[1] ภาควิชา วิศวกรรมโยธา, คณะ วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
*Corresponding author; E-mail address: 6170138221@student.chula.ac.th

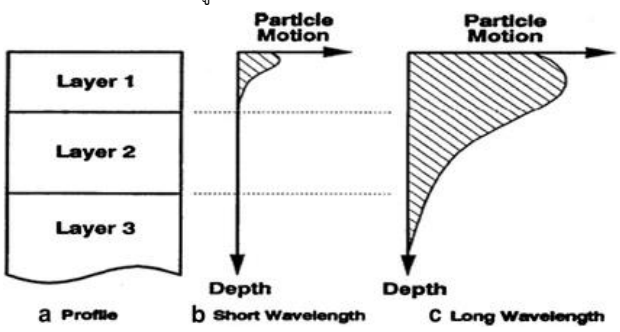
การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์นั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ การสำรวจปิโตรเลียม การสำรวจแหล่งน้ำบาดาล การศึกษาทางด้านแผ่นดินไหว รวมถึงการสำรวจชั้นดินทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์สำรวจชั้นดินจากการตรวจวัดคลื่นสั่นขนาดเล็ก (microtremor) บนผิวดิน อุปกรณ์ตรวจวัดประกอบด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลแบบ 24 บิตซึ่งรับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากจีโอโฟนแล้วส่งให้ระบบไมโครคอมพิวเตอร์ชื่อราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi) เพื่อเก็บข้อมูลและส่งต่อให้ระบบสมาร์ทโฟน ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลด้วยวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ (SPAC) และโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เพื่อแสดงภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity profile) และ คำนวณค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน (Average Shear wave velocity) ของชั้นดิน จากการตรวจวัดภาคสนามในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อทำการตรวจวัดในรัศมีที่เหมาะสม พบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนได้ใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนที่ประเมินจากวิธีดาวน์โฮล (downhole)
คำสำคัญ: ธรณีฟิสิกส์, ราสเบอร์รี่พาย, โครงข่ายประสาทเทียม, การตรวจวัดการสั่นขนาดเล็ก, ความเร็วคลื่นเฉือน

Geophysical survey is one of methods used in mining industries, petroleum explorations, groundwater explorations, earthquake studies, and geotechnical site investigations. In this study, an exploration system is developed to determine shear wave velocity profiles from records of small vibrations on ground surface (Microtremors). A microcomputer (Raspberry Pi), a 24 bit analog-to-digital converter and geophones are used for measuring microtremors and wirelessly sending the observed data to a smartphone. The vibration records are then analyzed in the smartphone for the shear wave velocity profile based on the spatial autocorrelation (SPAC) method and a artificial neural network (ANN). The predictions from the developed system were found to be agreed with a downhole test result at Chulalongkorn University when measuring in a suitable radius.
Keywords Geophysics, Raspberry pi, Neural Network, Microtremors, Shear wave velocity profile

ความเร็วคลื่นเฉือนในชั้นดินนั้นเป็นตัวแปรสำคัญเพื่อหาคุณลักษณะของชั้นดินสำหรับงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค และการประเมินความเสี่ยงด้านแผ่นดินไหวการหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินมักทำโดยวิธีดาวน์โฮลซึ่งมีราคาสูง และไม่เหมาะกับการเก็บข้อมูลปริมาณมากเนื่องจากต้องเตรียมหลุมเจาะสำรวจ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสั่นขนาดเล็ก (microtremors) ซึ่งเป็นวิธีสำรวจบนผิวดิน เก็บข้อมูลคลื่นด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กซึ่งมีราคาถูก ควบคุมด้วยสมาร์ทโฟนผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย วิเคราะห์ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN) ซึ่งสามารถทำนายภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนได้อย่างรวดเร็ว

2.1 คลื่นผิวดิน

คลื่นผิวดินหรือคลื่นผิวมีอัตราการลดลงของพลังงานที่ต่ำกว่าคลื่นในเนื้อวัสดุ เนื่องจากแพร่กระจายตามผิวดินในแนวราบเท่านั้น พลังงานส่วนใหญ่ของคลื่นผิวจะเดินทางผ่านชั้นดินในระดับลึกไม่เกิน 1 ความยาวคลื่น ดังนั้นคลื่นที่มีความยาวคลื่นไม่มากจะมีพฤติกรรมที่เป็นไปตามชั้นดินระดับตื้นและในทำนองเดียวกันคลื่นที่มีความยาวมากขึ้นจะได้รับอิทธิพลจากชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 1



ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของคลื่นผิวกับคุณสมบัติของชั้นดิน [9]

2.2 การวิเคราะห์ชั้นดินจากคลื่นผิว

การประเมินสภาพชั้นดินจากคลื่นผิวประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ การเก็บข้อมูลคลื่นในภาคสนาม, การสร้างเส้นโค้งการกระจายตัว และ การสร้างภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

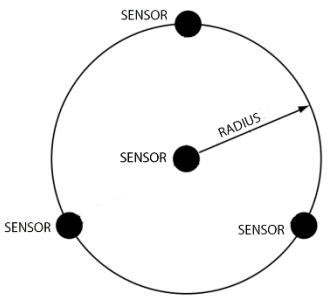
2.2.1 การเก็บข้อมูลคลื่นในภาคสนาม

การเก็บข้อมูลคลื่นในภาคสนาม ในการศึกษานี้จะเก็บข้อมูลจากการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติโดยใช้จีโอโฟนจำนวน 3 ตัววางบนแนวเส้นรอบวงของวงกลม และใช้จีโอโฟนอีกหนึ่งตัววางที่จุดศูนย์กลางของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อรัศมีวงกลม [1] มีดังนี้ 1. ความเร็วของวัสดุที่ทำการสำรวจ 2. ความลึกที่ต้องการสำรวจ 3. ช่วงความถี่ที่ทำการสำรวจ 4. คุณสมบัติการดูดซับพลังงานของวัสดุ 5. ความไวของเซนเซอร์ตรวจวัดคลื่น โดยยิ่งรัศมีวงกลมมีขนาดกว้างข้อมูลของชั้นดินที่ได้จะยิ่งลึกขึ้น

2.2.2 การสร้างเส้นโค้งการกระจายตัว

การสร้างเส้นโค้งการกระจายตัว หรือ dispersion curve ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีสหสัมพันธ์เชิงระยะ [7] ซึ่งวิเคราะห์โดยการหาค่าเฉลี่ยรอบวงกลมซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของข้อมูลสเปกตรัมที่เก็บได้จากจีโอโฟนที่จุดกึ่งกลางและ จีโอโฟนรอบวงกลมในแต่ละจุดซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันเบสเซลประเภทแรก อันดับ 0 (first kind zero order Bessel function, J_0) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ,รัศมีของเส้นรอบวงกลม และ ความเร็วของเฟสในแต่ละความถี่ซึ่งจะได้ข้อมูลความเร็วเฟสของคลื่นในแต่ละความถี่

การสำรวจโดยใช้รัศมีวงจีโอโฟนที่ต่างกันจะสามารถตรวจพบคลื่นที่มีช่วงความยาวที่ของคลื่นที่ต่างกันการในบางครั้งจึงจำเป็นต้องตรวจวัดคลื่นโดยใช้รัศมีของวงกลมที่แตกต่างกันออกไป [4]



การติดตั้งจีโอโฟนในการศึกษานี้

2.2.3 การสร้างภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือน

โดยทั่วไปการสร้างภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนทำโดยการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Inverse analysis) ทำโดยการสร้างเส้นโค้งกระจายตัวทางทฤษฎี (Theoretical dispersion curve) เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากข้อมูลที่ตรวจวัดได้ (Observation dispersion curve) โดยใช้อัลกอริทึมทั้งแบบเชิงเส้น [10], [11] และไม่เป็นเชิงเส้น [12], [13], [14], [15], [16], [17] เพื่อปรับปรุงตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินให้มีความใกล้เคียงตามที่กำหนดโดยมักจะต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นาน และ ใช้ทรัพยากรในการคำนวณสูงซึ่งไม่เหมาะกับไมโครคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) แบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ซึ่งรับข้อมูลเส้นโค้งการกระจายตัวในรูปแบบ อาเรย์ขนาด 1 มิติซึ่งสามารถทำนายภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนได้ภายใน 5 นาที

2.3 ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยของชั้นดิน

ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตร (Vs30) เป็นตัวแปรหนึ่งที่นิยมใช้ในการประเมินสภาพชั้นดินเพื่อออกแบบด้านแผ่นดินไหว โดย NEHRP ได้แบ่งประเภทชั้นดินเป็น 6 ประเภท (A-F) ตามตารางที่ 1 และใช้วิธีการคำนวณตามสมการที่ (1)

การจำแนกชั้นดินตาม

Soil type	Description	Vs30 (m/s)
A	Hard rock	> 1500
B	Rock	760 ~ 1500
C	Very dense Soil & soft rock	360 ~ 760
D	Stiff soil	180 ~ 360
E	Soft soil	< 180
F	Unstable soils	

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{h} \frac{d_i}{Vs_i}} \quad (1)$$

โดยที่ Vs_{30} คือความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วง 30 เมตร, Vs_i และ d_i คือความเร็วคลื่นเฉือนและความหนาของดินชั้นที่ i

3.1 อุปกรณ์

ระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.4 ไมโครคอมพิวเตอร์ ราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi) 3b

2.2.5 ตัวแปลงสัญญาณความละเอียด 24 บิต

2.2.6 จีโอโฟน 2 เฮริตซ์ จำนวน 4 ตัว

2.2.7 สมาร์ทโฟนจำนวน 1 เครื่อง

3.2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

การเก็บข้อมูลคลื่นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยติดตั้งจีโอโฟนในรูปแบบวงกลมรัศมีขนาด 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตรทำการเก็บข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 256 เฮิรตซ์เป็นเวลา 15 นาที จำนวน 3 ครั้ง ในแต่ละรัศมีโดยข้อมูลที่เก็บได้มีช่วงความถี่ระหว่าง 2 ถึง 28 เฮริตซ์

3.3 การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือนของดิน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาภาพตัดของชั้นดิน โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ประกอบด้วยข้อมูลเข้า (Input layer) 1 ชั้น ชั้นซ่อน (Hidden layer) จำนวน 7 ชั้น และชั้นข้อมูลออก (Output layer) จำนวน 1 ชั้น ดังแสดงในตารางที่ (3) ทั้งนี้ได้สร้างฐานข้อมูลจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์แบบสุ่มในช่วงตามตารางที่ (2) จำนวน 427,000 ข้อมูล แล้วแบ่งไปใช้ในการฝึกฝน (Train set) และ ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ (Validation set) จำนวน 384,300 ข้อมูล ใช้สำหรับการพิสูจน์ความแม่นยำของข้อมูล (Test set) จำนวน 42,700 ข้อมูล ซึ่งความคลาดเคลื่อนของผลทำนายจะประเมินจาก Loss function ตามสมการที่ (2) โดยโครงข่ายประสาทเทียม และความคลาดเคลื่อนของโมเดลซึ่งได้จากการทดสอบกับชุดข้อมูลที่เตรียมไว้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ (4) โดยที่ Validation loss คือ ความคลาดเคลื่อนของการทำนายชุดข้อมูลที่จัดเตรียมไว้ (Test set) และ Validation accuracy คือ อัตราการทำนายถูกของโมเดลต่ออัตราการทำนายทั้งหมดในชุดข้อมูลที่จัดเตรียมไว้ (Test set)

$$MSE = \frac{1}{n}\sum^{n}\left|y_{true} - y_{predict}\right| \quad (2)$$

โดยที่ y_{true} คือคำตอบจริงของข้อมูล $y_{predict}$คือคำตอบจากการทำนายด้วยโมเดล

ขอบเขตคุณลักษณะของชั้นดินที่สำหรับสร้างชุดข้อมูล

Layer	H (m)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Density (t/m3)
1	3	80~360	2	1.8
2	3	80~360	2	1.8
3	3	80~360	2	1.8
4	3	80~360	2	1.8
5	3	80~360	2	1.8
6	3	80~360	2	1.8
7	3	80~360	2	1.8
8	3	80~360	2	1.8
9	3	80~360	2	1.8
10	3	80~360	2	1.8
11	Half space	240~720	2	1.8

* Vs = Shear wave velocity, Vp = Compression wave

H = Layer thickness

3 ชั้น โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

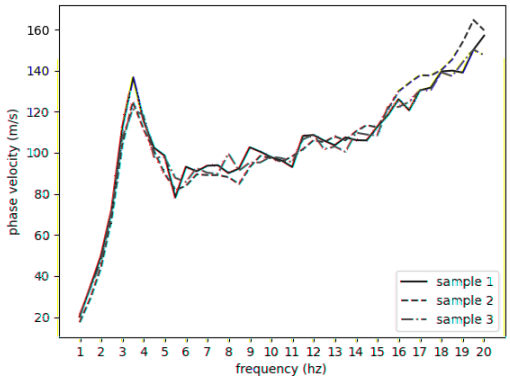
Layer (type)	Output Shape	Activation function
Input	n x 16	-
Dense	1 x 32	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 32	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 64	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 64	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Output	n x 11	-

ความคลาดเคลื่อนของโมเดล

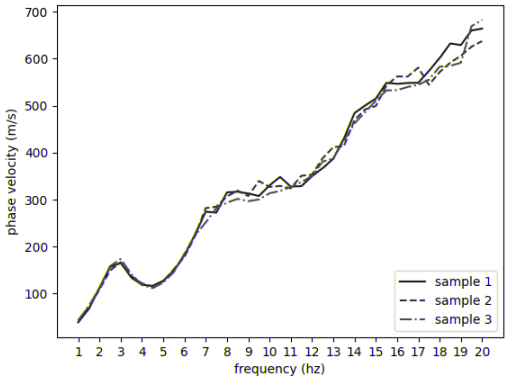
Model name	Frequency range (Hz)	Validation loss (%)	Validation accuracy (%)
2m.hdf5	3.5 – 5.5	28.32	91.35
4m.hdf5	3.0 – 5.5	28.18	91.36
6m.hdf5	3.0 – 5.5	28.20	91.38
8m.hdf5	3.0 – 4.5	28.83	91.36
10m.hdf5	3.0 – 4.0	28.67	91.37

4.1 ผลการทดสอบ

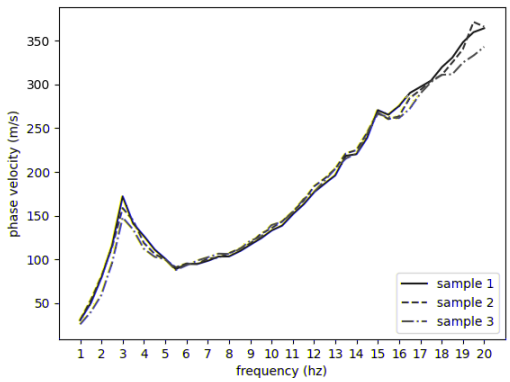
จากวิธีการที่ได้อธิบายก่อนหน้า ได้ทำการทดสอบในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยใช้รัศมีการวางจีโอโฟนขนาด 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตร จำนวน 3 ครั้งวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวในแต่ละรัศมีดังแสดงในรูปที่ (3) ถึง (7) แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาภาพตัดชั้นดินซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ (8) ถึง (12) โดยประเมินร้อยละความคลาดเคลื่อนของภาพตัดชั้นดินด้วย Loss function ระหว่างวิธีดาวน์โฮล กับ ผลการทำนายจากอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ตามตารางที่ (5) ความคลาดเคลื่อนของความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ความลึก 30 เมตรระหว่างวิธีดาวน์โฮล กับ ผลการทำนายจากอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ตามตารางที่ (6)



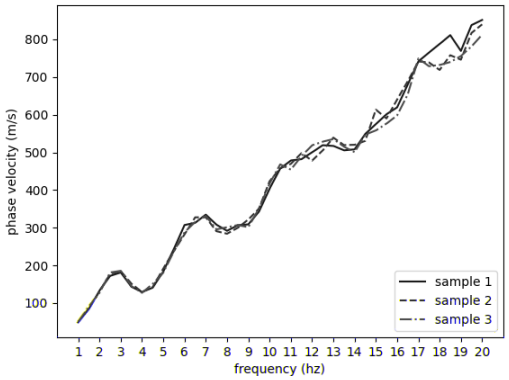
เส้นโค้งการกระจายตัววัดด้วยรัศมีขนาด 2 เมตร



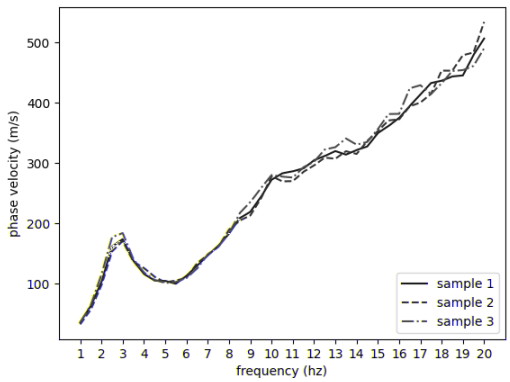
เส้นโค้งการกระจายตัววัดด้วยรัศมีขนาด 8 เมตร



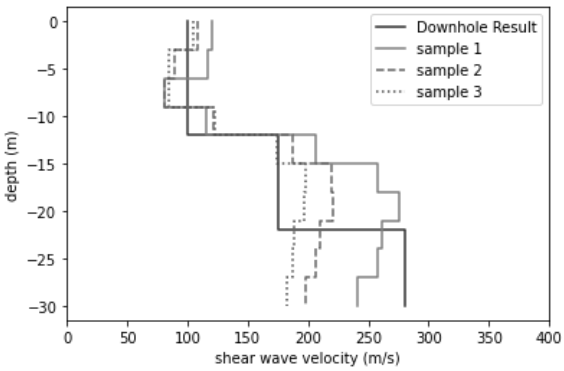
เส้นโค้งการกระจายตัววัดด้วยรัศมีขนาด 4 เมตร



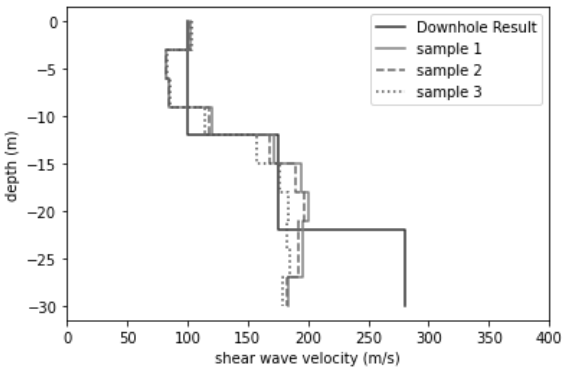
เส้นโค้งการกระจายตัววัดด้วยรัศมีขนาด 10 เมตร



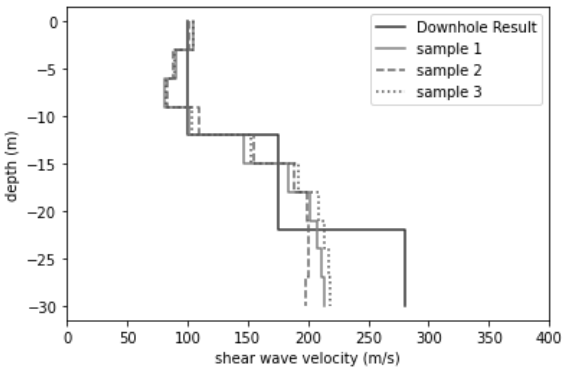
เส้นโค้งการกระจายตัววัดด้วยรัศมีขนาด 6 เมตร



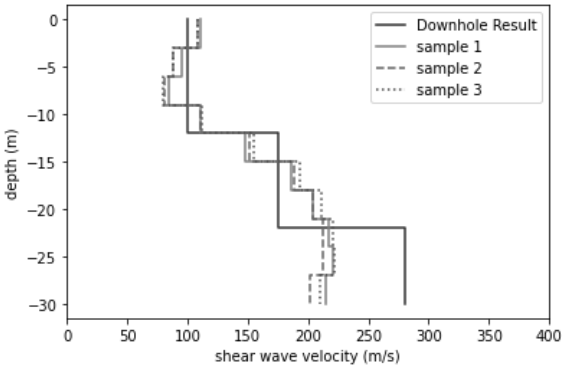
ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการวัดด้วยรัศมีจีโอโฟนขนาด 2 เมตร



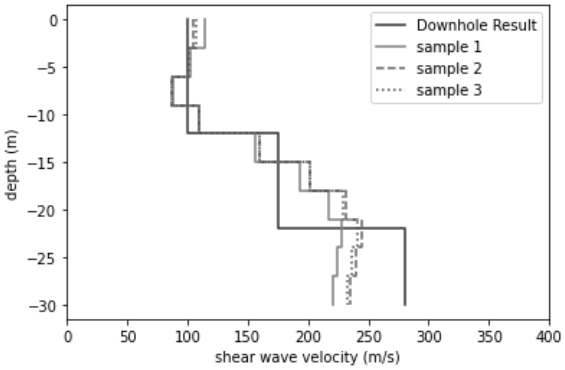
ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการวัดด้วยรัศมีจีโอโฟนขนาด 4 เมตร



ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการวัดด้วยรัศมีจีโอโฟนขนาด 6 เมตร



ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการวัดด้วยรัศมีจีโอโฟนขนาด 8 เมตร



ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการวัดด้วยรัศมีจีโอโฟนขนาด 10 เมตร

ร้อยละความคลาดเคลื่อนของภาพตัดชั้นดิน

Observation Radius (m)	Sample 1 Loss (%)	Sample 2 Loss (%)	Sample 3 Loss (%)
2	25.18	20.79	20.79
4	17.84	17.43	17.43
6	14.89	15.91	15.91
8	15.24	16.78	16.78
10	15.22	14.12	14.12

ร้อยละความคลาดเคลื่อนของความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ความลึก 30 เมตร

Observation Radius (m)	Downhole method (m/s)	Sample 1 prediction (m/s)	Sample 2 prediction (m/s)	Sample 3 prediction (m/s)
2	171.38	197.70 (15.39 %)	167.22 (2.39 %)	155.15 (9.44 %)
4	171.38	155.71 (9.11 %)	153.37 (10.48 %)	147.99 (13.62 %)
6	171.38	159.49 (6.90 %)	156.47 (8.67 %)	163.52 (4.55 %)
8	171.38	164.25 (4.12 %)	160.11 (6.54 %)	164.40 (4.04 %)
10	171.38	170.56 (0.44 %)	177.06 (3.34 %)	176.05 (2.75 %)

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยวิธีตรวจวัดคลื่นขนาดเล็ก (microtremor) ซึ่งเปรียบเทียบความแม่นยำด้วยวิธีดาวน์โฮล (downhole) ที่ความลึก 30 เมตร จากผิวดินหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือนชั้นดินที่ความลึกในช่วงผิวดินจนถึง 22 เมตรจากสองวิธีนั้นมีความใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความลึกตั้งแต่ 22 เมตรจนถึง 30 เมตร หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินมีความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ในการตรวจวัดจึงทำให้ข้อมูลในช่วงที่มีความถี่ต่ำซึ่งสำคัญสำหรับการประเมินชั้นดินในระดับลึกนั้นไม่ชัดเจน

สำหรับการตรวจวัดโดยใช้รัศมีกว้างซึ่งได้แก่ 8 และ 10 เมตร จะให้ข้อมูลภาพตัดที่ลึกแม่นยำมากกว่าการตรวจวัดโดยใช้รัศมีที่แคบกว่าซึ่งได้แก่ 2 และ 4 เมตร

วิธีตรวจวัดคลื่นสั่นขนาดเล็ก (Microtremor) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีตรวจวัดแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing) ซึ่งไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่ที่ทำการเก็บข้อมูล สามารถสำรวจในชั้นหินแข็งซึ่งไม่เหมาะกับการเจาะหลุมสำรวจ ผลการทดสอบในการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดภาคตัดความเร็วคลื่นเฉือนได้ใกล้เคียงกับการทดสอบดาวน์โฮลเมื่อทำการตรวจวัดในช่วงรัศมีที่เหมาะสม

ซึ่งอุปกรณ์นี้มีราคาที่ต่ำกว่ามาก นอกจากนี้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นยังสามารถทดสอบได้รวดเร็วเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเตรียมหลุมสำรวจ

การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์ภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือนทำให้สามารถประมวลผลหลังจากเก็บข้อมูลคลื่นได้ภายในเวลาไม่ถึง 5 นาที จึงทำให้เหมาะสำหรับการเก็บข้อมูลในงานที่ต้องการข้อมูลจำนวนมากภายใต้เวลาจำกัด

[1] Nazarian, S., Stokoe, K. H., & Hudson, W. R. (1983). Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems. Transportation Research Record, 38–45.

[2] Ewing, W. M., Jardetzky, W. S., Press, F., & Beiser, A. (1957) Elastic Waves in Layered Media. Physics Today, 10(12), 27–28.

[3] Whitham, G. B. (1999). Linear and Nonlinear Waves. New York: Wiley

[4] Okada, H.; Suto, K. The Microtremor Survey Method; Geophysical Monograph Series 12; Asten, M.W., Ed.; Society of Exploration Geophysicists: Tulsa, Oklahoma, 2003.

[5] Havskov, J.; Alguacil, G. Instrumentation in Earthquake Seismology, 2nd ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2016; p. 70.

[6] Thitimakorn, T., Luangthavornkul, N., Juntamat, P., & Harnsiri, A. (2008). Determining Shear-wave Velocity of Bangkok Subsoils by Multi-Channel Analysis of Surface Wave Method. 19(Great), 534–535.

[7] AKI, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bull.Earthq. Res. Inst., 35, 415-456

[8] BSSC (2003) NEHRP Recommended Provisions for seismic Regulations for New buildings and other Structures, Part1: Provisions, FEMA 368, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

[9] Rix GJ (1988) Experimental study of factors affecting the spectral-analysis-of- surface-waves method. PhD Diss., University of Texas at Austin

[10] Wiggins, R. A. (1972). The general linear inverse problem: Implication of surface waves and free oscillations for Earth structure. In Reviews of Geophysics (Vol. 10, Issue 1, p. 251). American Geophysical Union (AGU).

[11] Herrmann, R. B. (2013). Computer Programs in Seismology: An Evolving Tool for Instruction and Research. In Seismological Research Letters (Vol. 84, Issue 6, pp. 1081–1088). Seismological Society of America (SSA).

[12] Dal Moro, G., Pipan, M., & Gabrielli, P. (2007). Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and Marginal Posterior Probability Density estimation. In Journal of Applied Geophysics (Vol. 61, Issue 1, pp. 39–55). Elsevier

[13] Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I. Searching a parameter space. In Geophysical Journal International (Vol. 138, Issue 2, pp. 479–494). Oxford University Press (OUP).

[14] Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—II. Appraising the ensemble. In Geophysical Journal International (Vol. 138, Issue 3, pp. 727–746). Oxford University Press (OUP).

[15] Vinther, R., & Mosegaard, K. (1996). Seismic inversion through Tabu Search1. In Geophysical Prospecting (Vol. 44, Issue 4, pp. 555–570).

[16] Sen, M. K., & Stoffa, P. L. (1991). Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing. In GEOPHYSICS (Vol. 56, Issue 10, pp. 1624–1638). Society of Exploration Geophysicists

[17] Mosegaard, K., & Tarantola, A. (1995). Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems. In Journal of Geophysical Research: Solid Earth (Vol. 100, Issue B7, pp. 12431–12447). American Geophysical Union (AGU).