

ทฤษฎีการตรวจวัดความลึกของรอยร้าวด้วย คลื่นอัลตราโซนิก

ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล^{1,2}

¹ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร (SIIT)

²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

1. ปัญหาการแตกร้าวและความสำคัญของการวัดความลึกของรอยร้าว

การ แตกร้าวเป็นปัญหาที่สามารถพบเห็นได้บ่อยใน โครงสร้างคอนกรีต การ แตกร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงโครงสร้าง ความสวยงาม ความรู้สึกปลอดภัยของผู้ใช้งาน และความคงทนของโครงสร้าง การแตกร้าวนั้นสามารถ เกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวเนื่องจากพฤติกรรมของคอนกรีต เอง (เช่น การหดตัว หรือการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) การแตกร้าว เนื่องจากแรงกระทำภายนอก หรือจุดบกพร่องเนื่องจากการก่อสร้างที่ไม่มีคุณภาพ ทั้งนี้การ แตกร้าวในลักษณะต่าง ๆ นั้นจะมีพฤติกรรมของการแตกร้าว รวมถึงมีรายละเอียดลักษณะของ รอยร้าวที่แตกต่างกัน

หากรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตแล้ว ผู้ดูแลโครงสร้างมักจะมีคำถามหลักอยู่ 2 คำ ถามคือ รอยร้าวดังกล่าวนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร (สาเหตุคืออะไร) และ จะทำการซ่อมแซมรอยร้าวที่เกิดขึ้นและป้องกันไม่ให้อีกเกิดขึ้นลักษณะเดียวกัน เกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างไร (จะแก้ไขปัญหาได้อย่างไร) เพื่อที่จะตอบคำถามทั้งสองนี้ ผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องทำการตรวจสอบรอยร้าวโดยอาจจะเริ่มต้นจากการตรวจพินิจ (Visual Inspection) และทำการรวบรวมเกี่ยวกับการก่อสร้าง วัสดุที่ใช้ และระยะเวลาที่เกิดการแตกร้าวขึ้น จากข้อมูลเบื้องต้นเหล่านี้ผู้ตรวจสอบที่มีประสบการณ์จะสามารถประเมินสาเหตุ ของการแตกร้าวได้

อย่างไรก็ตามในหลาย ๆ กรณี ข้อมูลที่ได้จากการตรวจพินิจนั้นยังไม่เพียงพอต่อการกำหนดวิธีการแก้ไขซ่อมแซมได้ เพราะว่าการตรวจพินิจจะให้ข้อมูลที่ได้จากผิวของโครงสร้างเท่านั้น และจะไม่บอกถึงสภาพภายในของโครงสร้างได้ ในกรณีที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรงนั้น โดยทั่วไปความลึกของรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นข้อมูลที่จำเป็นต่อการประเมินความสามารถเชิงโครงสร้างที่เกิดรอยร้าวขึ้นนั้น และกำหนดวิธีการซ่อมแซมและปกป้องโครงสร้างที่เหมาะสม

การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเป็นวิธีการที่ค่อนข้างเป็นที่นิยมในการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งรวมถึงการตรวจวัดความลึกของรอยร้าวในโครงสร้างด้วย ซึ่งผู้เขียนจะขออธิบายทฤษฎีการตรวจวัดความลึกของรอยร้าวและข้อจำกัดของ ทฤษฎีดังกล่าวในบทความนี้

2. การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity Measurement)

คลื่น อัลตราโซนิกเป็นคลื่นกลซึ่งเป็นคลื่นชนิดเดียวกันกับคลื่นเสียงเพียงแตกต่างกันที่คลื่นอัลตราโซนิกนั้นมีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน (>20 kHz) ด้วยความถี่ที่สูงดังกล่าวคลื่นอัลตราโซนิกจึงมีความสามารถที่จะตรวจจับจุดบกพร่อง (Defect) ใน วัสดุต่างๆ ได้ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเล็ก ในปัจจุบัน การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมสูง ทั้งนี้เนื่องจากความสะดวกในการปฏิบัติงาน ระดับความแม่นยำ และความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน รูปที่ 1 แสดง ตัวอย่างระบบตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้กันอยู่ใน ปัจจุบัน (ประกอบด้วยตัวรับสัญญาณ

ตัวส่งสัญญาณ และ หน่วยประมวลผล) รูปแบบการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกส่วนใหญ่ในปัจจุบันนั้น เป็นการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity Measurement) ซึ่งเป็นการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่จากตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ไปยังตัวรับสัญญาณ (Receiver) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการวัดระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่ (Travel time, ระยะเวลาเคลื่อนที่) โดยที่ผู้ตรวจวัดจะต้องรู้ระยะทางที่แน่นอนระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ



รูปที่ 1: ระบบการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

3. ทฤษฎีการวัดความถี่ของรอยร้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

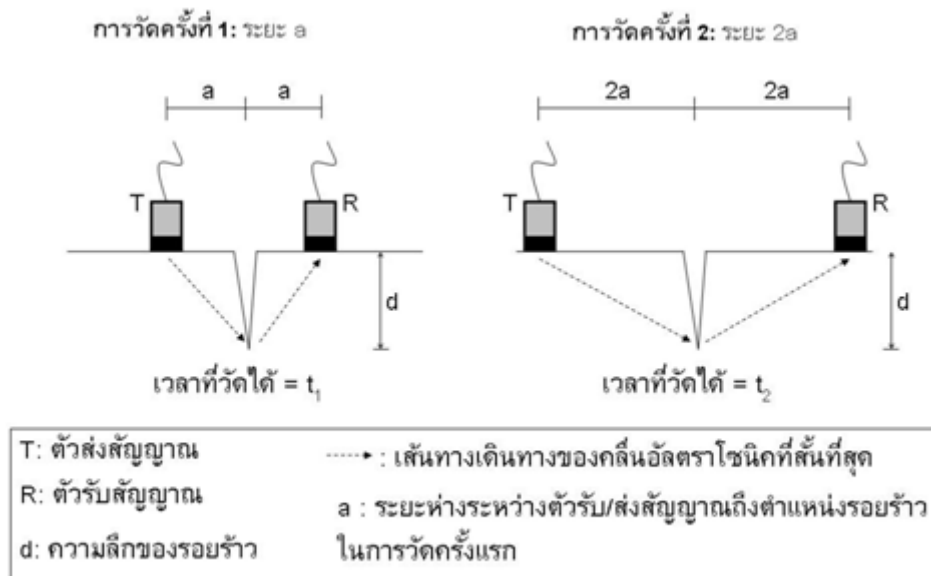
เราสามารถใช้ระบบวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกวัดระยะความถี่ของรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย ซึ่งในบทความนี้ผู้เขียนจะขอแยกตัวอย่าง 3 แบบดังนี้คือ

3.1 วิธีของ BS Standard

การวัดความลึกของรอยร้าวด้วยอัลตราโซนิกวิธีนี้เป็นวิธีที่ระบุไว้ในมาตรฐาน BS 1881: Part 203 ซึ่งเป็นวัตรยะเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่คร่อมรอยร้าว (ตัวรับและตัวส่งสัญญาณ อัลตราโซนิกอยู่คนละฝั่งของรอยร้าว) 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวรับ/ส่งสัญญาณ ในการวัดครั้งที่ 2 ให้แตกต่างไปจากการวัดครั้งแรก

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการวัดความลึกของรอยร้าวด้วยวิธีนี้ โดยสมมติให้ระยะห่างระหว่างตัวรับ/ส่งสัญญาณและตำแหน่งรอยร้าวมีค่าเท่ากับ a ในการวัดครั้งแรก และเท่ากับ $2a$ ในการวัดครั้งที่ 2 (มาตรฐาน BS 1881 กำหนดให้ a มีค่าเท่ากับ 150 มิลลิเมตร) เมื่อตัวส่งสัญญาณส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกไปในโครงสร้างที่ตรวจสอบคลื่น อัลตราโซนิกจะกระจายไปในทุกทิศทาง (ครึ่งทรงกลม) อย่างไรก็ตามรอยร้าวอยู่ระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณจะทำให้สัญญาณอัลตราโซนิกจะทำให้คลื่นไม่สามารถเคลื่อนที่ตรงจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณได้ ในกรณีนี้เส้นทางที่สั้นที่สุดที่คลื่นอัลตราโซนิกสามารถเคลื่อนที่จากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณได้คือการเคลื่อนที่อ้อมรอยร้าวดังแสดงใน**รูปที่ 2** ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในเส้นทางดังกล่าวจะไปถึงตัวรับสัญญาณได้เร็วที่สุด โดยหากเราวัตรยะเวลาเคลื่อนที่ได้เท่ากับ t_1 ในการวัดครั้งแรก และเท่ากับ t_2 ในการวัดครั้งที่ 2 เราจะสามารถคำนวณความลึกของรอยร้าวได้จาก**สมการที่ 1** ซึ่งค่า t_2 จะต้องมีค่ามากกว่า t_1 แต่จะต้องไม่เกิน $2t_1$ หากค่า t_2 ไม่อยู่ในช่วงนี้ก็หมายความว่าอาจจะมีความผิดพลาดระหว่างการทดสอบ

$$d = \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (1)$$



รูปที่ 2: วิธีการวัดความลึกของรอยร้าวตาม BS Standard

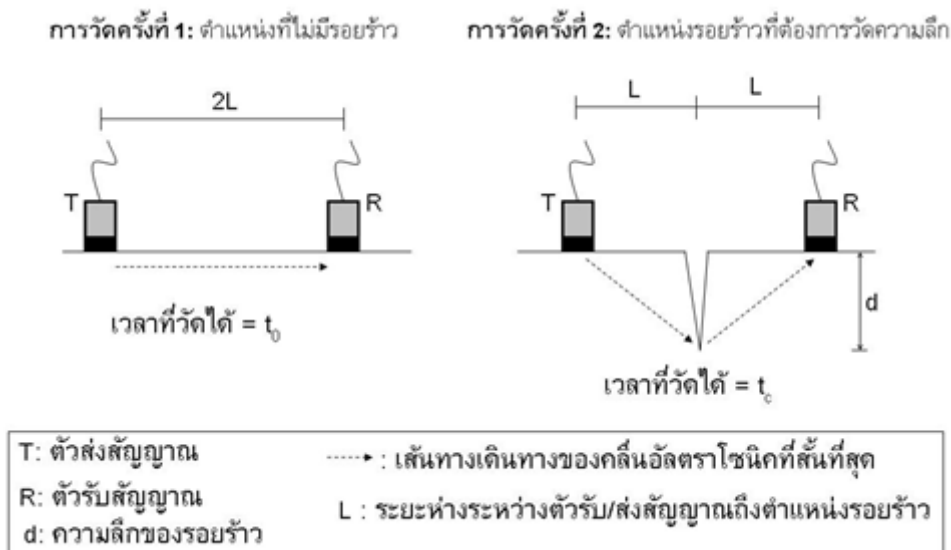
ในกรณีที่เราไม่สามารถกำหนดระยะห่างระหว่างตัวรับ/ส่งและรอยร้าวในการวัดครั้งที่ 2 ให้เป็น 2 เท่าของการวัดครั้งแรกได้ ผู้ทดสอบอาจจะปรับเปลี่ยนระยะทางได้ตามความเหมาะสม ซึ่งหากระยะห่างในการวัดครั้งที่ 2 เป็น k เท่าของการวัดครั้งแรก สมการคำนวณความลึกของรอยร้าวจะเป็นไปตาม **สมการที่ 2** (ในกรณีนี้ t_2 จะต้องมากกว่า t_1 แต่ต้องไม่เกิน kt_1)

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

3.2 วิธีการแบบ T_c-T_o (T_c-T_o Method)

วิธีการวัดความลึกของรอยร้าวแบบที่ 2 นี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับโครงสร้างที่มีขนาดจำกัดซึ่งทำให้ไม่สามารถวางตัวรับ/ส่งสัญญาณให้อยู่ห่างจากรอยร้าวตามวิธีการของ BS standard ได้ โดยทำการวัดระยะเวลาเคลื่อนที่คร่อมรอยร้าวเปรียบเทียบกับระยะเวลาเคลื่อนที่ในโครงสร้างส่วนที่คล้ายกันแต่ไม่มีรอยร้าว

รูปที่ 3 แสดง ตัวอย่างการวัดความลึกของรอยร้าวด้วยวิธีนี้ โดยจะเริ่มจากการเลือกส่วนของโครงสร้างที่ไม่มีรอยร้าวสำหรับการทดสอบหาระยะ เวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในกรณีที่ไม่มีรอยร้าว (การวัดครั้งที่ 1) โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณมีค่าประมาณ 150 – 200 มิลลิเมตร ในกรณีที่ไม่มีรอยร้าวเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่สั้นที่สุดคือการเคลื่อนที่ตามผิวจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ จากหลักการนี้ เราจะสามารถหาความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกได้จากการวัดครั้งแรกนี้ได้จากระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เคลื่อนที่ในกรณีที่ไม่มีรอย ร้าว (t_o)



รูปที่ 3: วิธีการวัดความลึกของรอยร้าวแบบ T_c-T_o

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบจุดของโครงสร้างที่เกิดการแตกร้าวขึ้น ด้วยการวางตัวรับ/ส่งสัญญาณคร่อมรอยร้าวที่ต้องการตรวจสอบโดยให้ตำแหน่งของตัวรับ/ส่ง สัญญาณ เหมือนกับการทดสอบส่วนที่ไม่มีรอยร้าว แต่ในครั้งนี้นำรอยร้าวอยู่ตรงกลางระหว่างตัวรับ และตัวส่งสัญญาณ (เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในการวัดครั้งนี้จะเหมือนกับการ ทดสอบตามวิธีของ BS Standard) ทั้งนี้หาระยะเวลาเคลื่อนที่ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ t_c เราก็จะสามารถคำนวณความลึกได้ตาม **สมการที่ 3**

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{\left(\frac{t_t}{t_0}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

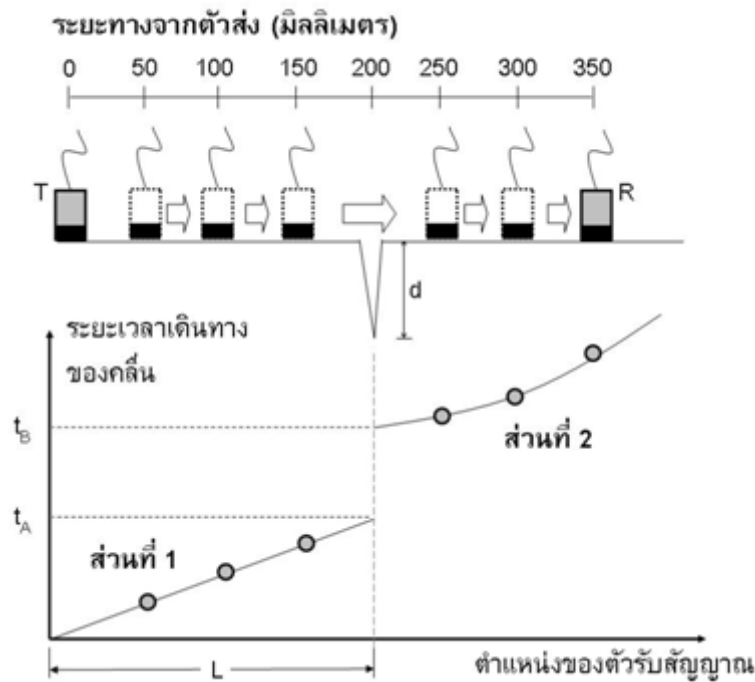
ทั้งนี้หากค่า t_c น้อยกว่า t_0 ก็จะบ่งชี้ว่ามีปัญหาในการทดสอบ เช่น คอนกรีตในบริเวณที่ทดสอบ ทั้ง 2 บริเวณอาจจะไม่เหมือนกัน เป็นต้น

3.3 วิธีการแบบ *Multi-position Measurement*

วิธีการวัดความลึกของรอยร้าวแบบสุดท้ายที่ผู้เขียนจะอธิบายในบทความนี้คือวิธีการแบบ *Multi-position measurement* ซึ่งเป็นการทดสอบรอยร้าวแบบที่คงตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณเอาไว้ แต่ปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวรับสัญญาณไปเรื่อย ๆ **รูปที่ 4** แสดงตัวอย่างการวัดความลึกของรอยร้าวด้วยวิธีนี้ โดยเริ่มจากการวางตัวส่งสัญญาณไว้ห่างจากรอยร้าว 200 มิลลิเมตร จากนั้นทำวางตัวรับสัญญาณที่ระยะ 50 มิลลิเมตร จากตัวส่งสัญญาณ (ซึ่งในกรณีนี้ตัวรับตัวส่งสัญญาณจะยังไม่คร่อมรอยร้าวด้วยเหตุนี้จึงยัง เป็นเพียงการทดสอบความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก) ทำการทดสอบแบบเดียวกันซ้ำที่ระยะ 100 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตรจากตัวส่งสัญญาณและทำการบันทึกข้อมูล ผลการทดสอบที่ได้จะเป็นส่วนที่ 1 ของกราฟ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงใน **รูปที่ 4**

หลังจากนั้น ทำการย้ายตัวรับสัญญาณไปอีกฝั่งของรอยร้าวและทำการทดสอบระยะเวลาการเคลื่อน ที่ของคลื่นอัลตราโซนิกโดยให้ระยะห่างระหว่างตัวรับ/ส่งสัญญาณมีค่า

เท่ากับ 250, 300, 350 มิลลิเมตรตามลำดับ (ในกรณีนี้ตัวรับส่งสัญญาณคร่อมรอยร้าว) ผลการทดสอบที่ได้จะเป็นส่วนที่ 2 ของกราฟดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 4: วิธีการวัดความลึกของรอยร้าวแบบ Multi-span Measurement

เราสามารถคำนวณหาความลึกของรอยร้าวได้จากค่า t_A และ t_B โดยเราสามารถหาค่า t_A ได้จากการลากเส้นตรงผ่านผลการทดสอบในส่วนที่ 1 และจุด 0-0 ความสูงของกราฟที่ระยะ L จะมีค่าเท่ากับ t_A ในขณะที่กราฟส่วนที่ 2 นั้นมีลักษณะไม่เชิงเส้น เราจึงควรหาค่า t_B ด้วยการสมมติฟังก์ชันโพลีโนเมียลในรูปแบบที่แสดงในสมการที่ 4

$$(4) \quad t = a(x-L)^2 + t_B$$

t คือ ระยะเวลาเดินทางของคลื่น

x คือ ตำแหน่งของตัวรับสัญญาณ (นับจากตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณ)

a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้สมการ (4) เข้าใกล้ผลการวัดมากที่สุด

เมื่อได้ค่า t_A และ t_B มาแล้วก็จะสามารถคำนวณหาความลึกของรอยร้าวได้จากสมการที่ 5

$$(5) \quad d = \frac{L}{2} \left(\frac{t_B}{t_A} - \frac{t_A}{t_B} \right)$$

จะสังเกตได้ว่าวิธีการนี้ต้องมีการวัดระยะเวลาเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกมากกว่า 2 ครั้ง และยังต้องมีการคำนวณที่ซับซ้อนมากกว่าสองวิธีแรกดังนั้นจึงเป็นไม่ค่อยได้ ได้รับความนิยม แต่ก็ เป็นวิธีที่สามารถนำไปประยุกต์เพื่อตรวจสอบดูว่ารอยร้าว นั้นตั้งฉากกับ ผิวโครงสร้างจริงหรือไม่

4. ข้อจำกัดของการวัดความลึกรอยร้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ถึง แม้การใช้คลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดใน การวัดความลึกของรอยร้าวใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่การใช้คลื่นอัลตราโซนิกตามทฤษฎีที่ได้อธิบายมาข้างต้นนั้นก็ยังคงมีข้อ จำกัดอยู่ค่อนข้างมาก เช่น

- o ประสิทธิภาพในการวัดความลึกจะน้อยลงหากรอยร้าวเต็มไปด้วยของเหลวหรือน้ำเพราะคลื่นอัลตราโซนิกอาจจะเคลื่อนที่ผ่านรอยร้าวได้
- o เหล็กเสริมในโครงสร้างจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดความลึกเพราะเหล็กเสริมจะส่งผลกระทบต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก
- o ในกรณีที่ผิวโครงสร้างมีลักษณะที่ไม่เรียบหรือเป็นผิวโค้ง ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะมีความคลาดเคลื่อน หรืออาจจะไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วอัลตราโซนิกได้เลย
- o ในกรณีที่มีรอยร้าวมากกว่า 1 รอยร้าวอยู่ใกล้กัน (เช่น ห่างกันไม่เกิน 100 มิลลิเมตร) จะไม่สามารถตรวจสอบความลึกของแต่ละรอยร้าวแยกกันได้

ผู้ที่นำคลื่นอัลตราโซนิกไปใช้ในการวัดความลึกของโครงสร้างจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดดังกล่าวนี้ และเข้าใจว่าวิธีการวัดรอยร้าวที่นำเสนอในบทความนี้นั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความลึกจริงของรอยร้าวได้ และต้องนำผลการวัดที่ได้ไปใช้ประกอบการตรวจสอบหรือใช้เป็นข้อมูลในการ วิเคราะห์ด้วยความเข้าใจในข้อจำกัดดังกล่าว

เอกสารอ้างอิง

- [1] BS 1881: Part 203 (1986), Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.