

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรง กับคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC

A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN BONDING OF STEEL WIRE FOR
PRESTRESSED CONCRETE AND CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

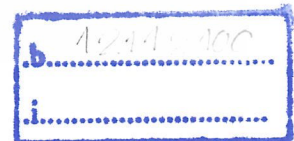


T104263



โดย
นายชวลิต เรียบบุญใหม่
นายชัยณรงค์ เล็กสมบูรณ์
นายสมพงษ์ วรสมุทรปราการ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....104263
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN BONDING OF STEEL WIRE FOR
PRESTRESSED CONCRETE AND CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE**



MR.CHAWALIT

REAKBUNMAI

MR.CHAINARONG

LEKSOMBOON

MR.SOMPONG

VORASAMUTPRAKAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC

A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN BONDING OF STEEL WIRE FOR PRESTRESSED CONCRETE AND CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

นักศึกษา	ชวลิต	เรียกบุญใหม่	รหัสประจำตัว	48010189
	ชัยณรงค์	เล็กสมบูรณ์	รหัสประจำตัว	48010192
	สมพงษ์	วรสมุทพรปราการ	รหัสประจำตัว	48012163

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. คมสัน มาลีดี
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลวดอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC โดยมุ่งเน้นการพัฒนาคอนกรีตมวลเบา และ ระบบ prestress มาประยุกต์ใช้งานร่วมกัน เพื่อนำไปใช้ในงานโครงสร้าง โดยในการทดลองนี้ มุ่งเน้นไปที่กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 1:1 โดยแปรหน่วยน้ำหนักที่ 1,500 , 1,600 , 1,700 และ 1,800 kg/m³ โดยใช้มอร์ต้าเป็นตัวเปรียบเทียบ และในการทดลองนั้น ใช้ทั้งทรายหยาบและทรายละเอียด จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด และ แรงยึดเหนี่ยว

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำให้ทราบว่า แรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC นั้นแปรผันตรงกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต โดยทรายละเอียด มีค่าแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าทรายหยาบ ดังนั้นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ 1,800 kg/m³ และใช้ทรายละเอียดมาประยุกต์ใช้กับลวดอัดแรง ซึ่งผลที่ได้นี้คาดว่าจะมีประโยชน์ในอนาคตต่อไป

Title : A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN OF STEEL WIRE FOR PRESTRESSED CONCRETE AND CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

Name : MR.CHAWALIT REAKBUNMAI
MR.CHAINARONG LEKSOMBOON
MR.SOMPONG VORASAMUTPRAKAN

Field : CIVIL ENGINEERING

Department : CIVIL ENGINEERING

Faculty : ENGINEERING

Advisor : DR.COMSAN MALEESEE

ABSTRACT

The objective of this project is to study of the relationship between bonding of steel wire for prestress concrete and cellular lightweight concrete by develop lightweight concrete and prestress system for structure system .

In this experiment expected to compressive strength at 28 days by used water cement ratio equal to 0.4 and sand cement ratio 1:1 . The amount of unit weight are vary 1,500 , 1,600 , 1,700 and 1,800 kg/m³ by compare with mortar used coarse aggregate and fine aggregate . Then testing properties of mortar such as compressive strength and bonding

Bonding of PC wire with cellular lightweight concrete (CLC) in accordance with unit weight and fine aggregate gave higher bonding than coarse aggregate . The result showed that mortar when used fine aggregate and has unit weight equal to 1,800 kg/m³ is appropriate to apply in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ด้วยความอนุเคราะห์และความกรุณาของ ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้จึงสำเร็จด้วยดีด้วยดี ตลอดระยะเวลาของโครงการศึกษานี้ ท่านได้ให้คำแนะนำและสั่งสอนอันมีค่า ท่านสอนให้อุทิศตนให้กับงานและปรับปรุง ซึ่งเนะเกี่ยวกับการนำเสนองาน ซึ่งถือเป็นสิ่งที่มีคุณค่าที่ผู้ประพันธ์ได้จากการศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอกล่าวคำขอบคุณอย่างซาบซึ้งและนับถือแด่คณะอาจารย์ที่เป็นอาจารย์ผู้ร่วมประเมิณงาน โครงการพิเศษนี้ และถือเป็นเกียรติอย่างยิ่งแก่ผู้ประพันธ์ ที่ได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นอันกระจำจรัส นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณศิวะ วาสาธา ที่สละเวลามาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาด้วยดีตลอดการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณ คุณพิมพ์ฉลวย ตระกูลยุทธชัย บริษัท S.K. CONCRETE PRODUCT CO., LTD. ที่ได้อนุเคราะห์และกรุณาอย่างสูงที่ให้ลวดเหล็กกล้า PC-wire มาใช้ในการทดสอบในโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ท้ายที่สุดขอขอบคุณสมาชิกของครอบครัวทุกคน ที่มอบความรักความห่วงใย และการช่วยเหลือด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะการเงิน ขอขอบคุณแหล่งข้อมูลต่าง ๆ อันทรงคุณค่าสำหรับการศึกษา

ผู้ประพันธ์

นายชวลิต	เรียกบุญใหม่
นายชัยณรงค์	เด็กสมบุรณ์
นายสมพงษ์	วรสุมทรปการ

สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
ปกใน (ภาษาไทย)	ก
ปกใน(ภาษาอังกฤษ)	ข
หน้าอนุมัติ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฐ
1. บทที่ 1	
1.1. กล่าวนำ	1
1.2. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.4. ขอบเขตการศึกษา	2
1.5. วิธีการศึกษา	3
1.6. ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2.1. คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)	6
2.2.1.1. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Light-Weight Aggregate Concrete)	6
2.2.1.2. คอนกรีตพูนหรือโฟมคอนกรีต (Aerated or Foam Concrete)	8
2.2.1.3. คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (No-Finess Concrete)	9

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ เรื่อง	หน้า
2.2.1.4. คุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา	9
2.2.1.5. ข้อควรระวังของคอนกรีตมวลเบาในการใช้งาน	10
2.2.1.6. การนำคอนกรีตพูนมาประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ	11
2.2.1.7. ความแตกต่างระหว่างคอนกรีตระบบมวลเบา CLC กับ ACC	11
2.2.2. คอนกรีตอัดแรง (Prestress)	13
2.2.2.1. วิธีการอัดแรงคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน (Pretensioned Concrete)	14
2.2.2.2. ข้อกำหนดในการออกแบบ	14
2.2.3. คอนกรีตมวลเบาในงานคอนกรีตอัดแรง	20
2.2.3.1. กำลังอัดประลัย	20
2.2.3.2. โมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง	20
2.2.3.3. กำลังดึง	20
2.2.3.4. การคืบและการหดตัว	21
2.2.4. ลวดอัดแรง (Prestressing wire)	21
2.2.5. แรงยึดเหนี่ยว (Bond Strength)	22
2.3. การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา	24
3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ	
3.1. การออกแบบการทดลอง	27
3.1.1. การคำนวณส่วนผสม (Mix design)	27
3.2. วิธีการทดสอบหากำลังอัด	29
3.2.1. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	29
3.2.2. วิธีการดำเนินงาน	30
3.2.3. การทดสอบ	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ เรื่อง	หน้า
3. 3. วิธีการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว	33
3.3.1. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	33
3.3.2. วิธีการดำเนินงาน	34
3.3.3 การทดสอบ	36
3.4. วิธีการทดสอบลวด PC wire 5 mm. และเหล็ก RB 6 mm.	37
3.4.1. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	37
3.4.2. วิธีการดำเนินงาน	37
3.5. วิธีการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง	39
3.5.1. การออกแบบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง	39
3.5.2. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	39
3.5.3. วิธีการดำเนินงาน	40
3.5.4. การทดสอบ	43
3.5.4.1 การทดสอบ Elongation	43
3.5.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคาน	43
4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	
4.1 การทดสอบหาค่ารับแรงอัด	47
4.1.1. วิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัด	52
4.2 การทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว	52
4.2.1. ผลการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว	53
4.2.2. วิเคราะห์ผลการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว	63

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ เรื่อง	หน้า
4.3. การทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.	64
4.3.1. ผลการทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.	64
4.3.2. วิเคราะห์ผลการทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.	65
4.4. การทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง	66
4.4.1. ผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง	67
4.3.2. วิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง และคานมอร์ต้าอัดแรง	74
5 สรุปผลการศึกษา	
5.1. สรุปผลการศึกษา	76
5.1.1. สรุปผลการทดสอบหาค่าดึงรับแรงอัด	76
5.1.2. สรุปผลการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว	77
5.1.3. สรุปผลการทดสอบมาตรฐานของ เหล็ก RB 6 mm. และ ลวด PC-Wire 5 mm	79
5.1.4. สรุปผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง	80
5.2. ปัญหาที่เกิดขึ้นในการศึกษา	81
5.3. ข้อเสนอแนะ	82
ภาคผนวก	83
บรรณานุกรม	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามการนำไปใช้ ACI 211.2-18	7
2.2.	การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก	8
2.3.	ความแตกต่างระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC กับ CLC	13
2.4.	หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต อัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	15
2.5.	หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง (มาตรฐานสำหรับ อาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	17
2.6.	ค่าตัวคูนน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต อัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	18
2.7.	แสดงค่าตัวคูนลดกำลังสำหรับกรณีต่าง ๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	19
2.8.	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421	22
4.1.	การทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.	64
4.2.	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421	65
4.3.	การตรวจสอบ Compressive Strength ของคานเพื่อที่จะ สามารถตัดลวดได้ที่ 300 ksc	67
4.4.	การคำนวณการดึงลวดและการหัดตัวที่ใช้ในงาน	69
4.5.	มาตรฐานลวด PC-Wire Grade 1770N (มอก. 95 – 2540)	70

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
4.6.	การคำนวณการดึงลวด PC-Wire 4 mm. คานยาว 2 m.	71
4.7.	การเปรียบเทียบการหดตัวที่ได้จากการคำนวณและการวัดจริง โดยใช้ลวด PC-Wire 4 mm. คานยาว 2 m.	71
4.8.	การทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง	73
4.9.	ค่าโมเมนต์ แรงเฉือน และการแอนตัว ที่ได้จากการทดสอบคาน	75
5.1.	เปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวเมื่อแปรผันชนิดทราย ชนิดเหล็ก และหน่วยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน	77
5.2.	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์แรงยึดเหนี่ยวที่หายไปจากคอนกรีตมวลเบา เทียบกับมอร์ต้า เมื่อแปรผันชนิดทราย ชนิดเหล็กและหน่วยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน	78
5.3.	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์แรงยึดเหนี่ยวที่เหลือในคอนกรีตมวลเบา เทียบกับมอร์ต้า เมื่อแปรผันชนิดทราย ชนิดเหล็กและหน่วยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน	78
5.4.	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421	79
5.5.	มาตรฐานลวด PC-Wire Grade 1770N (มอก. 95 – 2540)	79

สารบัญรูป

รูปที่ ชื่อรูป	หน้า
2.1. แสดงการเกิด Bond และ Adhesion ใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	23
3.1. รูปอุปกรณ์ที่ใช้	29
3.2. การผสม โฟมกับซีเมนต์เพสต์	30
3.3. มอร์ต่าที่ทำการปาดแต่งผิวหน้า	31
3.4. การบ่มแห้งตัวอย่าง	31
3.5. รูปตัวอย่างก่อนการทดสอบ	32
3.6. การกดทดสอบ	33
3.7. การวัดของตัวอย่าง	33
3.8. a. แบบหล่อขนาด 15cm.×15cm.×15cm. และ b. ลวด PC wire 5 mm.	34
3.9. การทำระยะฝั่ง 14 cm.	34
3.10. การเทลงแบบ	35
3.11. a. ตัวอย่างอายุ 24 ชั่วโมงก่อนแกะแบบ และ b. การบ่มตัวอย่างในน้ำ	35
3.12. การทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว	36
3.13. รูปตัวอย่างหลังการทดสอบ	38
3.14. โมที่ใช้ในการผสม	40
3.15. เครื่องดัดลวด และ b. แบบหล่อขนาด 15 × 30 เซนติเมตร	40
3.16. การเตรียมแบบหล่อสำหรับคานตัวอย่าง	41
3.17. การดัดลวด	42
3.18. ผูกเหล็กปลอกตามระยะที่คำนวณได้	42
3.19. การผสมคอนกรีตมวลเบา	42
3.20. การตัดลวด	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.21.	อุปกรณ์การทดสอบคาน	44
3.22.	ติดตั้ง Dial Gauge ที่ระยะ L/4 , L/2 และ 3L/4	45
3.23.	ติดตั้ง Load cell และ Hydraulic pump	46
3.24.	ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับตัวอย่างทดสอบ	46
4.1.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีต ของทรายหยาบ ใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของลวด PC-Wire 5 mm. (C-P)	48
4.2.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีต ของทรายหยาบ ใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็ก RB 6 mm. (C-R)	49
4.3.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีต ของทรายละเอียด ใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของลวด PC-Wire 5 mm. (F-P)	50
4.4.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีต ของทรายละเอียด ใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็ก RB 6 mm. (F-R)	51
4.5.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m ³ (C-P 1500) อายุ 28 วัน	53
4.6.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m ³ C-P 1600) อายุ 28 วัน	53
4.7.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m ³ (C-P 1700) อายุ 28 วัน	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.8.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m ³ (C-P 1800) อายุ 28 วัน	54
4.9.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่มอร์ต้า (C-P None) อายุ 28 วัน	55
4.10.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m ³ (C-R 1500) อายุ 28 วัน	55
4.11.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m ³ (C-R 1600) อายุ 28 วัน	56
4.12.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m ³ (C-R 1700) อายุ 28 วัน	56
4.13.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m ³ (C-R 1800) อายุ 28 วัน	57
4.14.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่มอร์ต้า (C-R None) อายุ 28 วัน	57
4.15.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m ³ (F-P 1500) อายุ 28 วัน	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.16.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m ³ (F-P 1600) อายุ 28 วัน	58
4.17.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m ³ (F-P 1700) อายุ 28 วัน	59
4.18.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m ³ (F-P 1800) อายุ 28 วัน	59
4.19.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่มอร์ต้า (F-P None) อายุ 28 วัน	60
4.20.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m ³ (F-R 1500) อายุ 28 วัน	60
4.21.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m ³ (F-R 1600) อายุ 28 วัน	61
4.22.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m ³ (F-R 1700) อายุ 28 วัน	61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.23.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 (F-R 1800) อายุ 28 วัน	62
4.24.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่มอร์ต้า (F-R None) อายุ 28 วัน	62
5.1	หน้าตัดคาน การวางลวด เหล็กปลอก และเปอร์เซ็นต์ตั้ง	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1. กล่าวนำ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในหลาย ๆ ด้าน รวมไปถึงในด้านการก่อสร้างได้มีการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ลดเวลาในการก่อสร้าง ลดค่าขนส่งซึ่งสอดคล้องกับภาวณ้ำมันในปัจจุบัน ทั้งเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วน โครงสร้างให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกทั้งเป็นการพัฒนาด้านนวัตกรรมใหม่ ๆ ตัวอย่างที่เราเห็นได้ชัด อาทิเช่น คอนกรีตมวลเบา

1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมากจึงมีการนำคอนกรีตมวลเบามาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดน้ำหนักขององค์อาคารซึ่งช่วยทำให้การก่อสร้างสะดวกรวดเร็วและง่ายในการทำงาน น้ำหนักที่เบาช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของการขนส่ง อีกทั้งยังเป็นฉนวนกันความร้อนได้อย่างดี ซึ่งจะมีประโยชน์ในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยตลอดจนอาคารสูง แต่คอนกรีตมวลเบานั้นรับกำลังได้ไม่มากจึงไม่สามารถนำมาใช้ในส่วนที่เป็นโครงสร้างหนักได้ เราจึงทำการวิจัยเพื่อทำให้คอนกรีตมวลเบารับกำลังได้เพิ่มมากขึ้น โดยการนำทฤษฎีและวิธีการของคอนกรีตอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบามาประยุกต์ใช้ร่วมกันโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC เพื่อให้ทราบว่าลวดเหล็กในงาน Prestress ช่วยในการรับกำลังได้มากขึ้นเพียงใดก่อนเกิดการ Slip หรือการลื่นไถลจากคอนกรีตมวลเบา

ดังนั้นผลที่ได้จากการวิจัยจะสามารถนำไปออกแบบคานคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ลวดอัดแรง โดยดึงที่ค่าสูงสุดปลอดภัยของลวดอัดแรงที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดอัดแรงกับคอนกรีตยังคงอยู่และไม่เกินกำลังคลากของลวดอัดแรง เมื่อตัดลวดจะเป็นการอัดแรงเข้าไปยังตัวคอนกรีตทำให้คอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น

1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC
2. เพื่อหาส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตมวลเบาแข็งแรงยึดเหนี่ยวกับลวดอัดแรงมากที่สุด
3. เพื่อสามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง

1.4. ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษากการทำคอนกรีตมวลเบาอัดแรงสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ใช้รับแรง ซึ่งมีน้ำหนักตัวคอนกรีตมวลเบาอยู่ระหว่าง 1,500 - 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีกำลังรับแรงอัด เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ประมาณ 180 - 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร - ในการทำวิจัยครั้งนี้ พิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดโฟมผสมในปูนซีเมนต์ (Foaming Agent) G-S
3. ใช้อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อทราย 1:1
4. ใช้แบบหล่อขึ้นทดสอบทรงลูกบาศก์ 5 cm. × 5 cm. × 5 cm. สำหรับการหาค่ากำลังรับแรงอัดและ 15 cm. × 15 cm. × 15 cm. ในการหาค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยว
5. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) 0.4
6. แปรผันหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ 1500, 1600, 1700, 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมอร์ต้า
7. แปรผันกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตมวลเบาหรือมอร์ต้ากับลวดเหล็กกล้า PC-Wire 5 mm. และเหล็ก RB 6 mm.
8. ดึงลวดที่ 40 %, 50 %, 60% ของแรงดึงที่จุดคานาเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ดึงที่ไม่ทำให้เกิดการลื่นไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5. วิธีการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ขั้นตอนรวบรวมข้อมูล

ทำการหาข้อมูลเกี่ยวกับคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC คอนกรีตอัดแรงประเภทดิ่งเหล็กก่อนและจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ทั้งจากหนังสือ อินเทอร์เน็ต และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
2. ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล

ทำการศึกษาจากข้อมูลที่รวบรวม รวมทั้งศึกษามาตรฐานและเงื่อนไขในการออกแบบ แล้วนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้ตาม
3. ขั้นตอนการเลือกขอบเขตที่จะศึกษา

ทำการศึกษา โดยการควบคุมตัวแปรตามขอบเขต เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุด
4. ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดเหนียว

โดยใช้มาตรฐาน ASTM C 234 โดยประยุกต์ใช้เป็นคอนกรีตมวลเบาเทียบกับมอร์ต้าและ ใช้ลวดอัดแรงเทียบกับเหล็กเส้นกลม ทดสอบที่อายุคอนกรีต 3 , 7 , 28 วัน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์
5. ขั้นตอนการวิเคราะห์และประเมินผลกำลังรับแรงอัดเหนียว

นำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเหนียวมาเขียนกราฟวิเคราะห์แรงอัดเหนียวและการลื่นไถล (Slip) เพื่อนำผลวิจัยไปหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด
6. ขั้นตอนออกแบบและหล่อคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง

ออกแบบคานเพื่อตรวจสอบค่าการลื่นไถล โดยดิ่งลวดอัดแรง แต่ละตำแหน่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของการดิ่งต่างกัน และหล่อคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง โดยใช้ลวดอัดแรงเทียบระหว่างคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงกับคานมอร์ต้าอัดแรง
7. ขั้นตอนการวิเคราะห์และประเมินผลคาน

นำผลการทดสอบคานมาวิเคราะห์การแอ่นตัว โมเมนต์ แรงเฉือนและการลื่นไถลเมื่อตัดลวดอัดแรง โดยตรวจสอบการหดตัวของลวดที่เข้าไปในคอนกรีต และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด

1.6. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของลวดอัดแรง กับ คอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC
2. ทราบส่วนผสมที่จะได้กำลังรับยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตมวลเบา กับ ลวดอัดแรง ได้ดีที่สุดใน
3. เพื่อนำไปประยุกต์ออกแบบชิ้นส่วนนำเา ระบบ Prestress มาใช้ในคานคอนกรีตมวลเบาต่อไป



บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1. กล่าวนำ

สำหรับในประเทศไทย ได้มีการพัฒนาและวิจัยคอนกรีตประเภทนี้ต่อเนื่องมาเป็นเวลานาน แต่ความต้องการใช้งานคอนกรีตมวลเบาในช่วงแรกที่ผ่านมายังมีน้อย ปัจจุบันอาคาร สิ่งก่อสร้างต่างๆ มีความสูงเพิ่มขึ้นและต้องการความรวดเร็วในการสร้าง ผู้ออกแบบได้ให้ความสนใจที่จะใช้คอนกรีตมวลเบามากขึ้น ความต้องการในการใช้คอนกรีตมวลเบาจึงเพิ่มขึ้นตาม

ในปัจจุบันการก่อสร้างโดยทั่วไปในประเทศ มีส่วนประกอบทำด้วยวัสดุจำพวกคอนกรีตเป็นวัสดุหลัก การใช้คอนกรีตมีความสะดวกและความเหมาะสมกว่าวัสดุอื่น ๆ เพราะสามารถขึ้นรูปร่างลักษณะ ตามขนาดที่ต้องการได้ง่าย แต่โดยปกติแล้วคอนกรีตมีน้ำหนักมากทำให้โครงสร้างต่าง ๆ ที่รองรับมีขนาดใหญ่ขึ้น นั่นก็หมายความว่ารากฐานก็ย่อมมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองวัสดุในการก่อสร้าง

ดังนั้นถ้าสามารถทำให้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของอาคารมีขนาดเบาลง จะทำให้ประหยัดวัสดุในการก่อสร้าง ขนาดของโครงสร้างหลักจะลดขนาดลงได้บ้างจากแนวคิดดังกล่าว จึงมีการค้นคิดที่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาลงกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งจะช่วยให้ราคาก่อสร้างประหยัดลงได้มาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีการนำเอาคอนกรีตมวลเบามาใช้งานมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตมวลเบามีน้ำหนัก 400 - 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รับกำลังอัดได้ 10 - 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและมีจุดเด่นในด้านที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน (Insulating Materials) แต่คอนกรีตมวลเบาก็มีข้อจำกัดด้านการผลิต และมีคุณสมบัติในด้านการดูดซึมน้ำ (Absorption) จึงทำให้การใช้คอนกรีตมวลเบามีขอบเขตไม่กว้างเท่าที่ควร

2.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

คอนกรีตมวลเบา คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป นิยมในต่างประเทศมาเป็นเวลานาน ซึ่งนำไปใช้ในการก่อสร้าง ตั้งแต่ทำเป็นฉนวนกันความร้อน จนถึงใช้เป็นชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น พื้น เสา กาน ฐานราก และผนังอาคาร เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โครงสร้างที่สำคัญคือ ลดน้ำหนักขององค์อาคาร ส่งผลให้เป็นการประหยัดต้นทุนโดยรวม

2.2.1. คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

2.2.1.1. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Light-Weight Aggregate Concrete)

มีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 60 - 1,000 กก./ลบ.ม. เทียบกับ 1,100 - 1,750 กก./ลบ.ม. ของมวลรวมปกติ หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเบาแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 1 สามารถจำแนกมวลรวมเบาออกได้เป็น 4 ชนิดคือ

1) มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินที่เป็นลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติ มวลรวมชนิดนี้ใช้ผสมคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูง และมวลรวมจะดูดซึมน้ำมาก

2) มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต 3 กระบวนการคือ

2.1) Expanded Clay Aggregate ได้จากการนำดินเหนียวผสมกับสารก่อพองอากาศ และนำไปเผาในหม้อเผาที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสเกิดเป็นพองอากาศอยู่ในเนื้อหิน ทำให้ภายในเป็นโพรงอากาศ

2.2) Expanded Shale Aggregate ได้จากการนำดินดานผสมกับถ่านที่บดละเอียดนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงค่อนข้างดี จึงนิยมนำมาทำคอนกรีตมวลเบา

2.3) Sintered Fly Ash ได้จากการนำ Fly Ash นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้อนุภาคเกาะติดกัน ผิวของมวลรวมค่อนข้างเรียบ

3) มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ การใช้ไม้หรือพลาสติกผสมในคอนกรีต

4) มวลที่ได้จากของเหลือของกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าที่หนักที่ได้โรงไฟฟ้าถ่านหินหรือจากการพ่นน้ำไปบน Slag ที่หลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1. การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามการนำไปใช้ ACI 211.2-18

ประเภท	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก. / ตร.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก. / ลบ.ม.)
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete)	180-480	1,400-1,800
คอนกรีตสำหรับงานก่อ (Masonry Concrete)	100-180	500-800
คอนกรีตสำหรับงานฉนวนความร้อน (Insulating Concrete)	10-100	น้อยกว่า 800

หากจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. คอนกรีตมวลเบาสำหรับงาน โครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete) มีน้ำหนักระหว่าง 1,400 - 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีกำลังต้านทานแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2. คอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา (Semi - Lightweight Concrete) มีน้ำหนักตั้งแต่ 1,800 - 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นำมาทำพวกคอนกรีตบล็อก สำหรับกำแพงรั้วและใช้เป็นวัสดุทนไฟ และมีกำลังต้านทานแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
3. คอนกรีตสำหรับงานฉนวนกันความร้อน (Insulating Lightweight Concrete) มีน้ำหนักตั้งแต่ 315 - 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังต้านทานแรงอัดระหว่าง 7 - 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2. การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก

ประเภท	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก. / ตร.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก. / ลบ.ม.)
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงาน โครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete)	ไม่ต่ำกว่า 170	1,400-1,800
คอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา (Semi - Lightweight Concrete)	ไม่ต่ำกว่า 120	1,800 - 2,050
คอนกรีตสำหรับงานฉนวนกันความร้อน (Insulating Concrete)	7 - 70	315 - 1,100

2.2.1.2. คอนกรีตพรุนหรือโฟมคอนกรีต (Aerated or Foam Concrete)

คอนกรีตประเภทนี้ เป็นคอนกรีตที่ได้จากการทำให้เกิดฟองอากาศ หรือที่เรียกว่า “โฟม” ขนาด 0.1 ถึง 1.0 มิลลิเมตร ในเนื้อคอนกรีต วิธีการผสมคอนกรีตพรุนมี 2 วิธี คือ

1) วิธีทางเคมี โดยใช้ผลของการทำปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อคอนกรีต ในขณะที่ยังมีสภาพ Plastic

2) การทำให้เกิดฟองอากาศ (Foaming Agent) แล้วผสมลงในส่วนผสมคอนกรีตเนื่องจากคอนกรีตพรุน มีโพรงที่เกิดจากการแทรกตัวของฟองอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง มีน้ำหนักเบา หน่วยน้ำหนักประมาณ 200 ถึง 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทั่วไปคอนกรีตประเภทนี้ นิยมนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้คอนกรีตพรุนยังมีคุณสมบัติหลายอย่างคล้ายไม้ เช่น สามารถเลื่อยได้ ตอกตะปูได้ สามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยกาว

2.2.1.3. คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (No-Fines Concrete)

คอนกรีตประเภทนี้ เป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด (ทราย) อยู่ในส่วนผสม ส่วนผสมหลักจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมหยาบ การยึดเกาะติดกันระหว่างมวลรวมหยาบ เกิดจากผิวที่ถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพสต์หนาประมาณ 1 ถึง 3 มิลลิเมตร เมื่อคอนกรีตแข็งตัว จะเกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบนั้น และทำให้น้ำหนักของคอนกรีตลดลงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตประเภทนี้ประมาณ 1,600 ถึง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมที่ใช้ได้แก่ กรวดโม หินโม เป็นต้น ขนาดของมวลรวมควรมีขนาดเท่าๆกัน ขนาดที่ให้อยู่ในช่วง 9.5 ถึง 20.0 มิลลิเมตร มีกำลังต้านทานแรงอัด 60 ถึง 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตประเภทนี้ ขึ้นอยู่กับมวลรวมที่ใช้ และปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยทั่วไปส่วนผสมที่ใช้จะประมาณ 1 : 8 โดยปริมาตร และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ประมาณ 0.4

2.2.1.4. คุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา มีดังนี้

1) *ความแข็งแรง* ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมวลเบาจะมีค่าประมาณ 10 ถึง 140 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับ โครงสร้าง ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานแรงอัด 100 ถึง 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาทั่วไปอาจทำให้สูงขึ้น โดยการใช้ทรายธรรมชาติแทนมวลรวมน้ำหนักเบา แต่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า

2) *ความคงทน* คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไป ไม่สามารถทนการกัดกร่อนจากสารเคมี ความเค้นทางกายภาพ และการกระทบกระแทกเนื่องจากแรงภายนอก เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาไม่มีโพรงอากาศอยู่ภายใน ดังนั้น คอนกรีตมวลเบาจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพที่มีสารจำพวกซัลเฟตเจือปนอยู่หรือในสภาพดินชื้น ดังนั้นในการนำไปใช้งานควรมีการฉาบผิวเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

3) *การหดตัว* คอนกรีตมวลเบาหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5 – 40 % แต่คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมซึ่งเป็นผลผลิตจาก ดินเผา ดินดานหรือตะกั้น จะหดตัวน้อยลง

4) *การนำความร้อน* คอนกรีตมวลเบาเป็นตัวนำความร้อนที่เร็ว เนื่องจากในเนื้อคอนกรีตมีโพรงอากาศมาก ทำให้คอนกรีตมวลเบาดูดซึมความร้อนได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่น ประมาณ 300 – 1800 กก./ลบ.ม. กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ประมาณ 4 – 480 กก./ตร.ซม.
- 6) การดูดซึมน้ำ คอนกรีตมวลเบาดูดซึมน้ำได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากมีรูพรุนมากกว่า
- 7) ค่ายุบตัว ในปริมาณความสามารถเท่าได้เท่ากับคอนกรีตมวลรวมเบาจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป
- 8) ความสามารถทนไฟ ทนไฟได้ดี กำลังรับแรงดึงมากกว่าคอนกรีตปกติ
- 9) สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบา ประมาณ 7×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียสซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา
- 10) การกันเสียง กันเสียงได้ดีมีการทดสอบเรื่องการกันเสียงมากมาย พบว่าผนังที่ทำจากคอนกรีตพรุนสามารถกันเสียงได้ดี
- 11) การก่อสร้าง ทำได้ง่ายเพราะสามารถใช้เลื่อยชนิดฟันห่าง ๆ เลื่อยตัดแต่งได้ตามต้องการง่ายกว่าไม้เสียอีก

2.2.1.5. ข้อควรระวังของคอนกรีตมวลเบาในการใช้งาน ประกอบด้วย

- 1) การแยกตัว ถ้าส่วนผสมมีค่ายุบตัวมากหรือมีการจีเขย่ามากเกินไป คอนกรีตจะเกิดการแยกตัว มวลรวมจะลอยตัวสู่ผิวหน้าคอนกรีต การแต่งผิวทำได้ยาก
- 2) การดูดซึมน้ำ ของมวลรวมจะมาก ดังนั้นในการออกแบบสัดส่วนส่วนผสมต้องนำปัจจัยนี้มาพิจารณา รวมทั้งกำหนดวิธีการผสม
- 3) การผสม ต้องผสมให้ถูกวิธีใช้เวลาผสมที่นานเกินไป อาจทำให้มวลรวมเบาแตก
- 4) ความทนทาน ในงานคอนกรีตเสริมเห

2.2.1.6. การนำคอนกรีตพูนมาประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ

คอนกรีตพูนนี้มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา ป้องกันความร้อน รวมทั้งยังป้องกันเสียงสะท้อน ได้ดีอีกด้วยดังกล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามเราสามารถประยุกต์การใช้งานได้โดยใช้ทำวัสดุสำเร็จรูป เช่น คอนกรีตบล็อก (Masonry Block) กำแพงสำเร็จรูปใช้สำหรับกำแพงประเภทที่รับน้ำหนัก (Load-bearing or Nonload-bearing Walls) แต่คอนกรีตพูนที่ใช้ทำกำแพงรับน้ำหนักควรหนาไม่น้อยกว่า 3 นิ้ว กำแพงที่สร้างด้วยคอนกรีตนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เนื่องจากเป็นฉนวนความร้อนที่ดี และมีน้ำหนักเบาจนสามารถลดขนาดของคานและเสาได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังมีความสม่ำเสมอในด้านขนาดและคุณสมบัติทางกายภาพ

2.2.1.7. ความแตกต่างระหว่างคอนกรีตระบบมวลเบา CLC กับ ACC

คอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC (Cellular lightweight Concrete) เป็นระบบการผลิตที่ใช้ส่วนผสมของปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย น้ำ และผสมน้ำยาที่ทำให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีตที่เป็นเม็ดกลมขนาดเล็กมาก ซึ่งจะมีความมั่นคงจนคอนกรีตก่อตัวแข็ง มีหน่วยน้ำหนักต่ออยู่ระหว่าง 300 - 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้งานในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตได้หลากหลายประเภท เช่น การนำไปผลิตอิฐ, ผนังเบา, ผนังเบาหล่อในที่, ผนังฉนวนกันความร้อน, พื้นปรับระดับที่ต้องทับหน้าด้วยคอนกรีต, ฉนวนกันความร้อนหลังคา ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากเทคโนโลยี CLC จึงมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ ฟองอากาศแบบไม่ต่อเนื่องในมวลคอนกรีตก่อให้เกิดผลดี คือ น้ำหนักเบา ป้องกันความร้อน เสียง และทนไฟได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ อีกทั้งกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ดังนั้นคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง หรือทำโครงสร้างอาคาร โดยเฉพาะผนังทั้งภายในและภายนอก

คอนกรีตมวลเบาระบบ AAC (Autoclaved Aerated Concrete) ผลิตขึ้นมาจากส่วนผสมของ วัสดุดิบ ทราย น้ำ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ยิบซั่ม และผงอลูมิเนียมที่ใช้ก่ฟองอากาศ โดยการผสมสูตร ที่เหมาะสม และผ่านการอบด้วยไอน้ำความดันสูง ทำให้มีฟองอากาศมากถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตร จึง ทำให้วัสดุ AAC เบากว่าน้ำ (ลอยน้ำ) โดยมีน้ำหนักระหว่าง 400 - 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เทียบกับ คอนกรีตทั่วไปที่ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ อลูมิเนียมที่ 1350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ปัจจุบันมีการผลิตคอนกรีตมวลเบาทั้งแบบ Autoclaved Aerated Concrete (AAC) และ แบบ Cellular Lightweight Concrete (CLC) ซึ่งมีคุณสมบัติความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3. ความแตกต่างระหว่างคอนกรีตมวลเบาระบบ AAC กับ CLC

ข้อแตกต่าง	AAC (Autoclaved Aerated Concrete)	CLC (Cellular Lightweight Concrete)
ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย	สูงกว่า ต้องใช้พลังงานสูงในบวนการ อบผลิตภัณฑ์ด้วยไอน้ำที่แรงดันสูง เข้าเตาอบAutoclave) เพื่อให้คอนกรีต แข็งตัว	จะประหยัดกว่ามากคอนกรีตแข็งตัว ตามธรรมชาติได้เอง และ เกิดความสึกหรอสูง
มวลผสม	ต้องมีการบดทราย	ไม่ต้องมีการบดทราย ให้สิ้นเปลือง พลังงาน
การทำให้เกิดฟองอากาศ	ใช้ผงอลูมิเนียม ทำให้เกิดฟองอากาศ	ใช้น้ำยา ทำให้เกิดฟองอากาศ
การดูดซึมน้ำ (โดยปริมาตร)	30-35%	18-25%
ค่าความหนาแน่น	400 - 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	300 - 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
วัตถุดิบ	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย น้ำ และ น้ำยา	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย น้ำ ปูนขาว ยิบซั่ม และผงอลูมิเนียม
ปริมาณการผลิต	ผลิตได้จำนวนมาก	ผลิตได้ค่อนข้างน้อย
มาตรฐานการผลิต	การผลิตค่อนข้างแน่นอน	การผลิตมีความแน่นอนน้อยกว่า
การขึ้นรูป	ขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้	ขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ยากกว่า

2.2.2. คอนกรีตอัดแรง (Prestress)

คอนกรีตอัดแรง (Prestress) หมายถึง การให้ความเค้น (stress) แก่องค์อาคาร (member) แม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรง คือ คอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเสริมเหล็ก โดยเพียงแต่วางเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการ แต่ในคอนกรีตอัดแรง เหล็กเสริมกับคอนกรีตจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่วางเหล็กที่ยังมิได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยเหล็กจะถูกดึงค้ำไว้บนคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความ

เค้นอัด ส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง สภาพเช่นนี้จะทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงหน่วยแรงดึงสูงๆ และคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุประรับแรงอัดได้ดี แต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต

2.2.2.1. วิธีการอัดแรงคอนกรีตอัดแรงชนิดเค้นเหล็กก่อน (Pretensioned Concrete)

การเค้นเหล็กจะกระทำก่อนการหล่อคอนกรีต เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกเค้นค้างไว้ที่แบบที่ระหว่างที่ค้ำ (fixed abutment) ที่ปลายทั้งสองข้าง หลังจากที่ได้ติดตั้งไม้แบบตามรูปแบบที่ออกแบบไว้แล้ว ก็จะหล่อคอนกรีตลงในไม้แบบซึ่งมีเหล็กเสริมอัดแรงที่เค้นค้างไว้ ทำการบ่มคอนกรีตจนคอนกรีตมีกำลังสูงถึงค่าที่ต้องการ จากนั้นก็ทำการตัดเหล็กเสริมอัดแรงที่ปลายทั้งสองข้าง เหล็กเสริมอัดแรงพยายามที่จะหดตัวลง คอนกรีตจึงถูกอัดโดยเหล็กเสริมอัดแรงนี้ การอัดแรงเกิดขึ้นโดยการถ่ายแรงผ่านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรง

คอนกรีตอัดแรงชนิดเค้นเหล็กก่อน เหมาะสำหรับการผลิตในโรงงาน ในทางปฏิบัติสามารถผลิตชิ้นงานพร้อมกันหลาย ๆ ชิ้นได้โดยการใช้ช่วงห่างระหว่างที่ค้ำมาก ๆ และหล่อชิ้นงานพร้อมกันหลาย ๆ ชิ้น

2.2.2.2. ข้อกำหนดในการออกแบบ

การออกแบบคอนกรีตอัดแรง มีขั้นตอนมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เนื่องจากการที่มีขั้นตอนการทำงานที่มากกว่า การออกแบบต้องครอบคลุมถึงความปลอดภัยของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกและการเสียรูป (deformation) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างและการทำงาน รวมทั้งต้องมีความคงทน (durability) เพียงพอตลอดอายุการใช้งานด้วย โดยปกติขั้นตอนการออกแบบ ต้องมีการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้าง ภายใต้สถานะ 2 ประเภท ดังนี้

ก) สถานะการใช้งาน (service state)

ที่สถานะการณ์ใช้งาน โครงสร้างต้องมีความสามารถในการใช้งานได้ตามกำหนด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กจะต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ การโก่งตัว การแตกร้าว และการกัดกร่อนต้องไม่มากเกินไปที่กำหนด

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต สำหรับโครงสร้างรับแรงคด หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง และระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ ดังนี้

ตารางที่ 2.4. หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงคด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต อัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

<p>ก) หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริมอัดแรง ก่อนการเสื่อมถดของแรงดึง อันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage) การคืบของคอนกรีต (creep) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation) ต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้</p>	
<p>หน่วยแรงอัด</p> <ul style="list-style-type: none"> - สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรง เป็นรูปสามเหลี่ยม (triangular distribution of prestress) - สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรงเท่า ๆ กันตลอดหน้าตัดขององค์อาคาร (uniform distribution of prestress) 	<p>$0.60f_{ci}'$</p> <p>$0.45 f_{ci}'$</p>
<p>หน่วยแรงดึง</p> <ul style="list-style-type: none"> - สำหรับองค์อาคารที่ไม่เสริมเหล็กเสริมธรรมดาชนิดเหนียว (bonded reinforcement) ในการช่วยรับแรงดึง - สำหรับองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมธรรมดาชนิดเหนียว ซึ่งจะต้องเสริมเหล็กชนิดเหนียวให้สามารถรับแรงดึงทั้งหมดในส่วนของคอนกรีตที่เกิดหน่วยแรง (tensile zone) โดยที่แรงดึงคำนวณจากสมมติฐานของหน้าตัดไม้แตกร้าว 	<p>$0.80\sqrt{f_{ci}'}$ ksc</p> <p>$1.60\sqrt{f_{ci}'}$ ksc</p>
<p>ข) หน่วยแรงในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (หลังการเสื่อมถดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง) ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงอัด	
-กรณี โครงสร้างรับหน่วยแรงเนื่องจากแรงดัด	$0.45f'_c$
-กรณี โครงสร้างรับหน่วยแรงอัดโดยตรง (direct compression)	$0.30f'_c$
หน่วยแรงดึง	
-หน่วยแรงดึงในบริเวณคอนกรีตซึ่งถูกอัดแรงมาก่อน (precompressed tensile zone)	$1.60\sqrt{f'_c}$ ksc
-สำหรับองค์อาคารซึ่งไม่ใช่ชนิดไม่ยึดเหนี่ยว หากค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินกว่าค่าที่กำหนดให้ข้างต้น อาจจะใช้เหล็กเสริมธรรมดาชนิดยึดเหนี่ยวให้เพียงพอเพื่อควบคุมความกว้างของรอยแตกกว้างไม่เกิน 0.2 มม. สำหรับองค์อาคารทั่วไป และไม่เกิน 0.1 มม. สำหรับองค์อาคารที่อาจได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อน (corrosive atmosphere)	

โดยที่ f'_{ci} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น ksc

f'_c คือ กำลังประลัยของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น ksc

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.5. หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้	
- ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก	$0.94f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.80f_{pu}$ หรือค่าสูงสุดที่แนะนำโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงหรือสมอยึด
- ทันทีก่อนถ่ายแรงเข้าสู่อาคาร	$0.70f_{pu}$

โดยที่ f_{py} คือ กำลังคดาก (yield strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น ksc
 f_{pu} คือ กำลังประลัย (breaking strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น ksc

ข) สถานะประลัย (Ultimate state)

เป็นสถานะที่โครงสร้างสิ้นสุดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์ที่สถานะนี้เป็น การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเกินน้ำหนักบรรทุก (overload) ก่อนที่โครงสร้างจะพัง ซึ่งในการออกแบบจะต้องมีค่าตัวคูณน้ำหนัก (load factor) ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณน้ำหนักดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6. ค่าตัวคูณน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

$$U = 1.4D + 1.7L \quad \text{— 1.1}$$

โดยที่ U คือ กำลังที่ต้องการ (required strength)

D คือ ผลของน้ำหนักคงที่

L คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกจร

ถ้าพิจารณาผลของแรงลมร่วมด้วย จะต้องหาค่ากำลังที่ต้องการ จากค่าสูงสุดของทั้งสามสมการ คือ 1.1-1.3

$$U = 0.759 (1.4D + 1.7L + 1.7W) \quad \text{— 1.2}$$

$$U = 0.9D + 1.4W \quad \text{— 1.3}$$

โดยที่ W คือ ผลของแรงลม

ในการออกแบบจะต้องออกแบบให้กำลังที่ออกแบบ (design strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (required strength) โดยที่กำลังที่ออกแบบหาได้จากการคูณกำลังระบุ (nominal strength) ด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง สำหรับกรณีต่าง ๆ ดังในตาราง

กำลังที่ต้องการ	≤	กำลังที่ออกแบบ
M_u	≤	ϕM_n
P_u	≤	ϕP_n
V_u	≤	ϕV_n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

M_u, P_u, V_u	คือ	กำลังที่ต้องการของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
$\phi M_n, \phi P_n, \phi V_n$	คือ	กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
M_n, P_n, V_n	คือ	กำลังระบุของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
ϕ	คือ	ตัวคูณลดกำลัง

ตารางที่ 2.7. แสดงค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับกรณีต่าง ๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

	ϕ
-กรณีของแรงดัด อาจมีหรือไม่มีแรงดิ่งในแนวแกน	0.90
-กรณีของแรงดิ่งในแนวแกน	0.90
-กรณีของแรงอัดหรือแรงอัดร่วมกับแรงดัด	
สำหรับชิ้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเกลียว	0.75
สำหรับชิ้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว	0.70
-กรณีของแรงเฉือนและแรงบิด	0.85
-กรณีของแรงกด	0.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3. คอนกรีตมวลเบาในงานคอนกรีตอัดแรง

การนำคอนกรีตมวลเบามาใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงเพื่อเหตุผลในการลดน้ำหนักตายตัวของโครงสร้าง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าวัสดุรวมถึงฐานของอาคาร นอกจากนี้ในกรณีน้ำหนักขององค์อาคารเป็นอุปสรรคในการขนส่งและการก่อสร้าง วิศวกรอาจเลือกใช้คอนกรีตมวลเบา โดยการพิจารณาคุณสมบัติเกี่ยวกับกำลังอัดประลัย โมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง กำลังดึง ผลของการคืบและการหดตัวดังต่อไปนี้

2.2.3.1. กำลังอัดประลัย

การควบคุมส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาให้มีกำลังอัดประลัยระหว่าง 35-50 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงสามารถทำได้ โดยขณะถ่ายแรงอัดคอนกรีตจะมีกำลังอัดประมาณ 28 นิวตัน/มม.² หรือ 285 กิโลกรัม/ซม.² ในเวลา 1 - 3 วัน ได้โดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 และการบ่มคอนกรีต

2.2.3.2. โมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง

คอนกรีตมวลเบาที่มีข้อเสียเปรียบคือ โมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำโดยเกณฑ์เฉลี่ยคอนกรีตมวลเบา มี E_c เป็น 55 เปอร์เซ็นต์ของคอนกรีตธรรมดา สำหรับ E_c ตามมาตรฐาน ACI code ใช้ได้สำหรับคอนกรีตมวลเบา ค่าโมดูลัสต่ำของคอนกรีตมวลเบาทำให้เกิดการสูญเสียแรงอัดสูง นอกจากนี้องค์อาคารจะเกิดการหดตัวทันทีขณะที่ทำการถ่ายแรงมากกว่าคอนกรีตมวลธรรมดากรณีที่แรงอัดคานเท่ากัน นอกจากนี้การแอ่นตัวขององค์อาคารของคอนกรีตมวลเบาจะมีค่ามากกว่า สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซอง คอนกรีตมวลเบาและคอนกรีตมวลธรรมดา มีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปัวซองเท่ากัน

2.2.3.3. กำลังดึง

กำลังดึงของคอนกรีตมวลเบา มีค่าแตกต่างกันตามชนิดของมวลละเอียดที่ใช้ในส่วนผสมในการออกแบบควรทำการทดลองหาลำกำลังดึงจากตัวอย่างจริงมาตรฐาน ACI code กำหนดให้ใช้ค่ากำลังดึงที่ได้จากการกดแท่งกระบอกแนวอน (splitting tensile strength, f_{ct}) ในการวิเคราะห์การแตกร้าวและกำลังเฉือนขององค์อาคารคอนกรีตมวลเบา เกณฑ์เฉลี่ยของ f_{ct} เป็น $0.33\sqrt{f'_c}$ สำหรับคอนกรีตมวลเบา

2.2.3.4. การคืบและการหดตัว

ความเครียดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลธรรมดา ผลของการวิจัยพบว่าความเครียดการหดตัวสูงกว่าในคอนกรีตมวลธรรมดา 6-38 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจจะต่ำกว่า สำหรับการคืบก็เช่นเดียวกันความเครียดการคืบในคอนกรีตมวลเบา มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลธรรมดา โดยมีช่วงการแตกต่างกันไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ อาจกล่าวได้ว่าการคืบหรือการหดตัวเกี่ยวข้องกับเนื้อซีเมนต์เหลวและไม่ขึ้นชนิดของมวลคละที่ใช้

2.2.4. ลวดอัดแรง (Prestressing wire)

ลวดอัดแรงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A421 ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติขั้นต่ำของลวดได้แก่ กำลังดึงประลัย กำลังคลากและค่ายึดตัวขณะขาด ในการออกแบบค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของลวดอัดแรง อาจใช้ค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^6 กก./ซม 2.4×10^6 กก./ซม² ลวดอัดแรงที่ใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ชนิดปลายยึดเป็นปม (Type BA) ลวดชนิดนี้ปลายลวดจะเป็นปม (bottom anchorage) เพื่อช่วยในการยึดจับปลาย ลวดชนิดนี้นิยมมากในอเมริกา
2. ชนิดปลายยึดเป็นลิ้ม (Type WA) ลวดชนิดนี้ใช้การยึดจับปลายด้วยลักษณะของลิ้ม (wedge anchorage) ไม่มีการทำปมที่บริเวณปลาย ลวดชนิดนี้นิยมใช้การทั่วไปในประเทศไทย

ตารางที่ 2.8. คุณสมบัติของลวดยึดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.(นิ้ว)	กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ซม ² (ปอนด์/นิ้ว ²)		กำลังครากอย่างน้อยที่สุด(ที่1%หน่วย การยึดตัว)กก.ซม ² (ปอนด์/นิ้ว)	
		ชนิดปลายยึดเป็น ปม	ชนิดปลายยึดเป็น ลิ่ม	ชนิดปลายยึดเป็น ปม	ชนิดปลายยึดเป็น ลิ่ม
4.88(0.192)	1.870(0.029)	-	17,580(250,000)	-	14,060(200,000)
4.98(0.196)	19.48(0.030)	16,870(240,000)	17,580(250,000)	13,500(192,000)	14,060(200,000)
6.35(0.250)	31.67(0.049)	16,870(240,000)	16,870(240,000)	13,500(192,000)	13,500(192,000)
7.01(0.276)	38.59(0.060)	-	16,520(235,000)	-	13,220(188,000)

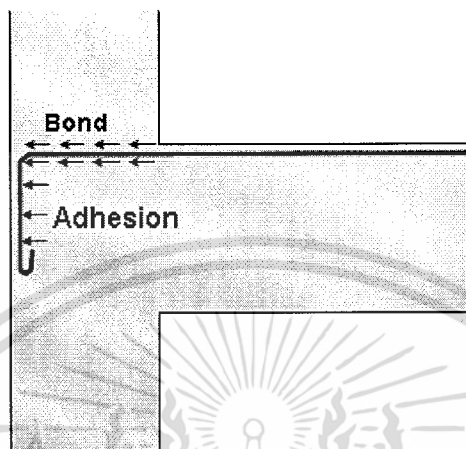
2.2.5. แรงยึดเหนี่ยว (Bond Strength)

โครงสร้างคอนกรีตทั่วไปมักมีการเสริมเหล็กเพื่อช่วยในการรับแรง ดังนั้นกำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ของคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เพียงพอจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงหรือถ่ายแรงได้เต็มประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้

กำลังในการยึดเหนี่ยวเกิดจากการยึดติด (Adhesion) และแรงเสียดทาน (Friction) ของเหล็กเสริมกับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยว เช่น

- ขณะที่คอนกรีตได้รับการบ่มและแข็งตัวจะเกิดการหดตัว ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง
- คอนกรีตมีการแตกร้าวหรือน้ำซึมผ่านได้ง่ายก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง

- ตำแหน่งในการเสริมเหล็ก เช่น บริเวณใต้เหล็กบนอาจมีช่องอากาศเนื่องจากการเข็ม ทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง
- การใส่สารผสมเพิ่ม เช่น สารกักกระจายฟองอากาศ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิด Bond และ Adhesion ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

นอกจากนี้ชนิดของซีเมนต์ ขนาดของเหล็กเสริม ชนิดของเหล็กเสริม หน้าที่ในการรับแรงของเหล็กเสริม (รับแรงดึง แรงอัดหรือแรงค้ำ) การจี้เขย่าวบริเวณเหล็กเสริมและสภาวะแวดล้อมต่างก็มีผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวทั้งสิ้น

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวด้วยการดึง (Bond Pull Out Test) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาเปรียบเทียบค่ากำลังในการยึดเหนี่ยวของคอนกรีต ซึ่งทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม. แล้วฝังเหล็กเสริมไว้ เมื่อคอนกรีตมีอายุตามต้องการก็ทำการดึงเหล็กเสริมออกด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง วัดระยะเลื่อนไถลในขณะที่ยึดออกแรงดึงที่เหล็กนั้น แล้วนำมาเขียนกราฟระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถล การทดสอบกระทำจนกว่าแรงที่ใช้ดึงที่เหล็กมีค่าเท่ากับกำลังฉุดครากของเหล็กนั้น หรือ เมื่อคอนกรีตเริ่มชำรุดแยกออกจากกัน หรือ จนกระทั่งระยะเลื่อนไถลมีค่ามากกว่า 2.5 มม. การคำนวณหาค่ากำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength) หาได้จากแรงดึงหารด้วยพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับคอนกรีต

ในทางปฏิบัติถือว่า กำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีต (Bond Strength) มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต คือ เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นตาม และกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยจะมากกว่าเหล็กกลม และกำลังยึดเหนี่ยวจะลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ไม่เท่า

2.3. การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา

รณชัย รักรวงศ์, วัชระ มณีวงศ์ และ ศิริพงษ์ พรหมศาสตร์, อิทธิพลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบา, ปรินญาณิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

ได้ทำการวิจัย อิทธิพลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตเบาที่ทำขึ้นจากวัสดุผสมต่าง ๆ จะมีน้ำหนักต่างกันมาก ซึ่งอาจมีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 3- 400 ksc กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ถ้าหน่วยน้ำหนักสูง กำลังต้านทานแรงอัดก็สูงด้วย ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็มีส่วนต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเช่นกัน คอนกรีตเบาที่ผลิตโดยวิธีผงอลูมิเนียมจะรับกำลังได้น้อยและความหนาแน่นจะน้อยลงผสมปริมาณผงอลูมิเนียมที่ใส่ลงไป

ณะถิษา หล้าหลั่น และ ศุภัญญกานต์ รัตนพงศ์, การผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ตะกอนประปา, ปรินญาณิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.

ได้ทำการศึกษาวิธีการใช้ตะกอนประปา เพื่อนำมาเป็นส่วนผสมในการแปรรูปให้เป็นคอนกรีตมวลเบา โดยทำการศึกษาข้อมูลของตะกอนประปา แล้วจึงทำการทดสอบคุณสมบัติของตะกอนประปา โดยนำไปหาสัดส่วนในการผสมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ตะกอนประปาเป็นส่วนผสม ได้ทำการออกแบบสัดส่วนการผสมไว้ 10 แบบการผสม ในแต่ละแบบการผสมจะมีสัดส่วนของตะกอนประปามากน้อยตามแบบการผสม เมื่อทำการผสมและขึ้นรูปคอนกรีตมวลเบา ได้นำไปทำการทดสอบคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด อัตราการซึมน้ำ นำผลการทดสอบมาสรุปผลและทำการวิเคราะห์ผลเพื่อสรุปผลการทดสอบหาปริมาณสัดส่วนในการผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ตะกอนประปาเป็นส่วนผสมได้จริง

ชาติชาย พรหมวงศ์, นายศาสวัต เอี่ยมโหมด และ วิไลรัตน์ สุขศรี , อิทธิพลของโพนที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเบา, ปรินญาณีพันธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.

เป็นการศึกษาอิทธิพลของโพนที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีตเบา โดยใช้นํ้ายาเคมีทำให้เกิดฟองอากาศก่อนแล้วจึงนำไปผสมกับซีเมนต์และนํ้า มีผลทำให้ความหนาแน่นลดลง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาคอนกรีตเบาเพื่อนำไปใช้ในงานโครงสร้าง ซึ่งมีความหนาแน่นระหว่าง 1,400 - 1,800 กก./ลบ.ม. และกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน มากกว่า 180 กก./ตร.ซม. ทดลองโดยใช้อัตราส่วนนํ้าต่อซีเมนต์ที่ 0.3 , 0.4 โดยทำการทดลองผสมโพนที่ได้จากนํ้ายาแต่ละตัวลงไปใ้คอนกรีต โดยการปรับปริมาณฟองอากาศที่ใช้เพื่อให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงไปอยู่ในช่วงที่ต้องการ แล้วทำการทดสอบว่าคอนกรีตผสมกับฟองอากาศตัวใดแล้วให้คุณสมบัติเหมาะสมที่สุด ใช้ซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าโดยใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ:1 โดยทำการทดสอบคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด อัตราการซึมผ่าน การยึดหดตัว และการบ่มด้วยนํ้า ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถนำไปออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตเบาสำหรับงานโครงสร้างได้ โดยการปรับลดอัตราส่วนนํ้าต่อซีเมนต์ ปริมาณฟองอากาศและปริมาณทรายให้เหมาะสม ที่อัตราส่วนนํ้าต่อซีเมนต์ 0.3 เริ่มการทดลองโดยการผสมซีเมนต์เพสต์กับฟองอากาศ โดยการปรับปริมาณฟองอากาศที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์เพื่อให้ได้ความหนาแน่นอยู่ระหว่างช่วงที่ต้องการ

กาญจนา ออมกระโทก และ อาริรัตน์ สุทธิ , วัสดุผสมสำหรับคอนกรีตเบา, ปรินญาณีพันธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.

ได้ศึกษาถึงวัสดุที่สามารถนำมาผสมกับคอนกรีตในการทำคอนกรีตนํ้าหนักเบา ทั้งที่เป็นชนิดแทนมวลรวมหยาบและแทนมวลรวมละเอียด ในการทำโครงการนี้ ได้นำวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และเป็นวัสดุเหลือใช้ มาใช้ให้เกิดประโยชน์คือ อิฐหัก เป็นวัสดุที่ได้จากการรื้อถอนอาคาร จี้เหล็ย เป็นวัสดุที่ได้จากการแปรรูปไม้และ โพน เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและกำลังเป็นที่สนใจในการนำมาผสมคอนกรีตเพื่อทำคอนกรีตมีน้ำหนักเบา วัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้นำมาผสมกับ ทราย ซีเมนต์ และหิน เป็นคอนกรีต โดยใช้สัดส่วนต่าง ๆ กัน แล้วนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมซึ่งเป็นการแนะนำวัสดุชนิดใหม่ เพื่อใช้แทนทรายหรือหิน ที่มีอยู่ตามธรรมชาติซึ่งคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ไพศาล ลีลาเลอเกียรติ , *แรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตผสมเถ้าลอยหล่อแบบแรงเหวี่ยง*, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.

ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและลวดอัดแรงชนิดมีร่อง (Indented Wire) โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 20 และ 25 และปูนซีเมนต์ MPC 30 ที่อายุการบ่ม 1, 3 และ 7 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.45, 0.55 และ 0.65 และใช้สารลดน้ำอย่างมาก 1 เปอร์เซ็นต์และใช้น้ำควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 3-5 เซนติเมตร พบว่าทั้งกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนที่มีความเหมาะสมในด้านกำลังคือที่ปริมาณเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 จะมีแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ประมาณ 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเส้นไถล 0.25 มิลลิเมตร และประมาณ 50 – 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับที่แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด การหล่อแบบแรงเหวี่ยงทำให้กำลังรับแรงอัดแรงยึดเหนี่ยว และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 9 – 20%, 15 – 25%, 2 – 10% ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะการหล่อแบบแรงเหวี่ยงบีบน้ำออกจากคอนกรีตทำให้ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและทำให้คอนกรีตมีช่องว่างลดลง

ศิวะ วาสาลา, *อิทธิพลของ Foaming Agent ระบบ CLC ที่มีต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตเสริมเหล็ก*, วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

ได้ศึกษาอิทธิพลของโฟมที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ในคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC ซึ่งใช้น้ำยาเคมีทำให้เกิดโฟมก่อนแล้วจึงนำไปผสมกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลง โดยมุ่งเน้นการพัฒนาคอนกรีตเบาเพื่อใช้ในงานโครงสร้าง ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 1,200 – 2,000 กก./ม³. และสามารถรับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันมากกว่า 180 กก./ชม². ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.4 และ 0.5 และใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายโดยน้ำหนัก ที่ 1:1 ทำการทดสอบคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด การหดตัวและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ผลการทดลอง พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมโฟมซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 1,200 – 2,000 กก./ม³. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 100 - 450 กก./ชม² ส่วนมอร์ตาร์ผสมโฟมจะมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 100-350 กก./ชม² การหดตัวมีค่าอยู่ในช่วง 778×10^{-6} – 1012×10^{-6} และ 393×10^{-6} - 649×10^{-6} ในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ ตามลำดับ และค่าแรงยึดเหนี่ยวในส่วนของมอร์ตาร์มีค่าระหว่าง 25.83 – 47.49 กก./ชม²

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.1. การออกแบบการทดลอง

1. กำหนด Unit weight ที่ 1500 , 1600 , 1700 , 1800 kg/m³ และ มอร์ต้า โดยกำหนดทดสอบกำลังรับแรงอัดและ แรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ที่ 3, 7 และ 28 วัน

2. w/c 0.4 , อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1 : 1 , Foaming Agent G-S

3. ใช้ เหล็ก RB 6 mm และ ลวด PC wire 5 mm ในการทดสอบ

4. ทำคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง

3.1.1. การคำนวณส่วนผสม (Mix design)

สำหรับ ทดสอบกำลังรับแรงอัด $(0.05 \times 0.05 \times 0.05) \times 9 = 0.0304$ ลูกบาศก์เมตร

สำหรับทดสอบแรงยึดเหนี่ยว $(0.15 \times 0.15 \times 0.15) \times 9 = 0.0011$ ลูกบาศก์เมตร

รวมปริมาตร $0.0304 + 0.0011 = 0.0315$ ลูกบาศก์เมตร

ค่าเผื่อ 20 % $0.0315 \times 1.2 = 0.0378$ ลูกบาศก์เมตร

ที่ Unit weight 1500 kg/m³

มอร์ต้ามีปริมาตร	0.0378×1500	=	56.7	ลูกบาศก์เมตร
ใช้ ปูน	56.7/2	=	28.35	กิโลกรัม
ทราย	56.7/2	=	28.35	กิโลกรัม
น้ำ	28.35×0.4	=	11.34	กิโลกรัม

ที่ Unit weight 1600 kg/m³

มอร์ต้ามีปริมาตร	0.0378×1600	=	60.48	ลูกบาศก์เมตร
ใช้ ปูน	$60.48/2$	=	30.24	กิโลกรัม
ทราย	$60.48/2$	=	30.24	กิโลกรัม
น้ำ	30.24×0.4	=	12.096	กิโลกรัม

ที่ Unit weight 1700 kg/m³

มอร์ต้ามีปริมาตร	0.0378×1700	=	64.26	ลูกบาศก์เมตร
ใช้ ปูน	$64.26/2$	=	32.13	กิโลกรัม
ทราย	$64.26/2$	=	32.13	กิโลกรัม
น้ำ	32.13×0.4	=	12.852	กิโลกรัม

ที่ Unit weight 1800 kg/m³

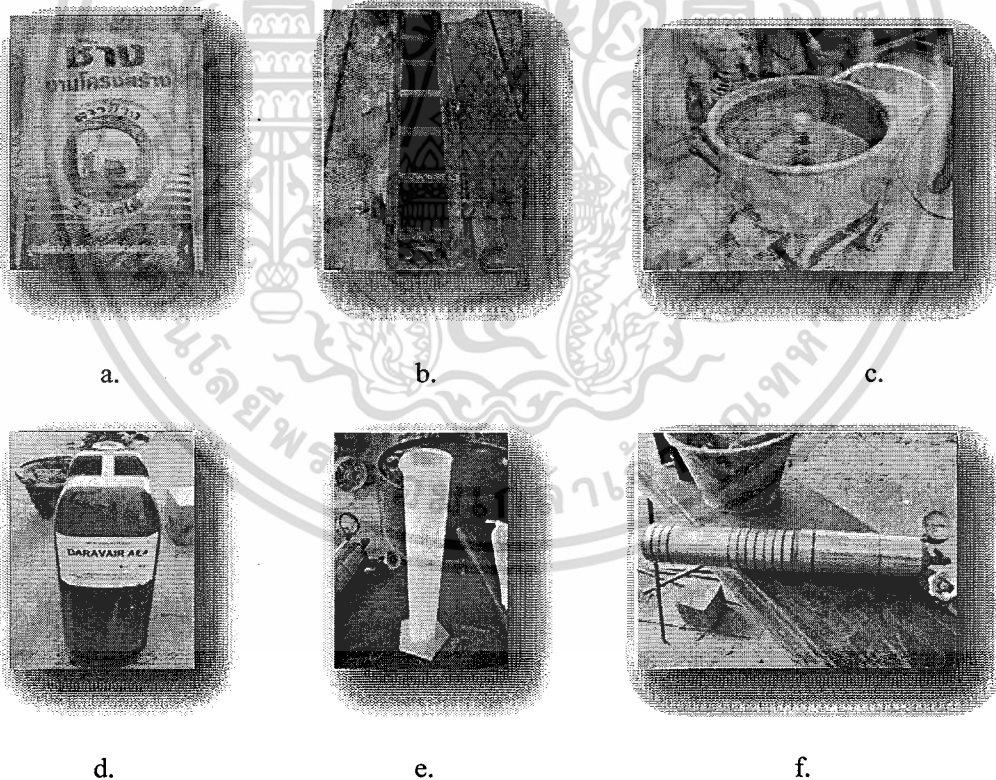
มอร์ต้ามีปริมาตร	0.0378×1800	=	68.04	ลูกบาศก์เมตร
ใช้ ปูน	$68.04/2$	=	34.02	กิโลกรัม
ทราย	$68.04/2$	=	34.02	กิโลกรัม
น้ำ	34.02×0.4	=	13.608	กิโลกรัม

3.2. วิธีการทดสอบหาค้างอัด

3.2.1. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำ
3. น้ำยาโฟม G-S
4. แบบหล่อขนาด 5 cm. × 5 cm. × 5 cm.
5. เครื่องไม้
6. เครื่องฉีดโฟม
7. เครื่องชั่ง
8. กระบอควงปริมาตร 0.5 litre

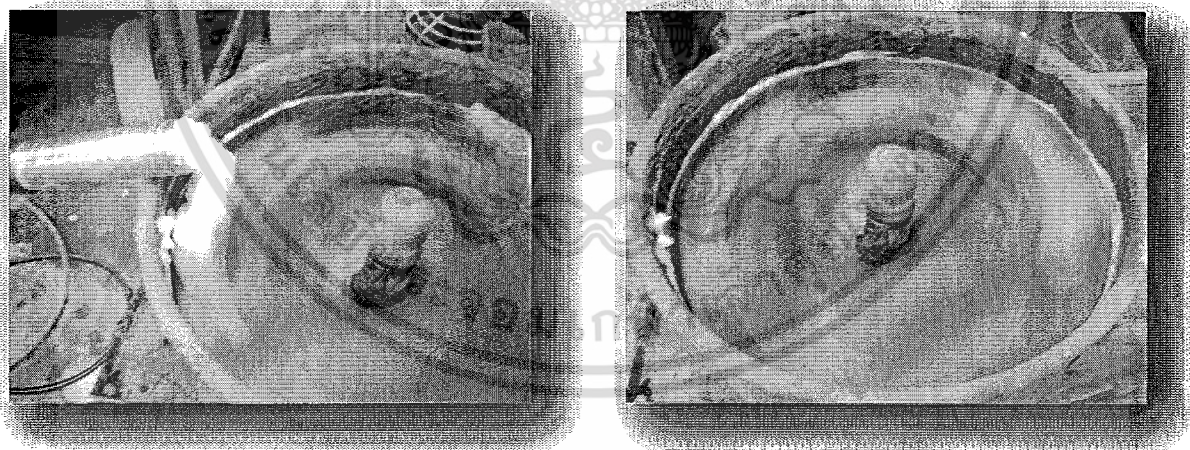


รูปที่ 3.1 รูปอุปกรณ์ที่ใช้ a. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 , b. แบบหล่อขนาด 5 cm.× 5 cm.× 5 cm. , c. เครื่องไม้ , d.น้ำยาโฟม G-S , e. กระบอควงปริมาตร 0.5 litre และ f. เครื่องฉีดโฟม

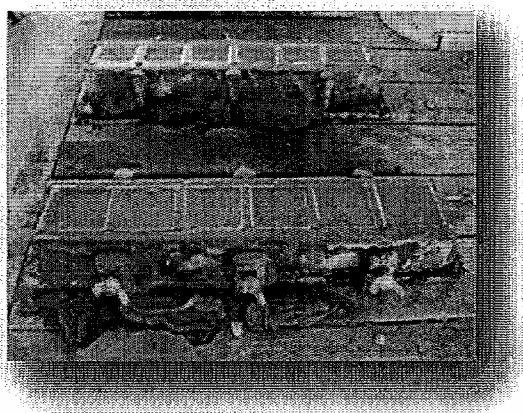
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2. วิธีการดำเนินงาน

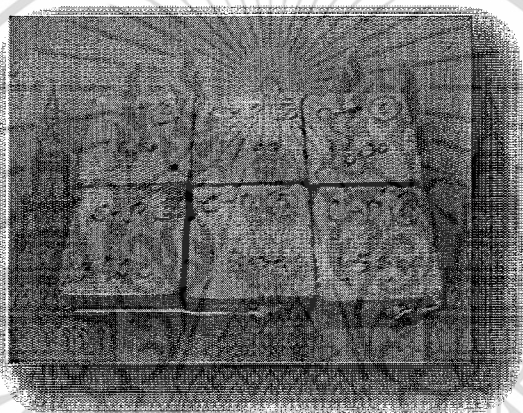
1. ทำการคำนวณปริมาณปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ นํ้ายาโพม ตามที่กล่าวมาข้างต้น
2. ผสมปูนซีเมนต์กับทรายในโม้แล้วทำการปั่นให้เข้ากัน จากนั้นจึงผสมน้ำกับปูนซีเมนต์และทรายในโม้ นํ้ายาโพมที่ได้จากการผสมกันน้ำตามอัตราส่วน มาทำการผสมในโม้จนกว่าโพมและซีเมนต์เพสต์จะเข้ากันดี แต่ไม่ควรใช้เวลาในการผสมเกิน 5 นาที
3. เทมอร์ดำที่ได้ลงในแบบหล่อขนาด 5cm.×5cm.×5cm. ในแต่ละกรณีใช้ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่ 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน
4. จากนั้นทำการเคาะแบบเพื่อให้มอร์ดำเข้าแบบได้ดีขึ้น จากนั้นปาดแต่งผิวหน้าด้วยเกรียงให้เรียบร้อย
5. ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วจึงทำการแกะแบบ จากนั้นจึงนำไปบ่มน้ำ
6. เมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุครบตามกำหนดแล้วนั้นให้นำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำ



รูปที่ 3.2 การผสม โปมกับซีเมนต์เพสต์



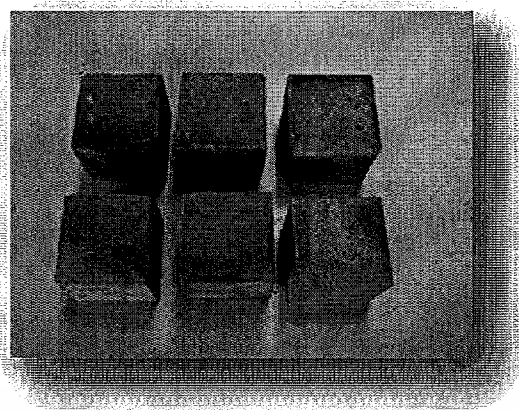
รูป 3.3 มอร์ต้าที่ทำการปาดแต่งผิวหน้า



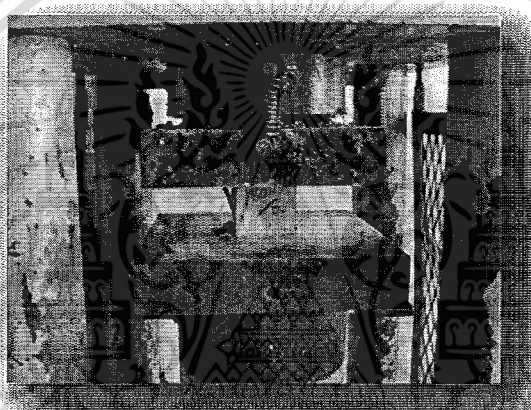
รูปที่ 3.4 การบ่มแห้งตัวอย่าง

3.2.3. การทดสอบ

1. เมื่อนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้ว ทิ้งไว้ให้น้ำระเหยออกจนแห้ง ถ้าอากาศชื้นอาจต้องนำเข้าสู่ตู้อบ
2. ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM : C 109-92



รูปที่ 3.5 รูปตัวอย่างก่อนการทดสอบ



รูปที่ 3.6 การกดทดสอบ



รูปที่ 3.7 การวัดน้ำหนักของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ค่าความเค้นอัดประลัยของแท่งคอนกรีต จะหาได้จากสูตร

$$F = P/A$$

โดยที่

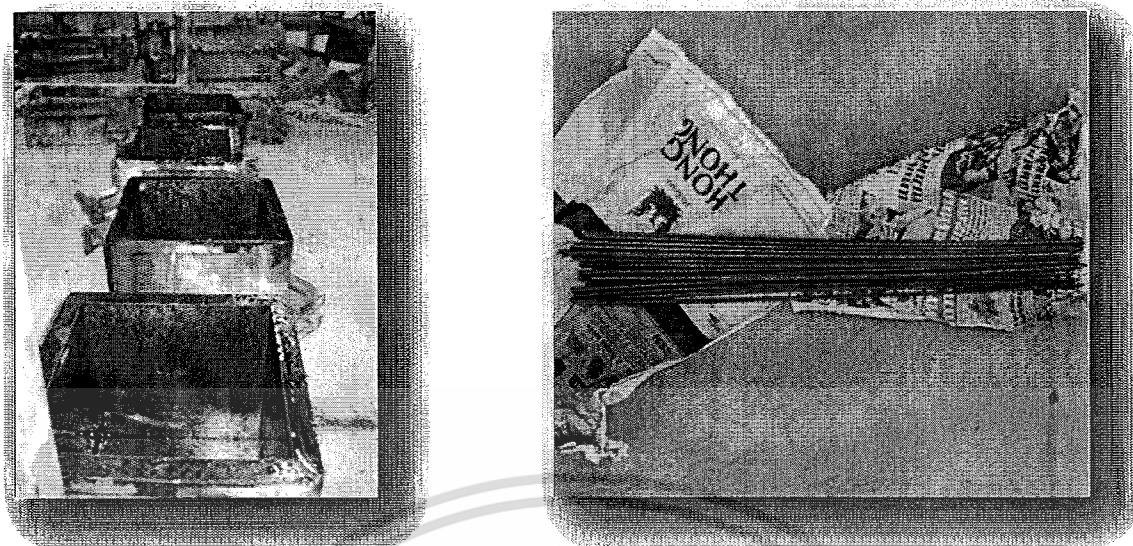
F	=	กำลังรับแรงอัด strength (ksc)
P	=	แรงกระทำสูงสุด (kg.)
A	=	พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกด (cm ²)

3.3. วิธีการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว

3.3.1. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำ
3. นํ้ายาโพม G-S
4. แบบหล่อขนาด 15cm.×15cm.×15cm.
5. เครื่องโม
6. เครื่องฉีดโฟม
7. เครื่องชั่ง
8. กระบอบกตวงปริมาตร 0.5 litre
9. เหล็ก RB 6 mm. และ ลวด PC wire 5 mm.
10. ตัวจับยึด (Clamp)
11. เหล็กหนา 1 เซนติเมตร
12. โครงเหล็ก



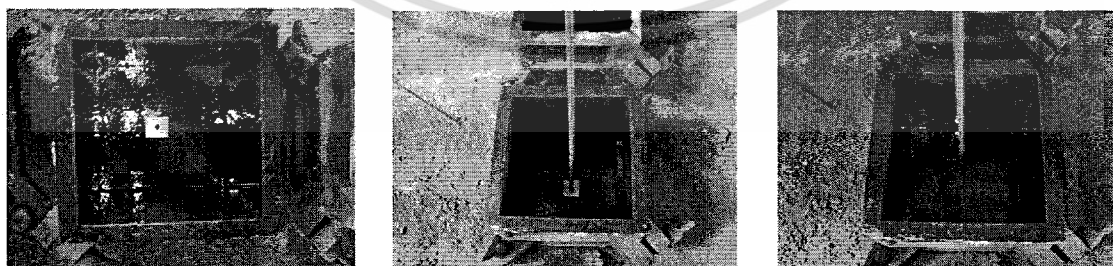
a.

b.

รูป 3.8 **ก.** แบบหล่อขนาด 15cm.×15cm.×15cm. และ **ข.** ลวด PC wire 5 mm.

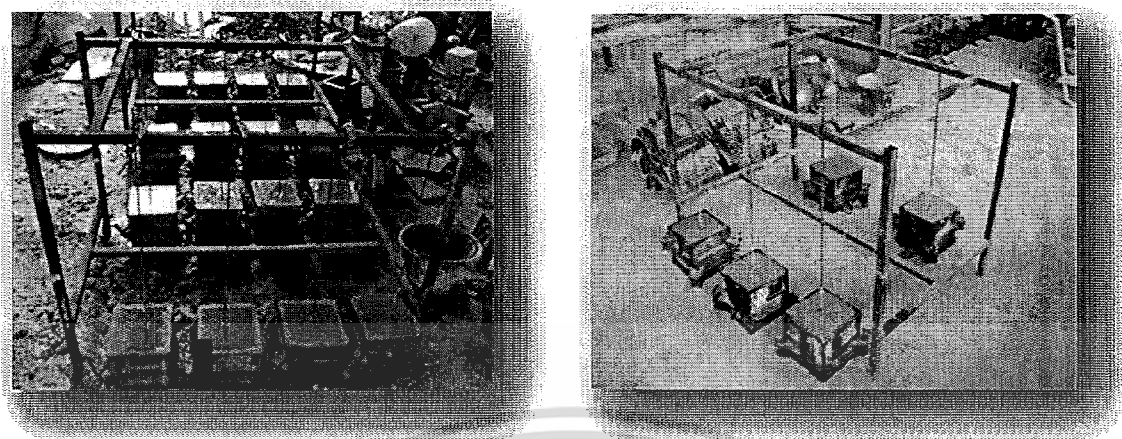
3.3.2. วิธีการดำเนินงาน

1. ใช้มอร์ต้าการผสมจากไม้เดียวกับที่ทดสอบกำลังรับแรงดัด โดยต้องสังเกตให้เหล็กหรือลวดที่ใช้ทดสอบตั้งตรงอยู่กลางแบบ และระยะฝั่ง 14 cm.
2. เทมอร์ต้าที่ได้ลงในแบบหล่อขนาด 15cm.×15cm.×15cm. ในแต่ละกรณีใช้ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่ 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน
3. จากนั้นทำการกระทุ้งมอร์ต้าเพื่อให้เข้าแบบได้ดีขึ้น แล้วปิดแต่งผิวหน้าด้วยเกรียงให้เรียบร้อย
4. ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วจึงทำการแกะแบบ จากนั้นจึงนำไปบ่มน้ำ
5. เมื่อตัวอย่างมีอายุครบตามกำหนดแล้วนั้นให้นำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำ

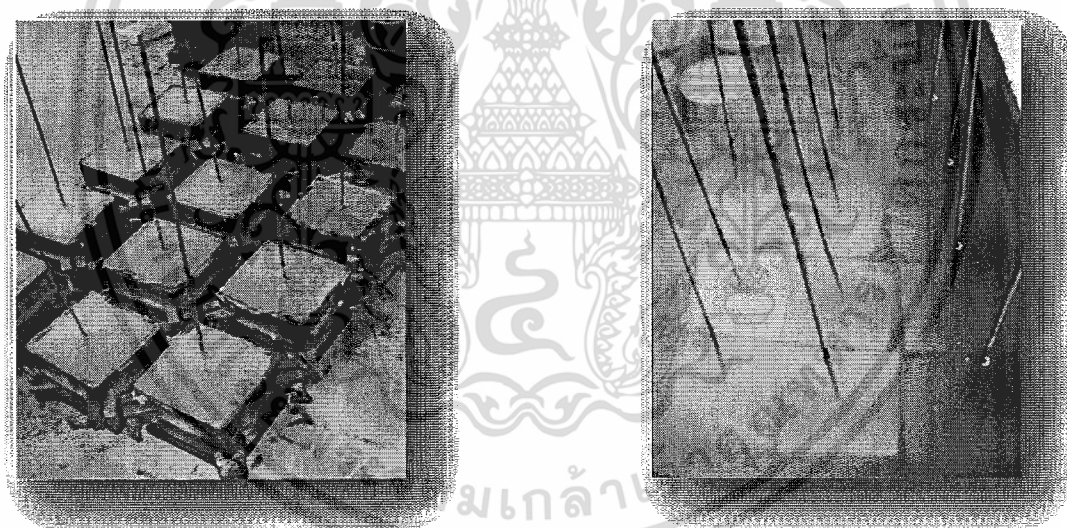


รูปที่ 3.9 การทำระยะฝั่ง 14 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การทดลองแบบ



a.

b.

รูปที่ 3.11 a. ตัวอย่างอายุ 24 ชั่วโมงก่อนแกะแบบ และ b. การบ่มตัวอย่างในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบ

1. นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วปล่อยให้แห้ง
2. ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบ ตาม มาตรฐาน ASTM : C 234 – 86



รูปที่ 3.12 การทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว

การคำนวณ

คำนวณหาค่าแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (Maximum Bond Strength) หาได้จาก

$$\text{Maximum Bond Strength} = \frac{P_{\max}}{\pi DL} \quad \text{ksc.}$$

โดยที่

P_{\max}	=	แรงดึงสูงสุด (กิโลกรัม)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหรือเหล็ก (เซนติเมตร)
L	=	ระยะฝัง (14 เซนติเมตร)

3.4. วิธีการทดสอบลวด PC wire 5 mm. และเหล็ก RB 6 mm.

3.4.1. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

1. การทดสอบแต่ละชุด ให้ใช้ชิ้นทดสอบ 3 ชิ้นซึ่งตัดมาจากชิ้นตัวอย่างต่างชิ้นกัน
2. สภาพชิ้นทดสอบจะต้องเป็นไปตามสภาพเดิมของเหล็กเส้นกลมสำเร็จรูปที่ทำขึ้น โดยไม่ผ่านกรรมวิธีความร้อนแต่อย่างใด และการตัดชิ้นทดสอบที่ปิดโค้งงอให้ตรงคืนนั้น จะต้องกระทำด้วยการตัดเย็นปกติ ถ้ามีการปิดโค้งงอเกินสมควรให้ตัดทิ้ง
3. เหล็กเส้นกลมตั้งแต่ RB 15 ลงมา ให้ทดสอบโดยไม่ต้องกลึงชิ้นทดสอบให้เล็กลง เหล็กเส้นกลมตั้งแต่ RB19 ขึ้นไป อาจกลึงลดขนาดลงให้พอเหมาะที่จะใช้กับเครื่องทดสอบแรงดึงก็ได้ แต่ไม่น้อยกว่า 15 mm. ในกรณีที่กลึงลดขนาด ความยาวของส่วนกลึงต้องไม่น้อยกว่า 5.5 (D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนที่กลึง)

4. ความยาวพิคคือ G ต้องเท่ากับ 5D

5. ความยาวระหว่างหัวจับคือ ระยะ P ปกติจะต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5.5D

3.4.2. วิธีการดำเนินงาน

1. ตัดเหล็กตัวอย่างประมาณ 60 cm วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยทั้งสองด้านด้วยเวอร์เนียร์ ชิดเส้นไปตามความยาวเหล็ก ตอกเครื่องหมายแบ่งเป็นช่องช่องละ 2.5 cm ทั้งหมด 8 ช่อง ยาว 20 cm และเพื่ออีก 2.5 cm.
2. นำเหล็กเข้าเครื่องทดสอบ ยึดปลายให้แน่น
3. ศึกษาการยึดตัวของเกจวัดการยึดตัวใน 1 ชิด (division) การยึดตั้งเท่ากับกิมิลลิเมตร จดค่าไว้ นำเกจวัดยึดตัวประกอบเข้ากับตัวอย่างเหล็กที่เครื่องทดสอบ ยึดปลายเหล็กให้แน่น ปรับค่าการอ่านเกจวัดการยึดตัวและเครื่องทดสอบเป็นศูนย์
4. เลือกการอ่านให้เหมาะสม อย่างน้อยต้องอ่านได้ 158 ค่า โดยอ่านค่าทุกยึดตัวทุกๆน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1000 N เริ่มให้น้ำหนักกระทำด้วยความเร็วต่ำ ระหว่างการทดสอบ สังเกตว่าเมื่อน้ำหนักกดบนเครื่องทดสอบหยุดนิ่งหรือไม่ ถ้าหยุดนิ่ง ให้อ่านน้ำหนักกระทำ แสดงว่าถึงจุดคราก (yield) แล้วจดบันทึกค่าไว้ ให้น้ำหนักกระทำต่อไป และเมื่อเข็มของเกจวัดความยึดตัวอย่างเร็วมีหยุด ให้เอาเกจวัดการยึดตัวออก

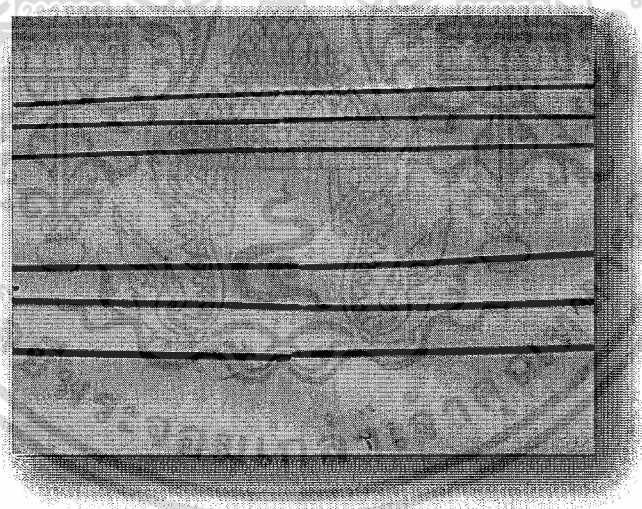
5. ให้นำหน้ากระดาษกระทำต่อไป ให้เอาไม้บรรทัดทาบกั้วเหล็ก วัดความยาวของเกจ 20 cm ถ้าเพิ่มขึ้น 2.5 mm เป็น 20.25 cm ให้อ่านหน้ากระดาษกระทำ หลังจากนั้นอ่านหน้ากระดาษกระทำทุกๆค่าความยาวที่เพิ่มขึ้น 5 mm คือการอ่านที่ 20.75 21.25 22.75 22.25 cm จนกระทั่งเหล็กขาด ให้บันทึกค่าสูงสุดที่ทำให้เหล็กขาด

6. เอาตัวอย่างเหล็กออกจากเครื่องทดสอบ ถ้าชิ้นตัวอย่างเหล็กค้างที่จับ ให้ใช้ค้อนเคาะที่ชิ้นตัวอย่างเหล็ก

7. ดูตำแหน่งและลักษณะการขาดของชิ้นเหล็ก วัดขนาดหน้าตัดชิ้นเล็กที่สุด นำมาต่อวัดด้วยกัน วัดการยืดทั้งหมดและการยืดแต่ละช่วง 2.5 cm และ 5 cm

8. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) และเขียนกราฟแสดงการยืดแต่ละช่วง 2.5 cm ของความยาวเกจ

9. คำนวณค่าต่างๆ ทั้งหมด เปรอ์เซ็นต์การยืดตัวที่ 5 cm ให้คิดช่วงใกล้กับจุดขาดที่มากที่สุดของความยาว 5 cm



รูปที่ 3.13 รูปตัวอย่างหลังการทดสอบ

3.5. วิธีการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง

3.5.1. การออกแบบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรง

- ปริมาตรซีเมนต์ต่อทราย 1:1
- W/C = 0.4
- Unit weight = 1,800 kg/m³ และ มอร์ต้า

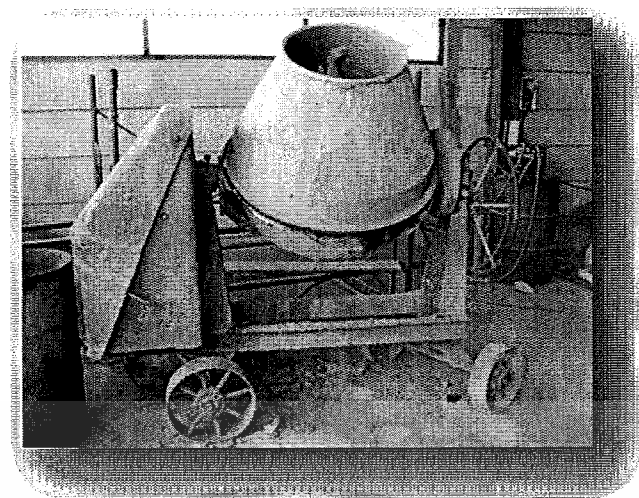
คำนวณขนาดของคานและเหล็กเสริม

- กำหนดในคานเป็นแบบคานแบบ Simple Beam
- รับน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งน้ำหนักของตัวเองประมาณ 6,000 กิโลกรัม
- กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 300 ksc.
- นำค่าไปคำนวณออกแบบดังนี้

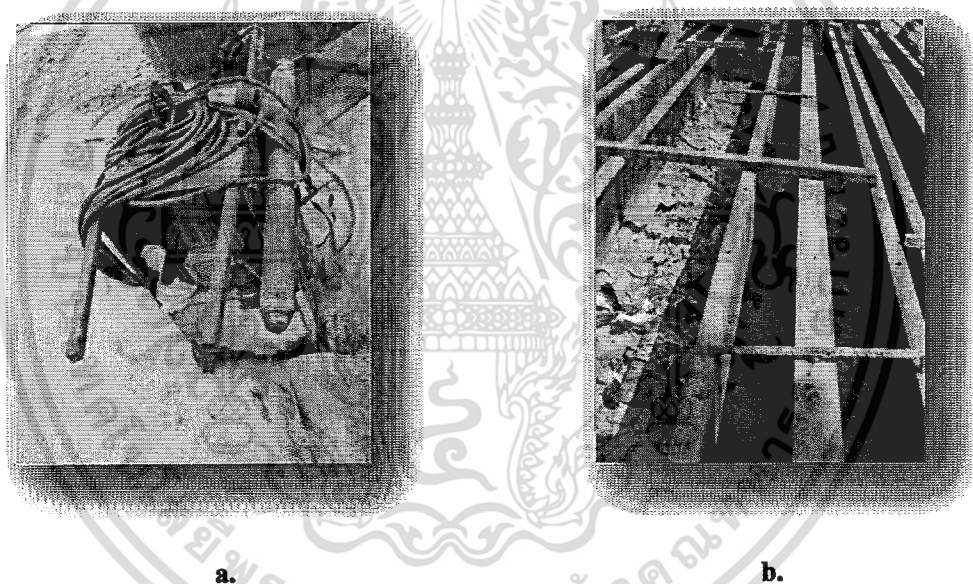
3.5.2. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำ
3. นํ้ายาโฟม G-S
4. แบบหล่อขนาด 15 cm.× 30 cm.
5. เครื่องโม
6. เครื่องฉีดโฟม
7. เครื่องชั่ง
8. กระบอกตวงปริมาตร 0.5 litre
9. ลวด PC wire 5 mm.และเหล็กปลอก RB 6 mm.
10. เครื่องตึงลวด



รูปที่ 3.14 โม้ที่ใช้ในการผสม



a.

b.

รูปที่ 3.15 a. เครื่องตึงลวด และ b. แบบหล่อขนาด 15 × 30 เซนติเมตร

3.5.3. วิธีการดำเนินงาน

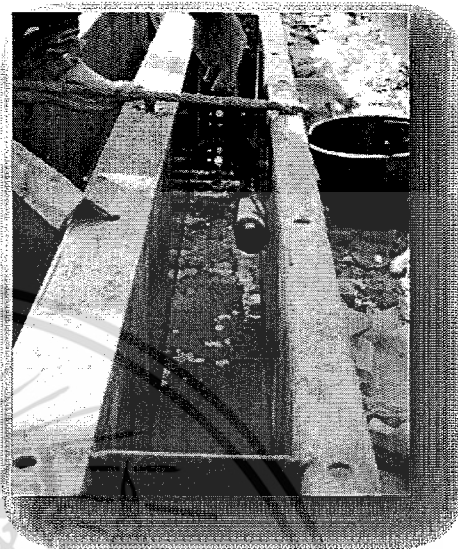
1. เตรียมแบบหล่อขนาด 15 cm. × 30 cm. × 200 cm. โดยการเชื่อมแผ่นเหล็กให้ติดกับแบบให้ได้ระยะที่ต้องการ แล้วทาน้ำมันให้เรียบร้อย

2. ร้อยลวด PC wire ตามจำนวนและตำแหน่งที่ได้จากการ Design ให้ครบทุกเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

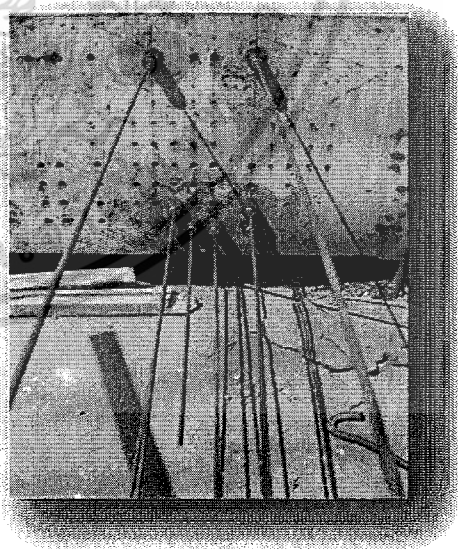
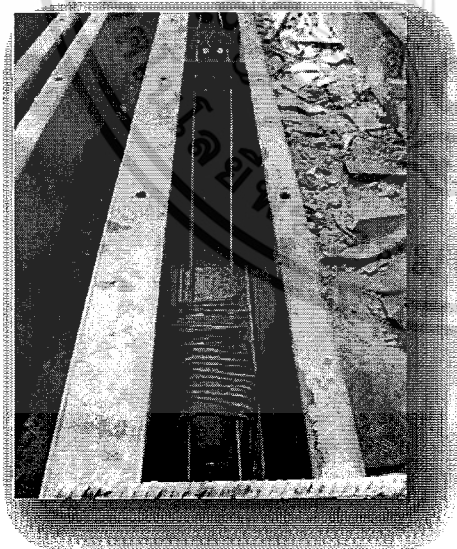
3. ตัด กิฟ ที่ตำแหน่งที่จะทำการดึงทั้ง 2 ด้าน

4. ทำการดึงลวด PC wire ด้วยเครื่องดึงลวด โดยจะดึงที่ 30 % ก่อนทุกเส้น แล้วค่อยดึงให้ได้เปอร์เซ็นต์ตามที่ต้องการอีกครั้ง โดย การทดสอบครั้งนี้ ใช้การดึงที่ 40 , 50 และ 60 %



a. เชื่อมแบบและเจาะรูให้ได้ตามตำแหน่งของลวดที่ได้ออกแบบไว้

b. ทาน้ำมัน

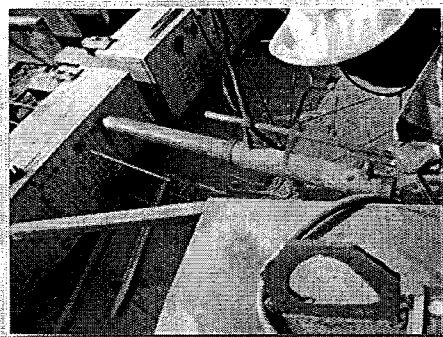


c. ร้อยลวดเข้ากับแบบตามหน้าตัดที่ได้คำนวณไว้

d. ตัดกิฟทั้งหัวและท้ายแบบ

รูปที่ 3.16 การเตรียมแบบหล่อสำหรับคานตัวอย่าง

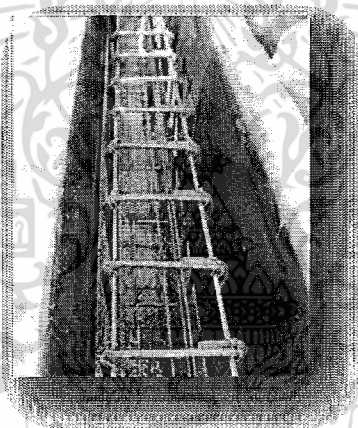
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



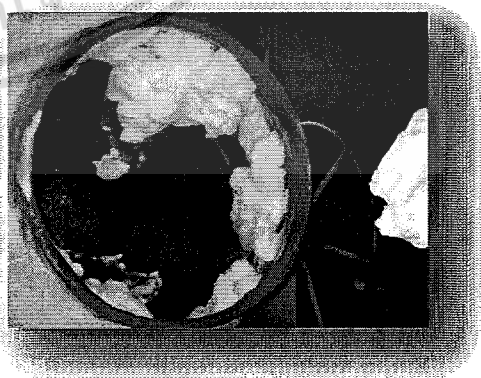
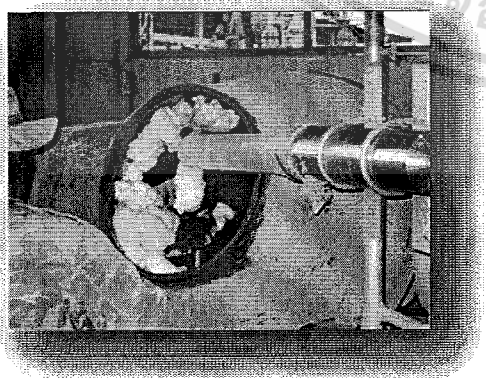
รูปที่ 3.17 การดึงลวด

5. ผูกเหล็กปลอกให้ได้ระยะและจำนวนตามที่คำนวณ

6. ทำการผสมมอร์ต้า และ คอนกรีตมวลเบา มาเทใส่แบบ แล้วทำการกระทุ้งได้ดี



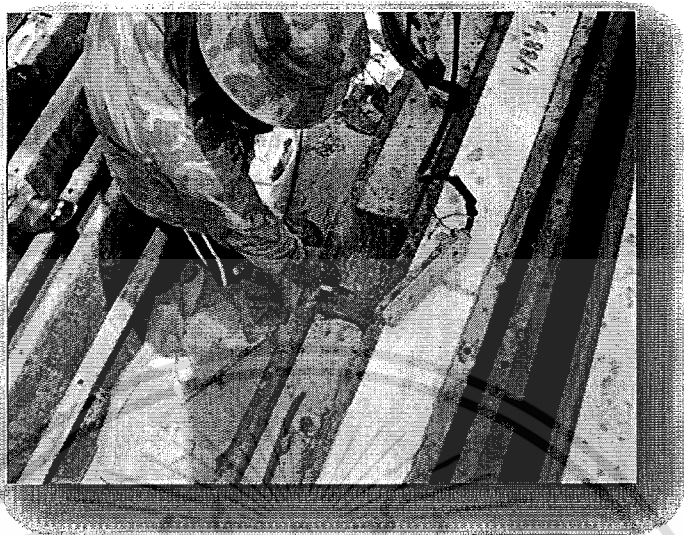
รูปที่ 3.18 ผูกเหล็กปลอกตามระยะที่คำนวณได้



รูปที่ 3.19 การผสมคอนกรีตมวลเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อตัวอย่างมีกำลังตามที่ต้องการแล้วทำการตัดลวด แล้วนำมาทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.20 การตัดลวด

3.5.4. การทดสอบ

3.5.4.1 การทดสอบ Elongation

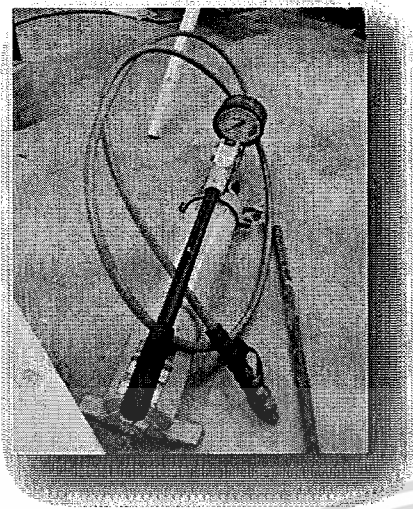
1. ทำการวัดความยาวของลวดที่หัวและท้ายตัวอย่างทุกเส้นแล้วบันทึกไว้ (ทำก่อนการตัดลวด)
2. ทำการตัดลวด
3. วัดความยาวของลวดที่เหลือ

3.5.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคาน

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

1. Load cell
2. Dial gauge
3. Hydraulic jack ขนาด 10 ตัน
4. Hydraulic pump (เป็นอุปกรณ์สำหรับเพิ่มแรงกดให้กับ Hydraulic jack)
5. Frame

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a. Hydraulic pump



b. Load cell



c. Dial gauge

รูปที่ 3.21 อุปกรณ์การทดสอบคาน

การทดสอบ

1. ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Support ทั้ง 2 ข้าง โดยใช้ Support แบบ Hinge เพื่อทดสอบแรงกระทำแบบ 2 จุด โดยใช้เหล็กตัวไอถ่ายแรงจาก Hydraulic Jack ลงสู่คานตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

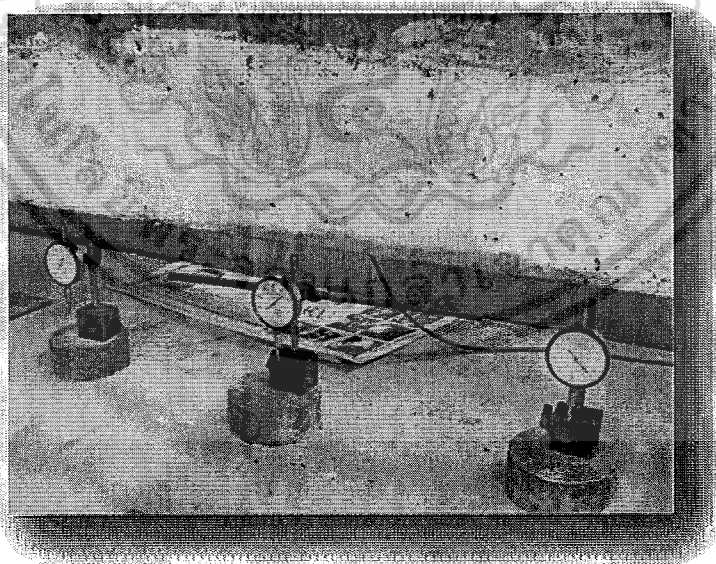
2. ติดตั้ง Dial Gauge เพื่อวัดระยะแอนตัวของตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวตามจำนวน 1 ตัว ที่ระยะ L/4 ถัดจาก Dial Gauge ตัวแรกไปทางด้านขวา และด้านซ้ายจำนวนด้านละ 1 ตัว และทำการตั้งค่าศูนย์แก่ Dial Gauge ทั้งหมด

3. ตั้งศูนย์ของ Dial Gauge ทั้งหมด

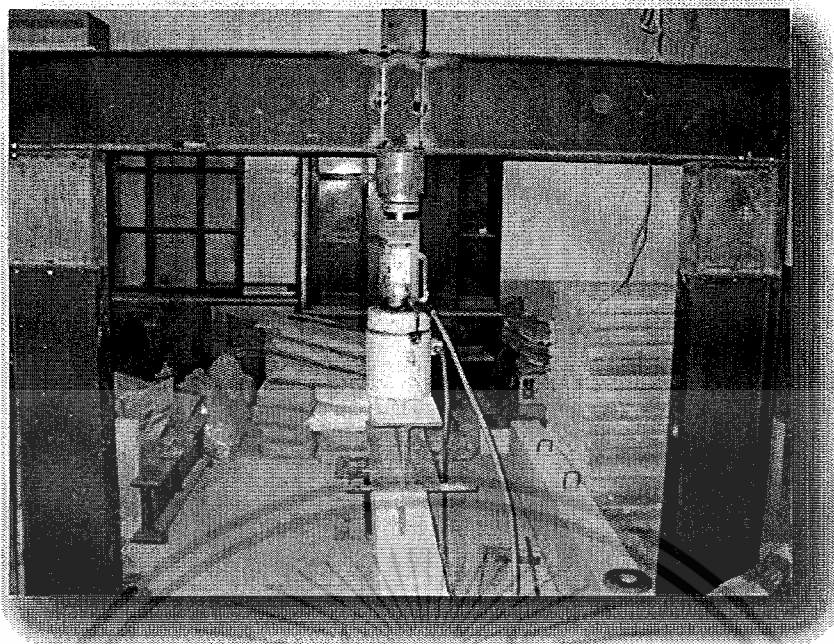
4. ดำเนินการทดสอบโดยใช้ Hydraulic Pump อัดน้ำมัน Hydraulic ไปยัง Hydraulic Jack อย่างช้า ๆ บันทึกค่าแรงกระทำ ค่าการแอนตัวของตัวอย่างทดสอบ และสังเกตลักษณะการแตกร้าว รวมทั้งวาดรอยการแตกร้าวที่เกิดขึ้น

5. ทำการทดสอบ และ บันทึกข้อมูลต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งระยะการแอนตัวสูงสุด ที่กึ่งกลางความยาวตาม จากนั้นทำการถอด Dial Gauge ทั้งหมดออก เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับ Dial Gauge

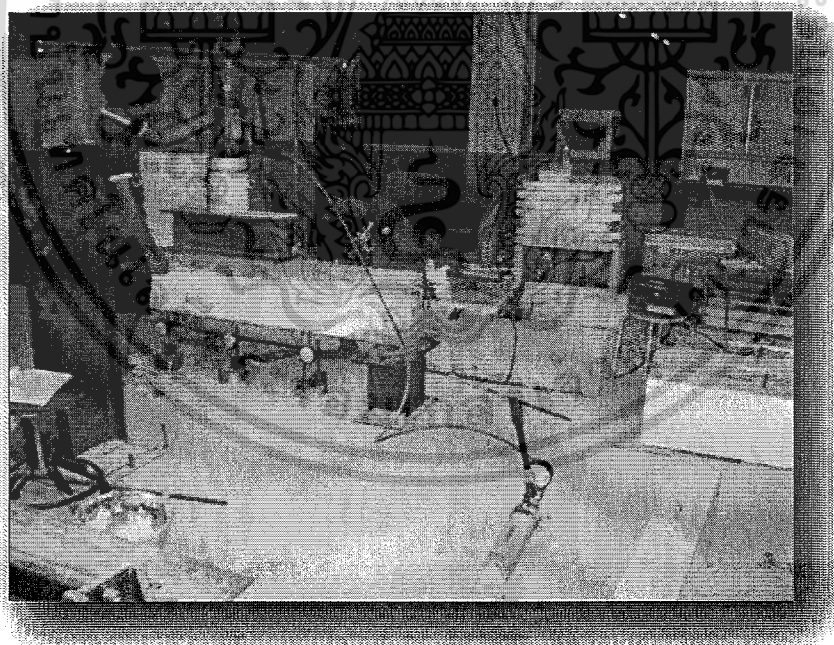
6. ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ เพื่อสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.22 ติดตั้ง Dial Gauge ที่ระยะ L/4 , L/2 และ 3L/4



รูปที่ 3.23 ติดตั้ง Load cell และ Hydraulic pump



รูปที่ 3.24 ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในการทดลองนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์แทนตัวอย่างต่าง ๆ ดังนี้

C-P	:	ทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm.
C-R	:	ทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm.
F-P	:	ทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm.
F-R	:	ทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm.
Def	:	ระยะสิ้นไหล (Slip)(mm.)

ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างจำนวน 180 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ทดสอบตัวอย่างอีกจำนวน 180 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว และทดสอบเหล็ก RB 6 mm และลวด PC-Wire 5 mm. อย่างละ 3 ตัวอย่าง การทดสอบมี 4 การทดสอบหลัก ๆ คือ

1. การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด
2. การทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว
3. การทดสอบมาตรฐานของ เหล็ก RB 6 mm. และ ลวด PC-Wire 5 mm.
4. การทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง

4.1. การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

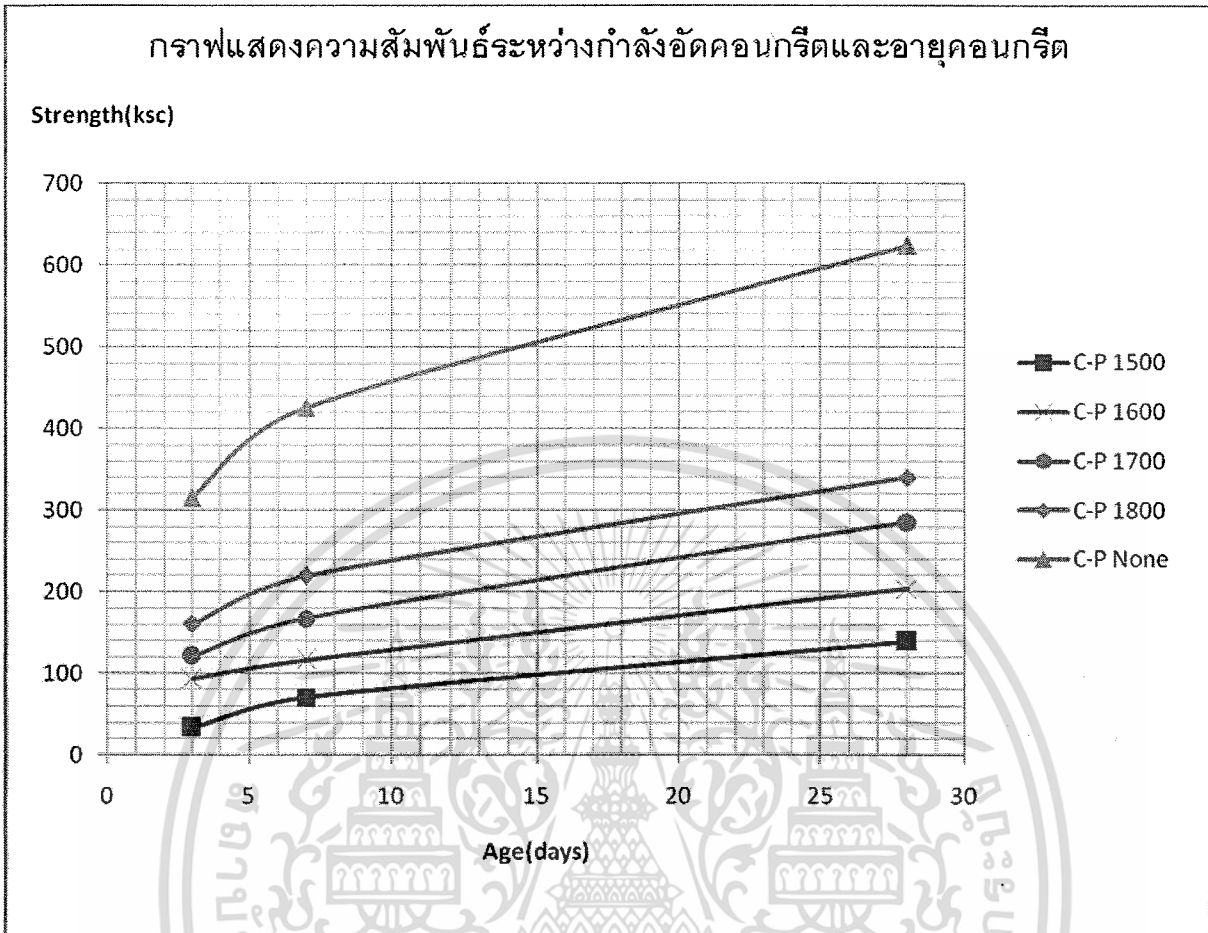
ค่าที่กำหนดในการทดสอบมีดังนี้

ทุกตัวอย่างทดสอบใช้

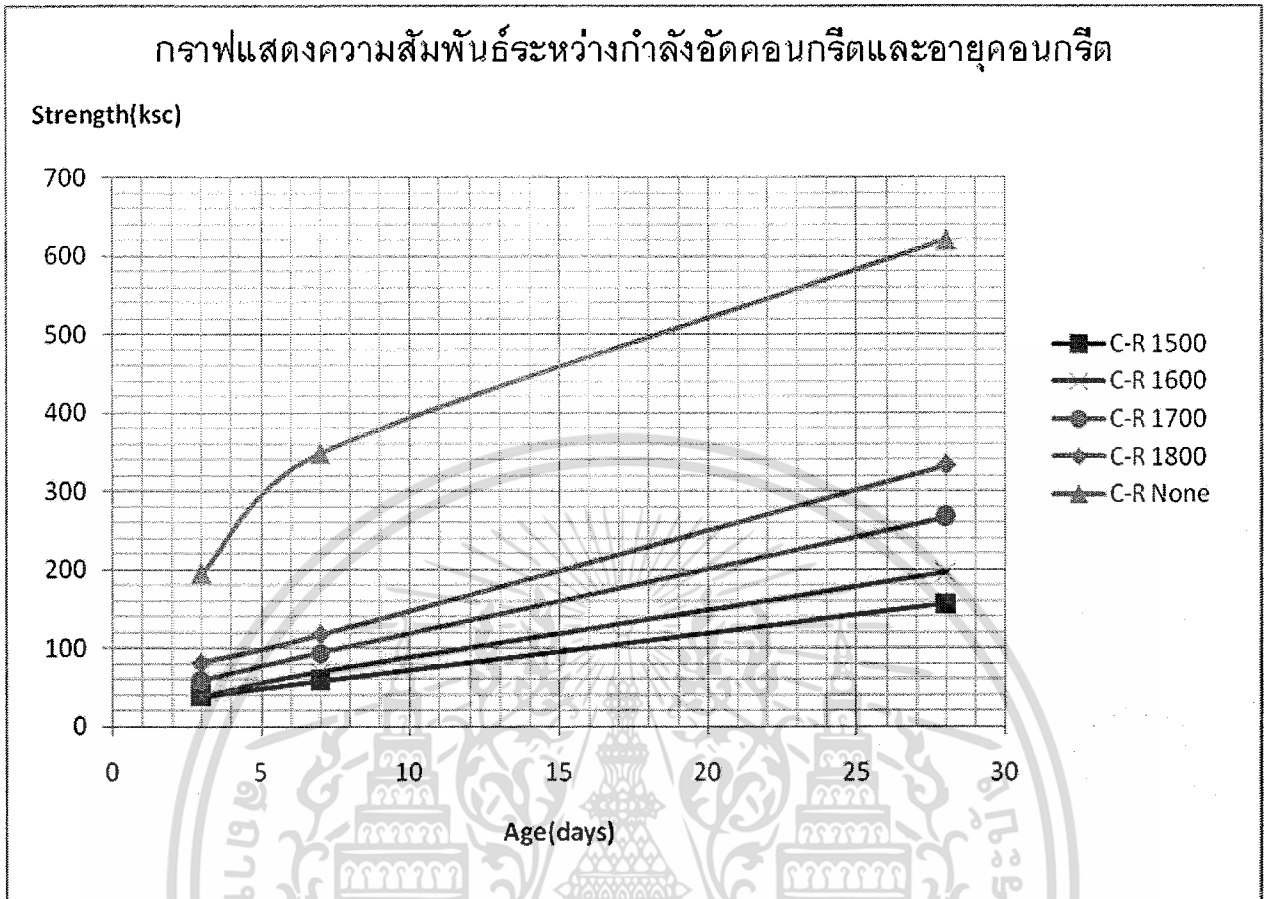
- Forming Agent G – S อัตราส่วน 5 % ของน้ำ
- W/C 0.4
- อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย 1:1

และตัวที่จะแปรผันคือ

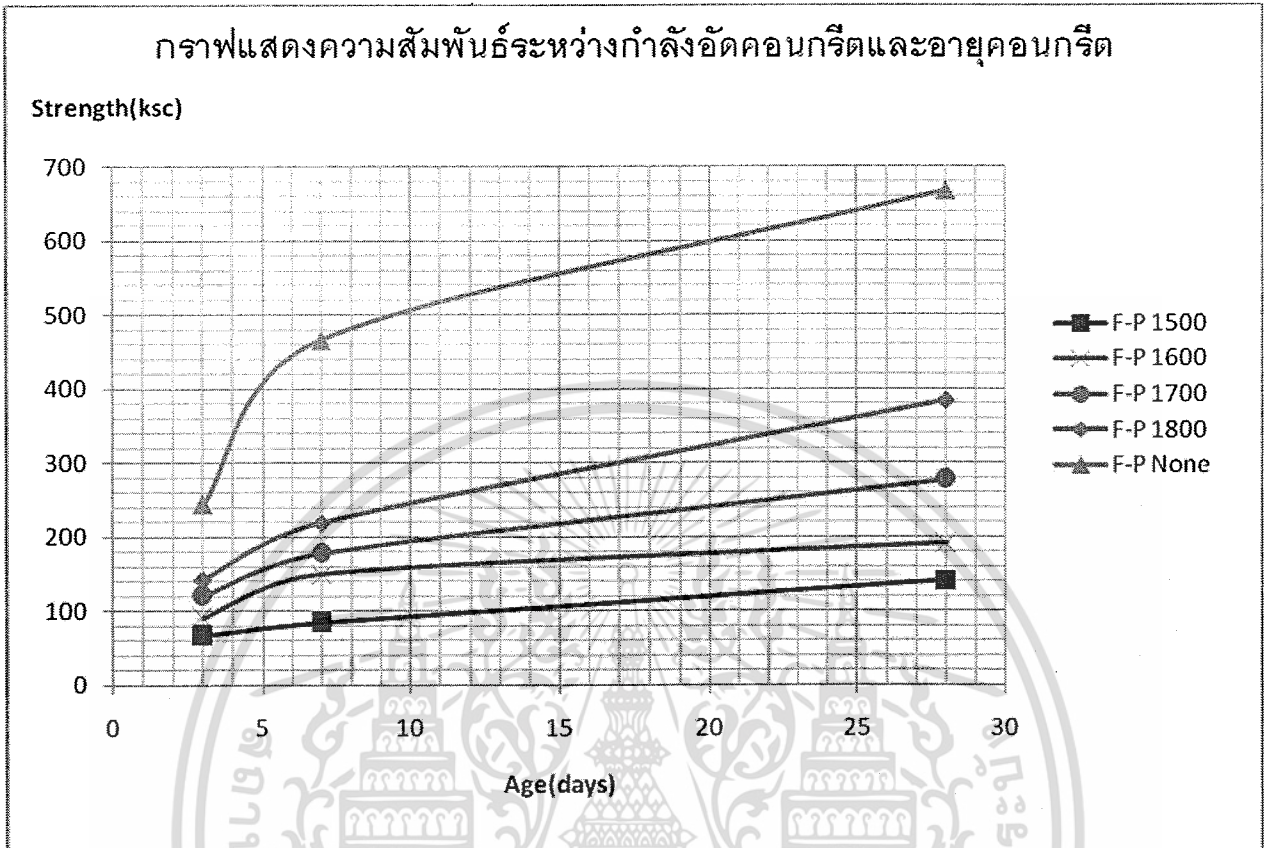
- หน่วยน้ำหนัก 1500, 1600, 1700, 1800 kg/m³ และมอร์ต้า (None)
- ทรายละเอียด (F) และทรายหยาบ (C)
- ลวดอัดแรง PC-Wire 5 mm. (P) และเหล็ก RB 6 mm. (R)



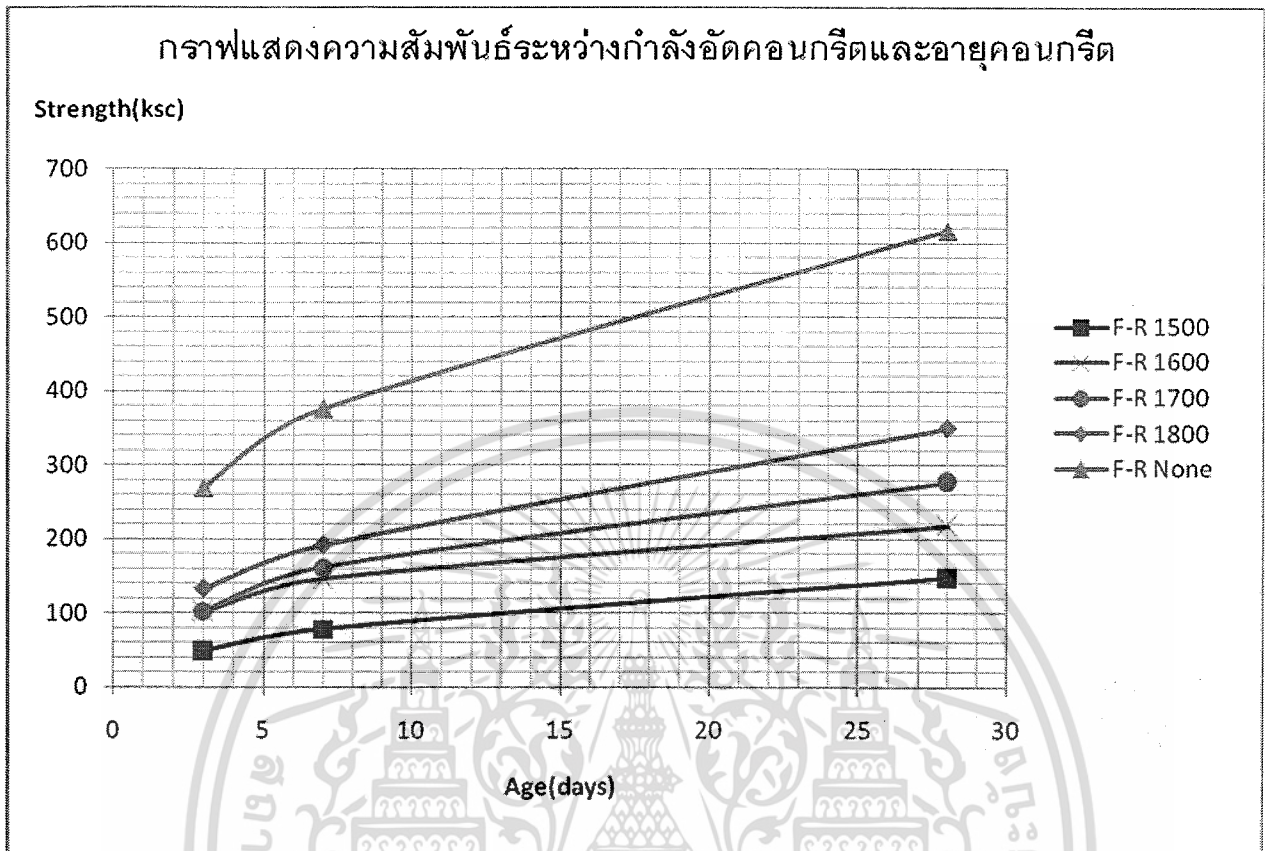
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีตของทรายหยาบใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของลวด PC-Wire 5 mm. (C-P)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีตของทรายหยาบ ใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็ก RB 6 mm. (C-R)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีตของทรายละเอียด ใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของลวด PC-Wire 5 mm. (F-P)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีตของทรายละเอียดใช้ตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็ก RB 6 mm. (F-R)

4.1.1. วิเคราะห์ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัด

ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดจะแปรผันตามหน่วยน้ำหนักในที่นี้เราทดสอบที่หน่วยน้ำหนัก 1500, 1600, 1700, 1800 kg/m³ และมอร์ต้า จะพบว่าคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนักที่ 1800 kg/m³ จะมีกำลังอัดมากที่สุด และในคอนกรีตมวลเบาทรายละเอียดจะรับกำลังอัด ได้มากกว่า ส่วนมอร์ต้าทรายหยาบจะรับกำลัง ได้มากกว่า

จากรูปที่ 4.1 – 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นและเมื่อเทียบหน่วยน้ำหนักเฉพาะคอนกรีตมวลเบา หน่วยน้ำหนักยิ่งมากกำลังอัดก็จะมากขึ้นตาม

4.2. การทดสอบหาระยะยัดเหนียว

ค่าที่กำหนดในการทดสอบมีดังนี้

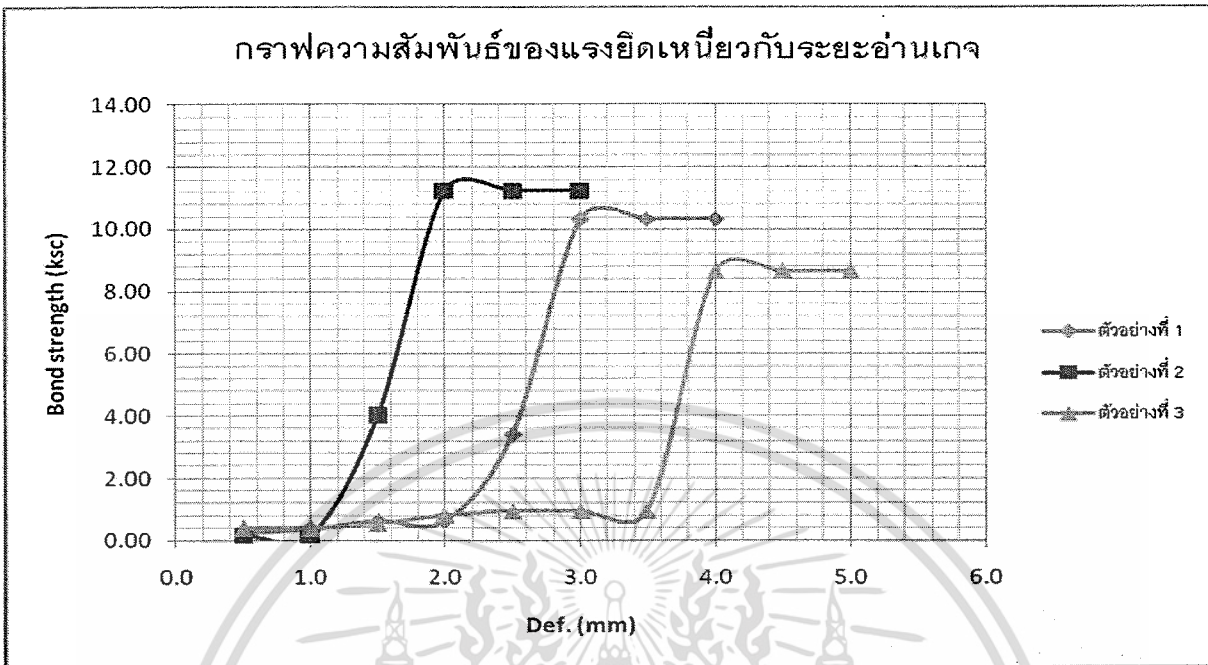
ทุกตัวอย่างทดสอบใช้

- Forming Agent G – S อัตราส่วน 5 % ของน้ำ
- W/C 0.4
- อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย 1:1

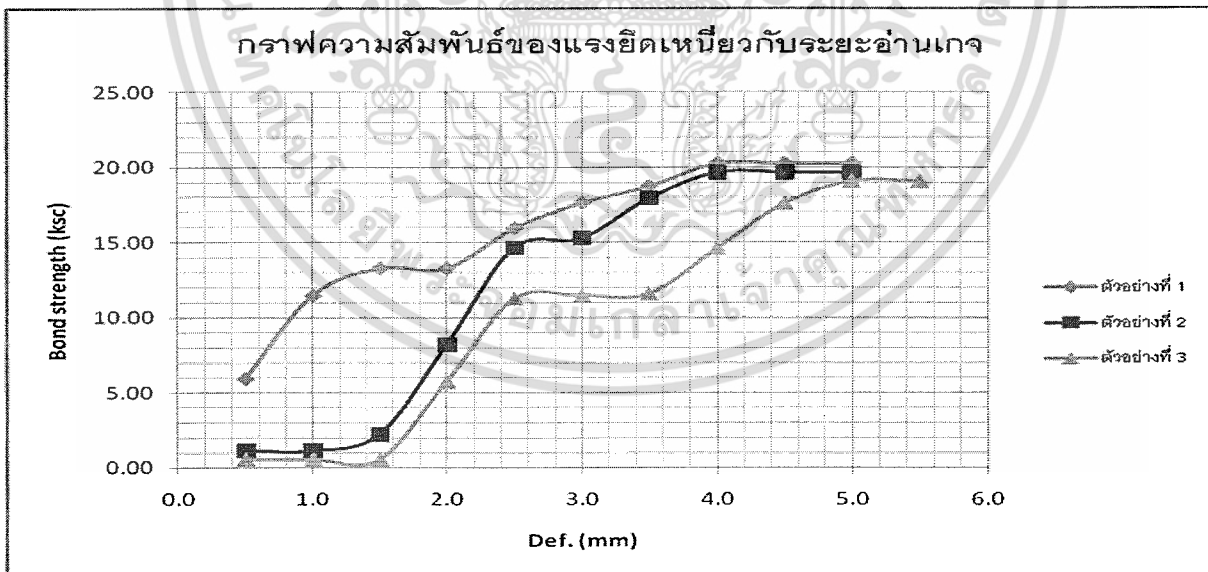
และตัวที่จะแปรผันคือ

- หน่วยน้ำหนัก 1500, 1600, 1700, 1800 kg/m³ และมอร์ต้า (None)
- ทรายละเอียด (F) และทรายหยาบ (C)
- ลวดอัดแรง PC-Wire 5 mm. (P) และเหล็ก RB 6 mm. (R)

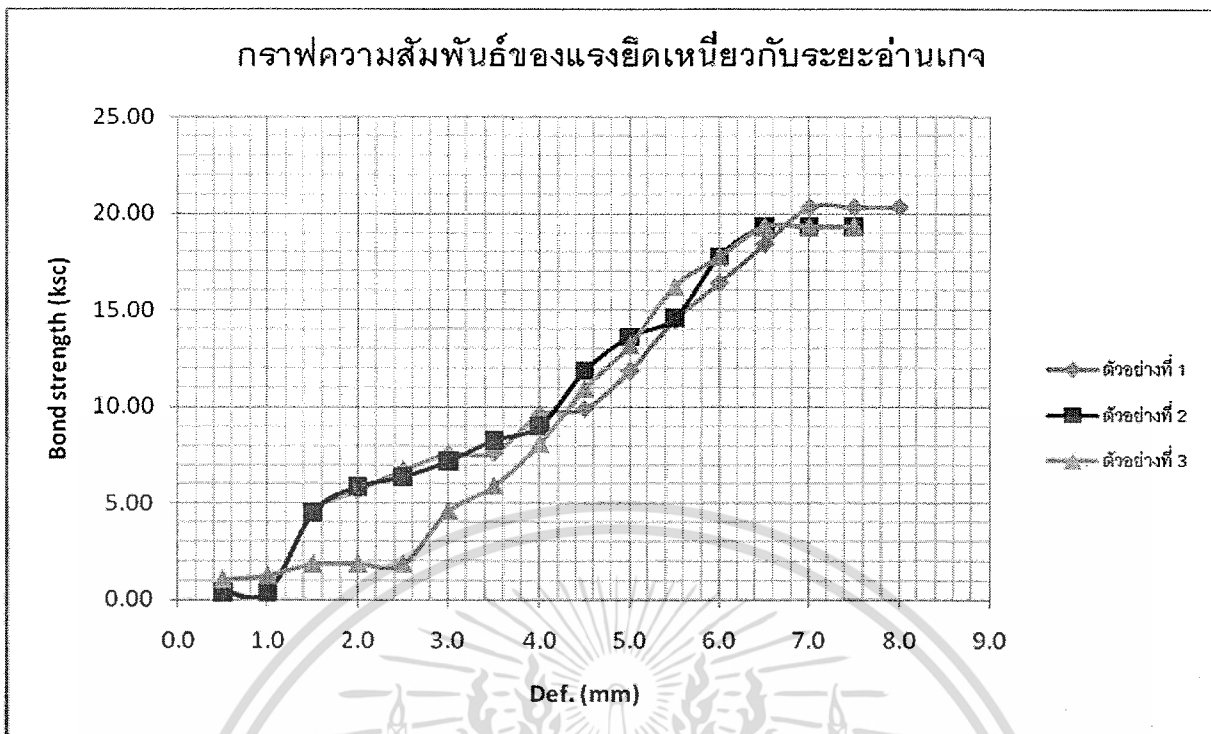
4.2.1. ผลการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว



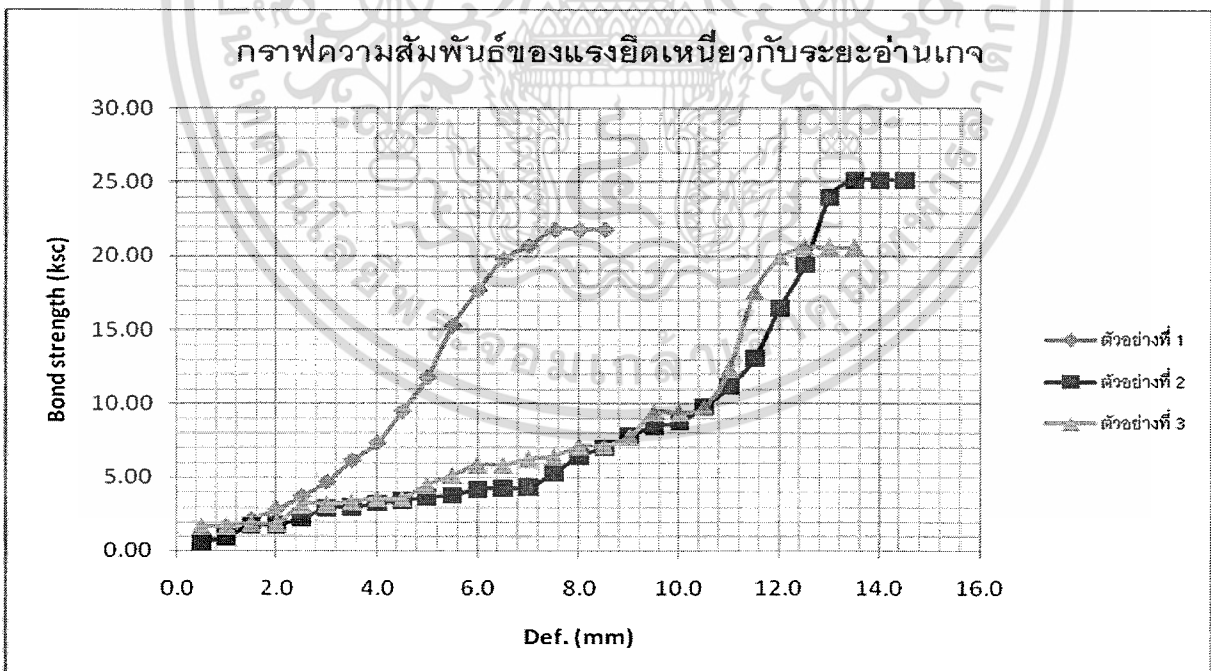
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m^3 (C-P 1500) อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m^3 (C-P 1600) อายุ 28 วัน

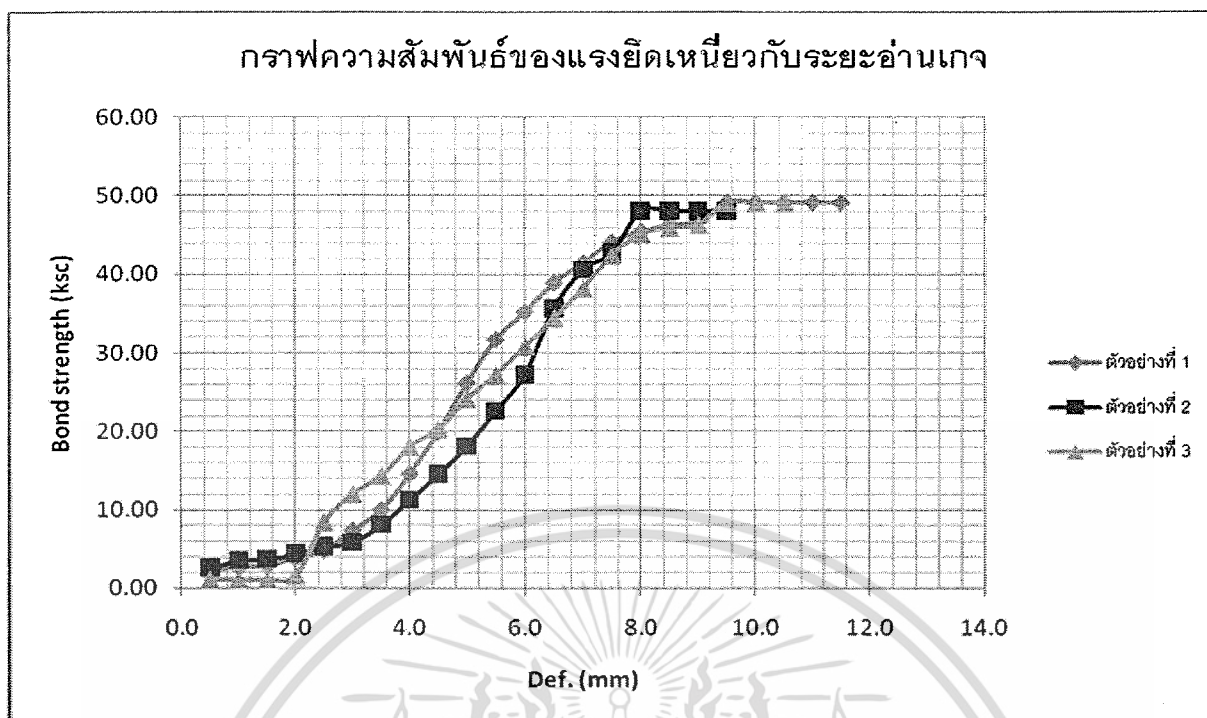


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m^3 (C-P 1700) อายุ 28 วัน

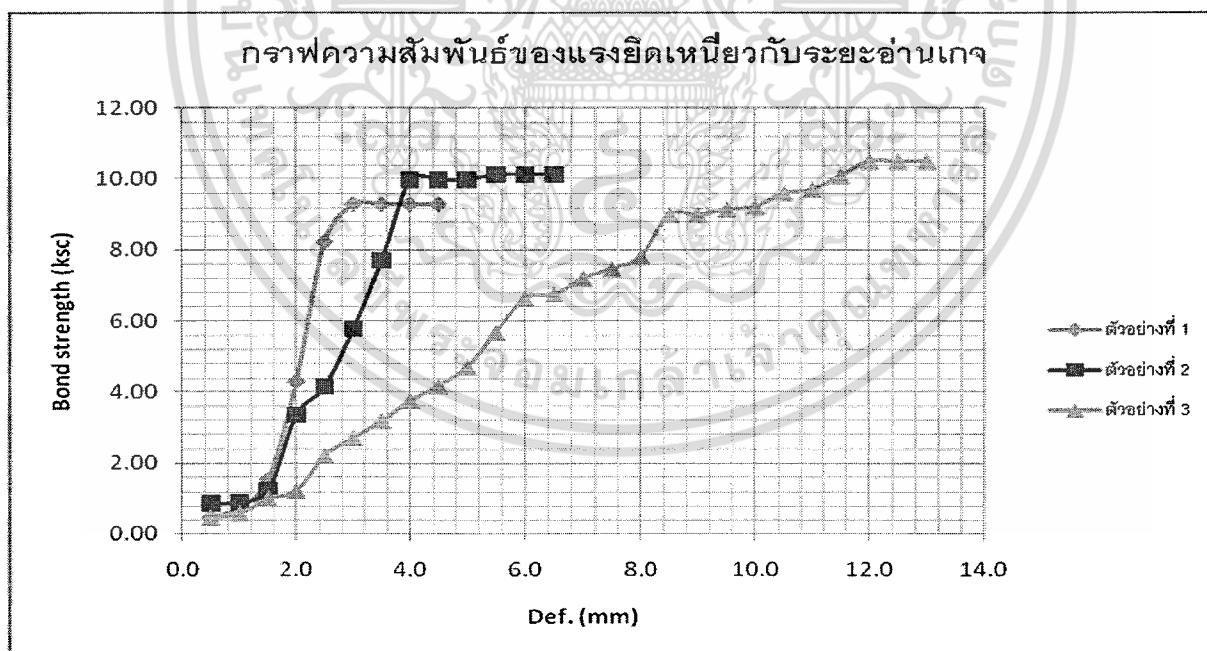


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 (C-P 1800) อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

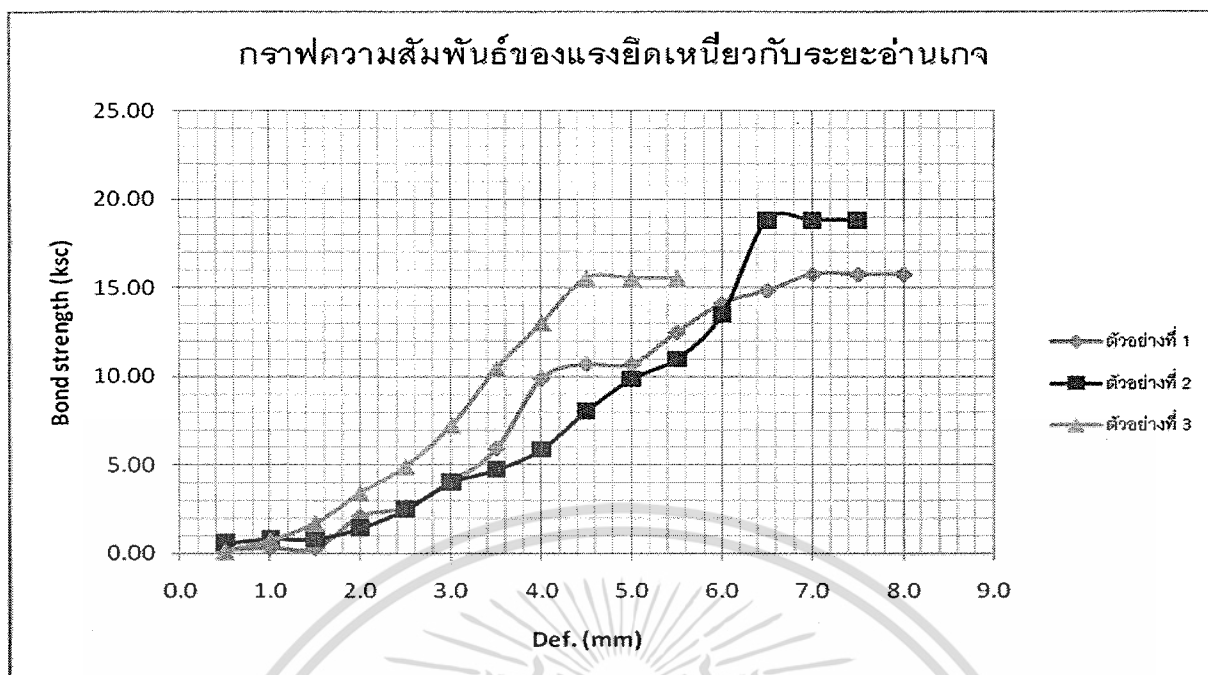


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่มอร์ต้า (C-P None) อายุ 28 วัน

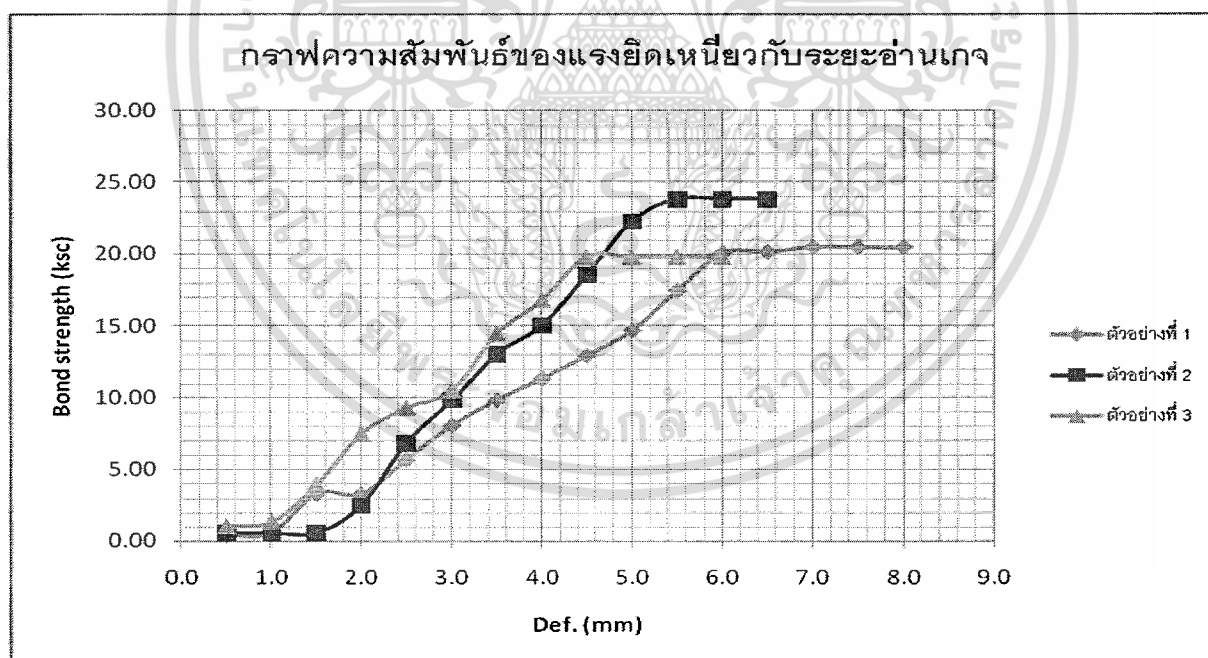


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m^3 (C-R 1500) อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

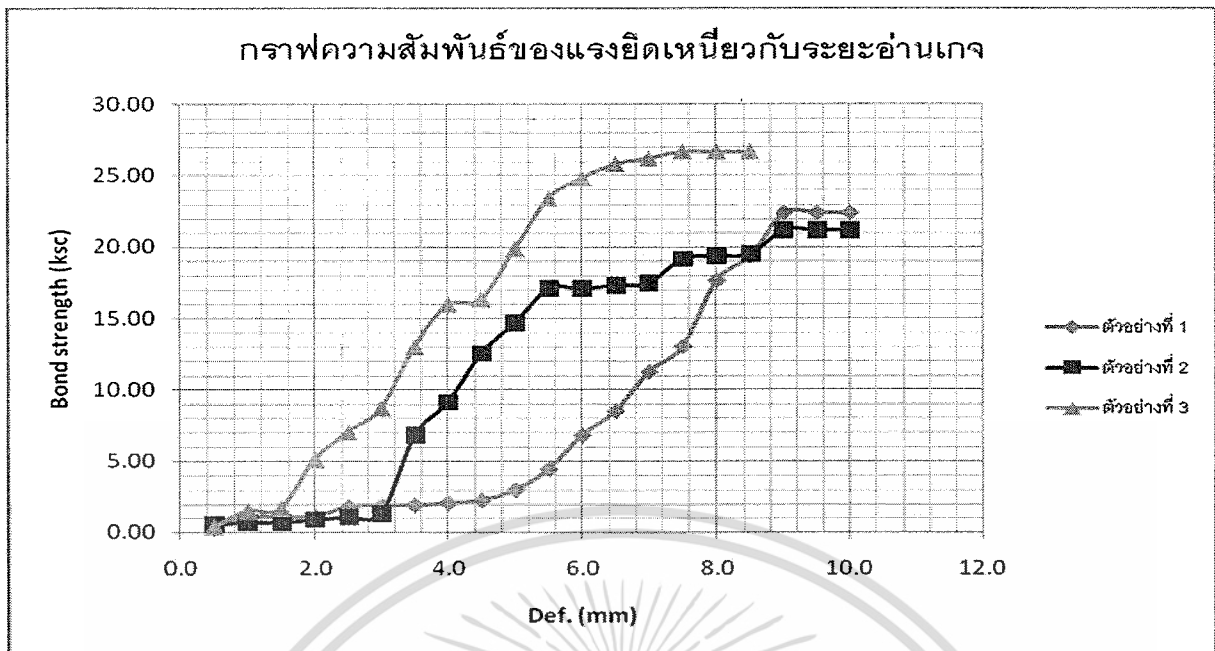


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนอ่านเกจ ของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m^3 (C-R 1600) อายุ 28 วัน

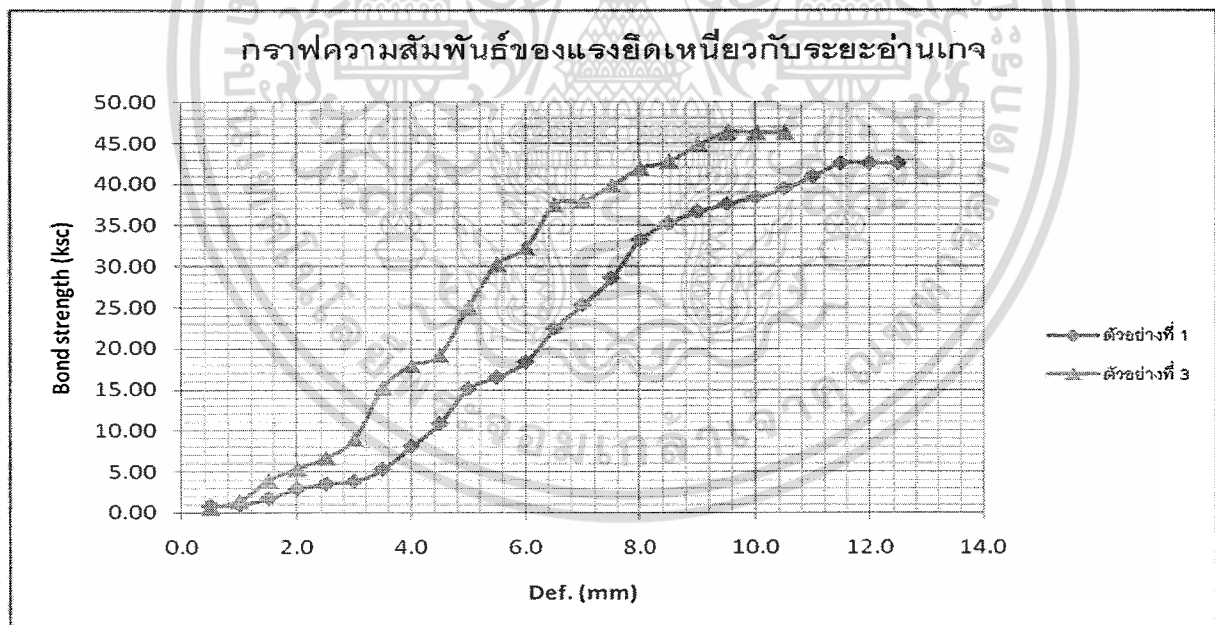


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m^3 (C-R 1700) อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



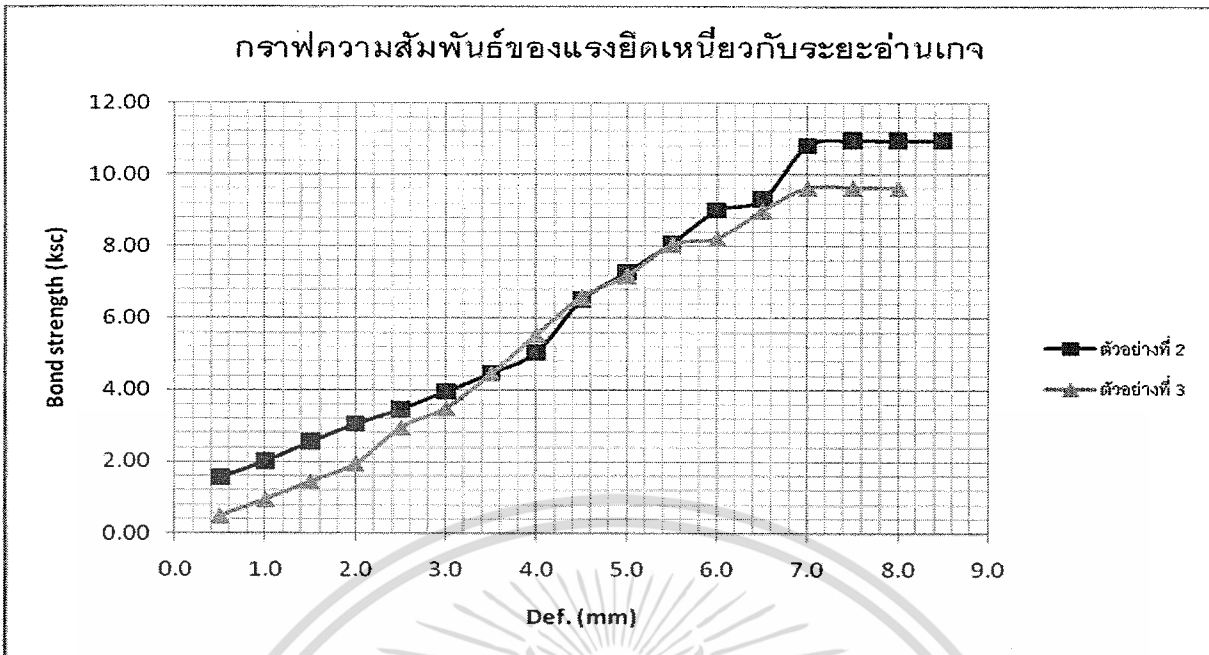
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 (C-R 1800) อายุ 28 วัน



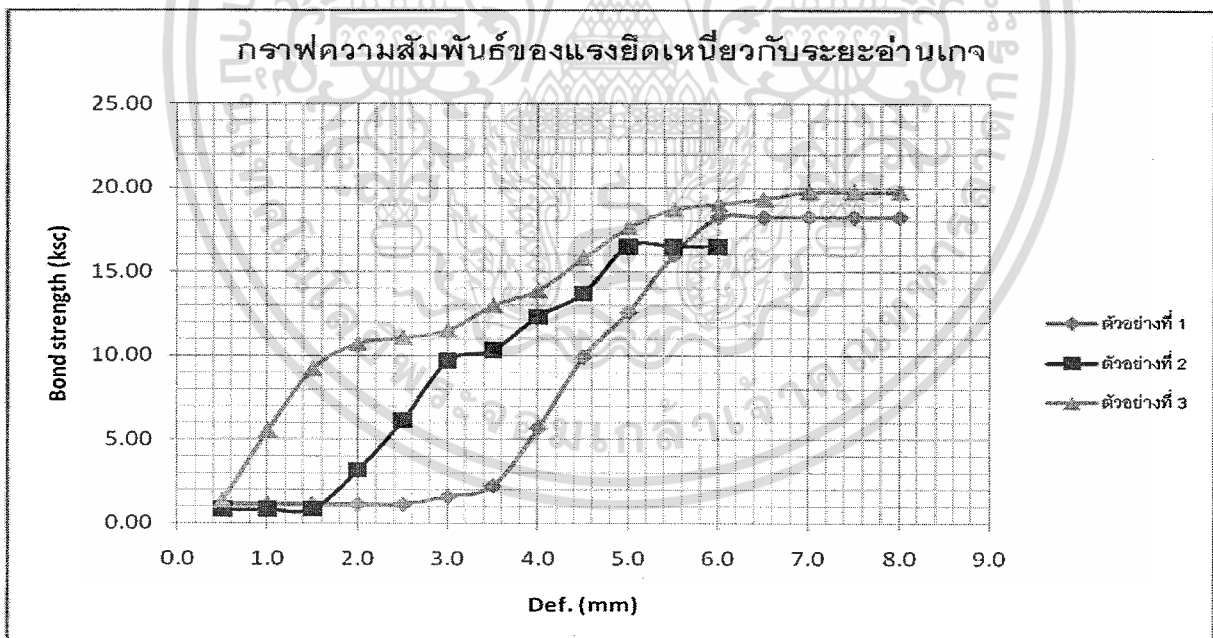
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm. ที่มอร์ต้า (C-R None) อายุ 28 วัน

*หมายเหตุ ตัวอย่างที่ 2 ผิดพลาดจึงไม่ได้นำค่ามาเขียนกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



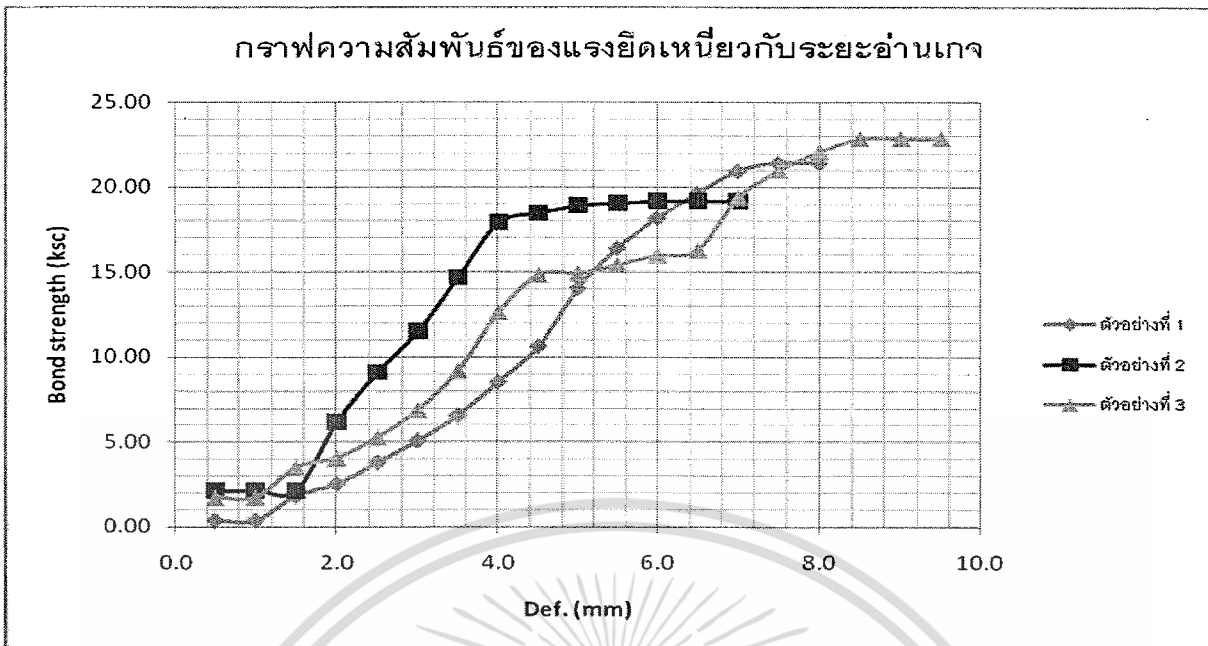
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m^3 (F-P 1500) อายุ 28 วัน



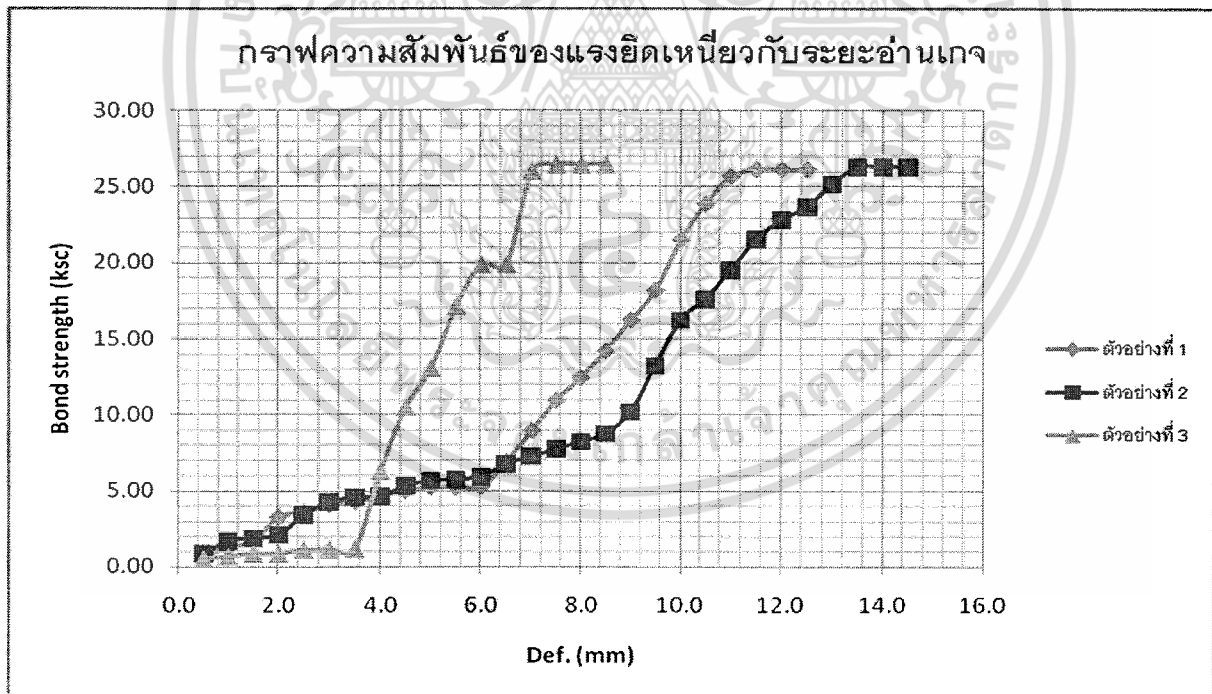
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m^3 (F-P 1600) อายุ 28 วัน

*หมายเหตุ ตัวอย่างที่ 1 ผิดพลาดจึงไม่ได้นำมาเขียนกราฟ

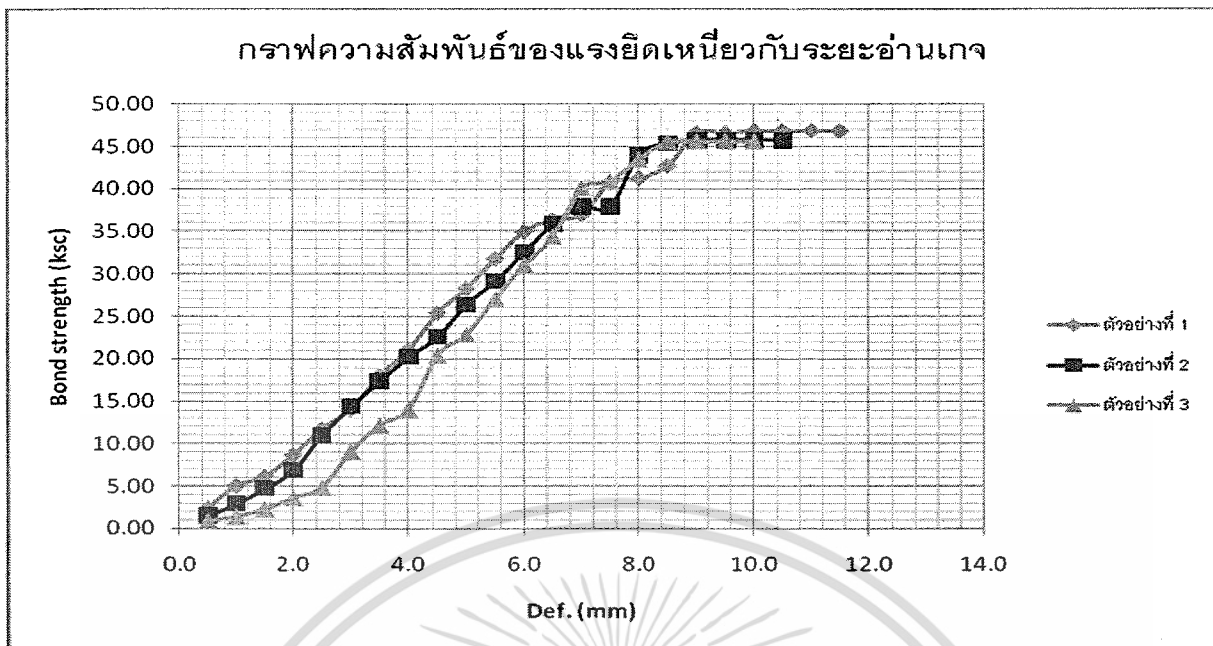
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



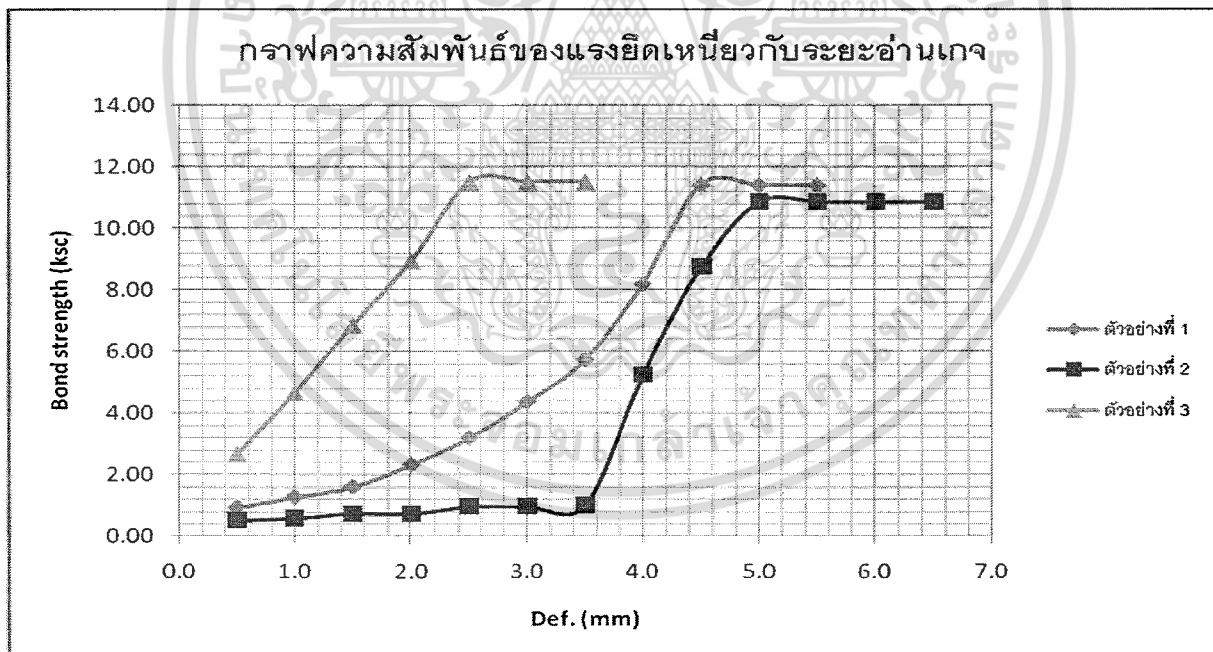
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m^3 (F-P 1700) อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 (F-P 1800) อายุ 28 วัน

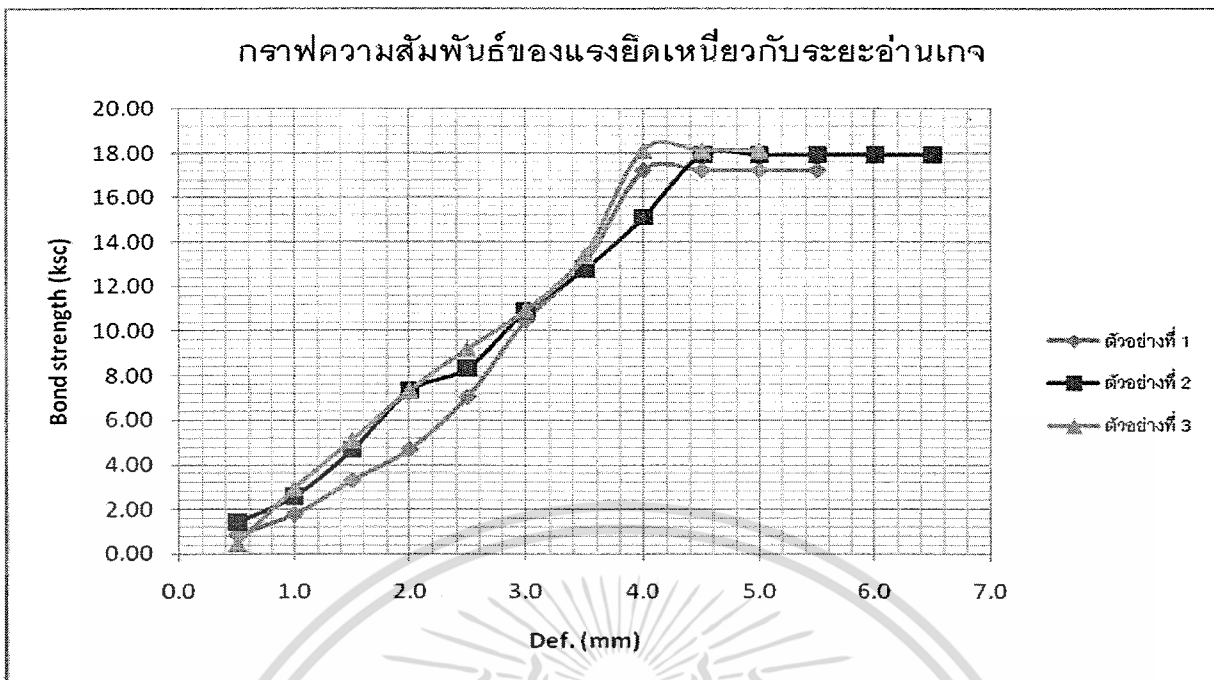


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm. ที่มอร์ต้า (F-P None) อายุ 28 วัน

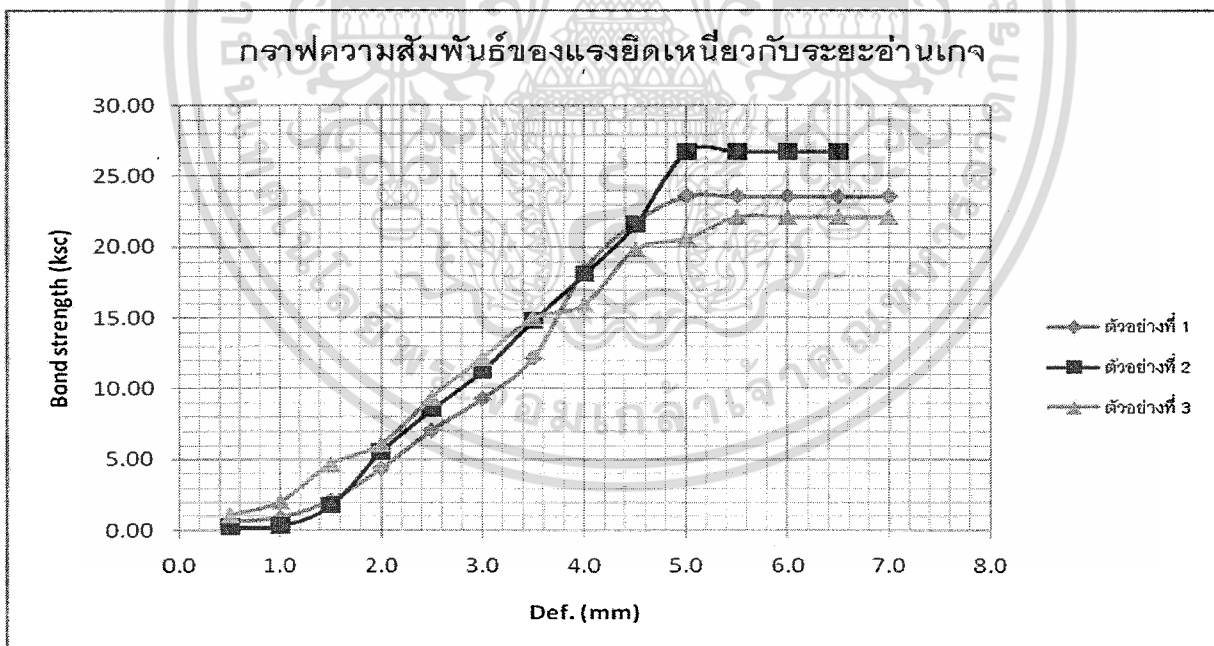


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m^3 (F-R 1500) อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

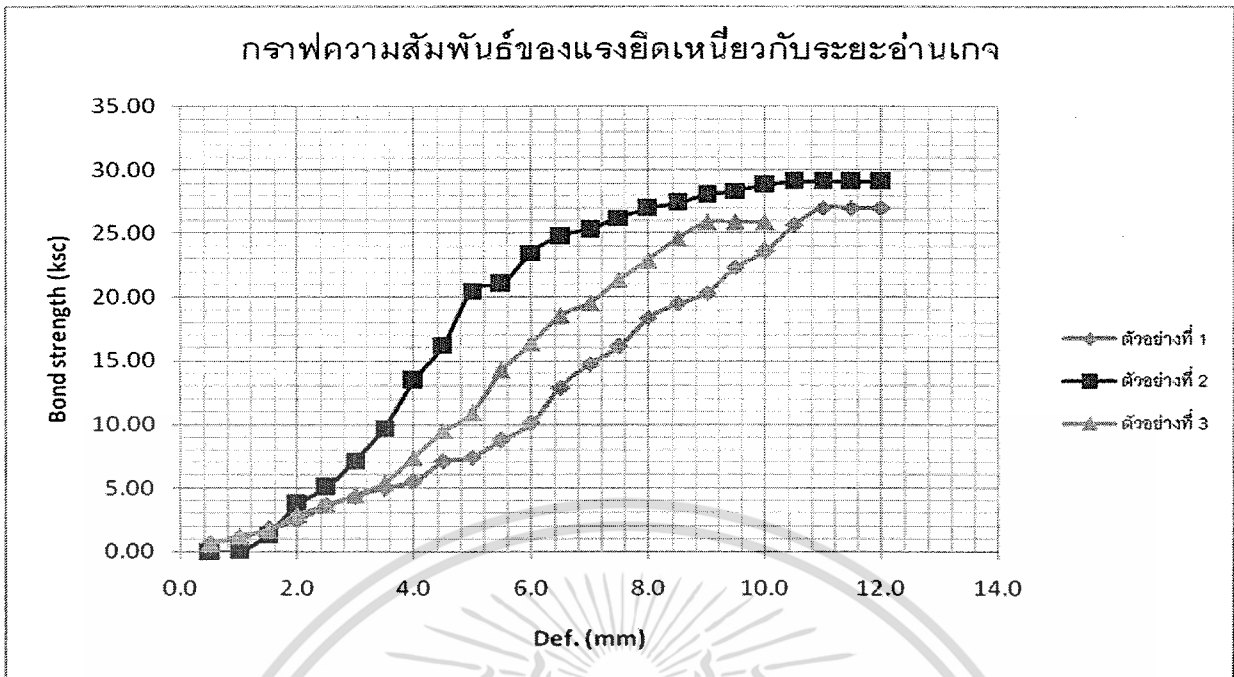


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m^3 (F-R 1600) อายุ 28 วัน

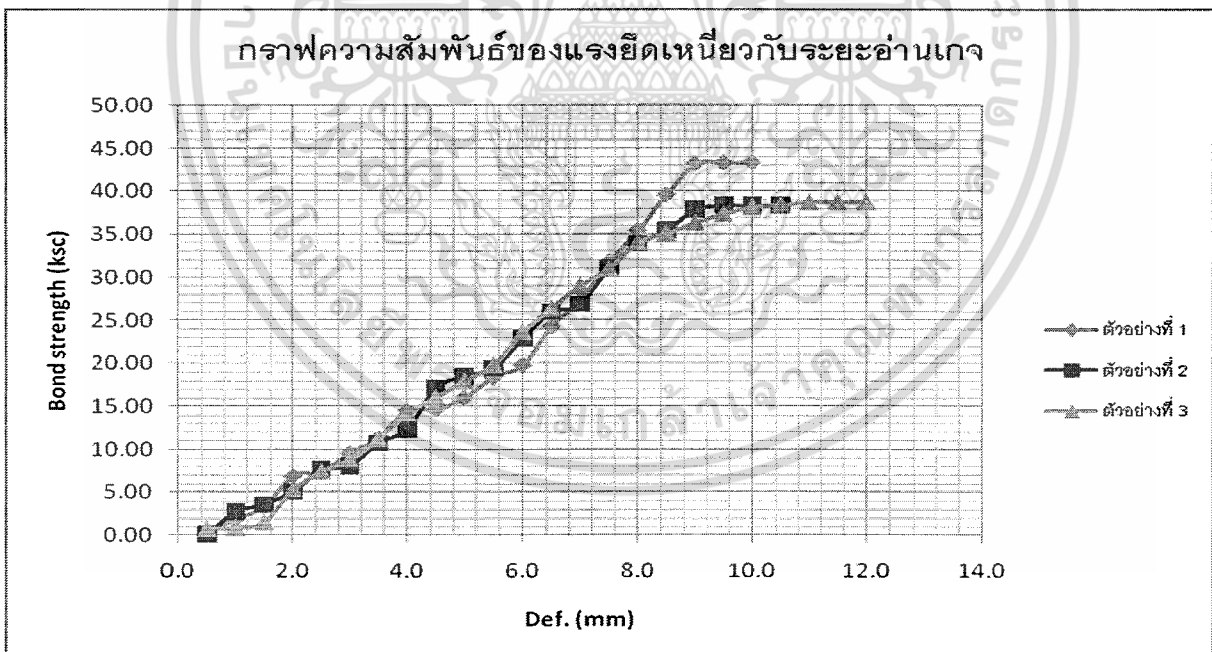


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m^3 (F-R 1700) อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 (F-R 1800) อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ของทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm. ที่มอร์ต้า (F-R None) อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2. วิเคราะห์ผลการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว

จากผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะอ่านเกจ ซึ่งระยะอ่านเกจที่ได้คือ ระยะที่รวมระยะยึดของเหล็กกับระยะที่ดึงหลุดจากคอนกรีตมวลเบาหรือมอร์ต้า พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ หน้วยน้ำหน้กต่าง ๆ เมื่อใช้ทรายละเอียดจะมีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าทรายหยาบ มอร์ต้าทรายละเอียดกับ ทรายหยาบมีแรงยึดเหนี่ยวพอ ๆ กัน แรงดึงสูงสุดของลวด RB 6 mm.จะไ้มากกว่า PC-Wire 5 mm. ไม่ว่า จะเป็นคอนกรีตมวลเบาหรือมอร์ต้า คอนกรีตมวลเบาเมื่อเทียบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ที่ใช้ RB 6 mm. จะไ้ค่าใกล้เคียงกับ PC-Wire 5 mm. หรือมากกว่าเล็กน้อย ส่วนถ้าเป็นมอร์ต้า PC-Wire 5 mm. จะมากกว่า RB 6 mm.เทียบก่อนเกิดการครากเพราะแรงดึงสูงสุดของ RB 6 mm. ไ้เกินค่าคราก (Yield) ของ มันซึ่งจะกล่าวในการทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm.และลวด PC-Wire 5 mm.ต่อไป เพราะมันเกิด การครากก่อนที่จะลื่นไ้ถล (Slip) เราจึงคิดที่ค่าคราก และเมื่อเทียบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าทราย ละเอียดกับทรายหยาบไ้ค่าใกล้เคียงกัน

4.3. การทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.

4.3.1. ผลการทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.

ตารางที่ 4.1 การทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.

No.	Type	Grade	Trade Mark	Length (m)	Weight (kg)	Error of Weight (%)	Diameter (mm)	Error Diameter (mm)	Cross Section Area (cm ²)	Load		Tensile Strength		Gauge Length (cm)	Elongation	
										Yield (kg)	Ultimate (kg)	Yield (ksc)	Ultimate (ksc)		(cm)	(%)
1	RB 6	SR 24	บดส.	0.810	0.172	0.97	5.90	0.10	0.273	1004	1318	3673	4822	3	1.1	36.67
2	RB 6	SR 24	บดส.	0.808	0.171	1.04	6.00	0.00	0.283	1006	1296	3559	4585	3	1	33.33
3	RB 6	SR 24	บดส.	0.810	0.171	1.09	5.95	0.05	0.278	1067	1278	3838	4597	3	1	33.33
Average RB 6				0.809	0.171	1.03	5.95	0.05	0.278	1026	1297	3690	4668	3	1.0	34.44
4	PC-Wire 5	1770	PC-Wire	0.825	0.128	0.12	5.00	0.00	0.196	3542	3672	18043	18705	2.5	0.4	16.00
5	PC-Wire 5	1770	PC-Wire	0.810	0.126	0.16	5.00	0.00	0.196	3340	3476	17014	17706	2.5	0.5	20.00
6	PC-Wire 5	1770	PC-Wire	0.802	0.125	0.19	5.00	0.00	0.196	3490	3621	17778	18445	2.5	0.5	20.00
Average PC-Wire 5				0.812	0.126	0.15	5.00	0.00	0.196	3457	3590	17611	18285	2.5	0.5	18.67

4.3.2. วิเคราะห์ผลการทดสอบมาตรฐานของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.

จากตารางที่ 4.3.1 พบว่า RB 6 mm. และ PC-Wire 5 mm. ได้ค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกันเองแสดงว่าเหล็กที่นำมาใช้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งนี้ต้องไปเทียบกับมาตรฐานอีกที และเห็นได้ว่า PC-Wire 5 มีมาตรฐานการผลิตดีกว่า RB 6 สังเกตได้จากค่าผิดพลาดจากน้ำหนักและเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งเทียบกับมาตรฐานแล้ว

จากมาตรฐาน ASTM A421 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เราเทียบมาตรฐานที่ PC-Wire 5 mm. (4.98 mm.) ได้กำลังคราก (Yield strength) 14,060 ksc ที่ทดสอบเฉลี่ยแล้วได้กำลังคราก (Yield strength) 17,611 ksc ซึ่งมากกว่ามาตรฐานแสดงว่าเหล็กใช้ได้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.(นิ้ว)	กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ซม ² (ปอนด์/นิ้ว ²)		กำลังครากอย่างน้อยที่สุด(ที่1%หน่วย การยืดตัว)กก.ซม ² (ปอนด์/นิ้ว)	
		ชนิดปลายยึดเป็น	ชนิดปลายยึดเป็น	ชนิดปลายยึดเป็น	ชนิดปลายยึดเป็น
		ปม	ลิ่ม	ปม	ลิ่ม
4.88(0.192)	1.870(0.029)	-	17,580(250,000)	-	14,060(200,000)
4.98(0.196)	19.48(0.030)	16,870(240,000)	17,580(250,000)	13,500(192,000)	14,060(200,000)
6.35(0.250)	31.67(0.049)	16,870(240,000)	16,870(240,000)	13,500(192,000)	13,500(192,000)
7.01(0.276)	38.59(0.060)	-	16,520(235,000)	-	13,220(188,000)

4.4. การทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง

ค่าที่กำหนดในการทดสอบมีดังนี้

ทุกตัวอย่างทดสอบใช้

- Forming Agent G – S อัตราส่วน 5 % ของน้ำ
- W/C 0.4
- อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย 1:1
- ทรายละเอียด (F)
- ลวดอัดแรง PC-Wire 4 mm.^๐ (P)

และตัวที่จะแปรผันคือ

- หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m³ และมอร์ต้า (None)



^๐ ใช้ PC-WIRE 4 mm. เนื่องจากเหตุขัดข้องทางบริษัท S.K. CONCRETE PRODUCT ผู้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุและสถานที่ ไม่มี PC-WIRE 5 mm. ในช่วงที่ทำการผสมและดึงลวดเพื่อหล่อคาน ดังนั้นจึงใช้ PC-WIRE 4 mm. ในการออกแบบคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1. ผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง

ตารางที่ 4.3 การตรวจสอบ Compressive Strength ของคานเพื่อที่จะสามารถตัดลวดได้ที่ 300 ksc

Beam	Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
Prestressed Mortar Beam 2	1-1	25.200	5.00	0.269	28	106	10805	429	2135
	1-2	25.301	5.02	0.267	28	100	10194	403	2102
	1-3	25.000	5.00	0.269	28	102	10398	416	2152
	average			0.268		103	10466	416	2130
	2-1	25.200	5.04	0.270	28	104	10601	421	2126
	2-2	25.401	5.06	0.269	28	106	10805	425	2093
	2-3	25.200	5.05	0.267	28	108	11009	437	2098
	average			0.269		106	10805	428	2106
								AVG	2118
Prestressed Lightweight Beam 1	3-1	25.952	5.02	0.232	28	78	7951	306	1781
	3-2	25.400	5.00	0.244	28	75	7645	301	1921
	3-3	26.750	5.00	0.228	28	80	8155	305	1705
	average			0.235		78	7917	304	1802
	4-1	25.200	5.02	0.238	28	77	7849	311	1881
	4-2	25.750	5.00	0.234	28	75	7645	297	1817
	4-3	25.500	5.00	0.228	28	80	8155	320	1788
	average			0.233		77	7883	309	1829
							AVG	1816	
Prestressed Lightweight Beam 2	5-1	25.700	5.02	0.240	28	83	8461	329	1860
	5-2	25.700	5.00	0.237	28	80	8155	317	1844
	5-3	25.705	5.00	0.240	28	85	8665	337	1867
	average			0.239		83	8427	328	1857
	6-1	25.654	5.02	0.240	28	75	7645	298	1864
	6-2	25.653	5.00	0.240	28	88	8970	350	1871
	6-3	25.250	5.00	0.237	28	78	7951	315	1877
	average			0.239		80	8189	321	1871
							AVG	1873	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 เป็นผลที่ได้จากการนำลูกปุ่นขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm. จากการผสมเพื่อหล่อคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรงเพื่อตรวจสอบกำลังที่ได้ว่าสามารถดึงได้หรือไม่ เนื่องจากคานมอร์ต้าอัดแรงตัวแรกเกิดผิดพลาดในขั้นตอนการผสมในที่นี้จึงไม่เก็บลูกปุ่นตัวอย่าง

ในที่นี้การผสมคานตัวหนึ่งต้องใช้ถึง 2 โมผสม ทำให้การควบคุมหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเป็นไปได้ยาก อีกทั้งเมื่อเทครั้งแรกจะต้องทิ้งช่วงเวลาจนกว่า โมผสมที่สองจะเสร็จจึงทำให้น้ำบางส่วนระเหยไปก่อน เพราะฉะนั้นหน่วยน้ำหนักที่ใช้จะเป็นค่าเฉลี่ยของการผสม 2 โมผสม

โดยปกติหน้างานจะดึงลวดเมื่อคอนกรีตมีกำลัง 300 ksc ซึ่งพบว่าการผสมทุกตัวได้กำลังอัดครบ 300 ksc ที่ 28 วัน จึงสามารถตัดลวดได้ ทั้งนี้เพราะแรงยึดเหนี่ยวแปรผันตรงตามกำลังอัด เมื่อกำลังอัดได้แรงยึดเหนี่ยวจึงมีแนวโน้มที่จะได้ด้วยเช่นกัน



ตารางที่ 4.4 การคำนวณการดึงลวดและการหดตัวที่ใช้ในงาน

Description	Dia 4 mm PC Wire	Dia 5 mm PC Wire	Dia 7 mm PC Wire
BED LENGTH	75.955 m	75.955 m	75.955 m
NORMAL DIA. OF WIRE	4 mm	5 mm	7 mm
MODULUS OF ELASTICITY	2.00E+06	2.00E+06	2.00E+06
CROSS SECTION AREA	12.6 mm ²	19.6 mm ²	38.5 mm ²
MIN. BREAKING STRENGTH	1,938 kg	3,008 kg	5,578 kg
PRE-LOAD	581 kg	902 kg	1,673 kg
FINAL LOAD	1,357 kg	2,106 kg	3,905 kg
FINAL LOAD	1,454 kg	2,256 kg	4,184 kg
FINAL LOAD	1,550 kg	2,406 kg	4,462 kg
ELONGATION AT PRE-LOAD	$\Delta 1 = (P1 \times L / AE)$ 17.57 cm	17.46 cm	16.52 cm
ELONGATION AT FINAL-LOAD	$\Delta 2 = (P1 \times L / AE)$ 41.01 cm	40.73 cm	38.54 cm
ELONGATION AFTER PRE-LOAD	$(\Delta 2 - \Delta 1)$ 23.43 cm	23.28 cm	22.02 cm
RANGE OF ELONGATION	(-5%) 22.26 cm	22.11 cm	20.92 cm
	(+5%) 24.60 cm	24.44 cm	23.12 cm

Stressing Machine

Gauge Reading (kg/cm²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Dia 4 mm PC.Wire	Dia 5 mm PC.Wire	Dia 7 mm PC.Wire
Gauge Reading (kg/cm ²) × 22.5794 + 92.7381	30%	21.64	35.86	70.00
	70%	55.97	89.15	168.82
	75%	60.27	95.81	181.17
	80%	64.56	102.47	193.52
	40%	30.22		
	50%	38.80		
	60%	47.39		

จากตารางที่ 4.4 ได้ค่า Elongation 23.43 cm. ± 5 % ที่ความยาวรวมทั้งหมดขนาด 75.955 m. เมื่อใช้เปรียบเทียบกับความยาวความขนาด 2 m. จะได้ว่า Elongation 0.62 cm. ± 5 % ส่วนตารางด้านล่างเป็นการคำนวณเพื่อนำไปใช้ในกรณีตลาดโดยตั้งค่าให้ Gauge reading อ่านได้ดังตารางจึงสามารถตั้งได้ตามเปอร์เซ็นต์ที่ได้ออกแบบไว้

ตารางที่ 4.5 มาตรฐานตลาด PC-Wire Grade 1770N (มอก. 95 – 2540)

PRESTRESS STEEL THAI-STANDARD LOW RELAXATION								
ชนิด	GRADE	ITEM	DIA. (mm.)	A _{ps} (cm. ²)	f _{pu} (ksc.)	f _{py} (ksc.)	P _u (kg)	P _y (kg)
สาย PC - WIRE	1770N	Ø 4 mm.	4.0	0.126	18,000	15,380	2268	1938
		Ø 5 mm.	5.0	0.196	18,000	15,350	3528	3009
		Ø 7 mm.	7.0	0.385	17,000	14,490	6545	5579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 ค่า P_y คือ MIN. BREAKING STRENGTH (P)

ตารางที่ 4.6 การคำนวณการดึงลวด PC-Wire 4 mm. คานยาว 2 m.

Description			Dia 4 mm PC Wire	
BED LENGTH	(L)		2 m	
NORMAL DIA. OF WIRE			4 mm	
MODULUS OF ELASTICITY	(E)		2.00E+06	
CROSS SECTION AREA	(A)		12.6 mm ²	
MIN. BREAKING STRENGTH	(P)		1,938	kg
PRE-LOAD	30%	(P1)	581	kg
FINAL LOAD	40%	(P2)	775	kg
FINAL LOAD	50%	(P2)	969	kg
FINAL LOAD	60%	(P2)	1,163	kg
ELONGATION AT PRE-LOAD	30%	$\Delta 1 = (P1 \times L / AE)$	0.46	cm
ELONGATION AT FINAL-LOAD	40%	$\Delta 2 = (P1 \times L / AE)$	0.62	cm
ELONGATION AFTER PRE-LOAD		$(\Delta 2 - \Delta 1)$	0.154	cm
RANGE OF ELONGATION		(-5%)	0.147	cm
		(+5%)	0.162	cm

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบการหดตัวที่ได้จากการคำนวณและการวัดจริงโดยใช้ลวด PC-Wire 4 mm. คานยาว 2 m.

ELONGATION (cm)							
ELONGATION AT PRE-LOAD ($\Delta 1$)	ELONGATION AT FINAL-LOAD ($\Delta 2$)			ELONGATION AFTER PRE-LOAD จากการคำนวณ ($\Delta 2 - \Delta 1$)			
	30%	40%	50%	60%	40%	50%	60%
0.46	0.62	0.77	0.93	0.154	0.309	0.463	
RANGE OF ELONGATION				(-5%)	0.147	0.293	0.440
				(+5%)	0.162	0.324	0.486

ELONGATION AFTER PRE-LOAD จากการวัดจริง ($\Delta 2 - \Delta 1$)		
40%	50%	60%
0.150	0.300	0.450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าค่า Elongation การดึงลวด 40%, 50% และ 60% ที่วัดได้จริงอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของการหดตัวที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งการหดตัวนี้คือการหดตัวของลวดที่เข้าไปในคาน เมื่อการหดตัวจากการดึงลวดที่ 40%, 50% และ 60% ยอมรับได้แสดงว่าการลื่นไถล (Slip) จึงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้วย

เพราะฉะนั้นการดึงสูงสุดที่ 60% ซึ่งก็คือการดึงที่ 1163 kg เป็นการดึงที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดและคอนกรีต ั้งคงอยู่ซึ่งไม่เกินค่าแรงยึดเหนี่ยว 57.52% ที่เหลือในคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงเทียบกับคานมอร์ต้าอัดแรง



ตารางที่ 4.8 การทดสอบความทนทานกริดมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ตาร์อัดแรง

Prestressed Mortar Beam 1			
Load (kg)	Gauge 1 (mm)	Gauge 2 (mm)	Gauge 3 (mm)
500	6.97	6.13	6.00
1000	7.12	6.31	6.52
1500	7.27	6.53	6.76
2000	7.40	6.70	6.94
2500	8.11	7.00	8.17
3000	-	-	-

Prestressed Mortar Beam 2			
Load (kg)	Gauge 1 (mm)	Gauge 2 (mm)	Gauge 3 (mm)
200	0.46	0.52	0.46
400	0.47	0.57	0.50
600	0.49	0.61	0.53
800	0.53	0.65	0.57
1000	0.56	0.69	0.62
1200	0.61	0.75	0.67
1400	0.64	0.79	0.70
1600	0.69	0.84	0.75
1800	0.72	0.88	0.79
2000	0.76	0.93	0.83
2200	0.81	0.99	0.89
2400	0.85	1.04	0.92
2600	0.89	1.10	0.97
2800	0.94	1.15	1.02
3000	0.98	1.21	1.07
3200	1.01	1.25	1.10
3400	1.04	1.30	1.14
3600	1.10	1.36	1.19
3800	1.12	1.39	1.22
4000	1.15	1.43	1.26
4200	1.46	1.92	1.60
6000	-	-	-

Prestressed Lightweight Beam 1			
Load (kg)	Gauge 1 (mm)	Gauge 2 (mm)	Gauge 3 (mm)
200	0.50	0.68	0.66
400	0.55	0.74	0.71
600	0.57	0.78	0.75
800	0.60	0.84	0.80
1000	0.65	0.89	0.86
1200	0.69	0.96	0.92
1400	0.74	1.01	0.98
1600	0.80	1.08	1.04
1800	0.84	1.15	1.10
2000	0.89	1.21	1.16
2200	0.94	1.27	1.21
2400	0.99	1.34	1.27
2600	1.04	1.41	1.33
2800	1.11	1.51	1.40
3000	1.20	1.63	1.49
3200	1.29	1.78	1.60
3400	1.48	2.09	1.80
3600	1.85	2.52	2.05
3800	2.14	2.92	2.33
4000	2.34	3.20	2.41
4200	3.64	3.60	2.68
4400	3.07	4.08	2.88
4600	-	-	-

Prestressed Lightweight Beam 2			
Load (kg)	Gauge 1 (mm)	Gauge 2 (mm)	Gauge 3 (mm)
200	0.45	0.85	0.95
400	0.51	0.92	1.02
600	0.57	1.00	1.11
800	0.63	1.10	1.20
1000	0.68	1.18	1.30
1200	0.75	1.26	1.40
1400	0.81	1.35	1.50
1600	0.88	1.44	1.61
1800	0.94	1.53	1.72
2000	1.00	1.62	1.82
2200	1.06	1.71	1.90
2400	1.11	1.79	1.98
2600	1.15	1.87	2.05
2800	1.20	1.93	2.12
3000	1.25	2.00	2.20
3200	1.29	2.07	2.25
3400	1.35	2.25	2.37
3600	1.49	2.38	2.48
3800	1.57	2.52	2.60
4000	1.80	2.85	2.90
4200	2.00	3.17	3.12
4400	2.26	3.52	3.44
4600	2.40	3.74	3.50
4800	2.60	4.02	3.72
5000	2.74	4.26	3.91
5200	-	-	-

*หมายเหตุ แถบสีคือแรงกระทำที่เริ่มเห็นรอยแตกแล้ว

4.3.2. วิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง

เมื่อทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรงแล้ว นำมาคำนวณหาโมเมนต์ แรงเฉือน และการแอ่น โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ในตอนแรกที่มีสมมติแรงกระทำ 6 ตัน กระทำ 2 จุด

ค่าโมเมนต์ แรงเฉือน และการแอ่นตัวหาได้จากการคำนวณดังนี้

Prestressed Mortar Beam 2

$$\begin{aligned} W &= \gamma \times b \times w \\ &= 2118 \times 0.15 \times 0.30 \\ &= 95.31 \quad \text{kg/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= Pa + WL^2/8 \\ &= 3000(0.6) + (95.31 \times 1.8^2)/8 \\ &= 1839 \quad \text{kg.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= 300 + (95.31 \times 1.8)/2 \\ &= 3086 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

Prestressed Lightweight Beam 1

$$\begin{aligned} M &= 2300(0.6) + (1816 \times 0.15 \times 0.3) \times 1.8^2/8 \\ &= 1413 \quad \text{kg.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= 2300 + 147.1/2 \\ &= 2447 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

Prestressed Lightweight Beam 2

$$\begin{aligned} M &= 2600(0.6) + (1873 \times 0.15 \times 0.3) \times 1.8^2/8 \\ &= 1594 \quad \text{kg.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= 2600 + 151.72/2 \\ &= 2676 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

การแอ่นตัวได้จากการทดสอบจากการอ่านค่าเกจซึ่งค่าที่กึ่งกลางคานเป็นค่าที่มีการแอ่นมากที่สุด จึงนำค่าที่กึ่งกลางคานมาใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าโมเมนต์ แรงเฉือน และการแอ่นตัว ที่ได้จากการทดสอบคาน

ค่าที่คำนวณจากผลการทดสอบ	Prestressed Mortar Beam 2	Prestressed Lightweight Beam 1	Prestressed Lightweight Beam 2
M (kg/m)	1839	1413	1594
V (kg)	3086	2447	2676
Δ (mm)	1.92	4.08	4.26

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าคานมอร์ต้าอัดแรงตัวแรกมีค่าที่ได้ผิดพลาดเนื่องมาจากขั้นตอนในการผสมเพราะฉะนั้นค่าที่ได้จึงออกมาได้การแอ่นตัวที่มากเกินไปเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบ และแรงกระทำที่รับได้สูงสุดแค่ 3000 kg แต่คานอีก 3 ตัว มีค่าการแอ่นตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งพบว่าคานมอร์ต้าอัดแรงมีค่าการแอ่นตัวอยู่ในช่วงไม่เกิน 2 mm. และคานคอนกรีตอัดแรงมีค่าการแอ่นตัวอยู่ในช่วง 5 mm.

คานมอร์ต้าอัดแรงรับแรงกระทำได้ตามที่ออกแบบและส่วนคอนกรีตมวลเบาอัดแรงรับโมเมนต์ได้น้อยกว่า คานมอร์ต้าอัดแรง และรับแรงเฉือนได้น้อยคานมอร์ต้าอัดแรง ส่วนการแอ่นตัวของคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงมีแนวโน้มมากเป็น 2 เท่าของคานมอร์ต้าอัดแรง

แต่ทั้งนี้ผลอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงจากนี้เพราะเนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบมีไม่มากพอจึงได้ค่าที่ไม่ชัดเจน ถ้าจะนำค่าไปใช้ควรตรวจสอบโดยการทดสอบอีกครั้งจะได้ผลที่ชัดเจนและควรควบคุมการผสมให้ได้ 1 โมผสมต่อ 1 คาน เพื่อคานอัดแรงมวลเบาจะได้มีหน่วยน้ำหนักเท่ากันตลอดคานและไม่เสียเวลาในการรอการผสมซึ่งจะทำให้ส่วนที่เทไปก่อนแห้งหรือน้ำระเหยออกก่อนที่การผสมต่อไปจะผสมเสร็จเพื่อเทให้เต็มคาน ทั้งนี้ต้องมีคานอย่างน้อยส่วนผสมละ 3 ตัวอย่างเพื่อค่าที่ได้จะชัดเจนยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1. สรุปผลการศึกษา

ในการทดลองนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์แทนตัวอย่างต่าง ๆ ดังนี้

C-P	:	ทรายหยาบกับลวด PC-Wire 5 mm.
C-R	:	ทรายหยาบกับเหล็ก RB 6 mm.
F-P	:	ทรายละเอียดกับลวด PC-Wire 5 mm.
F-R	:	ทรายละเอียดกับเหล็ก RB 6 mm.

จากการศึกษาการความสัมพันธ์ระหว่างลวดอัดแรงกับคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC โดยคงค่าตัวแปรดังนี้

- Forming Agent G – S อัตราส่วน 5 % ของน้ำ
- W/C 0.4
- อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย 1:1

สามารถสรุปผลการศึกษาได้โดยแบ่งเป็น 4 การทดสอบ ดังนี้

1. การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด
2. การทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว
3. การทดสอบมาตรฐานของ เหล็ก RB 6 mm. และ ลวด PC-Wire 5 mm.
4. การทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง

5.1.1. สรุปผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) เป็นพื้นฐานในการตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแปรผัน โดยตรงกับกำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่าชุดตัวอย่างทดสอบแรงยึดเหนี่ยวนั้นมีกำลังรับแรงอัดเป็นเท่าใด และจากผลการศึกษาทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสมที่ใช้ นั้นถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบเราให้แปรผัน ดังนี้

- หน่วยน้ำหนักดังนี้ 1500, 1600, 1700, 1800 kg/m³ และมอร์ต้า(None)
- ทรายละเอียด (F) และทรายหยาบ (C)
- ลวดอัดแรง PC-Wire 5 mm. (P) และเหล็ก RB 6 mm. (R)

กำลังอัดจะแปรผันโดยตรงตามอายุ และหน่วยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นจากการทดสอบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m³ จึงมีกำลังอัดมากที่สุด และทรายหยาบจะรับแรงอัดได้ดีกว่าในคอนกรีตและมอร์ต้า แต่สำหรับคอนกรีตมวลเบาทรายละเอียดกลับดีกว่า

เพราะฉะนั้นถ้าเราจะออกแบบคานคอนกรีตมวลเบาควรใช้ทรายละเอียด หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m³ โดยเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตมอร์ต้า

5.1.2. สรุปผลการทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว

แรงยึดเหนี่ยว (Bonding strength) จากการศึกษพบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มแปรผันโดยตรงกับหน่วยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นจึงแปรผัน โดยตรงกับกำลังรับแรงอัดด้วย จากการทดสอบจึงสรุปได้ว่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ทรายละเอียดดีกว่าทรายหยาบ และเป็นเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดกล่าวคือทรายละเอียดทำให้แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตมวลเบาดีกว่าทรายหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และแรงยึดเหนี่ยวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเหล็ก RB 6 mm. และ PC-Wire 5 mm. มีค่าไม่ต่างกัน

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวเมื่อแปรผันชนิดทราย ชนิดเหล็กและหน่วยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน

Type	Bond at 28 Days (ksc)				
	1500	1600	1700	1800	None
C-P	10.07	19.68	19.78	22.51	46.6
C-R	9.14	18.17	21.26	23.48	38.89
F-P	10.3	18.19	21.15	26.47	46.02
F-R	10.89	19.92	23.76	27.82	38.89

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์แรงยึดเหนี่ยวที่หายไปจากคอนกรีตมวลเบาเทียบกับมอร์ต้า เมื่อแปรผันชนิดทราย ชนิดเหล็กและหน่วยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน

Type	% ที่หายไปจากคอนกรีตมวลเบาเทียบกับมอร์ต้า				
	1500	1600	1700	1800	None
C-P	78.39	57.77	57.55	51.70	-
C-R	76.50	53.28	45.33	39.62	-
F-P	77.62	60.47	54.04	42.48	-
F-R	72.00	48.78	38.90	28.46	-

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์แรงยึดเหนี่ยวที่เหลือในคอนกรีตมวลเบาเทียบกับมอร์ต้า เมื่อแปรผันชนิดทราย ชนิดเหล็กและหน่วยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน

Type	% ที่เหลือในคอนกรีตมวลเบาเทียบกับมอร์ต้า				
	1500	1600	1700	1800	None
C-P	21.61	42.23	42.45	48.30	-
C-R	23.50	46.72	54.67	60.38	-
F-P	22.38	39.53	45.96	57.52	-
F-R	28.00	51.22	61.10	71.54	-

จากตารางที่ 5.2 เมื่อนำคอนกรีตมวลเบามาเทียบกับมอร์ต้าจะทราบว่าแรงยึดเหนี่ยวลดลงจากมอร์ต้าเท่าไร และจะสรุปได้ว่าที่เหลือเปอร์เซ็นต์ในแรงยึดเหนี่ยวเท่าไรในคอนกรีตมวลเบาจากตารางที่ 5.3 ค่าที่ดีที่สุดคือ F-P 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะมีแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 57.52% ของมอร์ต้าซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด โดยไม่คิดแรงยึดเหนี่ยวที่ทดสอบโดยเหล็ก RB 6 mm. เพราะค่าที่ได้นั้นเกินกำลังครากของเหล็กจึงไม่สามารถหาแรงยึดเหนี่ยวที่แท้จริงได้ จึงสรุปส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้ทรายละเอียด ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5.1.3. สรุปผลการทดสอบมาตรฐานของ เหล็ก RB 6 mm. และ ลวด PC-Wire 5 mm.

จากการทดสอบพบว่าชนิดเหล็กที่นำมาทดสอบมีกำลังคราก (Yield strength) ของเหล็ก RB 6 mm. และลวด PC-Wire 5 mm.

- RB 6 mm. พบว่ามีกำลังคราก เท่ากับ 3,690 ksc และกำลังสูงสุดเท่ากับ 4,668 ksc และระยะยืดเท่ากับ 34 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน มอก. 20 – 2543
- PC-Wire 5 mm. พบว่ามีกำลังคราก เท่ากับ 17,611 ksc และ กำลังสูงสุด เท่ากับ 18,285 ksc ตามมาตรฐาน ASTM A421 ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.(นิ้ว)	กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ชม ² (ปอนด์/นิ้ว ²)		กำลังครากอย่างน้อยที่สุด(ที่1%หน่วยการยืดตัว)กก.ชม ² (ปอนด์/นิ้ว ²)	
		ชนิดปลายยึดเป็นปม	ชนิดลายยึดเป็นลิ่ม	ชนิดปลายยึดเป็นปม	ชนิดปลายยึดเป็นลิ่ม
4.88(0.192)	1.870(0.029)	-	17,580(250,000)	-	14,060(200,000)
4.98(0.196)	19.48(0.030)	16,870(240,000)	17,580(250,000)	13,500(192,000)	14,060(200,000)
6.35(0.250)	31.67(0.049)	16,870(240,000)	16,870(240,000)	13,500(192,000)	13,500(192,000)
7.01(0.276)	38.59(0.060)	-	16,520(235,000)	-	13,220(188,000)

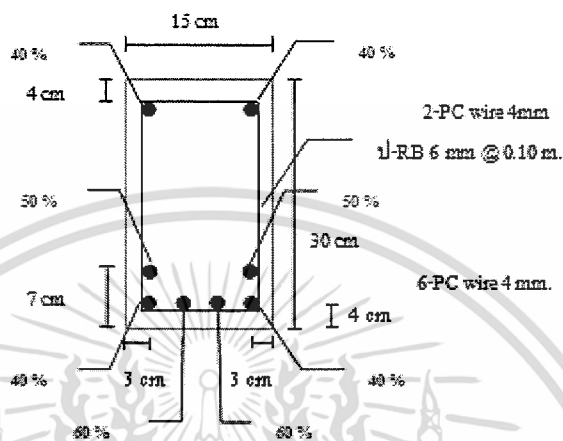
ตารางที่ 5.5 มาตรฐานลวด PC-Wire Grade 1770N (มอก. 95 – 2540)

PRESTRESS STEEL THAI-STANDARD LOW RELAXATION								
ชนิด	GRADE	ITEM	DIA. (mm.)	A _{ps} (cm. ²)	f _{pu} (ksc.)	f _{py} (ksc.)	P _u (kg)	P _y (kg)
ด้ายPC-WIRE	1770N	Ø 4 mm.	4.0	0.126	18,000	15,380	2268	1938
		Ø 5 mm.	5.0	0.196	18,000	15,350	3528	3009
		Ø 7 mm.	7.0	0.385	17,000	14,490	6545	5579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.4 และ 5.5 เป็นมาตรฐานลวดเหล็กกล้าอัดแรงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ในที่นี้ใช้ ตารางที่ 5.5 เพื่อสะดวกในการออกแบบผ่านโปรแกรมคำนวณที่ใช้มาตรฐานตารางที่ 5.5

5.1.4. สรุปผลการทดสอบคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงและคานมอร์ต้าอัดแรง



รูปที่ 5.1 หน้าตัดคาน การวางลวด เหล็กปลอก และเปอร์เซ็นต์ตั้ง

จากการทดสอบคานขนาด 15×30 cm. ยาว 2.00 ม. เสริมด้วยลวด PC-Wire ขนาด 4 mm. โดยใช้แรงกระทำแบบ 2 จุดทำการเปรียบเทียบระหว่างคานมอร์ต้าอัดแรงและคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 โดยให้ค่าตัวแปรที่กำหนดในการทดสอบมีดังนี้

ตัวแปรคงที่

- Forming Agent G – S อัตราส่วน 5 % ของน้ำ
- W/C 0.4
- อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย 1:1
- ทรายละเอียด (F)
- ลวดอัดแรง PC-Wire 4 mm.

และตัวที่จะแปรผันคือ

- หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 และมอร์ต้า (None)

ทดสอบโดยดึงลวด PC-Wire 4 mm. ด้วยแรงดึง 40%, 50% และ 60% ของแรงที่จุดครากของลวด (P_y) บนหน้าตัดเดียวกัน

ค่า Elongation ที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงมีค่ามากกว่าคานมอร์ต้าอัดแรง เมื่อใช้แรงดึงลวดเท่ากันและเมื่อให้แรงดึงลวดมากขึ้นค่า Elongation จะเพิ่มมากขึ้นเป็นสัดส่วน โดยตรงทั้ง 2 กรณี ซึ่งค่า Elongation บ่งบอกถึงการลื่นไถล(Slip) เข้าไปในคานของลวด PC-Wire เนื่องจากค่า Elongation ผ่านการลื่นไถลจึงอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้

คานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงที่มีหน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 สามารถรับแรงดึงลวดได้มากถึง 60% เห็นได้จากการออกแบบที่แปรผันค่าแรงดึงลวด ผลปรากฏว่าตรวจสอบค่า Elongation ผ่านทุกตัว

คานคอนกรีตมวลเบาอัดแรงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อยู่ในช่วง 4.6 – 5.2 ตัน ดังแสดงในบทที่ 4 ตารางที่ 4.28 เทียบได้เป็นประมาณ 80% ของคานมอร์ต้าอัดแรงซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกได้ถึง 6 ตัน

จากผลการทดสอบในบทที่ 4 เรื่องการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 จะยังคงเหลือแรงยึดเหนี่ยว 57.52% เทียบกับมอร์ต้า ดังแสดงในตารางที่ 5.3 สรุปได้ว่าค่าที่ดึงถึง 60% ของแรงที่จุดครากของลวดยังไม่เกินค่า 57.52% นี้ซึ่งถือว่าตรวจสอบการลื่นไถลผ่าน

เพราะฉะนั้นเราสามารถดึงลวด PC-Wire ได้ถึง 60% ด้วยแรงดึง 1163 kg หรือ ดึงด้วยเครื่องดึงโดยตั้งค่าให้อ่านเกจได้ 47.39 ksc ดังแสดงในตารางที่ 4.3.4

5.2. ปัญหาที่เกิดขึ้นในการศึกษา

- เครื่อง UTM ที่ใช้ทดสอบค่าแรงยึดเหนี่ยวนั้นขัดข้องอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง ทำให้ไม่สามารถทดสอบตามอายุของตัวอย่างที่ 3 และ 7 วันของบางตัวอย่างที่ต้องการได้
- การที่จะผสมคานคอนกรีตในแบบหล่อต้องผสมที่สถานที่ที่มีเครื่องดึงลวด Prestress และแบบหล่อคานพร้อม ซึ่งการผสมแล้วทิ้งแบบให้ได้อายุคอนกรีตเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของบริษัทที่เอื้ออำนวยสถานที่ จึงเป็นการจำกัดเวลาในการทดสอบ
- เครื่อง UTM ค่าที่อ่านได้เป็นค่าประมาณ เพราะการเพิ่มของแรงไม่สม่ำเสมอ
- การหล่อลูกปูนสำหรับการทดสอบ Bonding strength บางลูกมีฟองอากาศอยู่จำนวนมากทำให้บริเวณลวดที่ยึดเกาะกับคอนกรีตมวลเบาน้อย จึงทำให้ลวดหลุดก่อนทำการทดสอบ หรือมีค่าดึงสูงสุดน้อย
- การฉีดโฟมฟองอากาศการควบคุมคุณภาพ โฟมที่ได้ไม่คงที่ ต้องอาศัยการชั่งน้ำหนัก โฟมที่ได้เปรียบเทียบกับปริมาณเพื่อตรวจสอบหน่วยน้ำหนัก
- การขนย้ายคานมาทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธามีระยะทางไกลจึงมีค่าใช้จ่ายเรื่องค่าขนส่งสูงและส่งผลให้ต้องจำกัดจำนวนคานตัวอย่างที่ผสมเพื่อลดจำนวนเที่ยวในการขนส่ง

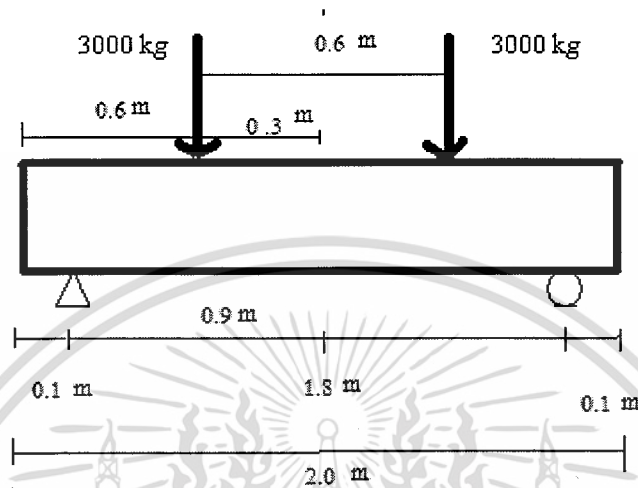
- วันที่ต้องดึงลวดและผสมคานเกิดเหตุขัดข้องกับทางบริษัทที่เอื้ออำนาจสถานที่และวัสดุคือ ลวด PC-Wire 5 mm. ที่ต้องใช้ในดึงอัดแรงหมดจึงต้องเปลี่ยนไปใช้ PC-Wire 4 mm. แทน โดยทำการออกแบบการวางลวดใหม่
- โม้ผสม 1 โม้ไม่สามารถผสมรองรับคานได้ทั้งตัว จึงต้องมีการผสมทีละครั้งดังนั้นการควบคุมการผสมและและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาจึงทำได้ยาก การเทคานในแต่ ละโม้จะทิ้งช่วงนาน
- เนื่องจากค่าขนส่งและเวลาที่จำกัดการหล่อคานตัวอย่างจึงได้มาอย่างจำกัดจำนวนทำให้ ค่าที่ได้จึงยังไม่ชัดเจน เพราะฉะนั้นหากต้องการนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปใช้ควรทำการ หล่อคานและทดสอบซ้ำจะได้ค่าที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

5.3. ข้อเสนอแนะ

- จากการทำการทดสอบมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบค่า Elongation เท่านั้น โดยการคุณสมบัติ ของคานอย่างอื่นนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้อ้างอิงได้เนื่องจากลวดแต่ละเส้นบนหน้าตัด คานมีการดึงด้วยเปอร์เซ็นต์ที่ต่างกันและคานตัวอย่างมีน้อยเกินกว่าจะสรุปได้
- การทำงานวิจัยนี้จะได้คุณภาพงานที่ดีควรจะมีสถานที่ที่อำนวยความสะดวกโดยไม่จำกัด เรื่องเวลาตลอดการทำวิจัย
- สถานที่ที่ทำการหล่อคานและดึงลวดควรจะเป็นสถานที่ที่อยู่ไม่ไกลกับสถานที่ที่ทดสอบ คานมากนัก
- ควรทำการหล่อคานและทดสอบซ้ำอีกครั้ง โดยมีส่วนผสมละ 3 ตัวอย่างเพื่อผลสรุปจะได้ ชัดเจนและแน่นอน

ภาคผนวก

ออกแบบคานเริ่มแรกโดยสมมติแรงกระทำ 6 ตัน กระทำ 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 1 การออกแบบคานเพื่อทดสอบคุณสมบัติคาน

$$\begin{aligned}
 \text{Self weight (น้ำหนักคาน)} \quad W &= \gamma \times b \times w \\
 &= 2400 \times 0.15 \times 0.30 \\
 &= 108 \quad \text{kg/m} \\
 M &= Pa + WL^2/8 \\
 &= 3000(0.6) + 108 \times 1.8^2/8 \\
 &= 1844 \quad \text{kg-m} \\
 V &= 3000 + 194.4/2 \\
 &= 3097 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปออกแบบหาระยะวางเหล็กปลอกโดยใช้ทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็กออกแบบคานรับแรงเฉือน

ออกแบบคานรับแรงเฉือน

f_c'	350	$L =$	1.80	m
b_w	15	น.น.คาน	108	kg/m
d	30	$d' =$	27.4	

หัวคาน ส่วนที่ไว้

$$V_u = 3097 \text{ kg}$$

$$\text{กำลังรับแรงเฉือนโดยคอนกรีต } V_c = 0.29 \cdot \text{SQRT}(f_c') \cdot b_w \cdot d = 2229.841 \text{ กก.} \quad V_c = 12372$$

$$\text{แรงเฉือนส่วนเกิน } V' = V_u - V_c = 867.1593 \text{ กก.}$$

$$1.32 \cdot \text{SQRT}(f_c') \cdot b_w \cdot d = 10149.61983 \text{ กก.} \quad V' > 1.32 \cdot \text{SQRT}(f_c') \cdot b_w \cdot d \quad \text{เปลี่ยนหน้าตัด}$$

$$0.795 \cdot \text{SQRT}(f_c') \cdot b_w \cdot d = 6112.839214 \text{ กก.} \quad 0.795 < V' < 1.32 \quad S_{max} = 6.85 \text{ ซม.} < 60$$

$$V' < 0.795 \cdot \text{SQRT}(f_c') \cdot b_w \cdot d \quad S_{max} = 13.7 \text{ ซม.} < 30$$

ใช้ 10 ซม.

$$S_{max} = 451094.2 \text{ ซม.}$$

$$\text{เลือกเหล็กเสริมรับลูกตั้งขนาด} = 0.6 \text{ cm} \quad A_v = 0.565487 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 2400 \text{ ksc}$$

$$\text{ระยะเรียงที่ต้องใช้} = 23.4761 \text{ cm}$$

จากการออกแบบคานรับแรงเฉือน เลือกใช้ระยะวางเหล็กปลอกที่ 10 เซนติเมตร เป็นระยะที่ปลอดภัยที่ทำให้ไม่พังที่เกิดจากแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALCULATION OF PC BEAM

DESIGN CRITERIA

High =	30	cm			
Width =	15	cm	Span =	2.00	m

PROPERTIES OF MATERIALS

Concrete :	$f'_c =$	350.00	ksc	Allowable stress	Transfer	Service
	$f'_a =$	245.00	ksc	compression (ksc)	147.00	140.00
	$E_c =$	282,869	ksc	tension (ksc)	-12.52	-29.75
	$\beta_1 =$	0.8				
Prestressing Steel :	PC WIRE	\emptyset	4 mm.			
Area Wire =	0.1260	cm ²	$\gamma_\pi =$	0.40		
$f_{pu} =$	18,000	ksc	$f_{pi} =$	13,500	ksc	
$f_{py} =$	15,380	ksc	$f_{pe} =$	11,364	ksc	
Prestress Loss	15.82%					

DESIGN LOAD

$$M_{design} = 1,839 \text{ kg-m.}$$

SECTION PROPERTIES

$A_c =$	450	cm ²	$e =$	4.75	cm		
$I_{NA} =$	33,750	cm ⁴	$y_i =$	15.00	cm	$S_i =$	2,250 cm ³
$r^2 =$	75.00	cm ²	$y_b =$	15.00	cm	$S_b =$	2,250 cm ³

TENDON ARRANGMENT

At top =	2	nos.	At bottom =	6	nos.	$e =$	4.75	cm.
$P_i =$	13,608	kg.	$P_c =$	11,455	kg.			

CHECK STRESS เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fiber	Transfer (ksc.)		service (ksc.)	
top	3.91	O.K.	83.01	O.K.
bottom	56.57	O.K.	-32.10	NO O.K.

NON-PRESTRESS STEEL

USED 0 RB 9 mm. $A_s = 0 \text{ cm}^2 > 0.004A = 0.90 \text{ cm}^2$

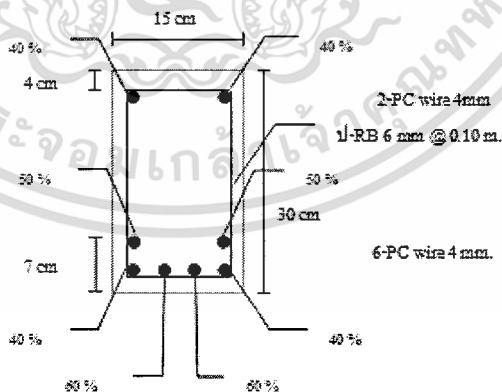
CHECK MOMENT

$\phi M_n = 3,513 \text{ kg-m.} > M_u \text{ O.K.}$
 $1.2M_{cr} = 2,148 \text{ kg-m.} < \phi M_n \text{ O.K.}$

CHECK DEFLECTION

$\Delta_{\text{allowable}} = 0.56 \text{ cm.}$
 At transfer $\Delta = 0.04 \text{ cm.} \uparrow < L/360 \text{ O.K.}$
 At service $\Delta = -0.05 \text{ cm.} \downarrow < L/360 \text{ O.K.}$

จากการคำนวณการแอ่นตัวที่ยอมรับได้คือ 0.56 cm. หรือ 5.6 mm.



รูปที่ 2 หน้าตัดคาน การวางลวด เหล็กปลอก และเปอร์เซ็นต์คั้ง

ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 1 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m^3 หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1466 kg/m^3 ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	26.611	5.10	0.16987	3	9.0	917.4	34.5	1251.6475
2	27.248	5.00	0.17361	3	8.0	815.5	29.9	1274.2767
3	26.721	5.06	0.16639	3	9.0	917.4	34.3	1230.6293
average			0.16996		8.7	883.5	32.9	1252.1845
1	25.802	5.10	0.16987	7	18.0	1834.9	71.1	1290.9266
2	25.552	5.06	0.16829	7	20.0	2038.7	79.8	1301.5957
3	25.654	5.06	0.16639	7	15.0	1529.1	59.6	1281.8040
average			0.16818		17.7	1800.9	70.2	1291.4421
1	25.500	5.00	0.17458	28	30.0	3058.1	119.9	1369.2549
2	24.900	5.00	0.17361	28	35.0	3567.8	143.3	1394.4578
3	24.892	5.00	0.17099	28	38.0	3873.6	155.6	1373.8551
average			0.17306		34.3	3499.8	139.6	1379.1893

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1604 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	24.594	5.08	0.18657	3	20.0	2038.7	82.8974	1493.3368
2	25.200	5.00	0.20646	3	23.0	2344.5	93.0376	1638.5714
3	24.892	5.00	0.18299	3	25.0	2548.4	102.3791	1470.2716
average			0.19201		22.7	2310.6	92.7713	1534.0599
1	25.900	5.08	0.18962	7	30.0	3058.1	118.0735	1441.1881
2	25.900	5.06	0.18657	7	30.0	3058.1	118.0735	1423.6116
3	25.200	5.00	0.18299	7	28.0	2854.2	113.2631	1452.3016
average			0.18639		29.3	2990.1	116.4700	1439.0338
1	25.000	5.00	0.20401	28	50.0	5096.8	203.8736	1632.0800
2	25.200	5.00	0.20381	28	52.0	5300.7	210.3458	1617.5397
3	25.750	5.00	0.20646	28	50.0	5096.8	197.9355	1603.5728
average			0.20476		50.7	5164.8	204.0516	1617.7308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ไซ้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1714 kg/m³ ไซ้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	26.010	5.06	0.20700	3	28.0	2854.2	109.7359	1572.8216
2	25.805	5.02	0.20800	3	30.0	3058.1	118.5091	1605.6805
3	25.603	5.00	0.20700	3	34.0	3465.9	135.3679	1616.9854
average			0.20733		30.7	3126.1	121.2043	1598.4958
1	25.150	5.12	0.22099	7	36.0	3669.7	145.9135	1716.1873
2	25.301	5.08	0.22057	7	40.0	4077.5	161.1592	1716.1165
3	26.107	5.06	0.22330	7	50.0	5096.8	195.2274	1690.3550
average			0.22162		42.0	4281.3	167.4333	1707.5529
1	25.704	5.00	0.22566	28	70.0	7135.6	277.6057	1755.8357
2	25.400	5.02	0.22253	28	75.0	7645.3	300.9945	1745.2238
3	25.551	5.00	0.22220	28	70.0	7135.6	279.2680	1739.2666
average			0.22346		71.7	7305.5	285.9560	1746.7754

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1780 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	24.900	5.06	0.20700	3	40.0	4077.5	163.7539	1642.9354
2	25.000	5.02	0.20800	3	40.0	4077.5	163.0989	1657.3705
3	25.000	5.00	0.20700	3	38.0	3873.6	154.9439	1656.0000
average			0.20733		39.3	4009.5	160.5989	1652.1020
1	25.600	5.02	0.21387	7	50.0	5096.8	199.0953	1664.2026
2	25.502	5.02	0.21287	7	54.0	5504.6	215.8484	1662.7800
03	25.100	5.12	0.22660	7	60.0	6116.2	243.6736	1763.2595
average			0.21778		54.7	5572.5	219.5391	1696.7474
1	26.055	5.00	0.23384	28	84.0	8562.7	328.6340	1794.9446
2	25.803	5.00	0.23269	28	88.0	8970.4	347.6537	1803.6027
3	25.956	5.00	0.23299	28	88.0	8970.4	345.6017	1795.2689
average			0.23317		86.7	8834.5	340.6298	1797.9387

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 มอร์ต้า หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 2216 kg/m^3 ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.300	5.04	0.26797	3	78.0	7951.1	314.2716	2101.5277
2	26.305	5.02	0.26826	3	82.0	8358.8	317.7678	2031.5017
3	25.552	5.00	0.26789	3	79.0	8053.0	315.1566	2096.7893
average			0.26804		79.7	8121.0	315.7320	2076.6063
1	25.000	5.02	0.26998	7	100.0	10193.7	407.7488	2151.2437
2	25.653	5.02	0.27154	7	109.0	11111.1	433.1311	2108.5812
3	25.654	5.12	0.27226	7	110.0	11213.0	437.0877	2072.7762
average			0.27126		106.3	10839.3	425.9892	2110.8670
1	25.000	5.00	0.27828	28	160.0	16309.9	652.3955	2226.2400
2	24.750	5.00	0.27654	28	160.0	16309.9	658.9854	2234.6667
3	25.000	5.00	0.27550	28	138.0	14067.3	562.6911	2204.0000
average			0.27677		152.7	15562.4	624.6907	2221.6356

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1484 kg/m³ ใช้ทดสอบ R

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	26.611	5.10	0.16787	3	12.0	1223.2	46.0	1236.9110
2	27.248	5.00	0.17861	3	10.0	1019.4	37.4	1310.9761
3	26.721	5.06	0.16939	3	9.0	917.4	34.3	1252.8175
average			0.17196		10.3	1053.3	39.2	1266.9015
1	25.502	5.00	0.17271	7	14.0	1427.1	56.0	1354.5032
2	25.600	5.00	0.17292	7	14.0	1427.1	55.7	1350.9375
3	25.200	5.10	0.17390	7	16.0	1631.0	64.7	1353.0968
average			0.17318		14.7	1495.1	58.8	1352.8458
1	25.198	5.02	0.19785	28	38.0	3873.6	153.7	1564.1125
2	25.200	5.00	0.19823	28	40.0	4077.5	161.8	1573.2540
3	25.200	5.00	0.20076	28	38.0	3873.6	153.7	1593.3333
average			0.19895		38.7	3941.6	156.4	1576.8999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m^3 หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1610 kg/m^3 ใช้ทดสอบ R

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	24.594	5.08	0.16987	3	10.0	1019.4	41.4487	1359.6672
2	25.200	5.00	0.16861	3	9.0	917.4	36.4060	1338.1746
3	24.892	5.00	0.16949	3	9.0	917.4	36.8565	1361.8030
average			0.16932		9.3	951.4	38.2370	1353.2149
1	25.000	5.08	0.17475	7	18.0	1834.9	73.3945	1375.9843
2	25.050	5.10	0.17573	7	18.0	1834.9	73.2480	1375.5235
3	25.650	5.00	0.17417	7	16.0	1631.0	63.5863	1358.0507
average			0.17488		17.3	1766.9	70.0763	1369.8528
1	25.502	5.02	0.20900	28	50.0	5096.8	199.8635	1632.5825
2	25.500	5.00	0.20800	28	50.0	5096.8	199.8761	1631.3725
3	25.700	5.00	0.20960	28	48.0	4893.0	190.3878	1631.1284
average			0.20887		49.3	5028.9	196.7091	1631.6945

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1804 kg/m^3 ใช้ทดสอบ R

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	24.900	5.06	0.19865	3	18.0	1834.9	73.6893	1576.6624
2	25.000	5.02	0.19762	3	20.0	2038.7	81.5494	1574.6614
3	25.000	5.00	0.19653	3	22.0	2242.6	89.7044	1572.2400
average			0.19760		20.0	2038.7	81.6477	1574.5212
1	25.100	5.04	0.20148	7	28.0	2854.2	113.7144	1592.6769
2	25.702	5.04	0.20692	7	30.0	3058.1	118.9813	1597.3433
3	25.803	5.00	0.20614	7	30.0	3058.1	118.5183	1597.8111
average			0.20485		29.3	2990.1	117.0713	1595.9438
1	25.400	5.00	0.21938	28	85.0	8664.6	341.1271	1727.4016
2	25.400	5.04	0.21919	28	78.0	7951.1	313.0343	1712.2078
3	25.200	5.00	0.21765	28	85.0	8664.6	343.8344	1727.3810
average			0.21874		82.7	8426.8	332.6653	1722.3301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ใช้ทรายหยาบหน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m^3 หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1700 kg/m^3 ใช้ทดสอบ R

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	26.010	5.06	0.19653	3	15.0	1529.1	58.7871	1493.2688
2	25.805	5.02	0.19643	3	14.0	1427.1	55.3043	1516.3799
3	25.603	5.00	0.19754	3	16.0	1631.0	63.7025	1543.0884
average			0.19683		15.0	1529.1	59.2646	1517.5790
1	25.000	5.02	0.19780	7	22.0	2242.6	89.7044	1576.0956
2	25.000	5.28	0.20343	7	20.0	2038.7	81.5507	1541.1610
3	25.900	5.08	0.20271	7	28.0	2854.2	110.2019	1540.6773
average			0.20131		23.3	2378.5	93.8190	1552.6447
1	25.500	5.00	0.21803	28	68.0	6931.7	271.8315	1710.0392
2	25.803	5.00	0.21730	28	68.0	6931.7	268.6415	1684.3133
3	25.500	5.00	0.21421	28	65.0	6625.9	259.8389	1680.0784
average			0.21651		67.0	6829.8	266.7706	1691.4770

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 มอร์ต้า หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 2260 kg/m^3 ใช้ทดสอบ R

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.300	5.04	0.25463	3	45.0	4587.2	181.3105	1996.9101
2	26.305	5.02	0.25489	3	55.0	5606.5	213.1369	1930.2523
3	25.552	5.00	0.25789	3	48.0	4893.0	191.4875	2018.5188
average			0.25580		49.3	5028.9	195.3117	1981.8937
1	25.600	5.08	0.26109	7	78.0	7951.1	310.5887	2007.6433
2	25.400	5.00	0.26358	7	80.0	8154.9	321.0608	2075.4331
3	25.100	5.00	0.26181	7	102.0	10397.6	414.2452	2086.1355
average			0.26216		86.7	8834.5	348.6315	2056.4040
1	25.000	5.00	0.27612	28	152.0	15494.4	619.7857	2208.9953
2	25.100	5.00	0.27525	28	150.0	15290.5	609.1841	2193.2271
3	24.999	5.00	0.27638	28	155.0	15800.2	632.0309	2211.1196
average			0.27592		152.3	15528.4	620.3335	2204.4473

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1556 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	26.611	5.05	0.18500	3	20.0	2038.7	76.6	1376.6258
2	27.248	5.06	0.18300	3	18.0	1834.9	67.3	1327.2709
3	26.721	5.00	0.18500	3	15.0	1529.1	57.2	1384.6891
average			0.18433		17.7	1800.9	67.1	1362.8619
1	26.506	5.10	0.19100	7	20.0	2038.7	76.9	1412.9460
2	26.300	5.06	0.19300	7	24.0	2446.5	93.0	1450.2773
3	26.500	5.06	0.19100	7	22.0	2242.6	84.6	1424.4164
average			0.19167		22.0	2242.6	84.9	1429.2132
1	26.464	5.02	0.19800	28	40.0	4077.5	154.1	1490.4221
2	26.413	5.01	0.20400	28	30.0	3058.1	115.8	1541.5990
3	26.510	5.02	0.20600	28	40.0	4077.5	153.8	1547.9154
average			0.20267		36.7	3737.7	141.2	1526.6455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1600 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	24.594	5.00	0.17000	3	25.0	2548.4	103.6217	1382.4791
2	25.200	5.10	0.17470	3	20.0	2038.7	80.9022	1359.3215
3	24.892	5.00	0.17400	3	22.0	2242.6	90.0936	1398.0395
average			0.17290		22.3	2276.6	91.5392	1379.9467
1	25.050	5.04	0.20000	7	40.0	4077.5	162.7733	1584.1333
2	25.952	5.02	0.19700	7	35.0	3567.8	137.4775	1512.1505
3	25.150	5.01	0.19600	7	37.0	3771.7	149.9667	1555.5370
average			0.19767		37.3	3805.6	150.0725	1550.6070
1	25.401	4.98	0.20100	28	47.0	4791.0	188.6143	1588.9582
2	25.900	5.01	0.21200	28	47.0	4791.0	184.9818	1633.7980
3	25.395	5.03	0.21000	28	50.0	5096.8	200.7009	1643.9919
average			0.20767		48.0	4893.0	191.4324	1622.2494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1700 kg/m^3 หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1702 kg/m^3 ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	26.010	5.06	0.20700	3	28.0	2854.2	109.7359	1572.8216
2	25.805	5.02	0.20800	3	30.0	3058.1	118.5091	1605.6805
3	25.603	5.00	0.20700	3	34.0	3465.9	135.3679	1616.9854
average			0.20733		30.7	3126.1	121.2043	1598.4958
1	26.405	5.24	0.23100	7	40.0	4077.5	154.4193	1669.5185
2	25.900	5.22	0.23000	7	50.0	5096.8	196.7892	1701.2086
3	27.719	5.00	0.23000	7	50.0	5096.8	183.8753	1659.5115
average			0.23033		46.7	4757.1	178.3613	1676.7462
1	26.832	5.22	0.23000	28	75.0	7645.3	284.9275	1642.0994
2	27.719	5.05	0.23200	28	73.0	7441.4	268.4580	1657.3684
3	25.500	5.00	0.23221	28	70.0	7135.6	279.8265	1821.2549
average			0.23140		72.7	7407.4	277.7373	1706.9075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1880 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	24.900	5.14	0.22200	3	30.0	3058.1	122.8154	1734.5647
2	25.000	5.07	0.21700	3	40.0	4077.5	163.0989	1712.0316
3	25.000	5.06	0.21700	3	35.0	3567.8	142.7115	1715.4150
average			0.21867		35.0	3567.8	142.8753	1720.6704
1	25.100	5.20	0.22700	7	50.0	5096.8	203.0614	1739.1971
2	25.200	5.20	0.23000	7	55.0	5606.5	222.4811	1755.1893
3	25.402	5.20	0.22800	7	58.0	5912.3	232.7553	1726.1246
average			0.22833		54.3	5538.6	219.4326	1740.1703
1	27.353	5.02	0.25014	28	104.0	10601.4	387.5811	1821.7033
2	27.562	5.06	0.25135	28	104.0	10601.4	384.6337	1802.2347
3	26.726	5.02	0.24442	28	100.0	10193.7	381.4086	1821.7659
average			0.24864		102.7	10465.5	384.5411	1815.2346

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 มอร์ต้า หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 2260 kg/m^3 ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.300	5.04	0.25463	3	50.0	5096.8	201.4561	1996.9101
2	26.305	5.02	0.25489	3	70.0	7135.6	271.2652	1930.2523
3	25.552	5.00	0.25789	3	65.0	6625.9	259.3061	2018.5188
average			0.25580		61.7	6286.1	244.0091	1981.8937
1	25.800	5.08	0.26118	7	120.0	12232.4	474.1246	1992.7669
2	25.452	5.00	0.26892	7	110.0	11213.0	440.5601	2113.1708
3	25.301	5.02	0.26182	7	120.0	12232.4	483.4794	2061.4122
average			0.26397		116.7	11892.6	466.0547	2055.7833
1	25.502	5.00	0.27480	28	180.0	18348.6	719.4862	2155.0913
2	25.401	5.00	0.27318	28	170.0	17329.3	682.2219	2150.9220
3	25.400	5.00	0.27220	28	150.0	15290.5	601.9890	2143.3071
average			0.27339		166.7	16989.5	667.8990	2149.7735

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 16 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1520 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.100	5.05	0.18100	3	10.0	1019.4	40.6	1427.9516
2	25.301	5.02	0.18412	3	14.0	1427.1	56.4	1449.6495
3	25.200	5.00	0.18323	3	12.0	1223.2	48.5	1454.1833
average			0.18278		12.0	1223.2	48.5	1443.9281
1	25.402	5.04	0.18756	7	20.0	2038.7	80.3	1465.0371
2	26.300	5.06	0.18953	7	18.0	1834.9	69.8	1424.2023
3	26.500	5.05	0.18625	7	22.0	2242.6	84.6	1391.7654
average			0.18778		20.0	2038.7	78.2	1427.0016
1	25.200	5.02	0.19234	28	37.0	3771.7	149.7	1520.4262
2	25.100	5.00	0.19202	28	37.0	3771.7	150.3	1530.0398
3	25.000	5.00	0.19279	28	35.0	3567.8	142.7	1542.3200
average			0.19238		36.3	3703.7	147.5	1530.9287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1600 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1634 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.401	5.02	0.19488	3	22.0	2242.6	88.2875	1528.3025
2	25.200	5.04	0.19818	3	28.0	2854.2	113.2613	1560.3494
3	25.301	5.00	0.19769	3	26.0	2650.4	104.7539	1562.7411
average			0.19692		25.3	2582.4	102.1009	1550.4643
1	25.050	5.04	0.19836	7	34.0	3465.9	138.3573	1571.1434
2	25.301	5.02	0.19863	7	38.0	3873.6	153.1018	1563.8924
3	25.150	5.02	0.19982	7	36.0	3669.7	145.9135	1582.6951
average			0.19894		36.0	3669.7	145.7909	1572.5770
1	24.900	5.00	0.20649	28	52.0	5300.7	212.8801	1658.5542
2	25.000	5.05	0.20655	28	52.0	5300.7	212.0285	1636.0396
3	24.500	5.01	0.20537	28	55.0	5606.5	228.8377	1673.1435
average			0.20614		53.0	5402.7	217.9154	1655.9124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1702 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.301	4.98	0.20443	3	30.0	3058.1	120.8699	1622.4863
2	25.301	5.00	0.20437	3	20.0	2038.7	80.5799	1615.5220
3	25.000	5.00	0.20423	3	26.0	2650.4	106.0143	1633.8400
average			0.20434		25.3	2582.4	102.4880	1623.9494
1	25.301	5.02	0.20923	7	40.0	4077.5	161.1598	1647.3504
2	25.100	5.04	0.20983	7	38.0	3873.6	154.3266	1658.6985
3	25.100	5.00	0.20863	7	42.0	4281.3	170.5715	1662.4064
average			0.20923		40.0	4077.5	162.0193	1656.1518
1	25.000	5.00	0.21440	28	68.0	6931.7	277.2681	1715.2000
2	25.000	5.00	0.21486	28	70.0	7135.6	285.4230	1718.8800
3	25.704	5.04	0.21494	28	68.0	6931.7	269.6741	1659.1513
average			0.21473		68.7	6999.7	277.4551	1697.7438

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19 ใช้ทรายละเอียดหน่วยน้ำหนัก 1500 kg/m³ หน่วยน้ำหนักที่ได้จริง 1806 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.301	5.00	0.21257	3	30.0	3058.1	120.8699	1680.3421
2	25.400	5.04	0.21161	3	36.0	3669.7	144.4774	1652.9965
3	25.000	5.00	0.21265	3	33.0	3363.9	134.5566	1701.2000
average			0.21228		33.0	3363.9	133.3013	1678.1795
1	25.100	5.00	0.21899	7	50.0	5096.8	203.0614	1744.9402
2	25.200	5.00	0.21568	7	48.0	4893.0	194.1653	1711.7460
3	25.402	5.02	0.21568	7	45.0	4587.2	180.5860	1691.4018
average			0.21678		47.7	4859.0	192.6042	1716.0294
1	25.000	5.02	0.22210	28	87.0	8868.5	354.7401	1769.7211
2	25.100	5.00	0.22195	28	85.0	8664.6	345.2043	1768.5259
3	25.200	5.02	0.21803	28	87.0	8868.5	351.9247	1723.5028
average			0.22069		86.3	8800.5	350.6230	1753.9166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 มอร์ต้า หน่วยน้ำหนักที่ไ้จริง 2200 kg/m³ ใช้ทดสอบ P

Spec. No.	Cross Sectional Area (cm ²)	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Age (days)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)
1	25.100	5.12	0.26382	3	64.0	6524.0	259.9185	2052.8822
2	25.301	5.00	0.25969	3	70.0	7135.6	282.0297	2052.8205
3	25.200	5.00	0.26236	3	66.0	6727.8	266.9773	2082.2222
average			0.26196		66.7	6795.8	269.6418	2062.6416
1	25.000	5.00	0.26842	7	88.0	8970.4	358.8175	2147.3600
2	25.200	5.00	0.26983	7	90.0	9174.3	364.0600	2141.5079
3	25.100	5.02	0.26756	7	100.0	10193.7	406.1227	2123.4584
average			0.26860		92.7	9446.1	376.3334	2137.4421
1	25.000	5.00	0.27484	28	155.0	15800.2	632.0082	2198.7200
2	24.800	5.02	0.27041	28	148.0	15086.6	608.3227	2172.0026
3	25.000	5.00	0.27412	28	150.0	15290.5	611.6208	2192.9600
average			0.27312		151.0	15392.5	617.3172	2187.8942

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] ดร.นเรศ พันธราทร, **การออกแบบคอนกรีตอัดแรง**, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : LIBRARY-NINE PUBLISHING, 2541.
- [2] วินิต ช่อวิเชียร, **คอนกรีตเทคโนโลยี**, พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร : หจก. วี.เจ.พรีนติ้ง จำกัด, 2542.
- [3] ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, **ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี**, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : หจก. วี.เจ.พรีนติ้ง จำกัด, 2542.
- [4] ต่อคุณ กาญจนาลัย, **การออกแบบคอนกรีตอัดแรง**, กรุงเทพมหานคร : หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537.
- [5] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง**, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : บริษัท โกลบอล กราฟิค จำกัด, 2549.
- [6] สมโพธิ วิวิธยุทธวงศ์, **การออกแบบคอนกรีตอัดแรง**, กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.
- [7] มนัส อนุศิริ, **ทฤษฎีและปฏิบัติการทดสอบวัสดุในงานวิศวกรรมโยธา**, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยุคเข็้น, 2549.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง**, มอก. 95 - 2540.
- [9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม**, มอก. 20 - 2543.
- [10] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง**, 2549.
- [11] ASTM C234-91a. 1995. **Standard Specification for Compare Concretes on Basis of Bond Developed with Reinforcing Steel**. Annual Book of ASTM Standards Vol. 04. 02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 148 – 152.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ชาติชาย พรหมวงศ์, ศาสตราจารย์ เอี่ยมโหมด และ วิไลรัตน์ สุขศรี, **อิทธิพลของสารเพิ่มฟองอากาศที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเบา**, ปรินูญานินพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [13] ศิวะ วาสาธา, **การศึกษาผลของฟองอากาศมวลเบาในระบบ CLC ที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม**, วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [14] พุทธพงศ์ คัมภีรานนท์, มหรรณพ กรรมสุด และ สัมพันธ์ ชนะบูรณาศักดิ์, **การศึกษาแนวโน้มของค่าแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กในคอนกรีตหลังถูกเพลิงไหม้**, ปรินูญานินพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.
- [15] รณชัย รักวงศ์, วัชระ มณีวงศ์ และ ศิริพงษ์ พรหมศาสตร์, **อิทธิพลของผงอูมิเนียมที่มีต่อคุณสมบัติคอนกรีตเบา**, ปรินูญานินพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [16] ฉะลือชา หล้าหลั่น และ สุทธิญูญกานต์ รัตนพงศ์, **การผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ตะกอนประปา**, ปรินูญานินพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [17] กาญจนา ออมกระโทก และ อารีรัตน์ สุทธิ, **วัสดุผสมสำหรับคอนกรีตเบา**, ปรินูญานินพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.
- [18] ไพศาล ลีลาเลอเกียรติ, **แรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตผสมเถ้าลอยหล่อแบบแรงเหวี่ยง**, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.