

## การตรวจหาการแยกตัวเนื่องจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

### Detecting Corrosion-Induced Delaminations

โดย Mohammad S. Khan

แปล / เรียบเรียงโดย สืบศักดิ์ พรหมบุญ และ ปรนิท จิตต์อารีกุล

เมื่อเหล็กเสริมคอนกรีตผุกร่อน ปริมาตรของเหล็กที่ผุกร่อนจะมากกว่าปริมาตรของโลหะเดิมหลายเท่า การขยายตัวของเหล็กเมื่อผุกร่อนนี้ก่อให้เกิดความเค้นดึงกับคอนกรีตที่อยู่รอบๆ ซึ่งทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเสียไปและเกิดช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้เรียกกันโดยทั่วไปว่า การแยกตัว (Delamination) การแยกตัวเริ่มจากระดับเล็กๆ (micro) และลุกลามไปถึงระดับใหญ่ (macro) จนในที่สุดจะทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กกะเทาะ (spalling) ซึ่งไม่ปลอดภัยกับคอนกรีต เช่น คอนกรีตพื้นสะพานหรือลานจอดรถ

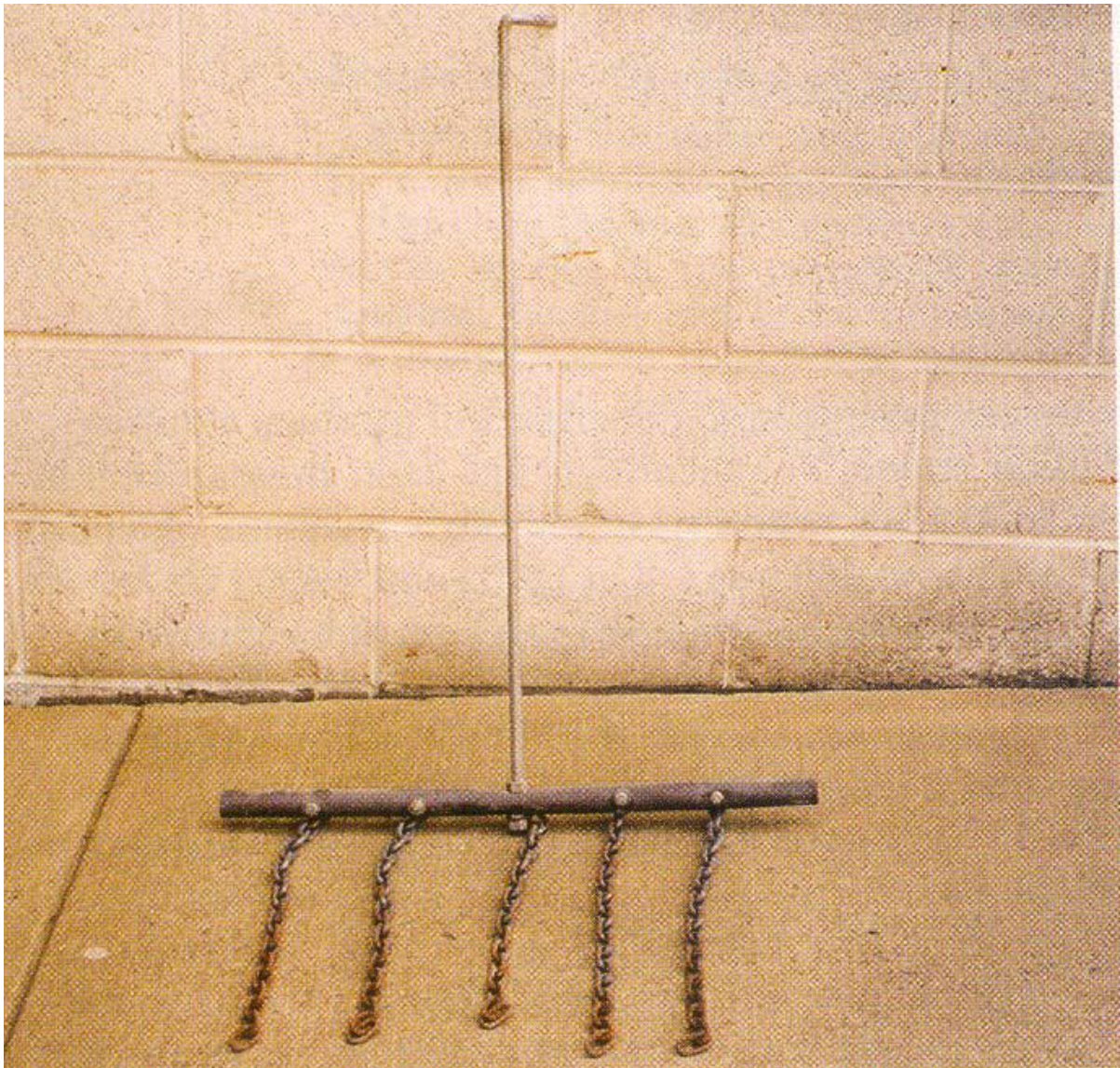
ก่อนที่จะดำเนินการซ่อมแซม ต้องสำรวจเพื่อระบุตำแหน่งและปริมาณของการแยกตัว การสำรวจและการซ่อมแซมนี้มีผลต่อเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีการที่เสียเวลาน้อยที่สุดและก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้โครงสร้างน้อยที่สุด

#### วิธีลากโซ่ (Traditional chain-drag test)

วิธีลากโซ่เป็นวิธีดั้งเดิมและพบเห็นได้มากที่สุดในการตรวจหาการแยกตัว ตรวจหาโดยการลากโซ่บนพื้นผิวคอนกรีตที่จะตรวจสอบแล้วฟังเสียงที่เกิดขึ้น คอนกรีตที่ไม่เสียหายจะทำให้เกิดเสียงคมชัด

ในขณะที่คอนกรีตที่มีการแยกตัวจะเกิดเป็นเสียงที่อหรือเสียงกลวง วิธีนี้มีกำหนดไว้เป็นมาตรฐานใน ASTM D 4580 ซึ่งกำหนดให้ใช้โซ่ยาวประมาณ 460 มม. (18 นิ้ว) เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. (1/4 นิ้ว) จำนวน 4 ถึง 5 เส้น ติดกับท่อทองแดง (copper) หรือท่ออลูมิเนียมยาว 610 มม. (2 ฟุต) แล้วติดท่อยาว 610 ถึง 910 มม. (2 ถึง 3 ฟุต) ที่กึ่งกลางท่อทองแดงหรืออลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นที่จับ ชุดอุปกรณ์ทดสอบโดยวิธีลากโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 1 วิธีนี้ง่ายและประหยัดเมื่อใช้กับงานขนาดปานกลาง แต่สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ (เช่น พื้นสะพาน) จะมีค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การควบคุมการจราจร ซึ่งเป็นผลเสียมากกว่าผลดี และในสะพานที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่นและปิด

สะพานเพียงบางส่วนเพื่อตรวจสอบ เสี่ยงจากการจราจรโดยรอบจะทำให้ลำบากในการฟังเสียงได้ ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งก็คือ วิธีลากโซ่ไม่มีวิธีการเก็บข้อมูลที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ ในการเก็บข้อมูลจะใช้สปีดเปอร์ยทำเครื่องหมายบริเวณที่เกิดการแยกตัวลงบนพื้นคอนกรีตแล้วจึงวาดภาพแสดงตำแหน่งลงบนกระดาษ



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบโดยวิธีลากโซ่แบบดั้งเดิม (Traditional chain-drag test)

ในกรณีพื้นผิวคอนกรีตแนวตั้ง โดยปกติจะใช้ค้อนเคาะ ซึ่งเสียงที่เกิดจากการเคาะของค้อนจะระบุการแยกตัวในคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน ในกรณีพื้นผิวคอนกรีตเหนือศีรษะ เช่น ใต้พื้นอาคารจอดรถ ใช้แท่งเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. (5/8 นิ้ว) หรือใหญ่กว่านั้น เป็นเครื่องมือสำหรับเคาะได้

### วิธีลากโซ่อัตโนมัติ (Automated chain-drag system)

Henderson, Costley and Dion<sup>1</sup> ได้พัฒนาวิธีลากโซ่อัตโนมัติขึ้น โดยใช้รถขนาดเล็ก (cart) ติดตั้งอุปกรณ์มีโซ่ติดไว้ใต้รถและใช้ไมโครโฟนพร้อมอุปกรณ์บันทึกสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นเมื่อรถแล่นผ่านพื้นผิวคอนกรีตที่ไม่โครโฟนมีเครื่องกั้นเสียงจากภายนอกเพื่อช่วยลดเสียงรบกวน

บรณรักษ์มีอุปกรณ์ทำเครื่องหมายอัตโนมัติและในกรณีคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแผนผังพื้นผิวคอนกรีตแสดงตำแหน่งพื้นที่ที่เกิดการแยกตัวในขณะดำเนินการทดสอบพร้อมทั้งเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ต่อไปได้ เครื่องมือนี้มีระบบกรองเสียงรบกวนภายนอกด้วยวิธีทางกลและเลือกขยายเฉพาะเสียงที่ต้องการได้ วิธีนี้ได้ใช้ตรวจสอบสะพานใน Starkville, MS และได้ผลการตรวจสอบสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการตรวจสอบพื้นสะพานแบบทั่วไป

### วิธีเครื่องกลไฟฟ้า (Electro-mechanical sounding system)

มาตรฐาน ASTM D 4580-02 “Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding” ได้เสนออุปกรณ์สำหรับตรวจหาการแยกตัวในคอนกรีต วิธีนี้ใช้รถเช่นเดียวกับวิธีลากโซ่อัตโนมัติแต่มีความแตกต่างเล็กน้อย โดยที่อุปกรณ์สำหรับวิธีนี้ใช้ล้อเหล็กสองล้อห่างกัน 152 มม. (6 นิ้ว) เคาะพื้นคอนกรีตในอัตรา 33 ครั้งต่อวินาที และมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสียงสองตัวเป็น piezoelectric hydrophone ติดอยู่ในล้ออย่างที่บรรจุน้ำมันซึ่งไม่หมุนไปกับพื้นคอนกรีต

สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับเสียงจะถูกบันทึกเป็นแถบกราฟสองช่อง (two-channel strip chart) ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องมือใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ และรับสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วง 3 มิลลิวินาทีแรกของการเคาะ นอกจากนี้ เครื่องมือจะรับสัญญาณเฉพาะที่อยู่ในช่วงความถี่ 300 ถึง 1200 เฮิรตซ์ เท่านั้นเพื่อกรอง

สัญญาณรบกวน ไม่มีรายงานการใช้เครื่องมือชนิดนี้มากนัก แต่ ASTM D 4580 กล่าวว่าวิธีนี้มีความแม่นยำต่ำกว่าวิธีลากโซ่ การประมวลผลข้อมูลของเครื่องมือนี้ดีกว่าของเครื่องมือลากโซ่อัตโนมัติ

### วิธีหมุนกระทบ (Rotary-percussion sounding system)

มาตรฐาน ASTM D 4580 ฉบับปัจจุบันยังได้เสนอเครื่องมือตรวจสอบแบบเคาะเสียงอีกชนิดหนึ่งซึ่งได้จดทะเบียนลิขสิทธิ์ไว้กับกรมทรัพย์สินทางปัญญาของสหรัฐอเมริกา (U.S. Patent and Trademark Office) อุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนเคาะสองชิ้นทำจากเหล็กกล้าแข็ง 15-point ซึ่งจะหมุนเมื่อนำไปกลิ้งบนพื้นผิวคอนกรีต ชิ้นส่วนเคาะจะกระทบกับคอนกรีตด้วยแรงที่พอเพียงที่ทำให้เกิดเสียงคมชัดบนคอนกรีตตัน แต่จะเป็นเสียงทื่อหรือเสียงกลวงบนพื้นผิวที่มีการแยกตัว อุปกรณ์นี้ใช้ได้หลากหลายบนพื้นผิวคอนกรีตใดๆ ไม่ว่าจะแวนอน, แนวตั้ง หรือเหนือศีรษะ อุปกรณ์ชนิดนี้อาจจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแท่งเหล็กธรรมดาเมื่อใช้ตรวจสอบพื้นผิวคอนกรีตแนวตั้งหรือเหนือศีรษะ

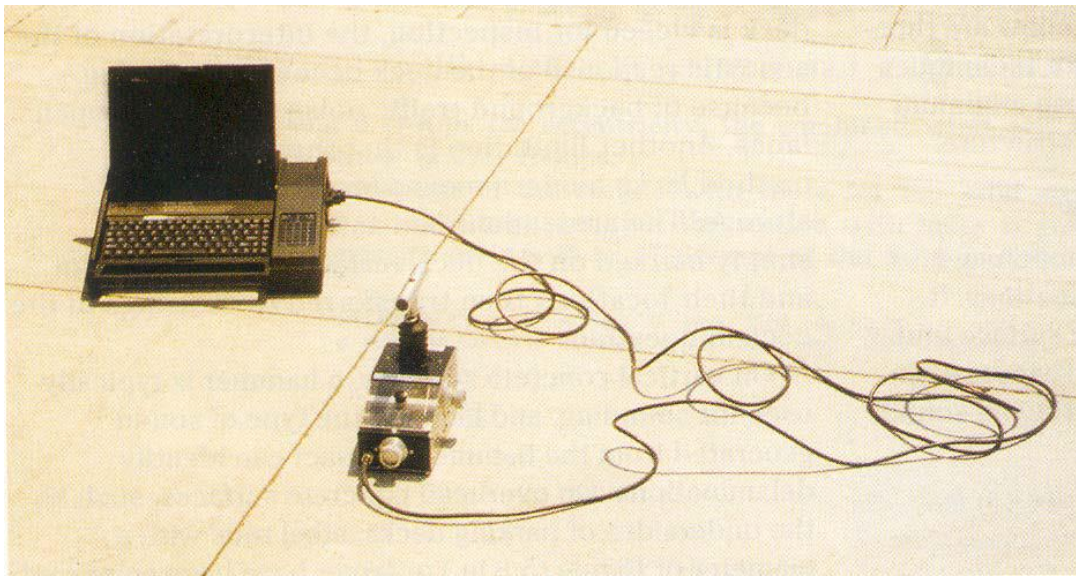
อย่างไรก็ตาม ไม่มีรายงานที่เปรียบเทียบความสามารถของเครื่องมือชนิดนี้กับเครื่องมือเคาะเสียงชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เครื่องมือนี้ยังเก็บข้อมูลและประมวลผลแบบอิเล็กทรอนิกส์ไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องทำเครื่องหมายบริเวณที่พบว่าการแยกตัวบนพื้นผิวคอนกรีตแล้วจึงวาดลงบนกระดาษต่อไปเช่นเดียวกับวิธีลากโซ่

### วิธีคลื่นความเค้นสะท้อน (Impact-echo method)

วิธี impact-echo เริ่มพัฒนามาจากโครงการวิจัยร่วมระหว่าง National Institute of Standards and Technology (NIST) และมหาวิทยาลัยคอร์เนล (Cornell University) การพัฒนาเริ่มต้นในช่วงปี 1980s และต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันซึ่งเน้นไปทางด้านการศึกษาประยุกต์ใช้งานวิธีการนี้ในรูปแบบต่างๆ

สำหรับวิธี impact-echo นี้ จะใช้เหล็กกระทบ (impactor) สร้างพลังงานกลในรูปของคลื่นความเค้น (stress wave) ให้แก่คอนกรีต คลื่นความเค้นนี้จะเคลื่อนที่ผ่านเต็มความลึกของชิ้นส่วนโครงสร้างหรือจนถึงความเสียหายในคอนกรีต แล้วสะท้อนกลับมายังพื้นผิว ความเสียหายที่ตรวจพบอาจจะเป็นช่องว่างที่เกิดจากชั้นผิวหรือชั้นทับหน้าเสียหาย คอนกรีตที่แน่นตัว (consolidated) ไม่เพียงพอ คอนกรีตหลุดตัวเมื่ออยู่ในสถานะพลาสติก

หรือจากการแยกตัวเนื่องจากการผุกร่อนของเหล็กเสริม ที่ผิวคอนกรีตมีเครื่องรับสัญญาณ (transducer) ติดอยู่ใกล้ๆ กับจุดกระทบเพื่อรับสัญญาณคลื่นสะท้อน การวิเคราะห์เรโซแนนซ์การสะท้อน (resonant echo) จากความหนาของชิ้นส่วนโครงสร้างหรือความลึกของความเสียหายทำได้ค่อนข้างง่าย ในการวิเคราะห์จะใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform) ซึ่งผลสเปกตรัมของแอมพลิจูดจะช่วยระบุความถี่หลักที่เกิดขึ้นในคลื่นสะท้อน ชุดอุปกรณ์ทดสอบโดยวิธีคลื่นความเค้นสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบโดยวิธีคลื่นความเค้นสะท้อน (Impact-echo test)(ที่มาจาก Gary Crawford, FHWA)

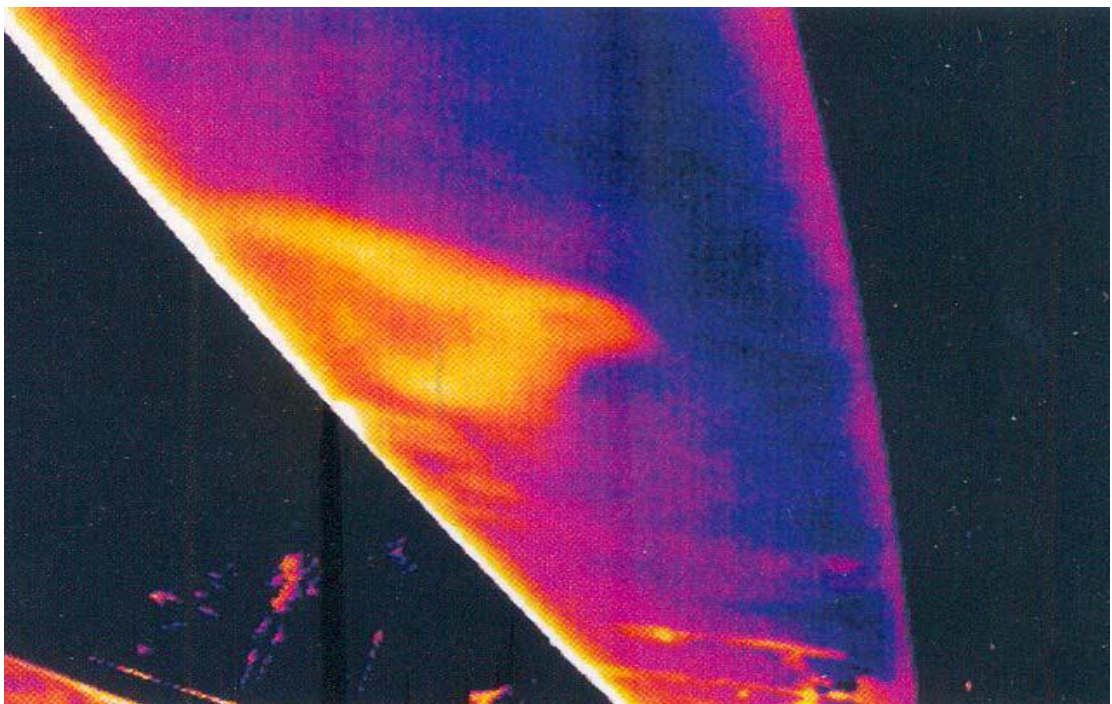
ชิ้นส่วนคอนกรีตที่ไม่มีความเสียหายภายในจะมีคุณลักษณะที่มีความถี่สูงสุดค่าเดียวซึ่งแสดงถึงความหนาของชิ้นส่วนโครงสร้าง ในกรณีแผ่นคอนกรีต ความหนา  $T$  คำนวณได้โดยหารครึ่งหนึ่งของความเร็วในการแพร่ของคลื่นความเค้น  $C_p$  ด้วยความถี่สูงสุด  $f_t$  ดังนี้

$$T = C / 2 f_t$$

ในการตรวจสอบช่วงแรก จะทดสอบค่าความเร็วของการแพร่ของคลื่นความเค้นโดยการกระแทกผิวคอนกรีตซึ่งมีคุณภาพดีที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ทราบความหนา หลังจากประมาณค่าความเร็วของการแพร่ของคลื่นความเค้นได้แล้วจึงทดสอบที่ตำแหน่งที่ต้องการและคำนวณความลึกของการสะท้อนของคลื่นต่อไป

วิธีตรวจจับความร้อนด้วยอินฟราเรด (Infrared thermography)

วิธีตรวจจับความร้อนใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ที่เมื่อระนาบอุณหภูมิแพร่ผ่านวัสดุ ถ้าหากมีความเสียหายใดๆ ในวัสดุจะทำให้อัตราการแพร่ผ่านลดลงและการไม่ต่อเนื่องของอุณหภูมินี้ตรวจจับได้บนพื้นผิวของวัตถุ กล้องอินฟราเรดสามารถบันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิที่ไม่ต่อเนื่องนี้ได้ โดยข้อมูลความเสียหายได้มาจากภาพแต่ต้องได้รับการแปลผลที่ถูกต้องเท่านั้น 2 ดังแสดงในรูปที่ 3 การใช้วิธีตรวจจับอุณหภูมิในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในงานสะพานนั้นเริ่มมีมาตั้งแต่ช่วงปี 1970s แต่ปัจจุบันก็ยังคงมีงานวิจัยเรื่องวิธีการนี้อยู่



รูปที่ 3 แสดงผลการตรวจจับความร้อนด้วยอินฟราเรดเพื่อสำรวจการแยกตัว (พื้นที่ปรากฏแสงสีส้มบ่งชี้ถึงการแยกตัวของคอนกรีต ภาพถ่ายจากใต้ท้องคาน)(ที่มาจาก Glenn Washer, FHWA)

วิธีตรวจจับอุณหภูมิสามารถตรวจจับการแยกตัวในสะพานคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามต้องมีการปรับปรุงอีกมากเพื่อให้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการสำรวจการแยกตัวในพื้นที่สะพาน ปัญหาประการหนึ่งคือความยากในการแยกแยะผลที่เกิดจากการแยกตัวกับผลที่เกิดจากวัสดุบนพื้นผิว เช่น เศษหิน เครื่องหมายบนผิวจราจรน้ำมันที่หยดบนพื้น และชิ้นส่วนโลหะ การถ่ายภาพวิดีโอรวมกับการอ่านผลอุณหภูมิจะช่วยระบุถึงผลที่เกิดจากวัสดุบนผิวในขณะวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิได้ เมื่อใช้วิธีการนี้พื้นสะพานควรสะอาดและแห้งเป็นเวลา 24 ชม. หลังฝนตก นอกจากนี้เมื่อตรวจจับอุณหภูมิความเสียหายหนึ่งได้แล้ว สิ่งอื่นๆ ที่อยู่ภายใต้จะถูกบังและตรวจจับไม่ได้

ในการแก้ปัญหาที่เกิดจากวัสดุบนพื้นผิวและการบดบัง ได้มีการใช้กล้องอินฟราเรดคู่ กล้องหนึ่งใช้งานที่ความยาวคลื่น 3 ถึง 5 ไมโครเมตร และอีกอันหนึ่งที่ 8 ถึง 12 ไมโครเมตร พร้อมกับการประมวลผลภาพขั้นสูงแต่ก็ประสบความสำเร็จในระดับจำกัด วิธีตรวจจับอุณหภูมิเพื่อตรวจหาการแยกตัวมีกำหนดเป็นมาตรฐานใน ASTM D 4788 “Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared

Thermography”

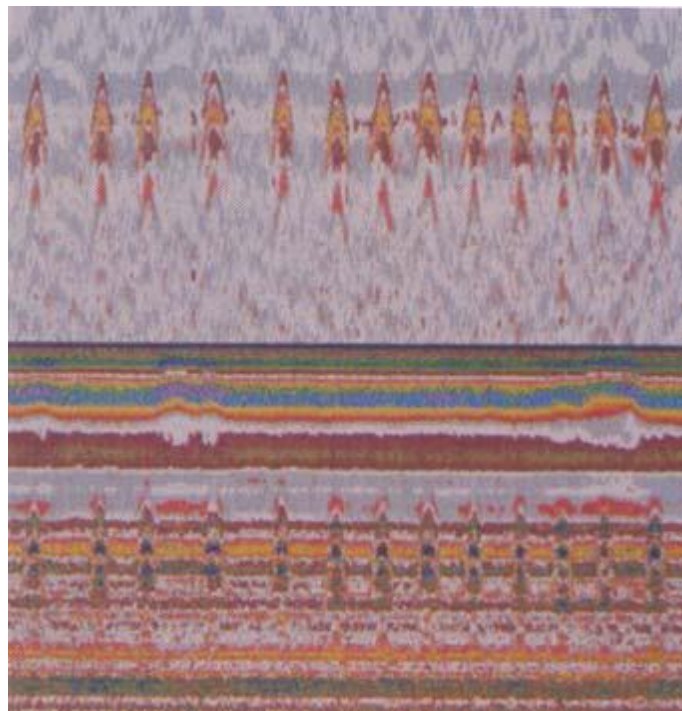
### วิธีเรดาร์ (Ground-penetrating radar)

Ground-penetrating radar (GPR) จะส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic energy) ในรูปของคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency pulse) เข้าสู่พื้นถนน สะพาน หรือวัตถุอื่นใดที่ต้องการทดสอบ เมื่อพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าสัมผัสกับรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน พลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับ วิธีการนี้ใช้เรดาร์จับสัญญาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากพื้นผิวรอยต่อเหล่านี้ จากนั้นจึงคำนวณคุณสมบัติภายใต้โดยใช้ทฤษฎีฟิสิกส์ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่น

มีการใช้งานเทคโนโลยี GPR มาเป็นเวลาหลายปีแล้วจากผู้ผลิตต่างๆ ตัวอย่างเช่น กรมทางหลวงของรัฐ Arizona ได้สำรวจสะพานจำนวน 134 สะพานทั่วมลรัฐโดยใช้ GPR5 ผู้สำรวจสรุปว่าวิธีการนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือคัดกรองขั้นต้นสำหรับงานตรวจสอบสะพานแบบละเอียด อย่างไรก็ตาม รายงานนี้ไม่ได้รายงานถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล GPR กับการเสื่อมสภาพที่แท้จริง

ในการตรวจสอบอีกงานหนึ่ง ใช้ GPR กับสะพานข้ามแม่น้ำ Connecticut ใน New Hampshire เพื่อกำหนดขอบเขตการรื้อและบำรุงรักษาพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปูทับด้วยแอสฟัลท์ อย่างไรก็ตาม ผู้ตรวจสอบรายงานว่าประสบกับความยุ่งยากในการแยกแยะปริมาณการซ่อมแซมและการบำรุงรักษาเนื่องจากฐานข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจมีน้อย ข้อมูลจาก GPR ได้จำแนกสะพานเข้าประเภทรื้อแล้วสร้างใหม่ซึ่งขัดกับความคาดหมาย เมื่อใช้ข้อมูลเพิ่มเติม คือ การตรวจสอบใต้สะพานด้วยสายตา กรมทางหลวงแห่งรัฐ New Hampshire ในฐานะเจ้าของสะพานก็ดำเนินการซ่อมแซมแทนที่จะรื้อแล้วสร้างใหม่

การแปลผล GPR ที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญมากในการใช้งานให้ประสบความสำเร็จ การแปลข้อมูลเรดาร์จากภายใต้ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญสูงเนื่องจากภาพจาก GPR เป็นภาพขยายสัญญาณที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน ดังนั้น จึงยังคงมีงานวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เข้าใจถึงสัญญาณสะท้อน GPR ได้ดีขึ้น 7 ภาพขยายสัญญาณจาก GPR ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ภาพขยายสัญญาณจากวิธีเรดาร์ (Ground-penetrating radar) (ที่มาจาก Gary Crawford, FHWA)



### โครงการของ FHWA

Federal Highway Administration (FHWA) ในสหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำในการพัฒนา GPR มาตั้งแต่ปี 1995 FHWA ได้สนับสนุน Lawrence Livermore National Laboratories เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบสองระบบคือ HERMES (High Speed Electromagnetic Roadway Measurement and Evaluation System) และ PERES (Precision Electromagnetic Roadway Evaluation System)8 HERMES ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นรถพ่วงยาว 9 เมตร (30 ฟุต) ติดตั้งเสาอากาศรับสัญญาณ 64 อันพร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ วงล้อถอดรหัส คอมพิวเตอร์และที่เก็บข้อมูล อุปกรณ์นี้สามารถสแกนที่ความกว้าง 2 เมตร (6.5 ฟุต) ไปตามสะพานหรือถนนที่ความเร็วในการจราจรปกติ PERES เป็นรถพ่วงยนต์ขนาดเล็กที่มีตัวรับสัญญาณ GPR ใช้ในงานที่ต้องการข้อมูลโดยละเอียดและยอมให้ปิดการจราจรได้



รูปที่ 5 ระบบตรวจสอบโดย HERMES



รูปที่ 5 ระบบตรวจสอบโดย HERMES

### การเลือกวิธีที่เหมาะสม

เกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกวิธีที่เหมาะสมในการตรวจสอบการแยกตัวในคอนกรีตเนื่องจากการผูกกร่อนคือ ความง่าย, ประสิทธิภาพ และ ความประหยัด ในหลายกรณีวิธีลากโซ่หรือใช้ค้อนเคาะเป็นวิธีที่สมดุที่สุดตามเกณฑ์ดังกล่าว วิธีนี้ง่ายจึงดำเนินการได้โดยผู้ตรวจสอบที่ได้รับการฝึกฝนมา ในพื้นที่ขนาดใหญ่ก็ครอบคลุมได้โดยเพิ่มจำนวนคนงานโดยที่ระยะเวลาและและราคาก็ยังคงอยู่ในระดับที่เหมาะสม วิธีนี้ใช้ได้ง่ายกับชิ้นส่วนคอนกรีตส่วนใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นพื้นผิวแนวอน แนวดิ่ง หรือเหนือศีรษะ แต่ข้อจำกัดประการสำคัญของวิธีนี้ก็คือเก็บข้อมูลในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ไม่ได้

ตัวอย่างงานที่เหมาะสมกับวิธีลากโซ่หรือค้อนเคาะก็คืออาคารจอดรถที่ต้องการตรวจสอบปริมาณ

การแยกตัวของคอนกรีต พื้นด้านบนและล่าง คาน เสา และผนัง โดยอาจสำรวจตอนกลางคืนหรือในวันหยุด ในขณะที่มีรถจอดไม่มากและกีดขวางผู้ใช้อาคารน้อยที่สุด

วิธีการนี้จะไม่มีประสิทธิภาพในงานที่ระยะเวลาเป็นปัจจัยสำคัญและมีพื้นที่คอนกรีตปริมาณมาก เช่น พื้นสะพาน เนื่องจากต้องควบคุมการจราจร จึงอาจใช้วิธีลากโซ่อัตโนมัติแทน วิธีนี้ได้แก้ปัญหาวงจรลากโซ่แบบเดิมบางประการโดยกรองเสียงรบกวนออกและเก็บข้อมูลในรูปอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม รายงานการใช้งานวิธีนี้มีอยู่น้อย

ในงานตรวจสอบโดยละเอียดที่มีพื้นที่คอนกรีตขนาดเล็ก วิธี impact-echo จะมีข้อดีหลายประการ โดยสามารถจำแนกการแยกตัวเนื่องจากการรุกรานจากความเสียหายประเภทอื่นๆ ได้ เนื่องจากให้ข้อมูลความลึกของความเสียหาย และโดยปกติจะทราบความลึกของเหล็กเสริมที่เป็นต้นเหตุของการแยกตัวจากการรุกรานได้ง่ายจากแบบหรือใช้มิเตอร์แม่เหล็กตรวจวัด ในการใช้งาน impact-echo ต้องเจาะแท่งคอนกรีตเล็กน้อยเพื่อวัดค่าความเร็วคลื่นและการใช้งานอุปกรณ์และแปลผลต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และได้รับการอบรมในระดับที่สูงกว่าของวิธีลากโซ่ วิธี impact-echo อาจใช้แทนเมื่อใช้วิธีฟังเสียงอื่นๆ ไม่ได้ เช่น การตรวจหารอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง (post-tension)

วิธีตรวจวัดอุณหภูมิเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในห้องทดลองที่สามารถให้ความร้อนแก่ตัวอย่างได้เหมาะสมก่อนการทดสอบ แต่ในสนามจะมีข้อจำกัดหลายประการ โดยจะใช้งานได้เฉพาะในวันที่มีแดดจ้า ไม่มีเมฆหรือไม่มีฝน อีกทั้งวัสดุแปลกปลอม เช่น เศษหิน สีทาถนน น้ำมันจารกถยนต์ และชิ้นส่วนโลหะหรือเงาจากต้นไม้และรางเหล็กกั้นถนนจะทำให้เกิดสัญญาณผิดได้ ดังนั้น จึงต้องมีการสำรวจด้วยสายตาอย่างรอบคอบหรือถ่ายภาพวิดีโอเพื่อให้ได้ผลดี วิธีนี้จะไม่เหมาะสมกับผิวคอนกรีตที่อยู่ในร่ม เช่น อาคารจอดรถหรือใต้สะพานนอกจากนี้ยังต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานและแปลผลที่มีความรู้และได้รับการอบรมเป็นอย่างดีเช่นเดียวกับวิธี impact-echo

วิธีเกือบทั้งหมดที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ไม่สามารถตรวจหาความเสียหายที่ซ้อนกันได้ เมื่อตรวจหาความเสียหายได้ที่หนึ่ง จะตรวจหาความเสียหายที่อยู่ภายใต้ความเสียหายแรกไม่ได้ ซึ่งเป็นปัญหา

ใหญ่ วิธี GPR เป็นวิธีเดียวที่ตรวจสอบลักษณะได้ตลอดความหนาของชิ้นส่วนคอนกรีต และสามารถตรวจหาความเสียหายที่ซ่อนกันได้ แต่วิธีนี้ก็ยังไม่พัฒนาไปจนถึงขั้นที่จะใช้ตรวจสอบการแยกตัวจากการผุกร่อนได้ง่าย มีประสิทธิภาพและประหยัด การประมวลผลภาพและระบบช่วยในการตัดสินใจเป็นปัญหาใหญ่ที่สุดที่เป็นอุปสรรคในการพัฒนาวิธีการนี้ให้สมบูรณ์ ปัจจุบันนี้ ระบบ GPR ที่มีในท้องตลาดสามารถใช้เป็นวิธีคัดกรองในการตรวจหาการแยกตัวในสะพาน

ในการพัฒนา GPR ทำให้มีระบบตรวจสอบที่ขับเคลื่อนไปบนพื้นสะพานด้วยความเร็วจราจรปกติได้โดยไม่ต้องควบคุมหรือปิดการจราจรและสามารถเก็บข้อมูลการแยกตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพและประหยัดเมื่อใช้ตรวจสอบสะพานจำนวนมากก็ตามแต่ก็ยังคงต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีความรู้และได้รับการอบรมในระดับที่สูงกว่าของวิธี impact-echo และ thermography

### อ้างอิง

1. Henderson, M.E., Costley, R. D., and Dion, G.N. "Acoustic Inspection of Concrete Bridge Decks with the HollowDeck" Structural Materials Technology IV: An NDT Conference, S Alampalli, ed., Feb. 28 — Mar 30, 2000, Atlantic City, NJ, pp. 184-189.
2. Maldague, X., Krapez, J.,-C., and Cielo, P., "Temperature Recovery and Contrast Computations in NDE Thermographic Imaging Systems", Journal of Nondestructive Evaluation, V. 10, No. 1, 1991, pp. 19-30.

3. Halabe, U. B., AlQennah, H., Gangarao, H.V.S., Klinkhachorn, P., and Sazanov, E.S.,

“Nondestructive Evaluation of FRP Composite Bridge Components Using Infrared Thermography”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, eds., AIP Conference Proceedings 615, 2002, pp. 1303-1309.

4. Khan, M.S., Washer, G.A., and Chase, S.B., “Evaluation of Dual Band Infrared Thermography System for Bridge Deck Delamination Surveys”, Structural Materials Technology III: An NDT Conference, Proceedings of SPIE V. 3400, 1998, pp. 224-233.

5. Maser, K., and Bernhardt, M., “Statewide Bridge Deck Survey Using Ground-Penetrating Radar”, Structural Materials Technology IV: An NDT Conference, S Alampalli, ed., Feb 28 — Mar 30, 2000, Atlantic City, NJ, pp. 31-37.

6. Romero, F.A., Roberts, G.E., and Roberts, R.L., “Evaluation of GPR Bridge Deck Survey Results Used for Delineation of Removal/Maintenance Quantity Boundaries on Asphalt Overlaid Reinforced Concrete Deck”, Structural Materials Technology IV: An NDT Conference, S Alampalli, ed., Feb 28 — Mar 30, 2000, Atlantic City, NJ, pp. 23-30.

7. Loulizi, A., Al-Qadi, I.L., Lahouar, S., “Ground-Penetrating Radar Signal Modeling to Assess Concrete Structures”, ACI Materials Journal, V. 99, No. 3, May-June 2002, pp. 282-291.

8. Davidson, N.C., and Chase, S.B., “Initial Testing of Advanced Ground-Penetrating Radar for the Inspection of Bridge Decks — The HERMES and PERES Bridge Inspectors”, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, SPIE Conference Proceedings 3587, S.B. Chase, ed., 1999, pp. 180-185.

หมายเหตุ: บทความนี้มีจุดประสงค์ให้ผู้อ่านได้ทราบถึงวิธีการล่าสุดในการตรวจสอบการแยกตัวในคอนกรีต ก่อนที่จะใช้วิธีการใดๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทความนี้กับโครงการใดๆ ผู้อ่านควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญก่อน