

การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน

Exploration of Site Characteristics of Subsoils by Microtremor Observations

นคร ภู่วโรดม และ กิตติศักดิ์ พิทักษ์วงศ์

Nakhorn Poovarodom and Kittisak Pitakwong

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี 12120

โทร.0-2564-3001-9 โทรสาร. 0-2564-3010

E-mail: pnakhorn@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งที่มีผลหลักต่อระดับความรุนแรงและลักษณะของการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินด้วยเทคนิคการตรวจวัดแบบ 1 จุด เพื่อวิเคราะห์อัตราส่วนของสเปกตรัมในแนวราบต่อแนวดิ่งของคลื่นที่ผิวดินสำหรับค่าคาบอิทธิพลหลัก และใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบหลายจุดพร้อมกันเพื่อวิเคราะห์แบบ 2-sites Spatial Autocorrelation (2sSPAC) สำหรับการสำรวจค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน บริเวณที่ศึกษามี 8 แห่งใน กทม. เชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนด้วยวิธี 2sSPAC ให้ผลสอดคล้องกับผลโดยเทคนิคอื่นที่เคยมีผู้วิจัยไว้ก่อนหน้านี้เป็นอย่างดี และผลความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดิน ได้ผลคือ บริเวณที่ศึกษาในจังหวัด เชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี ส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) และบางส่วนเป็นประเภท C (ดินแข็งมาก กึ่งหิน) ส่วนในกทม. พบว่าทุกบริเวณที่ศึกษาจำแนกเป็นประเภท E (ดินอ่อน) ค่าคาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษา มีค่าประมาณ 0.7 วินาทีสำหรับบริเวณดินอ่อน และประมาณ 0.4 วินาทีสำหรับบริเวณดินแข็ง

Abstract

This study quantitatively investigates site effects of subsoils, which govern intensity and characteristics of ground motion, by microtremor observations. The technique of single point microtremor observation with Horizontal-to-Vertical spectral ratio (H/V) method is applied to estimate the predominant

period and the comprehensive technique of array microtremor observation with 2-sites Spatial Autocorrelation (2sSPAC) technique is applied for exploration of shear wave velocity profile. The sites of investigation are 8 sites in Bangkok, Chiangmai, Chiangrai and Kanchanaburi. The results of shear wave velocity profiles from 2sSPAC technique are in good agreement when compared with the results from other techniques performed by previous researchers. Site classifications based on average shear wave velocity reveal that subsoils of Chiangmai, Chiangrai and Kanchanaburi are classified as class D (dense or stiff soil) or class C (very dense soil and soft rock) while all sites in Bangkok are classified as class E (soft soil). The results of H/V observation show that the predominant periods are about 0.7 second for soft soil and 0.4 second for stiff soil.

1. บทนำ

ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง (Site Characteristic หรือ Site Effect) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ชั้นดินอาจสามารถขยายขนาดคลื่นและเพิ่มระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นชั้นดินอ่อน และมีค่าความถี่หลักของการสั่นสะเทือนใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติของกลุ่มอาคารและเกิดความรุนแรงอย่างมากเนื่องจากการสั่นพ้อง คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งที่สำคัญคือ (1) ค่าความเร็วเฉือน (Shear Wave Velocity) ที่เป็

RECEIVED 1 June, 2010

ACCEPTED 3 August, 2010

ของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหว และ (2) คาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) ที่แสดงค่าคาบการสั่นของชั้นดินที่ตอบสนองหลักภายใต้แผ่นดินไหว โดยในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [1, 2] ได้จำแนกประเภทชั้นดินตามค่าเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรด้วยค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย ($\bar{V}_S$) หรือค่าการทดสอบฝังจุมมาตรฐานเฉลี่ย (Average Field Standard Penetration Resistance, $\bar{N}$) หรือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย (Average Undrained Shear Strength $\bar{S}_u$) สำหรับการจำแนกด้วย $\bar{V}_S$ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจำแนกประเภทชั้นดินสำหรับมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว [1, 2]

Soil	Soil Type	Shear Wave Velocity (m/s)
A	Hard Rock	$\bar{V}_S > 1500$
B	Rock	$760 < \bar{V}_S \leq 1500$
C	Very dense soil and soft rock	$360 < \bar{V}_S \leq 760$
D	Dense/Stiff soil	$180 < \bar{V}_S \leq 360$
E	Loose/Soft soil	$180 > \bar{V}_S$

ในประเทศไทย ถึงแม้ได้มีการกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่มีความทันสมัยและเป็นสากลขึ้นแล้ว [1] แต่ยังคงขาดการสำรวจข้อมูลด้านคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งสำหรับพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศเพื่อพิจารณาการพิจารณาความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เหมาะสม สำหรับวิธีการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนอาจได้จากการเจาะหลุมสำรวจเช่น การสำรวจแบบ Downhole [3, 4] แต่มีค่าใช้จ่ายสูงและอาจมีข้อจำกัดด้านความลึกของหลุมสำรวจ นอกจากนั้นยังมีวิธีทางอ้อมที่ไม่ต้องเจาะสำรวจ คือการวัดคลื่นที่ผิวดิน โดยจำแนกได้เป็นการวิเคราะห์การสะท้อนหรือการหักเหของคลื่นในชั้นดิน เช่น การวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องสัญญาณ (Multi-Channel Analysis of Surface Wave, MASW) [5] และการวิเคราะห์คลื่นขนาดเล็ก (Microtremor) ที่ผิวดิน [6, 7] ซึ่งเป็นวิธีหลักของงานวิจัยนี้

เนื่องจากมีข้อดีที่สำคัญ คือวิธีที่ศึกษานี้สามารถดำเนินการศึกษาได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ค่าใช้จ่ายต่ำ และสามารถสำรวจได้ในระดับความลึกมากได้ (ประมาณ 60-80 เมตร สำหรับในงานวิจัยนี้)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งสำหรับประเทศไทย โดยใช้การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน วิเคราะห์หาความเร็วคลื่นเฉือนโดยวิธี 2-sites Spatial Autocorrelation (2sSPAC) และหาค่าคาบอิทธิพลหลักด้วยวิธี H/V Spectrum Ratio โดยมุ่งหวังเพื่อพัฒนากระบวนการศึกษาที่สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทยเพื่อการจัดการด้านการป้องกันภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหวที่เหมาะสม

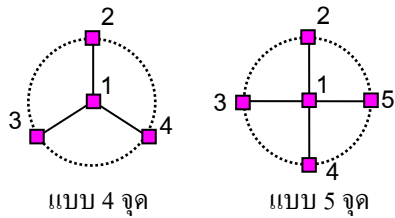
2. วิธีสำหรับการวิเคราะห์

2.1 วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC)

วิธี SPAC คือการหาความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นที่ผิวดินโดยการตรวจวัดการสั่นในแนวตั้งของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินในสภาพธรรมชาติ (ไม่มีการกระตุ้น) โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินมีองค์ประกอบหลักคือโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh การตรวจวัดต้องเป็นแบบหลายตำแหน่งพร้อมกัน (Array) และนำข้อมูลที่วัดพร้อมกันมาหาความสัมพันธ์ (Coherency) ในด้าน ระยะทางและความถี่ของคลื่น แล้วนิยามสัมประสิทธิ์ Spatial Autocorrelation ในรูปของค่าเฉลี่ยของ Coherency จากคลื่นในทิศทางต่าง ๆ และด้วยคุณสมบัติที่ความเร็วเฟสมีค่าต่างกันตามความถี่ของคลื่น (Dispersion) จะได้ว่า สัมประสิทธิ์ Spatial Autocorrelation เป็นฟังก์ชันกับความถี่และความเร็วเฟสของคลื่นด้วยรัศมีของการตรวจวัดที่ Array นั้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Dispersion Curve ของชั้นดินขึ้นมา (รายละเอียดเพิ่มเติมใน [7]) และค่าความเร็วคลื่นเฉือนสามารถวิเคราะห์ได้ต่อไปด้วยการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) สำหรับแบบจำลองของชั้นดินที่บริเวณศึกษา

ในการตรวจวัดแบบ Array สำหรับวิธี SPAC จำเป็นต้องจัดเรียงหัววัดเป็นรูปวงกลม เช่น 4 ถึง 5 หัววัดดังรูปที่ 1 อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านจำนวนหัววัด

และบุคลากร Morikawa [7] เสนอว่าอาจใช้หัววัด 2 หัวพร้อมกันแต่ทำการวัดหลายครั้งให้ครบทุกทิศทางสามารถให้ผลที่ถูกต้องยอมรับได้ เรียกว่าวิธี 2 Sites-SPAC



รูปที่ 1 การจัดเรียงหัววัดเป็นรูปวงกลมสำหรับวิธี SPAC

2.2 วิธี H/V Spectrum Ratio

วิธี H/V [8] เป็นการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินใน 3 แกนด้วยหัววัด 1 หัว และคำนวณอัตราส่วนของสเปกตรัมในแนวราบต่อสเปกตรัมในแนวตั้งของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน ซึ่งการคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนนี้เพื่อเป็นการกำจัดผลของอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีผลต่อทั้งสเปกตรัมในแนวราบและสเปกตรัมในแนวตั้งของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน และด้วยคุณสมบัติที่เสถียรของสเปกตรัมจากอัตราส่วน H/V จึงสามารถประเมินคาบการสั่นหลัก หรือคาบอิทธิพลหลักของชั้นดินได้จากค่าคาบการตอบสนองหลักของสเปกตรัมจากอัตราส่วน H/V

อย่างไรก็ดีวิธีนี้ยังมีข้อได้เปรียบสำคัญที่สมมุติฐานขององค์ประกอบหลักของคลื่นที่ผิวดิน แต่เนื่องจากความสะดวกในการปฏิบัติจึงมีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงพิจารณาผลของวิธี 2sSPAC เป็นหลัก และใช้ผลของ H/V ประกอบการวิจารณ์ผลการศึกษา

3. การดำเนินการวิจัย

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการตรวจวัดประกอบด้วย อุปกรณ์รับข้อมูล GEODAS-10-24DS ที่มี Resolution ของการแปลงสัญญาณ 24 bits และ หัววัดรุ่น CR4.5-2S ซึ่งสามารถวัดความเร็วการสั่นสะเทือนได้ 3 แกน มีคาบธรรมชาติ 2 วินาที สามารถตรวจวัดความถี่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 ถึง 20 Hz ด้วยความละเอียดในระดับ micro m/s จำนวน 3 หัว

วิธีการตรวจวัดสำหรับวิธี 2sSPAC คือ กำหนดตำแหน่งหัววัดเป็นลักษณะ Array วงกลม ทำการตรวจวัดด้วย 3 หัววัดเพียงบางส่วนของ Array จนกระทั่งครบ โดยในแต่ละ

รอบของการตรวจวัด ต้องมีการวัดที่จุดศูนย์กลางของ Array เช่น สำหรับ Array แบบ 5 จุดในรูปที่ 1 ครั้งที่หนึ่งคือการวัดจุด 1-2-4 และครั้งที่สอง คือการวัดจุด 1-3-5 โดยเมื่อดำเนินการครบทุกจุดแล้ว ทำการวัดสำหรับ Array ใหม่ที่เปลี่ยนรัศมีต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้ใช้รัศมีตั้งแต่ 7.5 ถึง 50 เมตร และการตรวจวัดสำหรับการวิเคราะห์ H/V สามารถใช้ข้อมูลจากหนึ่งหัววัดของการตรวจวัดสำหรับ 2sSPAC มาวิเคราะห์

บริเวณที่สำรวจมีทั้งสิ้น 8 บริเวณ คือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สนามรักบี้ ประตูใหญ่ CU) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (สนามฟุตบอล AIT) ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (สนามรักบี้ TU) กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา (สนามด้านหน้า TMD) กาญจนบุรี (ร.เทศบาล 5 KAN) เชียงราย (กรมโยธาธิการ CR) เชียงใหม่ 1 (วิศวกรรมโยธา มช. CM1) เชียงใหม่ 2 (วัดเจดีย์หลวง CM2) ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

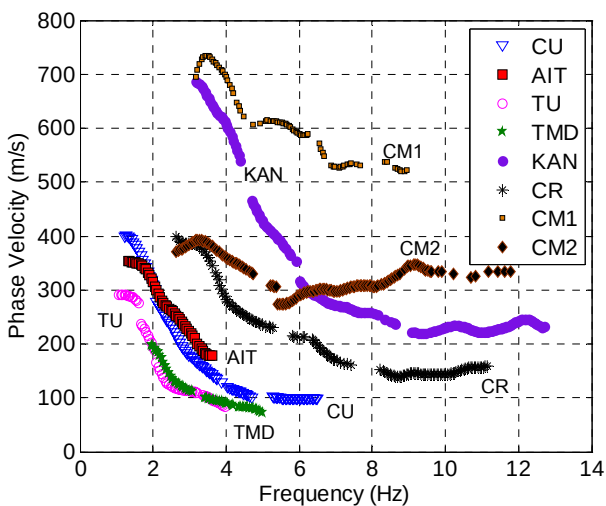
ตารางที่ 2 รายละเอียดของบริเวณที่ศึกษา

สถานที่	พิกัด	รัศมี (เมตร)	งานวิจัยเปรียบเทียบ*
CU	Lat :13°44.309' Long :100° 31.806'	12.5, 25, 50	D1, D2, M, F
AIT	Lat :14° 4.749' Long :100° 36.601'	25, 50	D1, D2, M, F
TU	Lat : 14° 4.153' Long :100° 36.553'	12.5, 25, 50	D2, M
TMD	Lat : 13° 40.022' Long :100° 36.295'	8.5, 12.5, 25	D1
KAN	Lat : 14° 01.079' Long :99° 32.074'	10, 20, 40	D1
CR	Lat : 19° 55.694' Long : 99° 52.259'	7.5, 15, 30	D1
CM1	Lat : 18° 48.053' Long : 98° 57.049'	12.5, 25, 50	D1
CM2	Lat : 18° 47.651' Long : 98° 57.03'	11.75, 23.5, 47	D1

* D1 = Downhole by [4], D2 = Downhole by [3],
M = MASW by [5], F = f-k by [6]

4. ผลการศึกษา

ผลการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี 2sSPAC ที่ศึกษาสามารถเปรียบเทียบกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่บริเวณเดียวกันด้วยเทคนิคอื่น ได้แก่ การสำรวจแบบ Downhole [3, 4] วิธี MASW [5] และการวิเคราะห์คลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินด้วยเทคนิค f-k [6] โดยที่งานวิจัยอื่นที่ใช้เปรียบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ Dispersion Curve ของทุกบริเวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งพบลักษณะที่แตกต่างระหว่างกลุ่มบริเวณชั้นดินอ่อนในเขต กทม. กับกลุ่มชั้นดินแข็งในจังหวัด กาญจนบุรี เชียงราย เชียงใหม่ โดยความเร็วเฟสของบริเวณชั้นดินอ่อนมีค่าต่ำกว่า

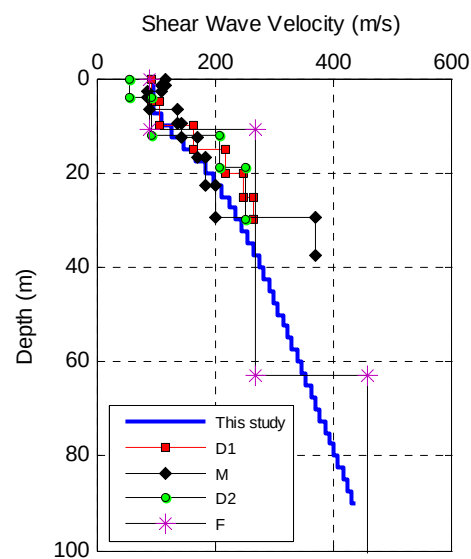


รูปที่ 2 Dispersion Curve รวมสำหรับแต่ละบริเวณ

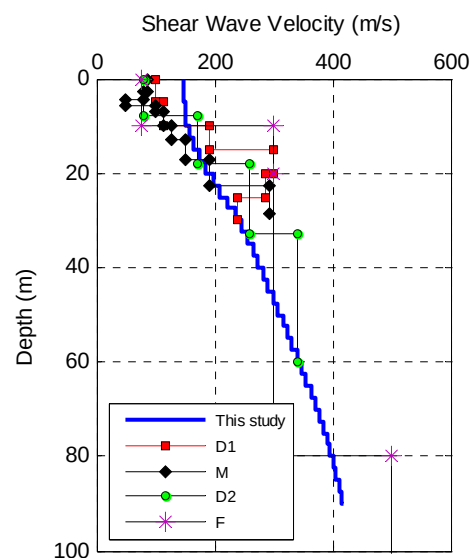
ค่าความเร็วคลื่นเฉือนตาม ความลึกแสดงในรูปที่ 3 ถึง 10 และเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ และ V_s ช่วง 30 เมตรแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งผลพบว่าค่าที่ได้จากการศึกษานี้สอดคล้องดีกับการทดสอบแบบดาวน์โฮล ยกเว้นบริเวณ CM1 (วิศวกรรมโยธา มช.) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นเชิงเขาและเป็นอาจข้อจำกัดที่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงเทคนิคให้เหมาะสมขึ้น อย่างไรก็ดี ผลจากการสำรวจแบบดาวน์โฮลมีค่าเพียงระดับความลึกไม่มากเมื่อเทียบกับผลของงานวิจัยนี้ ส่วนผลการจำแนกประเภทชั้นดินตามตารางที่ 1 ให้ผลเหมือนกัน นั่นคือ บริเวณ CU AIT TU และ TMD เป็นประเภท E บริเวณ KAN CR และ CM2 เป็น

ประเภท D ส่วน CM1 เป็นประเภท C นอกจากนี้ สังเกตได้ว่าค่า V_s ในตารางที่ 3 ของแต่ละบริเวณที่ศึกษามีลักษณะสอดคล้องกับขนาดของความเร็วเฟสในรูปที่ 2

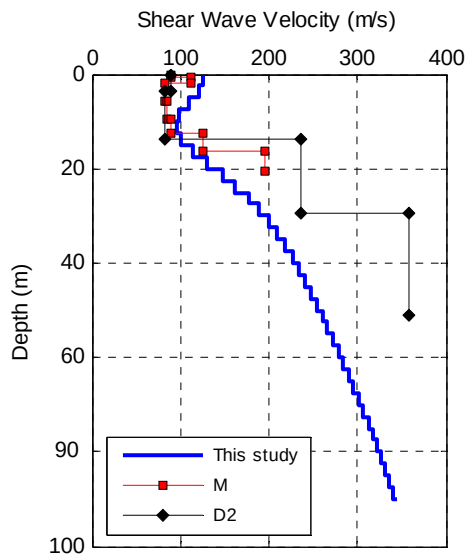
ค่าคาบอิทธิพลหลักหรือคาบการตอบสนองหลักของชั้นดินที่มีความสำคัญต่อการประเมินลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่บริเวณนั้น ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าคาบอิทธิพลหลักมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นเฉือนโดยมีค่าประมาณ 0.7 วินาทีสำหรับดินอ่อนใน กทม. และประมาณ 0.4 วินาทีสำหรับบริเวณดินแข็ง แต่ที่ CM2 ไม่สามารถหาค่าได้



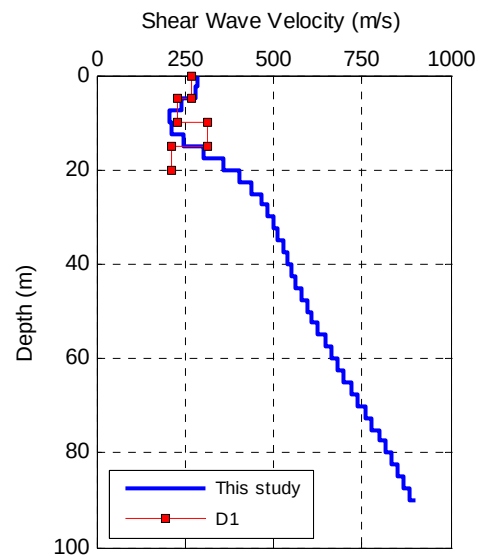
รูปที่ 3 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ CU



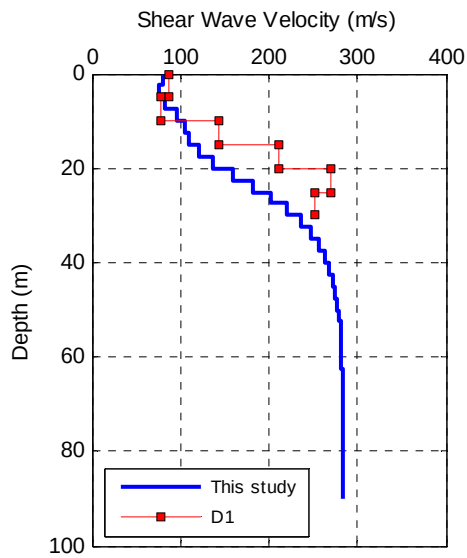
รูปที่ 4 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ AIT



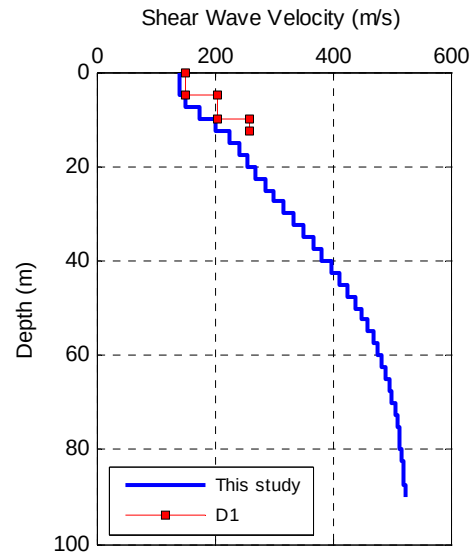
รูปที่ 5 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ TU



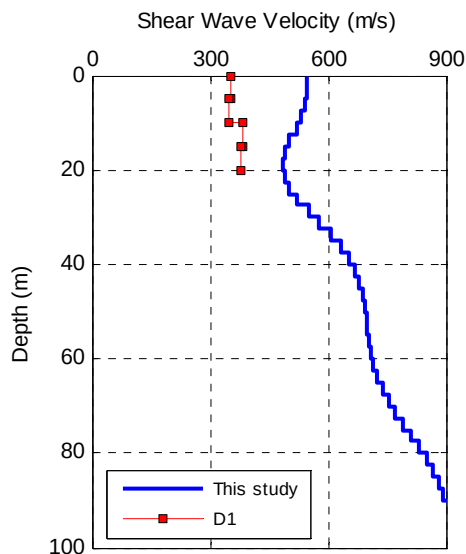
รูปที่ 7 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ KAN



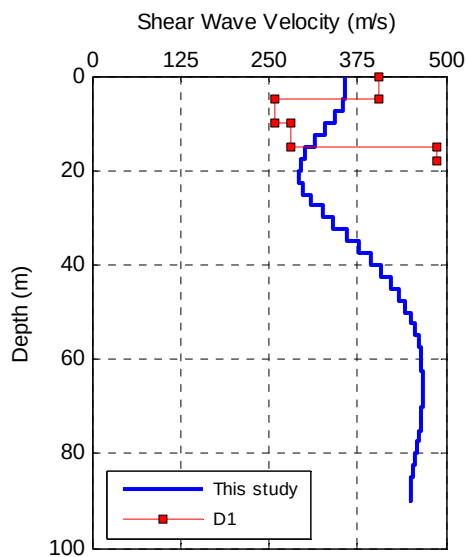
รูปที่ 6 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ TMD



รูปที่ 8 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ CR



รูปที่ 9 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ CM1



รูปที่ 10 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ CM2

ตารางที่ 3 ความเร็วคลื่นเฉือนและคาบอิทธิพลหลัก

สถานที่	$\bar{V}_S$ ช่วง 30 เมตร (m/s)		Predominant Period (s)
	2s-SPAC	Downhole [3, 4]	
CU	142	157, 125	0.754
AIT	174	174, 146	0.746
TU	120	129	0.730
TMD	117	141	0.658
KAN	300	257	0.403
CR	208	188	0.621
CM1	518	368	0.437
CM2	322	326	N.A.

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ได้แก่ ความเร็วคลื่นเฉือน และคาบอิทธิพลหลักของชั้นดิน ด้วยการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน ซึ่งไม่ต้องเจาะหลุมสำรวจ ดำเนินการได้อย่างรวดเร็วและได้ผลที่ระดับความลึกมาก ทำการศึกษาใน 8 บริเวณ ผลการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือน ($\bar{V}_S$) กับการสำรวจแบบดาวนโฮลพบว่ามีค่าสอดคล้องกัน และจำแนกชั้นดินได้เป็น ประเภท E ($\bar{V}_S < 180$ m/s) สำหรับ ทม.ที่เป็นชั้นดินอ่อน ส่วนชั้นดินแข็งที่ เชียงใหม่ เชียงราย กาญจนบุรี เป็น ประเภท D ($180 < \bar{V}_S \leq 360$) หรือ C ($360 < \bar{V}_S \leq 760$) คาบอิทธิพลหลักมีค่าประมาณ 0.7 วินาทีสำหรับดินอ่อน และประมาณ 0.4 วินาทีสำหรับบริเวณดินแข็ง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวิธีที่ศึกษานี้เพื่อการสำรวจในพื้นที่อื่น ๆ ในประเทศเพื่อการจัดการด้านการป้องกันภัยเนื่องจากแผ่นดินไหวที่เหมาะสมได้ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปี 2552 และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย พุทธศักราช 2553 ที่ RDG5030026

8. บรรณานุกรม

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552, มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302)
- [2] American Society of Civil Engineers, 2005, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. (ASCE7-05)
- [3] S.A. Ashford, 2000, Shear Wave Velocity Testing at Chulalongkorn University and SIIT Bangkok, Thailand. Test Report No. TR-2000/15, University of California, San Diego, Department of Structural Engineering, Structural Systems Research Project.
- [4] จิตติ ปาลศรีและ อาณัติ เรืองรัมย์, 2552, ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ค่า N สำหรับการตอกกระบอกผ่าทดสอบ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินในกรุงเทพมหานครและบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [5] ประภาพร จันทะมาศ, 2550, การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบ หลายช่องทางรับสัญญาณกับวิธีวัดจากหลุมเจาะ, คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [6] H.Arai and F.Yamazaki., 2002, Exploration of S-Wave Velocity Structure Using Microtremor Arrays in the Greater Bangkok, Thailand , Earthquake Disaster Mitigation Research Center
- [7] H. Morikawa, S. Sawada, and J. Akamatsu., 2004, A Method to Estimate Phase Velocity of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.94, No.3, pp.961-976
- [8] Y. Nakamura, 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute; 30(1):25–33.