

## การทำนายความผิดปกติทางธรณีวิทยาบริเวณหน้าอุโมงค์ด้วยคลื่นไหวสะเทือน PREDICTION OF GEOLOGICAL ANOMALIES AHEAD OF TUNNEL FACE BY SEISMIC WAVES

พลพัชร์ นิลวัชรารณณ์<sup>1\*</sup>, ฐิรวีตร บุญญะฐิติ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

\*Corresponding author address: ponlapat.nil@gmail.com

### บทคัดย่อ

ความผิดปกติทางธรณีวิทยา เช่น บริเวณที่ชั้นหินแตกต่างจากสภาพโดยรอบ บริเวณโพรงถ้ำที่มีปริมาณน้ำสูง อาจทำให้เกิดปัญหาในระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ได้ เช่น การสูญเสียเสถียรภาพของหน้าอุโมงค์ การไหลทะลักของน้ำ และประสิทธิภาพในการขุดเจาะที่ลดลง ดังนั้นการทราบถึงตำแหน่งของความผิดปกติทางธรณีวิทยาล่วงหน้าจึงเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนความปลอดภัยและแผนปฏิบัติงานขุดเจาะอุโมงค์ ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการตรวจวัดแบบ Tunnel Seismic Prediction มาคาดการณ์ความผิดปกติทางธรณีวิทยาบริเวณหน้าอุโมงค์ โดยจำลองการแพร่กระจายคลื่นด้วยวิธี Spectral Element Method ในแบบจำลองชั้นหินที่มีความผิดปกติทางธรณีวิทยา แล้วนำข้อมูลคลื่นที่สังเคราะห์ได้มาประมวลผลด้วยฟิลเตอร์แบบ F-K และการแปลงผลแบบ Kirchhoff's migration โดยคำนึงถึงทิศทางในการสั่นของคลื่น จากการศึกษาพบว่าวิธีการดังกล่าวตัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากคลื่นสะท้อนในทิศทางที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปได้ และทำให้สามารถทำนายตำแหน่งของความผิดปกติทางธรณีวิทยาได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างคลื่นสังเคราะห์

**คำสำคัญ:** Tunnel Seismic Prediction, F-K filter, Kirchhoff's migration, ธรณีฟิสิกส์

### Abstract

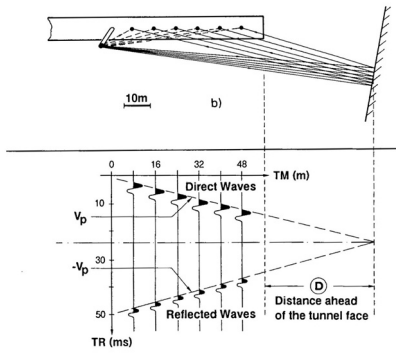
Geological anomalies such as weak zones, water-filled cavities may cause problems during tunnel excavations, for instance, the loss of stability at tunnel's face, flooding, reduction in excavation rate, etc. Thus, the knowledge of geological anomalies in advance is beneficial for safety and operation planning. The potential to predict geological anomalies ahead of tunnel face by seismic waves called Tunnel Seismic Prediction is investigated in this study. The study is performed on artificial seismic records generated by Spectral Element Method based on a numerical model which embedded with a geological anomaly. The synthesized waves are processed by F-K filtering to extract only waves in a relevant velocity range and directions before processed by Kirchhoff's migration with a consideration of vibration axes. Results from the migration show that irrelevant waves can be excluded by the proposed technique resulting in a better prediction for the location of assumed anomaly in the synthesis model.

**Keywords:** Tunnel Seismic Prediction, F-K filter, Kirchhoff's migration, Geophysical prospecting

### 1. TUNNEL SEISMIC PREDICTION (TSP)

ความผิดปกติทางธรณีวิทยาสามารถทำให้เกิดการวิบัติของหน้าอุโมงค์และคาดอุโมงค์ได้ เช่น การขุดเจาะเจอโพรงน้ำใต้ดินทำให้น้ำทะลักเข้ามาในอุโมงค์ ซึ่งสร้างความเสียหายต่อคนงานและเครื่องจักรได้ หากทราบตำแหน่งของความผิดปกติทางธรณีวิทยาในแนวการขุดเจาะของอุโมงค์ได้ล่วงหน้าจะทำให้สามารถเตรียมตัวรับมือกับปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ สำหรับวิธีในการการคาดการณ์ถึงความผิดปกติทางธรณีวิทยาในงานวิจัยนี้คือ วิธี Tunnel seismic prediction (TSP) ซึ่งใช้ระเบิดสร้างคลื่นสั่นสะเทือนให้เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปยังความผิดปกติทางธรณีวิทยาแล้วสะท้อนกลับมายังตัวรับคลื่นที่ติดตั้งไว้ที่บริเวณผิวของคาดอุโมงค์ [1] การประมวลผลข้อมูลของคลื่นที่ตัวรับสัญญาณแบบดั้งเดิมกระทำในปริภูมิของระยะทางกับเวลา โดยการหาจุดตัดกันระหว่างแนวของคลื่นตรงและ

คลื่นสะท้อน เพื่อทำนายถึงตำแหน่งของความผิดปกติที่อยู่บริเวณหน้าอุโมงค์ ซึ่งสามารถอธิบายโดยย่อได้ดังรูปที่ 1 จากการศึกษาที่ Hsueh Shan ในประเทศจีน พบว่าวิธี TSP สามารถคาดการณ์ตำแหน่งของรอยต่อที่วางตัวอยู่ข้างหน้าอุโมงค์ได้ แต่สำหรับการประเมินลักษณะทางกายภาพของความผิดปกตินั้นจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลทางธรณีวิทยาของพื้นที่การขุดเจาะอุโมงค์ควบคู่กันไปด้วย [2]



รูปที่ 1 การหาตำแหน่งของความผิดปกติทางธรณีวิทยาด้วยการลากเส้นตัดระหว่างแนวของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน [1]

## 2. วิธีการประมวลผล และวิเคราะห์ผล

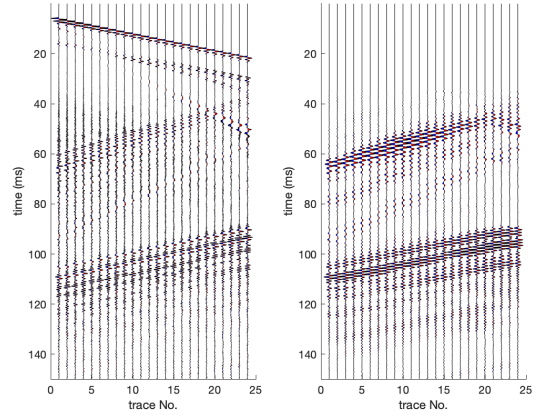
การตรวจวัดด้วยวิธี TSP ประกอบด้วยข้อมูลคลื่นที่ตรวจวัดได้จากการจุดระเบิดขนาดเล็กตามแนวอุโมงค์ประมาณ 16~24 ตำแหน่ง ทุกๆ ระยะประมาณ 1~2 m เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาแสดงผลรวมกันจะได้หน้าตัดการสั่น (Seismic section) ในปริภูมิของระยะทาง - เวลา สัญญาณประเภทคลื่นตรงที่แฝงอยู่ในข้อมูลนี้จะถูกกรองออกด้วยตัวกรองแบบ F-K เพื่อให้เหลือแต่สัญญาณประเภทคลื่นสะท้อนเท่านั้น

ข้อมูลที่ได้จากการกรองแล้วนี้จะถูกแปลงให้เป็นหน้าตัดขวางแบบสองมิติในปริภูมิของระยะทาง - ระยะทางด้วยการวิเคราะห์แบบ Kirchhoff ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คือ หน้าตัดแบบสองมิติที่แสดงตำแหน่งของพื้นผิวสะท้อนต่างๆ ที่เป็นไปได้ในชั้นดิน ซึ่งรวมถึงความผิดปกติทางธรณีวิทยาบริเวณหน้าอุโมงค์ด้วย

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ปรับปรุงการวิเคราะห์แบบ Kirchhoff โดยนำทิศทางของคลื่นสะท้อนมาประกอบการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำขึ้นดังที่จะได้แสดงรายละเอียดต่อไป

### 2.1. ตัวกรองแบบ F-K

ข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนที่เก็บได้จากพื้นที่จริงประกอบไปด้วยคลื่นหลายประเภท เช่น คลื่นตรง (Direct waves) คลื่นเสียง (Sound waves) คลื่นผิวภายในอุโมงค์ (Surface waves) และคลื่นสะท้อนจากหน้าอุโมงค์ (Tunnel face reflection waves) ซึ่งจะปะปนอยู่กับคลื่นสะท้อนจากความผิดปกติทางธรณี (Reflection waves from geological anomaly) ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของการวิเคราะห์ [3] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องขจัดคลื่นรบกวนเหล่านี้ออกก่อนที่จะนำเอาคลื่นสะท้อนไปประมวลผลต่อไป ตัวอย่างของการกรองสัญญาณด้วยวิธี F-K ได้แสดงในรูปที่ 2ก และรูปที่ 2ข



ก) ข้อมูลก่อนการกรอง ข) ข้อมูลหลังการกรอง

รูปที่ 2 ตัวอย่างการกรองสัญญาณด้วยวิธี F-K

### 2.2. พื้นผิวสะท้อนและทิศทางคลื่นที่ตรวจวัดได้

ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิด ไปยังพื้นผิวสะท้อนและสะท้อนกลับมาที่ตัวรับสัญญาณ ( $L_w$ ) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$L_w = V \times T_R \quad (1)$$

โดยที่  $V$  คือความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลาง และ  $T_R$  คือเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปกระทบผิวสะท้อนและเคลื่อนที่กลับมาที่ตัวรับสัญญาณ

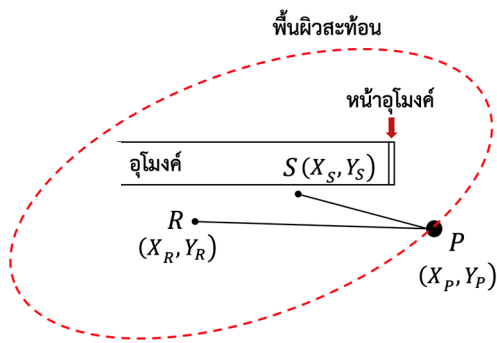
เมื่อกำหนดให้จุดกำเนิดคลื่น  $S$  ตัวรับสัญญาณ  $R$  และจุดสะท้อน  $P$  อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังรูปที่ 3 จะสามารถคำนวณหาค่า  $L_w$  จากความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตได้ดังสมการที่ 2

$$L_w = \sqrt{(X_S - X_P)^2 + (Y_S - Y_P)^2} + \sqrt{(X_R - X_P)^2 + (Y_R - Y_P)^2} \quad (2)$$

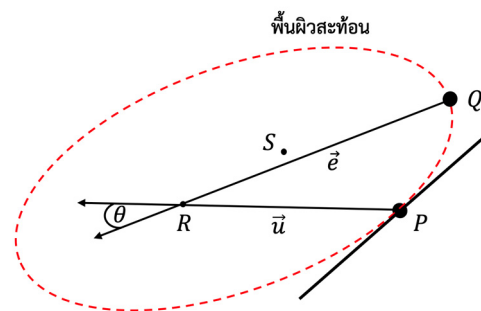
จากสมการที่ 2 สามารถจัดรูปใหม่เป็นสมการของทรงรีได้ดังนี้

$$\frac{X_P^2}{L_w^2} + \frac{Y_P^2}{L_w^2 - 4X_S^2} = \frac{1}{4} \quad (3)$$

โดยที่  $(X_S, Y_S)$ ,  $(X_R, Y_R)$ ,  $(X_P, Y_P)$  คือพิกัดของแหล่งกำเนิดคลื่น ตัวรับสัญญาณ และจุดสะท้อนตามลำดับ พื้นผิวที่สร้างได้จากสมการที่ 3 นี้เรียกว่าพื้นผิวสะท้อน (Equi-Travel time surface) [4] ซึ่งมีจุดกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณเป็นจุดโฟกัสนั่นเอง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำเนิดคลื่น S, ตัวรับสัญญาณ R, จุดสะท้อน P และ พื้นที่ผิวสะท้อน



รูปที่ 4 ทิศของการสั่นของคลื่นที่วัดได้และทิศของคลื่นสะท้อน

ในการวิเคราะห์ทั่วไปนั้นจะทราบระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปกลับก่อน แล้วจึงนำค่าดังกล่าวไปวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เกิดการสะท้อน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปได้คือ ทุก ๆ ตำแหน่งบนพื้นที่ผิวสะท้อน หรืออาจกล่าวในอีกนัยหนึ่งได้ว่า มีคำตอบที่เป็นไปได้หลายคำตอบ ทำให้ไม่สามารถนำผลวิเคราะห์ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการทำงานจริงต่อไปได้ และเพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดการสะท้อนที่แท้จริงอยู่ที่ตำแหน่งใดบนพื้นที่ผิวสะท้อน จำเป็นต้องนำข้อมูลอื่นๆ มาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย เช่น ทิศทางของการสั่นของคลื่นที่ตรวจวัดได้ [4]

จากรูปที่ 4 เมื่อกำหนดให้  $\vec{n}$  เป็นคลื่นที่ตรวจวัดได้ที่จัดอยู่ในรูปเวกเตอร์,  $\vec{e}$  เป็นเวกเตอร์ทิศทาง จากจุด Q ใด ๆ บนพื้นที่ผิวสะท้อนไปยังตัวรับสัญญาณ และ  $\theta$  เป็นมุมระหว่าง  $\vec{n}$  และ  $\vec{e}$  และขนาดของคลื่นเท่ากับ A เมื่อนำสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดได้ไปคูณแบบจุด (dot product) กับเวกเตอร์  $\vec{e}$  จะได้ผลลัพธ์ที่เวลาต่าง ๆ เท่ากับ  $A \cos \theta$  ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อจุด Q ที่สมมตินั้นอยู่ตรงกับจุดสะท้อนที่แท้จริง

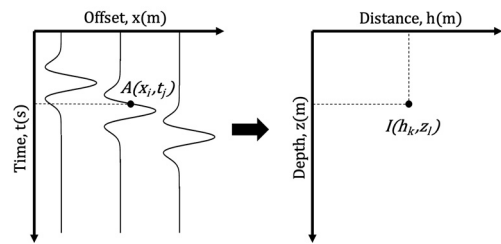
### 2.3. การวิเคราะห์แบบ Kirchhoff

ข้อมูลตรวจวัดที่ในปริภูมิระยะทาง - เวลา ที่ผ่านการกรองด้วยวิธี F-K แล้ว จะสามารถเปลี่ยนเป็นข้อมูลเชิงระยะทาง - ระยะทาง หรือหน้าตัดชั้นดินได้โดยการวิเคราะห์แบบ Kirchhoff [5]

$$A(x, t) \xrightarrow{\text{Migration}} I(h, z) \quad (4)$$

โดยที่  $A(x, t)$  เป็นแอมพลิจูดของคลื่นตรวจวัด ณ ระยะ  $x_i$  จากจุดกำเนิดคลื่น (Offset) ที่เวลา  $t_k$  และ  $I(h, z)$  คือแอมพลิจูดของคลื่นที่ระยะ  $h_k$  และความลึก  $z_l$  ในตัวกลาง ดังรูปที่ 5

ปริมาณ  $|I(h, z)|$  ที่สูงจะบ่งบอกว่า มีความเป็นไปได้สูงที่จุดนั้นจะเป็นจุดสะท้อน แต่ในทางกลับกันหากปริมาณ  $|I(h, z)|$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะสามารถบ่งบอกได้ว่าจุดนั้นมีโอกาสน้อยที่จะเป็นจุดสะท้อน



รูปที่ 5 การแปลงข้อมูลตรวจวัด เป็นหน้าตัดชั้นหิน

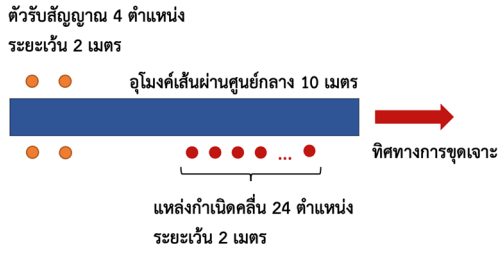
### 3. การจำลองข้อมูลแบบสังเคราะห์

การศึกษาในครั้งนี้ ใช้โปรแกรม SPEC2FEM2D สร้างคลื่นสังเคราะห์ประเภทคลื่นอัด โดยใช้แบบจำลองชั้นหินที่มีความเร็วคลื่นอัดเท่ากับ 3,000 m/s ขนาดกว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร ภายในแบบจำลองประกอบด้วยอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เมตร และกระเปาะทรายซึ่งมีความเร็วคลื่นอัดเท่ากับ 1,000 m/s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เมตร

ในการสร้างคลื่นสังเคราะห์ ได้กำหนดจุดกำเนิดคลื่นจำนวน 24 ตำแหน่ง ที่ระยะ 2, 4, 6, ... 48 เมตร จากหน้าอุโมงค์ ในฝั่งซ้ายของอุโมงค์ ที่ระยะ 7 เมตรในแนวรัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ และจัดจตุรัสสัญญาณคลื่นสั้นสะท้อนไว้ที่ระยะ 61 และ 63 เมตร จากหน้าอุโมงค์ ทั้งด้านซ้ายและขวาของอุโมงค์ ที่ระยะ 7 เมตรในแนวรัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ (รูปที่ 6)

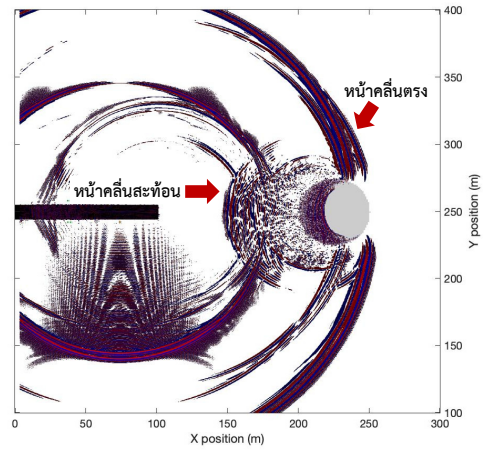
สำหรับตำแหน่งของกระเปาะทรายนั้นจัดวางในตำแหน่งที่แตกต่างกันสองตำแหน่ง ได้แก่ กรณีที่ 1. กระเปาะทรายวางตัวอยู่ในแนวจุดเจาะของอุโมงค์ และ กรณีที่ 2. กระเปาะทรายวางตัวอยู่ห่างจากแนวจุดเจาะของอุโมงค์ออกไปทางด้านข้างเป็นระยะทาง 100 m ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ

ในการจำลองการแพร่กระจายคลื่น ได้สร้างคลื่นอัดสังเคราะห์แบบริคเกอร์ที่มีความถี่หลักเท่ากับ 1,000 เฮิรตซ์ และระยะเวลาเท่ากับ 2.4 มิลลิวินาที ที่จุดกำเนิดคลื่น โดยการจำลองแต่ละครั้ง ใช้เวลาตรวจวัดคลื่นทั้งหมด 0.4 วินาที หลังจากนั้นจะเริ่มการจำลองใหม่โดยเปลี่ยนตำแหน่งของจุดกำเนิดคลื่นจนครบ 24 ตำแหน่ง ข้อมูลคลื่นที่ได้จากจุดตรวจวัดทั้งสิ้นจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป



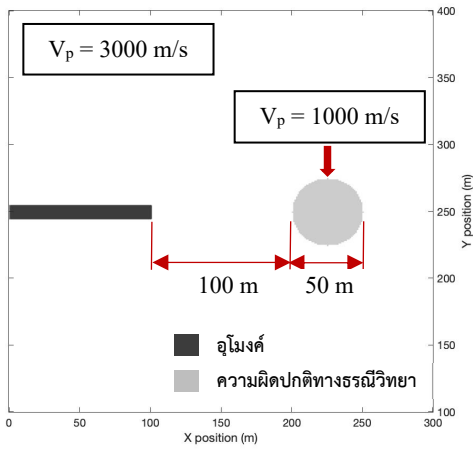
รูปที่ 6 แผนผังการจัดวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่น และตัวรับสัญญาณบริเวณตาอุโมงค์

จากการจำลองการแพร่กระจายของคลื่นด้วยวิธี Spectral element method คลื่นตรงที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังตัวรับสัญญาณ จากนั้นเคลื่อนไปยังความผิดปกติทางธรณีวิทยาภายในอุโมงค์ และสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณอีกครั้ง ดังรูปที่ 9

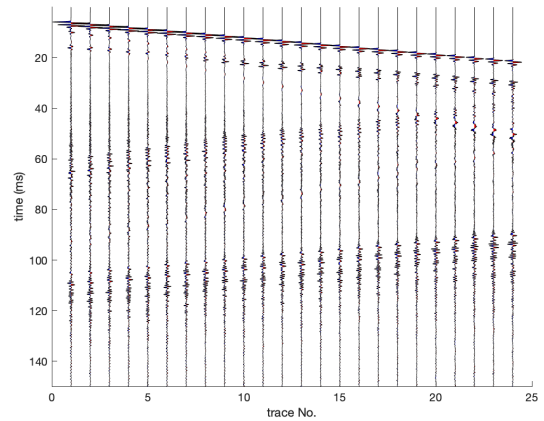


รูปที่ 9 การจำลองการแพร่กระจายของคลื่นด้วยวิธี Spectral element method

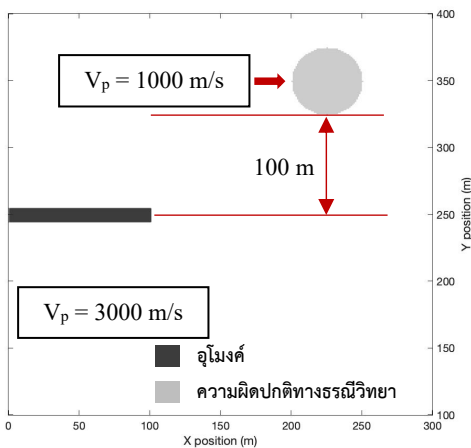
ผลจากการเก็บข้อมูลในปริภูมิของ ระยะทาง - เวลา ดังรูปที่ 10 โดยความชันของคลื่นในปริภูมิดังกล่าว สามารถบ่งบอกถึงความเร็วและทิศทางของคลื่น ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองการแพร่กระจายของคลื่นจะเห็นได้ว่า มีคลื่นที่มีความเร็วเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม บ่งบอกถึงคลื่นตรง (Direct wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected wave) ซึ่งเป็นคลื่นหลักที่จะใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 7 แบบจำลองความเร็วชั้นหินที่มีความผิดปกติทางธรณีวิทยาทางด้านอยู่ในแนวการขุดเจาะของอุโมงค์



รูปที่ 10 ข้อมูลจากตัวรับสัญญาณ ในปริภูมิของ ระยะทาง - เวลา



รูปที่ 8 แบบจำลองความเร็วชั้นหินที่มีความผิดปกติทางธรณีวิทยาทางด้านอยู่นอกแนวการขุดเจาะของอุโมงค์

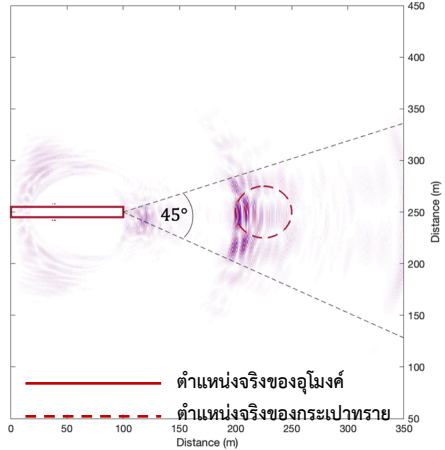
#### 4. การเปรียบเทียบผล

เมื่อนำเอาคลื่นตรวจวัดจำลองในหัวข้อก่อนหน้ามาประมวลผล และแสดงเป็นหน้าตัดด้วยวิธี Kirchhoff จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11 ถึง 14 โดยบริเวณที่มีความเข้มสีสูงในภาพหน้าตัด จะแสดงถึงตำแหน่ง และขนาดที่เป็นไปได้ของกระเปาะทราย ส่วนเส้นที่บสีแดง จะแสดงถึงตำแหน่งของอุโมงค์ และเส้นประสีแดงจะแสดงถึงตำแหน่งของกระเปาะทราย

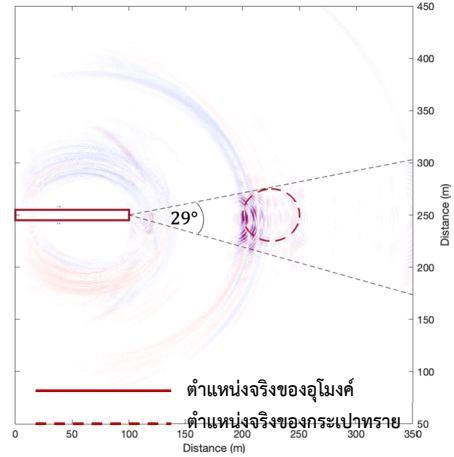
จากรูปที่ 11 เมื่อวิเคราะห์ผลโดยไม่คำนึงถึงทิศการสั่นของคลื่นจะสามารถประเมินได้ว่ามีกระเปาะทรายอยู่ด้านหน้าของอุโมงค์ โดยมีมุมเปิด 45 องศา และยังพบการสะท้อนหลายครั้งที่ตำแหน่งถัดจากกระเปาะทรายออกไป เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ผลที่คำนึงถึงทิศของการสั่น มุมเปิดที่พบมีขนาด 29 องศา ซึ่งมีขนาดเล็ก และใกล้เคียงกับขนาดจริงกว่า ดังรูปที่ 12

จากรูปที่ 13 เมื่อวิเคราะห์โดยไม่คำนึงถึงทิศของการสั่น พบกว่า การสะท้อนที่ชัดที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งของกระเปาะทรายนอกแนวอุโมงค์ โดยมีมุมเปิด 25 องศา แต่ยังคงพบการสะท้อนที่อยู่ในแนวอุโมงค์อยู่ ซึ่งเป็นจุดสะท้อนที่ไม่มีอยู่จริง เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงทิศของการสั่นในรูปที่ 14 จะพบตำแหน่งของกระเปาะทรายที่มุมเปิด 17 องศา และสามารถกำจัดการสะท้อนในแนวอุโมงค์ได้

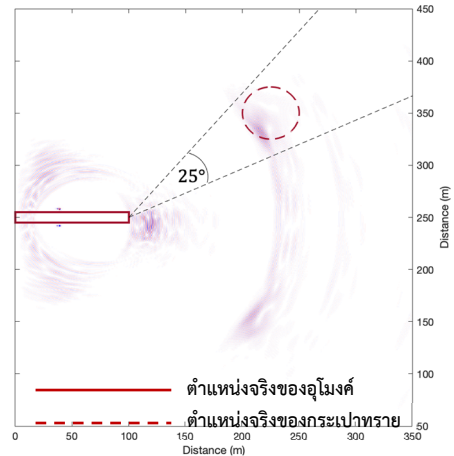
อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โดยคำนึงถึงทิศของการสั่น ยังคงเกิดภาพของจุดสะท้อนที่ไม่มีอยู่จริงอยู่ ได้แก่ 1. ภาพบนพื้นผิวสะท้อนบริเวณนอกแนวของอุโมงค์ ในรูปที่ 12 และ 2. ภาพสะท้อนของกระเปาะทราย โดยมีแนวของอุโมงค์เป็นเส้นสะท้อน ในรูปที่ 14 เพราะฉะนั้นการทำนายถึงตำแหน่งของความผิดปกติทางธรณีวิทยาด้านหน้าอุโมงค์ อาจต้องมีข้อมูลทางธรณีวิทยาโดยรอบอุโมงค์ด้วย เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการทำนายถึงตำแหน่งของความผิดปกติดังกล่าว



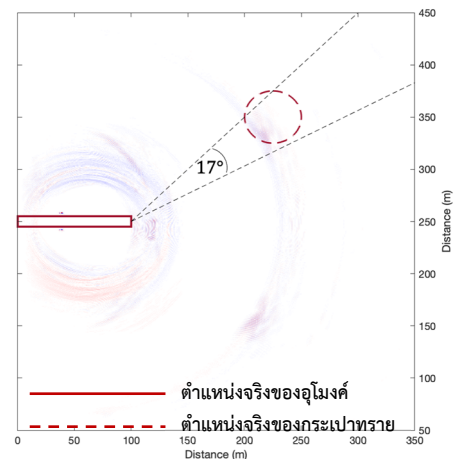
รูปที่ 11 ข้อมูลจากการแปลงผลแบบ Kirchhoff จากข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลองความเร็วชั้นหิน กรณีที่ 1



รูปที่ 12 ข้อมูลจากการแปลงผลแบบ Kirchhoff โดยคำนึงถึงทิศการสั่นจากข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลองความเร็วชั้นหิน กรณีที่ 1



รูปที่ 13 ข้อมูลจากการแปลงผลแบบ Kirchhoff จากข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลองความเร็วชั้นหิน กรณีที่ 2



รูปที่ 14 ข้อมูลจากการแปลงผลแบบ Kirchhoff โดยคำนึงถึงทิศของการสั่น จากข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลองความเร็วชั้นหิน กรณีที่ 2

## 5. สรุปผล

จากการสร้างแบบจำลองความเร็วในชั้นหิน 2 รูปแบบ แล้วนำไปประมวลผลด้วยการกรองแบบ F-K และวิเคราะห์แบบ Kirchhoff โดยคำนึงและไม่คำนึงถึงทิศทางของการสั่นของตัวรับสัญญาณ เพื่อทำนายตำแหน่งของความผิดปกติทางธรณีวิทยาบริเวณหน้าอุโมงค์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การกรองความเร็วคลื่นแบบ F-K สามารถจัดคลื่นที่รบกวนคลื่นสะท้อนจากความผิดปกติทางธรณีวิทยา ด้านหน้าอุโมงค์ได้
2. การวิเคราะห์โดยคำนึงถึงทิศทางของการสั่นของตัวรับสัญญาณสามารถเพิ่มความแม่นยำในการระบุความกว้างของความผิดปกติทางธรณีวิทยา และลดภาพที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้งได้

อย่างไรก็ตาม การจำลองและการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จะถูกจำกัดอยู่ในระยะ 2 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่อยู่ในทิศทางการสั่นของตัวรับสัญญาณเท่านั้น แต่ถ้าหากเป็นปัญหาในระดับ 3 เมตร การตรวจวัดข้อมูลจำเป็นต้องเพิ่มแกนการสั่นของตัวรับสัญญาณเป็นระบบ 3 แกน และใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันกับที่เสนอก่อนหน้า แต่เป็นการคำนวณกับสัญญาณแบบเวกเตอร์ในปริภูมิ 3 มิติ หรือ ใช้วิธีการคำนวณแบบเดิมในปริภูมิ 2 มิติจำนวน 2 รอบ โดยการวิเคราะห์ครั้งแรกจะใช้ข้อมูลจากการสั่น 2 ทิศทางในแนวราบ ส่วนการวิเคราะห์ครั้งที่สองจะใช้ข้อมูลทิศทางการสั่นในระยะที่ตั้งที่วางตัวตามแนวอุโมงค์ การวิเคราะห์ที่ตั้งกล่าวสามารถแสดงเป็นหน้าตัด 2 ระยะที่ตั้งฉากกันเพื่อแสดงถึงตำแหน่งของความผิดปกติทาง

ธรณีวิทยาในระบบ 3 มิติได้

## 6. รายการอ้างอิง

- [1] G. Sattel, P. Frey, and R. Amberg. (1992). Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods - pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break, vol. 10, no. 1., 19–25. DOI: 10.3997/1365-2397.1992002
- [2] D.-T. Tsai, F.-L. Hwang, H.-M. Shih, S.-C. Kao, J.-S. Tseng, and L.-P. Shi. (2005). Application of Tunnel Seismic Prediction for the Hsuehshan Tunnel. 171–176. November 7 - 20, Taipei, Taiwan.
- [3] Y. Wang, N. Fu, X. Lu, and Z. Fu. (2019). Application of a new geophone and geometry in tunnel seismic detection. Sensors (Switzerland), vol. 19, no. 5, DOI: 10.3390/s19051246.
- [4] Y. Ashida, T. Matsuoka, T. Watanabe, and H. Kusumi. (2002). Seismic imaging ahead of tunnel face with three component geophones. SEG Tech. Progr. Expand. Abstr., vol. 21, no. 1, 1622–1625,, DOI: 10.1190/1.1816984.
- [5] A. A. Kaufman, A. L. Levshin, and K. L. Lerner, (2002). Methods in Geochemistry and Geophysics. Acoustic and Elastic Wave Fields in Geophysics II,, 187–238