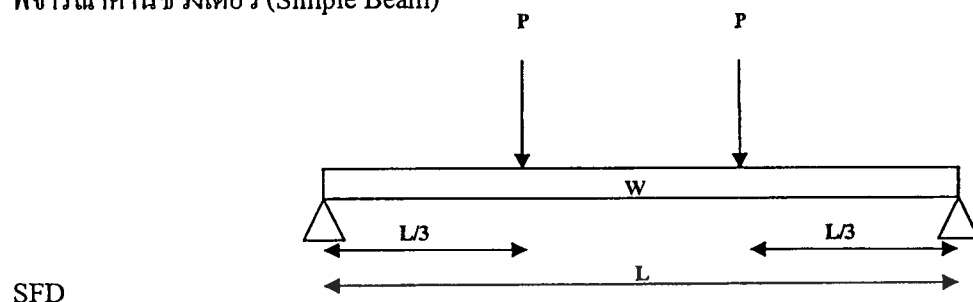
แสดงว่าที่คอนกรีตกำลังอัด 240 ksc. เมื่อเวลาผ่าน 365 วันไปจะเกิดคืบในคอนกรีตทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเหลือเพียง 95,221.62 ksc. เท่านั้น



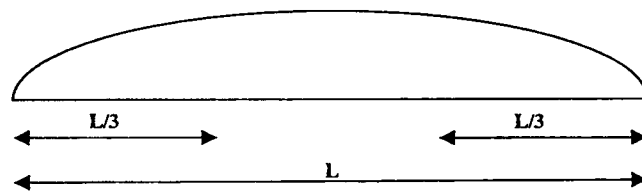
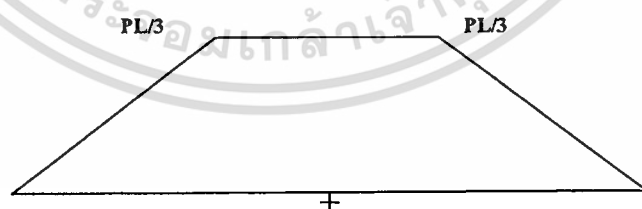
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-5 การคำนวณหาค่าน้ำหนักกระทำ, P (kg.)

พิจารณาคานช่วงเดี่ยว (Simple Beam)



แต่โมเมนต์ที่พิจารณานั้นต้องพิจารณน้ำหนักเนื่องจากตัวของคานเอง ซึ่งถือว่ามีความน้อยมากเราจะนำมาพิจารณาเฉพาะหาค่าโมเมนต์ด้วยจะก็ได้



รูปที่ ก.2 แสดงแผนภาพของแรงเฉือน และแผนภาพของ โมเมนต์ค้ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = \frac{PL}{3} + \left(-\frac{WL}{2}\right)\left(\frac{L}{3}\right) - \left(-\frac{WL}{3}\right)\left(\frac{L}{3}\right)\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$M = \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL^2}{6}\right) - \left(\frac{WL^2}{18}\right)$$

$$M = \frac{PL}{3} + \left(\frac{WL^2}{9}\right)$$

แทนค่าลงในสมการ

$$M = \frac{P(3)}{3} + \left(\frac{108(3)^2}{9}\right)$$

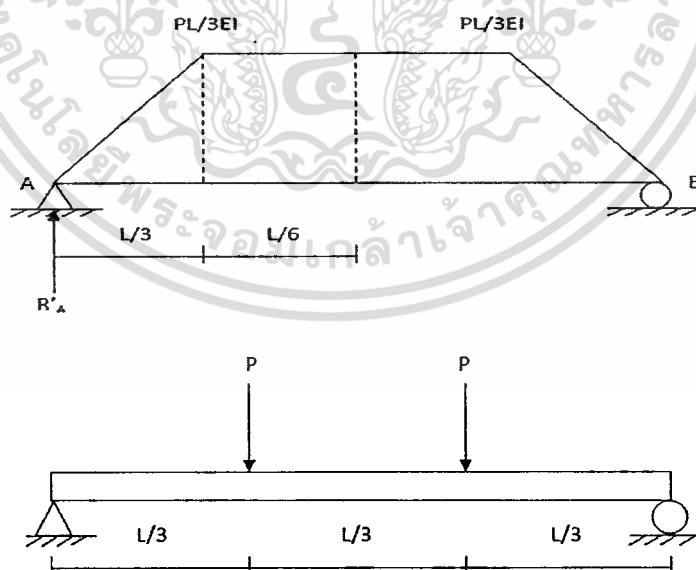
$$= P + 108$$

และจากการคำนวณจะได้ค่าโมเมนต์ 3,167.134 kg-m.

$$P = 3,167.134 - 108$$

$$= 3,059.134 \text{ kg.}$$

ก-6 การคำนวณหาระยะแอนตัวของคาน



รูปที่ ก.3 แสดงน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำ และแผนภาพของ โมเมนต์ดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_A' = \frac{PL}{3EI} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{2} + \frac{PL}{3EI} \cdot \frac{L}{6} = \frac{PL^2}{9EI}$$

$$\Delta_i = \frac{PL^2}{9EI} \left( \frac{L}{2} \right) - \frac{PL^2}{18EI} \cdot \frac{5L}{18} - \frac{PL^2}{18EI} \cdot \frac{L}{12}$$

$$= \frac{PL^3}{18EI} - \frac{5PL^3}{324EI} - \frac{PL^3}{216EI}$$

$$\Delta_i = \frac{23 PL^3}{648 EI}$$



$$I_{\alpha} = \frac{bk^3d^3}{3} + nA_s(d - kd^2)$$

$$= \frac{15(0.41)^3(26)^3}{3} + 56.27(26 - 10.71)^2$$

$$= 19211.81 \text{ cm}^4$$

$$I_g = \frac{1}{12} bh^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{12} (15)(30)^3 = 33,750 \text{ cm}^4$$

$$f_r = 2\sqrt{f_c'} = 2\sqrt{240} = 30.98 \text{ ksc.}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \frac{30.98 (33,750)}{10.74} = 97,354 \text{ kg}\cdot\text{cm.}$$

หาระยะแอ่นตัวของคานารูปผสม 3 ชั้น ตามวิธี ACI

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{cr} \leq I_g$$

$$I_e = \left( \frac{97354}{306000} \right)^3 \cdot 33750 + \left[ \left( 1 - \left( \frac{97354}{306000} \right)^3 \right) \cdot 19211.81 \right] \leq 33750$$

$$= 19680 \text{ cm}^4 \leq 33750 \text{ cm}^4$$

$$\Delta_i = K \left( \frac{23PL^3}{648 E_c I_e} \right) + K \left( \frac{5 WL^4}{384 E_c I_e} \right)$$

K = 1 (สำหรับคานาช่วงเดียวธรรมดา)

$$\Delta_i = 1 \left( \frac{23 (3060) (300)^3}{648 (227700) (19680)} \right) + 1 \left( \frac{5 (108) (300)^4}{384 (227700) (19680)} \right)$$

$$= 0.65 + 0.007 = 0.657 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{\delta}{1 + 50 p'} \quad p' = \frac{A_s'}{bd}$$

$$\delta = 1.4 \quad \text{สำหรับบรรทุกน้ำหนักใช้งาน 12 เดือน}$$

$$\lambda = 1.4$$

$$\Delta_a = \lambda \Delta_i$$

$$= (0.14)(0.657) = 0.92$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta_T = \Delta_i + \Delta_s = 0.657 + 0.92 = 1.577 \text{ cm}$$

หาระยะแอนตัวของคานารูปผสม 2 ชั้น ตามวิธี ACI

$$I_c = \left[ \left( \frac{97354}{389000} \right)^3 \cdot 33750 \right] + \left[ \left( 1 - \left( \frac{97354}{389000} \right)^3 \right) \cdot 19211.81 \right] \leq 33750$$

$$= 18911 \text{ cm}^4 \leq 33750 \text{ cm}^4$$

$$\Delta_i = 1 \cdot \left( \frac{23(3890)(300)^3}{648(227700)(18911)} \right) + 1 \cdot \left( \frac{5(108)(300)^4}{384(227700)(18911)} \right)$$

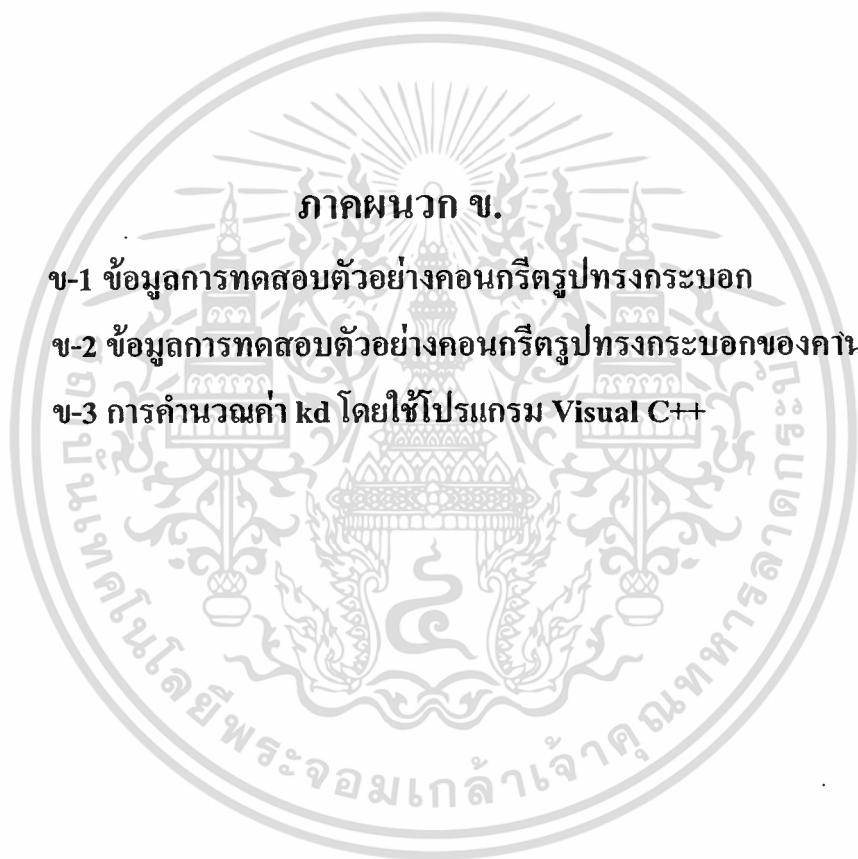
$$= 0.87 + 0.007 = 0.877$$

$$\Delta_s = 0.14(0.877) = 1.228$$

$$\Delta_T = 0.877 + 1.228 = 2.105 \text{ cm}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข-1 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

- คอนกรีตธรรมดา  $f_c' \sim 240$  ksc.

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	29.50	176.71	12.594	44342.508	250.927	236717.000	2415.846
2	14.96	29.30	175.77	12.612	41794.088	237.773	228023.000	2448.856
3	14.98	29.80	176.24	12.514	43832.824	248.706	206697.000	2382.684
4	15.00	30.00	176.71	12.564	42813.456	242.275	288414.000	2369.923
5	14.90	29.60	174.37	12.453	42303.772	242.614	178645.000	2412.792
		เฉลี่ย	175.96	12.547	43017.330	244.459	227699.200	2408.151

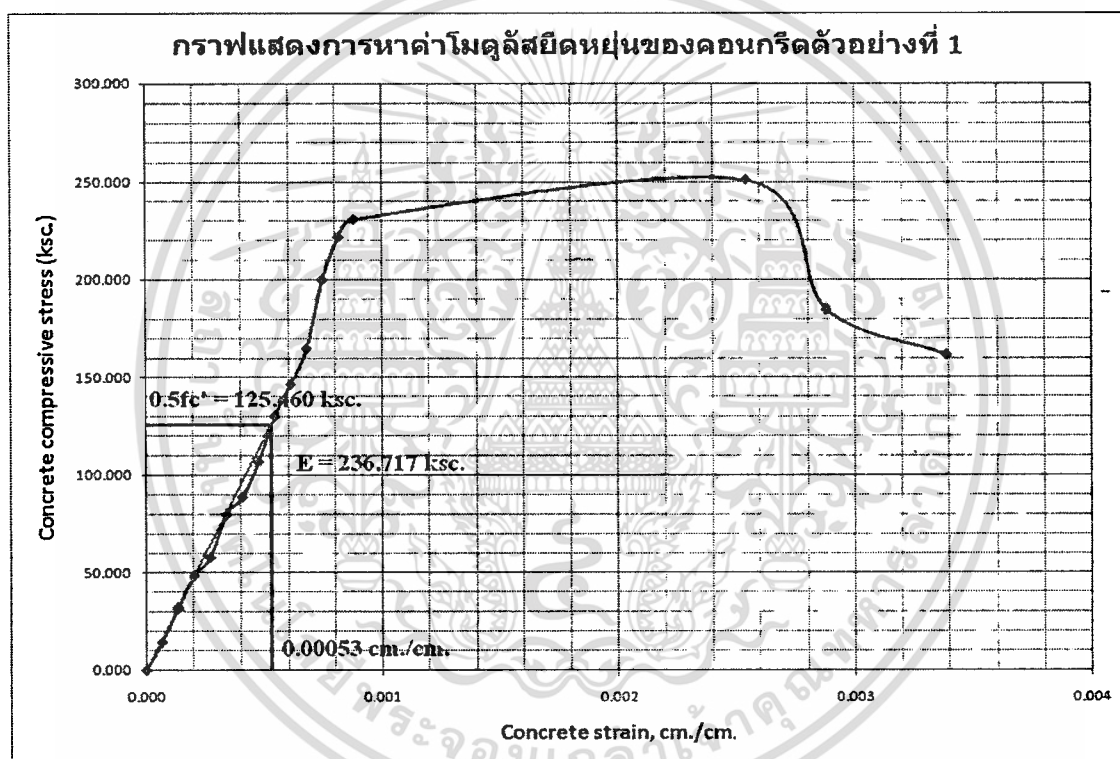
กำลังอัดเฉลี่ย ( $f_c'$ ) 250.927 ksc.

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบการหาคัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
25.00	2548.42	176.71	14.42	0.0000
55.00	5606.52	176.71	31.73	0.0000
84.00	8562.69	176.71	48.46	0.0010
100.00	10193.68	176.71	57.69	0.0010
138.00	14067.28	176.71	79.61	0.0010
154.00	15698.27	176.71	88.84	0.0010
185.00	18858.31	176.71	106.72	0.0010
225.00	22935.78	176.71	129.79	0.0010
254.00	25891.95	176.71	146.52	0.0020
285.00	29051.99	176.71	164.40	0.0020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
346.00	35270.13	176.71	199.59	0.0020
385.00	39245.67	176.71	222.09	0.0020
400.00	40774.72	176.71	230.74	0.0020
435.00	44342.51	176.71	250.93	0.0020
230.00	23445.46	176.71	132.68	0.0030



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 236,717 ksc.

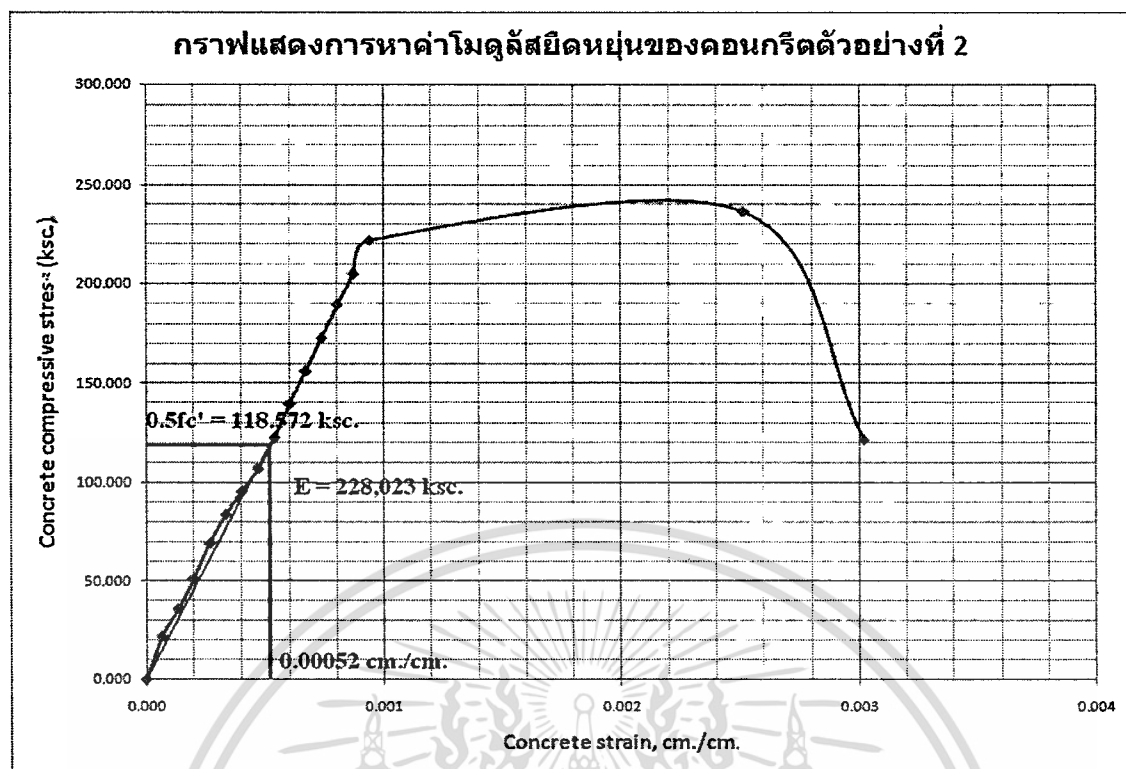
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 237.773 ksc.

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบการหาคัดตัวคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	175.77	0.00	0.0000
38.00	3873.60	175.77	22.04	0.0000
62.00	6320.08	175.77	35.96	0.0000
88.00	8970.44	175.77	51.04	0.0010
120.00	12232.42	175.77	69.59	0.0010
145.00	14780.84	175.77	84.09	0.0010
165.00	16819.57	175.77	95.69	0.0010
185.00	18858.31	175.77	107.29	0.0010
212.00	21610.60	175.77	122.95	0.0010
242.00	24668.71	175.77	140.35	0.0020
270.00	27522.94	175.77	156.58	0.0020
300.00	30581.04	175.77	173.98	0.0020
328.00	33435.27	175.77	190.22	0.0020
355.00	36187.56	175.77	205.88	0.0020
385.00	39245.67	175.77	223.28	0.0020
410.00	41794.09	175.77	237.78	0.0030
210.00	21406.73	175.77	121.79	0.0030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

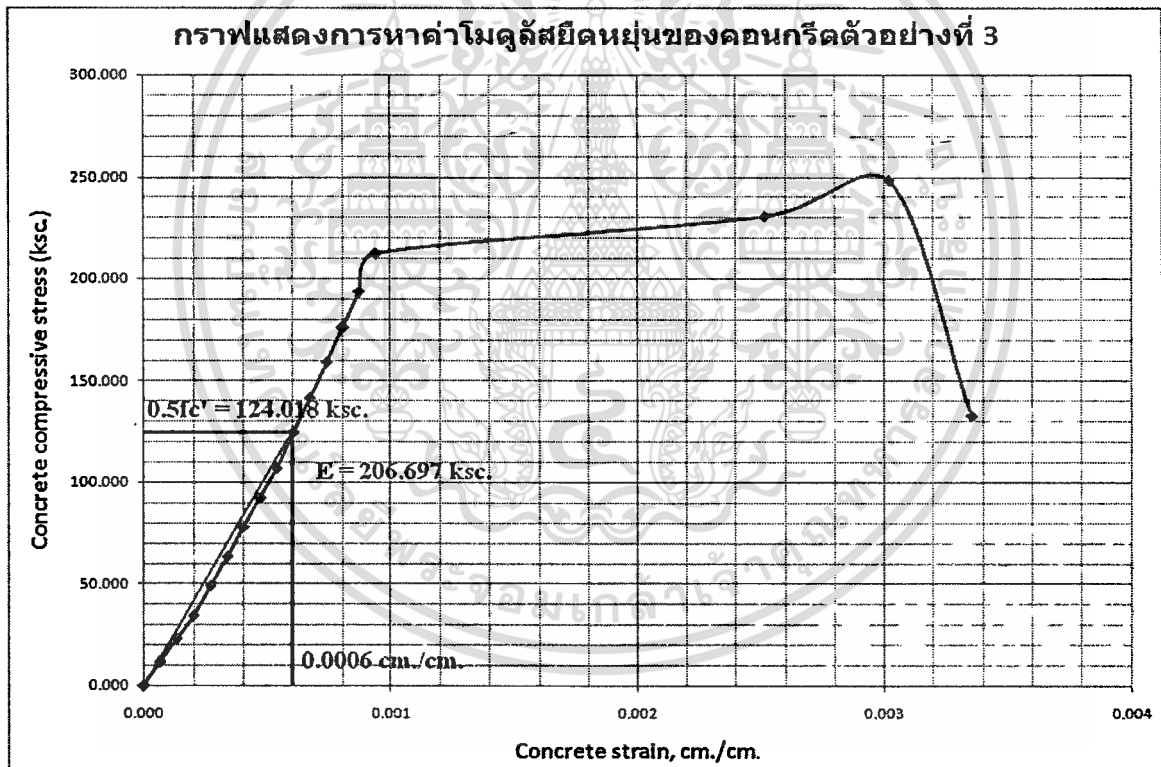
Initial Tangent Modulus Elastic = 228,023 ksc.

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 248.706 ksc.

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.24	0.00	0.0000
20.00	2038.74	176.24	11.57	0.0000
40.00	4077.47	176.24	23.14	0.0000
60.00	6116.21	176.24	34.70	0.0010
85.00	8664.63	176.24	49.16	0.0010
110.00	11213.05	176.24	63.62	0.0010
135.00	13761.47	176.24	78.08	0.0010
185.00	18858.31	176.24	107.00	0.0010
215.00	21916.41	176.24	124.36	0.0020

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
245.00	24974.52	176.24	141.71	0.0020
275.00	28032.62	176.24	159.06	0.0020
305.00	31090.72	176.24	176.41	0.0020
335.00	34148.83	176.24	193.76	0.0020
368.00	37512.74	176.24	212.85	0.0020
400.00	40774.72	176.24	231.36	0.0030
430.00	43832.82	176.24	248.71	0.0030
230.00	23445.46	176.24	133.03	0.0030



รูปที่ ข.3 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 206,697 ksc.

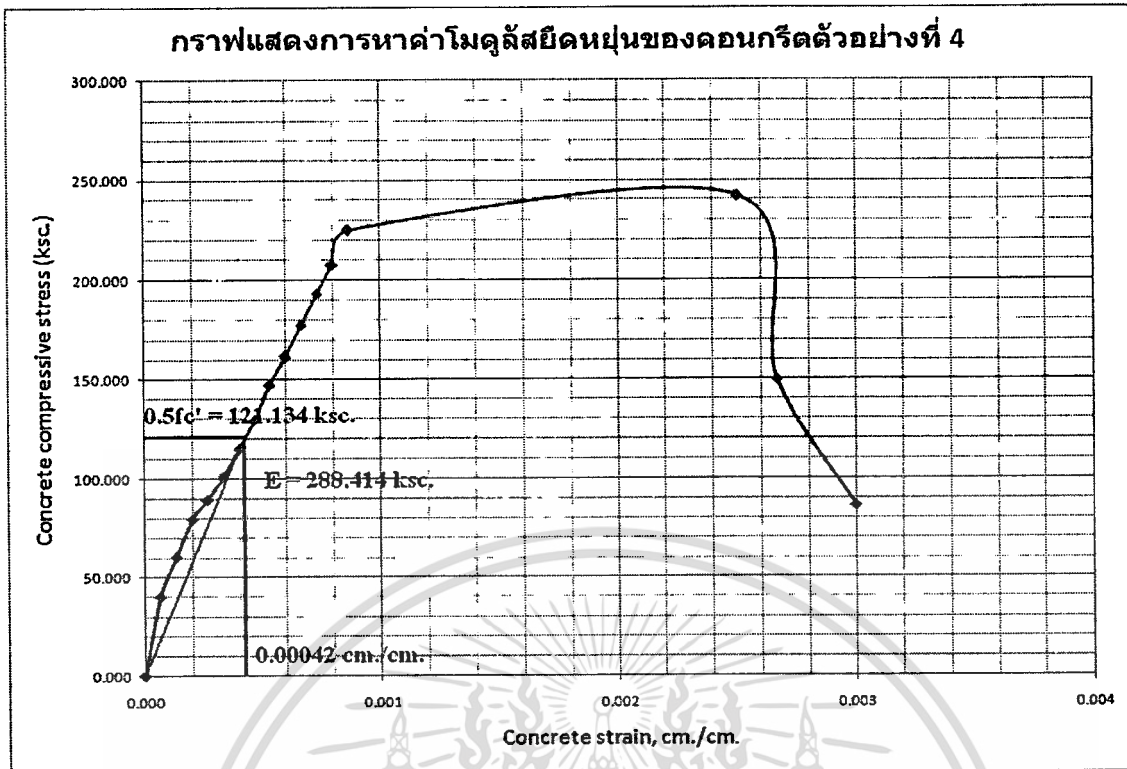
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 242.275 ksc.

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
70.00	7135.58	176.71	40.38	0.0000
105.00	10703.36	176.71	60.57	0.0000
138.00	14067.28	176.71	79.61	0.0010
155.00	15800.20	176.71	89.41	0.0010
175.00	17838.94	176.71	100.95	0.0010
200.00	20387.36	176.71	115.37	0.0010
225.00	22935.78	176.71	129.79	0.0010
255.00	25993.88	176.71	147.10	0.0010
280.00	28542.30	176.71	161.52	0.0020
308.00	31396.53	176.71	177.67	0.0020
335.00	34148.83	176.71	193.25	0.0020
360.00	36697.25	176.71	207.67	0.0020
390.00	39755.35	176.71	224.98	0.0020
420.00	42813.46	176.71	242.28	0.0020
260.00	26503.57	176.71	149.98	0.0030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

Initial Tangent Modulus Elastic = 288,414 ksc.

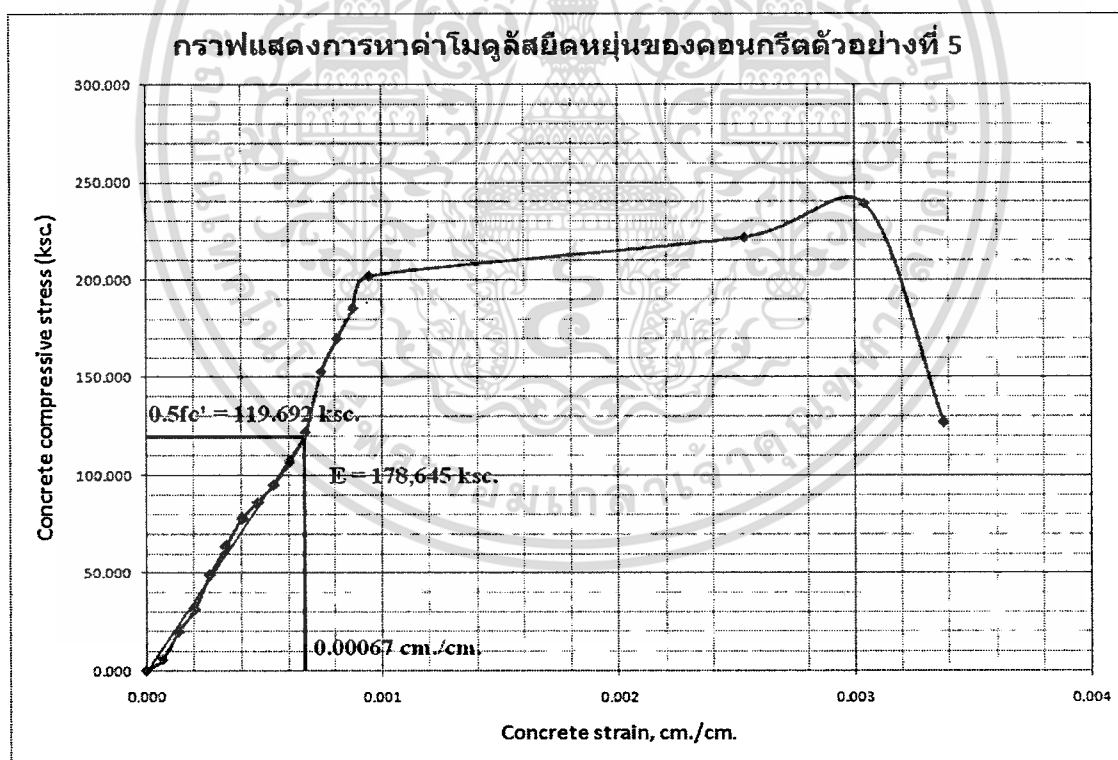
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 242.614 ksc.

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	174.37	0.00	0.0000
10.00	1019.37	174.37	5.85	0.0000
35.00	3567.79	174.37	20.46	0.0000
55.00	5606.52	174.37	32.15	0.0010
85.00	8664.63	174.37	49.69	0.0010
110.00	11213.05	174.37	64.31	0.0010
135.00	13761.47	174.37	78.92	0.0010
150.00	15290.52	174.37	87.69	0.0010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
165.00	16819.57	174.37	96.46	0.0010
185.00	18858.31	174.37	108.15	0.0020
212.00	21610.60	174.37	123.94	0.0020
265.00	27013.25	174.37	154.92	0.0020
295.00	30071.36	174.37	172.46	0.0020
322.00	32823.65	174.37	188.24	0.0020
350.00	35677.88	174.37	204.61	0.0020
385.00	39245.67	174.37	225.07	0.0030
415.00	42303.77	174.37	242.61	0.0030
220.00	22426.10	174.37	128.61	0.0030



รูปที่ ข.5 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 178,645 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คอนกรีตผสมโพลีซีเมนต์  
หน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลี หน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity ( $E_c$ ) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.04	30.30	177.66	8.569	40590.181	228.473	55707.862	1591.849
2	14.98	29.60	176.24	8.298	42019.776	238.419	54186.057	1590.626
3	15.05	29.80	177.89	8.578	42901.449	241.162	58141.053	1618.106
4	14.86	30.00	173.43	8.410	41099.966	236.981	56229.977	1616.394
5	15.20	28.80	181.46	8.504	40035.503	220.632	56843.366	1627.248
		เฉลี่ย	177.34	8.472	41329.375	233.133	56221.663	1608.845

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลี หน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 7 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity ( $E_c$ ) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.09	29.70	178.84	8.613	38801.815	216.962	39870.980	1621.547
2	14.89	30.00	174.13	8.415	38537.214	221.310	40013.677	1610.844
3	15.05	30.20	177.89	8.612	39343.516	221.162	39970.507	1603.002
4	15.09	30.30	178.84	8.564	39311.513	219.812	40156.781	1580.395
5	15.27	29.60	183.13	8.553	40035.562	218.614	39865.500	1577.825
		เฉลี่ย	178.57	8.551	39205.924	219.572	39975.489	1598.723

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 3 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.12	30.00	179.55	8.613	37482.117	208.752	30508.978	1598.968
2	14.90	30.00	174.37	8.501	34637.157	198.646	28960.546	1625.123
3	15.02	30.20	177.19	8.590	35079.312	197.980	30898.019	1605.301
4	15.09	30.10	178.84	8.611	37677.438	210.675	29862.032	1599.627
5	15.08	29.80	178.60	8.603	35880.408	200.893	30051.904	1616.371
		เฉลี่ย	177.71	8.584	36151.286	203.389	30056.296	1609.078

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 228.473 ksc.

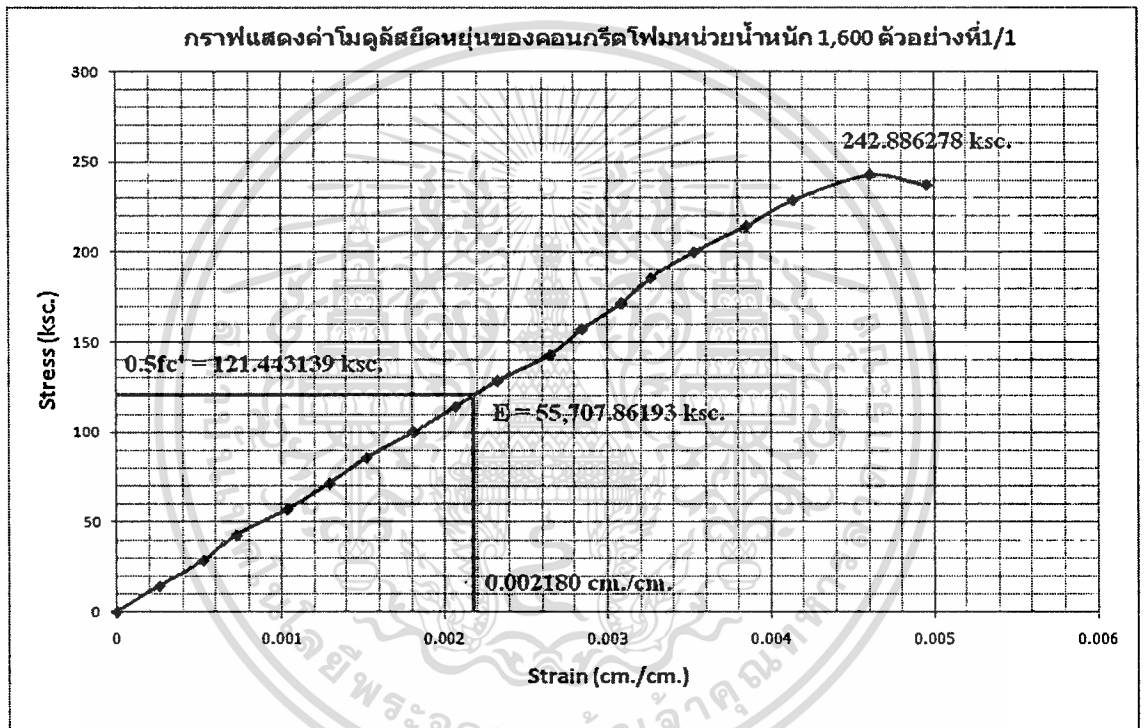
ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.66	0.00	0.0000
24.90	2538.28	177.66	14.29	0.0003
49.80	5076.56	177.66	28.57	0.0005
74.70	7614.84	177.66	42.86	0.0007
99.60	10153.12	177.66	57.15	0.0010
124.50	12691.40	177.66	71.44	0.0013
149.40	15229.68	177.66	85.72	0.0015
174.30	17767.96	177.66	100.01	0.0018
199.20	20306.24	177.66	114.30	0.0021
224.10	22844.52	177.66	128.59	0.0023
249.01	25382.80	177.66	142.87	0.0026
273.91	27921.09	177.66	157.16	0.0028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
298.81	30459.37	177.66	171.45	0.0031
323.71	32997.65	177.66	185.74	0.0033
348.61	35535.93	177.66	200.02	0.0035
373.51	38074.21	177.66	214.31	0.0039
398.41	40612.49	177.66	228.60	0.0041
423.31	43150.77	177.66	242.89	0.0046



รูปที่ ข.6 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพนหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 55,707.862 ksc.

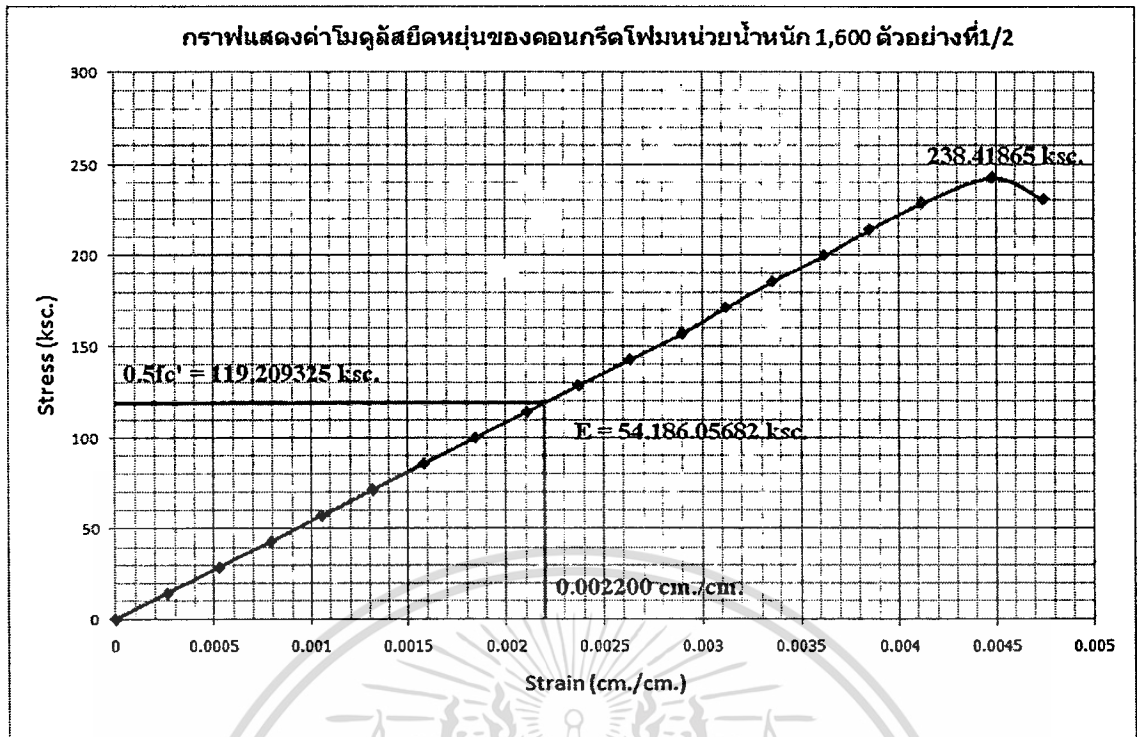
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 238.419 ksc.

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.24	0.00	0.0000
24.70	2518.07	176.24	14.29	0.0003
49.40	5036.14	176.24	28.57	0.0005
74.11	7554.21	176.24	42.86	0.0008
98.81	10072.27	176.24	57.15	0.0011
123.51	12590.34	176.24	71.44	0.0013
148.21	15108.41	176.24	85.72	0.0016
172.92	17626.48	176.24	100.01	0.0018
197.62	20144.55	176.24	114.30	0.0021
222.32	22662.62	176.24	128.59	0.0024
247.02	25180.69	176.24	142.87	0.0026
271.72	27698.76	176.24	157.16	0.0029
296.43	30216.82	176.24	171.45	0.0031
321.13	32734.89	176.24	185.74	0.0034
345.83	35252.96	176.24	200.02	0.0036
370.53	37771.03	176.24	214.31	0.0039
395.24	40289.10	176.24	228.60	0.0041
419.94	42807.17	176.24	242.89	0.0045
444.64	45325.24	176.24	257.17	0.0047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

Initial Tangent Modulus Elastic = 54,186.057 ksc.

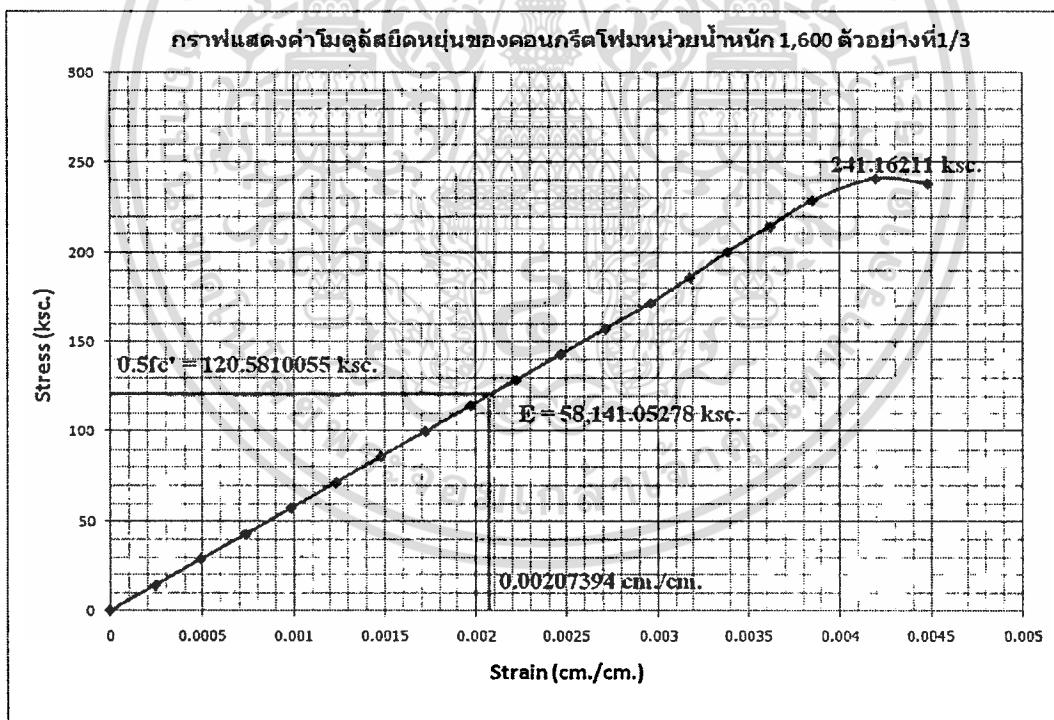
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 241.162 ksc.

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.89	0.00	0.0000
24.93	2541.66	177.89	14.29	0.0002
49.87	5083.31	177.89	28.57	0.0005
74.80	7624.97	177.89	42.86	0.0007
99.73	10166.63	177.89	57.15	0.0010
124.67	12708.28	177.89	71.44	0.0012
149.60	15249.94	177.89	85.72	0.0015
174.54	17791.60	177.89	100.01	0.0017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
199.47	20333.26	177.89	114.30	0.0020
224.40	22874.91	177.89	128.59	0.0022
249.34	25416.57	177.89	142.87	0.0025
274.27	27958.23	177.89	157.16	0.0027
299.20	30499.88	177.89	171.45	0.0030
324.14	33041.54	177.89	185.74	0.0032
349.07	35583.20	177.89	200.02	0.0034
374.00	38124.85	177.89	214.31	0.0036
398.94	40666.51	177.89	228.60	0.0039
423.87	43208.17	177.89	242.89	0.0042
448.81	45749.83	177.89	257.17	0.0045



รูปที่ ข.8 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 58,141.053 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

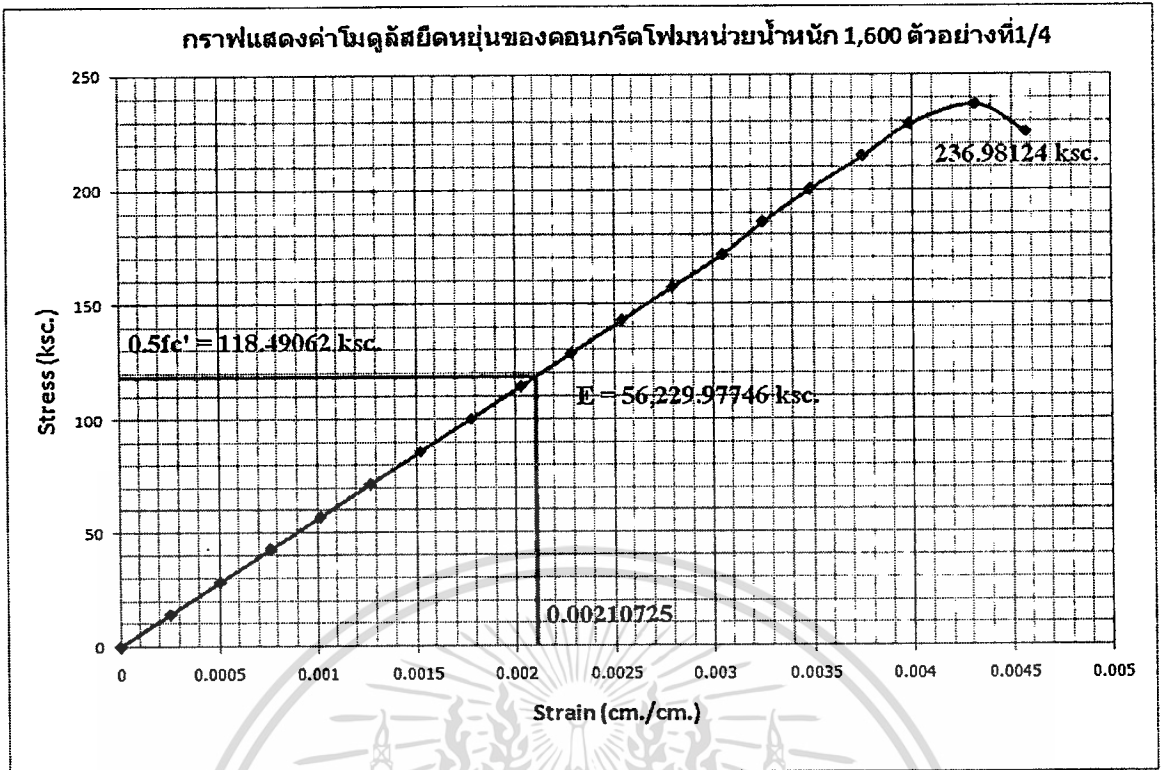
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 236.981 ksc.

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	173.43	0.00	0.0000
24.31	2477.89	173.43	14.29	0.0003
48.62	4955.77	173.43	28.57	0.0005
72.92	7433.66	173.43	42.86	0.0008
97.23	9911.55	173.43	57.15	0.0010
121.54	12389.44	173.43	71.44	0.0013
145.85	14867.32	173.43	85.72	0.0015
170.16	17345.21	173.43	100.01	0.0018
194.46	19823.10	173.43	114.30	0.0020
218.77	22300.99	173.43	128.59	0.0023
243.08	24778.87	173.43	142.87	0.0025
267.39	27256.76	173.43	157.16	0.0028
291.70	29734.65	173.43	171.45	0.0030
316.00	32212.54	173.43	185.74	0.0033
340.31	34690.42	173.43	200.02	0.0035
364.62	37168.31	173.43	214.31	0.0038
388.93	39646.20	173.43	228.60	0.0040
413.24	42124.08	173.43	242.89	0.0043
437.55	44601.97	173.43	257.17	0.0046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$   
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

Initial Tangent Modulus Elastic =  $56,229.977 \text{ ksc.}$

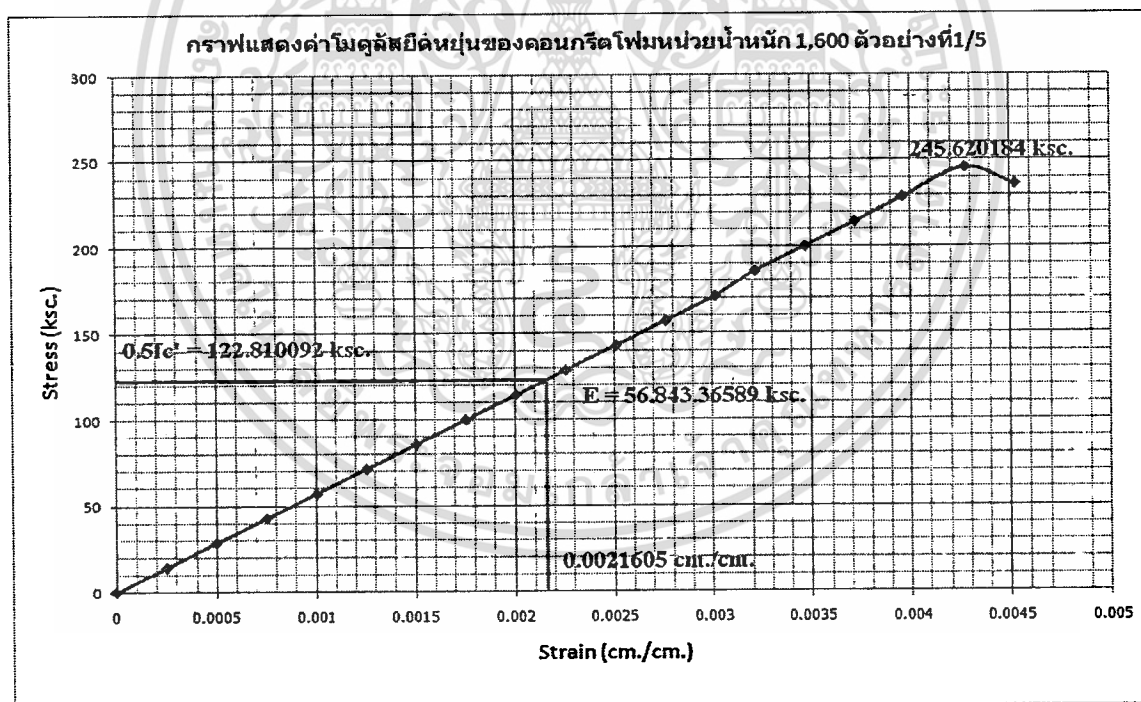
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ )  $220.632 \text{ ksc.}$

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,600 \text{ kg/m}^3$   
ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	181.46	0.00	0.0000
25.43	2592.57	181.46	14.29	0.0003
50.87	5185.15	181.46	28.57	0.0005
76.30	7777.72	181.46	42.86	0.0008
101.73	10370.29	181.46	57.15	0.0010
127.17	12962.87	181.46	71.44	0.0013
152.60	15555.44	181.46	85.72	0.0015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
178.03	18148.02	181.46	100.01	0.0018
203.47	20740.59	181.46	114.30	0.0020
228.90	23333.16	181.46	128.59	0.0023
254.33	25925.74	181.46	142.87	0.0025
279.76	28518.31	181.46	157.16	0.0028
305.20	31110.88	181.46	171.45	0.0030
330.63	33703.46	181.46	185.74	0.0032
356.06	36296.03	181.46	200.02	0.0035
381.50	38888.61	181.46	214.31	0.0037
406.93	41481.18	181.46	228.60	0.0040
432.36	44073.75	181.46	242.89	0.0043



รูปที่ ข.10 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,600 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 56,843.366 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ หน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก  
อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	14.82	29.60	172.50	9.062	42264.462	245.013	72531.960	1774.786
2	14.87	29.80	173.66	9.148	41753.910	240.428	74206.222	1767.657
3	15.00	30.10	176.71	9.269	41149.296	232.857	73166.554	1742.585
4	15.20	30.00	181.46	9.456	43363.410	238.972	74515.635	1737.037
5	14.86	30.20	173.43	9.284	42094.620	242.716	73911.016	1772.559
		เฉลี่ย	175.55	9.244	42125.140	239.997	73666.277	1758.925

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ หน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก  
อายุ 7 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.08	30.20	178.60	9.453	38692.358	216.637	54376.876	1752.549
2	15.10	29.80	179.08	9.467	38172.402	213.160	55984.084	1773.995
3	14.96	30.30	175.77	9.334	37633.781	214.104	53996.334	1752.557
4	15.10	29.80	179.08	9.364	37990.995	212.147	54790.657	1754.694
5	14.90	30.10	174.37	9.353	38607.302	221.415	54168.604	1782.059
		เฉลี่ย	177.38	9.394	38219.368	215.493	54663.311	1763.171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 3 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity ( $E_c$ ) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.08	30.20	178.60	9.476	37587.867	210.453	41361.671	1756.813
2	15.10	30.00	179.08	9.390	35585.432	198.714	41089.223	1747.836
3	15.04	30.20	177.66	9.443	35973.323	202.486	40916.684	1760.020
4	15.15	29.70	180.27	9.414	35704.314	198.064	41116.125	1758.339
5	14.86	30.10	173.43	9.309	35446.758	204.385	41390.876	1783.237
		เฉลี่ย	177.81	9.406	36059.539	202.820	41174.916	1761.249

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 245.013 ksc.

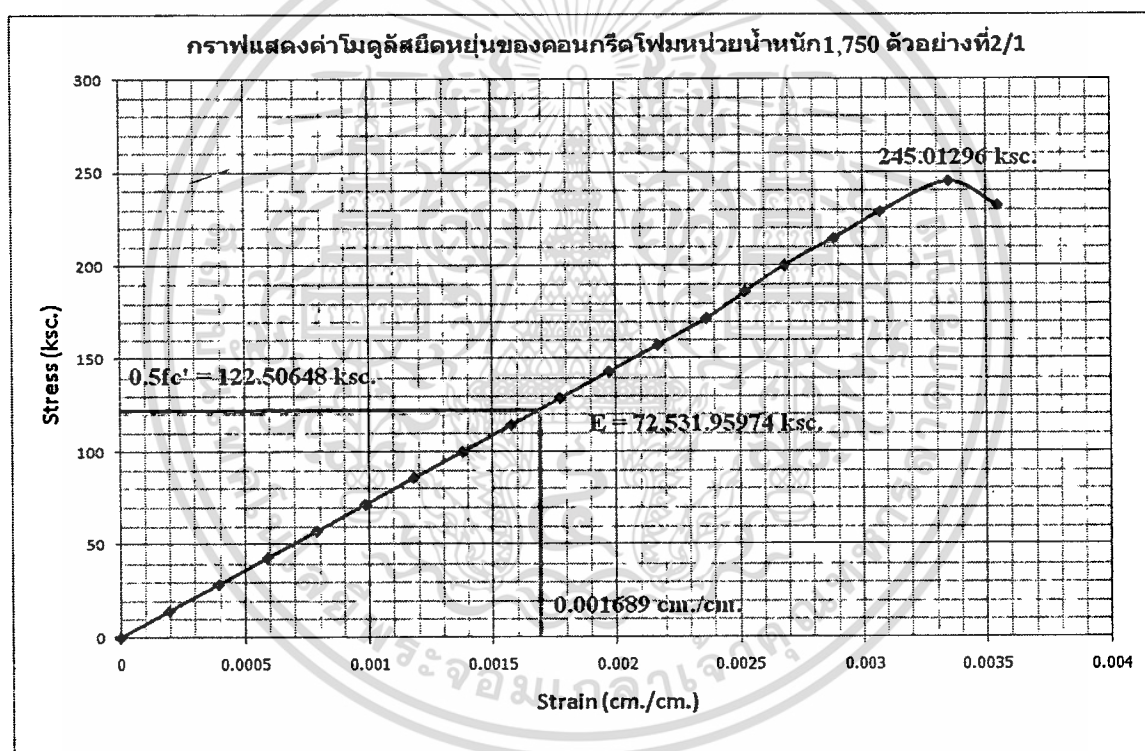
ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	172.50	0.00	0.0000
24.18	2464.57	172.50	14.29	0.0002
48.35	4929.13	172.50	28.57	0.0004
72.53	7393.70	172.50	42.86	0.0006
96.71	9858.26	172.50	57.15	0.0008
120.89	12322.83	172.50	71.44	0.0010
145.06	14787.39	172.50	85.72	0.0012
169.24	17251.96	172.50	100.01	0.0014
193.42	19716.52	172.50	114.30	0.0016
217.60	22181.09	172.50	128.59	0.0018
265.95	27110.22	172.50	157.16	0.0022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
290.13	29574.78	172.50	171.45	0.0024
314.31	32039.35	172.50	185.74	0.0025
338.48	34503.92	172.50	200.02	0.0027
362.66	36968.48	172.50	214.31	0.0029
386.84	39433.05	172.50	228.60	0.0031
411.02	41897.61	172.50	242.89	0.0033
435.19	44362.18	172.50	257.17	0.0035



รูปที่ ข.11 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,750 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 72,531.960 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

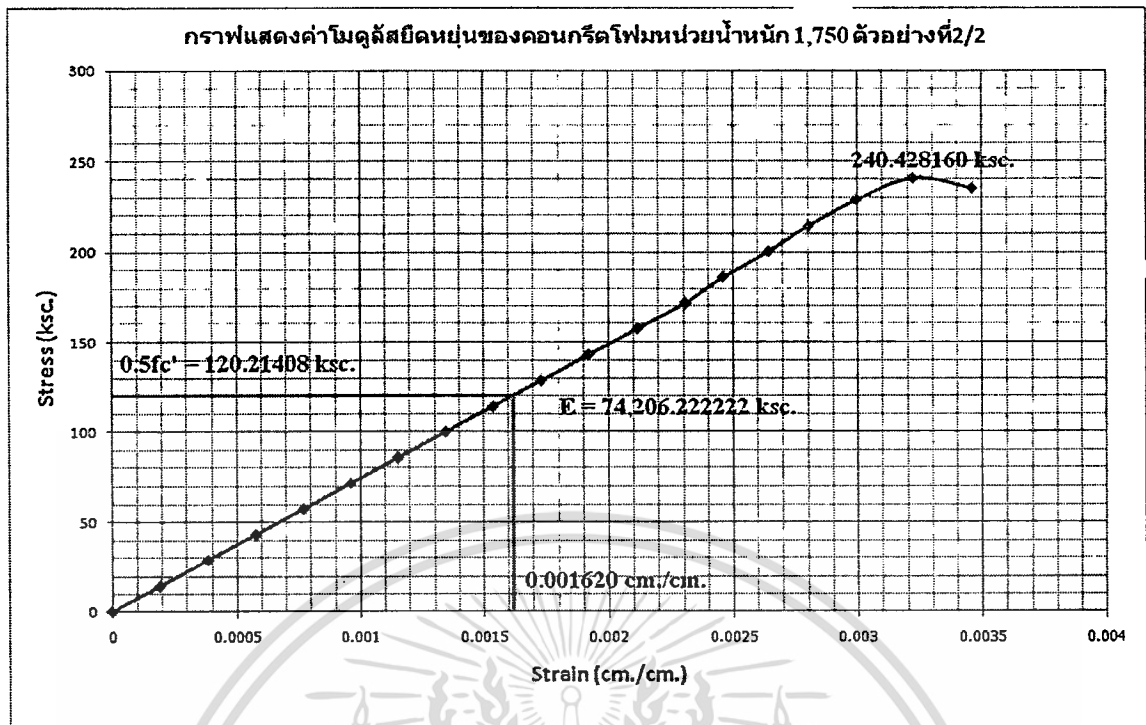
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 240.428 ksc.

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบการหาคัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	173.66	0.00	0.0000
24.34	2481.22	173.66	14.29	0.0002
48.68	4962.45	173.66	28.57	0.0004
73.02	7443.67	173.66	42.86	0.0006
97.36	9924.89	173.66	57.15	0.0008
121.70	12406.12	173.66	71.44	0.0010
146.04	14887.34	173.66	85.72	0.0012
170.39	17368.56	173.66	100.01	0.0013
194.73	19849.79	173.66	114.30	0.0015
219.07	22331.01	173.66	128.59	0.0017
243.41	24812.23	173.66	142.87	0.0019
267.75	27293.46	173.66	157.16	0.0021
292.09	29774.68	173.66	171.45	0.0023
316.43	32255.90	173.66	185.74	0.0025
340.77	34737.13	173.66	200.02	0.0026
365.11	37218.35	173.66	214.31	0.0028
389.45	39699.58	173.66	228.60	0.0030
413.79	42180.80	173.66	242.89	0.0032
438.13	44662.02	173.66	257.17	0.0035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.12 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

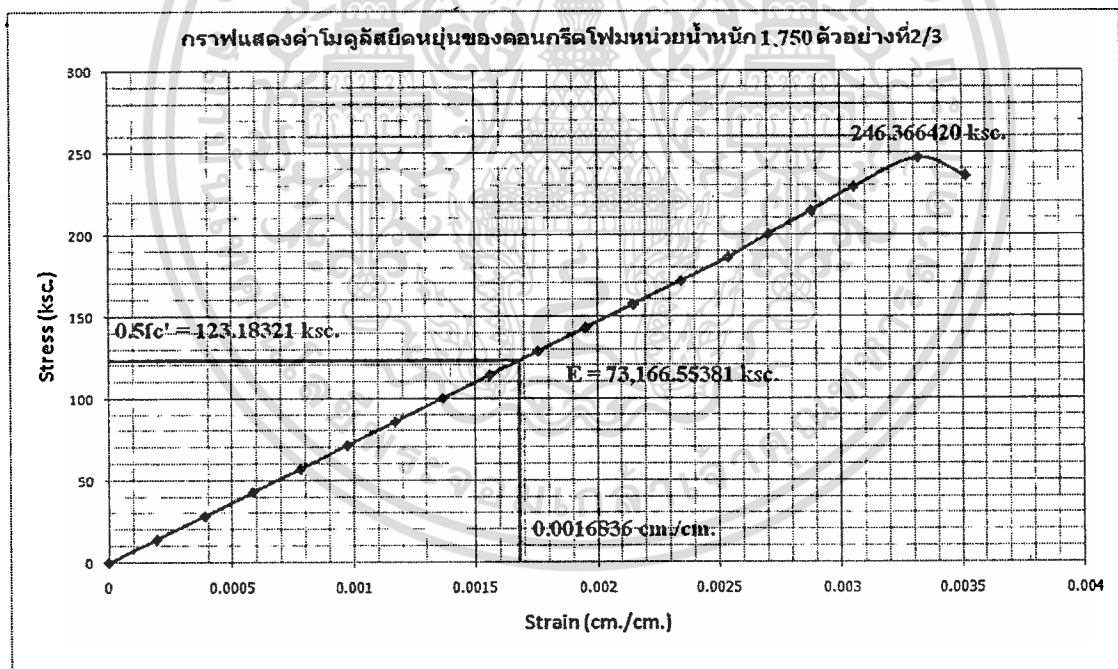
Initial Tangent Modulus Elastic =  $74,206.222 \text{ ksc.}$

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ )  $232.857 \text{ ksc.}$

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,750 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.80	176.71	14.29	0.0002
49.54	5049.59	176.71	28.57	0.0004
74.30	7574.39	176.71	42.86	0.0006
99.07	10099.19	176.71	57.15	0.0008
123.84	12623.98	176.71	71.44	0.0010
148.61	15148.78	176.71	85.72	0.0012
173.38	17673.58	176.71	100.01	0.0014

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
198.15	20198.38	176.71	114.30	0.0016
222.91	22723.17	176.71	128.59	0.0018
247.68	25247.97	176.71	142.87	0.0020
272.45	27772.77	176.71	157.16	0.0021
297.22	30297.56	176.71	171.45	0.0023
321.99	32822.36	176.71	185.74	0.0025
346.76	35347.16	176.71	200.02	0.0027
371.52	37871.95	176.71	214.31	0.0029
396.29	40396.75	176.71	228.60	0.0031
421.06	42921.55	176.71	242.89	0.0033
445.83	45446.35	176.71	257.17	0.0035



รูปที่ ข.13 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 73,166.554 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

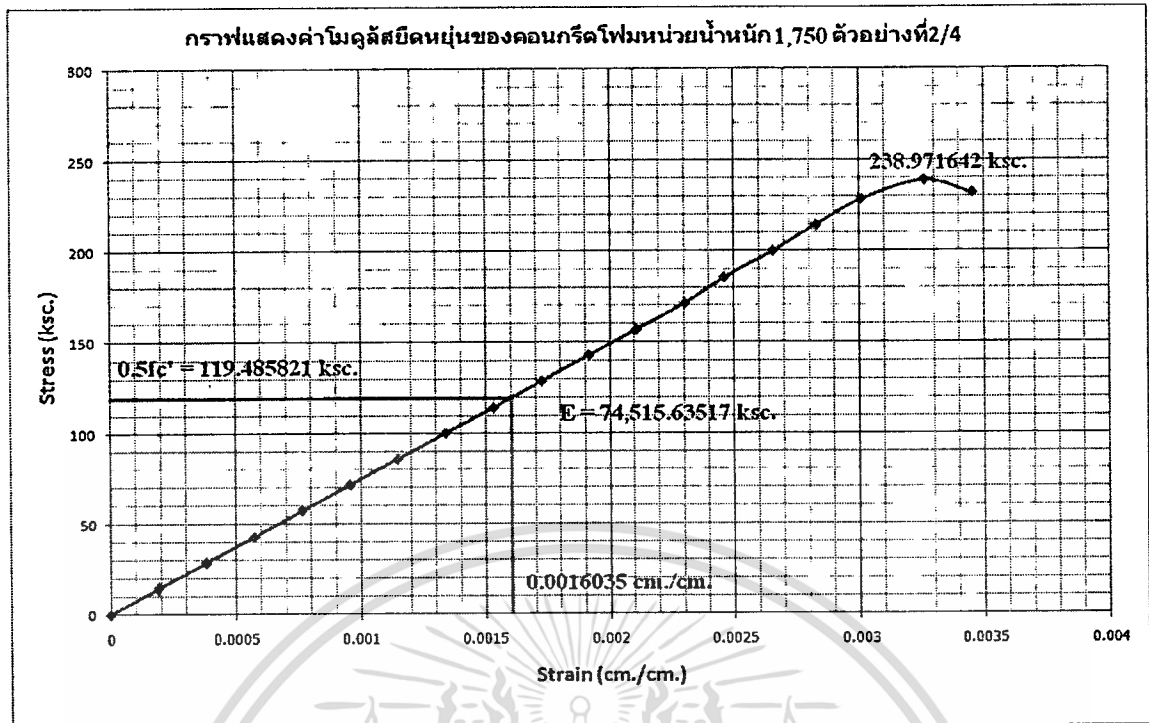
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 238.972 ksc.

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบการหาคัดคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	181.46	0.00	0.0000
25.43	2592.57	181.46	14.29	0.0002
50.87	5185.15	181.46	28.57	0.0004
76.30	7777.72	181.46	42.86	0.0006
101.73	10370.29	181.46	57.15	0.0008
127.17	12962.87	181.46	71.44	0.0010
152.60	15555.44	181.46	85.72	0.0012
178.03	18148.02	181.46	100.01	0.0013
203.47	20740.59	181.46	114.30	0.0015
228.90	23333.16	181.46	128.59	0.0017
254.33	25925.74	181.46	142.87	0.0019
279.76	28518.31	181.46	157.16	0.0021
305.20	31110.88	181.46	171.45	0.0023
330.63	33703.46	181.46	185.74	0.0025
356.06	36296.03	181.46	200.02	0.0027
381.50	38888.61	181.46	214.31	0.0028
406.93	41481.18	181.46	228.60	0.0030
432.36	44073.75	181.46	242.89	0.0033
457.80	46666.33	181.46	257.17	0.0035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.14 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

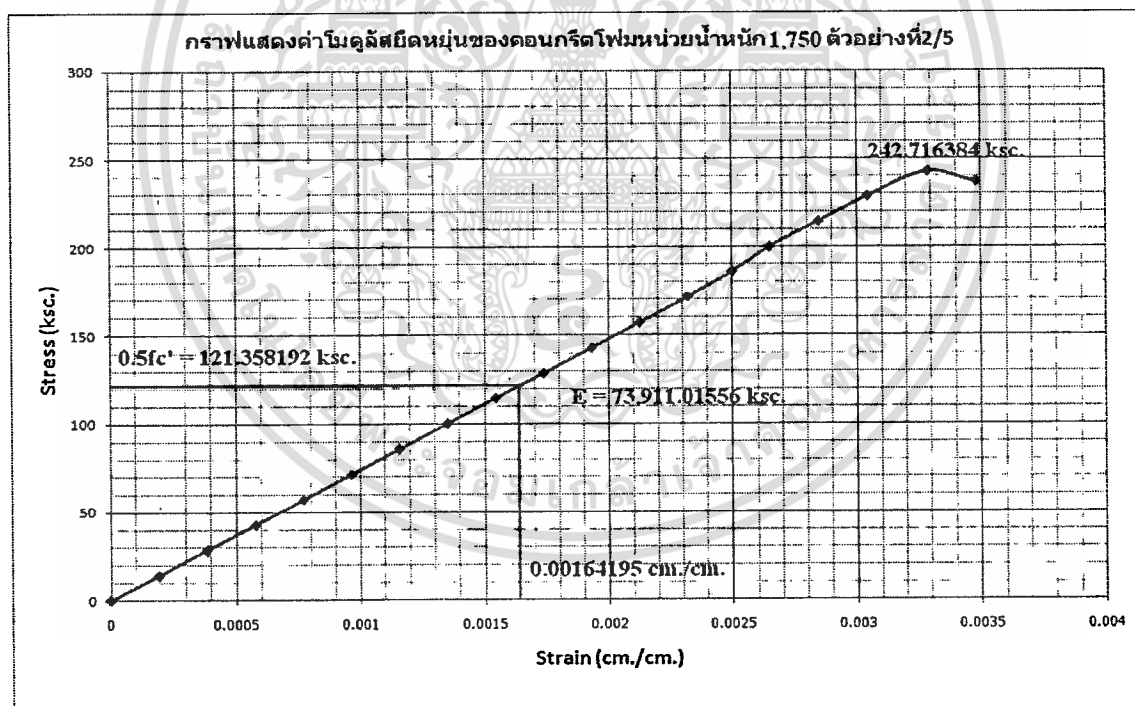
Initial Tangent Modulus Elastic = 74,515.635 ksc.

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 242.716 ksc.

ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	173.43	0.00	0.0000
24.31	2477.89	173.43	14.29	0.0002
48.62	4955.77	173.43	28.57	0.0004
72.92	7433.66	173.43	42.86	0.0006
97.23	9911.55	173.43	57.15	0.0008
121.54	12389.44	173.43	71.44	0.0010
145.85	14867.32	173.43	85.72	0.0012
170.16	17345.21	173.43	100.01	0.0014

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
194.46	19823.10	173.43	114.30	0.0015
218.77	22300.99	173.43	128.59	0.0017
243.08	24778.87	173.43	142.87	0.0019
267.39	27256.76	173.43	157.16	0.0021
291.70	29734.65	173.43	171.45	0.0023
316.00	32212.54	173.43	185.74	0.0025
340.31	34690.42	173.43	200.02	0.0027
364.62	37168.31	173.43	214.31	0.0028
388.93	39646.20	173.43	228.60	0.0030
413.24	42124.08	173.43	242.89	0.0033
437.55	44601.97	173.43	257.17	0.0035



รูปที่ ข.15 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,750 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 73,911.016 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยน้ำหนัก  $1,860 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ หน่วยน้ำหนัก  $1,860 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.07	30.10	178.37	9.954	43917.453	246.219	95461.665	1854.021
2	15.19	30.10	181.22	10.082	43700.459	241.146	95692.969	1848.310
3	15.17	30.40	180.74	10.070	44043.854	243.682	95210.777	1832.715
4	14.96	29.80	175.77	9.805	43184.725	245.684	95895.442	1871.881
5	15.06	30.00	178.13	9.985	43503.511	244.222	95548.448	1868.474
		เฉลี่ย	178.85	9.979	43670.000	244.191	95561.860	1855.080

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ หน่วยน้ำหนัก  $1,860 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 7 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.04	29.70	177.66	9.809	38587.743	217.202	79854.657	1859.014
2	15.09	29.80	178.84	9.980	38335.217	214.353	80065.582	1872.604
3	14.97	30.00	176.01	9.771	37355.502	212.237	78990.330	1850.479
4	14.95	30.00	175.54	9.706	37918.412	216.012	79424.544	1843.091
5	15.01	30.20	176.95	9.887	38195.073	215.852	79846.140	1850.147
		เฉลี่ย	177.00	9.831	38078.389	215.131	79636.251	1855.067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก

อายุ 3 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	14.88	30.00	173.90	9.822	36306.869	208.782	70098.893	1882.708
2	15.11	30.00	179.32	9.980	37274.576	207.871	70126.332	1855.199
3	15.08	30.20	178.60	10.106	37511.246	210.024	70154.679	1873.613
4	15.06	30.00	178.13	9.906	38198.974	214.443	70043.063	1853.691
5	15.09	29.80	178.84	9.987	37307.236	208.605	69980.307	1873.917
		เฉลี่ย	177.76	9.960	37319.780	209.945	70080.655	1867.825

กำลังอัดประลัย (fc') 246.219 ksc.

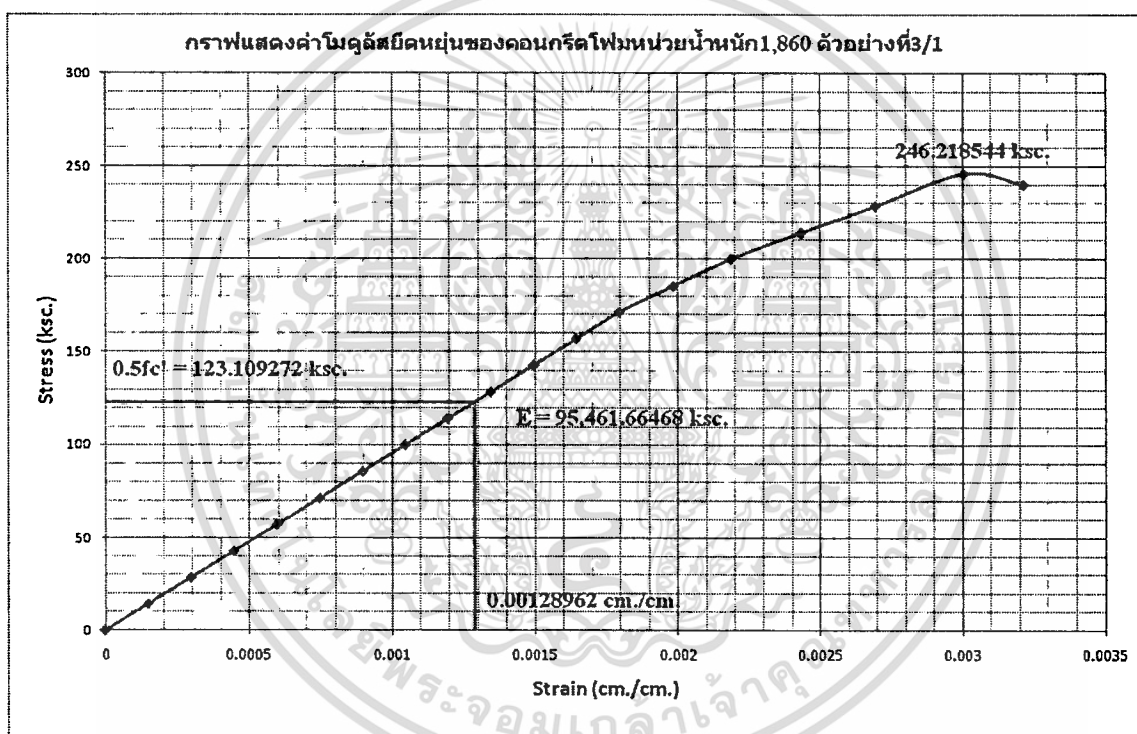
ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	178.37	0.00	0.0000
25.00	2548.42	178.37	14.29	0.0001
50.00	5096.83	178.37	28.57	0.0003
75.00	7645.25	178.37	42.86	0.0004
100.00	10193.67	178.37	57.15	0.0006
125.00	12742.08	178.37	71.44	0.0007
150.00	15290.50	178.37	85.72	0.0009
175.00	17838.92	178.37	100.01	0.0010
200.00	20387.33	178.37	114.30	0.0012
225.00	22935.75	178.37	128.59	0.0013
250.00	25484.17	178.37	142.87	0.0015
275.00	28032.58	178.37	157.16	0.0016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
300.00	30581.00	178.37	171.45	0.0018
325.00	33129.42	178.37	185.74	0.0020
350.00	35677.83	178.37	200.02	0.0022
375.00	38226.25	178.37	214.31	0.0024
400.00	40774.67	178.37	228.60	0.0027
425.00	43323.08	178.37	242.89	0.0030
450.00	45871.50	178.37	257.17	0.0032



รูปที่ ข.16 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โพลีเมอร์น้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,461.665 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

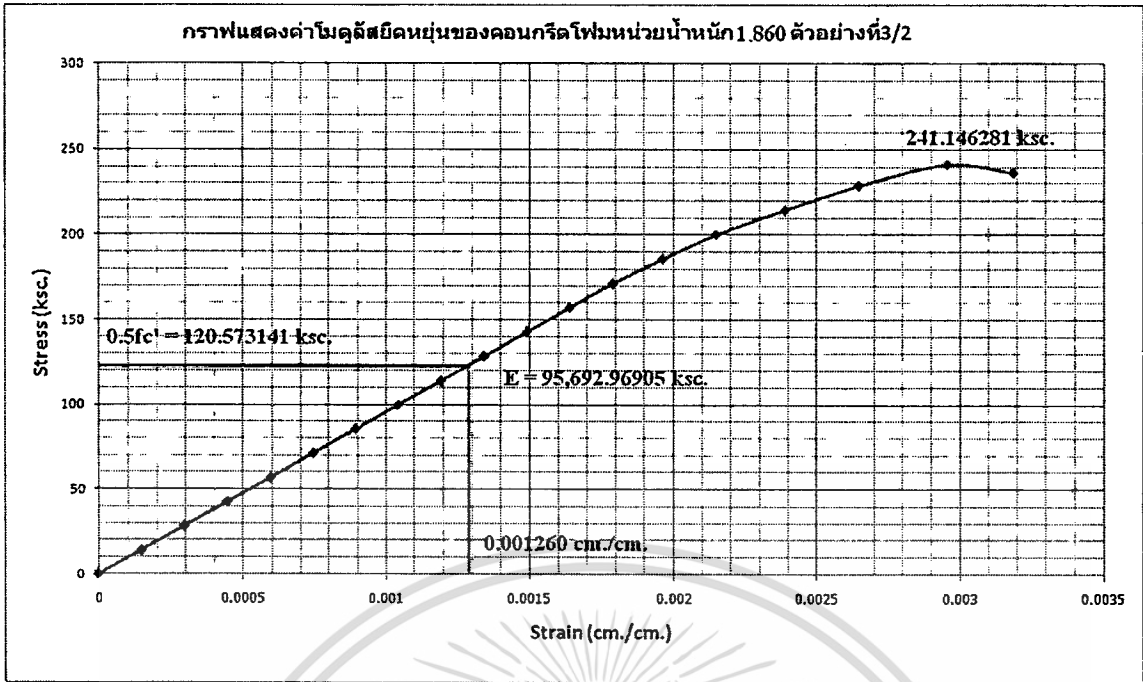
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 241.146 ksc.

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,860 \text{ kg/m}^3$

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	181.22	0.00	0.0000
25.40	2589.16	181.22	14.29	0.0001
50.80	5178.33	181.22	28.57	0.0003
76.20	7767.49	181.22	42.86	0.0004
101.60	10356.65	181.22	57.15	0.0006
127.00	12945.82	181.22	71.44	0.0007
152.40	15534.98	181.22	85.72	0.0009
177.80	18124.14	181.22	100.01	0.0010
203.20	20713.31	181.22	114.30	0.0012
228.60	23302.47	181.22	128.59	0.0013
254.00	25891.64	181.22	142.87	0.0015
279.40	28480.80	181.22	157.16	0.0016
304.80	31069.96	181.22	171.45	0.0018
330.20	33659.13	181.22	185.74	0.0020
355.60	36248.29	181.22	200.02	0.0022
381.00	38837.45	181.22	214.31	0.0024
406.40	41426.62	181.22	228.60	0.0026
431.79	44015.78	181.22	242.89	0.0030
457.19	46604.94	181.22	257.17	0.0032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.17 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

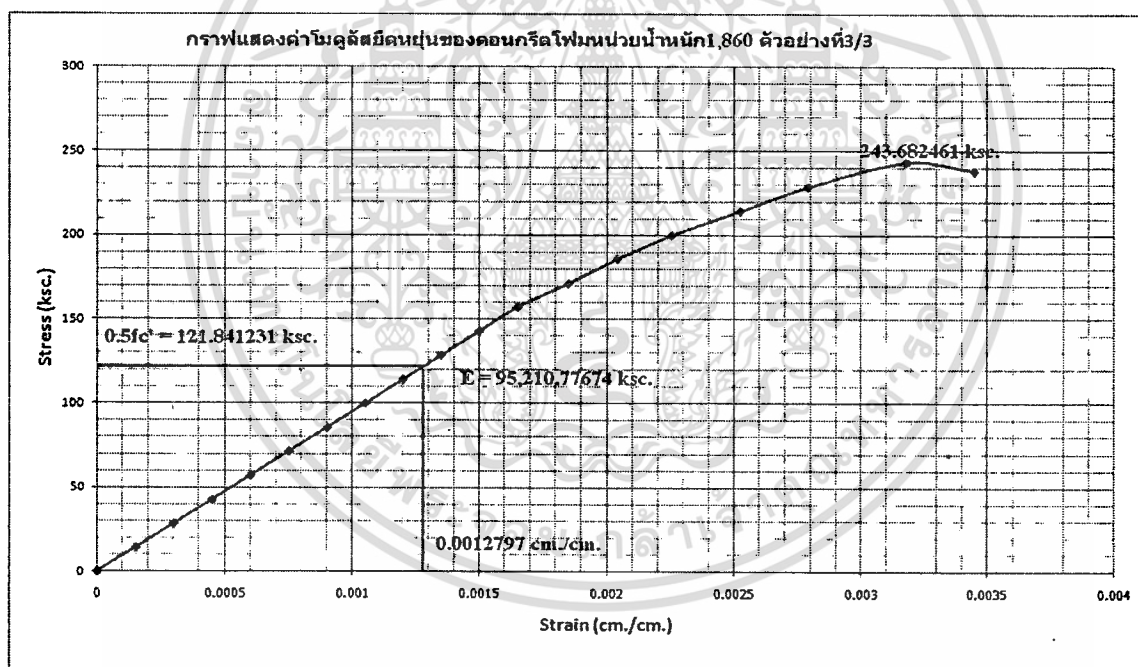
Initial Tangent Modulus Elastic = 95,692.969 ksc.

กำลังอัดประลัย (fc') 243.682 ksc.

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบการหาคัดตัวคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	180.74	0.00	0.0000
25.33	2582.35	180.74	14.29	0.0002
50.67	5164.70	180.74	28.57	0.0003
76.00	7747.05	180.74	42.86	0.0005
101.33	10329.40	180.74	57.15	0.0006
126.66	12911.75	180.74	71.44	0.0008
152.00	15494.10	180.74	85.72	0.0009
177.33	18076.45	180.74	100.01	0.0011
202.66	20658.80	180.74	114.30	0.0012

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
228.00	23241.15	180.74	128.59	0.0014
253.33	25823.50	180.74	142.87	0.0015
278.66	28405.85	180.74	157.16	0.0017
303.99	30988.20	180.74	171.45	0.0019
329.33	33570.55	180.74	185.74	0.0020
354.66	36152.90	180.74	200.02	0.0023
379.99	38735.25	180.74	214.31	0.0025
405.33	41317.60	180.74	228.60	0.0028
430.66	43899.95	180.74	242.89	0.0032
455.99	46482.30	180.74	257.17	0.0035



รูปที่ ข.18 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,210.777 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

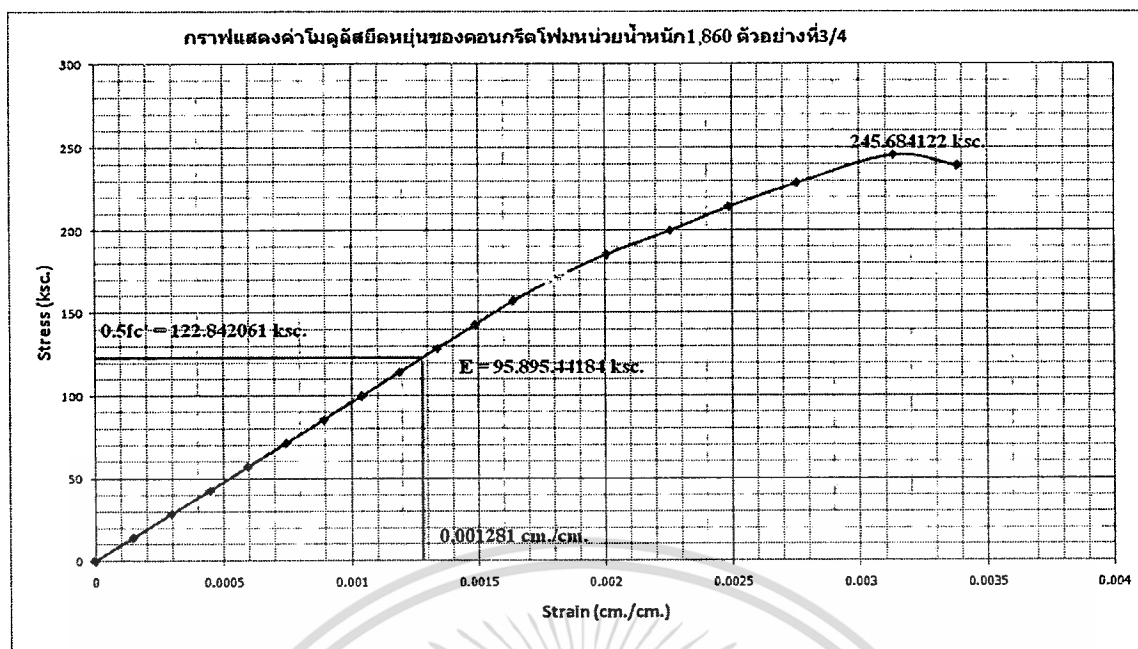
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 245.684 ksc.

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	175.77	0.00	0.0000
24.64	2511.35	175.77	14.29	0.0001
49.27	5022.70	175.77	28.57	0.0003
73.91	7534.05	175.77	42.86	0.0004
98.55	10045.40	175.77	57.15	0.0006
123.18	12556.75	175.77	71.44	0.0007
147.82	15068.10	175.77	85.72	0.0009
172.45	17579.45	175.77	100.01	0.0010
197.09	20090.79	175.77	114.30	0.0012
221.73	22602.14	175.77	128.59	0.0013
246.36	25113.49	175.77	142.87	0.0015
271.00	27624.84	175.77	157.16	0.0016
295.64	30136.19	175.77	171.45	0.0018
320.27	32647.54	175.77	185.74	0.0020
344.91	35158.89	175.77	200.02	0.0023
369.55	37670.24	175.77	214.31	0.0025
394.18	40181.59	175.77	228.60	0.0028
418.82	42692.94	175.77	242.89	0.0031
443.45	45204.29	175.77	257.17	0.0034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,895.442 ksc.

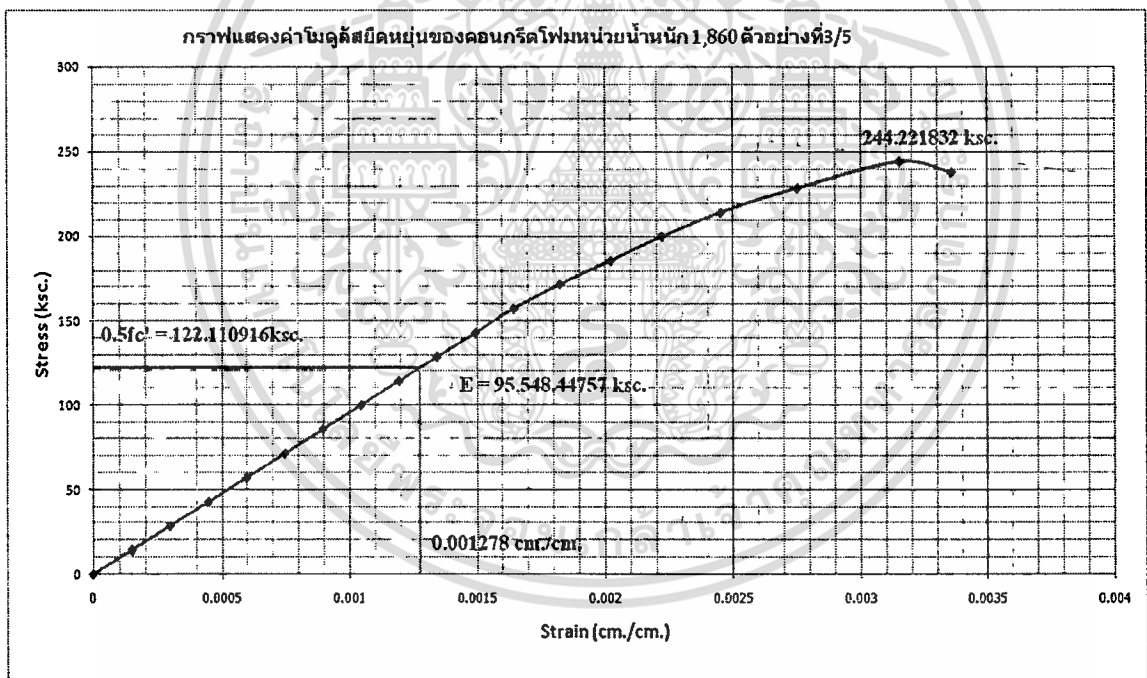
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 244.222 ksc.

ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,860  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	178.13	0.00	0.0000
24.97	2545.04	178.13	14.29	0.0001
49.93	5090.07	178.13	28.57	0.0003
74.90	7635.11	178.13	42.86	0.0004
99.87	10180.14	178.13	57.15	0.0006
124.83	12725.18	178.13	71.44	0.0007
149.80	15270.21	178.13	85.72	0.0009
174.77	17815.25	178.13	100.01	0.0010
199.73	20360.29	178.13	114.30	0.0012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
224.70	22905.32	178.13	128.59	0.0013
249.67	25450.36	178.13	142.87	0.0015
274.63	27995.39	178.13	157.16	0.0016
299.60	30540.43	178.13	171.45	0.0018
324.57	33085.46	178.13	185.74	0.0020
349.54	35630.50	178.13	200.02	0.0022
374.50	38175.54	178.13	214.31	0.0025
399.47	40720.57	178.13	228.60	0.0028
424.44	43265.61	178.13	242.89	0.0032
449.40	45810.64	178.13	257.17	0.0034



รูปที่ ข.20 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,860 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,548.448 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยน้ำหนัก  $1,940 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพน หน่วยน้ำหนัก  $1,940 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้า ตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.05	29.00	177.89	10.151	45513.472	255.845	121262.747	1967.650
2	15.08	30.00	178.60	10.437	46943.807	262.837	123185.398	1947.879
3	15.12	30.10	179.55	10.586	44280.089	246.612	122206.376	1958.718
4	14.95	30.10	175.54	10.264	45511.414	259.267	123163.926	1942.575
5	15.02	29.50	177.19	10.154	42554.762	240.170	122660.681	1942.609
		เฉลี่ย	177.76	10.318	44960.709	252.946	122495.826	1951.886

ตารางที่ ข.32 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพน หน่วยน้ำหนัก  $1,940 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 7 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้า ตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.02	30.00	177.19	10.454	39155.833	220.987	98910.456	1966.670
2	15.13	30.20	179.79	10.468	38595.895	214.671	99754.322	1927.920
3	14.90	29.80	174.37	10.257	36809.063	211.102	99017.578	1973.975
4	15.00	30.00	176.71	10.306	37277.765	210.949	98045.233	1944.001
5	15.03	29.70	177.42	10.232	37764.305	212.850	99047.135	1941.763
		เฉลี่ย	177.10	10.343	37920.572	214.112	98954.945	1950.866

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.33 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก  $1,940 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 3 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้า ตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity ( $E_c$ ) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	14.98	30.00	176.24	10.245	36639.824	207.893	87876.087	1937.658
2	15.06	29.60	178.13	10.218	37508.003	210.564	88236.549	1937.913
3	14.95	30.00	175.54	10.267	36449.507	207.644	86431.755	1949.620
4	15.00	30.00	176.71	10.286	36602.539	207.128	87698.665	1940.228
5	15.03	29.50	177.42	10.224	35758.902	201.547	88076.716	1953.399
		เฉลี่ย	176.81	10.248	36591.755	206.955	87663.954	1943.764

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 255.845 ksc.

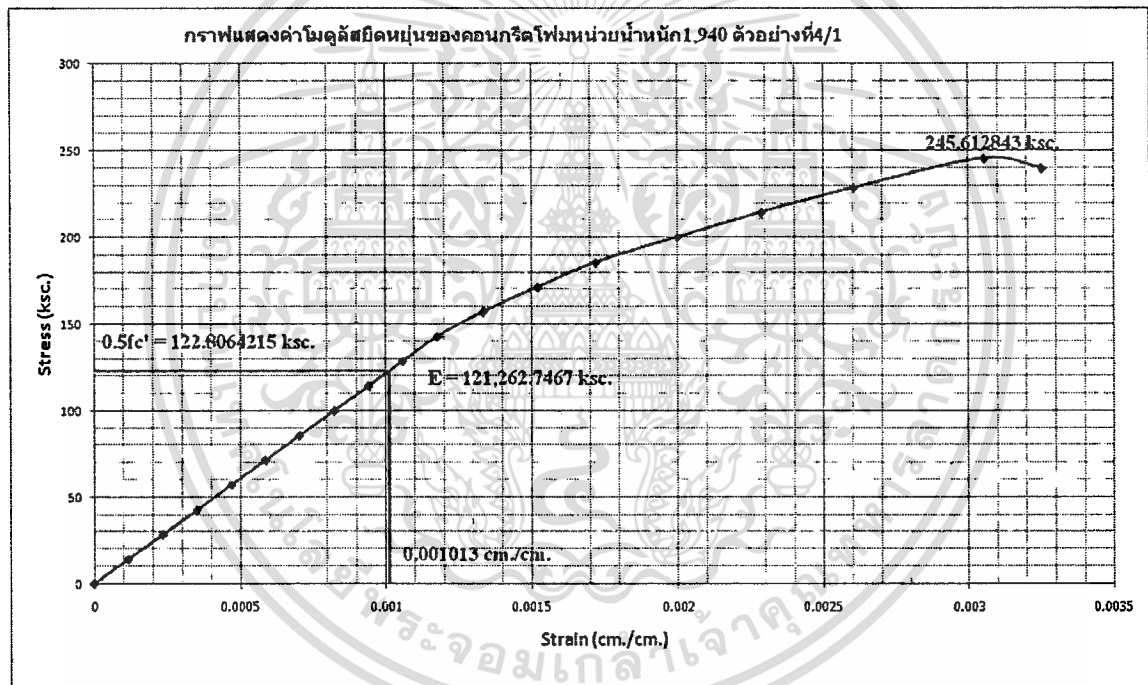
ตารางที่ ข.34 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก  $1,940 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.89	0.00	0.0000
24.93	2541.66	177.89	14.29	0.0001
49.87	5083.31	177.89	28.57	0.0002
74.80	7624.97	177.89	42.86	0.0004
99.73	10166.63	177.89	57.15	0.0005
124.67	12708.28	177.89	71.44	0.0006
149.60	15249.94	177.89	85.72	0.0007
174.54	17791.60	177.89	100.01	0.0008
199.47	20333.26	177.89	114.30	0.0009
224.40	22874.91	177.89	128.59	0.0011
249.34	25416.57	177.89	142.87	0.0012
274.27	27958.23	177.89	157.16	0.0013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
299.20	30499.88	177.89	171.45	0.0015
324.14	33041.54	177.89	185.74	0.0017
349.07	35583.20	177.89	200.02	0.0020
374.00	38124.85	177.89	214.31	0.0022
398.94	40666.51	177.89	228.60	0.0026
423.87	43208.17	177.89	242.89	0.0030
448.81	45749.83	177.89	257.17	0.0035
473.74	48291.48	177.89	271.46	0.0037



รูปที่ ข.21 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 121,262.747 ksc.

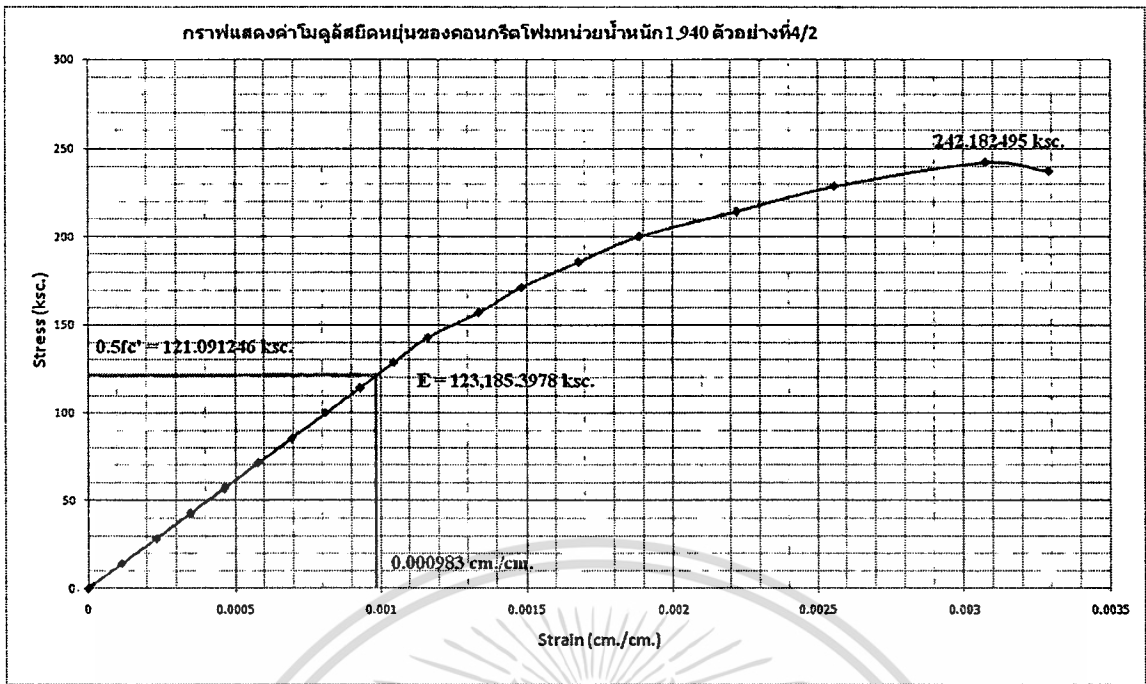
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 262.837 ksc.

ตารางที่ ข.35 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก  
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	178.60	0.00	0.0000
25.03	2551.80	178.60	14.29	0.0001
50.07	5103.60	178.60	28.57	0.0002
75.10	7655.40	178.60	42.86	0.0003
100.13	10207.20	178.60	57.15	0.0005
125.17	12759.00	178.60	71.44	0.0006
150.20	15310.80	178.60	85.72	0.0007
175.23	17862.60	178.60	100.01	0.0008
200.27	20414.40	178.60	114.30	0.0009
225.30	22966.20	178.60	128.59	0.0010
250.33	25518.00	178.60	142.87	0.0012
275.36	28069.80	178.60	157.16	0.0013
300.40	30621.60	178.60	171.45	0.0015
325.43	33173.40	178.60	185.74	0.0017
350.46	35725.20	178.60	200.02	0.0019
375.50	38277.00	178.60	214.31	0.0021
400.53	40828.80	178.60	228.60	0.0024
425.56	43380.60	178.60	242.89	0.0027
450.60	45932.40	178.60	257.17	0.0031
475.63	48484.20	178.60	271.46	0.0035
500.66	51036.00	178.60	285.75	0.0036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.22 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โพนหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

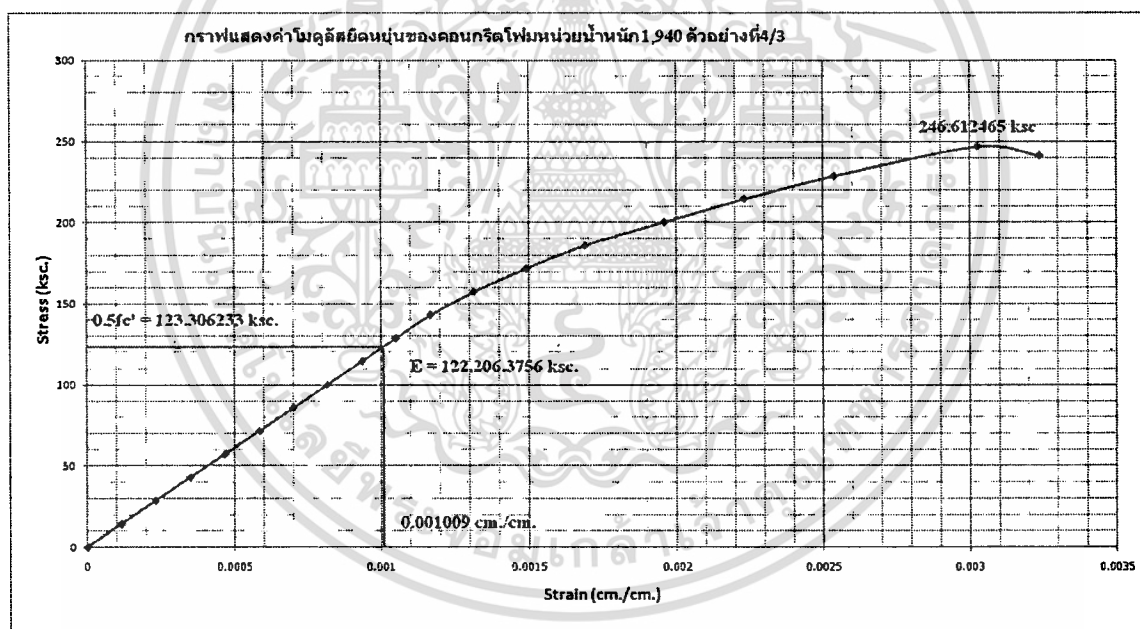
Initial Tangent Modulus Elastic = 123,185.398 ksc.

กำลังอัดประลัย (fc') 246.612 ksc.

ตารางที่ ข.36 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตผสม โพนหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	179.55	0.00	0.0000
25.17	2565.36	179.55	14.29	0.0001
50.33	5130.71	179.55	28.57	0.0002
75.50	7696.07	179.55	42.86	0.0004
100.66	10261.42	179.55	57.15	0.0005
125.83	12826.78	179.55	71.44	0.0006
151.00	15392.13	179.55	85.72	0.0007
176.16	17957.49	179.55	100.01	0.0008
201.33	20522.84	179.55	114.30	0.0009

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
226.50	23088.20	179.55	128.59	0.0011
251.66	25653.55	179.55	142.87	0.0012
276.83	28218.91	179.55	157.16	0.0013
301.99	30784.26	179.55	171.45	0.0015
327.16	33349.62	179.55	185.74	0.0017
352.33	35914.97	179.55	200.02	0.0020
377.49	38480.33	179.55	214.31	0.0022
402.66	41045.68	179.55	228.60	0.0025
427.82	43611.04	179.55	242.89	0.0030
452.99	46176.40	179.55	257.17	0.0032



รูปที่ ข.23 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 122,206.376 ksc.

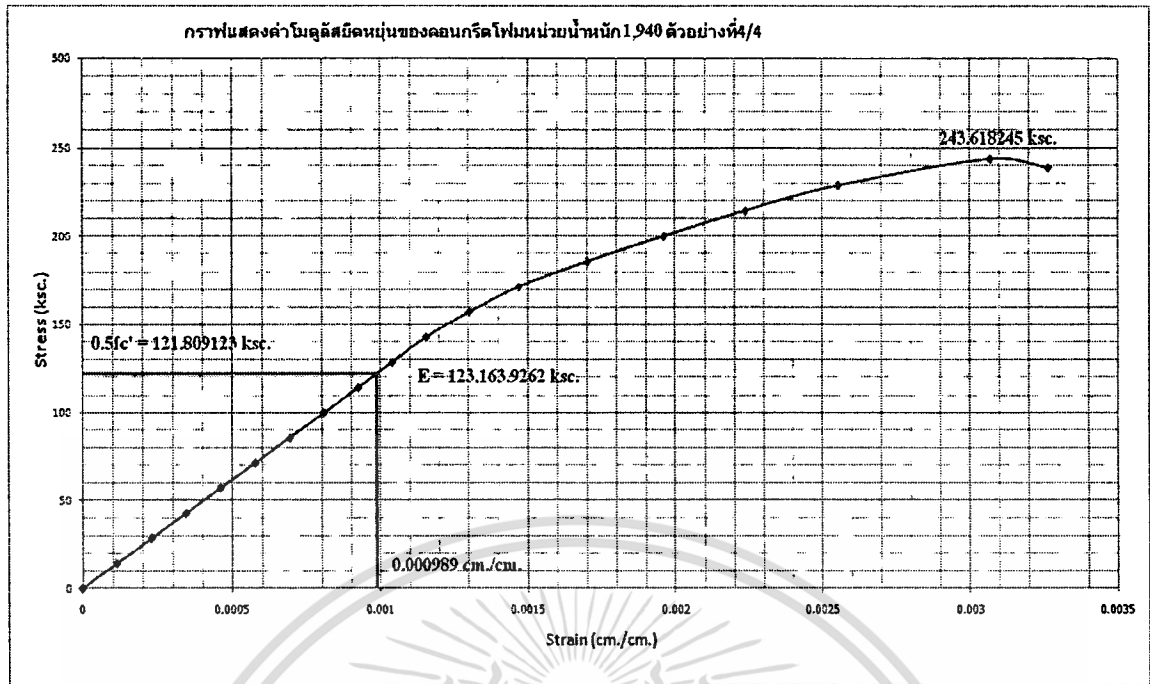
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 259.267 ksc.

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบการหาคัดตัวคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,940 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก  
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	175.54	0.00	0.0000
24.60	2507.99	175.54	14.29	0.0001
49.21	5015.99	175.54	28.57	0.0002
73.81	7523.98	175.54	42.86	0.0003
98.41	10031.97	175.54	57.15	0.0005
123.02	12539.97	175.54	71.44	0.0006
147.62	15047.96	175.54	85.72	0.0007
172.22	17555.95	175.54	100.01	0.0008
196.83	20063.94	175.54	114.30	0.0009
221.43	22571.94	175.54	128.59	0.0010
246.03	25079.93	175.54	142.87	0.0012
270.64	27587.92	175.54	157.16	0.0013
295.24	30095.92	175.54	171.45	0.0015
319.84	32603.91	175.54	185.74	0.0017
344.45	35111.90	175.54	200.02	0.0019
369.05	37619.90	175.54	214.31	0.0022
393.65	40127.89	175.54	228.60	0.0025
418.26	42635.88	175.54	242.89	0.0029
442.86	45143.87	175.54	257.17	0.0034
467.46	47651.87	175.54	271.46	0.0036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.24 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

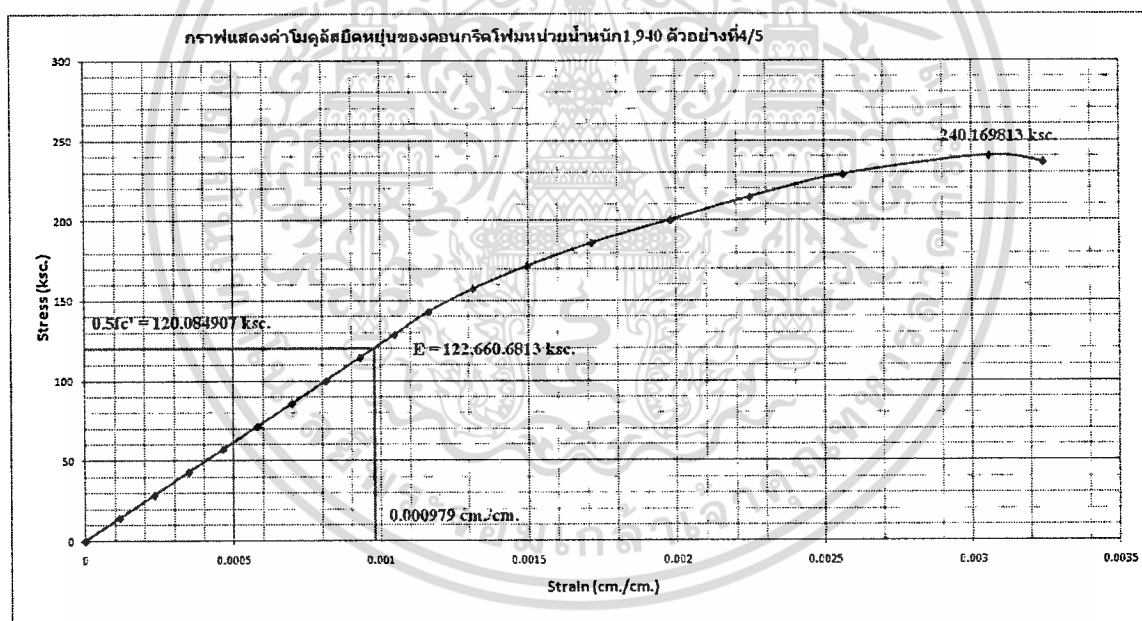
Initial Tangent Modulus Elastic = 123,163.926 ksc.

กำลังอัดประลัย (fc') 240.170 ksc.

ตารางที่ ข.38 ผลการทดสอบการหาคัดคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.19	0.00	0.0000
24.83	2531.53	177.19	14.29	0.0001
49.67	5063.07	177.19	28.57	0.0002
74.50	7594.60	177.19	42.86	0.0003
99.34	10126.14	177.19	57.15	0.0005
124.17	12657.67	177.19	71.44	0.0006
149.01	15189.21	177.19	85.72	0.0007
173.84	17720.74	177.19	100.01	0.0008
198.67	20252.27	177.19	114.30	0.0009

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
223.51	22783.81	177.19	128.59	0.0010
248.34	25315.34	177.19	142.87	0.0012
273.18	27846.88	177.19	157.16	0.0013
298.01	30378.41	177.19	171.45	0.0015
322.85	32909.95	177.19	185.74	0.0017
347.68	35441.48	177.19	200.02	0.0020
372.52	37973.01	177.19	214.31	0.0022
397.35	40504.55	177.19	228.60	0.0026
422.18	43036.08	177.19	242.89	0.0031
447.02	45567.62	177.19	257.17	0.0032



รูปที่ ข.25 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพนหน่วยน้ำหนัก 1,940 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 122,660.681 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยน้ำหนัก  $2,080 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.39 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ หน่วยน้ำหนัก  $2,080 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.10	29.30	179.08	10.946	46921.004	262.013	174675.609	2086.143
2	14.99	30.00	176.48	10.972	47671.168	270.124	170103.069	2072.390
3	15.05	30.20	177.89	11.113	49630.218	278.987	168265.046	2068.528
4	15.18	29.80	180.98	11.248	51140.434	282.573	165492.899	2085.574
5	15.06	28.90	178.13	10.808	48995.479	275.053	176570.539	2099.460
		เฉลี่ย	178.51	11.017	48871.661	273.750	171021.432	2082.419

ตารางที่ ข.40 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์ หน่วยน้ำหนัก  $2,080 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 7 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.05	30.00	177.89	11.170	38226.536	214.883	151210.871	2092.999
2	15.23	28.90	182.18	11.086	37717.955	207.042	148056.914	2105.656
3	15.05	29.80	177.89	10.986	37697.477	211.909	149806.870	2072.337
4	15.10	30.00	179.08	11.198	37547.059	209.668	151070.976	2084.373
5	15.06	30.20	178.13	6.000	38672.090	217.099	150592.865	1115.333
		เฉลี่ย	179.03	10.088	37972.223	212.120	150147.699	1894.140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.41 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก

อายุ 3 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้า ตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.15	30.00	180.27	11.170	36311.992	201.435	129054.963	2065.460
2	15.24	28.90	182.41	10.977	37210.591	203.989	130132.719	2082.217
3	15.05	29.80	177.89	10.986	37511.755	210.865	128772.998	2072.337
4	15.10	30.00	179.08	11.198	37029.701	206.779	129001.890	2084.373
5	15.06	30.20	178.13	11.166	36495.150	204.878	128659.634	2075.634
		เฉลี่ย	179.56	11.099	36911.838	205.589	129124.441	2076.004

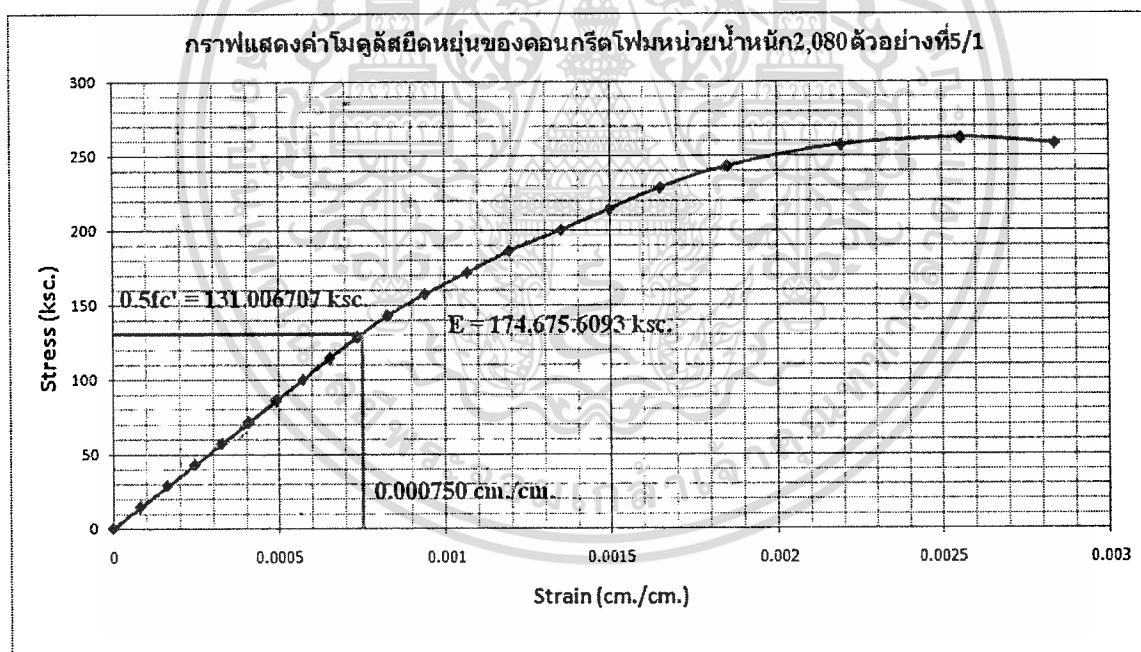
กำลังอัดประลัย (fc') 262.013 ksc.

ตารางที่ ข.42 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	179.08	0.00	0.0000
25.10	2558.57	179.08	14.29	0.0001
50.20	5117.15	179.08	28.57	0.0002
75.30	7675.72	179.08	42.86	0.0002
100.40	10234.29	179.08	57.15	0.0003
125.50	12792.87	179.08	71.44	0.0004
150.60	15351.44	179.08	85.72	0.0005
175.70	17910.01	179.08	100.01	0.0006
200.80	20468.59	179.08	114.30	0.0007
225.90	23027.16	179.08	128.59	0.0007
251.00	25585.73	179.08	142.87	0.0008

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
276.10	28144.30	179.08	157.16	0.0009
301.20	30702.88	179.08	171.45	0.0011
326.29	33261.45	179.08	185.74	0.0012
351.39	35820.02	179.08	200.02	0.0014
376.49	38378.60	179.08	214.31	0.0015
401.59	40937.17	179.08	228.60	0.0016
426.69	43495.74	179.08	242.89	0.0019
451.79	46054.32	179.08	257.17	0.0022
476.89	48612.89	179.08	271.46	0.0026
501.99	51171.46	179.08	285.75	0.0028



รูปที่ ข.26 กราฟแสดงการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 174,675.609 ksc.

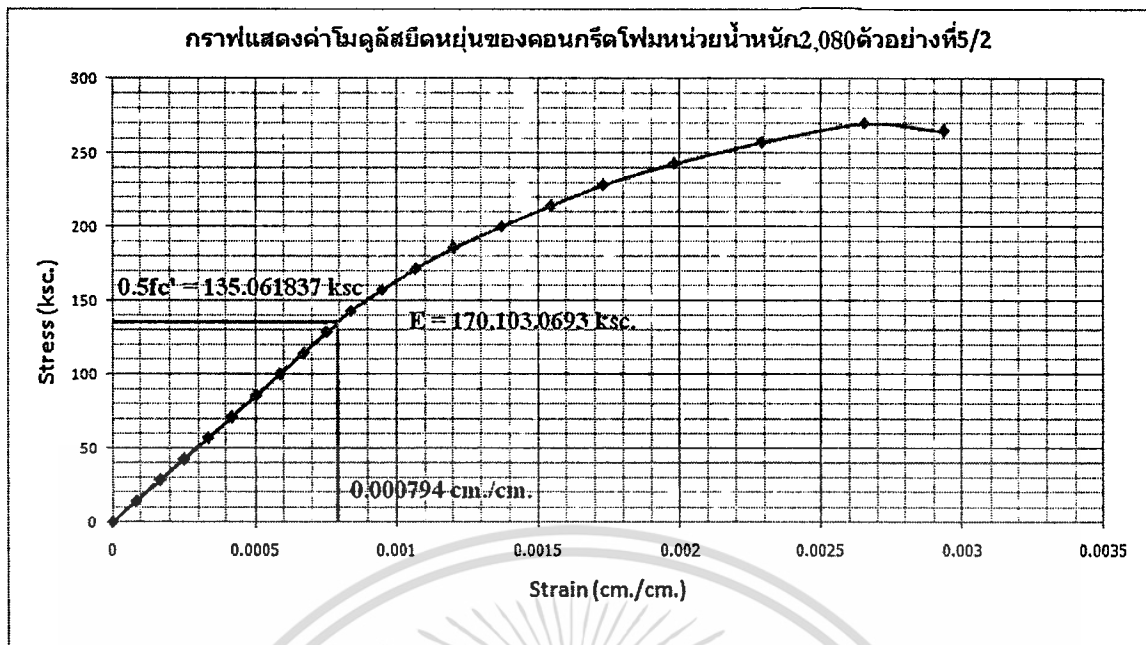
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 270.124 ksc.

ตารางที่ ข.43 ผลการทดสอบการหดตัวคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก  $2,080 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก  
อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.48	0.00	0.0000
24.74	2521.43	176.48	14.29	0.0001
49.47	5042.86	176.48	28.57	0.0002
74.21	7564.30	176.48	42.86	0.0003
98.94	10085.73	176.48	57.15	0.0003
123.68	12607.16	176.48	71.44	0.0004
148.41	15128.59	176.48	85.72	0.0005
173.15	17650.02	176.48	100.01	0.0006
197.88	20171.45	176.48	114.30	0.0007
222.62	22692.89	176.48	128.59	0.0008
247.35	25214.32	176.48	142.87	0.0008
272.09	27735.75	176.48	157.16	0.0009
296.82	30257.18	176.48	171.45	0.0011
321.56	32778.61	176.48	185.74	0.0012
346.29	35300.04	176.48	200.02	0.0014
371.03	37821.48	176.48	214.31	0.0015
395.76	40342.91	176.48	228.60	0.0017
420.50	42864.34	176.48	242.89	0.0020
445.23	45385.77	176.48	257.17	0.0023
469.97	47907.20	176.48	271.46	0.0027
494.70	50428.63	176.48	285.75	0.0029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.27 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

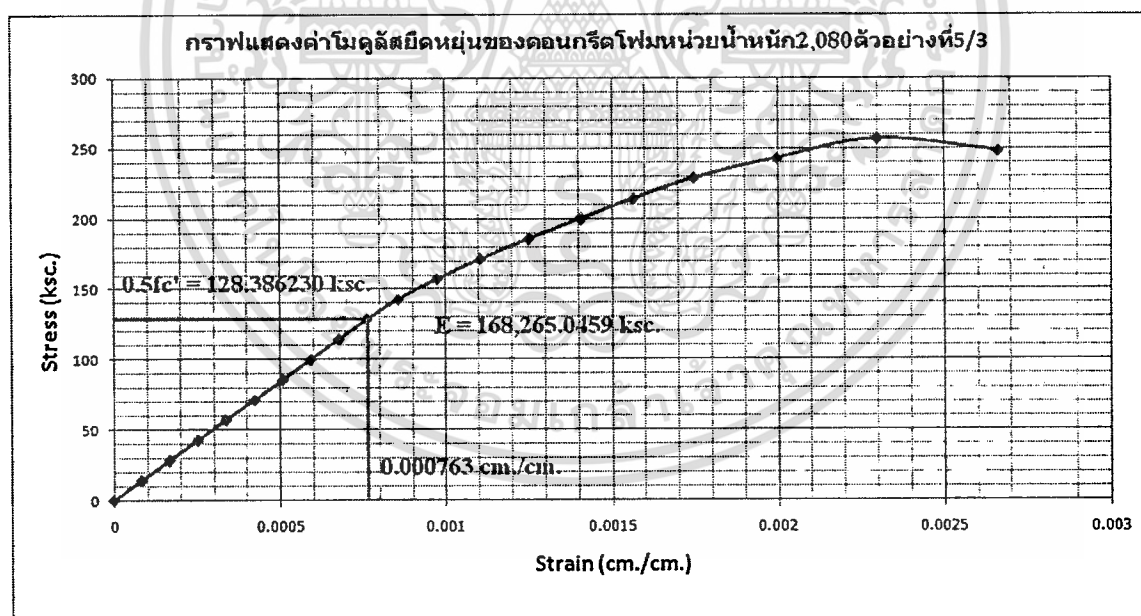
Initial Tangent Modulus Elastic = 170,103,069 ksc.

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 278.987 ksc.

ตารางที่ ข.44 ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอก อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.89	0.00	0.0000
24.93	2541.66	177.89	14.29	0.0001
49.87	5083.31	177.89	28.57	0.0002
74.80	7624.97	177.89	42.86	0.0003
99.73	10166.63	177.89	57.15	0.0003
124.67	12708.28	177.89	71.44	0.0004
149.60	15249.94	177.89	85.72	0.0005
174.54	17791.60	177.89	100.01	0.0006
199.47	20333.26	177.89	114.30	0.0007

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
224.40	22874.91	177.89	128.59	0.0008
249.34	25416.57	177.89	142.87	0.0009
274.27	27958.23	177.89	157.16	0.0010
299.20	30499.88	177.89	171.45	0.0011
324.14	33041.54	177.89	185.74	0.0012
349.07	35583.20	177.89	200.02	0.0014
374.00	38124.85	177.89	214.31	0.0015
398.94	40666.51	177.89	228.60	0.0017
423.87	43208.17	177.89	242.89	0.0019
448.81	45749.83	177.89	257.17	0.0022
473.74	48291.48	177.89	271.46	0.0027
498.67	50833.14	177.89	285.75	0.0030



รูปที่ ข.28 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 168,265.046 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

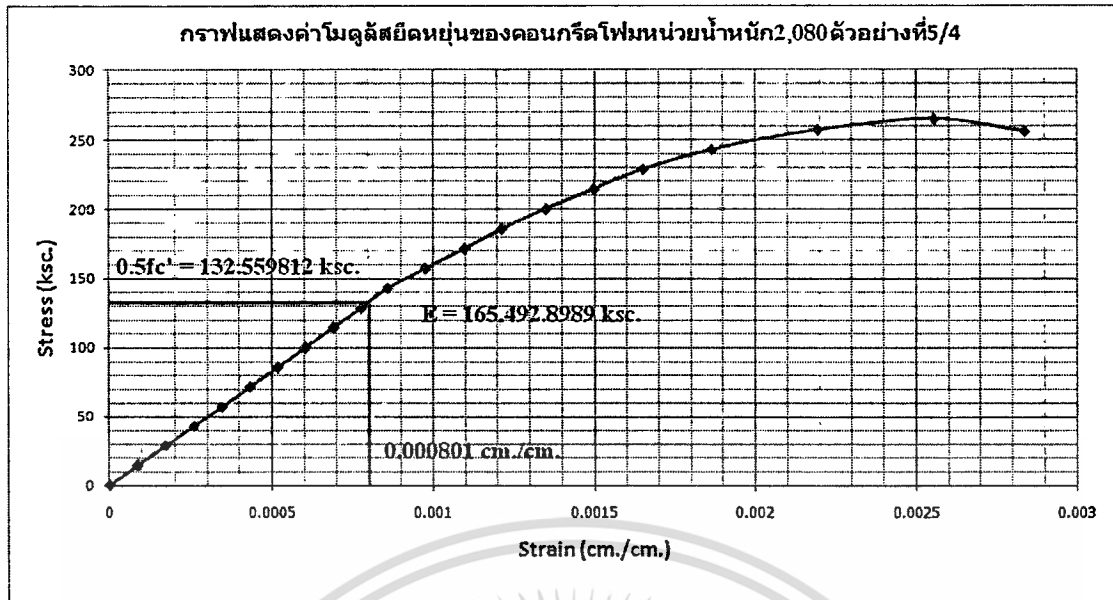
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 282.573 ksc.

ตารางที่ ข.45 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 2,080 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	180.98	0.00	0.0000
25.37	2585.76	180.98	14.29	0.0001
50.73	5171.51	180.98	28.57	0.0002
76.10	7757.27	180.98	42.86	0.0003
101.47	10343.02	180.98	57.15	0.0003
126.83	12928.78	180.98	71.44	0.0004
152.20	15514.53	180.98	85.72	0.0005
177.56	18100.29	180.98	100.01	0.0006
202.93	20686.05	180.98	114.30	0.0007
228.30	23271.80	180.98	128.59	0.0008
253.66	25857.56	180.98	142.87	0.0009
279.03	28443.31	180.98	157.16	0.0010
304.40	31029.07	180.98	171.45	0.0011
329.76	33614.82	180.98	185.74	0.0012
355.13	36200.58	180.98	200.02	0.0014
380.49	38786.33	180.98	214.31	0.0015
405.86	41372.09	180.98	228.60	0.0016
431.23	43957.85	180.98	242.89	0.0019
456.59	46543.60	180.98	257.17	0.0021
481.96	49129.36	180.98	271.46	0.0025
507.33	51715.11	180.98	285.75	0.0028
532.69	54300.87	180.98	300.04	0.0030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.29 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โปมหน่วยน้ำหนัก 2,080  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

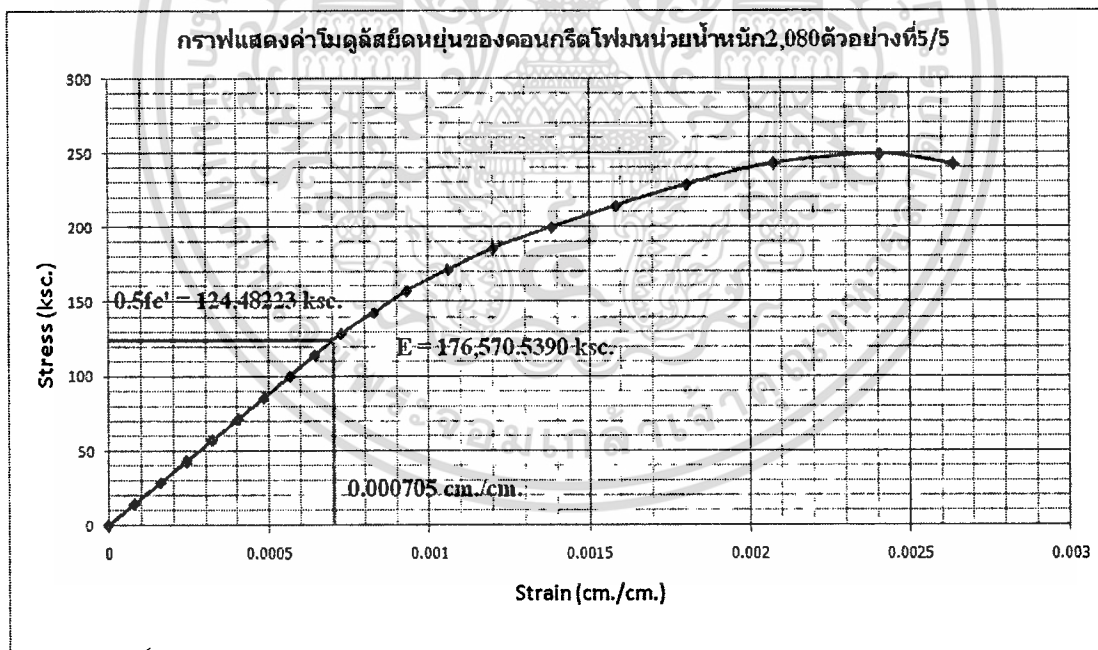
Initial Tangent Modulus Elastic = 165,492.899 ksc.

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 275.053 ksc.

ตารางที่ ข. 46 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตผสม โปมหน่วยน้ำหนัก 2,080  $\text{kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	178.13	0.00	0.0000
24.97	2545.04	178.13	14.29	0.0001
49.93	5090.07	178.13	28.57	0.0002
74.90	7635.11	178.13	42.86	0.0002
99.87	10180.14	178.13	57.15	0.0003
124.83	12725.18	178.13	71.44	0.0004
149.80	15270.21	178.13	85.72	0.0005
174.77	17815.25	178.13	100.01	0.0006
199.73	20360.29	178.13	114.30	0.0006
224.70	22905.32	178.13	128.59	0.0007

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
249.67	25450.36	178.13	142.87	0.0008
274.63	27995.39	178.13	157.16	0.0009
299.60	30540.43	178.13	171.45	0.0011
324.57	33085.46	178.13	185.74	0.0012
349.54	35630.50	178.13	200.02	0.0014
374.50	38175.54	178.13	214.31	0.0016
399.47	40720.57	178.13	228.60	0.0018
424.44	43265.61	178.13	242.89	0.0021
449.40	45810.64	178.13	257.17	0.0024
474.37	48355.68	178.13	271.46	0.0028
499.34	50900.71	178.13	285.75	0.0032
524.30	53445.75	178.13	300.04	0.0034



รูปที่ ข.30 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพนหน่วยน้ำหนัก 2,080 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 176,570.539 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข-2 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกของกาน

- การทดสอบตัวอย่างทรงกระบอก
  - คอนกรีตธรรมดา

ตารางที่ ข.47 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	29.50	176.71	12.594	44342.508	250.927	236717.00	2415.772
2	14.98	29.80	176.24	12.612	41794.088	237.138	228023.00	2425.813
3	15.00	29.80	176.71	12.514	43832.824	248.043	206697.00	2400.427
4	15.00	30.00	176.27	12.564	42813.456	242.275	288414.00	2410.018
5	15.00	29.60	176.77	12.453	42303.772	239.390	178645.00	2388.726
		เฉลี่ย	176.62	12.547	43017.330	243.555	227699.20	2408.151

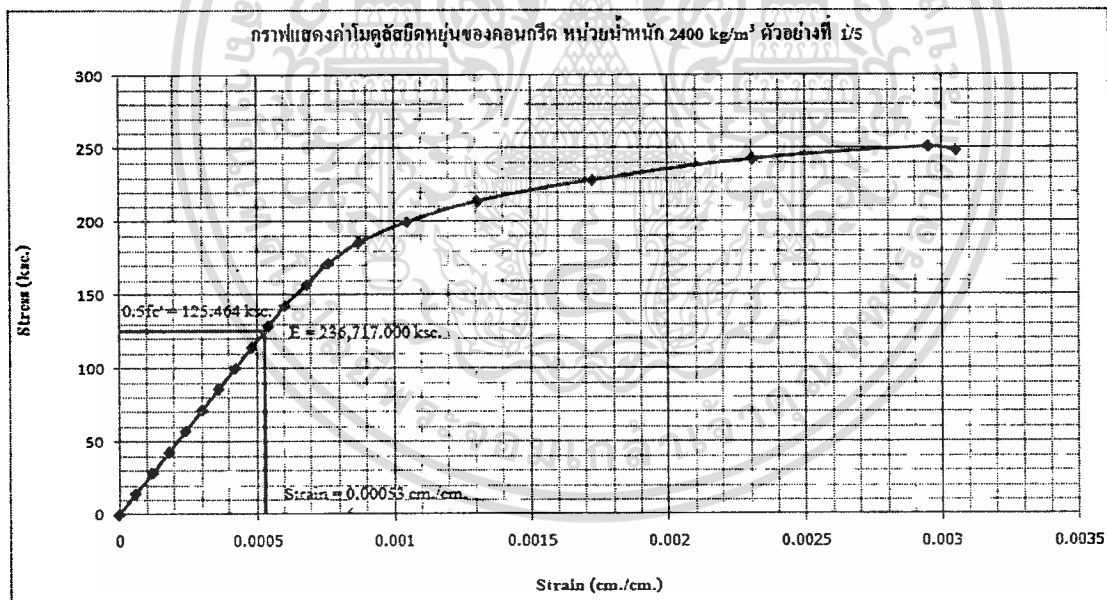
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 250.927 ksc.

ตารางที่ ข.48 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0015
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0001
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0002
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0002
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0003
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0004
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0004
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0005
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0006
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0007
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0008
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0009
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0011
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0013
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0017
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0023
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0030
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0031



รูปที่ ข.31 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 236,717 ksc.

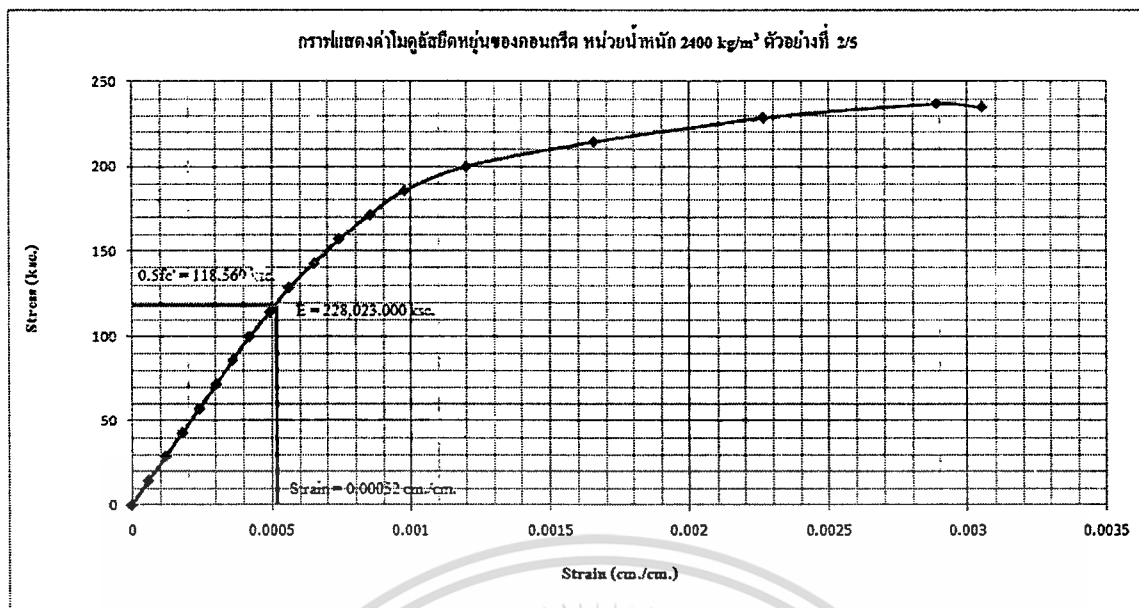
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 237.138 ksc.

ตารางที่ ข.49 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.24	0.00	0.0000
24.70	2518.02	176.24	14.29	0.0001
49.40	5036.03	176.24	28.57	0.0001
74.11	7554.05	176.24	42.86	0.0002
98.81	10072.07	176.24	57.15	0.0002
123.51	12590.08	176.24	71.44	0.0003
148.21	15108.10	176.24	85.72	0.0004
172.91	17626.11	176.24	100.01	0.0004
197.61	20144.13	176.24	114.30	0.0005
222.32	22662.15	176.24	128.59	0.0006
247.02	25180.16	176.24	142.87	0.0007
271.72	27698.18	176.24	157.16	0.0007
296.42	30216.20	176.24	171.45	0.0009
321.12	32734.21	176.24	185.74	0.0010
345.82	35252.23	176.24	200.02	0.0012
370.53	37770.24	176.24	214.31	0.0017
395.23	40288.26	176.24	228.60	0.0023
419.93	42806.28	176.24	242.89	0.0029
444.63	45324.29	176.24	257.17	0.0031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.32 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

Initial Tangent Modulus Elastic = 228,023 ksc.

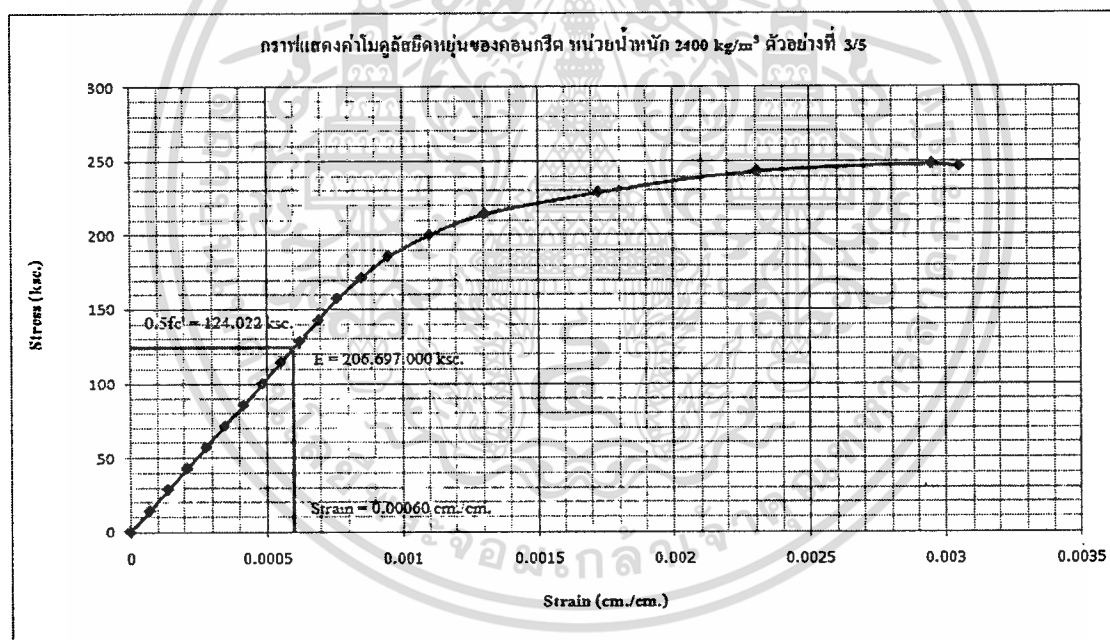
กำลังอัดประลัย (fc') 248.043 ksc.

ตารางที่ ข.50 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0001
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0002
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0003
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0003
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0004
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0005
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0006
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0006
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0008
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0008
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0009
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0011
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0013
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0017
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0023
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0030
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0031



รูปที่ ข.33 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 206,697 ksc.

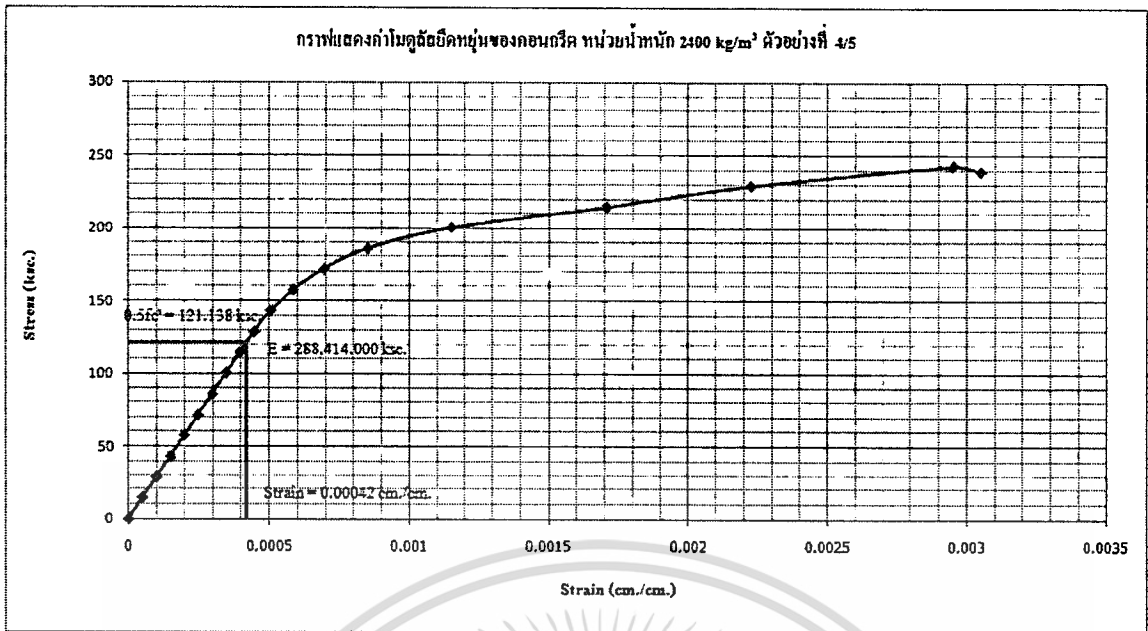
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 242.275 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.51 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.27	0.00	0.0000
24.71	2518.44	176.27	14.29	0.0000
49.41	5036.89	176.27	28.57	0.0001
74.12	7555.33	176.27	42.86	0.0001
98.82	10073.78	176.27	57.15	0.0002
123.53	12592.22	176.27	71.44	0.0002
148.24	15110.67	176.27	85.72	0.0003
172.94	17629.11	176.27	100.01	0.0003
197.65	20147.56	176.27	114.30	0.0004
222.35	22666.00	176.27	128.59	0.0004
247.06	25184.45	176.27	142.87	0.0005
271.77	27702.89	176.27	157.16	0.0006
296.47	30221.34	176.27	171.45	0.0007
321.18	32739.78	176.27	185.74	0.0009
345.88	35258.23	176.27	200.02	0.0012
370.59	37776.67	176.27	214.31	0.0017
395.30	40295.12	176.27	228.60	0.0022
420.00	42813.56	176.27	242.89	0.0030
444.71	45332.01	176.27	257.17	0.0031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.34 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

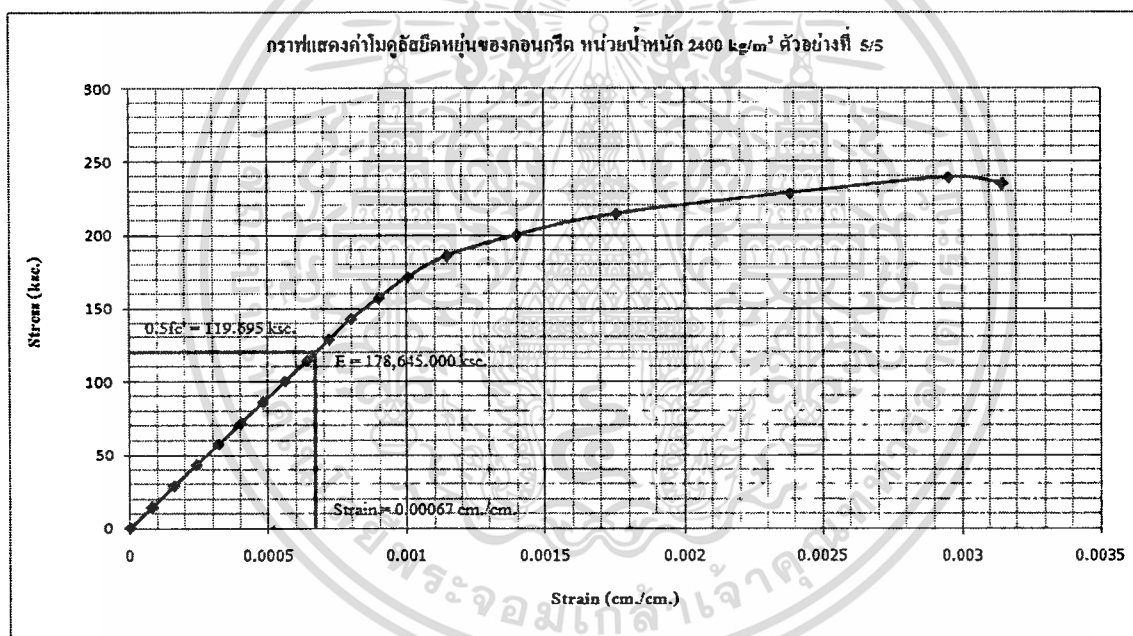
Initial Tangent Modulus Elastic = 288,414 ksc.

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 239,390 ksc.

ตารางที่ ข.52 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.77	0.00	0.0000
24.78	2525.59	176.77	14.29	0.0001
49.55	5051.18	176.77	28.57	0.0002
74.33	7576.77	176.77	42.86	0.0002
99.10	10102.35	176.77	57.15	0.0003
123.88	12627.94	176.77	71.44	0.0004
148.66	15153.53	176.77	85.72	0.0005
173.43	17679.12	176.77	100.01	0.0006
198.21	20204.71	176.77	114.30	0.0006
222.98	22730.30	176.77	128.59	0.0007
247.76	25255.89	176.77	142.87	0.0008

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
272.54	27781.48	176.77	157.16	0.0009
297.31	30307.06	176.77	171.45	0.0010
322.09	32832.65	176.77	185.74	0.0011
346.86	35358.24	176.77	200.02	0.0014
371.64	37883.83	176.77	214.31	0.0018
396.42	40409.42	176.77	228.60	0.0024
421.19	42935.01	176.77	242.89	0.0030
445.97	45460.60	176.77	257.17	0.0032



รูปที่ ข.35 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 178,645 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตผสมโม่ซีเมนต์  
หน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.53 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโม่ หน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก  
อายุ 28 วัน

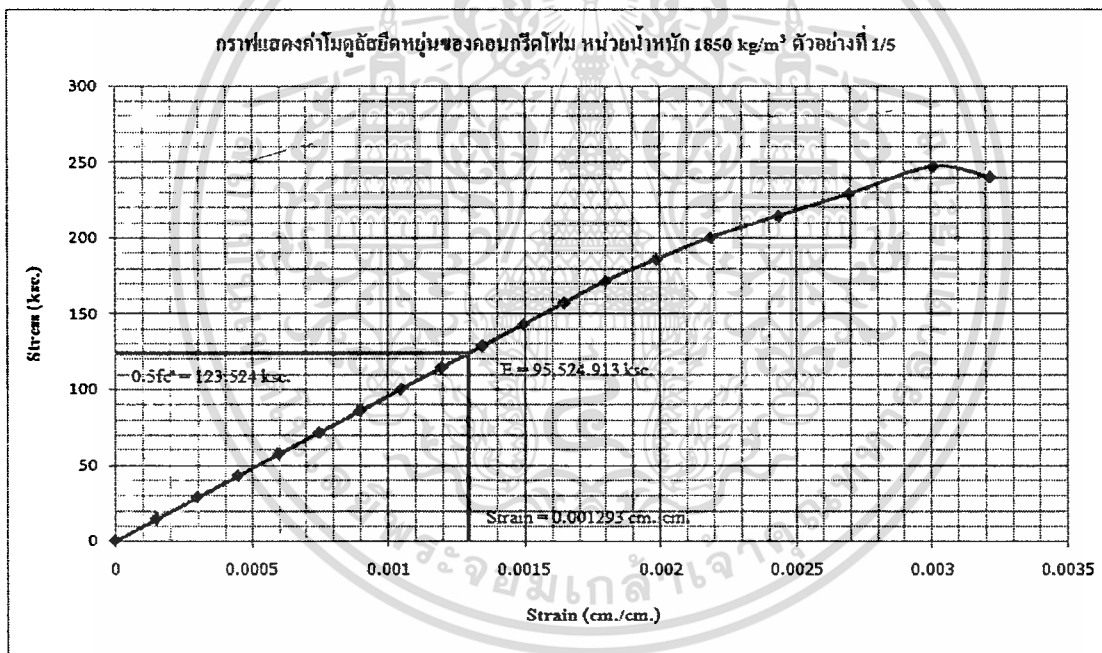
No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity (Ec) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.00	30.00	176.71	9.810	43657.054	247.048	95524.913	1850.441
2	15.02	30.05	177.19	9.850	42757.779	241.316	96254.065	1849.959
3	15.00	30.00	176.71	9.820	43062.245	243.682	95324.681	1852.328
4	14.95	30.02	175.54	9.740	43127.011	245.684	96204.315	1848.315
5	15.03	30.00	177.42	9.860	43330.363	244.222	95249.462	1852.456
		เฉลี่ย	176.72	9.816	43186.890	244.390	95711.487	1850.700

กำลังอัดเฉลี่ย ( $f_c'$ ) 247.048 ksc.

ตารางที่ ข.54 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโม่หน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$   
ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0003
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0004
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0006
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0007
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0009
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0010
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0012
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0013

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0015
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0016
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0018
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0020
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0022
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0024
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0027
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0030
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0032



รูปที่ ข.36 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,850 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,524.913 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

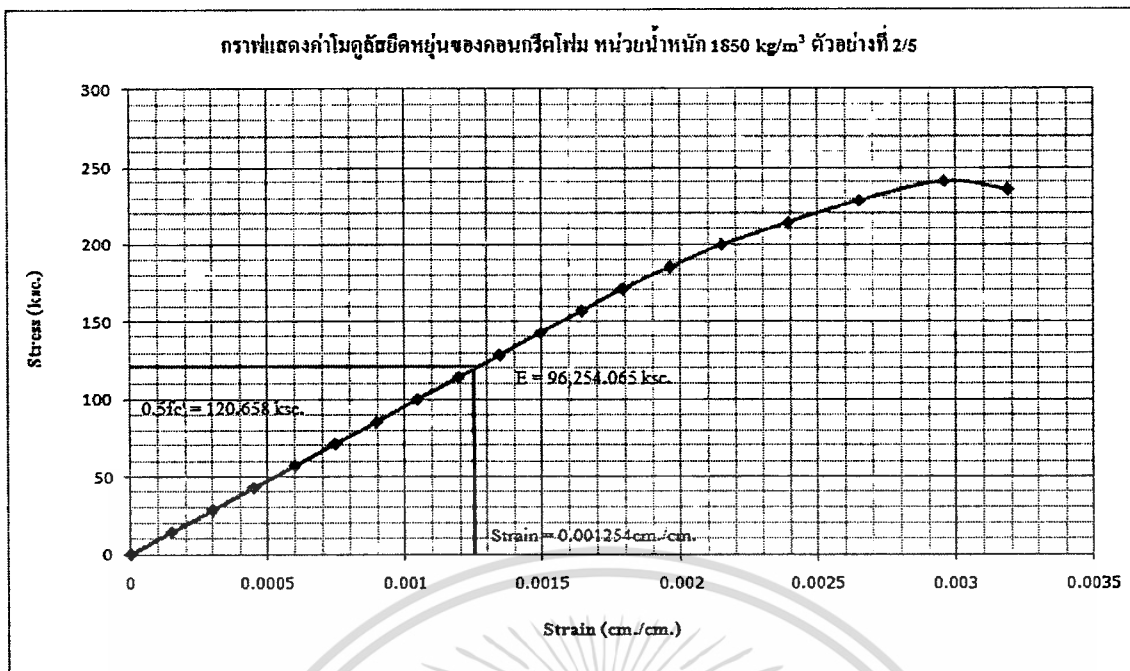
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 241.316 ksc.

ตารางที่ ข.55 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,850 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.19	0.00	0.0000
24.83	2531.59	177.19	14.29	0.0001
49.67	5063.18	177.19	28.57	0.0003
74.50	7594.77	177.19	42.86	0.0004
99.34	10126.36	177.19	57.15	0.0006
124.17	12657.95	177.19	71.44	0.0007
149.01	15189.54	177.19	85.72	0.0009
173.84	17721.13	177.19	100.01	0.0010
198.68	20252.72	177.19	114.30	0.0012
223.51	22784.30	177.19	128.59	0.0013
248.35	25315.89	177.19	142.87	0.0015
273.18	27847.48	177.19	157.16	0.0016
298.02	30379.07	177.19	171.45	0.0018
322.85	32910.66	177.19	185.74	0.0020
347.69	35442.25	177.19	200.02	0.0022
372.52	37973.84	177.19	214.31	0.0024
397.36	40505.43	177.19	228.60	0.0026
422.19	43037.02	177.19	242.89	0.0030
447.03	45568.61	177.19	257.17	0.0032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.37 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โยมน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

Initial Tangent Modulus Elastic = 96,254.065 ksc.

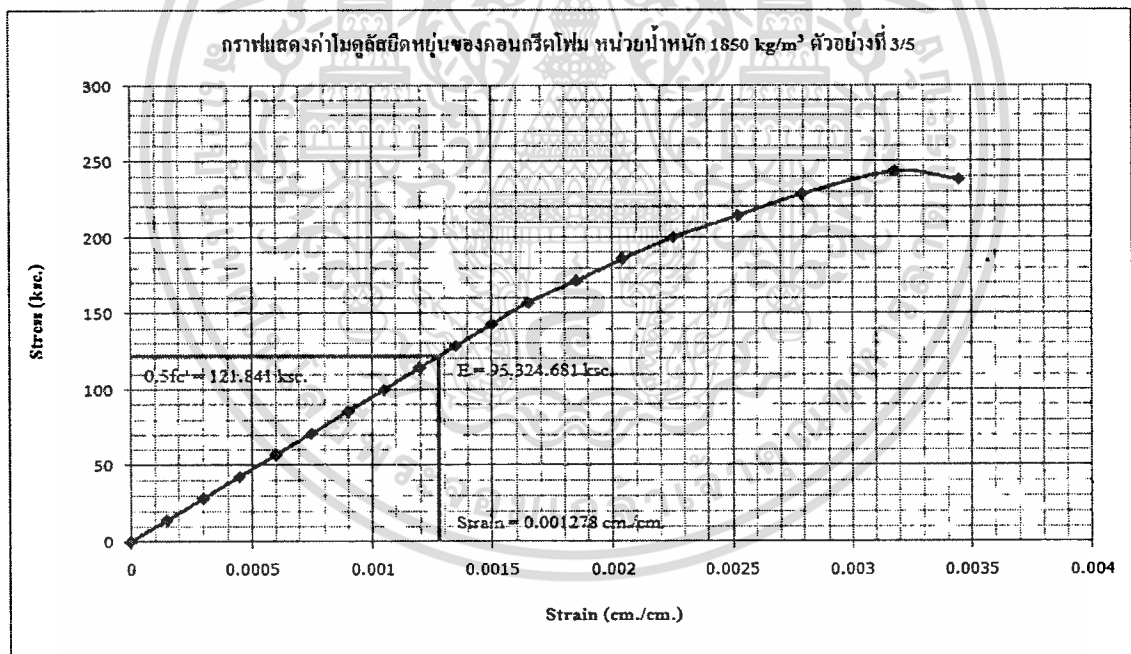
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 243.682 ksc.

ตารางที่ ข.56 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โยมน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0002
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0003
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0005
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0006
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0008
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0009
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0011
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0014
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0015
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0017
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0019
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0020
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0023
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0025
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0028
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0032
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0035
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0031



รูปที่ ข.38 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โยมน้ำหนัก 1,850 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,324.681 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

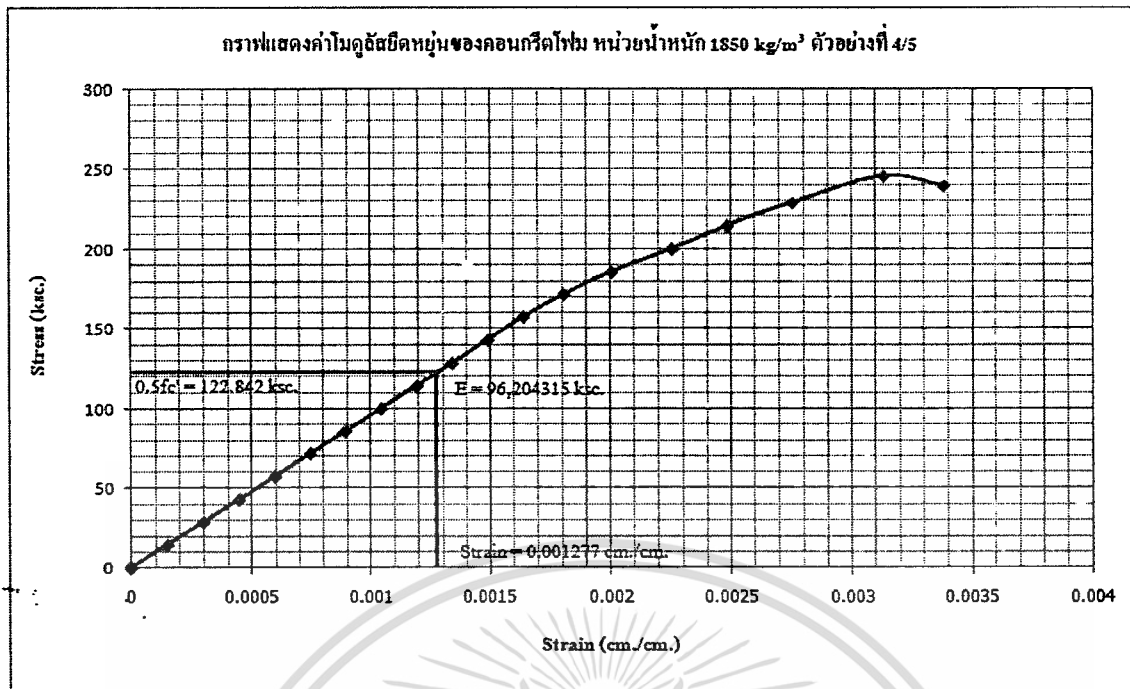
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 245.684 ksc.

ตารางที่ ข.57 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	175.54	0.00	0.0000
24.60	2508.02	175.54	14.29	0.0001
49.21	5016.03	175.54	28.57	0.0003
73.81	7524.05	175.54	42.86	0.0004
98.41	10032.06	175.54	57.15	0.0006
123.02	12540.08	175.54	71.44	0.0007
147.62	15048.09	175.54	85.72	0.0009
172.23	17556.11	175.54	100.01	0.0010
196.83	20064.12	175.54	114.30	0.0012
221.43	22572.14	175.54	128.59	0.0013
246.04	25080.15	175.54	142.87	0.0015
270.64	27588.17	175.54	157.16	0.0016
295.24	30096.18	175.54	171.45	0.0018
319.85	32604.20	175.54	185.74	0.0020
344.45	35112.21	175.54	200.02	0.0023
369.05	37620.23	175.54	214.31	0.0025
393.66	40128.24	175.54	228.60	0.0028
418.26	42636.26	175.54	242.89	0.0031
442.87	45144.27	175.54	257.17	0.0034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.39 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟม หน่วงน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

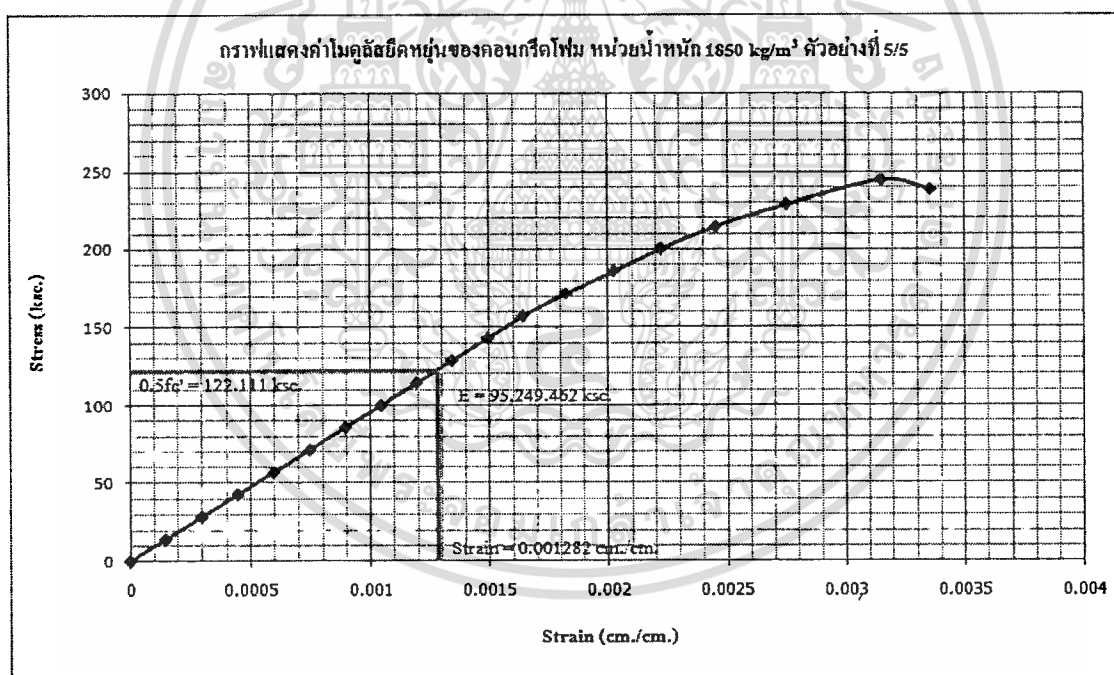
Initial Tangent Modulus Elastic = 96,204.315 ksc.

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 244.222 ksc.

ตารางที่ ข.58 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟม หน่วงน้ำหนัก  $1,850 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.42	0.00	0.0000
24.87	2534.88	177.42	14.29	0.0001
49.73	5069.75	177.42	28.57	0.0003
74.60	7604.63	177.42	42.86	0.0004
99.47	10139.50	177.42	57.15	0.0006
124.34	12674.38	177.42	71.44	0.0007
149.20	15209.25	177.42	85.72	0.0009
174.07	17744.13	177.42	100.01	0.0010
198.94	20279.00	177.42	114.30	0.0012

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
223.80	22813.88	177.42	128.59	0.0013
248.67	25348.75	177.42	142.87	0.0015
273.54	27883.63	177.42	157.16	0.0016
298.41	30418.51	177.42	171.45	0.0018
323.27	32953.38	177.42	185.74	0.0020
348.14	35488.26	177.42	200.02	0.0022
373.01	38023.13	177.42	214.31	0.0025
397.87	40558.01	177.42	228.60	0.0028
422.74	43092.88	177.42	242.89	0.0032
447.61	45627.76	177.42	257.17	0.0034



รูปที่ ข.40 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโฟมหน่วยน้ำหนัก 1,850 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

Initial Tangent Modulus Elastic = 95,249.462 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$

ตารางที่ ข.59 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$  ทรงกระบอก

อายุ 28 วัน

No.	ขนาด		พื้นที่ หน้าตัด ( $\text{cm}^2$ )	น้ำหนัก (kg.)	กำลังอัด (kg.)	หน่วย แรงอัด (ksc)	Modulus of elasticity ( $E_c$ ) (ksc)	หน่วย น้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ )
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)						
1	15.02	30.00	177.19	10.358	45269.548	255.491	159485.228	1948.610
2	15.05	30.00	177.89	10.422	45257.050	254.404	161532.483	1952.841
3	15.00	30.00	176.71	10.346	45225.672	255.925	157906.354	1951.546
4	15.00	30.00	176.71	10.334	45768.514	258.997	158786.598	1949.283
5	14.98	30.05	176.24	10.324	45246.284	256.726	160854.672	1949.351
		เฉลี่ย	176.95	10.357	45353.414	256.309	159713.067	1950.326

กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 255.491 ksc.

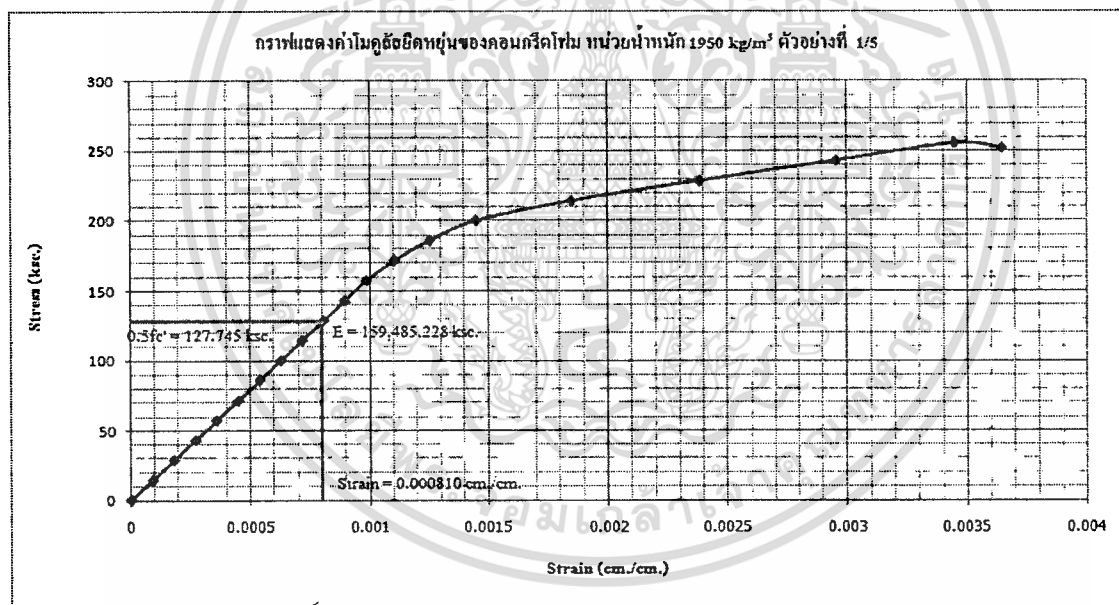
ตารางที่ ข.60 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์หน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 1

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.19	0.00	0.0015
24.83	2531.59	177.19	14.29	0.0001
49.67	5063.18	177.19	28.57	0.0002
74.50	7594.77	177.19	42.86	0.0003
99.34	10126.36	177.19	57.15	0.0004
124.17	12657.95	177.19	71.44	0.0004
149.01	15189.54	177.19	85.72	0.0005
173.84	17721.13	177.19	100.01	0.0006
198.68	20252.72	177.19	114.30	0.0007
223.51	22784.30	177.19	128.59	0.0008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
248.35	25315.89	177.19	142.87	0.0009
273.18	27847.48	177.19	157.16	0.0010
298.02	30379.07	177.19	171.45	0.0011
322.85	32910.66	177.19	185.74	0.0013
347.69	35442.25	177.19	200.02	0.0015
372.52	37973.84	177.19	214.31	0.0018
397.36	40505.43	177.19	228.60	0.0024
422.19	43037.02	177.19	242.89	0.0030
447.03	45568.61	177.19	257.17	0.0035
471.86	48100.20	177.19	271.46	0.0037



รูปที่ ข.41 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 1

Initial Tangent Modulus Elastic = 159,485.228 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

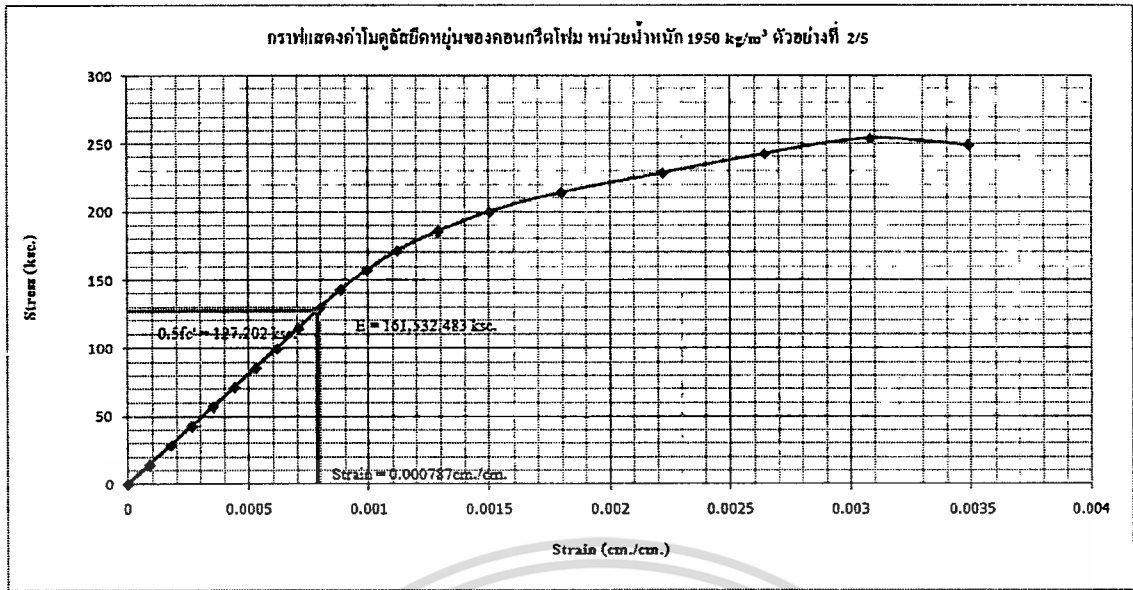
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 254.404 ksc.

ตารางที่ ข.61 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสม โฟมหน่วยน้ำหนัก  $1,950 \text{ kg/m}^3$

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 2

Load (kN)	Load(kg)	Area( $\text{cm}^2$ )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	177.89	0.00	0.0000
24.93	2541.59	177.89	14.29	0.0001
49.87	5083.18	177.89	28.57	0.0002
74.80	7624.77	177.89	42.86	0.0003
99.73	10166.36	177.89	57.15	0.0004
124.67	12707.95	177.89	71.44	0.0004
149.60	15249.54	177.89	85.72	0.0005
174.53	17791.13	177.89	100.01	0.0006
199.46	20332.72	177.89	114.30	0.0007
224.40	22874.32	177.89	128.59	0.0008
249.33	25415.91	177.89	142.87	0.0009
274.26	27957.50	177.89	157.16	0.0010
299.20	30499.09	177.89	171.45	0.0011
324.13	33040.68	177.89	185.74	0.0013
349.06	35582.27	177.89	200.02	0.0015
374.00	38123.86	177.89	214.31	0.0018
398.93	40665.45	177.89	228.60	0.0022
423.86	43207.04	177.89	242.89	0.0026
448.79	45748.63	177.89	257.17	0.0031
473.73	48290.22	177.89	271.46	0.0035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.42 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโม่หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 2

Initial Tangent Modulus Elastic = 161,532.483 ksc.

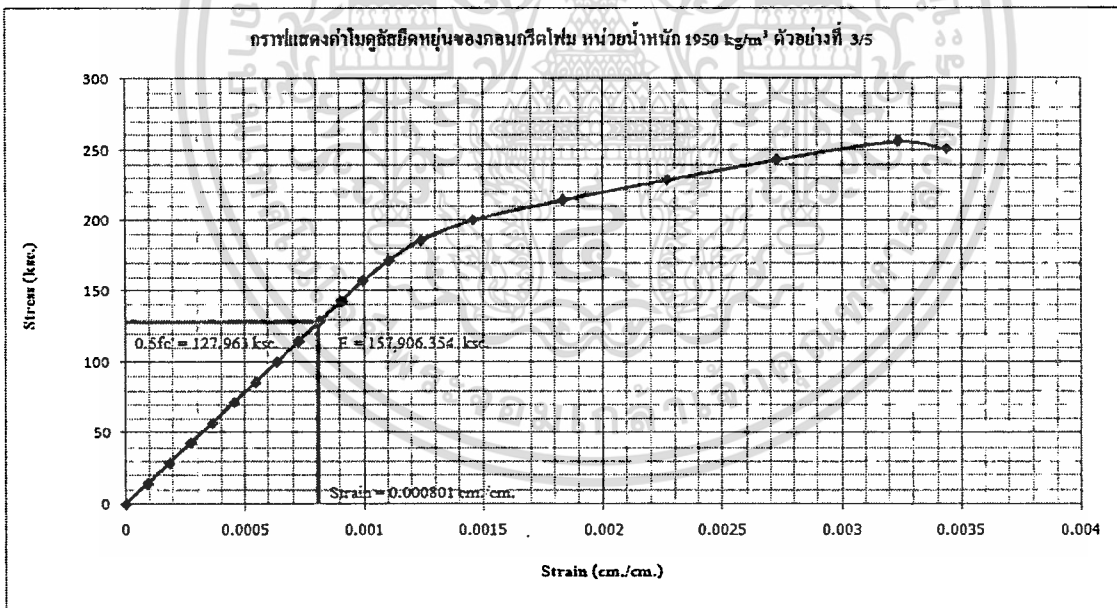
กำลังอัดประลัย (fc') 255.925 ksc.

ตารางที่ ข.62 ผลการทดสอบการหาค่าคอนกรีตผสมโม่หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 3

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0002
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0003
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0004
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0005
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0005
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0006
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0008
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0009
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0010
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0011
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0012
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0015
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0018
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0023
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0027
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0032
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0034



รูปที่ ข.43 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 3

Initial Tangent Modulus Elastic = 157,906.354 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

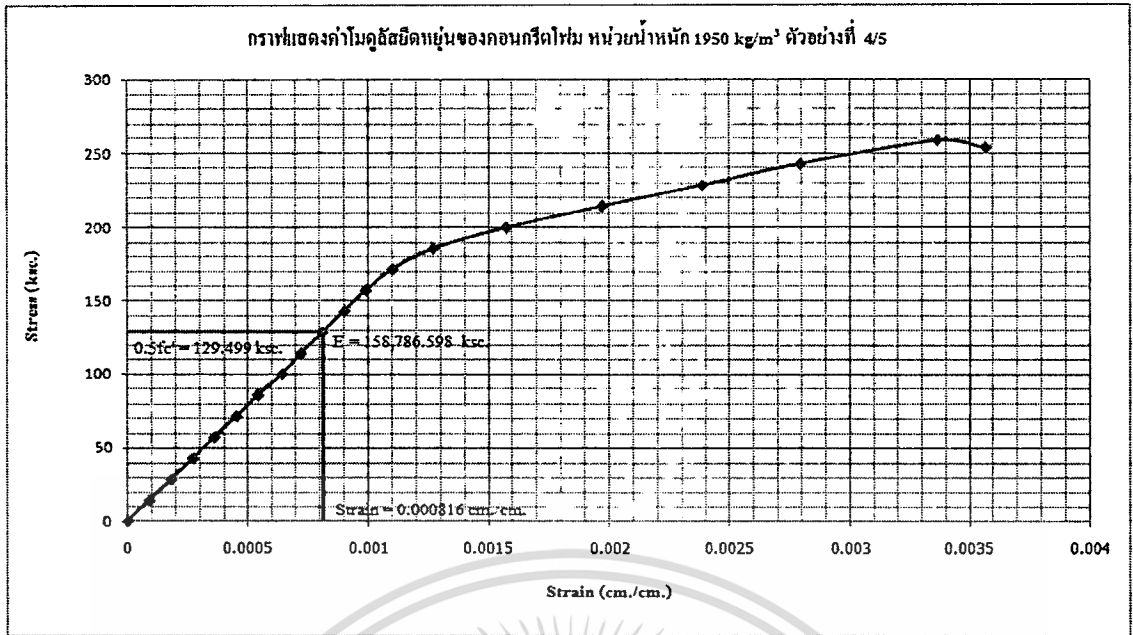
กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) 258.997 ksc.

ตารางที่ ข.63 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโพลีเมอร์น้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup>

ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 4

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.71	0.00	0.0000
24.77	2524.73	176.71	14.29	0.0001
49.54	5049.46	176.71	28.57	0.0002
74.30	7574.19	176.71	42.86	0.0003
99.07	10098.93	176.71	57.15	0.0004
123.84	12623.66	176.71	71.44	0.0004
148.61	15148.39	176.71	85.72	0.0005
173.37	17673.12	176.71	100.01	0.0006
198.14	20197.85	176.71	114.30	0.0007
222.91	22722.58	176.71	128.59	0.0008
247.68	25247.31	176.71	142.87	0.0009
272.44	27772.05	176.71	157.16	0.0010
297.21	30296.78	176.71	171.45	0.0011
321.98	32821.51	176.71	185.74	0.0013
346.75	35346.24	176.71	200.02	0.0016
371.51	37870.97	176.71	214.31	0.0020
396.28	40395.70	176.71	228.60	0.0024
421.05	42920.43	176.71	242.89	0.0028
445.82	45445.17	176.71	257.17	0.0034
470.58	47969.90	176.71	271.46	0.0036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.44 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมโม่หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 4

Initial Tangent Modulus Elastic = 158,786.598 ksc.

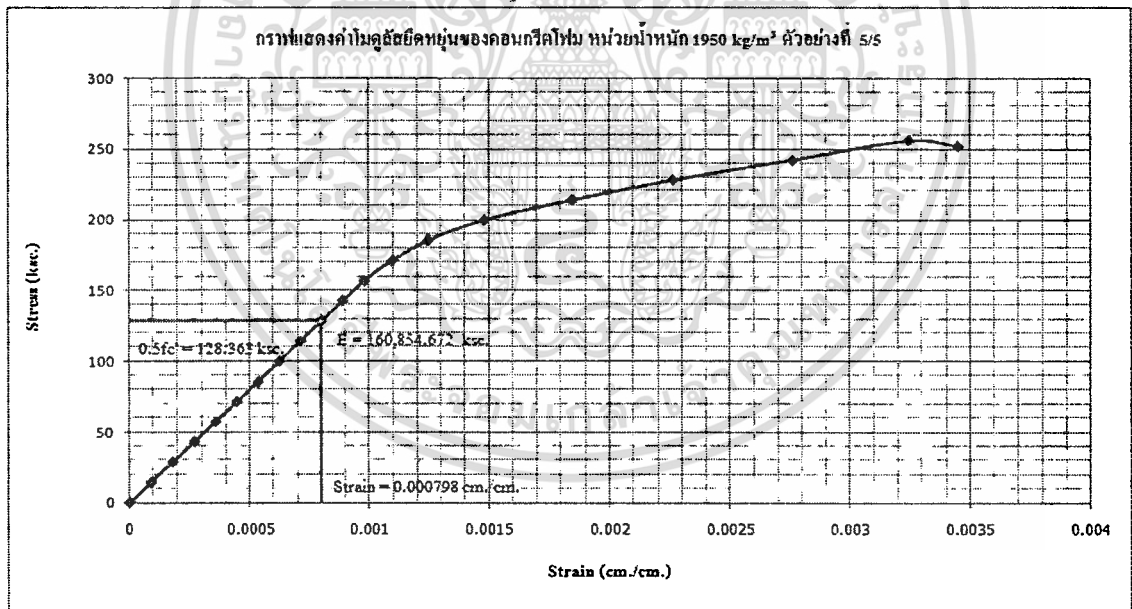
กำลังอัดประลัย (f<sub>c</sub>') 256.726 ksc.

ตารางที่ ข.64 ผลการทดสอบการหดตัว คอนกรีตผสมโม่หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup>  
ทรงกระบอกอายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 5

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
0.00	0.00	176.24	0.00	0.0000
24.70	2518.02	176.24	14.29	0.0001
49.40	5036.03	176.24	28.57	0.0002
74.11	7554.05	176.24	42.86	0.0003
98.81	10072.07	176.24	57.15	0.0004
123.51	12590.08	176.24	71.44	0.0004
148.21	15108.10	176.24	85.72	0.0005
172.91	17626.11	176.24	100.01	0.0006
197.61	20144.13	176.24	114.30	0.0007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (kN)	Load(kg)	Area(cm <sup>2</sup> )	Stress(ksc)	Strain
222.32	22662.15	176.24	128.59	0.0008
247.02	25180.16	176.24	142.87	0.0009
271.72	27698.18	176.24	157.16	0.0010
296.42	30216.20	176.24	171.45	0.0011
321.12	32734.21	176.24	185.74	0.0012
345.82	35252.23	176.24	200.02	0.0015
370.53	37770.24	176.24	214.31	0.0018
395.23	40288.26	176.24	228.60	0.0023
419.93	42806.28	176.24	242.89	0.0028
444.63	45324.29	176.24	257.17	0.0032
469.33	47842.31	176.24	271.46	0.0035



รูปที่ ข.45 กราฟแสดงการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม โฟม หน่วยน้ำหนัก 1,950 kg/m<sup>3</sup> ทรงกระบอก ตัวอย่างที่ 5

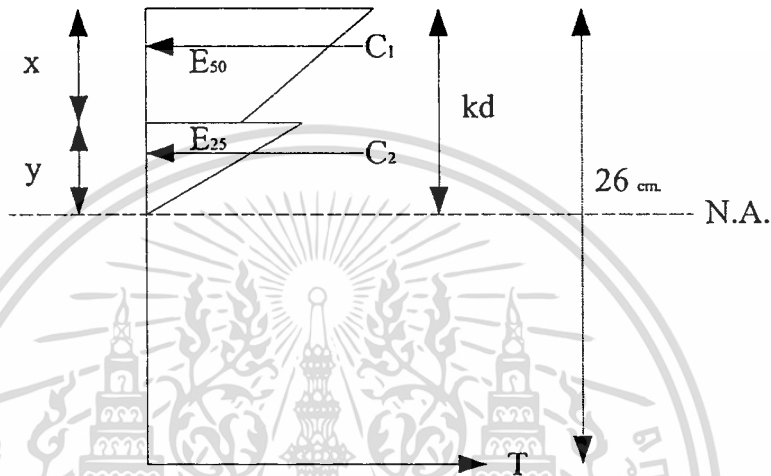
Initial Tangent Modulus Elastic = 160854.672 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข-3. การคำนวณค่า $kd$ โดยใช้โปรแกรม Visual C++

- การหาระยะ 3 layer

การใช้โปรแกรม Visual C++ เพื่อหาค่าระยะ  $kd$  ดังภาพ ในกรณีที่คานเกิดการคืบแล้วที่ 1 ปี ซึ่งได้แบ่งคานออกเป็นสามชั้น โดยค่า Elastic Modulus ต่างกัน



รูปที่ ข.46 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 3 ชั้น

ทำการหาค่า  $kd$

สูตร

$$\text{จาก } E_{50} = 95,221.62 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{25} = 169,007.80 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 227,669.20 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ stress 1 ที่ C.G. เป็น 50% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{1c.g} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ stress 2 ที่ C.G. เป็น 25% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{2c.g} = 60 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{จะได้ } \sigma_2 = 90 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{120 * kd}{(kd - x) + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd})}{(2 - \frac{x}{kd})} * x\right)}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{50}}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 * (kd - x)}{kd}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_1 * (26 - kd)}{kd}$$

$$\sigma_s = \varepsilon_s * 2.04 * 10^{-6}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 * (kd - x)}{kd}$$

$$C1 = 15 * \left(\frac{1}{2} * (\sigma_1 + \sigma_2) * x\right)$$

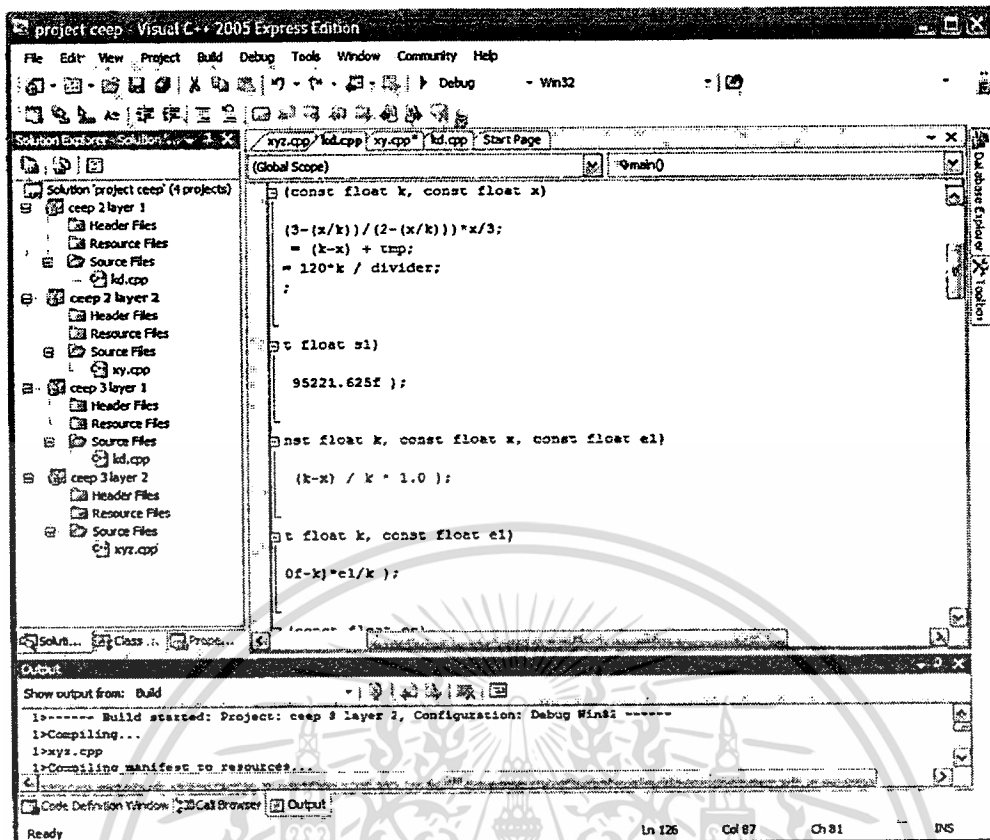
$$C1 = 15 * \left(\frac{1}{2} * (kd - x) * \sigma_2\right)$$

$$C1 + C2 = T$$

$$T = \sigma_s * 6.28$$

$$M = (c1 * (26 - x + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd})}{(2 - \frac{x}{kd})} * x\right))) + (c2 * (26 - kd + \left(\frac{2}{3} * (kd - x)\right)))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.47 ภาพ โปรแกรมการหาค่าระยะ Neutral Axis ในคาน 3 ชั้น

```

#include< iostream >
using namespace std;
#define STRESS_1C 120
#define STRESS_2C 60
#define STRESS2 90
bool checkK(const float k)
{
    if( (k < 12.0) || (k >= 26.0) )
        return false;
    return true;
}
float findStress1(const float k, const float x)
{
    float tmp = ((3-(x/k))/(2-(x/k)))*x/3;
    float divider = (k-x) + tmp;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float stress = 120*k / divider;

return stress;
}

float findE1(const float s1)
{
    return ( s1 / 95221.625f);
}

/*float findE2(const float k, const float x, const float e1)
{
    return ( e1 * (k-x) / k * 1.0 );
}*/

float findES(const float k, const float e1)
{
    return ( (26.0f-k)*e1/K);
}

float findStressS(const float es)
{
    return ( es * 2040000.0f);
}

float findStress12(const float k, const float x, const float s1)
{
    return ( s1 / k * (k-x) * 1.0f);
}

float findC1(const float s1, const float s12, const float x)
{
    return ( 7.5f * x * (s1 + s12) );
}

float findC2(const float k, const float x)
{
    return ( 90 * 7.5f * (k - x) );
}

float findT(const float ss)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    return ( ss * 6.28f);
}

float findM(const float c1, const float c2, const float s1, const float s12, const float k, const float
x)
{
    return (c1*((26-x)+(1/3.0f*((2*s1)+s12)/(s1+s12)*x)))+(c2*(26-x-(1/3.0f*(k-
x))));
}

float abs(float x)
{
    if( x < 0.0f)
        return -x;
    return x;
}

void print(int& count, float k, float x)
{
    cout << endl;
    cout << ++count << ". --> ";
    cout << "k = " << k << ", ";
    cout << "x = " << x << endl;
    cout << "-----" << endl;
}

int main()
{
    float k = 12.0f;
    float x = 1.0f;
    float s1, s12, ss, es, e1;
    float c, c1, c2, t, m;
    static int count = 0;
    bool flag = false;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cout << "Starting...." << endl;
do {
s1 = findStress1(k, x);
//cout << "s1 = " << s1 << endl;
s12 = findStress12(k, x, s1);
//cout << "s12 = " << s12 << endl;
c1 = findC1(s1, s12, x);
c2 = findC2(k, x);
c = c1 + c2;
//cout << "c = " << c << endl;
e1 = findE1(s1);
//cout << "e1 = " << e1 << endl;
es = findES(k, e1);
//cout << "es = " << es << endl;
ss = findStressS(es);
//cout << "ss = " << ss << endl;
t = findT(ss);
//cout << "t = " << t << endl;
m = findM(c1, c2, s1, s12, k, x);
//cout << "m = " << m << endl;
if( (abs(t - c) <= 100.0f) && (ss <= 2400.0f) && (m <= 310000.0f) && (x >=
5.0f) )
{
    print( count, k, x);
}
x += 0.01f;
if( x >= k )
{
    k += 0.01f;
    x = 1.0f;
}
} while( checkK(k) );

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
cout << "\n\nK and X is over the max/min" << endl;  
return 0;  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างค่าที่ได้เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ ข.65 แสดงการหาค่า Neutral Axis ของแกน 3 ชั้น

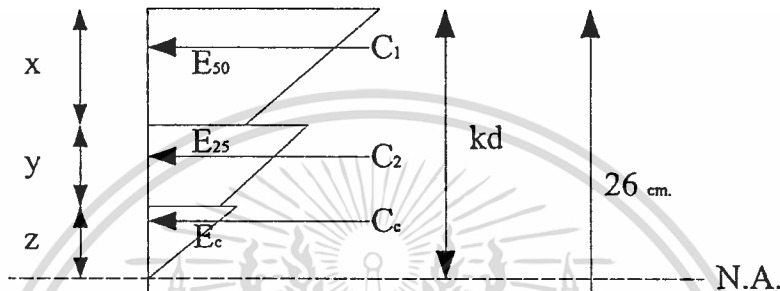
Kd	14.46000	OK	>11.86
x	4.65000		
σ1 CG	120.00000		
σ2 CG	60.00000		
σ1	141.26283		
σ2	90.00000		
E50	95221.62520		
€1	0.00148		
€2	0.00101		
€s	0.00118		
σs	2415.23840	ควรได้	2000
E25	169007.80000		
σ2	170.09823		
σ12	95.83599		
c1	8268.82139		
c2	6621.75000		
C	14890.57139	C-T	
T	15167.69716	-277.13	
M	316713.38884	ควรได้	239641

Kd	14.46000	>11.86
x	4.66000	
σ1 CG	120.00000	
σ2 CG	60.00000	
σ1	141.31229	
σ2	90.00000	
E50	95221.62520	
€1	0.00148	
€2	0.00101	
€s	0.00118	
σs	2416.08403	ควรได้
E25	169007.80000	
σ2	169.98433	
σ12	95.77182	
c1	8286.08958	
c2	6615.00000	
C	14901.08958	C-T
T	15173.00768	-271.92
M	316923.01370	ควรได้
		239641

Kd	14.55000	>11.86
x	4.60000	
σ1 CG	120.00000	
σ2 CG	60.00000	
σ1	140.87524	
σ2	90.00000	
E50	95221.62520	
€1	0.00148	
€2	0.00101	
€s	0.00116	
σs	2375.04436	ควรได้
E25	169007.80000	
σ2	170.98811	
σ12	96.33736	
c1	8183.83455	
c2	6716.25000	
C	14900.08455	C-T
T	14915.27859	-15.19
M	316587.09307	ควรได้
		239641

การใช้โปรแกรม Visual C++ เพื่อหาค่าระยะ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  คึงภาพ จากค่า  $kd$  ที่ได้คำนวณจากโปรแกรมข้างบน ในกรณีที่คานเกิดการคืบแล้วที่ 1 ปี ซึ่งได้แบ่งคานออกเป็นสามชั้น โดยค่า Elastic Modulus ต่างกัน

การหาระยะ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  จะแบ่งคานออกเป็นชั้นๆ ทีละ 1 ซม. เพื่อนำไปออกแบบระยะโค้งแต่ละชั้นของคาน



รูปที่ ข.48 ภาพการสมมูลของโมเมนต์ในคาน 3 ชั้น

ทำการหาค่าระยะ  $xyz$

$$\text{จาก } E_{s0} = 95,221.62 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{25} = 169,007.80 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 227,669.20 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ stress 1 ที่ C.G. เป็น 50% ของ  $fc'$  ดังนั้น

$$\sigma_{1c.g} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ stress 2 ที่ C.G. เป็น 25% ของ  $fc'$  ดังนั้น

$$\sigma_{2c.g} = 60 \text{ kg/cm}^2$$

ให้  $\sigma_c = 24 \text{ kg/cm}^2$  (ใช้ 10 % ของ strength เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการคืบน้อยมาก)

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{cc.g} = 16 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{120 * kd}{(kd - x) + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd})}{(2 - \frac{x}{kd})} * x\right)}$$

$$\sigma_1 = \frac{60 * (kd - x)}{(kd - x - y) + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd-x})}{(2 - \frac{x}{kd-x})} * y\right)}$$

$$C1 = 15 * \left(\frac{1}{2} * (\sigma_1 + (\sigma_1 - \frac{(\sigma_1 * x)}{kd})) * x\right)$$

$$C1 = 15 * \left(\frac{1}{2} * (\sigma_1 + (\sigma_1 - \frac{(\sigma_1 * x)}{kd})) * x\right)$$

$$Cc = \frac{1}{2} * 24 * 15 * (kd - x - y)$$

$$M = (c1 * (26 - x + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd})}{(2 - \frac{x}{kd})} * x\right)))$$

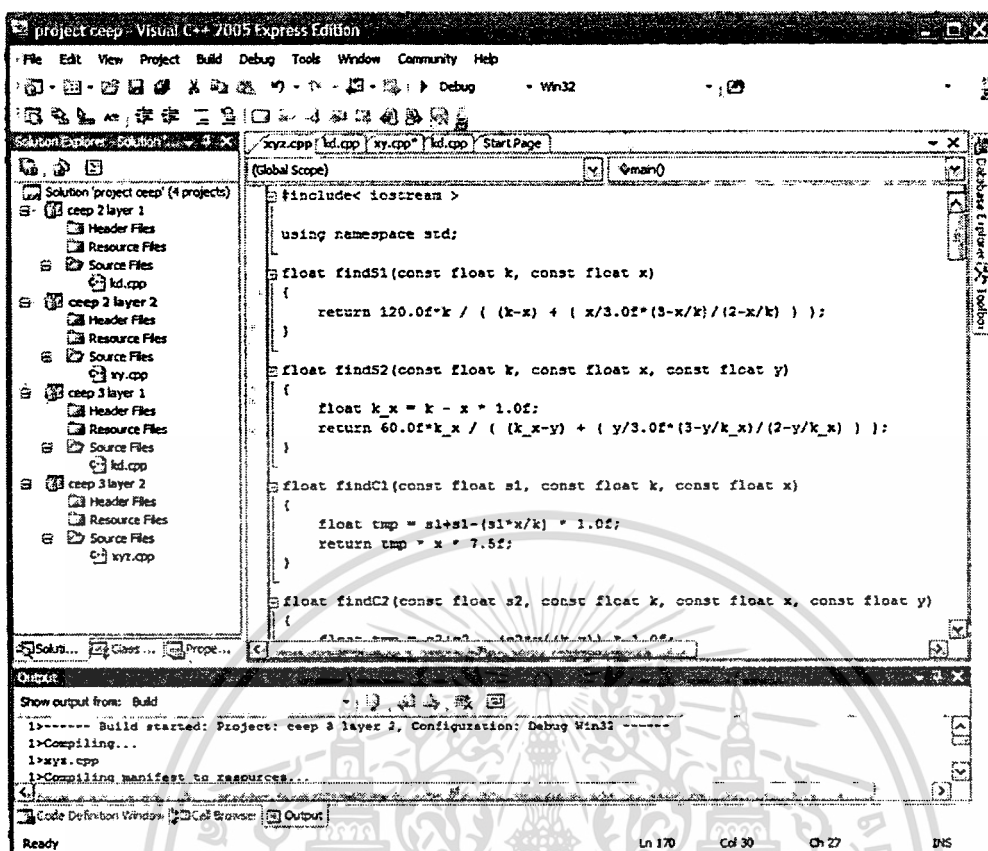
$$+ (C2 * (26 - x - y + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{y}{(kd-x)})}{(2 - \frac{y}{(kd-x)})} * y\right)))$$

$$+ (Cc * (26 - kd + \left(\frac{2}{3} * (kd - x - y)\right)))$$

$$C1 + C2 + Cc = T$$

$$T = \left(\frac{S1}{95,221.62}\right) * \left(\frac{(26 - kd)}{kd}\right) * 2,040,000 * 6.28$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.49 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ 3 ชั้น ในคาน

```

#include< iostream >
using namespace std;
float findS1(const float k, const float x)
{
    return 120.0f*k / ((k-x) + ( x/3.0f*(3-x/k)/(2-x/k) ));
}
float findS2(const float k, const float x, const float y)
{
    float k_x = k - x * 1.0f;
    return 60.0f*k_x / ((k_x-y) + ( y/3.0f*(3-y/k_x)/(2-y/k_x) ));
}
float findC1(const float s1, const float k, const float x)
{
    float tmp = s1+s1-(s1*x/k) * 1.0f;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    return tmp * x * 7.5f;
}
float findC2(const float s2, const float k, const float x, const float y)
{
    float tmp = s2+s2 - (s2*y/(k-x)) * 1.0f;
    return tmp * y * 7.5f;
}
float findCc(const float k, const float x, const float y)
{
    return 12.0f * 15.0f * (k-x-y);
}
float findM(const float k, const float x, const float y, const float c1, const float c2, const float cc)
{
    float group1 = c1 * ( 26.0f-x+( x/3.0f*(3.0f-x/k)/(2.0f-x/k) ) ) * 1.0f;
    float ykx = y / ( k - x ) * 1.0f;
    float group2 = c2 * ( 26.0f-x-y+( y/3.0f*(3.0f-ykx)/(2.0f-ykx) ) ) * 1.0f;
    float group3 = cc * ( 26.0f-k+( 2/3.0f*( k-x-y ) ) ) * 1.0f;
    return (group1 + group2 + group3 ) * 1.0f;
}
float findT(const float k, const float s1)
{
    return (s1/95221.6252f) * ( (26.0f-k)/k ) * 2040000.0f * 6.28f;
}
float findZ(const float k, const float x, const float y)
{
    return k - x - y * 1.0f;
}
float abs(float x)
{
    if( x < 0.0f )
        return -x;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    return x;
}

void print(int& count, float m, float x, float y)
{
    cout << endl;
    cout << ++count << ". --> ";
    cout << "m = " << m << ", x = " << x << ", y = " << y << endl;
    cout << "-----" << endl;
}

void testFormula()
{
    float k = 14.0f;
    float x = 5.0f;
    float y = 4.0f;
    float z = 5.0f;
    float s1 = findS1( k, x );
    float s2 = findS2( k, x, y );

    float c1 = findC1( s1, k, x );
    float c2 = findC2( s2, k, x, y );
    float cc = findCc( k, x, y );
    float m = findM( k, x, y, c1, c2, cc );

    cout << "k = " << k << endl;
    cout << "x = " << x << endl;
    cout << "y = " << y << endl;
    cout << "z = " << z << endl;
    cout << "m = " << m << endl;
    cout << "s1 = " << s1 << endl;
    cout << "s2 = " << s2 << endl;
    cout << "c1 = " << c1 << endl;
    cout << "c2 = " << c2 << endl;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cout << "Cc = " << cc << endl;
}
int main()
{
    //testFormula();
    float k = 14.46f;
    float x = 0.01f;
    float y = 0.01f;
    float z;
    float s1, s2, c, c1, c2, cc;
    float m, t;
    float xyz;
    static int count = 0;
    float setM[100];
    for( int i = 99; i >= 0; i-- )
    {
        setM[i] = i/100.0f * 305913.4f;
        //printf("%d, %.5f\n", i, setM[i]);
    }
    cout << "Starting...." << endl;
    for( int i = 99; i >= 0; i-- )
    {
        printf("i = %d, setM = %.3f\n", i, setM[i]);
        x = 0.01f;
        while( x <= k )
        {
            y = 0.01f;
            while( y <= k )
            {
                s1 = findS1( k, x );
                s2 = findS2( k, x, y );

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c1 = findC1( s1, k, x );
c2 = findC2( s2, k, x, y );
cc = findCc( k, x, y );
c = c1 + c2 + cc;
m = findM( k, x, y, c1, c2, cc );
z = findZ( k, x, y );
xyz = x + y + z*1.0f;
t = findT( k, s1 );
if( ( abs( xyz - k ) <= 0.0f )
    && ( abs( c - t ) <= 500.0f )
    && ( abs( m - setM[i] ) <= 1000.0f ) )
{
    print( count, m, x, y );
    y += 0.01f;
}
x += 0.01f;
}
cout << endl;
}
cout << "End..." << endl;
return 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้

$$P = 3167.134 - 108 = 3059.134$$

ตารางที่ ข.๑๖ แสดงการหาค่า ระยะ 3 จุดที่ไม่டுத்தัดหุยมุมต่างกัน

ระยะ (m.)	0.99	0.95	0.90	0.85	0.80
M ดิ่งการ	302854.27	290617.73	275322.06	260026.39	244730.72
Kd	14.4600	14.4600	14.4600	14.4600	14.4600
X	4.0100	3.4400	2.7800	2.1400	1.5400
Y	9.5500	10.0900	10.7100	11.2500	11.7800
Z	0.9000	0.9300	0.9700	1.0700	1.1400
X+Y	13.5600	13.5300	13.4900	13.3900	13.3200
	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$
M	303474.32	290877.62	275808.14	260669.12	246107.37
$\sigma_1$ CG	120.0000	120.0000	120.0000	120.0000	120.0000
$\sigma_2$ CG	60.0000	60.0000	60.0000	60.0000	60.0000
$\sigma_1$	138.1244	135.3784	132.2634	129.3140	126.6159
$\sigma_2$	89.3895	89.4128	89.4305	89.3797	89.3607
$\sigma_C$	24.0000	27.0000	32.0000	37.0000	42.0000
C1	7156.1839	6154.6064	4985.2051	3843.8182	2769.0800
C2	6953.9393	7337.3332	7780.0800	8196.3870	8591.6365
CC	162.0000	167.4000	174.6000	192.6000	205.2000
CS	2361.5792	2314.6298	2261.3708	2210.9434	2164.8133
$\sigma_{12}$	99.8202	103.1722	106.8352	110.1762	113.1312
$\sigma_{2C}$	7.6986	7.5457	7.4270	7.7627	7.8848
C	14272.1232	13659.3396	12939.8851	12232.8052	11565.9165
T	14830.7174	14535.8752	14201.4084	13884.7243	13595.0278
	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$
M	-620.05	-259.89	-486.08	-642.73	-1376.65
$\sigma_1$ CG					
$\sigma_2$ CG					
$\sigma_1$					
$\sigma_2$					
$\sigma_C$					
C1					
C2					
CC					
CS					
$\sigma_{12}$					
$\sigma_{2C}$					
C	-558.5943	-876.5356	-1261.5233	-1651.9191	-2029.1113
T					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

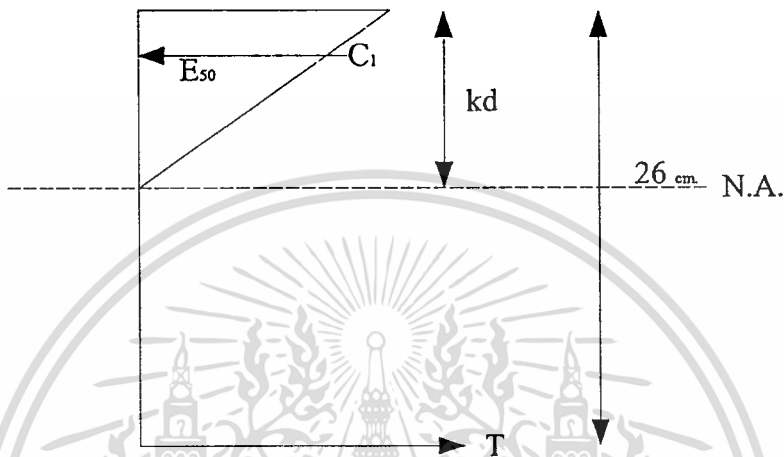
ตารางที่ ข.66 แสดงการหาค่า ระยะ 3 ชั้นที่โมดูลิตีต่างกัน (ต่อ)

ระยะ (ม.)	0.75	0.70	0.65	0.60
M ดองการ	229435.05	214139.38	198843.71	183548.04
Kd	14.4600	14.4600	14.4600	14.4600
X	0.9200	0.3300	0.0100	0.0000
Y	12.2400	12.7800	11.1900	9.2200
Z	1.3000	1.3500	3.2600	5.2400
X+Y	13.1600	13.1100	11.2000	9.2200
		$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$
M	230555.25	215553.83	200263.31	185157.65
$\sigma 1$ CG	120.0000	120.0000	120.0000	120.0000
$\sigma 2$ CG	60.0000	60.0000	60.0000	60.0000
$\sigma 1$	123.8983	121.3797	120.0415	120.0000
$\sigma 2$	89.2493	89.2563	86.4114	82.0876
$\sigma c$	47.0000	52.0000	57.0000	62.0000
c1	1655.4043	593.9736	18.0000	0.0000
c2	8979.7235	9372.5945	8888.1897	7733.3543
cc	234.0000	243.0000	586.8000	943.2000
$\sigma s$	2118.3482	2075.2871	2052.4072	2051.6975
$\sigma 12$	116.0154	118.6096	119.9585	120.0000
$\sigma 2c$	8.5690	8.5277	19.4949	29.7468
C	10869.1278	10209.5681	9492.9897	8676.5543
		$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$
T	13303.2264	13032.8030	12889.1169	12884.6606

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาระยะ 2 layer

การใช้โปรแกรม Visual C++ เพื่อหาค่าระยะ kd ดังภาพ ในกรณีที่คานเกิดการคืบแล้วที่ 1 ปี ซึ่งได้แบ่งคานออกเป็นสองชั้น โดยค่า Elastic Modulus ต่างกัน



รูปที่ ข.50 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 2 ชั้น

ทำการหาค่า kd

$$\text{จาก } E_{s0} = 95,221.62 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{25} = 169,007.80 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 227,669.20 \text{ kg/cm}^2$$

ให้ stress 1 ที่ C.G. เป็น 50% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$$\sigma_{1c.g} = 120 \text{ kg/cm}^2, \sigma_1 = 180 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{50}}$$

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_1 * (26 - kd)}{k}$$

$$\sigma_s = \epsilon_s * 2.04 * 10^6$$

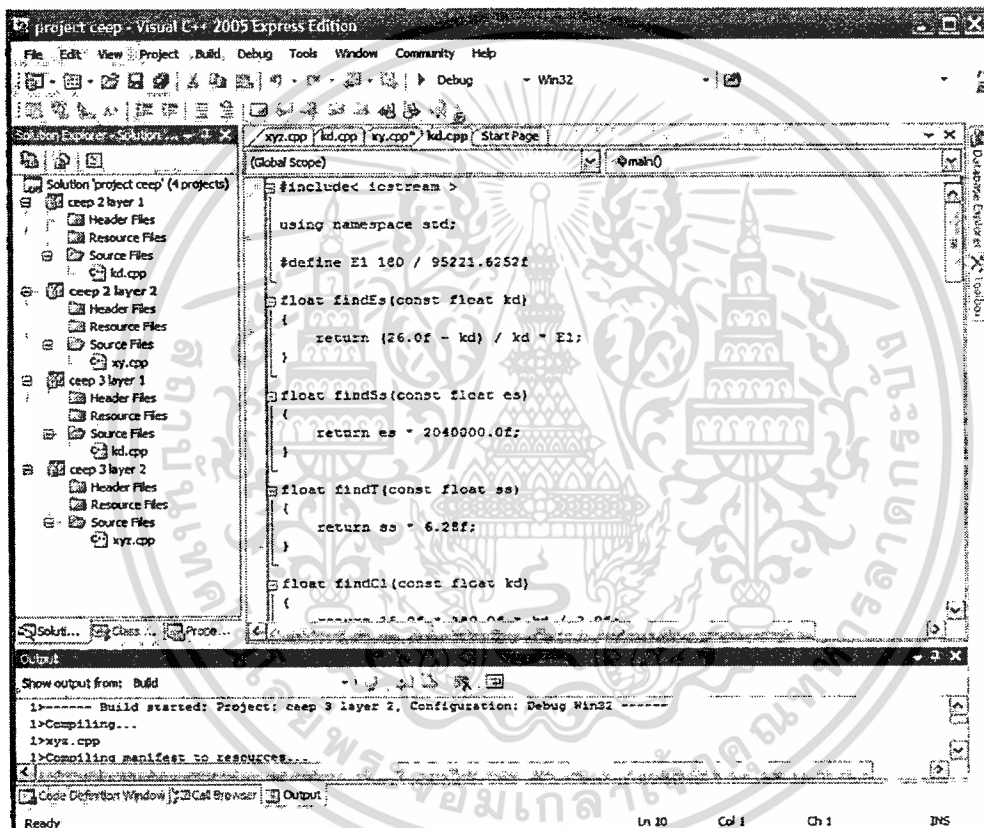
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C1 = 15 * \left(\frac{1}{2} * \sigma1 * x\right)$$

$$C1 = T$$

$$T = \sigma s * 6.28$$

$$M = \left(C1 * \left(26 - \frac{kd}{3}\right)\right)$$



รูปที่ ข.51 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ Neutral Axis ในคาน 2 ชั้น

```
#include< iostream >
```

```
using namespace std;
```

```
#define E1 180 / 95221.6252f
```

```
float findEs(const float kd)
```

```
{
```

```
    return (26.0f - kd) / kd * E1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
float findSs(const float es)
{
    return es * 2040000.0f;
}
float findT(const float ss)
{
    return ss * 6.28f;
}
float findC1(const float kd)
{
    return 15.0f * 180.0f * kd / 2.0f;
}
float findM(const float c1, const float kd)
{
    return c1 * (26.0f - kd / 3.0f);
}
float abs(float x)
{
    if (x < 0.0f)
        return -x;
    return x;
}
void print( float k)
{
    cout << endl;
    cout << "k = " << k << endl;
    cout << "-----" << endl;
}
void testFormula(const float kd)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float c1 = findC1( kd );
float es = findEs( kd );
float ss = findSs( es );
cout << "kd = " << kd << endl;
cout << "e1 = " << E1 << endl;
cout << "es = " << es << endl;
cout << "c1 = " << c1 << endl;
cout << "ss = " << ss << endl;
cout << "t = " << findT( ss ) << endl;
cout << "m = " << findM( c1, kd ) << endl;
}
int main()
{
//testFormula( 14.0f);
float kd = 0.01f;
float es, ss, c1, t, m;
cout << "Starting...." << endl;
do {
es = findEs( kd );
ss = findSs( es );
c1 = findC1( kd );
t = findT( ss );
m = findM(c1, kd);
if( (abs( t - c1 ) <= 1500.0f) && (ss <= 2410.0f) && (m <= 300000.0f) )
{
print( kd );
}
kd += 0.01f;
} while( kd < 26.0f);
cout << "\n\nK is over the max/min" << endl;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
return 0;
}
```

ค่าที่ได้คือ

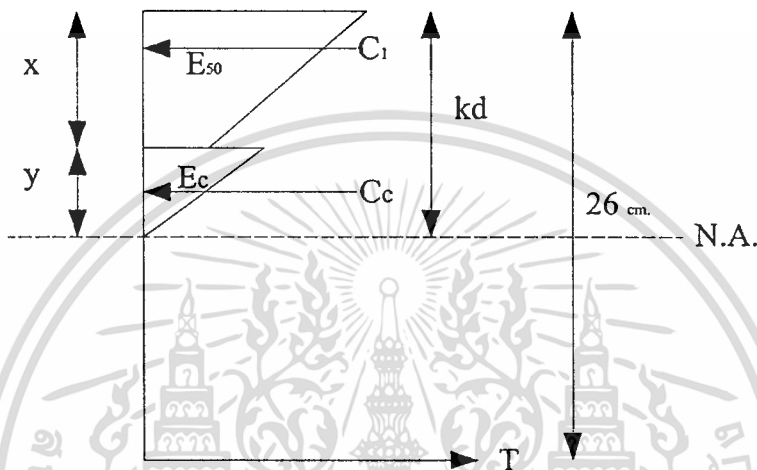
ตารางที่ ข.76 แสดงการหาค่า Neutral Axis ของคาน 2 ชั้น

Kd	13.85		
$\sigma_1$ CG	120		
$\sigma_1$	180		
E25	169007		
$\epsilon_1$	0.001065045		
$\epsilon_s$	0.000934317		
$\sigma_s$	1906.006969	ควรได้	2000
		C-T	
c1	18697.5	6727.776	
T	11969.72377	$\Delta M$	ควรได้
M	399814.875	160174	239641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรม Visual C++ เพื่อหาค่าระยะ x, y ดังภาพ จากค่า kd ที่ได้คำนวณจาก โปรแกรมข้างบน ในกรณีที่คานเกิดการคืบแล้วที่ 1 ปี ซึ่งได้แบ่งคานออกเป็นสองชั้น โดยค่า Elastic Modulus ต่างกัน

การหาระยะ x, y, z จะแบ่งคานออกเป็นชั้นๆ ทีละ 1 ซม. เพื่อนำไปออกแบบระยะโค้งแต่ละชั้นของคาน



รูปที่ ข.52 ภาพการสมดุลของโมเมนต์ในคาน 2 ชั้น

ทำการหาค่าระยะ x, y, z

จาก  $E_{s0} = 95,221.62 \text{ kg/cm}^2$

$E_{25} = 169,007.80 \text{ kg/cm}^2$

$E_c = 227,669.20 \text{ kg/cm}^2$

ให้ stress 1 ที่ C.G. เป็น 50% ของ  $f_c'$  ดังนั้น

$\sigma_{1c.g} = 120 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_c = 24 \text{ kg/cm}^2$  (ใช้ 10 % ของ strength เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการคืบน้อยมาก)

ดังนั้น

$\sigma_{cc.g} = 16 \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma_1 = \frac{120 * kd}{(kd - x) + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd})}{(2 - \frac{x}{kd})} * x\right)}$$

$$\sigma_{1c} = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 * x}{kd}$$

$$C_1 = 15 * \left(\frac{1}{2} * (\sigma_1 + \sigma_{1c}) * x\right)$$

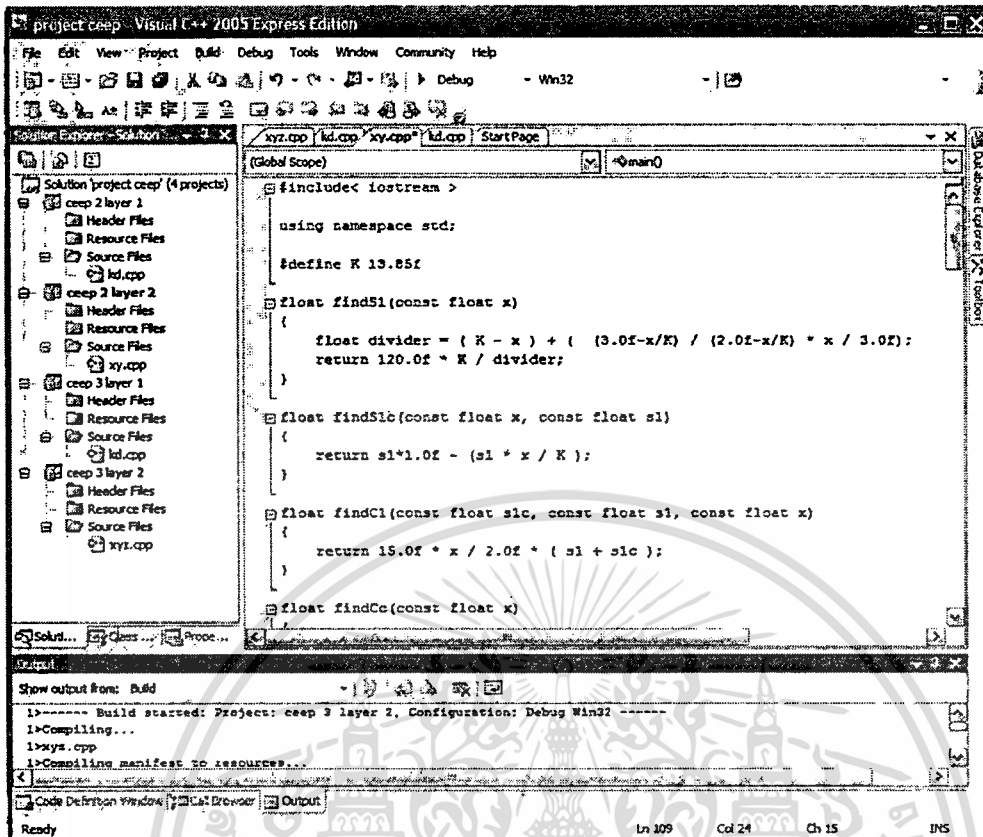
$$C_c = \frac{1}{2} * 24 * 15 * (kd - x)$$

$$C_1 + C_2 = T$$

$$T = \left(\frac{S_1}{95,221.62}\right) * \left(\frac{(26 - kd)}{kd}\right) * 2,040,000 * 6.28$$

$$M = \left(C_1 * \left(26 - x + \left(\frac{1}{3} * \frac{(3 - \frac{x}{kd})}{(2 - \frac{x}{kd})} * x\right)\right)\right) + \left(C_c * \left(26 - x - \left(\frac{(kd - x)}{3}\right)\right)\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.53 ภาพโปรแกรมการหาค่าระยะ 2 ชั้น ในคาน

```
#include< iostream >
using namespace std;
#define K 13.85f
float findS1(const float x)
{
    float divider = ( K - x ) + ( (3.0f-x/K) / (2.0f-x/K) * x / 3.0f);
    return 120.0f * K / divider;
}
float findS1c(const float x, const float s1)
{
    return s1*1.0f - (s1 * x / K);
}
float findC1(const float s1c, const float s1, const float x)
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    return 15.0f * x / 2.0f * ( s1 + s1c );
}
float findCc(const float x)
{
    return 12.0f * 15.0f * (K-x);
}
float findSs(const float s1)
{
    return ( s1 / 95221.6252f ) * ((26.0f-K)/K) * 2040000.0f;
}
float findT(const float ss)
{
    return ss * 6.28f;
}
float findM(const float c1, const float cc, const float x, const float s1, const float s1c)
{
    float exp1 = ( c1 * (26.0f-x+ ( (2.0f*s1 + s1c)/(s1 + s1c) * x / 3.0f ) ) );
    float exp2 = ( cc * ( 26.0f - x - (( K - x)/3.0f ) ) );
    return exp1 + exp2;
}
float abs(float x)
{
    if( x < 0.0f )
        return -x;
    return x;
}
void print( float x )
{
    cout << endl;
    cout << "x = " << x << endl;
    cout << "-----" << endl;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
void testFormula(const float x)
{
    float s1 = findS1( x );
    float s1c = findS1c( x, s1 );
    float c1 = findC1( s1c, s1, x );
    float cc = findCc( x );
    float ss = findSs( s1 );
    float t = findT( ss );
    float m = findM( c1, cc, x, s1, s1c );
    cout << "k = " << K << endl;
    cout << "x = " << x << endl;
    cout << "s1 = " << s1 << endl;
    cout << "s1c = " << s1c << endl;
    cout << "c1 = " << c1 << endl;
    cout << "cc = " << cc << endl;
    cout << "ss = " << ss << endl;
    cout << "t = " << t << endl;
    cout << "m = " << m << endl;
}
int main()
{

```

```

//testFormula( 5.0f );
float x = 0.01f;
float s1, s1c, c1, cc, ss, t, m;
float c;
cout << "Starting...." << endl;
do {
    s1 = findS1( x );
    s1c = findS1c( x, s1 );
    c1 = findC1( s1c, s1, x );

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cc = findCc( x );
ss = findSs( s1 );
t = findT( ss );
m = findM( c1, cc, x, s1, s1c );
c = c1 + cc;
//if( (abs( t - c ) <= 10000.0f) && (ss <= 34800.0f) && (m <= 10000.0f) )
if( (abs( t - c ) <= 30000.0f) && (ss <= 3000.0f) && (m <= 39000.0f) )
{
    cout << "ss = " << ss << endl;
    cout << "m = " << m;
    print( x );
}
x += 0.01f;
} while( x < K );
cout << "\n\nx is over the max/min" << endl;
return 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







ตารางที่ ข.68 แสดงการหาค่า ระยะ 2 ชั้นที่ไม่ดุลตัดหุ้มต่างกัน (ต่อ)

ระยะ (ม.)	0.25	0.20	0.15	0.14
M ดองการ	97253.72	77802.98	58352.23	54462.09
Kd	13.8500	13.8500	13.8500	13.8500
X	1.0900	0.6000	0.1200	0.0300
Y	12.7600	13.2500	13.7300	13.8200
	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$	$\Delta M$
M	97373.62	77799.11	58252.08	54546.62
$\sigma 1$ CG	120.0000	120.0000	120.0000	120.0000
$\sigma 1$	124.8456	122.6368	120.5214	120.1301
$\sigma c$	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000
C1	1960.9033	1079.8236	215.9986	54.0000
cc	2296.8000	2385.0000	2471.4000	2487.6000
os	2346.3586	2304.8457	2265.0881	2257.7340
$\sigma 1c$	115.0202	117.3240	119.4771	119.8698
C	4257.7033	-10477.4289	-11009.6072	-11537.3545
T	14735.1322	14474.4308	14224.7532	14178.5694

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ออมสิน คำริห์, สุวัฒน์ ติรเศรษฐ์. “การทำนายการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการคืบของคอนกรีต” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, พฤษภาคม 2553. หน้า 285



เอกสารประกอบการการประชุมวิชาการ

# วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15

PROCEEDINGS OF THE 15<sup>TH</sup> NATIONAL CONVENTION ON CIVIL ENGINEERING

## วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น

### CIVIL ENGINEERING WITH LOCAL DEVELOPMENT

12 – 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553

ศูนย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี

12 – 14 May 2010

Sunce Grand & Convention Center, UbonRatchathani



ร่วมจัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การทำนายการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการคืบของคอนกรีต  
**PREDICTING DEFLECTIONS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS  
 DUE TO CREEP OF CONCRETE**

อมสิน ดำริห์ (Omsin Damri)<sup>1</sup>

สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์ (Suwat Teeraset)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : damri\_ce@hotmail.com

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : kdsuwat@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ :** โครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยล้วนแล้วแต่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอาคารบางแห่งมีการใช้งานระยะเวลานานย่อมส่งผลกระทบต่อการใช้งานรับน้ำหนักของโครงสร้าง เนื่องมาจากการคืบของคอนกรีตและส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ลดลงตามมาด้วย การจะทราบถึงพฤติกรรมการลดลงของโมดูลัสยืดหยุ่นจะต้องใช้เวลานาน ในการศึกษานี้ได้หาวิธีการทดสอบให้น้อยลงโดยใช้คานคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาและคานคอนกรีตน้ำหนักเบา เนื่องจากคอนกรีตน้ำหนักเบามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดาที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน เมื่อทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ทฤษฎีการล้าประกอบกับวิธีการคำนวณการแอ่นตัวของคานคอนกรีต ที่ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงจะสามารถทำนายกำลังรับน้ำหนักและการแอ่นของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้

**ABSTRACT :** Building structure in Thailand mostly are reinforced concrete. When some buildings have been used for a long time, carrying load capacity of the buildings will be effected. This is because the creep of the concrete and results in the decreasing of the elastic modulus. It takes time to obtain the behavior of the elastic modulus reduction. In this study, to find an alternative method reducing the time of determination by applying normal weight concrete beam and lightweight concrete beam. Because lightweight concrete has lower elastic modulus than normal weight concrete but has been carried loads for period of time. When analyzing by the creep theory consist deflection calculation, to effect of change in elastic, the load capacity and deflection of reinforced concrete beam can be predicted.

**KEYWORDS :** Deflection, Creep, Deformation, Reinforced Concrete

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการใช้คอนกรีต และเหล็กเสริมที่มีกำลังสูง เช่น การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้น้ำหนักคานที่ได้รับการออกแบบมีความสึกน้อยลง และยังเป็นทางเลือกปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด แต่ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะยังไม่สมบูรณ์จนกว่าจะผ่านสองหลักเกณฑ์คือการตรวจสอบกำลัง และ

ความสามารถในการใช้งาน ที่ประกอบด้วยการตรงกำลังรับโมเมนต์ดัด แรงเฉือนรวมถึงกำลังรับโมเมนต์บิด ส่วนการตรวจสอบ ความสามารถในการใช้งานคือการแอ่นตัว การแตกร้าว การสันตะเทือนและอื่นๆ โดยส่วนมากการตรวจสอบความสามารถในการใช้งานมีความสำคัญที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของการแอ่นตัว เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องรับแรงปกติกระทำเป็นเวลานาน จากน้ำหนักบรรทุกคงที่



เช่น น้ำหนักคาน พื้น และผนัง หรือน้ำหนักบรรทุกจรถาวร คอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทิน ซึ่งรับหน่วยแรงอัดจะเกิดการคืบ และเกิดการหดตัวของไฟเบอร์ต่างๆซึ่งมีผลทำให้ความโค้งของชิ้นส่วนที่คานเพิ่มขึ้น และคานเกิดการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นจากการแอ่นตัวทันที เมื่อคานมีแรงปกติกระทำการแอ่นตัวทันที รวมกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการคืบในคอนกรีต เรียกว่า การแอ่นตัวระยะยาว ผลของการคืบทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ใช้ ออกแบบ ถึงแม้ว่าการคืบที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งานทั่วไป จะไม่ลดกำลังขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีผลต่อพฤติกรรม เนื่องจากการคืบขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นการแอ่นตัวสุดท้ายของคาน อาจจะมีมากกว่าการแอ่นตัวทันทีสองถึงสามเท่า ดังนั้นผู้ออกแบบจะต้องคำนึงการแอ่นตัวสุดท้ายนี้ไม่ว่าจะเป็นในคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตอัดแรง จะต้องตรวจว่าโครงสร้างยังคงใช้งานได้และการแอ่นตัวสุดท้ายต้องน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตต้องใช้เวลาคงระยะเวลาเท่าใดในงานวิจัยนี้ได้หาวิธีการทดสอบให้น้อยลง เพื่อศึกษาผลการคืบและการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น โดยใช้คอนกรีตน้ำหนักปกติ และคอนกรีต โฟมซีเมนต์ เนื่องจากคอนกรีต โฟมซีเมนต์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตน้ำหนักปกติที่ก้ำกึ่งอัดเท่ากัน โดยเทียบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตน้ำหนักปกติ ที่รับน้ำหนักกระทำมาเป็นเวลานาน ซึ่งได้จากการใช้ทฤษฎีการคืบและการวิเคราะห์แอ่นตัวของคอนกรีต เพื่อทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงและสามารถทำนายการแอ่นตัวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นได้

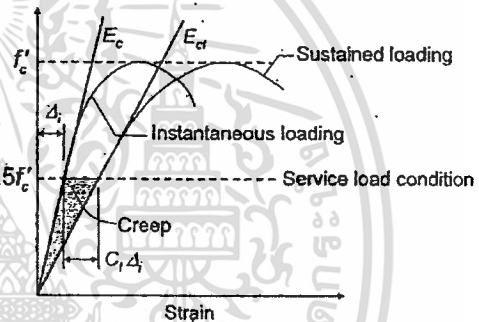
2. ทฤษฎีการวิเคราะห์

โดยส่วนใหญ่แล้วคอนกรีตในสภาพใช้งานอาจมีการเสีรูปลดลงตามกาลเวลา โดยมีสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1.) การเสีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load Dependent Deformation) ได้แก่ การคืบ (Creep) 2.) การเสีรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก (Load Independent Deformation) ได้แก่การหดตัว (Shrinkage) แต่ในบทความนี้พิจารณาการเสีรูปลดตามกาลเวลาเนื่องจากการคืบเท่านั้น

2.1 การคืบของคอนกรีต

การคืบของคอนกรีต คือ การเสีรูปร่างของคอนกรีตภายใต้ น้ำหนักหรือแรงกดที่บรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน โดยมีข้อ

ต้นนิยามว่าการคืบของคอนกรีตเกิดจากการหดตัวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต การไหลหนืดของซีเมนต์เพสต์ การไหลของผลึกในวัสดุผสม และการซึมของน้ำจากซีเมนต์เจล เมื่อมีน้ำหนักหรือแรงภายนอกกระทำต่อคอนกรีต การเสีรูปร่างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นทันที และการเสีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะเริ่มเกิดทันทีแต่ต่อเนื่องด้วยอัตราที่ลดลงตลอดเวลาที่คอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุก โดยการเสีรูปร่างทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 1.5 ถึง 4 เท่า ของการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นทันที อนึ่ง เมื่อน้ำหนักหรือแรงอัดที่กระทำซึ่งทำให้น้ำหนักแรงอัดในคอนกรีตมีค่าไม่เกิน  $0.5 f_c$  การคืบของคอนกรีตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ดังภาพที่ 1 การคืบของคอนกรีตจะลดลงเมื่อคอนกรีตใกล้ถึงคานทานแรงอัดสูงขึ้น



ภาพที่ 1 ผลการคืบต่อความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

การคืบแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1.) การคืบพื้นฐาน (Basic Creep) คืบการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นภายใต้กำลังอัดคงที่ ซึ่งปราศจากการสูญเสียความชื้น 2.) การคืบแห้ง (Drying Creep) ส่วนใหญ่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและขนาดของชิ้นส่วน

ปัจจัยที่มีผลต่อการคืบของคอนกรีต, ขนาดของแรง, อายุและกำลังของคอนกรีตเมื่อได้รับแรง, ระยะเวลาที่คอนกรีตรับแรง ซึ่งการคืบยังมีผลมาจากปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของคอนกรีตและสภาวะที่ได้รับ เช่น ประเภทปริมาณและขนาดใหญ่อุณหภูมิของมวลรวม, ชนิดของซีเมนต์, ปริมาณซีเมนต์เพสต์, ขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนคอนกรีต, อัตราส่วนปริมาตรก่อพื้นผิว



ของชิ้นส่วนของคอนกรีต, ปริมาณเหล็กเสริม, สภาพการบ่ม, อุณหภูมิและความชื้น

2.2 การทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคืบของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต  $E_c$  เป็นตัวบ่งบอกหรือแสดงถึงความต้านทานการเสียรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อนำหนักหรือแรงกดอัดกระทำ พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เวลาต่างๆ จะใช้สมการซึ่งเป็นสมการอ้างอิงที่ได้จากมาตรฐาน ACI 209R-82

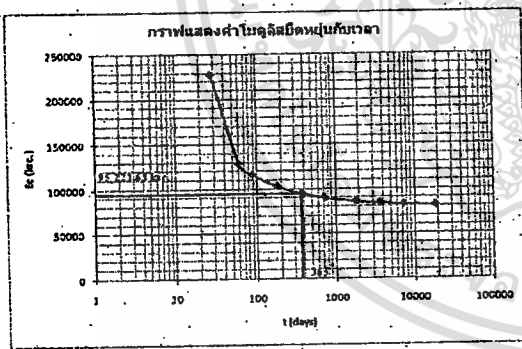
$$E_{ce}(t) = \frac{E_{ci}}{1 + \Phi(t)} \quad (1)$$

$E_{ce}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ณ เวลา  $t$

$E_{ci}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำปกติใช้ที่การบ่ม 28 วัน

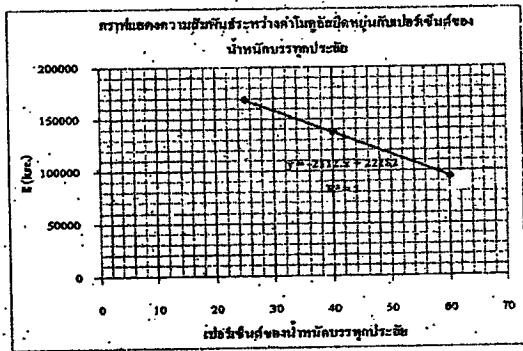
$\Phi(t)$  = สัมประสิทธิ์การคืบ

ในการที่จะทำนายกำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเวลาผ่านไปนั้น จะใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่เปลี่ยนของคอนกรีตทรงกระบอกหน่วยแรงอัด 240 ksc ที่คำนวณได้จากสมการ (1) มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลา



ภาพที่ 2 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตกับเวลา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกค้างที่ 40% และ 60% ของน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักบรรทุกประลัย



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัย

จากกราฟจะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่รับน้ำหนักบรรทุก 25 % ( $E_{c1}$ ) และ 50% ( $E_{c2}$ ) ของน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 169,007.8 ksc. และ 95,221.63 ksc. ตามลำดับ และจากการทดสอบแท่งคอนกรีตโพมที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ จะได้ค่าหน่วยน้ำหนักของโพมซีเมนต์เท่ากับ 1950 kg/m<sup>3</sup> และ 1850 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ

2.3 การแอนตัวทันที

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ศ.ท ให้พิจารณาหาการแอนตัวทันทีที่มากที่สุดโดยใช้ทฤษฎีอิลาสติก ของการวิเคราะห์โครงสร้าง สำหรับส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานดังนี้

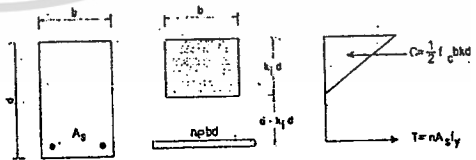
$$\Delta_i = K \frac{M_a L^2}{E_c I_c} \quad (2)$$

$K$  = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำหนักที่กระทำสภาพของจุดรองรับ

$M_a$  = โมเมนต์ค้ดสูงสุดที่กระทำ

$L$  = ความยาวช่วง

$E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



ภาพที่ 4 การคำนวณค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของหน้าตัด



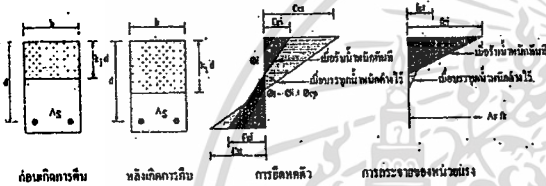
$I_c$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียประสิทธิผลของรูปตัด  
 $= (M_u / M_u')^3 I_u + [1 - (M_u / M_u')]^3 I_c' \leq I_u$

$M_u$  = โมเมนต์คดแตกร้าว =  $f_t I_u / y_t$   
 (ค่าโมดูลัสแตกร้าว  $f_t = 2.0 \sqrt{f_c}$  กก./ซม.<sup>2</sup>)

$I_u$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดทั้งหมด  
 $I_c'$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงร้าว  
 $= b(kd)^3 / 3 + nA_s(d - kd)^2$

ถ้าสำหรับส่วนโครงสร้าง คสล. รูปตัดสี่เหลี่ยมคี่น้้าเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว  
 $k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n$  (3)

2.4 การแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา



ภาพที่ 5 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนและหลังเกิดการคืบ

การแจกแจงของความเครียดและหน่วยแรงอัดในหน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยมคี่น้้าเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว เนื่องจากโมเมนต์คดมีค่าคงที่ การคืบทำให้เกิดการเปลี่ยนของการแจกแจงความเครียดและหน่วยแรงอัดในหน้าตัด กล่าวคือแกนสะเทินเลื่อนต่ำลง ความโค้ง  $\Phi$ , มีค่ามากกว่า  $\Phi_0$  และหน่วยแรงอัดที่ผิวบนลดลงจาก  $f_{c0}$  เป็น  $f_{cu}$

การพิจารณาการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลาเนื่องจากการคืบของคอนกรีตในทางปฏิบัติ มาตราฐาน ACI หรือ ว.ศ.ท. ให้พิจารณาจากการคูณการแอ่นตัวทันทีที่เกิดจากคานน้ำหนักบรรทุกค้ำ ( $\Delta_{i,cur}$ ) ด้วยตัวประกอบเนื่องจากการคืบ (creep factor :  $\lambda$ )

ระยะโค้งที่เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา  $\Delta_o = \lambda \Delta_{i,cur}$  (4)

ตัวคูณประกอบเนื่องจากการคืบ  $\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'}$   
 $\rho'$  = อัตราส่วน  $A_s / bd$  โดยให้พิจารณาที่กึ่งกลางคานสำหรับคานช่วงเดียวหรือ คานต่อเนื่อง และที่ฐานรองรับสำหรับคานยื่น  
 $\xi$  = ตัวประกอบตามกาลเวลาที่ขึ้นน้ำหนักบรรทุกค้ำ มีค่าดังนี้  
 เมื่อบรรทุกค้ำนาน 5 ปี หรือมากกว่า  $\xi = 2.0$

เมื่อบรรทุกค้ำนาน 1 ปี หรือมากกว่า  $\xi = 1.4$   
 เมื่อบรรทุกค้ำนาน 6 เดือน หรือมากกว่า  $\xi = 1.2$   
 เมื่อบรรทุกค้ำนาน 3 เดือนหรือมากกว่า  $\xi = 1.0$   
 ดังนั้นระยะโค้งตัวทั้งหมด  $\Delta_i = \Delta_i + \Delta_o$  (5)

3. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้ทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) คือการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก ตามมาตรฐาน มอก. 409-2525 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย ตามมาตรฐาน มอก. 20-2543 และมอก. 24-2536 ตามลำดับ

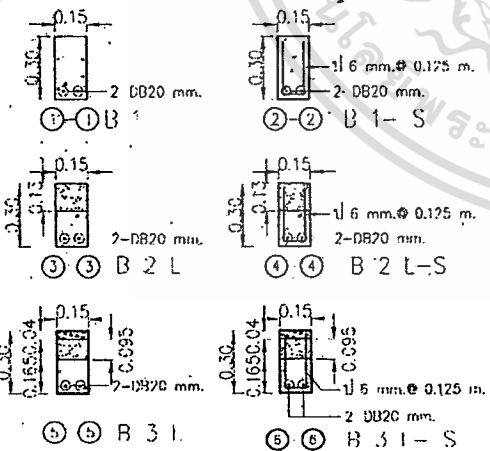
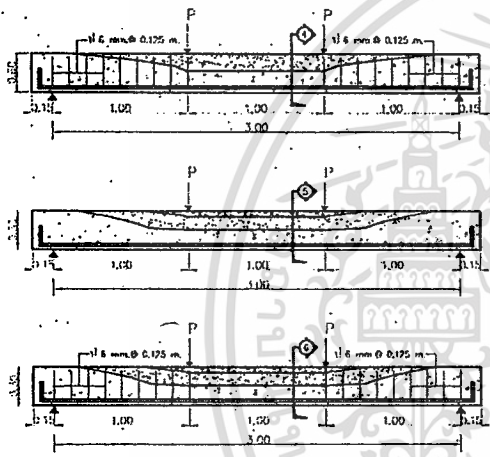
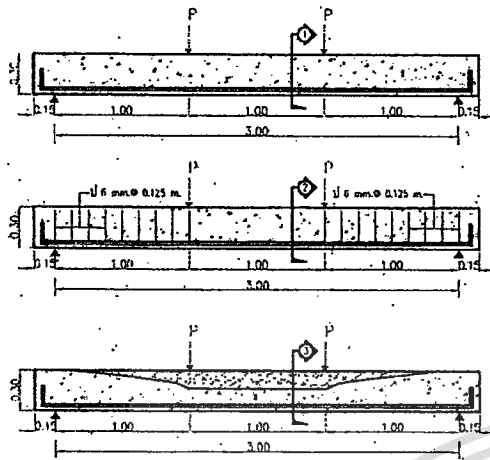
3.2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดลองเป็นคานกริดเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวน้้าหนักค้ำกว้าง 0.15 ม. ลึก 0.30 ม. และยาว 3.0 ม. จำนวน 8 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มมีคานอ้างอิงในกลุ่มแรก ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวน้้าหนักค้ำ 2400 กก./ม<sup>3</sup> ต่างกันที่เสริมเหล็กปลอกกับไม่เสริมเหล็กปลอก กลุ่มที่สองเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวน้้าหนักค้ำ 2400 กก./ม<sup>3</sup> ต่างกันที่เสริมเหล็กปลอกกับไม่เสริมเหล็กปลอก ส่วนกลุ่มที่สามเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวน้้าหนักค้ำ 2400 กก./ม<sup>3</sup> กับคอนกรีตโฟมซีเมนต์ 1950 กก./ม<sup>3</sup> ต่างกันที่เสริมเหล็กปลอกกับไม่เสริมเหล็กปลอก ตัวอย่างคานทดสอบ ออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ศ.ท. 1007-34) (5) ขณะที่เหล็กเสริมเสริมรับแรงใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 20 มม. (DB 20 - SD 40) และเหล็กเสริมเส้นกลมขนาด 6 มม. (RB 6 - SR 24) ใช้เป็นเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามลำดับ ภาพที่ 3 และตารางที่ 1 รายละเอียดของคานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ



ตารางที่ 1 รายละเอียดของคานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	เหล็กเสริม (มม.)	เหล็กปลอกที่ L/3 ทั้งสองด้าน (ม.)	จำนวนตัวอย่าง
B1	2-DB 20	ไม่มี	1
B1-S	2 DB 20	RB 6 มม.@0.125	2
B2L	2 DB 20	ไม่มี	1
B2L-S	2 DB 20	RB 6 มม.@0.125	1
B3L	2 DB 20	ไม่มี	1
B3L-S	2 DB 20	RB 6 มม.@0.125	2



ภาพที่ 6 รูปแบบคาน และการเสริมเหล็กคานทดสอบ

สำหรับการออกแบบหน้าตัดคาน จะใช้สมมูลของแรงภายในที่  $C = T$  เพื่อหาตำแหน่งของแนวแกนสะเทินที่ทำให้แรงหน้าตัดมีค่าใกล้เคียง



ภาพที่ 7 การกระจายของหน่วยแรงของคาน รูปแบบต่างๆ

เมื่อ

$$c = \frac{1}{2} f_c b \cdot kd$$

$$T = A_s f_s$$

$$\frac{\epsilon_s}{d - kd} = \frac{\epsilon_c}{d}$$

$$C = 0.5fc' = 120 \text{ kg/cm}^2$$

$$C1 = 0.5fc' = 120 \text{ kg/cm}^2$$

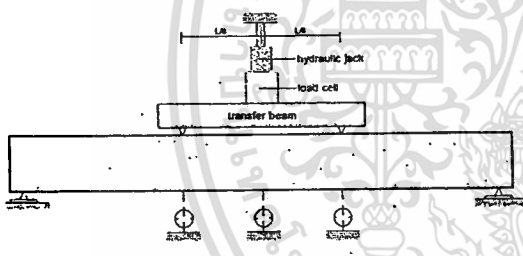
$$C2 = 0.25fc' = 60 \text{ kg/cm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

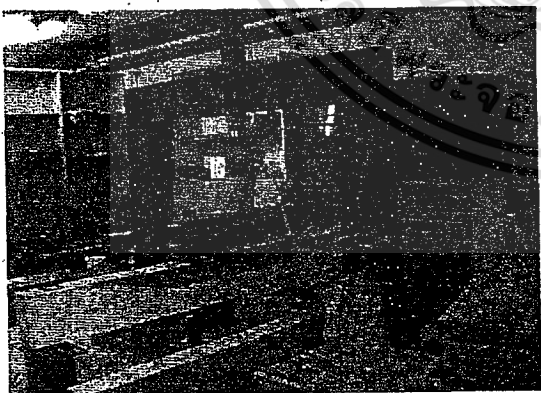


3.3 วิธีการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคานมีดังนี้ 1.) ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยจุดรองรับของคานทั้งสองด้านจะเป็นแบบหมุด 2.) ติดตั้ง dial gauge ได้ตัวอย่างทดสอบ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคาน จำนวน 1 ตัวและที่ระยะเท่ากับ L/6 ถัดจาก dial gauge ตัวแรกไปทางด้านซ้ายและด้านขวา จำนวนด้านละ 1 ตัว เพื่อวัดระยะแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ 3.) ทำการต่อสายไฟจากมาตรวัดความเครียดเข้ากับ strain gauge indicator 4.) การทดสอบตัวอย่างคานจะกระทำแบบ four-points loading test โดยใช้เหล็กตัวไอ (I-beam) ถ้ายแรงจาก hydraulic ram ลงสู่คานตัวอย่าง 5.) ดำเนินการทดสอบโดยใช้ hydraulic pumpอัดน้ำมัน hydraulic ไปยัง hydraulic ram อย่างช้าๆ บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัวของคานตัวอย่างจาก dial gauge ทั้ง 3 ตัว และค่าความเครียดจาก strain gauge indicator 6.) ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องโดยทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติเพื่อสังเกตลักษณะการวิบัติของคาน



(ก) แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

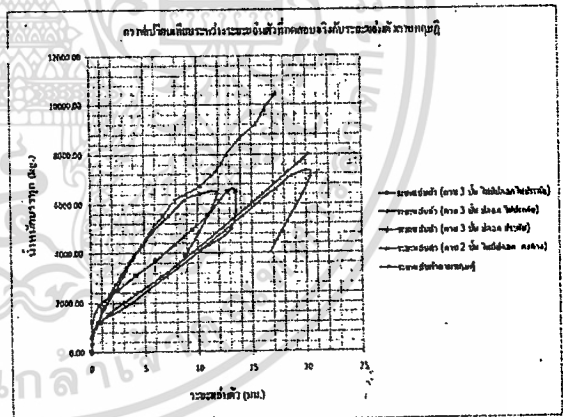


(ข) การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame  
ภาพที่ 8 รายละเอียดการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

1. จากผลการทดสอบพบว่าค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตธรรมดาเสริมเหล็ก 2-DB-20 และคานลูกผสม 2 ชั้นไม่เสริมเหล็ก ปลอกมีค่า 10.01 มม., 17.24 มม.ตามลำดับ ซึ่งจากทฤษฎีมีค่า 6.90 มม., 21.05 มม. ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 45.07 % ส่วนคานลูกผสม 2 ชั้นค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี 22.10 % เพราะในการทดสอบทำการวัดค่าความเครียดของคาน จึงนำมาวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในคานได้ ซึ่งมีค่า 111.57 ksc. ค่าที่ได้มีน้อยกว่าค่าการออกแบบตามทฤษฎี (120ksc.) เพราะฉะนั้นจึงทำให้เกิดการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจากทฤษฎี ส่วนคานลูกผสม 2 ชั้นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบมีค่า 132.76 ksc. มีค่ามากกว่า 120 ksc. ดังนั้นจึงมีการแอ่นตัวน้อยลง

2. จากผลการทดสอบพบว่าคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 ไม่เสริมเหล็กปลอก และคานลูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 เสริมเหล็กปลอกทดสอบไม่ประลัยมีค่าการแอ่นตัว 13.55 มม. , 11.85 มม. ซึ่งพบว่าการเสริมเหล็กปลอกในคานทำให้ระยะการแอ่นตัวน้อยลง



ภาพที่ 9 -กราฟเปรียบเทียบระหว่างระยะแอ่นตัวที่ทดสอบกับระยะแอ่นตัวตามทฤษฎี

3. การวิเคราะห์เพื่อที่จะทำนายการแอ่นตัวเมื่อระยะเวลาผ่านไปนั้น ใช้การเปรียบเทียบระหว่างคาน คอนกรีตธรรมดา กับคานลูกผสม 3 ชั้นที่ไม่เสริมเหล็กปลอกเพราะต้องการให้ได้ค่าแอ่นตัวมากที่สุด และค่าการแอ่นตัวคานคอนกรีตธรรมดา กับคาน



ถูกผสม 3 ชั้นเท่ากับ 10.01 มม., 13.55 มม. ซึ่งค่าการแอ่นตัวของคานที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกจรเมื่อระยะเวลาผ่านไปเวลา 1 ปี มีเพคเคอร์เท่ากับ 1.4 (มาตรฐาน ACI) จะได้ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ  $(10.01 \times 1.4) = 14.01$  มม. ถ้าที่ทดสอบได้มีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎีอยู่ 3.28%

4. การวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของคานเมื่อรับแรงกระทำเป็นระยะเวลา 1 ปีจากผลการทดสอบคานถูกผสม 3 ชั้นเสริมเหล็ก 2-DB 20 เสริมเหล็กปลอก ทำการทดสอบแบบประลัย จะได้กำลังอัดประลัยเท่ากับ 10441.39 kg. การแอ่นตัวของคานก่อนที่จะเกิดการประลัยมีค่าเท่ากับ 16.42 มม.

#### 5. สรุปผลการทดสอบ

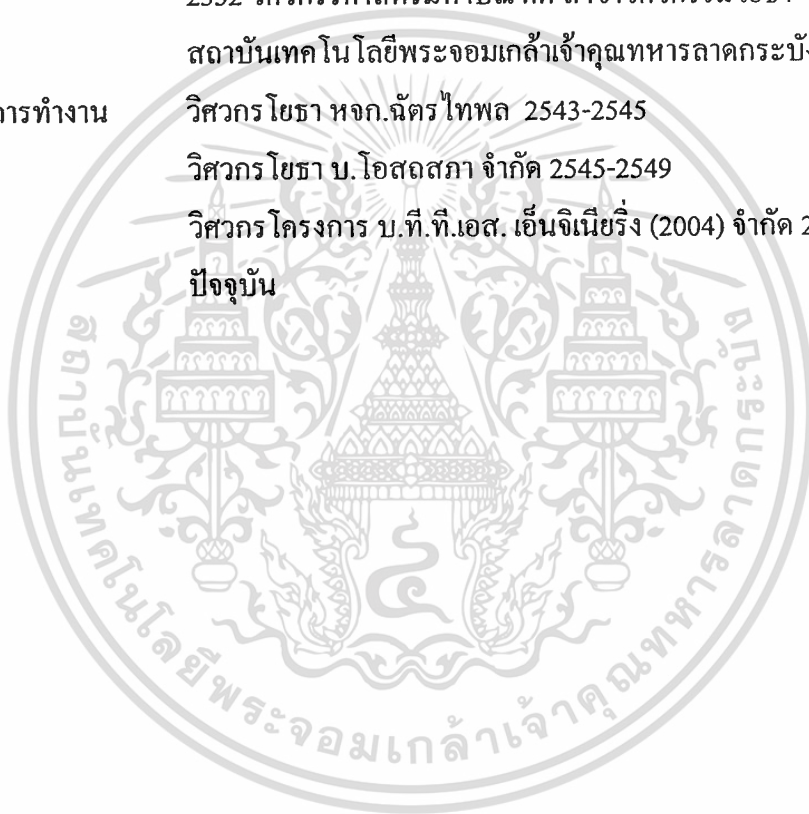
จากการทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีตเพื่อทำนายการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 ปีค่าการแอ่นตัวจากผลการทดสอบมีค่า 13.55 มม. และค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตธรรมดา 10.01 มม. โดยตามทฤษฎีที่ระยะเวลา 1 ปีการแอ่นตัวของคานจะมีค่าเท่ากับ 14.01 มม. ค่าที่ทดสอบได้มีจึงค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎีอยู่ 3.28% เพราะคานคอนกรีตธรรมดามีค่า Strength ที่ต่ำกว่าที่ออกแบบดังนั้นจึงทำให้คานคอนกรีตธรรมดาเกิดการแอ่นตัวมากกว่าทฤษฎีซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.90 มม. ค่าที่ทดสอบได้จึงมีค่ามากกว่าทฤษฎี 45.07% และการทดสอบคานที่การเสริมเหล็กปลอกส่งผลให้เกิดการแอ่นตัวน้อยลงเนื่องด้วยการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการทำนายการแอ่นตัวของพื้น ดังนั้นจึงเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของคานที่เกิดจากคานคอนกรีตธรรมดาและคานคอนกรีตถูกผสมที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก

#### บรรณานุกรม

- [1] Branson, D. E., (1977). Deformation of Concrete Structures, New York, McGraw-Hill, Inc.
- [2] Samra, R. M., (1997). Time Dependent Deflections of Reinforced Concrete Beams Revisited Journal of Struct. Engrg., ASCE, Vol. 123, June, 1997, 823-830
- [3] ศรีกรีข หริธูมาศ, (2544). คอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] Washa, G. W., and Fluck, P. G., (1952). Effect of Compressive Reinforcement on Plastic Flow of Concrete Beams, ACI Journal, Proceedings, Vol. 49, No. 2, Oct. 1952, pp. 89-108.
- [5] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (2538). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน, กรุงเทพฯ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอมสิน คำริห์
วัน เดือน ปีเกิด	1 เมษายน 2518 ที่จังหวัดพิษณุโลก
ที่อยู่	1092/57 อาคารชุดเซ็นทรัลซิตี นอช-เซาท์ ถ.บางนา-ตราด กม. 3 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260 โทร 087-333-4688
ประวัติการศึกษา	2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรโยธา หจก.ฉัตรไทยพล 2543-2545 วิศวกรโยธา บ.ไอเอสสถา จำกัด 2545-2549 วิศวกรโครงการ บ.ที.ที.เอส. เอ็นจิเนียริง (2004) จำกัด 2549- ปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้