

การประมาณความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยวิธีคลื่นผิวแบบพาสซีฟ ที่คำนึงถึงองค์ประกอบในแนวราบของคลื่น

Determination of shear wave velocity profiles by a passive surface wave method which considers horizontal components of waves

สิริธร ปชชา* ธีรวัฒน์ ชิมเล่มกิม และ จูริวัตร บุญญะฐี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

* Corresponding author; E-mail address: sireetorn.pat@hotmail.com

บทคัดย่อ

วิธีที่นิยมใช้ในการสำรวจชั้นดินเพื่อการออกแบบสิ่งปลูกสร้าง ได้แก่ การสำรวจด้วยวิธีตอกหยั่งมาตรฐาน ซึ่งแม้จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่มีค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการดำเนินการพอสมควร ด้วยเหตุนี้การสำรวจชั้นดินเบื้องต้นด้วยวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบพาสซีฟจึงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสามารถทำได้อย่างรวดเร็วภายใต้ค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก การสำรวจด้วยคลื่นผิวดินประกอบด้วยการบันทึกสัญญาณคลื่นในสนามแล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเฉือน (Shear Wave Dispersion Curve) โดยทั่วไปการวิเคราะห์ดังกล่าวจะพิจารณาเพียงคลื่นในแนวตั้งจึงมีเงื่อนไขในการคำนวณน้อยทำให้ประสบปัญหาความไม่แน่นอนของคำตอบ และส่งผลต่อความแม่นยำของการทำนาย ในการศึกษาจึงเสนอแนวทางการวิเคราะห์แบบผสมผสานโดยพิจารณาทั้งคลื่นในแนวราบ และแนวดิ่งเพื่อเพิ่มเงื่อนไขในการคำนวณ ทำให้การวิเคราะห์มีความแน่นอนมากขึ้น เนื่องจากคลื่นทั้งสองแนวตอบสนองต่อคุณสมบัติเชิงกลของชั้นดินในลักษณะที่ต่างกัน เมื่อทดลองใช้วิธีการที่ได้พัฒนานี้กับคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดจากภาคสนามเพื่อสร้างภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากวิธีดาวินโฮลและครอสโฮล พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถทำนายภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: คลื่นผิวดิน, ความเร็วคลื่นเฉือน, คลื่นในแนวราบ

Abstract

A commonly used method for subsurface investigation in foundation design is the Standard Penetration Test (SPT), which, despite its high accuracy, is associated with considerable cost and time requirements. Consequently, passive surface wave analysis has gained increasing attention as a preliminary geotechnical investigation method due to its efficiency and relatively low cost. This method involves recording ambient

surface waves in the field and analyzing the data to construct shear wave dispersion curves. Typically, such analysis considers only the vertical component of the wavefield, which leads to an underdetermined inversion problem and may result in non-unique solutions, thereby reducing the accuracy of the shear wave velocity profile prediction. To address this limitation, this study proposes a joint inversion approach that incorporates both vertical and horizontal components of the surface wavefield. By increasing the constraints in the inversion process, this method enhances the stability and reliability of the results, as the two components respond differently to the mechanical properties of subsurface materials. The proposed method was applied to field-recorded surface wave data to generate shear wave velocity profiles, which were then compared with profiles obtained from Downhole and Crosshole tests. The comparison demonstrates that the proposed approach provides accurate predictions of shear wave velocity profiles, indicating its potential for improving the reliability of surface wave-based geotechnical investigations.

Keywords: surface wave, shear wave velocity, horizontal waves

1. บทนำ

การสำรวจด้วยคลื่นผิว (Surface wave method) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการประเมินลักษณะของชั้นดิน การสำรวจด้วยคลื่นผิวสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ วิธีการแบบแอคทีฟ [1-3] ที่ใช้น้ำหนักตกกระทบหรือใช้คลื่นเป็นตัวสร้างคลื่นสั่นสะเทือน และวิธีการแบบพาสซีฟที่วิเคราะห์ผลจากการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติของชั้นดินโดยไม่มีการสร้างคลื่นสั่นสะเทือนขึ้นมาใหม่เอง ซึ่งมีจุดเด่นประการหนึ่งคือสามารถสำรวจได้ลึกกว่าวิธีการแบบแอคทีฟ

ในการศึกษานี้จะนำเสนอการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์แบบพาสซีฟแบบหนึ่งโดยเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีผู้เสนอไว้ก่อนหน้านี้จำนวนสองวิธี ได้แก่ วิธีสหสัมพันธ์ในตัวเชิงพื้นที่ (Spatial autocorrelation method, SPAC) และวิธีการสำรวจด้วยกลุ่มเซนเซอร์แบบวงกลมที่ไม่มีการตรวจวัดที่ศูนย์กลาง (Centerless circular array method, CCA-L) สำหรับวิธีที่เสนอในการศึกษานี้เป็นการพัฒนาต่อจากงานของอิรวินน์ [4] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความเร็วเฟสของคลื่นเรย์ลี (Rayleigh waves) จากเซนเซอร์ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งเหมือนวิธี CCA-L โดยการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้จะนำเอาคลื่นสั้นสะท้อนในแนวราบมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเพื่อเพิ่มสมการเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ ซึ่งจะช่วยลดความไม่แน่นอนและเพิ่มความแม่นยำในการทำนายผลได้

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสำรวจคุณสมบัติของชั้นดินเพื่อการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถดำเนินการสำรวจได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่าย สามารถเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่ในเวลาที่ยกจำกัด และสามารถใช้ประเมินพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการวิเคราะห์แรงกระทำจากแผ่นดินไหว เช่น ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน (V_s) ได้อย่างสอดคล้องกับวัตถุประสงค์

2. กรอบแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีสหสัมพันธ์ในตัวเชิงพื้นที่ (Spatial autocorrelation method, SPAC)

วิธี SPAC ซึ่งเสนอโดย Aki [5] เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คลื่นสั้นสะท้อนขนาดเล็ก (microtremors) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยการตรวจวัดจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งบนแนวเส้นรอบวงของวงกลม และเซนเซอร์ที่ติดตั้ง ณ จุดศูนย์กลางของวงกลม เมื่อนำสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่วัดจากเซนเซอร์แต่ละตัวบนเส้นรอบวงกับเซนเซอร์ที่จุดศูนย์กลางมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ผลลัพธ์ในรูปฟังก์ชันเบสเซลลำดับศูนย์ซึ่งแปรผันตามผลคูณระหว่างเลขคลื่น (wavenumber) กับรัศมีของวงกลม ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (1)

$$\bar{Y} = \left(\frac{Y_{10} + Y_{20} + \dots + Y_{N0}}{N} \right) = J_0(kr) \quad (1)$$

ในเวลาต่อมา Bettig et al. [6] ได้ประยุกต์ และปรับปรุงวิธีนี้ให้เหมาะสมกับพื้นที่ใช้งานจริง โดยเฉพาะในเขตเมืองที่ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ในรูปวงกลมได้อย่างสมบูรณ์ด้วยการใช้จำนวนสถานีวัดที่มากขึ้นและกระบวนการเฉลี่ยข้อมูลจากหลายตำแหน่ง ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นดินลึกได้อย่างแม่นยำในช่วงความถี่ต่ำวิธี SPAC ยังคงมีข้อจำกัด เช่น การใช้เฉพาะคลื่นแนวตั้ง ความซับซ้อนของการคำนวณฟังก์ชันเบสเซล [7]

2.2 วิธีการสำรวจด้วยกลุ่มเซนเซอร์แบบวงกลมที่ไม่มีการตรวจวัดที่

ศูนย์กลางสำหรับคลื่นเลิฟ (Centerless circular array method for Love waves, CCA-L)

Cho et al. [8] ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินเพื่อประเมินค่าความเร็วเฟสของคลื่นเรย์ลี เช่นเดียวกับวิธี SPAC และต่อมาได้มีการพัฒนาให้สามารถนำมาใช้กับคลื่นเลิฟได้โดยตรงโดยเรียกว่าวิธี CCA-L สำหรับวิธี SPAC เมื่อต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบคลื่นในแนวราบด้วยจะต้องใช้ทั้งค่าความเร็วเฟสของคลื่นเรย์ลี และอัตราส่วนพลังงานระหว่างคลื่นเรย์ลีและคลื่นเลิฟ เป็นตัวแปรร่วมในการคำนวณ ในขณะที่วิธี CCA-L จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าตัวเดียว ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ง่ายกว่า

ผลการประยุกต์ใช้งานภาคสนามจากพื้นที่ทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธี CCA-L สามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสภาพชั้นดินจริง โดยเทคนิคนี้รองรับช่วงความยาวคลื่นที่กว้างตั้งแต่ 2~25 เท่าของรัศมีอาร์เรย์ (r) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประเมินโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนได้ลึกมาก และเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าสำหรับการตรวจหยั่ง

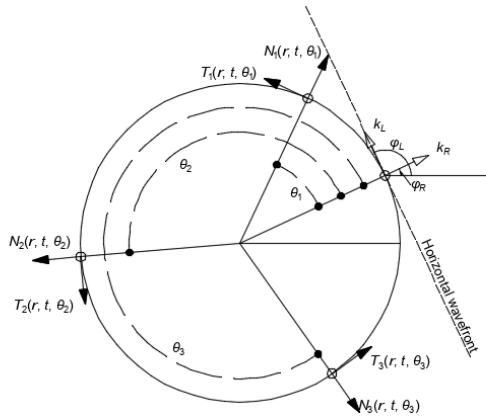
อย่างไรก็ตาม เทคนิค CCA-L ยังคงมีข้อจำกัด เช่น ความไวต่อการจัดวางเซนเซอร์ที่ไม่สมมาตร [9], ความไม่สมบูรณ์ของสนามคลื่นรบกวน [10], และสมมติฐานของแหล่งกำเนิด isotropic ที่อาจไม่เป็นจริงในบางพื้นที่ [11]

2.3 วิธีการกำลังของเฟสที่คำนึงถึงคลื่นในแนวราบ และแนวดิ่ง (Power of phase considering horizontal and vertical wave components, POP-HV)

ในการสร้างเส้นโค้งการกระจายโดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel's function) เข้ามาเกี่ยวข้อง และจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลม อิรวินน์ [4] ได้นำเสนอวิธีใหม่ชื่อว่า Power of phase (POP) สำหรับการวิเคราะห์หาเส้นโค้งการกระจายจากข้อมูลการตรวจวัดคลื่นในแนวดิ่งโดยไม่ใช้เบสเซลฟังก์ชัน

Li et al. [12] ได้แสดงให้เห็นว่าเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเลิฟมีความไวต่อความเร็วคลื่นเฉือน และไม่ไวต่อความเร็วคลื่นอัด (P-wave velocity) ทำให้ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับเสถียรมากกว่าในชั้นดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ การศึกษาโดยนักวิจัยอื่น [13, 14] ยังแสดงให้เห็นว่าการคำนึงถึงคลื่นเลิฟในโหมดที่สูงขึ้นจะสามารถเพิ่มความแม่นยำในการทำนายได้อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยเหล่านี้ทำให้เกิดแนวคิดการวิเคราะห์ผกผันร่วมโดยคำนึงถึงคลื่นทั้งสองประเภท ซึ่งพบว่าให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือมากขึ้น [15-17] โดยเฉพาะในชั้นดินที่มีความซับซ้อน

ในการศึกษานี้ได้ปรับปรุงวิธีการของอิรวินน์ [4] ให้สามารถคำนึงถึงคลื่นสั้นสะท้อนในแนวราบ โดยเริ่มจากการสมมติให้ $N_i(t, r, \theta_i)$ และ $T_i(t, r, \theta_i)$ เป็นการสั้นสะท้อนในแนวรัศมี และแนวสัมผัสของเซนเซอร์ตัวที่ i โดยมีรัศมีของวงกลมเท่ากับ r และมุมอะซิมุท (azimuth) θ เทียบกับเส้นทางการเดินทางของคลื่นแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์เชิงมุมระหว่างเส้นทางเดินของคลื่นเลี้ยวและการสะท้อนเทือนในแนวรัศมีและแนวสัมผัสของเซนเซอร์

การสั้นในแนวทั้งสองมีความสัมพันธ์กับการสั้นของคลื่นเรลีย์ และคลื่น
เลิฟดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Ni \\ Ti \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_R \exp \left[\frac{-jk_R e_{\theta_R} \cdot r \cdot \cos \theta_i}{} \right] \\ A_L \exp \left[\frac{-jk_L e_{\theta_L} \cdot r \cdot \cos \theta_i}{} \right] \end{bmatrix} e^{-j\omega t} \\ &= \begin{bmatrix} A_R \cos \theta_i & A_L \sin \theta_i \\ -A_R \sin \theta_i & A_L \cos \theta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp \left[\frac{-j\phi_R}{} \right] \\ \exp \left[\frac{-j\phi_L}{} \right] \end{bmatrix} e^{-j\omega t} \quad (2) \end{aligned}$$

โดย k_R และ k_L แทนเลขคลื่นประสิทธิผลของคลื่นเรย์ลี และคลื่นเลิฟ ตามลำดับ เมื่อหมุนองศาประกอบ N และ T ของเซนเซอร์ i ในไนทิคตั้งฉากกับทิศของคลื่นเลิฟ จะสามารถเขียนสมการเลขเชิงซ้อนของคลื่นเรย์ลี และคลื่นเลิฟได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Ri \\ Li \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^N e^{-j\theta_N} \\ A_i^T e^{-j\theta_T} \end{bmatrix} e^{-j\omega t} \\ &= \begin{bmatrix} A_N \cos \theta_i & -A_T \sin \theta_i \\ A_N \sin \theta_i & A_T \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\theta_N} \\ e^{-j\theta_T} \end{bmatrix} e^{-j\omega t} \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการ (3) หาเฟสของคลื่นได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวนจินตภาพ และจำนวนจริง ซึ่งแสดงในรูปของฟังก์ชัน $\tan$ ได้ดังนี้

$$\tan \phi_i^L = \frac{Im[A_N \sin \theta_i \sin(\phi_i^N) + A_T \cos \theta_i \sin(\phi_i^T)]}{Re[A_N \sin \theta_i \cos(\phi_i^N) + A_T \cos \theta_i \cos(\phi_i^T)]} = \frac{E}{F} \quad (4)$$

หลังจากได้เฟสของคลื่นเลิฟจากเซนเซอร์ที่ตรวจวัดตามเส้นรอบวงแล้ว ก็จะสามารถใช้วิธีการของ POP ในการคำนวณหาค่า k_L และ r ของคลื่นเลิฟ และคำนวณเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเลิฟได้

2.4 การสร้างค่าทฤษฎีเพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบ (Theoretical Benchmarking)

เพื่อประเมินประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้
ในการศึกษานี้ จึงได้สร้างค่าทางทฤษฎี (Theoretical benchmark) โดย
การสร้างกราฟการกระจายตัวทางทฤษฎีของคลื่นเรย์ลี และคลื่นเลิฟ

(Theoretical dispersion curve) จากข้อมูลโครงสร้างชั้นดินที่ทราบค่าความเร็วคลื่นตามยาว (P-wave velocity) และความเร็วคลื่นเฉือน (S-wave velocity) ของแต่ละชั้น [18] ทั้งนี้ การเปรียบเทียบกราฟการกระจายตัวช่วยประเมินความสอดคล้องของโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่วิเคราะห์ได้กับข้อมูลเชิงทฤษฎี

การสร้างเส้นการกระจายตัวเชิงทฤษฎีนี้ใช้การสร้างแบบจำลองชั้นดินแบบหนึ่งมิติ (1D Forward Modeling) ภายใต้สมมติฐานชั้นดินมีการวางตัวในแนวราบ (Horizontally Layered Medium) โดยอาศัยข้อมูลโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือน ของชั้นดิน เพื่อให้ได้กราฟกระจายตัวสำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากข้อมูลตรวจวัดในสนาม [19]

โดยงานวิจัยนี้ใช้ Disba [20] ซึ่งเป็นไลบรารี Python สำหรับการจำลองการกระจายของคลื่นผิว (Surface Wave Dispersion) โดยนำส่วนหนึ่งของชุดโปรแกรม Computer Programs in Seismology (CPS) มาพัฒนาใหม่ในภาษา Python ในด้านการทำแบบจำลองไปข้างหน้า (Forward Modeling) Disba จะคำนวณเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเรย์ลี โดยใช้วิธี Dunkin's matrix หรือ fast delta matrix algorithms [21] และสามารถคำนวณเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเลิฟด้วยวิธี Thomson-Haskell method [22, 23]

ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลตรวจวัดในสนาม ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกราฟการกระจายตัวของคลื่นเรย์ลี และคลื่นเลิฟที่สร้างขึ้นทางทฤษฎี โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบบาวน์โฮล (Downhole, DH) และครอสโฮล (Crosshole, XH) ในโครงการ InterPACIFIC เพื่อประเมินความสอดคล้องของผลการวิเคราะห์กับค่าทางทฤษฎี

2.5 พื้นที่ศึกษาและข้อมูลทางธรณีวิทยา

ในการศึกษาได้ใช้ข้อมูลตรวจวัดจากพื้นที่ศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ Cadarache และ Grenoble ในประเทศฝรั่งเศส และ Mirandola ในประเทศอิตาลี ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดข้อมูลจากโครงการ InterPACIFIC [24] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของคลื่นผิวดินของชั้นดินที่แตกต่างกันสามแบบ ได้แก่ พื้นที่หินแข็ง (Hard rock site), พื้นที่ดินแข็ง (Stiff soil site) และ พื้นที่ดินอ่อน (Soft soil site) ตามลำดับ



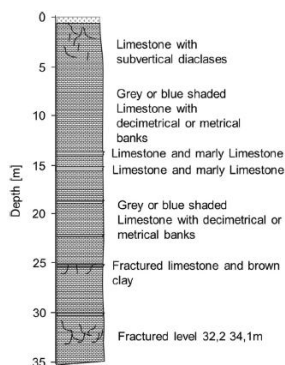


รูปที่ 2 พื้นที่ศึกษาบริเวณ (ก) Cadarache, (ข) Grenoble และ (ค) Mirandola

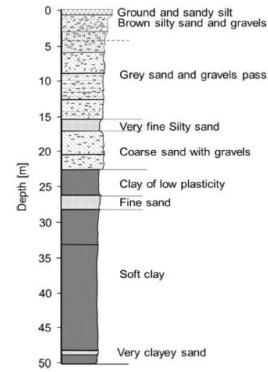
บริเวณ Cadarache เป็นตัวแทนของพื้นที่หินแข็ง ตั้งอยู่บนเนินเขาหิน โฟสในศูนย์วิจัย CEA Cadarache ทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศ ฝรั่งเศส ขึ้นหินในพื้นที่เป็นหินปูนยุคครีเทเชียส ดังรูปที่ 3

บริเวณ Grenoble เป็นตัวแทนของพื้นที่ดินแข็ง ตั้งอยู่ในเมือง Grenoble บริเวณเทือกเขาแอลป์ในประเทศฝรั่งเศส พื้นที่นี้ตั้งอยู่ภายใน แอ่งของตะกอนน้ำพัดที่ทับถมอยู่เหนือชั้นดินเหนียวและมาร์ลจาก ทะเลสาบในยุคควอเตอร์นารี โดยมีชั้นหินฐานเป็นหินยุคมีโซโซอิกซึ่งคาด ว่าอยู่ลึกลงไปหลายร้อยเมตร ดังรูปที่ 4

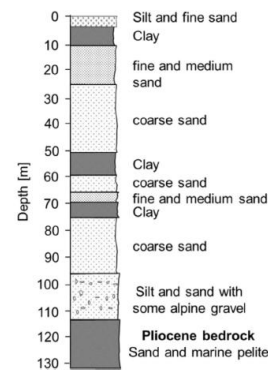
บริเวณ Mirandola เป็นตัวแทนของพื้นที่ดินอ่อน ตั้งอยู่ในเขตชาน เมือง Mirandola แคว้น Emilia-Romagna ประเทศอิตาลี ลักษณะเป็น พื้นที่ราบที่มีตะกอนดินเหนียวจากที่ราบน้ำท่วมถึงสลับกับชั้นทรายซึ่ง สะสมตัวจากการพัดพาของน้ำ ชั้นหินฐานเป็นตะกอนทะเลในช่วงเปลี่ยน ผ่านของยุคโพลสโตซีนตอนล่างถึงตอนกลางซึ่งอยู่ลึกลงไปประมาณ 50 ถึง 150 เมตร ดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 โครงสร้างทางธรณีวิทยาของบริเวณ Cadarache (CAD) [18]



รูปที่ 4 โครงสร้างทางธรณีวิทยาของบริเวณ Grenoble (GRE) [18]



รูปที่ 5 โครงสร้างทางธรณีวิทยาของบริเวณ Mirandola (MIR) [18]

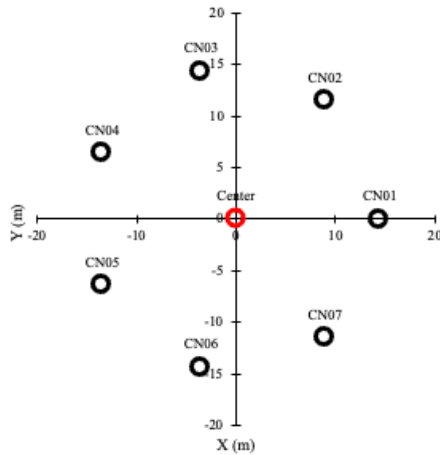
2.6 วิธีการตรวจวัดและการจัดเก็บข้อมูล

ในโครงการ InterPACIFIC ได้ตรวจวัดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติ โดยใช้เครื่องวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิด broadband รุ่น Güralp CMG-6TD (ดังแสดงในรูปที่ 6) ซึ่งตอบสนองต่อความถี่ในช่วง 30 วินาที ถึง 100 เฮิรตซ์ โดยบันทึกข้อมูลที่ความถี่ 200 Hz ซึ่งโครโนเวลาระหว่างเซนเซอร์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยสัญญาณ GPS

ในการตรวจวัดได้มีการจัดเรียงเซนเซอร์หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบวงกลม (circle geometry), สามเหลี่ยม (triangle geometry), ตัว L (L-shape geometry) และอาร์เรย์ ขนาดใหญ่ (large array) แต่ในการศึกษานี้จะใช้เฉพาะข้อมูลจากการจัดเรียงแบบวงกลมเท่านั้น เนื่องจากสามารถใช้เปรียบเทียบ dispersion curve ของคลื่นเรย์ลีและเลิฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6 เครื่องวัดคลื่นไหวสะเทือน Broadband Seismometer



รูปที่ 7 การจัดวางเซ็นเซอร์ในบริเวณศึกษา

การตรวจวัดคลื่นตามธรรมชาติในตำแหน่งต่าง ๆ ดำเนินการโดยใช้เซ็นเซอร์จำนวน 7 ตัวจัดวางเป็นวงกลม และมีเซ็นเซอร์ 1 ตัวที่ตำแหน่งศูนย์กลาง (ดังแสดงในรูปที่ 7) โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี CCA-L กับ POP-HV จะใช้คลื่นที่ได้จากเซ็นเซอร์รอบวงกลมเท่านั้น ขณะที่ SPAC จะใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตรงจุดศูนย์กลางร่วมด้วย

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นผิว

ข้อมูลจากการตรวจวัดถูกนำไปใช้ในการสร้างกราฟการกระจายตัวของคลื่นเรย์ลี และเลิฟ (Rayleigh and Love dispersion curves) โดยกราฟการกระจายตัวของคลื่นเรย์ลีจะสร้างด้วยวิธี SPAC, CCA และ POP ส่วนกราฟการกระจายตัวของคลื่นเลิฟจะสร้างด้วยวิธี SPAC-L, CCA-L และ POP-HV ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้คลื่นจากทั้งแนวดิ่งและแนวราบร่วมกันในการสร้างกราฟการกระจายตัว

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบดาวน์โฮลและครอสโฮลบริเวณ Cadarache

Thickness (m)	P-Wave Velocity (m/s)	S-Wave Velocity (m/s)
2	1413	505
2	3298	1179
3	3769	1347
3	4711	1684
6	6124	2189
16	6595	2358
Half-space	7537	2695

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบดาวน์โฮลและครอสโฮลบริเวณ Grenoble

Thickness (m)	P-Wave Velocity (m/s)	S-Wave Velocity (m/s)
2	856	306
10	1047	374
6	1142	408
6	1332	476
12	761	272
Half-space	951	340

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบดาวน์โฮลและครอสโฮลบริเวณ Mirandola

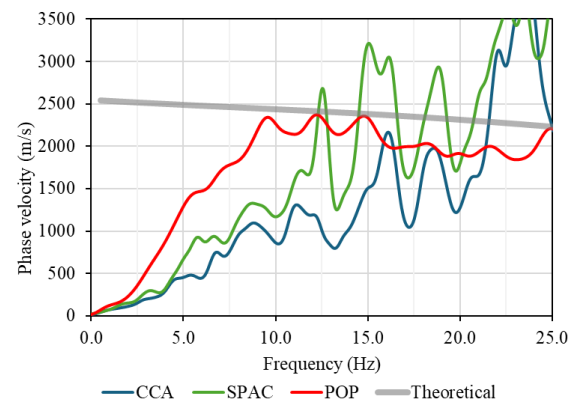
Thickness (m)	P-Wave Velocity (m/s)	S-Wave Velocity (m/s)
7	448	160
17	597	213
31	858	307
9	1044	373
11	839	300
16	1119	400
22	1305	467
Half-space	2014	720

ผลการวิเคราะห์แต่ละวิธีถูกนำมาเปรียบเทียบกับกราฟการกระจายตัวของคลื่นเรย์ลี และเลิฟทางทฤษฎี (Theoretical dispersion curve) โดยกราฟการกระจายตัวของคลื่นนี้ถูกสร้างจากแบบจำลองชั้นดินแบบหนึ่งมิติ (1D Forward Modeling) โดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบดาวน์โฮล (DH) และครอสโฮล (XH) ที่ดำเนินการโดยผู้วิจัยในโครงการ InterPACIFIC ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 3

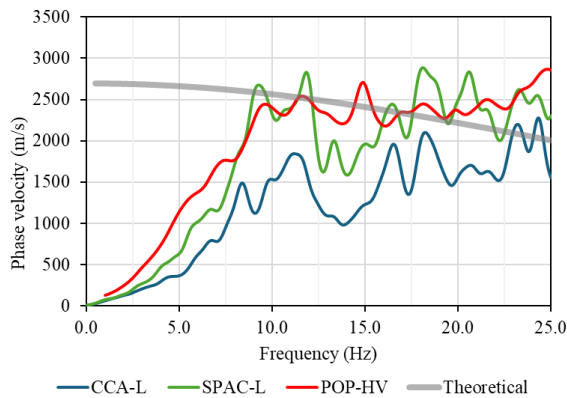
3. ผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ บริเวณ Cadarache

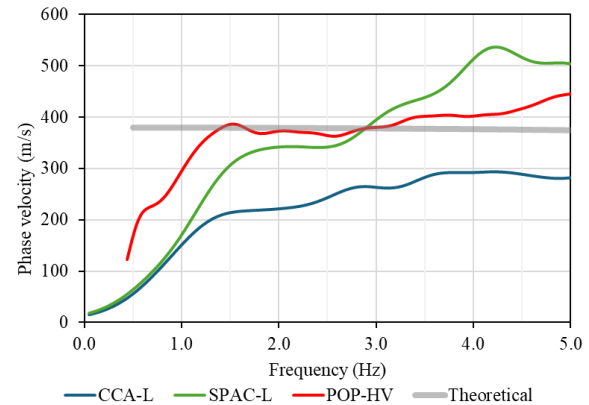
จากผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเรย์ลี และคลื่นเลิฟบริเวณ Cadarache ในรูปที่ 8 และ 9 พบว่า เส้นโค้งที่ได้จากแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในบางช่วงความถี่ โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูง ในพื้นที่หินแข็งที่มีความเร็วคลื่นเฉือนสูงและโครงสร้างค่อนข้างสม่ำเสมอ วิธี POP-HV แสดงศักยภาพในการจำลองเส้นโค้งการกระจายได้แม่นยำที่สุด โดยเฉพาะเส้นโค้งของคลื่นเลิฟซึ่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเฉือนอย่างชัดเจน ขณะที่วิธี SPAC และ CCA ให้ผลที่คลาดเคลื่อนไปจากกราฟทฤษฎีในบางช่วงความถี่ โดยเฉพาะวิธี CCA ที่แสดงความเร็วเฟสต่ำกว่าเส้นโค้งทางทฤษฎีอย่างชัดเจน แสดงถึงข้อจำกัดในการใช้คลื่นแนวดิ่งเพียงอย่างเดียวในสภาพหินแข็งที่มีความคมชัดของคลื่นสูง



รูปที่ 8 เส้นโค้งการกระจายของคลื่นเรย์ลีบริเวณ Cadarache



รูปที่ 9 เส้นโค้งการกระจายของคลื่นเลิฟบริเวณ Cadarache

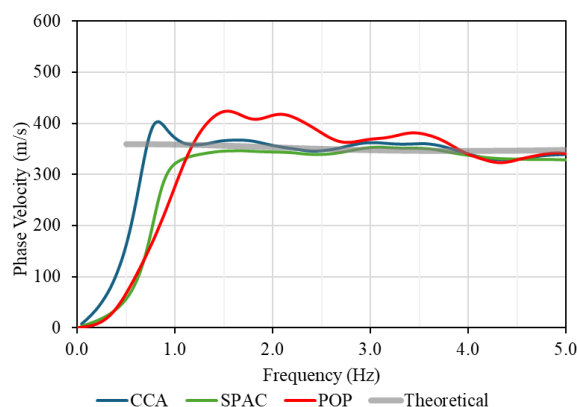


รูปที่ 11 เส้นโค้งการกระจายของคลื่นเลิฟบริเวณ Grenoble

3.2 ผลการวิเคราะห์ บริเวณ Grenoble

บริเวณ Grenoble มีลักษณะชั้นดินเป็นตะกอนพัดพาที่มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงตามชั้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีชั้นดินเหนียวอ่อนแทรกช่วงความลึกประมาณ 40 เมตร จากรูปที่ 10 และ 11 เส้นโค้งการกระจายจากแต่ละวิธีแสดงแนวโน้มใกล้เคียงกันในภาพรวม แต่เมื่อลงรายละเอียดพบว่า วิธี POP-HV สามารถจับความเปลี่ยนแปลงเล็กๆ ของเฟสคลื่นในช่วงความถี่กลางถึงสูงได้ดีกว่า โดยเฉพาะเส้นโค้งของคลื่นเลิฟที่แสดงแนวโน้มใกล้เคียงกับเส้นโค้งทฤษฎีมากกว่าวิธี SPAC-L และ CCA-L ในบางช่วง วิธี CCA-L แม้จะให้ผลใกล้เคียงในช่วงกลางของกราฟ แต่มีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้ขอบเขตช่วงความถี่ต่ำและสูง แสดงถึงความไวต่อการจัดวางเซนเซอร์ ขณะที่วิธี SPAC มีแนวโน้มคาดเคลื่อนในพื้นที่ที่ชั้นดินเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉือนอย่างชัดเจน

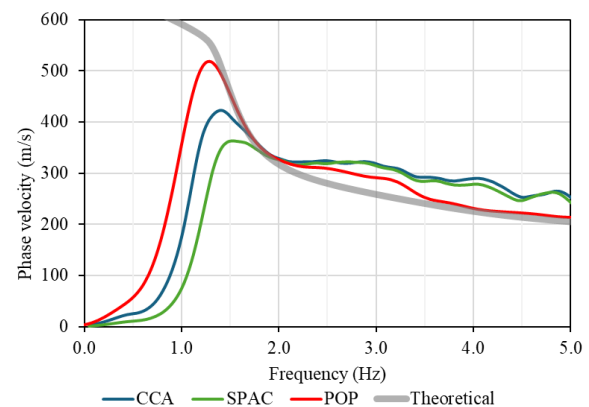
จากผลการวิเคราะห์บริเวณ Grenoble พบว่าการใช้ข้อมูลแนวราบร่วมกับแนวดิ่งจึงช่วยเพิ่มความแม่นยำ และลดความไม่แน่นอนของการวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ



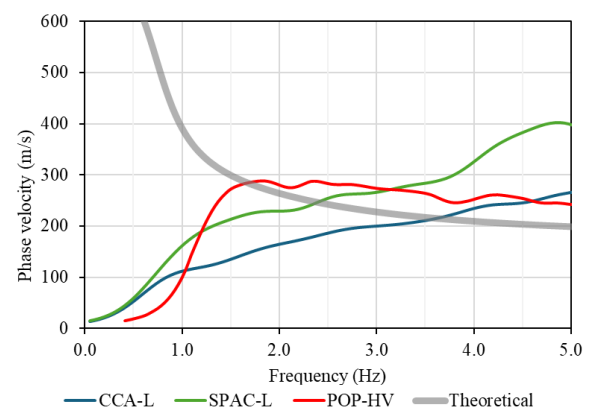
รูปที่ 10 เส้นโค้งการกระจายของคลื่นเรย์ลีบริเวณ Grenoble

3.3 ผลการวิเคราะห์ บริเวณ Mirandola

พื้นที่ดินอ่อนอย่าง Mirandola มีลักษณะของชั้นดินที่แปรผันสูง แสดงดังรูปที่ 12 และ 13 เส้นโค้งการกระจายจากแต่ละวิธีจึงแสดงผลต่างกันอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำที่ความไม่ต่อเนื่องของชั้นดินส่งผลกระทบมากที่สุด



รูปที่ 12 เส้นโค้งการกระจายของคลื่นเรย์ลีบริเวณ Mirandola



รูปที่ 13 เส้นโค้งการกระจายของคลื่นเลิฟบริเวณ Mirandola

ในส่วนของเส้นโค้งการกระจายของคลื่นเรย์ลีทั้งสามวิธีแสดงแนวโน้มของเส้นโค้งได้ใกล้เคียงกับเส้นโค้งทางทฤษฎี โดยเฉพาะวิธี POP ที่มีความใกล้เคียงตั้งแต่ความถี่ต่ำถึงสูง ในส่วนของการกระจายของคลื่นเลิฟวิธี POP-HV แสดงแนวโน้มของได้ใกล้เคียงเส้นโค้งทฤษฎีมากที่สุด ซึ่งสามารถสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงภายในชั้นดินได้ละเอียดกว่า วิธี POP-HV จึงแสดงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในด้านการจําแนกละเอียดของชั้นดินต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

4. บทสรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนจากกราฟการกระจายตัวโดยใช้คลื่นเรย์ลีและเลิฟ ซึ่งได้มาจากการตรวจวัดคลื่นในแนวดิ่งและแนวราบ การใช้ข้อมูลร่วมกันนี้มีความสำคัญในวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรมของชั้นดินอย่างครบถ้วน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความซับซ้อนทางธรณีวิทยา

จากผลการวิเคราะห์ในบริเวณ Cadarache, Grenoble และ Mirandola พบว่า วิธี POP ซึ่งใช้การวิเคราะห์ทั้งคลื่นแนวดิ่ง (Rayleigh waves) และแนวราบ (Love waves) ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีมากกว่าวิธี SPAC และ CCA-L ที่ใช้เฉพาะคลื่นแนวดิ่งหรือแนวราบเพียงองค์ประกอบเดียว โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความหนาของชั้นดินมากหรือมีการเปลี่ยนแปลงของ V_s อย่างชัดเจน POP สามารถแสดงลักษณะการกระจายคลื่นได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ แม้ในช่วงความถี่ต่ำ

ผลจากการเปรียบเทียบ dispersion curve ของแต่ละวิธีชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์ร่วมกันของคลื่นจากทั้งสององค์ประกอบมีศักยภาพสูงในการเพิ่มความแม่นยำของการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยเฉพาะในช่วงความถี่ที่ใช้เพียงแนวเดียวอาจแสดงผลคลาดเคลื่อนหรือขาดความต่อเนื่อง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอว่า การใช้ข้อมูลคลื่นทั้งในแนวดิ่งและแนวราบร่วมกันในการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการสำรวจชั้นดินที่มีความซับซ้อนหรือมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างอย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nazarian, S. and Stokoe, K.H. II. (1983). Evaluation of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method. *Transportation Research Record*, 930, pp. 38–45.
- [2] Stokoe, K.H. II, Rix, G.J. and Nazarian, S. (1994). In situ seismic testing with surface waves. *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, New Delhi, India, 5–10 January 1994, pp. 331–334.
- [3] Foti, S. (2004). Surface Wave Testing for Geotechnical Characterization. In Butcher, A.P., Powell, J.J.M., & Hight, D.W. (Eds.), *Proceedings of the 2nd International*

- Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC-2)*, Millpress, Rotterdam, pp. 133–145.
- [4] ถิรวัฒน์ (2561). การวิเคราะห์ชั้นดินโดยการวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายโหมดแบบย้อนกลับ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, pp. 415–457.
- [6] Bettig, B., Bard, P.-Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Hatzfeld, D. and Theodulidis, N. (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): Application to the Grenoble area. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42(3–4), pp. 281–304.
- [7] Bard, P.-Y. (1998). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Yokohama, Japan, 25–27 March 1998, Vol. 1, pp. 1251–1279.
- [8] Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y. (2006). A new method for estimating phase velocities of Rayleigh waves using microtremor array analysis. *Geophysical Prospecting*, 54(3), pp. 323–333.
- [9] Hobiger, M., Bard, P.-Y. and Cornou, C. (2009). Improving the SPAC method for microtremor array measurements by using a circular array. *Geophysical Journal International*, 177(2), pp. 797–812.
- [10] Asten, M.W. and Boore, D.M. (2005). Blind comparisons of shear-wave velocities at closely spaced sites in San Jose, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), pp. 518–539.
- [11] Okada, H. (2003). *The microtremor survey method*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 27–50
- [12] Li, J., Hanafy, S., Liu, Z. and Schuster, G.T. (2019). Wave equation dispersion inversion of Love waves. *Geophysics*, 84(3), pp. EN49–EN64.
- [13] Hamimu, L., Nawawi, M. and Safani, J. (2010). Joint inversion of multimode Love wave dispersion curves for accurately appraising of shear wave velocity reversal profile. *AIP Conference Proceedings*, 1250, pp. 245–248.
- [14] Safani, J., O'Neill, A., Matsuoka, T. and Sanada, Y. (2005). Applications of Love wave dispersion for improved shear-

- wave velocity imaging. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10(2), pp. 135–146.
- [15] Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Liu, Q. and Xu, S. (2007). Joint inversion of high-frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics*, 62(4), pp. 375–384.
- [16] Hamimu, L., Safani, J., & Nawawi, M. (2011). Improving the accurate assessment of a shear-wave velocity reversal profile using joint inversion of the effective Rayleigh wave and multimode Love wave dispersion curves. *Near Surface Geophysics*, 9, pp. 1–14.
- [17] Wittkamp, F. and Bohlen, T. (2016). Individual and joint 2-D elastic full-waveform inversion of Rayleigh and Love waves. *WIT Transactions on Geophysical Prospecting and Imaging*, 20, pp. 1–23.
- [18] Garofalo, F. et al. (2016). InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, pp. 241–254.
- [19] Aki, K. and Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology* (2nd ed.). Sausalito, CA: University Science Books, pp. 644–670.
- [20] Luu, K. (2024). *disba: Numba-accelerated computation of surface wave dispersion* (Version 0.7.0). Zenodo. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14534395>.
- [21] Dunkin, J.W. (1965). Computation of modal solutions in layered, elastic media at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 55(2), pp. 335–358.
- [22] Thomson, W.T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), pp. 89–93.
- [23] Haskell, N.A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43(1), pp. 17–34.
- [24] Hollender, F., Cornou, C., Dechamp, A., Bailly, T., Bard, P.-Y., Caillot, V., Dussouillez, P., Garofalo, F., Guyonnet-Benaize, C., Maufroy, E., & Sicilia, D. (n.d.). InterPACIFIC project: Presentation of the Ambient Vibration Array (Passive) Measurement Data Sets. Internal report, pp. 2–22.