



การตรวจสอบสภาพถนนคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ Concrete Pavement Monitoring with Ground Penetrating Radar

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง^{1*} ชนระบ วิชาลัย¹ และวีระพงษ์ พจนพิมล¹

Received: February, 2018; Accepted: May, 2018

บทคัดย่อ

การทรุดตัวของถนนอันเนื่องมาจากโพรงใต้ผิวจราจรที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีต นับเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อทางหลวงในประเทศไทย โพรงอากาศที่เกิดขึ้นจะขยายตัวเป็นวงกว้างและสร้างความเสียหายต่อพื้นทางให้มากขึ้นต่อไปได้ การตรวจสอบนับเป็นปัจจัยสำคัญในการบำรุงรักษาโครงสร้างถนน ซึ่ง Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นเครื่องมือที่ทำงานได้รวดเร็วและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นทางจราจรนำไปสู่การพัฒนาและตอบสนองแผนการบำรุงรักษาทางหลวงได้

การศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองการสำรวจด้วย GPR จากโมเดลโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประโยชน์ในการออกแบบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ผลรวมถึงการสร้างแบบจำลองผิวทางคอนกรีต การทดลองใช้เครื่อง GPR ในการสำรวจบนแบบจำลองและบนทางหลวงจริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าความถี่ 900 MHz เป็นย่านที่เหมาะสมที่สุด ทั้งการจำลองการสำรวจที่ได้จากโมเดลทางคณิตศาสตร์และการวัดค่าจากแบบจำลองที่ได้ทำขึ้น สำหรับการทดลองจริงในภาคสนามพบว่า วิธีสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์สามารถตรวจพบโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตและยืนยันถึงสภาพที่สมบูรณ์ภายหลังการอุดซ่อมโพรงแล้ว

คำสำคัญ : การสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์; การทรุดตัว; วิธีการอุดซ่อมโพรง; แบบจำลอง

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* Corresponding Author E - mail Address: narongchaiwiwatt@gmail.com

Abstract

Pavement subsidences in Thailand have often damaged due to voids beneath the concrete pavement, which are likely prone to more widespread sub pavement erosion and further void development, making their early detection an important aspect of highway maintenance and remediation. As a fast and non-destructive testing tool, Ground Penetrating Radar (GPR) can provide valuable information for the development of road repair and maintenance programs.

This study, GPR forward modeling of concrete pavement model was constructed to test parameters that affected to GPR data collection in the field. Study results indicated that a frequency of 900 MHz is suitable for void detection in both GPR forward modeling and concrete pavement model results. Real data collection in the field using 900 MHz antenna before and after repaired by sub-sealing method also showed significant of sub-base structure improvement at repaired locations.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Settlement; Sub-Sealing; Modeling

บทนำ

Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นวิธีการสำรวจทางด้านวิศวกรรมธรณีฟิสิกส์โดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินระดับตื้น แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจที่ให้ความละเอียดสูง วิธีการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR เป็นวิธีที่นับว่าประสบผลสำเร็จอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้งานเพื่อการจัดทำแผนที่โครงสร้างทางธรณีวิทยา ตลอดจนการตรวจวัดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นคอนกรีตโดยกรมทางหลวง [1] เครื่องมือ GPR เป็น เครื่องมือที่ทรงประสิทธิภาพในการใช้งานเพื่อสำรวจใต้พื้นดินอย่างละเอียด และยังใช้งานในกระบวนการควบคุมคุณภาพในงานวิศวกรรมการก่อสร้าง ซึ่งเป็นวิธีการสำรวจที่สามารถทำได้โดยรวดเร็วและไม่ทำลายวัสดุที่ทดสอบ ระบบการทำงานของเครื่องมือ GPR ประกอบด้วย ส่วนควบคุมที่มีหน่วยความจำและการแสดงผล และส่วนที่ใช้ส่งและรับสัญญาณคลื่น โดยประสิทธิภาพของชุดเครื่องมือจะขึ้นอยู่กับความถี่ กำลังส่ง และการป้องกันคลื่นรบกวนจากภายนอก สายอากาศที่ใช้ในเครื่องมือ GPR เป็นแบบ dipole ประกอบด้วยจำนวนคู่ที่เป็นโลหะ การส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นความถี่อยู่ระหว่าง 50 MHz - 2.5 GHz โดยความลึกการสำรวจจะแปรผกผันกับความถี่ที่ส่งออกมาจากสายอากาศซึ่งมีความลึกการสำรวจตั้งแต่ 0.25 - 50.0 ม. การกระจายตัวของคลื่นไม่เพียงแต่แพร่คลื่นในวัสดุชั้นใต้ผิวดินเท่านั้น แต่สามารถส่งพลังงานบางส่วนไปในอากาศได้อีกด้วย ซึ่งรัศมีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจรบกวนเครื่องมือสื่อสารและสัญญาณโทรคมนาคมบริเวณใกล้เคียงได้ แต่ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของเครื่องมือสำรวจ GPR ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ตลอดจนค่าความชื้นในชั้นดินอีกด้วย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

การศึกษาในครั้งนี้มีที่มาจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับถนนคอนกรีต โดยส่วนใหญ่มักจะตรวจพบได้เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นแล้ว หากมีการตรวจสอบพบได้ถึงโพรงที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับพื้นถนนจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถนนได้ อีกทั้งในขั้นตอนการซ่อมแซมไม่สามารถระบุได้ถึงการเติมเต็มของน้ำปูนที่อัดฉีดลงไป ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความถูกต้องในการตรวจสอบโพรงและชั้นวัสดุกันทางด้วยเครื่องมือ GPR โดยมีการจำลองผลการสำรวจ (Simulation) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการสำรวจในภาคสนามบนถนนหลวงที่มีผิวทางเป็นคอนกรีตก่อนและหลังการซ่อมแซมถนนด้วยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อตรวจสอบการเติมเต็มของน้ำปูนใต้พื้นถนนคอนกรีต

ตารางที่ 1 ปัจจัยหลักของประสิทธิภาพระบบ GPR [2]

Wave properties	High frequency	Low frequency
Wave length	Short	Long
Attenuation	High	Low
Resolution	High	Low
Depth of Investigation	Shallow	Deep

ทฤษฎี

1. ทฤษฎีการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุใต้ดิน

หลักการทำงานของ GPR จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ความถี่สูง พลังงานที่ส่งออกมาจากเครื่องสู่ผิวดินจะสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณเมื่อพบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (รูปที่ 1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric) และความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ (1)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

เมื่อ

- v คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เมตร/วินาที)
- c คือ ความเร็วคงที่ของแสงเท่ากับ 3×10^8 (เมตร/วินาที)
- ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้น ๆ

เมื่อเครื่องมือ GPR ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งสัญญาณ (Transmitter, Tx) ซึ่งอยู่บนผิวดินและสัญญาณถูกรับโดยตัวรับสัญญาณ (Receiver, Rx) ซึ่งวางอยู่บนผิวดินเช่นกัน คลื่นสัญญาณที่ถูกส่งลงไปใต้ผิวดินและสัญญาณนั้นจะถูกสะท้อนกลับโดยวัตถุชั้นต่าง ๆ ที่อยู่ใต้ผิวดิน (รูปที่ 1) สัญญาณที่รับได้จะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ โดยสามารถหา ค่าความลึกของชั้นวัสดุที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น (d) ตามสมการที่ (2)

$$d = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\tau}{2} \quad (2)$$

เมื่อ τ คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ (วินาที)

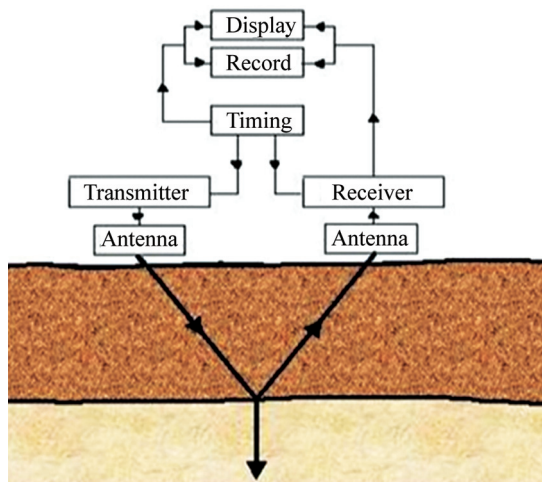
การสะท้อนกลับของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุที่เป็นโลหะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง ดังนั้นวัสดุที่เป็นโลหะใด ๆ ที่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน อาทิเช่น ท่อโลหะหรือสายไฟฟ้า อาจถูกตรวจพบได้โดยง่ายกว่าปกติ โดยสามารถอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น กล่าวคือวัสดุสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน คือ มีค่า ϵ_1 และ ϵ_2 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณ (Γ) ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

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

เมื่อ

Γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวัสดุ

ϵ_3 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ n



รูปที่ 1 การทำงานของระบบ GPR (<https://www.slideshare.net>)

ดังนั้น การสะท้อนกลับของคลื่นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ สามารถตรวจพบได้ง่ายเนื่องจากโลหะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการเผยแพร่ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของน้ำในดินและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสมการที่ (4) โดย Topp, G. C. et al. [3] สามารถช่วยให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในชั้นวัสดุใต้ดินที่มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4}\epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6}\epsilon_r^3 \quad (4)$$

โดยที่

θ คือ ค่าร้อยละของส่วนประกอบของน้ำในดิน

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ

เนื่องด้วยเครื่องมือ GPR มีการส่งกระจายคลื่นอยู่ในย่านความถี่เดียวกับความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารและความถี่ที่ใช้ในการแพร่ภาพโทรทัศน์ ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องมือการสำรวจจะถูกจำกัดกำลังส่งที่ควบคุมด้วยกฎหมายและทำการป้องกันการส่งคลื่นรบกวนด้วยวัสดุซับคลื่น ดังนั้นเครื่องมือสำรวจที่มีจำหน่าย จะสามารถเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมกับระดับความลึกการสำรวจเป็นหลัก ตารางที่ 2 แสดงความถี่ของสายอากาศของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือ GPR ที่แนะนำการใช้งานสายอากาศและระดับความลึกในการสำรวจ

ตารางที่ 2 ความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านต่าง ๆ [4]

Center Frequency	Depth of Penetration	Typical Applications
2600 MHz	0 - 12 in (0.4 m)	Concrete Evaluation
2000 MHz	0 - 12 in (0.4 m)	Concrete Evaluation
1600 MHz	0 - 18 in (0.5 m)	Concrete Evaluation
900 MHz	0 - 3 ft (0 - 1 m)	Concrete Evaluation, Void Detection
400 MHz	0 - 12 ft (0 - 4 m)	Utility, Engineering, Environmental, Void Detection
270 MHz	0 - 18 ft (0 - 6 m)	Utility, Engineering, Geotechnical
200 MHz	0 - 30 ft (0 - 9 m)	Geotechnical, Engineering, Environmental
100 MHz	5 - 50 ft (2 - 15 m)	Geotechnical, Engineering, Mining
15 - 80 MHz	0 - 150 ft (0 - 50 m)	Geotechnical, Geological

อย่างไรก็ตาม ความลึกการสำรวจที่ได้ยังขึ้นอยู่กับค่าความชื้นและค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของชั้นดิน เนื่องด้วย GPR เป็นการสำรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นพื้นที่ที่ทำการสำรวจยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการสำรวจ

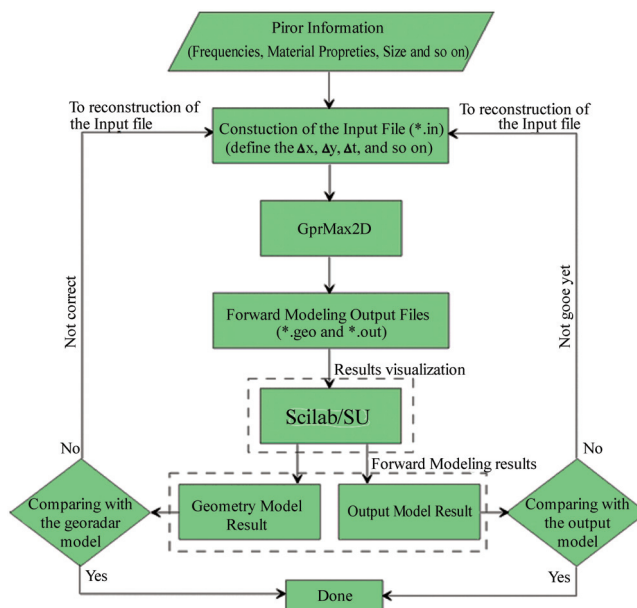
ผลการทดสอบด้วยเครื่อง GPR จะแสดงเป็นรูปภาพโดยมีลักษณะเป็นโทนสีต่าง ๆ ซึ่งสีที่แตกต่างกันแสดงถึงความสูงของยอดคลื่น (Amplitude) ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของชั้นวัสดุ ตามสมการที่ (3)

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน อธิบายได้ดังนี้

1. การจำลองผลการสำรวจ

การจำลองผลการสำรวจโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นวิธีการที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล เพื่อที่จะให้เหมาะสมที่สุดในการค้นหาโพรงอากาศใต้ผิวทางถนนคอนกรีต สามารถอธิบายถึงวิธีการปฏิบัติงานในการจำลองผลการสำรวจ GPR โดยแบบจำลองที่ทำการสำรวจต้องกำหนดขนาดและรูปตัดตามแนวความลึก ตลอดจนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุแต่ละชนิดลงในแบบจำลอง (ตารางที่ 3) แล้วทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม GprMax2D ซึ่งเป็นการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR โดยมีพื้นฐานการประมวลผลเชิงตัวเลขแบบวิธีการ Finite-Difference แบบ Time-Domain พัฒนาโดย Antonis, G. [5] ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสร้างเป็นภาพได้จากโปรแกรมไซแล็บ (Scilab) ตามกระบวนการ ดังรูปที่ 2 เนื่องจาก Scilab เป็นโปรแกรมที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทำซิมูเลชัน (Simulation) ของระบบ



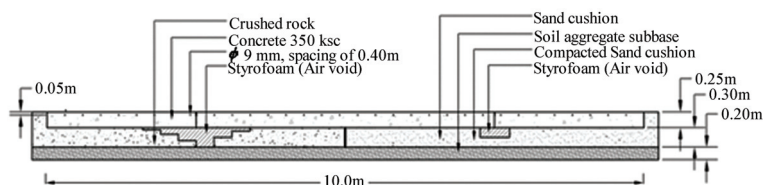
รูปที่ 2 ขั้นตอนการจำลองผลการสำรวจ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองผิวทางถนนคอนกรีตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หนา 0.25 ม. กำหนดให้ตำแหน่งที่ติดตั้งฉนวนสไตรโฟม (Styrofoam) คือโพรงอากาศที่อยู่ใต้ผิวทางแนวการสำรวจประกอบด้วย แบบจำลองแนวสำรวจที่ 1 (รูปที่ 3 ก) มีชั้นวัสดุรองพื้นทางเป็นหินคลุกบดอัดทรายบดอัด และแบบจำลองแนวสำรวจที่ 2 (รูปที่ 3 ข) มีชั้นวัสดุรองพื้นทางเป็นทรายบดอัดเพียงอย่างเดียว ค่าตัวแปรทางกายภาพ (ตารางที่ 3) ใช้ความถี่ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ

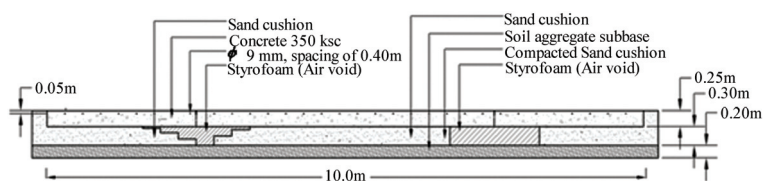
2. การก่อสร้างแบบจำลองผิวทางถนนคอนกรีตและชั้นรองพื้นทางตัวอย่าง

การก่อสร้างแบบจำลองถนนตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 3) กำหนดให้คอนกรีตชั้นผิวทางมีกำลังอัด (Compressive Strength) เท่ากับ 350 กก./ตร.ซม. ตำแหน่งโพรงอากาศที่อยู่ใต้ผิวทาง มีทั้งแบบชั้นบนไคและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดต่างกัน ติดตั้งแทนด้วยฉนวนสไตรโฟม สำหรับชั้นรองพื้นทาง

จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้นรองพื้นทางหินคลุกบดอัด และชั้นรองพื้นทางทรายบดอัด สำหรับส่วนเพิ่มเติมอื่น ได้ติดตั้งแผ่นเส้นใยธรณี (Geo-Textile) พลาสติกกรองพื้นคอนกรีต แผ่นสังกะสีทึบสีมูม เหล็กเสริมคอนกรีต และตะแกรงเหล็ก จากนั้นจึงดำเนินการหล่อคอนกรีตให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนด



(ก) แบบจำลองแนวสำรวจที่ 1



(ข) แบบจำลองแนวสำรวจที่ 2

รูปที่ 3 แบบจำลองผิวทางถนนคอนกรีตและชั้นรองพื้นทาง

3. การวัดค่าแบบจำลองด้วยเครื่องมือ GPR

การวัดค่าแบบจำลองด้วยเครื่องมือ GPR เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D4748-98 [6] โดยใช้ชุดสายอากาศความถี่ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ เริ่มทำการสำรวจบนแบบจำลอง (Geo-Model) ด้วยเครื่องมือ GPR ภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ 28 วัน ซึ่งเป็นเวลาที่คอนกรีตมีกำลังอัดคงที่ตามการออกแบบในชั้นต้น [7] ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นค่าคงที่ ได้อิเล็กทริกของวัสดุสำหรับการประมวลผลในระบบคอมพิวเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสำหรับแบบจำลอง [5], [8]

Materials	Dielectric constant
Air/Styrofoam	1/1.03
Concrete	6
Sand	3
Crushed rock	10
Rebar steel	10,000
Soil aggregate	12
Weathered clay	50

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของเครื่อง GPR

Parameters / Frequency	400 MHz	900 MHz	1.5 GHz
Tx-Rx (mm)	25	25	53
Sample/trace	1024	1024	1024
Bit/sample	16	16	16
Trace length (ns)	12	12	12
Transmission rate (KHz)	100	100	100
Trace/ meter	100	100	100
Meter/mark	1	1	1
Dielectric constant	4.5	4.5	4.5
Band pass filter (MHz)	100 - 800	225 - 2500	400 - 3000

4. การสำรวจด้วย GPR ในสถานที่จริง

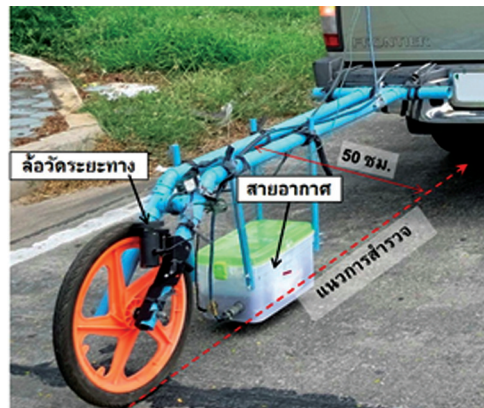
เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมดจากการสำรวจผ่านแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงเริ่มดำเนินการสำรวจในสถานที่จริง บนทางหลวงหมายเลข 321 หลักกิโลเมตรที่ 28+000 ถึง 28+300 ช่องการจราจรด้านซ้ายสุด ผิวทางถนนคอนกรีตหนา 0.25 ม. ใช้ทรายหยาบเป็นชั้นรองผิวทางและรองพื้นทางด้วยวัสดุคัดเลือกตามมาตรฐาน

การสำรวจภาคสนามใช้เครื่องมือ GPR พร้อมระบบวัดระยะทางอัตโนมัติและสายอากาศความถี่ 900 MHz (เป็นค่าความถี่ที่ดีที่สุดจากการวัดค่าแบบจำลองด้วยเครื่องมือ GPR ในข้อ 3. โดยได้ทำการประยุกต์ในการติดตั้งเครื่องมือการสำรวจเข้ากับรถยนต์ (รูปที่ 4) ความเร็วของรถที่ใช้ในการสำรวจไม่เกิน 20 กม./ชม. โดยกำหนดให้แนวการสำรวจขนานกับขอบทางด้านซ้าย ในระยะห่าง 50 ซม. ซึ่งเป็นแนวร่องล้อรถบรรทุกที่เกิดความเสียหายสูงสุด ตามรูปแบบการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ของกรมทางหลวง [1]

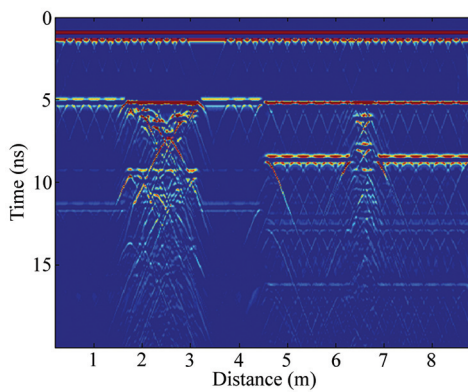
5. การวิเคราะห์และการแปลผลข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR จะได้รับการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Seismic Unix [9] โดยการใช้ฟังก์ชันการประมวลผลต่าง ๆ เพื่อให้ผลการสำรวจที่ได้มีความชัดเจนเพิ่มขึ้น โดยผลการสำรวจด้วยเครื่อง GPR จะแสดงเป็นรูปภาพโดยมีลักษณะเป็นโทนสีเข้มและอ่อนสลับกัน ซึ่งเกิดจากการกระจายสปีบริเวณยอดคลื่นและท้องคลื่น ความเข้มของสีจะแปรผันตรงกับขนาดความสูงของยอดคลื่นที่เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อน

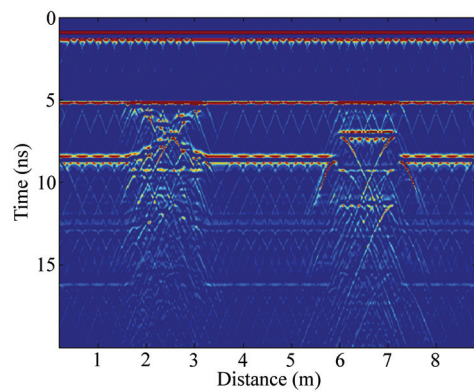
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลการสำรวจ GPR สามารถแปลความหมายได้โดยการพิจารณาจากรูปแบบการสะท้อนกลับของคลื่นที่แสดงในจอแสดงผล (Radargrams) ซึ่งวัตถุที่อยู่ใต้ดินจะแสดงผลการสะท้อนกลับของคลื่น โดยวัตถุกลมหรือวัตถุขนาดเล็กจะแสดงให้เห็นได้ในรูปแบบพาราโบลา จากการศึกษานี้สามารถพบการสะท้อนของขอบชั้นวัสดุ ความสนใจต่อผลการสะท้อนกลับของคลื่นจากรูปทรงของโพรงอากาศ ชั้นของวัสดุในแบบจำลอง และเหล็กเสริมคอนกรีตที่สอดคล้องกันกับรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [10]



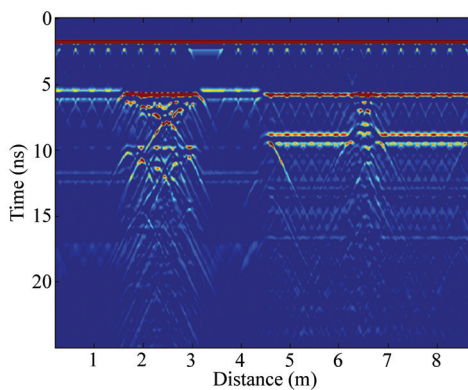
รูปที่ 4 การประยุกต์ในการติดตั้งเครื่องมือการสำรวจเข้ากับรถยนต์



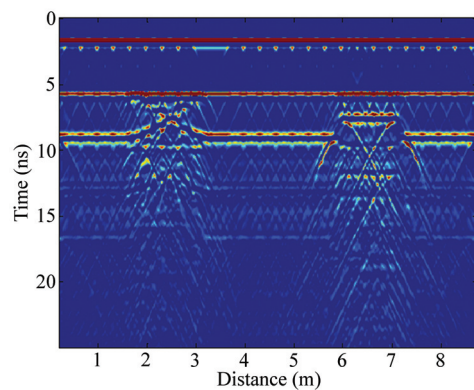
(ก) แนวสำรวจ No.1 ความถี่ 1.5 GHz



(ข) แนวสำรวจ No.2 ความถี่ 1.5 GHz

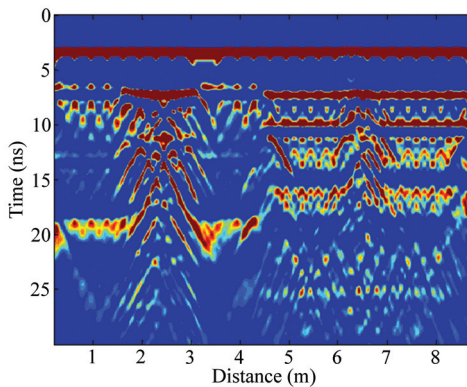


(ค) แนวสำรวจ No.1 ความถี่ 900 MHz

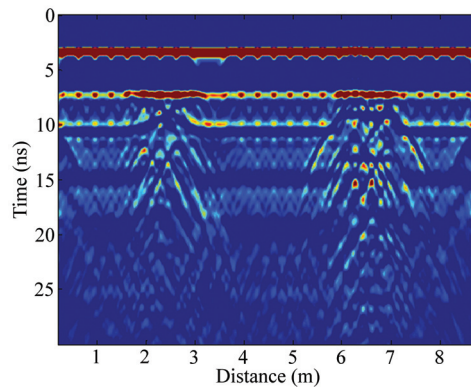


(ง) แนวสำรวจ No.2 ความถี่ 900 MHz

รูปที่ 5 จำลองผลการสำรวจด้วย GPR ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



(จ) แนวสำรวจ No.1 ความถี่ 400 MHz



(ฉ) แนวสำรวจ No.2 ความถี่ 400 MHz

รูปที่ 5 จำลองผลการสำรวจด้วย GPR ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

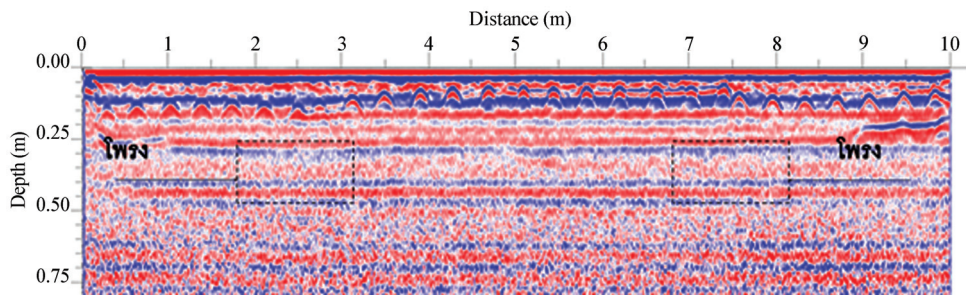
ผลการศึกษา

ผลการศึกษาจากแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ที่ใช้คลื่นความถี่ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ โดยมีลักษณะการสะท้อนของคลื่นเป็นบริเวณผิวยาวต่อเนื่องของชั้นวัสดุและมีความเข้มของการสะท้อนเป็นไปตามค่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก โดยเฉพาะการสะท้อนของเหล็กเสริมคอนกรีตที่แสดงเป็นรูปพาราโบลาได้อย่างชัดเจน

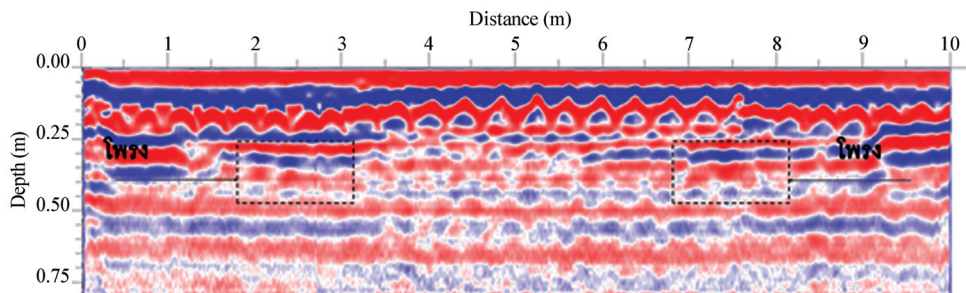
เนื่องจากคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นที่ขึ้นอยู่กับค่าความต่างของค่าไดอิเล็กตริกของแต่ละวัสดุ กล่าวคือ เมื่อพื้นถนนคอนกรีตมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 6 ในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นหินคลุก (Crushed Rock) มีค่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ (6 : 10) ส่วนในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นทรายบดอัด (Sand Cushion) มีค่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ (6 : 3) จึงทำให้การสะท้อนในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นหินคลุกชัดเจนกว่าในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นทรายบดอัด

ผลการจำลองสำรวจแสดงการสะท้อนของคลื่น เริ่มจากการสำรวจด้วยคลื่นความถี่ 1.5 GHz ดังรูปที่ 5 (ก) - (ข) สามารถแสดงให้เห็นถึงรูปทรงการสะท้อนกลับของคลื่นอันเกิดขึ้นจากโพรงอากาศ แต่สัญญาณการสะท้อนกลับที่แสดงมีความเข้มน้อย หากพิจารณาถึงการนำไปใช้ในการสำรวจจริงคาดว่าสัญญาณจะถูกกลบตอนลงจากการดูดซับโดยชั้นดิน เมื่อสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านวัตถุตัวนำของชั้นวัสดุต่าง ๆ ได้ดินจะทำให้ไม่สามารถตรวจพบโพรงอากาศที่สร้างขึ้นได้

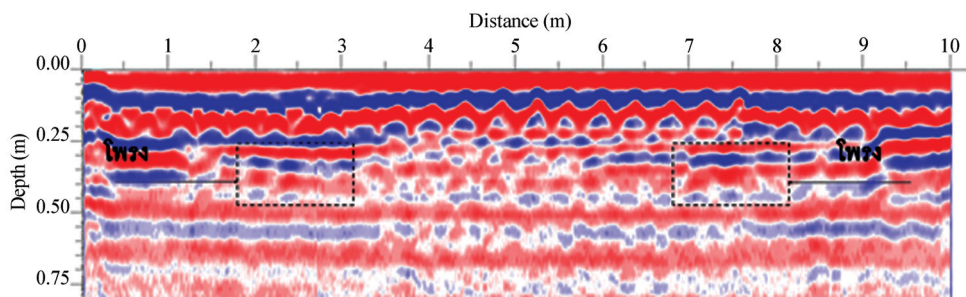
การจำลองผลการสำรวจโดยใช้ความถี่เท่ากับ 900 MHz ให้ผลการสำรวจที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบโพรงใต้ผิวทางจราจร จากรูปที่ 5 (ค) - (ง) โดยสามารถแสดงการสะท้อนกลับของรูปร่างโพรงอากาศที่ได้สร้างขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถจำแนกได้ถึงรูปทรงการสะท้อนกลับของแต่ละชั้นของโพรงอากาศได้เป็นอย่างดี และจากรูปที่ 5 (จ) - (ฉ) ที่ใช้ความถี่ที่มีความยาวคลื่นมากที่สุดคือ 400 MHz ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ชัดเจน ความถี่นี้ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงโพรงขนาดเล็กในส่วนปลายทั้งสองของโพรงอากาศแบบขั้นบันได



(ก) 1.5 GHz

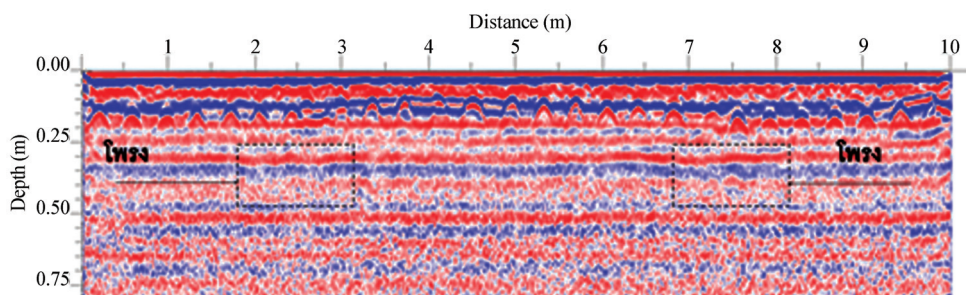


(ข) 900 MHz



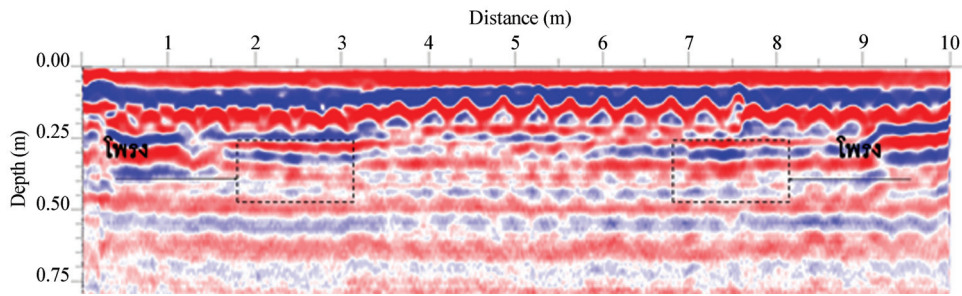
(ค) 400 MHz

รูปที่ 6 ผลการสำรวจ GPR ตามแนวการสำรวจที่ 1 ของแบบจำลองถนนตัวอย่าง

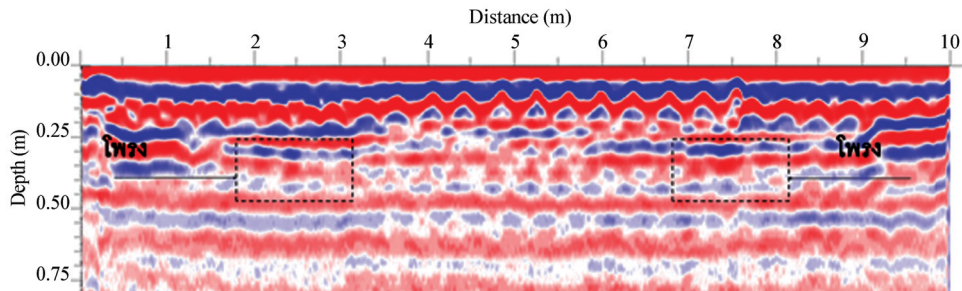


(ก) 1.5 GHz

รูปที่ 7 ผลการสำรวจ GPR ตามแนวการสำรวจที่ 2 ของแบบจำลองถนนตัวอย่าง



(ข) 900 MHz



(ค) 400 MHz

รูปที่ 7 ผลการสำรวจ GPR ตามแนวการสำรวจที่ 2 ของแบบจำลองถนนตัวอย่าง (ต่อ)

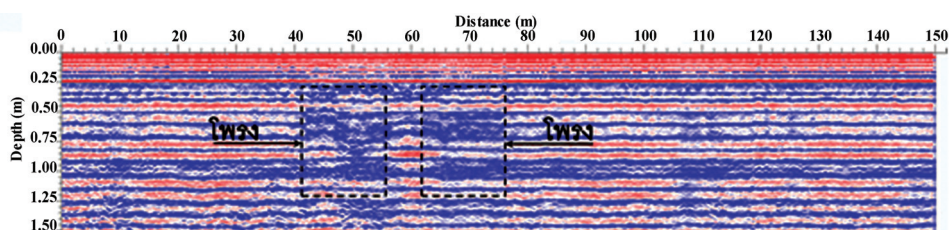
ผลการสำรวจ GPR ของแบบจำลองถนนตัวอย่างที่ได้ทำการเก็บข้อมูลภายหลังการก่อสร้างชั้นผิวทางคอนกรีตเป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าผลการสำรวจด้วยสายอากาศความถี่ 1.5 GHz ไม่สามารถแสดงให้เห็นหรือยากที่จะระบุได้ถึงโพรงอากาศใต้แผ่นพื้นถนนที่สร้างไว้ได้ ดังรูปที่ 6 และ 7

ผลการสำรวจ GPR ด้วยสายอากาศความถี่ 900 MHz และ 400 MHz สามารถแสดงให้เห็นถึงโพรงอากาศใต้แผ่นพื้นถนนที่สร้างไว้ไม่ชัดเจนทั้งสองความถี่ เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในชั้นวัสดุทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณลงไปในจนไม่สามารถสะท้อนกลับขึ้นมาได้ จากผลการสำรวจหากไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโพรงแล้ว ยังเป็นการยากในการระบุตำแหน่งและขนาดของโพรงที่ตรวจพบได้

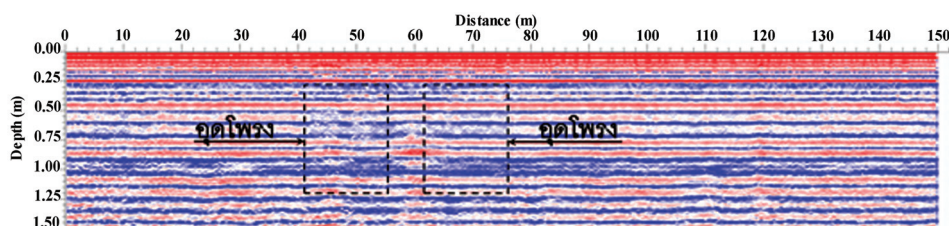
การสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR แบบเคลื่อนที่ได้ ดังรูปที่ 4 บนทางหลวงหมายเลข 321 ผลการสำรวจโพรงอากาศได้พิจารณาจากร่องรอยก่อนและหลังการก่อสร้าง 28 วัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8 ตามหลักการสะท้อนคลื่นที่แปรผันตามค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชั้นวัสดุ พบว่ามีโพรงอากาศเกิดขึ้นได้ผิวจราจรคอนกรีต (ต่ำกว่า 25 ซม.) แสดงเป็นสีน้ำเงิน - ฟ้ำที่ตำแหน่ง 10 40 - 55 65 - 75 110 และ 125 เมตร ตามลำดับ โดยเฉพาะตำแหน่งในกรอบเส้นประ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นทางได้ผิวจราจรเกิดโพรงอากาศมากกว่าผิวทางคอนกรีต ดังรูปที่ 8(ก)

ภายหลังการอัดฉีดน้ำปูนด้วยวิธี Sub-Sealing (มาตรฐานกรมทางหลวง ทล-ม. 327/2543) เพื่อให้ น้ำปูนเข้าไปอุดโพรงอากาศที่อยู่ใต้ผิวทางจราจร หลังจากนั้นต้องใช้เครื่อง GPR ในการตรวจสอบถึงการเต็มเต็มโพรงใต้พื้นผิวจราจรและประมวลผล ดังรูปที่ 8 (ข) พบว่าสปีบริเวณดังกล่าวมีความเข้มมากขึ้นเป็นปกติ เนื่องจากการแทนที่ของน้ำปูนทำให้ชั้นที่เป็นโพรงมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากการ

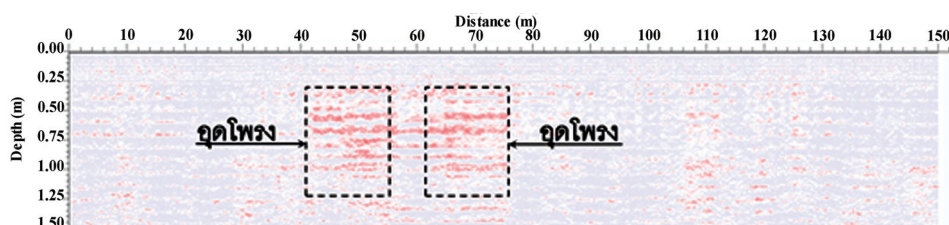
สำรวจแสดงให้เห็นว่าน้ำปูนที่ซ่อมด้วยวิธี Sub-Sealing สามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่างในโพรงอากาศได้ผิวทางได้อย่างเต็มที่ เป็นการแก้ไขปรับปรุงแผ่นคอนกรีตที่เสียหายเพียงบางส่วน จากการเกิดโพรงหรือช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีตได้ในราคาที่ไม่จำเป็นต้องทุบหรือแผ่นคอนกรีตเดิมออก สุดท้ายคือรูปที่ 8 (ค) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างก่อนซ่อมและหลังซ่อมด้วยวิธีหักลบ (Subtract) ซึ่งจุดที่น้ำปูนเข้าไปแทนช่องว่างของอากาศจะปรากฏเป็นสีเข้ม



(ก) ตำแหน่งโพรงอากาศใต้พื้นทาง ก่อนดำเนินการซ่อม



(ข) การอุดโพรงอากาศ ภายหลังการซ่อมด้วยวิธี Sub-Sealing



(ค) ความแตกต่าง ระหว่างรูป (ก) และ (ข) ภายหลังการอุดซ่อมโพรงอากาศแล้ว
รูปที่ 8 ผลการสำรวจโพรงอากาศด้วยเครื่องมือ GPR ในสถานที่จริง

อภิปรายผล

การจำลองผลการสำรวจโพรงอากาศใต้ผิวทางจราจรด้วยเครื่อง GPR ด้วยความถี่ที่แตกต่างกันคือ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้ย่านความถี่ที่นำไปสู่การแปลผลที่ดีที่สุด ซึ่งในแต่ละพื้นที่ผู้ดำเนินการสำรวจอาจต้องทำการปรับจูนความถี่ที่เหมาะสมสำหรับงานนั้น ๆ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ความถี่ 900 MHz สามารถให้ผลการสำรวจชัดเจนที่สุด สำหรับความถี่ 1.5 GHz มีสัญญาณการสะท้อนกลับที่มีความเข้มต่ำเกินไปการแสดงผลไม่ชัดเจน และความถี่ 400 MHz ไม่สามารถตรวจพบโพรงขนาดเล็กในส่วนของโพรงอากาศที่มีรูปร่างแบบชั้นบันไดได้

แม้ในขั้นตอนการก่อสร้างแบบจำลองถนนตัวอย่างได้ทำการปูรองพื้นด้วยแผ่นพลาสติกก่อนการเทพื้นคอนกรีตก็ยังไม่สามารถควบคุมความชื้นของวัสดุคันทางในถนนคอนกรีตได้ ซึ่งความชื้นส่วนหนึ่งเกิดจากความชื้นที่สะสมตัวอยู่ใกล้ลงไปใต้ดินที่ซึมขึ้นมาสะสมตัวอยู่ใต้แผ่นพลาสติกตลอดจนการรั่วซึมของแผ่นพลาสติก จึงทำให้ผลการสำรวจที่ได้ไม่ชัดเจน แต่ยังไม่พอที่จะระบุได้ถึงตำแหน่งของโพรงที่สร้างไว้ อย่างไรก็ตาม หากไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโพรงแล้ว ยังเป็นการยากที่จะระบุได้ถึงจุดที่เป็นโพรง

การสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ในสถานที่จริงสามารถแสดงให้เห็นถึงสภาพของผิวจราจรและพื้นทางก่อนและหลังการซ่อมด้วยวิธี Sub-Sealing โดยการศึกษาแนะนำเสนอเฉพาะกรณีศึกษาบริเวณของโพรงอากาศและสภาพภายหลังการซ่อมที่ชัดเจนเพื่อเป็นแนวทางในการใช้เครื่องมือ GPR เท่านั้น โดยมีได้หมายรวมถึงภาพตัดตลอดเส้นทางการสำรวจ

สรุปผล

การดำเนินการวิจัยและศึกษาเพื่อหาวิธีตรวจสอบโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์และหาวิธีในการซ่อมบำรุงผิวทางจราจร หรือแม้กระทั่งการตรวจสอบภายหลังจากการซ่อมบำรุงผ่านไปแล้วก็ตามพบว่า

1. การจำลองผลการสำรวจ พบว่าคลื่นทั้งสามย่านความถี่ที่ใช้ในการทดลอง สามารถแสดงให้เห็นการสะท้อนของวัสดุทั้งหมดที่อยู่ในแบบจำลองได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเหล็กเสริมคอนกรีตและรอยต่อในแต่ละชั้นของวัสดุที่มีความแตกต่างกัน
2. โปรแกรม GprMax ที่ใช้ในการจำลองนี้ไม่ได้มีการจำลองการดูดซับคลื่นด้วย ดังนั้นผลที่ได้จึงสามารถแสดงได้ถึงชั้นวัสดุได้แต่อย่างชัดเจนซึ่งแตกต่างจากความจริง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการถูกดูดซับและสูญเสียในระหว่างการเดินทางผ่านชั้นวัสดุต่าง ๆ
3. การก่อสร้างถนนคอนกรีตตัวอย่างยากที่จะควบคุมความชื้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจึงทำให้ผลการสำรวจของทุกตัวอย่างความถี่ที่ทำการเก็บข้อมูลหลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้ว 28 วัน ไม่ชัดเจนยากที่จะระบุตำแหน่งของโพรงอากาศและรอยต่อของชั้นวัสดุได้ต่างจากแบบจำลองที่ได้จากการจำลองผลการสำรวจด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถแยกชั้นวัสดุได้อย่างชัดเจน
4. การสำรวจในภาคสนามได้ทำการสำรวจก่อนและหลังการอัดฉีดน้ำปูนแล้ว 28 วัน พบว่ามีการแทรกตัวของน้ำปูนเข้าสู่ชั้นวัสดุคันทาง โดยพิจารณาได้จากการเปลี่ยนไปของสีในผลการสำรวจซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เพิ่มขึ้น
5. วิธีการสำรวจด้วยเครื่อง GPR นับเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณ และให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้ สามารถตรวจสอบโพรงใต้ผิวจราจรได้อย่างละเอียดถูกต้อง ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับเทคนิคและวิธีการดำเนินงานของผู้ใช้เครื่องมือด้วยเช่นกัน

จากจุดเด่นของวิธีการสำรวจด้วยเครื่อง GPR ดังที่ได้สรุปในเบื้องต้น สามารถนำไปศึกษาพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพื้นทางจราจรในระยะยาวได้ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือ GPR ยังมีข้อจำกัดด้านกำลังส่งที่ถูกจำกัดเพื่อป้องกันการรบกวนระบบการสื่อสารภายนอก ตลอดจนความถี่ที่ใช้กันกล่าวคือ เครื่องมือ GPR สามารถตรวจพบการสะท้อนของชั้นวัสดุที่แตกต่างกันได้เมื่อชั้นวัสดุนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ใช้

ในด้านความลึกของการสำรวจยังขึ้นอยู่กับความถี่ที่เลือกใช้งาน ตลอดจนความชื้นในชั้นวัสดุที่เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณที่ทำให้ความลึกการสำรวจที่ได้ลดลง โดยเฉพาะพื้นถนนคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลที่ตั้งอยู่บนดินเหนียวอ่อนที่มีความชื้นในดินสูง

References

- [1] Bancha, F., Vijitachara, S., Saree, S., Sakechai, A., and Pornchai, S. (2004). **Measurement of Cavity Filling Under Concrete Slabs by GPR and FWD**. Report No. 211. Bureau of Road Research and Development. Department of Highways. Ministry of Transport. Thailand. (In Thai)
- [2] Sato, M. (2005). **Short Course Lecture Note on GPR and Its Application to Environmental Study**. Lecture note of the Short course on Ground Penetration Radar and Electric Imaging for Solving Engineering Problem. AIT Bangkok, Thailand. 7-9 November 2005. Asian Institute of Technology. Thailand.
- [3] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Line. **Water Resources**. Vol. 16, pp. 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574
- [4] GSSI. (2017). **Antennas Manual**. Geophysical Survey Systems, Inc. Access (4 April 2018). Available (<http://www.geophysical.com>)
- [5] Antonis, G. (2006). **GprMax2D/3D simulator Version 2.0**. Access (20 November 2017). Available (<http://www.gprmax.com/code/UserGuideV2.pdf>)
- [6] ASTM D4748-98. (2002). **Standard Test Method for Determining Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar**. Annual Book of ASTM Standards 2002, Section 04: Construction Soil and Rock (I). American Society for Testing and Materials. Vol. 04.08.
- [7] Wiwattanachang, N., Giao, P. H., and Vichalai, C. (2015). Crack Detection in Fiber Concrete by Electrical Imaging Methods. **The 4th International Symposium on the Fusion science and Technologies (ISFT2015)**. RUS. Pra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand.
- [8] Chatterjee, R. (1989). **Antenna Theory and Practice**. 2nd ed. New Age International Inc.
- [9] CWP/SU. (2011). Seismic Un*x Release No. 43. An open source software package for seismic research and processing. **Center for Wave Phenomena**. Colorado School of Mines. Access (22 November 2017). Available (<http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes>)
- [10] SEGJ. (2004). Application of geophysical methods to engineering and environmental problems. **Society of Exploration Geophysicists of Japan**. Japan.