

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมิน
ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตโดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

จัดทำโดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่ร้อยเอก อธิพร ศิริสวัสดิ์

รายงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย

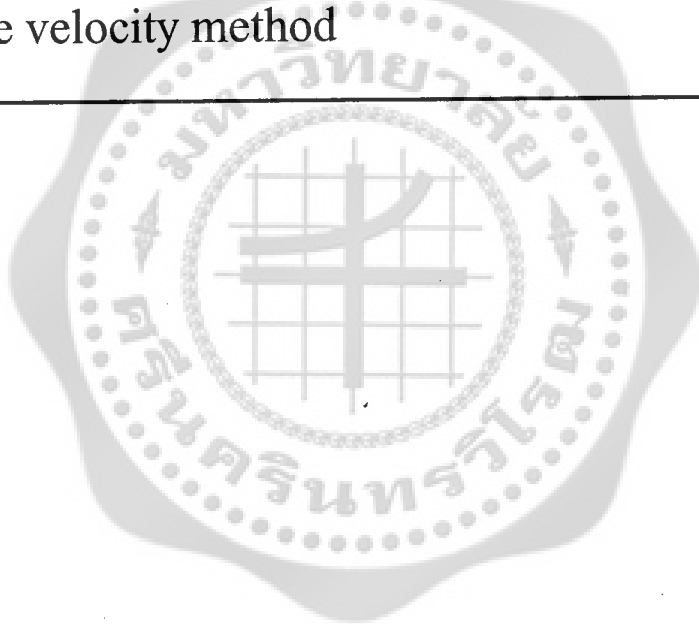
ในทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประเภททุนอุดหนุนการวิจัยจากรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมิน
ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตโดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

Influence of structural steel bar to evaluation
of compressive strength concrete for non-destructive testing
by ultrasonic pulse velocity method



จัดทำโดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่ร้อยเอก อิทธิพร ศิริสวัสดิ์

รายงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย

ในทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประเภททุนอุดหนุนการวิจัยจากรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประเภททุนอุดหนุนการวิจัยจากรายได้คณะฯ ประจำปี 2548 โดยในการนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเรื่องผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตโดยการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี วัดจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆ อาทิ ระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริมต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี เปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี และศึกษาผลกระทบของช่วงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในการปฏิบัติจริงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

ทางผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่สนับสนุนทุนค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา ที่ให้การเอื้อเฟื้อบุคลากรเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ทำวิจัย ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนิสิตนักศึกษา และบุคลากรผู้ที่มีความสนใจ จะได้นำความรู้เหล่านี้ไปใช้ในโอกาสต่อไป

ผู้วิจัย

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญ	ข
บัญชีตาราง	ง
บัญชีภาพประกอบ	จ
บทคัดย่อ	ช
ABSTRACT	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 คลื่นอัลตราโซนิก	3
2.2 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต	9
2.3 เทคนิคการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	12
2.4 เทคนิคการทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีต	15
2.5 เทคนิคการทดสอบหาความลึกของรอยแตกกว้าง	16
2.6 การประเมินผลทางสถิติ	18
2.7 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	25
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
3.3 วิธีการทดลอง	35
3.4 การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน	42
3.5 การทดสอบชิ้นงานตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี	43
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	46
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	47
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	57

บรรณานุกรม	59
ประวัติย่อผู้วิจัย	61
ภาคผนวก	62



ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบความยาวคลื่นที่ความถี่และความเร็วของคลื่นที่มีค่าต่างกัน	9
2.2 ค่าความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกในตัวกลางที่เป็นก๊าซและของเหลว	10
2.3 เกณฑ์พิจารณาในการตัดสินใจ	15
2.4 พิจารณาประเมินสภาพความสมบูรณ์	16
2.5 เกณฑ์ในการควบคุมการผลิต	18
2.6 เกณฑ์ในการประเมินการควบคุมคุณภาพ	18
2.7 ขนาดและมวลต่อเมตรของเหล็กเส้นกลม	20
2.8 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย	21
2.9 ขนาดและมวลต่อเมตรของเหล็กข้ออ้อย	22
2.10 ขนาดและมวลต่อเมตรของเหล็กรีดซ้ำ	22
3.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่เสริมเหล็กลักษณะต่าง ๆ	26
4.1 ลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่น ทดสอบแบบทางตรง	50
4.2 ค่าปรับแก้ผลกระทบของเหล็กเสริมในทิศตั้งฉากกับการส่งสัญญาณคลื่น	53
4.3 ค่าปรับแก้ในทิศตั้งฉากจากข้อแนะนำต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ	54
4.4 ค่าปรับแก้ในทิศขนานจากข้อแนะนำต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ กรณีมีระยะ หุ้มเหล็ก 2.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. และจำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น	54
4.5 ค่าปรับแก้ผลกระทบของเหล็กเสริมในทิศขนานกับการส่งสัญญาณคลื่น	56

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว	3
2.2 ลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง	4
2.3 ลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง	5
2.4 ลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบ ๆ จนเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่	5
2.5 เมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรงคลื่นที่สะท้อนกลับมามีคลื่นเป็นวงกลมเช่นกัน	6
2.6 การหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันของคลื่นอุลตราโซนิก	6
2.7 สายหนังที่ใช้หนังสัญญาณที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นอุลตราโซนิก	7
2.8 ผังการทำงานของเครื่องมือทดสอบวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี	10
2.9 เครื่องมือทดสอบ PUNDIT	10
2.10 การส่งสัญญาณโดยตรง	11
2.11 การส่งสัญญาณกึ่งโดยตรง	12
2.12 การส่งสัญญาณทางอ้อม	12
2.13 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเร็วคลื่นและค่ากำลังอัดของคอนกรีต	13
2.14 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเร็วคลื่นและค่ากำลังอัดของคอนกรีตในสเกลล็อกกาลิทึม	13
2.15 การทดสอบวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีเพื่อศึกษาการพัฒนากำลังของคอนกรีต	14
2.16 ผลกระทบของเหล็กเสริมในตำแหน่งขนานกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น	15
2.17 การประเมินค่าความลึกของรอยแตกกว้าง	16
2.18 การทดสอบหาความลึกของรอยแตกกว้าง	17
2.19 การทดสอบวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีเพื่อประเมินกำลังคอนกรีตหลังเพลิงไหม้	17
2.20 การทดสอบหาความลึกของชั้นคอนกรีตที่คุณภาพไม่สมบูรณ์	18
2.21 การแสดงเครื่องหมายการค้า ชื่อขนาดและชั้นคุณภาพบนเนื้อเหล็กเส้นกลม	20
2.22 การแสดงเครื่องหมายการค้า ชื่อขนาดและชั้นคุณภาพบนเนื้อเหล็กข้ออ้อย	21
3.1 หน้าตัดชิ้นงานตัวอย่าง	27
3.2 ชิ้นงาน A เหล็กตะแกรงชั้นเดียว (ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. ระยะหุ้มคอนกรีต 25 มม.	28
3.3 ชิ้นงาน B เหล็กตะแกรง 2 ชั้น (บน-ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. ระยะหุ้มคอนกรีต 25 มม.	28

รูปที่	หน้า
3.4 ชิ้นงาน C เหล็กตะแกรงชั้นเดียว (ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.	29
3.5 ชิ้นงาน D เหล็กตะแกรง 2 ชั้น (บน-ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.	29
3.6 ชิ้นงาน E เหล็กตะแกรงชั้นเดียว (กลาง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.	30
3.7 ชิ้นงาน F ไม่เสริมเหล็กตะแกรง ขนาด 40x40x15 ซม.	30
3.8 เครื่องทดสอบการรับกำลังอัด	31
3.9 แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม.	31
3.10 เครื่องผสมคอนกรีต	32
3.11 บ่อปั๊มแท่งคอนกรีต	32
3.12 ชุดทดสอบอุณหภูมิตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี	33
3.13 การเตรียมแบบหล่อชิ้นงานทดสอบ	33
3.14 การปาดหน้าคอนกรีตก่อนยกกรวยขึ้นเพื่อวัดค่าการยุบตัว	34
3.15 การวัดค่าการยุบตัว	34
3.16 การเตรียมแบบหล่อชิ้นงานทดสอบ	36
3.17 การเสริมเหล็กชิ้นงานทดสอบ	36
3.18 การทาน้ำมันแบบหล่อ	37
3.19 การหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์	37
3.20 การหล่อชิ้นงานทดสอบระยะห่างเหล็กเสริม 150 มม. จำนวน 6 ชนิด คือ A, B, C, D, E, และ F	38
3.21 การแตงผิวหน้าชิ้นงานชั้นตอนสุดท้าย	38
3.22 ขั้นตอนการถอดแบบหล่อออกจากชิ้นงานทดสอบ	39
3.23 การกองเก็บชิ้นงานหลังจากการทดสอบแล้วเสร็จ	39
3.24 การกำหนดตำแหน่งและเบอร์จุดที่จะทดสอบตัวอย่างแท่งลูกบาศก์	40
3.25 การทดสอบแท่งลูกบาศก์ด้วยเครื่องอุณหภูมิตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี	41
3.26 การกำหนดตำแหน่งและเบอร์จุดที่จะทดสอบตัวอย่างชิ้นงาน	41
3.27 การทดสอบด้วยเครื่องอุณหภูมิตราโซนิคพัลส์เวโลซิตีของชิ้นงาน แบบทางตรง	42

รูปที่	หน้า
3.28 การทดสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีของชิ้นงาน แบบทางอ้อม	42
3.29 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบมาตรฐาน	43
3.30 การออกแบบการวางตำแหน่งในการทดสอบ	45
3.31 ตำแหน่งการทดสอบแบบทางตรง	46
3.32 ตำแหน่งการทดสอบแบบทางตรงที่ระยะเหล็กเสริมต่างกัน	46
4.1 ตัวอย่างรหัสและตำแหน่งทดสอบแบบทางอ้อมที่ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.	51
4.2 ผลกระทบของตำแหน่งเหล็กเสริมลักษณะต่างๆ	52
4.3 กราฟปรับแก้ผลกระทบของขนาดเหล็กเสริมตามมาตรฐาน BS 1881 Part 203	52
4.4 ค่าปรับแก้ผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศตั้งฉากกับการส่งสัญญาณคลื่นตามคุณภาพคอนกรีต	53
4.5 ค่าปรับแก้จากผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางต่างๆ	54
4.6 กราฟปรับแก้ผลกระทบของขนาดเหล็กเสริมในทิศทางตามมาตรฐาน BS 1881 Part 203	55
4.7 ค่าปรับแก้ผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่น	55
4.8 ค่าปรับแก้ผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่นตามคุณภาพคอนกรีต	56

ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต อาทิ ระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม และลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี เลือกใช้วัสดุปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทสามและมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 3/4 นิ้ว ใช้แท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐาน และแบบหล่อชิ้นงานขนาด 40x40 เซนติเมตร ความหนา 15 เซนติเมตร ออกแบบค่ากำลังรับแรงอัดประลัย ที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 300 ± 25 และ 400 ± 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความชื้นเหลืออยู่ระหว่าง 7 ± 2.5 เซนติเมตร ใช้เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น ระยะห่างของเหล็กเสริมเท่ากับ 5-15 เซนติเมตร ใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5-7.5 เซนติเมตร ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ จากผลการทดสอบพบว่า ระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม และลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ จากการเสริมเหล็กขนาด 9 มิลลิเมตร ไม่มีผลกระทบต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีทั้งแบบทางตรงและแบบทางอ้อม ที่ความแตกต่างทางสถิติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนระยะคลื่นผ่านเหล็กต่อระยะห่างของการวัด (L_s/L) น้อยเมื่อเหล็กเสริมอยู่ในทิศทางตำแหน่งตั้งฉากกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น และมีค่าอัตราส่วนระหว่างระยะจากหัวส่งสัญญาณถึงเหล็กเสริมต่อระยะห่างของการวัดสัญญาณ (a/L) ต่ำเมื่อเหล็กเสริมอยู่ในทิศทางตำแหน่งขนานกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น

คำสำคัญ: อัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี, การทดสอบแบบไม่ทำลาย, กำลังรับแรงอัดคอนกรีต

Influence of Structural Steel Bar to Evaluation of Compressive Strength Concrete for Non-Destructive Testing by Ultrasonic Pulse Velocity Method

ABSTRACT

This research intended for Influence of structural steel bar, which involved steel spacing, concrete covering, reinforced steel layer and transducer pattern, to evaluation of compressive strength concrete by ultrasonic pulse velocity testing method. The selected raw materials, Portland cement type III and maximum coarse aggregate size 3/4 inches, were used as the proportions of concrete mixed design. The standard cubic specimens were made and casted in moulds of 40x40 cm. 15 cm. thickness, and the design compressive strength equaled 300 ± 25 and 400 ± 25 kg/cm² at 28 day cure. Slump was 7 ± 2.5 cm. The structural steel bars were sized 9 mm., reinforced steel layer 1-2 layers, steel spacing 5-15 cm., and concrete covering 2.5-7.5 cm. for testing and statistical analysis. The results shown that both of ultrasonic pulse velocity direct and indirect method, concrete thickness, steel spacing, concrete covering, reinforced steel layer, and transducer pattern, were not found significantly related at the .05 level on the output of testing. Because the L_s/L ratio were fewness for axis of bars perpendicular to path length and low value of a/L ratio for axis of bars parallel to path length.

Keyword: Ultrasonic pulse velocity, Non-destructive test, Compressive strength concrete

1. ความเป็นมาของโครงการ

จากวิธีการทดสอบคอนกรีตที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน สำหรับการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างที่เจ้าของงานเอาใจใส่และให้ความสำคัญในคุณภาพของงานนั้น ได้แก่ การทดสอบหาหน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่หล่อด้วยคอนกรีตที่ใช้งานนั้น ๆ และที่มีขั้นตอนวิธีการเก็บตัวอย่าง การหล่อ การบ่ม ตลอดจนการทดสอบตามที่ระบุไว้ใน มอก 409 : 2525 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต อย่างไรก็ตามยังเป็นที่ยกเถียงและหาข้อยุติไม่ได้ว่าผลของการทดสอบแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดย่อม ๆ ที่ได้มานั้นจะแสดงถึงคุณภาพของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้างจริงไปแล้วได้แม่นยำแน่นอนมากน้อยแค่ไหน เพราะปัจจัยแวดล้อมของการหล่อ การบ่ม และการทดสอบแท่งคอนกรีตย่อมแตกต่างกันไปจากที่เป็นของโครงสร้างคอนกรีตจริงอยู่มาก สิ่งที่เป็นที่ต้องการของวงการก่อสร้างอย่างยิ่งเห็นจะเป็นวิธีการทดสอบคอนกรีตที่สามารถทำได้รวดเร็ว ง่าย และสามารถประเมินคุณภาพของงานคอนกรีตได้แม่นยำภายในระยะเวลาที่เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ภายหลังการหล่อขึ้นส่วนคอนกรีต และถ้าวิธีดังกล่าวจะสามารถใช้ได้โดยการไม่ทำลายหรือไม่ทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตที่จะนำไปใช้งานต่อไปนั้นเสียหายจะยิ่งเป็นข้อจูงใจให้วิธีการทดสอบนั้นเป็นที่นิยมแพร่หลายยิ่งขึ้น

วิธีการทดสอบที่พอจะมีคุณสมบัติตามที่ต้องการนั้น เห็นจะเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Method of Testing) ซึ่งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งที่มีความแม่นยำได้แก่ วิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (Ultrasonic Pulse Velocity) วิธีนี้จะได้ผลดีเมื่อใช้ในการทดสอบความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ แต่วิธีนี้มีปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการประเมินกำลังของคอนกรีต เช่น รอยร้าวในเนื้อคอนกรีต การจัดวางเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายมีข้อจำกัดหลายประการทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินผลของกำลังอัดคอนกรีตที่ควรพิจารณา อาทิ คุณสมบัติของวัสดุผสม (Properties) เช่น ชนิดของซีเมนต์ วัสดุผสมและปริมาณฟองอากาศ เป็นต้น สัดส่วนผสม (Proportion) เช่น ปริมาณซีเมนต์ ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม เป็นต้น หรือการบ่ม (Curing) เช่น อุณหภูมิและความชื้น

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลกระทบของระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริมต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี
2. ศึกษาผลกระทบของช่วงค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี
3. เปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

1.2 ขอบเขตการศึกษา

1. ทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตที่ออกแบบ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 กำหนดกำลังแรงอัดประลัยรูปทรงลูกบาศก์เท่ากับ 300 ± 25 และ 400 ± 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อายุ 28 วัน และมีค่าความชื้นเหลืออยู่ระหว่าง 7 ± 2.5 เซนติเมตร
2. ทดสอบวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี โดยจัดวางตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์ในการส่งสัญญาณแบบโดยตรง (Direct Transducer) และแบบทางอ้อม (Indirect Transducer)
3. ใช้ขนาดโผล่ของวัสดุมวลรวมหยาบขนาด $3/4$ นิ้ว
4. ใช้เหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร
5. ใช้ระยะห่างของเหล็กเสริมเท่ากับ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร
6. ใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5, 5.0 และ 7.5 เซนติเมตร
7. จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น
8. มิติของโครงสร้างตัวอย่างเท่ากับ $40 \times 40 \times 15$ เซนติเมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง)

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

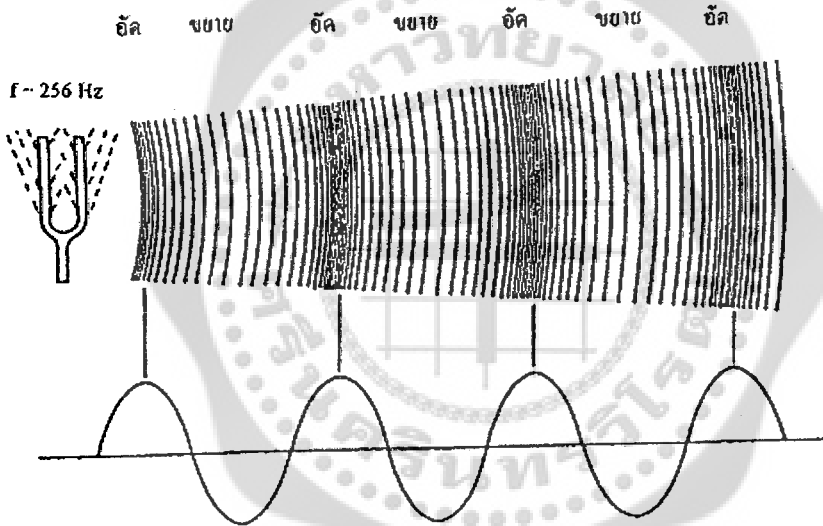
1. ทราบถึงความน่าเชื่อถือถูกต้องแม่นยำ ในการเปรียบเทียบการประเมินกำลังรับแรงอัดคอนกรีต ระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดมาตรฐานกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อสามารถนำไปประกอบการใช้งานในการประเมินกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจริงในสนาม
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการประเมินผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ทำลายวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก เป็นต้น
3. เมื่อสิ้นสุดโครงการวิจัย นักวิจัยจะสร้างรายงานวิจัย เรื่อง “ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตโดยการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี” และมีการเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่สาธารณะ
4. สามารถนำผลงานวิจัยมาประยุกต์ใช้ประกอบการเรียนการสอนนิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาในวิชาชีพพื้นฐาน ได้แก่ วิชาคอนกรีตเทคโนโลยีหรือวิชาวัสดุวิศวกรรมโยธาและการทดสอบ และสามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น ใช้ในการตรวจสอบประเมินกำลังของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยไม่ทำให้โครงสร้างเสียหาย

2.1 คลื่นอุลตราโซนิก

2.1.1 คลื่น (Wave)

คลื่นที่เกิดจากการแกว่งหรือสั่น (Oscillated) ของวัตถุ ซึ่งจะเป็นพลังงานและถ่ายทอดออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังบริเวณโดยรอบ โดยคลื่นทั่วไปสามารถจำแนกตามความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการสั่นของอนุภาคตัวกลางกับทิศทางการเคลื่อนที่ได้สองชนิด คือ

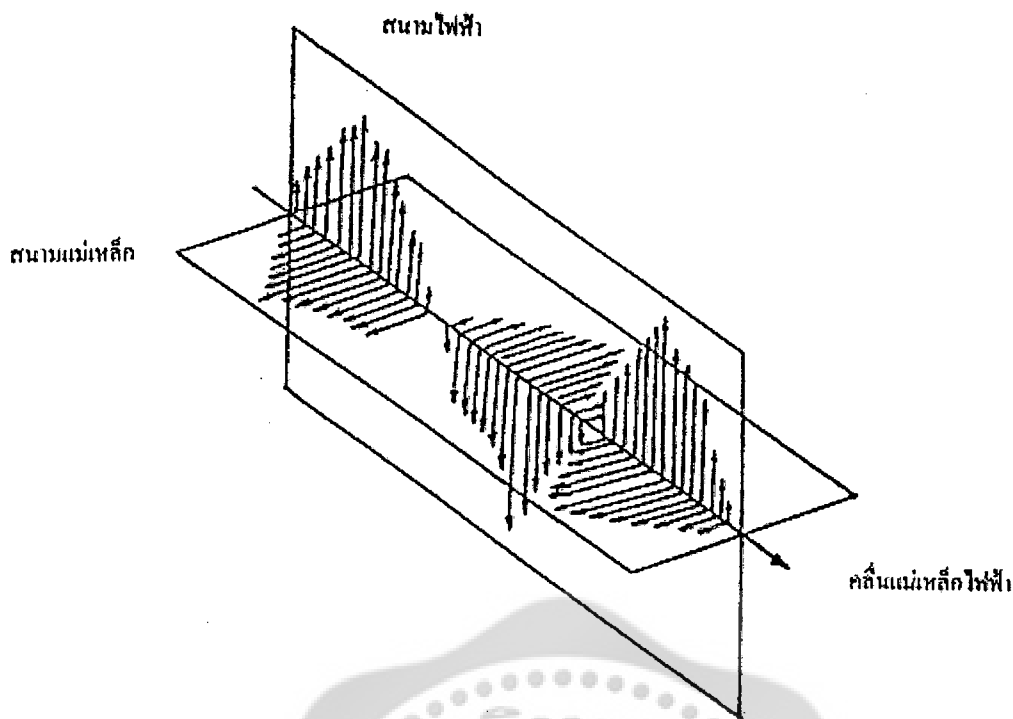
2.1.1.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือ คลื่นที่อนุภาคของตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นเสียง เป็นต้น ซึ่งแสดงลักษณะของคลื่นตามยาวได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว

จากรูปจะเห็นว่ามีส่วนที่เป็นคลื่นอัด (Compression) คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันสูง และคลื่นขยาย (Rarefaction) คือคลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันต่ำ เมื่อนำค่าของความดัน (P) ที่เปลี่ยนไปตามระยะทางมาเขียนกราฟ จะได้เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยยอดคลื่นจะตรงกับส่วนอัด ท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยายระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัดหรือส่วนขยายถึงส่วนขยาย คือ 1 ความยาวคลื่น และมีคาบเวลาเป็น T ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/f$ โดยจุดที่เป็นเส้นแกว่งนั้นมีค่าความดัน 1 บรรยากาศ

2.1.1.2 คลื่นตามขวาง (Transverse Wave) เป็นคลื่นที่อนุภาคตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นน้ำ เป็นต้น โดยรูปที่ 2.2 เป็นการแสดงถึงลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และสนามไฟฟ้า (Electric Field) มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นนั่นเอง



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง

2.1.2 คลื่นเสียง (Sound Wave)

คลื่นเสียงนั้นจัดอยู่ในรูปคลื่นตามยาว ซึ่งสามารถเดินทางผ่านวัตถุตัวกลางในลักษณะอัดและขยาย ทำให้เกิดเสียงขึ้นมา โดยแหล่งกำเนิดของคลื่นเสียงแบ่งได้ตามวัตถุกำเนิดเสียงได้สามประเภท คือ

1. เกิดจากการสั่นของสายหรือแท่ง ได้แก่ เครื่องสายต่าง ๆ, ส้อมเสียง ฯลฯ
2. เกิดจากการสั่นของลำอากาศ ได้แก่ ไดอะแฟรมของลำโพง, ผนังกล่อง ฯลฯ
3. เกิดจากการสั่นของลำอากาศ ได้แก่ เครื่องเป่าต่าง ๆ ฯลฯ

เนื่องจากคลื่นเสียงนั้นต้องอาศัยตัวกลางในการเดินทาง จึงทำให้คลื่นเสียงไม่สามารถเดินทางผ่านสุญญากาศได้

2.1.2.1 ลักษณะของคลื่นเสียง

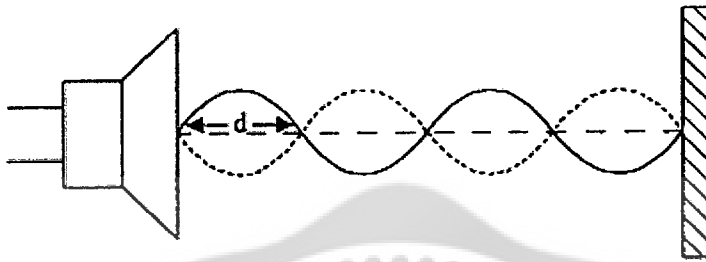
ความถี่ของคลื่นเสียงในตัวอย่างใด ๆ คือความถี่ของการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงนั้นความถี่ของมนุษย์สามารถได้ยินมีค่าอยู่ในช่วง 20 เฮิรท์ (Hz) - 20 กิโลเฮิรท์ (kHz) เรียกว่า ออดิเบิลเฟรควินซี (Audible Frequency) ความถี่ต่ำกว่าที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า อินฟราเรดเฟรควินซี (Infrared Frequency) และความถี่ที่สูงกว่าที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า อุลตราโซนิกเฟรควินซี (Ultrasonic Frequency)

อัตราเร็วของเสียง อัตราเร็วของคลื่นเสียงนั้นย่อมแปรผันตามคุณสมบัติของตัวกลางที่เสียงเดินทางผ่าน ซึ่งตัวแปรที่จำกัดอัตราเร็วของเสียงคือความหนาแน่น, อุณหภูมิ และความยืดหยุ่น (Elasticity)

2.1.2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียง

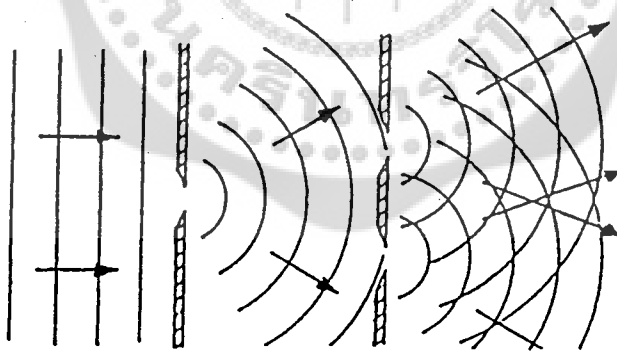
คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียง แบ่งได้เป็นสี่แบบ ได้แก่

1. การแทรกสอดของเสียง (Interference) เกิดจากการรวมกันของคลื่นสองคลื่นขึ้นไป ขณะเมื่อพบกันในตัวกลาง (Medium) เดียวกันซึ่งทำให้เกิดผลได้หลายลักษณะ เช่น การบีบอัด (Beat) ของคลื่นเสียง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกันหรือต่างเฟสกันเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกัน แล้วรวมเป็นคลื่นใหม่ซึ่งทำให้แอมพลิจูดเปลี่ยนไป การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Waves) เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นชุดที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและความถี่เดียวกัน แต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามหรือมีเฟสตรงข้ามกันซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง



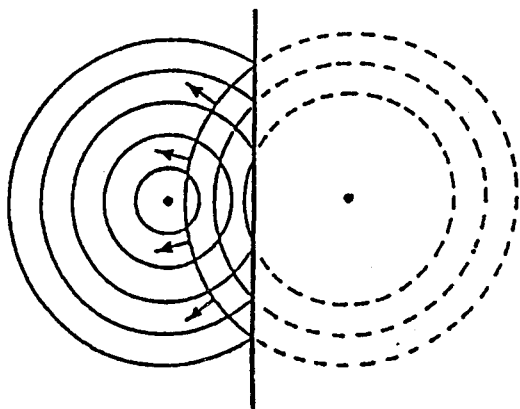
รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง

2. การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง (Diffraction) คลื่นเสียงจะเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้พบอยู่ในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลา เช่น ในกรณีที่ได้ยินเสียงแทรกที่เล่นอยู่คนละถนนของมุมตึกหรือการได้ยินเสียงที่ลอดผ่านช่องเล็ก ๆ จากอีกห้องหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



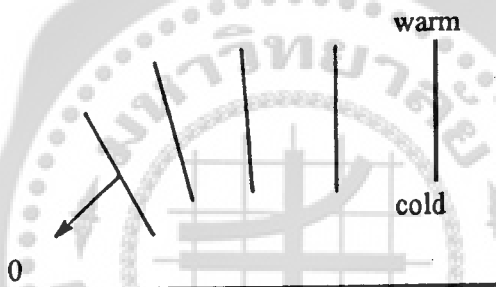
รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบ ๆ จนเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่

3. การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection) คลื่นเสียงสามารถสะท้อนได้เมื่อตกกระทบตัวกลางโดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและจะทำให้เกิดเสียงก้อง (Echo) ซึ่งเสียงก้องที่สะท้อนกลับมาในเวลาที่ยาวกว่า 50 เมตรต่อวินาที จะทำให้ได้ยินเสียงนั้นเป็นครั้งที่สอง



รูปที่ 2.5 เมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรง คลื่นที่สะท้อนกลับมากจะมีคลื่นเป็นวงกลมเช่นกัน

4. การหักเหของคลื่นเสียง (Refraction) คลื่นเสียงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเหของคลื่น ซึ่งทำให้ความเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนไปโดยที่ความถี่ยังคงที่อยู่



รูปที่ 2.6 การหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันของคลื่นอุลตราโซนิก

2.1.3 ลักษณะของคลื่นอุลตราโซนิก

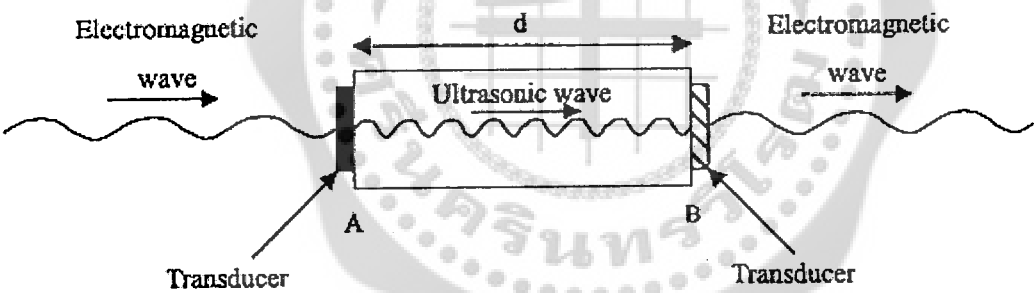
คลื่นอุลตราโซนิก คือคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์ จะสามารถได้ยินซึ่งมีความถี่ตั้งแต่ 20 กิโลเฮิรท์ ถึง 10^4 กิกะเฮิรท์ (GHz) โดยคลื่นที่มีความถี่มากกว่า 10^4 กิกะเฮิรท์ และมีค่าแอมปริจูดสูง ๆ จะเรียกว่า ไฮเปอร์ซาวนด์ (Hypersound) โดยคุณสมบัติของคลื่นอุลตราโซนิกจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับคลื่นเสียงที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งคลื่นอุลตราโซนิกส่วนใหญ่จะกำเนิดขึ้นจากการออสซิลเลชัน (Oscillation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งมีความถี่ต่าง ๆ ซึ่งความยาวคลื่นของคลื่นอุลตราโซนิกในแต่ละความถี่จะแตกต่างกันไป ด้วย โดยความยาวคลื่นจะสัมพันธ์กับความเร็ว (c) และค่าความถี่ (f) ของคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งการเปรียบเทียบความยาวคลื่นที่มีความถี่ต่างกันซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 แสดงค่าที่ $c = 1,000$ เมตรต่อวินาที (m/s) และ 3,000 เมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว และเปรียบเทียบกับค่าการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกันจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก โดยความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วในการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากโดยในสุญญากาศ มีค่าความเร็วประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบความยาวคลื่นที่ความถี่และความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกที่มีค่าต่างกัน

Frequency	wavelength (λ)		
	(for $c=1000\text{ ms}^{-1}$)	(for $c=3000\text{ms}^{-1}$)	(for electromagnetic radiation)
20 kHz = 2×10^4 Hz	5 cm	15 cm	1.5×10^4 m
100 kHz = 10^5 Hz	1 cm	3 cm	3×10^3 m
1 MHz = 10^6 Hz	1 mm	3 mm	300 m
50 MHz = 5×10^7 Hz	20 μm	60 μm	6 m
1 GHz = 10^9 Hz	1 μm	3 μm	30 cm

จากหลักการนี้ เป็นประโยชน์มากในตัวอย่างของระบบโทรทัศน์และระบบดิจิตอลคอมพิวเตอร์ที่ใช้หน่วง (Delay) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ไปเป็นคลื่นอุลตราโซนิกโดยทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หลักการคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน 1 มิลลิเซค(ms) สามารถเดินทางได้ระยะทาง 300 กิโลเมตรซึ่งมีค่ามาก จึงสามารถหน่วงสัญญาณนี้ได้โดยเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นอุลตราโซนิกโดยใช้อุปกรณ์สายหน่วง (Delay Line) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วยตัวส่งและตัวรับคลื่นอุลตราโซนิกโดยคลื่นจะเคลื่อนที่ในสายหน่วง และในระยะทาง d ซึ่งในระยะ d นี้อาจจะเป็นตัวกลางที่เป็น ก๊าซ ของเหลวหรือของแข็งก็ได้ซึ่งจะมีความเร็วที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.7 สายหน่วงที่ใช้หน่วงสัญญาณที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นอุลตราโซนิก

ตารางที่ 2.2 ค่าความเร็วของคลื่นอุลตราโซนิกในตัวกลางที่เป็นก๊าซและของเหลว

Gases and liquids		
	speed (ms ⁻¹)	Acoustic impedance (kgm ⁻² s ⁻¹)
Air	331.46	431
carbon dioxide	259	512
Helium	971.9	173
Hydrogen	1286	116
Neon	434	391
Nitrogen	337	421
Distilled water	1482.3	1048 x 10 ⁶
Acetic acid	1173	1.23 x 10 ⁶
Carbon tetrachloride	940	1.94 x 10 ⁵
Ethanol	1162	9.17 x 10 ⁵
Glycerol	1860	2.34 x 10 ⁶
Mercury	1454	1.97 x 10 ⁷

2.1.4 ความแรงและกำลังของคลื่นอุลตราโซนิก

เมื่อทรานสดิวเซอร์ของอุลตราโซนิกปล่อยคลื่นอุลตราโซนิกออกไป จะทำให้อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นสะเทือนอนุภาคนั้น ๆ จึงมีพลังงานที่เนื่องมาจากการสั่นสะเทือนอัตราการไหลของพลังงานจึงเรียกว่าเป็นความแรง (Intensity) ของลำอุลตราโซนิกอาจกล่าวให้ชัดเจนลงไปว่าความแรงของลำอุลตราโซนิกที่จุดๆหนึ่งเป็นอัตราการไหลของพลังงานผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวางอยู่ตั้งฉากกับลำอุลตราโซนิกที่จุดนั้น เมื่อความแรงของอุลตราโซนิกเพิ่มมากขึ้นจะมีการเพิ่มในเพรสเชอร์แอมพลิจูด (Pressure Amplitude) พาทีเคิลดีสพาสเมนต์แอมพลิจูด (Particel - Displacement Amplitrde) และพาทีเคิลเวโลซิตีแอมพลิจูด (Particel - Velocity Amplitude)

กำลังของอุลตราโซนิกจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Ultrasonic power (W)} = \text{Ultrasonic intensity} \times \text{Cross - Sections(W/cm}^2\text{)} \quad (2.1)$$

ในการใช้งานอุลตราโซนิกนั้น เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถส่งคลื่นไปยังจุดเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างเจาะจง ยิ่งถ้าคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลงโดยถ้าความยาวของคลื่นมากกว่าช่องเปิดของทรานสดิวเซอร์ เช่น คลื่นความถี่ 300 เฮิรท์ ในอากาศจะมีความยาวคลื่นประมาณ 1 เมตรเศษ ซึ่งยาวกว่าช่องเปิดของตัวทรานสดิวเซอร์ทำให้คลื่นเสียงที่ออกจากตัวกำเนิดเสียงนี้เกิดการหักเหและเลี้ยวเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียง ทำให้เกิดการกระจายของคลื่นเสียง (Scatter) ไม่มีทิศทางที่แน่นอน แต่ถ้าใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงขึ้นมาในย่านอุลตราโซนิกเช่นที่ความถี่ 40 กิโลเฮิรท์ จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียง 8 มิลลิเมตรเท่านั้น ซึ่งจะเล็กกว่าช่องเปิดของตัวกำเนิดเสียงมากคลื่นเสียงที่ได้จะไม่เลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งเป็นลำแคบ ๆ (Beam) ซึ่งมีทิศทางที่แน่นอน

ความถี่ที่ใช้งานมักจะถูกจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 กิโลเฮิรท์ เพราะถ้าความถี่สูงขึ้นกว่านี้อากาศจะเกิดดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระดับความแรงของคลื่นอัลตราโซนิกที่ห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานในด้านการแพทย์นั้นจะใช้รัศมีทำการสั้น ๆ จึงใช้ความถี่ในช่วง 1 เมกะเฮิรท์ (MHz) - 10 เมกะเฮิรท์ ส่วนความถี่ที่เป็นกิกะเฮิรท์ จะมีการใช้งานในตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางนั้น ไม่ใช่อากาศแต่เป็นตัวกลางชนิดอื่น เช่น น้ำ เป็นต้น

จากการมีทิศทางของคลื่นอัลตราโซนิกทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่นนำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic Remote Control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic Cleaner) โดยให้น้ำสั้นที่ความถี่สูงเครื่องวัดความหนาของวัตถุ โดยสังเกตตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกายใช้ทดสอบการรั่วของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นการใช้งาน เช่น ถ้าคลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 กิโลเฮิรท์ เพราะที่ความถี่สูงขึ้นกว่านี้อากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว

2.2 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นทดสอบเพื่อหาหน่วยแรงอัดประลัย (Ultimate Compressive Stress) หรือหน่วยแรงอื่น ๆ ล้วนแต่มีข้อเสียอยู่สองประการ ประการแรกได้แก่ ในการทดสอบเหล่านั้นแท่งตัวอย่างคอนกรีตจะต้องถูกกด ดึงหรือบิดจนแตกเสียหาย หรือถูกทำลาย และอีกประการหนึ่งได้แก่การที่ผลการทดสอบของแท่งตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวเป็นเพียงเครื่องช่วยชี้แนะแนวโน้มของคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตในโครงสร้างจริงเท่านั้น เพราะสภาพของการหล่อ กระทุ้งแน่น และบ่ม ในโครงสร้างจริงย่อมแตกต่างไปจากของแท่งตัวอย่างคอนกรีต

การทดสอบวิธีอัลตราโซนิกเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) โดยอาศัยคลื่นความถี่สูงมากกว่า 20,000 เฮิรท์ ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางและอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นเสียงสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากได้เร็วกว่าตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย จึงทำให้สามารถประเมินคุณภาพและคุณสมบัติของวัสดุ ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านการทดสอบนี้ยังสามารถใช้ได้กับวัสดุก่อสร้างหลายอย่าง เช่น คอนกรีตและไม้ เป็นต้น

2.2.1 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

การทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ

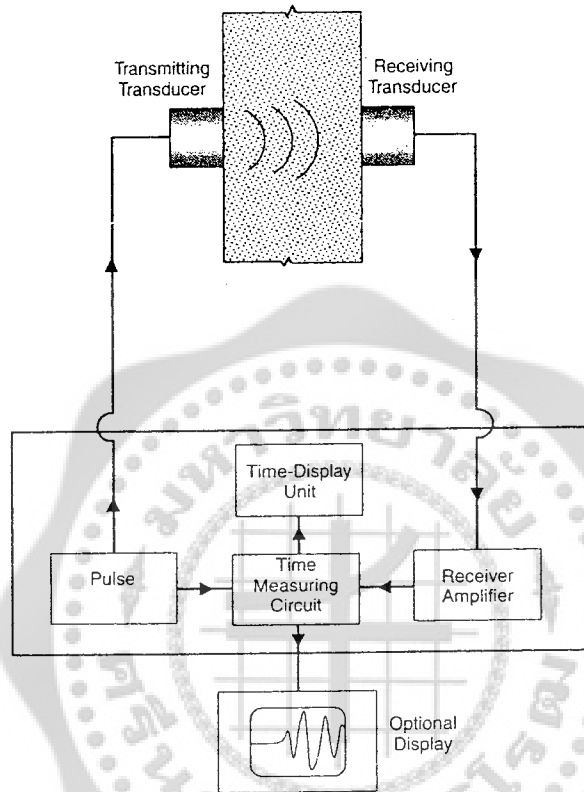
1. วิธีกึ่งทำลาย (Semi-Destructive Method) เช่น การทดสอบแบบพูลเอาท์ (Pull Out Test)
2. วิธีไม่ทำลาย (Non-Destructive Method) เช่น วิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (Ultrasonic Pulse Velocity Test) วิธีรีบาวนด์แฮมเมอร์ (Rebound Hammer Test)

การทดสอบแบบไม่ทำลาย มีข้อจำกัดหลายประการที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังนี้ คือ

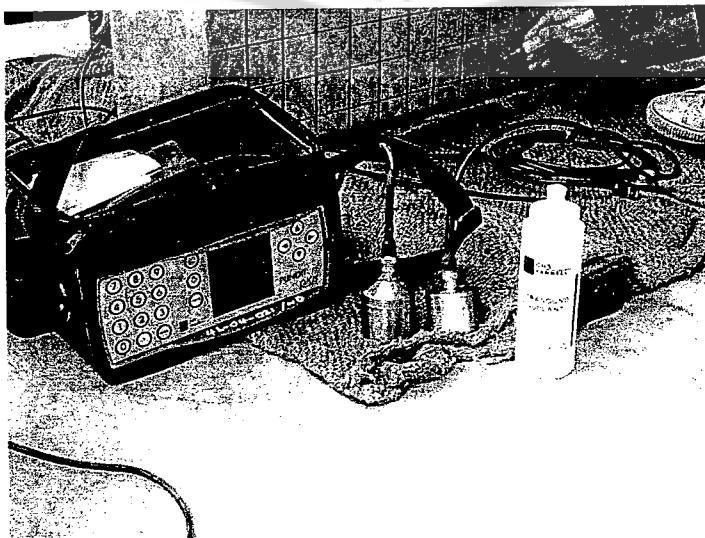
1. คุณสมบัติของวัสดุผสม (Properties) เช่น ชนิดของซีเมนต์ ชนิดของวัสดุผสมและวัสดุผสมเพิ่ม
2. สัดส่วนผสม (Proportion) เช่น ปริมาณซีเมนต์ อัตราส่วนซีเมนต์ต่อวัสดุผสม และขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ
3. การบ่ม (Curing) เช่น อุณหภูมิ และความชื้น

2.2.2 วิธีการทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (Ultrasonic Pulse Velocity Test)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เรียกว่า พอร์ทเทเบิล อัลตราโซนิก น็อนดีสทรักทีฟ ดิจิทัล อินดิเคติง เทสเตอร์ (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) หรือ PUNDIT ประกอบด้วย ตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ขนาด 54 กิโลเฮิรท์ซ์ จำนวนสองตัว อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่ส่งเป็นตัวรับสัญญาณคลื่น (Receiver) โดยการทดสอบนี้ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 597 และ BS 1881-203 โดยผังการทำงานของเครื่องมือทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผังการทำงานของเครื่องมือทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี



รูปที่ 2.9 เครื่องมือทดสอบ PUNDIT

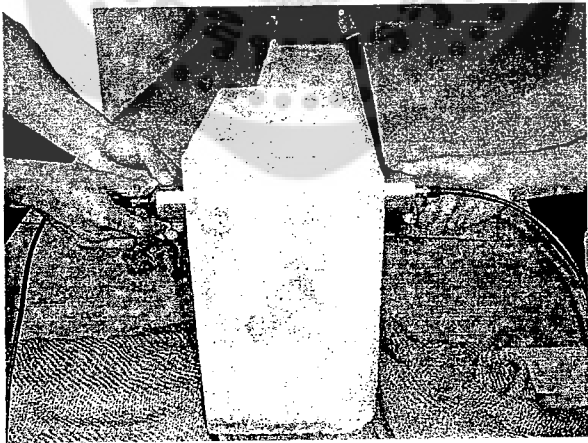
การวัดความเร็วคลื่นทำได้โดยนำทรานสดิวเซอร์สองตัววางแนบกับผิวหน้าคอนกรีตคนละด้าน ควรใช้จารบีทาบาง ๆ ที่ทรานสดิวเซอร์เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างหน้าของทรานสดิวเซอร์กับผิวคอนกรีต ซึ่งจะทำให้ความเร็วของคลื่นลดน้อยลง ค่าที่อ่านได้จากเครื่องเป็นเวลาที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ดังนั้นความเร็วคลื่นสามารถคำนวณได้จาก

$$V = L/T \tag{2.2}$$

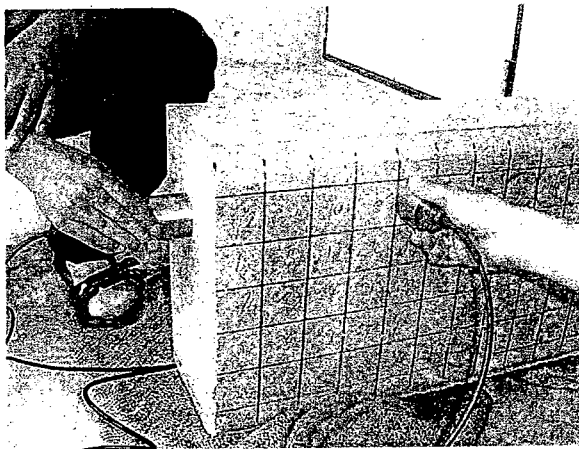
โดย	V = ความเร็วคลื่น	กิโลเมตรต่อวินาที
	L = ระยะห่างของทรานสดิวเซอร์	มิลลิเมตร
	T = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่	10 ⁻⁶ วินาที

การจัดวางตำแหน่งส่งสัญญาณของทรานสดิวเซอร์สามารถกระทำได้สามลักษณะ คือ ได้แก่ วิธีส่งสัญญาณโดยตรง (Direct Transducer) วิธีส่งสัญญาณโดยตรง (Semi - Direct Transducer) และวิธีส่งสัญญาณทางอ้อม (Indirect Transducer) ดังรูปที่ 2.10 ถึง 2.12

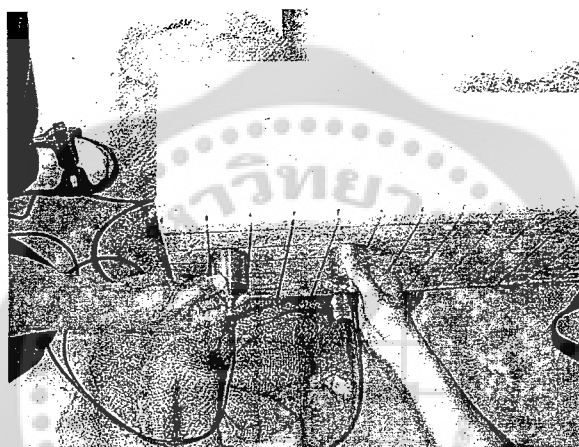
โดยวิธีส่งสัญญาณโดยตรงจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดถ้าสามารถทดสอบได้ เพราะคลื่นเสียงจะเดินทางทะลุผ่านตัวโครงสร้างที่ทดสอบโดยตรง กรณีมีความผิดปกติในเนื้อคอนกรีต เช่น โพรงหรือรอยร้าว ฯ จะถูกแสดงอย่างเด่นชัด โดยคลื่นเสียงจะใช้เวลาในการเดินทางนานกว่าส่วนอื่น ๆ ที่มีคุณภาพคอนกรีตดี ส่วนวิธีส่งสัญญาณทางอ้อมนั้น จะใช้เมื่อทำการวัดแบบ ส่งสัญญาณโดยตรงไม่ได้ และมักจะเป็นวิธีเดียวที่ใช้ในการทดสอบโครงสร้างพื้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดตรงที่ไม่ทราบว่าคุณคลื่นเสียงเดินทางผ่านเนื้อคอนกรีตลงไปลึกเพียงใดก่อนที่จะเดินทางมาถึงหัวรับ และพลังงานของคุณคลื่นเสียงจะลดลงมากน้อย ทำให้การวัดเป็นไปค่อนข้างลำบากเมื่อเทียบกับวิธีส่งสัญญาณโดยตรง แต่ถ้าผู้ทดสอบใช้ความระมัดระวังวิธีส่งสัญญาณทางอ้อมนี้จะใช้งานได้ดี



รูปที่ 2.10 การส่งสัญญาณโดยตรง



รูปที่ 2.11 การส่งสัญญาณกึ่งโดยตรง



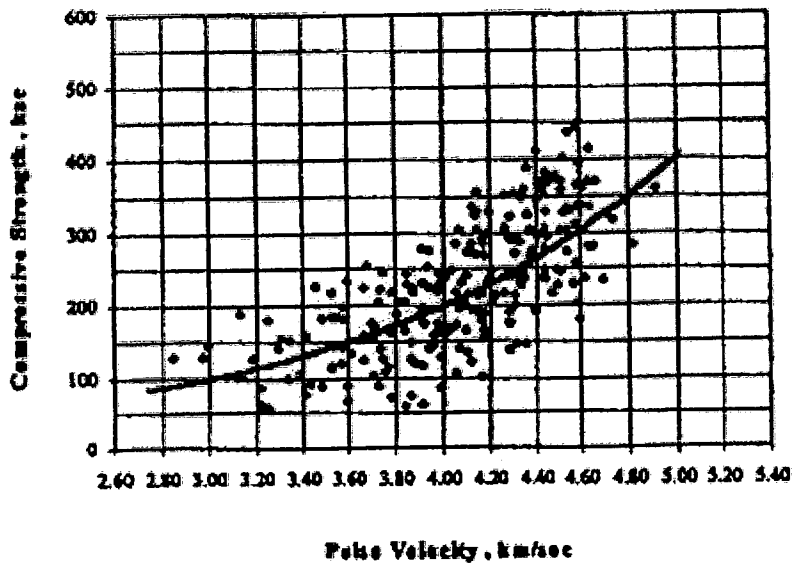
รูปที่ 2.12 การส่งสัญญาณทางอ้อม

2.3 เทคนิคการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

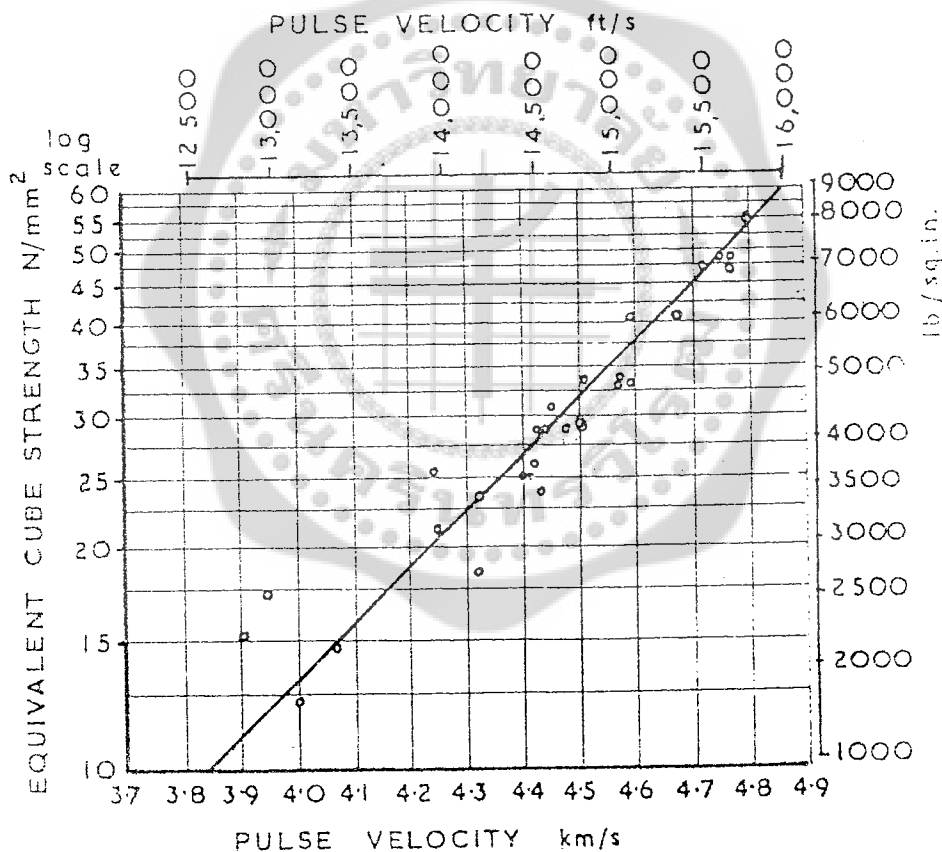
การนำค่าความเร็วที่วัดได้ไปแปรค่าเป็นค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตนั้น อาศัยการนำค่าความเร็วคลื่นที่วัดได้จากการทดสอบอัลตราโซนิกไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบค่ากำลังอัดแท่งตัวอย่าง (Compression Test) ซึ่งทำการวัดค่าความเร็วและหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แท่งตัวอย่างเดียวกัน จากนั้นนำค่าความเร็วคลื่นและค่ากำลังอัดของคอนกรีตมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.13

จากนั้นทำการทดสอบวัดค่าความเร็วที่โครงสร้างต่างๆ และนำมาแปรค่าเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบข้างต้น โดยมีขอบเขตการใช้งาน ดังนี้

- สภาพผิวของคอนกรีตควรเรียบพอสมควร เนื่องจากหากทรานสดิวเซอร์สามารถวางแนบสนิทกับผิวคอนกรีตได้ดี ผลการทดสอบก็จะมีค่าถูกต้องมากขึ้น
- ควรหลีกเลี่ยงบริเวณที่จะทำการทดสอบ ให้ห่างจากแนวเหล็กเสริมเพราะคลื่นสัญญาณจะเคลื่อนที่ผ่านเหล็กเสริมได้เร็วกว่าในคอนกรีต



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเร็วคลื่นและค่ากำลังอัดของคอนกรีต



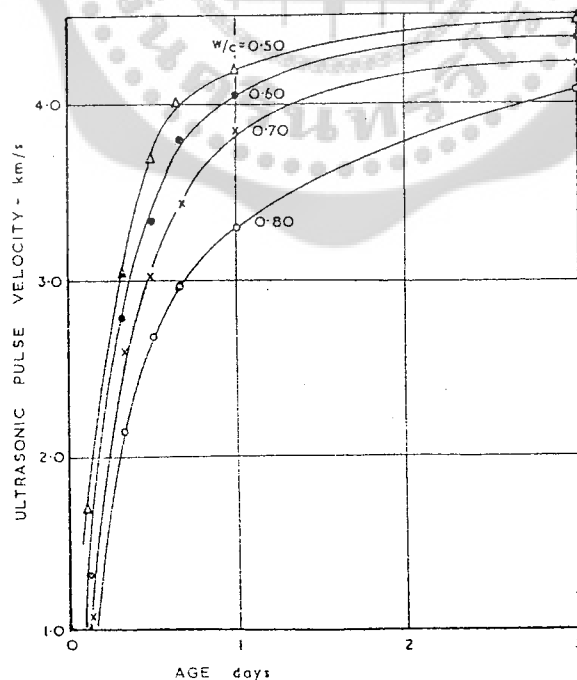
รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเร็วคลื่นและค่ากำลังอัดของคอนกรีตในสเกลล็อกกาลีทิม

ระยะห่างของทรานสดิวเซอร์ (Path Length) ไม่ควรน้อยกว่า 100 มิลลิเมตร สำหรับคอนกรีตที่มีขนาดมวลรวมต่ำกว่า 20 มิลลิเมตรและไม่น้อยกว่า 150 มิลลิเมตรสำหรับคอนกรีตที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุด 40 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีความหนาพอสมควร เช่น คานและเสา

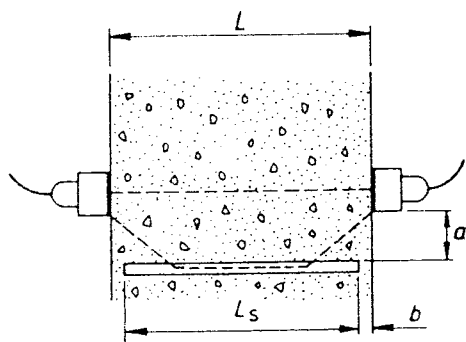
เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นมาจากวัสดุหลายประเภท เช่น หิน ทราย น้ำ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ๆ เช่น 200 กิโลเฮิรท์ซ ซึ่งอาจจะเหมาะในงานหารอยร้าวในโลหะหรือเซรามิกนั้นย่อมกระทำไม่ได้ เนื่องจากมีคลื่นเสียงสะท้อนกลับ (Echoes) สะท้อนจากหินและทรายที่กระจายอยู่ทั่วไป ดังนั้นการใช้ทดสอบอุลตราโซนิกกับงานคอนกรีตจึงมีข้อจำกัดอยู่ที่การหาความเร็วของคลื่นเสียงที่อยู่ในช่วงประมาณ 50 กิโลเฮิรท์ซเท่านั้น ซึ่งความเร็ว 54 กิโลเฮิรท์ซ เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เหมาะที่สุดสำหรับงานคอนกรีต โดยค่าความเร็วที่ต่ำลงไปเช่น 30 หรือ 24 กิโลเฮิรท์ซนั้นจะเป็นช่วงที่เหมาะสมกับงานไม้ ซึ่งทั่วไปความเร็วของคลื่นเสียงในช่วงนี้จะแปรตามคุณภาพและส่วนผสมของคอนกรีตและคอนกรีตที่คลื่นเสียงผ่านไปด้วยความเร็วที่สูง จะมีคุณภาพที่ดีกว่าหรือแน่นกว่าคอนกรีตที่คลื่นเสียงผ่านไปได้ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ

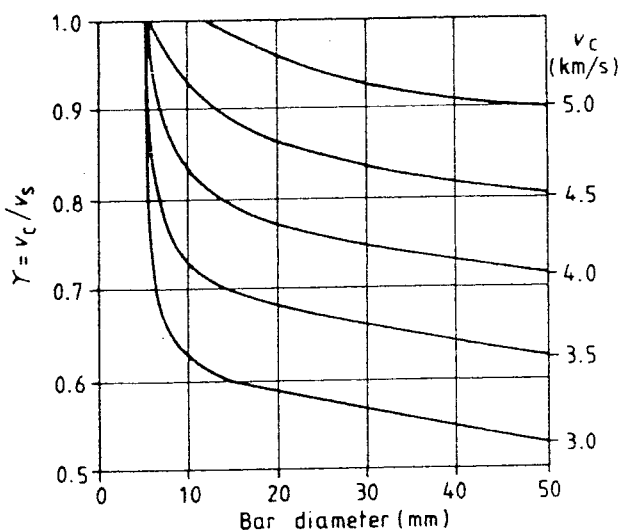
- ชนิดของมวลรวม
- อัตราส่วนระหว่างมวลและปูนซีเมนต์
- ขนาดและส่วนคละของมวลรวม
- อายุของคอนกรีต
- สภาพการบ่มคอนกรีต
- ความชื้นในคอนกรีต
- ระยะห่างของทรานสดิวเซอร์
- ตำแหน่งและจำนวนของเหล็กเสริมคอนกรีตในโครงสร้าง เป็นต้น



รูปที่ 2.15 การทดสอบวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีเพื่อศึกษาการพัฒนากำลังของคอนกรีต



(a) Cross section of concrete with lateral reinforcement



(b) Relationship between bar diameter and velocity ratio

รูปที่ 2.16 ผลกระทบของเหล็กเสริมในตำแหน่งขนานกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น

2.4 เทคนิคการทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีต

2.4.1 การประเมินจากค่าความเร็วที่วัดได้

ในการประเมินค่าความเร็วสามารถประเมินได้ จากค่าความเร็วคลื่นที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งต่าง ๆ บนโครงสร้าง โดยพิจารณาจากตารางที่ 2.3 โดยค่าความเร็วคลื่นที่ตรวจวัดได้จะมีค่าลดต่ำลงในคอนกรีตที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจเกิดจากโพรงอากาศรอยแตกร้าวหรือมีวัสดุเจือปน เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์พิจารณาในการตัดสินใจ

ค่าความเร็วคลื่น, กม./วินาที	สภาพความสมบูรณ์
มากกว่า 4.0	สมบูรณ์
3.6 - 4.0	บกพร่องเล็กน้อย
น้อยกว่า 3.6	บกพร่อง

อย่างไรก็ตามหากจะพิจารณาเกณฑ์ในการตัดสินใจจากตารางที่ 2.3 โดยตรงอาจมีบางกรณีที่เกิดคลาดเคลื่อนจากสภาพความเป็นจริงได้ เนื่องจากมีส่วนผสมและคุณสมบัติของมวลรวมแตกต่างกันมาก หรืออาจมีผลกระทบจากปริมาณเหล็กเสริมที่แตกต่างกัน เป็นต้น

2.4.2 การประเมินจากค่าความเร็วอ้างอิง

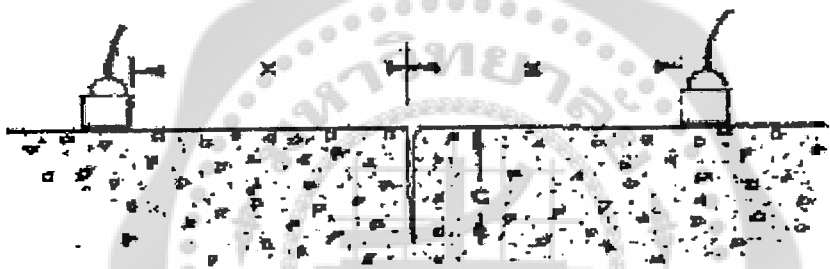
ในการพิจารณาประเมินสภาพความสมบูรณ์จากร้อยละของค่าความเร็วคลื่นที่ลดลงเมื่อเทียบกับค่าความเร็วคลื่นอ้างอิง (Reference Velocity) ที่ทดสอบจากโครงสร้างที่มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกัน และมั่นใจว่าสภาพสมบูรณ์จะเหมาะสมกว่า โดยพิจารณาจากเกณฑ์ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 พิจารณาประเมินสภาพความสมบูรณ์

ร้อยละความเร็วคลื่นทดลอง	สภาพความสมบูรณ์
น้อยกว่าร้อยละ5 ร้อยละ5 ถึง 10 มากกว่าร้อยละ10	สมบูรณ์ บกพร่องเล็กน้อย บกพร่อง

2.5 เทคนิคการทดสอบหาความลึกของรอยแตกร้าว

เทคนิคการทดสอบหาความลึกของรอยแตกร้าวกระทำได้ โดยติดตั้งหัวสัญญาณและหัวรับสัญญาณคร่อมรอยแตกร้าว แล้ววัดเวลาในการส่งผ่านเครื่อง (T_c) แล้วเลื่อนตำแหน่งหัวสัญญาณทั้งสองไปยังตำแหน่งคอนกรีตดีในระยะที่เท่ากัน แล้วตรวจวัดเวลาในการส่งผ่านเครื่อง (T_s) จะสามารถประเมินค่าความลึกของรอยแตกร้าว (Crack Depth) ได้จากสมการ 2.3

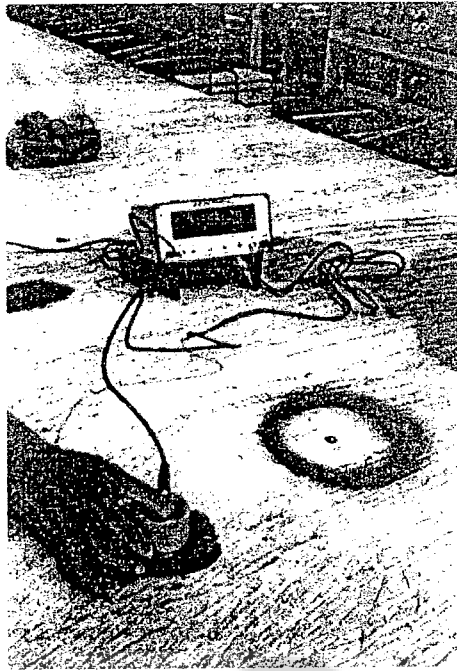


รูปที่ 2.17 การประเมินค่าความลึกของรอยแตกร้าว

$$C = X \sqrt{\left(\frac{T_c^2}{T_s^2} - 1\right)} \tag{2.3}$$

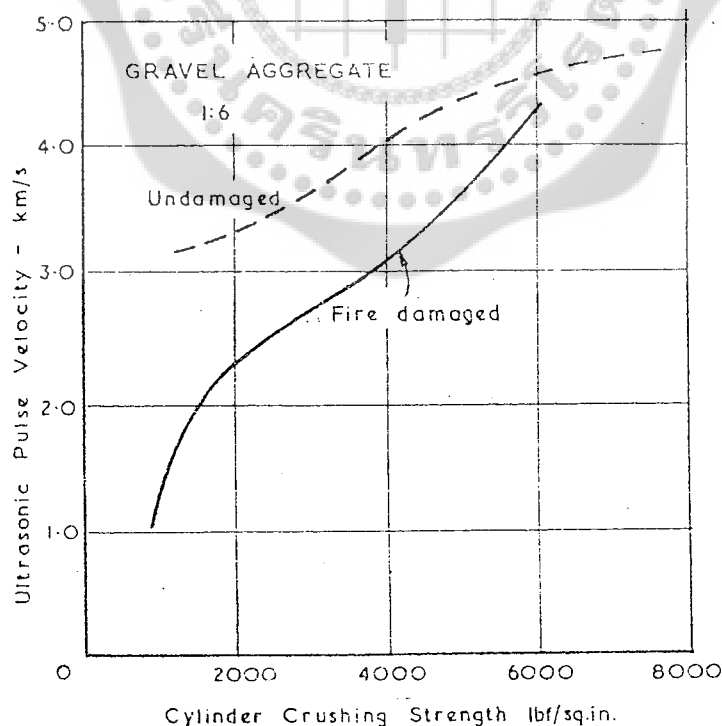
เมื่อ

- C = ความลึกของรอยแตกร้าว มิลลิเมตร
- T_c = เวลาที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่น ช่วงรอยร้าว 10^{-6} วินาที
- T_s = เวลาที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่น ช่วงคอนกรีตดี 10^{-6} วินาที
- X = ระยะห่างระหว่างหัววัดสัญญาณถึงรอยร้าว มิลลิเมตร

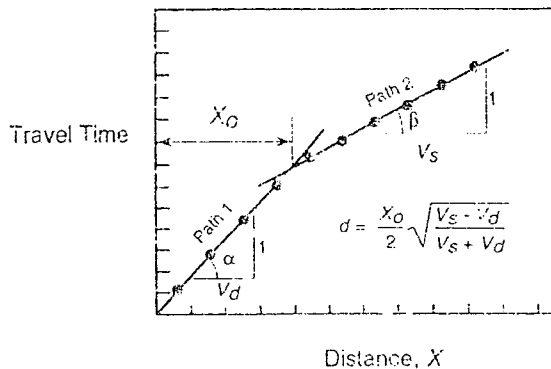
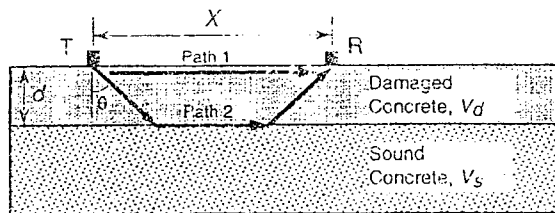


รูปที่ 2.18 การทดสอบหาความลึกของรอยแตกร้าว

นอกจากนี้ยังสามารถใช้การทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีหาความแตกต่างในคุณภาพของคอนกรีตที่เป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ในกรณีเนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตโดนไฟไหม้หรือโดนสารเคมีกัดทำลาย เป็นต้น ดังรูปที่ 2.19 โดยการทดสอบหาความลึกของชั้นคอนกรีตที่คุณภาพไม่สมบูรณ์สามารถกระทำได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีเพื่อประเมินกำลังคอนกรีตหลังเพลิงไหม้



รูปที่ 2.20 การทดสอบหาความลึกของชั้นคอนกรีตที่คุณภาพไม่สมบูรณ์

2.6 การประเมินผลทางสถิติ

2.6.1 การประเมินผลความผันแปรในกระบวนการผลิต

ในการประเมินผลนี้ จะพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดของคอนกรีตถ้ามีค่าสูง แสดงว่าการควบคุมยังไม่ดีพอ ต้องปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับระดับการควบคุมสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์ในการควบคุมการผลิต

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ ตร.ซม.)	มากกว่า 14.1	14.1- 17.6	17.6- 21.1	21.1- 24.6	มากกว่า 24.6
ระดับการควบคุมการผลิต	ดีเลิศ	ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้อง ปรับปรุง

2.6.2 การประเมินผลการผันแปรในกระบวนการควบคุมคุณภาพ

ในการประเมินนี้ จะพิจารณาสัมประสิทธิ์ความผันแปรถ้ามีค่าสูง แสดงว่าการควบคุมยังไม่ดีพอต้องปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปรกับระดับการควบคุมพอสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.6 เกณฑ์ในการประเมินการควบคุมคุณภาพ

สัมประสิทธิ์ ความผันแปร	น้อยกว่า 2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	มากกว่า 5.0
ระดับการควบคุมขบวนการ การควบคุมคุณภาพ	ดีเลิศ	ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้อง ปรับปรุง

สูตรในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$STDV = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (2.4)$$

โดย STDV = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Diviation)

X = ค่าของตัวอย่าง

N = จำนวนตัวอย่าง

สูตรการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

$$CV = \frac{STDV \times 100}{\bar{X}} \quad (2.5)$$

โดย CV = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

2.7 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

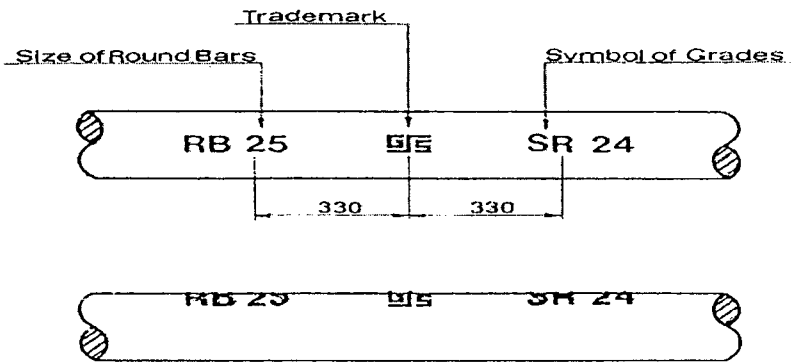
ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปจะมีหน่วยแรงอัดและแรงดึงเกิดขึ้น คอนกรีตจะรับแรงอัดได้ดี แต่รับแรงดึงได้น้อยมากจนนับว่าไม่รับแรงดึงเลยจึงมีเสริมเหล็กเส้นเพื่อช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้นหรืออาจเสริมเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยมีเหตุผลในการเลือกใช้วัสดุเหล็กเส้นคือเหล็กเส้นมีความสามารถรับแรงดึงได้ดีมีการยึดหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิใกล้เคียงกับคอนกรีตด้านราคาจะต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นโดยสามารถรีดเป็นเส้นได้ ใช้งานได้สะดวก หาง่าย จัดงอเป็นรูปต่างๆได้ มีความคงทนต่อสภาวะดินฟ้าอากาศได้ดีพอสมควรและสามารถผสมกับสารเคมีบางประเภทเพื่อทำให้คุณสมบัติบางอย่างดีขึ้นได้ โดยเหล็กเสริมคอนกรีตที่สำคัญได้แก่ เหล็กกลม เหล็กข้ออ้อย เหล็กกลมรีดซ้ำและลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง ซึ่งคุณสมบัติและรายละเอียดของเหล็กต่างๆ ต้องผลิตตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ

ก. เหล็กเส้นกลม (Round Bars) ผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก 20-2527 ว่าด้วยข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กเส้นกลม ชนิดเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ธรรมดา (Plain Carbon Steel) ร้อยละ 0.28 มีกัมมันต์และฟอสฟอรัสปริมาณเท่ากันร้อยละ 0.058 โดยน้ำหนักมีรูปร่างหน้าตัดกลมสม่ำเสมอ ผิวเรียบเกลี้ยง ใช้เสริมในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างโดยทั่วไปเหล็กเส้นกลมดังกล่าวต้องทำขึ้นจากเหล็กแท่งเหล็กเล็ก (billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) หรือเหล็กแท่งหล่อ (Ingot) ด้วยกรรมวิธีการรีดร้อน รีดเป็นเส้นกลมด้วยการรีดขณะร้อน โดยต้องไม่มีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อย่างอื่นมาก่อนและผลิตจากกรรมวิธีแบบโอเพนฮาร์ท แบบเต็มออกซิเจน หรือแบบบิเล็กตริกอาร์ก

ตารางที่ 2.7 ขนาดและมวลต่อเมตรของเหล็กเส้นกลม

ชื่อขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด ตร.มม.	มวลต่อเมตร กก.
RB 6	6	28.3	0.222
RB 9	9	63.6	0.499
RB 12	12	113.1	0.888
RB 15	15	176.7	1.387
RB 19	19	283.5	2.226
RB 22	22	380.1	2.984
RB 25	25	490.9	3.853
RB 28	28	615.8	4.834
RB 34	34	907.9	7.127

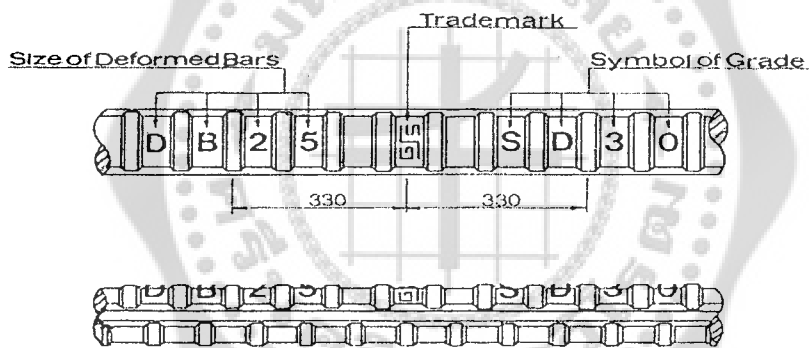
เหล็กเส้นกลมได้กำหนดให้มีชั้นคุณภาพ 1 ชั้นคุณภาพ โดยใช้สัญลักษณ์ SR 24 มีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากได้ไม่น้อยกว่า 24 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ความต้านทานแรงดึงไม่น้อยกว่า 39 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ค่าความยืด(Elongation) หรือความยาวที่เพิ่มขึ้นระหว่างจุดพิกัดของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 21 โดยมีขนาดเหล็กเส้นกลมต่างๆ คือ ชื่อขนาด RB 6 RB 9 RB 12 RB 15 RB 19 RB 22 RB 25 RB 28 และ RB 34 ซึ่งระบุขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเส้นกลมในหน่วยมิลลิเมตรตามค่าตัวเลข ดังตารางที่ 2.7 ข้างต้น โดยในอนาคตประเทศไทยจะเริ่มการผลิตเฉพาะขนาดเหล็กกลมเป็นเลขคู่เท่านั้นเพื่อความเป็นระบบสากลและสะดวกในการใช้งาน ทั้งนี้ในกำหนดค่าน้ำหนักเหล็กเส้นกลม จะมีค่าเท่ากับสูตร $0.6165D^2$ โดยเส้นผ่าศูนย์กลางมีหน่วยเป็นเซนติเมตร และน้ำหนักที่คำนวณได้มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อความยาวหนึ่งเมตร ส่วนเครื่องหมายการค้า (Trademark) ชื่อขนาด (Size) และชั้นคุณภาพ (Symbol of Grade) ต้องมีแสดงเป็นตัวนูนถาวรบนเนื้อเหล็ก ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การแสดงเครื่องหมายการค้า ชื่อขนาดและชั้นคุณภาพบนเนื้อเหล็กเส้นกลม

ข. เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bars) ผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 24-2536 ว่าด้วยข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเหล็กข้ออ้อย ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกเหล็กกล้าที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 0.27 และชนิดที่มีธาตุอื่นผสมอยู่เล็กน้อย (Low Alloy Steel) เช่น แมงกานีสฟอสฟอรัส และกำมะถัน ใช้เสริมในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป โดยเหล็กข้ออ้อยนี้คือเหล็กเส้นกลมที่มีบั้ง (Transverse Ribs) และอาจมีครีป (Longitudinal Ribs) ที่ผิวเพื่อเสริมกำลังยึดระหว่างเหล็กเส้นและเนื้อคอนกรีต เหล็กข้ออ้อยต้องผลิตขึ้นตามกรรมวิธีการผลิตเหมือนเหล็กเส้นกลม นำมารีดเป็นเส้นกลมโดยมีบั้งและมีครีปที่ผิว โดยการรีดเหล็กขณะร้อน

เหล็กข้ออ้อยมีสามชั้นคุณภาพ มีสัญลักษณ์คือ SD 30 SD 40 และ SD 50 แต่ในต่างประเทศอาจจะมีการผลิตเพิ่มขึ้นอีกสองชั้นคุณภาพคือ SD 24 และ SD 35 ซึ่งคุณสมบัติทางกลแสดงดังตารางที่ 2.8 โดยมีขนาดเหล็กข้ออ้อยต่างๆ คือ ชื่อขนาด DB 10 DB 12 DB 16 DB 20 มิลลิเมตรตามค่าตัวเลขดังตารางที่ 2.9 ทั้งนี้กำหนดสูตรค่าพื้นที่หน้าตัดเหล็กข้ออ้อย(A) มีค่าเท่ากับ $100W/0.785L$ โดยพื้นที่หน้าตัดมีหน่วยตารางมิลลิเมตร น้ำหนัก(W) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมและความยาวมีหน่วยเป็นเมตร หรือสูตรเส้นรอบวงคำนวณได้จากสูตรค่า $C=3.142D$ โดยเส้นรอบวง(D) และเส้นผ่าศูนย์กลางมีหน่วยมิลลิเมตร ส่วนเครื่องหมายการค้า, ชื่อขนาดและชั้นคุณภาพ ต้องมีแสดงเป็นตัวนูนถาวรบนเนื้อเหล็กดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การแสดงเครื่องหมายการค้า ชื่อขนาดและชั้นคุณภาพบนเนื้อเหล็กข้ออ้อย

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย

สัญลักษณ์	ความต้านทานแรงดึง ที่จุดคาน กก./มม. ²	ความต้านทานแรงดึง กก./มม. ²	ความยืดร้อยละ
SD 30	30	49	17
SD 40	40	57	15
SD 50	50	63	13

ตารางที่ 2.9 ขนาดและมวลต่อเมตรของเหล็กข้ออ้อย

ชื่อขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด ตร.มม.	มวลต่อเมตร กก.
DB 10	10	78.54	0.617
DB 12	12	113.10	0.888
DB 16	16	201.06	1.578
DB 20	20	314.16	2.466
DB 22	22	380.13	2.984
DB 25	25	490.87	3.853
DB 28	28	615.75	4.834
DB 32	32	804.25	6.313
DB 36	36	1,017.88	7.990
DB 40	40	1,256.64	9.865

ค. เหล็กรีดซ้ำ (Re Rolled Round Bars) ผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.211-2527 ว่าด้วยข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กรีดซ้ำชนิดเหล็กกล้าละมุนที่จัดอยู่ในจำพวกเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ธรรมดา เพื่อให้เสริมในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้าง เหล็กรีดซ้ำดังกล่าวต้องทำขึ้นจากเศษเหล็กเฉพาะที่ได้มาจากเข็มพืด (Sheet Pile) เหล็กแผ่นต่อเรือ (Ship Plate) เศษเหล็กแผ่นหรือเหล็กหน้าตัดหน้าตัดรูปต่างๆ ที่ทำขึ้นสำหรับใช้ในการก่อสร้างมารีดเป็นเส้นกลมด้วยการรีดขณะร้อนคุณภาพของเหล็กจึงอาจไม่คงที่

เหล็กรีดซ้ำมีชั้นคุณภาพหนึ่งชั้นคุณภาพ มีสัญลักษณ์ SSR 24 มีชื่อขนาด RRB 6 RRB 9 RRB 10 RRB 12 และ RRB 15 ขั้วระบุขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเส้นกลมในหน่วยมิลลิเมตรตามค่าตัวเลข ดังตารางที่ 2.10 โดยมีคุณสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานแรงดึงที่จุดคลาก ความต้านทานแรงดึง และค่าความยืดของเหล็กรีดซ้ำเท่ากับเกณฑ์กำหนดของเหล็กเส้นกลม ทั้งนี้ในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยอาจมีการยกเลิกการผลิตเหล็กรีดซ้ำเนื่องจากมีคุณภาพต่ำและสามารถใช้เหล็กกลมทดแทนได้

ตารางที่ 2.10 ขนาดและมวลต่อเมตรของเหล็กรีดซ้ำ

ชื่อขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด ตร.มม.	มวลต่อเมตร กก.
RRB 6	6	28.3	0.222
RRB 8	8	50.3	0.394
RRB 9	9	63.6	0.499
RRB 10	10	78.5	0.617
RRB 12	12	113.1	0.888
RRB 15	15	176.6	1.387

ทั้งนี้ในการทดสอบเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตทั่วไป จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การชักตัวอย่าง กระทำโดยวิธีสุ่มชักตัวอย่างจากมัดต่างๆ ในรุ่นเดียวกัน 1 เส้น ต่อทุกๆ 5 มัด หรือเศษของ 5 มัด จำนวนชักตัวอย่างจะตัดจากเหล็กที่สุ่มมา 1 เส้น ต้องไม่น้อยกว่า 5 ชิ้น แต่ละชิ้นยาวประมาณ 1.5 เมตร
2. การวัดขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ สำหรับเหล็กกลม และ เหล็กรีดเข้าให้ตัวอย่างน้อย 3 แห่ง ภายในส่วนของความยาวพิศดโดยรอบ ความโตของเหล็กเส้นนั้นๆ หรือโดยการชั่งน้ำหนักแล้วหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลาง จากค่าที่วัดหรือชั่งได้นั้นถือว่าเหล็กกล้าละมุนหนัก 0.785 กิโลกรัมต่อความยาว 1 เมตร เมื่อมีพื้นที่ภาคตัดขวาง 1 ตารางเซนติเมตร ให้คำนวณน้ำหนักเหล็กต่อความยาว 1 เมตร จากสูตรน้ำหนักต่อความยาวหนึ่งเมตรเท่ากับ $0.785D^2\pi/4$ หรือ $0.6165 D^2$ หน่วยกิโลกรัม เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหน่วยเป็นเซนติเมตร ส่วนเหล็กข้ออ้อยนั้นการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระทำได้ไม่สะดวกจึงนิยมใช้วิธีคำนวณหาพื้นที่ภาคตัดขวางและเส้นผ่าศูนย์กลาง จากน้ำหนักและความยาวของชิ้นตัวอย่างของสูตร $A=100W/0.785L$ และ $D^2=162W/L$ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น
3. การทดสอบ แต่ละชุดตัวอย่างให้ใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ซึ่งตัดมาจากชิ้นตัวอย่างต่างชิ้นกัน สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงและการดัดโค้งเย็น ผลการทดสอบทุกครั้งจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือที่ระบุไว้ในตารางต่างๆ ข้างต้นของแต่ละประเภทเหล็ก
4. เกณฑ์การตัดสิน ถ้าหากคุณสมบัติในการดึงไม่เป็นไปตามที่ระบุ กล่าวคือมีความต้านทานแรงดึงที่จุดคานงต่ำกว่าค่าที่กำหนดไม่เกิน 0.7 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และมีต้านทานแรงดึงต่ำกว่าค่าที่กำหนดไม่เกิน 1.5 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ต้องทำการทดสอบใหม่ด้วยชิ้นทดสอบที่ตัดมาจากชิ้นตัวอย่างชุดเดียวกันนั้น โดยใช้ชิ้นทดสอบใหม่เท่าจำนวนชิ้นทดสอบที่ไม่เป็นไปตามที่เกณฑ์กำหนด เพื่อชดเชยกับผลการทดสอบที่ยกเลิกไปแล้วถ้าผลการทดสอบซ้ำชิ้นใดชิ้นหนึ่งยังคงไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่ระบุไว้ หรือมีคุณสมบัติในการดึงครั้งแรกต่ำกว่าเกณฑ์ตามที่ระบุ ให้ถือว่าเหล็กเส้นชุดนั้นหรือจำนวนมัดที่ชักตัวอย่างมานั้นไม่เป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนด

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

อิทธิพร และวิทวัส (2547) ได้ศึกษาพบว่าความหนาของชิ้นงาน และช่วงค่ากำลังรับแรงอัดรวมทั้งขนาดโตสุดของวัสดุมวลรวมหยาบในชิ้นตัวอย่างคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีแตกต่างกันไป และเป็นการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้โดยประมาณและยอมรับได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งควรพิจารณาทดสอบกำลังรับแรงอัดในวิธีอื่นๆ ประกอบการใช้งาน และต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของการทดสอบวิธีนี้

สมนึก (1992) ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่องการประเมินกำลังของคอนกรีตโดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ทั้งนี้ได้รวบรวมงานวิจัยต่างๆไว้ดังนี้

Malhotra และ Richard (1972) ได้รายงานผลการทดสอบโดยวิธีพูลเอ้าท์ไว้เหมือนกันโดยเสนอแนะว่า วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการประเมินกำลังคอนกรีตทั้งที่มีกำลังสูงและกำลังต่ำได้ดี โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นๆ ข้อเสียเพียงประการเดียวคือต้องมีการวางแผนและจัดเตรียมล่วงหน้า โดยการเจาะนำคอนกรีตเป็นวงกลม และนำท่อเหล็กยึดสลักพร้อมการอีพ็อกซีเมื่อหล่อคอนกรีตเสร็จ อย่างไรก็ตามข้อเสียนี้สามารถขจัดได้โดยการประยุกต์ตัวยึด และวิธีการทดสอบ

Sturup และคณะ (1982) กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์เวโลซิตีและกำลังรับแรงอัด อาจจะไม่ชัดเจน เนื่องจากมีรอยแตกหรือมีโพรงภายในคอนกรีต เนื่องจากความผิดพลาดจากการผสมคอนกรีต และกล่าวอีกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์เวโลซิตี และกำลังรับแรงอัดที่ทดสอบกับวัสดุตัวอย่างในห้องทดลองสามารถนำไปใช้ทำนายกำลังของคอนกรีตโครงสร้างอาคารจริงๆ ด้วยความแม่นยำ นอกจากนี้ยังกล่าวว่าการทดสอบคอนกรีตวิธีพัลส์เวโลซิตี สามารถประมาณความลึกของรอยร้าวได้

Bungey (1982) ได้สรุปผลของเหล็กเสริมในคอนกรีตว่า หากเหล็กเสริมวางในแนวนานกับแนวที่ทดสอบจะทำให้ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีมีค่ามากกว่าความเป็นจริงเนื่องจากระยะทางที่คลื่นพัลส์เดินทางมากขึ้นนั่นเอง แต่ถ้าหากวางเหล็กเสริมในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ทดสอบจะมีผลกระทบต่อค่าที่ได้น้อยกว่า

Malhotra (1984) กล่าวว่า วิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ใช้ได้ผลดีสำหรับหาความสม่ำเสมอของคอนกรีต และใช้สำหรับประมาณ กำลังของคอนกรีต อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์เวโลซิตี และกำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอายุคอนกรีต ความชื้น อัตราส่วนระหว่างวัสดุผสมต่อซีเมนต์ ชนิดของวัสดุผสม และตำแหน่งของเหล็กเสริม

Akashi และ Amasaki (1984) กล่าวว่า อัตราส่วนระหว่างคลื่นแรงอัดกระทบของแฮมเมอร์ (Hammer) ต่อคลื่นหน่วยแรงสะท้อนกลับในวิธีบาวน์แฮมเมอร์ ขึ้นอยู่กับความเรียบมันของผิวคอนกรีต แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของคอนกรีต นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเครื่องมือรีบาวน์แฮมเมอร์ เช่น น้ำหนัก และค่ายังโมดูลัสของแฮมเมอร์ ค่าคงที่ของสปริง ค่ายังโมดูลัส และขนาดรูปร่างของปลัnger (Plunger) ความเสียหายระหว่างแฮมเมอร์ และแฮมเมอร์ไกด์บาร์ (Hammer Guide Bar)

Sturup และ Swamy (1984) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างพัลส์เวโลซิตีและค่ากำลังอัด โดยเฉพาะสำหรับคอนกรีตช่วงอายุต้นๆ

Teodora (1988) ได้สรุปผลการทดสอบคอนกรีตรูปลูกบาศก์มาตรฐานและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีกับค่ากำลังอัดคอนกรีตที่หน่วยแรงคลากในห้องปฏิบัติการทดสอบ วัสดุจากวิธีสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) ได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 10-15 เปอร์เซ็นต์

Tanigawa (1990) ได้สรุปให้ผลการทดลองว่าความแม่นยำของการประมาณค่ากำลังอัดมาตรฐานของคอนกรีต สามารถทำให้ดีขึ้น โดยการใช้ร่วมกันระหว่างวิธีบาวน์แฮมเมอร์และวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

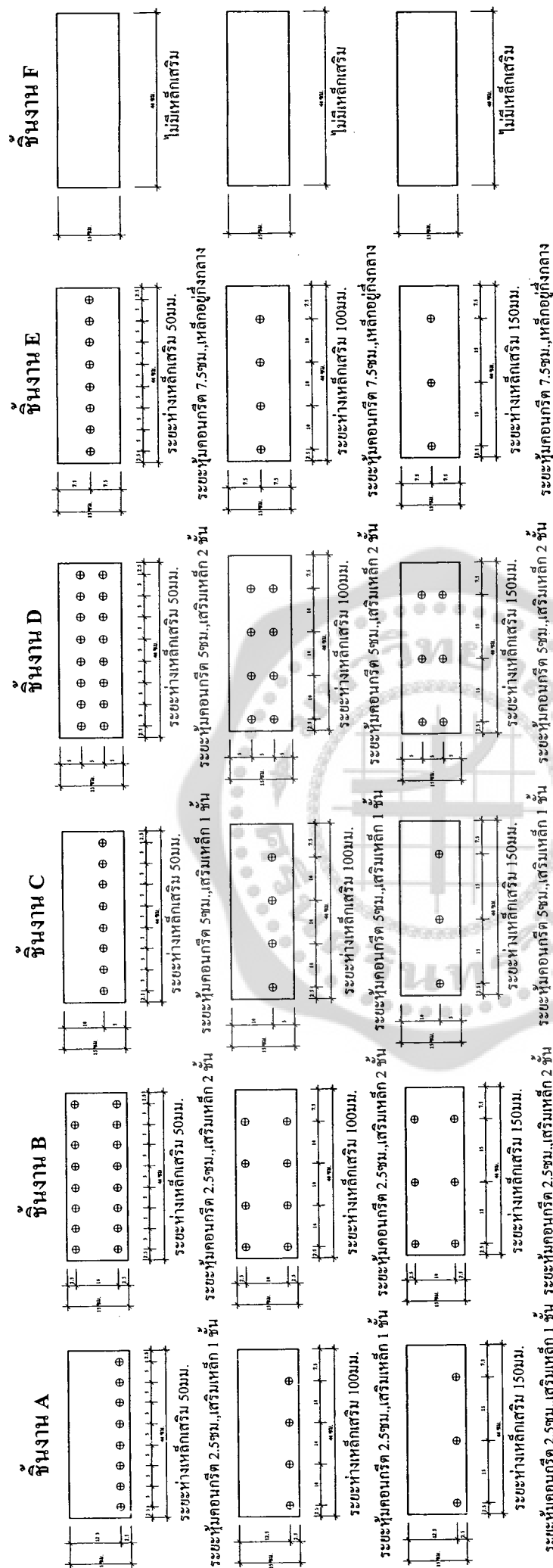
1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ III ตามมาตรฐาน ASTM C-150
2. น้ำประปา
3. ทราย ใช้ทรายนํ้าลิก จากจังหวัดกาญจนบุรี ขนาดค่อนข้างโต สะอาด ปราศจากอินทรีย์สารใดๆ เจือปน มีความถ่วงจำเพาะ 2.58 มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.92
4. หิน ใช้หินปูน (Lime Stone) มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 ขนาดโตสุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว
5. สารผสมเพิ่มชนิดลดน้ำปริมาณมาก (Superplasticers) ประเภท F

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

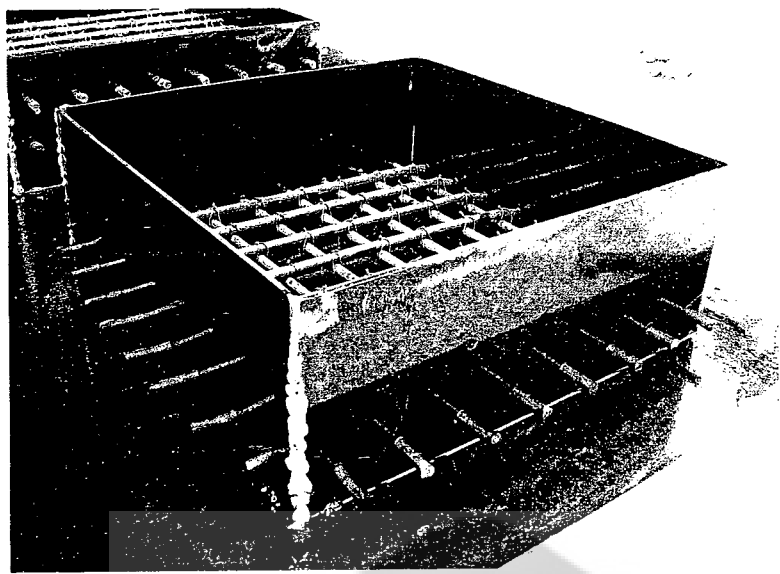
1. แบบหล่อคอนกรีตขึ้นงานทดสอบขนาด 40x40x15 เซนติเมตร (Form Work) จำนวน 6 ชุดดังรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.7 เพื่อให้หล่อขึ้นงานตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามรายละเอียดในตารางที่ 3.1
2. เครื่องทดสอบหาค่ากำลังอัด (Universal Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM C-39 ตามรูปที่ 3.8
3. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (Cubic Mold) ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 108 : 1983 ตามรูปที่ 3.9
4. เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Plant) ตามรูปที่ 3.10
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก วัดค่าความละเอียด 0.1 กิโลกรัม
6. บ่อบ่มแท่งคอนกรีต ตามรูปที่ 3.11
7. ชุดทดสอบอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (Ultrasonic Pulse Velocity) ตามมาตรฐาน ASTM C 597 และ BS 1881-203 1 ชุด เครื่องหมายการค้า PUNDIT ดังแสดงในรูปที่ 3.12
8. กรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Mold) สำหรับหาการยุบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C-143 พร้อมแท่งเหล็กสำหรับการกระทุ้ง (Compacting Bar) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C-39 ตามรูป 3.14 และ 3.15
9. เกรียงเหล็ก
10. เหล็กเสริมเส้นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 การเตรียมชั้นงานตัวอย่างที่เสริมเหล็กลักษณะต่าง ๆ

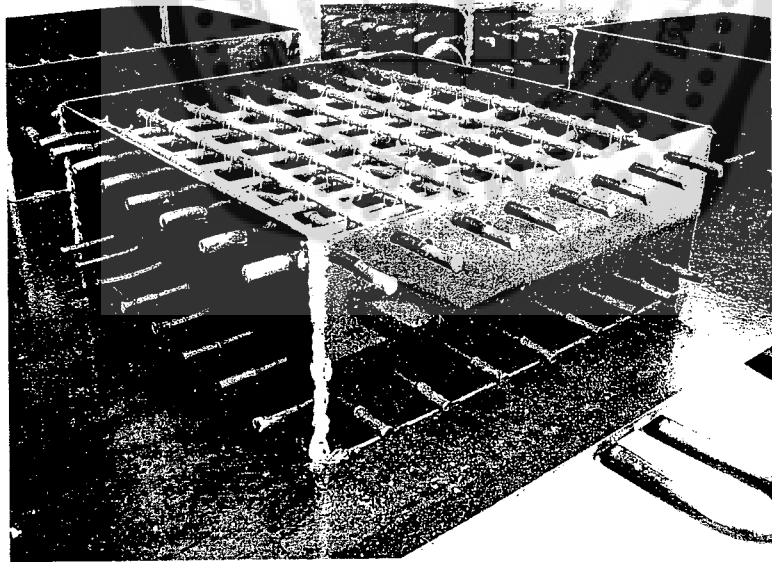
ลำดับ	ชนิด ชั้นงาน	ขนาดเหล็ก เสริม (Ø, มม.)	ระยะห่างเหล็ก เสริม (ซม.)	ระยะคอนกรีต หุ้มเหล็กเสริม (ซม.)	จำนวนชั้น เหล็กเสริม(ชั้น)
1	A	Ø 9	5	2.5	1 (บน)
			10	2.5	1 (บน)
			15	2.5	1 (บน)
2	B	Ø 9	5	2.5	2 (บน-ล่าง)
			10	2.5	2 (บน-ล่าง)
			15	2.5	2 (บน-ล่าง)
3	C	Ø 9	5	5	1 (บน)
			10	5	1 (บน)
			15	5	1 (บน)
4	D	Ø 9	5	5	2 (บน-ล่าง)
			10	5	2 (บน-ล่าง)
			15	5	2 (บน-ล่าง)
5	E	Ø 9	5	7.5	1 (กลาง)
			10	7.5	1 (กลาง)
			15	7.5	1 (กลาง)
6	F	Ø 9	ไม่เสริมเหล็ก		



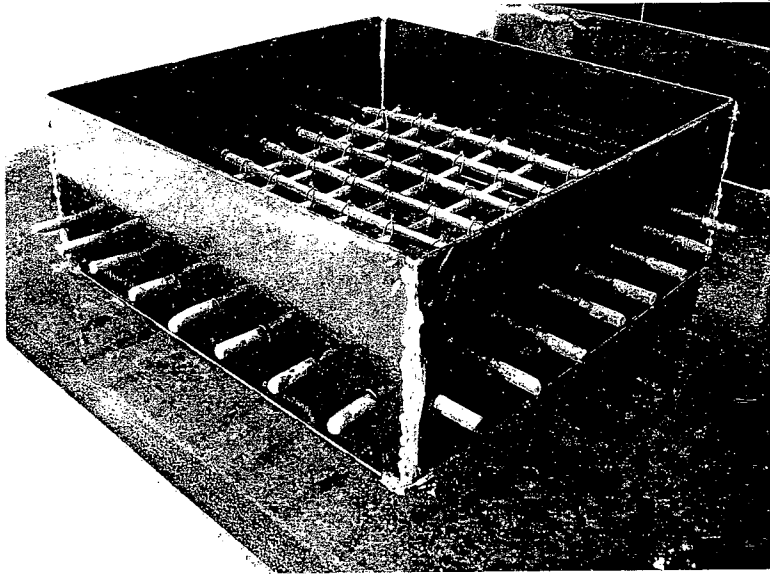
ลักษณะการประกอบเตรียมโครงเหล็กเสริมในชั้นงาน



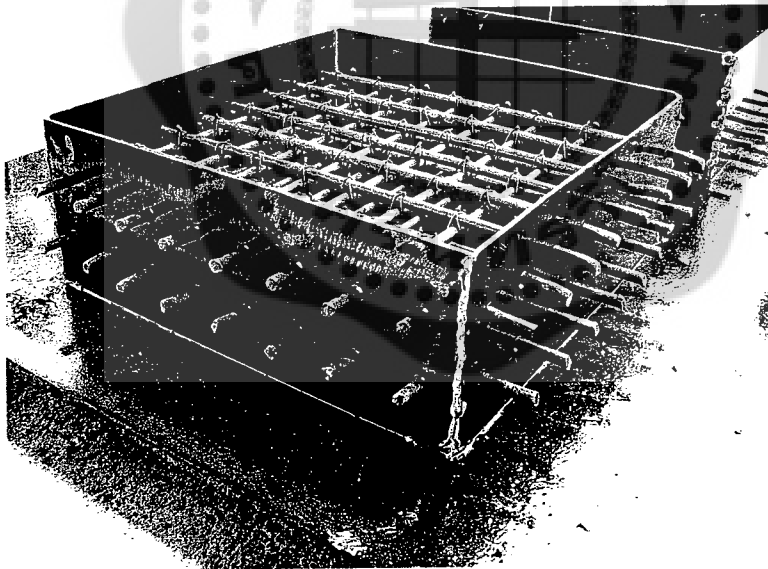
รูปที่ 3.2 ชั้นงาน A เหล็กตะแกรงชั้นเดียว (ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
ระยะหุ้มคอนกรีต 25 มม.



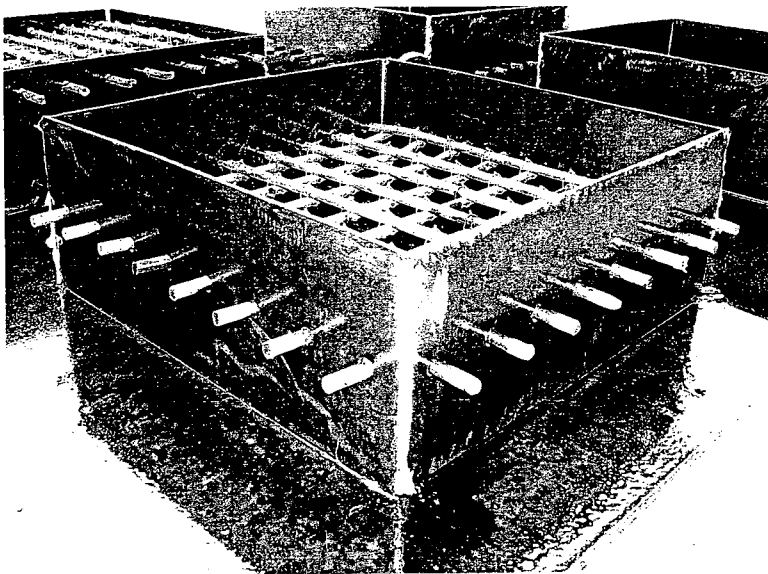
รูปที่ 3.3 ชั้นงาน B เหล็กตะแกรง 2 ชั้น (บน-ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม.ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
ระยะหุ้มคอนกรีต 25 มม.



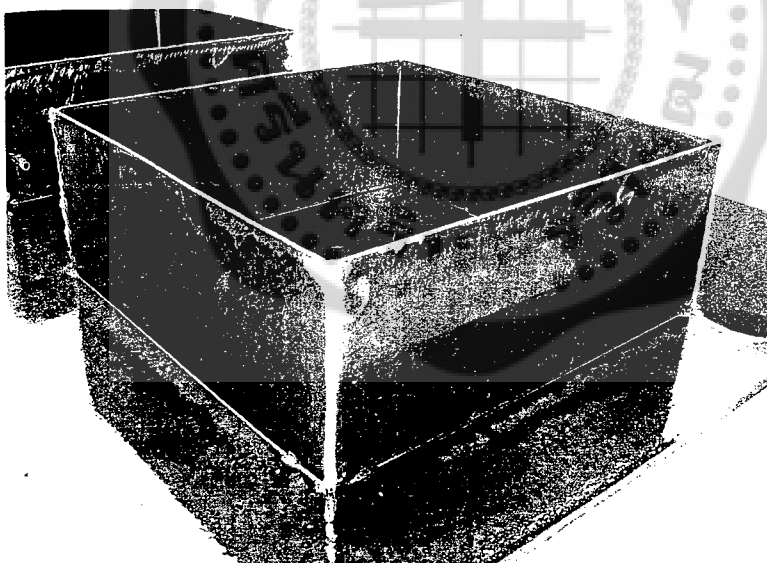
รูปที่ 3.4 ชั้นงาน C เหล็กตะแกรงชั้นเดียว (ล่าง)ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม.ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.



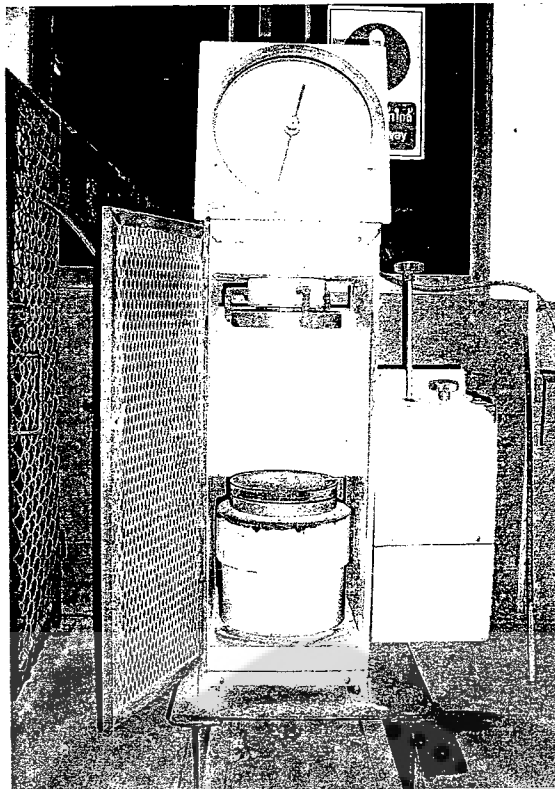
รูปที่ 3.5 ชั้นงาน D เหล็กตะแกรง 2 ชั้น(บน-ล่าง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม.ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.



รูปที่ 3.6 ชิ้นงาน E เหล็กตะแกรงชั้นเดียว (กลาง) ขนาดเหล็กเสริม RB 9 มม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.



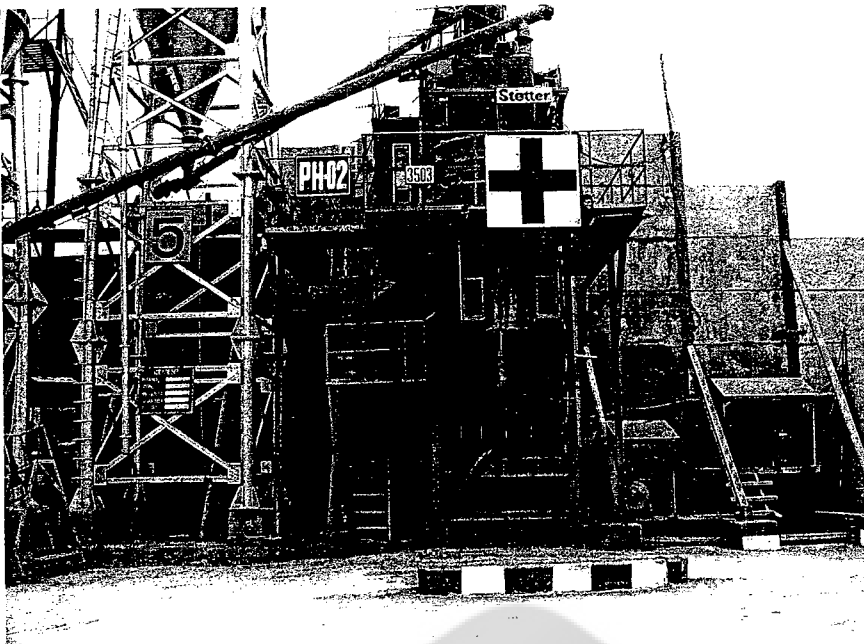
รูปที่ 3.7 ชิ้นงาน F ไม่เสริมเหล็กตะแกรงขนาด 40x40x15 ซม.



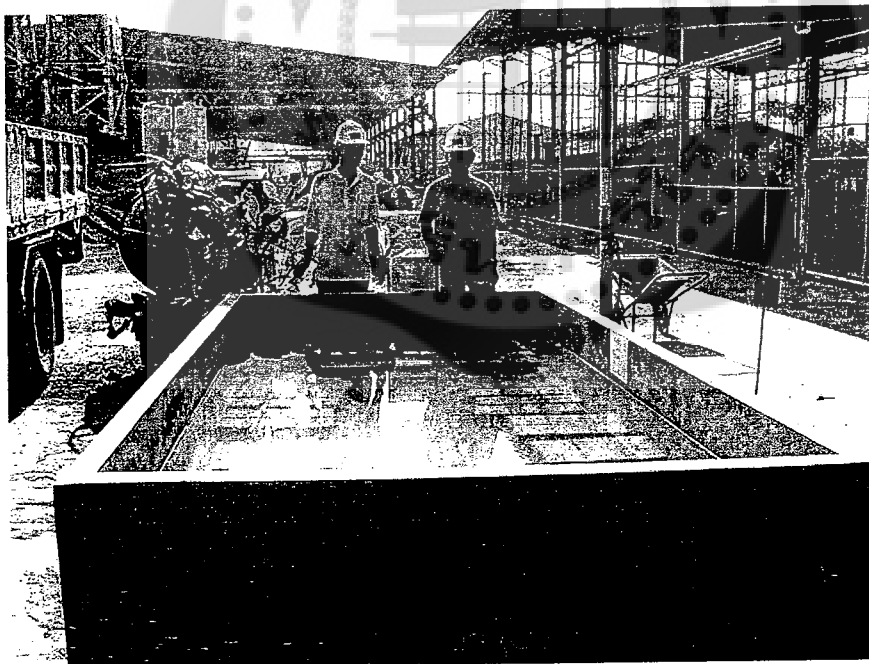
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบการรับกำลังอัด



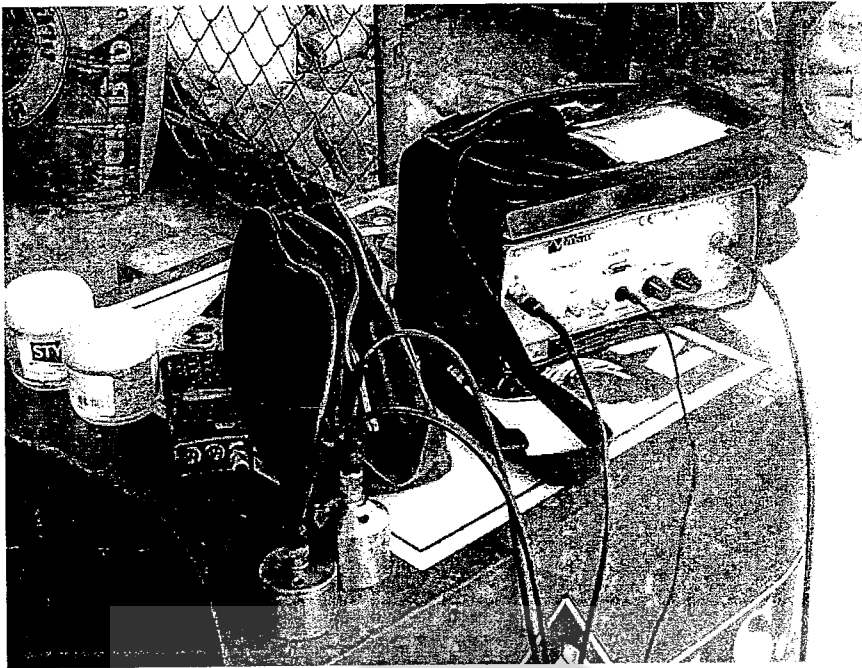
รูปที่ 3.9 แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม.



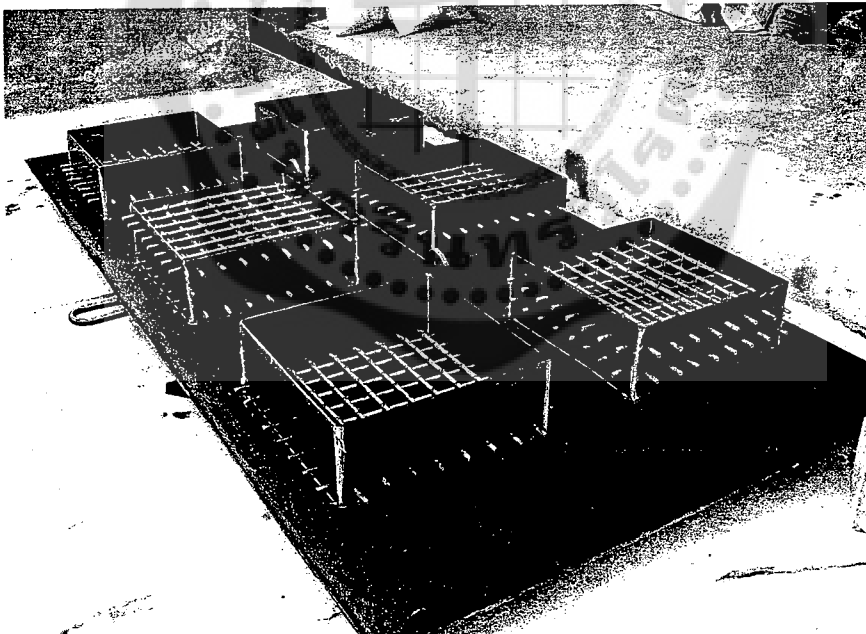
รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.11 บ่อปมแท่งคอนกรีต



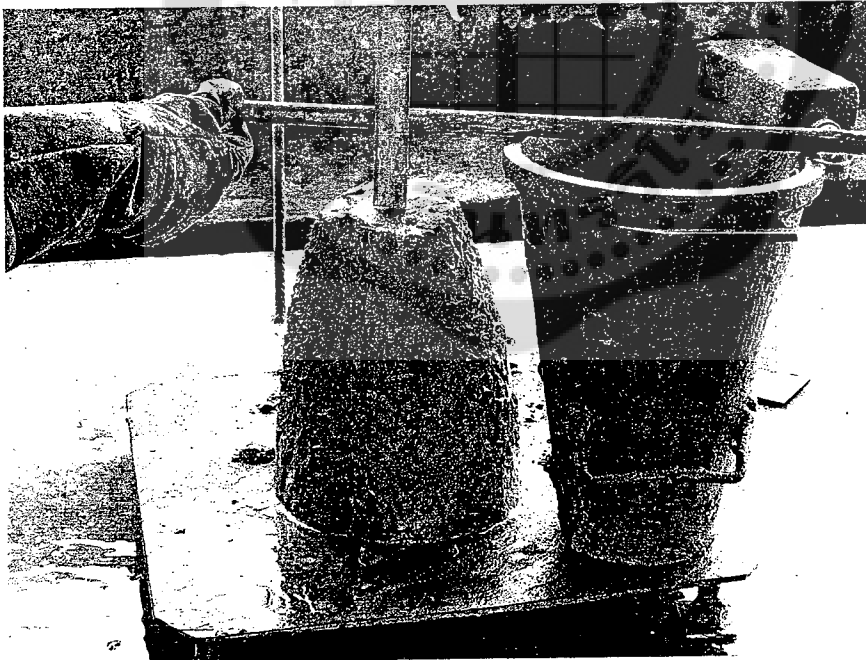
รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี



รูปที่ 3.13 การเตรียมแบบหล่อชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.14 การปาดผิวหน้าคอนกรีตก่อนยกกรวยขึ้นเพื่อวัดค่าการยุบตัว



รูปที่ 3.15 การวัดค่าการยุบตัว

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การทดสอบวัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

1. ผลการทดสอบอัตราส่วนละเอียดของทราย ตามภาคผนวก ก.
2. ผลการทดสอบอัตราส่วนละเอียดของหินขนาด 3/4 นิ้ว ตามภาคผนวก ก.

3.3.2 การคำนวณการออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีต

1. อัตราส่วนผสม กำลังอัดประลัยที่ 300 ± 25 กก./ตร.ซม หิน 3/4 นิ้ว ตามภาคผนวก ก.
2. อัตราส่วนผสม กำลังอัดประลัยที่ 400 ± 25 กก./ตร.ซม หิน 3/4 นิ้ว ตามภาคผนวก ก.

ทั้งนี้กำหนดค่าความชื้นเหลือของทุกสัดส่วนผสมอยู่ระหว่าง 7 ± 2.5 ซม.

3.3.3 การผสมคอนกรีต

1. ทำการชั่งน้ำหนักวัสดุ ตามสัดส่วนที่ได้คำนวณไว้
2. นำหิน ทราย เข้าเครื่องผสม เดินเครื่องเป็นเวลา 30 วินาที
3. นำปูนซีเมนต์น้ำและสารลดน้ำใส่เพิ่มเข้าไปในเครื่องผสมเดินเครื่องต่ออีกเป็นเวลา 45 วินาที รวมเวลาผสมทั้งหมด 75 วินาที

3.3.4 การทดสอบการยุบตัว

ทำการนำคอนกรีตที่ได้จากการผสมข้างต้นนำมาทดสอบการทดสอบการยุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C-147 ตามขั้นตอนดังนี้

1. เติมคอนกรีตลงไปกรวยสูงประมาณหนึ่งในสามของกรวยวัดความสูงได้ประมาณ 5.5 เซนติเมตรแล้วทำการใช้เหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง
2. ทำการเติมคอนกรีตจนได้ความสูง ประมาณสองในสามของกรวยวัดความสูงได้ ประมาณ 16 เซนติเมตรแล้วทำการใช้เหล็กกระทุ้ง 25 ครั้งกระทุ้งโดยประมาณให้ปลายเหล็กถึงพื้นผิวของชั้นที่หนึ่ง
3. เติมคอนกรีตจนเต็มแล้วทำการกระทุ้งต่ออีก 25 ครั้ง
4. ใช้เกรียงปาดให้คอนกรีตเรียบเสมอกับขอบของกรวย พร้อมกวาดคอนกรีตที่ฐานให้สะอาด
5. ใช้มือจับยกกรวยขึ้นให้ตรง ๆ ช้า ๆ อย่าให้กรวยไปกระทบถูกคอนกรีต
6. ทำการหยายกรวยขึ้นแล้ววางกรวยข้างคอนกรีต นำเหล็กกระทุ้งวางบนปากกรวย โดยให้แนวเหล็กอยู่เหนือคอนกรีต ทำการวัดระยะห่างของผิวคอนกรีตกับผิวเหล็กด้านล่าง ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าของการยุบตัวแล้วทำการบันทึกค่าเอาไว้ตามรูปที่ 3.15

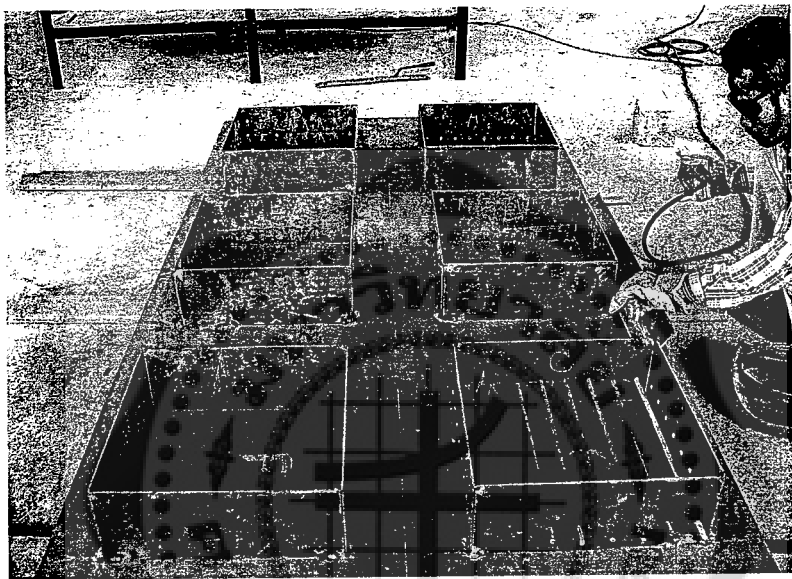
3.3.5 การหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

หลังจากได้ทำการผสมคอนกรีต และทำการทดสอบได้ค่าการยุบตัวแล้วจึงนำคอนกรีตที่ผสมมานั้นเทใส่ในแบบหล่อ (Cubic Mold) ตามมาตรฐาน BS 1881: Part 108: 1983 โดยทำการเทคอนกรีตแบ่งความสูงออกเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นสูง 5 เซนติเมตร แล้วทำการกระทุ้งชั้นละ 35 ครั้ง ตามมาตรฐาน BS 1881 เมื่อกระทุ้งครบเสร็จแล้วใช้เกรียงปาดแต่งหน้าให้เรียบ ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

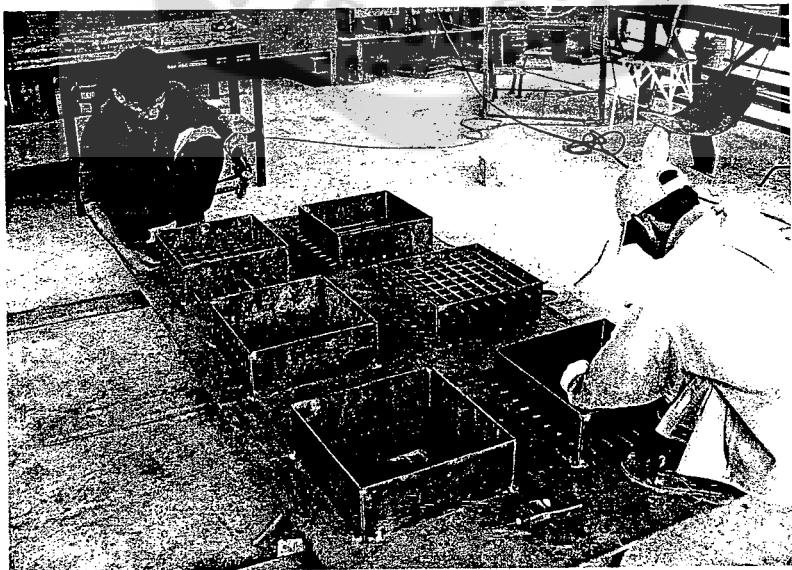
จึงทำการถอดแบบหล่อออกจากแท่งคอนกรีตเสร็จแล้วนำแท่งคอนกรีตไปบ่มน้ำไว้เป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงทำการทดสอบต่อไป

3.3.6 การหล่อแท่งชิ้นงานทดสอบ

หลังจากทำการทดสอบค่าการยุบและเก็บแท่งตัวอย่างทดสอบรูปลูกบาศก์แล้ว นำคอนกรีตที่ได้จากการผสมชุดเดียวกันไปเทลงในแบบหล่อแท่งชิ้นงานที่เตรียมไว้แล้วทำการจี้คอนกรีตเพื่อให้เนื้อของคอนกรีตแท่งชิ้นงานมีความสม่ำเสมอไม่ให้มีฟองอากาศและมีรูพรุน ทำการปาดแต่งผิวหน้าให้เรียบเสร็จแล้วรอคอนกรีตให้ได้อายุ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อได้จากนั้นนำเอาแท่งชิ้นงานทดสอบ ไปคลุมกระสอบทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วันแล้วจึงทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.16 การเตรียมแบบหล่อชิ้นงานทดสอบ



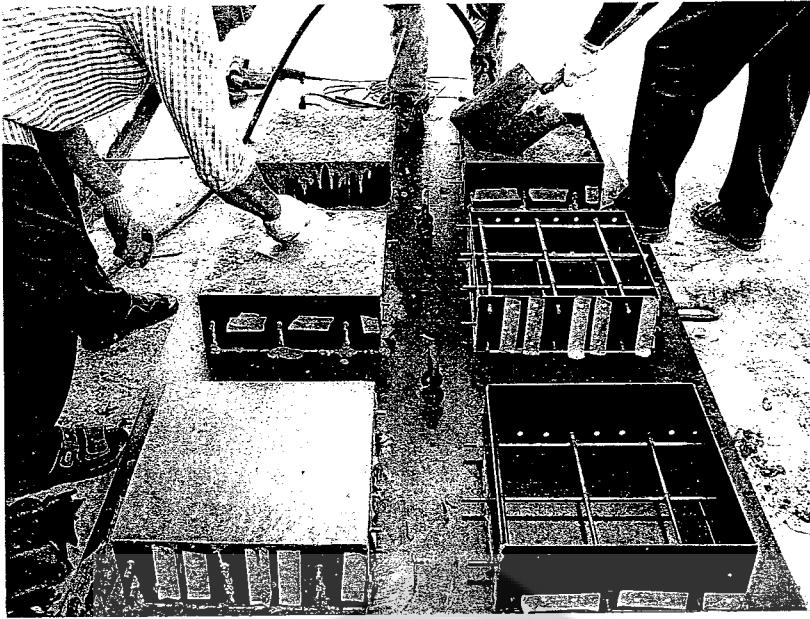
รูปที่ 3.17 การเสริมเหล็กชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.18 การทำน้ำมันแบบหล่อ



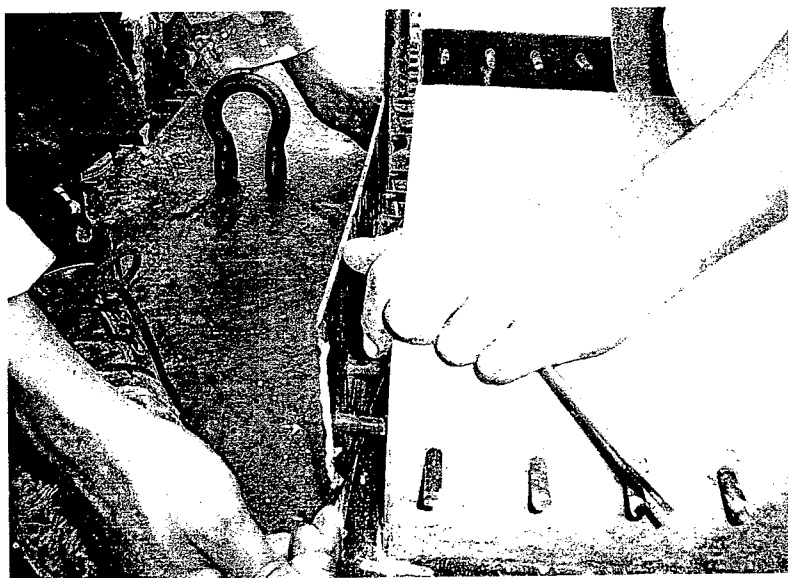
รูปที่ 3.19 การหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์



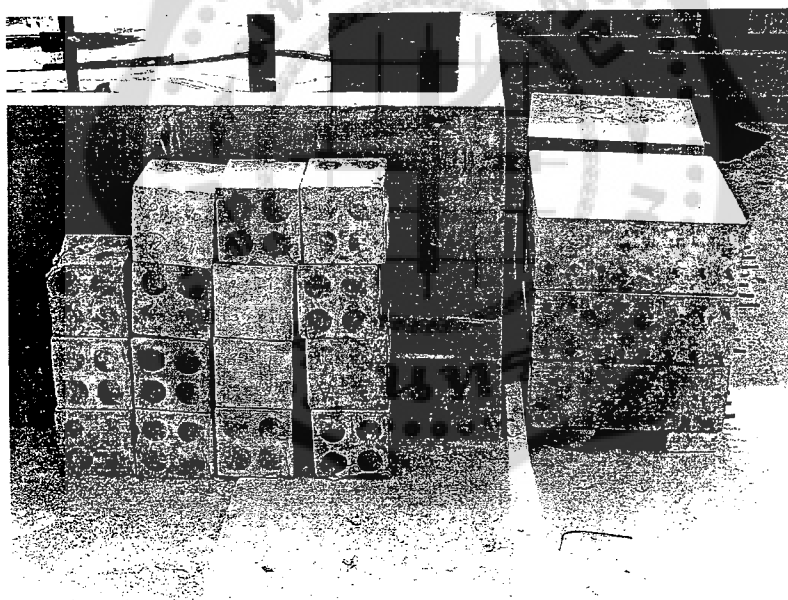
รูปที่ 3.20 การหล่อชิ้นงานทดสอบระยะห่างเหล็กเสริม 150 มม. จำนวน 6 ชนิด คือ A, B, C, D, E, และ F



รูปที่ 3.21 การแต่งผิวหน้าชิ้นงานขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการถอดแบบหล่อออกจากชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.23 การกองเก็บชิ้นงานหลังจากการทดสอบแล้วเสร็จ

3.3.7 การบ่มแท่งตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์

ทำการถอดแบบแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ หลังจากที่ทำกรหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจากนั้นนำเอาแท่งตัวอย่างที่จะทดสอบอายุ 28 วัน ไปทำการคลุมกระสอบบ่มน้ำตลอดอายุ 28 วัน แล้วนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตออกจากกระสอบที่คลุมลวงหน้า 1 วัน ก่อนถึงกำหนดเวลาการทดสอบ

3.3.8 การทดสอบโดยวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

ทำการทดลองวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีดังต่อไปนี้

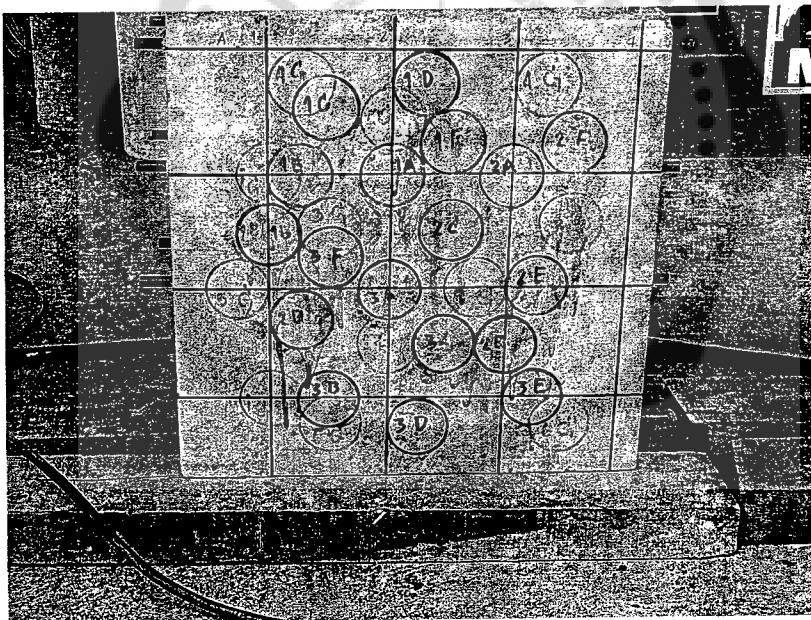
1. ทำความสะอาดผิวของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ทั้ง 6 ด้าน ทำการกำหนดตำแหน่งจุดที่จะทำการทดสอบด้านละ 4 จุด ทั้ง 6 ด้าน ตำแหน่งด้านตรงกันข้ามจะต้องตรงกันทั้ง 4 จุด แล้วเขียนหมายเลขกำกับตำแหน่งที่ทำเอาไว้หมายเลขจะต้องตรงกันทั้ง 4 ด้าน ทำลักษณะเดียวกันนี้ทั้ง 6 ด้าน 3 คู่
2. ทำการทดสอบด้วยเครื่องอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ตามตำแหน่งหมายเลขที่กำหนดเอาไว้ แท่งคอนกรีตทดสอบหนึ่งลูกมีตำแหน่งทดสอบรวม 12 ตำแหน่งหมายเลข ตามรูปที่ 3.25
3. ขั้นตอนการวัดค่าใช้จาระบีทาที่หัวรับและหัวส่งคลื่น โดยทาบาง ๆ จากนั้นก็เอาหัวส่งและหัวรับไปจีที่ตำแหน่งที่กำหนดเอาไว้ทำเป็นคู่ ๆ หมายเลขต้องตรงกันแล้วทำการวัดค่าตำแหน่งละ 3 ค่า จากนั้นหาค่าเฉลี่ยต่อตำแหน่ง โดยทำการวัดค่าทั้งหมดต่อแท่งคอนกรีตทดสอบหนึ่งลูกจำนวน 12 ตำแหน่ง ๆ ละ 3 ค่า จากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ยต่อจุด เอาค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่ากำลังอัด หลังจากนั้นนำแท่งคอนกรีตทดสอบไปเข้าเครื่องทดสอบหาค่ากำลังอัดมาตรฐานต่อไปตามรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.24 การกำหนดตำแหน่งและเบอร์จุดที่จะทดสอบตัวอย่างแท่งลูกบาศก์



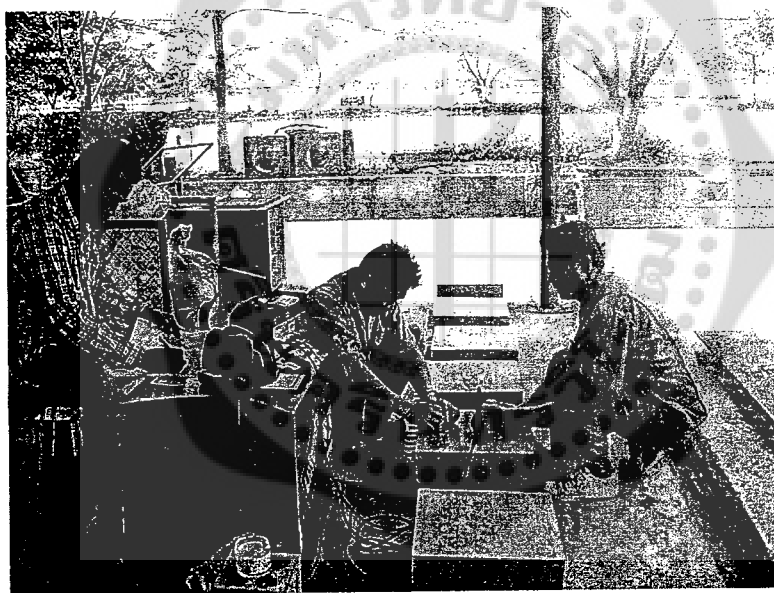
รูปที่ 3.25 การทดสอบด้วยเครื่องอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีของแท่งลูกบาศก์



รูปที่ 3.26 การกำหนดตำแหน่งและเบอร์จุดที่จะทดสอบตัวอย่างชิ้นงาน



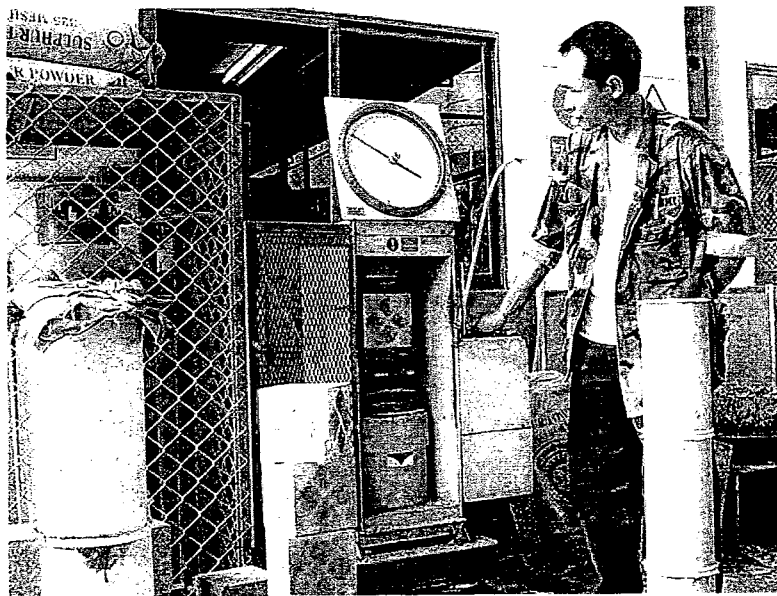
รูปที่ 3.27 การทดสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีของชิ้นงาน แบบทางตรง



รูปที่ 3.28 การทดสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีของชิ้นงาน แบบทางอ้อม

3.4 การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตโดยวิธีกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน

นำแท่งคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน ที่ผ่านการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วเข้าวางบนเครื่องทดสอบหาค่ากำลังอัดมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM C-39 ดังรูปที่ 3.29 โดยวางแท่งคอนกรีตให้ได้แนวศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างตรงกับแนวศูนย์กลางของแท่งกด ทำการเดินเครื่องทดสอบกำลังอัดพร้อมจดบันทึกแรงกดที่ได้ ผลของการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.



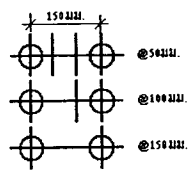
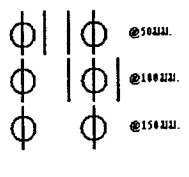
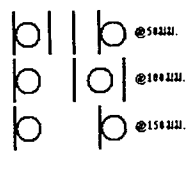
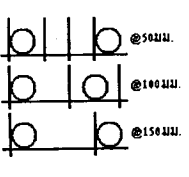
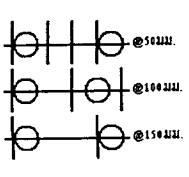
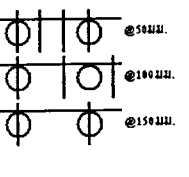
รูปที่ 3.29 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบมาตรฐาน

3.5 การทดสอบชิ้นงานตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งการทดสอบชิ้นงานด้วยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีแบบทางตรง รวม 6 ตำแหน่ง

รูปตำแหน่งทดสอบ	รายละเอียดของการทดสอบ $fc' 300 \pm 25 \text{ ksc.}, 400 \pm 25 \text{ ksc.}$
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1A, 2A และ 3A ขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายให้ตรงกับหน้า-หลังของตัวอย่างชิ้นงานทุกจุดโดยความหนาชิ้นงานหนา 150 มม.(Pathleng)ในการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบบันทึกข้อมูล
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1B, 2B และ 3B ขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายให้ตรงกับหน้า-หลังของตัวอย่างชิ้นงานทุกจุดโดยความหนาชิ้นงานหนา 150 มม.(Pathleng)ในการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบบันทึกข้อมูล
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1C, 2C และ 3C ขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายให้ตรงกับหน้า-หลังของตัวอย่างชิ้นงานทุกจุดโดยความหนาชิ้นงานหนา 150 มม.(Pathleng)ในการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบบันทึกข้อมูล
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1D, 2D และ 3D ขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายให้ตรงกับหน้า-หลังของตัวอย่างชิ้นงานทุกจุดโดยความหนาชิ้นงานหนา 150 มม.(Pathleng)ในการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบบันทึกข้อมูล
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1E, 2E และ 3E ขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายให้ตรงกับหน้า-หลังของตัวอย่างชิ้นงานทุกจุดโดยความหนาชิ้นงานหนา 150 มม.(Pathleng)ในการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบบันทึกข้อมูล
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1F, 2F และ 3F ขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายให้ตรงกับหน้า-หลังของตัวอย่างชิ้นงานทุกจุดโดยความหนาชิ้นงานหนา 150 มม.(Pathleng)ในการทดสอบจากนั้นทำการทดสอบบันทึกข้อมูล

ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งการทดสอบชิ้นงานด้วยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีแบบทางอ้อม รวม 6 ตำแหน่ง

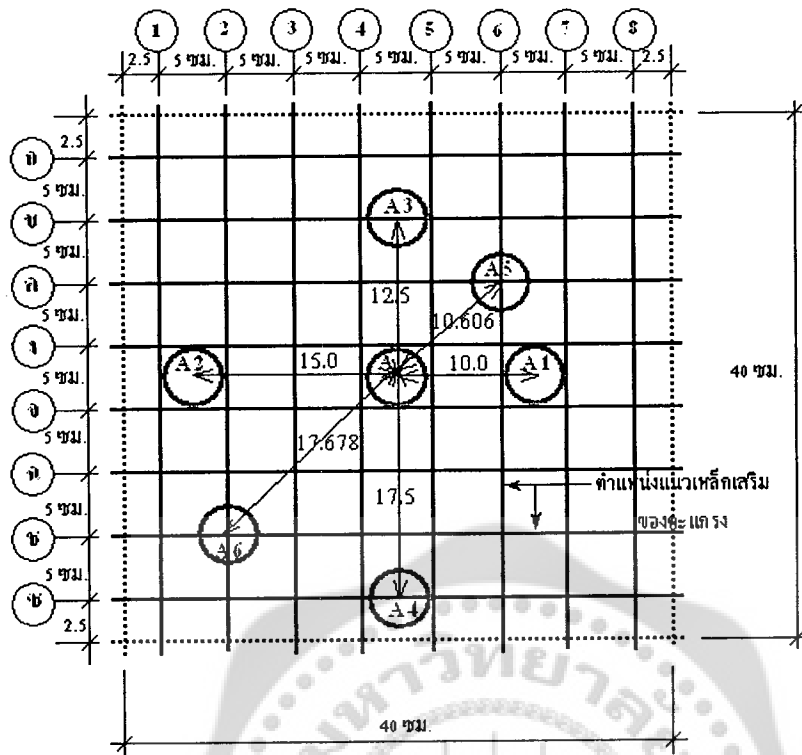
รูปตำแหน่งทดสอบ	รายละเอียดของการทดสอบ $fc' 300+25 \text{ ksc.}, 400+25 \text{ ksc.}$
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1G จำนวน 3 ค่า แล้วสลับหัวส่งเป็น 1G' จำนวน 3 ค่า ระยะห่างของหัวส่งและหัวรับ (Pathleng) 150 มม. โดยขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายแล้วกำกับรหัสทุกตำแหน่งแล้วทำการทดสอบ บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 2G จำนวน 3 ค่า แล้วสลับหัวส่งเป็น 2G' จำนวน 3 ค่า ระยะห่างของหัวส่งและหัวรับ 150 มม. โดยขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายแล้วกำกับรหัสทุกตำแหน่งแล้วทำการทดสอบ บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 3G จำนวน 3 ค่า แล้วสลับหัวส่งเป็น 3G' จำนวน 3 ค่า ระยะห่างของหัวส่งและหัวรับ 150 มม. โดยขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายแล้วกำกับรหัสทุกตำแหน่งแล้วทำการทดสอบ บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 4G จำนวน 3 ค่า แล้วสลับหัวส่งเป็น 4G' จำนวน 3 ค่า ระยะห่างของหัวส่งและหัวรับ 150 มม. โดยขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายแล้วกำกับรหัสทุกตำแหน่งแล้วทำการทดสอบ บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 5G จำนวน 3 ค่า แล้วสลับหัวส่งเป็น 5G' จำนวน 3 ค่า ระยะห่างของหัวส่งและหัวรับ 150 มม. โดยขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายแล้วกำกับรหัสทุกตำแหน่งแล้วทำการทดสอบ บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 6G จำนวน 3 ค่า แล้วสลับหัวส่งเป็น 6G' จำนวน 3 ค่า ระยะห่างของหัวส่งและหัวรับ 150 มม. โดยขั้นตอนทดสอบทำเครื่องหมายแล้วกำกับรหัสทุกตำแหน่งแล้วทำการทดสอบ บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์

การทดสอบชิ้นงาน A', C' ทำการทดสอบทำนองเดียวกันในการทดสอบทางตรง โดยพลิกกลับชิ้นงานเพื่อให้หัวส่งและรับอยู่ใกล้โครงเหล็กเสริม ส่วนในการทดสอบแบบทางอ้อมสลับหัวส่งรับปกติ แล้วทำการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

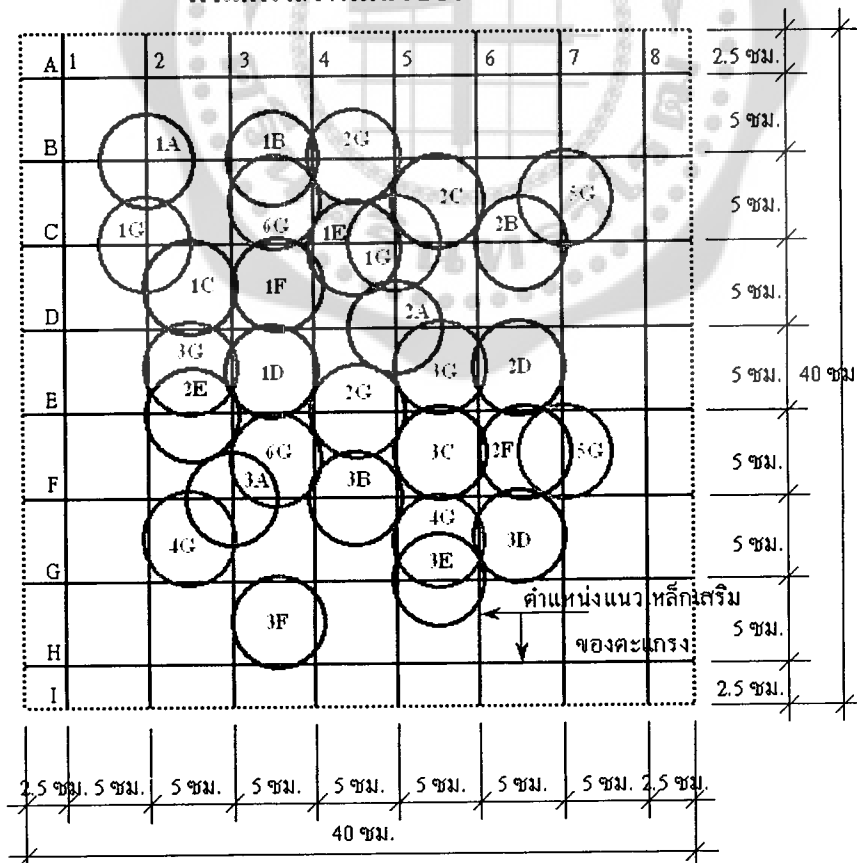
หมายเหตุ:

- การทดสอบชิ้นงาน A, B, C, D, E และ F จะทำการกำหนดให้หัวส่งอยู่ทางด้านผิวบนของชิ้นงานและหัวรับอยู่ด้านล่างของชิ้นงาน
- การทดสอบชิ้นงาน A', C' จะทำการสลับหัวส่งและหัวรับของชิ้นงาน

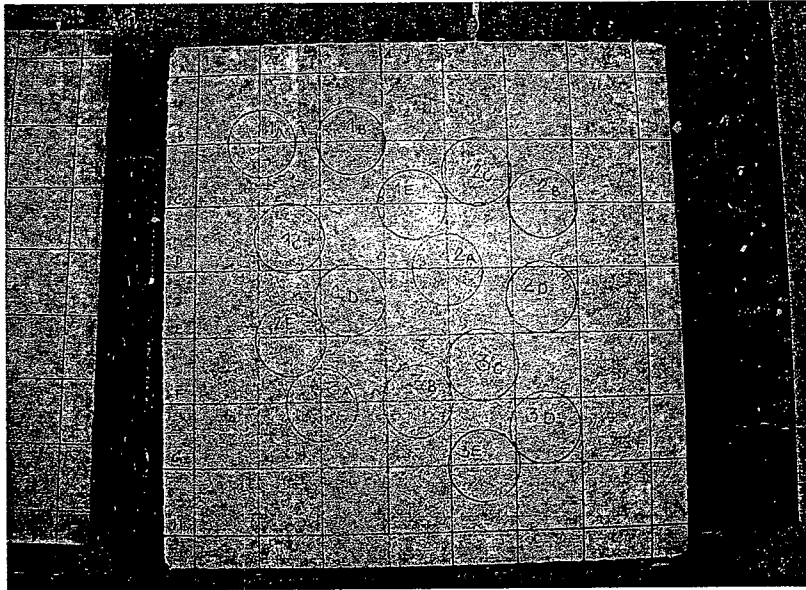
รูปแสดงตำแหน่งการทดสอบชิ้นงาน
เสริมเหล็ก RB9 มม. @5 ซม. ระยะห่างแกนเหล็ก(ล่าง)2.5 ซม.



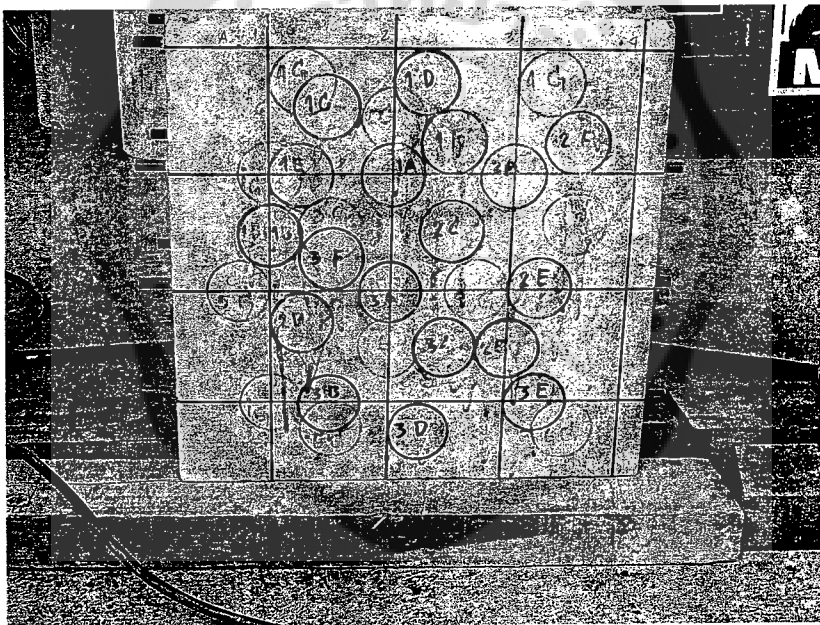
ตำแหน่งการทดสอบชิ้นงาน



รูปที่ 3.30 การออกแบบการวางตำแหน่งในการทดสอบ



รูปที่ 3.31 ตำแหน่งการทดสอบแบบทางตรง



รูปที่ 3.32 ตำแหน่งการทดสอบแบบทางตรงที่ระยะเหล็กเสริมต่างกัน

3.6 การวิเคราะห์ทดสอบสมมุติฐานเชิงสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel และโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เช่น MINITAB หรือ SPSS โดยทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าต่างๆ ตามหัวข้อวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparisons) ณ ระดับนัยสำคัญร้อยละ .05 ว่าจะมีผลแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตและผลการทดสอบชิ้นงานต่างๆแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งจำแนกผลได้ดังนี้

4.1.1 การทดสอบมวลรวมละเอียด

ผลการทดสอบหาขนาดละเอียดของทราย โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C33 ผลของการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวกย่อย ก. มีค่า F.M = 2.92

4.1.2 การทดสอบมวลรวมหยาบ

ผลการทดสอบหาขนาดละเอียดของหินโดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C33 ผลของการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวกย่อย ก. หิน 3/4 นิ้ว มีค่า F.M = 6.59

4.1.3 การทดสอบชิ้นงาน

1. ทดสอบหาค่ากำลังแรงอัดของคอนกรีตที่ออกแบบ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 กำหนดกำลังแรงอัดประลัยรูปทรงลูกบาศก์เท่ากับ 300 ± 25 และ 400 ± 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อายุ 28 วัน และมีค่าความชื้นเหลืออยู่ระหว่าง 7 ± 2.5 เซนติเมตร
2. ใช้ขนาดโดสของวัสดุมวลรวมหยาบขนาด 3/4 นิ้ว
3. ใช้เหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร
4. ใช้ระยะห่างของเหล็กเสริมเท่ากับ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร
5. ใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.5, 5.0 และ 7.5 เซนติเมตร
6. มิติของโครงสร้างตัวอย่างเท่ากับ $40 \times 40 \times 15$ เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง)

ผลของการทดสอบชิ้นงานทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวกย่อย ข. โดยค่าที่อ่านได้จะอยู่ในเทอมของเวลาก่อนที่จะแปลงค่าเป็นความเร็ว

4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากร (Two Samples Test)

นำข้อมูลผลทดสอบต่างๆ ที่ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มประชากรสองกลุ่ม พิจารณาในกรณีกลุ่มประชากรทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน (Two Independence Samples) และมีขนาดของกลุ่มตัวอย่างเท่ากันจึงเลือกใช้การเปรียบเทียบทางสถิติแบบ t-test ดังแสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ในภาคผนวกย่อย ค.

4.3 ศึกษาผลกระทบของระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริมต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

ก. วิธีทดสอบทางตรง

จัดวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ตามรายการหัวข้อที่ 1 ถึง 8 เพื่อใช้ประกอบการศึกษาผลกระทบดังนี้

1. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน A, B, C, D และ F โดยที่ชิ้นงาน $fc' 300 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
2. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน A, B, C, D และ F โดยที่ชิ้นงาน $fc' 300 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 100 มม.
3. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน A, B, C, D, E และ F โดยที่ชิ้นงาน $fc' 300 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 150 มม.
4. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน A, B, C, D, E และ F โดยที่ชิ้นงาน $fc' 400 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
5. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน A, B, C, D, E และ F โดยที่ชิ้นงาน $fc' 400 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 100 มม.
6. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน A, B, C, D, E และ F โดยที่ชิ้นงาน $fc' 400 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 150 มม.
7. การเปรียบเทียบผลกระทบชิ้นงานไม่มีเหล็กเสริม (F) กับชิ้นงาน A, B, C, D และ E โดยที่ชิ้นงาน $fc' 300 \pm 25$ ksc. ระยะหุ้มต่างๆ จำนวนชั้นของเหล็กเสริมต่างๆ และระยะห่างเหล็กต่างกันคือ 50 มม., 100 มม. และ 150 มม.
8. การเปรียบเทียบผลกระทบชิ้นงานไม่มีเหล็กเสริม (F) กับชิ้นงาน A, B, C, D และ E โดยที่ชิ้นงาน $fc' 400 \pm 25$ ksc. ระยะหุ้มต่างๆ จำนวนชั้นของเหล็กเสริมต่างๆ และระยะห่างเหล็กต่างกันคือ 50 มม., 100 มม. และ 150 มม.

จากข้อมูลการทดสอบในภาคผนวกย่อย ข. และการวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าความเร็วของคลื่นเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม ในชิ้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 300 ± 25 ksc กับชิ้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 400 ± 25 ksc ด้วยวิธีทดสอบแบบทางตรง ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่พบว่าไม่มีค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปัจจัยค่าระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม ของทั้งสองค่ากำลังรับแรงอัดประลัย

ข. วิธีทดสอบทางอ้อม

จัดวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ตามรายการหัวข้อที่ 1 ถึง 6 เพื่อใช้ประกอบการศึกษาผลกระทบดังนี้

1. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชิ้นงาน 1G, 2G, 3G, 4G, 5G และ 6G โดยที่ชิ้นงาน $fc' 300 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.

2. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชั้นงาน 1G, 2G, 3G, 4G, 5G และ 6G โดยที่ชั้นงาน $f_c' 300 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 100 มม.
3. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชั้นงาน 1G, 2G, 3G, 4G, 5G และ 6G โดยที่ชั้นงาน $f_c' 300 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 150 มม.
4. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชั้นงาน 1G, 2G, 3G, 4G, 5G และ 6G โดยที่ชั้นงาน $f_c' 400 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
5. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชั้นงาน 1G, 2G, 3G, 4G, 5G และ 6G โดยที่ชั้นงาน $f_c' 400 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 100 มม.
6. การเปรียบเทียบผลกระทบของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ และจำนวนชั้นของเหล็กเสริมของชั้นงาน 1G, 2G, 3G, 4G, 5G และ 6G โดยที่ชั้นงาน $f_c' 400 \pm 25$ ksc. ระยะห่างเหล็กเสริม 150 มม.

จากข้อมูลการทดสอบในภาคผนวกย่อย ข. และการวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าความเร็วของคลื่นเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม ในชั้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 300 ± 25 ksc กับชั้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 400 ± 25 ksc ด้วยวิธีทดสอบแบบทางอ้อม ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่พบว่าไม่มีค่าความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของค่าระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม ของทั้งสองค่ากำลังรับแรงอัดประลัย เช่นเดียวกันกับวิธีทดสอบแบบทางตรง

อาจกล่าวได้ว่าระยะห่างของเหล็กเสริม และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่มีผลกระทบต่อค่าความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีทั้งการทดสอบแบบทางตรงและทางอ้อม ส่วนจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริมพบว่าไม่มีผลกระทบเช่นเดียวกัน เนื่องมาจากค่าขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมมีจำนวนน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลกระทบต่อค่าที่อ่านได้

4.4 ศึกษาผลกระทบของช่วงค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

1. การเปรียบเทียบผลกระทบชั้นงาน $f_c' 300 \pm 25$ ksc กับชั้นงาน $f_c' 400 \pm 25$ ksc โดยชั้นงานมีระยะหุ้มเหล็กเท่ากัน ระยะห่างเหล็กเสริมเท่ากัน รวมทั้งจำนวนชั้นของเหล็กเสริมเท่ากัน

จากข้อมูลการทดสอบในภาคผนวกย่อย ข. และการวิเคราะห์ทางสถิติ ในการเปรียบเทียบผลกระทบชั้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 300 ± 25 ksc กับชั้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 400 ± 25 ksc โดยชั้นงานมีระยะหุ้มเหล็ก 2.5, 5.0 และ 7.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่พบว่าไม่มีค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของทั้งสองค่ากำลังรับแรงอัดประลัย กล่าวได้ว่าการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ในช่วงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันมีค่าที่ทดสอบได้เป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน

4.5 เปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ในการทดสอบกำลังแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

1. ทำการเปรียบเทียบลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ใน 6 ลักษณะดังรูปตำแหน่งทดสอบด้านล่างทดสอบแบบทางตรง

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่น ทดสอบแบบทางตรง

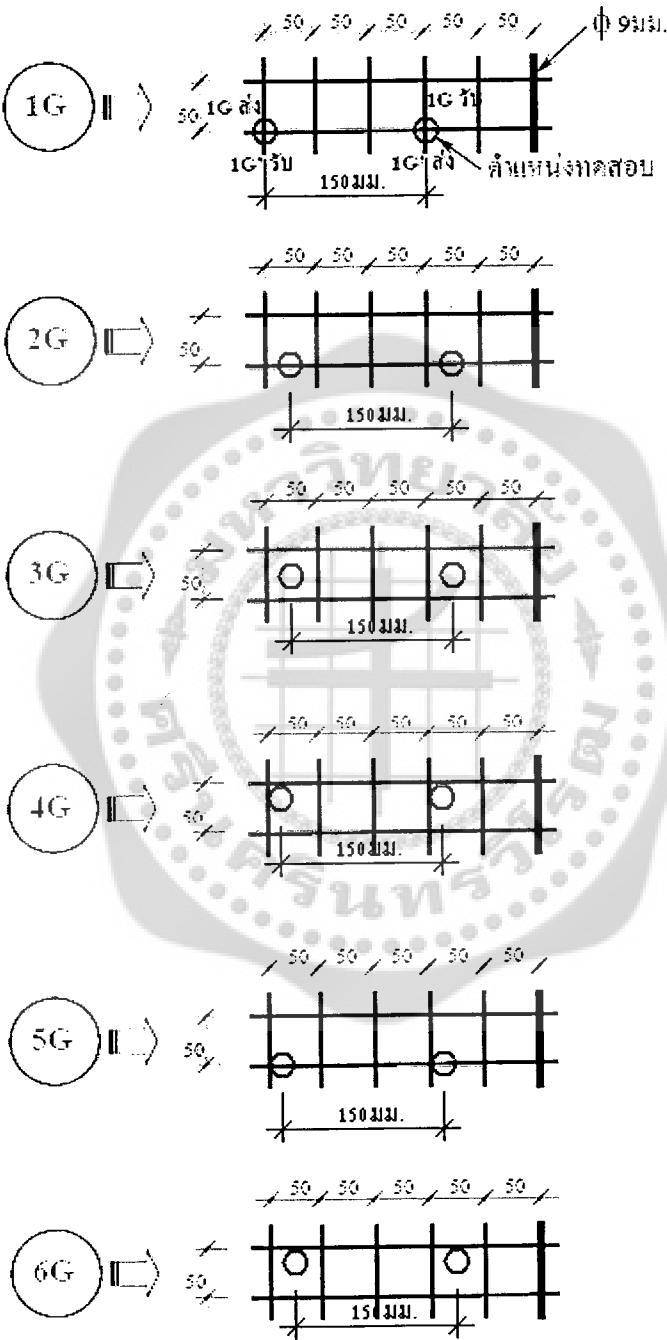
รูปตำแหน่งทดสอบ	รายละเอียดของการทดสอบ
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1A, 2A และ 3A
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1B, 2B และ 3B
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1C, 2C และ 3C
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1D, 2D และ 3D
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1E, 2E และ 3E
	ทำการทดสอบ 3 จุด คือ 1F, 2F และ 3F

จากข้อมูลการทดสอบในภาคผนวกย่อย ข. และการวิเคราะห์ทางสถิติ ในการเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ 6 ลักษณะ ในการทดสอบกำลังแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ในชิ้นงานกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 300 ± 25 ksc กับชิ้นงานกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 400 ± 25 ksc โดยมีระยะหุ้มเหล็ก 2.5, 5.0 และ 7.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น พบว่าค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ไม่มีค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ รวมถึงในกรณีการทดสอบชิ้นงาน A', C' ที่ทำการสลับหัวส่งและหัวรับของชิ้นงานด้วย โดยค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างการสลับหัวส่งและหัวรับของชิ้นงาน A, C กับ A', C' มีค่าประมาณร้อยละ 0.7 เท่านั้น

2. ทำการเปรียบเทียบลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ใน 6 ลักษณะดังรูปตำแหน่งทดสอบที่ 4.1 โดยทดสอบแบบทางอ้อม

จากข้อมูลการทดสอบในภาคผนวกย่อย ข. และการวิเคราะห์ทางสถิติ ในการเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ 6 ลักษณะ ในการทดสอบกำลังแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีทดสอบแบบทางอ้อม ในชิ้นงานกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 300 ± 25 ksc และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 400 ± 25 ksc โดยมีระยะหุ้มเหล็ก 2.5, 5.0 และ 7.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50, 100 และ 150 มม. จำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น และระยะห่างของหัวรับส่ง

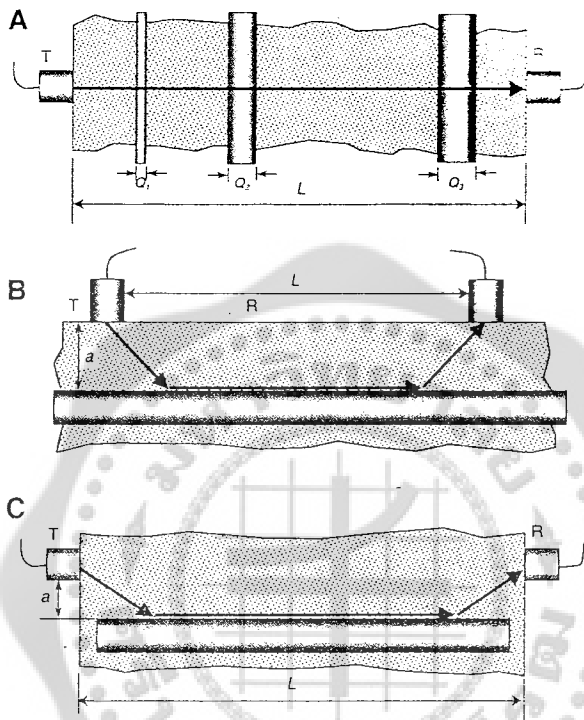
สัญญาณ 150 มม.พบว่าค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ไม่มีค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ รวมถึงในกรณีการทดสอบชิ้นงานสลัبدำแหน่งหัวส่งหัวส่งด้วย โดยค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างการสลัพบัวส่งและหัวรับของชิ้นงาน A, C กับ A', C' มีค่าประมาณร้อยละ 5.1 อาจเนื่องจากรูปแบบการวางเหล็กเสริมเป็นแบบตะแกรง มีผลรบกวนต่อทิศทางการเคลื่อนตัวของคลื่นทำให้มีค่าความแปรปรวนมากขึ้น



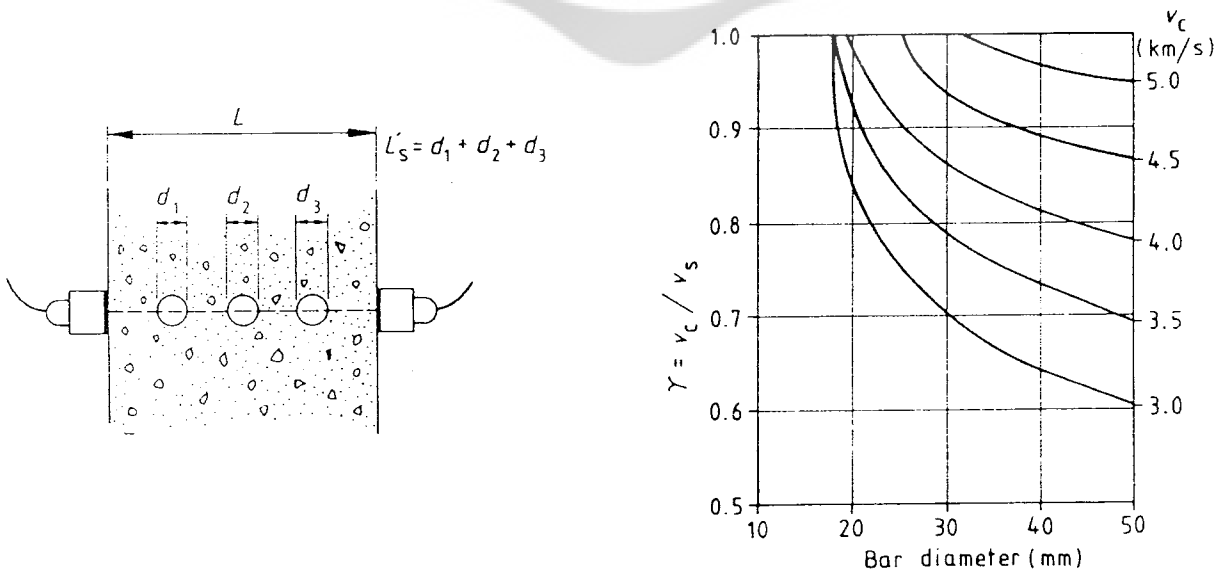
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างรหัสและตำแหน่งทดสอบแบบทางอ้อมที่ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.

4.6 เปรียบเทียบผลกระทบของเหล็กเสริมในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ตามข้อกำหนดของมาตรฐานต่าง ๆ

การทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีในงานวิจัยนี้กระทำโดยการส่งสัญญาณแบบโดยตรงและแบบทางอ้อม ในการส่งสัญญาณแบบโดยตรง เหล็กเสริมอยู่ในทิศทางตำแหน่งตั้งฉากกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่นดังรูปที่ 4.2(A) โดยเปรียบเทียบค่าการปรับแก้ผลกระทบของขนาดเหล็กเสริม 9 มิลลิเมตร ในชั้นตัวอย่างคอนกรีต ตามข้อกำหนดมาตรฐาน BS 1881 Part 203 โดยใช้กราฟรูปที่ 4.3 และใช้ตามข้อแนะนำอื่นๆ ตามรูปที่ 4.4 และ 4.5 และอ่านค่าจากตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของตำแหน่งเหล็กเสริมลักษณะต่างๆ

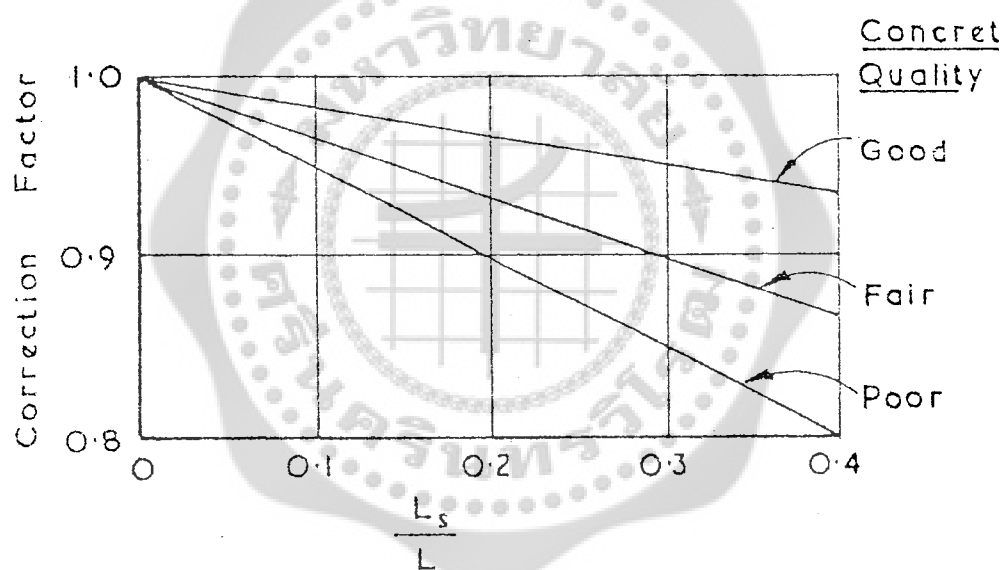


รูปที่ 4.3 กราฟปรับแก้ผลกระทบของขนาดเหล็กเสริมตามมาตรฐาน BS 1881 Part 203

ตารางที่ 4.2 ค่าปรับแก้ผลกระทบของเหล็กเสริมในทิศตั้งฉากกับการส่งสัญญาณคลื่น

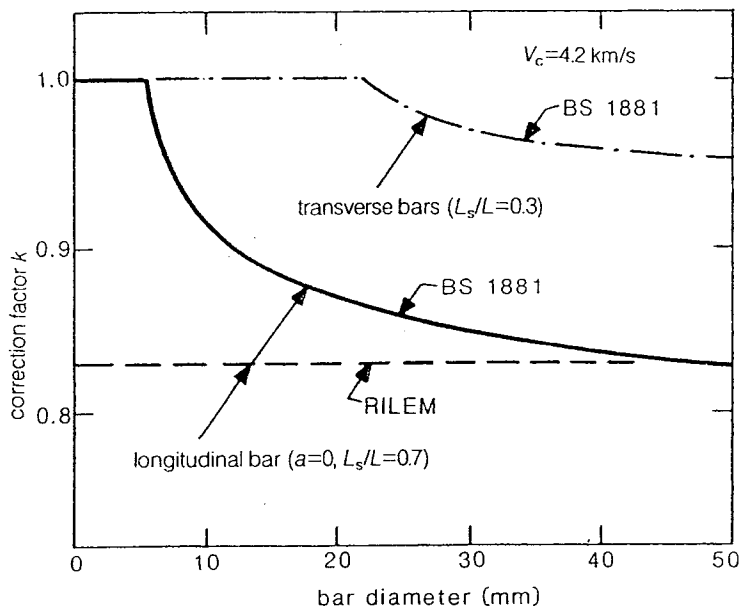
$$\frac{V_c}{V} = \frac{\text{pulse velocity in plain concrete}}{\text{measured pulse velocity in reinforced concrete}}$$

L_r/L	Very poor quality, $V_c = 3000 \text{ m/s}$	Fair quality, $V_c = 4000 \text{ m/s}$	Very good quality, $V_c = 5000 \text{ m/s}$
1/12	0.96	0.97	0.99
1/8	0.94	0.96	0.98
1/6	0.92	0.94	0.97
1/4	0.88	0.92	0.96
1/3	0.83	0.89	0.94
1/2	0.75	0.83	0.92



รูปที่ 4.4 ค่าปรับแก้ผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศตั้งฉากกับการส่งสัญญาณคลื่นตามคุณภาพคอนกรีต

จากการทดลองพบว่าคุณภาพของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในระดับดี มีค่าความเร็วคลื่นประมาณ 4.7 กิโลเมตรต่อวินาที ดังนั้นค่าปรับแก้ที่อ่านได้จากรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 และตารางที่ 4.2 สามารถจัดเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบได้ผลสรุปดังตารางที่ 4.3 โดยพบว่าการวัดหาค่าความเร็วของคลื่นที่วิ่งผ่านเหล็กเสริมคอนกรีตมีค่าสูงกว่าความเร็วที่วิ่งผ่านคอนกรีตล้วน ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นในเหล็กเสริมที่มีปริมาณมากจะมีค่าสูงกว่าเหล็กเสริมที่มีปริมาณน้อยและจึงมีค่าปรับแก้ค่าความเร็วต่ำกว่าทั้งนี้ในการเปรียบเทียบค่าปรับแก้กับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยเนื่องจากขนาดของเหล็กเสริมขนาด 9 มิลลิเมตร มีค่าอัตราส่วนระยะคลื่นผ่านเหล็กต่อระยะห่างของการวัด (L_s/L) น้อย จึงส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วของคลื่นน้อย รวมถึงการเสริมเหล็กจัดอยู่ในทิศตั้งฉากกับทิศทางของการวิ่งของคลื่นเสี่ยงจึงมีอิทธิพลต่อผลของการวัดค่าการวิ่งของคลื่นน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติที่ไม่พบค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปัจจัยต่างๆ ที่กำหนด



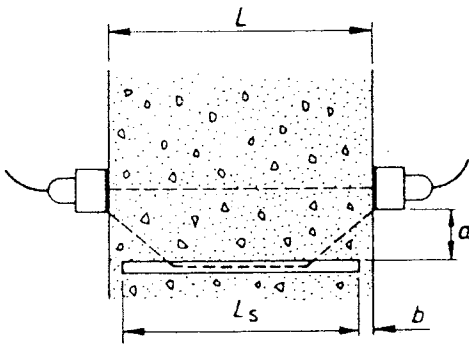
รูปที่ 4.5 ค่าปรับแก้จากผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าปรับในทิศตั้งฉากจากจากข้อแนะนำต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ

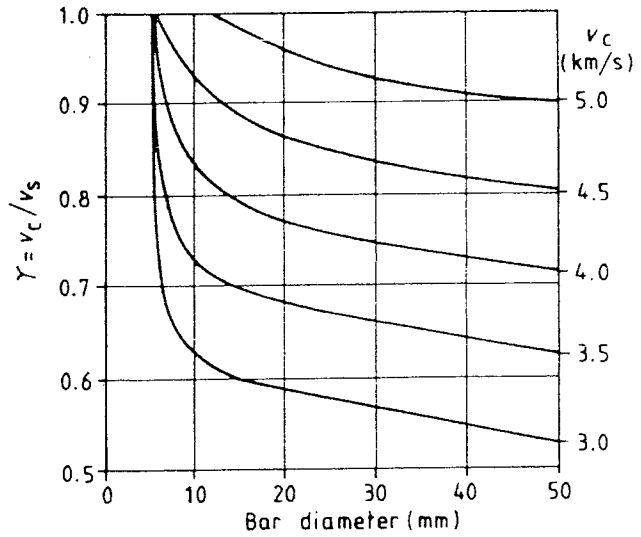
รูปแบบ	จำนวน ชั้นเหล็ก	อัตราส่วน L_s/L	รูปที่ 4.3	รูปที่ 4.4	รูปที่ 4.5	ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยจาก การทดสอบ
A	1	0.12	1.0	0.98	1.0	0.970	0.998
B และ E	1	0.06	1.0	0.99	1.0	0.985	0.996
C และ D	1	0.00	1.0	1.00	1.0	1.000	0.992
A	2	0.24	1.0	0.96	1.0	0.940	1.000
B และ E	2	0.12	1.0	0.98	1.0	0.970	0.988
C และ D	2	0.00	1.0	1.00	1.0	1.000	0.986

ตารางที่ 4.4 ค่าปรับในทิศขนานจากข้อแนะนำต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ กรณีมีระยะหุ้มเหล็ก 2.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. และจำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น

รูปแบบ	จำนวน ชั้นเหล็ก	อัตราส่วน a/L	รูปที่ 4.6-4.7	รูปที่ 4.8	ตารางที่ 4.5	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ
1G, 2G, 5G	1	0.166	1.0	1.0	0.98	1.030
3G	1	0.235	1.0	1.0	1.00	1.034
4G, 6G	1	0.314	1.0	1.0	1.00	1.020
1G, 2G, 5G	2	0.166	1.0	1.0	0.98	1.000
3G	2	0.235	1.0	1.0	1.00	1.016
4G, 6G	2	0.314	1.0	1.0	1.00	1.008

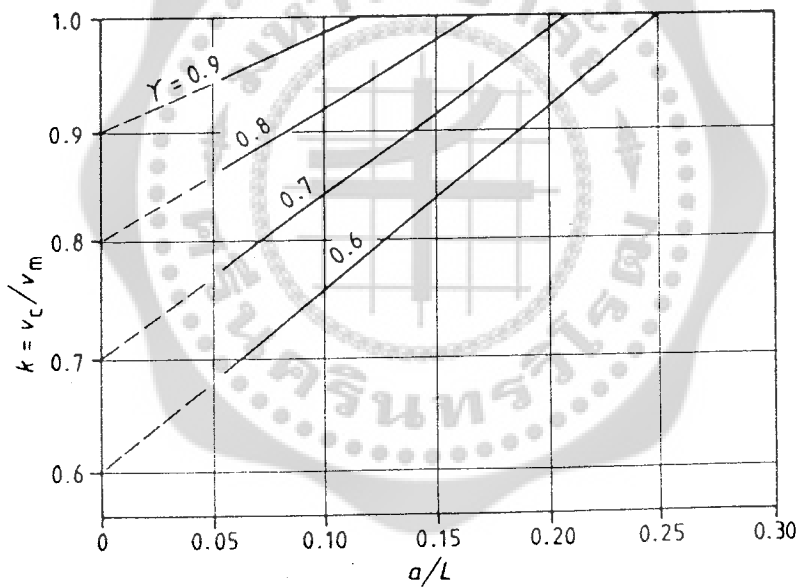


(a) Cross section of concrete with lateral reinforcement



(b) Relationship between bar diameter and velocity ratio

รูปที่ 4.6 กราฟปรับแก้ผลกระทบของขนาดเหล็กเสริมในทิศทางตามมาตรฐาน BS 1881 Part 203



รูปที่ 4.7 ค่าปรับแก้ผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่น

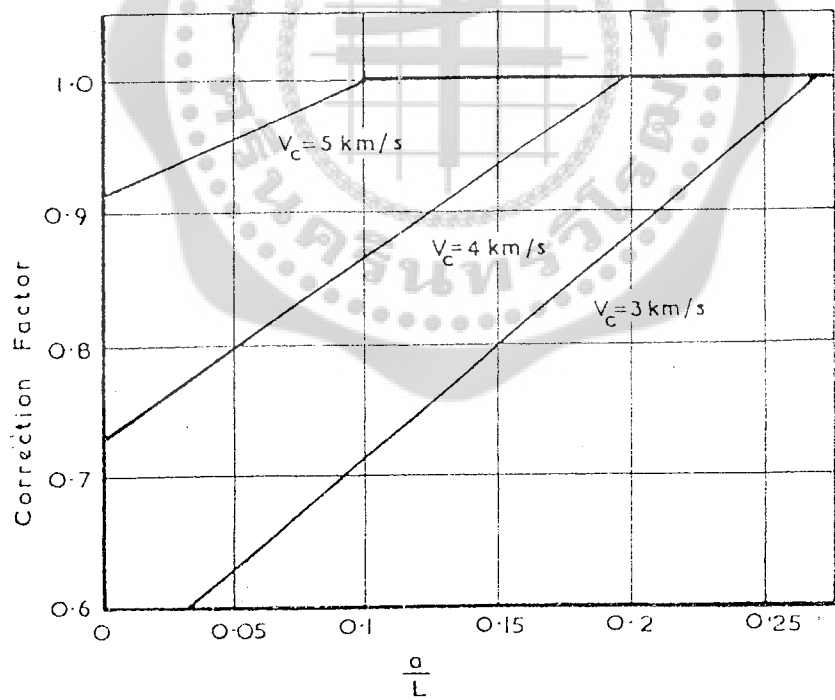
ส่วนผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่นดังรูปที่ 4.2(B) จากผลการทดลองพบว่าคุณภาพของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในระดับดี มีค่าความเร็วคลื่นประมาณ 4.7 กิโลเมตรต่อวินาที (กำหนดใช้ค่าความเร็วคลื่นในเหล็กเสริมประมาณ 5.9 กิโลเมตรต่อวินาที : Malhotra 2004) ดังนั้นค่าปรับแก้ที่อ่านได้จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 และตารางที่ 4.5 สามารถจัดเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบได้ผลสรุปดังตารางที่ 4.4 ที่แสดงตัวอย่างเฉพาะในกรณีมีระยะหุ้มเหล็ก 2.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. และจำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 และ 2 ชั้น ที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างระยะจากหัวส่งสัญญาณถึงเหล็กเสริมต่อระยะห่างของการวัดสัญญาณ (a/L) ต่ำสุด โดยพบว่าการวัดหาค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งผ่านเหล็กเสริมคอนกรีตยังมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วที่วิ่งผ่านคอนกรีตล้วนมาก ทั้งนี้เนื่องอัตราส่วน

ระหว่างระยะจากหัวส่งสัญญาณถึงเหล็กเสริมต่อระยะห่างของการวัดสัญญาณ มีค่ามากกว่า 0.15 ในคอนกรีตที่มีคุณภาพดี (Bungey 1996) ทั้งที่การวัดคลื่นในทิศทางกับการเสริมเหล็กน่าจะมีอิทธิพลมากกว่าการวัดคลื่นในทิศตั้งฉากกับการเสริมเหล็ก

ตารางที่ 4.5 ค่าปรับแก้ผลกระทบของเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่น

$$\frac{V_c}{V} = \frac{\text{pulse velocity in plain concrete}}{\text{measured pulse velocity in reinforced concrete}}$$

a/L	$\frac{V_c}{V_s} = 0.90$	$\frac{V_c}{V_s} = 0.80$	$\frac{V_c}{V_s} = 0.71$	$\frac{V_c}{V_s} = 0.60$
0	0.90	0.80	0.71	0.60
1/20	0.94	0.86	0.78	0.68
1/15	0.96	0.88	0.80	0.71
1/10	0.99	0.92	0.85	0.76
1/7	1.00	0.97	0.91	0.83
1/5	1.00	1.00	0.99	0.92
1/4	1.00	1.00	1.00	1.00



รูปที่ 4.8 ค่าปรับแก้ผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่นตามคุณภาพคอนกรีต

จากผลการทดลอง โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลายๆ ด้านต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตด้วยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี พบข้อมูลดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ศึกษาผลกระทบของระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริมต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

จากการทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ทั้งแบบทางตรงและแบบทางอ้อมตามเงื่อนไขของงานวิจัยนี้ พบว่าค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ไม่มีค่าความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปัจจัยด้านระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม ของทั้งสองค่ากำลังรับแรงอัดประลัย

5.2 ศึกษาผลกระทบของช่วงค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

จากการทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ทั้งแบบทางตรงและแบบทางอ้อมตามเงื่อนไขของงานวิจัยนี้ค่าเฉลี่ย ในชิ้นงานที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัย 300 ± 25 ksc กับชิ้นงานกำลังรับแรงอัดประลัย 400 ± 25 ksc พบว่าไม่มีค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของทั้งสองค่ากำลังรับแรงอัดประลัย โดยในช่วงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน จะมีค่าที่ทดสอบได้เป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน

5.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

พบว่าการทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ทั้งแบบทางตรงและแบบทางอ้อมตามเงื่อนไขของงานวิจัยนี้ ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ไม่มีค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ ส่วนในการทดสอบชิ้นงานที่ทำการสลัหัวส่งและหัวรับของชิ้นงานต่างๆ พบค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างการสลัหัวส่งและหัวรับของชิ้นงานในวิธีทดสอบแบบทางตรงมีค่าความแตกต่างต่างน้อยกว่าแบบทางอ้อม ซึ่งส่งผลถึงความน่าเชื่อถือในการทดสอบแบบทางตรงที่มีมากกว่าแบบทางอ้อม

5.4 เปรียบเทียบผลกระทบของเหล็กเสริมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ตามข้อกำหนดของมาตรฐานต่าง ๆ

พบว่าการทดสอบวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี ในทิศทางตำแหน่งตั้งฉากกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น มีความแตกต่างกันน้อยเนื่องจากขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมขนาด 9 มิลลิเมตร มีระยะน้อยเมื่อเทียบกับระยะห่างของการวัด จึงส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วของคลื่นน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการ

วิเคราะห์ทางสถิติที่ไม่พบค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปัจจัยต่างๆ ที่กำหนด ส่วนผลกระทบจากเหล็กเสริมในทิศทางกับการส่งสัญญาณคลื่นพบว่าความเร็วค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งผ่านเหล็กเสริมคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วที่วิ่งผ่านคอนกรีตล้วนมาก ทั้งนี้เนื่องอัตราส่วนระหว่างระยะจากหัวส่งสัญญาณถึงเหล็กเสริมต่อระยะห่างของการวัดสัญญาณ มีค่ามากเกินไปกว่า 0.15 ในคอนกรีตที่มีคุณภาพดี ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติที่ไม่พบค่าความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปัจจัยต่างๆ ที่ระบุ

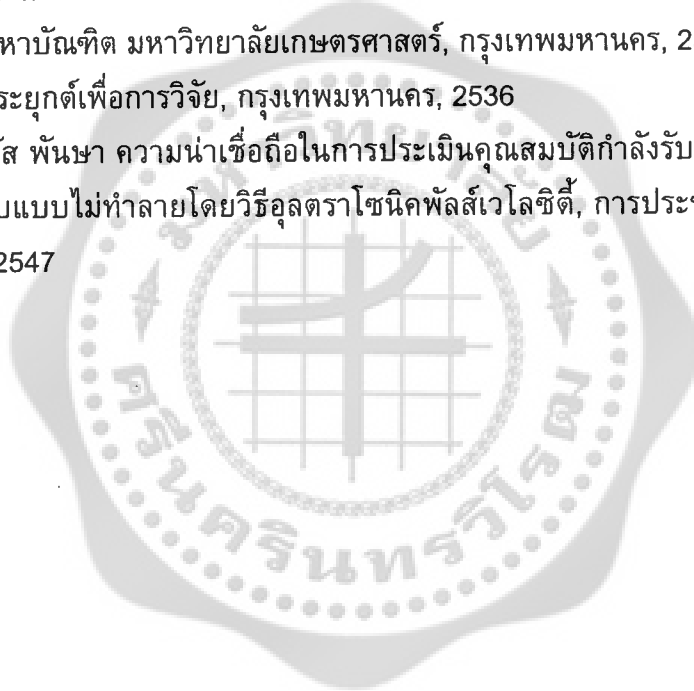
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระยะห่างของเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กเสริม และลักษณะการวางตำแหน่งการส่งสัญญาณคลื่นต่าง ๆ จากการเสริมเหล็กขนาด 9 มิลลิเมตร ไม่มีผลกระทบต่อทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตีทั้งแบบทางตรงและแบบทางอ้อม ที่ความแตกต่างทางสถิติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนระยะคลื่นผ่านเหล็กต่อระยะห่างของการวัด (L_s/L) น้อยเมื่อเหล็กเสริมอยู่ในทิศทางตำแหน่งตั้งฉากกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น และมีค่าอัตราส่วนระหว่างระยะจากหัวส่งสัญญาณถึงเหล็กเสริมต่อระยะห่างของการวัดสัญญาณ (a/L) ต่ำเมื่อเหล็กเสริมอยู่ในทิศทางตำแหน่งขนานกับทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น

5.5 ข้อวิจารณ์และเสนอแนะ

โดยทั่วไปความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งผ่านแท่งเหล็กเสริมคอนกรีตย่อมมีค่าสูงกว่าความเร็วที่วิ่งผ่านคอนกรีต ดังนั้นการวัดหาความเร็วคลื่น (Pulse Velocity) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นจึงจะมีค่าสูงกว่าที่วัดจากโครงสร้างที่หล่อด้วยคอนกรีตล้วน ดังนั้นในการแปลผลที่อ่านได้จึงควรต้องคำนึงถึงปัจจัยนี้ด้วย โดยทั่วไปเหล็กเสริมที่วิ่งตั้งฉากกับทิศทางของการวิ่งของคลื่นจะมีอิทธิพลต่อผลของการวัดน้อยกว่าเหล็กเสริมที่วิ่งขนานกับทิศทางของการวิ่งของคลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าจำนวนของเหล็กเสริมในทิศทางตั้งฉากมีจำนวนอยู่น้อยเมื่อเทียบกับระยะห่างของการวัด (Path length) อย่างไรก็ตามมีข้อแนะนำว่าในการเลือกตำแหน่งที่จะวัดหาความเร็วคลื่น ผู้ทดสอบควรหลีกเลี่ยงตำแหน่งของการวางหัวส่งสัญญาณที่อาจจะชนไปกับตำแหน่งของหน้าตัดของเหล็กเสริมของโครงสร้างเท่าที่จะทำได้ ส่วนงานวิจัยในอนาคตนั้น เนื่องจากในประเทศไทยการประเมินคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตด้วยวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตียังไม่เป็นที่แพร่หลายและยังไม่มีข้อมูลในการอ้างอิง เช่น การประเมินความลึกและทิศทางของรอยร้าวของคอนกรีต การประเมินหาความลึกของชั้นคอนกรีตที่มีคุณภาพไม่สมบูรณ์ นอกเหนือจากการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อดังกล่าว นอกเหนือจากการขยายผลศึกษาจากผลกระทบของเหล็กเสริมในขนาดอื่นๆ ที่ใหญ่ขึ้นหรือทดสอบจริงในโครงสร้าง เพื่อเป็นข้อมูลความน่าเชื่อถือประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ในงานทดสอบคอนกรีตได้อย่างถูกต้องต่อไป

- ACI Committee 228, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI 228.2R-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2004.
- ACI Committee 311, ACI Manual of Concrete Inspection, ACI 311, American Concrete Institute, 1982, pp.12-14.
- ASTM Test Designation C 597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA, 2003.
- BS 1881: Part 201, Guide to The Use of Non-destructive Methods of Test for Hardened Concrete, British Standards Institution, London, 1986.
- BS 1881: Part 203, Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, British Standards Institution, London, 1986.
- Bungey, J.H., The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing, Malhotra, V.M., Ed., ACI SP 82, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1984, 229.
- Bungey, J.H. and Millard S.G., Testing of Concrete in Structures, Chapman & Hall, London, UK, 1996.
- Chung, H.W., Effect of Embedded Steel Bar upon Ultrasonic Testing of Concrete, Mag. Concr. Res. (London), 30(102), 19, 1978.
- Malhotra, V.M., Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods, ACI Monograph 9, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1976.
- Malhotra, V.M. and Carino, N.J., Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2nd edition, CRC Press, 2004.
- Whitehurst, E.A., Evaluation of Concrete Properties from Sonic Tests, ACI Monograph 2, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1966, 94pp.
- กัลยา วานิชย์บัญชา การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 6, 2546
- บริษัท ซอยล์เทสดีงสยาม จำกัด คู่มือการใช้งาน PUNDIT, กรุงเทพฯ
- พิบูลย์ จินาวัฒน์ การใช้เครื่องมือทดสอบโครงสร้างคอนกรีต, การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่องบทบาทของการทดสอบโดยไม่ทำลาย, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2526
- พิภพ สุนทรสมัย วัสดุวิศวกรรมก่อสร้าง สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย - ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 7, โรงพิมพ์ประชาชน จำกัด, 2540

- ฟูจิอิ ซาโตะ การทดสอบแบบไม่ทำลาย สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์ ที.พี. พรินติ้ง จำกัด, 2538
- มานพ ตันตระกูล ทัศนคติ งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย - ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 5, 2541
- รุ่งเรืองชัย ข่อยนุ และวิทวัส พันษา การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี, วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2546
- สมนึก กิจบำรุงลาม การประเมินกำลังของคอนกรีตโดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2535
- สุนัย เหมาะประสิทธิ์ สถิติประยุกต์เพื่อการวิจัย, กรุงเทพมหานคร, 2536
- อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และวิทวัส พันษา ความน่าเชื่อถือในการประเมินคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2, 2547



ชื่อ ว่าที่ร้อยเอกอิทธิพร ศิริสวัสดิ์ (Acting Capt. Ittiporn Sirisawat)
ตำแหน่งวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8
ตำแหน่งบริหาร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา (2546-50)
ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิชาการ (2544-45)
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อำเภอ องค์กรักษ์ จังหวัด นครนายก 26120
โทร. 0-2664-1000 ต่อ 2030 โทรสาร 0-3732-2607
E-mail: ittiporn@swu.ac.th
ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2540
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2535
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2532



การทดสอบขนาดคละของมวลรวมและการออกแบบส่วนผสม





ชื่องานวิจัย: ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต

รายงานผลการทดสอบอัตราส่วนคละของหิน-ทราย

GEL	ประเภทวัสดุดิบ ☐ หิน 3/4" ☒ ทราย LOT NO.	
	ผู้จัดส่ง บริษัท ปรีนคา จำกัด แหล่งที่มา พงษ์เทวิน (สระบุรี)	
	จุดเก็บตัวอย่าง เลขที่วิธีปฏิบัติ	

ผู้ทดสอบ อธิพร ศิริสวัสดิ์

วันที่ทดสอบ 03/02/49

SIEVE SIZE	SPEC ASTM C#33		AMOUNT RETAINED INDIVIDUAL			CUMULATIVE	
	MIN	MAX	INDV.	ACC.	% INDV.	% RET.	% PASS.
3/8"		100	-	-	-	-	100.00
4	95	100	15	15	3.06	3.06	96.94
8	80	100	45	60	9.18	12.24	87.76
3/4	50	85	92	152	18.78	31.02	68.98
3/8	25	60	135	287	27.55	58.57	41.43
50	10	30	147	434	30.00	88.57	11.43
100	2	10	50	484	10.20	98.78	1.22
PAN			6	490	1.22	F.M. =	2.92
TOTAL			490		100.00		

บันทึก การตรวจสอบสภาพเครื่องมือ

1. เครื่องชั่ง

2. ชุดตะแกรงร่อน

3. เครื่องเขย่า

☒ พร้อมใช้

☐ ไม่พร้อมใช้ รายการที่.....

แก้ไขโดย

% ความชื้น 0.46 %

% โคลน 4.44 %

หมายเหตุ

ผลการทดสอบ ☒ ผ่าน ☐ ไม่ผ่าน

ตรวจสอบโดย

วันที่/...../.....



ชื่องานวิจัย: ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต

รายงานผลการทดสอบอัตราส่วนคละของหิน-ทราย

GEL	ประเภทวัสดุ ☒ หิน 3/4" ☐ ทราย LOT NO.						
	ผู้จัดส่ง บริษัท ปรีดา จำกัด			แหล่งที่มา พงษ์เทวิน (สระบุรี)			
	จุดเก็บตัวอย่าง			เลขที่วิธีปฏิบัติ			

ผู้ทดสอบ อธิพร ศิริสวัสดิ์ วันที่ทดสอบ 03/02/49

SIEVE SIZE	SPEC ASTM C#33		AMOUNT RETAINED INDIVIDUAL			CUMULATIVE	
	MIN	MAX	INDV.	ACC.	% INDV.	% RET.	% PASS.
1		100	-	-	-	-	100.00
3/4	90	100	53	53	3.35	3.35	96.65
3/8	20	55	1,016	1,069	64.18	67.53	32.47
4	-	10	400	1,469	25.27	92.80	7.20
8	-	5	40	1,509	2.53	95.33	4.67
PAN			74	1,583	4.67	F.M. =	6.59
TOTAL			1,583		100		

บันทึก การตรวจสอบสภาพเครื่องมือ

1. เครื่องชั่ง

2. ชุดตะแกรงร่อน

3. เครื่องเขย่า

☒ พร้อมใช้

☐ ไม่พร้อมใช้ รายการที่.....

แก้ไขโดย

% ความชื้น 1.60 %

% โคลน - %

หมายเหตุ ผลการทดสอบ ☒ ผ่าน ☐ ไม่ผ่าน

..... ตรวจสอบโดย

..... วันที่/...../.....

ตารางที่ ก-3 การออกแบบอัตราส่วนผสม กำลังอัดประลัยที่ 300± 25 กก./ตร.ซม.



CONCRETE MIXED DESIGN

ชื่องานวิจัย: ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต
โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

Assumption

- 1. Portland Cement Type 3 (ASTM C150)
- 2. Max.Size ot Aggregates = 20 mm.
- 3. Required Min. Compressive Strength 300±25 Ksc. at 28 Days. (CUBE)
- 4. Slump 7 ± 2.5 cm.

ITEM	DESCRIPTION	VOLUME (Liters)	WEIGHT (KGS.)
1	W/C Ratio = 0.389		
2	Water Content	116.7	116.7
3	Cement Type III (SG. = 3.15)	95.2	300.0
4	Entrapped Air = 2 %	20.0	-
5	Total Paste	231.9	-
6	Ratio S/A = 0.38		
7	Fine Aggregate = 38.0 % (SG = 2.65)	291.9	773.4
8	Coarse Aggregate = 62.0 % (SG = 2.72)	476.2	1295.3
9	Total Aggregate	768.1	-
10	Total	1000.0	2485.4
11	Admixture (% By Weight of Cement) = 0.83 %	2.5	

- Cement Type 3 = 300 Kgs.
- Sand = 773 Kgs.
- Rock = 1295 Kgs.
- Water = 117 Kgs.
- Admixture = 2.5 Litres



CONCRETE MIXED DESIGN

ชื่องานวิจัย: ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต
โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี

Assumption

- 1. Portland Cement Type 3 (ASTM C 150)
- 2. Max.Size of Aggregates = 20 mm.
- 3. Required Min. Compressive Strength 400±25 Ksc. at 28 Days. (CUBE)
- 4. Slump 7 ± 2.5 cm.

ITEM	DESCRIPTION	VOLUME (Liters)	WEIGHT (KGS.)
1	W/C Ratio = 0.389		
2	Water Content	136.2	136.2
3	Cement Type III (SG. = 3.15)	111.1	350.0
4	Entrapped Air = 2 %	20.0	-
5	Total Paste	267.3	-
6	Ratio S/A = 0.38		
7	Fine Aggregate = 38.0 % (SG = 2.65)	278.4	737.9
8	Coarse Aggregate = 62.0 % (SG = 2.72)	454.3	1235.7
9	Total Aggregate	732.7	-
10	Total	1000.0	2459.7
11	Admixture (% By Weight of Cement) = 0.86 %	3.0	

- Cement Type 3 = 350 Kgs.
- Sand = 738 Kgs.
- Rock = 1236 Kgs.
- Water = 136 Kgs.
- Admixture = 3.0 Litres

ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี



การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุตสาหกรรมไฟฟ้าสถิต (ทดสอบลูก CUBE)													
การทดสอบแบบมาตรฐาน		cube No.1				cube No.2							
หิน	3/4 นิ้ว 320.7 ksc.	No. จุด Test	Path length (mm.)	Pundit Reading (Micro sec)			Reading Average		Velocity (com.) km/sec				
				No.1	No.2	No.3							
f _c	300±25 ksc.	1	150	32.8	33.0	32.8	32.87	4.564	32.9	33.0	33.0	32.97	4.550
		2	150	32.2	32.5	32.6	32.43	4.625	31.5	32.0	31.9	31.80	4.717
อายุ	28 วัน	3	150	32.2	32.2	32.2	32.20	4.658	31.0	31.0	30.9	30.97	4.844
เก็บข้อ	24/12/2547	4	150	32.4	32.6	32.5	32.50	4.615	33.2	32.9	33.0	33.03	4.541
TEST	20/1/2548	5	150	31.2	31.5	31.2	31.30	4.792	32.5	32.2	32.5	32.40	4.630
CUBE	50x150x150 mm	6	150	33.3	33.4	33.2	33.30	4.505	32.5	32.7	32.7	32.63	4.597
N.O.	streath (ksc.)	7	150	33.1	32.9	33.8	33.27	4.509	32.2	32.2	32.2	32.20	4.658
1	318.04 ksc.	8	150	31.3	31.2	31.3	31.27	4.797	33.0	33.1	32.8	32.97	4.550
2	323.37 ksc.	9	150	31.0	30.9	31.0	30.97	4.844	32.9	32.9	33.1	32.97	4.550
3	ksc.	10	150	32.9	32.7	32.8	32.80	4.573	33.0	32.9	33.1	33.00	4.545
4	ksc.	11	150	33.5	33.3	33.5	33.43	4.487	31.2	31.2	31.4	31.27	4.797
5	ksc.	12	150	31.2	31.2	31.2	31.20	4.808	31.2	31.1	31.4	31.23	4.803
6	ksc.												
Mean.	320.7 ksc.			Mean.	32.29	4.65			32.29			32.29	4.65
S.D.	3.8			S.D.	0.90	0.13			0.78			0.78	0.11
V	14.2			V	0.81	0.02			0.61			0.61	0.01
Max.	323.4 ksc.			Max.	33.43	4.84			33.03			33.03	4.84
Min.	318.0 ksc.			Min.	30.97	4.49			30.97			30.97	4.54

รูปด้านหน้าจุด TEST บนพื้นคอนกรีตสอบ

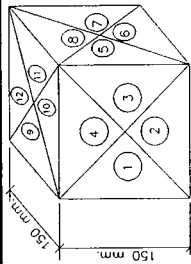
คุณหญิง 27 องศาเซลเซียส

ค่าการยุบตัว: 7.5 ซม.

TYPE รังนก		D		E		F		TYPE รังนก		3/4		3/4	
		in		in		in				in		in	
		fe'		fe'		fe'				300±25 ksc		300±25 ksc	
		mm		mm		mm				mm		mm	
		320.70		320.70		320.70				320.70		320.70	
		ksc		ksc		ksc				ksc		ksc	
		mm		mm		mm				mm		mm	
		28		28		28				28		28	
		24/12/547		24/12/547		24/12/547				24/12/547		24/12/547	
		20/12/548		20/12/548		20/12/548				20/12/548		20/12/548	
		7.5		7.5		7.5				7.5		7.5	
		27		27		27				27		27	
		L=150mm		L=150mm		L=150mm				L=150mm		L=150mm	
		Mean		Mean		Mean				Mean		Mean	
		SD		SD		SD				SD		SD	
		V _(velocity)		V _(velocity)		V _(velocity)				V _(velocity)		V _(velocity)	
		V _{avg}		V _{avg}		V _{avg}				V _{avg}		V _{avg}	
		Mean _{avg}		Mean _{avg}		Mean _{avg}				Mean _{avg}		Mean _{avg}	
		1		1		1				1		1	
		2		2		2				2		2	
		3		3		3				3		3	
		Mean		Mean		Mean				Mean		Mean	
		SD		SD		SD				SD		SD	
		V _(velocity)		V _(velocity)		V _(velocity)				V _(velocity)		V _(velocity)	
		V _{avg}		V _{avg}		V _{avg}				V _{avg}		V _{avg}	
		Mean _{avg}		Mean _{avg}		Mean _{avg}				Mean _{avg}		Mean _{avg}	
		1A		1A		1A				1A		1A	
		2A		2A		2A				2A		2A	
		3A		3A		3A				3A		3A	
		1B		1B		1B				1B		1B	
		2B		2B		2B				2B		2B	
		3B		3B		3B				3B		3B	
		1C		1C		1C				1C		1C	
		2C		2C		2C				2C		2C	
		3C		3C		3C				3C		3C	
		1D		1D		1D				1D		1D	
		2D		2D		2D				2D		2D	
		3D		3D		3D				3D		3D	
		1E		1E		1E				1E		1E	
		2E		2E		2E				2E		2E	
		3E		3E		3E				3E		3E	
		1F		1F		1F				1F		1F	
		2F		2F		2F				2F		2F	
		3F		3F		3F				3F		3F	
		Mean		Mean		Mean				Mean		Mean	
		SD		SD		SD				SD		SD	
		V _(velocity)		V _(velocity)		V _(velocity)				V _(velocity)		V _(velocity)	
		V _{avg}		V _{avg}		V _{avg}				V _{avg}		V _{avg}	
		Mean _{avg}		Mean _{avg}		Mean _{avg}				Mean _{avg}		Mean _{avg}	
		1G		1G		1G				1G		1G	
		1G'		1G'		1G'				1G'		1G'	
		2G		2G		2G				2G		2G	
		2G'		2G'		2G'				2G'		2G'	
		3G		3G		3G				3G		3G	
		3G'		3G'		3G'				3G'		3G'	
		4G		4G		4G				4G		4G	
		4G'		4G'		4G'				4G'		4G'	
		5G		5G		5G				5G		5G	
		5G'		5G'		5G'				5G'		5G'	
		6G		6G		6G				6G		6G	
		6G'		6G'		6G'				6G'		6G'	

TYPE รังนก		หิน		3/4		นิ้ว		TYPE รังนก		หิน		3/4		นิ้ว	
		ic'		(300±25 ksc)		320.70				ic'		(300±25 ksc)		320.70	
ขนาดรังนกทดสอบ	ขนาดรังนกทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.75	28	วัน	ขนาดรังนกทดสอบ	ขนาดรังนกทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.75	28	วัน	ขนาดรังนกทดสอบ	ขนาดรังนกทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.75	28	วัน	
ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เกือบตัวอย่าง	24/12/2547		ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เกือบตัวอย่าง	24/12/2547		ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เกือบตัวอย่าง	24/12/2547		
ระยะห่างเหล็กเสริม	ระยะห่างเหล็กเสริม	5 ซม. ทดสอบ	20/1/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	ระยะห่างเหล็กเสริม	5 ซม. ทดสอบ	20/1/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	ระยะห่างเหล็กเสริม	5 ซม. ทดสอบ	20/1/2548		
ระยะหุ้มเหล็กเสริม	ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการหุ้มตัว	7.5	ซม.	ระยะหุ้มเหล็กเสริม	ระยะหุ้มเหล็กเสริม	5 ซม. ค่าการหุ้มตัว	7.5	ซม.	ระยะหุ้มเหล็กเสริม	ระยะหุ้มเหล็กเสริม	5 ซม. ค่าการหุ้มตัว	7.5	ซม.	
เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชิ้น/จุดหนุ่ย	27	องค์ประกอบเสริม	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชิ้น/จุดหนุ่ย	27	องค์ประกอบเสริม	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชิ้น/จุดหนุ่ย	27	องค์ประกอบเสริม	
ตำแหน่ง ทดสอบ	รูปประกอบ ตำแหน่งทดสอบ	ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.						ทดสอบทางอ้อม(indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.							
		ผลทดสอบ(microsec)		Mean		SD	V _(velocity)	Mean		SD	V _(velocity)	Mean		SD	V _(velocity)
	1A	1 2 3	34.4 34.0 34.2	34.2	0.2	4.39		32.8 31.7 32.7	32.4	0.6	4.63				
	2A	1 2 3	34.3 34.2 34.2	34.2	0.1	4.38	4.40 34.07	33.1 33.2 33.0	33.1	0.1	4.53	4.54	33.03		
	3A	1 2 3	33.8 33.8 33.7	33.8	0.1	4.44		33.6 33.5 33.7	33.6	0.1	4.46				
	1B	1 2 3	33.5 33.5 33.6	33.5	0.1	4.47		33.0 33.2 33.1	33.1	0.1	4.53				
	2B	1 2 3	33.7 33.6 33.5	33.6	0.1	4.46	4.48 33.49	33.2 33.0 33.1	33.1	0.1	4.53	4.53	33.12		
	3B	1 2 3	33.4 33.3 33.3	33.3	0.1	4.50		33.1 33.2 33.2	33.2	0.1	4.52				
	1C	1 2 3	34.7 34.8 34.7	34.7	0.1	4.32		33.2 33.4 33.3	33.3	0.1	4.50				
	2C	1 2 3	32.7 32.7 32.8	32.7	0.1	4.58	4.46 33.68	32.5 32.4 32.4	32.7	4.0	4.32	4.48	33.49		
	3C	1 2 3	33.6 33.5 33.6	33.6	0.1	4.47		32.8 31.8 32.7	32.4	0.6	4.62				
	1D	1 2 3	33.3 33.2 33.1	33.2	0.1	4.52		32.9 32.6 32.8	32.8	0.2	4.58				
	2D	1 2 3	32.6 32.5 32.4	32.5	0.1	4.62	4.53 33.14	32.8 32.6 32.7	32.7	0.1	4.59	4.59	32.67		
	3D	1 2 3	33.8 33.9 33.5	33.7	0.2	4.45		32.6 32.5 32.5	32.5	0.1	4.61				
	1E	1 2 3	34.3 34.4 34.6	34.4	0.2	4.36		32.5 32.7 32.4	32.5	0.2	4.61				
	2E	1 2 3	33.2 33.3 33.3	33.3	0.1	4.51	4.47 33.58	33.3 33.0 33.1	33.1	0.2	4.53	4.53	33.09		
	3E	1 2 3	33.1 33.0 33.0	33.0	0.1	4.54		33.7 33.6 33.5	33.6	0.1	4.46				
	1F	1 2 3	32.9 32.8 33.6	33.1	0.4	4.53		32.6 32.5 32.6	32.6	0.1	4.61				
	2F	1 2 3	32.8 32.6 32.6	32.7	0.1	4.59	4.57 32.79	32.1 32.0 32.1	32.1	0.1	4.68	4.59	32.67		
	3F	1 2 3	33.2 33.3 32.3	32.6	0.5	4.60		33.4 33.4 33.3	33.4	0.1	4.50				
ตำแหน่ง ทดสอบ	รูปประกอบ ตำแหน่งทดสอบ	ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.						ทดสอบทางอ้อม(indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.							
		ผลทดสอบ(microsec)		Mean		SD	V _(velocity)	Mean		SD	V _(velocity)	Mean		SD	V _(velocity)
	1G	1 2 3	31.5 31.7 30.9	31.4	0.4	4.78		30.5 30.8 30.1	30.5	0.4	4.92				
	1G'	1 2 3	31.3 31.6 33.4	32.1	1.1	4.67	4.73 31.73	30.4 30.6 30.5	30.5	0.1	4.92	4.92	30.48		
	2G	1 2 3	29.2 29.9 30.3	29.8	0.6	5.03		30.5 30.1 31.0	30.5	0.5	4.91				
	2G'	1 2 3	30.6 29.9 30.3	30.3	0.4	4.96	4.99 30.03	30.7 30.8 30.3	30.6	0.3	4.90	4.91	30.57		
	3G	1 2 3	31.2 31.9 32.8	32.0	0.8	4.69		30.6 30.5 30.5	30.5	0.1	4.91				
	3G'	1 2 3	31.4 31.7 31.0	31.4	0.4	4.78	4.74 31.67	30.3 30.8 30.4	30.5	0.3	4.92	4.92	30.52		
	4G	1 2 3	31.5 31.8 31.3	31.5	0.3	4.76		30.4 30.3 30.6	30.4	0.2	4.93				
	4G'	1 2 3	30.9 30.6 31.5	31.0	0.5	4.84	4.80 31.27	30.6 30.1 30.4	30.4	0.3	4.94	4.93	30.40		
	5G	1 2 3	29.5 29.1 29.3	29.3	0.2	5.12		30.3 30.2 30.4	30.3	0.1	4.95				
	5G'	1 2 3	30.2 29.5 30.7	30.1	0.6	4.98	5.05 29.72	30.3 30.1 30.4	30.3	0.2	4.96	4.95	30.28		
	6G	1 2 3	31.5 31.7 31.4	31.5	0.2	4.76		30.6 30.5 30.3	30.5	0.2	4.92				
	6G'	1 2 3	31.6 31.5 31.8	31.6	0.2	4.74	4.75 31.58	30.5 30.3 30.1	30.3	0.2	4.95	4.94	30.38		

การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอัลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (ทดสอบลูก CUBE)													
การทดสอบ													
แบบมาตรฐาน													
หิน	3/4 นิ้ว												
fc	391.0 ksc.	No. จุด Test	cube No.1			cube No.2			cube No.3			Reading Average	Velocity (corr.) km/sec
			Pundit Reading (Micro sec)		Velocity (corr.) km/sec	Pundit Reading (Micro sec)		Velocity (corr.) km/sec	Pundit Reading (Micro sec)		Velocity (corr.) km/sec		
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3		
		1	31.1	31.1	31.1	31.7	31.7	31.8	31.3	31.3	31.3	31.30	4.792
		2	30.8	30.6	30.6	32.2	32.2	31.9	31.6	31.6	31.6	31.60	4.747
อายุ	28 วัน	3	31.1	31.2	31.1	32.0	32.0	32.1	32.3	31.9	31.8	32.00	4.688
เก็บ ดย	28/12/2547	4	31.3	31.3	31.3	31.9	31.8	31.8	31.6	31.6	31.6	31.60	4.747
TEST	24/1/2548	5	31.3	31.2	31.3	30.4	30.4	30.4	31.5	31.7	31.6	31.60	4.747
CUBE 150x150x150 mm		6	31.3	31.5	31.5	31.2	31.1	31.0	31.0	30.9	30.7	30.87	4.860
N0.	streth (ksc.)	7	31.4	31.3	31.3	32.0	32.1	31.8	30.7	30.8	30.6	30.70	4.886
1	385.00 ksc.	8	31.6	31.6	31.8	31.3	31.3	31.1	31.6	31.6	31.6	31.60	4.747
2	381.00 ksc.	9	31.6	31.6	31.5	30.8	30.8	30.8	30.6	30.8	30.6	30.67	4.891
3	407.00 ksc.	10	31.4	31.2	30.9	32.1	32.0	32.1	31.0	30.9	30.9	30.93	4.849
4	ksc.	11	31.2	31.2	31.1	32.0	32.0	31.8	31.2	31.0	30.8	31.00	4.839
5	ksc.	12	31.2	31.0	31.1	30.9	30.8	30.8	30.8	30.9	30.6	30.77	4.875
6	ksc.												
Mean.	391.0 ksc.												31.22 4.81
S.D.	14.0												0.45 0.07
V	196.0												0.20 0.00
Max.	407.0 ksc.												32.00 4.89
Min.	381.0 ksc.												30.67 4.69



รูปด้านหนึ่งจุด TEST บนเพดานการทดสอบ

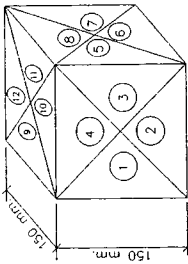
อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ค่าการยุบตัว: 7.5 มม.

[illegible]

TYPE ชิ้นงาน		A'	หิน	3/4	นิ้ว	TYPE ชิ้นงาน		C'	หิน	3/4	นิ้ว						
			(ic)	(400-25 ksc)	391.00	ksc			(ic)	(400-25 ksc)	391.00	ksc					
ขนาดชิ้นงานทดสอบ		40x40x15 ซม.	0.10	28	วัน	ขนาดชิ้นงานทดสอบ		40x40x15 ซม.	0.10	28	วัน						
ขนาดเหล็กเสริม		RB 9 มม. เส้นดียว		28/12/2547		ขนาดเหล็กเสริม		RB 9 มม. เส้นดียว		28/12/2547							
ระยะห่างเหล็กเสริม		5 ซม. ทดสอบ		24/1/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม		5 ซม. ทดสอบ		24/1/2548							
ระยะหุ้มเหล็กเสริม		2.5 ซม. ค้ำการขุดตัว		7.5	ซม.	ระยะหุ้มเหล็กเสริม		5 ซม. ค้ำการขุดตัว		7.5	ซม.						
เสริมเหล็กด่าง		1 ชิ้น ดูแผนภูมิ		27	องศาจากเข็มนาฬิกา	เสริมเหล็กด่าง		1 ชิ้น ดูแผนภูมิ		27	องศาจากเข็มนาฬิกา						
รูปประกอบ		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.				รูปประกอบ		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.									
ด้านหน้า	ทดสอบ	ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	ด้านหน้า	ทดสอบ	ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _{avg}	Mean _{avg}		
		1	2	3					1	2	3						
	1A	33.8	33.7	33.6	33.7	0.1	4.45	1A	34.6	34.5	34.6	34.6	0.1	4.34			
	2A	33.9	33.8	33.7	33.8	0.1	4.44	2A	34.8	34.8	34.7	34.8	0.1	4.31	34.64		
	3A	33.9	33.3	33.6	33.6	0.3	4.46	3A	34.6	34.5	34.7	34.6	0.1	4.34			
	1B	32.9	32.7	32.5	32.7	0.2	4.59	1B	34.2	34.3	34.2	34.2	0.1	4.38			
	2B	34.8	34.6	34.7	34.7	0.1	4.32	2B	34.4	34.4	34.1	34.3	0.2	4.37	34.27		
	3B	34.7	34.6	34.7	34.7	0.1	4.33	3B	34.5	34.0	34.3	34.3	0.3	4.38			
	1C	33.1	33.2	32.9	33.1	0.2	4.54	1C	34.0	34.1	34.1	34.1	0.1	4.40			
	2C	33.3	33.6	33.5	33.5	0.2	4.48	2C	33.7	33.7	33.8	33.7	0.1	4.45	4.41	34.02	
	3C	33.6	32.5	32.5	32.9	0.6	4.56	3C	34.3	34.0	34.5	34.3	0.3	4.38			
	1D	33.3	33.2	33.0	33.2	0.2	4.52	1D	34.3	34.3	34.1	34.2	0.1	4.38			
	2D	33.3	33.1	33.3	33.2	0.1	4.51	2D	33.6	33.8	33.7	33.7	0.1	4.45	4.39	34.13	
	3D	33.5	33.6	33.7	33.6	0.1	4.46	3D	34.6	34.4	34.4	34.5	0.1	4.35			
	1E	33.6	33.5	33.6	33.6	0.1	4.47	1E	34.6	34.5	34.6	34.6	0.1	4.34			
	2E	33.4	33.7	33.4	33.5	0.2	4.48	2E	35.1	35.2	35.1	35.1	0.1	4.27	4.31	34.80	
	3E	33.0	33.1	33.2	33.1	0.1	4.53	3E	34.8	34.8	34.5	34.7	0.2	4.32			
	1F	33.8	33.7	33.8	33.8	0.1	4.44	1F	34.8	34.7	33.5	34.3	0.7	4.37			
	2F	33.6	33.8	33.9	33.8	0.2	4.44	2F	33.7	33.5	33.8	33.7	0.2	4.46	4.42	33.93	
	3F	34.4	33.4	33.5	33.8	0.6	4.44	3F	33.8	33.9	33.7	33.8	0.1	4.44			
รูปประกอบ		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.				รูปประกอบ		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.									
ด้านหน้า	ทดสอบ	ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _{avg}	Mean _{avg}	ด้านหน้า	ทดสอบ	ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _{avg}	Mean _{avg}
		1	2	3							1	2	3				
	1G	30.0	30.4	29.5	30.0	0.5	5.01		1G	31.9	33.3	30.9	32.0	1.2	4.68		
	1G'	29.2	28.6	28.6	28.8	0.3	5.21	5.11	1G'	31.4	30.5	31.7	31.2	0.6	4.81	4.75	31.62
	2G	29.4	28.6	29.4	29.1	0.5	5.15		2G	29.6	29.5	29.0	29.4	0.3	5.11		
	2G'	29.5	28.2	28.7	28.8	0.7	5.21	5.18	2G'	28.9	28.9	28.9	28.9	0.0	5.19	5.15	29.13
	3G	31.0	31.2	30.2	30.8	0.5	4.87		3G	30.7	30.2	29.5	30.1	0.6	4.98		
	3G'	30.2	30.2	29.9	30.1	0.2	4.98	4.93	3G'	30.5	29.6	29.8	30.0	0.5	5.01	4.99	30.05
	4G	29.0	29.6	29.2	29.3	0.3	5.13		4G	29.0	30.0	29.4	29.5	0.5	5.09		
	4G'	28.9	29.0	29.2	29.0	0.2	5.17	5.15	4G'	29.5	29.2	29.2	29.3	0.2	5.12	5.10	29.38
	5G	29.6	29.6	28.9	29.4	0.4	5.11		5G	28.2	27.6	28.0	27.9	0.3	5.37		
	5G'	29.7	29.0	28.2	29.0	0.8	5.18	5.14	5G'	28.6	27.9	28.2	28.2	0.4	5.31	5.34	28.08
	6G	31.6	29.9	30.5	30.7	0.9	4.89		6G	29.9	30.0	29.9	29.9	0.1	5.01		
	6G'	31.5	30.6	30.8	31.0	0.5	4.84	4.87	6G'	29.8	30.0	29.3	29.7	0.4	5.05	5.03	29.82

การทดสอบ		การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (ทดสอบลูก CUBE)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		แบบมาตรฐาน		cube No.1				cube No.2				cube No.3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
				No. จุด Test	Path length (mm.)	Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average	Velocity (corr.)	Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average	Velocity (corr.)	Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average	Velocity (corr.)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
หิน	3/4 นิ้ว	fc			No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No.1	No.2	No.3		No



รูปด้านหน้าจุด TEST บนหน้าก่อนการทดสอบ

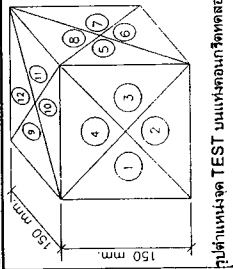
อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

ค่าการยุบตัว: 5.5 ซม.

TYPE รันงาน		A'		หิน		3/4		หิน		C'		3/4		หิน		3/4								
				ic'		(300±25 ksc)		317.24		ksc				ic'		(300±25 ksc)		317.24		ksc				
ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5x	28		ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5x	28		ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5x	28		ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5x	28		ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5x	28		ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5x			
ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เป็นตัวอ้างอิง	19/2548		ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เป็นตัวอ้างอิง	19/2548		ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เป็นตัวอ้างอิง	19/2548		ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เป็นตัวอ้างอิง	19/2548		ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เป็นตัวอ้างอิง	19/2548		ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เป็นตัวอ้างอิง			
ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ	2/5/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ	2/5/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ	2/5/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ	2/5/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ	2/5/2548		ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ			
ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการดูดตัว	5.5		ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการดูดตัว	5.5		ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการดูดตัว	5.5		ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการดูดตัว	5.5		ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการดูดตัว	5.5		ระยะหุ้มเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค่าการดูดตัว			
เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชั้น ดุมหนู	28	องศาเซตขึ้น	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชั้น ดุมหนู	28	องศาเซตขึ้น	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชั้น ดุมหนู	28	องศาเซตขึ้น	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชั้น ดุมหนู	28	องศาเซตขึ้น	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชั้น ดุมหนู	28	องศาเซตขึ้น	เสริมเหล็ก(ถ้ามี)	1 ชั้น ดุมหนู			
	รูปประกอบ ด้านหนึ่งทดสอบ	ด้านหนึ่ง ทดสอบ	ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.										ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.											
			ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _(velocity)	V _{avg}	Mean _{avg}	ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _(velocity)	V _{avg}	Mean _{avg}						
			1	2	3						1	2	3											
1A			32.9	32.8	32.7	32.8	0.1	4.57				1A			33.6	33.4	33.5	33.5	0.1	4.48				
2A			33.3	33.2	33.1	33.2	0.1	4.52	4.53	33.14				2A			32.8	32.3	32.7	32.6	0.3	4.60	4.56	32.87
3A			33.5	33.4	33.4	33.4	0.1	4.49				3A			32.2	32.7	32.6	32.5	0.3	4.62				
1B			32.8	32.7	32.6	32.7	0.1	4.59				1B			33.7	33.4	33.3	33.5	0.2	4.48				
2B			33.0	33.2	33.1	33.1	0.1	4.53	4.58	33.74				2B			32.7	32.8	33.9	33.1	0.7	4.53	4.51	33.26
3B			32.6	32.4	32.3	32.4	0.2	4.62				3B			32.9	32.9	33.7	33.2	0.5	4.52				
1C			33.0	32.9	32.8	32.9	0.1	4.56				1C			32.7	32.6	32.4	32.6	0.2	4.61				
2C			33.6	33.1	33.0	33.2	0.3	4.51	4.54	33.01				2C			33.2	33.3	33.4	33.3	0.1	4.50	4.51	33.23
3C			32.9	33.0	32.8	32.9	0.1	4.56				3C			33.9	33.9	33.7	33.8	0.1	4.43				
1D			33.0	32.8	32.9	32.9	0.1	4.56				1D			32.9	32.8	33.3	33.0	0.3	4.55				
2D			32.9	32.8	32.5	32.7	0.2	4.58	4.57	32.80				2D			32.9	32.6	32.4	32.6	0.3	4.60	4.56	32.88
3D			32.9	32.7	32.7	32.8	0.1	4.58				3D			33.0	33.1	32.9	33.0	0.1	4.55				
1E			32.4	32.1	32.0	32.2	0.2	4.66				1E			32.6	32.4	32.4	32.5	0.1	4.62				
2E			32.4	32.1	32.2	32.2	0.2	4.65	4.65	32.28				2E			33.5	33.7	33.6	33.6	0.1	4.46	4.53	33.11
3E			32.4	32.3	32.6	32.4	0.2	4.62				3E			33.6	33.1	33.1	33.3	0.3	4.51				
1F			33.0	33.1	32.3	32.8	0.4	4.57				1F			33.6	33.3	33.7	33.5	0.2	4.47				
2F			33.5	33.6	33.5	33.5	0.1	4.47	4.57	32.87				2F			32.5	32.4	32.5	32.5	0.1	4.62	4.54	33.01
3F			32.2	32.3	32.3	32.3	0.1	4.65				3F			33.0	33.1	33.0	33.0	0.1	4.54				
	รูปประกอบ ด้านหนึ่งทดสอบ	ด้านหนึ่ง ทดสอบ	ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.										ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.											
			ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _(velocity)	V _{avg}	Mean _{avg}	ผลทดสอบ(microsec)			Mean	SD	V _(velocity)	V _{avg}	Mean _{avg}						
			1	2	3						1	2	3											
1G			28.9	27.0	32.9	29.6	3.0	5.07				1G			29.7	27.7	29.4	28.9	1.1	5.18				
1G'			29.4	27.2	28.6	28.4	1.1	5.28	5.17	29.00				1G'			29.5	27.5	29.5	28.8	1.2	5.20	5.19	28.88
2G			28.1	29.8	29.7	29.2	1.0	5.14				2G			30.3	30.5	29.0	29.9	0.8	5.01				
2G'			28.7	27.5	28.9	28.4	0.8	5.29	5.21	28.78				2G'			30.6	29.8	29.5	30.0	0.6	5.01	5.01	29.95
3G			27.9	28.4	30.3	28.9	1.3	5.20				3G			30.5	29.5	28.0	29.3	1.3	5.11				
3G'			28.8	28.5	29.5	28.9	0.5	5.18	5.19	28.90				3G'			30.8	29.5	29.3	29.9	0.8	5.02	5.07	29.60
4G			27.5	26.8	28.1	27.5	0.7	5.46				4G			30.4	30.8	28.8	30.0	1.1	5.00				
4G'			28.2	26.9	27.6	27.6	0.7	5.44	5.45	27.52				4G'			28.9	31.7	27.2	29.3	2.3	5.13	5.06	29.63
5G			28.2	28.8	28.2	28.4	0.3	5.28				5G			29.3	27.9	30.6	29.3	1.4	5.13				
5G'			28.4	29.6	28.2	28.7	0.8	5.22	5.25	28.57				5G'			29.0	27.6	30.8	29.1	1.6	5.15	5.14	29.20
6G			28.4	28.5	27.6	28.2	0.5	5.33				6G			29.4	29.5	28.6	29.2	0.5	5.14				
6G'			29.4	28.4	27.5	28.4	1.0	5.28	5.30	28.30				6G'			29.0	29.0	28.4	28.8	0.3	5.21	5.18	28.98

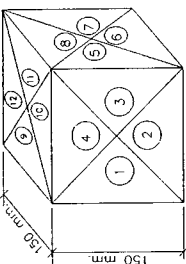
การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุตสาหกรรมโซนิกพัลส์ส่วโลหิตี (ทดสอบลูก CUBE)																																	
การทดสอบ				cube No.1						cube No.2						cube No.3																	
แบบมาตรฐาน		หีน	3/4 นิ้ว	f _c	410.9 ksc.	400±25	28 วัน	1/11/2548	2/7/2548	CUBE 50x150x150 mm	N0.	streth (ksc.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mean.	S.D.	V	Max.	Min.				
				Path length (mm.)		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Velocity (corr.)		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Velocity (corr.)		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Velocity (corr.)		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Velocity (corr.)					
				No. จุด Test		No.1		No.2		No.3		No.1		No.2		No.3		No.1		No.2		No.3		No.1		No.2		No.3					
				1		30.9		30.8		30.6		30.77		4.875		31.4		31.6		31.5		31.50		4.762		30.1		30.5		30.30		4.950	
				2		30.6		30.9		30.5		30.67		4.891		31.2		31.0		31.7		31.30		4.792		31.0		31.2		30.9		4.834	
				3		30.8		31.0		31.1		30.97		4.844		31.1		31.3		31.4		31.27		4.797		30.4		30.1		30.6		4.940	
				4		31.6		31.3		32.0		31.63		4.742		31.5		31.6		31.3		31.47		4.767		30.7		30.3		30.43		4.929	
				5		33.0		32.5		32.7		32.73		4.582		31.9		31.8		31.3		31.67		4.737		31.2		31.2		30.9		4.823	
				6		31.3		31.6		31.0		31.30		4.792		31.6		31.5		31.5		31.53		4.757		31.1		31.4		31.3		4.797	
				7		31.1		31.8		31.3		31.40		4.777		32.2		32.1		32.2		32.17		4.663		31.8		31.4		31.7		4.742	
				8		31.1		31.5		31.4		31.33		4.787		31.7		31.5		31.6		31.60		4.747		31.6		31.5		31.2		4.772	
				9		31.2		31.8		31.3		31.43		4.772		31.9		31.9		31.7		31.83		4.712		30.5		30.6		30.6		4.907	
				10		31.5		31.7		31.7		31.63		4.742		31.4		31.4		31.6		31.47		4.767		30.8		30.8		30.6		4.881	
				11		30.7		30.8		30.5		30.67		4.891		31.4		31.6		31.8		31.60		4.747		30.8		30.9		30.7		4.870	
				12		30.9		30.6		30.1		30.53		4.913		31.8		31.8		31.4		31.67		4.737		30.6		30.5		30.3		4.923	
				Mean.		31.26		4.80		31.26		4.80		31.26		4.80		31.26		4.80		31.26		4.80		31.26		4.80		31.26		4.80	
				S.D.		0.61		0.09		0.61		0.09		0.61		0.09		0.61		0.09		0.61		0.09		0.61		0.09		0.61		0.09	
				V		0.37		0.01		0.37		0.01		0.37		0.01		0.37		0.01		0.37		0.01		0.37		0.01		0.37		0.01	
				Max.		32.73		4.91		32.73		4.91		32.73		4.91		32.73		4.91		32.73		4.91		32.73		4.91		32.73		4.91	
				Min.		30.53		4.58		30.53		4.58		30.53		4.58		30.53		4.58		30.53		4.58		30.53		4.58		30.53		4.58	
				ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.	
				410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9		410.9	
				10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4		10.4	
				107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5		107.5	
				422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5		422.5	
				402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5		402.5	
				ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.		ksc.	
				30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84		30.84	
				0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44		0.44	
				0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20		0.20	
				31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63		31.63	
				30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30		30.30	

รูปด้านหน้าของ TEST แบบทดสอบลูกเต๋าสอง



อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ค่าการยวบยัว: 5.5 ซม.

การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุลตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (ทดสอบลูก CUBE)																														
การทดสอบ		cube No.1			cube No.2			cube No.3			Path length (mm.)	No. จุด Test	cube No.1					cube No.2					cube No.3							
แบบมาตรฐาน		Pundit Reading (Micro sec)			Reading Average			Velocity (km/sec)					Pundit Reading (Micro sec)			Reading Average			Velocity (km/sec)			Pundit Reading (Micro sec)			Reading Average			Velocity (km/sec)		
หิน	3/4 นิ้ว	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
fc	322.7 ksc.																													
	300±25 ksc.	32.4	32.5	32.6	32.50	4.615	32.57	32.0	32.7	33.0	32.57	4.606	32.8	32.9	32.80	4.573	32.0	32.7	33.0	32.57	4.606	32.7	32.8	32.9	32.80	4.573	32.3	32.1	32.17	4.663
อายุ	28 วัน	32.0	32.1	32.2	32.10	4.673	32.90	32.8	33.0	32.9	32.90	4.559	32.3	32.1	32.17	4.663	32.8	33.0	32.9	32.90	4.559	32.3	32.1	32.1	32.17	4.663	32.3	32.1	32.17	4.663
เก็บ ดย	14/1/2548	32.0	32.1	32.2	32.10	4.673	32.90	32.2	32.4	32.3	32.30	4.644	33.0	33.0	33.03	4.541	32.2	32.4	32.3	32.30	4.644	33.0	33.0	33.1	33.03	4.541	33.0	33.0	33.03	4.541
TEST	2/10/2548	31.9	31.8	31.8	31.83	4.712	32.33	32.4	32.5	32.1	32.33	4.639	32.3	32.5	32.4	4.630	32.4	32.5	32.1	32.33	4.639	32.3	32.5	32.4	32.40	4.630	32.3	32.5	32.40	4.630
CUBE	50x150x150 mm	31.4	31.5	31.5	31.47	4.767	31.70	31.7	31.8	31.6	31.70	4.732	31.8	31.9	31.83	4.712	31.7	31.8	31.6	31.70	4.732	31.8	32.0	31.9	31.90	4.702	31.8	32.0	31.90	4.702
NO.	streth (ksc.)	32.2	32.3	32.1	32.20	4.658	32.43	32.2	32.4	32.7	32.43	4.625	32.5	33.0	32.73	4.582	32.2	32.4	32.7	32.43	4.625	32.5	33.0	32.7	32.73	4.582	32.5	33.0	32.73	4.582
1	324.50 ksc.	31.9	31.4	31.5	31.60	4.747	32.70	32.8	32.7	32.6	32.70	4.587	32.7	32.8	32.73	4.582	32.8	32.7	32.6	32.70	4.587	32.7	32.8	32.7	32.73	4.582	32.7	32.8	32.73	4.582
2	321.00 ksc.	32.1	32.0	31.5	31.87	4.707	31.77	31.8	31.7	31.8	31.77	4.722	31.8	31.9	31.83	4.712	31.8	31.7	31.8	31.77	4.722	31.8	31.9	31.8	31.83	4.712	31.8	31.9	31.83	4.712
3	322.58 ksc.	31.9	31.8	32.0	31.90	4.702	32.80	32.8	32.9	32.7	32.80	4.573	33.1	33.2	33.17	4.523	32.8	32.9	32.7	32.80	4.573	33.1	33.2	33.2	33.17	4.523	33.1	33.2	33.17	4.523
4	ksc.	31.9	31.6	31.5	31.67	4.737	32.03	32.0	32.1	32.0	32.03	4.683	32.4	32.6	32.50	4.615	32.0	32.1	32.0	32.03	4.683	32.4	32.6	32.5	32.50	4.615	32.4	32.6	32.50	4.615
5	ksc.	32.1	32.2	32.0	32.10	4.673	30.80	30.8	30.9	30.7	30.80	4.870	32.0	31.9	31.90	4.702	30.8	30.9	30.7	30.80	4.870	32.0	31.9	31.8	31.90	4.702	32.0	31.9	31.90	4.702
6	ksc.	31.8	31.9	31.9	31.87	4.707	32.60	32.6	32.5	32.7	32.60	4.601	33.3	33.4	33.33	4.500	32.6	32.5	32.7	32.60	4.601	33.3	33.4	33.3	33.33	4.500	33.3	33.4	33.33	4.500
Mean.	322.7 ksc.						Mean.	31.93	4.70	32.24	4.65	32.54	4.61																	
S.D.	1.8						S.D.	0.29	0.04	0.59	0.09	0.51	0.07																	
V	3.1						V	0.08	0.00	0.35	0.01	0.26	0.01																	
Max.	324.5 ksc.						Max.	32.50	4.77	32.90	4.87	33.33	4.71																	
Min.	321.0 ksc.						Min.	31.47	4.62	30.80	4.56	31.83	4.50																	

อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ค่าการยุบตัว: 6.0 ซม.

TYPE ชิ้นงาน			TYPE ชิ้นงาน			TYPE ชิ้นงาน			TYPE ชิ้นงาน		
A			B			C			D		
ชิ้น	3/4	นิ้ว	ชิ้น	3/4	นิ้ว	ชิ้น	3/4	นิ้ว	ชิ้น	3/4	นิ้ว
ic	(300±25 ksc)	ksc	ic	(300±25 ksc)	ksc	ic	(300±25 ksc)	ksc	ic	(300±25 ksc)	ksc
ขนาดชิ้นงานทดสอบ			ขนาดชิ้นงานทดสอบ			ขนาดชิ้นงานทดสอบ			ขนาดชิ้นงานทดสอบ		
ขนาดเหล็กเสริม			ขนาดเหล็กเสริม			ขนาดเหล็กเสริม			ขนาดเหล็กเสริม		
ระยะห่างเหล็กเสริม			ระยะห่างเหล็กเสริม			ระยะห่างเหล็กเสริม			ระยะห่างเหล็กเสริม		
ระยะหุ้มเหล็กเสริม			ระยะหุ้มเหล็กเสริม			ระยะหุ้มเหล็กเสริม			ระยะหุ้มเหล็กเสริม		
เตรียมเหล็ก(ถ้า)			เตรียมเหล็ก(ถ้า)			เตรียมเหล็ก(ถ้า)			เตรียมเหล็ก(ถ้า)		
ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.			ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.			ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.			ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.		
ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดท่อ(microsec)			ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดท่อ(microsec)			ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดท่อ(microsec)		
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
1A	32.4	37.5	32.4	34.1	2.9	4.40		1A	33.8	33.6	33.5
2A	32.6	32.8	32.6	32.7	0.1	4.59	4.47	2A	34.5	34.5	34.6
3A	34.1	34.5	33.4	34.0	0.6	4.41		3A	33.5	33.7	33.7
1B	32.4	32.4	32.5	32.4	0.1	4.62		1B	33.8	34.0	33.8
2B	33.4	33.5	33.3	33.4	0.1	4.49	4.58	2B	34.3	34.2	34.2
3B	32.4	32.7	32.1	32.4	0.3	4.63		3B	33.0	33.2	33.3
1C	32.7	33.6	32.6	33.0	0.6	4.55		1C	33.5	33.7	33.8
2C	33.4	33.3	33.2	33.3	0.1	4.50	4.51	2C	34.2	34.4	34.8
3C	33.4	33.5	33.4	33.4	0.1	4.49		3C	33.8	33.7	33.6
1D	32.8	32.9	32.7	32.8	0.1	4.57		1D	33.7	33.6	33.8
2D	32.8	32.9	32.8	32.8	0.1	4.57	4.55	2D	33.8	33.7	33.6
3D	33.3	33.2	33.3	33.3	0.1	4.51		3D	33.2	33.1	33.2
1E	32.8	33.0	33.0	32.9	0.1	4.55		1E	33.0	33.2	33.2
2E	32.9	33.4	33.2	33.2	0.3	4.52	4.52	2E	33.5	33.8	33.8
3E	33.3	33.5	33.3	33.4	0.1	4.50		3E	33.4	33.6	33.5
1F	33.6	33.5	33.7	33.6	0.1	4.46		1F	33.8	33.7	33.6
2F	33.8	33.6	33.6	33.7	0.1	4.46	4.46	2F	34.1	34.2	34.0
3F	33.5	33.6	33.5	33.5	0.1	4.47		3F	34.0	33.9	33.8
ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.			ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.			ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.			ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, kN/sec], L=150mm.		
ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดท่อ(microsec)			ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดท่อ(microsec)			ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดท่อ(microsec)		
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
1G	29.6	29.8	33.3	30.9	2.1	4.85		1G	30.0	31.5	31.6
1G'	30.7	31.0	31.8	31.2	0.6	4.81	4.83	1G'	30.1	31.0	31.9
2G	29.2	29.8	30.6	29.9	0.7	5.02		2G	30.1	30.2	30.6
2G'	29.6	30.4	31.2	30.4	0.8	4.93	4.98	2G'	29.6	30.7	29.8
3G	29.6	30.4	30.4	30.1	0.5	4.98		3G	31.4	28.0	30.0
3G'	30.4	31.5	29.6	30.5	1.0	4.92	4.95	3G'	32.2	28.6	31.4
4G	30.4	29.9	29.0	29.8	0.7	5.04		4G	30.6	30.2	30.7
4G'	30.8	31.0	29.4	30.4	0.9	4.93	4.99	4G'	29.7	30.8	30.8
5G	29.5	31.2	30.2	30.3	0.9	4.95		5G	30.6	31.1	28.7
5G'	30.2	30.6	29.5	30.1	0.6	4.98	4.97	5G'	30.5	31.0	30.1
6G	30.0	31.7	29.0	30.2	1.4	4.96		6G	30.8	31.5	29.6
6G'	30.6	30.5	29.0	30.0	0.9	4.99	4.98	6G'	32.0	32.8	33.4

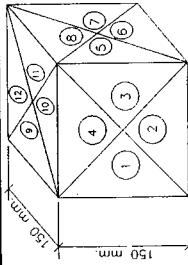
TYPE ซิงเกิ้ล		D		E		TYPE ซิงเกิ้ล		F		TYPE ซิงเกิ้ล		G								
		ic	ic	ic	ic	ic	ic	ic	ic	ic	ic	ic								
		3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4								
		(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)	(300±25 ksc)								
ขนาดชิ้นงานทดสอบ	40x40x15 ซม. 0.5 นิ้ว	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9	RB 9								
	ไม่เต็มพื้นที่	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง	เต็มด้วยช่อง								
	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม								
	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม	ระยะห่างเส้นเสริม								
	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)	เส้นเสริม(บน-ล่าง)								
ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.								
ตำแหน่งทดสอบ	รูปประกอบ	ตำแหน่งทดสอบ	ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)					
			Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}			
1			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1A	33.4	33.4	33.6	33.5	0.1	4.48			1A	32.6	32.7	32.8	32.7	0.1	4.59					
2A	33.4	33.4	33.6	33.5	0.1	4.48	4.47	33.58	2A	33.0	33.0	33.1	33.0	0.1	4.54	4.57	32.83			
3A	33.9	33.8	33.7	33.8	0.1	4.44			3A	32.9	32.8	32.6	32.8	0.2	4.58					
1B	32.9	33.5	32.6	33.0	0.5	4.55			1B	33.0	32.8	32.9	32.9	0.1	4.56					
2B	33.8	33.7	33.5	33.7	0.2	4.46	4.51	33.29	2B	32.8	33.0	33.1	33.0	0.2	4.55	4.56	32.91			
3B	33.4	33.2	33.0	33.2	0.2	4.52			3B	32.8	33.0	32.8	32.9	0.1	4.56					
1C	33.3	33.4	33.5	33.4	0.1	4.49			1C	32.6	32.7	32.8	32.7	0.1	4.59					
2C	33.6	33.4	33.5	33.5	0.1	4.48	4.49	33.41	2C	33.0	33.0	32.9	33.0	0.1	4.55	4.54	33.01			
3C	33.2	33.3	33.5	33.3	0.2	4.50			3C	33.2	33.4	33.5	33.4	0.2	4.50					
1D	33.2	33.1	33.9	33.4	0.4	4.49			1D	33.0	32.9	33.1	33.0	0.1	4.55					
2D	32.6	32.5	32.5	32.5	0.1	4.61	4.56	32.91	2D	32.6	32.7	32.5	32.6	0.1	4.60	4.57	32.86			
3D	32.8	32.9	32.7	32.8	0.1	4.57			3D	32.9	33.0	33.0	33.0	0.1	4.55					
1E	32.6	32.5	32.4	32.5	0.1	4.62			1E	32.7	32.6	32.5	32.6	0.1	4.60					
2E	32.7	32.6	32.5	32.6	0.1	4.60	4.61	32.57	2E	32.8	32.7	32.7	32.7	0.1	4.58	4.57	32.81			
3E	32.5	32.6	32.7	32.6	0.1	4.60			3E	32.9	33.0	33.4	33.1	0.3	4.53					
1F	32.6	32.5	32.6	32.6	0.1	4.61			1F	33.0	32.9	32.0	32.6	0.6	4.60					
2F	33.6	33.6	33.5	33.6	0.1	4.47	4.52	33.21	2F	32.9	33.0	32.9	32.9	0.1	4.55	4.59	32.69			
3F	33.4	33.6	33.5	33.5	0.1	4.48			3F	32.6	32.5	32.4	32.5	0.1	4.62					
ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.		ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.				
ตำแหน่งทดสอบ	รูปประกอบ	ตำแหน่งทดสอบ	ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)			ผลการทดสอบ(microsec)		
			Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}	Mean	SD	V _{avg}
1			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1G	30.9	30.6	28.6	30.0	1.3	4.99			1G	30.4	29.3	30.4	30.0	0.6	4.99					
1G'	31.6	29.7	29.5	30.3	1.2	4.96	4.98	30.15	1G'	30.6	29.0	31.4	30.3	1.2	4.95	4.97	30.18			
2G	30.0	30.5	30.8	30.4	0.4	4.93			2G	31.8	31.0	30.6	31.1	0.6	4.82					
2G'	29.9	29.6	31.2	30.2	0.9	4.96	4.95	30.33	2G'	32.8	30.4	31.6	31.6	1.2	4.75	4.78	31.37			
3G	31.7	30.2	31.7	31.2	0.9	4.81			3G	31.0	30.6	29.2	30.3	0.9	4.96					
3G'	32.5	31.0	31.2	31.6	0.8	4.75	4.78	31.38	3G'	33.0	30.4	30.0	31.1	1.6	4.82	4.89	30.70			
4G	31.0	29.4	29.8	30.1	0.8	4.99			4G	30.4	30.3	30.9	30.5	0.3	4.91					
4G'	30.9	29.6	30.7	30.4	0.7	4.93	4.96	30.23	4G'	30.4	29.2	31.8	30.5	1.3	4.92	4.92	30.50			
5G	29.6	30.6	30.0	30.1	0.5	4.99			5G	29.7	29.7	29.3	29.6	0.2	5.07					
5G'	31.4	31.0	31.0	31.1	0.2	4.82	4.90	30.60	5G'	29.6	30.7	29.8	30.0	0.6	4.99	5.03	29.80			
6G	30.5	30.9	29.6	30.3	0.7	4.95			6G	29.1	29.6	28.8	29.2	0.4	5.14					
6G'	34.0	30.3	30.6	31.6	2.1	4.74	4.84	30.98	6G'	29.8	30.6	31.2	30.5	0.7	4.91	5.03	29.85			

TYPE รังนก	A'		C'		ชนิด
	ic	3/4 (300±25 ksc)	ic	3/4 (300±25 ksc)	
ขนาดรังนกทดสอบ	40x40x15 ซม. 0ขุ	28	40x40x15 ซม. 0ขุ	28	วัน
ขนาดเหล็กเสริม	RB 9 มม. เส้นดัดอย่าง	14/12548	RB 9 มม. เส้นดัดอย่าง	14/12548	
ระยะห่างเหล็กเสริม	10 ซม. ทดสอบ	2/102548	10 ซม. ทดสอบ	2/102548	
ระยะหัวเหล็กเสริม	2.5 ซม. ค้ำการขุดตัว	6	5 ซม. ค้ำการขุดตัว	6	ซม.
เสริมเหล็ก(ถ้า)	1 ชิ้น ลูกรูบี้	25 องศาเซต	1 ชิ้น ลูกรูบี้	25	องศาเซต
ทดสอบทางตรง(Direct) (V=L/T, km/sec), L=150mm.					
รูปประกอบ ด้านหน้าทดสอบ	ทดสอบ(microsec)		ทดสอบ(microsec)		Mean V _{avg}
	Mean	SD	Mean	SD	
1A	33.9	33.0	34.2	0.1	4.55
2A	33.4	32.9	34.4	0.2	4.54
3A	34.0	33.4	33.6	0.3	4.46
1B	32.4	32.5	32.6	0.1	4.62
2B	33.7	33.6	33.3	0.2	4.47
3B	32.8	32.9	33.0	0.1	4.56
1C	33.0	32.9	32.9	0.1	4.55
2C	33.6	33.6	33.5	0.1	4.47
3C	33.9	33.2	33.3	0.4	4.48
1D	33.0	32.9	33.2	0.2	4.54
2D	33.5	33.0	33.2	0.3	4.51
3D	33.6	33.7	33.5	0.1	4.46
1E	33.4	33.6	33.5	0.1	4.48
2E	33.4	33.5	33.6	0.1	4.48
3E	33.3	33.4	33.5	0.1	4.49
1F	33.6	33.8	33.7	0.1	4.45
2F	34.0	34.2	34.3	0.2	4.41
3F	33.5	33.7	33.6	0.1	4.46
ทดสอบทางอ้อม(Indirect) (V=L/T, km/sec), L=150mm.					
รูปประกอบ ด้านหน้าทดสอบ	ทดสอบ(microsec)		ทดสอบ(microsec)		Mean V _{avg}
	Mean	SD	Mean	SD	
1G	28.4	28.9	27.0	1.0	5.34
1G'	28.5	29.5	28.3	0.6	5.21
2G	30.4	28.0	29.5	1.2	5.12
2G'	30.6	28.7	29.3	1.0	5.08
3G	27.8	30.2	29.4	1.2	5.15
3G'	28.0	30.6	30.6	1.5	5.04
4G	29.0	29.8	29.9	0.5	5.07
4G'	28.3	30.4	29.8	1.1	5.08
5G	31.0	29.0	27.7	1.7	5.13
5G'	31.8	29.7	28.2	1.8	5.02
6G	30.5	28.6	28.2	1.2	5.15
6G'	30.4	29.6	27.6	1.4	5.14

การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุตราโซนิกพัลส์เวโลซิตี (ทดสอบลูก CUBE)																	
การทดสอบ		cube No.1				cube No.2				cube No.3							
แบบมาตรฐาน		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average		Pundit Reading (Micro sec)		Reading Average	
หิน	3/4 นิ้ว	No.1	No.2	No.3	Velocity (corr.)	No.1	No.2	No.3	Velocity (corr.)	No.1	No.2	No.3	Velocity (corr.)	No.1	No.2	No.3	Velocity (corr.)
fc	399.5 ksc.				km/sec				km/sec				km/sec				km/sec
	400±25 ksc.																
อายุ	28 วัน																
เก็บค่า	19/1/2548																
TEST	15/2/2548																
CUBE	150x150x150 mm																
NO.	streth (ksc.)																
1	391.63 ksc.																
2	386.65 ksc.																
3	420.08 ksc.																
4	ksc.																
5	ksc.																
6	ksc.																
Mean.	399.5 ksc.																
S.D.	18.0																
V	325.3																
Max.	420.1																
Min.	386.7																

Mean.	399.5	ksc.	31.13	4.82	32.10	4.67	31.58	4.75
S.D.	18.0		0.25	0.04	0.57	0.08	0.31	0.05
V	325.3		0.06	0.00	0.32	0.01	0.10	0.00
Max.	420.1		31.53	4.88	33.00	4.76	32.20	4.83
Min.	386.7		30.73	4.76	31.50	4.55	31.03	4.66

รูปด้านหน้าลูก TEST ขนาด 150 มม.ทุกด้าน



รูปด้านหน้าจุด TEST บนแผ่นทดสอบ

อุณหภูมิ: 28 องศาเซลเซียส

ค่าการยุบตัว: 6.0 ซม.

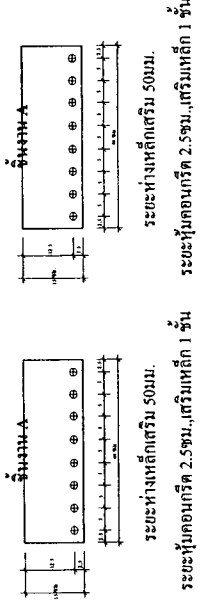
TYPE รังนก	A		B		TYPE รังนก		C		ชนิด
	พื้นที่ ic	3/4 (400±25 ksc)	พื้นที่ ic	3/4 (400±25 ksc)	ชนิดรังนกทดสอบ	ขนาดรังนก	พื้นที่ ic	3/4 (400±25 ksc)	
ขนาดรังนกทดสอบ	40x40x15 ซม.	28	40x40x15 ซม.	28	ขนาดรังนกทดสอบ	40x40x15 ซม.	28	40x40x15 ซม.	28
ขนาดรังนกเสริม	RB 9 มม.	19/12548	ขนาดรังนกเสริม	RB 9 มม.	ขนาดรังนกเสริม	RB 9 มม.	19/12548	ขนาดรังนกเสริม	RB 9 มม.
ระยะห่างรังนกเสริม	15 ซม.	15/22548	ระยะห่างรังนกเสริม	15 ซม.	ระยะห่างรังนกเสริม	15 ซม.	15/22548	ระยะห่างรังนกเสริม	15 ซม.
ระยะห่างรังนกเสริม	2.5 ซม.	6.0	ระยะห่างรังนกเสริม	2.5 ซม.	ระยะห่างรังนกเสริม	2.5 ซม.	6.0	ระยะห่างรังนกเสริม	2.5 ซม.
เสริมเหล็ก(ต่าง)	1 ซม.	28	เสริมเหล็ก(ต่าง)	2 ซม.	เสริมเหล็ก(ต่าง)	1 ซม.	28	เสริมเหล็ก(ต่าง)	1 ซม.
ทดสอบทางตรง(Direct) [V=L/T, km/sec], L=150mm.									
ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดรังนกทดสอบ			ขนาดรังนกเสริม			ขนาดรังนกเสริม		
	Mean	SD	V _{velocity}	Mean	SD	V _{velocity}	Mean	SD	V _{velocity}
1A	32.5	32.8	32.9	32.7	0.2	4.38	33.3	33.5	33.3
2A	32.3	32.5	32.6	32.5	0.2	4.62	33.8	33.8	33.8
3A	33.1	32.8	32.9	32.9	0.2	4.55	33.0	32.9	32.9
1B	32.9	32.2	32.1	32.4	0.4	4.63	33.1	33.1	33.1
2B	32.9	33.1	33.1	33.0	0.1	4.54	33.6	33.5	33.6
3B	32.6	32.5	32.5	32.5	0.1	4.61	32.5	32.9	32.7
1C	32.2	32.2	32.2	32.2	0.0	4.66	32.7	32.9	32.8
2C	32.8	33.0	33.0	32.9	0.1	4.55	33.4	33.5	33.5
3C	32.7	32.8	32.7	32.7	0.1	4.58	33.2	33.3	33.1
1D	32.4	32.6	32.7	32.6	0.2	4.61	33.2	33.3	33.0
2D	32.2	32.4	32.5	32.4	0.2	4.63	33.0	33.1	33.0
3D	32.7	32.7	32.8	32.7	0.1	4.58	32.5	32.4	32.6
1E	32.8	32.7	32.0	32.5	0.4	4.62	32.8	32.9	32.8
2E	32.6	32.7	32.8	32.7	0.1	4.59	33.4	33.5	33.4
3E	32.9	32.6	32.7	32.7	0.2	4.58	32.6	32.6	32.7
1F	33.0	33.0	33.1	33.0	0.1	4.54	32.7	32.9	32.7
2F	33.3	33.6	33.5	33.5	0.2	4.48	33.6	33.7	33.6
3F	32.9	33.1	33.1	33.0	0.1	4.54	33.2	33.2	33.2
ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.									
ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดรังนกทดสอบ			ขนาดรังนกเสริม			ขนาดรังนกเสริม		
	Mean	SD	V _{velocity}	Mean	SD	V _{velocity}	Mean	SD	V _{velocity}
1G	33.6	32.0	31.9	32.5	1.0	4.62	33.8	36.0	34.0
1G'	33.5	31.7	31.3	32.2	1.2	4.66	33.7	36.3	33.1
2G	31.7	32.6	33.7	32.7	1.0	4.59	30.6	31.1	31.7
2G'	31.9	30.5	32.1	31.5	0.9	4.76	31.2	31.3	34.8
3G	29.8	30.1	32.5	30.8	1.5	4.87	31.2	31.6	29.0
3G'	29.6	29.6	31.7	30.3	1.2	4.95	31.5	31.2	27.8
4G	31.0	31.2	32.5	31.6	0.8	4.75	32.3	33.0	34.6
4G'	30.0	30.7	31.1	30.6	0.6	4.90	32.3	32.6	35.8
5G	32.4	31.4	34.4	32.7	1.5	4.58	33.8	30.9	32.9
5G'	30.5	30.4	33.3	31.4	1.6	4.78	33.8	28.7	34.6
6G	34.2	29.9	29.2	31.1	2.7	4.82	31.7	28.9	33.9
6G'	31.7	29.1	32.4	31.1	1.7	4.83	31.6	29.9	33.6
ทดสอบทางอ้อม(Indirect) [V=L/T, km/sec], L=150mm.									
ตำแหน่ง ทดสอบ	ขนาดรังนกทดสอบ			ขนาดรังนกเสริม			ขนาดรังนกเสริม		
	Mean	SD	V _{velocity}	Mean	SD	V _{velocity}	Mean	SD	V _{velocity}
1H	33.6	32.0	31.9	32.5	1.0	4.62	33.8	36.0	34.0
1H'	33.5	31.7	31.3	32.2	1.2	4.66	33.7	36.3	33.1
2H	31.7	32.6	33.7	32.7	1.0	4.59	30.6	31.1	31.7
2H'	31.9	30.5	32.1	31.5	0.9	4.76	31.2	31.3	34.8
3H	29.8	30.1	32.5	30.8	1.5	4.87	31.2	31.6	29.0
3H'	29.6	29.6	31.7	30.3	1.2	4.95	31.5	31.2	27.8
4H	31.0	31.2	32.5	31.6	0.8	4.75	32.3	33.0	34.6
4H'	30.0	30.7	31.1	30.6	0.6	4.90	32.3	32.6	35.8
5H	32.4	31.4	34.4	32.7	1.5	4.58	33.8	30.9	32.9
5H'	30.5	30.4	33.3	31.4	1.6	4.78	33.8	28.7	34.6
6H	34.2	29.9	29.2	31.1	2.7	4.82	31.7	28.9	33.9
6H'	31.7	29.1	32.4	31.1	1.7	4.83	31.6	29.9	33.6

ตัวอย่างการวิเคราะห์ทางสถิติ



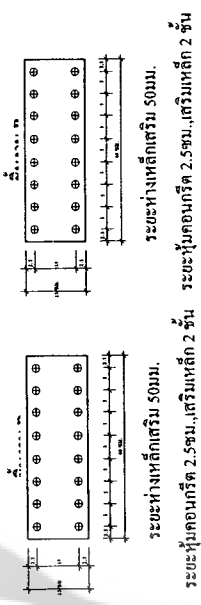
1. ผลการเปรียบเทียบผลกระทบชิ้นงาน $fc'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน $fc'400\pm25ksc$ มีระยะหุ้ม 2.5, 5.0, 7.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นเหล็กเสริม 1, 2 ชั้น

1.1 ชิ้นงาน A $fc'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน A $fc'400\pm25ksc$ ระยะหุ้ม 2.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นของเหล็กเสริม 1 ชั้น(ล่าง)



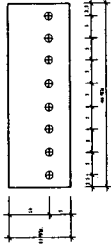
ชิ้นงานทดสอบ 15 x 40 ซม. $f_c' 300/400 \pm 25$ ksc. หิน 3/4 นิ้ว ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. [A เทียบ A]					
เปรียบเทียบชิ้นงาน(Direct)		ขนาดเหล็กเสริม	ระยะห่างเหล็กเสริม	ระยะหุ้ม	เหล็กตะแกรง
ชิ้นงาน	ระยะหุ้ม(ซม.)	ชิ้นงาน	(มม.)	(ซม.)	(ชั้น) (บน-ล่าง)
A	2.5	A	9	50	1 (ล่าง)
ตำแหน่งการทดสอบ					
(Direct)		Variable	Sig(2-Tailed)	ความหมาย	
	A	AA/AA	0.099	ไม่มีความแตกต่างกัน	
	B	AB/AB	0.338	ไม่มีความแตกต่างกัน	
	C	AC/AC	0.364	ไม่มีความแตกต่างกัน	
	D	AD/AD	0.023	น่าจะมีความแตกต่างกัน	
	E	AE/AE	0.430	ไม่มีความแตกต่างกัน	
	F	AF/AF	0.440	ไม่มีความแตกต่างกัน	

1.2 ชิ้นงาน B $fc'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน B $fc'400\pm25ksc$ ระยะหุ้ม 2.5 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นของเหล็กเสริม 2 ชั้น(บน-ล่าง)



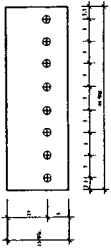
ชิ้นงานทดสอบ 15 x 40 ซม. f_c' 300/400±25 ksc. หิน 3/4 นิ้ว ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. [B เทียบ B]							
เปรียบเทียบชิ้นงาน(Direct)			ขนาดเหล็กเสริม		ระยะห่างเหล็กเสริม	ระยะหุ้ม	เหล็กตะแกรง
ชิ้นงาน	ระยะหุ้ม(ซม.)	ชิ้นงาน	(มม.)	(มม.)	(ซม.)	(ซม.)	(ชั้น) (บน-ล่าง)
B	2.5	B	9	50	2.5	2	(บน-ล่าง)
ตำแหน่งการทดสอบ							T-Test
(Direct)		Variable		Sig(2-Tailed)		ความหมาย	
⊕ A	⊕ A	BA/BA		0.044		น่าจะมีความแตกต่างกัน	
⊙ B	⊙ B	BB/BB		0.076		ไม่มีความแตกต่างกัน	
⊠ C	⊠ C	BC/BC		0.297		ไม่มีความแตกต่างกัน	
⊞ D	⊞ D	BD/BD		0.738		ไม่มีความแตกต่างกัน	
⊕ E	⊕ E	BE/BE		0.860		ไม่มีความแตกต่างกัน	
⊠ F	⊠ F	BF/BF		0.304		ไม่มีความแตกต่างกัน	

1.3 ชิ้นงาน C $f_c'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน C $f_c'400\pm25ksc$ ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นเหล็กเสริม 1 ชั้น(ล่าง)



ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.

ระยะห่างคอนกรีต 5 ซม.,เสริมเหล็ก 1 ชั้น

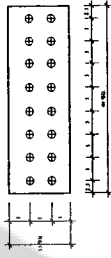


ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.

ระยะห่างคอนกรีต 5 ซม.,เสริมเหล็ก 1 ชั้น

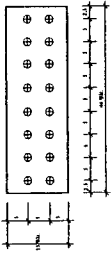
ชิ้นงานทดสอบ 15 x 40 ซม. $f_c' 300/400\pm25 ksc$. หิน 3/4 นิ้ว ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. [C เทียบ C]				
เปรียบเทียบชิ้นงาน(Direct)		ขนาดเหล็กเสริมระยะห่างเหล็กเสริม		เหล็กตะแกรง
ชิ้นงาน	ระยะหุ้ม(ซม.)	ชิ้นงาน	(มม.)	(ซม.) (ชั้น) (บน-ล่าง)
C	5.0	C	9	50 1 (ล่าง)
ตำแหน่งการทดสอบ				
(Direct)	Variable	Sig(2-Tailed)		ความหมาย
	CA/CA	0.860		ไม่มีความแตกต่างกัน
	CB/CB	0.316		ไม่มีความแตกต่างกัน
	CC/CC	0.147		ไม่มีความแตกต่างกัน
	CD/CD	0.095		ไม่มีความแตกต่างกัน
	CE/CE	1.000		ไม่มีความแตกต่างกัน
	CF/CF	0.771		ไม่มีความแตกต่างกัน

1.4 ชิ้นงาน D $f_c'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน D $f_c'400\pm25ksc$ ระยะหุ้ม 5.0 ซม. ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นของเหล็กเสริม 2 ชั้น(บน-ล่าง)



ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.

ระยะห่างคอนกรีต 5 ซม.,เสริมเหล็ก 2 ชั้น

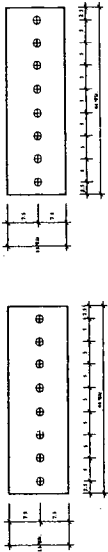


ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.

ระยะห่างคอนกรีต 5 ซม.,เสริมเหล็ก 2 ชั้น

ชิ้นงานทดสอบ 15 x 40 ซม. $f_c' 300/400\pm25 ksc$. หิน 3/4 นิ้ว ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. [D เทียบ D]				
เปรียบเทียบชิ้นงาน(Direct)		ขนาดเหล็กเสริมระยะห่างเหล็กเสริม		เหล็กตะแกรง
ชิ้นงาน	ระยะหุ้ม(ซม.)	ชิ้นงาน	(มม.)	(ซม.) (ชั้น) (บน-ล่าง)
D	5.0	D	9	50 2 (บน-ล่าง)
ตำแหน่งการทดสอบ				
(Direct)	Variable	Sig(2-Tailed)		ความหมาย
	DA/DA	0.215		ไม่มีความแตกต่างกัน
	DB/DB	0.415		ไม่มีความแตกต่างกัน
	DC/DC	0.088		ไม่มีความแตกต่างกัน
	DD/DD	0.100		ไม่มีความแตกต่างกัน
	DE/DE	0.512		ไม่มีความแตกต่างกัน
	DF/DF	0.014		น่าจะมีความแตกต่างกัน

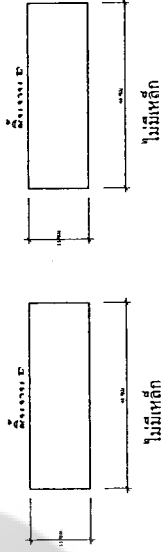
1.5 ชิ้นงาน E $f_c'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน E $f_c'400\pm25ksc$ ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. จำนวนชั้นเหล็กเสริม 1 ชั้น(กลาง)



ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม.
ระยะห่างคอนกรีต 7.5 ซม.,เหล็กอยู่กึ่งกลาง

ชิ้นงานทดสอบ 15 x 40 ซม. $f_c' 300/400\pm25 ksc$. หิน 3/4 นิ้ว ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. [E เทียบ E]					
เปรียบเทียบชิ้นงาน(Direct)		ขนาดเหล็กเสริม ระยะห่างเหล็กเสริม		เหล็กตะแกรง	
ชิ้นงาน	ระยะหุ้ม(ซม.)	ชิ้นงาน	(มม.)	(มม.)	(ชั้น) (บน-ล่าง)
E	7.5	E	9	50	1 (กลาง)
ตำแหน่งการทดสอบ					
(Direct)		Variable	Sig(2-Tailed)		
⊕ A	⊕ A	DA/DA	ไม่มีความแตกต่างกัน		
⊕ B	⊕ B	DB/DB	ไม่มีความแตกต่างกัน		
⊠ C	⊠ C	DC/DC	ไม่มีความแตกต่างกัน		
⊠ D	⊠ D	DD/DD	ไม่มีความแตกต่างกัน		
⊠ E	⊠ E	DE/DE	ไม่มีความแตกต่างกัน		
⊠ F	⊠ F	DF/DF	น่าจะมีความแตกต่างกัน		

1.6 ชิ้นงาน F $f_c'300\pm25ksc$ กับชิ้นงาน F $f_c'400\pm25ksc$ ไม่มีเหล็กเสริม



ชิ้นงานทดสอบ 15 x 40 ซม. $f_c' 300/400\pm25 ksc$. หิน 3/4 นิ้ว ระยะห่างเหล็กเสริม 50 มม. [F เทียบ F]					
เปรียบเทียบชิ้นงาน(Direct)		ขนาดเหล็กเสริม ระยะห่างเหล็กเสริม		เหล็กตะแกรง	
ชิ้นงาน	ระยะหุ้ม(ซม.)	ชิ้นงาน	(มม.)	(มม.)	(ชั้น) (บน-ล่าง)
F	-	F	-	-	ไม่มีเสริมเหล็ก
ตำแหน่งการทดสอบ					
(Direct)		Variable	Sig(2-Tailed)		
A	A	DA/DA	ไม่มีความแตกต่างกัน		
B	B	DB/DB	ไม่มีความแตกต่างกัน		
C	C	DC/DC	น่าจะมีความแตกต่างกัน		
D	D	DD/DD	ไม่มีความแตกต่างกัน		
E	E	DE/DE	ไม่มีความแตกต่างกัน		
F	F	DF/DF	ไม่มีความแตกต่างกัน		