

การพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบคลื่นไหวสะเทือนด้วยวิธี Microtremor

Seismic wave testing instrument development by Microtremor method

กฤษฎี โสวิรัตน์¹ คณะสมน อภิการสกุลชัย² ฐิติพงศ์ ลิวิจักษณ์³ และ จีรวัตร์ บุญญะฐิติ⁴

^{1,2,3} นิสิตปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่จะนำมาใช้สำหรับการทดสอบชั้นดินด้วยวิธี Microtremor ซึ่งเป็นกรนำเทคโนโลยีผสมผสานเข้ากับความรู้และเทคนิคทางวิศวกรรมปฐพี เพื่อนำไปทดสอบชั้นดินและเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน (Seismic wave) แล้วนำไปวิเคราะห์และแปลงผลออกมาเป็นรูปภาคตัดคลื่นเหมือนตามความลึก (V_s Profile) และพิสูจน์ความสามารถของวิธี Microtremor ในการทดสอบและหาขีดความสามารถของวิธี Microtremor จากความลึกที่สามารถทดสอบได้ โดยทำการทดสอบพื้นที่บริเวณสนามหญ้าข้างอาคารมหาจุฬาลงกรณ์ ฝั่งคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไซต์งานที่บางขุนเทียน และไซต์งานที่บางบอน จากผลการวิจัยพบว่า จากการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กราฟภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนและความลึกที่ทดสอบด้วยวิธี Microtremor และกราฟภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนและความลึกที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน Boring Log ด้วยการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ R-Squared ผลที่ได้จากไซต์ CU ที่รัศมี 4, 8 และ 14 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.2015, 0.2393 และ 0.1541 ตามลำดับ และ BKT-3, BKT-4, BB-1 และ BB-2 ที่รัศมี 14 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.7981, 0.5365, 0.4822 และ 0.5039 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธี Microtremor สามารถนำไปใช้ในการสำรวจและเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนเพื่อนำมาสังเคราะห์ชั้นดินได้อย่างค่อนข้างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คลื่นไหวสะเทือน, ความเร็วคลื่นเฉือน, Microtremor, Geophone

Abstract

This research was processed to learn and develop the testing instruments using the Microtremor which apply the geotechnical knowledge with computer programming technologies for testing and collecting seismic wave data from underground. After collecting the waveform, these data will be analyzed and changed into V_s profile to prove the accuracy and to search for the limitations of this method. The testing areas are at Chulalongkorn University and sites in the Bangkok area. The results of this study comparing the R-square of V_s profile from the testing method to

the boring log method reveal that estimated shear wave velocity (V_s) profiles agree well with those derived from the Standard Penetration Test (SPT) of nearby soil boring report. The outcomes show that this method can be used for analyzing ground profiles effectively.

Keywords: Seismic wave, Shear wave velocity, Microtremor, Geophone

1. คำนำ

ปัจจุบันการพัฒนาด้านโปรแกรมซอฟต์แวร์ในประเทศพัฒนาอย่างรวดเร็ว การตรวจสอบงานดินจึงเป็นประเภทหนึ่งที่ต้องถูกปรับเปลี่ยนกลยุทธ์เพื่อลดต้นทุนและสร้างรายได้เปรียบในด้านการแข่งขัน อีกปัจจัยหนึ่งทางด้านวิศวกรรม คือ การขยายตัวของชุมชนเมืองทำให้เกิดความต้องการพัฒนาระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานรวมถึงสิ่งปลูกสร้างเพื่อการอยู่อาศัย สิ่งสำคัญที่โครงสร้างเหล่านี้จำเป็นต้องพิจารณา คือ ความปลอดภัยภายใต้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม ชั้นดินในสภาพธรรมชาติมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมกันอย่างแพร่หลายคือ การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) โดยมีอุปกรณ์ในการใช้ทดสอบคือ สามขา เครื่องกวน ปืนน้ำ และถังตกตะกอน จะเห็นว่า อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการทดสอบมีจำนวนมากส่งผลให้ใช้เวลาดำเนินการนานและไม่สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อเข้าทดสอบในพื้นที่ที่คับแคบหรือพื้นที่ปากรทาบได้โดยสะดวก และวิธีการทดสอบนี้อาจส่งผลกระทบต่อตัวอย่างดิน เนื่องจากชั้นดินที่ได้ออกมานั้นถูกรบกวน ทำให้สภาพตัวอย่างดินที่ได้มาไม่คงสภาพที่แท้จริง ซึ่งส่งผลให้กำลังและคุณสมบัติของดินแตกต่างกันออกไป การเจาะดินเพื่อเก็บตัวอย่างดินมาวิจัยและทดสอบต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง โดยที่จะต้องให้เกิดความกระเทือนต่อดินที่จะนำมาทดสอบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะหาดินมีความไวตัวมาก การรบกวนอาจทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงได้ ค่าที่วิจัย หรือ ทดลองได้ก็จะผิดไปจากความเป็นจริง และระยะเวลาที่จะได้ผลการทดสอบใช้เวลาหลังจากเก็บตัวอย่างดินแล้วอย่างน้อยหนึ่งวัน ถึงจะสามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ผล

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถสำรวจชั้นดินทางอ้อมได้สะดวกและรวดเร็วกว่า คือ การศึกษาชั้นดินโดยการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) เนื่องจากคลื่นผิวดินในธรรมชาติของชั้นดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ความเร็วเฟสของคลื่นผิวดินจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ที่เรียกว่า เส้นโค้งการกระจาย (Dispersion Curve) และเส้นโค้งการกระจายนี้เป็นฟังก์ชันของความเร็วคลื่นเฉือน ความหนาชั้นดิน ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นอัด (P-wave velocity) โดยพารามิเตอร์ทั้งสี่เรียงตามลำดับการมีอิทธิพลต่อเส้นโค้งการกระจายของพื้นผิว ซึ่งนอกจากการใช้ความเร็วคลื่นเฉือนในการสำรวจชั้นดินเพื่อประเมินสภาพชั้นดินทั่วไปแล้ว ความเร็วคลื่นเฉือนในช่วง 30 เมตรแรก ยังสามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการขยายแรงสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวได้ และเป็นข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบอาคารสูงเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยทั่วไปดินที่มีความเร็วเฉือนต่ำมักมีคุณสมบัติการขยายแรงสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวมากกว่าดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนสูง

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่จะนำมาใช้สำหรับการทดสอบชั้นดินด้วยวิธี Microtremor ซึ่งเป็นการนำเทคโนโลยีผสมผสานเข้ากับความรู้และเทคนิคทางวิศวกรรมปฐพี เพื่อทดสอบชั้นดินและเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน (Seismic wave) แล้วสามารถนำผลการทดสอบการสำรวจชั้นดินมาสังเคราะห์ วิเคราะห์ และแปลผลผลลัพธ์ให้เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพในการดำเนินงานมากที่สุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลื่นพื้นผิว (Surface Wave)

เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่อยู่บนผิวดิน หรือที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลาง [1] ได้แก่

1. คลื่นเรย์ลี (Rayleigh Wave) เป็นคลื่นที่เดินทางบนผิวหน้าของตัวกลาง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้อนุภาคของตัวกลางหมุนวนเป็นวงรีบนระนาบในแนวตั้ง โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นจะมีค่ามากที่สุดที่ผิว และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก อีกทั้งความเร็วเฟสของคลื่นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ เรียกว่า การกระจายความเร็วเฟส (Dispersion) ซึ่งลักษณะการกระจายความเร็วเฟสของคลื่นผิวดินนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นทุติยภูมิ
2. คลื่นเลิฟ (Love Wave) เป็นคลื่นที่เดินทางอยู่บนผิวดิน เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นอยู่บนระนาบในแนวราบ โดยทิศทางของการสั่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คล้ายกับการสั่นของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากคลื่นทุติยภูมิ แต่แอมพลิจูดของการสั่นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก ความเร็วเฟสของคลื่นมีการกระจายความเร็วตามความถี่ เช่นเดียวกับคลื่นเรย์ลี และมีความเร็วเท่ากับคลื่นเฉือนที่วิ่งในแนวราบ (SH-component)

2.2 Microtremor

วิธีการ Microtremor เป็นวิธีที่วิเคราะห์คลื่นผิวที่เฟสของคลื่นโดยตรง เฟสของคลื่นสามารถคำนวณได้จากการแปลงฟูเรียร์ข้อมูลสัญญาณคลื่นผิวที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับอาร์เรย์แบบวงกลมที่มีเซนเซอร์อย่างน้อย 3 ตัว ติดตั้งอยู่บนเส้นรอบวงโดยระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากันและรัศมีของอาร์เรย์สามารถพิจารณาได้เป็นตัวขยายจำนวนลูกคลื่น (k) ดังนั้นรูปแบบอาร์เรย์ที่ง่ายที่สุดประกอบด้วยเซนเซอร์ 3 ตัว ที่มีระยะห่างระหว่างเซนเซอร์เป็นมุม 120 องศา

$$\rho(r, f) = J_0\left(\frac{2\pi r}{c(f)}\right) \quad (1)$$

โดยที่ $c(f) = 2\pi f r / x_i$

เมื่อ $\rho(r, f)$ คือ ความหนาแน่นของคลื่น

$c(f)$ คือ เฟสของคลื่นที่ความถี่นั้น ๆ

r คือ รัศมีของอาร์เรย์

f คือ ความถี่คลื่น

2.2.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิธี Microtremor

ขั้นตอนการดำเนินการเบื้องต้นในการสร้างเส้นโค้งการกระจายจากการทดสอบ (Experimental Dispersion Curve, EDC) มีดังต่อไปนี้

1. ใช้ฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Hann แบ่งชุดข้อมูล
2. โดยแต่ละชุดจะมีวิธีการดำเนินการในแต่ละชุดข้อมูลดังนี้
 - a) แปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เพื่อคำนวณเฟสสเปกตรัม
 - b) ใช้ Unwrapping Algorithms ในการปรับค่าเฟสของสมาชิกในอาร์เรย์
 - c) ในแต่ละความถี่คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบเอนเอียง (Bias Standard Deviation) ของสมาชิกในอาร์เรย์
3. คำนวณจำนวนลูกคลื่นสเปกตรัมโดยนำค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากทุกชุดข้อมูลหารด้วยรัศมีของอาร์เรย์และคูณด้วยรากที่สองของสอง หากพิจารณาอิทธิพลจากสัญญาณรบกวนให้เลือกใช้สมการ (1) แทน
4. คำนวณความเร็วเฟสสเปกตรัม จากสมการด้านล่าง

$$c = \omega / k \quad (2)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วเฟสสเปกตรัม

ω คือ ความถี่สเปกตรัม

k คือ จำนวนลูกคลื่นสเปกตรัม

3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. อุปกรณ์สำรวจคลื่นไหวสะเทือน 1 ชุด ประกอบด้วย

- 1.1 อุปกรณ์บันทึกและเก็บข้อมูลสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน 3 ช่องสัญญาณ โดยใช้บอร์ด ADS 1256 ชนิด 24 bit เพื่อใช้เปลี่ยนสัญญาณคลื่นไฟฟ้าประเภทอนาล็อก (Analog) เป็นดิจิตอล (Digital) และใช้บอร์ด Raspberry Pi 3B+ เพื่อทำการเก็บบันทึกข้อมูล
 - 1.2 Signal cable ใช้สำหรับเชื่อมต่อตัวรับสัญญาณ (Geophone) กับอุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน เพื่อส่งข้อมูลจาก Geophone ไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน
 - 1.3 Geophone ขนาด 2 เฮิร์ตซ์ จำนวน 3 ตัว ใช้สำหรับรับสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน
 - 1.4 อุปกรณ์ปล่อยสัญญาณไวไฟ TP-link เพื่อให้อุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรม
 - 1.5 อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า หรือ Power Bank เพื่อจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน และตัวปล่อยสัญญาณไวไฟ TP-link
2. โปรแกรม Microtremor ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
 3. ไมโครแทรกเตอร์วงกลม ใช้สำหรับวัดมุมขนาด 120 องศา ระหว่าง Geophone แต่ละตัว
 4. ตลับเมตร สำหรับวัดระยะทาง
 5. แท็บเล็ต (Tablet) ใช้สำหรับแสดงหน้าจอของโปรแกรม Microtremor เพื่อที่จะสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผ่านทางหน้าจอ แสดงผลการทดสอบความเร็วคลื่น และแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฟสกับความถี่คลื่น (Dispersion Curve) ของผลการทดสอบชุดนั้น ๆ
 6. โปรแกรม Dinver เพื่อใช้ในการจำลองชั้นดินจาก Dispersion Curve ของผลการทดสอบที่ได้ทำการเก็บบันทึกข้อมูลมา

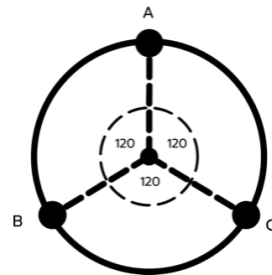
3.2 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

การทำการทดสอบจะใช้วิธี Microtremor เพื่อเก็บข้อมูลผลการทดสอบ โดยรูปแบบการวางตัวรับสัญญาณ (Geophone) เป็นแบบวงกลม ซึ่งแต่ละตัวทำมุมห่างกัน 120 องศา ดังรูปที่ 1 และมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนและอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณไวไฟกับอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า แล้วทำการเชื่อมต่อระบบเข้ากับ Tablet ผ่านโปรแกรม VNC Viewer และ Fing
2. กำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมของพื้นที่ที่จะทำการทดสอบ แล้วทำการวัดระยะทางของ Geophone จากจุดศูนย์กลางของวงกลมและมุมระหว่าง Geophone โดยทำมุม

กัน 120 องศา แล้วปัก Geophone ให้ได้ตั้งและติดแน่นกับพื้นดิน

3. เชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนเข้ากับ Geophone โดยปลายด้านหนึ่งทำการหนีบ Signal cable เข้ากับขั้วของ Geophone ทั้ง 3 ตัว และปลายอีกด้านหนึ่งทำการเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน
4. เปิดโปรแกรม Microtremor ผ่านทางหน้าจอ Tablet แล้วทำการตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลดังนี้
 - 4.1 ชื่อการทดสอบ
 - 4.2 จำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บในชุดข้อมูลนั้น ๆ
 - 4.3 ความเร็วในการเก็บข้อมูล (Sampling Rate)
 - 4.4 ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของวงกลมถึง Geophone หรือ รัศมี
5. กด Set และ Collect Signal เพื่อเริ่มทำการทดสอบ
6. ทำการเก็บข้อมูลชุดถัดไปโดยเปลี่ยนระยะรัศมีที่วาง Geophone ไปเรื่อย ๆ เพื่อให้ได้ผลข้อมูลแม่นยำในระดับความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 1 รูปแบบการวางตำแหน่งของ Geophone ทั้ง 3 ตัว

3.3 ขั้นตอนและวิธีการประมวลผล

3.3.1 การประมวลผลข้อมูลของบอร์ด ADS 1256 และบอร์ด Raspberry 3B+ [2]

1. ตั้งค่าตัวแปร โดยประกอบไปด้วย โพลเดอร์เก็บไฟล์ ชื่อไฟล์ จำนวนข้อมูล รัศมี ความถี่ และวันเดือนปีที่บันทึกข้อมูล ซึ่งข้อมูลทั้งหมดนี้จะถูกนำไปใช้ในการตั้งชื่อไฟล์
2. ทำการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจากตัวรับสัญญาณ Geophone
3. ทำการเก็บข้อมูลเป็น loop โดยโปรแกรมจะเก็บข้อมูลไปเรื่อย ๆ จนกว่าข้อมูลจะครบตามที่ได้ตั้งค่าไว้
4. เปลี่ยนสัญญาณคลื่นไฟฟ้าประเภทอนาล็อก (Analog) เป็นดิจิตอล (Digital)
5. เนื่องจากข้อมูลที่เก็บนั้นจะมีความถี่ในการเก็บระหว่างข้อมูลที่ไมเท่ากัน เราจึงต้องเลือกข้อมูลขึ้นมา ให้มีความถี่ระหว่างข้อมูลตามที่ได้ตั้งค่าไว้
6. ทำการเก็บข้อมูลที่ได้อไว้ในรูปของไฟล์ .csv

7. ใช้วิธี Microtremor ในการเปลี่ยนข้อมูลจากค่าแรงดันไฟฟ้ากับเวลา เป็น ความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) กับความถี่ ซึ่งจะได้ Dispersion curve ของพื้นที่ทำการเก็บข้อมูล
8. ทำการเก็บข้อมูลที่ได้ในรูปของไฟล์ .txt เพื่อใช้แปลผลข้อมูลต่อโปรแกรม Dinver

3.3.2 การประมวลผลข้อมูลของโปรแกรม Dinver

ในปัจจุบันนั้นยังไม่มีวิธีการหาชั้นดินจาก Dispersion curve แต่ในทางกลับกัน เราสามารถหา Dispersion curve จากข้อมูลชั้นดินได้ ดังนั้นเราจึงสุ่มค่าตัวแปรต่าง ๆ ในชั้นดิน เพื่อนำไปหา Dispersion curve แล้วจึงเทียบ Dispersion curve ที่ได้จากการสุ่มกับ Dispersion curve ที่ได้จากการทดสอบ โดยวิธีที่จะหา Dispersion curve จากการสุ่มตัวแปรนั้น ได้เลือกใช้โปรแกรม Dinver ซึ่งมีขั้นตอนการใช้โปรแกรมดังนี้

1. ทำการนำเข้าไฟล์ .txt ที่ได้จากโปรแกรม Microtremor
2. ตั้งค่าช่วงของตัวแปร โดยประกอบความเร็วคลื่นเฉือน Poisson's ratio ความหนาแน่นดิน และความเร็วคลื่นอัด
3. ตัวโปรแกรมจะคำนวณ Dispersion curve จากช่วงตัวแปรที่ได้ตั้งค่าไว้
4. ตัวโปรแกรมจะคำนวณค่า Misfit ระหว่าง Dispersion curve จากช่วงตัวแปรที่ได้ตั้งค่าไว้ กับ Dispersion curve ที่ได้ใส่ไฟล์เข้าไปในขั้นตอนแรก ว่ามีความใกล้เคียงกันมากแค่ไหน ซึ่งหากค่า Misfit มีค่ามาก แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อนมาก โดยโปรแกรมจะทำงานไปเรื่อยๆ จนครบทุกกรณี
5. ตัวโปรแกรมจะเลือกแสดงค่า V_s ของดิน จากกรณีที่มีค่า Misfit ที่เลือกไว้



รูปที่ 2 วิธีการทดสอบการหาชั้นดินด้วยวิธี Microtremor

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ผล

4.1.1 ตรวจสอบความถูกต้องของ V_s profile และชั้นดิน

นำ Ground Profile ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน และความลึกชั้นดินที่ได้จากการนำข้อมูล Dispersion Curve จากการทดสอบมาจำลองเปรียบเทียบกับผลเจาะสำรวจชั้นดินที่ได้ทำการแปลงค่า N-Value มาเป็นความเร็วเฉือนหรือ V_s โดยใช้สมการ Empirical สำหรับดินทุกชนิดของ Imai และ Tonouchi (1982) [3] ดังนี้

$$V_s = 318N^{0.314} \quad (3)$$

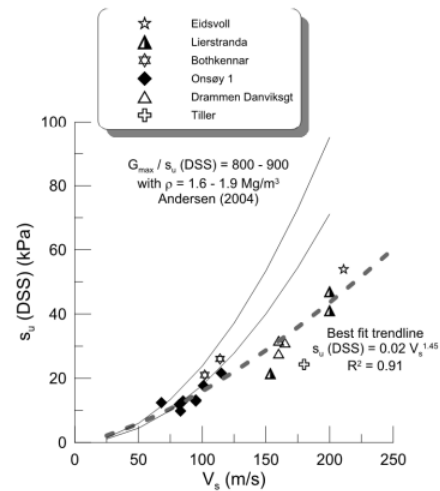
เมื่อ V_s คือ ความเร็วคลื่นเฉือน (ฟุตต่อวินาที)

และในชั้นดินอ่อนที่ไม่สามารถทำการเจาะสำรวจหาค่า N-Value ให้ใช้การแปลงค่า Undrained shear strength มาเป็นความเร็วเฉือนหรือ V_s โดยใช้สมการของ NGI (2015) and L'Heureux and Long [4] ดังนี้

$$V_s = 14.57Su^{0.69} \quad (4)$$

เมื่อ S_u คือ Undrained shear strength (kPa)

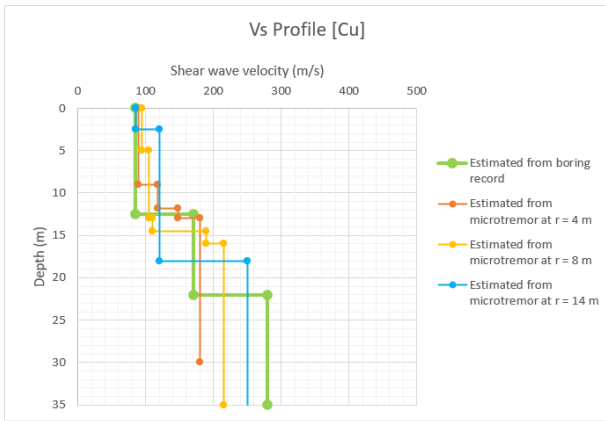
V_s คือ ความเร็วคลื่นเฉือน (เมตรต่อวินาที)



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ S_u (NGI (2015) and L'Heureux and Long)

4.1.2 ผลการทดสอบชั้นดิน

การทดสอบได้ทำการใช้ตัวรับสัญญาณ (Geophone) ขนาด 2 เฮิรตซ์ และทำการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนที่ระยะรัศมีที่ต่างกัน เพื่อให้เก็บผลการทดสอบได้ที่มีความลึกหลายระดับและมีความละเอียดแม่นยำ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางต่อไปนี้

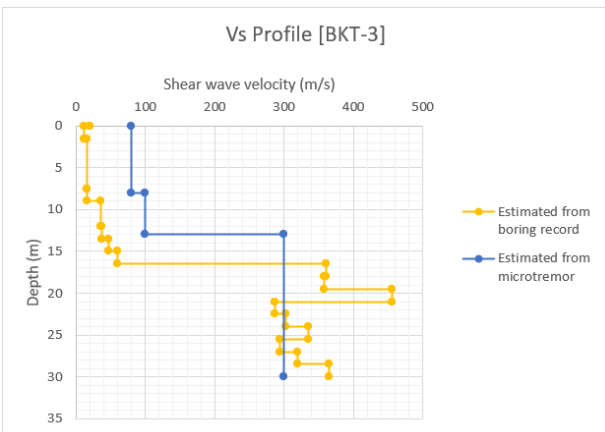


รูปที่ 4 ผลการทดสอบพื้นที่บริเวณสนามหญ้าข้างอาคารมหาจุฬาลงกรณ์ ผังคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

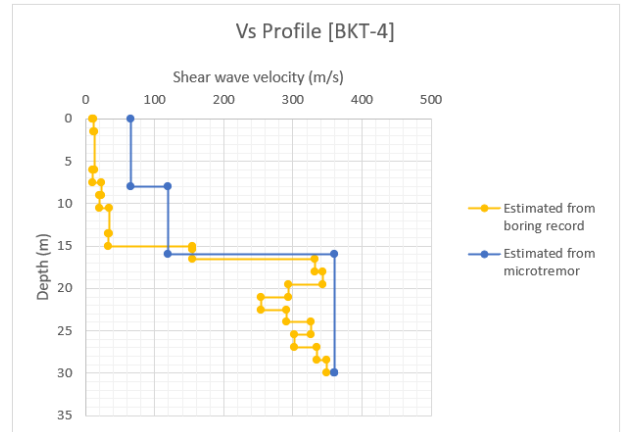
จากผลการทดสอบพื้นที่บริเวณสนามหญ้าข้างอาคารมหาจุฬาลงกรณ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าได้ค่าภาพตัดความเร็วเฉือนในชั้นดินค่อนข้างตรงกับผลเจาะสำรวจชั้นดิน ด้วยการใช้ค่าทางสถิติ R-Squared ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

Sites	Radius of testing (m)	R ²
CU	4, 8, 14	0.2015, 0.2393, 0.1541

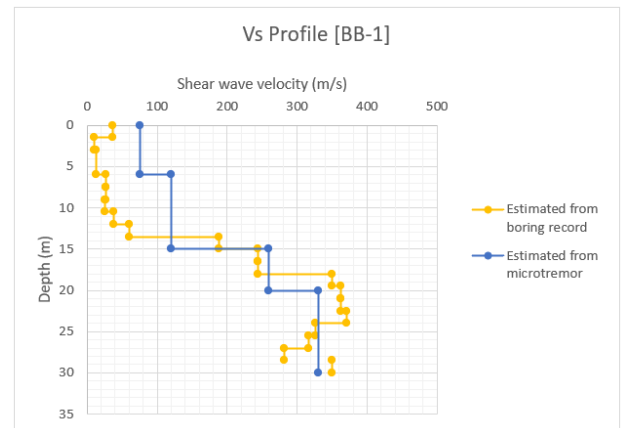
จากราฟผลทดสอบมีข้อสังเกตที่ขึ้นไปตามตามทฤษฎีคือ รัศมีที่มากขึ้นจะทำให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำในช่วงความลึกที่มากขึ้นเช่นกัน เช่นที่ความลึก 0 - 13 เมตร จากผิวดิน การใช้รัศมีทดสอบ 4 เมตร จะได้ผลที่แม่นยำมากกว่าการใช้รัศมีทดสอบ 8, 14 เมตร และ ที่ระดับความลึก 25 เมตรเป็นต้นไป การใช้รัศมีทดสอบ 14 เมตร จะได้ผลที่แม่นยำมากกว่าการใช้รัศมีทดสอบ 4, 8 เมตร



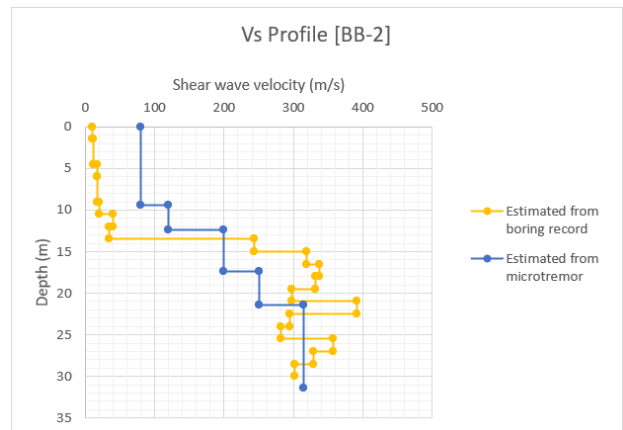
รูปที่ 5 ผลการทดสอบพื้นที่เขตงานที่เขตบางขุนเทียน หลุมเจาะที่ 3



รูปที่ 6 ผลการทดสอบพื้นที่เขตงานที่เขตบางขุนเทียน หลุมเจาะที่ 4



รูปที่ 7 ผลการทดสอบพื้นที่บริเวณเขตงานที่เขตบางบอน หลุมเจาะที่ 1



รูปที่ 8 ผลการทดสอบพื้นที่บริเวณเขตงานที่เขตบางบอน หลุมเจาะที่ 2

จากผลการทดสอบพื้นที่เขตงานเขตบางบอน และ พื้นที่เขตงานเขตบางขุนเทียน พบว่าได้ค่าภาพตัดความเร็วเฉือนในชั้นดินค่อนข้างตรงกับผลเจาะสำรวจชั้นดิน ด้วยการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ R-Squared ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

Sites	R ²
BKT-3	0.7981
BKT-4	0.5365
BB-1	0.4822
BB-2	0.5039

การทดสอบพื้นที่ไซต์งานเขตบางบอน และ พื้นที่ไซต์งานเขตบางขุนเทียนทางคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีที่มีทำการทดสอบ 14 เมตรเนื่องจากต้องการเก็บข้อมูลให้ได้ช่วงความลึกที่มากพอที่จะหาจุดเปลี่ยนชั้นดินได้อย่างแม่นยำ โดยทุกหลุมเจาะจะมีจุดเปลี่ยนชั้นดินที่ใกล้เคียงกันคือที่ระดับความลึก 15 เมตร เปลี่ยนชั้นดินจากดินทรายปนดินเหนียวแข็งปานกลางเป็นดินทรายแข็ง และผลการทดสอบด้วยวิธี Microtremor ได้ระดับความลึกและค่าความเร็วเฉือนบริเวณจุดเปลี่ยนชั้นดินค่อนข้างใกล้เคียงกับผลเจาะสำรวจชั้นดิน

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

4.2.1 หลีกเลี่ยงและลดผลจากคลื่นรบกวน (Noise)

คลื่นรบกวน (Noise) มักมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณพื้นผิวดินและจากตัวอุปกรณ์สำรวจคลื่นไหวสะเทือนเอง ซึ่งคลื่นรบกวนทำให้ความแม่นยำในการประมวลผลข้อมูลลดลง จึงควรหลีกเลี่ยงคลื่นรบกวนให้มากที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งปัจจัยหลักที่อาจทำให้เกิดคลื่นรบกวนมีดังนี้

1. Electric Noise ที่เกิดจากสายไฟที่มีความยาวมากเกินไป ไม่เหมาะสมกับวิธีที่ใช้สำรวจ
2. Electric Noise ที่เกิดจากสายไฟวนทับกัน
3. การเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์กับขั้วสายไฟโดยใช้ฝาครอบ
4. ผิวดินบริเวณที่ทำการปัก Geophone มีความอ่อนหรือหลวมมากเกินไป
5. ผิวดินบริเวณที่ทำการปัก Geophone มีความชื้นมาก
6. การใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดพักหรือใช้งานอุปกรณ์บันทึกข้อมูลในสภาพอากาศที่ร้อนเป็นเวลานานอาจทำให้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเกิดการ Overheating
7. บริเวณที่ทำการทดสอบไม่มีแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีพลังงานคลื่นสูงและความถี่ต่ำ เช่น เครื่องจักร การตอกเสาเข็ม รถบรรทุกขนาดใหญ่ ฯลฯ

4.2.2 ขีดความสามารถของวิธี Microtremor ในช่วงรัศมีและความลึกที่ทดสอบได้

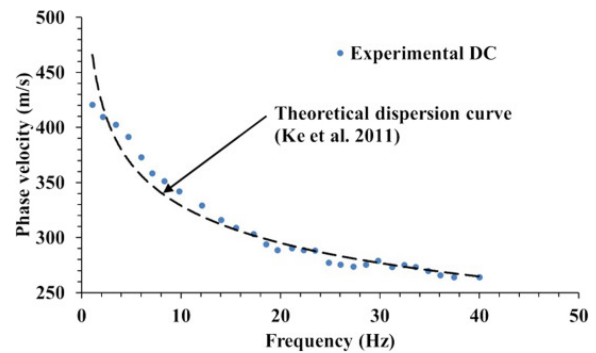
ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้วิธีในการทดสอบได้แก่

1. ช่วงความเร็วคลื่นเฉือนของประเภทดินที่ทำการทดสอบ ซึ่งมีช่วงที่สามารถใช้ในการหาความเร็วเฟสอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective Range) อยู่ระหว่าง $R \leq \lambda \leq 10R$ เมื่อ R คือ รัศมีที่ใช้ในการทดสอบ และ

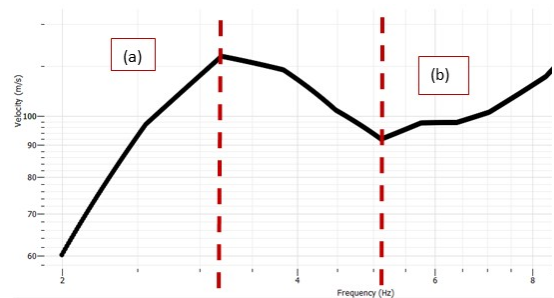
λ คือ ความยาวคลื่น อ้างอิงจากวิธี SPAC (Aki, 1957) [5] ซึ่งมีวิธีคำนวณหาความเร็วเฟสคล้ายกับวิธี Microtremor

2. ความลึกของช่วงดินที่ต้องการทดสอบ
3. ช่วงความถี่ธรรมชาติของ Geophone ที่ใช้ทำการทดสอบ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้ Geophone ที่สามารถรับความถี่ได้ดีที่ช่วง 3 - 20 Hz
4. คุณสมบัติในการสลายพลังงานของคลื่นในดิน
5. รัศมีที่ใช้ทดสอบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1/3 เท่า และ 2 เท่า ของความยาวคลื่น (Soheil Nazarian, Kenneth H. Stokoe II, and W.R. Hudson)

4.2.3 เลือกข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเฉพาะช่วงที่จะนำมาสร้างแบบจำลองชั้นดินในโปรแกรม Dinver



รูปที่ 9 Theoretical Dispersion Curve



รูปที่ 10 ตัวอย่าง Dispersion Curve ที่ได้จากการทดสอบ

จาก Theoretical dispersion curve (รูปที่ 8) และ dispersion curve ที่ได้จากการทดสอบ (รูปที่ 9) จะเห็นว่า มี 2 ช่วงที่เป็นข้อมูลที่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้คือช่วง (a) และ (b) เนื่องจากเหตุผลดังนี้

1. เกิดจากขีดความสามารถในการรับความถี่ของ geophone ที่นำมาทำการทดสอบที่สามารถรับความถี่ได้ดีที่ช่วง 3 - 20 Hz
2. เกิดจากการซ้อนทับกันของความถี่ของคลื่นที่เก็บข้อมูลมากเกินไปของอัตราการรับข้อมูล (Sampling Rate) หรือ Aliasing Effect

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ความสามารถของวิธี Microtremor ในการสำรวจและเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน

จากการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กราฟภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนและความลึกที่ทดสอบด้วยวิธี Microtremor และกราฟภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนและความลึกที่ได้จากผลการเจาะสำรวจดินด้วยการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ R-Squared ผลที่ได้มีดังนี้

Sites	Radius of testing (m)	R ²
CU	4, 8, 14	0.2015, 0.2393, 0.1541
BKT-3	14	0.7981
BKT-4	14	0.5365
BB-1	14	0.4822
BB-2	14	0.5039

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธี Microtremor สามารถนำไปใช้ในการสำรวจและเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนเพื่อนำมาสังเคราะห์ชั้นดินได้อย่างค่อนข้างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำวิจัยนี้ทางคณะผู้ทดสอบมีความคิดเห็นว่าการทดสอบด้วยวิธี Microtremor เป็นการทดสอบที่ทำการทดสอบได้สะดวกและใช้เวลาในการทดสอบไม่นาน รวมถึงอุปกรณ์ในการทดสอบสามารถพกพาได้ง่าย และผลที่ได้มีความแม่นยำเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีนี้มีข้อควรระวังเพื่อไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนขณะเก็บข้อมูลดังที่กล่าวไปข้างต้น

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ขอขอบคุณ นายชวกร เมธีพลกุล นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้ เสนอแนะแนวคิด คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ตลอดจนแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด ระยะเวลาการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถจัดทำปริญญาานิพนธ์ได้อย่างสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia (1999). Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64, 800–808.
- [2] Support ThaiEasyElec (2020). บทความ ESP32 การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI, ThaiEasyElec enable your design.
- [3] Imai T, Tonouchi K (1982). Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus. In: Proceedings of the 2nd European symposium of penetration testing, Amsterdam, pp 67–72
- [4] J.S. L'Heureux and M.Long (2016). Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays, NGM 2016 Reykjavik.

- [5] Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* 35, 415–457.