



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา	วิศวกรรมโยธา
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรีบา운드แฮมเมอร์และวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี
	Estimation of Compressive Strength of Concrete in Existing Structure by Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity Methods
นามผู้วิจัย	นายพีรเกียรติ ส้าราญ
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
ประธานกรรมการ	(..... รองศาสตราจารย์สมโพธิ วิวิธเกียรติวงศ์, Ph.D.)
กรรมการ	(..... อาจารย์สมศักดิ์ โชติชนาทวีวงศ์, M.Eng.)
กรรมการ	(..... รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนันทน์, D.Eng.)
หัวหน้าภาควิชา	(..... รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทร์วางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์
และวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

Estimation of Compressive Strength of Concrete in Existing Structure by Rebound Hammer
and Ultrasonic Pulse Velocity Methods

โดย

นายพีรเกียรติ์ สํารานู

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

พีรเกียรติ สำราญ 2553: การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรืบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สมโพธิ วิวิชเยรูวงศ์, Ph.D. 94 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อ เสนอสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะยัดรีงและมีหน่วยแรงอัดภายใน จากผลการทดสอบโดยวิธีรืบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีร่วมกันในสนาม โดยปรับแก้จากสมการประเมินกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. จำนวน 1920 ตัวอย่าง ดังนี้ $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.322$

การวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบชิ้นส่วน โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีรืบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี จำนวน 18 ตำแหน่ง จำแนกเป็น เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหกตำแหน่ง คานคอนกรีตเสริมเหล็กหกตำแหน่ง และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหกตำแหน่ง เพื่อหาค่าเลขจำนวนรืบาวน์และค่าความเร็วคลื่นอุลตราโซนิคส์ จากนั้นทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตในตำแหน่งที่ได้ทดสอบโดยวิธีรืบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีเพื่อนำมาหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน การปรับแก้สมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์ในห้องทดลองมาเป็นสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะยัดรีงและมีหน่วยแรงอัดภายใน ทำให้ได้โดยการแทนค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน(CST) และค่าเลขจำนวนรืบาวน์ของเครื่องซมิคท์แฮมเมอร์ที่ใช้ทดสอบที่ปรับเทียบมาเป็นเลขจำนวนรืบาวน์(RHT)ในสมการข้างต้น

สมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะยัดรีงและมีหน่วยแรงอัดภายใน จากการทดสอบโดยวิธีรืบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีร่วมกัน มีดังนี้ สำหรับ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก : $LN(CST) = 0.3110k_1 * UPVT + 0.03209k_{21}k_{22} * RHT + 2.978$, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก : $LN(CST) = 0.3110k_1 * UPVT + 0.03209k_{21}k_{22} * RHT + 3.055$ และ พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก : $LN(CST) = 0.3110k_1 * UPVT + 0.03209k_{21}k_{22} * RHT + 3.124$ โดย CST หมายถึง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่ประเมินได้ , UPVT หมายถึง ค่าอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีจากการทดสอบ และ RHT หมายถึง ค่าเลขจำนวนรืบาวน์ที่ปรับเทียบมาจากเครื่องซมิคท์แฮมเมอร์ที่ใช้ทดสอบ

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Pirakiat Sumran 2010: Estimation of Compressive Strength of Concrete in Existing Structure by Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity Methods. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sompothi Vivithkeyoonvong, Ph.D. 94 pages.

The objective of this research is to present equations for estimation of compressive strength of concrete structures which are restrained and stressed internally by the use of rebound hammer and ultrasonic pulse velocity methods. They were modified from the equation, which estimates compressive strength of concrete, resulted from the tests of 1920 – 15 x 15 x 15 cm. concrete cubes namely, $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.322$

This research had performed Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity tests for 18 spots in existing reinforced concrete structures. There were 6 spots in columns, 6 spots in beams and 6 spots in slabs. After the tests, the concrete samples were drilled out to find compressive strengths by standard compression test. The equations for estimation of compressive strength of concrete structures were obtained by substitute the compressive strength of concrete samples (CST) and the calibrated rebound numbers (RHT) into the above equation.

The equations for estimation of compressive strength of concrete in existing structures which are restrained and stressed internally by the Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity methods are : $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 2.987$ for reinforced concrete column, $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.055$ for reinforced concrete beam and $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.124$ for reinforced concrete slab. Where CST is compressive strength of concrete structure. UPVT is ultrasonic pulse velocity and RHT is rebound number from calibrated Schmidt Hammer.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สมโพธิ วิวิธเกยูรวงศ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และคณะกรรมการอันประกอบไปด้วยอาจารย์ สมศักดิ์ โชติชนาทวีวงศ์ กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ศุภกิจ นนทนันทน์ กรรมการวิชาการ ที่กรุณาให้คำชี้แนะ ปรึกษา ตลอดจนแก้ไขปรับปรุงรูปแบบวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จ ลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณความห่วงใยจากสมาชิกในครอบครัวและภรรยาที่ให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท วอเตอร์ ดีเวลล์ฟเมนท์ คอนซัลแต้นส์ กรุ๊ป จำกัด ที่ได้ส่งเสริมการศึกษา และขอขอบคุณ คุณสุรชัย เกษียรธาดานนท์ คุณอาริยะ พิภพทอง คุณศรารุณี ยอดมณี คุณปฏิมา ปรมาพจน์ ตลอดจนพี่ๆ และเพื่อนๆ ร่วมงานทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการศึกษาครั้งนี้

คุณความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ นายเกษม สำราญ และนางปิยพร สำราญ ผู้ให้กำเนิด ให้สติปัญญา ความรู้ความสามารถ กำลังใจ และทุนในการศึกษาวิจัย คณาจารย์ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ติดตามประสานงาน ช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงอย่างสมบูรณ์

พีรเกียรติ สำราญ

เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	10
อุปกรณ์	10
วิธีการ	11
ผลและวิจารณ์	55
ผลการศึกษา	55
วิจารณ์	75
สรุปและข้อเสนอแนะ	78
สรุป	78
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	83
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	94

สารบัญตาราง

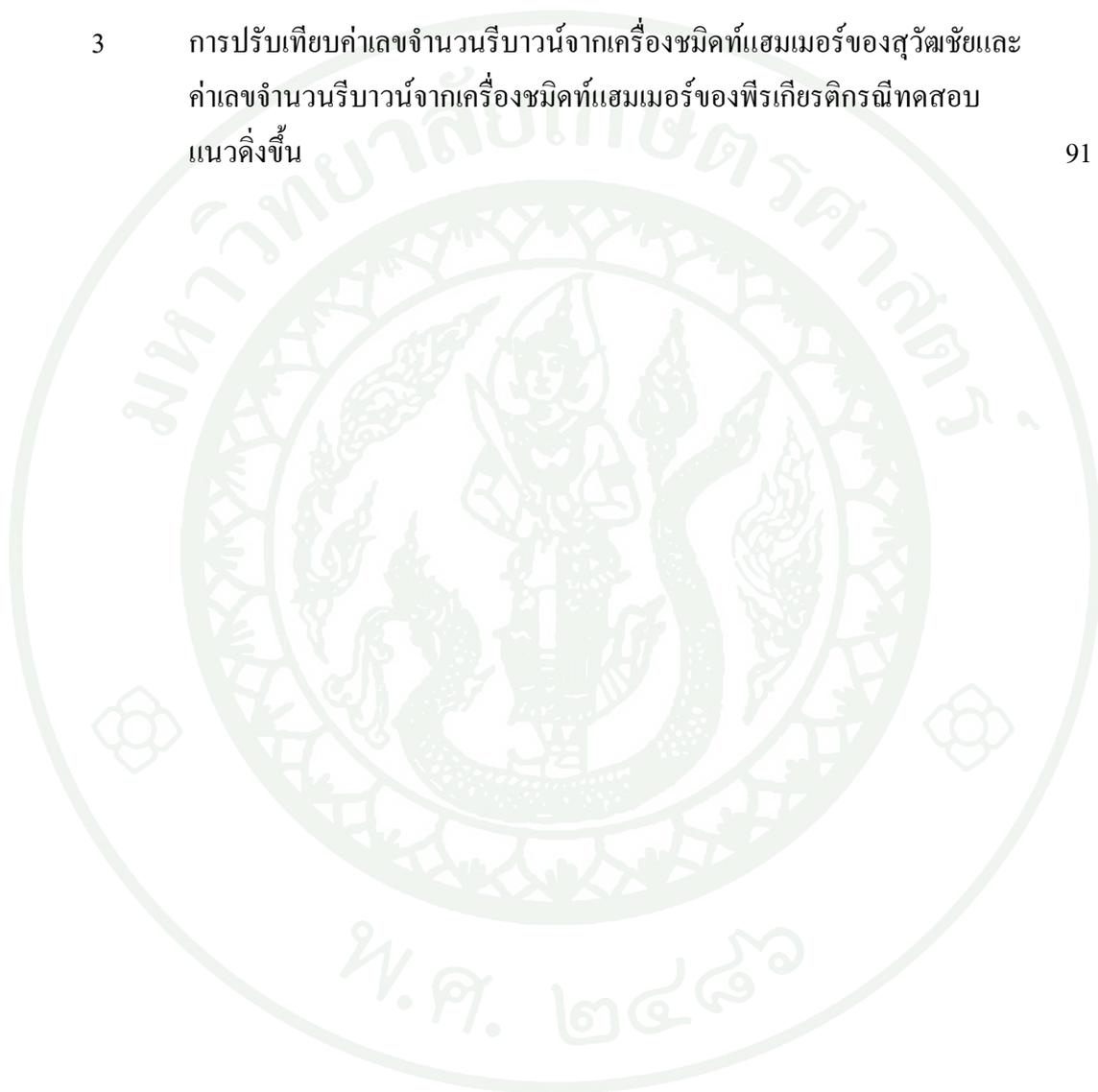
ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งคุณภาพของคอนกรีตจากความเร็วคลื่น	16
2	เลขจำนวนริบาวาน์(ทดสอบแนวตั้งลง)กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มประจำเครื่องทดสอบของ สุวัฒชัยและพีรเกียรติ	18
3	เลขจำนวนริบาวาน์(ทดสอบแนวราบ)กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มประจำเครื่องทดสอบของ สุวัฒชัยและพีรเกียรติ	19
4	เลขจำนวนริบาวาน์(ทดสอบแนวตั้งขึ้น)กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มประจำเครื่องทดสอบของ สุวัฒชัยและพีรเกียรติ	21
5	ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20 x 0.40 x 2.00 ม. โดยวิธีอุตตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี	32
6	ผลของขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีต่อกำลังรับแรงอัด	52
7	ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด	52
8	ค่าปรับเทียบเนื่องจากอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายในและแนวการทดสอบ โดยวิธีริบาวาน์แฮมเมอร์	54
9	ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้าง โดยวิธีอุตตราโซนิกพัลส์ เวโลซิตี	56
10	ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้าง โดยวิธีอุตตราโซนิก พัลส์เวโลซิตี	57
11	ผลการทดสอบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้าง โดยวิธีอุตตราโซนิกพัลส์ เวโลซิตี	58
12	ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้าง โดยวิธีริบาวาน์แฮมเมอร์	59
13	ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้าง โดยวิธีริบาวาน์แฮมเมอร์	61
14	ผลการทดสอบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้าง โดยวิธีริบาวาน์แฮมเมอร์	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	การปรับแก้ค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากการทดลองของพีรเกียรติเป็นค่าเลขจำนวนรีบาวน์ในสมการของสุวัฒน์ชัย(2542)	65
16	ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่คำนวณได้จากสมการของสุวัฒน์ชัย $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.322$	66
17	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน	67
18	การปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตตัวอย่างตามขนาดของแท่งตัวอย่าง	68
19	ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการของสุวัฒน์ชัย	69
20	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและการปรับแก้ค่าคงที่(C) ในสมการ $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + C$	73
21	การปรับแก้ค่าคงที่(C) $LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + C$	74
ตารางผนวกที่		
1	การปรับเทียบค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชมิคท์แฮมเมอร์ของสุวัฒน์ชัยและค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชมิคท์แฮมเมอร์ของพีรเกียรติกรณีทดสอบแนวคั้งลง	85
2	การปรับเทียบค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชมิคท์แฮมเมอร์ของสุวัฒน์ชัยและค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชมิคท์แฮมเมอร์ของพีรเกียรติกรณีทดสอบแนวราบ	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
3	การเปรียบเทียบค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่แฮมเมอร์ของสุวัฒชัยและ ค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่แฮมเมอร์ของพีรเกียรติกรณิทดสอบ แนวคั้งขึ้น	91



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วิธีการทดสอบอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี(Ultrasonic Pulse Velocity)	13
2	การทดสอบหาความเร็วคลื่นอุลตราโซนิก(Ultrasonic Pulse) ด้วยวิธีอินไดเรกทรานมิชชั่น(Indirect Transmission)	15
3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาว์ทดสอบแนวตั้ง ลงกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จาก กราฟของกลุ่มประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ	23
4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาว์ทดสอบแนวราบ กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จาก กราฟของกลุ่มประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ	24
5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาว์ทดสอบแนวตั้ง ขึ้นกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จาก กราฟของกลุ่มประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ	25
6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาว์ของพีรเกียรติและ เลขจำนวนริบาว์ของสุวัฒชัยกรณีทดสอบแนวตั้งลง	26
7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาว์ของพีรเกียรติและ เลขจำนวนริบาว์ของสุวัฒชัยกรณีทดสอบแนวราบ	27
8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาว์ของพีรเกียรติและ เลขจำนวนริบาว์ของสุวัฒชัยกรณีทดสอบแนวตั้งขึ้น	28
9	คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 x 40 x 200 ซม.	30
10	รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งที่ทำการทดสอบ อุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีของเครื่องมือทดสอบ PUNDIT	31
11	การสกัดผิวปูนฉาบออกจากเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ	34
12	การขัดผิวคอนกรีตที่จะทำการทดสอบให้เรียบ	35
13	การใช้เครื่องกำหนดตำแหน่งทดสอบ เพื่อให้ตำแหน่งทดสอบตรงกัน	36
14	การทดสอบอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างเสาคอนกรีต	37
15	การทดสอบอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างคานคอนกรีต	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	การทดสอบอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างพื้นคอนกรีต	39
17	การใช้เครื่องมือชมิคแฮมเมอร์(Schmidt hammer) ทดสอบโครงสร้างเสาคอนกรีต	41
18	การใช้เครื่องมือชมิคแฮมเมอร์(Schmidt hammer) ทดสอบโครงสร้างคานคอนกรีต	42
19	การใช้เครื่องมือชมิคแฮมเมอร์(Schmidt hammer) ทดสอบโครงสร้างพื้นคอนกรีต	43
20	การเจาะโครงสร้างเสาคอนกรีต	45
21	การเจาะโครงสร้างคานคอนกรีต	46
22	การเจาะโครงสร้างพื้นคอนกรีต	47
23	การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งตัวอย่างคอนกรีต	48
24	การตัดแท่งคอนกรีตตัวอย่างโดยเครื่องตัดไฟเบอร์	49
25	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด(Hydraulic testing machine)	50
26	การหาลำดับรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง	51
27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนเสา คอนกรีตจากวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและจากสมการ $LN(CST) = 0.3110 \cdot k_1 \cdot UPVT + 0.03209 \cdot k_{21} \cdot k_{22} \cdot RHT + 3.322$	70
28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนคาน คอนกรีตจากวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและจากสมการ $LN(CST) = 0.3110 \cdot k_1 \cdot UPVT + 0.03209 \cdot k_{21} \cdot k_{22} \cdot RHT + 3.322$	71
29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนพื้น คอนกรีตจากวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและจากสมการ $LN(CST) = 0.3110 \cdot k_1 \cdot UPVT + 0.032090 \cdot k_{21} \cdot k_{22} \cdot RHT + 3.322$	72

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CST	=	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่ประเมินได้
UPVT	=	ค่าอุลตราโซนิกพัลส์วโลซิติ์จากการทดสอบ
RHT	=	ค่าเลขจำนวนรีบาวน์ที่เปรียบเทียบมาจากเครื่องชนิดท์แฮมเมอร์ที่ใช้ทดสอบ
k_1	=	ค่าปรับแก้ค่า UPVT เมื่อตัวอย่างทดสอบมีหน่วยแรงอัดภายในขณะทดสอบ
k_{21}	=	ค่าปรับแก้เลขจำนวนรีบาวน์เนื่องจากอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายใน
k_{22}	=	ค่าปรับแก้เลขจำนวนรีบาวน์เนื่องจากอิทธิพลของแนวแนวการทดสอบ

การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ และวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี

Estimation of Compressive Strength of Concrete in Existing Structure by Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity Methods

คำนำ

การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นวิธีการที่แพร่หลายและได้รับการยอมรับในหลายๆประเทศ เพราะเป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำความเสียหายต่อชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ถูกทดสอบ วิธีการทดสอบไม่ยุ่งยาก มีความสะดวก รวดเร็ว และเป็นวิธีที่ให้ผลในการคาดหมายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในระดับที่น่าพอใจ การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้ประเมินกำลังของคอนกรีตในการวิจัยนี้จะใช้วิธีรีบาวน์แฮมเมอร์(rebound hammer) และวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี(ultrasonic pulse velocity)ร่วมกัน ซึ่งมีผลรายงานจากการวิจัยทั้งในและต่างประเทศว่าเป็นวิธีที่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยทั่วไปสามารถแยกออกเป็นสองประเภทดังนี้

1. การทดสอบแบบกึ่งทำลาย(semidestructive test) เช่น การทดสอบแบบพูลเอ้าท์(pull out test), การทดสอบแบบพูลออฟ(pull off test) และการทดสอบแบบเบรก-ออฟ(break-off test) เป็นต้น
2. การทดสอบแบบไม่ทำลาย(nondestructive test) เช่น การทดสอบความแข็งของผิว (surfaces hardness test), การทดสอบแบบอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี(ultrasonic pulse velocity test) และการทดสอบแบบอัลตราโซนิคพัลส์แอทเทนนูเอชัน(ultrasonic pulse attenuation test) เป็นต้น

การทดสอบทั้งสองประเภทมีข้อจำกัดหลายประการที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต(Malhotra,1984) ดังนี้คือ คุณสมบัติของวัสดุผสม

(properties) เช่น ชนิดของซีเมนต์, ชนิดของวัสดุผสม และวัสดุผสมเพิ่ม, ปริมาณฟองอากาศ เป็นต้น สัดส่วนผสม(proportion) เช่น ปริมาณซีเมนต์, อัตราส่วนซีเมนต์ต่อวัสดุผสม และขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ เป็นต้น การบ่ม(curing) เช่น อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น

วิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี(Malhotra,1984) จะใช้ได้ผลดีเมื่อใช้ในการทดสอบความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ แต่ยังมีปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีนี้ เช่น รอยร้าวในเนื้อคอนกรีต, การจัดวางตำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตฯ ส่วนวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์เป็นวิธีที่ทำการทดสอบได้ง่ายกว่า แต่ผลการทดสอบจะมีความกระจัดกระจายมากกว่าเนื่องจากปัจจัยบางประการ เช่น ความเรียบของผิวคอนกรีต, ความแข็งของผิวคอนกรีต, ตำแหน่งที่กด ตลอดจนสภาพการยัดตัวของวัสดุทดสอบและผลของหน่วยแรงภายในเนื้อคอนกรีต ส่วนความชื้นในคอนกรีตจะไม่มีผลต่อการทดสอบโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ แต่จะมีผลต่อการทดสอบโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี ซึ่งค่าพัลส์เวโลซิตีจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในคอนกรีตมากขึ้น

จากความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ได้มีการรวมการทดสอบแบบไม่ทำลายทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ได้ผลดีขึ้น มีการทดสอบแบบไม่ทำลายร่วมกันหลายวิธี แต่ผลการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการรวมวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีและวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์จะให้ค่าความน่าเชื่อถือมากที่สุด

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือ จัดตั้งสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะยึดรั้งและมีหน่วยแรงอัดภายใน จากผลการทดสอบโดยวิธีริบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีร่วมกัน โดยปรับแก้จากสมการประเมินกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบกับคอนกรีตรูปทรงแปดเหลี่ยม

ขอบเขตการศึกษา

ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างอาคารที่กำลังใช้งาน หรือผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยวิธีริบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี เสร็จแล้วจึงทำการเจาะ (coring) คอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ทำการทดสอบตามวิธีการข้างต้น เพื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน พร้อมกับจัดตั้งสมการสำหรับประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างต่อไป

ประเภทของโครงสร้างและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

1. พื้นคอนกรีต จำนวน 6 ตัวอย่าง
2. คานคอนกรีต จำนวน 6 ตัวอย่าง
3. เสาคอนกรีต จำนวน 6 ตัวอย่าง

การตรวจเอกสาร

Kollex (1958) ได้สรุปผลการทดสอบกำลังของคอนกรีตโดยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์ว่า ความเรียบของผิวคอนกรีต มีผลต่อค่าของรืาวาน์แฮมเมอร์ คอนกรีตที่หล่อด้วยแบบเหล็กจะมีค่ารืาวาน์แฮมเมอร์ที่สูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อไม้ ประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์

Mitchell และ Hoagland (1961) ได้ทดสอบตัวอย่างแท่งคอนกรีตทรงกระบอกโดยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์ ในสถานะที่มีแรงอัดกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ พบว่าค่าของรืาวาน์แฮมเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงอัดภายในเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ระดับคงที่ เมื่อหน่วยแรงอัดในตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ของกำลังประลัยของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกนั้น และเมื่อทดสอบคอนกรีตตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เช่น คานขนาดเล็ก , ผนัง , แท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. หรือ แท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด ϕ 15 x 30 ซม. โดยไม่มีการยึดครั้งแรกที่ทดสอบด้วยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์จะทำให้ได้ค่ารืาวาน์นัมเบอร์น้อยกว่าในกรณีที่แท่งคอนกรีตมีการยึดครั้งแรก

Malhotra (1976) กล่าวว่า การประเมินการรับกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์ให้ความถูกต้องเพียง 15-20 % ของจำนวนตัวอย่างที่ทดสอบเท่านั้น

Bungey (1984) กล่าวว่า หากเหล็กเสริมวางอยู่ในแนวขนานกับแนวที่ทดสอบ จะทำให้ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบโดยวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโรซิติมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง แต่ถ้าเหล็กเสริมวางอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ทดสอบจะทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาดน้อยลง

Akashi และ Amasaki (1984) ได้กล่าวว่า ค่าดัชนีรืาวาน์ (rebound index) ขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวคอนกรีต แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของคอนกรีต นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับการสัมผัสของเครื่องรืาวาน์แฮมเมอร์ เช่น น้ำหนัก ค่าโมดูลัสอีลาสติคของแฮมเมอร์ ค่าคงที่ของสปริง ขนาดรูปร่างของพลังเกอร์ (plunger) ความเสียดทานระหว่างแฮมเมอร์กับแฮมเมอร์ไกด์บาร์ (hammer guide bar)

Malhotra (1984) กล่าวว่าวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโรซิติ ใช้ได้ผลดีสำหรับหาความสม่ำเสมอของคอนกรีต และใช้สำหรับประมาณกำลังของคอนกรีต แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง พัลส์เวโรซิติ

และกำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆอีกคือ อายุคอนกรีต ความชื้น อัตราส่วนระหว่างวัสดุผสมต่อซีเมนต์ ชนิดของวัสดุผสม และตำแหน่งของเหล็กเสริม

Samarin และ Dhir (1984) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับค่าของความเร็วคลื่นเสียง (pulse velocity) ของคอนกรีตมีผลจากค่าอัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) , ปริมาตรของหินที่มีอยู่ในคอนกรีต (volume fraction) , ขนาดของหิน (maximum size coarse aggregate) , สภาพการป่ม (curing condition) และการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จากค่าของความเร็วเสียง เพียงอย่างเดียวจะให้ค่าความแม่นยำต่ำมาก

Tanigawa (1984) กล่าวว่า การประเมินกำลังของคอนกรีตจะให้ผลถูกต้องเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ และวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี ร่วมกัน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงผลของขนาดของหินในคอนกรีตว่า ที่กำลังรับแรงอัดระดับเดียวกันค่าอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีของคอนกรีตที่มีหินขนาดใหญ่เป็นส่วนผสมจะค่ามากกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยหินที่มีขนาดเล็กกว่า

Swamy และ Al-Hamed (1984) กล่าวว่า คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากัน คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบากว่าจะวัดค่าพัลส์เวโลซิตีได้น้อยกว่าคอนกรีตที่มีน้ำหนักมากกว่าเนื่องจากคอนกรีตที่มีน้ำหนักมากกว่าจะมีความหนาแน่นมากกว่า

Sturup และคณะ (1984) กล่าวว่า ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบโดยวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี และวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน อาจให้ค่าที่ไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากรอยแตกหรือโพรงในคอนกรีต ซึ่งเกิดจากการผสมและเทคอนกรีต แต่ยังสามารถนำไปใช้ประเมินกำลังคอนกรีตในโครงสร้างได้ผลใกล้เคียง

Malhotra และ Carino (1991) ได้กล่าวไว้ว่า หน่วยแรงภายในเนื้อคอนกรีตจะมีผลต่อการทดสอบโดยวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี เมื่อหน่วยแรงภายในเพิ่มขึ้นถึงระดับประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังรับแรงอัดประลัย หรือมากกว่า ทั้งนี้เพราะตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบอาจเกิดรอยแตกขนาดเล็กภายในเนื้อคอนกรีต (micro crack) และจะเป็นผลทำให้ค่าพัลส์เวโลซิตีที่ทดสอบได้มีค่าลดลง

สมโพธิ์ และทานิกาวา (2535) ได้ทำการทดสอบคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. จำนวน 180 ตัวอย่างโดยวิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตี วิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ในแนวตั้งลง วิธีฟูลอพอและวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน โดยตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกระหว่าง 210 – 350 กก./ตร.ซม. ใช้หินขนาดใหญ่สุด 3 / 8 นิ้ว และ 1 / 2 นิ้ว ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.480 – 0.650 ใช้น้ำหนักซีเมนต์ 346 – 469 กก. ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร และใช้หิน 743 – 776 กก.ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร ทำการบ่มและทดสอบคอนกรีตตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่าการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตี วิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ และการรวมการทดสอบโดยวิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตีกับวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ตลอดจนการรวมการทดสอบทั้งสามวิธี ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดีขึ้นตามลำดับดังนี้ 0.629 , 0.812 , 0.821 และ 0.829

สุรินทร์ (2536) ได้ทำการทดสอบคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. จำนวน 720 ตัวอย่างโดยวิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตี วิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ในแนวตั้งลง และวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน โดยตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกระหว่าง 210 – 560 กก./ตร.ซม. ใช้หินขนาดใหญ่สุด 3 / 8 นิ้ว และ 1 / 2 นิ้ว ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.320 – 0.684 ใช้น้ำหนักซีเมนต์ 314 – 500 กก. ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร และใช้หิน 665 – 1140 กก.ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร ทำการบ่มและทดสอบคอนกรีตตัวอย่างที่อายุ 28 วันและ 90 วัน พบว่าการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีความแม่นยำสูงขึ้น เมื่อใช้วิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตีร่วมกับวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์

นรินทร์ (2541) ทำการทดสอบคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15x 15 x 15 ซม. จำนวน 720 ตัวอย่าง โดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ในแนวตั้งลง และวิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตีร่วมกัน โดยตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกระหว่าง 210 – 560 กก./ตร.ซม. ใช้หินขนาดใหญ่สุด 3 / 4 นิ้ว และ 1 นิ้ว ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.320 – 0.684 ใช้น้ำหนักซีเมนต์ 285 – 469 กก. ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร และใช้หิน 975 – 1176 กก.ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร ทำการบ่มและทดสอบคอนกรีตตัวอย่างที่อายุ 28 วันและ 90 วัน ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยคัดเลือกข้อมูลจำนวน 600 ตัวอย่าง จากสุรินทร์(2536) โดยมีขนาดหินโตสุด 3 / 8 นิ้ว และ 1 / 2 นิ้ว รวมกับข้อมูลจากนรินทร์(2541) จำนวน 600 ตัวอย่าง โดยมีขนาดหินโตสุด 3 / 4 นิ้ว และ 1 นิ้ว พบว่า สมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น โ齡เป็นสมการที่ใช้ประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เชื่อถือได้สูงสุด เมื่อนำมาสร้างสมการร่วมกันระหว่างวิธีอุตสาหกรรมโชนิกส์พลัสเวโลซิตีและวิธีรีบาวน์

แสมเมอร์ เพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อมีตัวแปรอื่น ๆ รวมอยู่ด้วยในรูปของสมการแบบลอการิทึมดังนี้

1) เมื่อทราบเฉพาะค่าอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี และค่าเลขจำนวนริบาวน์

$$\text{LN}(\text{CST}) = 0.29062 * \text{UPVT} + 0.03244 * \text{RHT} + 3.42182$$

2) เมื่อทราบค่าอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี ค่าเลขจำนวนริบาวน์ อายุคอนกรีต น้ำหนักซีเมนต์ต่อคอนกรีต ขนาดหินใหญ่สุด ปริมาตรหินต่อปริมาตรคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

$$\text{LN}(\text{CST}) = 0.36955 * \text{UPVT} + 0.00205 * \text{RHT} + 0.00071 * \text{AGE} + 0.00011 * \text{CEMENT} - 0.19469 * \text{SIZE} + 0.0837 * \text{VA} - 1.03952 * \text{WC} + 4.60034$$

โดย	CST	=	การทดสอบโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน
	UPVT	=	การทดสอบโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี
	RHT	=	การทดสอบโดยวิธีริบาวน์แสมเมอร์
	AGE	=	อายุของคอนกรีตที่ทดสอบ
	CEMENT	=	น้ำหนักซีเมนต์เป็นกิโลกรัม ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร
	SIZE	=	ขนาดหินใหญ่สุด
	VA	=	ปริมาตรหิน ต่อ ปริมาตรคอนกรีต
	WC	=	อัตราส่วนน้ำ ต่อ ซีเมนต์โดยน้ำหนัก

สุวิทย์ชัย (2542) ทำการทดสอบคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. จำนวน 720 ตัวอย่าง โดยใช้หินขนาดใหญ่สุด 1 นิ้ว , 3 / 4 นิ้ว , 1 / 2 นิ้ว และ 3 / 8 นิ้ว ออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงอัดประลัยระหว่าง 210 – 560 กก./ตร.ซม. และทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 และ 90 วัน โดยวิธีริบาวน์แสมเมอร์ในแนวตั้งลง แนวนอนและแนวตั้งขึ้น และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีในสภาพที่ไม่มีและมีหน่วยแรงอัดภายใน พบว่าคอนกรีตที่มีหน่วยแรงอัดภายใน ไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก จะมีผลต่อการทดสอบโดยวิธีริบาวน์แสมเมอร์ โดยทำให้เลขจำนวนริบาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นจากการทดสอบในสภาพที่ไม่มีหน่วยแรงอัดภายในโดยเฉลี่ย 3.33 จุด หรือ 8.82% แต่จะไม่มีผลต่อการทดสอบโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์

เวโลซิตีอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการปรับเทียบค่าริบาว์นัมเบอร์ที่ได้จากการทดสอบในแนวคั้งขึ้นและในแนวราบ เป็นค่าริบาว์นัมเบอร์ในแนวคั้งลง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.9594 , 0.9712 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 1.17 และ 0.99 ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงเส้นตรง ดังนี้

$$RVD = 1.2401 * RVU - 20.814$$

$$RVD = 1.0789 * RH - 6.5897$$

โดย RVD = เลขจำนวนริบาว์นัมเบอร์ที่ทดสอบในแนวคั้งลง
 RVU = เลขจำนวนริบาว์นัมเบอร์ที่ทดสอบในแนวคั้งขึ้น
 RH = เลขจำนวนริบาว์นัมเบอร์ที่ทดสอบในแนวราบ

นอกจากนี้ สุวัตชัย (2542) ได้สร้างสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกเมื่อทราบตัวแปรอื่นๆ โดยรวบรวมข้อมูลจำนวน 600 ตัวอย่างจากสุรินทร์(2536) จำนวน 600 ตัวอย่าง จากนรินทร์(2541) และจำนวน 720 ตัวอย่าง จากสุวัตชัย(2542) รวมเป็น 1920 ตัวอย่าง พร้อมทั้งพิจารณาผลของหน่วยแรงอัดภายในและทิศทางของการทดสอบโดยวิธีริบาว์นัมเบอร์ในรูปของสมการแบบลอการิทึม ดังนี้

1) เมื่อทราบเฉพาะค่าอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี และค่าเลขจำนวนริบาว์นัมเบอร์

$$LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.032090 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.322$$

2) เมื่อทราบค่าอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี ค่าเลขจำนวนริบาว์นัมเบอร์ อายุคอนกรีต น้ำหนักซีเมนต์ต่อคอนกรีต ขนาดหินใหญ่สุด ปริมาตรหินต่อปริมาตรคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

$$LN(CST) = 0.3360 * k_1 * UPVT + 0.004137 * k_{21} * k_{22} * RHT + 0.0006148 * AGE + 0.0001419 * CEMENT - 0.1510 * SIZE + 0.198 * VA - 1.014 * WC + 4.597$$

โดย CST = การทดสอบโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน
 UPVT = การทดสอบโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี

RHT	=	การทดสอบโดยวิธีรีบาวันแฮมเมอร์
AGE	=	อายุของคอนกรีตที่ทดสอบ
CEMENT	=	น้ำหนักซีเมนต์เป็นกิโลกรัม ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร
SIZE	=	ขนาดหินใหญ่สุด
VA	=	ปริมาตรหิน ต่อ ปริมาตรคอนกรีต
WC	=	อัตราส่วนน้ำ ต่อ ซีเมนต์โดยน้ำหนัก
k_1	=	ค่าปรับแก้ค่า UPVT เมื่อตัวอย่างทดสอบมีหน่วยแรงอัด ภายในขณะทดสอบ
k_{21}	=	ค่าปรับแก้เลขจำนวนรีบาวันเนื่องจากอิทธิพลของหน่วย แรงอัดภายใน
k_{22}	=	ค่าปรับแก้เลขจำนวนรีบาวันเนื่องจากอิทธิพลของแนว การทดสอบ

การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรีบาวันแฮมเมอร์(rebound hammer)และวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี(ultrasonic pulse velocity)ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเป็นการปรับแก้สมการที่เสนอโดยสุวัฒน์ชัย(2542) จากผลการทดสอบในสนามของพีรเกียรติ(2553)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ชุดทดสอบปริบาวน้แฮมเมอร์(rebound hammer)
2. ชุดทดสอบอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี(ultrasonic pulse velocity)
3. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปัมไฮดรอลิกโดยใช้ไฟฟ้า
4. เครื่องคอมพิวเตอร์ Microsoft Windows 98/NT/ME หรือสูงกว่า, 200 MHz , แสดงผลบนจอภาพด้วย VGA graphic card 1024x768 resolution, หน่วยความจำใน RAM ไม่น้อยกว่า 64 MB และเนื้อที่ในฮาร์ดดิสก์ไม่น้อยกว่า 200 MB
5. เครื่องพิมพ์ Ink jet HP Photosmart C6280 All-in-One
6. อุปกรณ์กำหนดตำแหน่งการทดสอบ RHT และ UPVT ในสนาม
7. ส่วนโรตารี
8. เครื่องเจียร์คอนกรีต
9. แท่งสกัดคอนกรีต
10. ค้อน
11. อุปกรณ์บันทึกข้อมูล เช่น แผ่น CD-R, Flash Drive
12. อุปกรณ์สำนักงานต่าง ๆ

วิธีการ

1. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีรืาวนแฮมเมอร์(Rebound Hammer)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีรืาวนแฮมเมอร์(rebound hammer) เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายที่สามารถทำการทดสอบองค์อาคารในสถานที่ที่ต้องการได้สะดวก รวดเร็ว โดยอาศัยการสะท้อนกลับของสตีลแฮมเมอร์(steel hammer) การทดสอบสามารถนำไปใช้ในกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

1. ประเมินค่ากำลังอัดของคอนกรีต
2. ตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักขององค์อาคาร

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีรืาวนแฮมเมอร์ อาศัยแรงต้านทานที่เกิดขึ้นจากการดันของสตีลแฮมเมอร์ ซึ่งมีหน้าตัดที่แน่นอน กดลงบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการตรวจสอบแล้วเกิดการสะท้อนกลับ ระยะที่ดันลูกตุ้มให้สะท้อนกลับคือค่าเลขจำนวนรืาวน(rebound number) ซึ่งจะนำค่าไปแปลงผลเป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้ดัชนีมาตรฐานในการแปลงผล

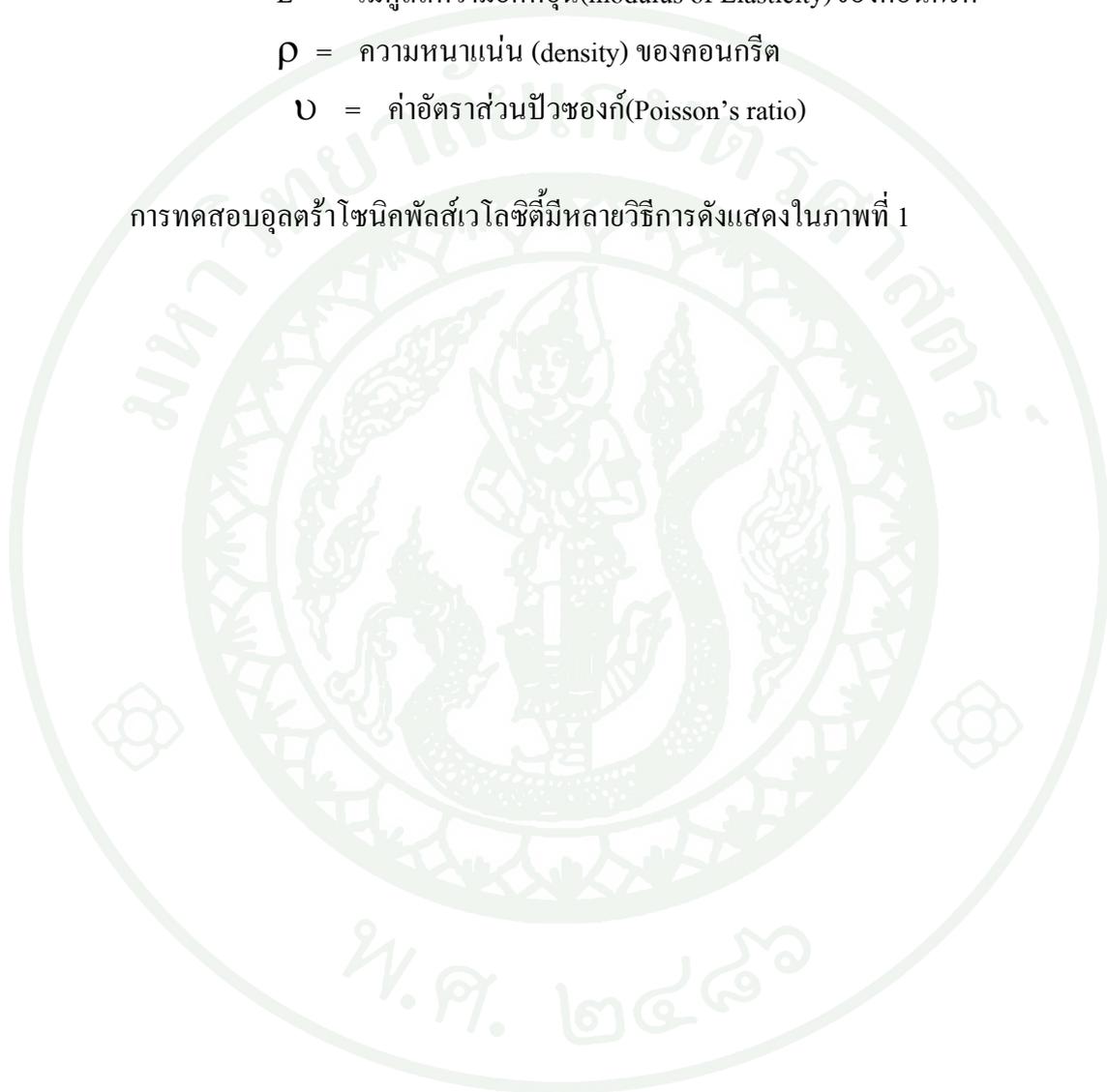
2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (Ultrasonic Pulse Velocity)

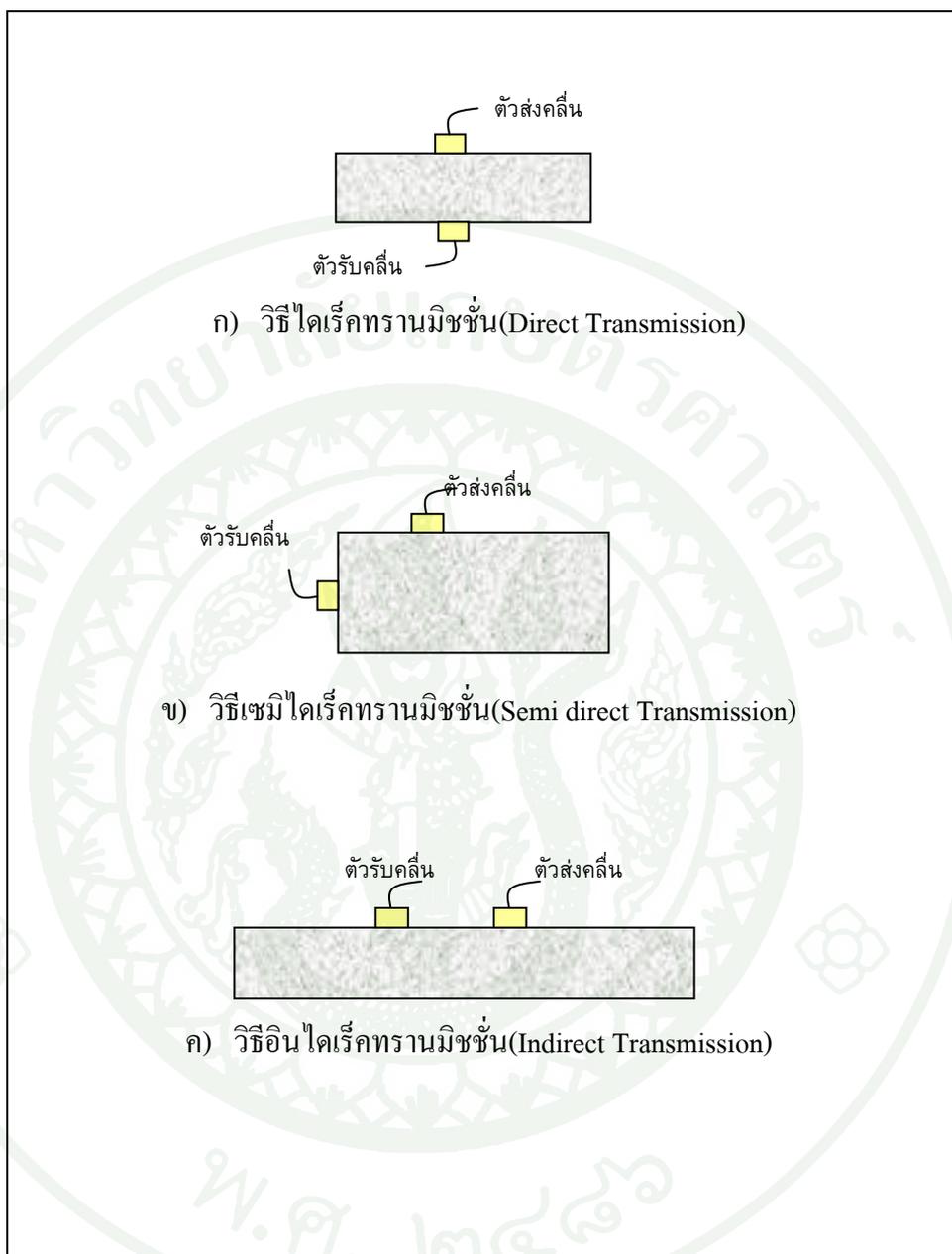
การทดสอบโดยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี(ultrasonic pulse velocity) อาศัยหลักการวัดความเร็วของคลื่นที่เกิดจากปิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์(Piezoelectric Transducer) ในการประเมินกำลังของโครงสร้าง ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก(ultrasonic) ที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต และโมดูลัสความยืดหยุ่น(Modulus of Elasticity)ของคอนกรีต ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก(V) ที่เดินทางผ่านวัสดุประเภทอีลาสติกโซลิด(Elastic Solid) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ของวัสดุ ดังแสดงในสมการ

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

- โดยที่
- V = ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกพัลส์ (ultrasonic pulse velocity)
 - E = โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of Elasticity) ของคอนกรีต
 - ρ = ความหนาแน่น (density) ของคอนกรีต
 - ν = ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

การทดสอบอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีมีหลายวิธีการดังแสดงในภาพที่ 1





ภาพที่ 1 วิธีการทดสอบอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (Ultrasonic Pulse Velocity)

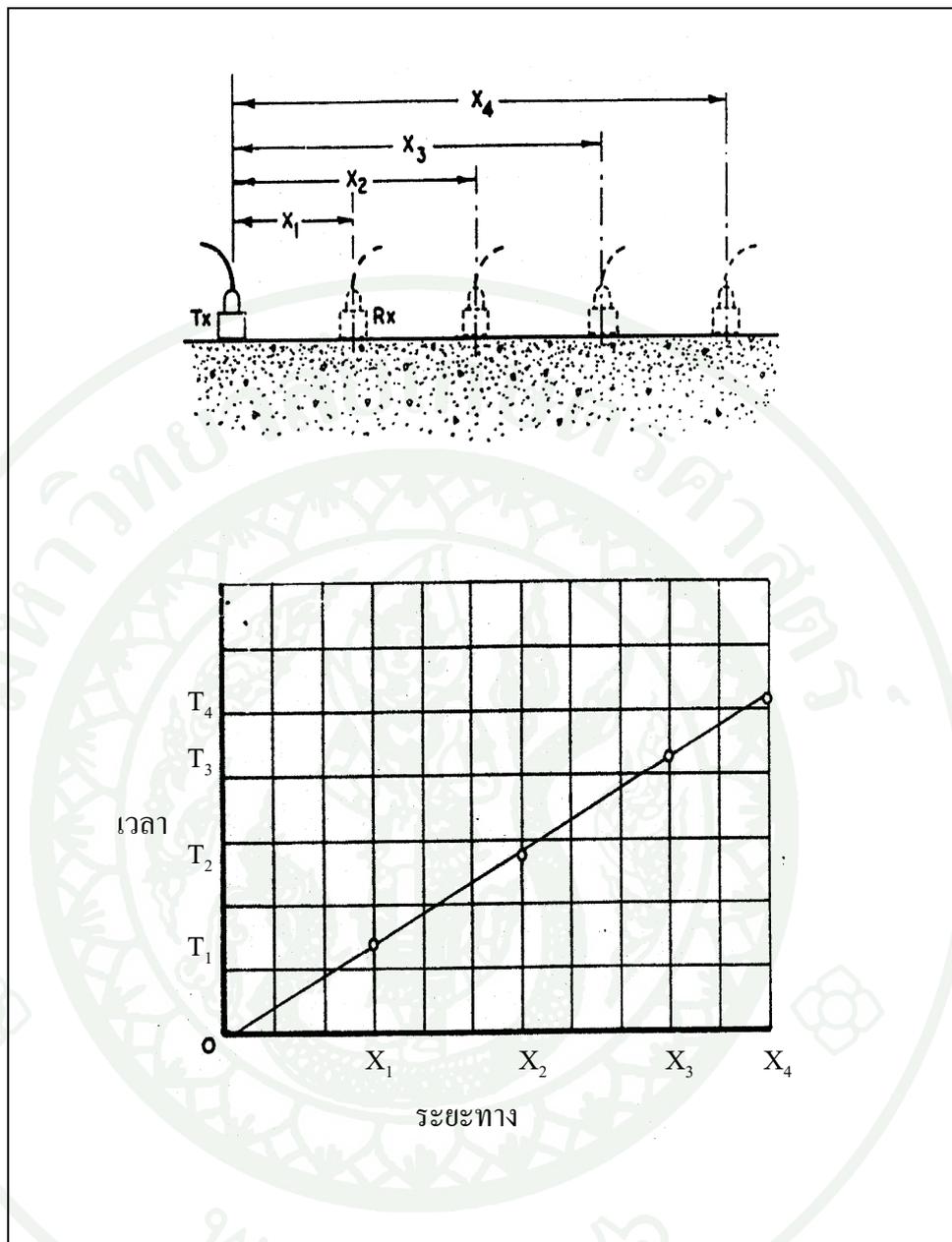
การทดสอบแบบไดเร็กทรานมิชชั่น(Direct Transmission) จะต้องทำการวัดระยะเวลา (t) ที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากตัวส่งคลื่น(Transmitter) ไปยังตัวรับคลื่น(Receiver) และระยะห่าง (S) ระหว่างตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่น ค่าความเร็วคลื่นอุลตราโซนิกจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V = \frac{S}{t} \quad (2)$$

โดยที่	V	=	ความเร็วคลื่นอุลตราโซนิก
	S	=	ระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่น
	T	=	ระยะเวลา

วิธีการทดสอบแบบไดเร็กทรานมิชชั่นเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของโครงสร้าง เนื่องจากวิธีการนี้จะเป็นการวัดความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านเนื้อวัสดุในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผิวของตัวรับและตัวส่งคลื่น(Transducers) แต่วิธีไดเร็กทรานมิชชั่นมีข้อจำกัดในการทดสอบคือจะต้องสามารถเข้าถึงได้ทั้งสองด้านของชิ้นส่วน

ในการคำนวณหาความเร็วคลื่นสำหรับการทดสอบด้วยวิธีอินไดเร็กทรานมิชชั่น (Indirect Transmission) มักอาศัยเวลาที่คลื่นต้องใช้ในการเดินทางจากตัวรับคลื่นไปยังตัวส่งคลื่น โดยจัดให้มีระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่นต่างๆ กัน จากนั้นจึงคำนวณหาความเร็วคลื่นจากเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การทดสอบหาความเร็วคลื่นอุลตราโซนิก(Ultrasonic Pulse)
ด้วยวิธีอินดิเรกทรานมิชชั่น(Indirect Transmission)

วิธีการทดสอบแบบอินไดเร็กทรานมิชชันอาศัยการกระจายของคลื่นอุลตราโซนิคในเนื้อวัสดุ โดยทั้งตัวรับและตัวส่งคลื่นจะอยู่ในระนาบเดียวกัน จึงทำให้กำลังของคลื่นที่เดินทางไปยังตัวรับคลื่นมีขนาดน้อยกว่ากำลังของคลื่นที่จะได้จากการทดสอบด้วยวิธีไคเร็กทรานมิชชัน เมื่อมีการจัดให้ระยะทางในการเดินทางของคลื่นมีค่าเท่ากัน โดยความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิคที่ได้จากวิธีไคเร็กทรานมิชชัน และวิธีอินไดเร็กทรานมิชชันจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งจะสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของสองวิธีการนี้ได้จากการทดสอบบนชิ้นส่วนเดียวกัน

การทดสอบอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีได้นำมาใช้ในการประเมินค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยการเปรียบเทียบค่าของความเร็วคลื่นที่เดินทางผ่านในคอนกรีตโครงสร้าง นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ประเมินสภาพของโครงสร้างโดยโครงสร้างที่มีรอยร้าวจะทำให้ความเร็วของคลื่นมีค่าลดลง เนื่องจากคลื่นจะต้องเดินทางอ้อมรอยร้าวและมีระยะทางในการเดินทางที่มากขึ้น Whitehurst(1951) ได้แนะนำแนวทางในการประเมินคุณภาพของคอนกรีตอย่างคร่าวๆ จากความเร็วคลื่นดังแสดงในตารางที่ 1 โดยค่าในตารางได้จากผลการทดสอบคอนกรีตกำลังอัดปกติที่มีค่าความหนาแน่นประมาณ 150 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต อย่างไรก็ตาม ในการประเมินสภาพต้องอาศัยพิจารณาของผู้ประเมินเป็นส่วนประกอบหนึ่งในการพิจารณา

ตารางที่ 1 การแบ่งคุณภาพของคอนกรีตจากความเร็วคลื่น

ความเร็วคลื่น (เมตร/วินาที)	คุณภาพคอนกรีต
> 4500	ดีมาก
3600 - 4500	ดี
000 - 3600	พอใช้

ที่มา: Whitehurst, 1951

3. การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้าง

3.1 การปรับเทียบเครื่องมือชmidtแฮมเมอร์ (Schmidt hammer calibration)

ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเป็นการปรับแก้สมการที่เสนอโดยสุวัฒชัย(2542) แต่เนื่องจาก เครื่องชmidtแฮมเมอร์ (Schmidt hammer) ที่ใช้ในการทดสอบไม่ใช่เครื่องเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบเครื่องมือ เพื่อให้ค่าเลขจำนวนรืบาวน์ (rebound number) ที่ได้จากการทดสอบมีค่า เทียบเท่ากับเลขจำนวนรืบาวน์ของสุวัฒชัย(2542) ซึ่งค่าเลขจำนวนรืบาวน์ในแนวการทดสอบต่างๆ กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้มาจากกราฟคู่มือประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ แสดงในตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 4 ตามลำดับ และเมื่อนำมาเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรืบาวน์กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟคู่มือประจำเครื่อง แสดงในภาพที่ 3 ถึง ภาพที่ 5 ตามลำดับ

การหาความสัมพันธ์ของค่าเลขจำนวนรืบาวน์จากเครื่องชmidtแฮมเมอร์ของสุวัฒชัย (RHT)และค่าเลขจำนวนรืบาวน์จากเครื่องชmidtแฮมเมอร์ของพีรเกียรติ(RHT') จะใช้กระบวนการทางสถิติ สร้างเป็นแบบจำลองในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งปรากฏว่า สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย(Simple Linear Regression) ให้ค่าความสัมพันธ์ของเลขจำนวนรืบาวน์สำหรับเครื่องชmidtแฮมเมอร์ทั้งสองสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 6 ถึง ภาพที่ 8 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงไว้ในตารางผนวกที่ 1 ถึง ตารางผนวกที่ 3 ตามลำดับ

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขจำนวนรืบาวน์ของสุวัฒชัยและพีรเกียรติสรุปได้ดังนี้

กรณี 1 ทดสอบแนวตั้งลง

$$RHT = 0.9127RHT' + 2.2203$$

กรณี 2 ทดสอบแนวราบ

$$RHT = 0.8761RHT' + 4.4178$$

กรณี 3 ทดสอบแนวตั้งขึ้น

$$RHT = 0.8674RHT' + 6.0957$$

ตารางที่ 2 เลขจำนวนรีบาวน์(ทดสอบแนวตั้งลง)กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก
ที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มมือประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ

กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตรูปทรงกระบอก (กก./ซม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งลง (สุวัฒชัย,2542)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งลง (พีรเกียรติ,2551)
120	20.0	20.0
140	21.9	21.3
160	23.2	23.1
180	25.0	24.7
200	26.3	26.3
220	27.8	27.8
240	29.0	29.2
260	30.3	30.7
280	31.6	32.2
300	32.9	33.5
320	34.0	34.8
340	35.1	36.2
360	36.5	37.5
380	37.5	38.8
400	38.8	40.1
420	39.8	41.4
440	41.0	42.7
460	42.1	43.8
480	43.3	45.1

ตารางที่ 2 (ต่อ)

กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตรูปทรงกระบอก (กก./ซม. ^๒)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งลง (สุวัฒชัย,2542)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งลง (พีรเกียรติ,2551)
500	44.5	46.3
520	45.5	47.4
540	46.7	48.6
560	47.7	49.8
580	48.9	51.0
600	50.0	52.2

ที่มา: Concrete Test Hammer Manual (1991)

ตารางที่ 3 เลขจำนวนรีบาวน์(ทดสอบแนวราบ)กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก
ที่ประเมินได้จากกราฟของคู่มือประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ

กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตรูปทรงกระบอก (กก./ซม. ^๒)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวราบ (สุวัฒชัย,2542)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวราบ (พีรเกียรติ,2551)
120	24.2	23.0
140	26.0	24.7
160	27.5	26.5
180	29.0	28.0
200	30.3	29.5
220	31.8	31.0
240	32.9	32.4
260	34.2	33.8

ตารางที่ 3 (ต่อ)

กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตรูปทรงกระบอก (กก./ชม.2)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวราบ (สุ่วฒซัย,2542)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวราบ (พีรเกียรดี,2551)
280	35.3	35.2
300	36.6	36.4
320	37.6	37.8
340	38.6	39.2
360	40.0	40.6
380	41.1	41.9
400	42.3	43.1
420	43.3	44.4
440	44.3	45.7
460	45.5	46.9
480	46.7	48.2
500	47.6	49.5
520	48.5	50.6
540	49.7	51.8
560	50.9	53.1
580	52.0	54.2
600	53.0	55.2

ที่มา: Concrete Test Hammer Manual (1991)

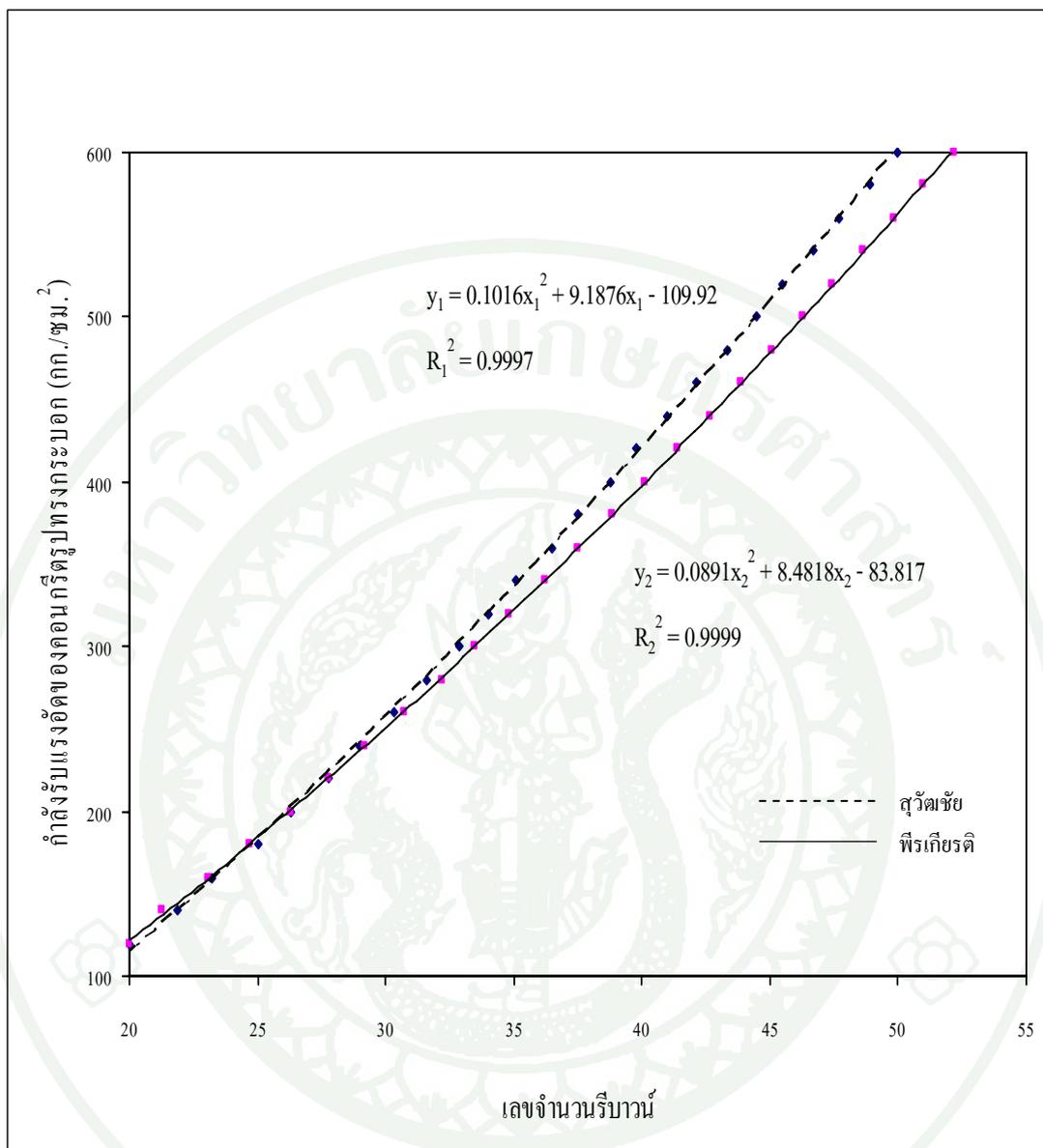
ตารางที่ 4 เลขจำนวนรีบาวน์(ทดสอบแนวคิ่งขึ้น)กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก
ที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มมือประจำเครื่องทดสอบของสุวัฒชัยและพีรเกียรติ

กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตรูปทรงกระบอก (กก./ซม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวคิ่งขึ้น (สุวัฒชัย,2542)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวคิ่งขึ้น (พีรเกียรติ,2551)
120	30.0	27.9
140	31.8	29.5
160	33.0	31.1
180	34.5	32.6
200	35.7	34.1
220	36.8	35.4
240	38.0	36.7
260	39.1	38.0
280	40.2	39.2
300	41.3	40.5
320	42.3	41.7
340	43.4	43.0
360	44.5	44.2
380	45.5	45.4
400	46.6	46.7
420	47.5	47.8
440	48.5	49.0
460	49.5	50.0
480	50.5	51.2
500	51.7	52.3
520	52.5	53.5
540	53.3	54.6

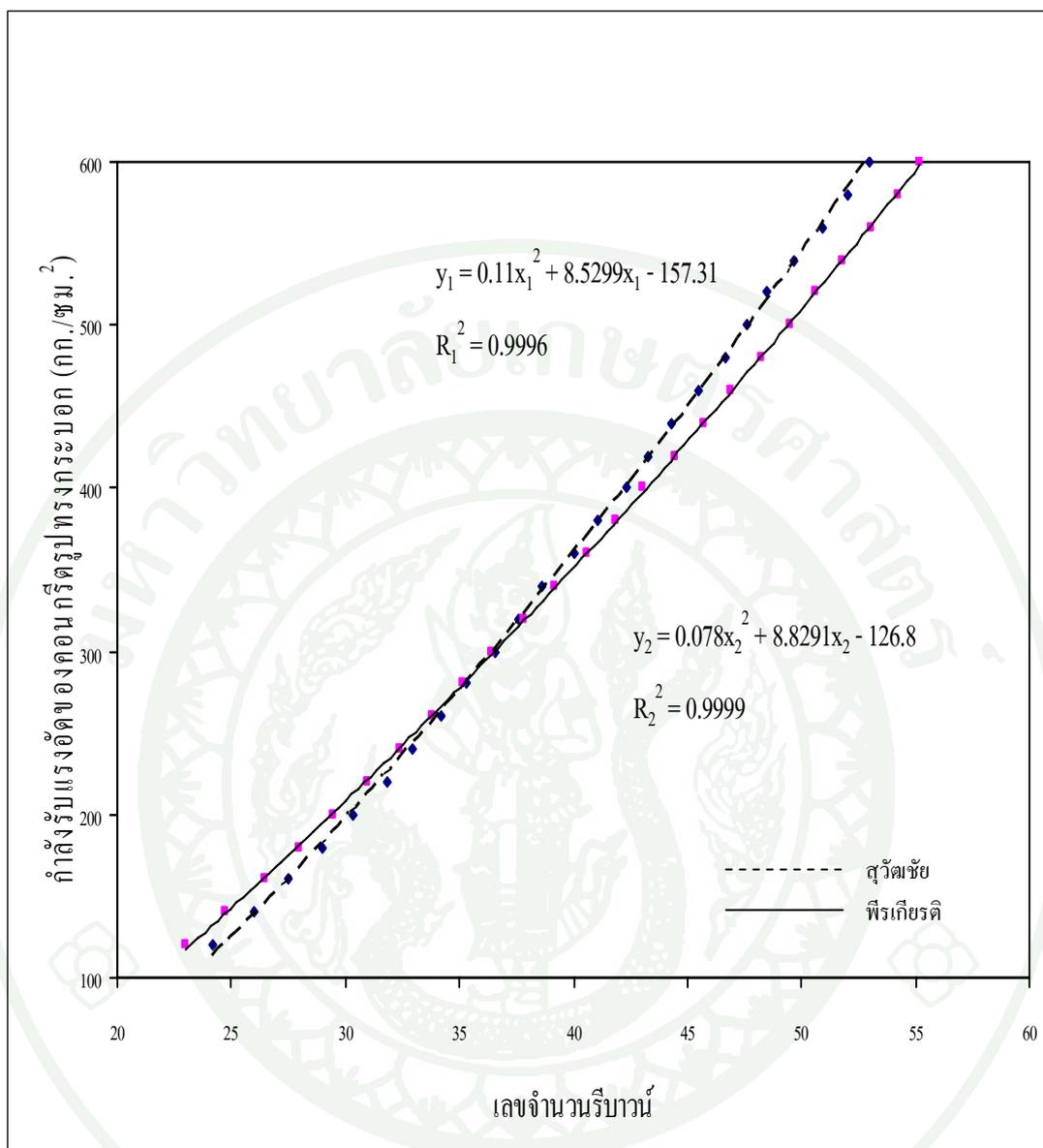
ตารางที่ 4 (ต่อ)

กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตรูปทรงกระบอก (กก./ซม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งขึ้น (สุวัฒชัย,2542)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งขึ้น (พีรเกียรติ,2551)
560	54.3	55.5
580	55.3	56.8
600	56.2	57.9

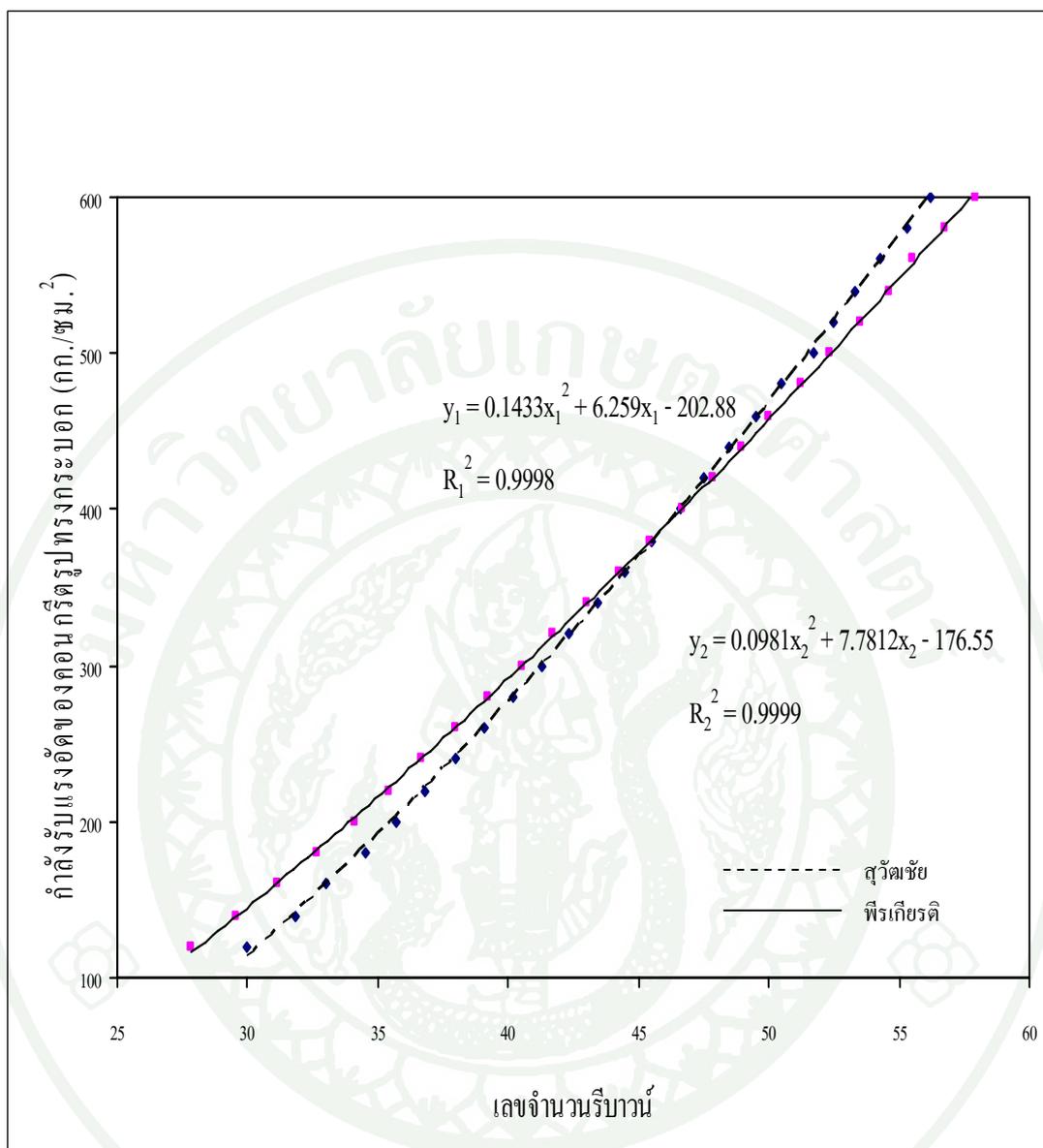
ที่มา: Concrete Test Hammer Manual (1991)



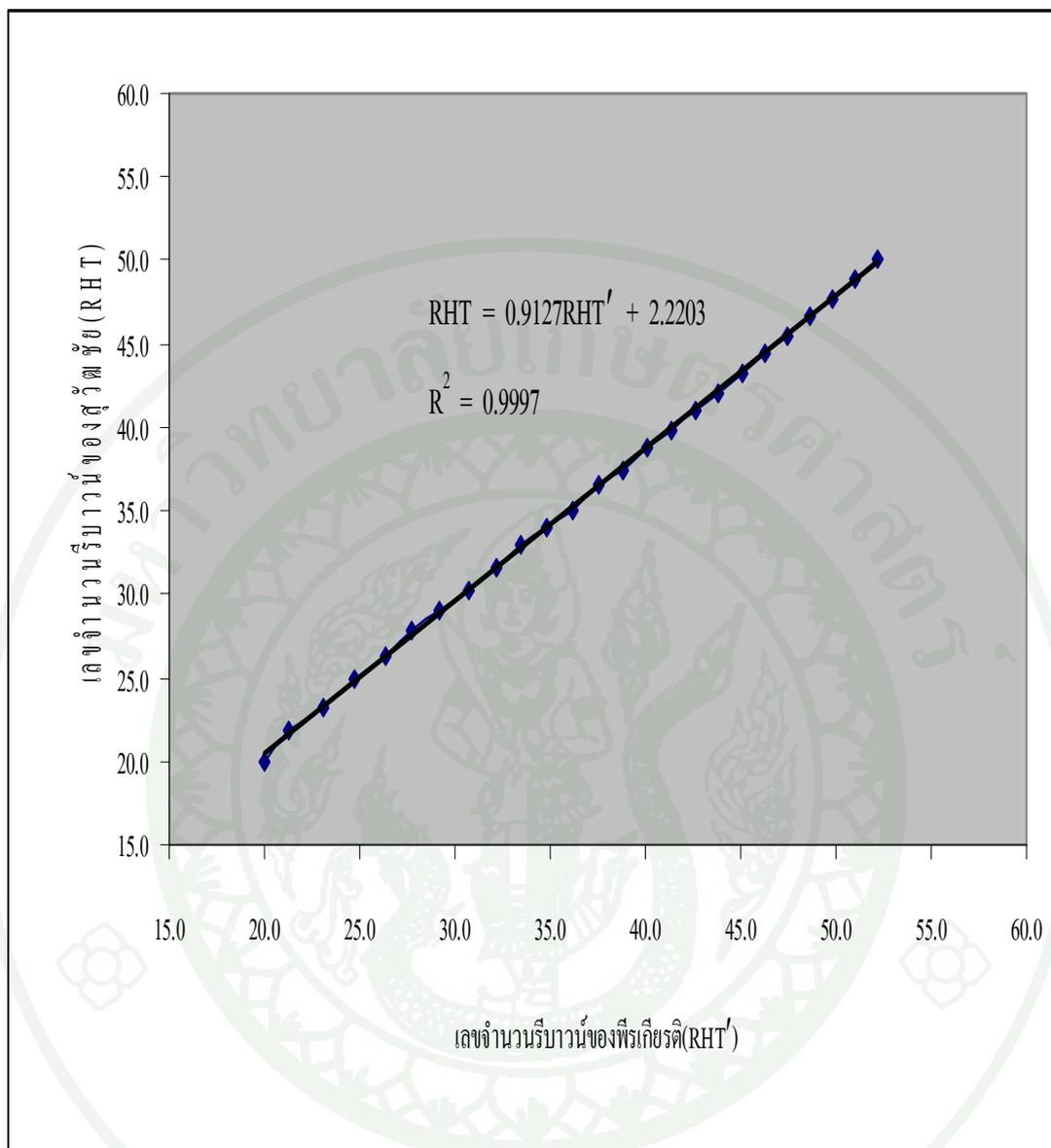
ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนริบาวนทดสอบแนวตั้งลงกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มมือประจำเครื่องทดสอบของสุ่วตซ์ัยและพีรเกียรติ



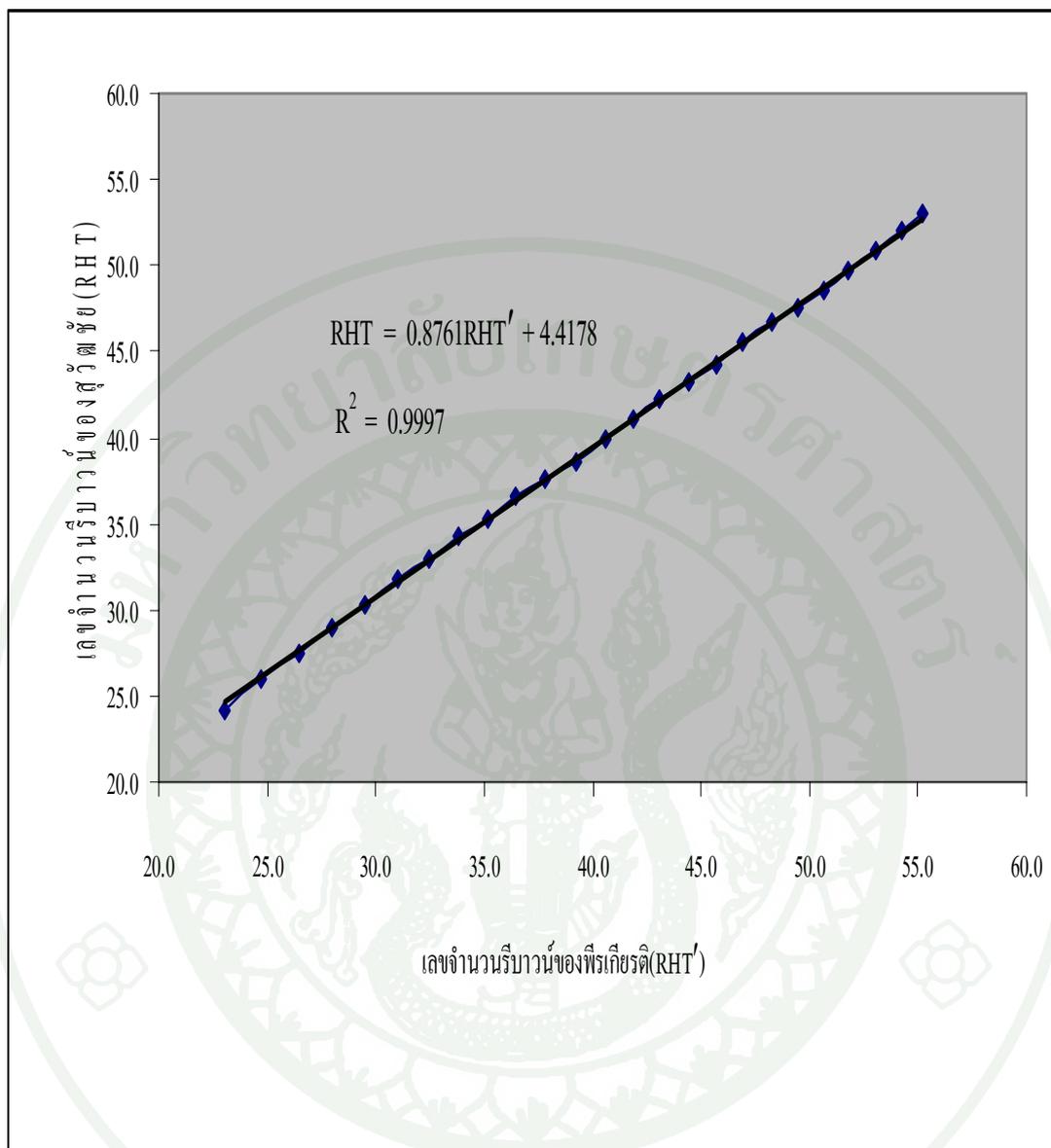
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรืบาวนัทดสอบเนวราบกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มมือประจำเครื่องทดสอบของสุ่วฒซัยและพีรเกียรตื



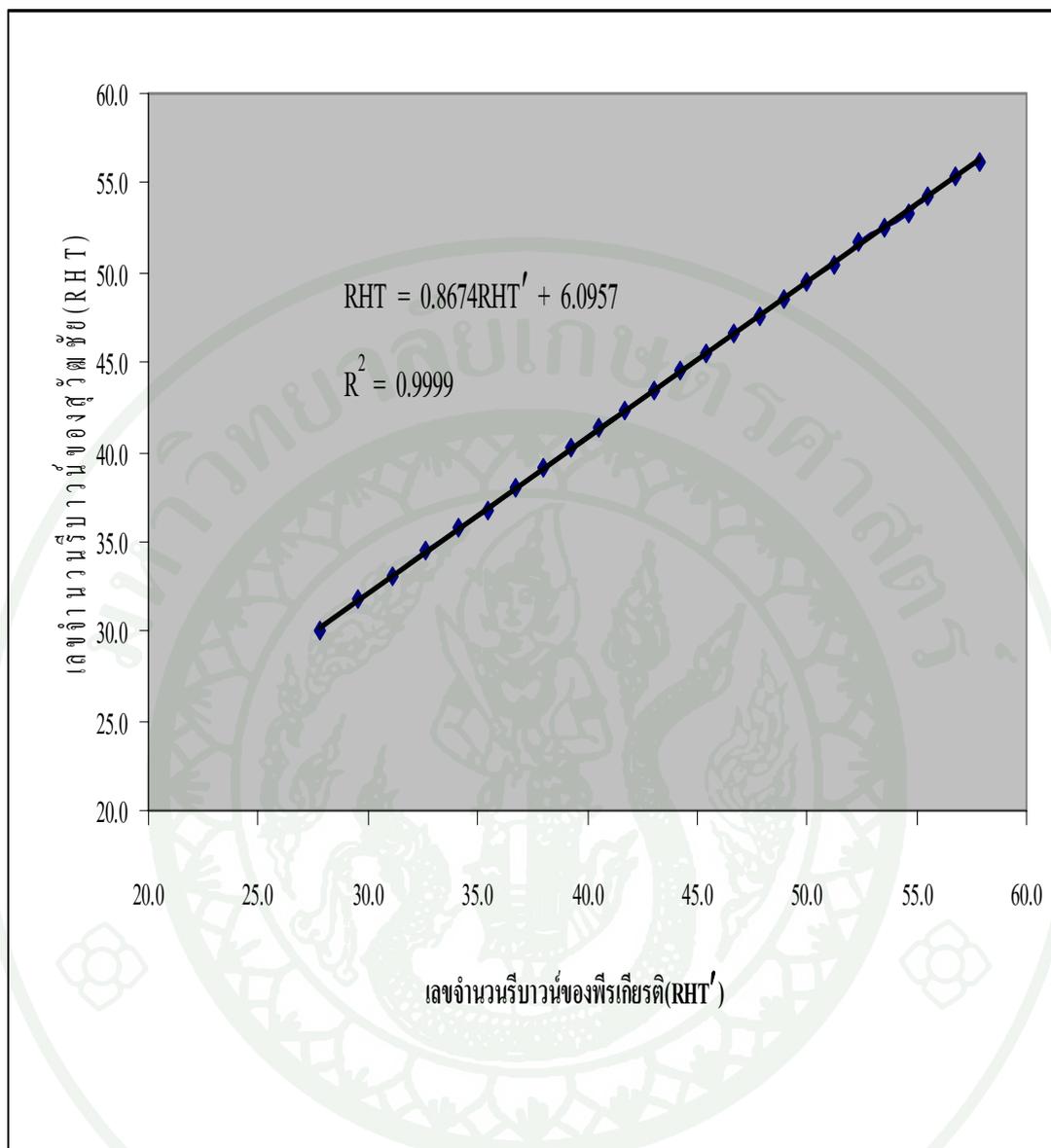
ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรีบาวน์ทดสอบแนวตั้งขึ้นกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ประเมินได้จากกราฟของกลุ่มมือประจำเครื่องทดสอบของสู้ตชัยและฟิรเกียรติ



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรอบของพีริเกียติและเลขจำนวนรอบของกำ้วตซัย กรณีทดสอบแนวคั้งลง



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรึบาวนของพีรเกียรติและเลขจำนวนรึบาวนของสู่วัฒชัย กรณีทดสอบแนวราบ



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรีบาวน์ของพีรเกียรติและเลขจำนวนรีบาวน์ของตัวต้วชัย กรณีทดสอบแนวคิ่งขึ้น

3.2 การปรับเทียบเครื่องมือทดสอบพันดิท (PUNDIT calibration)

การปรับเทียบเครื่องมือทดสอบพันดิททำได้โดยหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20x40x200 ซม. ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 280 กก./ซ.ม.² จำนวน 1 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชม. เพื่อนำไปบ่มในน้ำจนอายุครบ 7 วัน จากนั้นนำไปบ่ม

ในอากาศจนอายุครบ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบโดยวิธีอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ตามตำแหน่งที่แสดงในภาพที่ 10 พร้อมกับตรวจสอบค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีที่ได้จากตำแหน่ง 1,2,3,4,5,6 และ 7 เพื่อนำมาพิจารณาถึงผลของเหล็กกล้าตึง(Stirrup)ที่มีต่อค่าอุตราโซนิกพัลส์ เวโลซิตี ซึ่งผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5 โดยการทดสอบในตำแหน่งที่ 1,2,3,4 และ 5 ซึ่งเป็นการทดสอบตามแนวความกว้างของคาน พบว่าความเร็วของคลื่นที่ผ่านตำแหน่งที่ 1,2,3,4 และ 5 เท่ากับ 4317.00 , 4211.61 , 4424.88 , 4299.47 และ 4442.01 ม./วินาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นที่ผ่านตำแหน่งที่หนึ่งแตกต่างกัน -2.44 , 2.50 , -0.41 และ 2.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้การทดสอบในตำแหน่งที่ 6,7,8 และ 9 ซึ่งเป็นการทดสอบตามแนวความลึกของคาน พบว่าความเร็วของคลื่นที่ผ่านตำแหน่งที่ 6,7,8 และ 9 เท่ากับ 4229.74 , 4217.87 , 4314.26 และ 4321.66 ม./วินาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นที่ผ่านตำแหน่งที่หกแตกต่างกัน -0.28 , 2.00 และ 2.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

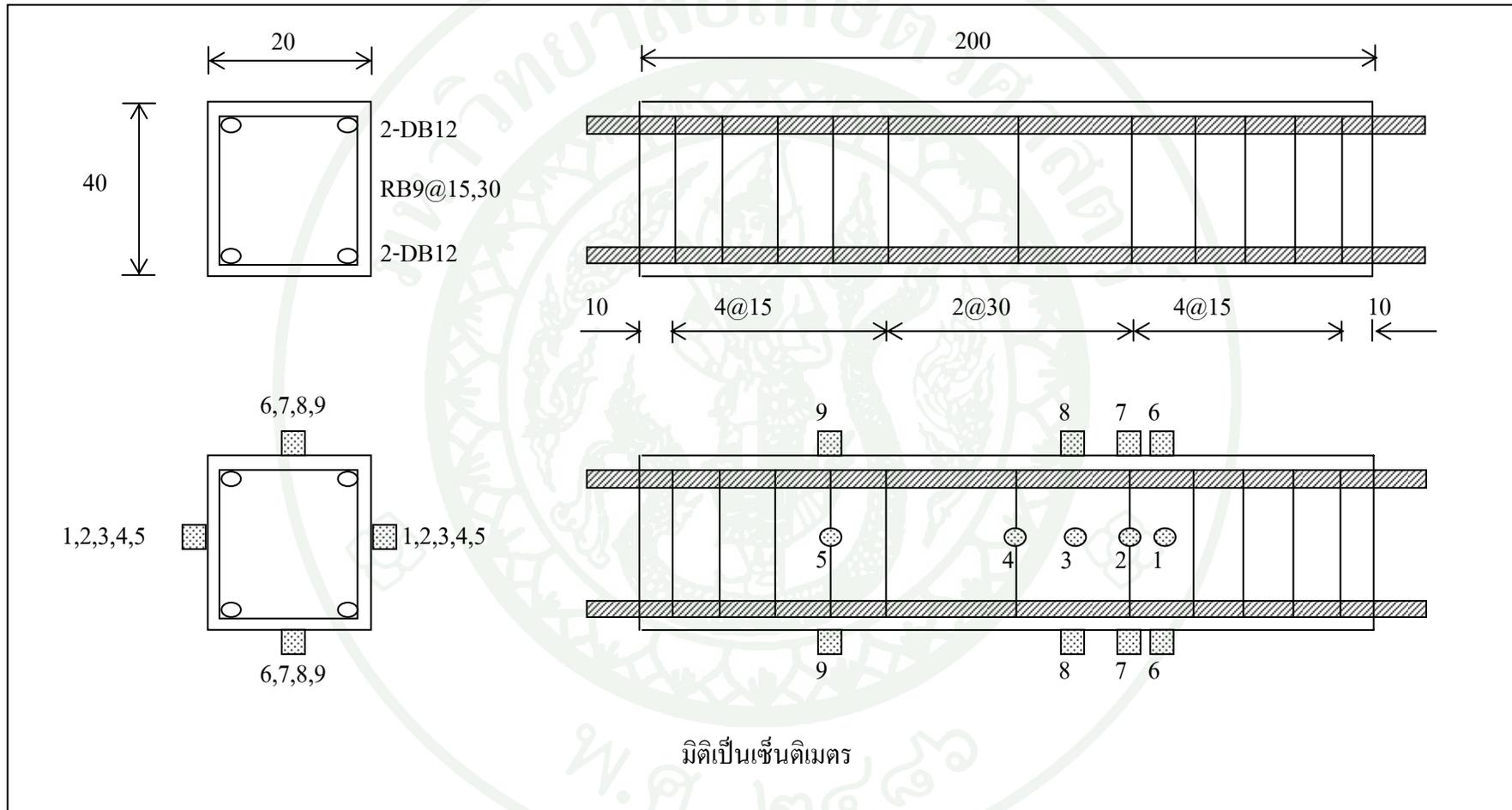
สำหรับการวัดค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีตามแนวความกว้างคานพบว่า การทดสอบตำแหน่งที่ 1 เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 5 และการทดสอบตำแหน่งที่ 3 เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นการแสดงผลของเหล็กกล้าตึงที่มีต่อค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี มีค่าแตกต่างกัน 2.90 เปอร์เซ็นต์ และ -2.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ การทดสอบตำแหน่งที่ 1 เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 3 และ การทดสอบตำแหน่งที่ 2 เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นการแสดงผลของระยะเรียงเหล็กกล้าตึงที่มีต่อค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี มีค่าแตกต่างกัน 2.50 เปอร์เซ็นต์ และ 2.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการวัดค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีตามแนวความลึกของคานพบว่า การทดสอบตำแหน่งที่ 6 เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 9 ซึ่งเป็นการแสดงผลของเหล็กกล้าตึงที่มีต่อค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี มีค่าแตกต่างกัน 2.17 เปอร์เซ็นต์และ การทดสอบตำแหน่งที่ 6 เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 8 ซึ่งเป็นการแสดงผลของระยะเรียงเหล็กกล้าตึงที่มีต่อค่าอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี มีค่าแตกต่างกัน 2.00 เปอร์เซ็นต์

จากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมา สรุปได้ว่าตำแหน่งเหล็กกล้าตึงและระยะเรียงของเหล็กกล้าตึงในคานไม่มีผลต่อค่าความเร็วคลื่นอุตราโซนิกส้อย่างมีนัยสำคัญ แต่จะเห็นว่าค่าความเร็วคลื่นอุตราโซนิกจะขึ้นกับค่าความหนาแน่นของคอนกรีตในแต่ละตำแหน่งทดสอบ ดังจะเห็นได้จากค่าความเร็วคลื่นที่ตำแหน่ง 3 มีค่ามากกว่าค่าความเร็วคลื่นที่ตำแหน่ง 1 และค่าความเร็วคลื่นที่ตำแหน่ง 5 มีค่ามากกว่าค่าความเร็วคลื่นที่ตำแหน่ง 2 ไม่ว่าจะเป็นการวัดตามแนวความกว้างของ

คานหรือความถี่ของคาน แสดงว่าคอนกรีตบริเวณตำแหน่งที่ 3 และ 5 มีค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตบริเวณตำแหน่งที่ 1 และ 2



ภาพที่ 9 คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 X 40 X 200 ซม.



ภาพที่ 10 รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งที่ทำการทดสอบอัตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีของเครื่องมือทดสอบ PUNDIT

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20 X 0.40 X 2.00 ม. โดยวิธีอุตสาหกรรมใช้ปูนซีเมนต์

ตำแหน่ง	เวลา (วินาที X 10 ⁻⁶)				เฉลี่ย	ระยะทาง (ซม.)	ความเร็ว (ม./วินาที)
	1	2	3	4			
1	47.80	47.90	48.00	48.10	47.95	20.70	4317.00
2	48.50	48.60	49.00	48.60	48.68	20.50	4211.61
3	45.40	45.50	45.30	45.50	45.43	20.10	4424.88
4	46.80	46.50	46.90	46.80	46.75	20.10	4299.47
5	45.60	45.70	45.80	45.70	45.70	20.30	4442.01
6	93.20	93.00	93.30	93.10	93.15	39.40	4229.74
7	93.30	93.10	93.10	93.20	93.18	39.30	4217.87
8	91.30	91.30	91.30	91.40	91.33	39.40	4314.26
9	91.30	91.40	91.50	91.40	91.40	39.50	4321.66

3.3 การทดสอบอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีกับคอนกรีตในโครงสร้าง

3.3.1 เลือกชนิดของโครงสร้างที่จะทำการทดสอบ(เสา , คาน , พื้น) พร้อมทั้งกำหนดตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ

3.3.2 ตรวจสอบสภาพผิวของคอนกรีตบริเวณที่จะทำการทดสอบ โดยผิวคอนกรีตจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ในกรณีที่ผิวคอนกรีตมีปูนฉาบเกาะ ต้องทำการสกัดปูนฉาบออกให้หมดจนเห็นเนื้อคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 11 แล้วทำการขัดผิวคอนกรีตให้เรียบเสมอกัน ดังแสดงในภาพที่ 12

3.3.3 ใช้เครื่องกำหนดตำแหน่งทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 13 เพื่อให้ตำแหน่งที่จะทำการทดสอบตรงกัน

3.3.4 วัดขนาดของโครงสร้างในแนวที่จะทำการทดสอบ ซึ่งคือระยะทางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวอย่างคอนกรีต(path length)

3.3.5 ติดตั้งเครื่องมือทดสอบพินดิท(Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester , PUNDIT) โดยก่อนเริ่มทำการทดสอบทุกครั้งจะต้องทำการปรับเทียบ(calibrate) คลื่นพัลส์เวโลซิตีกับแท่งปรับเทียบประจำเครื่อง

3.3.6 นำหัวส่งคลื่น(transducer) และหัวรับคลื่น (receiver)ของเครื่องมือ ประกอบตรงตำแหน่งที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 14 , ภาพที่15 และภาพที่ 16 พร้อมทั้งอ่านค่าเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีเดินทางผ่านโครงสร้างที่ทดสอบ มีหน่วยเป็น $\times 10^{-6}$ วินาที จากนั้นนำค่าความยาวที่วัดได้จากข้อ 3.3.4 มาหารด้วยเวลาที่อ่านได้จากเครื่องพินดิท เพื่อหาค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่เดินทางผ่านตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในสมการ

$$UPVT' = \frac{S}{t} \quad (3)$$

โดยที่ UPVT = ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก
 S = ระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่น
 T = ระยะเวลา



ภาพที่ 11 การสกัดผิวปูนฉาบออกจากเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ



ภาพที่ 12 การขัดผิวเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบให้เรียบ



ภาพที่ 13 การใช้เครื่องกำหนดตำแหน่งทดสอบ เพื่อให้ตำแหน่งทดสอบตรงกัน



ภาพที่ 14 การทดสอบอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างเสาคอนกรีต



ภาพที่ 15 การทดสอบอุดตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างคานคอนกรีต



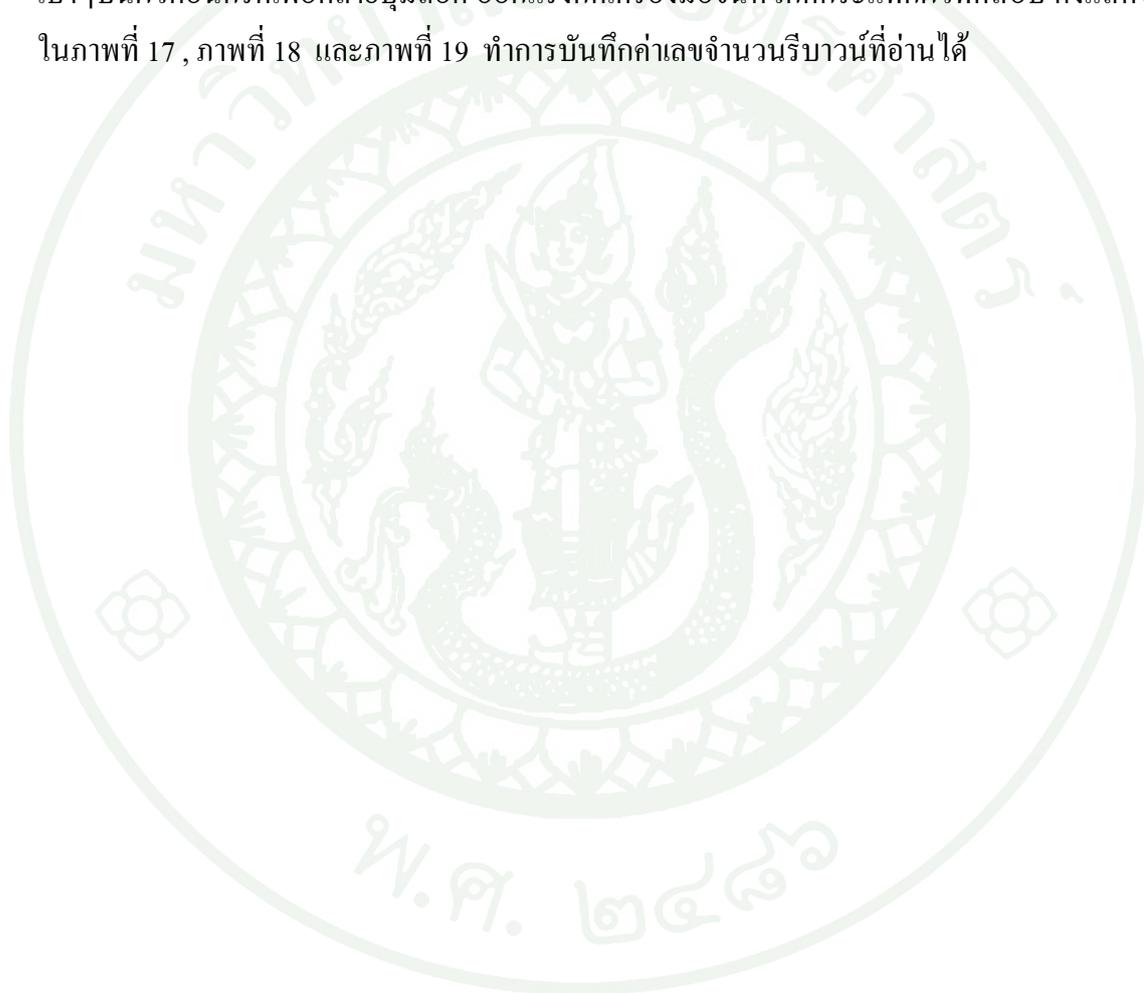
ภาพที่ 16 การทดสอบอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างพื้นคอนกรีต

3.4 การทดสอบริบาวน์แฮมเมอร์กับคอนกรีตในโครงสร้าง

3.4.1 เลือกชนิดของโครงสร้างที่จะทำการทดสอบ(พื้น , คาน , เสา) พร้อมทั้งกำหนดตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับการทดสอบอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

3.4.2 ตรวจสอบสภาพผิวของคอนกรีตบริเวณที่จะทำการทดสอบ ในกรณีที่ผิวคอนกรีตมีคราบจาระบีติดอยู่เนื่องจากการใช้ในการทดสอบอุลตราพัลส์เวโลซิตีให้เช็ดทำความสะอาดออกให้หมด

3.4.3 นำเครื่องชนิดท์แฮมเมอร์(Schmidt hammer type N)มาทำการทดสอบ โดยจับเครื่องมือในแนวตั้งฉากกับผิวคอนกรีตโครงสร้างบริเวณตำแหน่งที่จะทดสอบ แล้วกดเครื่องมือลงเบาๆบนผิวคอนกรีตเพื่อคลายปุ่มล๊อค ออกแรงกดเครื่องมือจนหัวกดกระแทกผิวทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 17 , ภาพที่ 18 และภาพที่ 19 ทำการบันทึกค่าเลขจำนวนรีบาวน์ที่อ่านได้





ภาพที่ 17 การใช้เครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์(Schmidt hammer) ทดสอบโครงสร้างเสาคอนกรีต



ภาพที่ 18 การใช้เครื่องมือชนิดที่แฮมเมอร์(Schmidt hammer) ทดสอบ โครงสร้างคานคอนกรีต



ภาพที่ 19 การใช้เครื่องมือชมิทท์แฮมเมอร์(Schmidt hammer) ทดสอบโครงสร้างพื้นคอนกรีต

3.5 การทดสอบวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน

3.5.1 ทำการเจาะ(coring)คอนกรีตโดยใช้เครื่องเจาะคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองนิ้วตรงตำแหน่งที่ได้ทำการทดสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีและวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ โดยเจาะจนทะลุเสา, คาน และพื้น ดังแสดงในภาพที่ 20 , ภาพที่ 21 และภาพที่ 22

3.5.2 ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของแท่งตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 23 จากนั้นหาพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะออกมา ในการทดลองนี้จะกำหนดให้ความสูงของแท่งตัวอย่างมีค่าเป็นสองเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง ถ้าหากแท่งตัวอย่างที่นำมามีความสูงมากกว่าที่กล่าวมา ให้ทำการตัดแท่งตัวอย่างโดยใช้เครื่องตัดไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ 24

3.5.3 นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตมากดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด(Hydraulic Testing Machine) ดังแสดงในภาพที่ 25 และภาพที่ 26 จนแท่งตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ใช้ในการกด กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต คือ น้ำหนักที่กดแท่งตัวอย่างคอนกรีตจนวิบัติหารด้วยพื้นที่หน้าตัดรับแรงอัดของแท่งคอนกรีต

3.5.4 เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบได้มาจากการเจาะคอนกรีตในโครงสร้างจริง ทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงแตกต่างจากคอนกรีตรูปทรงกระบอก $\varnothing 15 \times 30$ ซม. ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้หาค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานตามวิธี ACI ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบเพื่อให้เป็นค่าเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดตามวิธี ACI โดยการปรับแก้ตามตารางที่ 6 และตารางที่ 7



ภาพที่ 20 การเจาะ โครงสร้างเสาคอนกรีต



ภาพที่ 21 การเจาะ โครงสร้างคานคอนกรีต



ภาพที่ 22 การเจาะ โครงสร้างพื้นคอนกรีต



ภาพที่ 23 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งคอนกรีตตัวอย่าง



ภาพที่ 24 การตัดแต่งคอนกรีตตัวอย่างโดยเครื่องตัดไฟเบอร์



ภาพที่ 25 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด(Hydraulic testing machine)



ภาพที่ 26 การหาค่าลึงรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

ตารางที่ 6 ผลของขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง X ความสูง)	กำลังอัดเฉลี่ยสัมพัทธ์ร้อยละ
Ø 5 X 10 ซม.	109
Ø 7.5 X 15 ซม.	106
Ø 15 X 30 ซม.	100
Ø 20 X 40 ซม.	96
Ø 30 X 60 ซม.	91
Ø 45 X 90 ซม.	86
Ø 60 X 120 ซม.	84
Ø 90 X 180 ซม.	82

ตารางที่ 7 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง(H/D) ของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก	แฟกเตอร์สำหรับแก้กำลังรับแรงอัด ให้ถูกต้อง
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

3.6 การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยสมการของสุวัฒชัย

ในงานวิจัยครั้งนี้จะปรับแก้สมการของ สุวัฒชัย ภูวพัฒนชาติ (2542) ที่ใช้ประเมินกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่มีอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายในและแนวการทดสอบของริบาวน์แฮมเมอร์ เป็นสมการที่ใช้ประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้าง โดยพิจารณาอิทธิพลของการยัดรีงของโครงสร้างคอนกรีต โดยที่สมการของสุวัฒชัย(2542)มีรูปแบบ ดังนี้

$$\text{LN}(\text{CST}) = 0.3110 * k_1 * \text{UPVT} + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * \text{RHT} + 3.322 \quad (4)$$

โดย k_1 = ค่าปรับแก้ค่า UPVT เมื่อตัวอย่างทดสอบมีหน่วยแรงอัดภายในขณะทดสอบ

k_{21} = ค่าปรับแก้เลขจำนวนริบาวน์เนื่องจากอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายใน

k_{22} = ค่าปรับแก้เลขจำนวนริบาวน์เนื่องจากอิทธิพลของแนวการทดสอบ

สำหรับค่า k_1 ในงานวิจัยครั้งนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.00 เนื่องจากผลการศึกษาของสุวัฒชัย(2542) พบว่าคอนกรีตที่มีหน่วยแรงอัดภายในไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต จะไม่มีผลต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี ส่วนค่า k_{21} และ k_{22} มีค่าดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าปรับเทียบเนื่องจากอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายใน และแนวการทดสอบโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์

ค่าปรับเทียบของ การทดสอบโดย วิธีรีบาวน์แฮม เมอร์	k_{21}		k_{22}
	หน่วยแรงอัดภายใน		แนวการทดสอบ
	มี	ไม่มี	
แนวดิ่งลง	1.0711 – 6.1222/RHT	1	1
แนวนราบ	1.0895 – 7.1569/RHT	1	1.0789 – 6.5897/(k_{21} *RHT)
แนวดิ่งขึ้น	1.0892 – 7.7123/RHT	1	1.2401 – 20.814/(k_{21} *RHT)

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ผลทางสถิติได้ข้อมูลจากการทดลองจำนวน 18 ตัวอย่าง แบ่งได้เป็น เสาคอนกรีต 6 ตัวอย่าง คานคอนกรีต 6 ตัวอย่าง และ พื้นคอนกรีต 6 ตัวอย่าง ผลจากการวิจัยสามารถแสดงด้วยตาราง และภาพดังต่อไปนี้



ตารางที่ 9 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีอุตสาหกรรมไร้รอยต่อ

ชิ้นส่วน	เวลา (วินาที X 10 ⁶)												ระยะทาง (ซม.)	ความเร็ว (ม./วินาที)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			เฉลี่ย
C1C	49.90	53.30	51.80	50.50	52.80	53.40	53.00	52.90	52.80	52.90	52.00	52.40	52.31	21.30	4072.01
C1E	50.10	49.70	49.80	49.50	50.10	49.30	49.70	49.80	50.20	50.10	49.70	49.60	50.30	21.30	4234.59
C2C	47.10	46.70	46.70	46.70	47.30	47.60	46.60	46.70	46.60	46.80	47.30	47.20	46.94	19.30	4111.49
C2E	44.70	44.60	44.30	44.50	44.60	43.70	43.70	44.50	44.20	44.10	43.70	43.70	44.19	19.20	4344.71
C3C	46.20	46.10	45.90	46.10	45.90	45.90	45.90	46.10	46.10	46.50	46.40	46.50	46.50	20.30	4365.59
C3E	47.50	47.40	47.40	46.60	47.20	48.20	48.30	48.60	48.50	48.60	48.50	48.40	47.93	20.70	4318.50

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวแรก หมายถึง ชนิดโครงสร้าง C หมายถึง เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
 ตัวเลขตัวกลาง หมายถึง หมายเลขชิ้นส่วนที่ทดสอบ
 ตัวอักษรตัวหลัง หมายถึง บริเวณที่ทำการทดสอบ C หมายถึงบริเวณกลางชิ้นส่วนโครงสร้าง , E หมายถึงบริเวณปลายชิ้นส่วนโครงสร้าง

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีอุตรั้าโซนิคพัลส์เวโลซิตี

ชิ้นส่วน	เวลา (วินาที X 10 ⁻⁶)												ระยะทาง (ซม.)	ความเร็ว (ม./วินาที)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			เฉลี่ย
B1C	51.90	52.40	52.50	52.40	52.30	52.50	52.20	52.50	53.90	54.40	53.40	54.50	52.91	19.90	3761.22
B1E	47.90	47.90	47.90	47.90	48.40	48.80	48.50	48.60	51.40	52.50	52.70	52.80	49.61	20.00	4031.58
B2C	48.50	48.40	48.60	48.40	50.80	51.30	50.60	51.50	50.60	50.70	49.20	49.70	49.86	20.45	4101.62
B2E	47.70	47.00	47.30	47.40	47.00	47.70	47.70	47.30	46.90	47.20	47.40	47.50	46.90	20.50	4371.00
B3C	38.90	39.20	39.00	39.30	38.80	39.30	39.30	39.40	39.20	38.90	39.70	39.10	39.18	15.50	3956.60
B3E	39.10	39.40	40.10	40.20	40.50	40.10	39.90	40.30	39.50	40.30	39.90	40.10	39.95	16.00	4005.01

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวแรก หมายถึง ชนิดโครงสร้าง B หมายถึง คาน
 ตัวเลขตัวกลาง หมายถึง หมายเลขชิ้นส่วนที่ทดสอบ
 ตัวอักษรตัวหลัง หมายถึง บริเวณที่ทำการทดสอบ C หมายถึงบริเวณกลางชิ้นส่วนโครงสร้าง , E หมายถึงบริเวณปลายชิ้นส่วนโครงสร้าง

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีอุตสาหกรรมโชนิคพัลส์เวโลซิตี

ชั้นส่วน	เวลา (วินาที X 10 ⁻⁶)												ระยะทาง (ซม.)	ความเร็ว (ม./วินาที)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			เฉลี่ย
S1C	26.40	26.70	26.10	26.50	25.90	26.30	26.70	26.30	26.40	26.10	26.30	26.40	26.34	10.50	3986.08
S1E	26.50	26.70	26.40	26.30	27.10	26.70	26.60	27.10	26.10	26.10	26.40	26.30	26.53	10.50	3958.53
S2C	25.70	25.90	26.40	26.30	26.50	26.50	26.60	26.40	26.10	26.60	26.40	26.10	26.29	10.45	3974.64
S2E	27.60	27.60	27.40	27.90	27.10	27.20	28.20	27.80	27.90	27.90	27.40	27.10	27.59	10.50	3805.50
S3C	26.90	27.80	27.40	27.60	26.50	27.70	26.70	26.80	27.90	27.40	27.80	27.40	27.33	10.45	3824.34
S3E	27.40	27.10	26.80	26.80	27.80	27.60	27.80	27.90	27.40	27.80	27.80	27.40	28.10	10.50	3736.65

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวแรก หมายถึง ชนิดโครงสร้าง S หมายถึง ชั้น
 ตัวเลขตัวกลาง หมายถึง หมายเลขชั้นส่วนที่ทดสอบ
 ตัวอักษรตัวหลัง หมายถึง บริเวณที่ทำการทดสอบ C หมายถึงบริเวณกลางชั้นส่วนโครงสร้าง, E หมายถึงบริเวณปลายชั้นส่วนโครงสร้าง

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์

ชั้นส่วน	ตำแหน่ง	ครั้งที่										เฉลี่ย	ค่าเลขจำนวนรืาวาน์
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
C1C	1	40	41	40	39	41	41	42	39	40	41	40.40	40.50
	2	40	40	41	42	41	40	39	41	42	41	40.70	
	3	38	41	41	40	41	39	41	42	41	40	40.40	
C1E	1	42	41	42	43	41	41	41	42	41	42	41.60	41.57
	2	41	42	41	41	42	43	41	41	42	43	41.70	
	3	40	43	41	42	41	41	41	42	42	41	41.40	
C2C	1	40	41	39	42	42	40	41	39	42	41	40.70	40.37
	2	40	39	38	43	40	38	39	40	41	40	39.80	
	3	41	40	40	42	41	40	39	41	40	42	40.60	
C2E	1	41	42	42	43	44	41	41	42	42	41	41.90	42.70
	2	42	42	44	43	42	41	44	44	42	42	42.60	
	3	43	45	42	43	44	43	45	43	43	45	43.60	

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ชั้นส่วน	ตำแหน่ง	ครั้งที่										เฉลี่ย	ค่าเลขจำนวนรีบาวน์
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
C3C	1	44	43	43	44	42	42	43	43	43	42	42.90	42.30
	2	42	42	42	43	42	43	43	44	42	43	42.60	
	3	41	40	42	42	41	40	42	42	42	42	41.40	
C3E	1	43	43	43	44	44	45	43	43	42	44	43.40	43.07
	2	44	44	42	44	42	43	43	43	43	43	43.10	
	3	44	42	42	43	43	43	42	44	42	42	42.70	

หมายเหตุ

ตัวอักษรตัวแรก หมายถึง ชนิดโครงสร้าง C หมายถึง เสา

ตัวเลขตัวกลาง หมายถึง หมายเลขชั้นส่วนที่ทดสอบ

ตัวอักษรตัวหลัง หมายถึง บริเวณที่ทำการทดสอบ C หมายถึงบริเวณกลางชั้นส่วน โครงสร้าง , E หมายถึงบริเวณปลายชั้นส่วน โครงสร้าง

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์

ชิ้นส่วน	ตำแหน่ง	ครั้งที่										เฉลี่ย	ค่าเลขจำนวนรืาวาน์
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
B1C	1	40	40	40	42	41	40	40	41	40	40	40.40	40.40
	2	40	41	40	40	40	41	41	40	41	42	40.60	
	3	42	38	40	42	39	40	40	41	40	40	40.20	
B1E	1	42	40	40	40	40	41	42	40	41	40	40.60	41.43
	2	40	40	44	43	40	41	40	40	42	41	41.10	
	3	42	44	43	42	42	42	44	42	42	43	42.60	
B2C	1	44	43	43	43	44	42	42	43	42	42	42.80	42.60
	2	42	42	42	43	43	42	42	43	42	42	42.30	
	3	42	45	42	42	43	43	42	42	43	43	42.70	
B2E	1	44	42	42	43	43	43	42	42	45	43	42.90	43.13
	2	45	42	42	42	43	45	45	45	43	42	43.40	
	3	42	45	43	43	45	43	42	42	43	43	43.10	

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ชั้นส่วน	ตำแหน่ง	ครั้งที่										เฉลี่ย	ค่าเลขจำนวนรีบาวน์
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
B3C	1	42	42	42	43	42	42	41	42	42	43	42.10	42.80
	2	42	43	42	44	43	43	44	44	44	42	43.10	
	3	44	42	44	42	43	42	44	44	44	43	43.20	
B3E	1	44	44	43	44	43	44	44	43	44	43	43.60	44.70
	2	46	45	46	44	44	46	45	46	46	46	45.40	
	3	44	45	44	46	45	46	46	44	46	45	45.10	

หมายเหตุ

ตัวอักษรตัวแรก หมายถึง ชนิดโครงสร้าง B หมายถึง คาน

ตัวเลขตัวกลาง หมายถึง หมายเลขชั้นส่วนที่ทดสอบ

ตัวอักษรตัวหลัง หมายถึง บริเวณที่ทำการทดสอบ C หมายถึงบริเวณกลางชั้นส่วนโครงสร้าง, E หมายถึงบริเวณปลายชั้นส่วนโครงสร้าง

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีรืาวนแฮมเมอร์

ชิ้นส่วน	ตำแหน่ง	ครั้งที่										เฉลี่ย	ค่าเลขจำนวนรืาวน
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
S1C	1	37	37	35	37	35	34	37	37	36	37	36.20	35.53
	2	35	35	35	34	36	34	35	35	35	36	35.00	
	3	34	36	36	37	35	35	35	34	36	36	35.40	
S1E	1	35	36	36	36	36	36	36	34	34	35	35.40	35.27
	2	35	35	36	36	37	36	35	35	36	37	35.80	
	3	34	35	35	34	36	34	33	36	36	33	34.60	
S2C	1	34	35	35	34	36	33	34	34	34	35	34.40	34.60
	2	35	34	35	35	34	36	36	35	36	34	35.00	
	3	33	35	34	36	36	33	34	36	33	34	34.40	
S2E	1	34	35	35	34	35	35	35	35	34	35	34.70	34.47
	2	34	34	33	35	35	35	34	35	35	34	34.40	
	3	34	34	34	35	35	34	34	34	35	34	34.30	

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ชั้นส่วน	ตำแหน่ง	ครั้งที่										เฉลี่ย	ค่าเลขจำนวนรีบาวน์
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
S3C	1	35	36	33	34	34	35	32	34	34	34	34.10	34.23
	2	34	35	33	36	34	34	33	33	34	35	34.10	
	3	34	35	35	34	35	34	33	36	36	33	34.50	
S3E	1	34	32	35	34	33	32	35	35	34	31	33.50	33.60
	2	35	35	33	34	36	34	35	35	32	34	34.30	
	3	34	31	32	32	34	34	33	32	34	34	33.00	

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวแรก หมายถึง ชนิดโครงสร้าง S หมายถึง พื้น
 ตัวเลขตัวกลาง หมายถึง หมายเลขชั้นส่วนที่ทดสอบ
 ตัวอักษรตัวหลัง หมายถึง บริเวณที่ทำการทดสอบ C หมายถึงบริเวณกลางชั้นส่วนโครงสร้าง , E หมายถึงบริเวณปลายชั้นส่วนโครงสร้าง

ตารางที่ 15 การปรับแก้ค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากการทดลองของพีรเกียรติเป็นค่าเลขจำนวนรีบาวน์
ในสมการของสุวัธชัย (2542)

ชิ้นส่วน	ค่าเลขจำนวนรีบาวน์จาก	ค่าเลขจำนวนรีบาวน์ของ
	การทดลองของพีรเกียรติ	สุวัธชัย (2542)
C1C	40.50	39.90
C1E	41.57	40.83
C2C	40.37	39.78
C2E	42.70	41.83
C3C	42.30	41.48
C3E	43.07	42.15
B1C	40.40	39.81
B1E	41.43	40.72
B2C	42.60	41.74
B2E	43.13	42.21
B3C	42.80	41.91
B3E	44.70	43.58
S1C	35.53	34.65
S1E	35.27	34.41
S2C	34.60	33.80
S2E	34.47	33.68
S3C	34.23	33.47
S3E	33.60	32.89

ตารางที่ 16 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่คำนวณได้จากสมการของสุวิทย์ชัย

$$LN(CST) = 0.3110 * k_1 * UPVT + 0.03209 * k_{21} * k_{22} * RHT + 3.322$$

ชิ้นส่วน	วิธีถอดรื้อโชนิคพลัส	วิธีรีบาวน์แฮมเมอร์	ค่ากำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตที่คำนวณได้ จากสมการของ สุวิทย์ชัย
	เวโลซิตี	เลขจำนวนรีบาวน์	
	ความเร็ว (ม./วินาที)		
C1C	4072.01	39.90	279.83
C1E	4234.59	40.83	304.86
C2C	4111.49	39.78	282.01
C2E	4344.71	41.83	327.60
C3C	4365.59	41.48	325.41
C3E	4318.50	42.15	328.89
B1C	3761.22	39.81	253.19
B1E	4031.58	40.72	285.02
B2C	4101.62	41.74	302.72
B2E	4371.00	42.21	335.06
B3C	3956.60	41.91	291.23
B3E	4005.01	43.58	314.87
S1C	3986.08	34.65	258.83
S1E	3958.53	34.41	254.52
S2C	3974.64	33.80	250.49
S2E	3805.50	33.68	236.67
S3C	3824.34	33.47	236.35
S3E	3736.65	32.89	225.45

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน

ชิ้นส่วน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	แรงกด (กก.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
C1C*	4.26	8.57	14.25	3500	245.56
C1E*	4.26	8.51	14.25	3325	233.28
C2C	4.25	7.85	14.19	3450	243.19
C2E	4.25	8.51	14.19	3420	241.08
C3C	4.27	8.47	14.32	3530	246.51
C3E	4.26	8.57	14.25	3525	247.31
B1C	4.24	8.48	14.12	3225	228.41
B1E	4.23	8.44	14.05	3275	233.05
B2C*	4.24	8.42	14.12	3625	256.74
B2E*	4.24	8.53	14.12	3325	235.49
B3C	4.25	8.58	14.19	3475	244.96
B3E	4.27	8.51	14.32	3525	246.16
S1C	4.25	8.56	14.19	3200	225.57
S1E	4.24	8.47	14.12	3125	221.32
S2C	4.24	8.51	14.12	3050	216.01
S2E	4.24	8.52	14.12	2975	210.70
S3C	4.23	8.52	14.05	3050	217.03
S3E	4.23	8.51	14.05	3025	215.26

*ตำแหน่งที่ทำการเจาะคอนกรีตไม่ตรงกับตำแหน่งที่ทดสอบรับน้ำหนักแอมเมอร์และอูลตราโซนิคพลัสวโลซิติ

ตารางที่ 18 การปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตตัวอย่างตามขนาดของแท่งตัวอย่าง

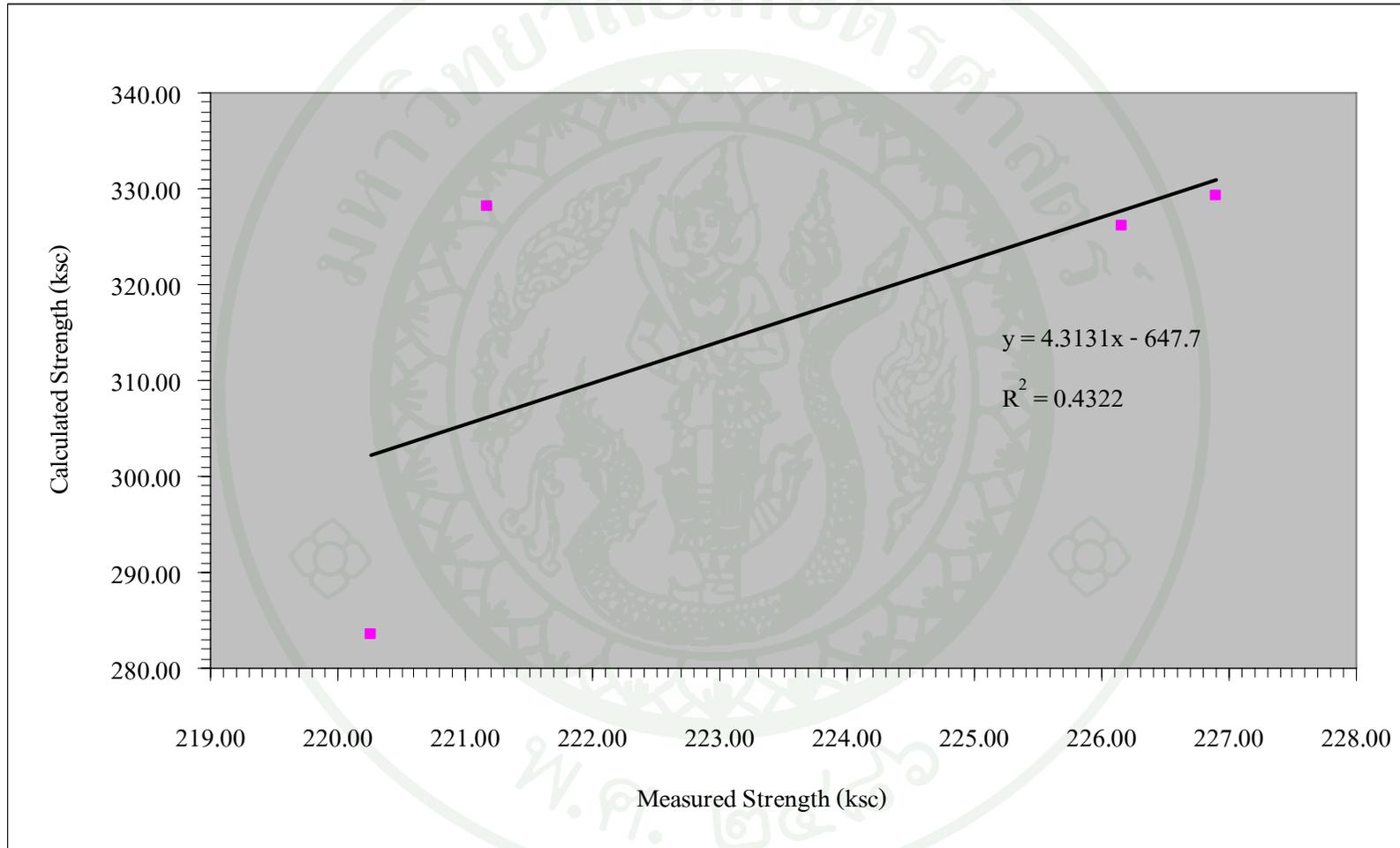
ชิ้นส่วน	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบ	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปรับ
	โดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)	แก้ตามขนาดของแท่งตัวอย่าง (กก./ตร.ซม.)
C1C*	245.56	225.29
C1E*	233.28	214.02
C2C	243.19	220.26
C2E	241.08	221.17
C3C	246.51	226.15
C3E	247.31	226.89
B1C	228.41	209.55
B1E	233.05	213.8
B2C*	256.74	235.54
B2E*	235.49	216.04
B3C	244.96	224.73
B3E	246.16	225.83
S1C	225.57	206.95
S1E	221.32	203.05
S2C	216.01	198.18
S2E	210.70	193.30
S3C	217.03	199.11
S3E	215.26	197.48

*ตำแหน่งที่ทำการเจาะคอนกรีตไม่ตรงกับตำแหน่งที่ทดสอบริบวอร์แฮมเมอร์และอูลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

ตารางที่ 19 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานเปรียบเทียบกับ
ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการของสู่วัชชัย

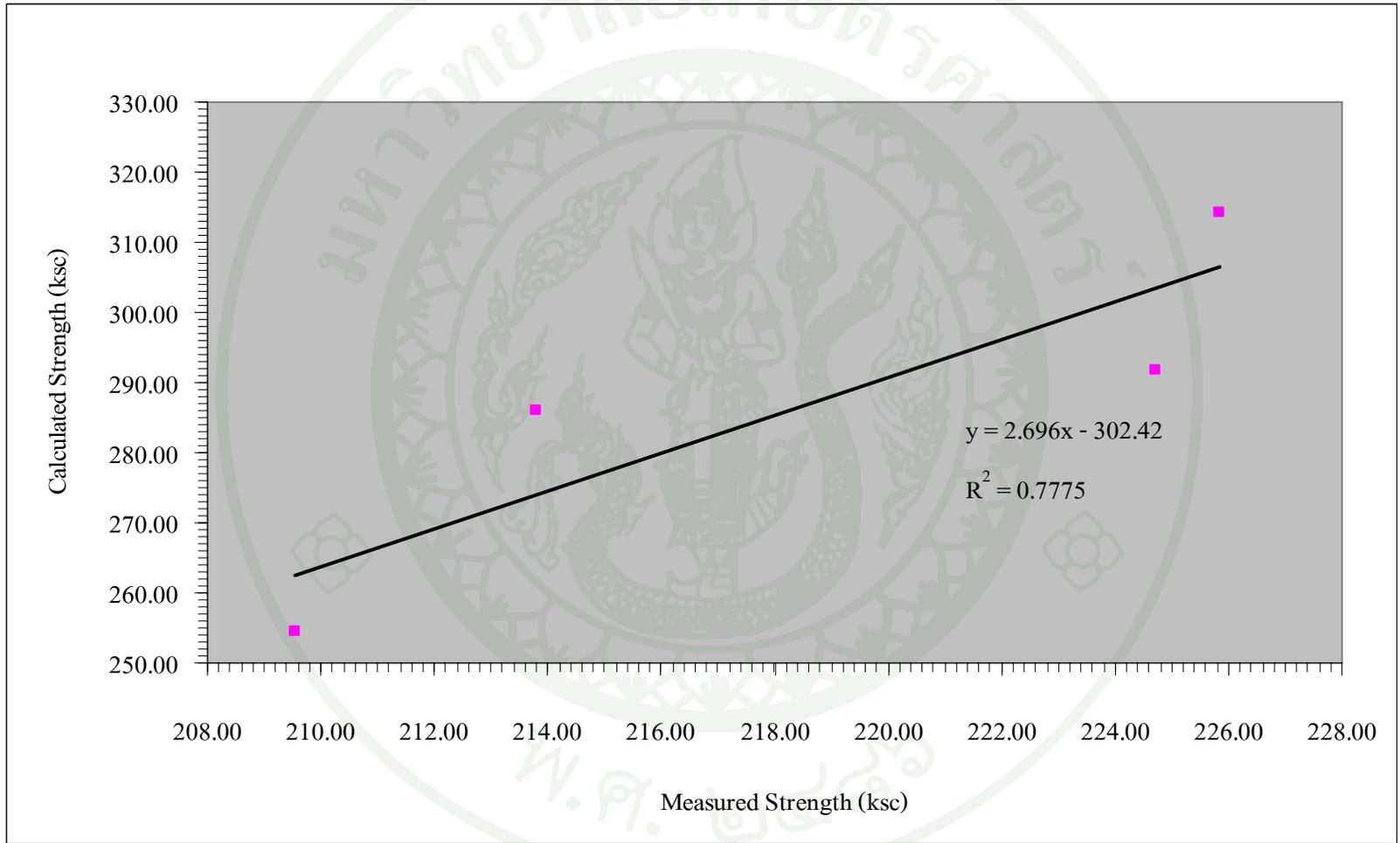
ชิ้นส่วน	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	กำลังรับแรงอัดของ	ค่าความ แตกต่าง (%)
	โดยวิธีกำลังรับแรงอัด มาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)	คอนกรีตตามสมการของ สู่วัชชัย (กก./ตร.ซม.)	
C1C*	225.29	279.83	24.21
C1E*	214.02	304.86	42.44
C2C	220.26	282.01	28.04
C2E	221.17	327.60	48.12
C3C	226.15	325.41	43.89
C3E	226.89	328.89	44.95
B1C	209.55	253.19	20.83
B1E	213.80	285.02	33.31
B2C*	235.54	302.72	28.52
B2E*	216.04	335.06	55.09
B3C	224.73	291.23	29.59
B3E	225.83	314.87	39.43
S1C	206.95	258.83	25.07
S1E	203.05	254.52	25.35
S2C	198.18	250.49	26.40
S2E	193.30	236.67	22.43
S3C	199.11	236.35	18.70
S3E	197.48	225.45	14.16

*ตำแหน่งที่ทำการเจาะคอนกรีตไม่ตรงกับตำแหน่งที่ทดสอบริบวอร์แฮมเมอร์และอุลตราโซนิค
พัลส์เวโลซิตี



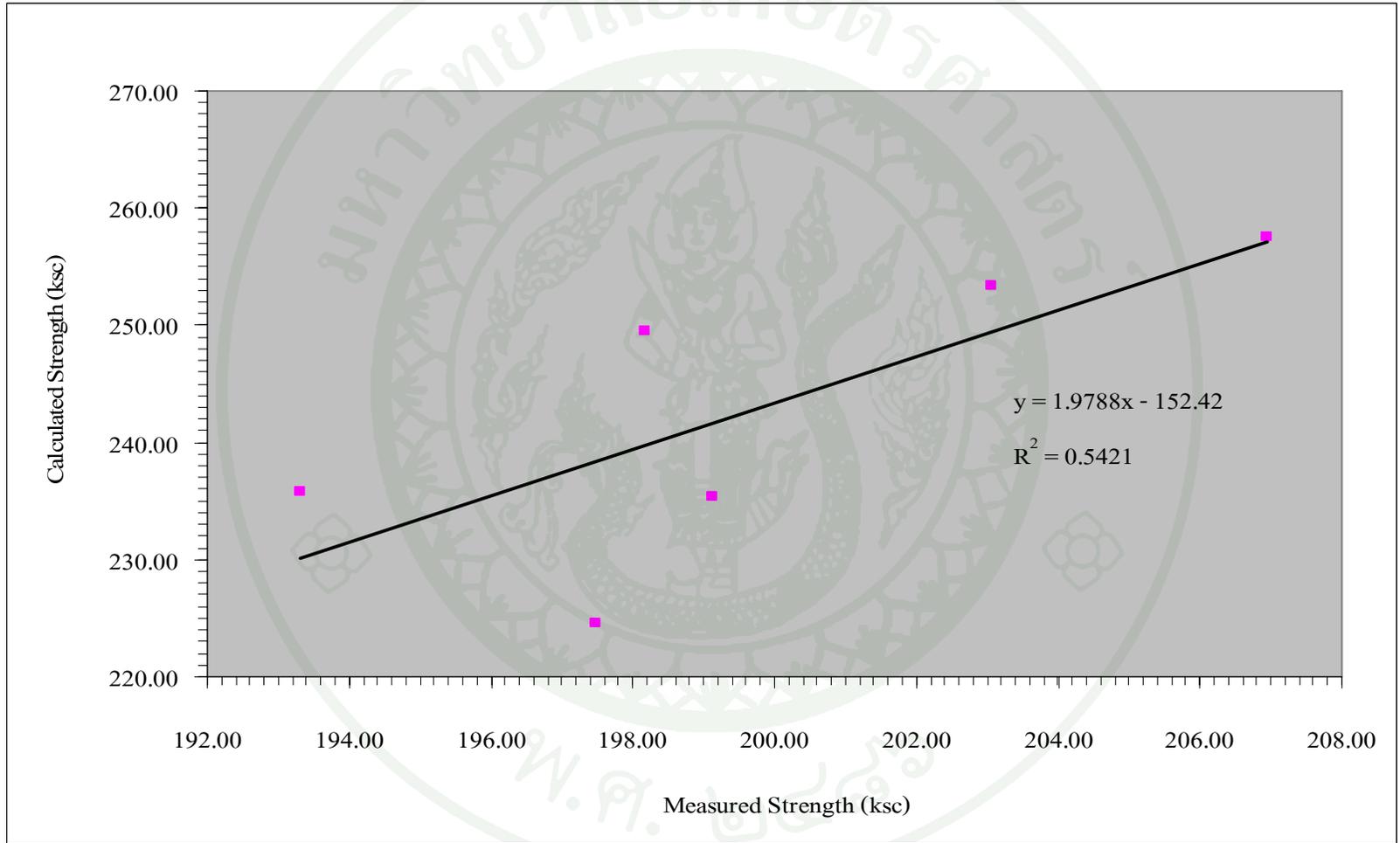
ภาพที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนเสาคอนกรีตจากวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและจากสมการ

$$\text{LN}(\text{CST}) = 0.3110k_1 * \text{UPVT} + 0.03209k_{21}k_{22} * \text{RHT} + 3.322$$



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนคานคอนกรีตจากวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและจากสมการ

$$LN(CST) = 0.3110k_1 * UPVT + 0.03209k_{21}k_{22} * RHT + 3.322$$



ภาพที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนพื้นคอนกรีตจากวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและจากสมการ

$$\text{LN}(\text{CST}) = 0.3110k_1 * \text{UPVT} + 0.03209k_{21}k_{22} * \text{RHT} + 3.322$$

ตารางที่ 20 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานและการปรับแก้ค่าคงที่ (C) ในสมการ $LN(CST) = 0.3110k_1 * UPVT + 0.03209k_{21}k_{22} * RHT + C$

ชิ้นส่วน	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบ	
	โดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)	การปรับแก้ค่าคงที่, C
C1C ^x	225.29	3.105
C1E ^x	214.02	2.968
C2C	220.26	3.075
C2E	221.17	2.929
C3C	226.15	2.958
C3E	226.89	2.951
B1C	209.55	3.133
B1E	213.80	3.034
B2C ^x	235.54	3.071
B2E ^x	216.04	2.883
B3C	224.73	3.063
B3E	225.83	2.990
S1C	206.95	3.098
S1E	203.05	3.096
S2C	198.18	3.088
S2E	193.30	3.120
S3C	199.11	3.151
S3E	197.48	3.190

^xตำแหน่งที่ทำการเจาะคอนกรีตไม่ตรงกับตำแหน่งที่ทดสอบปริมาตรแอมเมอร์และอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี

ตารางที่ 21 การปรับแก้ค่าคงที่ (C) ในสมการ $LN(CST) = 0.3110k_1 * UPVT + 0.03209k_{21}k_{22} * RHT + C$

ชั้นส่วน	การปรับแก้ค่าคงที่, C	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation,sd)	
เสา	C2C	3.075		
	C2E	2.929		
	C3C	2.958	2.978	0.066
	C3E	2.951		
คาน	B1C	3.133		
	B1E	3.034		
	B3C	3.063	3.055	0.060
	B3E	2.990		
พื้น	S1C	3.098		
	S1E	3.096		
	S2C	3.088		
	S2E	3.120	3.124	0.039
	S3C	3.151		
	S3E	3.190		

วิจารณ์

ในการทดสอบตัวอย่างเสา คาน และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีและวิธีริบาวน์แฮมเมอร์ และการวิเคราะห์ผลการทดลองตลอดจนการนำเสนอผลการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้าง สรุปได้ดังนี้

1. การปรับแต่งผิวคานคอนกรีตให้เรียบกระทำได้ยากเนื่องจากโครงสร้างอยู่ในระดับสูง อีกทั้งมีแนวสายไฟพาดผ่าน ทำให้การทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังมากยิ่งขึ้น ส่วนการปรับแต่งผิวพื้นคอนกรีตพบอุปสรรคเล็กน้อย คือผิวบนของพื้นมีการปูกระเบื้องไว้ จึงต้องทำการรื้อกระเบื้องออกก่อนที่จะทำการขัดผิว ส่วนการปรับแต่งผิวเสาคอนกรีตกระทำได้ง่ายเนื่องจากโครงสร้างอยู่ในระดับที่สามารถทำงานได้สะดวก ระดับและความเรียบของผิวคอนกรีตจะมีผลต่อค่าเลขจำนวนริบาวน์ เช่น ถ้าผิวโค้งนูนจะทำให้ค่าที่อ่านได้ต่ำกว่าค่าความเป็นจริง ส่วนผิวที่เว้าจะทำให้ค่าที่อ่านได้สูงกว่าค่าความเป็นจริง แต่จะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเร็วคลื่นอุลตราโซนิคส์

2. การใช้เครื่องกำหนดตำแหน่งทดสอบเพื่อให้ตำแหน่งที่จะทดสอบตรงกันในการทดสอบโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีแบบไดเร็กทรานมิชชั่น(Direct Transmission) สำหรับโครงสร้างเสาและคานคอนกรีตไม่พบอุปสรรค เพราะสามารถมองเห็นตำแหน่งของเครื่องกำหนดตำแหน่งทดสอบได้ชัดเจนทั้งสองด้านของโครงสร้างเนื่องจากคานและเสามีมิติไม่ใหญ่นัก แต่หากคานและเสามีมิติใหญ่กว่าขนาดเครื่องกำหนดตำแหน่ง อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบได้มากเนื่องจากตำแหน่งทดสอบอาจไม่ตรงกัน ส่วนการกำหนดตำแหน่งในพื้นที่คอนกรีตค่อนข้างทำได้ยากเนื่องจากมองเห็นโครงสร้างเพียงด้านเดียว แต่เนื่องจากพื้นมีความหนาค่อนข้างน้อยทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยถึงแม้ตำแหน่งจะไม่ตรงกันพอดี

3. จากการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20 X 0.40 X 2.00 ม. โดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีซึ่งมีระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่น 20 ซม. และ 40 ซม. ตามลำดับ พบว่าตำแหน่งเหล็กค้ำและระยะเรียงของเหล็กค้ำในคานไม่มีผลต่อค่าความเร็วคลื่นอุลตราโซนิคส์อย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความเร็วคลื่นอุลตราโซนิคส์จะขึ้นกับค่าความหนาแน่นของคอนกรีตในแต่ละตำแหน่ง โดยที่คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากกว่ามีค่าความเร็วคลื่นอุลตราโซนิคส์สูงกว่า

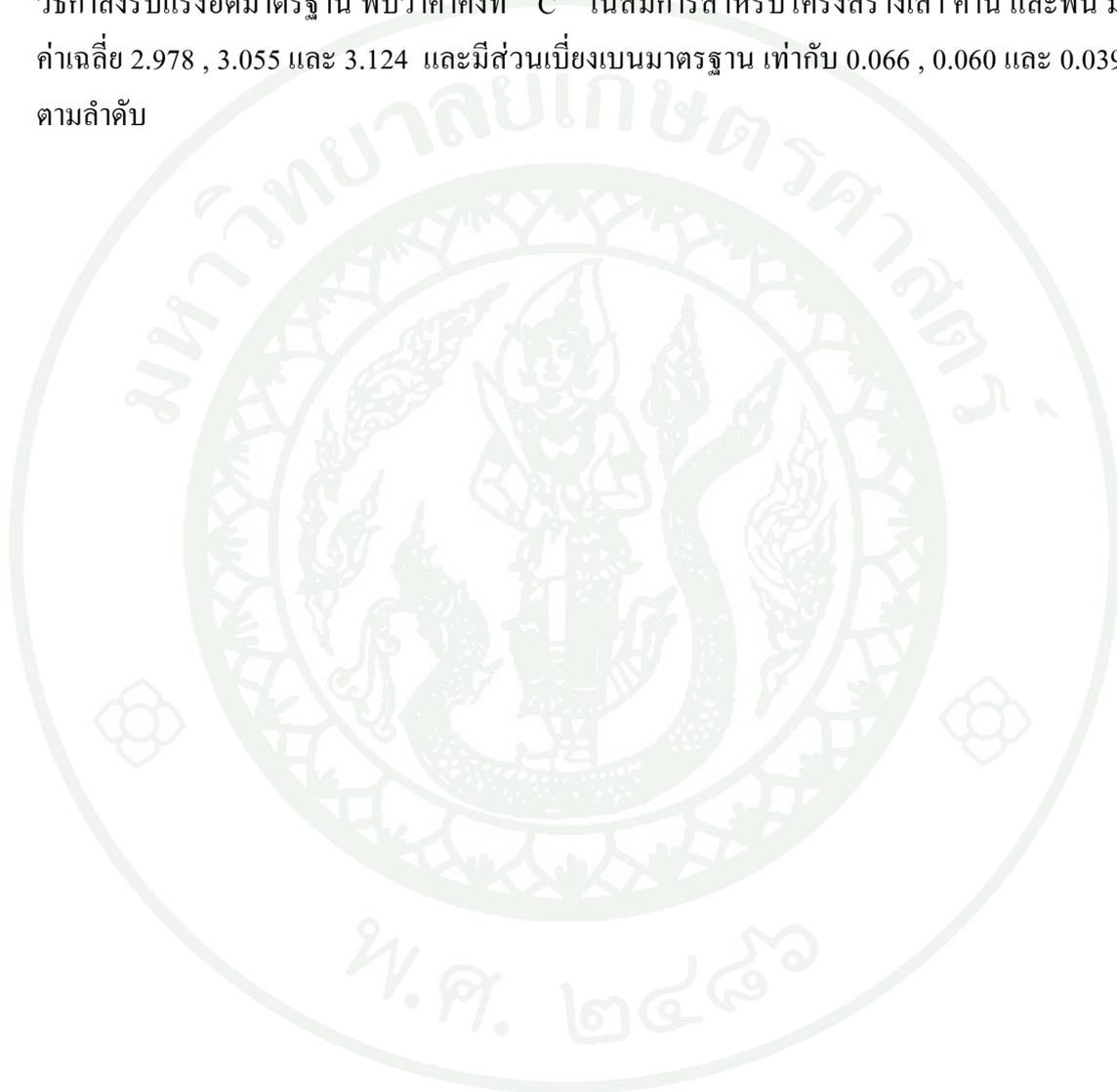
4. เมื่อทำการเจาะคอนกรีต(Coring)ตัวอย่างคานและเสาคอนกรีตในบางตำแหน่ง พบว่าตำแหน่งที่เจาะตรงกันกับเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งไม่สามารถเจาะตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดตามวิธีมาตรฐานได้ ทำให้ต้องปรับเปลี่ยนตำแหน่งเจาะใหม่ซึ่งไม่ตรงกันกับบริเวณที่ทำการทดสอบรับน้ำหนักแอมเมอร์และอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีที่ทำไว้ก่อนแล้ว ทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าเบี่ยงเบนไปจากกำลังรับแรงอัดที่คำนวณได้มาก จำเป็นต้องตัดผลการทดลองนี้ทิ้งไป

5. ตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบได้มาจากการเจาะคอนกรีตในโครงสร้างจริง ทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงแตกต่างจากคอนกรีตรูปทรงกระบอก $\varnothing 15 \times 30$ ซม. ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้หาลำดับรับแรงอัดมาตรฐานตามวิธี ACI ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบเพื่อให้เป็นค่ากำลังรับแรงอัดตามวิธี ACI ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์อาจคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงเล็กน้อย

6. ในการทดสอบวิธีรับน้ำหนักแอมเมอร์เนื่องจากเครื่องชนิดที่แอมเมอร์ที่ใช้ไม่ใช่เครื่องเดียวกันกับที่ใช้ในการเสนอสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของสุวัตชัย ดังนั้นต้องทำการปรับเทียบค่าเลขจำนวนรับน้ำหนักของเครื่องชนิดที่แอมเมอร์ทั้งสองให้สัมพันธ์กัน ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย(Simple Regression Analysis)ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรับน้ำหนัก เนื่องจากให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างเลขจำนวนรับน้ำหนักทั้งสองสูงสุด

7. จากการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทดสอบโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐานเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่คำนวณจากสมการของสุวัตชัย ในโครงสร้างเสาคอนกรีตมีค่าแตกต่างเฉลี่ย 41.61 % ในโครงสร้างคานคอนกรีตมีค่าแตกต่างเฉลี่ย 31.03 % และในโครงสร้างพื้นคอนกรีตมีค่าแตกต่างเฉลี่ย 21.50 % ทั้งนี้การที่ค่ากำลังรับแรงอัดของโครงสร้างแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างเฉลี่ยต่างกันอาจเกิดจากการที่โครงสร้างแต่ละชนิดมีความหนาแน่นของเนื้อโครงสร้างต่างกัน โดยเสาคอนกรีตมีค่าแตกต่างเฉลี่ยมากที่สุดเพราะเสาเป็นโครงสร้างในแนวตั้งทำให้ควบคุมคุณภาพตอนเทคอนกรีตได้ยาก ทำให้มวลหินมาสะสมบริเวณปลายด้านล่างเสามากกว่าบริเวณกลางเสา ทำให้ความหนาแน่นของเนื้อโครงสร้างทั้งสองบริเวณไม่เท่ากัน ส่วนโครงสร้างคานและพื้นคอนกรีต การควบคุมคุณภาพตอนเทคอนกรีตในคานทำได้ยากกว่าในพื้นที่ แต่ค่อนข้างง่ายกว่าในเสา จึงทำให้การกระจายตัวของหินจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าแตกต่างเฉลี่ยไม่สูงมากนัก ด้วยเหตุนี้จึงแบ่งสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างเป็นสมการที่ใช้สำหรับเสา คาน และพื้น

8. การปรับแก้ค่าคงที่จากสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของส่วตัว LN(CST) = $0.3110k_1 * UPVT + 0.032090k_{21}k_{22} * RHT + 3.332$ โดยปรับแก้ค่า 3.322 เป็นค่าคงที่ C ในสมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างเสา คาน และพื้นของพรีเคาส์เทรต ทำได้โดยการแทนค่าตัวแปร CST ในสมการดังกล่าว ด้วยกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน พบว่าค่าคงที่ C ในสมการสำหรับโครงสร้างเสา คาน และพื้น มีค่าเฉลี่ย 2.978 , 3.055 และ 3.124 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.066 , 0.060 และ 0.039 ตามลำดับ



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ผลการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะยี่ดิ่งและมีหน่วยแรงอัดภายใน จากการทดสอบโดยวิธีรืาวาน์แฮมเมอร์และวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีร่วมกัน แสดงได้ดังนี้

เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก :

$$\text{LN(CST)} = 0.3110k_1 * \text{UPVT} + 0.032090k_{21}k_{22} * \text{RHT} + 2.978$$

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก :

$$\text{LN(CST)} = 0.3110k_1 * \text{UPVT} + 0.032090k_{21}k_{22} * \text{RHT} + 3.055$$

พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก :

$$\text{LN(CST)} = 0.3110k_1 * \text{UPVT} + 0.032090k_{21}k_{22} * \text{RHT} + 3.124$$

โดย	CST	=	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตใน โครงสร้างที่ประเมินได้	..กก./ตร.ซม.
	UPVT	=	ค่าอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีจากการทดสอบ	..กม./วินาที
	RHT	=	ค่าเลขจำนวนรืาวาน์ที่ปรับเทียบมาจากเครื่องชนิดที่แฮมเมอร์ที่ใช้ทดสอบ	
	k_1	=	ค่าปรับแก้ค่า UPVT เมื่อตัวอย่างทดสอบมีหน่วยแรงอัดภายในขณะทดสอบ	
	k_{21}	=	ค่าปรับแก้เลขจำนวนรืาวาน์เนื่องจากอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายใน	
	k_{22}	=	ค่าปรับแก้เลขจำนวนรืาวาน์เนื่องจากอิทธิพลของแนวการทดสอบ	

โดยที่งานวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยของสุวัธชัย ภูวพัฒนชาติ(2542) ดังนั้นสมการประเมีนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะยี่ดิ่งและมีหน่วยแรงอัดภายใน จากการทดสอบโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอัลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีร่วมกันที่กล่าวมา สามารถใช้ได้กับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 210 – 560 กก./ตร.ซม. มีขนาดหินใหญ่สุด 3 / 8 , 1 / 2 , 3 / 4 และ 1 นิ้ว มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.320 – 0.684 และมีอายุของคอนกรีตระหว่าง 28 – 90 วัน แต่หากคอนกรีตมีอายุมากกว่า 90 วัน อาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากกำลังของคอนกรีตที่มีอายุมากกว่า 90 วัน มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นน้อยมากและใช้เวลานานนับปี

ค่าปรับเทียบเนื่องจากอิทธิพลของหน่วยแรงอัดภายใน และแนวการทดสอบโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์ที่เสนอโดยสุวัธชัย

ค่าปรับเทียบของการทดสอบโดยวิธีรีบาวน์แฮมเมอร์	k_{21} หน่วยแรงอัดภายใน		k_{22}
	มี	ไม่มี	แนวการทดสอบ
แนวคั้งลง	1.0711 – 6.1222/RHT	1	1
แนวราบ	1.0895 – 7.1569/RHT	1	1.0789 – 6.5897/(k_{21} *RHT)
แนวคั้งขึ้น	1.0892 – 7.7123/RHT	1	1.2401 – 20.814/(k_{21} *RHT)

ค่าปรับเทียบเนื่องจากเครื่องชนิดที่แฮมเมอร์ที่ใช้ทดสอบที่เสนอโดยพีรเกียรติ

แนวการทดสอบ	RHT
แนวค้ำลง	$0.9127RHT' + 2.2203$
แนวราบ	$0.8761RHT' + 4.4178$
แนวค้ำขึ้น	$0.8674RHT' + 6.0957$

ข้อเสนอแนะ

ในการใช้สมการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงสร้างโดยวิธีรืบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอัดร้าวโซนิกพัลส์เวโลซิตี ที่เสนอนี้จะต้องทำการปรับแก้ค่าเลขจำนวนรืบาวน์ของเครื่องชนิดที่แฮมเมอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นเลขจำนวนรืบาวน์ของสุ่วตชัยเสียก่อน ส่วนค่าอัดร้าวโซนิกพัลส์เวโลซิตีนั้น ไม่จำเป็นต้องปรับแก้รวมทั้งค่าคงที่ต่างๆในสมการ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นรินทร์ เลิศสาธิต. 2541. การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีและวิธีรีบา운드แฮมเมอร์ร่วมกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมโพธิ วิวิธเกสรวงษ์ และ ยาซูโอะ ทานิกาวา. 2535. การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยรวมการทดสอบจากวิธีรีบา운드แฮมเมอร์ และวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี. รายงานการวิจัย. โครงการความร่วมมือกับต่างประเทศ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 131 น.

สุรินทร์ กิตติวรการชัย. 2536. ประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูงโดยรวมการทดสอบแบบไม่ทำลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุวัฒน์ ภูวพัฒนาชาติ. 2542. อิทธิพลของหน่วยแรงภายในที่มีผลต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีรีบา운드แฮมเมอร์และวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Akashi, T. and S. Amasaki. 1984. **Study of the Stress Waves in the Plunger of a Rebound Hammer at the Time of Impact**, Publication SP-82 American Concrete Institute, Michigan. 825 p.

Bungey, J.H. 1984. **The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing**. Publication SP-82 American Concrete Institute, Michigan. 825 p.

Kolcx, J. 1958. **An Appreciation of the Schmidt Rebound Hammer**, Mag. Coner. Res. (London). 10(28), 27.

Malhotra, V.H. 1976. **Testing hardness concrete non-destructive methods**, ACI Monograph. No.9 : 103 - 108

- Malhotra, V.H. 1984. **In situ/Nondestructive Testing of Concrete**. American Concrete Institute, Michigan. 825 p.
- Malhotra, V.M. and N.J. Carion. 1991. **CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. CRC Press, Inc, Florida. 343 p.
- Mitchell, L. J. and G.G. Hoagland. 1961. **Investigation of the Impact Tube Concrete Test Hammer**. Bull. 305, Highway Research Board, 14 p.
- Samarin, A. and R.K. Dhir. 1984. **Determination of In Situ Concrete Strength : Rapidly and Confidently by Nondestructive Testing**. Publication SP-82 American Concrete Institute, Michigan. 825 p.
- Sturup, V.R., F.J. Vecchio and H. Caratin. 1984. **Pulse Velocity as a Measure of concrete Compression Strength**. Publication SP-82 American Concrete Institute, Michigan. 825 p.
- Swamy, R.N. and A.H. Al-Hamed. 1984. **The Use of Pulse Velocity Measurements of Estimate Strength of Air-Dried Cubes and Hence In Situ Strength of Concrete**. Publication SP-82 American Concrete Institute, Michigan. 825 p.
- Tanigawa, Y.,K. Baba and H. Mori. 1984. **Estimation of Concrete Strength by Combined Nondestructive Testing Methods**. Publication SP-82 American Concrete Institute, Michigan. 825 p.



ภาคผนวก

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม ที่เรียกว่าตัวเกณฑ์ กับตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวอื่นๆ ที่สัมพันธ์กันตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งเรียกว่าตัวพยากรณ์ ถ้ามีตัวพยากรณ์เพียงตัวเดียวจะเรียกการศึกษาคือความสัมพันธ์นั้นว่า การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) แต่ถ้ามีตัวพยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยมีตัวเกณฑ์เพียงตัวเดียว จะเรียกการศึกษาคือความสัมพันธ์นั้นว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย จะใช้วิธีพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่เป็นตัวพยากรณ์ จากสมการเส้นตรง $Y = a + bX$ โดยนิยมใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยที่ a ก็คือค่าคงที่ ส่วน b เป็นความชันของเส้นกราฟ ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยหรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ การพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามจะถูกต้องหรือไม่ขึ้นอยู่กับสมการถดถอย ถ้าพบว่าสมการถดถอยมีส่วนเบี่ยงเบนน้อย ก็แสดงว่าค่าของตัวแปรตามจะถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามในการพยากรณ์แต่ละครั้งจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (Standard Error of Estimate, SEE) ได้ดังแสดงในตารางผนวกที่ 1 ถึงตารางผนวกที่ 3

ตารางผนวกที่ 1 การเปรียบเทียบค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่สามเมอร์ของสุ่วฒชัยและค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่สามเมอร์ของพีรเกียรติ กรณีทดสอบแนวตั้งลง

กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งลง Y(สุ่วฒชัย)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวตั้งลง X(พีรเกียรติ)	X ²	Y ²	XY
120	20.00	20.00	400.00	400.00	400.00
140	21.90	21.28	452.84	479.61	466.03
160	23.20	23.07	532.22	538.24	535.22
180	25.00	24.72	611.08	625.00	618.00
200	26.30	26.33	693.27	691.69	692.48
220	27.80	27.76	770.62	772.84	771.73
240	29.00	29.21	853.22	841.00	847.09
260	30.30	30.72	943.72	918.09	930.82
280	31.60	32.17	1034.91	998.56	1016.57
300	32.90	33.49	1121.58	1082.41	1101.82
320	34.00	34.84	1213.83	1156.00	1184.56
340	35.10	36.21	1311.16	1232.01	1270.97
360	36.50	37.50	1406.25	1332.25	1368.75
380	37.50	38.83	1507.77	1406.25	1456.13
400	38.80	40.12	1609.61	1505.44	1556.66
420	39.80	41.40	1713.96	1584.04	1647.72
440	41.00	42.66	1819.88	1681.00	1749.06
460	42.10	43.84	1921.95	1772.41	1845.66
480	43.30	45.08	2032.21	1874.89	1951.96
500	44.50	46.26	2139.99	1980.25	2058.57
520	45.50	47.42	2248.66	2070.25	2157.61
540	46.70	48.63	2364.88	2180.89	2271.02

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวตั้งลง Y(สุ่วฒชัย)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวตั้งลง X(พีรเกียรติ)	X ²	Y ²	XY
560	47.70	49.83	2483.03	2275.29	2376.89
580	48.90	51.00	2601.00	2391.21	2493.90
600	50.00	52.20	2724.84	2500.00	2610.00
SUM	899.40	924.57	36512.46	34289.62	35379.22

การหาสมการถดถอยของค่าเลขจำนวนรีบาวน์กรณีทดสอบในแนวดิ่งลง

$$N = 25$$

$$\Sigma X = 924.570$$

$$\Sigma Y = 899.400$$

$$\Sigma XY = 35379.224$$

$$\Sigma X^2 = 36512.460$$

$$\bar{X} = 36.983$$

$$\bar{Y} = 35.976$$

$$SS_{XY} = \Sigma XY - ((\Sigma X \Sigma Y)/N) = 2116.8937$$

$$SS_{XX} = \Sigma X^2 - ((\Sigma X)^2/N) = 2319.2727$$

$$b = SS_{XY} / SS_{XX} = 0.9127$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} = 2.2203$$

สมการถดถอย

$$Y = 0.9127X + 2.2203$$

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์

$$SEE = \sqrt{((\Sigma Y^2 - a\Sigma Y - b\Sigma XY)/(N-2))} = 0.1657$$

ตารางผนวกที่ 2 การเปรียบเทียบค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่สามเมอร์ของสุ่วฒชัยและค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่สามเมอร์ของพีรเกียรติ กรณีทดสอบแนวราบ

กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวราบ Y(สุ่วฒชัย)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวราบ X(พีรเกียรติ)	X ²	Y ²	XY
120	24.20	23.00	529.00	585.64	556.60
140	26.00	24.70	610.09	676.00	642.20
160	27.50	26.46	700.13	756.25	727.65
180	29.00	27.95	781.20	841.00	810.55
200	30.30	29.50	870.01	918.09	893.73
220	31.80	30.98	959.76	1011.24	985.16
240	32.90	32.42	1051.06	1082.41	1066.62
260	34.20	33.83	1144.47	1169.64	1156.99
280	35.30	35.15	1235.52	1246.09	1240.80
300	36.60	36.43	1326.78	1339.56	1333.16
320	37.60	37.84	1431.87	1413.76	1422.78
340	38.60	39.20	1536.88	1489.96	1513.24
360	40.00	40.60	1648.60	1600.00	1624.12
380	41.10	41.86	1752.09	1689.21	1720.36
400	42.30	43.07	1855.11	1789.29	1821.90
420	43.30	44.42	1973.49	1874.89	1923.56
440	44.30	45.69	2087.58	1962.49	2024.07
460	45.50	46.94	2203.27	2070.25	2135.72
480	46.70	48.23	2326.13	2180.89	2252.34
500	47.60	49.47	2447.28	2265.76	2354.77
520	48.50	50.63	2563.40	2352.25	2455.56
540	49.70	51.80	2683.24	2470.09	2574.46

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวราบ Y(สุ่วฒซัย)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวราบ X(พีรเกียรต)	X ²	Y ²	XY
560	50.90	53.08	2817.38	2590.81	2701.72
580	52.00	54.22	2939.27	2704.00	2819.18
600	53.00	55.20	3047.04	2809.00	2925.60
SUM	988.90	1002.66	42520.65	40888.57	41682.83

การหาสมการถดถอยของค่าเลขจำนวนรีบาวน์กรณีทดสอบในแนวราบ

$$N = 25$$

$$\Sigma X = 1002.663$$

$$\Sigma Y = 988.900$$

$$\Sigma XY = 41682.834$$

$$\Sigma X^2 = 42520.649$$

$$\bar{X} = 40.107$$

$$\bar{Y} = 39.556$$

$$SS_{XY} = \Sigma XY - ((\Sigma X \Sigma Y)/N) = 2021.4959$$

$$SS_{XX} = \Sigma X^2 - ((\Sigma X)^2/N) = 2307.3257$$

$$b = SS_{XY} / SS_{XX} = 0.8761$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} = 4.4178$$

สมการถดถอย

$$Y = 0.8761X + 4.4178$$

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์

$$SEE = \sqrt{((\Sigma Y^2 - a\Sigma Y - b\Sigma XY)/(N-2))} = 0.1570$$

ตารางผนวกที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่สามเมอร์ของสุ่วตชัยและค่าเลขจำนวนรีบาวน์จากเครื่องชนิดที่สามเมอร์ของพีรเกียรติกรณิศทดสอบแนวคิ่งขึ้น

กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวคิ่ง ขึ้น Y(สุ่วตชัย)	เลขจำนวนรีบาวน์ ทดสอบแนวคิ่งขึ้น X(พีรเกียรติ)	X ²	Y ²	XY
120	30.00	27.85	775.62	900.00	835.50
140	31.80	29.53	872.02	1011.24	939.05
160	33.00	31.13	969.08	1089.00	1027.29
180	34.50	32.64	1065.37	1190.25	1126.08
200	35.70	34.13	1164.86	1274.49	1218.44
220	36.80	35.43	1255.28	1354.24	1303.82
240	38.00	36.70	1346.89	1444.00	1394.60
260	39.10	38.00	1444.00	1528.81	1485.80
280	40.20	39.22	1538.21	1616.04	1576.64
300	41.30	40.50	1640.25	1705.69	1672.65
320	42.30	41.73	1741.39	1789.29	1765.18
340	43.40	43.00	1849.00	1883.56	1866.20
360	44.50	44.24	1957.18	1980.25	1968.68
380	45.50	45.44	2064.79	2070.25	2067.52
400	46.60	46.65	2176.22	2171.56	2173.89
420	47.50	47.84	2288.67	2256.25	2272.40
440	48.50	48.95	2396.10	2352.25	2374.08
460	49.50	50.00	2500.00	2450.25	2475.00
480	50.50	51.21	2622.46	2550.25	2586.11
500	51.70	52.34	2739.48	2672.89	2705.98
520	52.50	53.53	2865.46	2756.25	2810.33
540	53.30	54.60	2981.16	2840.89	2910.18

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวตั้ง ขึ้น Y(สุ่วตชัย)	เลขจำนวนรีบาวน ทดสอบแนวตั้งขึ้น X(พีรเกียรติ)	X ²	Y ²	XY
560	54.30	55.50	3080.25	2948.49	3013.65
580	55.30	56.75	3220.56	3058.09	3138.28
600	56.20	57.90	3352.41	3158.44	3253.98
SUM	1102.00	1094.81	49906.72	50052.72	49961.32

การหาสมการถดถอยของค่าเลขจำนวนรีบาวน์กรณีทดสอบในแนวตั้งขึ้น

$$N = 25$$

$$\Sigma X = 1094.810$$

$$\Sigma Y = 1102.000$$

$$\Sigma XY = 49961.320$$

$$\Sigma X^2 = 49906.718$$

$$\bar{X} = 43.792$$

$$\bar{Y} = 44.080$$

$$SS_{XY} = \Sigma XY - ((\Sigma X \Sigma Y)/N) = 1702.0952$$

$$SS_{XX} = \Sigma X^2 - ((\Sigma X)^2/N) = 1962.3605$$

$$b = \frac{SS_{XY}}{SS_{XX}} = 0.8674$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} = 6.0957$$

สมการถดถอย

$$Y = 0.8674X + 6.0957$$

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์

$$SEE = \sqrt{((\Sigma Y^2 - a\Sigma Y - b\Sigma XY)/(N-2))} = 0.0959$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นาย พีรเกียรติ สำราญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	25 ธันวาคม 2521
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (โยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-