มยผ. 1507-51

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีทดสอบเพื่อประเมินสภาพสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ (Radar)

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการใช้ Radar ในการตรวจสภาพภายในของโครงสร้างคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหาตำแหน่งของเหล็กเสริมหรือท่อทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ การคำนวนระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ความลึกของช่องว่างที่อยู่ภายใน และความหนาของชั้นคอนกรีต

1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

2. นิยาม

"เรดาร์ (Radar)" หมายถึง ระบบการตรวจจับวัตถุด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในย่านของคลื่นวิทยุ (Radio Detection and Ranging) โดยความถี่ของคลื่นเรดาร์มีค่าตั้งแต่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 3 กิกะเฮิรตซ์

"ช่องว่างในคอนกรีต (Void)" หมายถึง โพรงอากาศซึ่งอาจจะมีลักษณะแห้ง หรืออิ่มตัวด้วยของเหลวก็ได้ และมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โดยทั่วไปช่องว่างในคอนกรีตจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของมวลรวมหยาบ

"ค่าคงที่ไดอิเลคทริค (Dielectric Constant)" หมายถึง ค่าคงที่ที่แสดงถึงลักษณะการอนุญาตให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันของแต่ละวัสดุ

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์

3.1 ตัวรับส่งสัญญาณ (Antenna with Transmitter and Receiver) เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับและส่งคลื่นเรดาร์ โดยตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ทำหน้าที่ส่งคลื่นเรดาร์ที่มีพลังงานต่ำ (ไม่เกิน 20 วัตต์) เข้าสู่โครงสร้างคอนกรีตและตัวรับสัญญาณทำหน้าที่รับสัญญาณที่สะท้อนมาจากโครงสร้างคอนกรีต

<u>หมายเหตุ</u> โดยทั่วไปความถี่ของเรดาร์สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 500 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์

3.2 อุปกรณ์แสดงผล (Display Device) เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้แสดงผลของคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาจากโครงสร้างซึ่งอาจแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

(1) Grey-Level Chart Recorder เป็นภาพที่แสดงความเข้มข้น หรือ ขนาดของสัญญาณเรดาร์ที่แต่ละตำแหน่งและเวลา

(2) Oscilloscope เป็นเครื่องมือบันทึกการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าโดยใช้หลอดสุญญากาศที่ผลิตรังสีอิเล็คตรอนจากขั้วบวก สามารถบันทึกคลื่นลงให้เห็นบนจอได้

(3) หน้าจอคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมการแสดงผลแบบสี เป็นระบบการแสดงผลที่เชื่อมต่อกับข้อมูลการวัดที่เป็นดิจิตอลและแสดงผลเป็นภาพกราฟฟิกเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้หลากหลายมากขึ้น

3.3 แหล่งพลังงาน (Power Source) เป็นแหล่งพลังงานสำหรับคลื่นเรดาร์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์ 12 โวลต์ อุปกรณ์โดยทั่วไปสามารถใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ได้

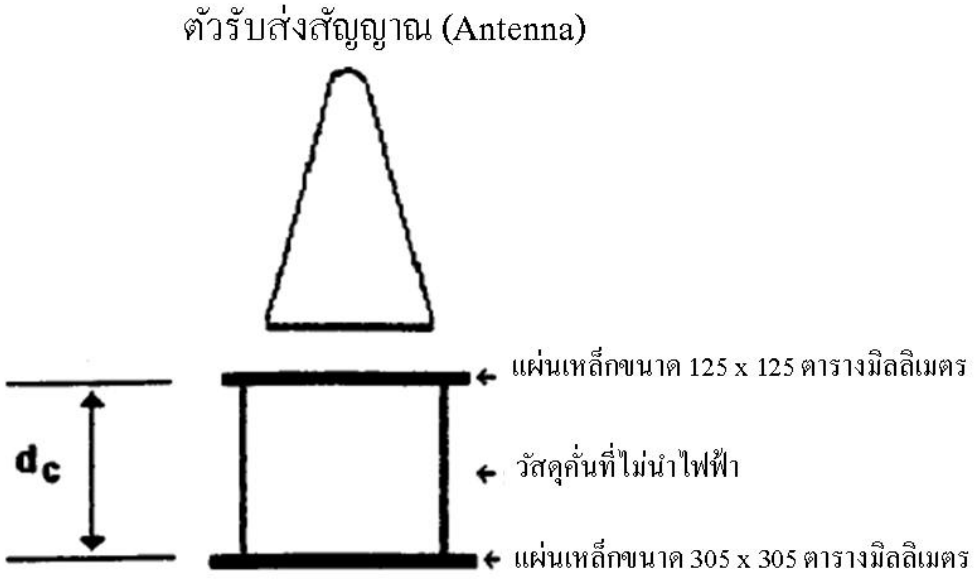
4. วิธีการใช้งานเครื่องตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์

4.1 การสอบเทียบ (Calibration)

(1) ค่าเวลามาตรฐานสำหรับการปรับแก้ (Calibration Time Constant, C_T) ตรวจวัดได้จากการทดสอบเครื่องรับส่งคลื่นเรดาร์กับแผ่นเหล็กสองแผ่นที่มีระยะห่างคงที่ (d_c) โดยใช้วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้ามาเป็นตัวเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่น แผ่นโลหะบนควรมีขนาดประมาณ 125x125 มิลลิเมตร และแผ่นโลหะล่างควรมีขนาดประมาณ 300x300 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นควรมีค่าประมาณ 300 มิลลิเมตร

(2) วัดการสะท้อนของคลื่นเรดาร์จากอุปกรณ์ที่ระบุไว้ในขั้นตอนที่แล้ว

(3) วัดระยะเวลาที่แตกต่างกันระหว่างคลื่นที่สะท้อนจากแผ่นโลหะบนและแผ่นโลหะล่าง ค่าดังกล่าวคือค่าเวลามาตรฐานสำหรับการปรับแก้ (Calibration Time Constant, C_T)



รูปที่ 1 แผ่นสอบเทียบเวลามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D4748

(ข้อ 4.1)

4.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเลคทริค (Dielectric Constant)

การคำนวณ หรือประเมินค่าคงที่ไดอิเลคทริคของคอนกรีตในโครงสร้างอย่างถูกต้องเพื่อตรวจวัดตำแหน่งของวัตถุหรือช่องว่างที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต ให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

(1) วัดการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ในจุดที่รู้ตำแหน่งแน่นอนของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก หรือกำแพงคอนกรีตที่มีความหนาไม่มากเกินไป เพื่อคำนวณค่าคงที่ไดอิเลคทริค ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจวัดดังกล่าวได้ ให้ประมาณจากค่ามาตรฐานของวัสดุแต่ละชนิด

(2) ตรวจวัดระยะเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้ในการสะท้อนกลับมาที่ตัวรับส่งสัญญาณ

(3) คำนวณค่าคงที่ไดอิเลคทริคตามสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_r = \left[\frac{\Delta t \times d_c}{2 \times T \times C_T} \right]^2 \qquad (1)$$

โดย

ε_r : ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของคอนกรีต

Δt : เวลาที่คลื่นใช้ในการสะท้อนกลับมาที่ตัวรับส่งสัญญาณ

d_c : ระยะทางระหว่างแผ่นเหล็ก

T : ความหนาของวัสดุที่วัด

C_T : เวลามาตรฐานสำหรับการปรับแก้

ค่าคงที่ไดอิเลคทริคที่ได้จากการคำนวณสามารถใช้กับโครงสร้างคอนกรีตชนิดเดียวกันและอยู่ในสภาวะเหมือนกัน

5. ขั้นตอนการตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์

5.1 เคลื่อนตัวรับส่งสัญญาณเรดาร์ไปตามผิวโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการตรวจสอบ ไม่ควรเคลื่อนตัวรับส่งสัญญาณเร็วเกินไปจนมีผลกับความแม่นยำของการวัด กรณีเครื่องวัดตรวจจับสัญญาณตามช่วงเวลา ความเร็วของการเคลื่อนที่ตัวรับส่งสัญญาณจะมีผลต่อความละเอียดของการวัด

5.2 วิเคราะห์แยกสัญญาณที่สะท้อนมาจากผิวของโครงสร้างคอนกรีต และสัญญาณที่สะท้อนมาจากวัตถุต่างๆในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.3 คำนวณเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้เดินทางและสะท้อนกลับจากแต่ละวัตถุ เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุต่างๆที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ

(1) ***ความชื้นของคอนกรีต :*** เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเลคทริคสูงกว่าคอนกรีตมาก กรณีความชื้น ของคอนกรีตไม่คงที่อาจมีผลต่อการคำนวณตำแหน่งของวัตถุหรือช่องว่างในคอนกรีต

(2) ***การซ้อนกันของวัตถุในโครงสร้างคอนกรีต :*** เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีนี้อาศัยการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ จึงมีข้อจำกัดสำหรับการตรวจสอบวัตถุที่อยู่ซ้อนกันในโครงสร้าง วิธีการนี้จะไม่สามารถแยกแยะวัตถุที่อยู่ซ้อนกันได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่วัตถุดังกล่าวมีรูปร่างไม่แน่นอน

6.2 ข้อควรระวัง

(1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ อาจจะปล่อยพลังงานในช่วงของไมโครเวฟซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นผู้ดำเนินการตรวจสอบจึงควรอยู่นอกเหนือจากจุดเสี่ยง เช่น พื้นที่ใต้เสาอากาศ ระหว่างที่เครื่องกำลังทำงาน

(2) คลื่นเรดาร์ที่ออกจากเครื่องทดสอบอาจจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณการติดต่อสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีเสาอากาศไม่ได้อยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้อง ควรควบคุมให้คลื่นเรดาร์ที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางเข้าสู่โครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบ

7. การแปลความผลการทดสอบ

7.1 ตรวจสอบสภาพภายในของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นได้จากภาพของคลื่นที่สะท้อนมาจากแต่ละตำแหน่ง โดยเปรียบเทียบลักษณะคลื่นที่สะท้อนมาจากจุดที่ไม่มีวัตถุอื่นและจุดที่มีการเปลี่ยนแปลง

7.2 ความลึกของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีตหรือความหนาของชั้นคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T = \frac{\Delta t \times d_c}{2\sqrt{\varepsilon_r \times C_T}} \qquad (2)$$

โดย

T : ความหนาของวัสดุที่ทำการวัดได้

ε_r : ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของคอนกรีต

Δt : เวลาที่คลื่นใช้ในการสะท้อนกลับมาที่ตัวรับส่งสัญญาณ

d_c : ระยะทางระหว่างแผ่นเหล็ก

C_T : เวลามาตรฐานสำหรับการปรับแก้

8. เอกสารอ้างอิง

8.1 ACI 228.2R-98 Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures - Reported by ACI committee 228

8.2 BS 1881 – 201: 1986, Testing Concrete. Guide to the Use of Non-Destructive Methods of Test for Hardened Concrete

8.3 ASTM D4748-98 Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar

ภาคผนวก 1 หลักการของคลื่นเรดาร์ในคอนกรีต

1. การตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ อาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ เมื่อกระทบกับรอยต่อระหว่างวัตถุที่สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันมาก คลื่นเรดาร์จะสะท้อนและหักเหเมื่อกระทบกับรอยต่อดังกล่าว และขนาดของคลื่นสะท้อนมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเลคทริค (Dielectric Constants) ของวัตถุทั้งสองดังสมการ

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \qquad (3)$$

โดยที่

A : ขนาดของคลื่นสะท้อน

A_o : ขนาดของคลื่นเริ่มต้น

ε_1 : ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของตัวกลางที่ 1

ε_2 : ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของตัวกลางที่ 2

การตรวจสอบลักษณะภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่าคงที่ไดอิเลคทริคของคอนกรีตและค่าคงที่ไดอิเลคทริคของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งอาจเป็นช่องว่าง โลหะ หรือ วัสดุอื่น โดยความแตกต่างระหว่างคอนกรีตและโลหะ หรือ ช่องว่างนั้นเพียงพอต่อการตรวจสอบในกรณีทั่วไป

ระยะห่างจากผิวคอนกรีตของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต คำนวณได้จากเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้ในการเดินทางไปและสะท้อนกลับดังแสดงในสมการ

$$T = \frac{\Delta t \times c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (4)$$

โดย

T : ระยะห่างของวัตถุจากผิวคอนกรีต

ε_r : ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของคอนกรีต

Δt : เวลาที่คลื่นใช้ในการสะท้อนกลับมาที่ตัวรับส่งสัญญาณ

c : ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนผสม ประเภทของวัสดุที่ใช้ผสม และความชื้นของคอนกรีต ซึ่งสามารถตรวจวัดได้หากมีส่วนของโครงสร้างที่มีความหนาเหมาะสม

2. ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของวัสดุต่างๆมีค่าแตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

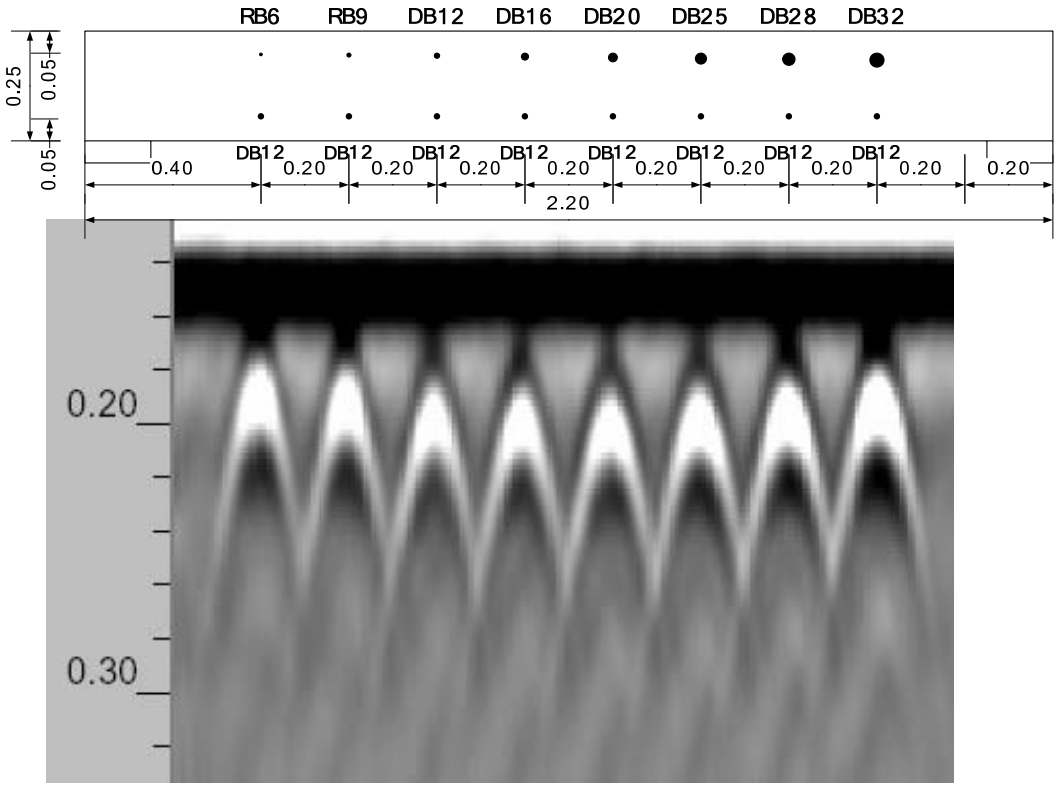
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของวัสดุประเภทต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเลคทริค
อากาศ	1
น้ำ	80 - 88
ทราย	2-6
หิน	5 - 12
คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	6 - 11
คอนกรีตผสมแอสฟัลต์	3 - 5

3. การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยเรดาร์สามารถใช้ในการตรวจสอบวัสดุต่างๆที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัสดุเหล่านี้เทียบกับความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านคอนกรีต อย่างไรก็ตามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านโลหะที่นำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงทำให้เรดาร์สามารถตรวจสอบหาโลหะในโครงสร้างได้ชัดเจนกว่าวัสดุอื่น เช่น พลาสติก หรือท่อ PVC

ภาคผนวก 2 ตัวอย่างผลการทดสอบแท่งตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

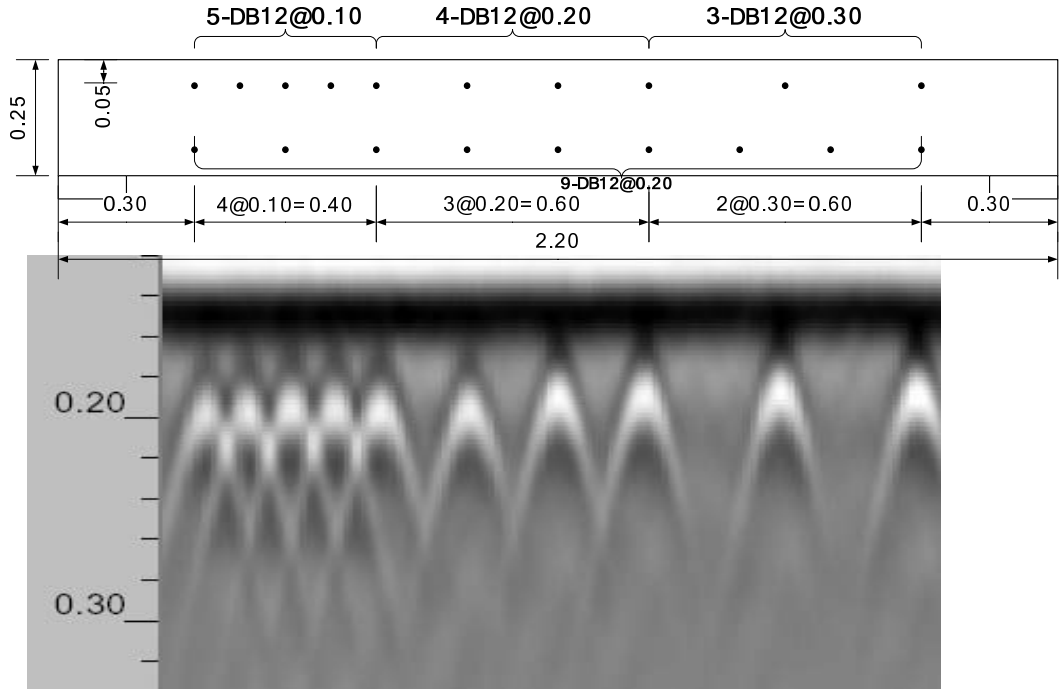
1. รูปที่ 2 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กเสริมขนาดต่างๆกัน โดยการใช้เรดาร์สามารถช่วยหาตำแหน่งของเหล็กเสริมที่อยู่ในโครงสร้างได้ โดยจุดบนสุดของส่วนโค้งแสดงถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ดีจะสามารถสังเกตได้ว่าเหล็กที่มีขนาดแตกต่างกันก็จะให้ผลการวัดที่มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งทำให้วิธีการเรดาร์มีข้อจำกัดในการวัดขนาดของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2: ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมอยู่ด้านใน

(ข้อ 9.3)

2. รูปที่ 3 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กเสริมขนาดเท่ากันแต่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต่างกัน โดยจุดบนสุดของส่วนโค้งแสดงถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม

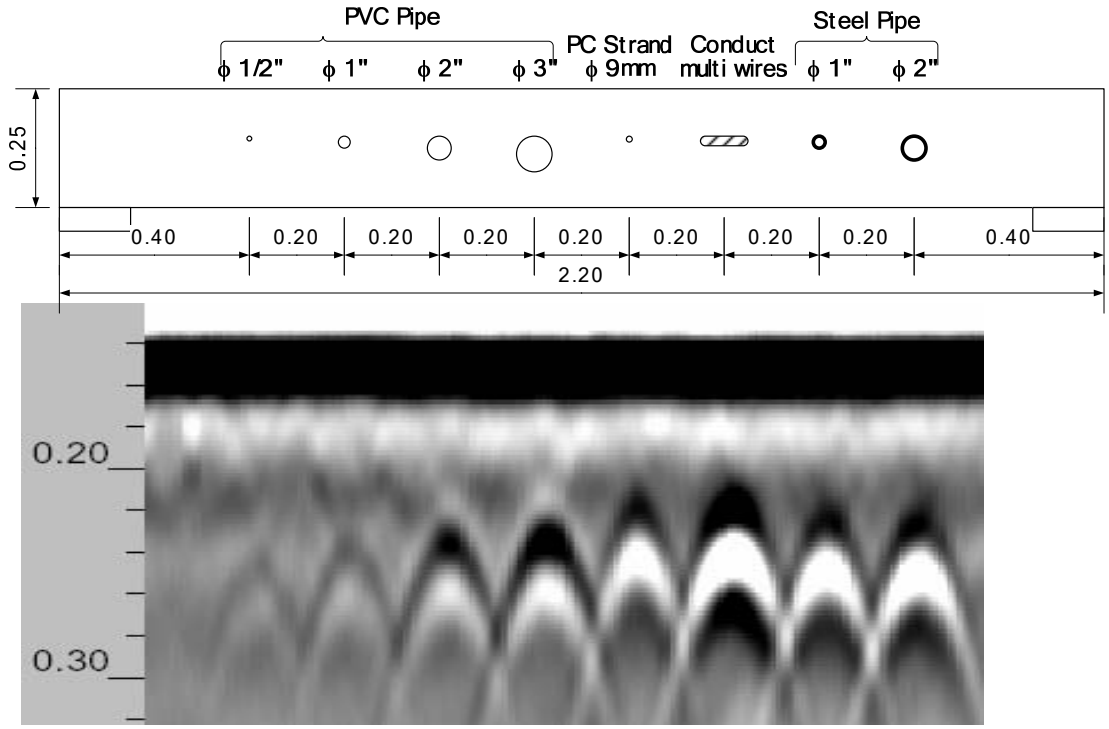


รูปที่ 3 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมอยู่ด้านในกรณีเหล็กเสริมมีระยะห่างต่างกัน

(ข้อ 9.3)

3. รูปที่ 4 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีท่อพีวีซี ลวดพันเกลียว (Strand) ท่อรอยลวดอัดแรง (Conduct Multi Wires) และท่อเหล็ก

จะเห็นได้ว่าสัญญาณสะท้อนจากท่อพีวีซี จะไม่ชัดเจนเท่ากับท่อเหล็ก เนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเลคทริคของคอนกรีตกับท่อพีวีซี น้อยกว่าความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเลคทริคของคอนกรีตกับท่อเหล็ก

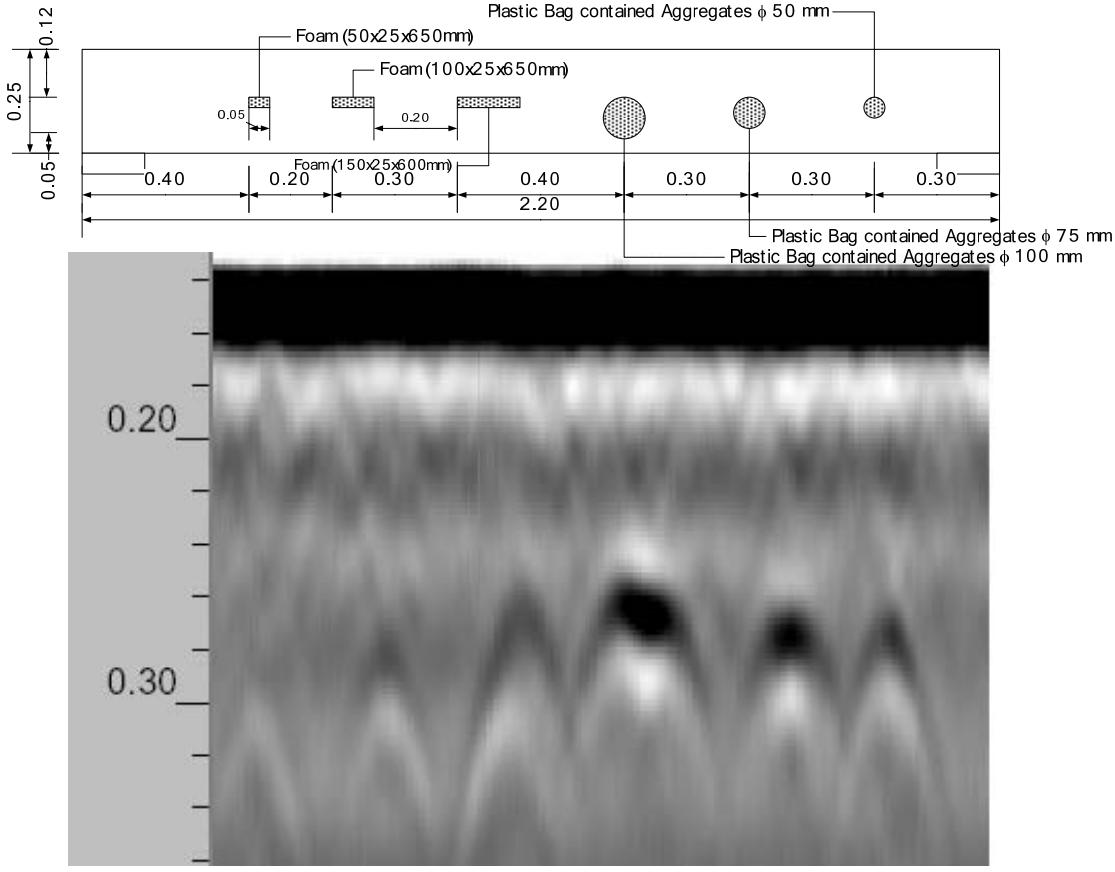


รูปที่ 4 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่มีท่อชนิดต่างๆ ภายใน

(ข้อ 9.3)

4. รูปที่ 5 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีโพรงโดยจำลองจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบ และแผ่นโฟมที่ระดับความลึกเดียวกัน และมีขนาดต่างๆ กัน

จะเห็นได้ว่าสัญญาณสะท้อนจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบและแผ่นโฟม จะไม่ชัดเจนเท่ากับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็กเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเลคทริคน้อยกว่ากรณีคอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็ก

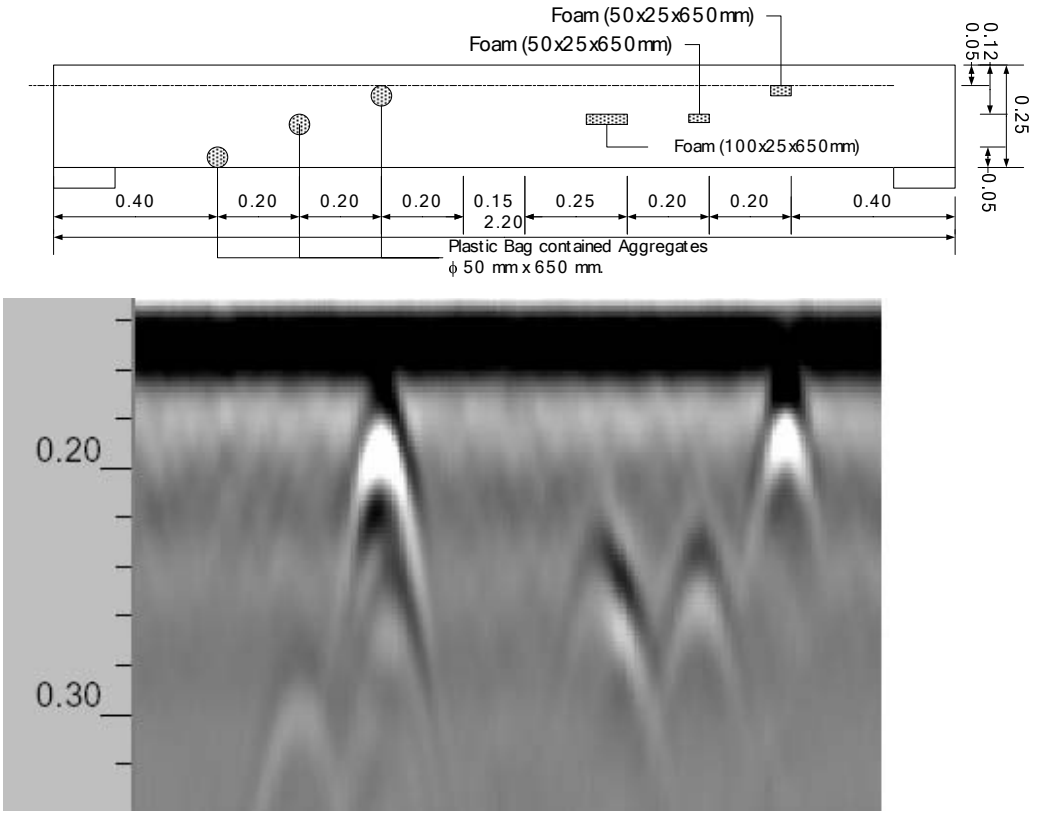


รูปที่ 5 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้าง ที่มีโพรงภายใน ที่ระดับความลึกเดียวกัน แต่มีขนาดต่างกัน

(ข้อ 9.3)

5. รูปที่ 6 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีโพรงโดยจำลองจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบ และแผ่นโฟมที่ความลึกต่างๆ กัน

จะเห็นได้ว่าสัญญาณสะท้อนจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบและแผ่นโฟม จะไม่ชัดเจนเท่ากับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็กเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเลคทริคน้อยกว่ากรณีคอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็ก



รูปที่ 6 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่มีโพรงภายในที่ความลึกต่างกัน

(ข้อ 9.3)