

การประเมินกำลังคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ESTIMATING STRENGTH OF CONCRETE BY USING ULTRASONIC PULSE VELOCITY



โดย
นายปลุณ สนิทมัจโร
นายเอกพงษ์ ชินารักษ์

111
114-111
2543

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 42416
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ศ. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESTIMATING STRENGTH OF CONCRETE BY USING ULTRASONIC PULSE VELOCITY



MR.PRIN SNITMACHARO
MR.EKAPHONG CHINARAK

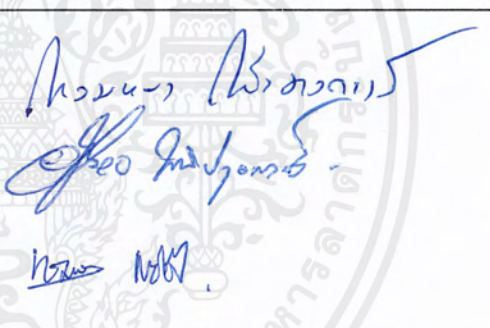
A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG

2000

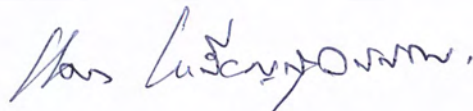
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อ โครงการพิเศษ	การประเมินกำลังคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิค		
นักศึกษา	นายปฤณ สนิทมัจโร	รหัสประจำตัว	40010453
	นายเอกพงษ์ ชินารักษ์	รหัสประจำตัว	40011028
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ แหลมทอง เหล่าคงถาวร		

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
อาจารย์แหลมทอง	เหล่าคงถาวร	
ผศ.อำนาจ	พานิชกุลพงศ์	
อาจารย์อุษะ	ศิริแก้ว	
อาจารย์ทรงกลด	แซ่ฮึ้ง	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.แดง เจริญสุวรรณ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 2 เดือน เมษายน พ.ศ.2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ โครงการพิเศษ	การประเมินกำลังคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก ESTIMATING STRENGTH OF CONCRETE BY USING ULTRASONIC PULSE VELOCITY
นักศึกษา	นายปฤณ สนิทมัจโร นายเอกพงษ์ ชินารักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์แหลมทอง เหล่าคงถาวร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2543

บทคัดย่อ

การประเมินกำลังคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังคอนกรีตที่ได้จากการประเมินกับกำลังที่แท้จริงของคอนกรีต

โครงการพิเศษนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการประเมินกำลังคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก โดยทำการทดสอบจากตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM : C 192 โดยออกแบบกำลังต่างๆ กันคือ 200, 250, 300, 350, 400, 450 และ 500 ksc อย่างละ 30 ตัวอย่าง ทำการบ่ม 28 วัน ซึ่งการทดสอบหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่าน ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM : C 597-83 และการทดสอบกำลังคอนกรีตทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM : C 39

ผลการทดสอบสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคอนกรีต(ksc)กับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวอย่างคอนกรีต(km/s) โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย 52.16 ksc ได้ดังสมการ $\text{Log}Y = -2.5355 + 7.6139 \text{log}V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title : ESTIMATING STRENGTH OF CONCRETE BY USING ULTRASONIC PULSE VELOCITY
Name : MR.PRIN SNITMACHARO
: MR.EKAPHONG CHINARAK
Field : CONSTRUCTION ENGINEERING
Department : CIVIL ENGINEERING
Faculty : ENGINEERING
Advisor : MR.LEAMTHONG LAKONGTHAWORN

ABSTRACT

Before using Ultrasonic pulse velocity to evaluate strength of concrete for accurate results, it is necessary to make a comparison between estimated and actual strength of concrete.

The main purpose of this special project is to estimate strength of concrete by Ultrasonic pulse velocity. The 210 cylindrical concrete specimens, as ASTM : C 192, were casted for testing and concrete strengths were varies that were 200, 250, 300, 350, 400, 450 and 500 ksc , 30 specimens for each strength. Then the specimens were tested by Ultrasonic pulse velocity, as ASTM : C 597-83, standard compressive test method, as ASTM : 39, at the age of 28 days respectively.

Finally, the estimative equation for compressive strength of concrete were derived from the testing results. Estimated strength of concrete (ksc) by Ultrasonic pule velocity (km/s) which has standard deviation of 52.16 ksc is $\text{Log}Y = -2.5355+7.6139\text{log}V$.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์แหลมทอง เหล่าคงถาวร สำหรับหัวข้อโครงการพิเศษ คำชี้แนะ และโอกาสในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์อุบะ สิริแก้ว สำหรับคำชี้แนะและความเอื้อเฟื้อทุกประการ และขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลืออันดีในการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสำหรับอุปสรรคทุกประการ อันเป็นผลให้โครงการพิเศษนี้ เสร็จสมบูรณ์ ด้วยความโล่งใจของผู้มีพระคุณหลายคนที่อยู่เบื้องหลัง

นายปฤถะ สนิทมาจโร

นายเอกพงษ์ ชินารักษ์

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอวมุติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ญ
	สารบัญรูป	ฎ
1	บทนำ	1
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
	1.4. ขอบเขตของการศึกษา	3
	1.5. ขั้นตอนการศึกษา	2
2	วรรณกรรมปริทัศน์	4
	2.1. กล่าวนำ	4
	2.2. คลื่นอัลตราโซนิก	4
	2.2.1. นิยามของคลื่นอัลตราโซนิก	4
	2.2.2. คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก	4
	2.2.3. หลักการของคลื่นอัลตราโซนิก	6
	2.2.4. การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิก	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
3.1.	แสดงผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสด 1 m ³	17
5.1.	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณซีเมนต์และทรายที่เปลี่ยนแปลงเมื่อกำลังของคอนกรีตที่ออกแบบเพิ่มขึ้น	30
ผ.ข.1.	แสดงผลการทดสอบและผลการประเมินกำลังคอนกรีตด้วยวิธีต่างๆ	ผข1
ผ.ข.2.	แสดงผลการทดสอบหาความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตจากการสุ่มจำนวน 30 ตัวอย่าง	ผข16

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
1.1.	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังคอนกรีต	2
2.1.	แสดงกราฟเปรียบเทียบความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นเสียงกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2.	แสดงหลักการทำงานของเครื่องมือพันดิท	8
2.3.	แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์	12
ผ.ก.1.	แสดงการผสมคอนกรีต	ผก2
ผ.ก.2.	แสดงการบ่มตัวอย่างคอนกรีต 28 วัน	ผก2
ผ.ก.3.	แสดงตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด 210 ตัวอย่าง	ผก3
ผ.ก.4.	แสดงตัวอย่างคอนกรีต	ผก3
ผ.ก.5.	แสดงการปรับแก้เครื่องมือพันดิท	ผก4
ผ.ก.6.	แสดงการทดสอบหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวอย่างคอนกรีต	ผก4
ผ.ก.7.	แสดงการทดสอบโดยเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์	ผก5
ผ.ก.8.	แสดงการทดสอบหาลำดับของคอนกรีต โดยเครื่องมือทดสอบกำลังอัด	ผก6
ผ.ก.9.	แสดงการอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต	ผก6
ผ.ก.10.	แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่วิบัติอย่างสมบูรณ์	ผก7
ผ.ก.11.	แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่วิบัติอย่างไม่สมบูรณ์	ผก7

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอ努มติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ญ
	สารบัญรูป	ฎ
1	บทนำ	1
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
	1.4. ขอบเขตของการศึกษา	3
	1.5. ขั้นตอนการศึกษา	2
2	วรรณกรรมปริทัศน์	4
	2.1. กล่าวนำ	4
	2.2. คลื่นอัลตราโซนิค	4
	2.2.1. นิยามของคลื่นอัลตราโซนิค	4
	2.2.2. คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิค	4
	2.2.3. หลักการของคลื่นอัลตราโซนิค	6
	2.2.4. การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิค	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	2.3. เครื่องมือพันคิท	7
	2.3.1. เครื่องมือพันคิท	7
	2.3.2. ส่วนประกอบหลัก	7
	2.3.3. วิธีการใช้งานในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาค่าลึงรับแรงอัด	8
	2.3.4. ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วคลื่นเสียงในคอนกรีต	9
	2.3.5. ข้อควรระวังในการใช้งาน	9
	2.3.6. คุณสมบัติพิเศษของเครื่องมือพันคิท	11
	2.4. เครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	11
	2.4.1. เครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	11
	2.4.2. หลักการของเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	12
	2.4.3. วิธีการใช้งานของเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	12
	2.2.4. ข้อควรระวังในการใช้งานเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	13
	2.4.5. คุณสมบัติพิเศษของเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	14
3	วิธีดำเนินการศึกษา	15
	3.1. กล่าวนำ	15
	3.2. การศึกษาเพื่อประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือพันคิท และเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์	15
	3.3. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต	16
	3.4. การออกแบบตัวอย่างคอนกรีต	17
4	ผลการศึกษา	18
	4.1. ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือพันคิท	18
	4.2. ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือ ชมิคท์แฮมเมอร์	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	4.3. ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือพันดิท และโดยเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์ร่วมกัน	21
5	วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา	29
	5.1. การวิเคราะห์การประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือพันดิท	29
	5.2. การวิเคราะห์ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์	31
	5.3. การวิเคราะห์ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือพันดิทและโดยเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์ร่วมกัน	31
	5.4. สรุปผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือพันดิท	31
	5.5. สรุปผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีต โดยเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์	32
	5.6. สรุปผลการศึกษาทั้งหมด	32
	5.7. ข้อเสนอแนะในการนำผลการทดสอบไปใช้งาน	33
	รายการอ้างอิง	34
	บรรณานุกรม	35
	ภาคผนวก ก. : รูปขั้นตอนการดำเนินการ	ผก1
	ภาคผนวก ข. : ผลการทดสอบ	ผข1
	ภาคผนวก ค. : การวิเคราะห์ทางสถิติ	ผค1
	ภาคผนวก ง. : การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติ	ผง1
	ภาคผนวก จ. : คู่มือการใช้งานเครื่องมือพันดิทในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของตัวอย่างคอนกรีต	ผจ1

บทที่ 1

บทนำ

1.1. กล่าวนำ

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีสองวิธีคือ การทดสอบแบบไม่ทำลาย และการทดสอบแบบทำลาย ซึ่งการทดสอบแบบทำลายนั้นจะทำให้ทราบค่ากำลังรับแรงอัดได้โดยตรง ซึ่งย่อมถูกต้องแม่นยำกว่าการทดสอบแบบไม่ทำลาย แต่การทดสอบแบบทำลายนั้นมีข้อเสียคือไม่สามารถใช้ทดสอบที่หน้างานก่อสร้างได้ และตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกทดสอบก็ไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิม ซึ่งในกรณีนี้การทดสอบแบบไม่ทำลายจึงมีความจำเป็น ถึงแม้ว่าจะไม่ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำเท่ากับการทดสอบแบบทำลาย แต่สำหรับผู้ที่ใช้เครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายจนเชี่ยวชาญแล้วก็สามารถหาผลการทดสอบที่น่าพอใจได้

1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

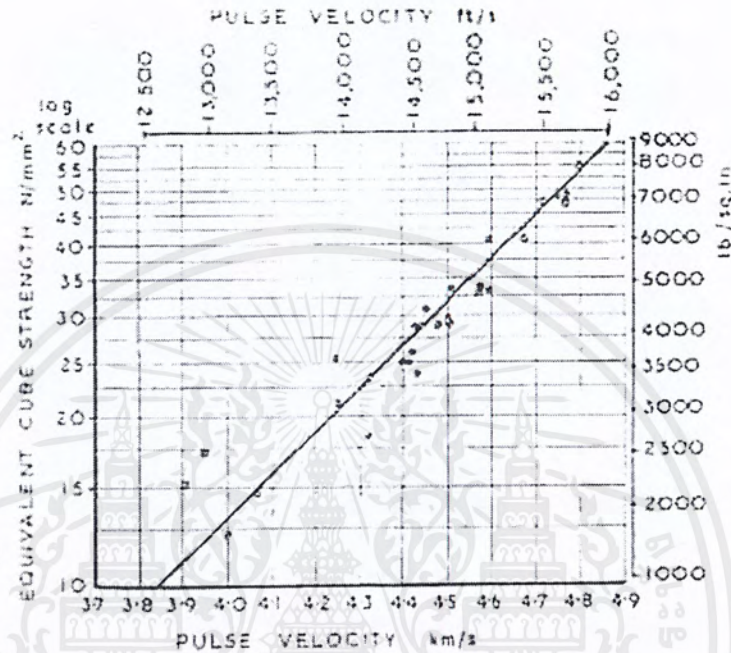
การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีวัดความเร็วของคลื่นเสียงอัลตราโซนิคผ่านเนื้อคอนกรีต สามารถใช้ทดสอบได้ทั้งตัวอย่างคอนกรีตและอาคาร โครงสร้างคอนกรีต โดยสามารถประมาณกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และยังสามารถวัดความลึกของรอยแตกร้าวในคอนกรีตและประมาณการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุต่อเวลาที่เปลี่ยนไปได้

ซึ่งการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีนี้กระทำได้โดยการหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านเนื้อคอนกรีตจากการทดสอบโดยเครื่องมือพินดิท แล้วนำความเร็วคลื่นที่หาได้ไปเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ก็จะสามารถทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้

แต่จากคู่มือของเครื่องมือพินดิทมีข้อเสนอแนะว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 1.1. เป็นกราฟที่ใช้ในกรณีทั่วไปเท่านั้น ถ้าจะให้ผลที่เชื่อถือได้มากกว่าแล้ว ควรทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะแวดล้อมและปัจจัยใกล้เคียงกับสถานที่ก่อสร้าง โดยการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก และทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแล้วสร้างกราฟไว้ใช้งานในกรณีอื่นๆ



รูปที่ 1.1. กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต(คู่มือเครื่องมือพื้นดินที่6)

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะแวดล้อมและปัจจัยใกล้เคียงกับสถานที่ก่อสร้าง เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการใช้งานจริง

1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ประเมินกำลังของคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากการทดสอบกับตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะแวดล้อมและปัจจัยใกล้เคียงกับสถานที่ก่อสร้าง เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4. ขอบเขตของการศึกษา

เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่วิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีตเช่น ขนาดโตสุดของหิน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อายุคอนกรีต กำลังคอนกรีต เป็นต้น แต่โครงการพิเศษนี้มุ่งที่จะศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังคอนกรีตเท่านั้น เนื่องจากในการนำเครื่องมือทดสอบชนิดนี้ไปใช้งาน ในบางครั้งไม่อาจที่จะทราบถึงข้อมูลต่างๆของคอนกรีตได้

1.5. ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ศึกษาเกี่ยวกับการทำงานเครื่องมือพันติทในการทดสอบเพื่อหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
2. ทำการออกแบบขั้นตอนการทดสอบ
3. ทำการทดสอบตามที่ออกแบบ
4. นำผลจากการทดสอบนำไปวิเคราะห์ตามหลักการของสถิติ
5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1. กล่าวนำ

ในการดำเนินการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิกจำเป็นต้องทราบนิยามและหลักการของคลื่นอัลตราโซนิก วิธีการใช้งานและหลักการทำงานของเครื่องมือพันดิท เพื่อช่วยในการออกแบบการทดสอบ ตลอดจนศึกษาถึงเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง เพื่อผลการประเมินกำลังที่ถูกต้องมากขึ้น

ซึ่งในที่นี้จะศึกษาเครื่องมือชนิดที่แสมเมอร์ควบ์ไปคัว เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับจุดทดสอบและสามารถทำการทดสอบควบ์ไปเครื่องมือพันดิทได้

2.2. คลื่นอัลตราโซนิก

2.2.1. นิยามของคลื่นอัลตราโซนิก

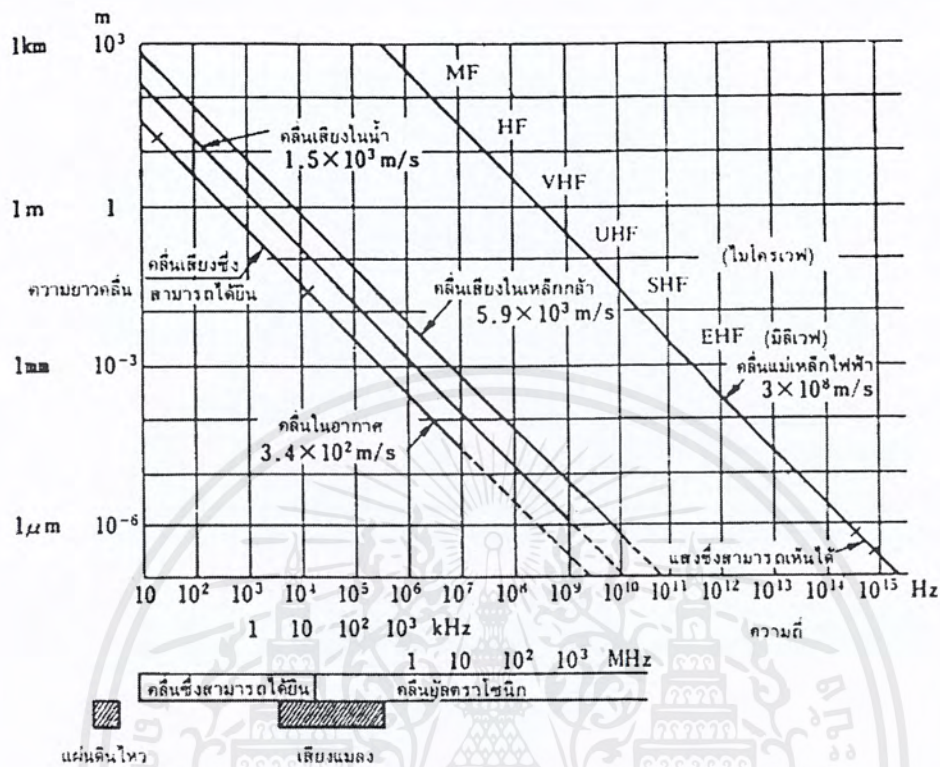
นิยามของ คลื่นอัลตราโซนิก คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz

2.3.2. คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียง สามารถเดินทางผ่านของแข็ง ได้ดีกว่าของเหลวและอากาศ ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในอากาศเท่ากับ 340 m/s ในน้ำ 1500 m/s และเหล็กกล้า 5,900 m/s และสามารถเปรียบเทียบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

1. เมื่อเทียบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปที่ 2.1. คลื่นเสียงมีความเร็วช้ากว่ามากในอัตราส่วน 1:100,000
2. ที่ความถี่เดียวกัน คลื่นเสียงจะมีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1. แสดงกราฟเปรียบเทียบความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นเสียงกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Fujii ,1995)

3. การที่คลื่นเสียงจะส่งผ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้น จำเป็นจะต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่าน แต่สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วไม่จำเป็น ถึงแม้ว่าในสูญญากาศคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ยังส่งผ่านไปได้
4. ทั้งคลื่นเสียงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถส่งผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศได้ ยกเว้น คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 1,000 kHz ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นอัลตราโซนิกจะไม่สามารถส่งผ่านตัวกลางอากาศได้
5. สำหรับในน้ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่ต่ำมากๆ(ต่ำกว่า 30 kHz)จึงจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ แต่ว่าสำหรับคลื่นเสียงแล้ว สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้โดยง่าย
6. สำหรับโลหะ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมากๆ หรือกัมมันตรังสีเท่านั้นจึงจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ แต่ว่าสำหรับคลื่นเสียงแล้ว สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโลหะไปได้ดีกว่าและไกลกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย
7. ในกรณีของคลื่นเสียงจะไม่ก่อให้เกิดอันตราย เหมือนอย่างเช่นคลื่นกัมมันตภาพรังสี พวกรังสีเอกซ์ พลังงานอันเกิดจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งที่มีชีวิตได้นั้น จะต้องมีเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเกินกว่า 0.1 watt/cm² แต่ว่าพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ที่ใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายหรือ ใช้ในทางการแพทย์นั้นจะมีค่าต่ำกว่า 0.1mwatt/cm² ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องห่วงว่าคลื่นอัลตราโซนิก จะมีผลร้ายต่อร่างกายอย่างไร

2.2.3. หลักการของคลื่นอัลตราโซนิก

ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ที่เคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางที่เป็นของแข็ง จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุนั้นๆ ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการที่ (2.1) (American Society for Testing and Materails [ASTM],1991)

$$V^2 = (K) \frac{E}{D} \quad (2.1)$$

ซึ่ง V = ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก
 K = ค่าคงที่
 E = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของแข็ง
 และ D = ความหนาแน่นของของแข็ง

ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะไม่ขึ้นกับความถี่ของคลื่น

เนื่องจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นก็มีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วย ดังนั้นการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในของแข็งจึงสามารถใช้เป็นตัวชี้ถึงกำลังของของแข็งในทางอ้อม วัสดุที่สามารถใช้คลื่นอัลตราโซนิกทดสอบ ได้แก่ คอนกรีต ท่อนไม้

2.3.4. การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิก

ในปัจจุบัน ได้มีการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิก ในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ อย่างมากมาย เช่น การล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก(สำหรับชิ้นส่วนนาฬิกา, แวนตา, เครื่องเพชรพลอย และอาหาร ฯลฯ)การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการผลิต(วัสดุที่แข็งแต่เปราะ เช่น พลาสติก เป็นต้น) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก ช่วยให้เกิดในการสันสะเทือน(เช่น ในการทำให้เกรนของโลหะเล็กลง, การไล่ฟองอากาศ เป็นต้น)ตัวอย่างการใช้งานของคลื่นอัลตราโซนิก ที่ยกตัวอย่างมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดนี้ อาศัยพลังงานที่เกิดจากคลื่นมาใช้ประโยชน์โดยตรงเหมือนกับ การนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในลักษณะทางไฟฟ้ากำลัง

นอกจากการนำพลังงานที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิก มาใช้ให้เป็นประโยชน์โดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการอีกอย่างหนึ่งซึ่งใช้คลื่นอัลตราโซนิก เป็นตัวกลางในการตรวจหาข้อมูลของเนื้อวัตถุในตัวกลางคลื่นที่ผ่านไป ซึ่งเปรียบเหมือนการใช้ประโยชน์จากไฟฟ้าในลักษณะของไฟฟ้าสื่อสารในประเทศญี่ปุ่น ได้มีการนำเอาคลื่นอัลตราโซนิก มาใช้ประโยชน์ในทางทหารตั้งแต่ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยทหารเรือ ซึ่งจะใช้เครื่องมือนี้ในการค้นหาตำแหน่งของเรือดำน้ำของศัตรู(ในลักษณะเดียวกับการค้นหาตำแหน่งของเครื่องบิน โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเรดาร์) ตัวอย่างของการใช้คลื่นอัลตราโซนิก ในการหาตำแหน่งของเรือดำน้ำ หรือการหารอยร้าวในเนื้อวัตถุอาศัยหลักการเดียวกันหมด คือ การสะท้อนกลับของคลื่น สำหรับเครื่องมือสำหรับตรวจจับวัตถุซึ่งอยู่ใต้น้ำ เช่น เครื่องตรวจจับเรือใต้น้ำ เครื่องมือตรวจหาฝูงปลา เครื่องวัดความลึกของท้องทะเล และเครื่องตรวจชั้นดินใต้สมุทร เหล่านี้จะถูกเรียกรวมๆ กันว่า เครื่องโซนาร์

2.3. เครื่องมือพันดิท

2.3.1. เครื่องมือพันดิท

เครื่องมือพันดิทมีชื่อเต็มว่า โปรเทเบิล อัลตราโซนิก นอนเดสตรักทีฟ ดิจิตอล อินดิเคติง เทสเตอร์ (Portable Ultrasonic Non – destructive Digital Indicating Testor) ชื่อย่อคือ พันดิท (PUNDIT) ผลิตโดยบริษัท ซี.เอ็น.เอส อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ประเทศอังกฤษ

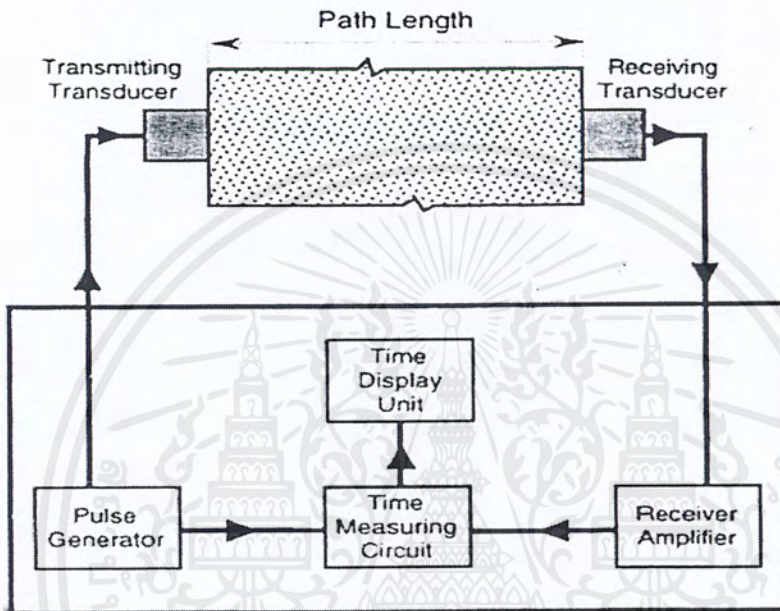
2.3.2. ส่วนประกอบหลัก

เครื่องมือพันดิทมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนที่ในการทดสอบกำลังอัดคือ

1. ตัวเครื่องมือพันดิท เป็นเครื่องมือ อิเล็กทรอนิกส์แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิตอล 3 หลักความละเอียดสูงสุด 0.1 μ s
2. โพรบรับ-ส่งสัญญาณ 2 โพรบ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 mm สูงประมาณ 35 mm ซึ่งจะเชื่อมต่อกับตัวเครื่องมือด้วยสายรับ-ส่งสัญญาณยาวเส้นละ 4 ม. ทั้งสองโพรบนี้สามารถใช้สลับกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แท่งปรับแก้ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 mm ยาวประมาณ 200 mm



รูปที่ 2.2. แสดงหลักการทำงานของเครื่องมือพันดิท (ASTM, 1991)

2.3.3. วิธีการใช้งาน ในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาค่ารับแรงอัด

นำโพรบรับส่งสัญญาณทั้ง 2 โพรบสัมผัสกับผิวของคอนกรีตในด้านตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.2. เปิดเครื่องมือเพื่อเริ่มการทำงาน เมื่อเริ่มการทำงานเครื่องมือพันดิทจะส่งคลื่นเสียงความถี่ 54 kHz ทางด้านโพรบส่งสัญญาณ ผ่านเนื้อคอนกรีต โดยจะใช้เวลาเดินทางค่าหนึ่ง และเข้าสู่โพรบรับสัญญาณอีกด้านหนึ่ง แล้วตัวเครื่องมือพันดิทจะแสดงผลเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านเนื้อคอนกรีตออกมาในระบบดิจิทัลเป็นตัวเลข 3 หลัก ความละเอียดสูงสุด 0.1 μ s แล้ววัดระยะทางที่คลื่นวิ่งผ่านคอนกรีต เมื่อทราบเวลาและระยะทางแล้ว จะสามารถหาความเร็วของคลื่นเสียงที่เดินทางผ่านเนื้อคอนกรีตได้ นำความเร็วคลื่นที่หาได้ไปเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตกับค่ารับแรงอัดของคอนกรีต ก็จะสามารถทราบค่ารับแรงอัดของคอนกรีตได้

2.3.4. ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วคลื่นเสียงในคอนกรีต

ความเร็วของคลื่นเสียงในคอนกรีตจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

ก. อายุคอนกรีต

ถ้าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 เดือนขึ้นไป อัตราการเพิ่มความเร็วของเสียงน้อยลง เมื่อเทียบกับความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น และถ้าความแข็งแรงไม่เพิ่มขึ้น ความเร็วเสียงก็จะลดน้อยลง

ข. ความชื้นของคอนกรีต

เมื่อแห้งความเร็วเสียงจะลดน้อยลงเช่น อัตราส่วนของน้ำที่มีเมื่อลดลง 1% จะทำให้ความเร็วเสียงลดลง 50 – 90 cm/s

ค. รอยแตกร้าวหรือช่องว่างภายในคอนกรีต

ถ้าบริเวณระหว่างโพรบรับและโพรบส่งมีรอยแตกร้าวหรือมีช่องว่าง ความเร็วเสียงก็จะลดน้อยลง เนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศได้ช้ากว่าในคอนกรีต

2.3.5. ข้อควรระวังในการใช้งาน

ก. ระยะห่างสิ้นสุดของการวัด

ระยะห่างสิ้นสุดของการวัดไม่ควรน้อยกว่า 10 cm เมื่อมวลรวมหยาบมีขนาดโตสุดไม่เกิน 20 cm และไม่ควรน้อยกว่า 15 cm เมื่อมวลรวมหยาบมีขนาดโตสุดไม่เกิน 40 m ทั้งนี้เพื่อลดอิทธิพลของมวลรวมหยาบ

ข. ระยะแคบสุดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่จะใช้ทดสอบ

ความเร็วของคลื่นเสียงจะไม่แปรไปตามรูปร่างของแท่งตัวอย่างคอนกรีต แต่ทั้งนี้ผิวของแท่งตัวอย่างต้องเรียบและเหมาะสมต่อการวางโพรบรับ-ส่งสัญญาณ และระยะสิ้นสุดของแท่ง-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบในทิศตั้งฉากกับการวัด ต้องไม่น้อยกว่าความยาวของคลื่นของคลื่นเสียง ในกรณีของโพรบรับ-ส่งสัญญาณที่ใช้ในงานทดสอบคอนกรีตซึ่งมีความถี่ในช่วง 50 – 54 kHz ระยะที่วางนี้ไม่ควรน้อยกว่า 80 cm มิฉะนั้นแล้วความเร็วของคลื่นเสียงที่วัดได้ อาจน้อยลงและข้อมูลที่ได้อาจไม่แม่นยำแน่นอนเท่าที่ควร

ค. ตำแหน่งและจำนวนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ตำแหน่งและจำนวนของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีผลให้ความเร็วคลื่นที่วัดได้อาจมากขึ้นจริงได้เนื่องจากเหล็กมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าคอนกรีต จึงควรหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นและตำแหน่งที่ขนานกับเหล็กเสริมในคอนกรีต

ง. เปอร์เซนต์ความชื้นในคอนกรีต

เปอร์เซนต์ของความชื้นในโครงสร้างก็มีอิทธิพลต่อความเร็วของคลื่นเสียงอยู่บ้าง โดยทั่วไปคลื่นเสียงจะวิ่งผ่านคอนกรีตที่มีความชื้นสูงด้วยความเร็วมากกว่าวิ่งผ่านคอนกรีตที่มีความชื้นต่ำ ประมาณ 2 % โดยที่คอนกรีตดังกล่าวมีส่วนผสมและคุณภาพอย่างเดียวกัน ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้จะมากขึ้นในกรณีของคอนกรีตที่มีความแข็งแรงต่ำๆ และลดน้อยลงในกรณีของคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงๆ ดังนั้นผู้ทำการทดสอบจึงควรรักษาปัจจัยด้านนี้ ให้คงที่ในการทดสอบเท่าที่จะทำได้ และถ้าเป็นไปได้ควรทำการทดสอบในสภาพที่ชื้นมากกว่าแห้ง เพราะอย่างน้อยก็เป็นการช่วยให้ผู้ทำการก่อสร้างเอาใจใส่ต่อการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น

จ. ผิวสัมผัสของโพรบรับส่งคลื่น

ถ้าผิวสัมผัสของโพรบเป็นรอยนูนหรือรอยบุ๋ม มีฝุ่นหรือเม็ดทรายจะทำให้ความเร็วเสียงลดน้อยลง ดังนั้นจึงควรทาจาระบี บริเวณผิวสัมผัสเพื่อป้องกันการลดความเร็วเสียงเนื่องจากผิวสัมผัส

อุณหภูมิของคอนกรีตระหว่าง 5 ถึง 30 เซลเซียส จะไม่มีผลต่อความเร็วคลื่นการให้รวมเงาที่ตำแหน่งของการทดสอบจะช่วยขจัดปัญหาของการใช้เครื่องมือพันดิท ในวันที่ร้อนจัดของบ้านเราได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6. คุณสมบัติพิเศษของเครื่องมือพันดิท

ก. ข้อดีของเครื่องมือพันดิท

1. สามารถเพิ่มจุดตรวจวัดได้ง่าย
2. ไม่จำเป็นต้องซ่อมแซมจุดที่ทำการตรวจวัด
3. สามารถใช้ทดสอบ ณ จุดก่อสร้างได้

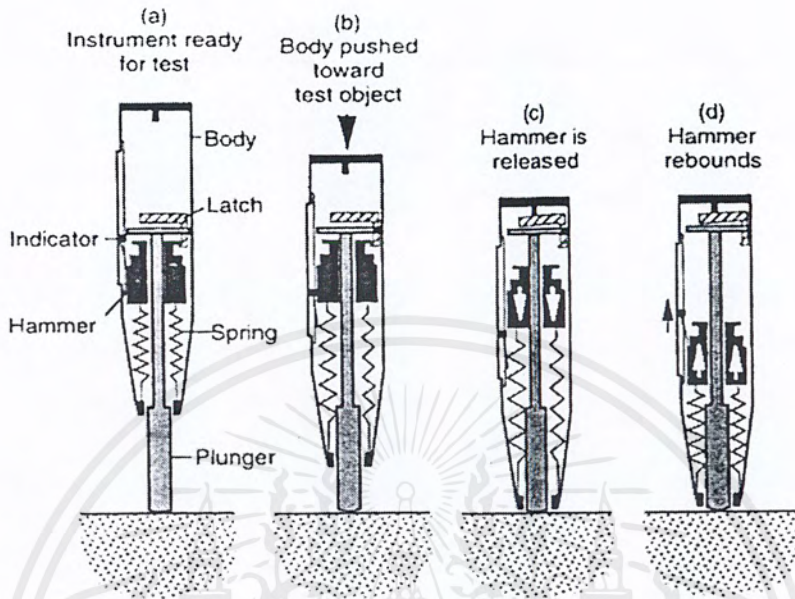
ข. ข้อเสียของเครื่องมือพันดิท

1. ผลที่ได้มีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีการทดสอบแบบทำลาย
2. มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่น

2.4. เครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

2.4.1. เครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

เครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์ เป็นเครื่องมือทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นที่ยิงไปกระทบคอนกรีต ประกอบด้วยค้อนและตัวสปริงรับการสะท้อนของคลื่นเครื่องมือนี้เป็นประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบอาคารที่สร้างเสร็จแล้วและการทดสอบนั้นไม่ทำความเสียหายให้กับส่วนที่เป็นคอนกรีตของอาคารที่ทดสอบแต่ประการใด



รูปที่ 2.3. แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์(Nawy , 1997)

2.4.2. หลักการของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

หลักการของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์สรุปได้จากจากคำกล่าวของEdward G. Nawyว่า “...ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างค่าริบาว์นัมเบอร์กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังของคอนกรีต ค่าริบาว์นัมเบอร์ขึ้นอยู่กับกรณีที่หัวพลังเกอร์กระทบกับผิวคอนกรีต ยิ่งหัวพลังเกอร์ตกลงไปในเนื้อคอนกรีตมากเท่าใด ค่าริบาว์นัมเบอร์ก็จะยิ่งน้อยลงเท่านั้น ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังของคอนกรีตมีอิทธิพลต่อค่าริบาว์นัมเบอร์...”(Nawy , 1997)

2.4.3. วิธีการใช้งานของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

นำเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์กดในแนวตั้งจากบนบริเวณทดสอบ แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าริบาว์นัมเบอร์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ก็จะได้กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4. ข้อควรระวังในการใช้งานเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

ก. อัตราส่วนของน้ำหนักมืออยู่บนค้อนกรีด

แรงกดของค้อนกรีดที่ขึ้นจะลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับค้อนกรีดแห้งเนื่องจากการสะท้อนลดลง

ข. อายุค้อนกรีด

เมื่อเวลาผ่านไปนาน ความแข็งแรงเหมือนกัน แต่ค่าริบาว์นัมเบอร์จะมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องปรับค่าให้ถูกต้อง

ค. ความเรียบมันของค้อนกรีด

ค่าริบาว์นัมเบอร์จะลดน้อยลงเมื่อกดบนค้อนกรีดเนื่องจาก ค้อนกรีดจะทำให้ระนาบที่กดไม่ตั้งฉากกับแนวแกนที่ทำการกด

ง. ความหนาของค้อนกรีด

ถ้าความหนาค้นกว่า 10 cm ค่าริบาว์นัมเบอร์จะลดน้อยลงเร็วมาก ถ้าความหนาเกิน 30 cm จะคงที่

จ. ความแข็งแรงของกำแพง เสา ตามแนวสูง

โดยทั่วไปบริเวณด้านบนจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณตรงกลางและบริเวณล่าง และค่าริบาว์นัมเบอร์ก็จะมีค่าน้อยลงเช่นกัน

ฉ. มุมของค้อนกรีด

ควรกดห่างจากบริเวณที่เป็นมุม 3 – 6 cm ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช. การกดที่เดียวกัน

ไม่ควรกดซ้ำที่เดียวกันเนื่องจากการกดซ้ำที่เดิมอาจทำให้ได้ค่าน้อยลงเพราะการกดแต่ละครั้งจะทำให้คอนกรีตที่กดมีรอยขรุขระ

2.4.5. คุณสมบัติพิเศษของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

ก. ข้อดีของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

1. วิธีการทดสอบทำได้ง่าย
2. เพิ่มจุดทดสอบได้ง่าย
3. ไม่ต้องซ่อมแซมจุดที่ทดสอบ

ข. ข้อเสียของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

1. ผลที่ได้มีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีการทดสอบแบบทำลาย
2. ค่ารบกวนน้ำหนักเบอร์ดจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขชนิดต่างๆ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

3.1. กล่าวนำ

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษาต้องการสร้างกราฟเพื่อประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและเครื่องมือชmidtแฮมเมอร์ ซึ่งกราฟที่น่าเชื่อถือนั้นต้องเกิดมาจากผลการทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งในการทดสอบนี้จะใช้ตามมาตรฐานASTM

3.2. การศึกษาเพื่อประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและเครื่องมือชmidtแฮมเมอร์

ก. อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องมือพันดิท รุ่น พันดิท6 หมายเลขประจำเครื่อง 064628
2. เครื่องมือชmidtแฮมเมอร์
3. เครื่องทดสอบกำลังอัด
4. ตู้อบ

ข. ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

1. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI (211.1-77)
2. ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต
3. ทำการทดสอบหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านตัวอย่างคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทตามมาตรฐาน ASTM: C 597 - 83
4. ทำการทดสอบหาค่าริบาว์นัมเบอร์โดยเครื่องมือชmidtแฮมเมอร์โดยกดบนผิวตัวอย่างคอนกรีตด้านเรียบจำนวน 5 ครั้งห่างกันรัศมี 1 นิ้ว แล้วหาค่ากลาง
5. ทำการทดสอบหาลำดับอัดของตัวอย่างคอนกรีตโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM:C 39

6. สุ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการทดสอบกำลังอัดแล้ว จำนวน 30 ตัวอย่าง นำไปทดสอบหาความชื้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ก. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คราซ้าง
2. ทราย
3. หิน
4. น้ำประปา
5. โม่ผสมคอนกรีต
6. แบบหล่อมาตรฐาน ASTM: C 192 เป็นแบบหล่อรูปร่างทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm
7. น้ำมันทาแบบ
8. เหล็กกระทงปูปลายกลมมน

ข. ขั้นตอนการเตรียมอย่างคอนกรีต

1. ทำความสะอาดแบบหล่อไม่ให้มีฝุ่นหรือสิ่งปนเปื้อนเกาะติดอยู่ แล้วทาน้ำมันหล่อลื่นที่ผิวด้านในให้ทั่ว
2. ตรวจสอบสกรูรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ แล้วประกอบแบบและขันสกรูให้แน่น ป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยก ล้างโม่ให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง
3. เตรียมส่วนผสมของคอนกรีตตามที่ออกแบบไว้
4. ใส่ซีเมนต์และทรายลงในโม่ผสมทำการโม่ให้เข้ากันก่อน แล้วค่อยๆ ใส่น้ำและหินตามลำดับ โม่จนคอนกรีตสดเหนียวและมีความสามารถเทได้
5. นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ เทใส่ลงในแบบหล่อ โดยเทแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นละเท่าๆกันแต่ละชั้น ใช้เหล็กกระทงปูให้ทั่ว 25 ครั้ง เสร็จแล้วปาดผิวบนให้เรียบ
6. ทิ้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้เฉยๆประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำคอนกรีตที่ถอดออกจากแบบแล้วไปบ่มโดยแช่ในบ่อบ่ม 28 วัน แล้วจึงนำชิ้นจากบ่อบ่มเพื่อนำไปทดสอบต่อไป

3.4. การออกแบบตัวอย่างคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานACI(211.1-77) โดยจะออกแบบให้มีกำลังต่างๆกัน เนื่องจากการทดสอบนี้ต้องการเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่กำลังอัดต่างๆ กับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตและค่าริบาว์นัมเบอร์ของซมิคท์แฮมเมอร์ ซึ่งในที่นี้จะทดสอบกำลังของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการบ่ม28วัน โดยจะออกแบบกำลังของคอนกรีตซึ่งมีขนาดหินโตสุด 20mm ที่ 200, 250, 300, 350, 400, 450 และ500kg/cm² ตามลำดับและในแต่ละกำลังจะผสมจำนวน30 ตัวอย่างรวมเป็น210ตัวอย่าง ซึ่งสามารถสรุปผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตได้ดังตารางที่ 3.1.

ตารางที่ 3.1. แสดงผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีตสด 1 m³.

กำลังที่ออกแบบ (kg/cm ²)	ปริมาณ ซีเมนต์ (kg)	ปริมาณน้ำ (kg)	ปริมาณหิน (kg)	ปริมาณทราย (kg)	รวม (kg)
200	286	147	1012	921	2366
250	323	149	1012	882	2366
300	364	151	1012	839	2366
350	417	153	1012	784	2365
400	465	155	1012	733	2365
450	526	158	1012	669	2364
500	541	158	1012	655	2365

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1. ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันติ

ก. ความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต

จากการสุ่มเก็บข้อมูลจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบจำนวน 30 ตัวอย่างพบว่าความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 4.06– 6.08 % (ภาคผนวก ง.) เมื่อนำไปคำนวณทางสถิติพบว่า มีค่าเฉลี่ยความชื้นเท่ากับ 5.102 % มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.436 % และจากการคำนวณที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของตัวอย่างทั้งหมด พบว่า มีค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.95 – 5.26 % (หมายความว่าถ้ามีการสุ่มตัวอย่างคอนกรีตภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมาทำการทดสอบหาค่าความชื้น 100 ครั้ง ใน 95 ครั้งจะมีค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.95 – 5.26 %) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าอยู่ระหว่าง 0.347 – 0.586 % สรุปว่าค่าความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด 175 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่า ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคที่วิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ถูกผลกระทบจากความชื้นเท่าๆกัน

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบโดยเครื่องมือพันติแล้วนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ (ภาคผนวก ง.) พบว่า ความเร็วที่คลื่นอัลตราโซนิควิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบโดยตรงอยู่ในรูปเส้นโค้งสมการที่เลขยกกำลัง เนื่องจากเป็นสมการที่ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตได้เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1. และสามารถเขียนสมการที่ถดถอยเพื่อใช้ประเมินกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วันแบบจุด เมื่อทราบค่าความเร็วที่คลื่นอัลตราโซนิควิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีตได้ดังสมการที่(4.1)

$$\log Y = -2.53551 + 7.6139 \log V \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.801$$

$$S = 52.158$$

ซึ่ง	V	=	ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก(km/s)
	Y	=	กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ28วัน(kg/cm ²)
	R^2	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
และ	S	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(kg/cm ²)

หมายเหตุ ค่าของ V มีค่าอยู่ระหว่าง 4.15 – 4.85 km/s การประเมินค่ากำลังอัดจึงจะมีความถูกต้อง

ซึ่งค่า $R^2 = 0.798$ หมายความว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ที่วัดจากเครื่องมือพื้นดินสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตได้ 79.8 %

และสามารถเขียนสมการที่ความเชื่อมั่น 95% เพื่อใช้ประเมินกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วันแบบช่วง เมื่อทราบค่าความเร็วที่คลื่นอัลตราโซนิกวิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีตได้ดังสมการที่(4.2)

$$\log Y = -2.53551 + 7.61386 \log V \pm 1.96 \times 0.06197 \sqrt{\left\{ \left(1 + \frac{1}{175} + \frac{(\log V - 0.6622)^2}{0.04614} \right) \right\}} \quad (4.2)$$

ซึ่ง	V	=	ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก(km/s)
และ	Y	=	กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ28วัน(kg/cm ²)

ก. การเปรียบเทียบกราฟที่สร้างขึ้นกับกราฟคู่มือเครื่องมือพื้นดิน

จากรูปที่ 4.3 พบว่ากราฟที่สร้างขึ้นจากการประมาณกำลังคอนกรีตแบบจุดกับกราฟคู่มือของเครื่องมือมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เนื่องจากกราฟคู่มือเครื่องมือพื้นดินเป็นการประมาณกำลังคอนกรีตแบบจุดซึ่งมีข้อดีน้อยกว่าการประมาณกำลังคอนกรีตแบบช่วงที่ได้สร้างขึ้นหลายประการ จึงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยืนยันว่าการประเมินกำลังคอนกรีต โดยคลื่นอัลตราโซนิกจำเป็นต้องมีการสร้างกราฟขึ้นมาก่อน จึงจะให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า

4.2. ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีบาว์นัมเบอร์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดได้จากเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์ กับกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมีความสัมพันธ์กันแบบโดยตรง อยู่ในรูปเส้นโค้งสมการที่เลขยกกำลัง แสดงดังรูปที่ 4.3. ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ถดถอยเพื่อประเมินกำลังของคอนกรีตแบบจุดที่อายุ 28 วัน เมื่อทราบค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดได้ดังสมการที่(4.4)

$$\log Y = 1.0532 + 0.9677 \log N \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.628$$

$$S = 63.613$$

ซึ่ง Y = กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (kg/cm^2)
 N = ค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่ได้จากการกดเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์
 R^2 = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 และ S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (kg/cm^2)

ค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์ เป็นค่ากลางที่ได้จากการกดตัวอย่างคอนกรีตด้านผิวเรียบจำนวน 5 ครั้ง และค่ากลางที่ได้ ควรอยู่ระหว่าง 14 - 50 จึงจะให้ผลการประเมินค่ากำลังอัดได้ถูกต้อง

ซึ่ง $R^2 = 0.628$ หมายความว่าค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตได้ 62.8 %

และสามารถเขียนสมการที่ความเชื่อมั่น 95% เพื่อใช้ประเมินกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตแบบช่วงที่อายุ 28 วันเมื่อทราบค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดได้จากเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์ได้ดังสมการที่(4.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\log Y = 1.0532 + 0.9667 \log N \pm 1.96 \times 0.08476 \sqrt{\left(1 + \frac{1}{175} + \frac{(\log N - 1.50383)^2}{2.245096}\right)} \quad (4.4)$$

ซึ่ง N = ค่าริบาวนัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

และ Y = กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (kg/cm^2)

ข. การเปรียบเทียบระหว่างกราฟที่สร้างขึ้นกับกราฟของกลุ่มเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

จากกราฟที่ 4.6. จะพบว่ากราฟของกลุ่มเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์ให้ผลการประเมินกำลังที่ไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากค่ากำลังคอนกรีตที่อ่านได้จากกราฟมักจะต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการประเมินกำลังคอนกรีตแต่เหมาะสมเมื่อนำไปใช้เพื่อประเมินกำลังค่าสุดของคอนกรีต

4.3. ผลการศึกษาการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและโดยเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์ร่วมกัน

จากผลการทดสอบ โดยเครื่องมือพันดิทและเครื่องมือชนิดที่รวมกันแล้วนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ (ภาคผนวก ง) พบว่าสามารถเขียนสมการที่ถดถอยเชิงซ้อนเพื่อใช้ประเมินกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อทราบค่าความเร็วที่คลื่นอัลตราโซนิกวิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีตและค่าริบาวนัมเบอร์ได้ดังสมการที่(4.6)

$$\log Y = -1.82913 + 5.78515 \log V + 0.33563 \log N \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0.8290$$

$$S = 48.6375$$

ซึ่ง Y = กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (kg/cm^2)

V = ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิค (km/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 N &= \text{ค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์} \\
 R^2 &= \text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ} \\
 S &= \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(kg/cm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

ค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์ ควรอยู่ระหว่าง 14 - 50 และค่าของ V มีค่าอยู่ระหว่าง 4.15 - 4.85 km/s จึงจะให้ผลการประเมินค่า กำลังอัดได้ถูกต้อง

ซึ่ง $R^2 = 0.829$ หมายความว่าค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์ และความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตได้ 82.9%

และสามารถเขียนสมการที่ความเชื่อมั่น 95% เพื่อใช้ประเมินช่วงกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วันเมื่อทราบค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดได้จากเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์และค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกได้ดังสมการที่(4.6)

$$\log Y = -1.88348 + 5.88767 \log V + 0.32661 \log N \pm 1.96 \times 0.05722 \sqrt{\left[1 + m_0' (M'M)^{-1} m_0\right]} \quad (4.6)$$

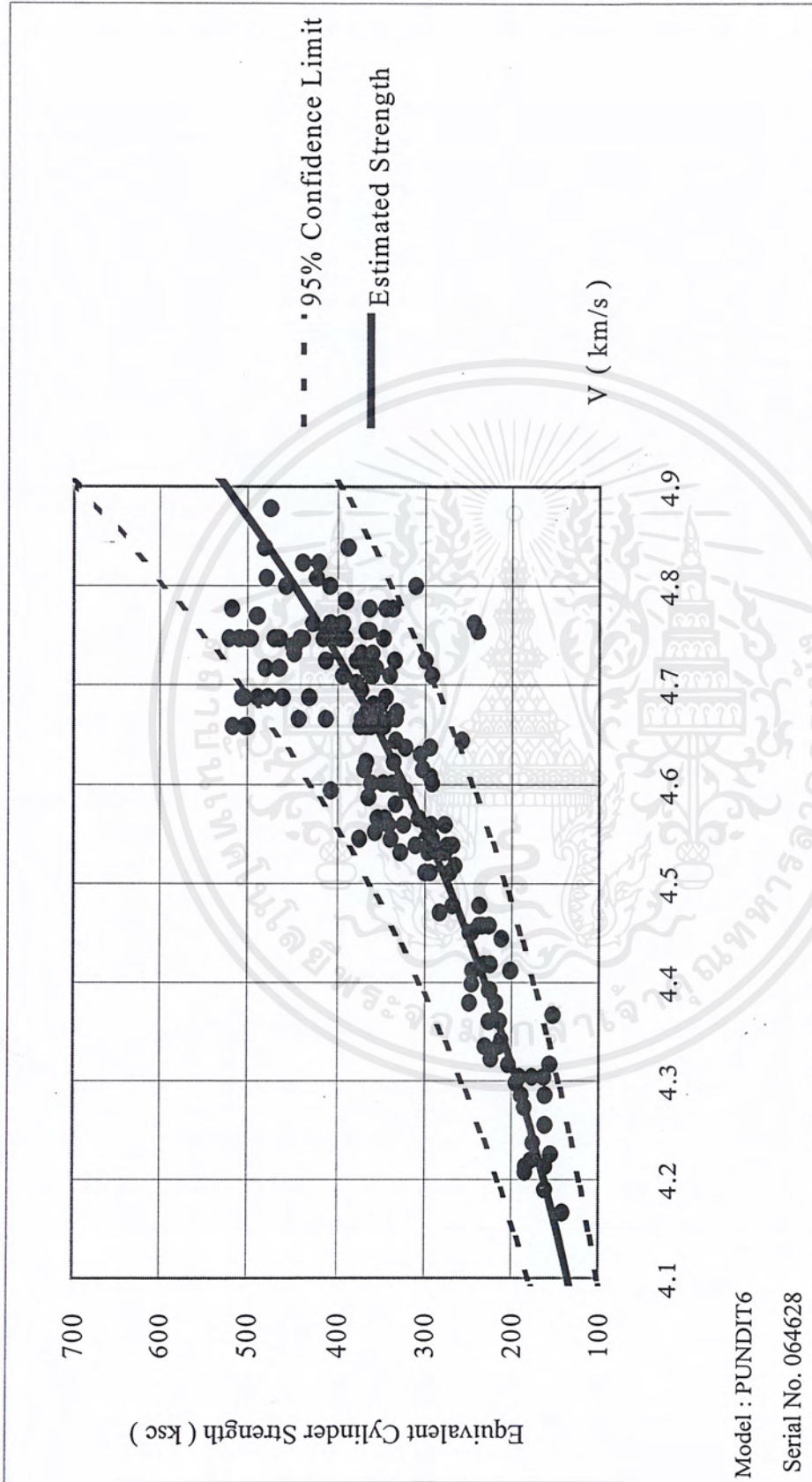
$$\begin{aligned}
 \text{ซึ่ง } Y &= \text{กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (kg/cm}^2\text{)} \\
 V &= \text{ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (km/s)} \\
 N &= \text{ค่ารีบาว์นัมเบอร์ที่วัดจากเครื่องมือชนิดท์แฮมเมอร์}
 \end{aligned}$$

$$m_0' = \begin{bmatrix} 1 & \log V & \log N \end{bmatrix}$$

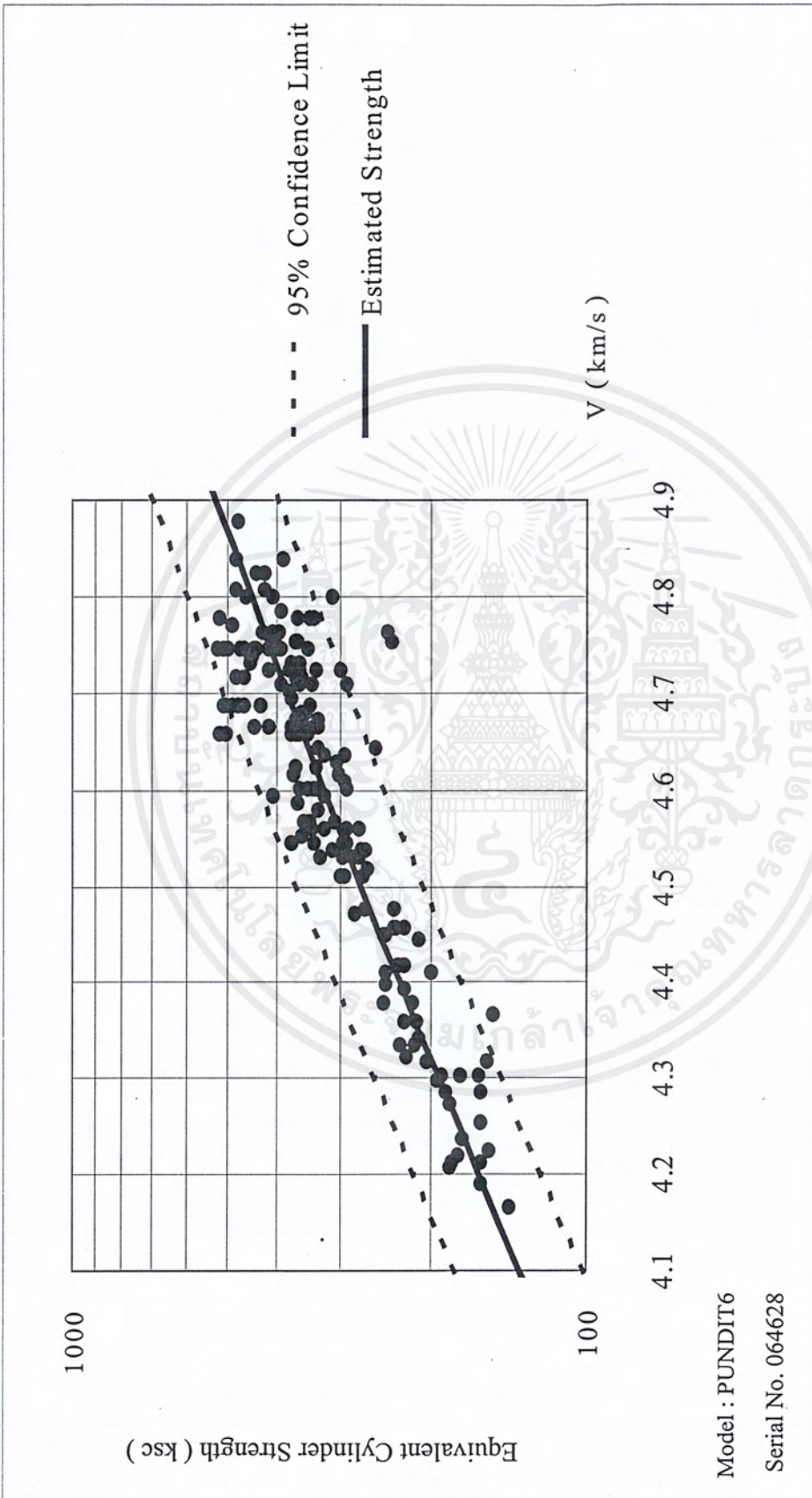
$$m_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ \log V \\ \log N \end{bmatrix}$$

$$\text{และ } (M'M)^{-1} = \begin{bmatrix} 13.6177 & -25.2101 & 2.0506 \\ -25.2101 & 50.3833 & -5.4243 \\ 2.0506 & -5.4243 & 1.0251 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

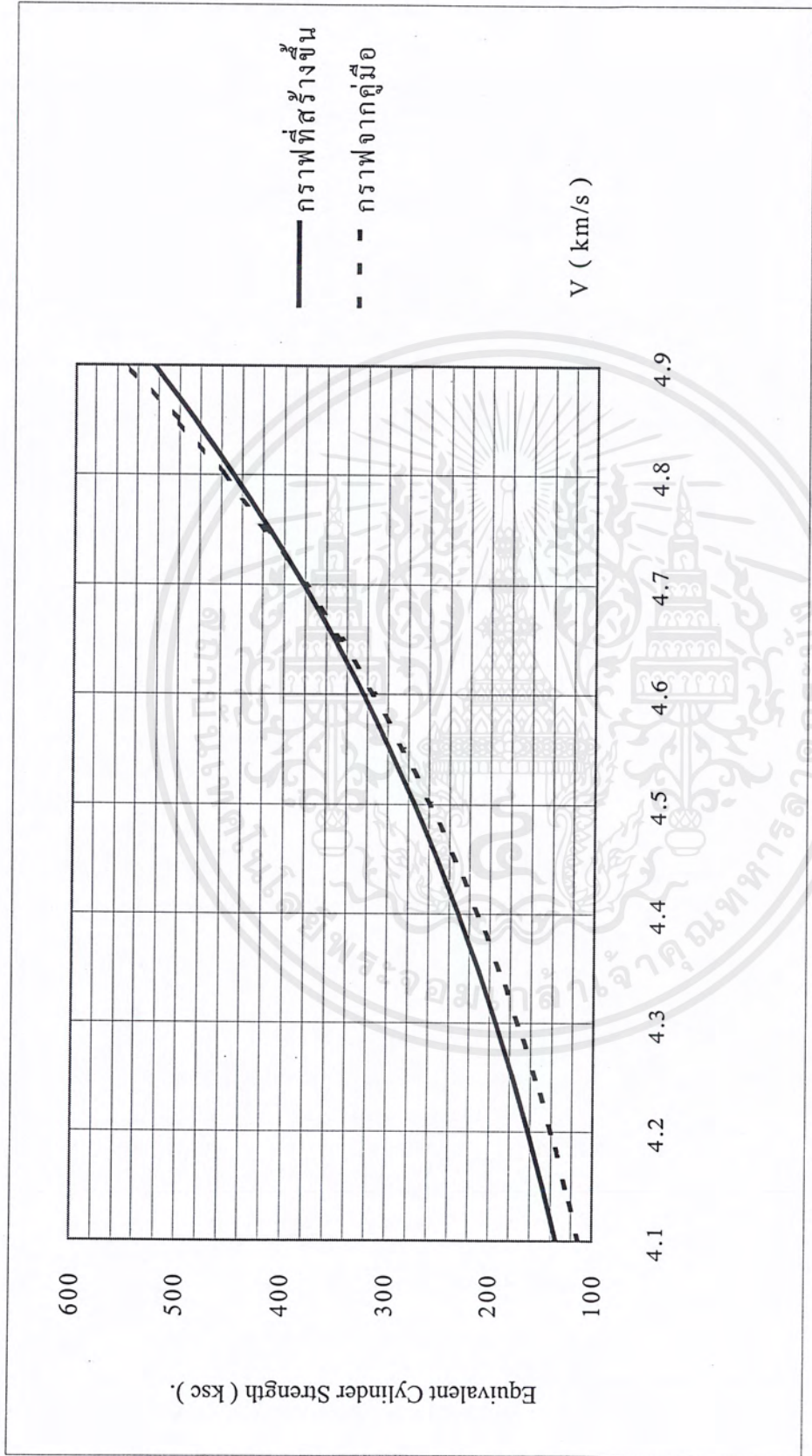


รูปที่ 4.1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านตัวอย่างคอนกรีตกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



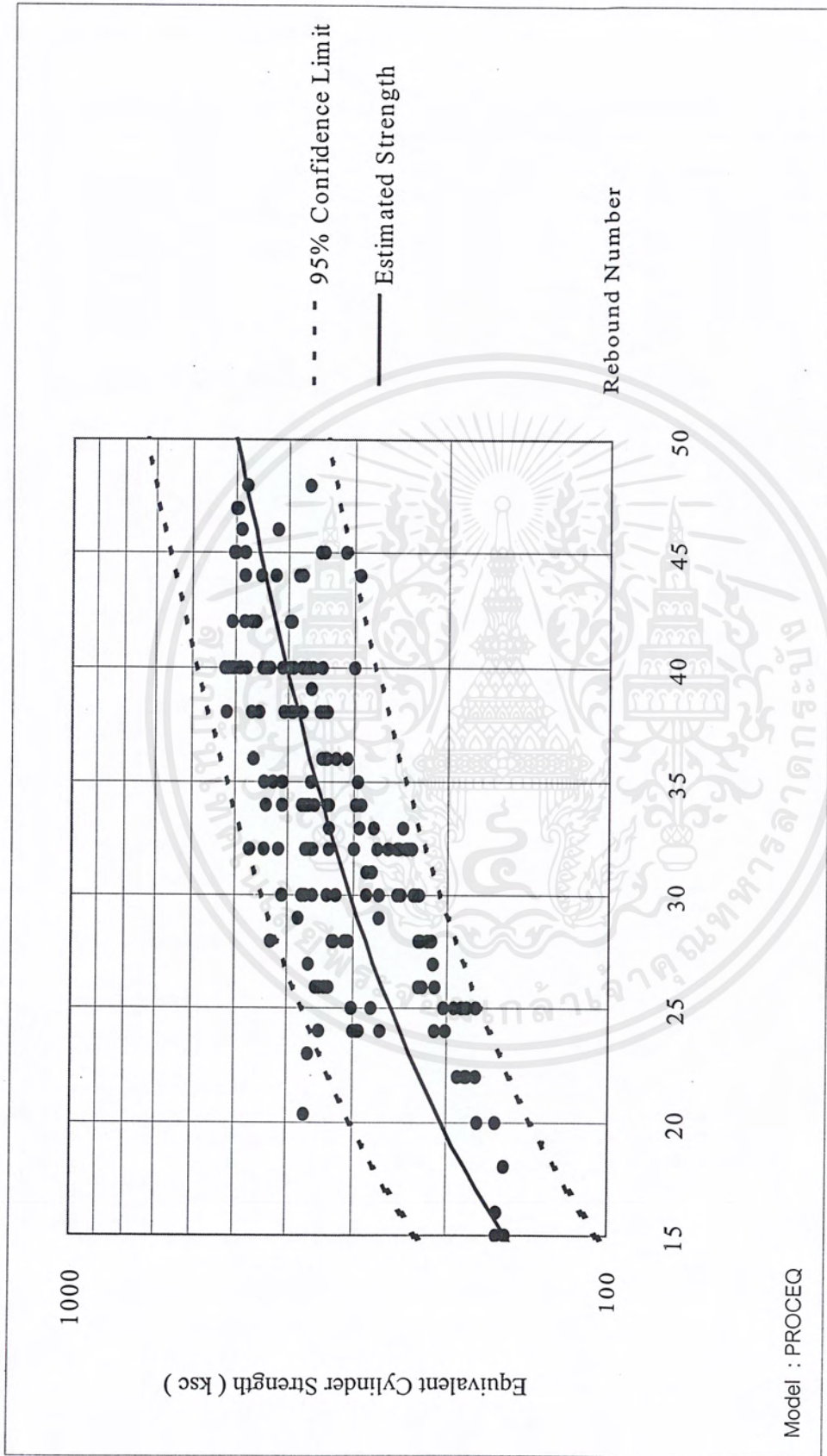
รูปที่ 4.2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



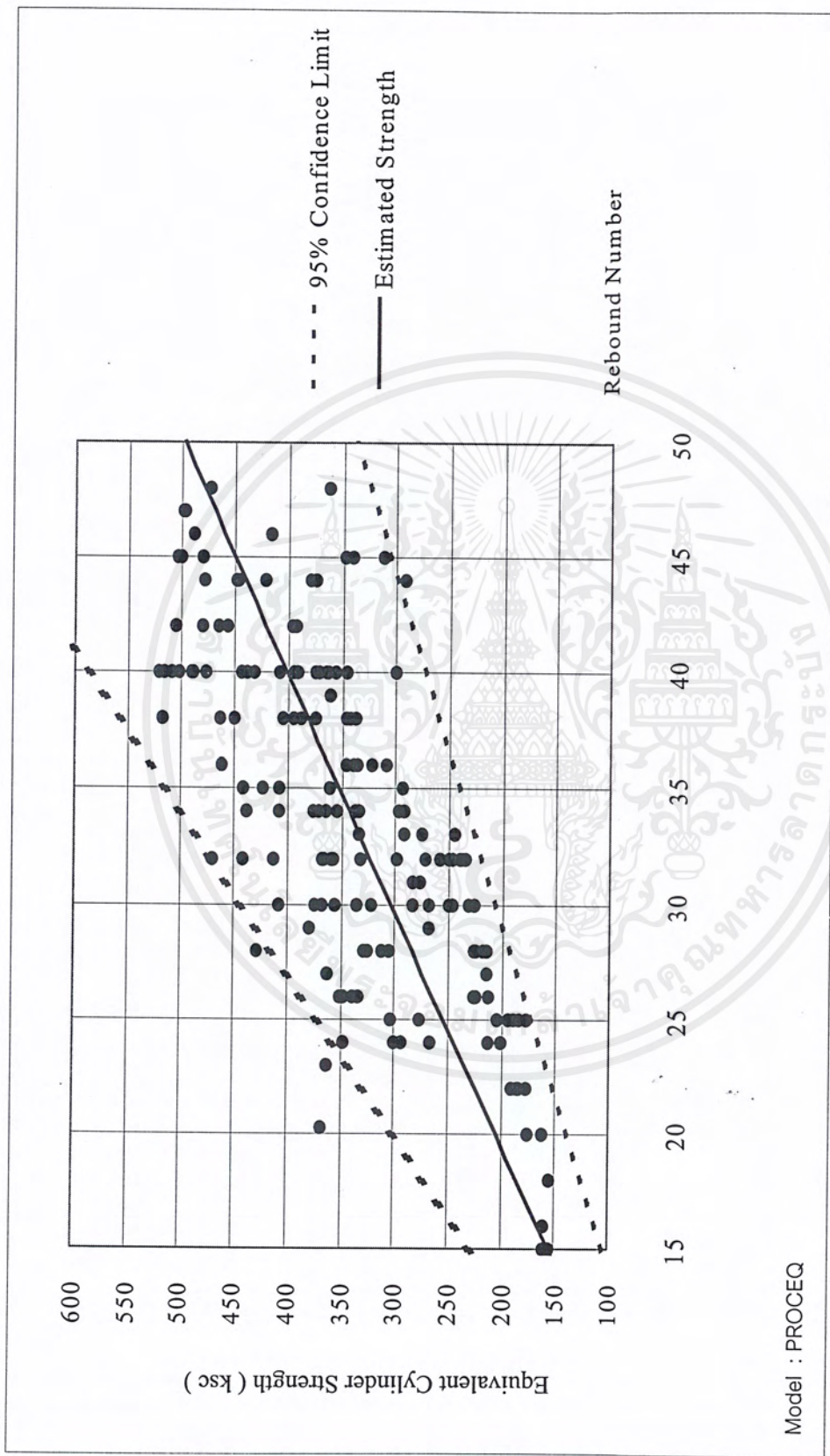
รูปที่ 4.3. กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟใช้งานของเครื่องมือพินดิกและกราฟที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



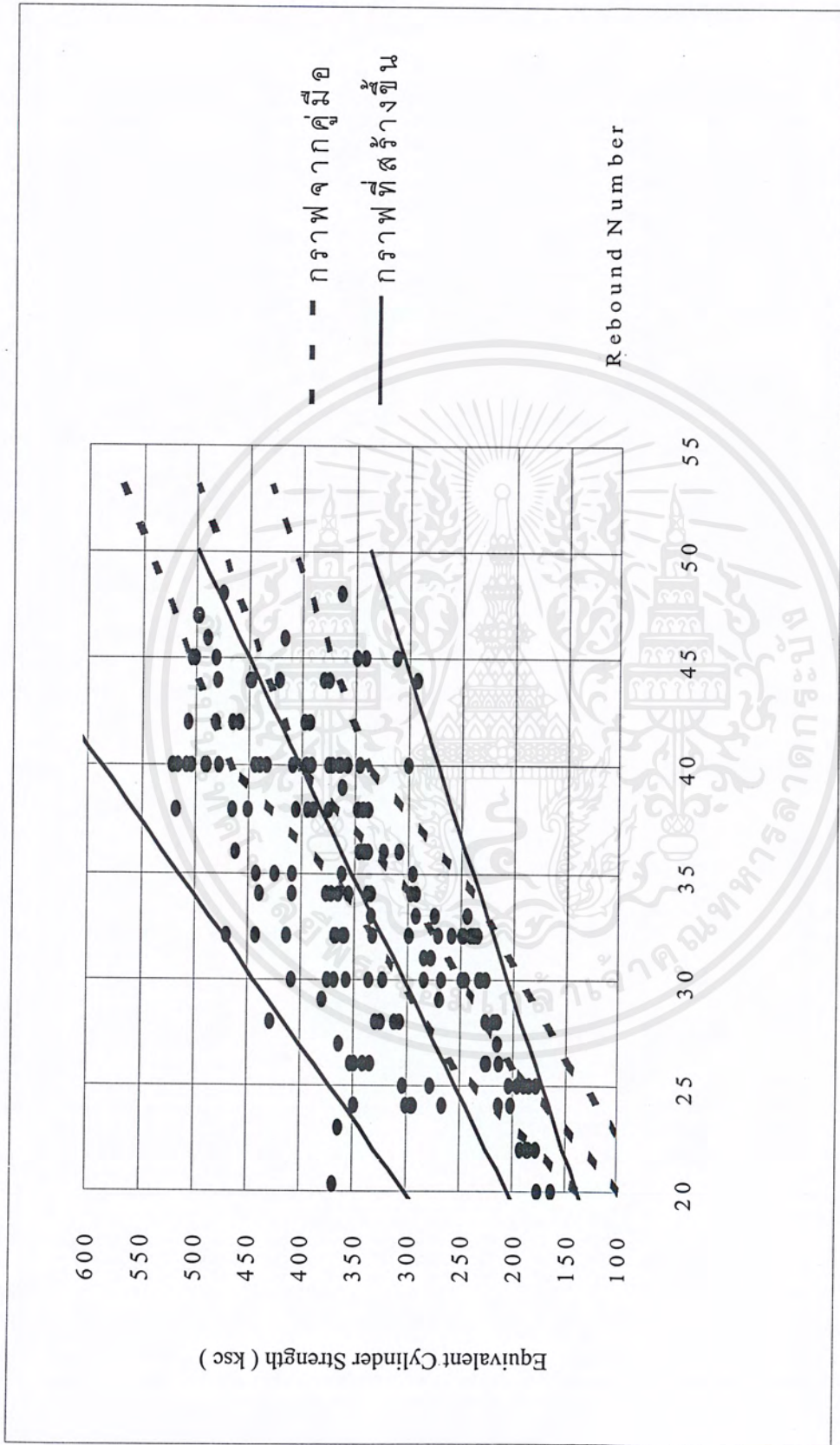
รูปที่ 4.4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีบาวน์ัมเบอร์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6. กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟใช้งานของเครื่องมือพินดากับกราฟที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

5.1. การวิเคราะห์การประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิท

วิเคราะห์เหตุผลที่ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคแปรผันแบบ โดยตรงกับกำลังของคอนกรีต

ก. เหตุผลประการแรก

เนื่องจากความเร็วคลื่น V มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของแข็งที่นำมาทดสอบเป็นดังสมการที่(2.1)

$$V^2 = (K) \frac{E}{D} \quad (2.1)$$

ซึ่ง V = ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค
 K = ค่าคงที่
 E = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของแข็ง
และ D = ความหนาแน่นของของแข็ง

และจากผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตดังตารางที่ 3.1. นำหนักของส่วนผสมโดยรวมต่อปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันไม่มาก ซึ่งแสดงว่าจากการผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ความหนาแน่นมีผลต่อความเร็วน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตหรืออาจกล่าวได้ว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคในการทดสอบมีความสัมพันธ์กับค่า โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่านั้น

เนื่องจากกำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่า โมดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งอาจสรุปแบบโดยอ้อมได้ว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมีความสัมพันธ์กับกำลังของคอนกรีตด้วย

ข. เหตุผลประการที่สอง

เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิคเป็นคลื่นเสียง ดังนั้นการที่คลื่นอัลตราโซนิคจะผ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่าน โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเนื้อวัตถุนั้น เช่น ในอากาศความเร็วของคลื่นเสียงมีค่าเท่ากับ 340 m/s ในน้ำความเร็วของคลื่นเสียงมีค่าเท่ากับ 1500 m/s ในเหล็กกล้าความเร็วของคลื่นเสียงมีค่าเท่ากับ 5900 m/s

ตารางที่ 5.1. แสดงการเปรียบเทียบปริมาณซีเมนต์และทรายที่เปลี่ยนแปลงเมื่อกำลังของคอนกรีตที่ออกแบบเพิ่มขึ้น

กำลังคอนกรีตที่ออกแบบ (kg/cm) ²	ปริมาณซีเมนต์ (kg)	ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (kg)	ทรายชั้น (kg)	ปริมาณทรายเป็นที่ลดลง (kg)	อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย	อัตราส่วนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นต่อทรายเป็นที่ลดลง
200	286	-	921	-	0.310	-
250	323	37	882	39	0.366	0.952
300	364	41	839	43	0.433	0.952
350	417	53	784	56	0.532	0.952
400	465	48	733	51	0.635	0.952
450	526	61	669	64	0.787	0.952
500	606	80	586	83	1.035	0.964

จากตารางที่ 5.1. พบว่าเมื่อกำลังคอนกรีตที่ออกแบบเพิ่มขึ้นปริมาณหินจะคงที่ ปริมาณน้ำใกล้เคียงกัน ปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นและปริมาณทรายเป็นที่ลดลงในสัดส่วนที่ค่อนข้างคงที่ หรืออัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเป็นที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่ออัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเป็นที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งซีเมนต์เพสต์เป็นประสานระหว่างมวลรวมในคอนกรีตสด ทำให้มวลรวมมีการประสานกันที่สมบูรณ์ขึ้น คอนกรีตสดมีช่องว่างลดลง ซึ่งมีผลให้ตัวอย่างคอนกรีตมีกำลังเพิ่ม และเมื่อคลื่นอัลตราโซนิคเดินทางผ่านตัวอย่างคอนกรีตจึงมีความเร็วสูงขึ้น แสดงว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมีความสัมพันธ์กับกำลังของคอนกรีต

5.2. การวิเคราะห์การประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์

วิเคราะห์เหตุผลที่ค่ารีบาวน์นัมเบอร์แปรผันแบบโดยตรงกับกำลังของคอนกรีต

จากคำกล่าวของ Edward G. Nawy ว่า“...ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างค่ารีบาวน์นัมเบอร์กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังของคอนกรีต ค่ารีบาวน์นัมเบอร์ขึ้นอยู่กับการที่หัวพลังเกอร์กระทบกับผิวคอนกรีต ยิ่งหัวพลังเกอร์ตกลงไปในเนื้อคอนกรีตมากเท่าใด ค่ารีบาวน์นัมเบอร์ก็จะยิ่งน้อยลงเท่านั้น ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังของคอนกรีตมีอิทธิพลต่อค่ารีบาวน์นัมเบอร์...” (Nawy , 1997) จึงพอสรุปได้ว่าค่ารีบาวน์นัมเบอร์มีความสัมพันธ์กับกำลังของคอนกรีต

5.3. การวิเคราะห์การประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์ร่วมกัน

เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 จะเห็นได้ว่าการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์ร่วมกันจะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีกว่าการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทหรือโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์เพียงอย่างเดียว

5.4. สรุปผลการทดสอบการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิท

จากผลการทดสอบรูปที่ 4.1. จะเห็นว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เมื่อความเร็วคลื่นที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่ามากขึ้น จะมีความแม่นยำในการประเมินกำลังลดลง ดังนั้นในการนำผลการทดสอบนี้ไปใช้การประเมินกำลังคอนกรีตที่คลื่นอัลตราโซนิคมีความเร็วสูงขึ้นจะมีความผิดพลาดมากขึ้น

สำหรับในการนำผลการทดสอบนี้ไปใช้งานเพื่อความปลอดภัย ควรคำนึงถึงค่าต่ำสุดของกำลังคอนกรีตที่แสดงในกราฟด้วย

5.5. สรุปการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์

เนื่องจากค่าริบาวน์เป็นค่ากลางที่ได้จากการกดตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM: C 850-85 ต้องกดอย่างน้อย 10 ครั้ง และจากผลการทดสอบรูปที่ 4.3. จะเห็นว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีช่วงในการประเมินกำลังคอนกรีตที่ค่อนข้างกว้างมาก จึงไม่แนะนำให้นำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าริบาวน์นัมเบอร์กับกำลังคอนกรีตจากการทดสอบนี้ไปใช้ในการประเมินกำลังคอนกรีต

5.6. สรุปผลการศึกษาทั้งหมด

จากผลการวิเคราะห์ ระหว่าง การประเมินกำลังคอนกรีตโดยกราฟของเครื่องมือพันดิทอย่างเดียวกับการประเมินกำลังคอนกรีต โดยกราฟของเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์อย่างเดียว และการประเมินกำลังคอนกรีตโดยสมการที่ร่วมระหว่างเครื่องมือพันดิทกับเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์ พบว่าการประเมินกำลังคอนกรีตร่วมกันระหว่างเครื่องมือพันดิทกับเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังคอนกรีตได้มากที่สุดและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด แสดงว่ามีความน่าเชื่อถือมากที่สุด เมื่อเทียบกับการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีใดวิธีหนึ่งอย่างเดียว

แต่เนื่องจากค่าริบาวน์นัมเบอร์ที่ได้จากการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM: C 805-85 จึงยังไม่แนะนำให้นำสมการที่การประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์ร่วมกันจากการทดสอบนี้ไปใช้ในการประเมินกำลังคอนกรีต

แต่มีข้อเสนอแนะว่า ถ้าการทดสอบหาค่าริบาวน์นัมเบอร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM: C 805-85 แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างสมการเพื่อประเมินกำลังของคอนกรีตโดยเครื่องมือพันดิทและโดยเครื่องมือชมิคท์แฮมเมอร์ร่วมกัน น่าจะเป็นสมการเพื่อใช้ประเมินกำลังคอนกรีตที่มีความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งานมากกว่า

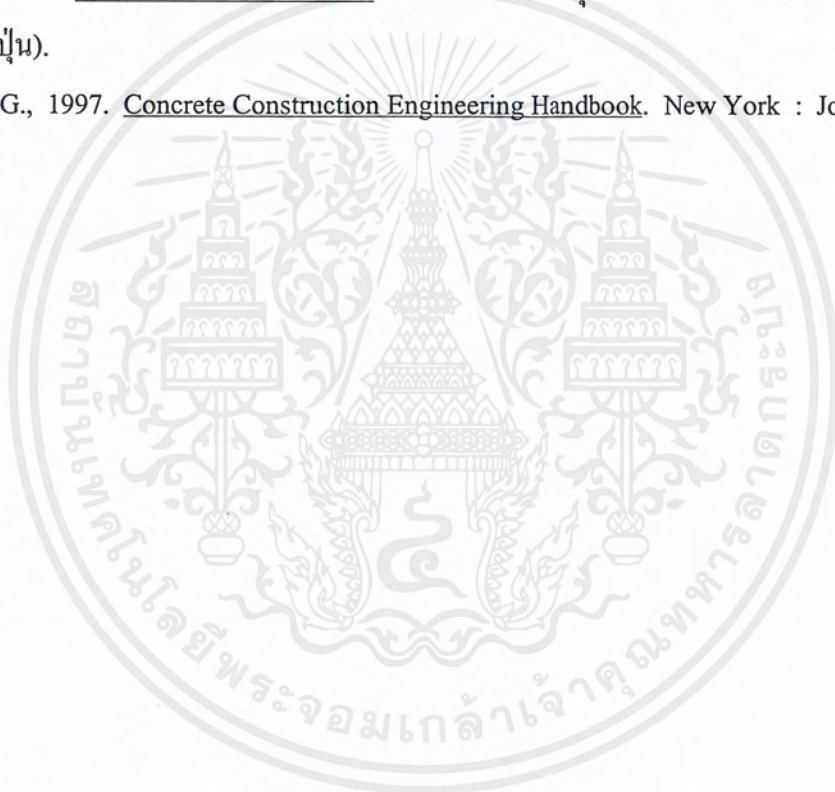
ดังนั้นจากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ของโครงการพิเศษนี้ขอสรุปว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของเครื่องมือพันดิทมีความเหมาะสมในการประเมินกำลังคอนกรีตมากที่สุด เนื่องเป็นการทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ทุกประการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7. ข้อเสนอแนะในการนำผลการทดสอบไปใช้งาน

1. ในการทดสอบครั้งนี้ใช้แบบหล่อเป็นเหล็กตั้งนั้นในการวัดค่ารีบาวน์นัมเบอร์จากคอนกรีตที่ใช้แบบหล่อเป็นไม้ อาจทำให้การประเมินกำลังคอนกรีตผิดพลาดได้
2. การทดสอบด้วยชนิดที่แฮมเมอร์ทำการวัดโดยกดลงในแนวตั้งฉากกับผิวโลกเท่านั้น
3. ในการทดลองนี้ใช้ขนาดหินใหญ่สุดเพียงขนาดเดียว คือ 20 mm จึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ถึงผลกระทบต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคและค่ารีบาวน์นัมเบอร์ที่เกิดจากขนาดหินใหญ่สุดที่มีขนาดต่างๆกัน ได้
4. ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ ระหว่าง 30-35 องศาเซลเซียสเท่านั้น
5. ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุ 28 วันเท่านั้น จึงไม่สามารถวิเคราะห์ผลของอายุคอนกรีตที่มีผลต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคและค่ารีบาวน์นัมเบอร์ได้
6. เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ต้องประเมินกำลังของคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่านั้น การทดสอบจึงไม่ครอบคลุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคลื่นอัลตราโซนิคและค่ารีบาวน์นัมเบอร์ ดังนั้น จึงมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่า ควรมีการทำการทดสอบเพิ่มถ้าต้องการประเมินกำลังคอนกรีตให้ครอบคลุมปัจจัยต่างๆ เกี่ยวกับ อายุคอนกรีต ปริมาณซีเมนต์ ขนาดหินใหญ่สุด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แนวทดสอบของเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

รายการอ้างอิง

- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. ม.ป.ท.
- American Society for Testing and Materials, 1992. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregate. Philadelphia : ASTM.
- CNS FARNELL. Limited, n.d.. PUNDIT6 Operating Manual. n.p.
- Fujii. Z., 1995. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- Nawy. E. G., 1997. Concrete Construction Engineering Handbook. New York : John Wiley & Sons.



บรรณานุกรม

- กัลยา วานิชย์บัญชา, 2541. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. ม.ป.ท.
- American Society for Testing and Materials, 1992. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregate. Philadelphia : ASTM.
- CNS FARNELL. Limited, n.d.. PUNDIT6 Operating Manual. n.p.
- Fujii. Z., 2538. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- Montgomery. D. C., 1999. Applied Statistics and Probability for Engineers. Second Edition. New Yoke : John Wiley & Sons.
- Nawy. E. G., 1997. Concrete Construction Engineering Handbook. New York : John Wiley & Sons.

ภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

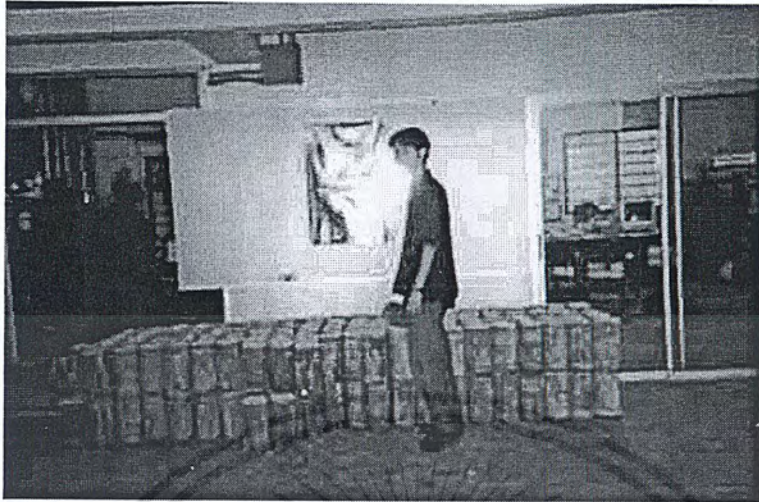


รูปที่ ผ.ก.1 การผสมคอนกรีต



รูปที่ ผ.ก.2 บ่มตัวอย่างคอนกรีต 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

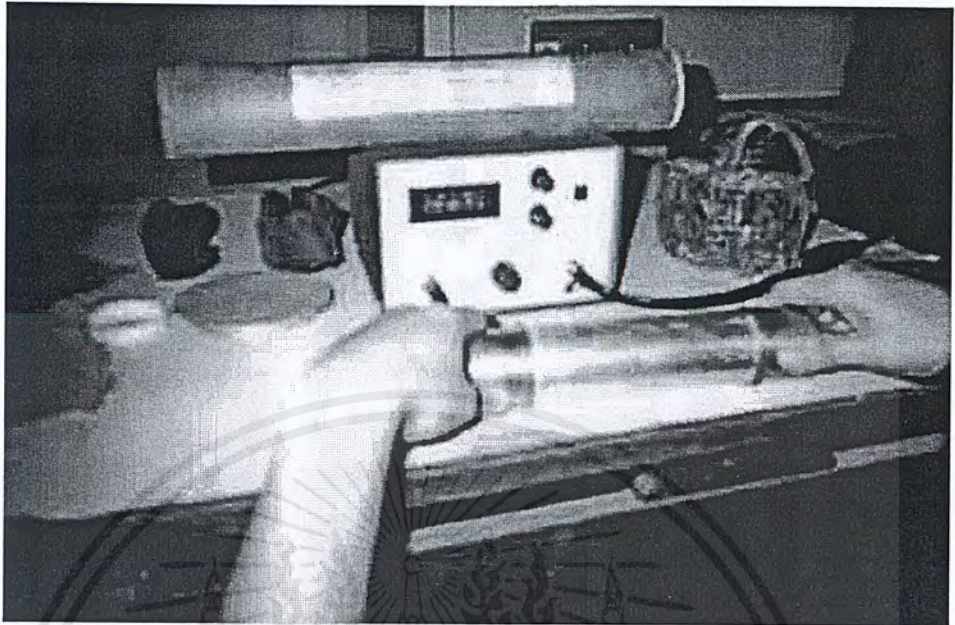


รูปที่ ผ.ก.3 แสดงตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด 210 ตัวอย่าง



รูปที่ ผ.ก.4 แสดงตัวอย่างคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

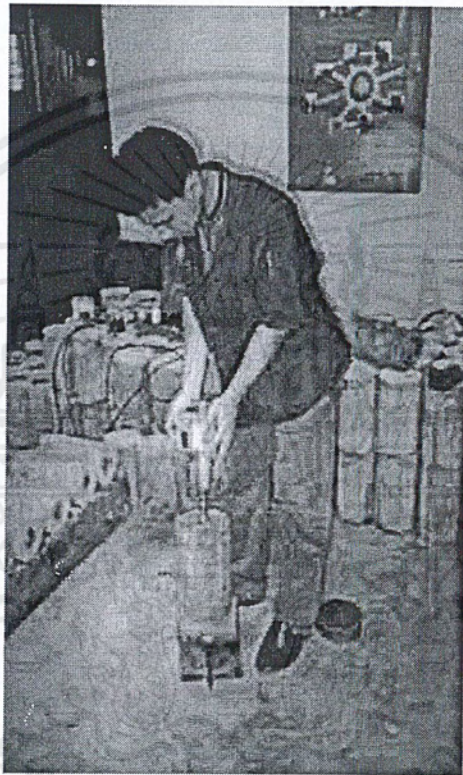


รูปที่ ผ.ก.5 แสดงการปรับแก้เครื่องมือพินดิท



รูปที่ ผ.ก.6 แสดงการทดสอบหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวอย่างคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.7 แสดงการทดสอบ โดยเครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

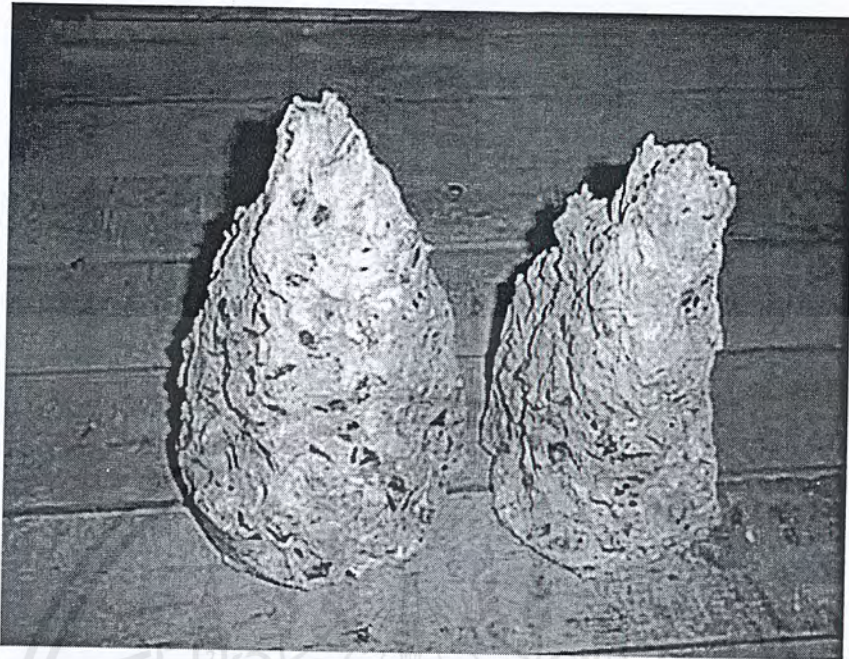


รูปที่ ผ.ก.8 แสดงการทดสอบหาค่าดึงของตัวอย่างคอนกรีตโดยเครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ ผ.ก.9 แสดงการอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.10 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่วิบัติอย่างสมบูรณ์



รูปที่ ผ.ก.11 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่วิบัติอย่างไม่สมบูรณ์ซึ่งจะไม่นำมาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีต โดยวิธีต่างๆ

ลำดับที่	ความยาว(ซม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ซม.)			ความเร็วคลื่น (V) (กม./วินาที)	ค่าบดตัว (ซม.)	ค่าริบวาน์(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
1	30.5	29.8	30.2	15.0	15.0	15.0	4.2465	8.7	14	106.44				แตกที่ปลาย
2	30.3	30	30.2	15.0	15.0	15.0	4.2465	8.7	14	113.23				แตกที่ปลาย
3	30.3	30	30.2	15.0	15.0	15.0	4.1875	8.7	14	118.90				แตกที่ปลาย
4	30.1	30	30.1	15.0	15.0	15.0	4.2087	8.7	14	118.90				แตกที่ปลาย
5	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2614	8.7	14	127.39				แตกที่ปลาย
6	30.4	30.2	30.3	15.0	15.0	15.0	4.2378	8.7	15	130.22				แตกที่ปลาย
7	30	29.8	29.9	15.0	15.0	15.0	4.1877	8.7	14	130.22				แตกที่ปลาย
8	30	29.8	29.9	15.0	15.0	15.0	4.2472	8.7	14	130.22				แตกที่ปลาย
9	30.3	29.7	30	15.0	15.0	15.0	4.2194	8.7	14	133.62				แตกที่ปลาย
10	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.1379	8.7	15	135.88				แตกที่ปลาย
11	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.1667	8.7	14	141.54	152.58	145.31	138.02	
12	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3668	8.7	14	152.87	218.09	145.31	181.94	
13	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2254	8.7	15	155.13	169.73	155.35	153.29	
14	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3165	8.7	18	156.26	199.69	185.32	184.49	
15	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.1899	8.7	16	161.36	159.19	165.36	148.98	
16	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2135	8.7	16	161.36	166.13	165.36	153.98	

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าขยายตัว (ชม.)	คาร์บาวน(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
17	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2553	8.7	15	161.36	179.11	155.35	159.80	
18	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2857	8.7	15	161.36	189.08	155.35	166.64	
19	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3042	8.7	20	163.06	195.37	205.21	187.74	
20	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2373	8.7	20	175.51	173.41	205.21	171.21	
21	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3042	8.7	22	176.65	195.37	225.04	193.68	
22	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2194	8.7	25	177.78	167.92	254.68	179.62	
23	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2135	8.7	25	184.01	166.13	254.68	178.14	
24	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2076	8.7	22	184.57	164.36	225.04	169.45	
25	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2735	8.7	22	185.70	185.02	225.04	185.70	
26	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2857	8.7	25	189.10	189.08	254.68	196.89	
27	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3042	8.7	22	191.37	195.37	225.04	193.68	
28	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.2980	8.7	25	194.76	193.25	254.68	200.24	
29	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4118	8.7	24	201.56	235.78	244.81	230.44	
30	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3165	8.7	25	203.82	199.69	254.68	205.38	
31	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4118	9.0	25	203.82				แตกที่ปลาย
32	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3228	9.0	22	204.95				แตกที่ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใชวงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)				เส้นผ่านศูนย์กลาง(ชม.)		ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าอุปตัวค่าริบาว์(N) (ชม.)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.				โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
33	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3290	9.0	206.65				แตกที่ปลาย
34	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4379	9.0	206.65				แตกที่ปลาย
35	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3290	9.0	207.78				แตกที่ปลาย
36	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3415	9.0	209.48				แตกที่ปลาย
37	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3415	9.0	212.31	208.66	244.81	209.67	
38	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4444	9.0	212.31	249.41	264.53	247.05	
39	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3605	9.0	214.01	215.69	274.37	223.54	
40	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3353	9.0	215.15	206.38	284.19	218.62	
41	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3796	9.0	218.54	222.99	284.19	232.11	
42	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3228	9.0	224.20	201.89	264.53	209.80	
43	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3924	9.0	225.34	228.01	284.19	236.14	
44	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4183	9.0	225.34	238.44	284.19	244.45	
45	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3605	9.0	226.47	215.69	303.82	231.37	
46	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3924	9.0	226.47	228.01	264.53	230.49	
47	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4577	9.0	226.47	255.11	284.19	257.56	
48	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8077	9.0	229.87				มีรูพรุนด้านข้าง

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ซม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ซม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าขุบตัว (ซม.)	คาร์บอน(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
49	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3353	9.0	30	231.00	206.38	303.82	223.61	
50	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4183	9.0	30	232.13	238.44	303.82	250.02	
51	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7170	9.0	35	233.89				มีรูพรุนด้านข้าง
52	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4577	9.0	32	234.39	255.11	323.40	269.05	
53	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4577	9.0	32	237.79	255.11	323.40	269.05	
54	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4776	9.0	32	237.79	263.93	323.40	276.22	
55	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7544	9.0	32	240.06	416.68	323.40	393.18	
56	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7619	9.0	33	244.02	421.74	333.17	400.88	
57	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4118	9.0	30	245.72	235.78	303.82	247.86	
58	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3988	9.0	32	246.28	230.56	323.40	248.80	
59	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4510	9.0	32	246.28	252.24	323.40	266.70	
60	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.3796	9.0	30	249.12	222.99	303.82	237.40	
61	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4510	7.2	32	249.12	252.24	323.40	266.70	
62	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8465	7.2	28	249.12				แตกที่ปลาย
63	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7544	7.2	31	255.91				แตกที่ปลาย
64	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6440	7.2	32	258.12	348.43	323.40	342.39	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับโครงการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ช.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าขยายตัว (ชม.)	ค่ารับน้ำหนัก (กค./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังคอนกรีต			หมายเหตุ	
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.				โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N		
65	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5181	7.2	28	259.31			แตกที่ปลาย	
66	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5181	7.2	24	266.10	282.64	244.81	265.12	
67	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7847	7.2	40	266.21				มีรูพรุนด้านข้าง
68	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4776	7.2	30	268.37	263.93	303.82	270.45	
69	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5386	7.2	29	268.93	292.56	294.01	289.65	
70	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5113	7.2	32	271.76	279.42	323.40	288.67	
71	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5386	7.2	33	274.59	292.56	333.17	302.13	
72	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5317	7.2	31	277.42	289.21	313.61	293.40	
73	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5593	7.2	25	277.42	302.87	254.68	283.43	
74	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7393	7.2	32	279.35				มีรูพรุนด้านข้าง
75	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.4709	7.2	30	283.09	260.95	303.82	268.09	
76	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5317	7.2	31	284.22	289.21	313.61	293.40	
77	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	7.2	33	288.75				มีรูพรุนด้านข้าง
78	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5455	7.2	34	291.58	295.95	342.94	307.82	
79	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	7.2	33	292.14	324.75	333.17	327.53	
80	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7096	7.2	44	292.37	387.71	440.12	412.64	

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอมกรีต โดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าอุปตัว (ชม.)	ค่ารับวาม์(N)	กำลังอัดคอมกรีต (กก./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอมกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
81	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5593	7.2	24	293.28	302.87	244.81	279.68	
82	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5113	7.2	35	294.41	279.42	352.69	297.24	
83	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6368	7.2	24	294.41	344.35	244.81	308.86	
84	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6083	7.2	24	294.41	328.56	244.81	297.85	
85	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5317	7.2	34	296.67	289.21	342.94	302.39	
86	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5455	7.2	32	298.94	295.95	323.40	301.79	
87	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5113	7.2	24	300.07	279.42	244.81	262.78	
88	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7244	7.2	40	300.07	397.10	401.34	407.46	
89	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6154	8.4	25	302.90	332.43	254.68	304.60	
90	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6296	8.4	28	305.73	340.32	284.19	321.87	
91	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5662	8.4	36	308.00	306.40	362.44	322.15	
92	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8000	8.4	45	311.28	448.12	449.79	464.92	
93	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5386	8.4	28	311.39	292.56	284.19	286.34	
94	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5942	8.4	26	311.39				แตกที่ปลาย
95	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5455	8.4	30	322.15				แตกที่ปลาย
96	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5942	8.4	36	322.72	320.98	362.44	333.94	

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ซม.)			เส้นผ่านศูนย์กลาง(ซม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าอุปตัว (ซม.)	ค่ารับน้ำหนัก (N)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
97	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6368	8.4	30	322.72	344.35	303.82	332.21	
98	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5593	8.4	28	324.98	302.87	284.19	294.12	
99	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5317	8.4	28	328.38	289.21	284.19	283.81	
100	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6729	8.4	32	332.91	365.30	323.40	355.14	
101	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5802	8.4	26	334.04	313.59	264.53	294.91	
102	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	8.4	26	334.04	324.75	264.53	302.99	
103	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6440	8.4	26	334.04	348.43	264.53	319.94	
104	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6656	8.4	33	334.04	361.00	333.17	355.46	
105	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	8.4	34	334.27	324.75	342.94	330.74	
106	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7244	8.4	30	335.40	397.10	303.82	370.92	
107	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6225	8.4	36	336.31	336.35	362.44	346.24	
108	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7771	8.4	34	337.27	432.07	342.94	412.46	
109	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	8.4	38	337.44	324.75	381.91	342.97	
110	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5455	8.4	36	339.70	295.95	362.44	313.62	
111	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6656	8.4	26	339.70	361.00	264.53	328.83	
112	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7096	8.4	45	341.06	387.71	449.79	415.68	

ตารางที่ ผ.ง.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่านศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่ามุมตัว (ชม.)	ค่าริบาว์(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต		หมายเหตุ	
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N		
113	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5593	8.4	38	341.97	302.87	381.91	324.96	
114	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	8.4	40	345.36	374.08	401.34	389.08	
115	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7771	8.4	36	345.36	432.07	362.44	420.23	
116	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5662	8.4	38	346.50	306.40	381.91	327.89	
117	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	8.4	26	347.63	356.75	264.53	325.84	
118	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	8.4	24	348.20	324.75	244.81	295.17	
119	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.6	45	348.20	411.68	449.79	435.42	
120	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6802	7.6	26	351.03	369.66	264.53	334.92	
121	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.6	38	353.86				แตกที่ปลาย
122	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5732	7.6	38	354.42				แตกที่ปลาย
123	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5662	7.6	34	354.65	306.40	342.94	316.19	
124	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6729	7.6	40	356.69	365.30	401.34	381.99	
125	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7170	7.6	30	356.69	392.38	303.82	367.50	
126	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5524	7.6	32	357.82	299.39	323.40	304.49	
127	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6802	7.6	32	359.52	369.66	323.40	358.42	
128	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7319	7.6	39	360.65	401.90	391.63	407.88	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.จ.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอมกรีต โดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่านศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าอุปตัวค่ารับน้ำหนัก (ชม.)	ค่ารับน้ำหนัก (N)	กำลังอัดคอมกรีต (กก./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอมกรีต		หมายเหตุ	
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N		
129	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7096	7.6	35	361.22	387.71	352.69	382.92	
130	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6012	7.6	23	362.35	324.75	234.93	291.10	
131	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	7.6	27	362.35	356.75	274.37	329.88	
132	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7096	7.6	48	362.35	387.71	478.78	424.53	
133	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7244	7.6	40	362.35	397.10	401.34	407.46	
134	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7544	7.6	34	364.05	416.68	342.94	401.05	
135	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7771	7.6	40	364.33	432.07	401.34	434.94	
136	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5872	7.6	32	365.46	317.26	323.40	318.46	
137	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	7.6	30	368.01	356.75	303.82	341.43	
138	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6225	7.6	32	368.01	336.35	323.40	333.18	
139	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6729	7.6	32	368.01	365.30	323.40	355.14	
140	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7170	7.6	30	368.01	392.38	303.82	367.50	
141	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7544	7.6	20	368.01	416.68	205.21	337.23	
142	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6154	7.6	34	370.28	332.43	342.94	336.77	
143	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7244	7.6	40	370.28	397.10	401.34	407.46	
144	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6656	7.6	40	373.67	361.00	401.34	378.51	

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ซม.)			เส้นผ่านศูนย์กลาง(ซม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่ายวบตัว (ซม.)	ปริมาตร (ซม.)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
145	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6948	7.6	30	373.67	378.57	303.82	357.46	
146	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7319	7.6	44	373.67	401.90	440.12	424.27	
147	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	7.6	38	374.81	356.75	381.91	368.83	
148	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5455	7.6	34	375.94	295.95	342.94	307.82	
149	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7022	8.4	29	379.33	383.11	294.01	356.80	
150	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7244	8.4	44	379.33	397.10	440.12	420.35	
151	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6948	8.4	42	380.47				แตกที่ปลาย
152	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7022	8.4	38	381.32				แตกที่ปลาย
153	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6656	8.4	46	383.01				แตกที่ปลาย
154	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8387	8.4	38	388.62	476.38	381.91	461.25	
155	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6512	8.4	40	390.66				แตกที่ปลาย
156	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7847	8.4	40	391.00	437.35	401.34	439.04	
157	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	8.4	42	392.36	411.68	420.74	425.71	
158	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7096	8.4	38	394.06	387.71	381.91	393.34	
159	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7619	8.4	40	394.73	421.74	401.34	426.88	
160	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	8.4	42	396.32	411.68	420.74	425.71	

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ซม.)				เส้นผ่าศูนย์กลาง(ซม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าขยุบตัว (ซม.)	ค่ารับน้ำหนัก (ก.ก./ตร.ซม.)	กำลังอัดคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต		หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.	โดยค่า V					โดยค่า N		
161	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7544	8.4	38	404.81	416.68	381.91	415.88	
162	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7619	8.4	35	407.64	421.74	352.69	408.66	
163	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.5942	8.4	30	407.76	320.98	303.82	314.64	
164	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7619	8.4	40	408.38	421.74	401.34	426.88	
165	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8000	8.4	34	408.78	448.12	342.94	424.25	
166	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6656	8.4	32	413.31	361.00	323.40	351.90	
167	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7244	8.4	32	413.31	397.10	323.40	378.82	
168	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	8.4	46	416.36	411.68	459.46	438.55	
169	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8232	8.4	44	421.23	464.84	440.12	474.79	
170	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8077	8.4	35	423.61	453.62	352.69	432.35	
171	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7619	8.4	28	427.46	421.74	284.19	379.94	
172	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	8.4	40	431.88	374.08	401.34	389.08	
173	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	8.4	40	431.88	374.08	401.34	389.08	
174	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	8.4	40	438.78	411.68	401.34	418.98	
175	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	8.4	40	438.78	411.68	401.34	418.98	
176	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8232	8.4	34	438.78	464.84	342.94	436.44	

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่ายุบตัว (ชม.)	คาร์บอน(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กค./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต		หมายเหตุ	
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N		
177	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8232	8.4	40	438.78	464.84	401.34	460.23	
178	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	8.4	32	441.33	411.68	323.40	389.54	
179	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	35	441.33	411.68	352.69	401.10	
180	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6656	7.7	40	443.48	361.00	401.34	378.51	
181	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	44	444.39				แตกที่ปลาย
182	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	44	444.39				แตกที่ปลาย
183	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7096	7.7	40	445.80				แตกที่ปลาย
184	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7393	7.7	44	447.50	406.76	440.12	428.23	
185	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7319	7.7	44	448.41	401.90	440.12	424.27	
186	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7393	7.7	38	450.11	406.76	381.91	408.21	
187	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8000	7.7	42	457.47	448.12	420.74	454.57	
188	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	36	461.26	374.08	362.44	375.91	
189	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	38	464.26	411.68	381.91	412.02	
190	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	38	464.26	411.68	381.91	412.02	
191	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7170	7.7	42	464.71	392.38	420.74	410.19	
192	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	32	469.87	411.68	323.40	389.54	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อความศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าการฉใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ซม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ซม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่ายุบตัว (ซม.)	คาร์บอน(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กค./ตร.ซม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
193	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8780	7.7	48	474.45	506.67	478.78	522.13	
194	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	40	477.51	374.08	401.34	389.08	
195	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8077	7.7	44	478.98	453.62	440.12	465.90	
196	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7170	7.7	42	480.00	392.38	420.74	410.19	
197	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.8387	7.7	45	481.25	476.38	449.79	487.44	
198	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	46	488.66	374.08	459.46	407.25	
199	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7695	7.7	40	488.89	426.87	401.34	430.89	
200	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7695	7.7	40	489.74	426.87	401.34	430.89	
201	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	47	496.87	411.68	469.13	441.64	
202	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	47	498.23	411.68	469.13	441.64	
203	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	7.7	45	500.50	356.75	449.79	389.77	
204	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	7.7	40	502.42	356.75	401.34	375.06	
205	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	45	503.89	374.08	449.79	404.33	
206	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6875	7.7	42	506.16	374.08	420.74	395.32	
207	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	40	508.48	411.68	401.34	418.98	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับโครงการในงานที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบและการประเมินกำลังคอนกรีต โดยวิธีต่างๆ(ต่อ)

ลำดับที่	ความยาว(ชม.)			เส้นผ่าศูนย์กลาง(ชม.)			ความเร็วคลื่น(V) (กม./วินาที)	ค่าอุปตัว (ชม.)	ค่ารับวามัน(N)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ชม.)	การประเมินกำลังอัดคอนกรีต			หมายเหตุ
	L1	L2	Lave.	D1	D2	Dave.					โดยค่า V	โดยค่า N	โดยค่า V & N	
208	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.6584	7.7	40	516.40	356.75	401.34	375.06	
209	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7771	7.7	38	517.54	432.07	381.91	427.72	
210	30	30	30	15.0	15.0	15.0	4.7468	7.7	40	520.76	411.68	401.34	418.98	



ตารางที่ ผ.ข.2 แสดงผลการทดสอบหาความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตจากการสุ่ม 30 ตัวอย่าง

ลำดับที่	เวลา (ไมโครวินาที)	ค่ารีบาวน์	ก่อนอบ (กก.)	หลังอบ (กก.)	ความเร็วคลื่น (กม./วินาที)	กำลัง (กก./ตร.ซม.)	%ความชื้น
1	65.9	32	727.61	691.54	4.55	357.82	4.957
2	65.8	38	553.33	522.83	4.56	341.97	5.512
3	65.3	26	756.03	721.07	4.59	311.39	4.624
4	65	34	323.84	306.41	4.62	370.28	5.382
5	64.4	38	370.84	351.84	4.66	374.81	5.124
6	64.3	40	1220.53	1161.34	4.67	373.67	4.850
7	64.2	32	3273.19	3074.25	4.67	332.91	6.078
8	64.2	32	1243.42	1173.62	4.67	368.01	5.614
9	64.1	32	1231.6	1181.15	4.68	359.52	4.096
10	63.7	38	946.2	896.86	4.71	394.06	5.215
11	63.5	40	2746.35	2593.44	4.72	300.07	5.568
12	63.5	44	912.77	857.63	4.72	379.33	6.041
13	63.4	44	2528.97	2386.85	4.73	448.41	5.620
14	63.3	38	1440.65	1368.48	4.74	450.11	5.010
15	63.2	45	2621.9	2486.54	4.75	348.20	5.163
16	63.2	42	3239.06	3072.11	4.75	396.32	5.154
17	63.1	32	1865.59	1774.15	4.75	240.06	4.901
18	63.1	31	1112.63	1057.3	4.75	255.91	4.973
19	63	35	3294.7	3130.99	4.76	407.64	4.969
20	63	28	1122.15	1069.35	4.76	427.46	4.705
21	62.8	36	1271.92	1207.11	4.78	345.36	5.095
22	62.5	34	291.1	277.4	4.80	408.78	4.706
23	62.2	34	1630.94	1542.77	4.82	438.78	5.406
24	61.9	28	1218.33	1165.65	4.85	249.12	4.324
25	63.3	25	1806.5	1720.7	4.74	279.35	4.750
26	66.2	31	1356.7	1290.63	4.53	284.22	4.870
27	63.7	44	1468.3	1395.92	4.71	292.37	4.930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.2 แสดงผลการทดสอบหาความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตจากการสุ่ม30ตัวอย่าง(ต่อ)

ลำดับที่	เวลา (ไมโครวินาที)	ค่ารีบาวน์	ก่อนอบ (กก.)	หลังอบ (กก.)	ความเร็วคลื่น (กม./วินาที)	กำลัง (กก./ตร.ซม.)	%ความชื้น
28	65.3	26	2230.1	2116.5	4.59	322.72	5.094
29	65.5	26	986.5	935.9	4.58	334.04	5.129
30	64.9	36	1623.4	1538.9	4.62	336.31	5.205



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ทางสถิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ทางสถิติ

1. ค่าแปรปรวน

ค่าแปรปรวนเป็นค่าที่ใช้วัดการกระจายที่ใช้กันมากที่สุด โดยที่ค่าแปรปรวนจะพิจารณาจากผลรวมของค่าแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลแต่ละค่าของข้อมูลกับค่าเฉลี่ยเลขคณิต ถ้าค่าแตกต่างนั้นมากแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายมาก

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{ผ.ภ.1})$$

ซึ่ง S^2 = ค่าแปรปรวนของตัวอย่าง

x_i = ค่าของข้อมูลตัวอย่าง

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

และ n = จำนวนตัวอย่าง

2. การประมาณค่า

การประมาณค่า คือ การประมาณค่าพารามิเตอร์หรือลักษณะของประชากรโดยใช้ข้อมูลจากตัวอย่าง นั่นคือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของประชากรด้วยค่าสถิติที่เหมาะสม โดยการคำนวณค่าสถิติจะใช้ข้อมูลตัวอย่าง การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่จะกล่าวถึงมีดังนี้

- ประมาณค่าเฉลี่ยประชากร (μ) ด้วยค่าเฉลี่ยตัวอย่าง (\bar{x})
- ประมาณค่าแปรปรวนประชากร (σ^2) ด้วยค่าแปรปรวนตัวอย่าง (s^2)

3. การประมาณค่าแบบช่วง

เป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ของประชากรว่าจะอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่ง โดยใช้ข้อมูลตัวอย่าง โดยช่วงของการประมาณค่าจะบอกถึงค่าที่ต่ำสุดและค่าที่สูงสุดของพารามิเตอร์ซึ่งค่าที่ต่ำสุดและค่าที่สูงสุดของพารามิเตอร์จะขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นในการประมาณค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ระดับความเชื่อมั่น

ระดับความเชื่อมั่น หมายถึง โอกาสที่พารามิเตอร์ของประชากรจะอยู่ในช่วงของค่าที่ประมาณได้เช่นค่าเฉลี่ยประชากร (μ) มีค่าอยู่ในช่วงค่าที่ต่ำสุดและค่าที่สูงสุดของ พารามิเตอร์ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% หมายความว่า ในการสุ่มตัวอย่างขนาด n จากประชากร 100 ครั้ง (ครั้งละ n หน่วย) ค่าเฉลี่ยประชากร (μ) จะมีค่าอยู่ในช่วงค่าที่ต่ำสุดและค่าที่สูงสุดของพารามิเตอร์ 95 ครั้ง จะมีเพียง 5 ครั้ง ที่ค่าเฉลี่ยประชากร (μ) ไม่อยู่ในช่วงค่าที่ต่ำสุดและค่าที่สูงสุดของพารามิเตอร์

5. การประมาณค่าเฉลี่ยประชากร (μ) แบบช่วง

กรณีประชากรมีการแจกแจงใดๆ และขนาดตัวอย่างใหญ่ ($n > 30$)

$$\bar{x} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + Z_{1+\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{ผ.ค.2})$$

ซึ่ง \bar{x} = ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง
 Z = พื้นที่ใต้เส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ
 α = ระดับนัยสำคัญ
 S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 μ = ค่าเฉลี่ยของประชากร
และ n = จำนวนตัวอย่าง

6. การประมาณค่าแปรปรวนประชากรแบบช่วง

ค่าประมาณแบบช่วงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร (σ) ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1 - \alpha)100\%$ คือ

$$\sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\lambda_{1-\frac{\alpha}{2}}}} < \sigma < \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\lambda_{\frac{\alpha}{2}}}} \quad (\text{ผ.ก.3})$$

- ซึ่ง S^2 = ค่าแปรปรวนของตัวอย่าง
 λ = พื้นที่ใต้เส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์
 α = ระดับนัยสำคัญ
 และ n = จำนวนตัวอย่าง

7. การวิเคราะห์ความถดถอย

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรตัวหนึ่งกับตัวแปรอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ โดยจะต้องมีการกำหนดหรือทราบค่าตัวแปรอื่นๆ ล่วงหน้า การวิเคราะห์ความถดถอยแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย
2. การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน

7.1. การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวหรือลักษณะที่สนใจ 2 ลักษณะ โดยที่ต้องทราบค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง หรือต้องกำหนดค่าของตัวแปรตัวหนึ่งไว้ล่วงหน้า โดยจะเรียกตัวแปรที่ต้องกำหนดค่าไว้ล่วงหน้าว่า ตัวแปรอิสระ และมักใช้สัญลักษณ์ X และจะเรียกตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ว่า ตัวแปรตาม และใช้สัญลักษณ์ Y

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่า มีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ถ้า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก แสดงว่า ถ้า X มีการเปลี่ยนแปลงไป จะมีผลกระทบต่อค่าของ Y เป็นอย่างมาก
2. ใช้ความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้ มาประมาณค่าหรือพยากรณ์ค่า Y ในอนาคต เมื่อกำหนดค่า X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.1. การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad : \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{ผ.ภ.4})$$

ซึ่ง Y_i = ตัวแปรตาม

X_i = ตัวแปรอิสระ

β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือคือค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์

ε_i = ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

และ β_1 = ความชันของเส้นตรง

ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนแปลง 1 หน่วย จะเรียก β_1 ว่า “สัมประสิทธิ์ความถดถอย” ค่าของ β_1 อาจจะเป็น

1. $\beta_1 > 0$ แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกัน คือ ถ้า X เพิ่ม Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้า X ลดลง Y จะลดลงด้วย
2. $\beta_1 < 0$ แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกัน คือ ถ้า X เพิ่ม Y จะลดลง แต่ถ้า X ลดลง Y จะเพิ่มขึ้น
3. β_1 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย
4. $\beta_1 = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน

7.1.2. การประมาณค่า β_0 และ β_1 โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การประมาณค่า β_0 และ β_1 ด้วย a และ b ตามลำดับนั้น มีเป้าหมายเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y ด้วย Y_i ค่าต่ำสุดโดยใช้วิธีที่เรียกว่า “วิธีกำลังสองน้อยที่สุด” (Least Square Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องหาค่า a และ b ที่ทำให้ผลบวกของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (\text{ผ.ก.5})$$

ซึ่ง \hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i

a = ค่าประมาณของ β_0

b = ค่าประมาณของ β_1

และ X_i = ตัวแปรอิสระ

ผลบวกของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{ผ.ก.6})$$

ซึ่ง ε_i = ค่าคลาดเคลื่อน

Y_i = ตัวแปรตาม

และ \hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i

ดังนั้นวิธีกำลังสองน้อยที่สุดคือการหาค่า a และ b ที่ทำให้ $\sum \varepsilon_i^2$ มีค่าต่ำสุด

การหาค่า a และ b ที่ทำให้ $\sum \varepsilon_i^2$ มีค่าต่ำสุดจะทำได้โดยการใช้สมการอนุพันธ์เทียบกับ a และ b แล้วให้เท่ากับศูนย์

$$\text{จะได้ } b = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} \quad (\text{ผ.ก.7})$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (\text{ผ.ก.8})$$

$$SS_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad (\text{ผ.ก.9})$$

$$SS_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} \quad (\text{ผ.ก.10})$$

$$SS_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad (\text{ผ.ก.11})$$

ซึ่ง a = ค่าประมาณของ β_0

b = ค่าประมาณของ β_1

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระ

\bar{y} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_i = ตัวแปรอิสระ

y_i = ตัวแปรตาม

และ n = จำนวนตัวอย่าง

การประมาณค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

$$S^2 = \frac{SS_{yy} - b(SS_{xy})}{n - 2} \quad (\text{ผ.ค.12})$$

ซึ่ง S^2 = ค่าแปรปรวน

b = ค่าประมาณของ β_1

SS_{xy} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.10)

SS_{yy} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.11)

และ n = จำนวนตัวอย่าง

7.1.3. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ ถ้า R^2 มีค่ามากแสดงว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันมาก

$$R^2 = b \frac{SS_{xy}}{SS_{yy}} \quad (\text{ผ.ค.13})$$

ซึ่ง R^2 = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

b = ค่าประมาณของ β_1

SS_{xy} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.10)

และ SS_{yy} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.11)

7.1.4. สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R)

สำหรับสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามีค่ามากหรือน้อยนั้น จะเรียกว่า “สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์” ซึ่งในกรณีที่ค่าของ Y ขึ้นกับ X เพียงตัวเดียว จะเรียกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย” โดยที่ จะไม่มีหน่วย จึงสามารถใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X ได้ว่า มีความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะมีค่าสูงสุดเป็น 1 และต่ำสุดเป็น -1

เนื่องจากเราใช้ข้อมูลตัวอย่าง จึงประมาณค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ด้วยค่า R โดยที่ R คือ ความสัมพันธ์ของตัวอย่าง

ความหมายของค่า R

1. ค่า R เป็นลบ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศตรงข้าม คือ ถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะลด ค่า X ลด Y จะเพิ่ม
2. ค่า R เป็นบวก แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือ ถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะเพิ่ม ค่า X ลด Y จะลดด้วย
3. ค่า R มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กันมาก
4. ค่า R มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศตรงข้าม แต่มีความสัมพันธ์กันมาก
5. ค่า $R = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
6. ถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

7.1.5. การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานเป็นการทดสอบว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ สมมติฐาน (H)

$H_0 : \beta_1 = 0$ หรือ $H_0 : X$ และ Y ไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ หรือ $H_1 : X$ และ Y มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

มีวิธีการทดสอบ 3 วิธี กรณีตัวอย่าง (n) มากกว่า 30

ก. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{(1-R^2)}{(n-2)}}} \quad (\text{ผ.ค.14})$$

ซึ่ง Z = สถิติทดสอบ

R = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

R^2 = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

และ n = จำนวนตัวอย่าง

จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$

ข. ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{b(SS_{xy})}{S^2} \quad (\text{ผ.ค.15})$$

ซึ่ง F = สถิติทดสอบ

b = ค่าประมาณของ β_1

SS_{xy} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.10)

และ S^2 = ค่าแปรปรวน

จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{1-\alpha; n-2}$

ค. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย

$$Z = \frac{b\sqrt{SS_{xx}}}{S} \quad (\text{ผ.ค.16})$$

ซึ่ง Z = สถิติทดสอบ
 b = ค่าประมาณของ β_1
 SS_{xx} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.9)
และ S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}; n-2}$ ซึ่งไม่ว่าจะใช้สถิติทดสอบใดก็ตาม ผลการทดสอบจะต้องเหมือนกัน

7.1.6. การหาช่วงความเชื่อมั่นความถดถอย

การประมาณค่าแบบจุดที่กล่าวมาแล้วนั้น จะมีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถให้ค่าที่แท้จริงของพารามิเตอร์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากว่าตัวประมาณค่าซึ่งเป็นตัวสถิติจะมีค่าที่ไม่แน่นอนเสมอ จึงควรมีการเพิ่มสารสนเทศเกี่ยวกับพารามิเตอร์ด้านการกำหนดค่าประมาณของพารามิเตอร์ให้อยู่ในช่วงที่มีความเชื่อมั่นว่าจะครอบคลุมค่าที่แท้จริงของพารามิเตอร์ ตัวอย่างเช่น ในการทดลองหาค่าจุดคลากของเหล็กเส้นกลมขนาด 9 mm ยี่ห้อหนึ่ง 10 เส้น ได้ค่าเฉลี่ยจุดคลากเท่ากับ 2490 kg/cm^2 แต่หากมีการทดสอบซ้ำอีกด้วยเงื่อนไขเดิมทุกประการ ค่าเฉลี่ยของจุดคลากอาจมีค่าไม่เท่าเดิม สิ่งที่ผู้ทดสอบควรให้ความสนใจคือค่าแตกต่างจากสาเหตุด้านรีโพรคิวซิวิตีของการทดลองนี้ควรมีค่าเท่าใด เช่น ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% อธิบายในรูปความถี่ได้ว่า หากมีการทดลองภายใต้การควบคุม 100 ครั้งแล้ว ในจำนวนการทดลอง 95 ครั้งในช่วงประมาณจะครอบคลุมค่าที่แท้จริงของพารามิเตอร์และอีก 5 ครั้งในช่วงประมาณมิได้ครอบคลุมค่าที่แท้จริงของพารามิเตอร์

การประมาณค่าของ Y แบบช่วงเมื่อกำหนดค่า X ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ เมื่อจำนวน ตัวอย่าง (n) มากกว่า 30 ตัวอย่าง คือ

$$\hat{Y}_i \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SS_{xx}}\right]} \quad (\text{ผ.ค.17})$$

- ซึ่ง \hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i
 Z = พื้นที่ใต้เส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ
 S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 n = จำนวนตัวอย่าง
 \bar{x} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระ
 x_i = ตัวแปรอิสระ
และ SS_{xx} = ค่าที่ได้จากสมการ (ผ.ค.9)

ข้อจำกัดในการพยากรณ์ค่า Y เมื่อกำหนดค่า X

เมื่อกำหนดค่า $X = X_i$ เราสามารถพยากรณ์ค่า \hat{Y}_i โดยใช้สมการ ดังนี้

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (\text{ผ.ค.5})$$

แต่การใช้สมการ (ผ.ค.5) พยากรณ์ค่า Y ได้นั้น จะต้องให้ค่า X อยู่ในช่วงของข้อมูลตัวอย่าง ที่นำมาคำนวณหาค่า a และ b เพื่อสร้างสมการถดถอย ดังนั้นถ้าค่า X ที่กำหนดให้เพื่อพยากรณ์ค่า Y อยู่นอกช่วงของค่าตัวอย่างของ X ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y อาจจะไม่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเดียวกันกับ กรณีที่ X อยู่ในช่วงของข้อมูลตัวอย่าง ในรูปทั่วไป ค่าข้อมูลตัวอย่างของ X ที่นำมาหาค่า a และ b ในสมการ $\hat{Y}_i = a + bX_i$ เป็นค่าที่อยู่ในช่วง $[c, d]$ การพยากรณ์ค่า Y โดยกำหนดค่า X นั้น ค่า X ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $[c, d]$ จึงใช้สมการ $\hat{Y}_i = a + bX_i$ ได้ แต่ถ้า $X < c$ หรือ $X > d$ จะไม่สามารถใช้สมการ $Y_i = a + bX_i$ ได้ เนื่องจากเมื่อ $X < c$ หรือ $X > d$ ความสัมพันธ์อาจจะไม่ได้อยู่ในรูป $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$ ซึ่งอาจทำให้ค่าประมาณเชื่อถือไม่ได้

7.2. การวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน

ก. การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการความถดถอยเชิงซ้อน

$$\hat{Y}_i = a + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} \quad (\text{ผ.ค.18})$$

ซึ่ง \hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i

a = ส่วนตัดแกน \hat{Y}_i เมื่อ $X_{1i} = X_{2i} = 0$

b_1 = ค่าที่แสดงถึงค่า \hat{Y}_i ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่า X_{1i} มีการเปลี่ยนแปลง

b_2 = ค่าที่แสดงถึงค่า \hat{Y}_i ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่า X_{2i} มีการเปลี่ยนแปลง

X_{1i} = ตัวแปรอิสระตัวที่ 1

และ X_{2i} = ตัวแปรอิสระตัวที่ 2

สามารถหาค่า a , b_1 และ b_2 ได้จากการแก้สมการ

$$na + b_1 \sum x_{1i} + b_2 \sum x_{2i} = \sum y_i \quad (\text{ผ.ค.19})$$

$$a \sum x_{1i} + b_1 \sum x_{1i}^2 + b_2 \sum x_{1i} x_{2i} = \sum x_{1i} y_i \quad (\text{ผ.ค.20})$$

$$a \sum x_{2i} + b_1 \sum x_{1i} x_{2i} + b_2 \sum x_{2i}^2 = \sum x_{2i} y_i \quad (\text{ผ.ค.21})$$

$$SST = SSR + SSE \quad (\text{ผ.ค.22})$$

ซึ่ง SST = ค่าแปรปรวนทั้งหมดของ Y

SSR = ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ X_1 และ X_2

และ SSE = ค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม

$$SST = \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \quad (\text{ผ.ค.23})$$

ซึ่ง SST = ค่าแปรปรวนทั้งหมดของ Y

Y_i = ตัวแปรตาม

และ n = จำนวนตัวอย่าง

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{ผ.ค.24})$$

ซึ่ง SSE = ค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม

Y_i = ตัวแปรตาม

และ \hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i

ข. การประมาณค่าคลาดเคลื่อนของความถดถอย

$$S^2 = \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-3} \quad (\text{ผ.ค.25})$$

ซึ่ง S^2 = ค่าแปรปรวนของการประมาณ

Y_i = ตัวแปรตาม

\hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i

และ n = จำนวนตัวอย่าง

ค. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (\text{ผ.ค.26})$$

ซึ่ง R^2 = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน

SSE = ค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม

และ SST = ค่าแปรปรวนทั้งหมดของ Y

การประมาณค่าของ Y แบบช่วงเมื่อกำหนดค่า X_1 และ X_2 ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ เมื่อจำนวน ตัวอย่าง (n) มากกว่า 30 ตัวอย่าง คือ

$$\hat{Y} \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{1 + m_0' (M'M)^{-1} m_0} \quad (\text{ผ.ค.27})$$

- ซึ่ง \hat{Y}_i = ค่าประมาณของ Y_i
 Z = พื้นที่ใต้เส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ
 S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$m_0' = [1 \quad x_1 \quad x_2]$$

$$m_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{bmatrix}$$

$$\text{และ } M' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \end{bmatrix}$$

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\lambda_{1-\frac{\alpha}{2}}}} < \sigma < \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\lambda_{\frac{\alpha}{2}}}} \quad (\text{ผ.ค.3})$$

- ซึ่ง S^2 = ค่าแปรปรวนของตัวอย่าง
 λ = พื้นที่ใต้เส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบโคสเคอร์
 α = ระดับนัยสำคัญ
 n = จำนวนตัวอย่าง

จะได้ ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สามารถประมาณค่าแปรปรวนของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

$$\sqrt{\frac{(30-1)(0.436)^2}{45.72}} < \sigma < \sqrt{\frac{(30-1)(0.436)^2}{16.05}} \quad (\text{ผ.ง.2})$$

$$0.347 < \sigma < 0.586$$

∴ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ค่าแปรปรวนของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.347 – 0.586%

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต

2.1. การคำนวณหาสมการที่ถดถอย

กำหนดให้ Y เป็นค่าของกำลังอัดของคอนกรีต (kg/cm^2) X เป็นค่าของความเร็วคลื่นที่วิ่งผ่านคอนกรีต หน่วย กม./วินาที เนื่องจากค่าของ Y มีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับค่าของ X และ X กับ Y มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง จึงกำหนดให้มาตรฐานในแกน Y และแกน X อยู่ในมาตราส่วนล็อกกาลิทึม เพื่อให้ค่าของ $\log X$ และ $\log Y$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จะได้

$$Y' = \log Y$$

$$X' = \log X$$

จากข้อมูลการทดลอง คำนวณเบื้องต้นได้ว่า

$$\sum x' = 115.8962, \quad \bar{x}' = 0.6622, \quad \sum x'^2 = 76.8000$$

$$\sum y' = 438.7037, \quad \bar{y}' = 2.5069, \quad \sum y'^2 = 1103.1173, \quad \sum x'y' = 290.8891$$

ในการหาค่าตัวประมาณพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 จะได้จากการคำนวณ SS_{xx} และ SS_{xy} โดย

$$SS_{xx} = \sum x'^2 - \frac{(\sum x')^2}{n} \quad (\text{ผ.ท.9})$$

$$= 76.80005 - \frac{(115.89622)^2}{175}$$

$$= 0.04614$$

$$\text{และ } SS_{xy} = \sum x'y' - \frac{\sum x' \sum y'}{n} \quad (\text{ผ.ท.10})$$

$$= 290.88909 - \frac{(115.89622)(438.7037)}{175}$$

$$= 0.305137$$

$$\text{ดังนั้น } b = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} = \frac{0.305137}{0.04614} = 7.61386$$

$$\text{และ } a = \bar{y}' - b\bar{x}'$$

$$= 2.5069 - 7.61386 \times 0.66226$$

$$= -2.53551$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $\hat{Y}' = -2.53551 + 7.61386X'$

(ผ.จ.3)

$$\hat{Y}' = \log \hat{Y} = -2.53551 + 7.61386 \log X$$

หรือ $\hat{Y} = 10^{(-2.53551 + 7.61386 \log X)}$

$$= 10^{-2.53551} \times 10^{7.61386 \log X}$$

$$\hat{Y} = 0.00291X^{7.61386}$$

จาก $R^2 = b \frac{SS_{xy'}}{SS_{y'y'}}$ (ผ.ก.13)

$$SS_{y'y'} = \sum y'^2 - \frac{(\sum y')^2}{n}$$
 (ผ.ก.11)

$$SS_{y'y'} = 1103.1173 - \frac{(438.7037)^2}{175}$$

$$SS_{y'y'} = 3.3405$$

$$R^2 = 7.61386 \times \frac{0.35137}{3.3405}$$

$$R^2 = 0.80086$$
 (ผ.จ.4)

$$\therefore R = \sqrt{R^2} = 0.8949$$
 (ผ.จ.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานเป็นการทดสอบว่า X' และ Y' มีความสัมพันธ์กันหรือไม่

สมมติฐาน

$H_0 : \beta_1 = 0$ หรือ $H_0 : X'$ และ Y' ไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ หรือ $H_1 : X'$ และ Y' มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

มีวิธีการทดสอบ 3 วิธี

กรณีตัวอย่างขนาดใหญ่ ($n \geq 30$)

ก. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

สถิติทดสอบ
$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{(1-R^2)}{(n-2)}}}$$
 (ผ.ก.14)

จะได้
$$Z = \frac{0.8949}{\sqrt{\frac{(1-0.80086)}{(175-2)}}}$$

$$Z = 26.3765$$

ซึ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$), $Z_{0.975} = 1.96$

\therefore จะปฏิเสธ H_0 เพราะ $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 26.3765 > 1.96$

ข. ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

$$\text{สถิติทดสอบ } F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{b(SS_{xy'})}{S^2} \quad (\text{ผ.ค.15})$$

$$F = \frac{(7.61386)(0.35137)}{0.00384}$$

$$F = 696.688$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$), $F_{0.95;1,173} = 3.84$

\therefore จะปฏิเสธ H_0 เพราะ $F > F_{1-\alpha;n-2} = 696.688 > 3.84$

ค. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย

$$\text{สถิติทดสอบ } Z = \frac{b\sqrt{SS_{xx}}}{S} \quad (\text{ผ.ค.16})$$

$$\text{จะได้ } Z = \frac{(7.61386)\sqrt{0.0462}}{0.06197} = 26.4095$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

\therefore จะปฏิเสธ H_0 เพราะ $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2};n-2} = 26.4095 > 1.96$

จากการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อสรุปได้ว่า X' ($\log X'$) และ Y' ($\log Y$) มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง หรือ $\hat{Y}' = \log \hat{Y} = a + b \log X$

ก. การประมาณค่าคลาดเคลื่อนของความถดถอย

$$S^2 = \frac{SSE}{n-2} = \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2} \quad (\text{ผ.ก.25})$$

จากผลการทดลองจะได้

$$= \frac{470638.4}{175-2} = 2720.453$$

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{2720.453} = 52.158$$

ง. การหาช่วงความเชื่อมั่นความถดถอย

การประมาณค่าของ Y แบบช่วงเมื่อกำหนดค่า X เมื่อจำนวนตัวอย่าง (n) มากกว่า 30

ตัวอย่าง

$$\hat{Y}_i \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SS_{xx}}\right\}} \quad (\text{ผ.ก.17})$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะได้

$$\hat{Y}' = -2.53551 + 7.61386X' \pm 1.96 \times 0.06197 \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{175} + \frac{(x' - \bar{x}')^2}{0.04614}\right\}} \quad (\text{ผ.ก.6})$$

$$\log \hat{Y} = -2.53551 + 7.61386 \log X \pm 1.96 \times 0.06197 \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{175} + \frac{(\log X - 0.6622)^2}{0.04614}\right\}} \quad (\text{ผ.ก.7})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าริบาวนกับกำลังอัดคอนกรีต

3.1. การคำนวณหาสมการที่ถดถอย

กำหนดให้ Y เป็นค่าของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน หน่วย kg/cm^2
 X เป็นค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือชนิดที่สามเมอร์ เนื่องจากค่าของ Y มีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับค่าของ X และ X กับ Y มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง จึงกำหนดให้มาตรฐานในแกน Y และ X อยู่ในมาตราส่วนล็อกกาลิทึม เพื่อให้ค่าของ $\log X$ และ $\log Y$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จะได้

$$Y' = \log Y$$

$$X' = \log X$$

จากข้อมูลการทดลอง คำนวณเบื้องต้นได้ว่า

$$\sum x' = 263.16977, \quad \bar{x}' = 1.50383, \quad \sum x'^2 = 398.00697$$

$$\sum y' = 438.7037, \quad \bar{y}' = 2.5069, \quad \sum y'^2 = 1103.1173, \quad \sum x'y' = 661.90477$$

ในการหาค่าตัวประมาณพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 จะได้จากการคำนวณ SS_{xx} และ SS_{xy} โดย

$$SS_{x'x'} = \sum x'^2 - \frac{(\sum x')^2}{n} \quad (\text{ผ.ท.9})$$

$$= 398.00697 - \frac{(263.16977)^2}{175}$$

$$= 2.245096$$

$$\text{และ } SS_{x'y'} = \sum x'y' - \frac{\sum x' \sum y'}{n} \quad (\text{ผ.ท.10})$$

$$= 661.90477 - \frac{(263.16977)(438.7037)}{175}$$

$$= 2.17011$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } b = \frac{SS_{xy'}}{SS_{xx}} = \frac{2.17011}{2.245096} = 0.96665$$

$$\text{และ } a = \bar{y}' - b\bar{x}$$

$$= 2.5069 - 0.96665 \times 1.50383$$

$$= 1.0532$$

$$\text{ดังนั้น } \hat{Y}' = \log \hat{Y} = 1.0532 + 0.96665X'$$

$$= 1.0532 + 0.96665 \log X$$

$$\text{หรือ } \hat{Y} = 10^{(1.0532 + 0.96665 \log X)}$$

$$\hat{Y} = 10^{1.0532} \times 10^{0.96665 \log X}$$

$$= 11.30316X^{0.96665}$$

$$\text{จาก } R^2 = b \frac{SS_{xy'}}{SS_{y'y'}} \quad (\text{ผ.ท.13})$$

$$SS_{y'y'} = \sum y'^2 - \frac{(\sum y')^2}{n} \quad (\text{ผ.ท.11})$$

$$SS_{y'y'} = 1103.1173 - \frac{(438.7037)^2}{175}$$

$$SS_{y'y'} = 3.3405$$

$$R^2 = 0.96665 \times \frac{2.17011}{3.3405} \quad (\text{ผ.ท.8})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R^2 = 0.62797$$

(ผ.ง.9)

3.2. การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานเป็นการทดสอบว่า X' และ Y' มีความสัมพันธ์กันหรือไม่

สมมติฐาน

$H_0 : \beta_1 = 0$ หรือ $H_0 : X'$ และ Y' ไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ หรือ $H_1 : X'$ และ Y' มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

มีวิธีการทดสอบ 3 วิธี

กรณีตัวอย่างขนาดใหญ่ ($n \geq 30$)

ก. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

สถิติทดสอบ $Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{(1-R^2)}{(n-2)}}}$ (ผ.ค.14)

จะได้ $Z = \frac{0.792}{\sqrt{\frac{(1-0.628)}{(175-2)}}}$

$$Z = 17.089$$

ซึ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$), $Z_{0.975} = 1.96$

\therefore จะปฏิเสธ H_0 เพราะ $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 17.089 > 1.96$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

สถิติทดสอบ $F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{b(SS_{xy})}{S^2}$ (ผ.ก.15)

$$F = \frac{(0.96665)(2.17011)}{0.007184}$$

$$F = 292.00$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$), $F_{0.95;1,173} = 3.84$

\therefore จะปฏิเสธ H_0 เพราะ $F > F_{1-\alpha;n-2} = 292.00 > 3.84$

ค. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย

สถิติทดสอบ $Z = \frac{b\sqrt{SS_{xx}}}{S}$ (ผ.ก.16)

$$\text{จะได้ } Z = \frac{(0.96665)\sqrt{2.2451}}{0.08475}$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

\therefore จะปฏิเสธ H_0 เพราะ $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2};n-2} = 17.09 > 1.96$

จากการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อสรุปได้ว่า X' ($\log X$) และ Y' ($\log Y$) มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือ

$$\hat{Y}' = \log \hat{Y} = 1.0532 + 0.96665X'$$

$$= 1.0532 + 0.96665 \log X$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{Y} = 10^{(1.0532 + 0.96665 \log X)}$$

$$\hat{Y} = 10^{1.0532} \times 10^{(0.96665 \log X)}$$

$$\hat{Y} = 11.30316X^{0.96665}$$

จ. การประมาณค่าคลาดเคลื่อนของความถดถอย

$$S^2 = \frac{SSE}{n-2} = \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2} \quad (\text{ผ.ก.12})$$

จากผลการทดลองจะได้

$$S^2 = \frac{70064.447}{175-2} = 4046.615$$

$$S = \sqrt{S^2} = 63.613$$

ฉ. การหาช่วงความเชื่อมั่นความถดถอย

การประมาณค่าของ Y แบบช่วงเมื่อกำหนดค่า X เมื่อจำนวนตัวอย่าง (n) มากกว่า 30

ตัวอย่าง

$$\hat{Y}_i \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SS_{xx}}\right\}} \quad (\text{ผ.ก.17})$$