การตรวจจับโพรงในชั้นคอนกรีตแบบไม่สัมผัสโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านด้วยสายอากาศแพทช์ไมโครสตริป

Non-contact Void Detection in Concrete Layers using Reflection and Transmission Coefficients Using a Microstrip Patch Antenna

เกรียงไกร ตรีฤทธิวิทยา,[1] ไชยพัฒน์ ทวีทรัพย์พิทักษ์[1] และพรพิมล ฉายแสง[2]*

Kriangkrai Treerittivitaya, [1] Chaiyapat Taweesubpithak [1] and Pornpimon chaisaeng [2*]

Received 17 March 2025, Revised 9 April 2025, Accepted 19 May 2025

ABSTRACT

This article is to present non-contact void detection in concrete layers based on the reflected power electromagnetic waves response to different permittivities of concrete with and without voids. The measurement is accomplished by employing a vector network analyzer connected with a microstrip patch antenna. The antenna was developed on a double-sided FR-4 PCB. The antenna was designed to operate at 1.614 GHz with a return loss less than -25 dB. The reflection coefficient S_{11} was measured in the concrete by the transmitting antenna, while the receiving antenna on the opposite side of concrete blocks measured the transmission coefficient S_{21}. The concrete block was measured along its length and the measurement positions were adjusted using a driven rail system. The results for the concrete sample with voids and without voids showed that the average S_{11} was -30.93 dB and -22.88 dB respectively while the average S_{21} was -16.48 and -18.86 dB, respectively. The reference values of S_{11} and S_{21} of concrete voids are respectively lower than -28.11 dB and higher than -17.53 dB. The accuracy of void detection in concrete is at 94%, that can be concluded that electromagnetic waves can be effectively applied to detect concrete voids.

Keywords: Reflection coefficient, Transmission coefficient, Concrete void

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจสอบโพรงในชั้นคอนกรีตแบบไม่สัมผัสด้วยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสะท้อนกลับ ณ ความถี่ที่ตอบสนองต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้าที่ต่างกันระหว่างคอนกรีตแบบมีโพรงและแบบไม่มีโพรง ในการตรวจวัดประยุกต์ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ทำงานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปแพทช์บนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ทำงานที่ความถี่ 1.614 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000
Department of Civil Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Tha Chang, Mueang, Chanthaburi 22000, Thailand.

[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000
Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Tha Chang, Mueang, Chanthaburi 22000, Thailand.

[*]Corresponding author: Tel. 09-4549-6517, E-mail address: pornpimon.c@rbru.ac.th

-25 dB สายอากาศส่งทำหน้าที่ส่งออกกำลังงานความถี่ไปยังคอนกรีต เพื่อตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} และสายอากาศรับด้านหลังก้อนคอนกรีตทำหน้าที่ตรวจจับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} การตรวจวัดทำตามแนวยาวของก้อนคอนกรีตและเปลี่ยนตำแหน่งการวัดด้วยระบบรางขับเคลื่อน ผลการตรวจวัดคอนกรีตในตำแหน่งโพรงและไม่มีโพรงให้ค่าเฉลี่ย S_{11} อยู่ที่ -30.93 dB และ -22.88 dB ตามลำดับ และค่าเฉลี่ย S_{21} อยู่ที่ -16.48 และ -18.86 dB ตามลำดับ ค่าอ้างอิงของคอนกรีตมีโพรง คือ S_{11} น้อยกว่า -28.11 dB และ S_{21} มากกว่า -17.53 dB การตรวจหาโพรงในชั้นคอนกรีตให้แม่นยำที่ 94% แสดงให้เห็นว่าการตรวจหาโพรงในชั้นคอนกรีตด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การสะท้อน สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน โพรงในชั้นคอนกรีต

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง สามารถขึ้นแบบเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย และสามารถรับกำลังอัดได้ดี (Zhang *et al.*, 2024) แต่ในกระบวนการก่อสร้างอาจมีข้อจำกัดที่ทำให้กระบวนการไฮเดรชันของซีเมนต์ไม่สมบูรณ์ (Hren *et al.*, 2024) หรือเมื่อเวลาผ่านไป โครงสร้างคอนกรีตอาจเสื่อมสภาพ นำไปสู่ข้อบกพร่องทางโครงสร้างต่างๆ เช่น การแยกตัว การเกิดช่องโพรงอากาศ (Concrete voids) (Jiao *et al.*, 2020) ซึ่งโพรงเหล่านี้มีอยู่หลายลักษณะ เช่น โพรงที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycombing) ซึ่งมักเกิดบนผิวหน้าคอนกรีต หรือเกิดลงไปในผิวคอนกรีต ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง ความทนทาน คุณสมบัติทางกล การซึมผ่าน และประสิทธิภาพในระยะยาวของโครงสร้างคอนกรีต (Zhang *et al*., 2020) โพรงสามารถเกิดได้ทั้งบริเวณผนังอาคาร ผิวทางคอนกรีต หรือคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น ๆ โพรงใต้ชั้นคอนกรีตเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การผสมคอนกรีตที่ไม่ได้มาตรฐาน การเทคอนกรีตที่ไม่ถูกต้อง หรือการไม่ปฏิบัติตามขั้นตอน (Hilal *et al.*, 2015) วิธีการตรวจสอบโพรงในชั้นคอนกรีตสามารถทำได้ระหว่างกระบวนการก่อสร้าง โดยสังเกตการเกิดผิวหน้าปูดพองที่มีขนาดเล็กระหว่างเทคอนกรีต แต่วิธีนี้ยากต่อการสังเกตหากแสงสว่างไม่เพียงพอ (Wang *et al.*, 2023) โดยส่วนใหญ่จึงพบการเกิดโพรงใต้ชั้นคอนกรีตเมื่อผิวคอนกรีตเกิดความเสียหายแล้ว (ภราดร และคณะ, 2566) การตรวจสอบโพรงใต้ชั้นคอนกรีต จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มคุณภาพของงานก่อสร้าง กระบวนการประเมินสภาพโครงสร้างที่ใช้โดยทั่วไปในปัจจุบันใช้เวลานานซับซ้อน (Sun *et al.*, 2025) และค่าใช้จ่ายสูง (Nguyen *et al.*, 2025) จึงมีการพัฒนาและนำเสนอเทคนิคสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

การการพัฒนาเทคนิคตรวจจับและระบุความเสียหายในคอนกรีตที่ถูกนำเสนอมีหลายเทคนิค (Hoang & Nguyen, 2020) เทคนิคอิมแพคเอกโค (Impact-echo: IE) ใช้กับระบบรางไร้หินรองราง (Ballastless track) ในระบบรถไฟความเร็วสูงของประเทศจีน อาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นเสียงเพื่อตรวจจับและระบุตำแหน่งของโพรงอากาศ รอยร้าว หรือความเสียหายภายในชั้นคอนกรีต (Tian *et al.*, 2019) อีกวิธีหนึ่งคือเทคนิคเทอโมกราฟฟีอินฟราเรด (Infrared Thermography) ซึ่งตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิวของคอนกรีตเพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายใน โดยอุณหภูมิบริเวณที่มีโพรงต่ำกว่าพื้นที่โดยรอบที่ไม่มีโพรง ส่งผลให้สามารถตรวจสอบและแสดงผลเป็นภาพเพื่อระบุตำแหน่งของโพรง (Cotic *et al.*, 2015; Yong *et al.*, 2020) นอกจากนี้ยังมีการใช้เรดาร์ย่านความถี่ไมโครเวฟ ในการตรวจสอบโพรงในคอนกรีต โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ ซึ่งใช้ในห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบกับโพรงขนาดใหญ่ หรือวิธีการตรวจหาโพรงในพื้นผิวทางคอนกรีตด้วยระบบเรดาร์ย่านความถี่ 400 MHz ซึ่งสามารถแสดงผลได้ทันที อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูงจึงเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน เทคนิคเรดาร์ความถี่ 1 GHz สามารถตรวจจับความเสียหายใต้พื้นผิวทางคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการเอฟดี

ทีดี (Finite-difference time-domain) และประมวลผลด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง ทำให้สามารถแสดงผลเป็นภาพ 3 มิติ แม้ว่าวิธีนี้จะมีความแม่นยำสูง แต่ก็มีขั้นตอนที่ซับซ้อน (Tomita & Chew, 2022; Takayama *et al.*, 2022; Thitimakorn *et al.*, 2016) การทดสอบแบบไม่ทำลายถูกพัฒนาเพื่อตรวจสอบความบกพร่องของคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบวิธีอื่น ๆ พบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงในการตรวจสอบโพรงใต้ผิวคอนกรีต เนื่องจากการตอบสนองของคลื่นความถี่ต่อโพรงใต้ชั้นคอนกรีตแตกต่างจากคอนกรีตปกติ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอากาศและคอนกรีต (Moosazadeh *et al.*, 2017; Teshale *et al.*, 2020 Cao & Al-Qadi, 2021; Yu *et al.*, 2023) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นการตรวจสอบโพรงในชั้นคอนกรีตแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นความถี่สูงจึงได้รับความสนใจ โดยอาศัยสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านที่ตอบสนองต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันระหว่างคอนกรีตมีโพรงและคอนกรีตไม่มีโพรงอยู่ภายใน ในส่วนของทฤษฎีเป็นการนำเสนอหลักการของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่าน การตอบสนองของคลื่นความถี่เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่ต่างกัน ระเบียบวิธีวิจัยเป็นการนำเสนอการจำลองและพัฒนาสายอากาศที่มีความถี่ทำงานในช่วงที่ต้องการ เพื่อให้สามารถตรวจจับโพรงในชั้นคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ ลดการสะท้อนกลับของกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศ และมีขนาดเล็ก (Haq *et al.*, 2023) การทดสอบคุณสมบัติสายอากาศ จากนั้นทดสอบระบบตรวจวัดคอนกรีตด้วยสายอากาศต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา ในการตรวจใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ทำงานร่วมกับสายอากาศต้นแบบ คอนกรีตได้รับการตรวจวัดในแต่ละตำแหน่งอย่างละเอียด ผลการวิจัยและวิจารณ์เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านที่ตอบสนองต่อโพรงในชั้นคอนกรีต กำหนดค่าอ้างอิงในการตัดสินใจ เพื่อระบุตำแหน่งของโพรงในชั้นคอนกรีต สุดท้ายเป็นการสรุปผล

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบโพรงในชั้นคอนกรีตใช้การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยพารามิเตอร์การกระเจิง (S-parameters) ซึ่งสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T) ของคลื่นความถี่ โดย S_{21} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Islam *et al.*, 2018) ในกรณีที่คลื่นเดินจากอากาศไปยังตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุอื่นความสามารถในการเดินทางผ่านวัสดุของคลื่นความถี่อธิบายได้จากค่า S_{21} ดังสมการที่ (1)

$$S_{21} = T = \frac{2\eta}{\eta_0 + \eta} \quad (1)$$

โดย η_0 คือ อิมพีแดนซ์ภายใน (Intrinsic impedance) ของตัวกลางอากาศ และ η คือ อิมพีแดนซ์ภายในของตัวกลางที่ 2 และค่า S_{11} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสดงการสะท้อนกลับของคลื่นความถี่ ดังสมการที่ (2)

$$S_{11} = \Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (2)$$

อิมพีแดนซ์ภายในของตัวกลางค่าสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างอากาศและตัวกลางจึงมีค่าสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ε_r ของตัวกลาง ดังสมการที่ (3)

$$\Gamma = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางดังสมการที่ (4)

$$T = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4)$$

วัสดุที่มี ε_r ต่ำ คลื่นความถี่สามารถส่งผ่านได้ดีและเกิดการสะท้อนกลับน้อย คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าอากาศ (พรพิมล และ คณะ, 2566)

ดังนั้นคอนกรีตบริเวณที่มีโพรงจึงเกิดการส่งผ่านคลื่นได้ดี และสะท้อนกลับน้อย ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ S_{21} และ S_{11} เพื่อตรวจสอบโพรงใต้ชั้นคอนกรีต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปแพทช์

การรับส่งคลื่นความถี่ประยุกต์ใช้สายอากาศไมโครสตริปแพทช์ จำนวน 2 ตัว โครงสร้างสายอากาศได้รับการคำนวณเบื้องต้นด้วยทฤษฎี ข้อมูลจากการคำนวณถูกใช้เป็นพื้นฐานในการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโครงสร้างในการจำลองใช้คุณสมบัติของแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 และใช้การป้อนสัญญาณแบบโพรบโคแอกเชียล โครงสร้างของสายอากาศแสดงดังใน Figure 1

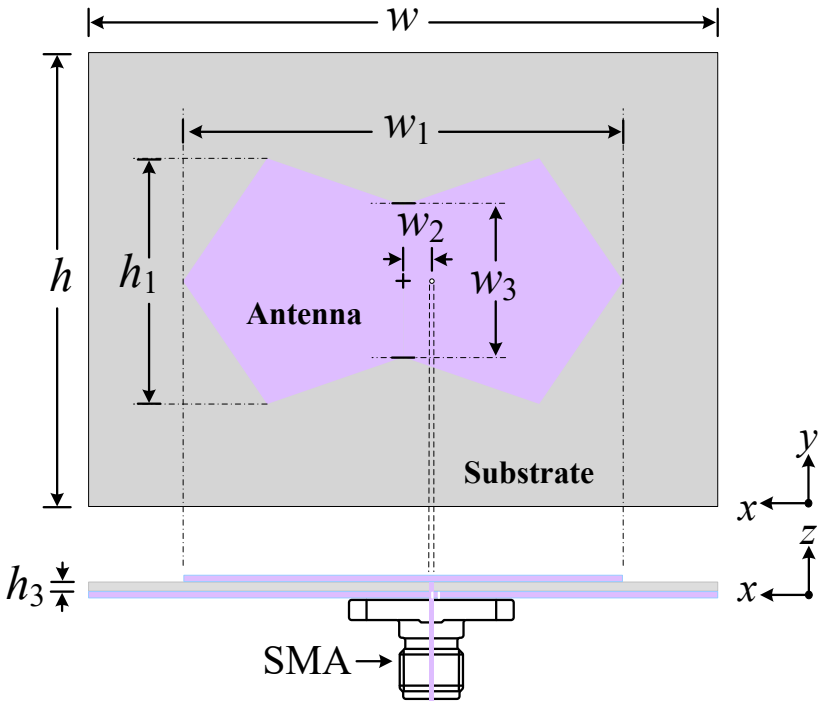
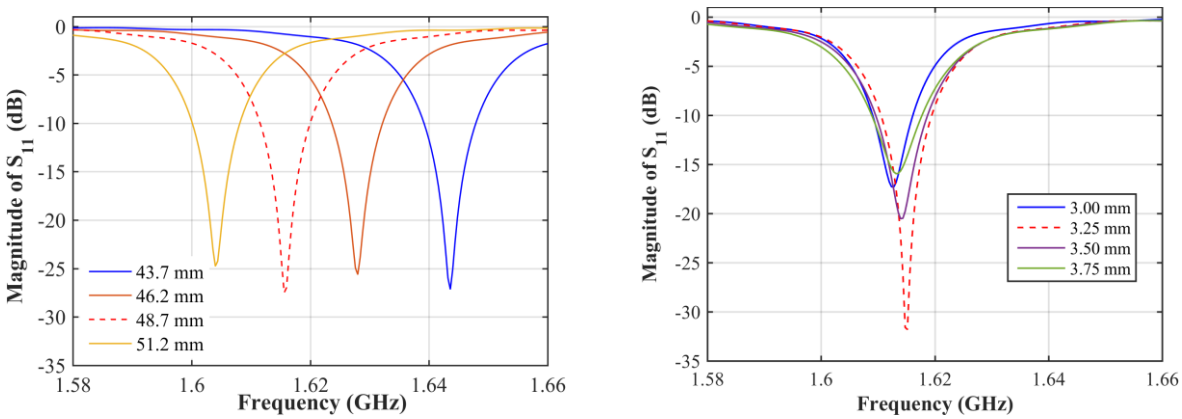


Figure 1 Configuration of the Microstrip Antenna

ขนาดพื้นผิวของตัวนำ (w_1) ได้รับการปรับเพื่อให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ หรือค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ทำงานของระบบ โดยขนาด w_1 ได้รับการปรับในช่วง 43.7 ถึง 51.2 มม. และขนาดของตัวนำที่เหมาะสมอยู่ที่ 48.7 มม. สายอากาศทำงานได้ดีที่ความถี่ 1.614 GHz ดังแสดงใน Figure 2 (a) จากนั้นจึงปรับระยะของจุดป้อนสัญญาณ w_2 ซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำที่ระยะ 3 มม. และ 3.25 ถึง 3.75 มม. ค่า S_{11} อยู่ที่ -16.28 dB และ-31.12 ถึง -15.95 dB ระยะที่ให้ค่า S_{11} ต่ำสุดที่ความถี่ 1.614 GHz อยู่ที่ 3.25 มม. ให้ค่า S_{11} ที่ -31.12 dB ดังแสดงใน Figure 2 (b) โครงสร้างของสายอากาศในการจำลองได้รับการปรับ เพื่อให้สายอากาศทำงานได้ดีที่ความถี่ 1.614 GHz และขนาดที่เหมาะสมแสดงดัง Table 1

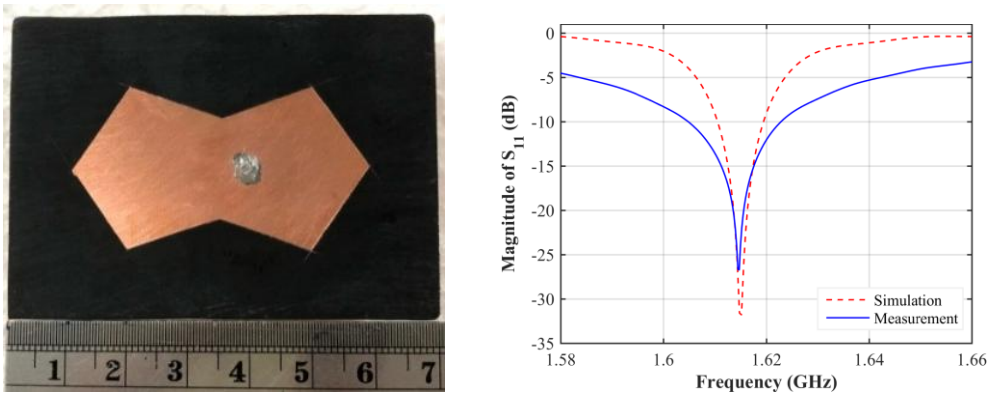


(a) (b)

Figure 2 Variations of S_{11} versus frequency for different (a) sizes of patch (w_1) (b) feed points (w_2)

Table 1 Dimension of antenna

Parameter	h	w	w_1	h_1	h_3	w_2	w_3
Value (mm)	50.0	70.0	48.7	25.6	1.414	3.25	16.74



(a) (b)

Figure 3 (a) Prototype and (b) return loss measurements for microstrip antenna

ขนาดที่เหมาะสมจากการจำลองได้รับการนำมาใช้ในการพัฒนาสายอากาศต้นแบบ โดยพัฒนาบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 วัสดุฐานรอง (Substrate) มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.4 และมีความหนา 1.414 มม. ขนาดของสายอากาศต้นแบบอยู่ที่ 50x70 มม. แสดงดัง Figure 3 (a) สายอากาศต้นแบบได้รับการทดสอบช่วงความถี่ทำงานด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) ของบริษัท Keysight รุ่น ENA E5063A 18 GHz ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -25 dB ที่ความถี่ 1.614 GHz ดังแสดงใน Figure 3 (b) แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้รับการพัฒนาเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ในการตรวจหาโพรงในชั้นคอนกรีต เนื่องจากให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำและมีช่วงความถี่ทำงานที่เหมาะสม

2. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

วัสดุที่ใช้เป็นตัวแทนของคอนกรีตตัวอย่างสำหรับทดสอบ (Material under test: MUT) เป็นมอร์ตาร์ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และทราย เนื่องจากหินและทรายมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกัน (Oswald *et al.*, 2018) ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อการส่งผ่านและสะท้อนของคลื่นความถี่สูงในลักษณะคล้ายกัน มอร์ต้าที่ใช้มีอัตราส่วนซีเมนต์และทรายเป็น 1 : 2.5 หล่อตามแบบที่ขนาด 38x16x8 ซม.

จำนวน 1 ตัวอย่างมีโฟมอยู่ภายในเพื่อใช้เป็นตัวแทนของโพรงอากาศ เนื่องจากมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสอดคล้องกัน จำนวน 2 โพรง ขนาด 3.5x3.5x7 ซม. และขนาด 3.5x3.5x6 ซม. บ่มเป็นเวลา 14 วัน โครงสร้างแสดงดัง Figure 4

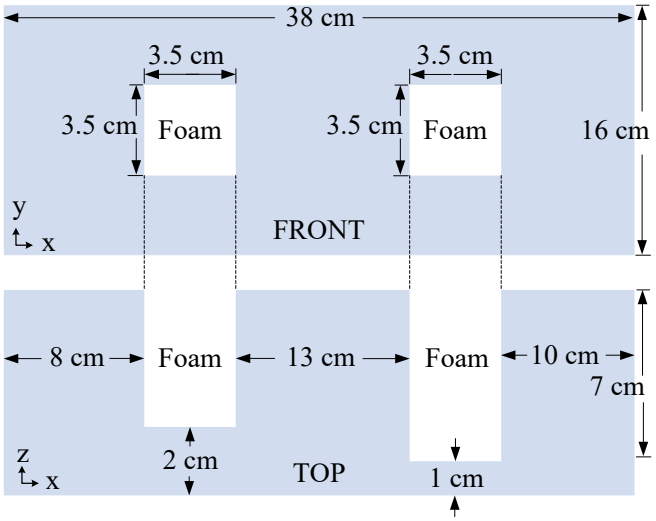


Figure 4 Concrete sample (MUT) geometry

3. การตรวจวัดโพรงในชั้นคอนกรีต

คอนกรีตได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่อง VNA ในช่วงความถี่ 1.5 ถึง 1.7 GHz การตรวจวัดใช้เครื่อง VNA ทำงานร่วมกับสายอากาศรับส่งที่ได้รับการพัฒนา สายอากาศส่งถูกต่อเข้ากับพอร์ตที่ 1 ของเครื่อง VNA และสายอากาศรับถูกต่อเข้ากับพอร์ตที่ 2 คอนกรีตตัวอย่างอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ดังแสดงใน Figure 5 การตรวจวัดทำตามแนวยาวของคอนกรีต ตำแหน่งตรวจวัดแต่ละครั้งห่างกัน 2 ซม. ทั้งหมด 20 ครั้ง ตรวจวัดที่ระยะ 0 2 4 ถึง 38 ซม. ในแต่ละตำแหน่งตรวจวัดซ้ำ 10 ครั้ง และเฉลี่ยเพื่อให้ข้อมูลถูกต้องมากที่สุด ข้อมูลจากการตรวจวัดประกอบด้วย S_{11} คือ สัมประสิทธิ์สะท้อน เกิดจากคลื่นเดินทางออกไปตกกระทบกับคอนกรีตและถูกตรวจจับด้วยสายอากาศส่งดังแสดงใน Figure 6(a)

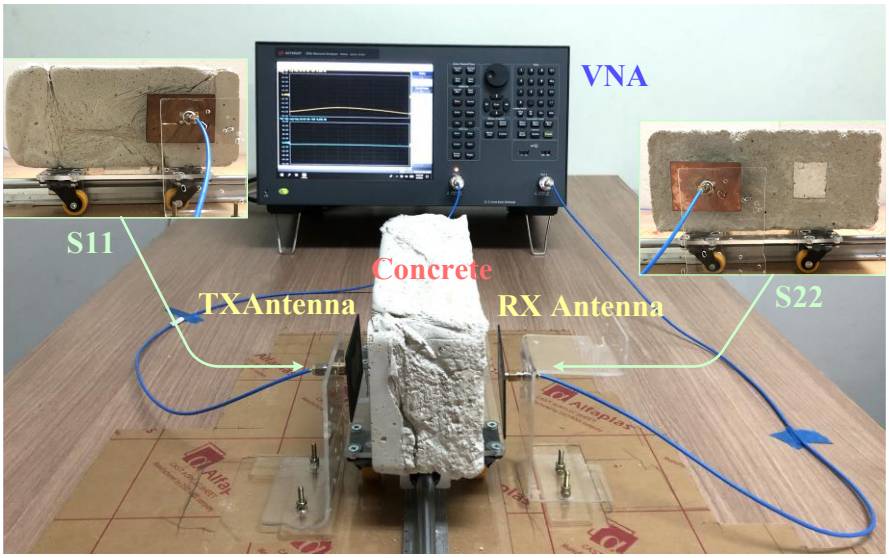
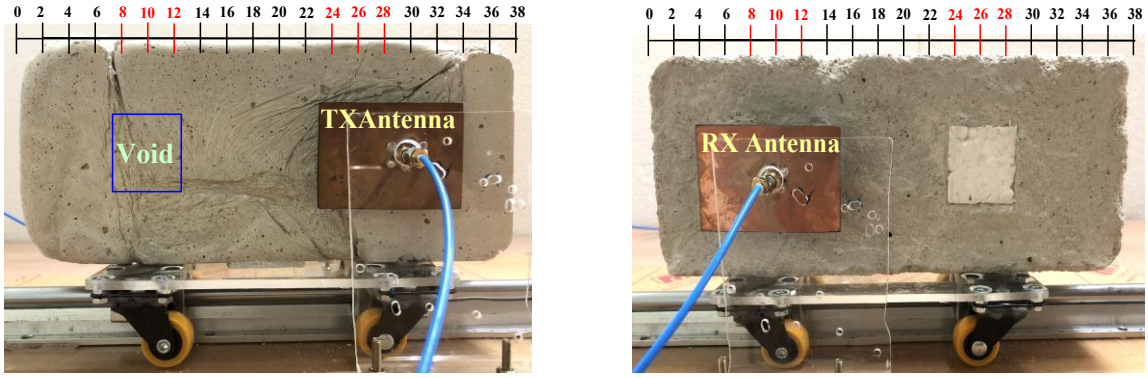


Figure 5 Concrete void measurement setup



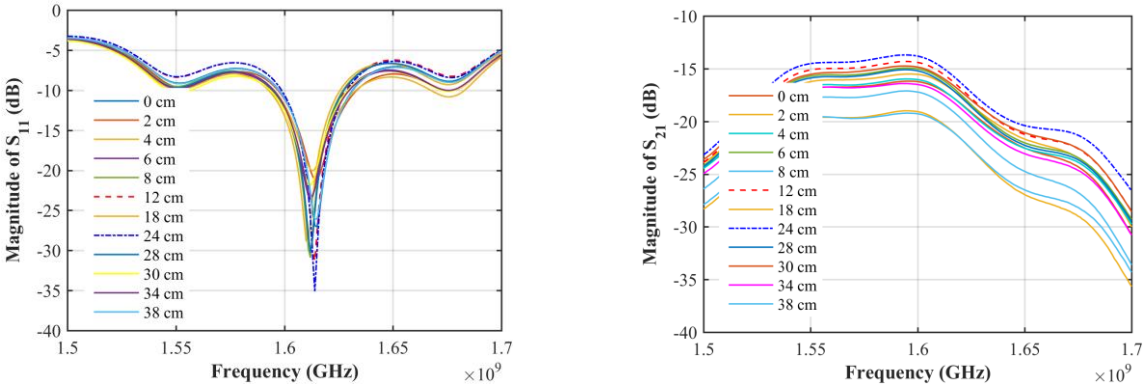
(a) (b)

Figure 6 Position of antenna and foam (a) Tx antenna (b) Rx antenna

และ S_{21} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน คลื่นความถี่เดินทางผ่านคอนกรีตและได้รับการตรวจจับด้วยสายอากาศรับ ดังแสดงใน Figure 6 (b) ตำแหน่งไม่มีโพรงของคอนกรีตอยู่ที่ระยะ 0 ถึง 8 และ 14 ถึง 22 และ 30 ถึง 38 ซม. ตำแหน่งที่มีโพรงอยู่ในช่วง 8 ถึง 12 และ 24 ถึง 28 ซม. ข้อมูล S_{11} และ S_{21} จากการตรวจวัดถูกนำมาใช้วิเคราะห์ เพื่อหาโพรงในชั้นคอนกรีต

ผลและวิจารณ์

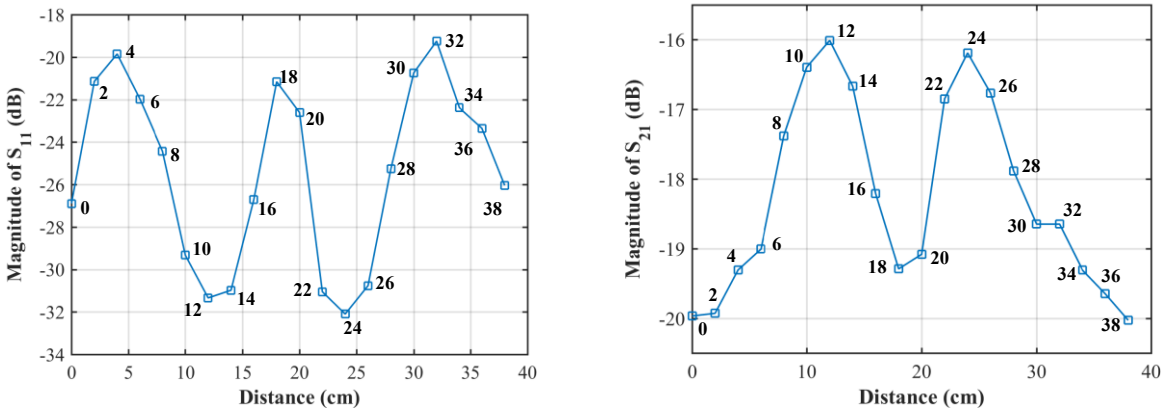
การตรวจหาโพรงในชั้นคอนกรีตโดยไม่สัมผัสด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านตรวจวัดตามแนวยาวของคอนกรีตที่ระยะ 0 2 4 ถึง 38 ซม. ในช่วงความถี่ 1.5 ถึง 1.7 GHz ให้ค่า S_{11} อยู่ในช่วง -3.26 ถึง -35.09 dB ดังแสดงดังใน Figure 7 (a) และพารามิเตอร์ S_{21} เปลี่ยนแปลงในช่วง -13.69 ถึง -35.67 dB ดังแสดงดังใน Figure 7 (b)



(a) (b)

Figure 7 Magnitude of (a) S_{11} (b) S_{21} from each position on concrete sample measurement

เพื่อลดความซับซ้อนในขั้นตอนการตรวจวัด จึงวิเคราะห์เฉพาะที่ความถี่ 1.614 GHz การตอบสนองของ S_{11} มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในช่วงขอบรอยต่อระหว่างโพรงและคอนกรีตไม่มีโพรง เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทำให้บริเวณรอยต่อคลื่นส่งผ่านโพรงได้เพียงบางส่วน เป็นข้อจำกัดของความเจาะจงตำแหน่งวัด โดยการตอบสนองต่อโพรงของ S_{11} อยู่ที่ระยะ 10 ถึง 14 และ 22 ถึง 26 ซม. ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -30.55 และ -31.30 dB และในคอนกรีตแบบไม่มีโพรงเฉลี่ยอยู่ที่ -22.88 dB เห็นได้ว่าโพรงในชั้นคอนกรีตส่งผลให้กำลังงานการสะท้อนลดลง ดังแสดงใน Figure 8 (a) สำหรับ S_{21} มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งโพรงในลักษณะเดียวกันที่ 10 ถึง 14 และ 22 ถึง 26 ซม. มีเฉลี่ยอยู่ที่ -16.36 และ -16.60 dB และคอนกรีตแบบไม่มีโพรงเฉลี่ยอยู่ที่ -18.86 dB เมื่อตรวจวัดตรงตำแหน่งโพรงส่งผลให้กำลังงานการส่งผ่านเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Figure 8 (b)



(a) (b)

Figure 8 Response of (a) reflection and (b) transmission coefficient to concrete void

ความไม่สม่ำเสมอบนผิววัสดุตัวทดสอบมีขนาดเล็กกว่า 1/4 ของความยาวคลื่น และเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากขอบเขตการตรวจวัดของคลื่น ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อย การตรวจวัดในแต่ละระยะ แสดงให้เห็นถึงความต่างของค่า S_{11} และ S_{21} ที่ตอบสนองต่อโพรงในชั้นคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ไม่เท่ากันระหว่างคอนกรีตแบบมีโพรงและไม่มีโพรง ในช่วงขอบรอยต่อระหว่างโพรงและคอนกรีตไม่มีโพรง ดังนั้นสามารถชดเชยด้วยการวิเคราะห์จากทั้ง 2 พารามิเตอร์ เพื่อให้ระบบมีความแม่นยำในการตรวจวัด ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านได้รับการคำนวณ เพื่อกำหนดค่าอ้างอิงในการตัดสินใจ แสดงดังใน Table 2

Table 2 Condition of decision process

Concrete	Parameter *S*	
With voids	$S_{11} \leq$ -28.11	$S_{21} \geq$ -17.53
Without voids	$S_{11} >$ -28.11	$S_{21} <$ -17.53

ค่าอ้างอิงที่เลือกให้ความคลาดเคลื่อนของ S_{11} สูงสุดที่ 3.7 dB และ S_{21} สูงสุดที่ 0.9 dB ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งโพรงบริเวณรอยต่อระหว่างโพรงและคอนกรีตอยู่ที่ ±1.5 ซม. ซึ่งระดับอ้างอิงถูกนำใช้การในการตัดสินใจ ดังนั้นเพื่อทดสอบความแม่นยำของระบบ จึงทำการสุ่มตำแหน่งใหม่และตรวจวัดอีกครั้ง การตรวจหาโพรงในชั้นคอนกรีตทำทั้งหมด 50 ครั้ง แบบสุ่มตำแหน่ง ความสามารถในการตรวจหาโพรงถูกต้อง 47 ครั้ง ซึ่งความผิดพลาดเกิดจากตรวจหาและตัดสินใจในกรณีที่ค่าอ้างอิงไม่เข้าเงื่อนไข ทั้งนี้ระบบยังคงให้ความแม่นยำตรวจวัดอยู่ที่ 94% ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ และสามารถนำไปพัฒนาเพิ่มการปรับเทียบในส่วนประมวลผลเพื่อให้ระบบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ผล

การตรวจสอบโพรงในชั้นคอนกรีตใช้การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} ที่ความถี่ 1.614 GHz ประยุกต์ใช้สายอากาศไมโครสตริปแพทช์ต้นแบบทำงานร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ภาคส่งของระบบทำหน้าที่ส่งออกกำลังงานความถี่ไปยังคอนกรีตและตรวจจับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ภาครับทำหน้าที่ตรวจจับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากคอนกรีต คอนกรีตอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ การตรวจวัดทำตามแนวยาวของก้อนคอนกรีตที่ระยะ 0 2 4 ถึง 38 ซม. โพรงในชั้นคอนกรีตอยู่ที่ระยะ 14 ถึง 18 และ 20 ถึง 24 ซม.

ค่าพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} จากการตรวจวัดในตำแหน่งโพรงเฉลี่ยอยู่ที่ -30.93 และ -16.48 dB และคอนกรีตแบบไม่มีโพรงอยู่ที่ -22.88 และ -18.86 dB ในช่วงรอยต่อระหว่างคอนกรีตแบบไม่มีโพรงและแบบมีโพรงภายใน ส่งผลให้ข้อมูลผันผวนเล็กน้อย การใช้ 2 พารามิเตอร์ในการตัดสินใจช่วยเพิ่มความแม่นยำระดับอ้างอิงในกรณีคอนกรีตแบบมีโพรงของ S_{11} < -28.11 dB และ S_{21} < -17.53 dB ระบบได้รับการทดสอบการตรวจหาโพรงแบบสุ่มตำแหน่งและให้ความแม่นยำอยู่ที่ 94% ซึ่งเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้สัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่าน เพื่อตรวจหาโพรงในคอนกรีตสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน

คำขอบคุณ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนการทดลองและวิจัยนี้ จากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ประจำปีงบประมาณ 2567

เอกสารอ้างอิง

พรพิมล ฉายแสง, อลงกต ไชยอุปละ, สินาด โกศลานันท์ และ ประพัน ลี้กุล.(2566). ระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตในช่วงอายุต้นแบบไม่ทำลายด้วยอัตราส่วนของกำลังงานการสะท้อนในย่านความถี่ไมโครเวฟ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, *31*(5), 108-122.

ภราดร กัณหากรณ์, เวธนี ฤกษสโมสร, วิศรุตา ฤกษสโมสร, นรสิงห์ อินมณเทียร, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ, มนเทียร เสร็จกิจ, สุพชัย ทิพย์ภักดี และ ชิระวัฒน์ วัฒนพานิช. (2566). การทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตเก่ารับแรงเฉือนด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย WU-DIC. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, *33*(2), 355-368.

Cao, Q., & Al-Qadi, L. I. (2021). Development of a numerical model to predict the dielectric properties of heterogeneous asphalt concrete. *Sensors*, *21*(8), 1-15. https://doi.org/10.3390/s21082643

Cotic, P., Kolaric, D., Bosiljkov, V. B., Bosiljkov, V., & Jaglicic Z. (2015). Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. *NDT&E International*, *74*, 87-93. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.05.003

Haq, M. A. U., Armghan, A., Aliqab, K. ,& Alsharari, M. (2023). A Review of Contemporary Microwave Antenna Sensors: Designs, Fabrication Techniques, and Potential Application. *IEEE Access, 11*, 40064-40074. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268109

Hilal, A. A., Thom, N. H., & Dawson, A. R. (2015). On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives. *Construction and Building Materials, 85*, 157–164. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.093

Hren, M., Kosec, T., & Legat, A. (2024). An investigation into corrosion around voids at the steel-concrete interface. *Cement and Concrete Research*, *181*(107545), 1-17. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107545

Hoang, N. D., & Nguyen, Q. L. (2020). A novel approach for automatic detection of concrete surface voids using image texture analysis and history-based adaptive differential evolution optimized support vector machine. *Advances in Civil Engineering, 2020*(4190682), 1-15. https://doi.org/10.1155/2020/4190682

Islam, S. S., Rahman, M. A., Faruque, M. R. I., & Islam, M. T. (2018). Design and analysis with different substrate materials of a new metamaterial for satellite applications. *Science and Engineering of Composite Materials*, *25*(1), 59–66. https://doi.org/10.1515/secm-2015-0526

Jiao, L., Ye, Q., Cao, X., Huston, D., & Xia, T. (2020). Identifying concrete structure defects in GPR image. *Measurement*, *160*(107839), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107839

Moosazadeh, M., Kharkovsky, S., Case, T. J., & Samali, B. (2017). Antipodal Vivaldi antenna with improved radiation characteristics for civil engineering applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, *11*(6), 796-803. https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0720

Nguyen, V. H., Pham, T.N., Huh, J. H., Choi, P. J., Kim, Y. B., Kwon, O. H., & Kwon, K. R. (2025). Efficient synthetic defect on 3D object reconstruction and generation pipeline for digital twins smart factory, *Sensors, 25*(6908), 1-24. https://doi.org/10.3390/s25226908

Oswald, G. K. A., Rezvanbehbahani, S., & Stearns, L. A., (2018). Radar evidence of ponded subglacial water in Greenland, *Journal of Glaciology*, *64*(247) ,711-729. https://doi.org/10.1017/jog.2018.60

Sun, D., Sardahi, Y., Chen, G. S., Zatar, W., Nghiem, H., & Yang, Z. (2025). A Study on Nonlinear Vibrations in the Impact-Echo Method for Void Flaw Detection in Solids, *Vibration, 8*(66), 1-11. https://doi.org/10.3390/vibration8040066

Takayama, J., Oharaa, Y., & Sun, W. (2022). Nondestructive evaluation of air voids in concrete structures using microwave radar technique. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, *15*(1), 36–47. https://doi.org/10.1080/18824889.2021.2019968

Teshale, E. Z., Hoegh, K., Dai, S., Giessel, R., & Turgeon, C. (2020). Ground penetrating radar sensitivity to marginal changes in asphalt mixture composition. *Journal of Testing and Evaluation*, *48*(3), 2295-2310. https://doi.org/10.1520/JTE20190486

Thitimakorn, T., Kampananon, N., Jongjaiwanichkit, N., & Kupongsak, S. (2016). Subsurface void detection under the road surface using ground penetrating radar (GPR), a case study in the Bangkok metropolitan area, Thailand. *International Journal Geo-Engineering*, *7*(1), 1-9. https://doi.org/10.1186/s40703-016-0017-8

Tian, X., Du, Y., & Zhao, W. (2019). Detection and identification of mortar void in the ballastless track of high-speed railway based on transient impact characteristics. *Journal of Vibration and Shock*, *38*(18) , 148–153.

Tomita, K., & Chew, M. Y. L. (2022). A review of infrared thermography for delamination detection on infrastructures and buildings. *Sensors*, *22*(2), 1-42. https://doi.org/10.3390/s22020423

Wang, H., Wu, Y., Chen, C., & Guo, Y. (2023). In-site health monitoring of cement concrete pavements based on optical fiber sensing technology. *Journal of Road Engineering*, *3*(1),113-123.https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.003

Yong, Y., Junwei, L., Rongzhe, L., Xiushu, T., & Weigang, Z. (2020). Analysis on edge estimation of functional layer defect in ballastless track based on Burg power spectrum. *Journal of Vibration and Shock*, *39*(10),1–6.

Yu, Q., Li, Y., Luo, T., Zhang, J., Tao, L., Zhu, X., Zhang, Y., Luo, L., & Xu, X. (2023). Cement pavement void detection algorithm based on GPR signal and continuous wavelet transform method. *Scientific Reports,13*(1),19710. https://doi.org/10.1038/s41598-023-46752-2

Zhang, J., Gao, X., & Yu, L. (2020). Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete. *Construction and Building Materials, 239*(117843), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117843

Zhang, J., Peng, L., Wen, S., & Huang, S. (2024). A review on concrete structural properties and damage evolution monitoring techniques.*Sensors, 24*(2),1-29. https://doi.org/10.3390/s24020620