

มยพ. 1501-51 ถึง มยพ. 1507-51

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย



กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ.2551



มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507-51

ISBN 978-974-16-5840-4

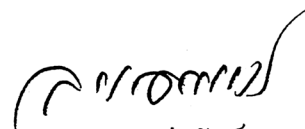
พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2551 จำนวน 200 เล่ม

สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปพิมพ์จำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

คำนำ

กรมโยธาธิการและผังเมืองมีภารกิจเกี่ยวกับงานด้านการผังเมือง และด้านการโยธาธิการ ซึ่งงานด้านการโยธาธิการจะครอบคลุมถึง การออกแบบ การก่อสร้าง การควบคุมการก่อสร้างอาคาร การกำหนดคุณภาพและมาตรฐานการก่อสร้างด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม เพื่อให้เกิดมาตรฐานความปลอดภัยแก่สาธารณชน และเนื่องด้วยในปัจจุบันการก่อสร้างอาคารมีความก้าวหน้าทั้งทางด้านเทคโนโลยีในเรื่องของวัสดุ การออกแบบ และการก่อสร้างมากกว่าในอดีตมาก กรมโยธาธิการและผังเมือง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงและพัฒนามาตรฐานการออกแบบ การควบคุมงาน และการก่อสร้างให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีในปัจจุบัน

สำหรับมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมฉบับนี้ กรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมืองและหน่วยงานต่างๆ สำหรับให้เป็นแนวทางในการปฏิบัติให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยกรมโยธาธิการและผังเมืองหวังเป็นอย่างยิ่งว่า มาตรฐานที่จัดทำขึ้นนี้จะมีประโยชน์และสามารถนำไปใช้อ้างอิงเพื่อทำให้งานก่อสร้างได้มาตรฐานและมีความปลอดภัยในการใช้งาน



(นายสมชาย ชุ่มรัตน์)

อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง

สารบัญ

หน้า

1. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย	
 การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection Method)	
 (มยผ. 1501-51)	
1. ขอบข่าย	1
2. นิยาม	1
3. การตรวจพินิจ	1
4. หลักการของการตรวจพินิจ	1
5. ลักษณะความเสียหายที่พบเห็นได้บ่อยในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	2
5.1 จุดบกพร่องจากการก่อสร้าง	2
5.2 รอยร้าว	3
5.3 การสลายตัวของคอนกรีต	4
5.4 การบิดเบี้ยวหรือเคลื่อนตัวของโครงสร้าง	5
5.5 การสูญเสียผิวคอนกรีตเนื่องจากการกัดเซาะ	5
5.6 การวิบัติของวัสดุอุดรอยต่อ	5
5.7 การรั่วซึมของน้ำ	5
5.8 การหลุดร่อนของคอนกรีต	6
5.9 การเกิดรอยร้าวขนานกับผิวเหล็กเสริมในคอนกรีต	6
6. การวิเคราะห์ผลการตรวจพินิจ	6
7. เอกสารอ้างอิง	7
ภาคผนวก 1 ความรู้เบื้องต้นของการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
ภาคผนวก 2 วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย	10
ภาคผนวก 3 ตัวอย่างรูปแบบของรอยร้าวและสาเหตุ	14
ภาคผนวก 4 ตัวอย่างลักษณะความเสียหายที่พบเห็นได้บ่อยในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	15

2. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer)

(มยผ. 1502-51)

1. ขอบข่าย	19
2. นิยาม	19
3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของค้อนกระแทก	19
4. วิธีการใช้งานค้อนกระแทก	20
5. ขั้นตอนการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยการใช้ค้อนกระแทก	21
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง	21
7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ	22
8. เอกสารอ้างอิง	23
ภาคผนวก 1 ค้อนกระแทกแบบสมิธ	24
ภาคผนวก 2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนและกำลังอัดของคอนกรีต	25
ภาคผนวก 3 แบบฟอร์มบันทึกผลการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย วิธีการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก	26

3. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวยิงทดสอบ

(มยผ. 1503-51)

1. ขอบข่าย	27
2. นิยาม	27
3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องยิงหัวยิงทดสอบ	27
4. วิธีการใช้งานเครื่องยิงหัวยิงทดสอบ	28
5. ขั้นตอนการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวยิงทดสอบ	29
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง	30
7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ	30
8. เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก 1 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมของการทดสอบ	32
ภาคผนวก 2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและกำลังอัดของคอนกรีต	33
ภาคผนวก 3 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย วิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวยิงทดสอบ	34

4. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)

(มยผ. 1504-51)

1. ขอบเขต	35
2. นิยาม	35
3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก	35
4. วิธีการใช้งานเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก	36
5. ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	37
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง	37
7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ	37
8. เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก 1 ทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิก	39
ภาคผนวก 2 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัด	40
ภาคผนวก 3 วิธีการตรวจวัดความลึกของรอยร้าว	41
ภาคผนวก 4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทดสอบ โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก	43

5. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีต (Cover Meter)

(มยผ. 1505-51)

1. ขอบเขต	45
2. นิยาม	45
3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	45
4. วิธีการสอบเทียบเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	45
5. วิธีการใช้งานเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	47
6. วิธีการใช้งานเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหาตำแหน่งของเหล็กเสริม	48
7. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง	48
8. การสรุปและการแปลความผลการทดสอบ	49
9. เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก 1 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการตรวจวัด	51

6. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีทดสอบหาค่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริม (Half Cell Potential)

(มยผ. 1506-51)

1. ขอบข่าย	53
2. นิยาม	53
3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	53
4. วิธีการใช้งานเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	54
5. ขั้นตอนประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	54
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง	56
7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ	56
8. เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก 1 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการทดสอบ	58
ภาคผนวก 2 ลักษณะวงจรของเครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	59
ภาคผนวก 3 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัด	60
ภาคผนวก 4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทดสอบ หาค่าการสึกกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม	61

7. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีทดสอบเพื่อประเมินสภาพสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ (Radar)

(มยผ. 1507-51)

1. ขอบข่าย	63
2. นิยาม	63
3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์	63
4. วิธีการใช้งานเครื่องตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์	64
5. ขั้นตอนการตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์	65
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง	65
7. การแปลความผลการทดสอบ	66
8. เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก 1 หลักการของคลื่นเรดาร์ในคอนกรีต	68
ภาคผนวก 2 ตัวอย่างผลการทดสอบแท่งตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก	70

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection Method)

1. ขอบข่าย

มาตรฐานนี้ครอบคลุมวิธีการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการตรวจพินิจ และข้อแนะนำเกี่ยวกับการเก็บข้อมูลและจำแนกประเภทของความเสียหาย

2. นิยาม

“การตรวจพินิจ (Visual Inspection) หมายถึง การตรวจสอบด้วยตาเปล่า ประกอบกับอุปกรณ์การตรวจสอบพื้นฐาน เช่น ไม้บรรทัด มาตรวัดความกว้างของรอยร้าว โดยไม่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเกี่ยวข้อง

“ความเสียหาย (Damage)” หมายถึง การสูญเสียความสามารถทางกลหรือความคงทนของโครงสร้างอันเนื่องมาจากกลไกต่างๆ

“การเสื่อมสภาพ (Deterioration)” หมายถึง การสูญเสียคุณสมบัติ หรือ การเปลี่ยนแปลงในทางใดทางหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบให้โครงสร้างมีพฤติกรรมที่ไม่เหมาะสมกับหน้าที่ของโครงสร้างนั้นๆ

3. การตรวจพินิจ

3.1 การตรวจพินิจเป็นขั้นตอนที่ถือได้ว่ามีความสำคัญมากที่สุดขั้นตอนหนึ่งของการตรวจสอบโครงสร้าง การตรวจพินิจด้วยผู้ตรวจสอบที่มีประสบการณ์จะช่วยให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของความเสียหาย หรือ การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

3.2 เนื่องจากการตรวจพินิจนั้นมีค่าดำเนินการที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบอื่นๆ เช่น การเจาะตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นการตรวจสอบพินิจจึงสามารถดำเนินการได้บ่อยกว่าวิธีการตรวจสอบแบบอื่น และมักจะเป็นขั้นตอนแรกๆในการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต

3.3 ในการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการตรวจพินิจนั้น ผู้ตรวจสอบต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมโครงสร้าง พฤติกรรมของคอนกรีต และเทคนิคการก่อสร้าง เพื่อการรวบรวมข้อมูลที่สมบูรณ์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

4. หลักการของการตรวจพินิจ

4.1 การตรวจพินิจควรจะเป็นไปตามการวางแผนเบื้องต้นเพื่อให้ได้ข้อมูลการตรวจสอบที่มีคุณภาพและความสมบูรณ์สูงสุด ขั้นตอนโดยทั่วไปของการตรวจพินิจประกอบด้วย

- (1) การเดินตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของโครงสร้าง และ ศึกษารูปแบบและลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง

- (2) การรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง เช่น แบบโครงสร้าง วัสดุก่อสร้างที่ใช้ ประวัติของโครงสร้าง ลักษณะแวดล้อม เป็นต้น
- (3) การวางแผนการตรวจพินิจโดยละเอียด
- (4) การติดตารางบนผิวโครงสร้างเพื่อใช้อ้างอิงตำแหน่งของจุดต่างๆบนโครงสร้าง
- (5) การตรวจพินิจโดยละเอียดและบันทึกผล
- (6) การดำเนินการตรวจสอบเพิ่มเติม

ข้อแนะนำ 4.1:

- (1) การตรวจพินิจเป็นวิธีการที่มีความยืดหยุ่นและสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญแก่ผู้ตรวจสอบได้ แต่ข้อมูลที่ได้อาจขึ้นอยู่กับวางแผนและการดำเนินการ ดังนั้นประสิทธิภาพของการตรวจพินิจนั้นจึงขึ้นอยู่กับความรู้และประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบเป็นสำคัญ
- (2) การตรวจพินิจมีข้อจำกัด คือ สามารถตรวจสอบได้เฉพาะบริเวณผิวโครงสร้าง และไม่สามารถตรวจสอบความเสียหาย หรือ รอยแตกร้าวที่อยู่ภายในโครงสร้าง และไม่สามารถวัดความเสียหายเชิงปริมาณอย่างชัดเจน จึงควรใช้เครื่องมือทดสอบร่วมกับการตรวจพินิจเพื่อรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมให้เพียงพอสำหรับการวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างต่อไป

4.2 เป้าหมายหลักของการตรวจพินิจ คือ การกำหนดตำแหน่งและขนาดของความเสียหายในโครงสร้าง โดยแยกลักษณะของความเสียหายอย่างชัดเจนเพื่อความสะดวกและชัดเจนในการใช้ข้อมูลในภายหลัง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ที่ไม่ได้ดำเนินการตรวจพินิจด้วยตนเอง) ลักษณะความเสียหายที่สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 5

4.3 การตรวจโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยตาเปล่าในระยะเวลาที่เหมาะสม ช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดงบประมาณในระยะยาว

ข้อแนะนำ 4.3:

ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมโครงสร้างที่มีการเกิดสนิมในระดับที่ทำให้โครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก มักจะแพงกว่ากรณีการป้องกันการเกิดสนิม หรือ การซ่อมแซมในขณะที่โครงสร้างยังมีความสามารถในการรับแรงที่เพียงพอ ดังนั้นการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างเป็นระยะๆ จะช่วยให้สามารถดำเนินการบำรุงรักษาที่จำเป็นได้ทันทั่วทั้ง และ ประหยัดงบประมาณในระยะยาว

5. ลักษณะความเสียหายที่พบเห็นได้บ่อยในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.1 จุดบกพร่องจากการก่อสร้าง (Construction Faults)

ตัวอย่างของจุดบกพร่องที่เกิดจากการก่อสร้าง คือ รอยต่อระหว่างเทคอนกรีต เหล็กเสริมที่ยื่นออกมาจากโครงสร้าง รูปพรรณแบบรวงผึ้งในเนื้อคอนกรีต หลุมขนาดเล็กที่เกิดจากพองอากาศบริเวณผิวแบบหล่อที่มีการเขย่าไม่เพียงพอ ผิวเสียรูปเนื่องจากการต่อแบบไม่ดี เป็นต้น ความเสียหายเหล่านี้เป็นความ

เสียหายอันเนื่องมาจากการควบคุมการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน และมีส่วนทำให้อัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตนั้นเป็นไปได้เร็วมากขึ้น

5.2 รอยร้าว (Cracking)

รอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ และสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกช่วงอายุของโครงสร้าง การวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตนั้นมีส่วนช่วยให้ซ่อมแซมโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ตรวจสอบต้องบันทึก จำนวนของรอยแตก ร้าว ทิศทางและลักษณะของรอยแตก ร้าว ความลึกของรอยแตก ร้าว ความกว้างของรอยร้าว และอัตราการขยายตัวของรอยร้าวอย่างคร่าว ๆ

5.2.1 ทิศทางและลักษณะของรอยร้าว

ลักษณะของรอยร้าวที่สามารถสังเกตได้บนผิวโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นข้อมูลพื้นฐานที่บ่งบอกสาเหตุของการเกิดรอยร้าว เช่น รอยแตกหลายงาเกิดจากการยัดรีดคอนกรีตที่ผิวด้วยคอนกรีตด้านในโครงสร้าง หรือมีการขยายตัวของคอนกรีตที่อยู่ด้านในของโครงสร้าง รอยร้าวที่อยู่ในทิศทางเดียวจะเกิดจากแรงดึงในคอนกรีต โดยแรงดึงดังกล่าวอาจเกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง หรือ เกิดจากแรงคดที่กระทำกับโครงสร้าง

5.2.2 ความลึกของรอยร้าว

ความลึกของรอยร้าวสามารถแยกออกกว้างๆ ได้เป็น 4 ระดับ คือ (1) รอยร้าวเฉพาะที่ผิว (2) รอยร้าวตื้น (3) รอยร้าวลึก และ (4) รอยร้าวทะลุโครงสร้าง รอยร้าวเฉพาะที่ผิวหมายถึงรอยร้าวที่ความลึกเข้าไปในโครงสร้างไม่มากหรือเกิดรอยร้าวในชั้นของปูนฉาบ รอยร้าวตื้น คือรอยร้าวที่เกิดในผิวคอนกรีตและมีความลึกที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้าง รอยร้าวลึกคือรอยร้าวที่มีความลึกมากในระดับที่ทำให้เหล็กเสริมผุกร่อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่รอยร้าวมีความลึกมากกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนได้อย่างรวดเร็ว และรอยร้าวทะลุคือรอยร้าวที่ทะลุโครงสร้างซึ่งบ่งบอกถึงความเสียหายที่ค่อนข้างรุนแรง และมีการกระจายตัวของแรงดึงที่กระทำในคอนกรีตที่ค่อนข้างคงที่

5.2.3 ความกว้างของรอยร้าว

ความกว้างของรอยแตกร้าวเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการตรวจพินิจ ความกว้างของรอยแตกร้าวอาจถูกแบ่งได้ 3 ระดับ ได้แก่ (1) รอยร้าวขนาดเล็ก (2) รอยร้าวขนาดกลาง และ (3) รอยร้าวขนาดใหญ่

ข้อแนะนำ 5.2.3:

ระดับความกว้างนั้นควรต้องถูกจำแนกโดยคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน สภาพแวดล้อม และอายุการใช้งานของแต่ละโครงสร้างประกอบกันไปด้วย ยกตัวอย่างเช่นรอยร้าวขนาด 0.1 มิลลิเมตร อาจจะถูกจำแนกเป็นรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างขนาดใหญ่ในสภาพแวดล้อมธรรมดา ในขณะที่รอยร้าวขนาดเดียวกัน (0.1 มิลลิเมตร) ในโครงสร้างที่อยู่ชายฝั่งทะเลนั้นอาจถูกจำแนกเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่

5.2.4 อัตราการขยายตัวของรอยร้าว

อัตราการขยายตัวของรอยร้าวเป็นข้อบ่งชี้ว่าสาเหตุของรอยแตกร้าว นั้นยังดำเนินอยู่อย่างต่อเนื่อง หรือมีความรุนแรงมากขึ้นหรือไม่ ทั้งนี้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการดำเนินการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปสามารถแบ่งแยกประเภทรอยร้าวออกเป็นรอยร้าวที่มีความกว้างมากขึ้นเรื่อยๆ และรอยร้าวที่มีสภาพคงที่แล้ว

ข้อแนะนำ 5.2.4:

รอยร้าวที่มีสภาพคงที่แล้ว หมายถึง รอยร้าวที่ไม่มีการขยายตัวมากพอที่อาจกระทบต่อการซ่อมแซมโครงสร้าง

5.2.5 การจำแนกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง

- (1) การจำแนกรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อระบุสาเหตุของการเกิดรอยร้าว ข้อมูลของช่วงอายุคอนกรีตระหว่างที่รอยร้าวเริ่มปรากฏเป็นข้อมูลสำคัญที่จะช่วยให้ผู้ตรวจสอบระบุสาเหตุของรอยแตกร้าวได้ถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายในโครงสร้างคอนกรีตในสถานะคอนกรีตสด
- (2) ผู้ตรวจสอบโครงสร้างอาจจะจำแนกรอยร้าวที่เกิดจากพฤติกรรมทางโครงสร้างและการรับแรงออกจากรอยร้าวที่เกิดจากพฤติกรรมของคอนกรีตเพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์รอยแตกร้าว โดยทั่วไปรอยร้าวที่เกิดจากพฤติกรรมทางโครงสร้างมักมีขนาดใหญ่และความกว้างของรอยร้าวอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากการล้าของคอนกรีต

5.3 การสลายตัวของคอนกรีต (Disintegration)

การสลายตัวของคอนกรีต คือ คอนกรีตเกิดการสลายตัวกลับเป็นส่วนประกอบเดิม หรือ เป็นส่วนเล็กๆ โดยมีสาเหตุมาจากการสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ในคอนกรีต ข้อแตกต่างระหว่างการสลายตัวของคอนกรีตและการหลุดร่อนของคอนกรีต (Spalling) คือ ลักษณะของ

คอนกรีตในส่วนที่หลุดออกมาจากโครงสร้าง สำหรับการสลายตัวของคอนกรีตเป็นการสูญเสียเนื้อคอนกรีตที่เล็กทีละน้อย ในขณะที่สำหรับการหลุดร่อนเป็นการกะเทาะออกของชั้นคอนกรีตขนาดใหญ่ การสลายตัวของคอนกรีตที่พบเห็นมากคือการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟต หรือการเสื่อมสภาพเนื่องจากกรด

5.4 การบิดเบี้ยวหรือเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Distortion and Movement)

การบิดเบี้ยวของโครงสร้างหรือการเคลื่อนตัวของโครงสร้างคือการสูญเสียตำแหน่งขององค์อาคารในโครงสร้าง ตัวอย่างที่พบเห็นได้บ่อยคือการทรุดตัวไม่เท่ากันของเสา หรือ กำแพง เป็นต้น ลักษณะความเสียหายรูปแบบนี้ควรได้รับการตรวจสอบโดยละเอียดและอาจติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดตามมาตรฐาน มยพ. 1552-51 (มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร) เพราะอาจทำให้เกิดการวิบัติของอาคารแบบฉับพลันได้

5.5 การสูญเสียผิวคอนกรีตเนื่องจากการกัดเซาะ (Erosion)

(1) การสึกกร่อน (Abrasion)

การสึกกร่อนของคอนกรีตเกิดจากผิวคอนกรีตถูกขัดสีด้วยวัตถุที่มีความแข็ง หรือมีแรงเสียดทานสูง ผิวคอนกรีตที่สึกกร่อนสามารถสังเกตเห็นมวลรวมในคอนกรีตได้ และอาจเห็นแนวขูดขีด และเส้นทางของวัตถุที่ขัดสีกับผิวคอนกรีต

(2) การกัดเซาะโดยฟองอากาศในของเหลว (Cavitation)

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตซึ่งเกิดเนื่องจากการกัดเซาะด้วยฟองอากาศในของเหลวที่มีการเคลื่อนที่ โดยมีสาเหตุจากแรงกระทำที่เกิดจากการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ ทำให้สูญเสียผิวคอนกรีต ความเสียหายลักษณะนี้มักเป็นหลุมขนาดเล็ก และผิวคอนกรีตจะมีความขรุขระมาก โดยทั่วไปการกัดเซาะโดยฟองอากาศในของเหลวนี้เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำมากกว่า 12 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป

5.6 การวิบัติของวัสดุอุดรอยต่อ (Joint Sealant Failure)

วัสดุอุดรอยต่อมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความชื้นหรือสารอื่นที่อาจมีอันตรายต่อโครงสร้างซึมผ่านรอยต่อได้ อย่างไรก็ตามการหลุดร่อนออกของวัสดุอุดรอยต่อเป็นสิ่งที่พบเห็นได้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

5.7 การรั่วซึมของน้ำ (Seepage)

การรั่วซึมของน้ำในคอนกรีต ได้แก่ การรั่วซึมของน้ำหรือของเหลวอื่นผ่านช่องว่างในคอนกรีตซึ่งเกิดจากจากแรงดันน้ำภายนอก และอาจเกิดขึ้นได้โดยทั่วไปในโครงสร้างที่มีความดันน้ำระหว่างแต่ละด้านไม่เท่ากัน การรั่วซึมของน้ำนี้มีโอกาสทำให้อุณหภูมิเกิดสนิมในโครงสร้าง เพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

5.8 การหลุดร่อนของคอนกรีต (Spalling)

การหลุดร่อนของคอนกรีต คือ คอนกรีตบริเวณผิวโครงสร้างหลุดร่อนออกเนื่องจากความดันภายในโครงสร้าง ซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อแนะนำ 5.8: โดยทั่วไปการหลุดร่อนของคอนกรีต อาจจำแนกได้ตามขนาดของคอนกรีตที่หลุดร่อน เพื่อเป็นข้อมูลบ่งชี้ความรุนแรงของการหลุดร่อน เช่น

- การหลุดร่อนขนาดเล็ก ลึกไม่เกิน 20 มิลลิเมตร และมีขนาดไม่เกิน 150 มิลลิเมตร ทุกด้าน
- การหลุดร่อนขนาดใหญ่ มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของการหลุดร่อนขนาดเล็ก

5.9 การเกิดรอยร้าวขนานกับผิวเหล็กเสริมในคอนกรีต (Delamination)

การเกิดรอยร้าวขนานกับผิวเหล็กเสริมในคอนกรีต เกิดขึ้นในกรณีที่เหล็กเสริมเป็นสนิม และเกิดฉนวนกันน้ำไม่เพียงพอ แรงดันที่เกิดจากสนิมทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นรอบเหล็กเสริม และหากสนิมกระจายตัวเป็นพื้นที่กว้าง รอยร้าวรอบเหล็กเสริมจะเชื่อมต่อกันเป็นรอยร้าวที่อยู่ขนานกับผิวในคอนกรีต (Delamination) ความเสียหายชนิดนี้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าต้องใช้วิธีการเคาะด้วยของแข็งและสังเกตเสียงที่เกิดขึ้น คอนกรีตที่มีความแน่นจะให้เสียงที่แตกต่างจากคอนกรีตที่มีช่องว่างอยู่ภายใน

6. การวิเคราะห์ผลการตรวจพินิจ

จากการตรวจพินิจของแต่ละโครงสร้าง ผู้ตรวจสอบต้องระบุได้ว่าโครงสร้างที่ตรวจสอบ จัดอยู่ในกลุ่มใดจากลักษณะโครงสร้าง 5 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

- (1) โครงสร้างที่ไม่มีจุดบกพร่องจากการก่อสร้างและยังไม่แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพ และยังไม่จำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียด
- (2) โครงสร้างที่มีจุดบกพร่องจากการก่อสร้างซึ่งส่งผลกระทบต่อความคงทน แต่ยังไม่แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพ จุดบกพร่องดังกล่าวควรได้รับการแก้ไข
- (3) โครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดในบางจุด แต่ยังไม่ถึงระดับที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดเพื่อวางแผนบำรุงรักษา
- (4) โครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพเป็นวงกว้าง และสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และต้องการประเมินอัตราการเสื่อมสภาพ ควรต้องมีการบำรุงรักษาอย่างทันที่
- (5) โครงสร้างที่เกิดความเสียหายที่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้โครงสร้างอย่างชัดเจน และจำเป็นต้องออกมาตรการสำหรับความปลอดภัยในการใช้งานโครงสร้าง และโครงสร้างควรได้รับการซ่อมบำรุงโดยด่วน

7. เอกสารอ้างอิง

- 7.1 ACI 201.1R-92 Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service
- 7.2 ACI 207.3R-94 Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions
- 7.3 ACI 224.1R-93 Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures
- 7.4 ACI 437R-03 Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings
- 7.5 Standard Specification for Concrete Structure – 2001 “Maintenance”, Japan Society of Civil Engineers
- 7.6 Evaluation of Concrete in Concrete Structures, USACE
- 7.7 Properties of Concrete, A.M. Neville, Fourth Edition, Pearson Education Limited
- 7.8 Concrete Society Report, Non-structural Cracks in Concrete, Technical Report, No.22, 3rd Edition, page 48 (Concrete Society, London, 1992)

ภาคผนวก 1 ความรู้เบื้องต้นของการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. จุดประสงค์หลักของการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การประเมินสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาทั้งความแข็งแรงของโครงสร้าง (Load Carrying Capacity) ความสามารถใช้งาน (Serviceability) และ ความคงทน (Durability) ของโครงสร้าง ดังนั้นเป้าหมายสำคัญที่สุดในการตรวจสอบโครงสร้าง คือ การหาสาเหตุของความเสียหาย หรือ การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น และการประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนซ่อมบำรุง หรือ บำรุงรักษาโครงสร้างอย่างเหมาะสม โดยการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยการตรวจพินิจและการตรวจสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นขั้นตอนเริ่มแรกที่มีความจำเป็นในการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ผู้ตรวจสอบมีข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป
2. การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถจำแนกได้ตามพฤติกรรม หรือ ประเภทของความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่
 - (1) ความมั่นคงของส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างหรือโครงสร้างทั้งระบบ
 - (2) ความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของโครงสร้าง
 - (3) ความคงทนของโครงสร้าง
 - (4) การแอ่นตัว หรือการเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้างในระยะยาว
 - (5) ความสามารถในการต้านทานไฟของโครงสร้าง หรือ ความเสียหายหลังจากการเกิดเพลิงไหม้
 - (6) ความสามารถใช้งาน (Serviceability) ของโครงสร้าง
3. ขั้นตอนของการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวทางดังต่อไปนี้
 - (1) การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้าง เช่น แบบโครงสร้าง ประวัติการใช้งาน ข้อมูลวัสดุ ตำแหน่งของโครงสร้าง โดยเฉพาะส่วนที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างที่อยู่ภายในจุดประสงค์ของการตรวจสอบ
 - (2) การสำรวจสภาพของโครงสร้างด้วยการตรวจพินิจ โดยอาจใช้อุปกรณ์พื้นฐานประกอบการสำรวจ เช่น กล้องถ่ายรูป หรือ สายวัด เป็นต้น เพื่อช่วยในการเก็บข้อมูล
 - (3) การตรวจสอบเพิ่มเติมด้วย การเจาะตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หรือ การเก็บผงตัวอย่างเพื่อการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี หรือ การสุ่มทดสอบโครงสร้างบางส่วนด้วยเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย
 - (4) การประเมินลักษณะของความเสียหาย สาเหตุของความเสียหาย และระดับของความเสียหายในปัจจุบันจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจและตรวจสอบ
 - (5) การวางแผนในการดำเนินการหยุดความเสียหาย หรือ การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง หรือ ทำการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยวิธีการที่เหมาะสม

(6) การติดตามเก็บข้อมูลของโครงสร้างที่สำคัญ เพื่อประเมินผลของการซ่อมแซมและวางแผนการดูแลรักษาโครงสร้างในระยะยาว

4. การประเมินความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้องดำเนินการโดยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญตามหลักวิศวกรรม และการรายงานผลการตรวจสอบและข้อสรุปตามลักษณะของความเสียหายนั้น อาจจะมี ความสำคัญมากกว่าข้อกำหนดในมาตรฐานต่างๆ เนื่องจากโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพแตกต่างกันจะ ต้องการรายละเอียดของการตรวจสอบที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ ได้รับความเสียหายจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง หรือ ความเสียหายที่เกิดจากเพลิงไหม้

ภาคผนวก 2 วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

1. หลักการพื้นฐานของการทดสอบแบบไม่ทำลาย .

- (1) วิธีการทดสอบโดยไม่ทำลายส่วนใหญ่เป็นการทดสอบอาศัยการประเมินจากผลการวัดค่าสมบัติต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับสมบัติของโครงสร้าง หรือมีความเกี่ยวข้องกับกลไกของการเสื่อมสภาพแบบต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีการประเมินโดยอ้อมเป็นส่วนใหญ่ หัวใจของการทดสอบแบบไม่ทำลาย คือ การเก็บข้อมูลการประเมินสภาพของโครงสร้างให้เพียงพอโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างในระดับที่มากเกินไป วิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายบางชนิดอาจต้องเจาะรูขนาดเล็กในโครงสร้าง คอนกรีต หรืออาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสียหายในระดับหนึ่ง
- (2) การตรวจสอบด้วยเทคนิคการทดสอบโดยไม่ทำลายสามารถประยุกต์ใช้ในกรณีดังต่อไปนี้
 - ก. การตรวจสอบคุณภาพของงานก่อสร้างใหม่
 - ข. การแก้ปัญหาในงานก่อสร้างในระหว่างการก่อสร้าง
 - ค. การตรวจสอบสภาพของโครงสร้างเก่าเพื่อการวางแผนบำรุงรักษา
 - ง. การประเมินคุณภาพของงานซ่อมแซม
- (3) การเลือกวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับข้อมูลสมบัติของโครงสร้างที่ต้องการทำการตรวจสอบ โดยตารางที่ 1 แสดงรายการวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับโครงสร้างคอนกรีต รวมทั้งการตรวจพินิจตามมาตรฐานอ้างอิงของกรมโยธาธิการ

ตารางที่ 1 รายการวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

(ภาคผนวก 2 ข้อ 1 (3))

วิธีการทดสอบ	วัตถุประสงค์ของการใช้งาน	มาตรฐานอ้างอิง
1. การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ	ประเมินสาเหตุ และ ระดับความเสียหาย หรือการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง	มยพ. 1501-51
2. วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ (Rebound Hammer)	ประเมินกำลังอัดของคอนกรีต	มยพ. 1502-51
3. วิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ (Penetration Resistance)	ประเมินกำลังอัดของคอนกรีต	มยพ. 1503-51
4. วิธีทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)	ตรวจสอบความคงที่ของคุณภาพคอนกรีตในโครงสร้าง หรือ ค้นหาช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีต	มยพ. 1504-51

ตารางที่ 1 รายการวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (ต่อ)

(ภาคผนวก 2 ข้อ 1 (3))

วิธีการทดสอบ	วัตถุประสงค์ของการใช้งาน	มาตรฐานอ้างอิง
5. วิธีตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีต (Cover Meter)	ตรวจหาตำแหน่งของเหล็กเสริมในโครงสร้าง และวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	มยพ. 1505-51
6. วิธีทดสอบหาค่าการสีกกร่อนของเหล็กเสริม (Half-Cell Potential Test)	ประเมินโอกาสเกิดสนิมในเหล็กเสริม	มพย. 1506-51
7. วิธีทดสอบเพื่อประเมินสภาพสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ (Radar)	ตรวจสอบหาช่องว่างหรือวัตถุแปลกปลอมในโครงสร้างคอนกรีต	มพย. 1507-51

นอกจากวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ระบุในตารางที่ 1 ที่มีกล่าวไว้โดยละเอียดในมาตรฐานฉบับนี้ ยังมีการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอื่นๆ อีกหลายวิธี เช่น

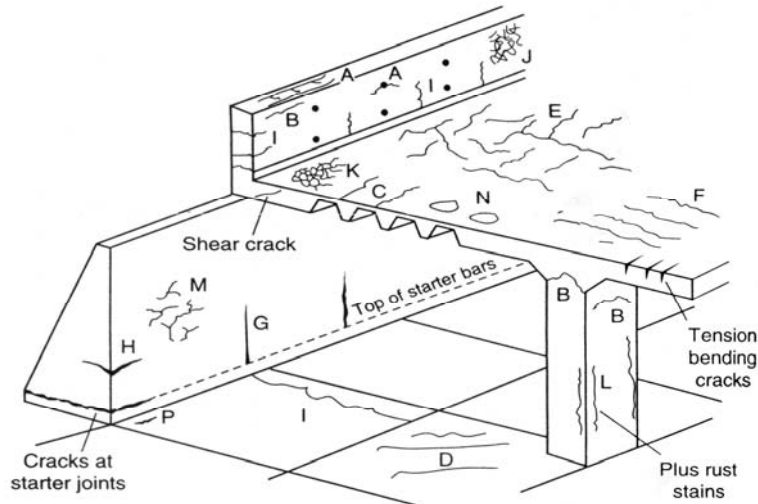
- วิธีวัดความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequencies) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญทางพลศาสตร์ของคุณสมบัติต่อไปนี้ คือ โมดูลัสยืดหยุ่น โมดูลัสแข็งเกร็ง และอัตราส่วนปัวซอง โดยหลักการทดสอบ คือ ตัวอย่างจะถูกทำให้สั่นที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจุดสูงสุดที่ชัดเจนของการตอบสนอง คือ ค่าความถี่พื้นฐาน
- วิธีใช้การแผ่รังสีนิวเคลียร์แกมมา (Nuclear Gamma Radiation) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความหนาแน่นของคอนกรีตในที่ โดยนำแหล่งของรังสีแกมมา หรือตัวตรวจวัดจะถูกติดไว้ในหัวห้อย (Probe) ซึ่งจะถูกสอดเข้าไปในรูเจาะของคอนกรีตที่ทราบระยะความลึก ค่าต่างๆ ที่อ่านได้สามารถนำไปเทียบเป็นค่าความหนาแน่นของคอนกรีตจากกราฟเทียบเคียง (Calibration)
- วิธีทดสอบความถี่กำทอน (Resonant Frequency Testing) มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบพื้นฐาน (Fundamental Modes) ในห้องปฏิบัติการของการสั่นสะเทือนสำหรับการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ ใช้ในงานสนามสำหรับตรวจหาช่องว่าง การลอกเป็นชั้น ลึงเจือปน การเสื่อมสภาพ และใช้หลักการพื้นฐาน คือ สภาพะของความถี่กำทอน (Resonant Frequency) จะถูกทำให้เกิดขึ้นระหว่างผิวสะท้อนสองผิว พลังงานจะถูกใส่เข้าไปในระบบ โดยการใช้การกระแทกของค้อน หรือใช้ระบบ Oscillator Amplifier

- วิธี Ultrasonic Pulse-echo เป็นวิธีที่ใช้เป็นตัวบอกถึงความสม่ำเสมอและคุณภาพของคอนกรีต และบอกตำแหน่งของเหล็กเสริม ช่องว่างในคอนกรีต ความหนาแน่น และความหนาของคอนกรีต อาศัยหลักการที่ว่า ทิศทาง ขนาด และความถี่ของคลื่นที่ปล่อยสู่คอนกรีต ถูกเปลี่ยนแปลงโดยสิ่งกีดขวาง เช่น รอยแตก และวัตถุอื่นๆ หรือคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลง
- วิธีการแพร่ของคลื่นเสียง (Acoustic Emission) ใช้เพื่อตรวจวัดอย่างต่อเนื่องถึงแนวโน้มของการวิบัติของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน เพื่อตรวจวัดขีดความสามารถของโครงสร้างระหว่างการทดสอบพิสูจน์ (Proof Testing) โดยอาศัยหลักการที่ว่า ในช่วงระหว่างการขยายตัวของรอยแตก หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างแบบพลาสติก จะมีการคายพลังงานความเครียด (Strain Energy) จะทำให้เกิดคลื่นเสียงซึ่งสามารถตรวจจับได้ โดยเซนเซอร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของวัตถุที่ถูกทดสอบ
- วิธีการกระทบของคลื่นเสียง (Acoustic Impact) เพื่อใช้ในการตรวจจับการสูญเสียแรงยึดเกาะ การลอกเป็นชั้น ช่องว่าง และรอยแตกขนาดเส้นผม โดยพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการทดสอบจะถูกเคาะด้วยเครื่องมือทดสอบ ผลของความถี่ที่วัดได้ตลอดช่วงเวลาในการส่งผ่านคลื่นเสียง และคุณลักษณะของความหน่วงของคลื่นเสียงที่วัดได้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในวัสดุ
- วิธีวัดความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance Measurement) ใช้เพื่อพิจารณาหาปริมาณความชื้นในคอนกรีต โดยอาศัยการพิจารณาหาปริมาณความชื้นของคอนกรีต โดยใช้หลักการนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในคอนกรีต
- วิธีใยแก้วนำแสง (Fiber Optics) ใช้เพื่อใช้ส่วนของโครงสร้างที่ไม่สามารถมองเห็นได้ โดยหุ้มใยแก้วนำแสงซึ่งประกอบด้วย ใยแก้วที่ยืดหยุ่น เลนส์ และระบบส่งแสง ถูกสอดเข้าไปในรอยร้าว หรือรูเจาะในคอนกรีต ใช้เลนส์กล้องส่องดูรอยตำหนิ เช่น รอยร้าวโพรง หรือการแยกตัวของมวลรวม ใยแก้วไปในบริเวณที่คอนกรีตถูกเจาะเอาแก่นคอนกรีตออกมา หรือหลุมขุด (Bore Holes) ที่ถูกเจาะ ตรวจสอบช่องว่างระหว่างผนัง และรูอื่นๆ ในงานวัสดุก่อ
- วิธีฉายรังสีแกมมา (Gamma Radiograph) ใช้เพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ขนาดและสภาพของเหล็กเสริม โพรงในคอนกรีต ความหนาแน่น และความหนาของคอนกรีต โดยใช้หลักการที่ว่า ความหนาแน่นและความหนาของตัวอย่างทดสอบมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซึมของรังสีแกมมา รังสีแกมมาจะถูกปล่อยจากเครื่องมือทะลุผ่านตัวอย่างไปออกอีกด้านหนึ่ง และจะถูกบันทึกบนฟิล์ม

- การสะท้อนของการกระแทก (Impact Echo) เพื่อพิจารณาหาร้าวคุณสมบัติของหน้าตัด การลอกเป็นชั้นและโพรงแบบรวงผึ้ง ตรวจวัดการเคลื่อนของพื้นผิว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของคลื่นหน่วยแรงชั่วขณะ (Transient Stress Waves) กับความไม่ต่อเนื่องภายในของคอนกรีต ต้องการระดับความชำนาญในการทดสอบปานกลาง เป็นเทคนิคที่ง่าย และมีประสิทธิภาพสำหรับการแปลผล โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ของการเคลื่อนที่ของคลื่น ต้องพิจารณาหาความเร็วคลื่นในวัสดุทดสอบที่ทราบความหนา
 - วิธีตรวจจับความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared Thermography) ใช้เพื่อตรวจจับตำหนิภายใน (Internal Flaws) การขยายตัวของรอยร้าว การลอกเป็นชั้น และโพรงภายใน โดยอาศัยหลักการที่ว่าสามารถตรวจจับตำหนิได้ โดยเลือกใช้ช่วงความถี่ของรังสีอินฟราเรดในการตรวจจับความร้อนรูปแบบต่างๆ ซึ่งความร้อนแต่ละรูปแบบที่ได้จะระบุถึงชนิดที่แน่นอนของข้อบกพร่อง (Defects)
 - Laser Interferometry เพื่อพิจารณาหาจุดกำเนิดและการแพร่ขยายของรอยร้าว และตรวจวัดพฤติกรรมที่สัมพันธ์กันของทั้งสอง ภาพสามมิติ (Hologram) ของวัตถุจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เลเซอร์รูปแบบลายละเอียด ต้องการความชำนาญในการทดสอบสูง สามารถตรวจวัดพฤติกรรมของรอยร้าวเนื่องจากการคืบ (Creep Cracks) ได้ ค่าใช้จ่ายสูง เป็นวิธีการทดสอบที่ยังไม่แพร่หลาย
 - วิธีโพลาไรเซชัน (Polarization Method) เพื่อประเมินอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งอยู่ใต้ตำแหน่งที่ทดสอบ โดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่ต้องเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างเหล็กเสริมกับแท่งอ้างอิงมาตรฐาน (Standard Reference Electrode) มีค่าตามที่กำหนด ค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ตรวจวัดได้จะใช้ในการประเมินความต้านทานโพลาไรเซชัน (Polarization Resistance) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต
 - Penetrability Method เพื่อเปรียบเทียบส่วนผสมของคอนกรีต ทั่วไปใช้ในงานวิจัยแต่อาจใช้เพื่อตรวจสอบกระบวนการบ่ม โดยอาศัยหลักการว่าอัตราการไหลของของเหลวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการแทรกซึมได้ (Penetration) ของคอนกรีต และทดสอบโดยวัดการไหลของของเหลว (อากาศหรือน้ำ) เข้าไปในคอนกรีตภายใต้สภาวะที่กำหนด
- (4) เทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลายแต่ละชนิดมีความสามารถตรวจสอบได้แตกต่างกัน ดังนั้น ในการตรวจสอบโครงสร้างโดยทั่วไป ควรใช้เครื่องมือตรวจสอบมากกว่าหนึ่งชนิดเพื่อให้ข้อมูลที่วัดได้มีความสมบูรณ์ และวิเคราะห์ผลได้แม่นยำยิ่งขึ้น รวมถึงต้องเลือกวิธีการตรวจสอบที่เหมาะสมในการตรวจสอบโครงสร้าง

ภาคผนวก 3 ตัวอย่างรูปแบบของรอยร้าวและสาเหตุ

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของลักษณะรอยร้าวไม่เชิงโครงสร้าง (Non-structural Cracks) รูปแบบต่างๆ ซึ่งรูปแบบของรอยร้าวที่แตกต่างกันมีความสัมพันธ์กับสาเหตุของรอยร้าวดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 1: ลักษณะของรอยร้าวแบบต่างๆ

(ภาคผนวก 3)

ที่มา: A.M. Neville, “Properties of Concrete”, และ Concrete Society Report,

“Non-structural Cracks in Concrete”, Technical Report No.22

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของรอยร้าวและสาเหตุของรอยร้าว

(ภาคผนวก 3)

รูปแบบของรอยร้าว	สาเหตุของรอยร้าว
A, B, C	การทรุดตัวแบบพลาสติก (Plastic Settlement)
D, E, F	การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage)
G, H	การยืดหดตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ (Thermal Contraction)
I	การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ในสภาวะถูกยัดครั้งแรก
J, K	การแตกร้าวลายขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการที่ปริมาณการยัด - หดตัวที่ผิวโครงสร้างมากกว่าคอนกรีตที่อยู่ต่ำกว่า (Crazing)
L	การเกิดสนิมของเหล็กเสริม (อันเนื่องมาจากคลอไรด์หรือคาร์บอนชั้น)
M	ปฏิกิริยาระหว่างด่างและมวลรวม
N	ตุ่มพองบนผิวคอนกรีตอันเนื่องมาจากการเย็นน้ำ
P	D-cracking รอยร้าวอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของน้ำสู่มวลรวมตามวัฏจักรการแข็งตัวและหลอมเหลวของน้ำในคอนกรีต

หมายเหตุ: รอยร้าวแบบ P (D-cracking) เป็นรอยร้าวที่ไม่พบเห็นในสภาวะแวดล้อมทั่วไปของประเทศไทย

ภาคผนวก 4 ตัวอย่างลักษณะความเสียหายที่พบเห็นได้บ่อยในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



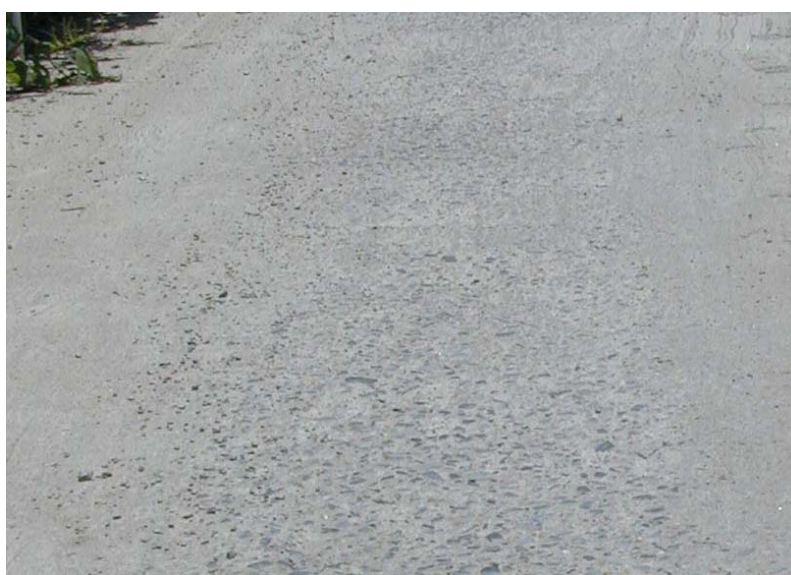
รูปที่ 2: รูปการกระแทกออกของผิวคอนกรีต



รูปที่ 3: รูปการสลายตัวของคอนกรีต



รูปที่ 4: รูปการบิดเบี้ยวหรือเคลื่อนตัวของโครงสร้าง



รูปที่ 5: การสูญเสียผิวคอนกรีตเนื่องจากการสึกกร่อน (Abrasion)



รูปที่ 6: รูปการวิบัติของวัสดุอุดรอยต่อ



รูปที่ 7: การรั่วซึมของน้ำ

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer)

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการใช้ค้อนกระแทก (Rebound Hammer) ในการวัดค่าการสะท้อน (Rebound Number) และข้อแนะนำเกี่ยวกับการแปลความหมายของผลการวัดที่ได้
- 1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

2. นิยาม

“ค้อนกระแทก” หมายถึง เครื่องมือสำหรับการทดสอบความแข็งของผิวโดยอาศัยหลักการของการสะท้อนกลับของพลังงานที่แตกต่างกันของวัตถุที่มีความแข็งของผิวต่างกัน

“ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's Hammer)” หมายถึง ค้อนกระแทกที่มีกลไกการส่งพลังงานโดยใช้พลังงานศักย์ของสปริงเป็นหลัก

“ค่าการสะท้อน” หมายถึง ค่าแสดงระดับของการสะท้อนของก้อนเหล็กในค้อนกระแทก สามารถอ่านได้จากมาตรวัดของค้อนกระแทก

“ก้อนหินขัด” หมายถึง เป็นก้อนหินที่มีผิวหยาบและมีส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์ หรือวัสดุเทียบเท่าอื่นๆ ใช้ในการเตรียมผิวโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการทำการวัดค่าการสะท้อน

“ความแข็งของผิว (Surface Hardness)” หมายถึง ความสามารถของผิววัตถุในการทนแรงกระแทก

“กำลังอัด (Compressive Strength)” หมายถึง ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ในสถานะถูกอัด

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของค้อนกระแทก

3.1 ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ มีส่วนประกอบหลัก คือ ตัวค้อนภายนอก (Body) แท่งเหล็ก (Plunger) ก้อนเหล็ก (Hammer) สปริง (Spring) สลัก (Latch) และช่องสไลด์ที่ใช้วัดระยะสะท้อนของก้อนเหล็ก (Indicator) ระยะสะท้อนของค้อนกระแทกวัดได้จากมาตราส่วนซึ่งติดกับค้อนโดยมีค่าตั้งแต่ 10 ถึง 100 เรียกว่า ค่าการสะท้อน (Rebound Number) รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบของค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's Rebound Hammer)

3.2 ก้อนหินขัด (Abrasive Stone) เป็นก้อนหินที่มีผิวหยาบและมีส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์ หรือวัสดุเทียบเท่าอื่นๆ

3.3 แท่งทดสอบ (Test Anvil) เป็นก้อนเหล็กทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 มิลลิเมตร มีความแข็งของจุดรับการกระแทกเท่ากับ Brinell 500 หรือ Rockwell 52C และมีอุปกรณ์ที่ช่วยให้ค้อนกระแทกตั้งฉากกับจุดกระแทกขณะทดสอบ

4. วิธีการใช้งานค้อนกระแทก

- 4.1 ก่อนการทดสอบ ผู้ทดสอบต้องปลดแท่งเหล็กให้หลุดจากตัวล็อก ด้วยการกดค้อนกระแทกที่คอนกรีตและค่อยๆ ผ่อนออก แท่งเหล็กจะยื่นออกมาจากตัวค้อน สลักจะยึดก้อนเหล็กให้อยู่ติดกับแท่งเหล็ก
- 4.2 ระหว่างการทดสอบให้ตั้งตัวค้อนตั้งฉากกับผิวคอนกรีตแล้วค่อยๆ กดค้อนกระแทกเข้าหาผิวคอนกรีต เมื่อค้อนกระแทกถูกกดเข้าหาผิวคอนกรีต สปริงที่ยึดระหว่างตัวค้อนและก้อนเหล็กจะยืดตัวออก และเมื่อค้อนกระแทกถูกกดจนถึงระดับหนึ่ง ตัวสลักจะปล่อยก้อนเหล็กโดยอัตโนมัติ และก้อนเหล็กจะเคลื่อนเข้ากระแทกแท่งเหล็กและสะท้อนกลับ
- 4.3 ในระหว่างที่แท่งเหล็กสะท้อน ตัวอ่านค่าจะเคลื่อนที่ไปกับก้อนเหล็กและค้างอยู่ที่ระยะมากที่สุดที่ก้อนเหล็กสะท้อน และอ่านค่าการสะท้อนได้จากมาตรวัดที่ติดอยู่กับตัวค้อน
- 4.4 ค้อนกระแทกสามารถทดสอบได้ทั้งทิศแนวนอน แนวตั้ง หรือ แนวเฉียง อย่างไรก็ตามทิศทางการทดสอบมีผลต่อแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อก้อนเหล็ก ดังนั้นการทดสอบในทิศทางแตกต่างกันจะให้ผลการทดสอบแตกต่างกัน สำหรับคอนกรีตชนิดเดียวกัน และต้องปรับให้ถูกต้องด้วยการคูณค่าสัมประสิทธิ์หรือ อ่านค่าจากตารางของแต่ละทิศทาง
- 4.5 โดยทั่วไปตารางหรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสะท้อน (Rebound Number) จะเป็นไปตามผลการทดสอบของผู้ผลิตค้อนกระแทก อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดที่ได้จากกราฟอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ เช่น มวลรวมในโครงสร้างที่ตรวจสอบ และคอนกรีตที่ผู้ผลิตค้อนกระแทกทดสอบในห้องปฏิบัติการแตกต่างกัน ดังนั้นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสะท้อนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประเภทเดียวกับคอนกรีตที่ทำการทดสอบในโครงสร้าง จะช่วยให้การประเมินผลการตรวจสอบเป็นไปด้วยความแม่นยำกว่า โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสะท้อน (Rebound Number) ดังต่อไปนี้
- (1) เตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีช่วงครอบคลุมกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่ตรวจสอบ โดยมีจำนวนตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละช่วงกำลังอัดของคอนกรีต
 - (2) หลังจากการเตรียมผิวให้เรียบ (Capping) นำตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต และเพิ่มแรงกดตัวอย่างทดสอบให้มีค่าประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัดประลัย เพื่อยืดรั้งตัวอย่างทดสอบให้อยู่นิ่ง ตัวอย่างทดสอบต้องอยู่ในสภาพอึดตัวผิวแห้งในขณะทดสอบ
 - (3) วัดค่าการสะท้อน 15 ครั้ง โดยแบ่งตำแหน่งทดสอบเป็นแนวตั้ง 3 แนว และทดสอบ 5 ครั้งต่อแนว โดยแต่ละแนวให้ห่างกันเป็นมุม 120 องศา ตำแหน่งการกดควรอยู่ในระยะ 200 มิลลิเมตร บริเวณช่วงกลางของตัวอย่างทดสอบ หรือประมาณ 2 ใน 3 ของความสูงของแท่งตัวอย่างทดสอบ และต้องไม่ทดสอบซ้ำตำแหน่งเดียวกัน
 - (4) เฉลี่ยค่าการสะท้อนที่ได้ และค่าเฉลี่ยจะเป็นค่าการสะท้อนของตัวอย่างทดสอบ

- (5) ให้ดำเนินการขั้นตอน 1 – 4 กับตัวอย่างทดสอบอื่น
- (6) ทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีต และบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบลงในกราฟ
- (7) วิเคราะห์ผลและสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการสะท้อนและกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Technique) เป็นต้น

5. ขั้นตอนการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยการใช้ก้อนกระแทก

- 5.1 ทำการกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าการสะท้อน โดยควรเป็นบริเวณผิวคอนกรีตที่ไม่มีรอยแตก ร้าว หรือการกะเทาะออกของผิวคอนกรีต และทำการขีดผิวคอนกรีตให้เรียบด้วยก้อนหินขัด
- ข้อแนะนำ 5.1: ในกรณีที่โครงสร้างมีชั้นปูนฉาบให้ทำการสกัดชั้นปูนฉาบออกก่อนทำการขีดผิวคอนกรีตให้เรียบด้วยหินขัด
- 5.2 ตรวจสอบแท่งเหล็กของก้อนกระแทกให้ยื่นในลักษณะพร้อมทดสอบ
- 5.3 จับก้อนกระแทกอย่างมั่นคงให้แกนของก้อนกระแทกตั้งฉากกับผิวคอนกรีต
- 5.4 ค่อยๆ กดก้อนกระแทกเข้าหาผิวคอนกรีต จนกระทั่งมีการสะท้อนของก้อนเหล็กภายในก้อนกระแทก แท่งเหล็กจะถูกล็อกโดยอัตโนมัติ
- 5.5 อ่านค่าการสะท้อน (Rebound Number) จากมาตรวัดของก้อนกระแทก โดยให้อ่านค่าจำนวนเต็มที่ใหญ่ที่สุด
- 5.6 ตำรวจดูความเสียหายของผิวคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกระแทกของก้อนกระแทก กรณีพบความเสียหายอันเนื่องได้มาจากข้อบกพร่องของคอนกรีต ณ บริเวณที่ทดสอบ เช่น ฟองอากาศขนาดใหญ่ เป็นต้น ให้บันทึกรายละเอียดเพิ่มเติม หรือยกเลิกการใช้ค่าการสะท้อนที่วัดได้ ณ ตำแหน่งนี้
- 5.7 บันทึกค่าการกระแทกที่วัดได้ และทดสอบจุดต่อไป โดยให้มีระยะห่างระหว่างจุดที่ทดสอบไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

การทดสอบคอนกรีตด้วยก้อนกระแทก เป็นวิธีการที่รวดเร็วและสะดวกในการทดสอบวัดกำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัดและมีผลกระทบจากตัวแปรหลายประการซึ่งผู้ดำเนินการตรวจสอบจำเป็นต้องคำนึงถึง ได้แก่ ความขรุขระของผิวโครงสร้าง ขนาดและความแข็งแกร่งของโครงสร้าง (Rigidity) อายุของตัวอย่างทดสอบ ประเภทของมวลรวม ประเภทของซีเมนต์ และคาร์บอนเนชันของผิวคอนกรีต (Carbonation)

- 6.1 ลักษณะของผิวคอนกรีต มีผลต่อการสะท้อนของคอนกรีต จึงกระทบโดยตรงต่อผลการทดสอบคอนกรีตด้วยก้อนกระแทก กรณีผิวคอนกรีตขรุขระมากแท่งเหล็กของก้อนกระแทกอาจกระแทกและทำให้ผิวคอนกรีตแตก ค่าการสะท้อนที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นก่อนการทดสอบผิวโครงสร้างคอนกรีตที่มีความขรุขระควรขัดให้เรียบด้วยก้อนหินขัด

- 6.2 ขนาดของโครงสร้างที่ทดสอบ รวมถึงความแข็งแรง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดค่าการสะท้อน กรณีโครงสร้างที่ตรวจสอบมีขนาดเล็ก การเคลื่อนที่ของโครงสร้างระหว่างการกระทบจะทำให้ค่าการสะท้อนที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยลงกว่าความเป็นจริง ระหว่างการตรวจสอบอาจจำเป็นต้องถ่วงหรือยึดโครงสร้างดังกล่าวให้มีความแข็งแรงมากขึ้น
- 6.3 เนื่องจากวิธีการทดสอบด้วยค้อนกระทบเป็นวิธีการวัดความแข็งแรงของผิวคอนกรีต จึงไม่เหมาะสำหรับการวัดคอนกรีตที่มีอายุน้อยมากๆ ซึ่งยังไม่มีแข็งแรงเพียงพอ นอกจากนี้การใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนและกำลังอัดที่อายุ 28 วันนั้นอาจจะไม่เหมาะกับการตรวจสอบโครงสร้างที่มีอายุมากๆ และควรมีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนที่ได้จากโครงสร้างและค่ากำลังอัดที่ได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างในกรณีดังกล่าว
- 6.4 ประเภทของมวลรวม และปูนซีเมนต์ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทดสอบ โครงสร้างคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ โดยทั่วไปแล้วค่าการสะท้อน (Rebound Number) ของคอนกรีตที่มีมวลรวมเป็นหินปูน (Limestone) จะมีค่าน้อยกว่าค่าการสะท้อนของคอนกรีตที่มีมวลรวมเป็นหินแม่น้ำซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากัน ความแตกต่างนี้จะมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) กับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้การใช้หินชนิดเดียวกันจากแหล่งอาจส่งผลให้ค่าการสะท้อนของคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากันมีค่าแตกต่างกันได้
- 6.5 ประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้อาจส่งผลต่อค่าการสะท้อนที่วัดได้ โดยปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณอูมินาสูงนั้นอาจมีกำลังอัดที่แท้จริงมากกว่าค่าที่แปรผลจากการกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสะท้อน (Rebound Number) ที่ได้จากการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ดังนั้นจึงควรมีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสะท้อน (Rebound Number) สำหรับประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้เพื่อการประเมินกำลังอัดที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ
- 6.6 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในคอนกรีตมีผลกระทบต่อค่าการสะท้อนอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่อยู่ในเขตการจราจรหนาแน่นและมีอายุการใช้งานมานาน อาจมีความลึกของชั้นที่เกิดคาร์บอนชั่นในคอนกรีตไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร ค่าการสะท้อนที่ได้นั้นอาจจะมีค่ามากเกินไปได้ถึงร้อยละ 50 ซึ่งต้องมีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสะท้อน (Rebound Number) สำหรับคอนกรีตที่มีคาร์บอนชั่นสูงเป็นการเฉพาะ

7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ

- 7.1 ให้เฉลี่ยค่าการกระทบที่ทดสอบได้อย่างน้อย 10 ตำแหน่ง และตัดค่าการกระทบที่มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยมากกว่า 6 และเฉลี่ยค่าที่เหลือใหม่ หากมีค่าตั้งแต่สามค่าขึ้นไปที่ต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 ให้ทดสอบค่าชุดใหม่
- 7.2 นำค่าการกระทบที่ได้เทียบเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีต ตามความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

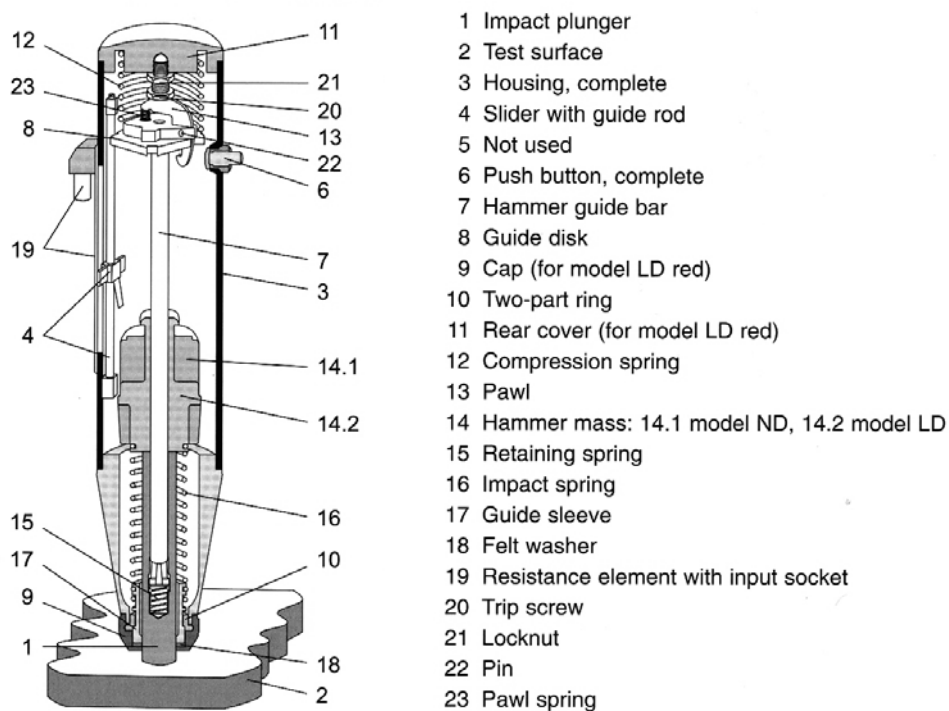
ข้อแนะนำ 7. หากโครงสร้างที่ทำการวัดมีความแข็งแรงน้อย เช่น เป็นโครงสร้างที่บางมากหรือ ไม่มีการยึดกับโครงสร้างข้างเคียงอย่างเพียงพอ การเทียบค่าการกระแทกเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีความคลาดเคลื่อนสูง ในกรณีดังกล่าวผู้ทดสอบสามารถทำได้เพียงเปรียบเทียบความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของความแข็งแรงของคอนกรีตในบริเวณที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกันเท่านั้น

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 C805-02 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete
- 8.4** BS EN 12504-2:2001 Testing Concrete in Structures. Non-Destructive Testing. Determination of Rebound Number
- 8.5** BS 1881 - 202: 1986, Testing Concrete. Recommendations for Surface Hardness Testing by Rebound Hammer

ภาคผนวก 1 ค้อนกระแทกแบบสมิทท์

- (1) ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ คิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1948 โดยวิศวกรชาวสวิส ชื่อ เอิร์น สมิทท์ ค้อนกระแทก (Rebound Hammer) เป็นเครื่องมือทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลายซึ่งเป็นที่นิยมในการวัดกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากความรวดเร็วในการทดสอบ และราคาที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการทดสอบ ค้อนกระแทกเป็นเครื่องวัดความแข็งของผิวคอนกรีต ค่ากำลังอัดที่ได้แปลงมาจากค่าความแข็งของผิวคอนกรีตซึ่งได้จากความสัมพันธ์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในปัจจุบันค้อนกระแทกที่ได้รับความนิยมกว้างขวางที่สุด คือ ค้อนกระแทกแบบสมิทท์
- (2) รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบโดยละเอียดของค้อนกระแทกแบบสมิทท์ ซึ่งรวมถึงส่วนประกอบหลักของ ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.1

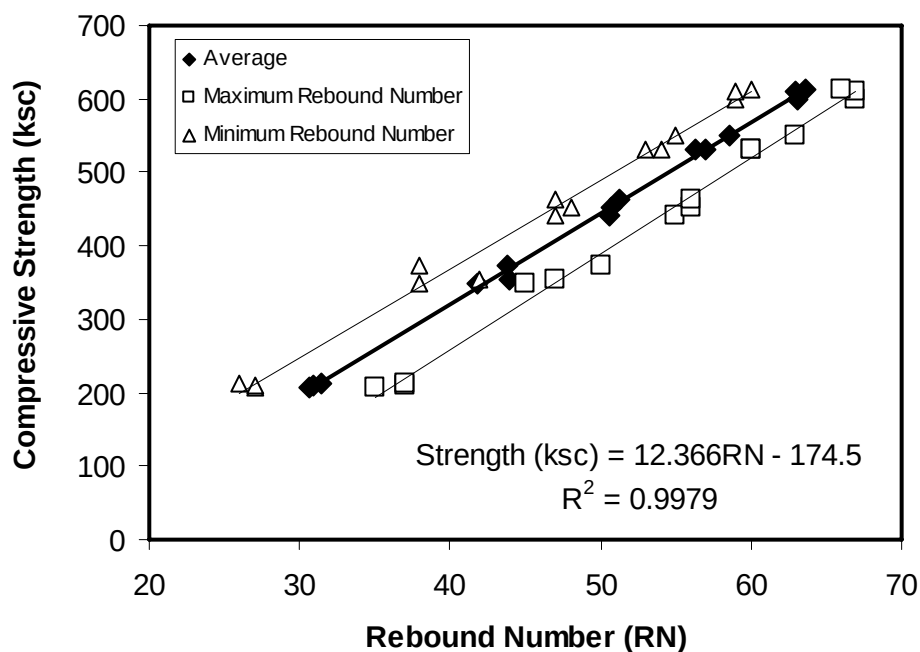


รูปที่ 1: ตัวอย่างส่วนประกอบของค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's Rebound Hammer)

(ภาคผนวก 1 (2))

ภาคผนวก 2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนและกำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและค่าการสะท้อนที่วัดได้จากตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 15 ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในข้อที่ 4.5 โดยตัวอย่างทดสอบครอบคลุมกำลังอัดตั้งแต่ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและค่าการสะท้อนออกมาเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น



รูปที่ 2: ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนและกำลังอัดของคอนกรีต
ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
(ภาคผนวก 3)

หมายเหตุ: รูปที่ 2 เป็นเพียงตัวอย่างการสร้างความสัมพันธ์ซึ่งสามารถใช้ได้เฉพาะกับส่วนประกอบของคอนกรีตที่ทำการทดสอบเท่านั้น

ภาคผนวก 3 แบบฟอร์มบันทึกผลการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

โครงการ:		บพ. มยผ. 1502-1										ทะเบียนทดสอบ:		แผ่นที่			
สถานที่:		(หน่วยงานที่ทำการทดสอบ)										ผู้ทดสอบ:					
ชนิดโครงสร้าง:		การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก															
ตำแหน่ง:		วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีต										ผู้ประเมินผล:					
วันที่ทดสอบ:		ด้วยค้อนกระทบ										ผู้ตรวจสอบ:					
ลำดับ ที่	ตำแหน่งที่ ทำการทดสอบ	มุม ทดสอบ (องศา)	ค่าการสะท้อน (Rebound Index)										ค่าเฉลี่ย (1)	ค่าเฉลี่ย ปรับแก้ (2)	ค่าเฉลี่ย ปรับแก้ เครื่องมือ (3)	ค่ากำลังอัด ประสัเทียบเท่า (เมก้าปาสกาล)	หมายเหตุ
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
			ค่าเฉลี่ย														

หมายเหตุ: (1) ค่าเฉลี่ย หมายถึง ค่าเฉลี่ยของการสะท้อนทั้ง 10 ค่า (2) ค่าเฉลี่ยปรับแก้ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน มยผ. 1502-51

(3) ค่าเฉลี่ยปรับแก้เครื่องมือของเครื่องมือทดสอบ [ค่าปรับแก้ตามคู่มือทดสอบ (Adjusting Coef.) =]

(4) ค่ากำลังอัดประสัเทียบเท่าคำนวณได้จากค่าการสะท้อนที่ทดสอบได้ (3) ตามความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดประสัที่สร้างขึ้นสำหรับแต่ละโครงการ

(5) ดำเนินการทดสอบ ตามมาตรฐาน มยผ. 1502-51 (6) ผลการทดสอบที่ได้จากค้อนกระทบ เป็นค่า โดยประมาณเท่านั้นควรใช้ควบคู่กับการทดสอบอื่นๆ ที่เชื่อถือได้

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

วิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวยิงทดสอบ

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการประเมินความสามารถต้านทานการทะลุ (Penetration Resistance) ของโครงสร้างคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวยิงทดสอบ และข้อแนะนำเกี่ยวกับการแปลความหมายของผลการวัดที่ได้
- 1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

2. นิยาม

- “ความแข็งของผิว (Surface Hardness)” หมายถึง ความสามารถของผิววัตถุในการทนแรงกระแทก
- “กำลังอัด (Compressive Strength)” หมายถึง ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่วัตถุสามารถรับได้ในสถานะถูกอัด
- “ความต้านทานการทะลุ (Penetration Resistance)” หมายถึง ความสามารถของวัตถุในการป้องกันการทะลุของวัตถุอื่น
- “หัวยิงทดสอบ (Probe)” หมายถึง แท่งโลหะอัลลอยที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นโคนซึ่งสามารถทะลุเข้าไปในคอนกรีตและปักอยู่ได้โดยไม่มีการเสียรูปทรง และปลายอีกข้างหนึ่งมีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อให้สามารถวัดระยะทะลุและดึงหัวยิงทดสอบออกจากโครงสร้างคอนกรีตได้โดยสะดวก
- “ระยะทะลุ (Penetration Depth)” หมายถึง ความยาวระยะฝังลึกของวัตถุหนึ่งซึ่งถูกยิงเข้าไปในวัตถุอีกวัตถุหนึ่ง โดยวัดจากผิวของวัตถุที่ถูกยิง

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องยิงหัวยิงทดสอบ

- 3.1 หัวยิงทดสอบ คือ แท่งโลหะอัลลอยที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นโคนที่ซึ่งสามารถทะลุเข้าไปในคอนกรีตและปักอยู่ได้โดยไม่มีการเสียรูปทรง และปลายอีกข้างหนึ่งมีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อให้สามารถวัดระยะทะลุและดึงหัวยิงทดสอบออกจากโครงสร้างคอนกรีตด้วยเครื่องมือเฉพาะได้โดยสะดวก นอกจากนี้หัวยิงทดสอบควรมีความยาวคงที่ หรือแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยปรกติจะมีความแข็งแรงอยู่ในช่วงระหว่าง Rockwell 44 HRC และ 48 HRC
- 3.2 เครื่องยิงหัวยิงทดสอบเป็นอุปกรณ์ที่สามารถส่งผ่านพลังงานไปให้กับหัวยิงทดสอบได้อย่างคงที่ทุกครั้ง โดยให้ค่าความเร็วของ หัวยิงทดสอบ แตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 3 นอกจากนี้เครื่องยิงต้องมีกลไกป้องกันการยิงหัวยิงทดสอบโดยมิได้ตั้งใจเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ

3.3 อุปกรณ์ยึดตำแหน่งเครื่องยิงทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งและทิศทางการยิงของหัวยิงทดสอบ โดยเครื่องยิงหัวยิงทดสอบต้องถูกยึดกับโครงสร้างคอนกรีตอย่างมั่นคงโดยระดับของการยึดขึ้นอยู่กับพลังงานของเครื่องยิงหัวยิงทดสอบที่ใช้

3.4 ชุดอุปกรณ์วัดระยะทะเลว ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดความยาวที่มีความแม่นยำในระดับ 0.5 มิลลิเมตร และต้องมีช่วงการวัดที่เหมาะสมกับผลการทดสอบ และแผ่นเหล็กอ้างอิงที่ถูกยึดอยู่กับผิวคอนกรีตไม่น้อยกว่า 3 จุด ทุกจุดต้องอยู่ห่างจากกันเท่าๆกัน และอยู่ห่างจากจุดที่จะทำการยิงหัวยิงทดสอบไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร

4. วิธีการใช้งานเครื่องยิงหัวยิงทดสอบ

4.1 คอนกรีตที่จะทดสอบด้วยวิธีการยิงหัวยิงทดสอบ ต้องมีความต้านทานการทะลุมากพอที่จะทำให้ ความลึกของแท่งเหล็กที่ทะลุเข้าไปในคอนกรีตนั้น ไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาของโครงสร้าง และไม่เกินความยาวของแท่งเหล็ก นอกจากนี้แท่งเหล็กต้องปักติดกับคอนกรีตอย่างมั่นคงภายหลังทดสอบเพื่อ บันทึกผลได้อย่างแม่นยำ

4.2 ตำแหน่งของการยิงหัวยิงทดสอบแต่ละจุดจะต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 175 มิลลิเมตร

4.3 ตำแหน่งของการยิงหัวยิงทดสอบจะต้องห่างจากขอบของโครงสร้างไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร

4.4 การประเมินกำลังอัดของคอนกรีตจากระยะทะเลวของหัวยิงทดสอบต้องเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะเลวของหัวยิงทดสอบและกำลังอัดของคอนกรีตสามารถวัดได้ในห้องปฏิบัติการตามขั้นตอนดังนี้

(1) เตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร หรือตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150 มิลลิเมตร และแผ่นคอนกรีตตัวอย่างขนาด 600 x 600 x 200 มิลลิเมตร โดยใช้ชนิดของซีเมนต์และมวลรวมที่เหมือนกับโครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบจริงและเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมให้มีช่วงที่ครอบคลุมกำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างที่ตรวจสอบ

(2) ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจากตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก หรือตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ตามมาตรฐาน ASTM C42

(3) ทำการทดสอบหาค่าระยะทะเลวของแผ่นคอนกรีตตัวอย่างจนได้ค่าการทะลุอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยให้ระยะห่างของจุดทดสอบแต่ละครั้งห่างจากกัน และห่างจากขอบตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 150 มิลลิเมตร หากหัวยิงทดสอบไม่ยึดติดกับตัวอย่างทดสอบอย่างมั่นคงให้ทำการทดสอบเพิ่มเติม

(4) ดำเนินการขั้นตอนที่ 1 – 3 กับตัวอย่างทดสอบที่มีสัดส่วนผสมอื่นๆ อย่างน้อย 3 ชุด

(5) บันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบลงในกราฟและสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการทะลุและกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Technique) เป็นต้น

หมายเหตุ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและกำลังอัดของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของหัวหยั่งทดสอบ พลังงานที่เครื่องยิงส่งผ่านไปที่หัวหยั่งทดสอบ ดังนั้นการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและกำลังอัดของคอนกรีตจึงต้องใช้ขนาดของหัวหยั่งทดสอบ และพลังงานที่เท่ากับการวัดโครงสร้างจริง

5. ขั้นตอนการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ

5.1 ติดตั้งอุปกรณ์ยิงหัวหยั่งคอนกรีต ตามคู่มือการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบ ต้องระมัดระวังมิให้หัวหยั่งทดสอบถูกยิงออกมาโดยมิได้ตั้งใจ และต้องยึดเครื่องยิงไว้อย่างมั่นคง

หมายเหตุ 5.1: หากคอนกรีตที่ต้องการทำการทดสอบมีกำลังอัดต่ำกว่า 17 เมกะปาสกาล หรือมีความหนาแน่นน้อยกว่า 2000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้ลดพลังงานที่เครื่องยิงส่งผ่านไปที่หัวหยั่งทดสอบ หรือเพิ่มขนาดของหัวหยั่งทดสอบ และเพิ่มระยะห่างจากตัวยิงและจุดที่ต้องการทดสอบโดยขั้นตอนที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้เครื่องมือ

5.2 ยิงหัวหยั่งคอนกรีต เข้าไปในโครงสร้างคอนกรีต

5.3 นำอุปกรณ์ยิงหัวหยั่งทดสอบออก และทำการเคาะหัวหยั่งคอนกรีตเบาๆเพื่อทำการยืนยันว่าหัวหยั่งคอนกรีตไม่ได้สะท้อนออกมาจากระยะทะลุลึกสุดที่เข้าไปได้ หากหัวหยั่งทดสอบไม่ยึดอยู่กับโครงสร้างคอนกรีตอย่างมั่นคงให้ยกเลิกผลการทดสอบดังกล่าว

หมายเหตุ 5.3: หากหัวหยั่งทดสอบไม่ยึดอยู่กับ โครงสร้างอย่างมั่นคงผู้ตรวจสอบอาจพิจารณาเพิ่มพลังงานในการยิง

5.4 หากหัวหยั่งทดสอบยึดอยู่กับโครงสร้างอย่างมั่นคง ให้ทำการติดตั้งแผ่นเหล็กอ้างอิง หากผิวของโครงสร้างมีการกะเทาะออกเนื่องจากการทะลุของหัวหยั่งทดสอบให้เอาคอนกรีตส่วนที่กะเทาะดังกล่าวออกก่อนการติดตั้งแผ่นเหล็กอ้างอิง

5.5 ทำการวัดระยะจากแผ่นเหล็กอ้างอิงถึงปลายของหัวหยั่งทดสอบที่ยื่นมาจากโครงสร้าง โดยต้องทำการวัดระยะทะลุอย่างน้อย 3 ครั้ง หากหัวหยั่งทดสอบอยู่ในลักษณะเอียง ให้ทำการทดสอบคอนกรีตบริเวณดังกล่าวเพิ่มเติมอีก 4 ครั้งรอบจุดที่ทำการวัดเดิมและทำการเฉลี่ยระยะทะลุที่วัดได้

5.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานการทะลุที่ได้กับความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุและกำลังอัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ดังระบุไว้ในหัวข้อ 4.2

5.7 ซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากการยิงหัวหยั่งทดสอบ ด้วยวิธีการที่เหมาะสม

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

- 6.1 วิธีการทดสอบคอนกรีตด้วยการยิงหัวหยั่งทดสอบนี้จะทำให้บริเวณผิวคอนกรีตได้รับความเสียหายและจำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมในภายหลัง
- 6.2 ตำแหน่งของการยิงและตำแหน่งของมวลรวมหยาบที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีตมีผลต่อค่าการทะลุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่ จะต้องเลือกเครื่องมือให้เหมาะสมกับคอนกรีตในโครงสร้าง
- 6.3 ช่องว่างในคอนกรีตที่เกิดจากฟองอากาศส่งผลให้ค่าการทะลุที่วัดได้มีค่ามากเกินไป ดังนั้นจึงควรสำรวจลักษณะของรูที่เกิดจากการยิงโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีค่าการทะลุที่ได้แตกต่างจากค่าอื่นมาก เพื่อประกอบการสรุปผล
- 6.4 ในกรณีที่ทำการทดสอบโครงสร้างที่มีลักษณะบาง หรือมีความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป เช่น คอนกรีตที่มีอายุน้อยกว่า 7 วันหรือคอนกรีตมวลเบา จะต้องมีการปรับพลังงานในการยิงให้เหมาะสมกับโครงสร้างนั้น ๆ และต้องใช้กราฟความสัมพันธ์สำหรับการแปลผลโดยเฉพาะ

7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ

ค่าการทะลุที่วัดได้จากคอนกรีตเดียวกันต้องต่างกันไม่เกิน ค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 หากค่าการทะลุที่วัดได้ในชุดการวัดเดียวกันแตกต่างกันเกินกว่านี้ ให้ทดสอบเพิ่มเติมและหาค่าการทะลุที่มีความแตกต่างมากที่สุดออก

ตารางที่ 1: ข้อกำหนดเกี่ยวกับความแม่นยำของการวัดระยะทะลุ

(หัวข้อ 7.1)

ขนาดมวลรวม ใหญ่สุด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความแตกต่างมากสุดในหนึ่งชุด ข้อมูลที่ยอมให้ได้ (มม.)	ความแตกต่างมากที่สุดระหว่างชุด ข้อมูลต่างกันที่ยอมให้ได้ (มม.)
No. 4 (มอร์ตาร์)	2.0 มม.	6.6 มม.	3.3
25 มม.	2.5 มม.	8.4 มม.	4.1
50 มม.	3.6 มม.	11.7 มม.	5.6

หมายเหตุ:

- ตารางที่ 1 เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับความแม่นยำของการวัดระยะทะลุในกรณีที่ผู้ทดสอบเป็นคนเดียวกัน
- หลักที่ 3 หมายถึงความแตกต่างมากที่สุดที่ยอมให้ได้ในชุดข้อมูลเดียวกัน (3 ค่าระยะทะลุ)
- ความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลที่มีมากกว่าค่าที่กำหนดในหลักที่ 4 แสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะมีความแตกต่างของคอนกรีตที่ทำการวัดแต่ละครั้ง

ที่มา : มาตรฐาน ASTM C803/C803M-97

8. เอกสารอ้างอิง

8.1 ACI 224.1R-03 In-Place Methods to Estimate Concrete Strength – Report by ACI Committee 228.

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 C803/C803M-97 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete

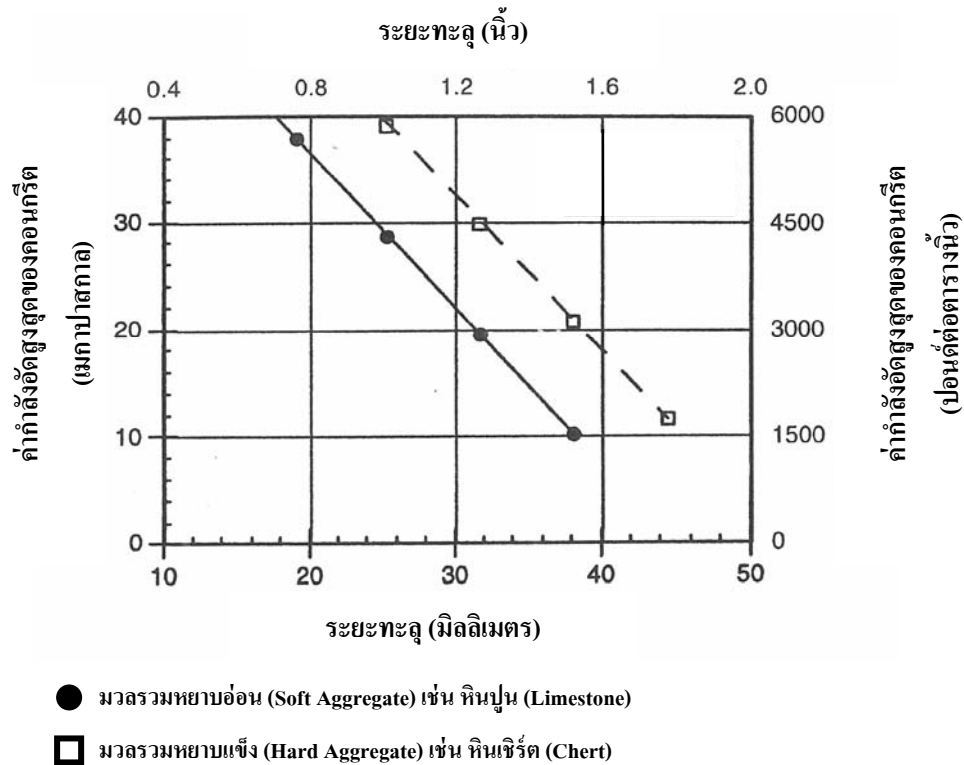
8.4 BS 1881 - 207: 1992 Testing Concrete. Recommendations for the Assessment of Concrete Strength by Near-to-Surface Tests

ภาคผนวก 1 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมของการทดสอบ

1. หลักการของวิธีการยิงด้วยหัวหยังทดสอบ คือ การให้พลังงานระดับคงที่จากเครื่องยิงไปยังแท่งเหล็ก เพื่อให้เจาะทะลุเข้าไปในผิวคอนกรีต เพื่อตรวจสอบความต้านทานการทะลุของคอนกรีต (Penetration Resistance) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความยาวของแท่งเหล็กที่ทะลุเข้าไปในคอนกรีต หรือ ความลึกของรูที่เกิดจากการเจาะจากผิวคอนกรีต
2. การทดสอบความต้านทานการทะลุของคอนกรีตด้วยหัวหยังทดสอบ สามารถใช้ประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยมีสมมติฐานว่าความต้านทานการทะลุของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแตกต่างกันไปสำหรับอุปกรณ์การทดสอบแต่ละแบบ และต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการทะลุของคอนกรีต ที่วัดได้จากเครื่องยิงหัวหยังทดสอบกับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต
3. หัวหยังทดสอบ แท่งเหล็ก หรือ หัวเจาะเหล็กที่ถูกยิงเข้าไปในคอนกรีต อาจกระทบจุดที่มีมวลรวมหยาบหรือบริเวณอื่นก็ได้ ดังนั้นค่าความต้านทานการทะลุของคอนกรีตที่วัดได้จึงกระจายตัวค่อนข้างมาก และขึ้นอยู่กับสมบัติของมวลรวมหยาบที่อยู่ในคอนกรีตด้วย

ภาคผนวกที่ 2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต จากผลทดสอบ ในกรณีมวลรวมหยาบอ่อน กับมวลรวมหยาบแข็ง



รูปที่ 1 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต

(ภาคผนวก 2)

ที่มา: ACI 228.1R-03 Figure 2.4

หมายเหตุ: ในการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตจากระยะทะลุของหัวหยั่งทดสอบ ควรพิจารณาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุของหัวหยั่งทดสอบและกำลังอัดของคอนกรีตเฉพาะสำหรับโครงการแต่ละโครงสร้างเพื่อให้มีความแม่นยำในการตรวจสอบค่ากำลังอัด

ภาคผนวก 3 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ

โครงการ: สถานที่: ชนิดโครงสร้าง: ตำแหน่ง: วันที่ทดสอบ:			บพ. มยผ. 1503			ทะเบียนทดสอบ:..... หน้าที่/.....		
			(หน่วยงานที่ทำการทดสอบ)			ผู้ทดสอบ:		
			การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีต ด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ			ผู้ประเมินผล:		
						ผู้ตรวจสอบ:		
ลำดับ ที่	ชนิด โครงสร้าง	ตำแหน่ง ที่ทดสอบ	ค่าการทะลุที่ทดสอบได้ (มม.)			ค่าเฉลี่ย (มม.) (2)	ค่ากำลังอัดสูงสุด ของคอนกรีต โดยประมาณ (เมกะปาสกาล) (3)	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			

- หมายเหตุ:
- (1) ค่าการทะลุที่ทดสอบได้ โดยให้ทดสอบอย่างน้อย 3 จุด
 - (2) ค่าเฉลี่ยจากค่าการทะลุที่ทดสอบได้
 - (3) กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตโดยประมาณ ซึ่งประเมินจากค่าการทะลุที่ทดสอบได้

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)

1. ขอบเขต

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการประเมินสภาพของคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีต และกำหนดข้อแนะนำเกี่ยวกับการแปลความหมายของผลการวัดที่ได้
- 1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

2. นิยาม

- “คลื่น (Wave)” หมายถึง ลักษณะเฉพาะของการถ่ายโอนพลังงานรูปแบบต่างๆ จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้ายการรบกวนสภาวะเริ่มต้นของตัวกลาง
- “คลื่นดล (Pulse Wave)” หมายถึง คลื่นเดี่ยวที่มีระยะเวลาการเกิดคลื่นไม่มากกว่า 1 คาบของคลื่นนั้นๆ
- “คลื่นกล (Mechanical Wave)” หมายถึง คลื่นที่ส่งพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยการถ่ายโอนพลังงานกลของอนุภาค การเคลื่อนที่ของคลื่นชนิดนี้จึงจำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่
- “คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Wave)” หมายถึง คลื่นกลที่มีความถี่สูงจนเกินความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน (ความถี่มากกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์)
- “ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)” หมายถึง ระยะทางที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ในหนึ่งหน่วยเวลา
- “ความคงที่ของสมบัติ (Uniformity)” หมายถึง การที่คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ มีค่าเหมือนกันหมดทุกจุด

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก

- 3.1 ตัวกำเนิดคลื่น (Pulse Generator) ซึ่งประกอบด้วยวงจรสำหรับกำเนิดคลื่นดลของความต่างศักย์ไม่น้อยกว่า 3 คลื่นต่อวินาที
- 3.2 ตัวส่งสัญญาณ (Transmitting Transducer) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นความต่างศักย์เป็นคลื่นกลที่มีความถี่สูง (30 ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์) โดยตัวส่งสัญญาณนั้นมีส่วนประกอบหลักเป็นผลึกแร่ที่มีปฏิกิริยาทางกลกับความดันไฟฟ้า (Piezoelectric Material) และสร้างคลื่นดลแรก (Triggering Pulse) เพื่อเป็นสัญญาณเริ่มต้นของวงจรควบคุมเวลา
- 3.3 ตัวรับสัญญาณ (Receiving Transducer) ที่มีส่วนประกอบเหมือนกับตัวส่งสัญญาณ แต่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนคลื่นกลกลับเป็นคลื่นสัญญาณไฟฟ้า
- 3.4 ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายขนาดของสัญญาณ ให้มีความชัดเจนต่อการวิเคราะห์สัญญาณ โดยมีอัตราส่วนขยายสัญญาณคงที่ไม่เกิน 3 เท่าของสัญญาณดิบที่วัดได้

- 3.5 วงจรควบคุมเวลา (Time-Measuring Circuit) ซึ่งทำหน้าที่สร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ตรวจรับได้กับเวลาที่เริ่มต้นส่งสัญญาณ โดยเวลาเริ่มต้นจะอ้างอิงกับคลื่นคลแรกซึ่งเป็นคลื่นที่เกิดภายในส่วนประมวลผล วงจรควบคุมเวลาเป็นตัวแทนผลเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ วงจรควบคุมเวลานี้ควรใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 40 องศาเซลเซียสได้โดยไม่มีความคลาดเคลื่อน
- 3.6 หน่วยแสดงผล (Display Unit) ของเครื่องทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมี 2 รูปแบบหลักคือ แบบแสดงผลเป็นตัวเลข และแบบแสดงผลเป็นคลื่นที่ตัวรับสัญญาณตรวจจับได้
หมายเหตุ: การแสดงผลเป็นตัวเลขเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากใช้งานง่าย ในขณะที่อุปกรณ์แสดงผลเป็นรูปคลื่น ช่วยให้ศึกษาอัตราการสูญเสียพลังงานของคลื่นกลในตัวกลางได้ แต่มีขั้นตอนการใช้ที่ยากกว่ามาก
- 3.7 แท่งอ้างอิง (Reference Bar) เป็นของแข็งที่มีความยาวคงที่และให้ค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกคงที่ ทำให้เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เคลื่อนที่ผ่านแท่งอ้างอิงมีค่าคงที่ แท่งอ้างอิงใช้เพื่อปรับแก้การตั้งค่าของเครื่องวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก
- 3.8 สายส่งสัญญาณ (Connecting Cables) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างตัวรับสัญญาณ หรือตัวส่งสัญญาณกับส่วนประมวลผล โดยสายส่งสัญญาณต้องมีคุณภาพสูง และทำให้คลื่นสูญเสียพลังงานน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีทดสอบโครงสร้างขนาดใหญ่
- 3.9 วัสดุเชื่อมสัญญาณ (Coupling Agent) เป็นวัสดุที่มีความหนืดสูง ซึ่งใช้เพื่อส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกจากตัวส่งสัญญาณไปยังคอนกรีต หรือ จากคอนกรีตมายังตัวรับสัญญาณ โดยไม่สูญเสียพลังงาน กลไกหลักของวัสดุเชื่อมสัญญาณคือการแทนที่ช่องว่าง (อากาศ) ตรงผิวสัมผัสระหว่างตัวรับส่งสัญญาณ และผิวคอนกรีต

4. วิธีการใช้งานเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก

- 4.1 เครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น เริ่มต้นโดยการแนบตัวส่งสัญญาณ และตัวรับสัญญาณเข้าด้วยกันและตั้งค่าเวลาที่ใช้เดินทางให้เป็นศูนย์ ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้เครื่องมือ
- 4.2 การตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิกกับแท่งอ้างอิงหลังจากการตั้งค่าเริ่มต้น เครื่องอัลตราโซนิกควรได้รับการทดสอบกับแท่งอ้างอิงว่า ค่าระยะเวลาการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกต้องเท่ากับค่าที่ระบุไว้กับแท่งอ้างอิง
- 4.3 เครื่องอัลตราโซนิกควรได้รับการตรวจการตั้งค่าเริ่มต้นและตรวจสอบความแม่นยำทุกครั้งก่อนเริ่มการทดสอบจริง (แต่ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบทุกครั้งสำหรับการวัด) และควรตรวจสอบเป็นระยะๆ ทุกชั่วโมงในการตรวจสอบโครงสร้างที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

5. ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

5.1 เลือกจุดที่จะทำการทดสอบจริงในโครงสร้าง โดยให้ห่างจากเหล็กเสริมพอที่จะทำให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกไม่ได้รับผลกระทบจากเหล็กเสริม ควรวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านเนื้อคอนกรีตในกรณีที่ทำได้ และระยะห่างระหว่างตัวส่งสัญญาณ กับตัวรับสัญญาณไม่ควรห่างกันน้อยเกินไป

ข้อแนะนำ 5.1: ระยะห่างระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 100 มิลลิเมตร ถึง 300 มิลลิเมตร

5.2 บันทึกระยะห่างระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ

5.3 ทาวัสเชื่อมสัญญาณลงบนผิวคอนกรีต ณ จุดที่ต้องการทดสอบ

5.4 แนบตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณกับโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ กดให้ไม่มีช่องว่างระหว่างผิวโครงสร้างและตัวรับส่งสัญญาณ

5.5 วัดระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางระหว่างตัวรับและตัวส่ง และบันทึกค่า

5.6 คำนวณความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกจากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของตัวรับกับตัวส่งสัญญาณ และเวลาการเดินทางที่วัดได้

5.7 วัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ณ จุดอื่นๆ ในโครงสร้างและบันทึกเพื่อเปรียบเทียบ

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

6.1 ปริมาณความชื้นภายในคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการทดสอบเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในเนื้อคอนกรีต โดยความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่แห้งอยู่ประมาณร้อยละ 5 และการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวจะมีความเปลี่ยนแปลงเชิงเปรียบเทียบน้อยกว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้ง

6.2 ขนาดของโครงสร้างที่ทดสอบไม่ส่งผลกระทบต่อการตรวจวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกมากนัก โดยเฉพาะในกรณีรูปร่างของโครงสร้างไม่ส่งผลกระทบต่อการจำแนกคลื่นที่เคลื่อนที่ตรงจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ ดังนั้นขนาดของโครงสร้างที่เหมาะสมกับวิธีการทดสอบนี้จึงกำหนดด้วยความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิก และควรจะมีค่าไม่น้อยกว่าความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ทดสอบ

6.3 การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกได้รับผลกระทบจากเหล็กเสริมที่อยู่ภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น การทดสอบควรหลีกเลี่ยงตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมวางตัวอยู่

7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ

7.1 ควรเปรียบเทียบค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก

7.2 จุดที่มีค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกน้อยกว่าจุดอื่นเป็นจุดที่อาจจะมีความบกพร่อง มีกำลังอัดต่ำกว่า หรือ มีช่องว่างอยู่ในโครงสร้าง

7.3 การเขียนเส้นชั้นความสูงของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Contour Graph) เพื่อประกอบการแปลความผลการทดสอบ ทำให้สรุปผลการทดสอบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

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 C597-97 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete

8.4 BS 1881 - 203: 1986, Testing Concrete. Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete

8.5 BS EN 12504-4:2004 Testing Concrete. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity

ภาคผนวก 1 ทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิก

การทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก อาศัยการวัดความเร็วของคลื่นกลที่เคลื่อนที่ในคอนกรีต หลักการในการทำงานของเครื่องทดสอบโดยคลื่นอัลตราโซนิก คือ การปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในคอนกรีต และจับเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่จากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ โดยมีระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณคงที่ ค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในคอนกรีตนั้น สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างตัวรับกับตัวส่งสัญญาณและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของคอนกรีต และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ดังสมการ

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

โดยที่

V : ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง

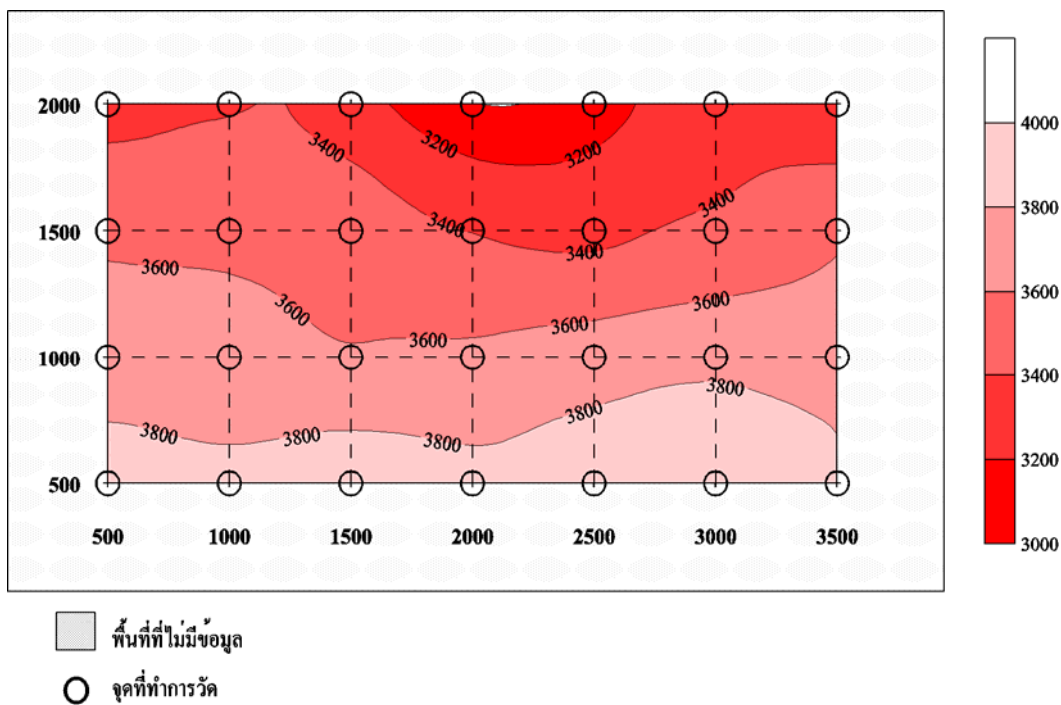
E : ค่าคงที่ยืดหยุ่นของตัวกลาง

ρ : ความหนาแน่น

μ : อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson ratio)

ภาคผนวก 2 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัด

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างผลการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านกำแพงคอนกรีตขนาด 4 x 2 ตารางเมตร และมีความหนา 200 มิลลิเมตร โดยทำการวัดค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกทุกๆระยะ 500 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึง ความเร็วที่สูงกว่าของคอนกรีตที่อยู่ด้านล่างซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการแยกตัวของคอนกรีตในระหว่างการเทคอนกรีต นอกจากนี้ผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่า โครงสร้างส่วนบนด้านขวาบน (พื้นที่ที่เป็นสีขาว) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำสุด อาจจะมี ความบกพร่องหรือ ความเสียหายภายในโครงสร้างบริเวณดังกล่าว



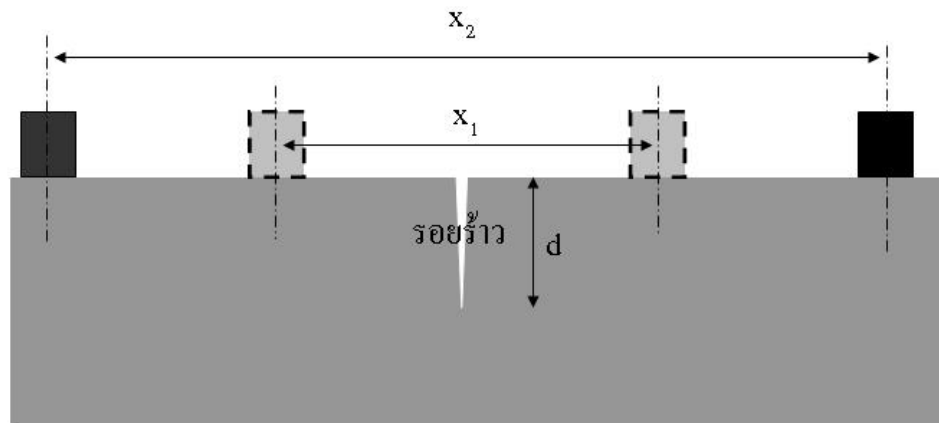
รูปที่ 1: ตัวอย่างแผนที่แสดงเส้นชั้นความสูง (Contour Map) ของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

(ภาคผนวก 1)

ด้วยวิธีการทดสอบคอนกรีตดังที่แสดงข้างต้น คลื่นอัลตราโซนิกสามารถใช้ในการตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีต (Uniformity of Concrete) เปรียบเทียบคุณภาพของคอนกรีตที่คนละตำแหน่ง และใช้ในการประเมินคุณภาพของงานซ่อมแซมได้ด้วย นอกจากนี้ วิธีการทดสอบคอนกรีตโดยคลื่น อัลตราโซนิกนี้ ยังสามารถนำไปทดสอบหาความเปลี่ยนแปลง สมบัติของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไปได้ โดยในกรณีนี้ ต้องมีการทำสัญลักษณ์ตำแหน่งของการวัดอย่างชัดเจน

ภาคผนวก 3 วิธีการตรวจวัดความลึกของรอยร้าว

วิธีการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถใช้ในการประเมินความลึกของรอยร้าว โดยทำการวัดระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิก ใช้เดินทางเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณ แตกต่างกันไป (x_1 และ x_2 ดังแสดงในรูปที่ 1) โดยทั่วไปจะทำการวัดโดยให้ระยะ x_2 มีค่าเป็น 2 เท่าของ x_1



รูปที่ 1: วิธีการประเมินความลึกของรอยร้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
(ภาคผนวก 3)

จากการทดสอบข้างต้น ค่าความลึกของรอยร้าวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$d = x_1 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (2)$$

โดยที่

d : ความลึกของรอยร้าว (มิลลิเมตร)

x_1 : ระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณของการวัดครั้งแรก (มิลลิเมตร)

t_1 : ระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิก ใช้เดินทางเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณเท่ากับ x_1 (μs)

t_2 : ระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิก ใช้เดินทางเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณเท่ากับ x_2 (μs)

หมายเหตุ: การวัดความลึกของรอยร้าวนี้สามารถกระทำได้ในกรณีที่ไม่มีเหล็กเสริมพาดผ่านรอยร้าวเท่านั้น

ข้อเสนอแนะ: การคำนวณความลึกของรอยร้าวนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่ารอยร้าวมีทิศทางตั้งฉากกับผิวโครงสร้าง ผู้ตรวจสอบจึงควรเข้าใจว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นเพียงแค่ค่าความลึกโดยประมาณเท่านั้น

ภาคผนวก 4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

โครงการ: สถานที่: ชนิดโครงสร้าง: ตำแหน่ง: วันที่ทดสอบ:			บพ. มยผ. 1504			ทะเบียนทดสอบ: หน้าที่/.....		
			(หน่วยงานที่ทำการทดสอบ) การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก			ผู้ทดสอบ:		
						ผู้ประเมินผล:		
						ผู้ตรวจสอบ:		
ลำดับ ที่	ตำแหน่ง ที่ทำการทดสอบ	ระยะห่าง (มม.) (1)	ค่าอ่านระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ (10^{-6} วินาที) (2)			ค่าเฉลี่ย (10^{-6} วินาที) (3)	ความเร็ว คลื่นเฉลี่ย (กม./วินาที) (4)	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ค่าเฉลี่ย								

- หมายเหตุ:**
- (1) ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของหัวส่งสัญญาณถึงกึ่งกลางหัวรับสัญญาณ
 - (2) ระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากหัวส่งสัญญาณไปยังหัวรับสัญญาณ หน่วยเป็น มิลลิวินาที
 - (3) ค่าเฉลี่ยของค่าอ่าน (2)
 - (4) ความเร็วคลื่นเฉลี่ย = (1)/(3) หน่วยเป็น กิโลเมตร/วินาที

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
วิธีตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีต (Cover Meter)

1. ขอบเขต

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการใช้เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก เพื่อหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและประเมินระยะหุ้มเหล็กของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

2. นิยาม

“ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Concrete Cover)” หมายถึง ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กอยู่โดยมีค่าเท่ากับระยะทางระหว่างผิวของโครงสร้างและผิวของเหล็กเสริม

“การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)” หมายถึง การที่การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวดและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอีกสนามหนึ่งขึ้นมา

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

- 3.1 เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ (1) หัววัด (2) จอแสดงผล และ (3) สายเชื่อมต่อข้อมูล ระหว่างการทดสอบให้เคลื่อนหัววัดไปตามผิวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และจอแสดงผลจะแสดงผลเมื่อหัววัดเคลื่อนที่เข้าไปใกล้เหล็กเสริม หรือ โลหะที่อยู่ในโครงสร้าง หัววัดอาจประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำขดเดียวหรือหลายขด

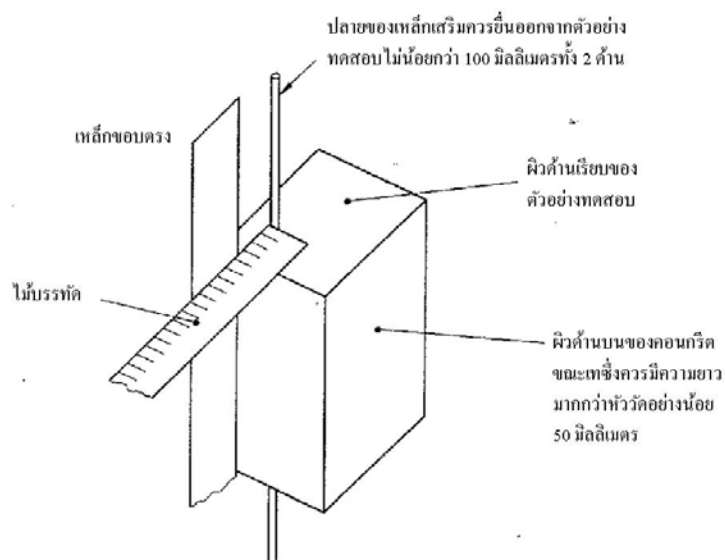
4. วิธีการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

- 4.1 ก่อนนำเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไปใช้ทดสอบ ให้สอบเทียบเครื่องมือในห้องทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก โดยความถี่ของการตรวจสอบขึ้นอยู่กับคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือและควรบันทึกประวัติการตรวจสอบไว้ด้วย
- 4.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือ ควรให้ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งไม่เกินร้อยละ ± 5 หรือ ± 2 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับว่าค่าใดมากกว่ากัน

4.3 การสอบเทียบสามารถเลือกทำได้จากวิธีดังต่อไปนี้

(1) วิธี ก

แท่งตัวอย่างสอบเทียบเป็นแท่งคอนกรีตซึ่งติดตั้งแท่งเหล็กตรง ผิวเรียบ และสะอาดให้มีระยะห่างจากผิวคอนกรีตด้านทดสอบไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 ในกรณีระยะคอนกรีตหุ้มน้อยกว่า 12 มิลลิเมตร ให้สอบเทียบตามวิธี ข หรือ วิธี ค แทน ผิวคอนกรีตด้านทดสอบต้องเรียบและมีความขรุขระไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับระนาบผิว วัสดุที่ใช้ควรเหมือนกับโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ มวลรวมไม่ควรมีสมบัติทางแม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ควรใช้สารผสมเพิ่ม และควรระวังไม่ให้แท่งเหล็กบิดงอระหว่างเทคอนกรีต หลังจากถอดแบบ และระหว่างบ่มแท่งตัวอย่างสอบเทียบ ให้วัดระยะคอนกรีตหุ้มจริงจากผิวคอนกรีตทั้งสองด้านที่ปลายเหล็กยื่นจากแท่งคอนกรีตด้วยเครื่องมือวัดระยะที่มีความแม่นยำไม่น้อยกว่า ± 0.5 มิลลิเมตร และค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองด้านแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิเมตร กรณีแตกต่างกันเกินกว่า 1 มิลลิเมตร ให้หล่อแท่งตัวอย่างสอบเทียบใหม่



รูปที่ 1 แท่งตัวอย่างสอบเทียบตามมาตรฐาน BS 1881 Part 204

(ข้อ 4.3)

ดำเนินการสอบเทียบโดยใช้เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กตามข้อแนะนำในคู่มือการใช้เครื่องมือเพื่อวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจากทุกด้านที่ขนานกับเหล็กเสริม (ด้านแนวตั้งทั้งสี่ด้านในรูปที่ 1) และอยู่ในระยะการวัดของเครื่องวัด ระหว่างการสอบเทียบให้ระวังผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ดังระบุไว้ในหัวข้อ 7 กรณีเครื่องวัดมีมาตรวัดสำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาดให้สอบเทียบตามขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นสำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาด ทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและค่าที่วัดได้ด้วยไม้บรรทัด

(2) วิธี ข

ใช้แท่งตัวอย่างสอบเทียบตามที่ระบุในวิธี ก โดยเคลื่อนแท่งสอบเทียบแทนการเคลื่อนหัววัด และขีดหัววัดกับตัวอย่างทดสอบให้หนึ่งระหว่างอ่านค่า โดยความคลาดเคลื่อนของการวัดให้เป็นตามการสอบเทียบด้วยวิธี ก

(3) วิธี ค

ใช้แท่งตัวอย่างสอบเทียบทดสอบตามที่ระบุ ใน วิธี ก แต่เจาะรูเพิ่มเติมเพื่อสอดเหล็กเสริมเข้าไปที่ระยะต่างๆ และเปรียบเทียบระยะที่วัดได้จากเครื่อง และระยะที่วัดโดยใช้เครื่องมือวัดอื่นที่มีความแม่นยำตามที่ระบุในการสอบเทียบโดยวิธี ก

5. วิธีการใช้งานเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

5.1 ให้เปิดเครื่องและดำเนินการปรับเครื่องตามคู่มือซึ่งแตกต่างกันไปตามรุ่นของเครื่อง โดยหัววัดของเครื่องมือวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กควรอยู่ห่างจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือ วัตถุอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของเครื่องได้ ในระยะที่พอเหมาะเพื่อให้การเตรียมเครื่องมือเบื้องต้นถูกต้อง

5.2 เครื่องมือวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กบางรุ่นต้องใช้เวลาเพื่อเตรียมระบบการวัดให้พร้อมทำงาน โดยดำเนินการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กได้ต่อเมื่อการแสดงผลของเครื่องนิ่งเท่านั้น

5.3 วิธีการสอบเทียบในสถานที่จริง (In-Situ Calibration)

(1) ก่อนการปฏิบัติงานจริง ให้สอบเทียบเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กให้ถูกต้องตามมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีเหล็กเสริมในโครงสร้างแตกต่างจากเหล็กเสริมที่ใช้สอบเทียบ ในห้องปฏิบัติการ

(2) กรณีผลการสอบเทียบแสดงว่ากราฟสำหรับปรับแก้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่เหมาะสมกับสภาพของการทำงาน เช่นระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเกินช่วงที่วัดในห้องปฏิบัติการ หรือคอนกรีตโครงสร้างจริงส่งผลให้การวัดขาดความแม่นยำ ให้สร้างกราฟสำหรับปรับแก้ขึ้นใหม่ตามวิธีดังต่อไปนี้

วิธี ก

เจาะที่ตำแหน่งของเหล็กตามความลึกที่แสดงจากเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ควรระมัดระวังไม่ให้เหล็กเสริมได้รับความเสียหายจากการเจาะมากเกินไป วัดระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมและผิวคอนกรีตของแต่ละตำแหน่งและเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และอาจสร้างกราฟสำหรับปรับแก้ค่าที่วัดได้ (Calibration Curve) ซึ่งนำไปใช้แปลผลที่วัดจากเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเป็นระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจริง

วิธี ข

ตรวจปรับตามมาตรฐานดังแสดงในหัวข้อ 4 โดยใช้ประเภทของเหล็กเสริม และคอนกรีตเหมือนโครงสร้างจริงเพื่อสร้างกราฟสำหรับปรับแก้ค่าที่วัดได้เป็นค่าระยะหุ้มที่แท้จริง

5.4 วิธี ก เหมาะกับการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในโครงสร้างเก่า ในขณะที่ วิธี ข เหมาะสำหรับงานควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป

6. วิธีการใช้งานเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหาตำแหน่งของเหล็กเสริม

6.1 หลังจากเตรียมเครื่องและสอบเทียบเพื่อสร้างกราฟปรับแก้ค่า (Calibration Curve) ให้นำหัววัดแนบกับผิวคอนกรีต และเคลื่อนที่บนผิวคอนกรีตในทิศทางที่ต้องการวัด ทิศทางการเคลื่อนหัววัดควรตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมมีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อวางตัวผ่านแกนของขดลวดในหัววัด

6.2 คำนวณระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กได้จากกราฟปรับแก้ค่ากรณีมีข้อมูลขนาดของเหล็ก

6.3 ในกรณีเหล็กเสริมมีการเรียงตัวกันไม่หนาแน่นเกินไป และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กอยู่ในระยะที่เหมาะสม การตรวจวัดอาจให้ข้อมูลที่เพียงพอในตรวจสอบลักษณะเรียงตัวของเหล็กเสริมในคอนกรีต และอาจใช้ตรวจหาจุดที่เป็นรอยต่อระหว่างเหล็กเส้น (Laps)

6.4 กรณีที่เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต้องอยู่ห่างจากผิวคอนกรีตเพื่อผลการวัดที่แม่นยำ เช่น กรณีคาดว่าระยะหุ้มคอนกรีตมีค่าน้อยมาก เป็นต้น ให้ใช้วัสดุที่ไม่รบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น แผ่นไม้ หรือ แผ่นพลาสติกที่มีความหนาเหมาะสม (ประมาณ 20 มิลลิเมตร) เพื่อรองหัววัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ตรวจวัดได้มีค่าเท่ากับค่าระยะหุ้มคอนกรีตที่ได้จากเครื่องวัดระยะคอนกรีตเสริมเหล็กกับความหนาของวัสดุรองหัววัด

7. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะอาจจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ซึ่งส่งผลให้ความแม่นยำของการวัดน้อยลง ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ต้องได้รับการระมัดระวัง ตัวอย่างของปัจจัยดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

7.1 ประเภทของเหล็กเสริม: โดยปรกติกราฟปรับแก้ค่าใช้กับเหล็กเสริมได้บางประเภทเท่านั้น ประเภทของเหล็กเสริมมีผลต่อการตรวจสอบน้อยมาก ยกเว้นเหล็กเสริมประเภทพิเศษ เช่น เหล็กอัดแรงรับแรงดึงสูง (High Tensile Prestressing Bars) ซึ่งการตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 5 เมื่อมีวัสดุเหล่านี้อยู่ในโครงสร้าง ให้สร้างกราฟปรับแก้ค่าเฉพาะสำหรับวัสดุนี้ก่อนตรวจสอบ

7.2 ขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริม : โดยปรกติกราฟปรับแก้ค่าที่มาจากเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กนั้นสามารถใช้ได้กับทั้งเหล็กกลมหรือเหล็กข้ออ้อย แต่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของเหล็กข้ออ้อยจะมีค่าเท่ากับค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่วัดได้ลบด้วยความสูงของบั้ง หรือคิบบ (Rib)

- 7.3 รูปร่างและทิศทางการวางตัวของเหล็กเสริม : การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจะมีความแม่นยำต่อเมื่อเหล็กเสริมในโครงสร้างวางตัวเป็นแนวตรงและมีระยะห่างจากผิวคอนกรีตค่อนข้างคงที่
- 7.4 จำนวนของเหล็กเสริม : เหล็กเสริมที่อยู่ใกล้กันมากทำให้ผลการวัดไม่ตรงกับความจริง โดยเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อมีเหล็กเสริมมากกว่า 1 เส้นในขอบเขตการวัดของหัววัด นอกจากนี้เครื่องวัดอาจไม่สามารถแยกเหล็กเสริมแต่ละเส้นออกจากกันได้หากระยะห่างระหว่างเหล็กเส้นแต่ละเส้นน้อยเกินไป
- 7.5 ลวดผูกเหล็ก : ลวดผูกเหล็กอาจทำให้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีลวดผูกเหล็กอยู่ใกล้ผิวคอนกรีตมาก อย่างไรก็ตามผู้ใช้เครื่องมือที่มีประสบการณ์จะแยกผลกระทบจากวัสดุต่างๆ จากผลของเหล็กเสริมหลักได้
- 7.6 ประเภทของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ : กรณีมวลรวมหรือซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตมีส่วนประกอบที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก รวมถึงวัสดุแต่งผิวคอนกรีตบางประเภท อาจส่งผลกระทบต่อผลตรวจวัดที่ไม่แม่นยำให้ตรวจสอบโดยอ่านค่าการวัดบริเวณโครงสร้างที่ไม่มีเหล็กเสริม และสังเกตค่าเพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติทั่วไป (อย่างไรก็ตาม เครื่องมือบางรุ่นก็ไม่สามารถทำได้)
- 7.7 ลักษณะผิวของโครงสร้างคอนกรีตที่ตรวจสอบ : กรณีผิวโครงสร้างคอนกรีตไม่เรียบจะส่งผลให้ค่าการวัด ขึ้นอยู่กับระดับความขรุขระของผิวคอนกรีต
- 7.8 อุณหภูมิ : อุณหภูมิขณะใช้งานมีผลกระทบต่อหัววัดของเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กบางชนิด ควรมีการตั้งค่าเริ่มต้นเป็นระยะ และทำตามข้อแนะนำการใช้ในคู่มือเครื่องวัดระยะคอนกรีต
- 7.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริม : หากเหล็กเสริมเป็นสนิมมากจนเกินไปอาจทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน

8. การสรุปและการแปลความผลการทดสอบ

- 8.1 ผลการวัดระยะหุ้มเหล็กที่ตำแหน่งเดียวกันควรมีค่าแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ ± 15 หรือ ± 5 มิลลิเมตร โดยในกรณีที่ความแตกต่างอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ใช้ค่าที่มากกว่าเมื่อระยะหุ้มเหล็กที่ต้องการวัดมีค่าไม่เกิน 100 มิลลิเมตร
- 8.2 หากผลการวัดได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อ 7 ทำให้ความแม่นยำในการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กน้อยลง แต่สามารถใช้เครื่องมือวัดเพื่อค้นหาตำแหน่งเหล็กได้ และกรณีที่ความแม่นยำในการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมลดลง ควรมีการเจาะสำรวจด้วยสว่านเพื่อเปรียบเทียบผลการวัดกับระยะหุ้มเหล็กเสริมจริง เพื่อปรับแก้ไขในกรณีที่พบความคลาดเคลื่อน

9. เอกสารอ้างอิง

- 9.1** ACI 228.2R-98 Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures – Reported by ACI Committee 228
- 9.2** BS 1881 - 201: 1986, Testing Concrete. Guide to the Use of Non-Destructive Methods of Test for Hardened Concrete
- 9.3** BS 1881 - 204: 1988 Testing Concrete. Recommendations on the Use of Electromagnetic Covermeters

ภาคผนวก 1 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการตรวจวัด

1. เครื่องตรวจวัดระยะหุ้มเหล็กของคอนกรีต (Cover Meter) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาข้อมูลของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ ตำแหน่งของเหล็กเสริม และ ระยะหุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีวัสดุนำไฟฟ้าเข้ามารบกวน
2. ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าและพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นหลักการเบื้องต้นเพื่อความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดระยะหุ้มเหล็กของคอนกรีต (Cover Meter) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าคือการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าที่อยู่ในสนามแม่เหล็กนั้นซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์
3. เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กสามารถใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่อไปนี้
 - (1) ควบคุมคุณภาพของการก่อสร้างโดยใช้ตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กภายหลังการก่อสร้าง
 - (2) ตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต ที่ไม่มีข้อมูลที่น่าเชื่อถือเกี่ยวกับปริมาณเหล็กเสริมภายในโครงสร้าง
 - (3) ใช้หาข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นก่อน การทดสอบซึ่งต้องหลีกเลี่ยงตำแหน่งของเหล็กเสริม เช่น การเจาะเก็บตัวอย่าง หรือ การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีต เป็นต้น
 - (4) ตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุที่เป็นโลหะอื่นๆ เช่น ท่อเหล็ก หรือ สายไฟ เป็นต้น
4. เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กมีหลักการตรวจวัด 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ (1) หลักการกระแสวน (Eddy Current Effects) และ (2) หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Induction Effect)
5. สำหรับเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่อาศัยหลักการกระแสวน ขดลวดภายในหัววัดจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสวน (Eddy Current) ในเหล็กเสริม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของหัววัด เครื่องมือระบบนี้จะมีความถี่สูงกว่า 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และไวต่อวัตถุนำไฟฟ้าทุกชนิดที่เข้าใกล้หัววัด นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความนำไฟฟ้าของวัตถุ ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) เป็นพิเศษ
6. เครื่องวัดที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก มีความถี่ใช้งานต่ำกว่าเครื่องวัดระบบกระแสวน โดยความถี่ใช้งานต่ำกว่า 90 เฮิร์ตซ์ หัววัดประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ขด ขดแรกมีไฟฟ้ากระแสสลับทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดและเหล็กเสริม และขดลวดที่ 2 ทำหน้าที่ตรวจวัดความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กชนิดนี้ไวต่อวัตถุที่มีความเป็นแม่เหล็กน้อยกว่าเครื่องวัดระบบกระแสวน จอแสดงผลอาจจะแสดงผลในรูปแบบของมาตรวัดแบบเข็มหรือแบบตัวเลข

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

วิธีทดสอบหาค่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริม (Half-Cell Potential)

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการวัดค่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริม ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
- 1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

2. นิยาม

“ครึ่งเซลล์ (Half-Cell)” หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยโลหะ และสารละลายของเกลือที่มีโลหะนั้นเป็นสารประกอบ

“ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential)” หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ที่วัดเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์มาตรฐาน หรือครึ่งเซลล์อื่นที่ระบุไว้

“แอโนด (Anode)” หมายถึง จุดที่เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน

“แคโทด (Cathode)” หมายถึง จุดที่เกิดปฏิกิริยา รีดักชัน

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

3.1 ครึ่งเซลล์ (Half Cell) คอปเปอร์ – คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper-Copper Sulphate Half Cell) เป็นครึ่งเซลล์มาตรฐานที่ประกอบการทดสอบตามเอกสารนี้ ประกอบด้วย

- (1) ท่อใส่สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับ คอปเปอร์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟต และต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร
- (2) สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตอิ่มตัว เตรียมได้จากการละลายผลึกคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำกลั่นให้อิ่มตัว โดยที่สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่เหลือจะตกผลึกเป็นก้อนเมื่อสารละลายอิ่มตัวแล้ว
- (3) พลาสติกหรือไม้ที่มีความพรุน ซึ่งต้องเปียก และมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 13 มิลลิเมตร
- (4) แท่งทองแดง (คอปเปอร์) เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร และยาวไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร อยู่ในท่อใส่สารละลายและจุ่มในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

3.2 วัสดุเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างคอนกรีตและอุปกรณ์ (Electrical Junction Device) เป็นตัวเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์วัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปใช้เป็นฟองน้ำเปียกด้วยสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ดีและยึดติดที่ปลายของครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต

3.3 สารละลายสำหรับเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า (Electrical Contact Solution) ซึ่งช่วยให้มีความนำไฟฟ้าเพียงพอ ให้ผลการวัดเป็นมาตรฐาน โดยสารละลายนี้อาจได้จากการละลายน้ำยาทำความสะอาด ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในน้ำ 20 ลิตร และอาจต้องเติม สารไอโซโพรพิล (Isopropyl) หรือ ดีเนเจอร์แอลกอฮอล์ (Denatured Alcohol) เพื่อป้องกันการเกาะตัวของสารละลายกรณีอุณหภูมิระหว่างตรวจวัดต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส

3.4 มาตรวัดศักย์ไฟฟ้า (Voltmeter) สำหรับการทดสอบหาค่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริม ควรมีความไวสูง (ใช้แบตเตอรี่) และมีความแม่นยำร้อยละ ± 3 ในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ทดสอบ ความต้านทานของมาตรวัดศักย์ไฟฟ้าไม่ควรต่ำกว่า 10 เมกะโอห์ม เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่า 100 มิลลิโวลต์ มาตรวัดควรแสดงผลที่ละเอียด 0.02 โวลต์หรือละเอียดกว่า

3.5 สายไฟฟ้า (Electrical Lead Wires) สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ กับเหล็กเสริมในโครงสร้างซึ่งมีขนาดที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ ในวงจรเกิน 0.1 มิลลิโวลต์ โดยเลือกสายไฟให้มีขนาดใหญ่เพียงพอ และมีความยาวไม่มากจนเกินไป

4. วิธีการใช้งานเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

4.1 ต้องดูแลไม่ให้พลาสติกหรือไม้ที่มีความพรุนซึ่งอยู่ในครึ่งเซลล์แห้งเกินไป เพราะช่องว่างในวัสดุดังกล่าวอาจอุดตันด้วยผลึกของคอปเปอร์ซัลเฟตที่ตกตะกอน

4.2 กรณีที่ใช้ครึ่งเซลล์ให้ผลคลาดเคลื่อน ให้ทำความสะอาดแท่งทองแดง (Copper Rod) ในครึ่งเซลล์ โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก

4.3 ควรเปลี่ยนสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตทุกเดือน หรือก่อนทำการตรวจสอบโครงสร้างแต่ละครั้ง ไม่ควรใช้ขนสัตว์หรือวัสดุอื่นซึ่งอาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตย์ทำความสะอาดแท่งทองแดง

5. ขั้นตอนประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

5.1 การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ควรวัด ณ ตำแหน่งของเหล็กเสริม โดยระยะห่างระหว่างจุดที่ตรวจวัดไม่ห่างกันมากหรือน้อยจนเกินไป

ข้อแนะนำ: ตำแหน่งการวัดที่ห่างกันมากอาจจะทำให้ผู้ตรวจสอบพลาดข้อมูลของจุดที่เกิดสนิม ในขณะเดียวกัน หากตำแหน่งที่วัดอยู่ใกล้กันมากจนเกินไป จะทำให้สิ้นเปลืองเวลาและงบประมาณโดยเปล่าประโยชน์ ในกรณีที่ตรวจสอบส่วนของโครงสร้างขนาดเล็กเช่นส่วนของเสาหรือคานจุดที่ทำการวัดอาจจะห่างกัน 50 ถึง 100 มิลลิเมตร. ในขณะที่การตรวจสอบโครงสร้างขนาดใหญ่เช่นสะพาน ระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดอาจจะห่างกันประมาณ 0.5 ถึง 1 เมตร

5.2 ต่อสายไฟฟ้ากับเหล็กเสริมในโครงสร้าง โดยค่าความต้านทานของรอยต่อต้องต่ำเพียงพอและไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานของทั้งวงจร โดยควรขัดผิวเหล็กเสริมและสายไฟฟ้าก่อนเชื่อมต่อ ในหลายกรณี ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับการแกะทะลอกกรีดหุ้มเหล็กออก สายไฟฟ้าที่ต่อจากเหล็กเสริมต้องเชื่อมกับขั้วบวกของมาตรวัดศักย์ไฟฟ้า

- 5.3 โดยทั่วไปสายไฟฟ้าต้องต่อโดยตรงกับเหล็กเสริมในโครงสร้าง ยกเว้นกรณีมีหลักฐานที่เชื่อถือได้ว่ามีวัสดุนำไฟฟ้าอื่นที่เชื่อมต่อกับเหล็กเสริมในโครงสร้างและเชื่อมต่อได้ง่ายกว่า ให้ตรวจสอบความต่อเนื่องทางไฟฟ้าจากการวัดค่าความต้านทานระหว่างโลหะที่ผิวอย่างน้อยสองจุดขึ้นไป
- 5.4 การเชื่อมต่อสายไฟเข้าระหว่างครึ่งเซลล์ และ เครื่องมือวัดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม
- 5.5 เชื่อมต่อปลายด้านหนึ่งของสายไฟฟ้ากับครึ่งเซลล์ และปลายอีกด้านหนึ่งเข้ากับขั้วลบของมาตรวัดศักย์ไฟฟ้า
- 5.6 ในกรณีผิวส่วนใหญ่ของโครงสร้างคอนกรีตแห้ง ต้องทำให้ผิวโครงสร้างคอนกรีตเปียกก่อนวัดศักย์ไฟฟ้า ให้ตรวจสอบเบื้องต้นโดยการต่อครึ่งเซลล์กับผิวคอนกรีตและสังเกตค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ กรณีที่ค่าศักย์ไฟฟ้าไม่คงที่ แสดงว่าผิวคอนกรีตแห้งเกินไป ให้ทำผิวคอนกรีตให้เปียกจนกระทั่งอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าได้ค่อนข้างคงที่ หรือ มีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง ± 0.02 โวลต์ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 นาที โดยวิธีการทำให้ผิวคอนกรีตเปียกมี 2 วิธีดังนี้

วิธี ก

พ่นน้ำหรือสารละลายตามที่ระบุในหัวข้อ 4.6.2.3 และเช็ดละอองน้ำที่เหลืออยู่บนผิวคอนกรีตก่อนตรวจวัดความต่างศักย์ครึ่งเซลล์ วิธีนี้เหมาะสำหรับผิวคอนกรีตที่ต้องการความชื้นเพียงเล็กน้อยเพื่อให้มีสภาพเหมาะสมสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

วิธี ข

ใช้ฟองน้ำที่ชุ่มด้วยสารละลายตามที่ระบุในหัวข้อ 4.6.2.3 วางบนผิวคอนกรีต และไม่จำเป็นต้องเอาฟองน้ำออกระหว่างการวัดค่าความต่างศักย์ครึ่งเซลล์ แต่ให้ตรวจวัดผ่านฟองน้ำนี้ วิธีนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ไม่สามารถใช้วิธีอื่นได้

- 5.7 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยค่าความต่างศักย์ครึ่งเซลล์ที่อ่านได้ต้องมีความละเอียดในระดับ 0.01 โวลต์ และควรคำนึงถึงผลของอุณหภูมิในกรณีที่อุณหภูมิระหว่างทำการวัดมีการเปลี่ยนแปลงมาก
- หมายเหตุ: วิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถใช้กับโครงสร้างได้น้ำได้ แต่ต้องระมัดระวังการตีความผลการตรวจสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับตำแหน่งของการเกิดสนิม การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถบอกความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่อาจจะไม่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของการเกิดสนิมที่แม่นยำ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุระหว่างครึ่งเซลล์และเหล็กที่เกิดสนิมเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการหาตำแหน่งที่เกิดสนิม ในกรณีของโครงสร้างได้น้ำวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นี้มักให้ค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกันทุกจุด อย่างไรก็ตามผลการวัดที่ได้แสดงถึงการแนวโน้มความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเหมือนทดสอบโครงสร้างอื่นที่ไม่ได้อาศัยได้น้ำ

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

6.1 ปัจจัยดังต่อไปนี้นี้มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้วยวิธีที่ระบุในมาตรฐานนี้ และอาจทำให้ไม่สามารถทำการวัดได้ หรือทำให้การตีความผลการทดสอบคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

- (1) ผิวคอนกรีตถูกปิดด้วยวัสดุต่างๆ เช่น ปูนฉาบ กระเบื้อง วัสดุกันซึม และสี
- (2) เหล็กเสริมเคลือบผิวด้วยอีพอกซี หรือโลหะอื่น
- (3) กระบวนการคาร์บอนขึ้นเกิดถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม
- (4) ความชื้นของผิวคอนกรีตไม่เพียงพอ ทำให้ค่าความต่างศักย์ครึ่งเซลล์มีค่าเป็นลบน้อยลงและอาจไม่สามารถตรวจจับการเกิดสนิมได้

6.2 เนื่องจากในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ต้องมีการเชื่อมต่อสายไฟของเครื่องมือกับเหล็กเสริมในโครงสร้าง จึงต้องมีการเจาะหรือกะเทาะผิวคอนกรีตบางส่วนออก ทั้งนี้ขั้นตอนนี้ต้องดำเนินการด้วยความระมัดระวังและต้องมีการซ่อมแซมโครงสร้างอย่างเหมาะสมภายหลังการวัด

ข้อแนะนำ: ในกรณีที่โครงสร้างมีส่วนที่เกิดสนิม จนเกิดการกะเทาะของผิวคอนกรีตแล้วสามารถต่อวงจรกับส่วนของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมแล้วได้ โดยต้องมีการทำความสะอาดเหล็กเสริมก่อน

7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ

7.1 ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากครึ่งเซลล์ คอปเปอร์ – คอปเปอร์ซัลเฟต จากโครงสร้างที่อยู่เหนือน้ำ

ข้อแนะนำ: ข้อมูลในตารางที่ 1 เป็นข้อมูลจากผลสำรวจในต่างประเทศ ดังนั้นจึงควรต้องระมัดระวังในการแปลผลการวัดสำหรับวัสดุท้องถิ่น และควรมีการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าในกรณีใช้ครึ่งเซลล์ชนิดอื่นในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างคอนกรีต

**ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
และความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในโครงสร้าง**

(ข้อ 7.1)

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/ CuSO ₄)	สภาพการเกิดสนิม
มากกว่า -0.20 โวลต์ CSE	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
ระหว่าง -0.20 และ -0.35 โวลต์ CSE	ไม่แน่นอน
น้อยกว่า -0.35 โวลต์ CSE	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่เกิดสนิมแล้ว

หมายเหตุ: CSE คือ ศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างเทียบกับครึ่งเซลล์ คอปเปอร์ – คอปเปอร์ซัลเฟต

ที่มา: ASTM C876-91(1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

7.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้จากตำแหน่งเดียวกันไม่ควรแตกต่างกันเกิน 10 มิลลิโวลต์เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือชุดเดียวกันในการวัดแต่ละครั้ง

7.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้จากตำแหน่งเดียวกันไม่ควรแตกต่างกันเกิน 20 มิลลิโวลต์เมื่อวัดด้วยเครื่องมือคนละชุด

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

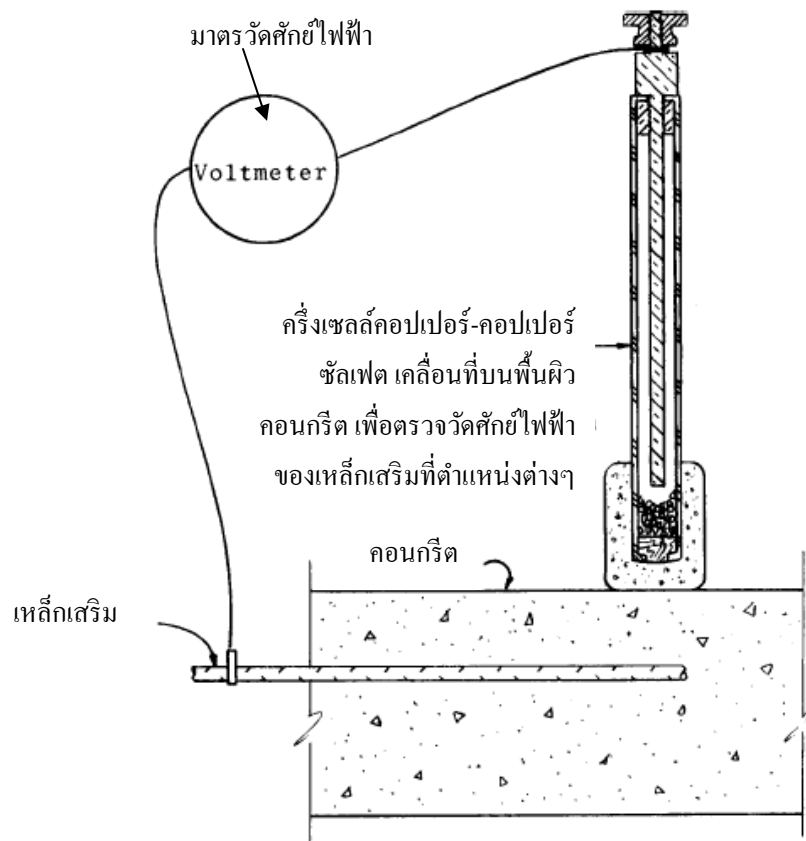
8.3 ASTM C876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

ภาคผนวก 1 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการทดสอบ

1. วิธีการวัดค่าการสีกกร่อนของเหล็กเสริม เป็นการประเมินความเป็นไปได้ ที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเกิดสนิมจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
2. วิธีการวัดค่าการสีกกร่อนด้วยการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นี้ ใช้ได้กับเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยอีพอกซีเท่านั้น
3. เนื่องจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต้องเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า ดังนั้นผิวโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตรวจวัดจึงควรมีความชื้นในระดับที่ทำให้คอนกรีตสามารถนำไฟฟ้าได้

ภาคผนวก 2 ลักษณะวงจรของเครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

รูปที่ 1 แสดงวงจรของเครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ซึ่งมีส่วนประกอบดังที่ระบุในหัวข้อที่ 3 ในการใช้งานอุปกรณ์วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นี้ จะต้องมีการต่อวงจรกับเหล็กเสริม และมีการทำให้ผิวคอนกรีตสามารถนำไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่ง ดังที่อธิบายในข้อ 5.6

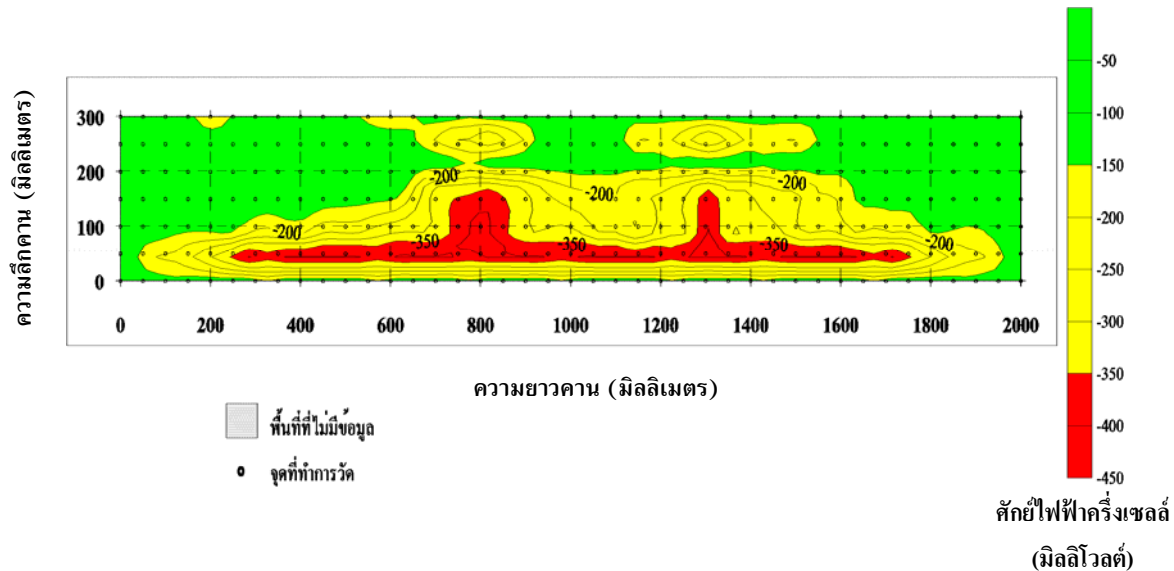


รูปที่ 1 วงจรของเครื่องวัดค่าต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ดังแสดงในมาตรฐาน ASTM 876

(ภาคผนวก 2)

ภาคผนวก 3 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัด

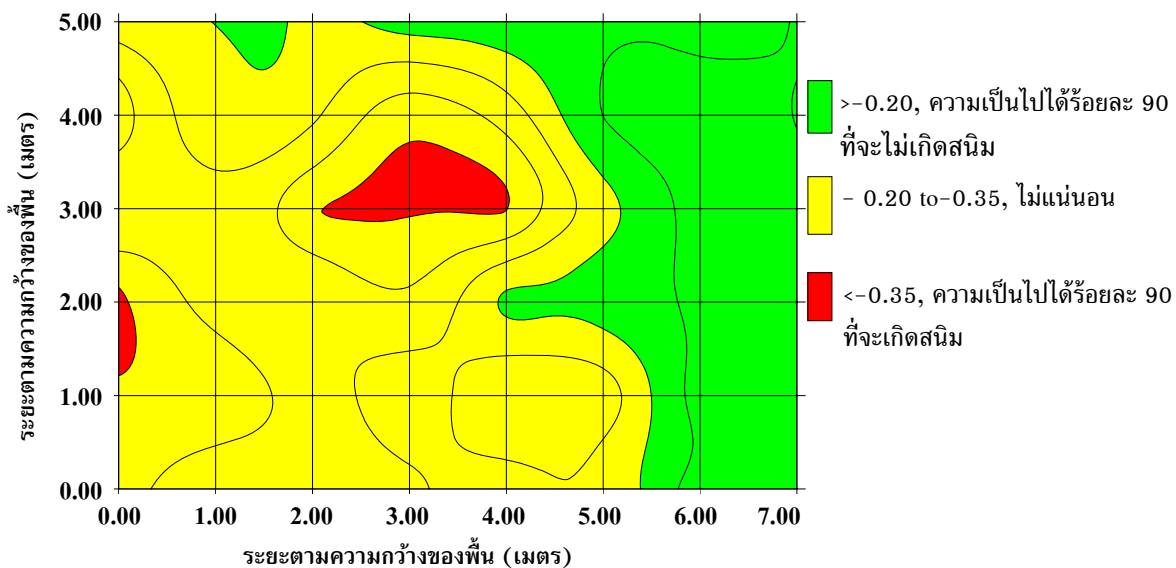
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากคานคอนกรีตเสริมเหล็กยาว 2 เมตร ลึก 30 เซนติเมตร โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุก ๆ ระยะ 50 มิลลิเมตร ส่วนที่แสดงสีแดง (สีเข้ม) คือจุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ติดลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ซึ่งเป็นจุดที่มีแนวโน้มที่กำลังเกิดสนิมอยู่มากที่สุด



รูปที่ 2 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

(ภาคผนวก 3)

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กกว้าง 5 เมตร ยาว 7 เมตร โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุก ๆ ระยะ 1000 มิลลิเมตร ส่วนที่แสดงสีแดง (สีเข้ม) คือจุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ติดลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ซึ่งเป็นจุดที่มีแนวโน้มที่กำลังเกิดสนิมมากที่สุด



รูปที่ 3 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

(ภาคผนวก 3)

ภาคผนวก 4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทดสอบหาค่าการลึกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม

โครงการ:		บพ. มยผ. 1506		ทะเบียนทดสอบ:	
.....				หน้าที่/.....	
สถานที่:		(หน่วยงานที่ทำการทดสอบ) การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีทดสอบหาค่าการลึกร่อน ของเหล็กเสริม		ผู้ทดสอบ:	
ชนิดโครงสร้าง:				ผู้ประเมินผล:	
ตำแหน่ง:				ผู้ตรวจสอบ:	
วันที่ทดสอบ:					
ลำดับที่	ตำแหน่งทดสอบ	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (มิลลิโวลต์) (1)	สภาพการเกิดสนิม ตาม มยผ. 1506 (3)	หมายเหตุ	

หมายเหตุ: (1) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของโครงสร้างเทียบกับครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต หน่วยเป็น มิลลิโวลต์
 (2) ความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในโครงสร้างตามมาตรฐาน มยผ. 1506-51 แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1. ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ > -200 มิลลิโวลต์ : ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
2. ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อยู่ระหว่าง -200 และ -350 มิลลิโวลต์ : ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
3. ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ < -350 มิลลิโวลต์ : ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะเกิดสนิม

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีทดสอบเพื่อประเมินสภาพสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ (Radar)

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการใช้ Radar ในการตรวจสอบสภาพภายในของโครงสร้างคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหาตำแหน่งของเหล็กเสริมหรือท่อทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ การคำนวณระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 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 หรืออิมดัวด้วยของเหลวก็ได้ และมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โดยทั่วไปช่องว่างในคอนกรีตจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของมวลรวมหยาบ

“ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)” หมายถึง ค่าคงที่ที่แสดงถึงลักษณะการอนุญาตให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันของแต่ละวัสดุ

3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์

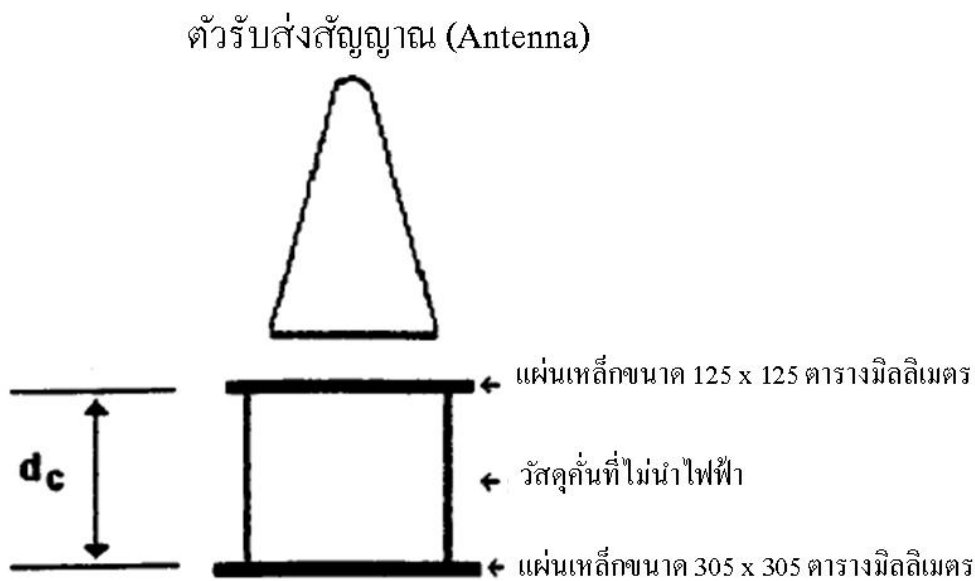
- 3.1 ตัวรับส่งสัญญาณ (Antenna with Transmitter and Receiver) เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับและส่งคลื่นเรดาร์ โดยตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ทำหน้าที่ส่งคลื่นเรดาร์ที่มีพลังงานต่ำ (ไม่เกิน 20 วัตต์) เข้าสู่โครงสร้างคอนกรีตและตัวรับสัญญาณทำหน้าที่รับสัญญาณที่สะท้อนมาจากโครงสร้างคอนกรีต
- หมายเหตุ โดยทั่วไปความถี่ของเรดาร์สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 500 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์
- 3.2 อุปกรณ์แสดงผล (Display Device) เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้แสดงผลของคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาจากโครงสร้างซึ่งอาจแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้
- (1) Grey-Level Chart Recorder เป็นภาพที่แสดงความเข้มข้น หรือ ขนาดของสัญญาณเรดาร์ที่แต่ละตำแหน่งและเวลา
 - (2) Oscilloscope เป็นเครื่องมือบันทึกการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าโดยใช้หลอดสุญญากาศที่ผลิตรังสีอิเล็กตรอนจากขั้วบวก สามารถบันทึกคลื่นลงให้เห็นบนจอได้
 - (3) หน้าจอคอมพิวเตอร์ และ โปรแกรมการแสดงผลแบบสี เป็นระบบการแสดงผลที่เชื่อมต่อกับข้อมูลการวัดที่เป็นดิจิทัลและแสดงผลเป็นภาพกราฟิกเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้หลากหลายมากขึ้น

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 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)

การคำนวณ หรือประเมินค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีตในโครงสร้างอย่างถูกต้องเพื่อตรวจวัดตำแหน่งของวัตถุหรือช่องว่างที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต ให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- (1) วัดการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ในจุดที่รู้ตำแหน่งแน่นอนของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก หรือกำแพงคอนกรีตที่มีความหนาไม่มากเกินไป เพื่อคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจวัดดังกล่าวได้ ให้ประมาณจากค่ามาตรฐานของวัสดุแต่ละชนิด
- (2) ตรวจวัดระยะเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้ในการสะท้อนกลับมาที่ตัวรับส่งสัญญาณ
- (3) คำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามสมการต่อไปนี้

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

โดย

ϵ_r : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีต

Δt : เวลาที่คลื่นใช้ในการสะท้อนกลับมาที่ตัวรับส่งสัญญาณ

d_c : ระยะทางระหว่างแผ่นเหล็ก

T : ความหนาของวัสดุที่วัด

C_T : เวลามาตรฐานสำหรับการปรับแก้

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ได้จากการคำนวณสามารถใช้กับโครงสร้างคอนกรีตชนิดเดียวกันและอยู่ในสถานะเหมือนกัน

5. ขั้นตอนการตรวจสอบคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์

5.1 เคลื่อนตัวรับส่งสัญญาณเรดาร์ไปตามผิวโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการตรวจสอบ ไม่ควรเคลื่อนตัวรับส่งสัญญาณเร็วเกินไปจนมีผลกับความแม่นยำของการวัด กรณีเครื่องวัดตรวจจับสัญญาณตามช่วงเวลา ความเร็วของการเคลื่อนที่ตัวรับส่งสัญญาณจะมีผลต่อความละเอียดของการวัด

5.2 วิเคราะห์แยกสัญญาณที่สะท้อนมาจากผิวของโครงสร้างคอนกรีต และสัญญาณที่สะท้อนมาจากวัตถุต่างๆในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.3 คำนวณเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้เดินทางและสะท้อนกลับจากแต่ละวัตถุ เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุต่างๆที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ

- (1) **ความชื้นของคอนกรีต** : เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าคอนกรีตมาก กรณีความชื้นของคอนกรีตไม่คงที่อาจมีผลต่อการคำนวณตำแหน่งของวัตถุหรือช่องว่างในคอนกรีต

(2) การซ้อนกันของวัตถุในโครงสร้างคอนกรีต : เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีนี้อาศัยการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ จึงมีข้อจำกัดสำหรับการตรวจสอบวัตถุที่อยู่ซ้อนกันในโครงสร้าง วิธีการนี้จะไม่สามารถแยกแยะวัตถุที่อยู่ซ้อนกันได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่วัตถุดังกล่าวมีรูปร่างไม่แน่นอน

6.2 ข้อควรระวัง

- (1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ อาจจะปล่อยพลังงานในช่วงของไมโครเวฟซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นผู้ดำเนินการตรวจสอบจึงควรอยู่นอกเหนือจากจุดเสี่ยง เช่น พื้นที่ใต้เสาอากาศ ระหว่างที่เครื่องกำลังทำงาน
- (2) คลื่นเรดาร์ที่ออกจากเครื่องทดสอบอาจจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณการติดต่อสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีเสาอากาศไม่ได้อยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้อง ควรควบคุมให้คลื่นเรดาร์ที่ถูกปล่อยออกมาไม่ทิศทางเข้าสู่โครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบ

7. การแปลความผลการทดสอบ

7.1 ตรวจสอบสภาพภายในของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นได้จากภาพของคลื่นที่สะท้อนมาจากแต่ละตำแหน่ง โดยเปรียบเทียบลักษณะคลื่นที่สะท้อนมาจากจุดที่ไม่มีวัตถุอื่นและจุดที่มีการเปลี่ยนแปลง

7.2 ความลึกของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีตหรือความหนาของชั้นคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดย

T : ความหนาของวัสดุที่ทำการวัดได้

ϵ_r : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีต

Δt : เวลาที่คลื่นใช้ในการสะท้อนกลับมายังตัวรับส่งสัญญาณ

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 เมื่อกระทบกับรอยต่อระหว่างวัตถุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันมาก คลื่นเรดาร์จะสะท้อนและหักเหเมื่อกระทบกับรอยต่อดังกล่าว และขนาดของคลื่นสะท้อนมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constants) ของวัตถุทั้งสองดังสมการ

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3)$$

โดยที่

A : ขนาดของคลื่นสะท้อน

A_0 : ขนาดของคลื่นเริ่มต้น

ϵ_1 : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวกลางที่ 1

ϵ_2 : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวกลางที่ 2

การตรวจสอบลักษณะภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีตและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งอาจเป็นช่องว่าง โลหะ หรือ วัสดุอื่น โดยความแตกต่างระหว่างคอนกรีตและโลหะ หรือ ช่องว่างนั้นเพียงพอต่อการตรวจสอบในกรณีทั่วไป

ระยะห่างจากผิวคอนกรีตของวัตถุที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต คำนวณได้จากเวลาที่คลื่นเรดาร์ใช้ในการเดินทางไปและสะท้อนกลับดังแสดงในสมการ

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

โดย

T : ระยะห่างของวัตถุจากผิวคอนกรีต

ϵ_r : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีต

Δt : เวลาที่คลื่นใช้ในการสะท้อนกลับมายังตัวรับส่งสัญญาณ

c : ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนผสม ประเภทของวัสดุที่ใช้ผสม และความชื้นของคอนกรีต ซึ่งสามารถตรวจวัดได้หากมีส่วนของโครงสร้างที่มีความหนาเหมาะสม

2. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆมีค่าแตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

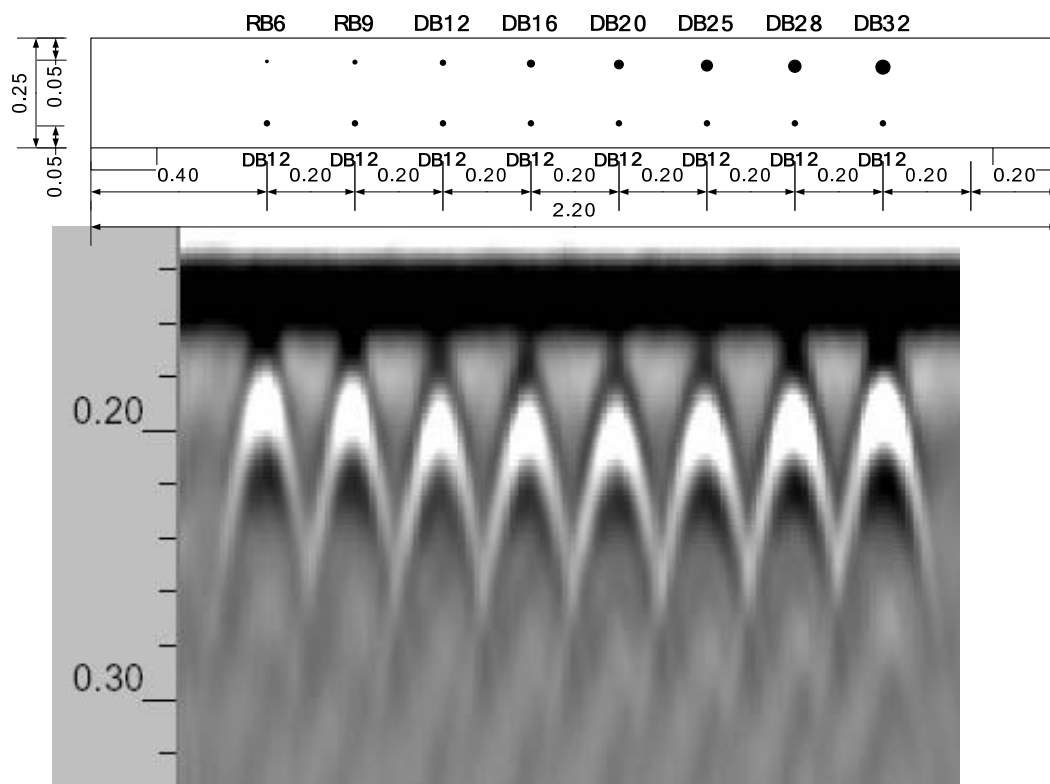
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุประเภทต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
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

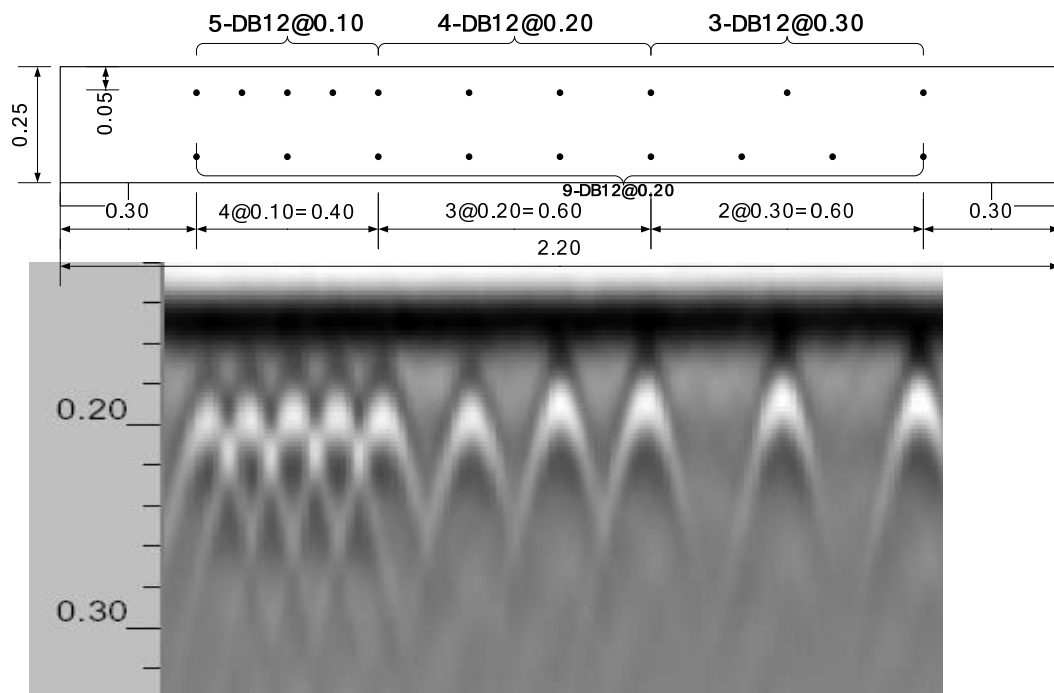
ภาคผนวก 2 ตัวอย่างผลการทดสอบแท่งตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

- รูปที่ 2 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กเสริมขนาดต่างๆกัน โดยการใช้อัลตราซาวด์สามารถช่วยหาดำแหน่งของเหล็กเสริมที่อยู่ในโครงสร้างได้ โดยจุดบนสุดของส่วนโค้งแสดงถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถสังเกตได้ว่าเหล็กที่มีขนาดแตกต่างกันก็จะให้ผลการวัดที่มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งทำให้วิธีการเรดาร์มีข้อจำกัดในการวัดขนาดของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2: ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมอยู่ด้านใน (ข้อ 9.3)

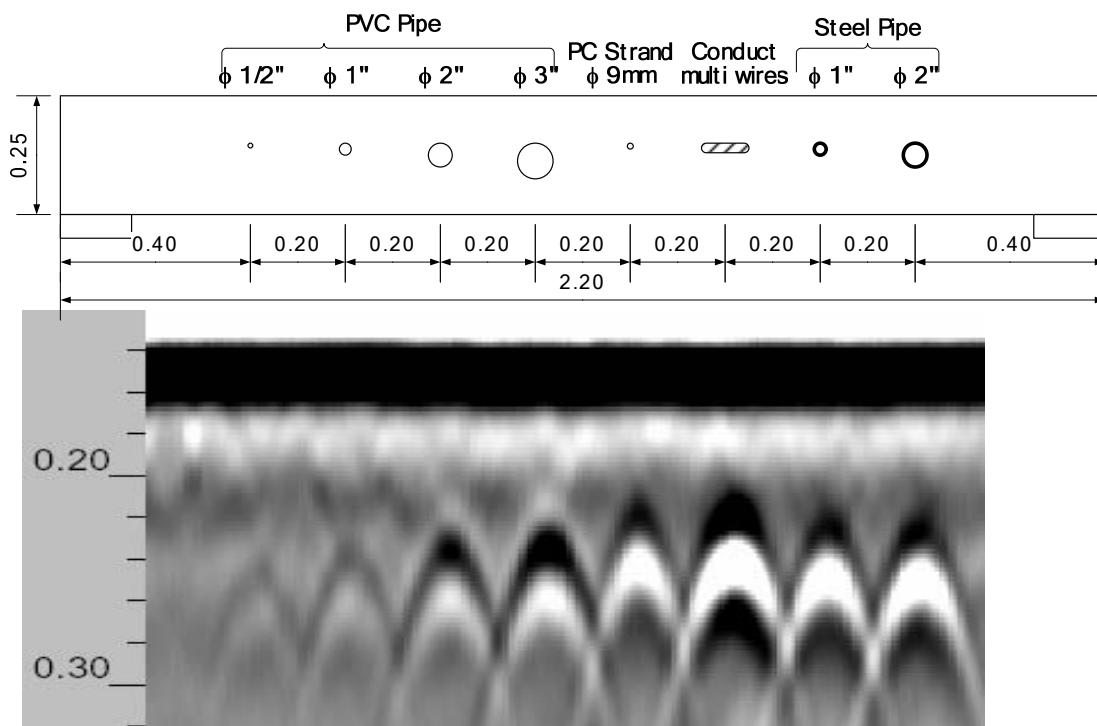
2. รูปที่ 3 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กเสริมขนาดเท่ากันแต่มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต่างกัน โดยจุดบนสุดของส่วนโค้งแสดงถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้าง
ที่มีเหล็กเสริมอยู่ด้านในกรณีเหล็กเสริมมีระยะห่างต่างกัน
(ข้อ 9.3)

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

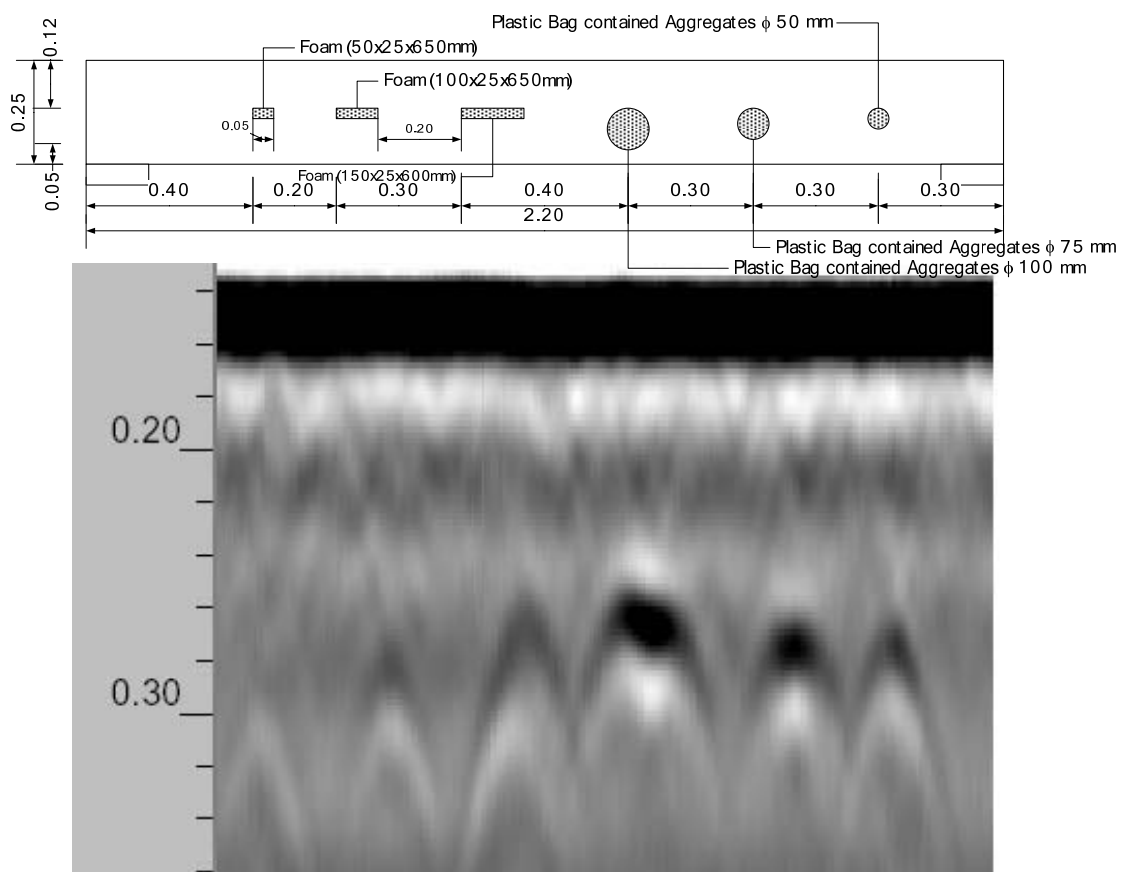
จะเห็นว่าสัญญาณสะท้อนจากท่อพีวีซี จะไม่ชัดเจนเท่ากับท่อเหล็ก เนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเล็กทริกของคอนกรีตกับท่อพีวีซี น้อยกว่าความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเล็กทริกของคอนกรีตกับท่อเหล็ก



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่มีท่อชนิดต่างๆ ภายใน
(ข้อ 9.3)

4. รูปที่ 5 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีโพรงโดยจำลองจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบ และแผ่นโฟมที่ระดับความลึกเดียวกัน และมีขนาดต่างๆ กัน

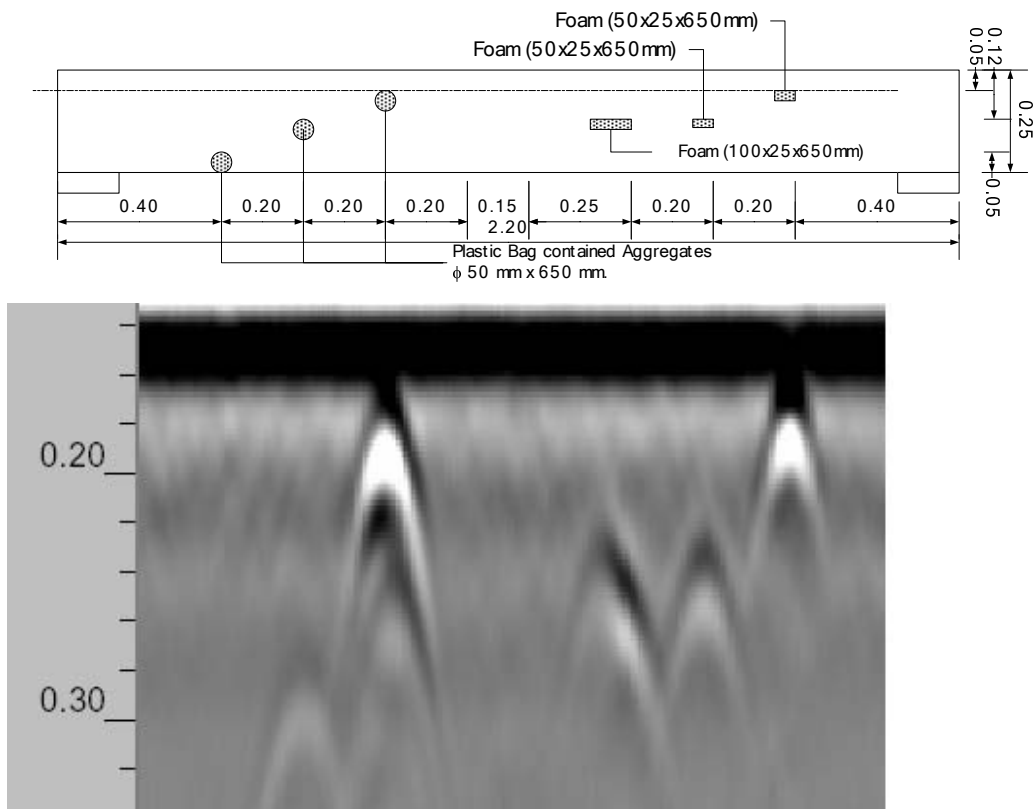
จะเห็นได้ว่าสัญญาณสะท้อนจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบและแผ่นโฟม จะไม่ชัดเจนเท่ากับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็กเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเล็กทริกน้อยกว่ากรณีกอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็ก



รูปที่ 5 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้าง
ที่มีโพรงภายใน ที่ระดับความลึกเดียวกัน แต่มีขนาดต่างกัน
(ข้อ 9.3)

5. รูปที่ 6 แสดงผลการวัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีโพรงโดยจำลองจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบ และแผ่นโฟมที่มีความลึกต่างๆ กัน

จะเห็นได้ว่าสัญญาณสะท้อนจากถุงพลาสติกหุ้มมวลรวมหยาบและแผ่นโฟม จะไม่ชัดเจนเท่ากับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็กเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าไดอิเล็กทริกน้อยกว่ากรณีกอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือท่อเหล็ก



รูปที่ 6 ตัวอย่างผลแบบ Grey-Level Chart แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้าง
ที่มีโพรงภายในที่มีความลึกต่างกัน
(ข้อ 9.3)

คณะกรรมการกำกับดูแลการปฏิบัติงานของที่ปรึกษา
เรื่อง มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
(Nondestructive Test)

1.	นายเอกวิทย์	ธีระพร	รองอธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง	ประธานกรรมการ
2.	นายศิริชัย	กิจจารึก	ผู้อำนวยการสำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ	กรรมการ
3.	นายมนต์ชัย	ศุภมาร์คภักดี	วิศวกรวิชาชีพ 9 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
4.	นายนพ	โรจนวานิช	วิศวกรวิชาชีพ 9 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
5.	นายวิเชียร	ธนสุกาญจน์	วิศวกรโยธา 8 สวค.	กรรมการ
6.	นายวิสุทธิ์	เรืองสุขวรรณ	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
7.	นายเสถียร	เจริญเหรียญ	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สนอ.	กรรมการ
8.	นายสุธี	ปิ่นไพสิฐ	วิศวกรไฟฟ้า 8 วช สวค.	กรรมการ
9.	นางขนิษฐา	ส่งสกุลชัย	วิศวกรโยธา 8 วช สวค.	กรรมการ
10.	นายไพฑูรย์	นนทสุข	นักวิชาการพัสดุ 8 ว กค.	กรรมการ
11.	นางอภิญญา	จำว้าง	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการ
12.	นายครรชิต	ชิตสุริยวนิช	วิศวกรเครื่องกล 7 วช สวค.	กรรมการ
13.	นายกนก	สุจริตสัจชัย	วิศวกรวิชาชีพ 8 วช (วิศวกรรมโยธา) สวค.	กรรมการและเลขานุการ

คณะที่ปรึกษา เรื่อง มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
(Nondestructive Test)

บริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด

หัวหน้าคณะ:

รศ. ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะทำงาน:

ดร. รัตติพงษ์ สหมิตรมงคล	Asian Institute of Technology, ประเทศไทย
นาย ณัฐมนต์ กัมปนานนท์	วิศวกรประจำบริษัทฯ
นาย จุลเสรษฐ์ ฤกษ์ณะภักดี	วิศวกรประจำบริษัทฯ
นาย อรรถวิทย์ จงใจวานิชย์กิจ	วิศวกรประจำบริษัทฯ

กรมโยธาธิการและผังเมือง

สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ

ถนนพระรามที่ 6 แขวงสามเสนใน

เขตปทุมธานี กรุงเทพฯ 10400

โทร. 0-2299-4813 โทรสาร 0-2299-4797