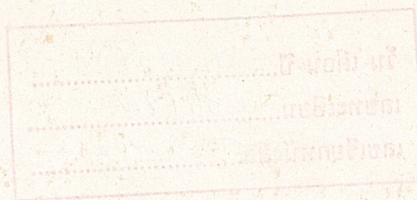


การศึกษาผลของน้ำหนักกระทำซ้ำต่อความแข็งแรงของคอนกรีต

The studying of cyclic load which effect to the strength of concrete



โดย

นาย พลศักดิ์ สีวะอเนกนาก

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

033189

The studying of cyclic load which effect to the strength of concrete

MR. POLASAK SIWA-ANEKNART

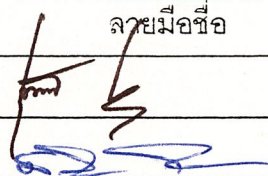
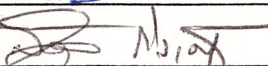
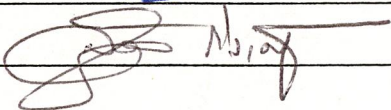
A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE BACHELOR DEGREE OF CONSTRUCTION ENGINEERING
KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1993


ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาผลของน้ำหนักกระทำซ้ำต่อความแข็งแรงของคอนกรีต

นักศึกษา นายพลศักดิ์ สิวะอเนกนาถ รหัสประจำตัว 33100252
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ ศักดิ์ชัย สถานุพงษ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
อ.สุรัตน์ หวังเจริญ	
อ.สุวัฒน์ ทิระเศรษฐ์	
อ.ศักดิ์ชัย สถานุพงษ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(นายสุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 14 เดือน ๗.๖. พ.ศ. 2537

การศึกษาผลของน้ำหนักกระทำซ้ำต่อความแข็งแรงของคอนกรีต

The studying of cyclic load which effect to the strenght of concrete

โดย นายพลศักดิ์ สีวะอเนกนาถ
 อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ศักดิ์ชัย สถานพงษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีต เมื่อรับน้ำหนักกระทำซ้ำที่ความถี่ช่วง 6.147-6.90, 3.871-4.054, 2.542-2.667 และ 1.802-1.917 รอบ/นาที ใช้แท่งคอนกรีตทรงกระบอกในการทดสอบขนาด ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม. ออกแบบให้รับกำลังอัดประลัยได้ไม่ต่ำกว่า 150 กก./ซม² ใช้ความเค้น 90 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นอัดประลัย ผลต่างของค่าความเค้นสูงสุดกับต่ำสุดต่อด้วยค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 1 เวลาที่ใช้ในการทดสอบไม่เกิน 1 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าความถี่ 3 ช่วงแรก คอนกรีตเกิดการแตกร้าวที่ค่าเฉลี่ยของจำนวนวงรอบของการกระทำที่ 142, 142 และ 144 รอบตามลำดับ ช่วงความถี่ 1.802-1.917 รอบ/นาที ไม่เกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปหากำลังอัดประลัยพบว่า ลดลงจากกำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีตที่ไม่ได้ทำการทดสอบ

Abstract

This special project intends to study the behavioral change of strength of concrete loaded by cyclic load at 6.147-6.90, 3.871-4.054, 2.542-2.667 and 1.802-1.917 round per minute of frequency range. Dimensions of cylindrical concretes which are used to test are 5 cm. indiameter and 10 cm. height. They are designed to be able to bear at least 150 ksc. of static ultimate strength. Stress ratio is 0.9. Stressrange is 1. Test time is less than 1 hour. The result is that cylindrical concretes, at the former three frequency ranges, are broken at the average number of 142, 142 and 144 rounds respectively but cylindrical concretes aren't broken at 1.802-1.917 round per minute frequency range. And we found that the static ultimate strength is reduced.

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา วิชา SPECIAL PROJECT อ.ศักดิ์ชัย
 สถานุพงษ์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่
 ประจำโรงปฏิบัติการเทคโนโลยีการก่อสร้าง ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ
 ภาคเครื่องกลทุกคนที่แนะนำการใช้เครื่องมือและให้ความช่วยเหลือ และที่ขาดไม่ได้คือเครื่องมือที่
 ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากภาคเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
 วิทยุพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

พลศักดิ์ สีระอเนกนาถ

นักศึกษาผู้ประกาศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
คำนิยามของศัพท์ที่ใช้.....	VIII

บทที่

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการงานพิเศษ.....	3

2. ทฤษฎีและแนวความคิด

2.1 อธิปไตยต่างๆที่มีผลต่อคอนกรีต.....	4
2.2 MICROCRACK (รอยร้าวเล็กๆในเนื้อคอนกรีต).....	5
2.3 ขบวนการเกิดรอยร้าว.....	7
2.4 ความล้า(FATIGUE)	
2.4.1 Static Fatigue หรือ Creep Rupture.....	9
2.4.2 Fatigue.....	11
2.5 S-N Diagram.....	13
2.6 พฤติกรรมของแรงล้า.....	15

3. วิธีการศึกษา

3.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

3.1.1 ขนาดตัวอย่าง	18
3.1.2 แบบหล่อ	18
3.1.3 กำลังของคอนกรีต.....	19
3.1.4 การผสมคอนกรีต.....	19
3.1.5 การหล่อคอนกรีต.....	19
3.1.6 การหล่อห่มวกห้วยท้ายคอนกรีต.....	20
3.1.7 จำนวนตัวอย่าง.....	20

3.2 การเตรียมเครื่องมือในการทดสอบ

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	21
3.2.2 การศึกษาวิธีใช้งานเครื่องมือ.....	22
3.2.3 ตัวอย่างโปรแกรมควบคุมเครื่องมือ.....	23
3.2.4 การดำเนินการทดสอบ.....	25

4. ผลการทดสอบ.....	27
--------------------	----

5. การวิเคราะห์.....	42
----------------------	----

6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	44
---------------------------	----

บรรณานุกรม.....	46
-----------------	----

ภาคผนวก ก.....	47
----------------	----

ภาคผนวก ข.....	50
----------------	----

ภาคผนวก ค.....	52
----------------	----

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดของคอนกรีต ทรงกระบอกขนาดφ15ซม.....	28
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดของคอนกรีต ทรงกระบอกขนาดφ5ซม.....	29
4.3 ชุดทดสอบที่ 1.....	30
4.4 ชุดทดสอบที่ 2.....	31
4.5 ชุดทดสอบที่ 3.....	32
4.6 ชุดทดสอบที่ 4 (เมื่อทำครบ 1 ซม.แล้ว คอนกรีตยังไม่ปรากฏรอยแตกร้าวขึ้น นำ ไปทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด).....	33

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ของวัสดุผสม (Aggregate) ปูนซีเมนต์ก้อ (cement paste) และคอนกรีต.....	6
2.2 แสดงภายในและแรงที่มากกระทำต่อเนื้อคอนกรีต.....	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ของคอนกรีต ขณะ เกิดรอยแตกร้าวภายใน.....	8
2.4 ความล้าของคอนกรีตจากอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก.....	9
2.5 อิทธิพลของช่วงเวลาในการทดสอบกับความเค้นและ ความเครียด.....	10
2.6 อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกคงที่กับความสามารถใน การรองรับความเค้นและความเครียดของคอนกรีต.....	11
2.7 ความแปรเปลี่ยนของเส้นความเค้นและความเครียด เมื่อรับน้ำหนักเป็นวงรอบ.....	12
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio (S) กับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ.....	13
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเค้น Stress ratio (S) กับจำนวนรอบของน้ำหนักจนเสียหาย (cycle to failure), N ของคอนกรีต.....	14
2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress level, S กับ Logarithmic Average of Cycle to Failure, N_u โดยมีค่า Stress range, R แตกต่างกัน.....	16
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress range, R กับ Logarithmic Average of Cycle to Failure, N_u โดยมีค่า Maximum stress ratio, S แตกต่างกัน.....	17
2.12 แสดงการคาดการณ์แรงสูงสุด และต่ำสุดที่ทำให้คอนกรีต เกิดการวิบัติที่น้ำหนักกระทำเป็นวงรอบที่ 1 ล้านรอบ.....	17

3.1	แสดงแบบหล่อขนาด $\phi 5$ ซม. สูง 10 ซม.	18
3.2	แสดงแบบหล่อขนาด $\phi 15$ ซม. สูง 30 ซม.	19
3.3	แสดงตัวอย่างที่ผ่านการหล่อหวมหัวทำขึ้นมาแล้ว	20
3.4	แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบขนาด 15 และ 5 ซม.	21
3.5	เครื่อง UNIVERSAL TESTING MACHINE ของภาคโยธา	22
3.6	เครื่อง UTM รุ่น AG-10TB	22
3.7	รูปแสดงการอัดของคอนกรีตขนาด $\phi 15$ ซม.	25
3.8	รูปแสดงการอัดของคอนกรีตขนาด $\phi 5$ ซม.	25
3.9	แสดงการติดตั้งคอนกรีตขนาด $\phi 5$ ซม. เข้ากับเครื่อง UTM รุ่น AG-10TB	26
4.1	กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 15$ ซม.	34
4.2	กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 5$ ซม.	35
4.3	กราฟเปรียบเทียบแสดงหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 5$ ซม.	36
4.4	กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตขนาด $\phi 5$ ซม. ภายหลังจากการทำการทดสอบแล้วไม่เกิดความเสียหายใดๆให้เห็น	37
4.5	กราฟเปรียบเทียบแสดงหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 5$ ซม. ที่ไม่ได้ผ่านการรับน้ำหนักเป็นวงรอบ	38
4.6	กราฟแสดงจำนวนของน้ำหนักที่กระทำจนคอนกรีตชุดที่ 1 เกิดรอยแตกร้าวขึ้น	39
4.7	กราฟแสดงจำนวนของน้ำหนักที่กระทำจนคอนกรีตชุดที่ 2 เกิดรอยแตกร้าวขึ้น	40
4.8	กราฟแสดงจำนวนของน้ำหนักที่กระทำจนคอนกรีตชุดที่ 3 เกิดรอยแตกร้าวขึ้น	41
4.9	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำจนคอนกรีตชุดที่ 1, 2 และ 3 เกิดรอยแตกร้าวขึ้น	

คำนิยามของศัพท์ที่ใช้

- UTM = UNIVERSAL TESTING MACHINE
- (*) = แสดงลำดับที่ของเอกสารอ้างอิง
- STRESS RATIO (S) = อัตราส่วนของน้ำหนักที่กระทำต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุด
(สัดส่วนความเค้น)
- STRESS RANGE = ผลต่างของค่าความเค้นสูงสุดกับต่ำสุด/ค่าความเค้นสูงสุด
- STROKE = ระยะของการเปลี่ยนแปลงขึ้นหรือลงจากจุดที่กำหนดอ้างอิงไว้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

โครงสร้างของคอนกรีตต่าง ๆ เช่น คาน, ผนัง, ถนน เมื่อผ่านการรับน้ำหนักมา นาน ก็อาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งความเสียหายนี้ตัวแปรที่สำคัญตัว หนึ่งคือ ความล้าของคอนกรีต

การรับน้ำหนักของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ อยู่เสมอ โดยที่น้ำหนักที่รับ ไม่เกิดน้ำหนักประลัยของคอนกรีต ก็อาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตถึงขีดสูงสุดของระดับความล้าที่ไม่สามารถรับน้ำหนักได้ต่อไป จึงเป็นผล ให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นมาในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นในที่สุด

ความล้าเป็นผลมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากถูกน้ำหนักกระทำ อาจเป็นน้ำหนักที่อยู่กับที่ (Dead Load) หรือน้ำหนักจร (Live Load) และ น้ำหนักนั้นต้องมีค่ามากพอสมควร แต่ไม่เกินน้ำหนักประลัยของคอนกรีต ทำให้กำลังในการ รับน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดวิบัติในที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1.2.1 เพื่อศึกษาการรับน้ำหนักของคอนกรีตในช่วงความถี่ต่างๆ

1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาถึงน้ำหนักกระทำซ้ำๆเป็นวงรอบ จนก่อให้เกิดความล้าซึ่งส่งผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบเป็นแท่งคอนกรีต ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ออกแบบเพื่อให้รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้อย่างน้อย 150 กก./ซม^2 เพื่อใช้ในการทดสอบเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการต่อไป น้ำหนักที่ใช้กระทำประมาณ 90 % ของน้ำหนักประลัย (stress ratio = 0.9) ใช้ความถี่กระทำจากสูงสุดก่อน (เท่าที่เครื่อง UTM รุ่น AG-10TB ของบริษัท SHIMATSU จะสามารถทำได้) แล้วจึงใช้ความถี่ต่ำลงตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการทดสอบแต่ละแท่งตัวอย่างไม่เกิน 1 ชั่วโมง ถ้าทำการทดสอบจนครบ 1 ชั่วโมงแล้วยังไม่เกิดรอยแตกร้าวขึ้นแก่แท่งคอนกรีต ให้นำไปทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด เพื่อพิจารณาความเปลี่ยนแปลงกำลังของคอนกรีตต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและแนวความคิด

(12) การล้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนของวัสดุผสมต่อซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ชนิดและส่วนขนาดคละของวัสดุผสม ส่วนประกอบทางเคมีและความละเอียดของซีเมนต์ สารเคมีผสมเพิ่ม และอายุของคอนกรีตเพื่อให้รับน้ำหนัก นอกจากนี้ยังอยู่กับระยะเวลาและขนาดของน้ำหนักที่กระทำ ความชื้นภายในเนื้อคอนกรีต อุณหภูมิและสภาวะแวดล้อม และขนาดของโครงสร้างอาคารคอนกรีต หลังจากที่เราให้น้ำหนักกระทำออกไป คอนกรีตจะเริ่มคืนตัวอย่างรวดเร็วโดยมีระยะคืนตัวทันที (Elastic Recovery) และระยะคืนตัวแบบช้า (Creep Recovery) และมีระยะหดตัวถาวร (Permanent Deformation) เกิดขึ้น

อัตราการใช้ของคอนกรีตจะช้าลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าประมาณ 75% ของการล้าจะเกิดขึ้นภายในเวลา 6 เดือน และประมาณ 90% ของการล้าจะเกิดขึ้นภายในเวลา 1 ปี การล้าของคอนกรีตอาจทำให้เกิด การถ่ายแรงจากคอนกรีตให้เหล็กเสริม ลดแรงอัดในคอนกรีตอัดแรง เปลี่ยนจุดตัดกลับในคานต่อเนื่อง เพิ่มการโก่งตัวของโครงสร้างเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าลดลง และลดความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

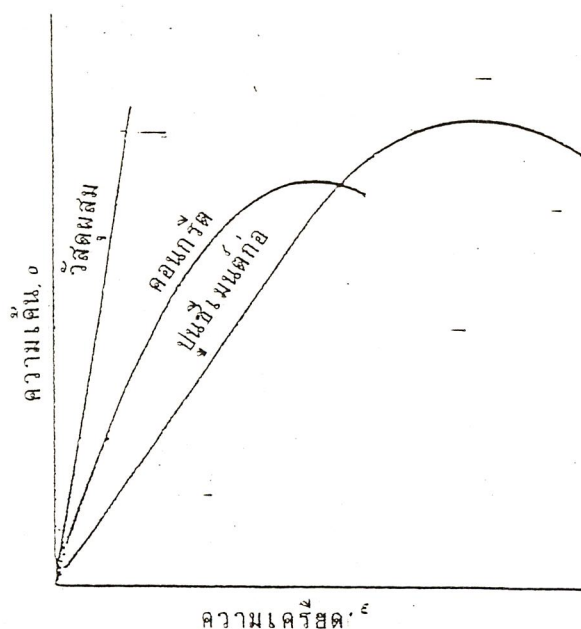
2.1 อิทธิพลต่างๆที่มีต่อการล้าของคอนกรีต (12)

1. น้ำหนักบรรทุกค้าง การล้าของคอนกรีตเป็นส่วนโดยตรงกับขนาดของน้ำหนักบรรทุก
2. ความแข็งแรงของคอนกรีต การล้าของคอนกรีตเป็นส่วนผกผันกับกำลังความแข็งแรงของคอนกรีต ถ้าความแข็งแรงของคอนกรีตมีค่าสูง อัตราการใช้ของคอนกรีตจะมีค่าต่ำ
3. ชนิดของปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาจะเกิดการล้าของคอนกรีตมากกว่า คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทแข็งตัวเร็ว หรือปูนซีเมนต์ลูมิน่า
4. อัตราส่วนผสมของคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ การล้าของคอนกรีตจะมีค่าต่ำด้วย
5. วัสดุผสม การล้าของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้วัสดุผสมที่มีความละเอียดขึ้น
6. การบ่ม คอนกรีตที่ได้รับการบ่มขึ้นตลอดเวลาจะมีอัตราการใช้ต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ
7. อายุของคอนกรีต อัตราการใช้ของคอนกรีตจะลดลงเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

2.2 Microcrack (รอยร้าวเล็กในเนื้อคอนกรีต) ⁽¹⁰⁾

ธรรมชาติของคอนกรีตจะมีรอยร้าวเล็กๆ (microcracks) ทั้งที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและมองไม่เห็นอยู่ก่อนแล้วในเนื้อคอนกรีต ขบวนการที่ทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ เหล่านี้ (Mechonisms of Fracture) เกิดจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโครงสร้างภายในเนื้อคอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของโครงสร้างคอนกรีตจะเห็นได้ว่า คอนกรีตเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และมอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์ผสมทราย) โดยที่มอร์ตาร์จะล้อมรอบและแทรกตัวอยู่ระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบรวมตัวกันเป็นเนื้อคอนกรีตกำลังความแข็งแรง (Strength) ของคอนกรีตได้มาจากแรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของมอร์ตาร์และวัสดุมวลรวมหยาบ

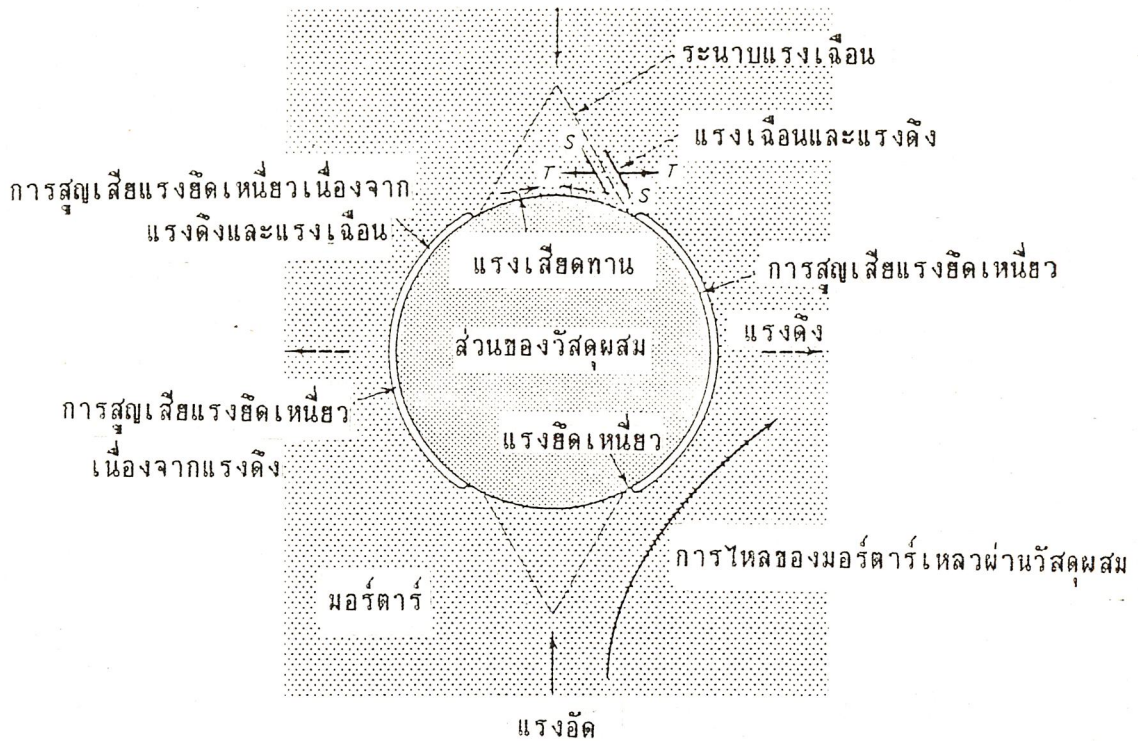
จากการที่คอนกรีตมีส่วนผสมต่างๆ คละกันอยู่และปฏิกิริยาการคายความร้อนของปูนซีเมนต์ (Hydrated Portland Cement) รูป 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของ stress-strain curve ของสององค์ประกอบ จะเห็นว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ของทั้งสององค์ประกอบต่างก็เป็นเส้นตรง (Linear) ยกเว้นในช่วงที่มีระดับความเค้น (Stress levels) สูงมากๆ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของทั้งสององค์ประกอบจะมีค่าแตกต่างกันเป็นผลให้คอนกรีตมีความสัมพันธ์ของ Stress-strain Curve ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear)



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ของวัสดุผสม (Aggregate) ปูนซีเมนต์ก่อก่อ (Cement Paste) และคอนกรีต

เมื่อพิจารณาภายในเนื้อคอนกรีต จะเห็นว่าคอนกรีตมีการยึดเกาะกันของส่วนผสมต่างๆ ความแตกต่างกันของค่า โมดูลัสยืดหยุ่น ขบวนการคายความร้อนของคอนกรีต (Hydration Process) ในขณะเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ในช่วงต้น และการสูญเสียความชื้นเมื่อค่อสขแห้งตัว (Drying Shrinkage Cracks) ก่อให้เกิดรอยร้าวเล็กๆขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต (Microcracks)

เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุก จะมีผลเกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุผสมกับมอร์ตาร์จะลดลง เพราะเหตุว่ารอยร้าวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นรอบๆวัสดุผสมมากกว่าเกิดในตัววัสดุผสมเอง เนื่องจากการขยายตัวของ Microcracks ซึ่งปรกติจะมีอยู่ในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 2.2 แสดงภายในและแรงที่กระทำต่อเนื้อคอนกรีต

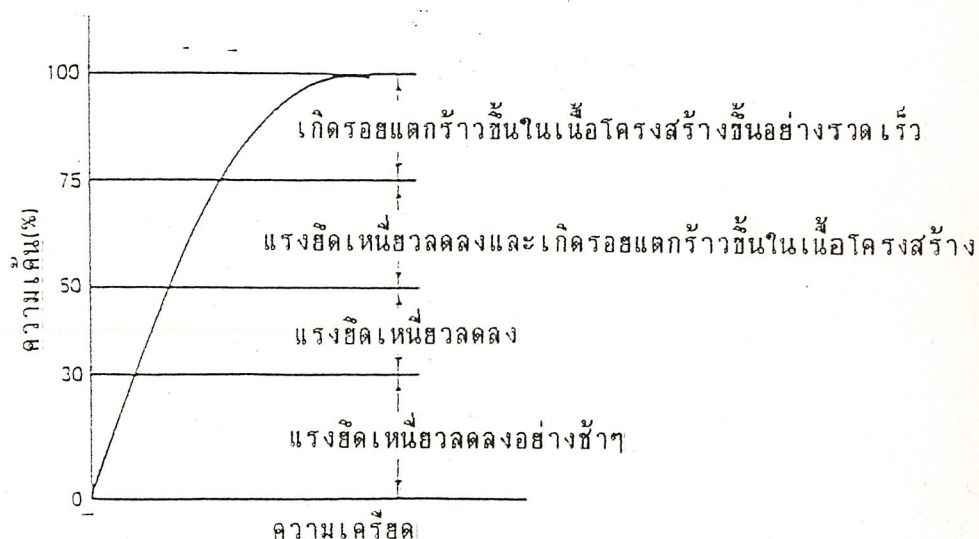
รูป 2.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อน้ำหนักกระทำต่อคอนกรีต จะเกิด Stress Shear และ Tension ขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุผสมกับมอร์ตาร์ลดลง ทำให้กำลังของคอนกรีตตกลง ⁽¹⁾

2.3 ขบวนการเกิดรอสร้าว

จากการค้นคว้าของ J. Glucklick ⁽²⁾ ได้แสดงให้เห็นว่า ขบวนการเกิดรอสแตกร้าว (Fracture Process) ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักจะเกิดขึ้นสามขั้นตอนคือ

1. Crack Initiation
2. Slow Crack Growth
3. Rapid Crack Growth

ทั้งสามขั้นตอนจะเป็นส่วนพิจารณาถึงพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) และการแตกเสี้ยวของคอนกรีต ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าน้ำหนักประมาณ 30% ของความเค้นประลัย (Ultimate Stress) ลงมา กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-เครียด (Stress-Strain Curve) ก็จะเป็นเส้นตรงความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นไม่สามารถที่จะไปขยายรอยร้าวเล็กๆเหล่านี้ได้ ถ้าหากน้ำหนักที่ใช้อยู่ระหว่าง 30% ถึง 50% ของความเค้นประลัย (Ultimate Stress) รอยแตก (Cracks) ก็จะเริ่มขึ้นทีละน้อย แต่ขยายตัวเข้ามา



รูปที่ 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ของคอนกรีตขณะเกิดรอยแตกร้าวภายใน

รอยแตกร้าวส่วนใหญ่จะยังคงเกิดขึ้นที่ส่วนหน้าสัมผัส (Interfacial Region) กันระหว่างองค์ประกอบของซีเมนต์ (Cement) กับองค์ประกอบของวัสดุผสม (Aggregate) รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นกระจายทั่วไปและขยายตัวอย่างคงที่ กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) จะเริ่มโค้งเพิ่มขึ้นทีละน้อย ถ้าหากใช้ความเค้น (Stress) ประมาณ 50% ของความเค้นประลัย (Ultimate Stress) ขึ้นไป รอยแตกร้าวก็จะเริ่ม

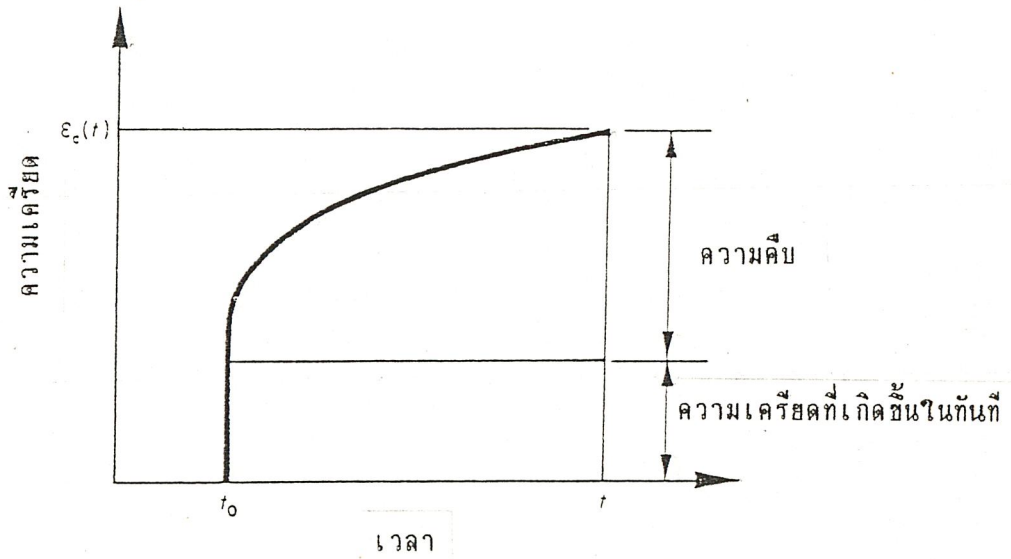


ขยายตัวประสานกับและจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเชื่อมโยงกันหมด กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) จะมีแนวโน้มโค้งมากขึ้น และถ้าใช้ความเค้น (Stress) ประมาณ 75% ของความเค้นประลัย (Ultimate Stress) ขึ้นไป แล้วรอสแตกร้าวจะปรากฏตัวขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะประสานตัวขยายเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนกระทั่งคอนกรีตไม่สามารถรับน้ำหนักและคงตัวอยู่ได้จึงต้องแตกเสียหายในที่สุด กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) จะเริ่มโค้งมากขึ้นตลอดเวลา

2.4 ความล้า (Fatigue) ⁽²⁾

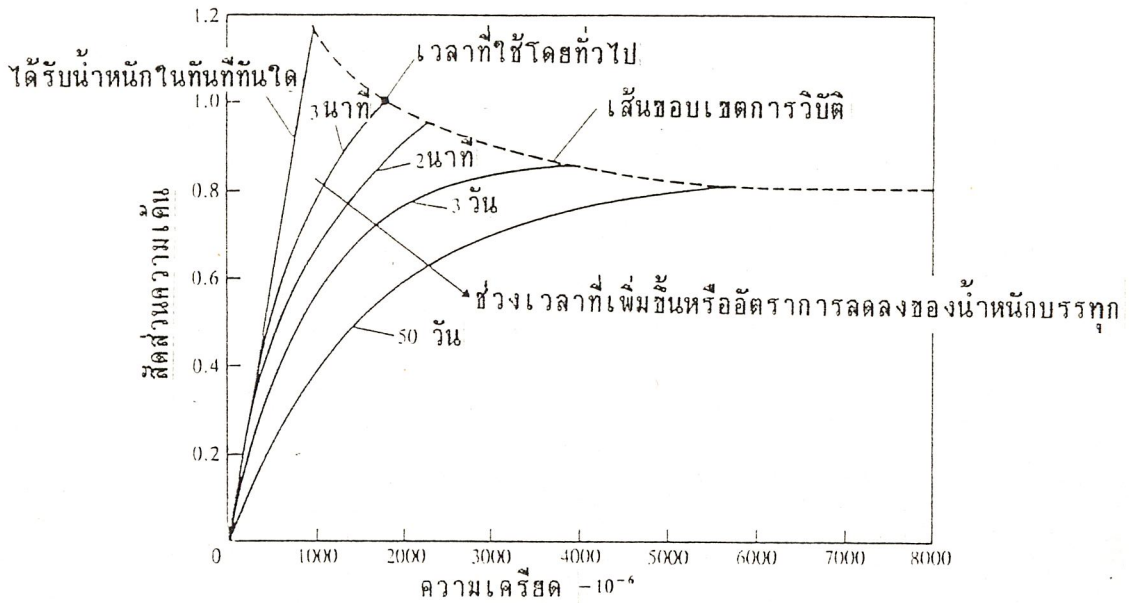
ความล้าของคอนกรีตเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ โดยถูกน้ำหนักกระทำ ซึ่งน้ำหนักนั้นน้อยกว่าน้ำหนักสูงสุดที่คอนกรีตนั้นรับได้จากการทดสอบแรงกดตันของคอนกรีต แบ่งเป็น 2 อย่าง คือ

2.4.1 Static Fatigue หรือ Creep Rupture เกิดเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 2.4 ความล้าของคอนกรีตจากอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก

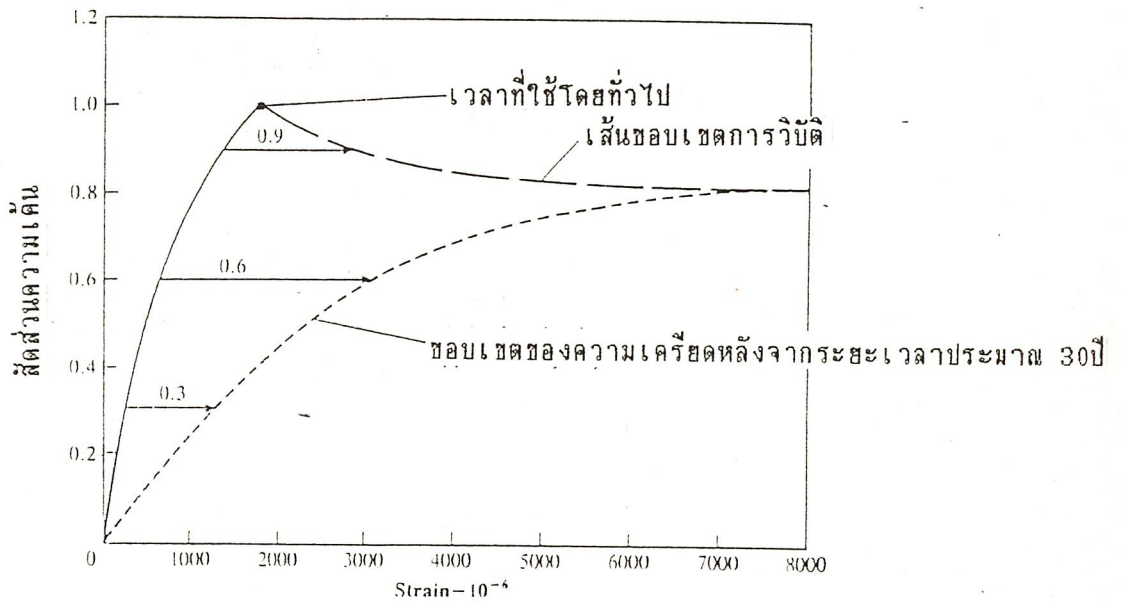
รูป 2.4⁽³⁾ เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความล้า เมื่อมีการบรรทุกน้ำหนักคงที่ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความล้าของคอนกรีตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.5 อธิพลของช่วงเวลาในการทดสอบกับความเค้นและความเครียด

รูป 2.5⁽⁴⁾ เป็นกราฟระหว่าง Strain กับ Stress Ratio โดยมีเส้น Static Fatigue Failure Envelope เป็นเส้นขอบเขตของการวิบัติของคอนกรีต

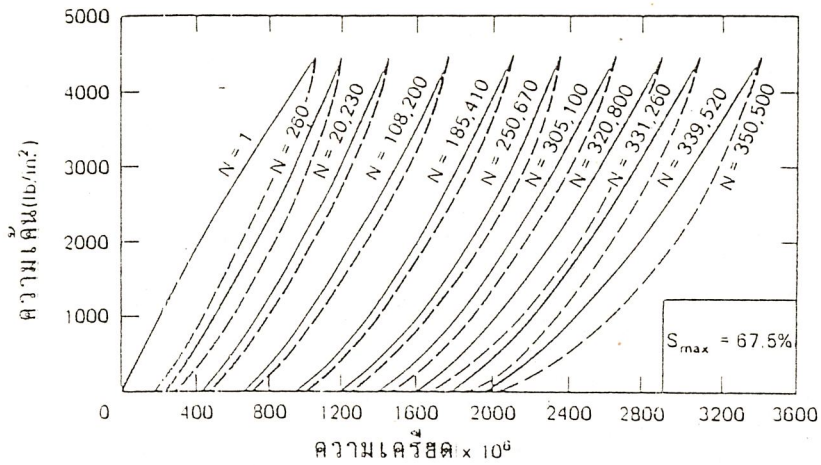
จากรูป 2.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อ Stress Ratio (อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุด) ลดลง ค่า strain ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจนถึงจุดวิบัติจะมีค่ามากขึ้นหรือ เมื่อเวลาที่ใช้ในการกระทำนานขึ้น ค่า strain ทั้งหมดที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้นด้วย strain ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่า strain ที่วัดได้จากการทดสอบเพื่อหา stress และ creep rupture จะเกิดขึ้นเมื่อ stress เกินกว่า 70 หรือ 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ทำให้ Microcracks ขยายตัวเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้เกิดความวิบัติ



รูป 2.6 อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกคงที่กับความสามารถในการรองรับ
ความเค้นและความเครียดของคอนกรีต

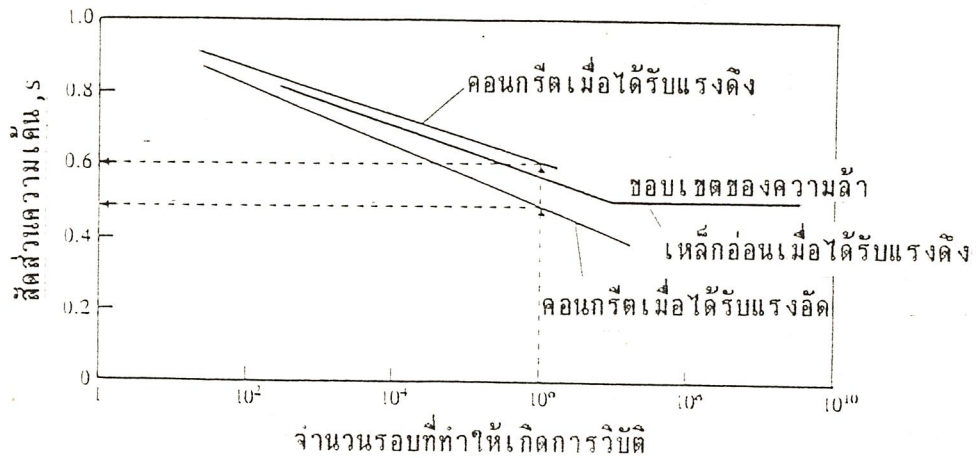
จากรูป 2.6⁽⁴⁾ จะเห็นว่าที่ stress ratio 0.8-1.0 จะเกิดการวิบัติเมื่อค่า strain ถึงเส้น static Fatigue failure envelope ถ้าหากค่า stress ratio ต่ำกว่า 0.8 จะใช้เวลานานเป็นสิบปีกว่าคอนกรีตจะถึงขีดจำกัดของ strain

2.4.2 Fatigue เกิดเนื่องจากการรับแรงกระทำซ้ำๆกัน ภายใต้น้ำหนักกระทำนั้น มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชั้นในเนื้อคอนกรีต คือ มีการขยายตัวของ Microcracks อันเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ ลงๆ แบบ Hysteresis Loop ดังรูปที่ 2.7⁽⁵⁾



รูปที่ 2.7 ความแปรเปลี่ยนของเส้นความเค้น
และความเครียดเมื่อรับน้ำหนักเป็นวงรอบ

ในตอนต้นการขยายตัวของรอยร้าวเล็กๆ (Microcracks) นี้จะค่อยเป็นไปอย่างช้า
จนกระทั่งจำนวนวงรอบของการกระทำซ้ำมีจำนวนมากพอ ก็จะทำให้รอยร้าวเล็กๆ เหล่านี้ขยายรวม
ตัวประสานกันเป็นรอยแตกยาวของคอนกรีตปรากฏออกมาเมื่อถึงขีดจำกัดสูงสุด



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress ratio (s)
กับจำนวนวงรอบที่ก่อให้เกิดการวิบัติ

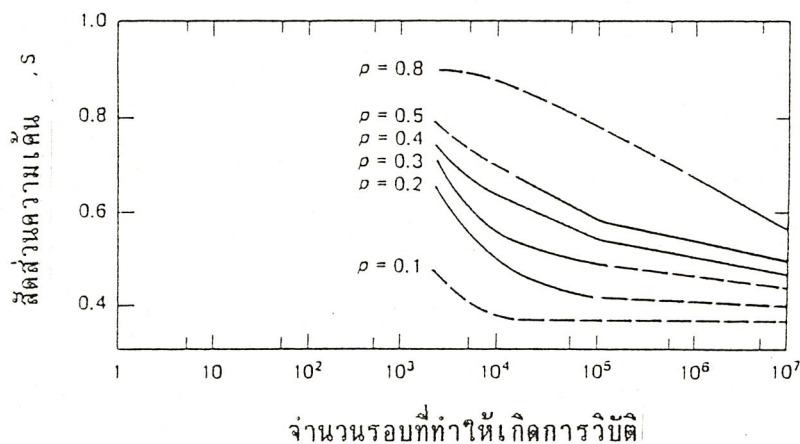
รูปที่ 2.8^(๘) แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของน้ำหนักที่กระทำต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุด กับจำนวนรอบของการวิบัติเมื่อ stress ratio ต่ำลง จำนวนรอบที่ก่อให้เกิดการวิบัติที่สูงขึ้น ค่าที่มากที่สุดของ stress ratio ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ทำให้เกิดการวิบัติ เรียกว่า endurance limit จากรูป mild steel มี endurance limit ประมาณ 0.5 ซึ่งหมายความว่า เมื่อ $S < 0.5$ N จะเป็น infinity แต่คอนกรีตจะไม่ปรากฏ limit นี้ ดังนั้น จึงกำหนดเอาจำนวนรอบที่สูงของ N เช่น 1 ล้านรอบ ที่กำหนดเช่นนั้นเพราะว่า มันยากที่จะกำหนดจำนวนรอบของการวิบัติได้อย่างแน่นอน

2.5 S-N Diagram

ในการหาข้อมูลเกี่ยวกับแรงล้า (Fatigue Strength) นี้จะแสดงอยู่ในรูปของ S-N Diagram เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกระทำ, S หรือ Stress Ratio กับค่าลอการิทึมของจำนวนรอบ (Number of Cycles) ของการให้น้ำหนักกระทำซ้ำจนกระทั่งคอนกรีตเสียหาย (Failure) หรือค่า N

แรงต้านทานของคอนกรีตต่อน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบของหน่วยแรงกระทำเป็นวงรอบ ก่อให้คอนกรีตเกิดแรงล้า (Fatigue Strength) ต่อเมื่อน้ำหนักที่กระทำนั้นต้องมีค่าประมาณ 50% ของกำลังประลัย (Static Ultimate Strength) ของคอนกรีตขึ้นไป จากการทดสอบของ ACI (American Concrete Institute) โดย J.J. McCall ⁽⁷⁾ พบว่าคอนกรีตจะสามารถรับวงรอบน้ำหนักกระทำซ้ำที่ 50% ของกำลังประลัย (Static Ultimate Strength) นี้ได้ประมาณ 10^6 ครั้งเป็นต้นไป (หนึ่งล้านวงรอบขึ้นไป)

ค่าความสัมพันธ์ของ S-N Curve จะแสดงถึงพฤติกรรมของคอนกรีตได้ดีภายใต้การถูกวงรอบน้ำหนักกระทำซ้ำจนเกิดความเสียหายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9

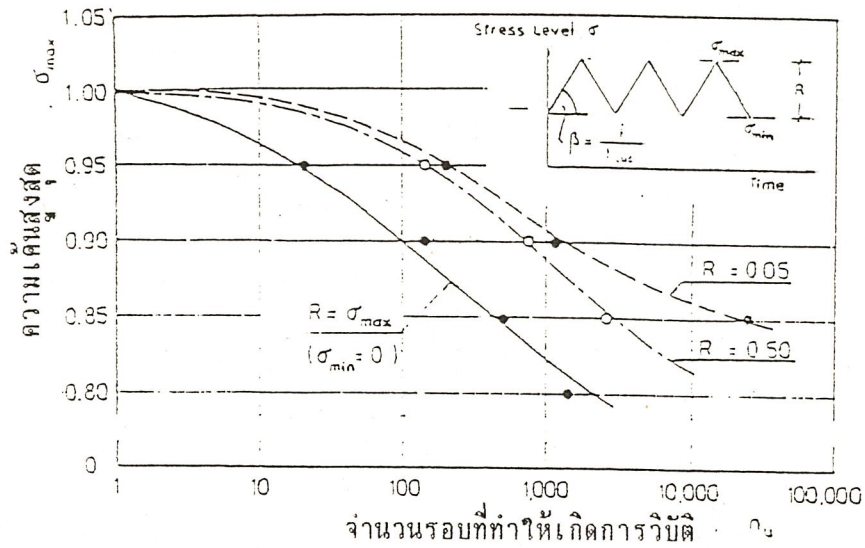


รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเค้น (Stress Ratio), S กับจำนวนวงรอบน้ำหนักจนเสียหาย (Cycles to Failure), N ของคอนกรีต

จากการศึกษาของ ACI (American Concrete Institute) พบว่า แรงล้า (Fatigue Strength) ของคอนกรีตภายใต้ขนาดน้ำหนักที่กระทำซ้ำในรูปของสัดส่วนความเค้นขนาดเดียวกัน แม้ว่าคอนกรีตจะมีความแตกต่างกันทางด้านของอายุ (Ages) ปริมาณ Water/Cement Ratios ชนิดของวัสดุผสม (Aggregate) และอื่นๆก็จะให้ความสัมพันธ์ของ S-N Curve ทำนองเดียวกัน แต่ความสัมพันธ์ของ S-N Curve นี้จะมีผลเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับค่า Stress Range, R หรือค่าความแตกต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของความเค้น ที่เกิดจากการให้น้ำหนักในลักษณะของจำนวนน้ำหนักกระทำซ้ำ ($R = \sigma_{max} - \sigma_{min}$) ทั้งนี้ยังพบอีกว่า ถ้าค่า Stress Range, R มีค่าลดลงแล้ว ช่วงเวลาในการเกิดแรงล้า (Fatigue Life) ในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นหรือจะรับวงรอบน้ำหนักกระทำซ้ำได้นานขึ้น

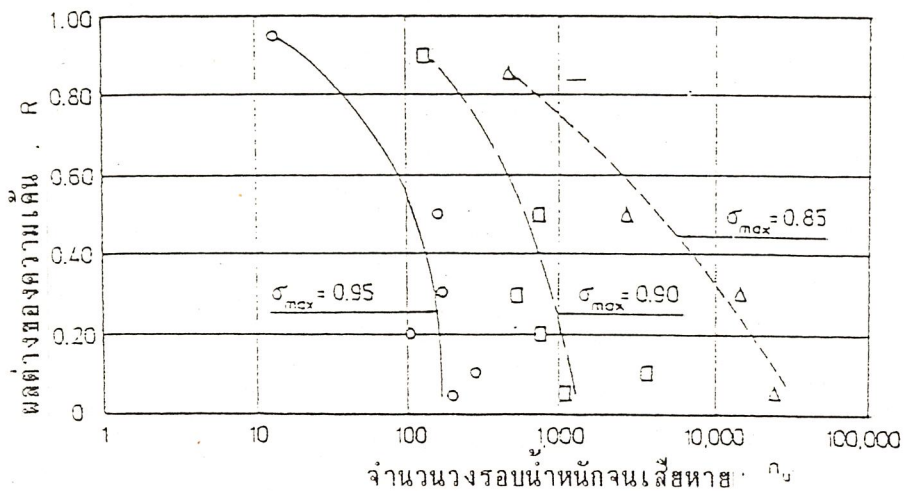
2.6 พฤติกรรมของแรงล้า (Fatigue Strength)

จากการศึกษาทดสอบของ M.E.Award และ H.K.Holsdorf ⁽⁴⁾ เกี่ยวกับแรงล้าของคอนกรีต โดยทำการทดสอบใช้แท่งคอนกรีตตัวอย่างขนาด 100x100x305 มม. มารับวงรอบน้ำหนักกระทำซ้ำมีค่าสัดส่วนความเค้น (Stress Ratio หรือ Stress Level) ตั้งแต่ 80% ถึง 95% ของกำลังประลัย (Static Ultimate Strength) และค่า Stress Range, R มีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0 ถึง 95 % ของกำลังอัดประลัย คอนกรีตที่ใช้กำลังอัดประลัยของรูปทรงกระบอก เท่ากับ 280 kgf/cm² (400 psi) ที่อายุ 28 วันได้ แสดงความสำคัญของค่า Stress Level และ Stress Range ในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress Level, S กับจำนวนวงรอบ (Number of Cycles), N_u ของวงรอบน้ำหนักกระทำ โดยที่มีค่า Stress Range แตกต่างกัน จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าถ้าค่าสัดส่วนความเค้น มีค่าสูง ค่าวงรอบของน้ำหนักกระทำซ้ำจันคอนกรีตเสียหายจะมีค่าน้อย



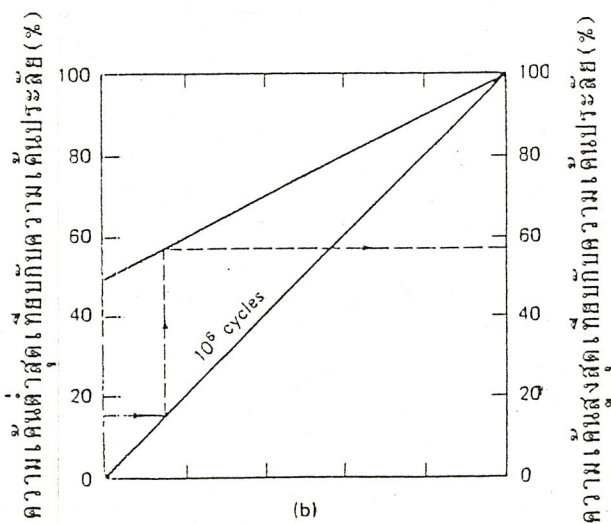
รูป 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress Level, S กับ Logarithmic Average of Cycles to Failure, N_u โดยมีค่า Stress Range, R แตกต่างกัน

แต่ถ้าสัดส่วนความเค้น มีค่าต่ำลง ค่าวงรอบของน้ำหนักกระทำซ้ำจนคอนกรีตเสียหายจะมีค่ามากขึ้น และในรูปที่ 2.11 ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress Range, R กับค่า จำนวนวงรอบของน้ำหนักกระทำซ้ำจนคอนกรีตเสียหาย (Number of Cycles to Failure) n_u โดยที่ค่าสัดส่วนความเค้น แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าจำนวนวงรอบยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าไร ค่า Stress Range ก็ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ทุกขณะกล่าวคือ n_u $R = 0$ หรืออาจจะกล่าว ได้อีกอย่างหนึ่งว่า ถ้าหากค่า Stress Range, R มีค่าเท่ากับศูนย์แล้ว จำนวนวงรอบของน้ำหนัก กระทำซ้ำก็จะมีค่าไม่สิ้นสุด นั่นก็หมายถึงว่า น้ำหนักที่ให้นั้นมิได้กระทำซ้ำเป็นวงรอบแล้ว แต่เป็น น้ำหนักที่ตกลงบนคอนกรีตแบบอยู่นิ่ง (Sustained Load) ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการรกดน้ำหนักจะมี ผลมากกว่าจำนวนวงรอบของน้ำหนักที่กระทำซ้ำ



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress Range กับ Logarithmic Average of Cycles To Failure, Nu โดยมีค่า Maximum Stress Ratio, S แตกต่างกัน

รูปที่ 2.12^(b) แสดงการคาดการณ์แรงสูงสุดและต่ำสุดที่ทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติที่หน้าหน้ากระทำเป็นวงรอบ 1 ล้านรอบ



บทที่ 3

วิธีการศึกษา

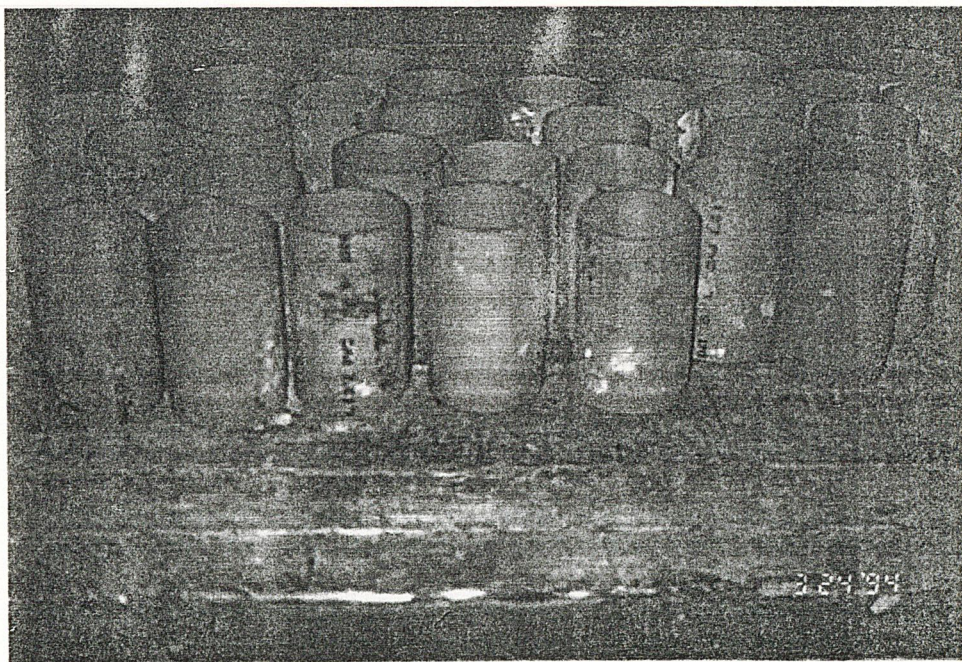
3.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

3.1.1 ขนาดของตัวอย่าง

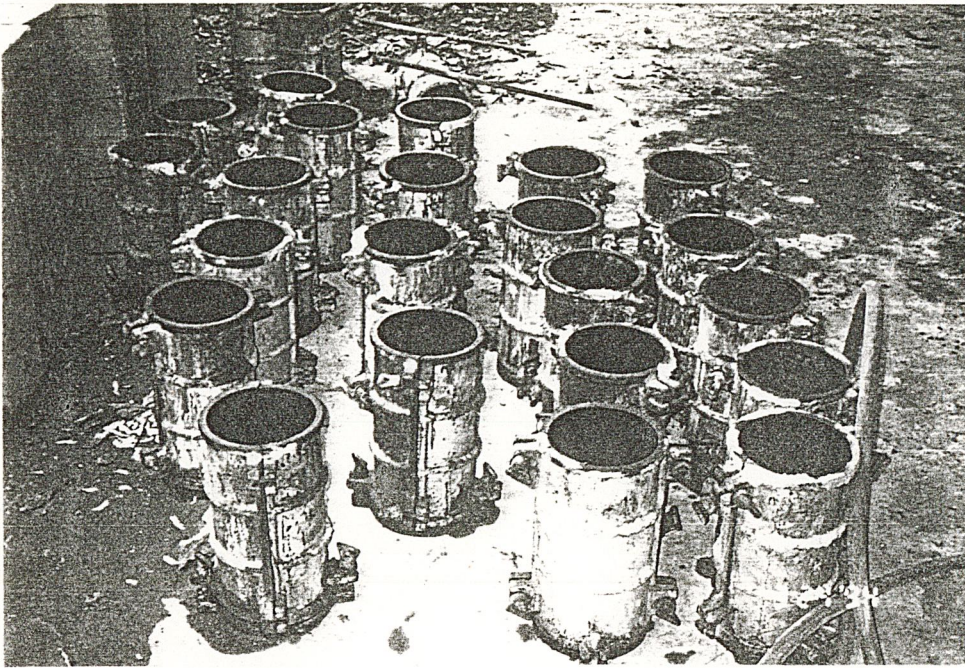
เลือกใช้ตัวอย่างเป็นคอนกรีตทรงกระบอก ขนาด ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม. เพื่อให้เหมาะสมกับเครื่อง UTM ที่ใช้ทดสอบ

3.1.2 แบบหล่อ

- ใช้ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว ตัดเป็นท่อน ๆ ละ 10 ซม. และผ่าตามยาว
- ใช้แบบเหล็กทรงกระบอกขนาดมาตรฐานอเมริกัน ขนาด ϕ 15 ซม. สูง 30 ซม. เพื่อหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดมาตรฐานไว้เปรียบเทียบกำลังกับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.1 แสดงแบบหล่อขนาด ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม.



รูปที่ 3.2 แสดงแบบหล่อขนาด ก ϕ 15 ซม. สูง 30 ซม.

3.1.3 กำลังของคอนกรีต

ออกแบบให้รับกำลังได้อย่างต่ำ 150 ksc เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้
เหมาะสมกับเครื่อง UTM ที่ใช้ทดสอบ

3.1.4 การผสมคอนกรีต

1. อัตราส่วนผสมจากการออกแบบ
2. ความเร็วไม่ผสม 30 รอบ / นาที
3. ปูนซีเมนต์ Type 3 ตรา TPI
4. ใช้หินเกล็ด ขนาดโตสุด 10 ซม.

3.1.5 การหล่อคอนกรีต

การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาด อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเกาะติดอยู่
2. ทาน้ำมันด้านผิวในให้ทั่ว เพื่อแกะคอนกรีตได้ง่าย
3. ตรวจสอบรูรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตก

แยกหรือแบบหลุดชั้นเทหรือกระทั่งคอนกรีต

การหล่อคอนกรีต

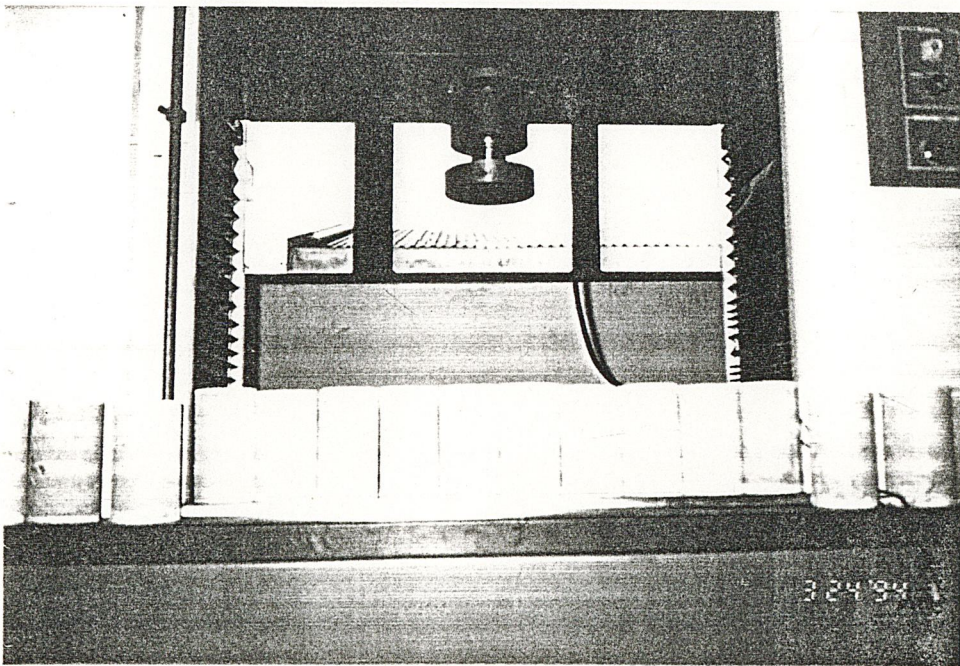
1. แบ่งเทคอนกรีตเป็น 3 ชั้น ชั้นละประมาณ 1 ใน 3 ของความสูงแบบ
2. กระทุ้ง 25 ครั้งในแต่ละชั้น
3. แต่งผิวให้เรียบ
4. ทิ้งไว้ 24 ชม.
5. แกะแบบออก
6. บ่มต่อในน้ำจนอายุครบ 7 วัน

3.1.6 การหล่อหมวกห้วยท้ายคอนกรีต

เพื่อให้คอนกรีตได้ระนาบทั้งหัวท้าย

ข้อกำหนดของความเอียง คือ

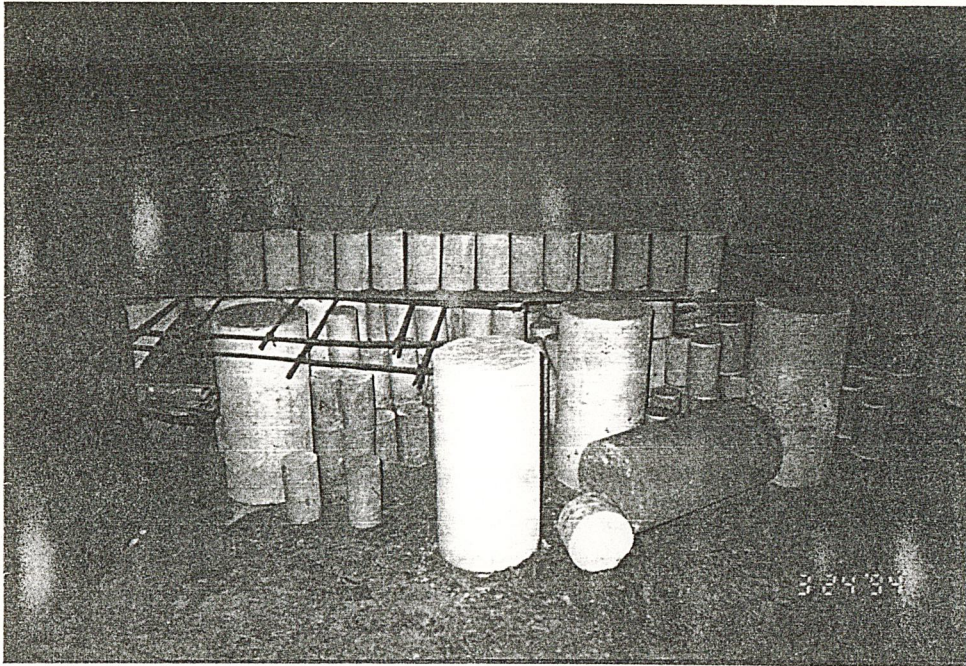
1. คอนกรีต ϕ 15 ซม. สูง 30 ซม.
ความเอียง < 0.5 องศา (ประมาณ 3 มม.)
2. คอนกรีต ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม.
ความเอียง < 0.5 องศา (ประมาณ 1 มม.)



รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างที่ผ่านการหล่อหมวกห้วยท้ายแล้ว

3.1.7 จำนวนตัวอย่าง

แบ่งตัวอย่างออกเป็นชุด โดยแต่ละชุดใช้ 5 ตัวอย่างเพื่อทดสอบ

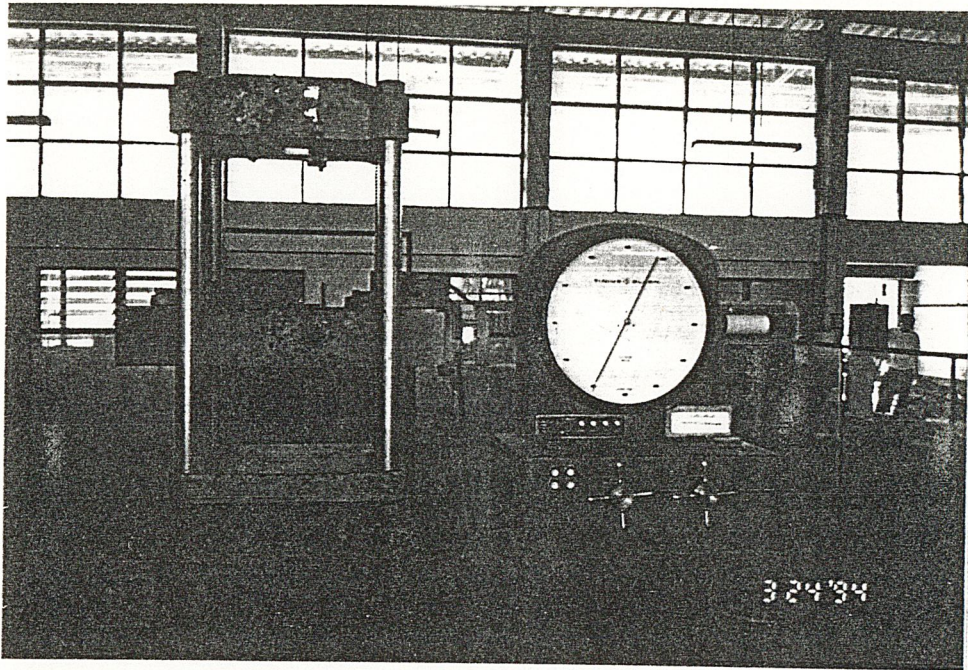


รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบขนาด ϕ 15 และ 5 ซม.

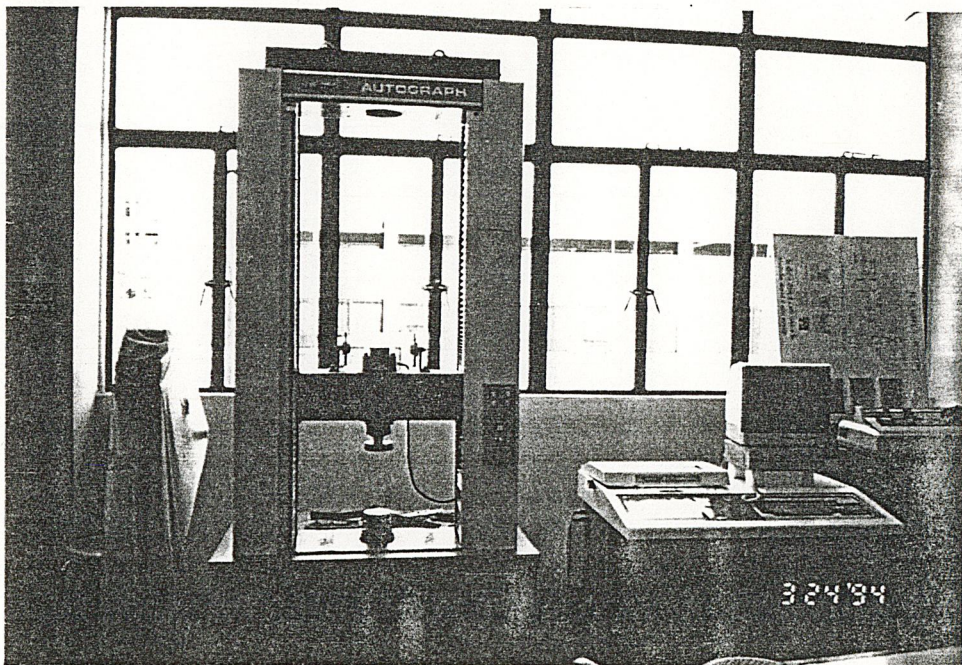
3.2 การเตรียมเครื่องมือในการทดสอบ

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง UTM ของภาคโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. เครื่อง UTM รุ่น AG-10TB บริษัท SHIMATSU ของภาคเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง รายละเอียด โดยย่อของเครื่อง UTM รุ่น AG-10TB ที่เกี่ยวข้องกับกาทดสอบ
 - 2.1 น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กำหนดไว้ 10,000 กก.
 - 2.2 ใช้คำสั่งให้เครื่อง UTM โดยผ่าน Software
 - 2.3 สามารถกระทำเป็นวงรอบได้ในความถี่ต่ำเท่านั้น (ใช้เวลาในหนึ่งรอบมากกว่า 1 วินาที)



รูปที่ 3.5 เครื่อง UNIVERSAL TESTING MACHINE ของภาคโยธา



รูปที่ 3.6 เครื่อง UTM รุ่น AG-10TB

3.2.2 การศึกษาวิธีใช้งานเครื่องมือ ทำได้โดย

1. ศึกษาจาก Staff และผู้ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาจากคู่มือเครื่อง

3.2.3 ตัวอย่างโปรแกรมควบคุมเครื่องมือ

1. เมื่อทำการเปิดเครื่องและเข้าสู่โปรแกรมแล้ว จะมีชุดของคำสั่งขึ้นมาจากหน้าจอภาพดังนี้

1 TEST MODE	CYCLE	TEN/COMP	(COM)
2 TEST SPEED	10.000	MM / MIN	(IXI)
3 TRAVERSE SPEED	500.00	MM / MIN	
4 RETURN POSITION	2 MM		
5	RETURN		
6 RECORDED MODE	X-P		
7 X-AXIS	LOAD		
8 LOAD CELL	10000.	KGF	
9 F/S LOAD	2000.0 (* 5)	KGF (AUTO)	
10 CHART RATIO	10.000		
11 CHART MODE	FORWORD	DOWN CONNECT	
12 MIN POSITION	STROKE	.00000 MM	
13	CYCLE STOP TIME	.00000 SEC	
14 MAX POSITION	LOAD	3900 KGF	
15	CYCLE STOP TIME	0 SEC	

อธิบายชุดคำสั่งได้ดังนี้

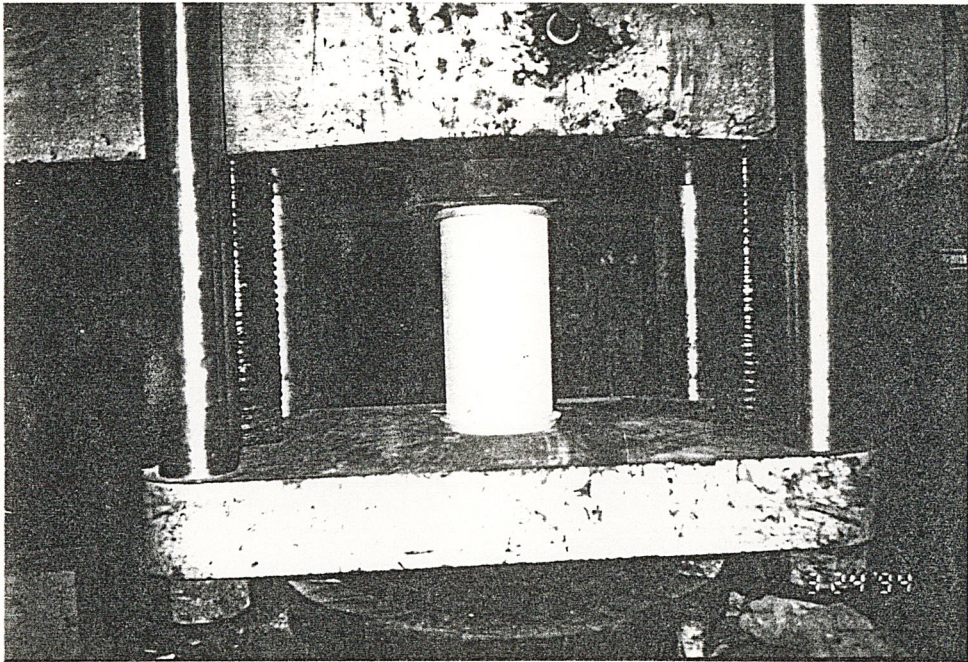
บรรทัดที่	1 TEST MODE	เพื่อเรียก MODE ว่าจะให้เครื่องทดสอบแบบไหน ในที่นี้ เราเลือก CYCLE TEN/COMP เพื่อให้เครื่องทำ การทดสอบแบบเป็นวงรอบ
บรรทัดที่	2 TEST SPEED	เพื่อเลือกความเร็วในการเคลื่อนตัววงกตอัดของเครื่อง จากตัวอย่างเลือกความเร็ว 10 มม./นาที
บรรทัดที่	3 TRAVERSE SEED	เพื่อเลือกความเร็วในการคืนตัวหลังจากที่ตกลงไปจนได้ แรงค่าที่ตั้งเอาไว้ จากตัวอย่างเลือกที่ 500 มม./ นาที
บรรทัดที่	4 RETURN POSITION	เพื่อเลือกว่าหลังการทดลองแล้ว จะให้หัวกดขึ้นไปสูง จากระดับที่ตั้งค่าไว้ให้เป็น 0.00 เท่าไรจากตัวอย่าง เลือกที่ 2 มม.
บรรทัดที่	5 RETURN	เพื่อเลือกว่าหลังจากหยุดการทดลองแล้ว จะให้หัวกดกลับสู่ ตำแหน่งเดิมหรือค้างไว้ตรงจุดนั้น
บรรทัดที่	8 LOAD CELL	เพื่อบอกให้โปรแกรมที่ควบคุมเครื่องอู้ทราบว่า เครื่อง UTM นั้น ทนแรงได้สูงสุดเท่าไร จากตัวอย่าง เครื่อง AG-10TB ทนแรงได้สูงสุด 10000 กก.
บรรทัดที่	12 MIN POSITION	เพื่อตั้งค่าตำแหน่งต่ำสุด (ค่าแรงกตน้อยที่สุด) จากตัว อย่างตั้งค่าไว้ที่ STROKE .00000 มม. หมายความว่าตั้ง ค่าไว้ที่ระดับที่ให้เป็น 0.00000 มม.
บรรทัดที่	13	เป็นการตั้งค่าช่วงเวลาในการหยุดของหัวกดเมื่อถึงตำแหน่งต่ำสุด จากตัวอย่างตั้งไว้ที่ .00000 วินาที คือไม่มีการหยุดเลย
บรรทัดที่	14 MAX POSITION	เป็นการตั้งค่าของตำแหน่งสูงสุดโดยใช้แรงเป็นตัวกำหนด จากตัวอย่างให้ตำแหน่งสูงสุดอยู่ที่แรง 3900 กก.
บรรทัดที่	15	เป็นการตั้งค่าช่วงเวลาในการหยุดของหัวกดเมื่อถึงตำแหน่งสูงสุดจากตัวอย่างตั้งไว้ที่ 0 วินาที คือไม่มีการหยุดเลย

หมายเหตุ บรรทัดที่ไม่มีผลหรือไม่เกี่ยวข้องกับ การทดสอบจะไม่มีการกล่าวถึง

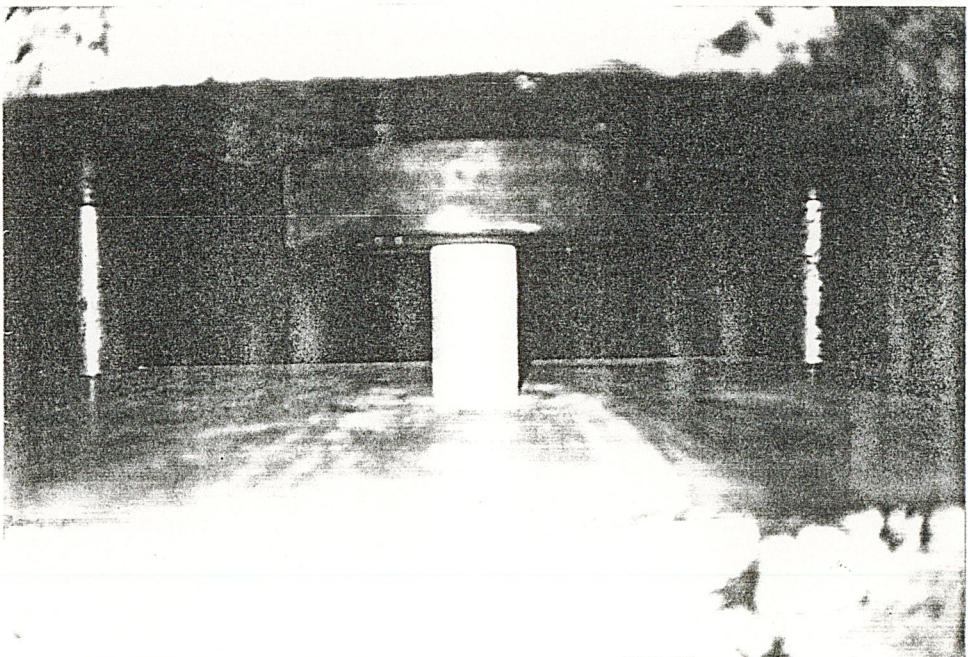
3.2.4 การดำเนินการทดสอบ

3.2.4.1 ทดสอบหากำลังอัดปรัลัษของคอนกรีต

1. ทำการหล่อหวมวกหัวท้ายคอนกรีตเพื่อให้ได้ระนาบ
2. นำเข้าติดตั้งในเครื่อง UTM
3. นำการอัดทดสอบ โดยให้อัดตราการเพิ่มของแรงเป็นไปอย่างช้า ๆ และคงที่
4. บันทึกผล



รูปที่ 3.7 รูปแสดงการกดอัดของคอนกรีตขนาด ϕ 15 ซม.



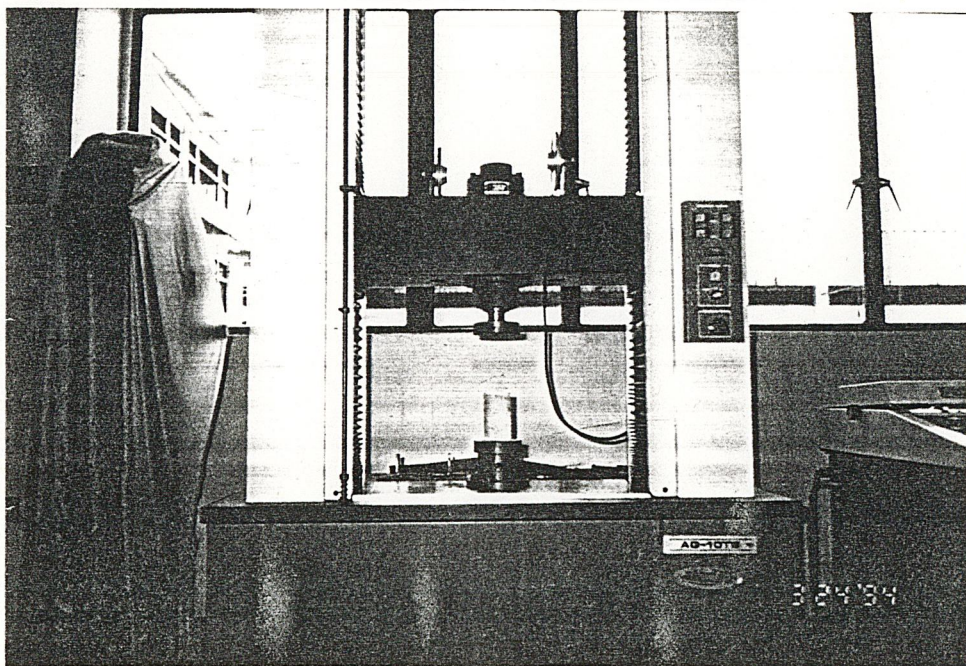
รูปที่ 3.8 รูปแสดงการกดอัดของคอนกรีตขนาด ϕ 5 ซม.

3.2.4.2 การทดสอบความล้า

ทำการทดสอบกับเครื่อง UTM รุ่น AG-10TB โดยให้คอนกรีตรับน้ำหนักกดอัดเป็นวงรอบ (Cyclic Load) ที่ความถี่ต่ำ (เครื่อง UTM รุ่น AG-10TB ไม่สามารถกระทำเป็นวงรอบที่ความถี่สูงได้โดยทำการทดสอบที่ความถี่สูงสุดที่เครื่อง UTM สามารถทำได้ก่อน) เป็นเวลา 1 ชม.

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำคอนกรีตเข้าติดตั้งที่ฐานเครื่อง
2. ป้อนข้อมูลสำหรับการทดสอบ
3. ทำการทดสอบเป็นเวลาไม่เกิน 1 ชม. ต่อ 1 ตัวอย่าง
4. บันทึกจำนวนรอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวขึ้น
5. หากทดสอบครบ 1 ชม. แล้วยังไม่เกิดรอยแตกร้าวขึ้นให้เห็น นำไปทดสอบเพื่อหากำลังอัดปรัลยอีกครึ่งหนึ่ง



รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งคอนกรีตขนาด ϕ 5 ซม. เข้ากับฐานเครื่อง UTM รุ่น AG-10TB

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้เป็นแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม. ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้อย่างน้อย 150 กก./ซม.^2 นำไปทำการทดสอบความล้มโดยรับน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบที่ความถี่ต่างๆ เป็นเวลาไม่เกิน 1 ชม. สัดส่วนความเค้นที่ใช้คือ 0.9 Stress Range เท่ากับ 1 และหล่อคอนกรีตขนาด ϕ 15 ซม. สูง 30 ซม. เพื่อเปรียบเทียบกำลังของคอนกรีต

ตารางที่ 4.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด ๑๕ ซม.

Specimen No.	Code of Structure	Dimensions(cm.)		Weight (kq.)	Slump (cm.)	Date of Casted	Date of Tested	Ages days	Ultimate load (kg)	Compressive Strength		weight per volumn		Remark	
		Cross section	Height							KSC	PSI	kg/m3	LB/Ft3		
1		15.042	30.05	12.52	6			7	32,020	180.186		2344.54			
2		15.07	30.24	12.468	6			7	31,970	179.236		2311.52			
3		15.062	29.95	12.489	6			7	31,790	178.417		2339.76			
4		15.052	30.16	12.56	6			7	31,180	175.226		2340.34			
5		15.062	30.05	12.369	6			7	31,730	178.080		2310.12			
เฉลี่ย													178.229		

ตารางที่ 4.3 ชุดทดสอบที่ 1
(ความถี่=6.618-6.90รอบ/นาที)

No.	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง(ซม.)	ความถี่(รอบ/นาที)	จำนวนรอบที่เกิดรอยแตกร้าวขึ้น
1	5.630	9.780	6.742	137
2	5.664	9.950	6.667	145
3	5.668	9.800	6.187	138
4	5.645	9.750	6.383	150
5	5.671	9.990	6.900	142
	เฉลี่ย			142.4

ตารางที่ 4.4 ชุดทดสอบที่ 2
(ความถี่=3.871-4.054รอบ/นาที)

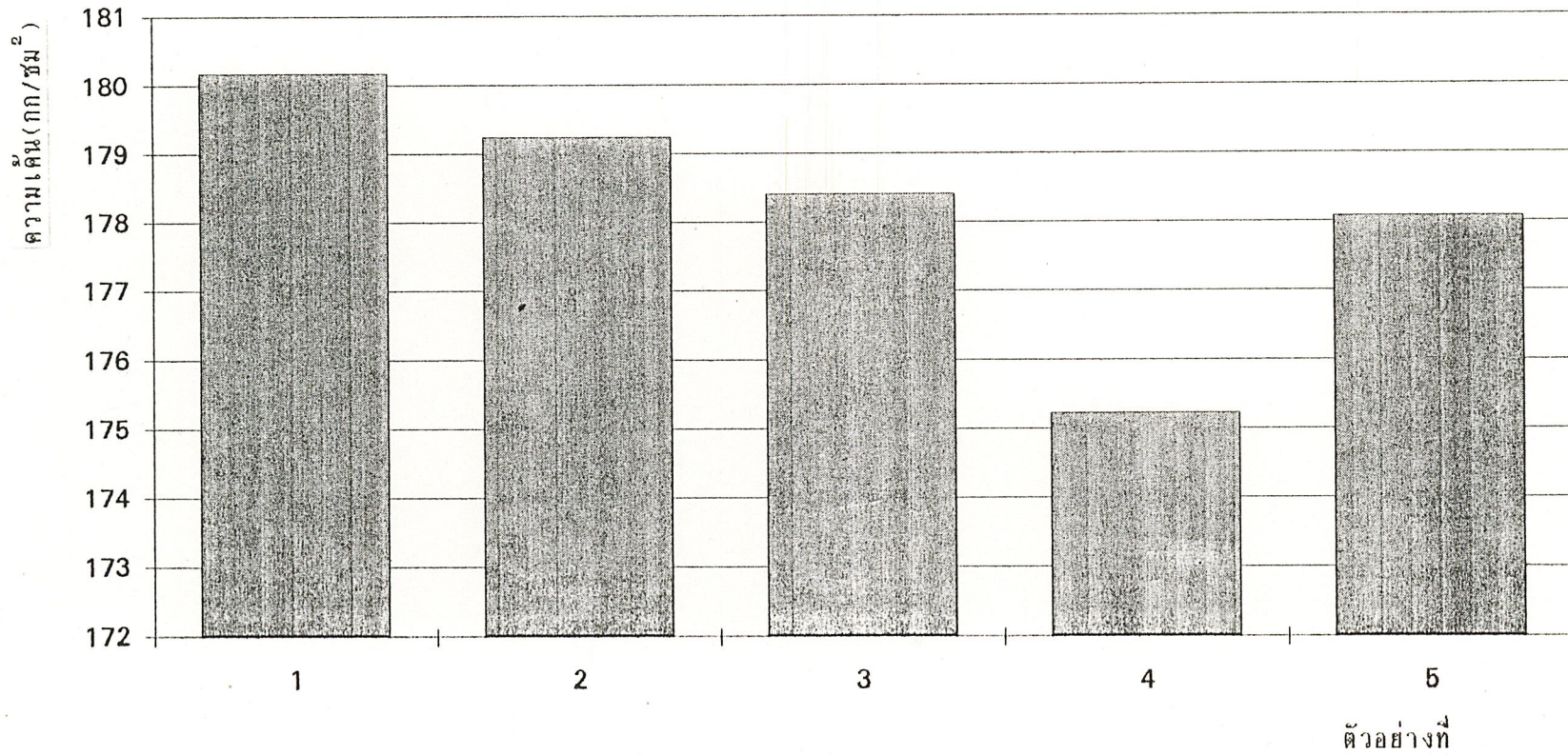
No.	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง(ซม.)	ความถี่(รอบ/นาที)	จำนวนรอบที่เกิดรอยแตกกว้างขึ้น
1	5.641	9.950	3.974	141
2	5.682	9.890	3.896	144
3	5.664	9.790	4.054	138
4	5.632	9.840	3.947	138
5	5.645	9.770	3.871	148
	เฉลี่ย			141.8

ตารางที่ 4.5 ชุดทดสอบที่ 3
(ความถี่=2.542-2.667 รอบ/นาที)

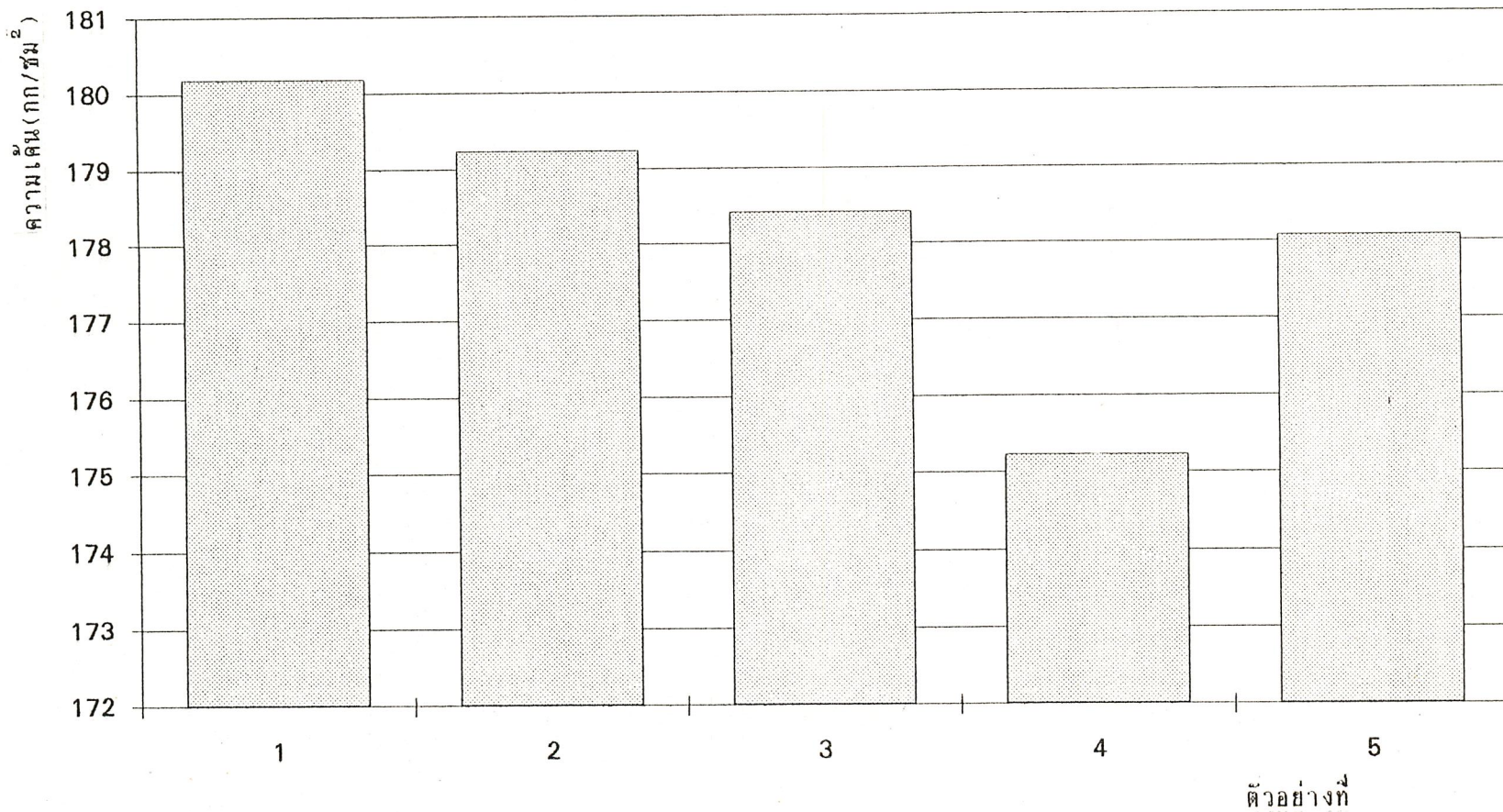
No.	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง(ซม.)	ความถี่(รอบ/นาที)	จำนวนรอบที่เกิดรอยแตกกว้างขึ้น
1	5.633	9.870	2.586	139
2	5.645	9.930	2.667	140
3	5.644	9.950	2.597	142
4	5.661	9.870	2.542	150
5	5.655	9.950	2.632	148
	เฉลี่ย			143.8

ตารางที่ 4.6 ชุดทดสอบที่ 4 (เมื่อทำครบ 1 ชม.แล้วคอนกรีตยังไม่ปรากฏรอยร้าวขึ้นนำไปทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด)
(ความถี่=1.802-1.917 รอบ/นาที)

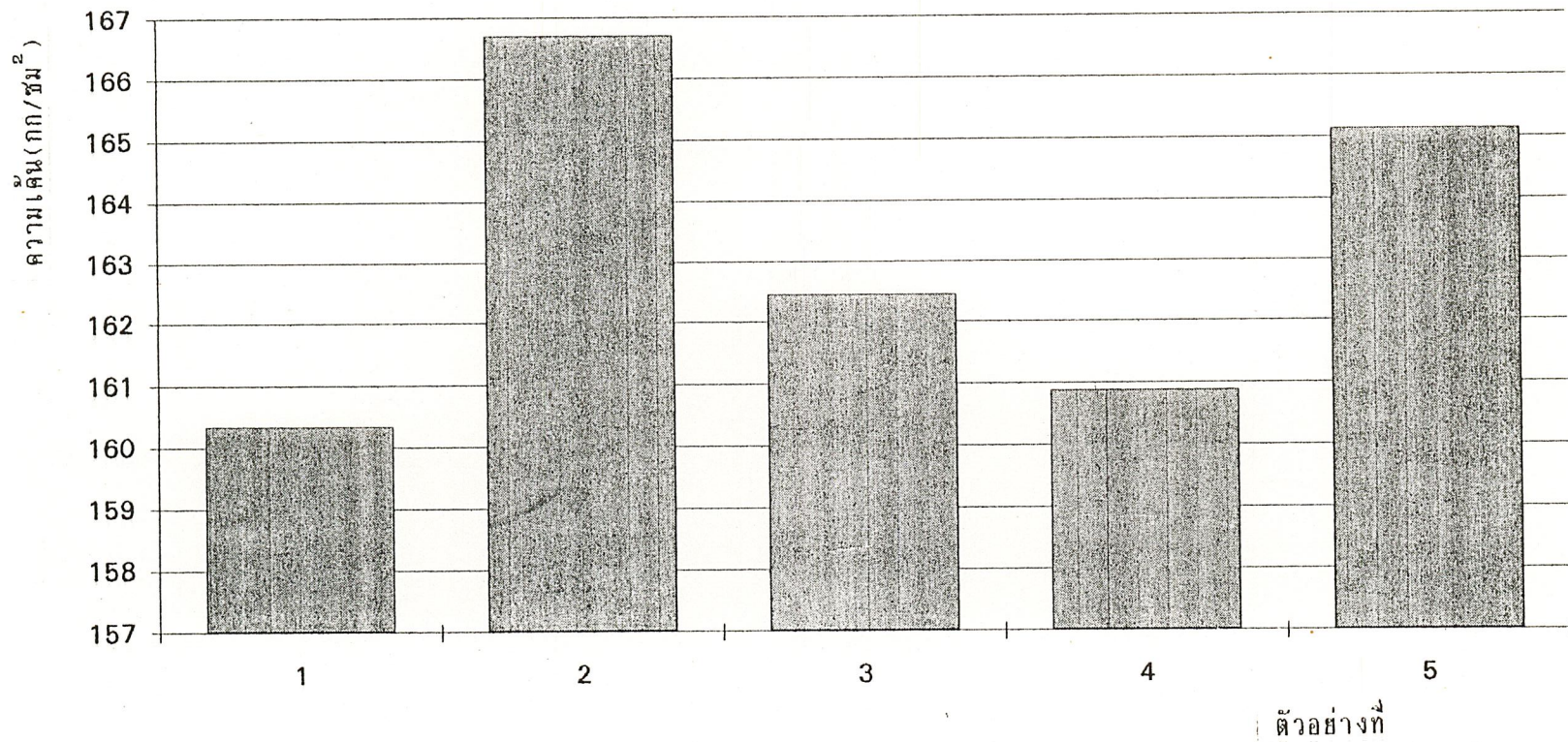
No.	เส้นผ่าศูนย์กลาง(ซม.)	ความสูง(ซม.)	ความถี่(รอบ/นาที)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด(kg.)
1	5.671	9.960	1.917	4050
2	5.674	9.760	1.818	4215
3	5.686	9.900	1.905	4125
4	5.630	9.890	1.846	4005
5	5.650	9.980	1.802	4140
	เฉลี่ย			4107



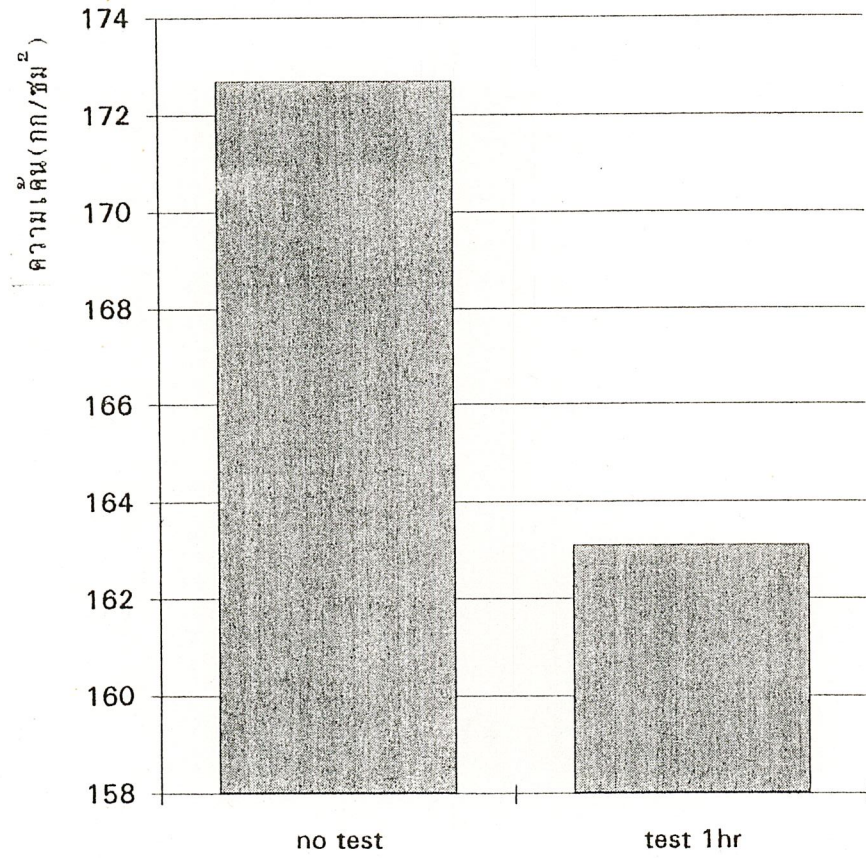
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักบรรจุสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด ϕ 15 ซม.



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงหาเวทย์น้ำหนักบรรจุสูงสุดของแท่งคอนกรีตวางระบอบขนาด ๘ 5 ซม.

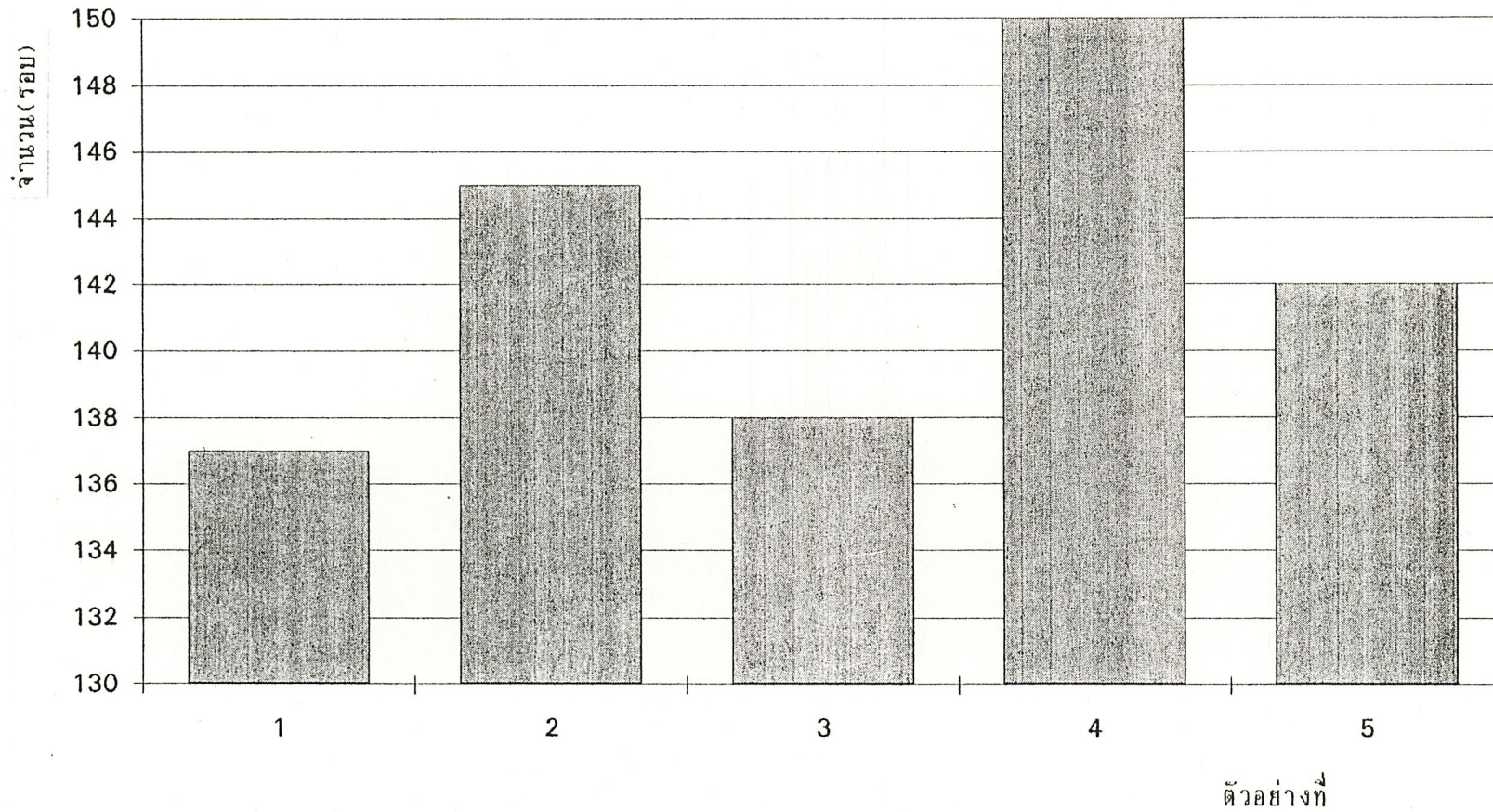


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตขนาด \varnothing 5 ซม. ภายหลังจากการทำการทดสอบแล้วไม่เกิดความเสียหายใดๆให้เห็น

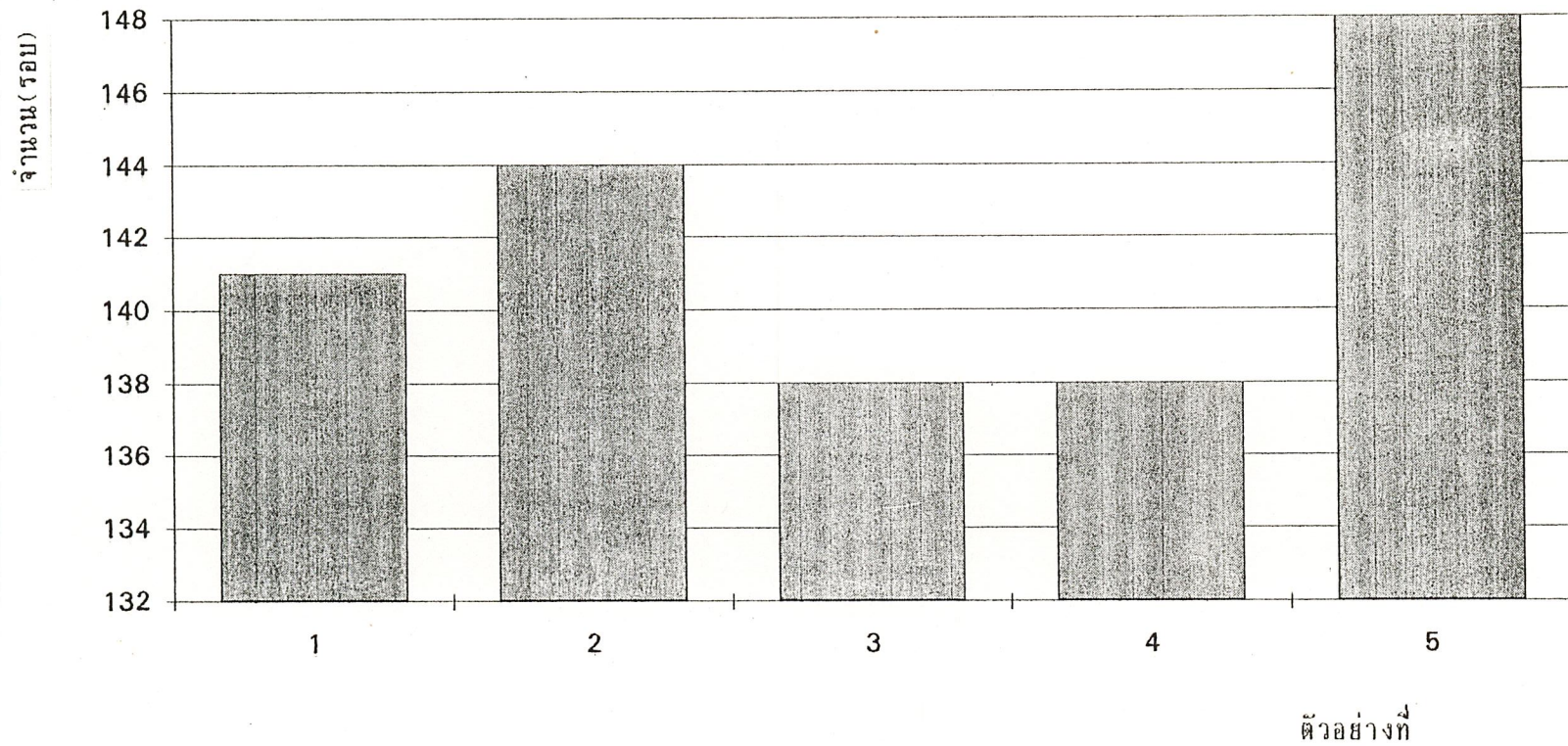


ตัวอย่าง

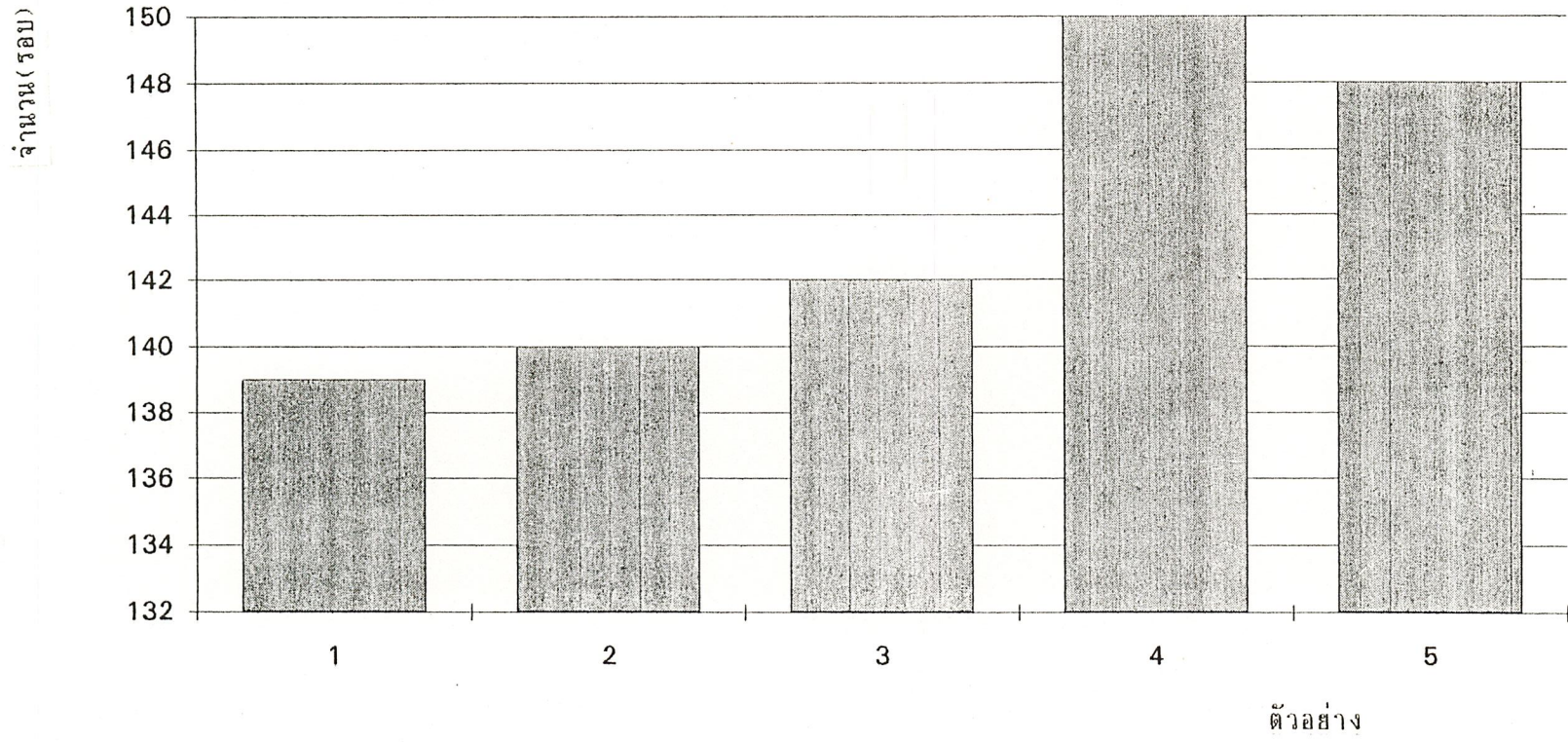
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\phi 5$ ซม. ที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบ และผ่านการทดสอบการรับน้ำหนักเป็นวงรอบ ($f=1.802-1.917$ rpm)



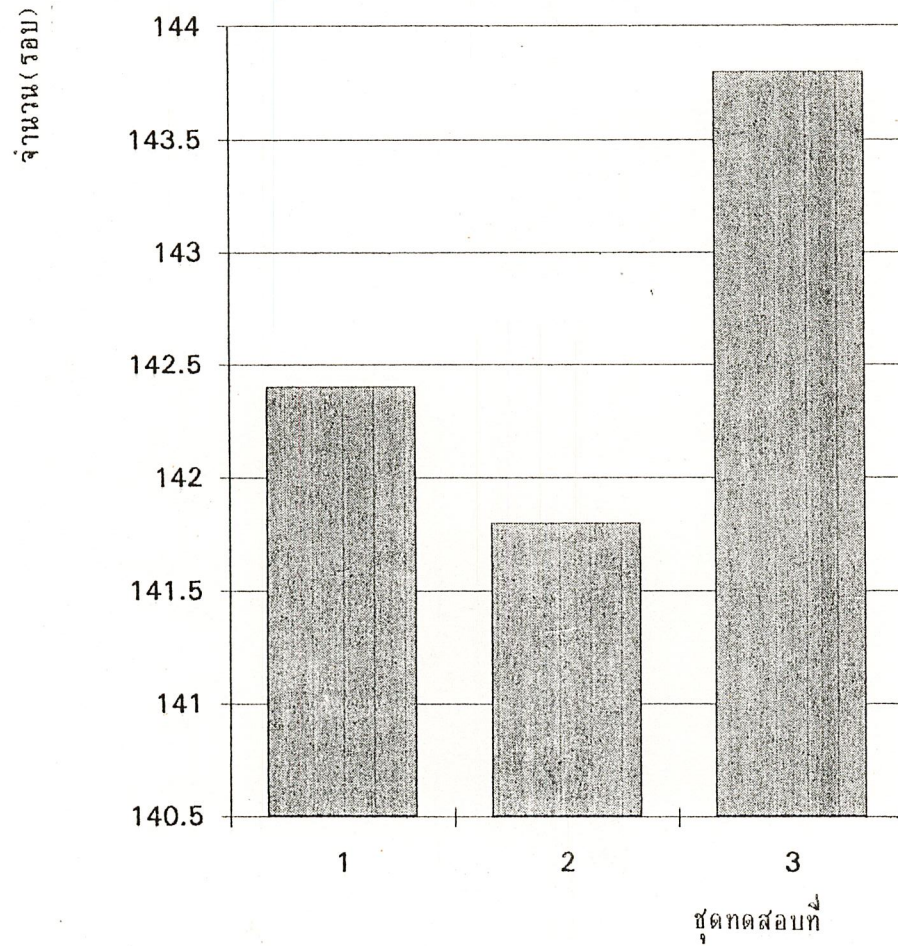
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำจนเคลือบวัสดุที่ 1 เกิดรอยแตกบริเวณ
($f=6.187-6.90$ rpm)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงจำนวนรอบของน้ำหยดที่กระทำจนคอนกรีตชั้นที่ 2 เกิดรอยแตกร้าวขึ้น
($f=3.871-4.059$ rpm)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงจำนวนรอบของน้ำหนักร่างที่กระทำของเครื่องวัดชุดที่ 3 เกิดรอยแตกบริเวณ
 (f=2.542-2.667 rpm)



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนรอบของน้ำหนักรถที่กระทำจบนคอนกรีตชุดที่ 1, 2 และ 3
เกิดรอยแตกเร็วขึ้น ($f=2.542-2.667\text{rpm}$)

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด ϕ 15 ซม. สูง 30 ซม. และ ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม. พบว่าแท่งเล็กรับความเค้นได้น้อยกว่าแท่งใหญ่ เล็กน้อย ค่าเฉลี่ยของความเค้น คือ 172.669 และ 178.229 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ ใกล้เคียงกับค่าจากตารางที่ 2 ภาคผนวก ค โดยที่เมื่ออัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางกลางเท่ากับ 2 แล้ว แพลตฟอร์มสำหรับแท่งกำลังอัดให้ถูกต้องมีค่าเท่ากับ 1

จากผลการทดสอบคอนกรีตเป็นวงรอบ พบว่าให้ผลเป็นไปตามทฤษฎี คือ เมื่อคอนกรีตได้รับน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบ โดยที่น้ำหนักที่ใช้ต้องก่อให้เกิดสัดส่วนความเค้น (ความเค้นที่ในการทดลองต่อด้วยความเค้นอัดประลัย) มากกว่า 0.5 ทำให้คอนกรีตเกิดความล้าและเสียหายในที่สุด

จากผลการทดสอบ ใช้สัดส่วนความเค้น 0.9 Stress Range (ผลต่างของค่าความเค้นสูงสุดกับต่ำสุดต่อด้วยความเค้นสูงสุด) 1 เวลาที่ใช้ในการทดสอบแต่ละตัวอย่างไม่เกิน 1 ชม. แบ่งทดสอบออกเป็นชุดๆ แต่ละชุดมีตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง ทำการทดสอบที่ช่วงความถี่ 6.147 ถึง 6.90 3.871 ถึง 4.054 2.542 ถึง 2.667 และ 1.802 ถึง 1.917 รอบ/นาที ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ที่ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบของแต่ละชุดตัวอย่าง 142, 142 และ 144 รอบ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ M.E.Award และ H.K.Holdorf ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 ที่ค่าสัดส่วนความเค้น 0.9 และค่า Stress Range เท่ากับ 1 ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวที่จำนวนวงรอบของการกระทำ 100 รอบ สาเหตุที่คอนกรีตเกิดรอยแตกเร็วขึ้น เนื่องจากรอยร้าวเล็กๆภายในเนื้อคอนกรีตเกิดการขยายตัวและเชื่อมประสาน มีผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงจนเท่ากับหรือน้อยกว่าน้ำหนักที่กระทำ

เมื่อสัดส่วนความเค้นและ Stress Range มีค่าคงที่ ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อจำนวนรอบที่ก่อให้เกิดรอยแตกร้าวน้อยมาก แต่สิ่งที่มีผลต่อการทดสอบคือ ช่วงเวลาในการทดสอบ พิจารณาได้จาก ชุดทดสอบที่ 1 ถึง 3 มีช่วงเวลาที่เกิดจากแตกร้าวแตกต่างกัน และชุดที่ 4 เมื่อทำจนครบเวลา 1 ชม.แล้ว ก็ยังไม่เกิดการแตกเร็วขึ้น เนื่องจากความล้าในเนื้อคอนกรีตยังไม่มากพอที่จะก่อให้เกิดรอยร้าวให้เห็นได้ แม้ว่าภายในเนื้อคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวและเชื่อมประสานกันของรอยร้าวเล็กๆภายใน

จากชุดทดสอบที่ 4 เมื่อถูกน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบจนครบ 1 ชม. แล้วยังไม่เกิดการแตกร้าวขึ้นนำไปทดสอบหาค่าลึงรับน้ำหนักสูงสุด พบว่า ค่าค่าลึงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4107 กก. มีค่าลดลงกว่าค่าเฉลี่ยเดิมคือ 4350 กก. อธิบายได้ว่า รอยร้าวเล็กๆภายใน ยังเกิดขึ้นไม่มากพอที่จะทำให้ค่าลึงของคอนกรีตต่ำลงจนเท่ากับหรือน้อยกว่าน้ำหนักที่กระทำ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับกำลังของคอนกรีต ขนาด ϕ 5 ซม. สูง 10 ซม. รับน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบที่ความถี่ในการทดสอบต่ำ คือ 6.187 ถึง 6.90 3.871 ถึง 4.054 2.542 ถึง 2.667 และ 1.802 ถึง 1.917 รอบ/นาที เป็นเวลาทั้งหมดไม่เกิน 1 ชม. โดยกำหนดสัดส่วนความเค้นไว้ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดประลัย Stress Range ที่ 1 กำลังอัดประลัย 172.689 กก./ซม² จากการทดสอบพบว่า

6.1.1. คอนกรีตภายหลังจากรับน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบ จะเกิดการแตกร้าวขึ้นที่การกระทำ 142 , 142 และ 144 รอบตามลำดับ

6.1.2. คอนกรีตที่ทำการทดสอบจนครบเวลา 1 ชม.แล้ว ยังไม่เกิดรอยแตกร้าวขึ้นเมื่อนำไปหากล้างอัดประลัย พบว่ามีค่าลดลงจากค่าเฉลี่ย 5.586 เปอร์เซ็นต์

6.1.3. ช่วงความถี่ที่ใช้ ไม่มีผลต่อจำนวนรอบที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวขึ้นแก่คอนกรีต

6.1.4. จำนวนรอบที่กระทำมีผลต่อการแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

6.2 ข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ เป็นเพียงจุดเริ่มแรกในการศึกษาผลของน้ำหนักกระทำเป็นวงรอบที่ความถี่ต่ำ (มากกว่า 1 รอบใน 1 วินาที) ที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต จนคอนกรีตเกิดความล้าและแตกร้าวในที่สุดเนื่องจากไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป หรือพิจารณาอีกแง่หนึ่งก็คือ กำลังของคอนกรีตซึ่งลดลงจากการขยายตัวของรอยร้าวเล็กๆภายในเนื้อคอนกรีต ในการศึกษาขั้นต่อไปควรพิจารณาเกี่ยวกับเรื่องต่อไปนี้

6.2.1. ความถี่ที่สูงหรือต่ำกว่าที่ใช้ในโครงการงานพิเศษชุดนี้ เพราะความถี่ที่ศึกษาในโครงการงานพิเศษนี้ยังไม่กว้างนัก ผลการทดสอบออกมายังไม่เห็นความแตกต่างมากนัก

6.2.2. Stress Range, R เพราะค่า R มีผลต่อจำนวนวงรอบที่กระทำจนคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวมากที่สุดตัวหนึ่ง เช่น ถ้าค่า R ลดลง จำนวนวงรอบที่กระทำก็เพิ่มขึ้น

6.2.3. คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากัน แต่มีส่วนผสมต่างกัน เพราะถึงแม้กำลังจะเท่ากัน แต่ในบางครั้งพฤติกรรมของการรับน้ำหนักกระทำ เป็นวงรอบอาจไม่เหมือนกัน เพราะโครงสร้างของคอนกรีตต่างกัน นั่นคือ ขึ้นอยู่กับลักษณะของส่วนผสม ชนิด ความแข็งแรง และคุณสมบัติอื่นๆ ของส่วนผสม

6.2.5. ใช้คอนกรีตที่ถูกสารเคมีหรือความร้อนในระดับต่างๆมาทำการทดลอง เนื่องจากสิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อกำลังหรือการเปลี่ยนแปลงชั้นในเนื้อของคอนกรีต

บรรณานุกรม

1. A.E.Brook and Norman,"The Structure of Concrete",Cement and Concrete Association ,London 1968,pp.275-288
2. Sidney Mindess and J Francis Young ,"Concrete", Prentice-Hall INC.,England Cliffs, New Jersey,1987
3. A.Ghali and R.Farve,"Concrete Structures:stresses and deformation",Chapman and Hall,London,1986,pp.1-4
4. H.Rusch,"Research toward a general flexural theory for structural concrete", ACI Journal,Vol.57,No.1,July 1960,pp.1-28
5. E.W.Bennette and N.K.Razu,"Structure",Solid Mechanics and Engineering Design, Part2.John Wiley and Sons Inc.,New York,1971,pp.1089-1102
6. A.M.Neville and J.J. Brooks,"Concrete Technology",Longman Scientific and Technicle,New York,1987,pp.195-202
7. Dr.Paul W.Ables,"Fatigue Strength of Concrete",ACI Committee 215,American Concrete Institute,Detroit,March 1974
8. ACI,"Fatigue strength of plain concrete in tension ,compression,or flexure",Journal of the ACI,Vol.71,No.3,1974,pp.97-121
9. พิภพ สุนทรสมัย,ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น พิมพ์ครั้งที่11,2536
10. สมศักดิ์ คมวุฒิชัย,พฤติกรรมของพื้นถนนคอนกรีตภายใต้การรับน้ำหนักกระทำซ้ำ,คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 162 หน้า, 2528
11. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี, ภาควิชาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2530
12. วินิต ช่อวีเชียร, 'คอนกรีตเทคโนโลยี', พิมพ์ครั้งที่ 7, 2529

ภาคผนวก ก.

ในวงการก่อสร้างปัจจุบัน เป็นที่รู้จักอย่างแน่แท้จะนำปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Port Land Cement) มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต นับเป็นปูนซีเมนต์สมัยใหม่ซึ่งสามารถทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณ ใช้ในโครงสร้างอาคาร ถนน เขื่อน และงานก่อนรื้ออื่นๆ ได้อย่างปลอดภัย

เดิมทีเดิยว เมื่อปี พ.ศ. 2299 วิศวกรชาวอังกฤษชื่อ John Smeaton ได้ค้นพบ Hydraulic Cement และได้นำไปสร้างประภาคาร Eddy-Stone Lighthouse ให้คงทนอยู่ได้ถึง 125 ปี จนกระทั่งมีการค้นคว้าปูนซีเมนต์ในคุณสมบัติต่างๆ จนได้เกิด โรมันซีเมนต์, บริกต์สซีเมนต์ขึ้น ในปี พ.ศ. 2376 Joseph Asdin เป็นบุคคลที่ได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาของปูนซีเมนต์ที่เรียกว่า "พอร์ตแลนด์" (Portland) เพราะเขาพบว่ามันคล้ายกับหินบนเกาะเล็กๆของพอร์ตแลนด์ ได้จากการผสมหินปูน (Limestone) และดิน (Clay) โดยการเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาฟาเรนไฮต์ จะทำให้น้ำถูกไล่ออกไปหมด และจะกลายสภาพเป็นปูนเม็ดในเตาเผา (Rotary Kilns) ที่อุณหภูมิ 1,600 องศาฟาเรนไฮต์ และจะเผาต่อไปจนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 2,700-3,000 องศาฟาเรนไฮต์ หินปูนจะแยกตัวออกเป็นแคลเซียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ปูนเม็ดที่ออกมาเตาเรียกว่า Clinker จะมีขนาดประมาณ ϕ 1/8 - 2 นิ้ว เมื่อเย็นลงก็ส่งไปบด พร้อมกับก็นำยิปซัม (Gypsum) บดเข้าผสมด้วยประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ บดปูนซีเมนต์ให้มีขนาดของเม็ดเล็กมาก ยิ่งละเอียดเท่าใดก็ทำให้การก่อตัว (Set) ได้รวดเร็วขึ้น

สำหรับบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ได้บดซีเมนต์ตราเอราวัณให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ตราช้าง เพื่อให้ก่อตัวแข็งแรงได้เร็ว

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน ASTM C150-61

The American Society for Testing Material ได้กำหนดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ 5 ชนิดดังนี้

1.1. ชนิด I Normal Portland Cement บางที่เรียก Standard Portland Cement เป็นชนิดมาตรฐาน เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างทั่วไปโดยเฉพาะงานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ในงานอาคาร สะพาน ผิวถนน ลานบินและอื่นๆ ประเทศไทย เกือบได้กับปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราพญานาคเค็สรเด็ยวสีเขียว ตราเพชร และตราดอกจิกปูนซีเมนต์

1.2. ชนิด II Modified Portland Cement เป็นชนิดที่ผลิตขึ้นเพื่อต้านทานเกลือซัลเฟต เมื่อปูนซีเมนต์มีปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) จะเกิดความร้อนต่ำและเพิ่มขึ้นช้ากว่าปูนซีเมนต์ชนิด I เหมาะที่จะนำมาใช้กับงานคอนกรีตมวล (Mass Concrete) อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นไม่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนในคอนกรีต เกือบปูนซีเมนต์ได้กับตราพญานาค 7 เค็สร

1.3. ชนิด III High-Early Strength Portland Cement เป็นชนิดของปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังรวดเร็ว ในช่วงอายุ 24 ชม. จะมีความแข็งแรงของคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิด I ที่อายุ 3 วัน และอายุ 7 วัน เท่ากับปูนซีเมนต์ชนิด I อายุ 28 วัน เป็นต้น จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับงานที่ต้องการเร่งด่วน เช่น ถนนที่มีการสัญจรของรถคับคั่ง สนามบินจะต้องเปิดใช้และยังเหมาะที่จะนำมาใช้กับช่วงที่มีอากาศหนาว (Cold Weather) เพื่อให้คอนกรีตแข็งตัวได้รวดเร็ว ก่อนที่น้ำที่ผสมจะแข็งตัวเสียก่อน เกือบได้กับปูนซีเมนต์ของไทยตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคเค็สรเด็ยวสีแดง

1.4. ชนิด IV Low-Heat Portland Cement เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ มีอัตราความร้อนต่ำและกำลังก็เพิ่มขึ้นช้าๆ เหมาะที่จะเลือกใช้กับงานสร้างเขื่อนขนาดใหญ่

1.5. ชนิด V Sulfate-Resistant Portland Cement เป็นการจงใจที่จะให้ด้านทานสารพวกเกลือ เช่น การสร้างในบริเวณใกล้ทะเล หรือมีเจอน้ำเกลือในบริเวณที่มีดินเค็มเกือบปูนซีเมนต์ในประเทศไทย ได้กันตราปลาลงของชลประทานซีเมนต์

ส่วนปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า และตรานกอินทรี เป็นพวกซีเมนต์ โดย นำทรายหรือหินบดให้ละเอียด ผสมเข้าไปในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิด I ประมาณ 25-30% เพื่อให้มีคุณสมบัติง่ายต่อการใช้งาน ลดการหดตัวเมื่อเกิดการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ทำให้ไม่เกิดการแตกร้าว ราคาถูก เหมาะสำหรับอาคารเล็กและงานก่ออิฐฉาบปูน เพราะไม่ต้องกรบกำลังมากนัก

2. การเปรียบเทียบกำลังที่เกิดขึ้นสำหรับปูนซีเมนต์ทั้ง 5 ชนิด

ได้มีการทดสอบด้วยอัตราส่วนผสมของคอนกรีต กรรมวิธีและอยู่ในสภาพเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ก1 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณของกำลัง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เกิดขึ้นในการใช้ปูนซีเมนต์แต่ละชนิด ตามอายุของคอนกรีต 1, 7, 28 วัน และ 3 เดือน เป็นลำดับ โดยยึดถือกำลังที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ธรรมดาชนิด I ให้มีปริมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ กำลังอัดที่เกิดขึ้นกับปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ จะแตกต่างกันไปตามอายุ แต่จะเท่ากันเมื่อคอนกรีตมีอายุ 3 เดือน

ตารางที่ ก1 การรับกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ

ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	กำลังอัดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับชนิด I			
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	3 เดือน
ชนิด I Normal	100	100	100	100
II Modified	75	85	90	100
III High-Early Stength	190	120	110	100
IV Low-Heat	55	55	75	100
V Sulfate-Resistant	65	75	85	100

ภาคผนวก ข.

อิทธิพลของขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง

คอนกรีตชนิดเดียวกัน ทดสอบห้ำำลังอัดโดยใช้ทรงกระบอกที่มีรูปร่างเหมือนกัน แต่แตกต่างกัน ขนาดของตัวอย่างที่ใหญ่กว่าจะให้หำลังอัดที่ต่ำกว่า ตารางที่ ข1 แสดงหำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาดต่างๆ คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของหำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดมาตรฐาน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

ตารางที่ ข1 ผลของขนาดของแท่งทดสอบที่มีต่อหำลังอัด

แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง x ความสูง	หำลังอัดเฉลี่ย สัมพัทธ์ ร้อยละ	แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง x ความสูง	หำลังอัดเฉลี่ย สัมพัทธ์ ร้อยละ
φ 5 x 10 ซม.	109	φ 30 x 60 ซม.	91
7.5 x 15	106	45 x 90	86
15 x 30	100	60 x 120	84
20 x 40	96	90 x 180	82

อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างทรงกระบอกก็มีผลต่อค่าหำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตเช่นกันถ้าอัตราส่วนดังกล่าวยิ่งมากเท่าไร หำลังอัดที่ได้จากการทดสอบจะต่ำลงเท่านั้น หำลังอัดเทียบเท่า (Equivalent Strength) ของแท่งทดสอบที่มีรูปร่างไม่ได้มาตรฐานที่เทียบกับแท่งทดสอบมาตรฐาน (ส่วนสูงเป็นสองเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง) ทำได้โดยคูณค่าหำลังอัดที่ทดลองได้จากแท่งทดสอบนั้นด้วยแฟคเตอร์ที่ให้ไว้ใน ตารางที่ ข2 เช่น เมื่อแฟคเตอร์สำหรับแก้หำลังอัดให้ถูกต้องสำหรับแท่งทดสอบที่มีอัตราส่วน h/d เท่ากับ 1 มีค่าเป็น 0.91 แสดงว่า

แท่งทดสอบนี้มีกำลังอัดมากกว่าแท่งทดสอบมาตรฐาน 10 เปอร์เซ็นต์ (ซึ่งได้จาก $1.00/0.91 = 1.10$)

นอกจากนี้ กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตรูปลูกบาศก์จะสูงกว่าของแท่งทรงกระบอกประมาณ 13 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของคานาก็มีผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต คล้ายกับผลของขนาดทรงกระบอกที่มีต่อกำลังอัด โดยทั่วไปตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่จะได้กำลังน้อยกว่าตัวอย่างขนาดเล็ก

ตารางที่ ๒ ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่ง
ทดสอบที่มีต่อกำลังอัด

อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (h/d) ของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก	แฟคเตอร์สำหรับแก้กำลังอัด ให้ถูกต้อง
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

ภาคผนวก ค.

วิธีของ ACI

การคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปซึ่งหล่อในที่ อาจจะดำเนินเป็นขั้นๆ ตามวิธีการซึ่งเสนอโดยสถาบันคอนกรีตของอเมริกา (ACI 211.1-70) ดังต่อไปนี้ ซึ่งให้ผลค่อนข้างแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงและถูกต้อง ทั้งนี้จะต้องทราบถึงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตเสียก่อน เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก โมดูลัสความละเอียดและเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ เป็นต้น อีกทั้งวัสดุผสมต้องมีขนาดคล้อยอยู่ในพิกัดกำหนดด้วย

1. เลือกค่าความขุบตัวที่เหมาะสมกับประเภทของงาน

ค่าความขุบตัวต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และให้ได้ความชื้นเพียงพอทำงานได้สะดวกในกรณีที่มีได้กำหนดค่าความขุบตัวมาให้ ค่าความขุบตัวที่เหมาะสมกับประเภทของงานเลือกได้จากตารางที่ ค1

2. เลือกขนาดโตสุดของวัสดุผสม

ขนาดโตสุดของวัสดุผสม ไม่ควรเกินกว่า $1/3$ ของความหนาของแผ่นพื้น หรือ $3/4$ ของขนาดความห่างของเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด

ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบที่เหมาะสมกับประเภทการใช้งานอาจเลือกได้จากตารางที่ ค2

3. ประมาณปริมาณน้ำที่ผสมและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น

ตารางที่ ค3 ให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตเพื่อให้ได้ค่าการบวมตัวตามที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโตสุด รูปร่างและส่วนขนาดคล้อยของวัสดุผสม ในตารางดังกล่าวยังให้ค่าปริมาณฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่มีสารทำให้เกิดฟองอากาศและปริมาณฟองอากาศที่ควรจะมีในส่วนผสมคอนกรีตเมื่อใส่สารทำให้เกิดฟองอากาศ

4. เลือกอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์

อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะที่คอนกรีตนั้นถูกนำไปใช้งาน และกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต้องการ ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตสำหรับวัสดุผสมที่จะใช้ผสมทำคอนกรีต ก็ให้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์จากตารางที่ ค4 และ ค5 ตารางที่ ค4 ให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่มากที่สุดสำหรับประเภทงาน และสภาวะแวดล้อมต่างๆ ส่วนตารางที่ ค5 ให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนักที่มากที่สุดสำหรับค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ต้องการ และให้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนดังกล่าวที่ต่ำที่สุดซึ่งหาได้จาก 2 ตารางนี้

5. คำนวณปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนักแล้ว ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรย่อมหาได้ซึ่งเท่ากับปริมาณน้ำจากขั้นที่ 3หารด้วยอัตราส่วนจากขั้นที่ 4 อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดปริมาณซีเมนต์ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตมาให้ก็ให้เลือกใช้ค่าที่มากที่สุดจากที่คำนวณได้หรือที่กำหนดให้

6. คำนวณปริมาณวัสดุผสมหยาบ

ตารางที่ ค6 แสดงปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่น (dry rodded) ในส่วนผสมต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งแตกต่างกันตามค่าในโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ใช้ และขนาดโตที่สุดของหินที่ใช้ ปริมาณของวัสดุผสมหยาบคิดเป็นน้ำหนักมีค่าเท่ากับปริมาตรของวัสดุผสมหยาบคูณด้วยหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบนั้น

7. ประมาณปริมาณวัสดุผสมละเอียด

เมื่อได้ค่าต่างๆของส่วนผสมจนถึงลำดับที่ 6 แล้ว ปริมาณของวัสดุผสมละเอียดจะหาได้ดังนี้
 ปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุผสมละเอียด = ปริมาตรของคอนกรีต - ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสมต่างๆ (ยกเว้นทราย)

โดยที่ ปริมาตรเนื้อแท้ (ซึ่งเป็นปริมาตรที่ไม่มีช่องว่างในเนื้อ) ของวัสดุคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะ และน้ำหนักของวัสดุ กล่าวคือ

$$\text{ปริมาณน้ำเนื้อแท้} = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุ}}{\text{ความถ่วงจำเพาะ \times \text{หน่วยน้ำหนักของน้ำ}}}$$

8. ปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้นของวัสดุผสม

ตามปกติ วัสดุผสมที่ใช้งานจริงจะมีความชื้นสูงกว่าในสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้ง ฉะนั้นจึงต้องแก้ส่วนผสมให้เข้ากับสภาพจริง โดยเพิ่มน้ำหนักของวัสดุผสมขึ้นเท่ากับน้ำหนักน้ำที่ติดตามและลดน้ำในส่วนผสมออกในจำนวนเท่ากัน ในกรณีที่วัสดุผสมแห้งกว่าสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้งจะต้องแก้ส่วนผสมเช่นเดียวกันในทางตรงกันข้าม

9. การปรับส่วนผสมด้วยการทดลองผสม

สัดส่วนของผสมต่างๆ ที่คำนวณแล้วเป็นเกณฑ์โดยประมาณทั้งสิ้น ซึ่งจะต้องตรวจสอบดูด้วยถึงผลที่ได้ทั้งในด้านกำลังของคอนกรีต และความยากง่ายในการทำงานโดยการทดลองผสมจริง จากนั้นตรวจสอบดูหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ปริมาตรที่ใช้และปริมาณอากาศ แล้วจึงปรับส่วนผสมต่างๆ ให้เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง

ถ้าต้องการให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 ซม. จะต้องเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำในส่วนผสม 2 ลิตรต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะมีผลให้กำลังของคอนกรีตน้อยลงหรือมากขึ้นตามไปด้วย ฉะนั้นถ้าต้องการให้คอนกรีตมีกำลังคงเดิม จะต้องปรับปริมาณปูนซีเมนต์หรือหินและทรายร่วมไปด้วย

ถ้าต้องการให้คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศมีปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 เปอร์เซ็นต์ จะต้องลดหรือเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม 3 ลิตรต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ ก.1 ค่าความขุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

ประเภทของงาน	ค่าความขุบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด*	ค่าต่ำสุด
งานฐานราก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก งานก่อสร้างใต้น้ำ	8.0	2.0
งานพื้น คาน และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	5.0	2.0

ตารางที่ ก.2 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

ขนาดความหนาของ โครงสร้าง (ซม.)	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คาน ผนังและเสา คสล.		ผนังคอนกรีต ไม่เสริมเหล็ก		พื้นถนน คสล. รับน้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีต รับน้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.
5.0—15.0	$\frac{1}{2}$ — $\frac{3}{4}$	12.5-20	$\frac{3}{4}$	20	$\frac{3}{4}$ —1	20—25	$\frac{3}{4}$ — $1\frac{1}{2}$	20—40
15.0—30.0	$\frac{3}{4}$ — $1\frac{1}{2}$	20—40	$1\frac{1}{2}$	40	$1\frac{1}{2}$	40	$1\frac{1}{2}$ —3	40—75
30.0—75.0	$1\frac{1}{2}$ —3	40—75	3	75	$1\frac{1}{2}$ —3	40—75	3	75
มากกว่า 75.0	$1\frac{1}{2}$ —3	40—75	6	150	$1\frac{1}{2}$ —3	40—75	3—6	75—150

ตารางที่ ค.3 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยวบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ

ค่าความยวบตัว (ชม.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม. ³ สำหรับวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ							
	$\frac{3''}{8}$ (10 มม.)	$\frac{1''}{2}$ (12.5 มม.)	$\frac{3''}{4}$ (20 มม.)	1'' (25 มม.)	$\frac{1''}{2}$ (40 มม.)	2'' (50 มม.)	3'' (75 มม.)	6'' (150 มม.)
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ								
3 — 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 — 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 — 18	240	230	210	205	185	180	170	—
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ								
3 — 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 — 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 — 18	215	205	190	185	170	165	160	—
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้
สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลา หรือมีการเยือกแข็งและการละลาย ของน้ำสลับกันบ่อย ๆ (เฉพาะคอนกรีต กระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำเค็ม หรือถูกกับซัลเฟต
โครงสร้างบาง ๆ ที่มีเหล็กหุ้ม บางกว่า 3 ซม.	0.45	0.40*
โครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมด	0.50	0.45*

ตารางที่ ค5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ 28 วัน (กก./ซม. ²)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	—
400	0.43	—
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

ตารางที่ ค6 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

ขนาดโตสุดของหิน	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตร ของคอนกรีต สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่าง ๆ กัน			
	2.40	2.60	2.80	3.00
$\frac{3}{8}$ " (10 มม.)	0.50	0.48	0.46	0.44
$\frac{1}{2}$ " (12.5 มม.)	0.59	0.57	0.55	0.53
$\frac{3}{4}$ " (20 มม.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1" (25 มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
$1\frac{1}{2}$ " (40 มม.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2" (50 มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3" (75 มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6" (150 มม.)	0.87	0.85	0.83	0.81

1. การหาความถ่วงจำเพาะของทราย ⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned}
 B &= 600 \text{ g.} && \text{อุณหภูมิ } 29.5 \text{ องศาเซลเซียส} \\
 A &= 589.0 \text{ g.} && \text{คงที่ } T = 100 \text{ องศาเซลเซียส} \\
 W_c &= 1329 \text{ g.} \\
 W &= 1689 \text{ g.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความถ่วงจำเพาะ (ภายใต้สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)} &= \frac{B}{W_c + B - W} \\
 &= \frac{600}{1329 + 600 - 1689} = \frac{600}{240} = 2.5 \text{ Answer}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความถ่วงจำเพาะ (เมื่อวัดแห้งสนิท)} &= \frac{A}{W_c + B - W} = \frac{587}{240} \\
 &= 2.445 \text{ Answer}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการดูดซึม} &= \frac{B - A}{B} \times 100\% = 2.167\% \text{ Answer}
 \end{aligned}$$

2. ความถ่วงจำเพาะของ Cement Type III ทราย TPI ขนาดขนาด 240 ML.

$$\begin{aligned}
 n_1 &= \text{ค่าที่อ่านได้เมื่อแช่น้ำ 30 นาที} = 18 \text{ มม. } T = 30 \text{ องศาเซลเซียส} \\
 n_2 &= \text{น้ำมันก๊าดที่ใส่ซีเมนต์แช่น้ำ 30 นาที} = 22.8 \text{ มม. } T = 29 \text{ องศาเซลเซียส}
 \end{aligned}$$

$$\text{นน. Cement ที่แท้จริงในขวด} = 367 - 351 = 16 \text{ g.}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น ความถ่วงจำเพาะ} &= \frac{\text{นน. Cement ที่แท้จริงในขวดแก้ว}}{\text{ปริมาตรน้ำมันก๊าดส่วนที่เพิ่ม (n=n_1)}} \\
 &= \frac{16}{22.8 - 18} = \frac{16}{4.8} = 3.333
 \end{aligned}$$

3. ความถ่วงจำเพาะของหิน และอัตราการดูดซึม (ครั้งที่ 2)

$$A = 4.95 \text{ Kg.}$$

$$B = 4.969 \text{ Kg.}$$

$$C = 3.1 \text{ Kg.}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ (มีความชื้น)} = \frac{A}{B - C} = \frac{4.95}{4.969 - 3.1} = 2.648$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง)} = \frac{B}{B - C} = \frac{4.969}{4.969 - 3.1} = 2.658$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ (วัสดุแห้งสนิท)} = \frac{B}{B - C} = \frac{4.969}{4.969 - 3.1} = 2.658$$

$$\text{เพราะฉะนั้นอัตราการดูดซึม} = \frac{B-A}{A} \times 100 = \frac{4.969 - 4.95}{4.95} = 0.3838 \%$$

หิน 2000 กรัม

ขนาดตะแกรง	นน. ที่ค้างบนตะแกรง	% ของนน. ที่ค้าง	% สะสม
2"	0	0	0
1"	0	0	0
3/4"	638	31.9	31.9
1/2"	1133	56.65	88.55
3/8"	73	3.65	92.2
เบอร์ 4	112	5.6	97.8
8	23	1.15	98.5
Pn	21	1.05	100
รวม	2000	100	508.95

$$\text{เพราะฉะนั้นโมดูลัสความละเอียด} = \frac{508.95}{100} = 5.08$$

- A = น้ำหนักมวลรวมที่ชั่งหลังจากผ่านการอบแห้งสนิท
 B = น้ำหนักมวลรวมภายใต้สภาวะอุณหภูมิแห้ง
 C = น้ำหนักมวลรวมที่ชั่งในน้ำ
 Wc = น้ำหนักขวดพิกโนมิเตอร์ที่บรรจุน้ำชนิดเดียวกับที่ใช้ทดสอบเต็มปากขวด
 W = น้ำหนักขวดพิกโนมิเตอร์ที่บรรจุน้ำและมวลรวม

การทดสอบจากหน่วย นน. ของมวลรวม

ผลการทดลอง

$$\text{อุณหภูมิน้ำ} = 33.8 \text{ องศาเซลเซียส}$$

$$\text{นน. ถัง} = 1.25 \text{ Kg.}$$

$$\text{นน. น้ำ+ถัง} = 22.20 \text{ Kg. เพราะฉะนั้นนน. น้ำ} = 20.95 \text{ Kg.}$$

$$\text{นน. หิน+ถัง} = 34.30 \text{ Kg. น้ำหนักหิน} = 33.05 \text{ Kg.}$$

$$\text{นน. ทราย+ถัง} = 35.25 \text{ g. น้ำหนักทราย} = 34 \text{ Kg.}$$

$$\text{ที่ อุณหภูมิ } 33.5 \text{ องศาเซลเซียส หน่วยน้ำหนักน้ำ} = 994.58 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{เพราะฉะนั้นค่าแฟกเตอร์ของภาชนะ} = \frac{994.58}{20.95} = 47.474$$

$$\text{หน่วย นน. หิน} = 33.05 \times 47.474 = 1569.015 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{หน่วย นน. ทราย} = 34 \times 47.474 = 1614.11 \text{ Kg./m}^3$$

1. กำหนดค่าสูบตัว 8-10 ซม.
2. กำหนดขนาดโตสุดของหิน 10 ซม.
3. จากตาราง ปริมาณน้ำ 225 ลิตร/ม³
4. จากตาราง W/C เมื่อกำลังอัดประลัย 150 ได้ค่า 0.8
5. ปริมาณซีเมนต์ = $225/0.8 = 281.25$ กก.
6. ปริมาณวัสดุผสมหยาบ เมื่อ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย = 2.60 และขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบ 10 มม. ได้ปริมาตรวัสดุผสมหยาบสภาพแห้งและอัดแน่น = $0.48 \text{ ม}^3/\text{ม}^3$ ของคอนกรีต
หน่วยน้ำหนักของหิน = $1,543.65 \text{ กก./ม}^3$
เพราะฉะนั้นน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบสภาพแห้งและอัดแน่น = $0.48 \times 1,543.65 = 740.95$ กก.
7. หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด
ปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุผสม
ปริมาตรน้ำ = $225/1000 = 0.225 \text{ ม}^3$
ปริมาตรซีเมนต์ = $281.25/3.33 \times 1000 = 0.084 \text{ ม}^3$
ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ = $740.95/2.675 \times 1000 = 0.277 \text{ ม}^3$
ปริมาตรของอากาศ = $0.03 \times 1 = 0.03 \text{ ม}^3$
ปริมาตรรวมยกเว้นทราย = 0.6165 ม^3
ปริมาตรทราย = $1 - 0.6165 = 0.3835 \text{ ม}^3$
น้ำหนักทรายแห้ง = $0.3835 \times 2.445 \times 1000 = 937.66$ กก.
8. ปรับความชื้น
นน. วัสดุผสมหยาบ (เปียก) = $740.95 (1.02) = 755.77$ กก.
นน. วัสดุผสมละเอียด (เปียก) = $937.66 (1.04) = 975.16$ กก.
น้ำที่ผิวของวัสดุผสมหยาบ = $2 - 0.384 = 1.616$ %
น้ำที่ผิวของวัสดุผสมละเอียด = $4 - 2.167 = 1.833$ %
ปริมาณน้ำที่ต้องใช้จริง = $225 - 740.95 (0.016) - 937.66 (0.018)$
= 196.27 กก.

ฉะนั้น คอนกรีต 1 ม³ ต้องใช้

น้ำ	196	กก.
ซีเมนต์	281	กก.
วัสดุผสมหยาบ (เปลือก)	756	กก.
วัสดุผสมละเอียด (เปลือก)	<u>975</u>	กก.
รวมน้ำหนักทั้งหมด	<u>2208</u>	กก.