



การประเมินผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหวและการพัฒนาความเร่ง
ตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ

โดย

นายอมรเทพ จิรศักดิ์จ่ารัฐศรี

คุณูปนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การประเมินผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหวและการพัฒนาความเร่ง
ตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ

โดย

นายอมรเทพ จิรศักดิ์จรัสศรี



คุณิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ASSESSMENT OF SEISMIC SITE EFFECTS AND DEVELOPMENT OF
DESIGN RESPONSE SPECTRUM IN BANGKOK BASIN

BY

MR AMORNTEP JIRASAKJAMROONSRI



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY

DEPARTMENT OF ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2017

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คุษฎีนิพนธ์

ของ

นายอมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี


เรื่อง

การประเมินผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหวและการพัฒนาความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
สำหรับออกแบบในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์

เมื่อ วันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2561

ประธานกรรมการสอบคุษฎีนิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ บุญญะกิจกุล)

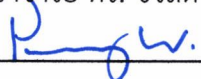
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาคุษฎีนิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร. นคร กุ้วโรตม)


กรรมการสอบคุษฎีนิพนธ์


(ศาสตราจารย์ ดร. ชาลิต ชาลิตร์รักษตระกูล)

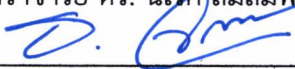
กรรมการสอบคุษฎีนิพนธ์


(ศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย)

กรรมการสอบคุษฎีนิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นเรศ ลิ้มสัมพันธุ์เจริญ)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีร์ เจียรพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหวและ การพัฒนาความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับ ออกแบบในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ
ชื่อผู้เขียน	นายอมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี
ชื่อปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ถ้ามี)	-
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งมุ่งเน้นการศึกษาโครงสร้างชั้นดินระดับลึกสำหรับการสร้างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงสร้าง โดยในส่วนแรกคือการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินด้วยเทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) เพื่อสำรวจค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p) และความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) จากผิวดินถึงระดับชั้นหิน โดยมีตำแหน่งการสำรวจ 170 ตำแหน่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอครอบคลุมพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ วิธีการสำรวจและวิเคราะห์ผลประกอบด้วยวิธี Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (H/V) สำหรับการประเมินค่าคาบอิทธิพลหลัก วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) และวิธี Centerless Circular Array (CCA) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) เพื่อการคำนวณความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกด้วยการคำนวณย้อนกลับ ผลการศึกษาพบว่า บริเวณพื้นที่ใกล้อ่าวไทยและพื้นที่ฝั่งตะวันออกเฉียงใต้มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนสำหรับ 30 เมตรแรก (V_{S30}) ต่ำมาก ประมาณ 97 เมตรต่อวินาที และมีค่าคาบอิทธิพลหลักยาวประมาณ 1.2 วินาที ในขณะที่ค่า V_{S30} สูงกว่า 900 เมตรต่อวินาทีและค่า T_p สั้นกว่า 0.2 วินาที อยู่ในพื้นที่ขอบของแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความเร็วคลื่นเฉือนในช่วง 100 เมตรแรก มีค่าต่ำกว่า 500 เมตรต่อวินาที และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยที่ชั้นดินที่แข็งขึ้นมีค่าประมาณ 1000 เมตรต่อวินาที สำหรับระดับความลึกของชั้นหินสามารถประเมินได้จาก

ระดับที่มีความแตกต่างกันของความเร็วคลื่นเฉือนอย่างชัดเจน ซึ่งความเร็วที่ระดับชั้นหินโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีหรือมากกว่า ความลึกของชั้นหินมีค่าแตกต่างกันโดยมีค่าต่ำกว่า 70 เมตร ในพื้นที่ขอบแอ่ง และมีความลึกถึง 900 เมตรในพื้นที่ส่วนกลางของแอ่งกรุงเทพฯ

ส่วนที่สองของการศึกษาคือการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินเพื่อใช้สำหรับการแบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบโซนย่อยที่สอดคล้องกัน โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้พิจารณาจากการประเมินความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่เป็นไปได้สำหรับแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นค่าความเร่งในรูปแบบของประวัติเวลา (Acceleration Time History) ที่ชั้นหินโผล่ (Rock Outcrop) โดยศึกษาการแพร่กระจายของคลื่นผ่านแบบจำลองชั้นดินด้วยการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear Analysis) สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับป้อนเข้าสู่แบบจำลองชั้นดินถูกเลือกมาจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวและทำการปรับสเกลเพื่อให้ค่าสเปกตรัมผลตอบสนองสอดคล้องกับ Conditional Mean Spectrum (CMS) ที่คาบการสั่น 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, และ 3.0 วินาที โดยมีคาบการเกิดซ้ำที่ 2475 ปี จากนั้นค่าเฉลี่ยของความเร่งเชิงสเปกตรัมถูกนำมาใช้เป็นสเปกตรัมสำหรับออกแบบซึ่งเป็นค่าสูงสุดของแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้น Maximum Credible Earthquake (MCE) สำหรับแต่ละตำแหน่งการศึกษา จากผลการศึกษาค่าความเร็วคลื่นเฉือนและสเปกตรัมความเร่งถูกนำมาใช้พิจารณาตามความคล้ายกันของรูปร่างและพื้นที่ที่อยู่ใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้สามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนย่อยจำนวน 10 โซน โดยค่าสเปกตรัมความเร่งสำหรับแต่ละโซนที่เสนอในการศึกษานี้มีความแตกต่างจากค่าในมาตรฐานการออกแบบในปัจจุบันสำหรับบางพื้นที่ เนื่องจากคุณลักษณะของชั้นดินที่ได้จากการศึกษาใหม่นี้

คำสำคัญ: ผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหว, การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน, แอ่งกรุงเทพฯ, การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน, ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบ, การแบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบโซนย่อย

Dissertation Title	ASSESSMENT OF SEISMIC SITE EFFECTS AND DEVELOPMENT OF DESIGN RESPONSE SPECTRUM IN BANGKOK BASIN
Author	Mr.Amorntep Jirasakjamroonsri
Degree	Doctor of philosophy
Major Field/Faculty/University	Engineering Engineering Thammasat University
Dissertation Advisor	Associate Professor Dr. Nakhorn Poovarodom
Dissertation Co-Advisor (If any)	-
Academic Years	2017

ABSTRACT

In this dissertation, seismic site effects of the Bangkok basin area focusing on deep basin structures were carefully examined in order to establish the spectral accelerations appropriate for design of structures. Investigation of site characteristics was firstly conducted by microtremor observations to explore the site predominant period and shear wave velocity profile from surface to basement rock. Field observations were conducted for 170 sites distributed almost evenly in the Bangkok basin area. The Horizontal-to-Vertical spectral ratio (H/V) method was used to estimate predominant period. The Spatial Autocorrelation (SPAC) and Centerless Circular Array (CCA) methods were applied to determine shear wave velocity profile from phase velocity dispersion curve and inversion analysis. The results showed that the area along the Gulf of Thailand and the south-east part exhibit very low average shear wave velocity for the first 30-m depth (V_{s30}) of 97 m/s and long predominant period (T_p) of 1.2 second, while V_{s30} of higher than 900 m/s and short T_p of 0.2 second were found in the boundary of the basin. Generally, shear wave velocity of the first 100 m were less than 500 m/s. The velocity increased gradually along depth and the underneath layers of stiffer soil exhibit moderate value of about 1000 m/s. The

estimated depth of basement rock could be inferred from the level having clear contrasts of shear wave velocity. The velocity at this level generally changes abruptly to be about 2000 m/s or more. The estimated depth of basement rock varies from less than 70 m near the boundary of the basin to 900 m in the central area.

In the second part, site response analysis was conducted in order to examine the ground response and to propose seismic microzonation accordingly. The ground motions obtained from Probabilistic Seismic Hazard Assessment were input as rock outcrop acceleration time histories and the propagation through the model of soil profiles was analyzed by an equivalent linear analysis. From strong ground motion database, the input motions were selected and scaled to match response spectra with the Conditional Mean Spectrum (CMS) at 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, and 3.0 second, for 2475 years return period. Then the average spectral accelerations were used to evaluate the Maximum Credible Earthquake (MCE) design spectrum for each site. The results of shear wave velocities and spectral accelerations were considered for their similarity of shape and the vicinity area were sub-divided into 10 zones consequently. The proposed spectral acceleration curves for each zone are considerably distinct from the present design standard which was derived based on limited information of site characteristics.

Keywords: Seismic Site Effects, Microtremor Observation, Bangkok Basin, Site Response Analysis, Design Response Spectrum, Seismic Microzonation

กิตติกรรมประกาศ

ดุชฎินิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลงไปได้หากปราศจากความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นคร ภู่วโรดม อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยช่วยเหลือแก้ไขข้อผิดพลาด รวมถึงให้คำแนะนำต่าง ๆ สำหรับการทำดุชฎินิพนธ์ให้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด อีกทั้งขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ, ศ.ดร.ชวลิต ซาลีรักษ์ตระกูล, ศ.ดร.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย และ ผศ.ดร.นเรศ ลิ้มสัมพันธ์เจริญ ที่ให้เกียรติมาเป็นคณะกรรมการสอบดุชฎินิพนธ์ และให้ความคิดเห็น และคำแนะนำต่าง ๆ เพื่อใช้ในการปรับปรุงดุชฎินิพนธ์ให้มีความถูกต้องและมีความสมบูรณ์ นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ Prof. Masato Saitoh และ Assist.Prof. Chandra S Goit อาจารย์มหาวิทยาลัยไซตามะ ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้คำแนะนำและสอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณกิตติศักดิ์ พิทักษ์วงศ์ ที่เป็นคนบุกเบิกการศึกษานี้เป็นคนแรก รวมถึงโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ คุณนันทกร พลินยศ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและแนะนำวิธีการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมถึง วิธีการวิเคราะห์ผล การสร้างแผนที่ และการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในภาคสนาม

ขอขอบพระคุณ คุณณัฐพล มากเทพพงษ์ ที่ให้คำแนะนำด้านการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรม และช่วยเก็บข้อมูลภาคสนามร่วมกับ คุณภคพงศ์ ภัทราคม, คุณวีระ ชูบทอง และ คุณอัศศุทธิ์ นันทยศสกุล อีกทั้งเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่มีส่วนร่วมในการเก็บข้อมูลภาคสนามทุกท่านไม่มากก็น้อยจนกระทั่งงานภาคสนามเสร็จสมบูรณ์ รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าใช้พื้นที่สำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนามมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ และให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาตลอดระยะเวลา 3 ปี รวมถึงคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่เปิดโอกาสให้ได้รับทุนการศึกษาไปทำวิจัยระยะสั้นที่ประเทศญี่ปุ่น เป็นระยะเวลา 2 เดือน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการศึกษามาโดยตลอดจนกระทั่งดุชฎินิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

นายอมรเทพ จิรศักดิ์จรรุญศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตการศึกษา	6
1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษา	7
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง	8
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินและกำลังขยายคลื่น	9
2.2.1 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง	9
2.2.2 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย	11
2.2.3 การศึกษากำลังขยายของคลื่นแผ่นดินไหว	12
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสภาพทางธรณีวิทยาและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน	15

2.4	งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดิน	21
2.4.1	การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น	21
2.4.2	การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ	25
บทที่ 3 วิธีการวิจัย		27
3.1	การวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก	27
3.2	การวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส	29
3.2.1	การวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี Spatial Auto Correlation	30
3.2.2	การวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี Centerless Circular Array	36
3.3	วิธีการลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี Running Variance	39
3.4	การวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก	43
3.5	การวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ	44
3.6	การวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 1 มิติ	47
3.7	การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ	51
3.8	การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ	52
3.8.1	การวิเคราะห์ด้วยวิธี Dynamic Finite Element	53
3.8.1.1	Elementary Boundariies	57
3.8.1.2	Local Boundariies	57
3.8.1.3	Consistent Boundariies	57
3.8.2	การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า	58
3.8.3	การวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น	59
3.9	พื้นที่การศึกษา	60
3.10	เครื่องมือสำหรับการศึกษา	67
3.11	วิธีการดำเนินการศึกษา	69
3.12	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความสอดคล้องของเครื่องมือ	70
3.13	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก	71
3.14	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส	73
3.15	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก	75

3.16	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้น เทียบเท่า 1 มิติ	78
3.16.1	ขั้นตอนการเลือกแผ่นดินไหวสำหรับวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้น ดิน	84
3.16.2	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน	90
3.17	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น	92
3.18	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 มิติ	94
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล		96
4.1	ผลการวิเคราะห์ค่า T_p , V_{S30} , และความลึกของชั้นดิน	96
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{S30} กับ T_p ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ	110
4.3	การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกกับงานวิจัยในอดีต	111
4.4	ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ	113
4.4.1	Transfer Function	113
4.4.2	อัตรากำลังขยายคลื่นของแผ่นดินไหว	116
4.4.3	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	119
4.4.4	การกำหนดค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบใน พื้นที่ย่อย	127
4.5	ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น	137
4.6	ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ	148
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		161
5.1	สรุปผลการศึกษาดังด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน	161
5.1.1	ค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p)	161
5.1.2	ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนจากผิวดินถึงความลึก 30 เมตร (V_{S30})	161
5.1.3	โครงสร้างแอ่งกรุงเทพฯ	162

	5.2 สรุปผลการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1	162
มิติ		
	5.3 สรุปผลการแบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบแบ่งโซนย่อย	162
	5.4 สรุปผลการศึกษาการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น	163
	5.5 สรุปผลการศึกษาการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2	163
มิติ		
	5.6 ข้อเสนอแนะ	164
	รายการอ้างอิง	166
	ประวัติผู้เขียน	173



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา	60
3.2 คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็ว รุ่น VSE-15D-6	67
3.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูล รุ่น McSEIS-MT NEO	68
3.4 Dynamic soil properties สำหรับการชั้นดินที่มีความลึกมากกว่า 300 เมตร	84
3.5 Dynamic soil properties สำหรับการชั้นดินที่มีความลึกน้อยกว่า 300 เมตร	84
3.6 รายละเอียดคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับจังหวัดกรุงเทพมหานคร CMS=2.0 วินาที	87
4.1 ผลการศึกษาความลึกของชั้นหิน , V_{s30} และค่า T_p	96
4.2 รายละเอียดพื้นที่ในแต่ละโซนย่อยจำนวน 10 โซน	128
4.3 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับความหน่วง 2.5%	131
4.4 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับความหน่วง 5.0%	131
4.5 รายละเอียดแบบจำลองชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น	138
4.6 รายละเอียดตำแหน่งที่ใช้สำหรับการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดิน	145
4.7 รายละเอียดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการศึกษา	146
4.8 รายละเอียดของแบบจำลองแองดินตะกอนตัวอย่าง	149

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 Isopach Map of Bangkok Soft Clay	16
2.2 ลักษณะชั้นดินตามความลึก จำนวน 10 กลุ่ม	18
2.3 แผนที่แบ่งประเภทชั้นดินจำนวน 10 ประเภทบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ	19
2.4 ภาพร่าง 3 มิติและภาพตัดขวางบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ	20
2.5 แผนผังสำหรับการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินอย่างเหมาะสมด้วยเกณฑ์ของ (ก) Maximum Shear Strain, และ (ข) Peak Ground Acceleration	25
3.1 ตัวอย่างคลื่น Cosine จำนวน 1 รอบ	30
3.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นแนวขนานกับเส้นทางตรวจวัด	32
3.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นทำมุม θ กับเส้นทางตรวจวัด	32
3.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับเส้นทางตรวจวัด	33
3.5 ความสอดคล้องของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ	33
3.6 รูปแบบการตรวจวัดแบบ Array ด้วยวิธี SPAC	35
3.7 แผนผังแสดงวิธีการคำนวณความเร็วเฟส	36
3.8 แผนผังการวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี CCA (ก) รูปแบบการเก็บข้อมูลสำหรับวิธี CCA, (ข) Theoretical Spectral Ratio สำหรับแบบ Noise Free, (ค) Theoretical Spectral Ratio สำหรับ Noise Inclusive	38
3.9 ข้อมูลการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนพื้นดินในแนวตั้งของ (ก) เครื่องมือวัดชุดที่ 1, (ข) เครื่องมือวัดชุดที่ 2, (ค) เครื่องมือวัดชุดที่ 3 และ (ง) เครื่องมือวัดชุดที่ 4	41
3.10 กราฟ Histogram ของค่าความแปรปรวนจากการสั่นสะเทือนของพื้นดินในแนวตั้งของ (ก) เครื่องมือวัดชุดที่ 1, (ข) เครื่องมือวัดชุดที่ 2, (ค) เครื่องมือวัดชุดที่ 3 และ (ง) เครื่องมือวัดชุดที่ 4	41
3.11 ผลการเปรียบเทียบ (ก) อัตราส่วน Power Spectrum Density จากข้อมูลทั้งหมดซึ่งไม่มีการตัดสัญญาณรบกวน, (ข) อัตราส่วน Power Spectrum Density จากข้อมูลทั้งหมดที่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวน, (ค) อัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณปกติ, และ (ง) ความเร็วเฟสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี CCA	43
3.12 แผนผังการวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณย้อนกลับ	44

3.13	เส้นทางการเดินทางของคลื่นจากแหล่งกำเนิด	45
3.14	แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ	46
3.15	ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบเชิงเส้นเทียบเท่า	47
3.16	แบบจำลองชั้นดิน (ก) แบบจำลองชั้นดินที่มีลักษณะสม่ำเสมอและมีขอบเขตด้านข้างเป็นอนันต์ (ข) แบ่งแบบจำลองชั้นดินออกเป็นชั้นย่อยจำนวนเท่ากับ N	48
3.17	การประมาณด้วยวิธี Forward Difference ของฟังก์ชัน $f(\tilde{x})$	48
3.18	ตัวอย่างของโครงสร้างที่วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 มิติ (ก) กำแพงกันดิน, (ข) เชื้อนดิน, (ค) อุโมงค์	53
3.19	ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างกำแพงกันดิน และ Degree of Freedom ของชั้นส่วนที่ใช้แบบสี่เหลี่ยมและมี 4 โหนด	53
3.20	การแปลงชั้นส่วนสี่เหลี่ยมจากรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอในระบบ x-y ไปยังรูปร่างสี่เหลี่ยมในระบบ s-t	55
3.21	Boundary สำหรับไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 ประเภท (ก) Elementary Boundary, (ข) Local Boundary, และ (ค) Lumped-Parameter Consistent Boundary	58
3.22	แบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน (ก) ตำแหน่งที่เลือกใช้สร้างแบบจำลองเชื้อน, (ข) หน้าตัด 2 มิติของเชื้อน	58
3.23	แผนที่แสดงตำแหน่งการศึกษา	66
3.24	ชุดอุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน	67
3.25	ขั้นตอนการวิเคราะห์ Coherence (ก) ข้อมูลการตรวจวัด 2 ตำแหน่ง, (ข) Spectrum และ Cross-Spectrum, (ค) Coherence และ (ง) Phase Difference (Radian)	71
3.26	ขั้นตอนวิเคราะห์หาค่าคาบอทธิพลหลัก (ก) ข้อมูลการตรวจวัด 3 ทิศทาง, (ข) Fourier Spectrum สำหรับแกน X, (ค) Fourier Spectrum สำหรับแกน Y, (ง) Fourier Spectrum สำหรับแกน Z และ (จ) H/V Spectral Ratio	73
3.27	แผนผังแสดงการวิเคราะห์หาความเร็วเฟสด้วยวิธี CCA (ก) ค่าเฉลี่ยของ Spectral Ratio จากข้อมูลการตรวจวัด (ข) Spectral Ratio ตามทฤษฎี (ค) ความเร็วเฟสสำหรับโครงข่ายที่มีค่ารัศมีเท่ากับ 250 เมตร และ (ง) ความเร็วเฟสรวมสำหรับข้อมูลตัวอย่าง	75
3.28	ตัวอย่างการป้อนแบบจำลองความเร็วเฟส	76
3.29	ตัวอย่างการกำหนดค่าเริ่มต้น	76

3.30 ตัวอย่างการป้อนค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	77
3.31 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ (ก) Dispersion Curve ที่ได้จากการทดลองและการ คำนวณ (ข) ความเร็วคลื่นเฉือน	77
3.32 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของดิน (ก) Modulus of reduction curves, (ข) Damping curves	79
3.33 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Boring Log บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ	80
3.34 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Boring Log บริเวณจังหวัดสมุทรสาคร	81
3.35 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Drilling Log บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ	82
3.36 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Drilling Log บริเวณจังหวัดสมุทรสาคร	83
3.37 ตัวอย่าง Uniform Hazard Spectrum สำหรับแอ่งกรุงเทพฯ	85
3.38 ชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับ Uniform Hazard Spectrum ที่คาบการ สั้นต่าง ๆ	85
3.39 คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกมาใช้สำหรับ CMS=2 วินาที ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร	87
3.40 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับ CMS ที่คาบการสั้น 2.0 วินาที	88
3.41 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับเลือกคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของ พื้นดิน	88
3.42 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข) จังหวัด ปทุมธานี	89
3.43 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดกรุงเทพมหานคร (ข) จังหวัด นครนายก	89
3.44 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดฉะเชิงเทรา (ข) จังหวัดชลบุรี	89
3.45 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดสมุทรปราการ (ข) จังหวัด สมุทรสาคร	90
3.46 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดนครปฐม (ข) จังหวัดราชบุรี	90
3.47 Spectral Acceleration สำหรับคาบการสั้น 2.0 วินาที	91
3.48 Spectral Acceleration สำหรับตำแหน่งที่ศึกษา	91
3.49 แผนผังแสดงขั้นตอนวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และวิธีไม่เชิงเส้นสำหรับการศึกษาส่วนที่ 1	93
3.50 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาและเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลอง แอ่งดินตะกอน 2 มิติ กับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ	95

4.1	แผนที่แสดงความลึกของชั้นหิน	104
4.2	แผนที่แสดงความลึกของชั้นหินและแนวเส้นสำหรับภาพตัดขวาง	105
4.3	แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว A-A' ของแอ่งกรุงเทพฯ	106
4.4	แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว B-B' ของแอ่งกรุงเทพฯ	106
4.5	แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว C-C' ของแอ่งกรุงเทพฯ	107
4.6	แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว D-D' ของแอ่งกรุงเทพฯ	107
4.7	แผนที่แสดงค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p)	108
4.8	แผนที่แสดงค่า V_{S30}	109
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_p ในแนวราบกับค่า V_{S30} ในแนวตั้ง	110
4.10	การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกจากการศึกษานี้กับวิธี F-K (Arai, 2545), (ก) พระนครศรีอยุธยา, (ข) AIT, (ค) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ (ง) สมุทรปราการ	111
4.11	การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกในช่วง 30 เมตรแรกจากการศึกษานี้กับวิธี F-K, Downhole, และ MASW สำหรับตำแหน่ง (ก) AIT, (ข) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	112
4.12	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข) จังหวัดกรุงเทพมหานคร	113
4.13	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดฉะเชิงเทรา (ข) จังหวัดชลบุรี	114
4.14	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดนครปฐม (ข) จังหวัดนครนายก	114
4.15	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดนนทบุรี (ข) จังหวัดเพชรบุรี	114
4.16	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดปราจีนบุรี (ข) จังหวัดปทุมธานี	115
4.17	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดราชบุรี (ข) จังหวัดสมุทรปราการ	115
4.18	ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดสมุทรสาคร (ข) จังหวัดสมุทรสงคราม	115
4.19	ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข) จังหวัดกรุงเทพมหานคร	117
4.20	ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดฉะเชิงเทรา (ข) จังหวัดชลบุรี	117
4.21	ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดนครปฐม (ข) จังหวัดนครนายก	118
4.22	ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดนนทบุรี (ข) จังหวัดเพชรบุรี	118
4.23	ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดปราจีนบุรี (ข) จังหวัดปทุมธานี	118
4.24	ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดราชบุรี (ข) จังหวัดสมุทรปราการ	119

4.25 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดสมุทรสาคร (ข) จังหวัดสมุทรสงคราม	119
4.26 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดพระนครศรีอยุธยา	121
4.27 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดกรุงเทพมหานคร	121
4.28 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดฉะเชิงเทรา	122
4.29 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดชลบุรี	122
4.30 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดนครปฐม	123
4.31 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดนครนายก	123
4.32 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดนนทบุรี	124
4.33 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดเพชรบุรี	124
4.34 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดปราจีนบุรี	125
4.35 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดปทุมธานี	125
4.36 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดราชบุรี	126
4.37 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดสมุทรปราการ	126
4.38 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดสมุทรสาคร	127
4.39 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดสมุทรสงคราม	127
4.40 แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวแบบแบ่งเขตย่อยจำนวน 10 โซน	130
4.41 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 1	132
4.42 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 2	133
4.43 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 3	133
4.44 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 4	134
4.45 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 5	134
4.46 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 6	135
4.47 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 7	135
4.48 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 8	136
4.49 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 9	136
4.50 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 10	137
4.51 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น	138
4.52 คลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด (ก) PGA=0.01g, (ข) PGA=0.02g, (ค) PGA=0.04g, (ง) PGA=0.08g, (จ) PGA=0.10g, และ (ฉ) PGA=0.20g	139

4.53 ผลการเปรียบเทียบ Shear Strain Profile ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ากับวิธีไม่เชิงเส้น โดยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA เท่ากับ (ก) 0.01g, (ข) 0.02g, (ค) 0.04g, (ง) 0.08g, (จ) 0.10g, และ (ฉ) 0.20g	140
4.54 ผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า กับวิธีไม่เชิงเส้น โดยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA เท่ากับ (ก) 0.01g, (ข) 0.02g, (ค) 0.04g, (ง) 0.08g, (จ) 0.10g, และ (ฉ) 0.20g	142
4.55 (ก) ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกทั้ง 5 ตำแหน่ง (ข) ตำแหน่งสถานี	144
4.56 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง (ก) ABSH10, (ข) AICH06, (ค) FKSH14, และ (ง) HRSM05	145
4.57 ผลการเปรียบเทียบ Shear Strain Profile ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ากับวิธีไม่เชิงเส้น ที่ตำแหน่ง (ก) ABSH10, (ข) AICH06, (ค) FKSH14, และ (ง) HRSM05	146
4.58 ผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า กับวิธีไม่เชิงเส้น ที่ตำแหน่ง (ก) ABSH10, (ข) AICH06, (ค) FKSH14, และ (ง) HRSM05	147
4.59 แบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างแบบ 2 มิติ	148
4.60 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง	150
4.61 ผลการเปรียบเทียบค่า S_d ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D	151
4.62 เปรียบเทียบความเร่งตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D ระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10 องศา	153
4.63 เปรียบเทียบความเร่งตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D ระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 30 องศา	154
4.64 เปรียบเทียบความเร่งตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D ระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 45 องศา	155
4.65 เปรียบเทียบค่า S_d สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10 องศา ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D	156
4.66 เปรียบเทียบค่า S_d สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 30 องศา ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D	157
4.67 เปรียบเทียบค่า S_d สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 45 องศา ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D	158

4.68 เปรียบเทียบอัตราการขยายกำลังสำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10, 30, และ 160 องศา ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวระดับต่ำถึงปานกลาง โดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันตก ซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่มีรอยเลื่อนจำนวนมากพาดผ่าน บางรอยเลื่อนยังคงมีพลังอยู่ (Active Fault) และสามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาได้ ทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนได้อย่างมากหากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นในพื้นที่ดังกล่าว นอกจากผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยตรงในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคตะวันตก หรือแม้แต่ทางภาคใต้ของไทย นอกจากนี้ หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นในระยะไกลยังสามารถส่งผลให้พื้นที่ภาคกลางตอนล่าง โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล สามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ รวมถึงอาคารสูงต่าง ๆ เกิดการสั่นไหวมากกว่าปกติ สร้างความตื่นตระหนกให้กับประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวเป็นอย่างมาก จึงเป็นสาเหตุให้นักวิจัยมีความสนใจในการศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นไหวของอาคารสูงและผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับอาคารในพื้นที่นี้มากขึ้น

พื้นที่ภาคกลางตอนล่าง ครอบคลุมพื้นที่ 14 จังหวัด ตั้งอยู่บนที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างซึ่งเป็นแอ่งดินตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากการทับถมกันของดินตะกอนที่ไหลมาจากแม่น้ำหลักสายสำคัญของประเทศไทยจำนวน 4 สาย ได้แก่ แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำบางปะกง ไหลมาจากจากทางภาคเหนือลงสู่อ่าวไทยในทางตอนใต้ จึงทำให้ชั้นดินบริเวณนี้มีลักษณะเป็นดินตะกอนทับถมกันหนาหลายร้อยเมตร และมีชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 15-25 เมตร อยู่ชั้นบนสุด ปัจจุบันพื้นที่นี้ถูกเรียกว่า “แอ่งกรุงเทพฯ (Bangkok Basin)”

ลักษณะทางธรณีวิทยาหรือโครงสร้างของแอ่งกรุงเทพฯ รวมถึงคุณสมบัติเฉพาะตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนด้านบนซึ่งมีความสามารถในการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวที่มาจากระยะไกลให้กลับขึ้นมามีความรุนแรงมากขึ้นได้อีกครั้ง ส่งผลให้อาคารสูงหลายแห่งในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และพื้นที่ใกล้เคียงเกิดการสั่นไหวได้ จนกระทั่งประชาชนสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อาคารสูงได้รับผลกระทบมากกว่าอาคารเตี้ย เนื่องจากอาคารสูงมีคาบการสั่นที่ยาว (Long Natural Period) กว่าอาคารเตี้ย ผนวกกับคุณลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีคาบการสั่นที่ยาวซึ่งบังเอิญสอดคล้องกับค่าคาบการสั่นของอาคารสูงหลายแห่ง ทำให้อาคารสูงเหล่านั้นเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) และมีการเคลื่อนตัวมากกว่าปกติ

เหตุการณ์สำคัญที่ทำให้ประเทศไทยเริ่มให้ความสำคัญและตระหนักถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เริ่มมาจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ริคเตอร์ ซึ่งเกิดต่อเนื่องกันจำนวน 3 ครั้งบริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี ในช่วงวันที่ 22-24 เมษายน 2526 ผลกระทบที่เกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนี้ พบว่า นอกจากเขื่อนศรีนครินทร์และพื้นที่อื่นในจังหวัดกาญจนบุรีและพื้นที่ใกล้เคียงในภาคตะวันตกที่ได้รับผลกระทบและรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแล้ว พื้นที่ภาคกลางโดยเฉพาะกรุงเทพมหานครและปริมณฑลยังสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน ถึงแม้ว่าอยู่ห่างจากพื้นที่เกิดเหตุมากกว่า 150 กิโลเมตร หลังจากเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นที่กรุงเม็กซิโกซิตีซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศเม็กซิโกวันที่ 19 กันยายน 2528 ขนาด 8.0 M_w เหตุการณ์ในครั้งนั้นส่งผลให้อาคารบ้านเรือนต่าง ๆ ในกรุงเม็กซิโกซิตีเสียหายเป็นจำนวนมาก และมีผู้เสียชีวิตจากเหตุการณ์นี้มากกว่าหนึ่งหมื่นคน ซึ่งพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนพื้นที่ของทะเลสาบเก่า ซึ่งมีชั้นดินตะกอนทับถมกันและมีชั้นดินอ่อนหนาถึงประมาณ 60 เมตร ทำให้สามารถขยายแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้มากกว่าปกติถึง 3-4 เท่า ในขณะที่พื้นที่ที่อยู่ใกล้กับจุดเกิดเหตุแผ่นดินไหว ซึ่งไม่ได้ตั้งอยู่บนทะเลสาบเก่ากลับได้รับผลกระทบและมีความเสียหายน้อยกว่าพื้นที่ในกรุงเม็กซิโกซิตี จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี และกรุงเม็กซิโกซิตี ส่งผลให้นักวิจัยในประเทศไทยเริ่มให้ความสนใจในการศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เนื่องจากพื้นที่นี้ตั้งอยู่บนชั้นดินตะกอนที่ทับถมกันหนาหลายร้อยเมตรและมีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 15-25 เมตร ซึ่งมีความสามารถในการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวให้มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นได้ ต่อมาในวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ถึง 6.3 ขึ้นในพื้นที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย สร้างความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือนจำนวนมาก ซึ่งถือเป็นความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ของประเทศไทย และจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในครั้งนี้อาการรุนแรงที่เกิดขึ้นส่งผลมาถึงพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีอาคารสูงหลายแห่งรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นและเกิดการสั่นไหวมากกว่าปกติ รวมถึงประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวต่าง ๆ ในอดีตที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โดยเฉพาะกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นที่ตั้งของอาคารสูงจำนวนมากมีความเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ระยะไกลได้ ทำให้นักวิจัยเริ่มให้ความสำคัญกับการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างชั้นดิน (Soil Structures), คุณลักษณะของชั้นดิน (Site Characteristics) รวมถึงลักษณะของการขยายความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Site Amplification Characteristics) ในพื้นที่ดังกล่าวมากขึ้น เพื่อใช้สำหรับการวางแผนออกแบบอาคารต่าง ๆ ให้มีความสามารถในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ดีและเหมาะสมกับแต่ละ

พื้นที่มากยิ่งขึ้น เนื่องจาก พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นพื้นที่ที่มีความสำคัญทั้งในเรื่องเศรษฐกิจของประเทศ และมีประชาชนจำนวนมากอาศัยอยู่ รวมถึงโครงการสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ และอาคารสูงมีการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน

จากข้อจำกัดของข้อมูลและปริมาณที่ไม่เพียงพอเกี่ยวกับผลการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างและคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ในอดีต ทำให้การศึกษาลดตอบสนองของชั้นดินรวมถึงลักษณะการขยายความรุนแรงของแผ่นดินไหวในอดีตยังมีความไม่สมบูรณ์ ซึ่งไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมหรือความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม นอกจากนี้ ข้อมูลของการเจาะสำรวจชั้นดินที่มีความลึกหลายร้อยเมตร หรือลึกถึงระดับของชั้นหินยังมีปริมาณน้อย ทำให้ช่วงแรกของการศึกษาลดตอบสนองของชั้นดินกระทำได้เพียงการศึกษาลักษณะและความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้โดยใช้ข้อมูลของชั้นดินเท่าที่มีการเก็บบันทึกไว้ ซึ่งมีความลึกที่ไม่มากมาเป็นตัวแทนในการศึกษาและนำมาอธิบายพฤติกรรมของชั้นดินที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ส่งผลให้ผลการศึกษาที่ได้ส่วนใหญ่อาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินบริเวณดังกล่าวได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมเท่าที่ควร (Asford, S.A. และคณะ, 2540)

หลังจากนั้นเป็นต้นมา นักวิจัยได้ให้ความสนใจต่อการศึกษาโครงสร้างชั้นดิน รวมถึงศึกษาลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ มากขึ้น เช่น การสำรวจโครงสร้างชั้นดินในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โดยไม่ต้องทำการขุดเจาะสำรวจชั้นดิน ด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) ซึ่งสามารถประเมินโครงสร้างชั้นดินด้วยพารามิเตอร์ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity, V_s) ได้ถึงระดับความลึกของชั้นหินจำนวน 4 ตำแหน่ง (Arai, H., Yamazaki, F., 2545) แต่เนื่องจากตำแหน่งการศึกษาที่มีจำนวนไม่มาก ทำให้มีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยเทคนิคเดียวกันเพื่อให้มีจำนวนตำแหน่งการศึกษาคอบคลุมพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ มากขึ้น (กิตติศักดิ์, 2553; นนทกร, 2555 และ อมรเทพ, 2556) จากผลการศึกษาต่าง ๆ ทำให้ทราบลักษณะโครงสร้างชั้นดินหรือความเร็วคลื่นเฉือนในช่วง 100 เมตรแรก แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาลดตอบสนองของชั้นดินและลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวจำเป็นต้องมีโครงสร้างชั้นดินที่มีความลึกหลายร้อยเมตร หรือมีความลึกถึงระดับของชั้นหิน เนื่องจากแบบจำลองโครงสร้างชั้นดินมีอิทธิพลโดยตรงต่อลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหว (อมรเทพ และนคร, 2557)

ดังนั้น การให้ความสำคัญต่อการศึกษาคูณลักษณะของชั้นดิน รวมถึงโครงสร้างของชั้นดินด้วยพารามิเตอร์ของความเร็วคลื่นเฉือน และระดับความลึกของชั้นหิน มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ในการประเมินผลตอบสนองของชั้นดิน และลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้สำหรับการปรับปรุงมาตรฐานการ

ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โดยเฉพาะในส่วนของ การสร้างความเร่งตอเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบให้มีความถูกต้องและเหมาะสม เนื่องจาก ข้อมูลโครงสร้างชั้นดินที่นำมาใช้ในการศึกษามีความสมบูรณ์มากขึ้น

สำหรับข้อมูลที่มีสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินได้แก่ ข้อมูล ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินแต่ละประเภท และคลื่น แผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่สำหรับป้อนเข้าสู่แบบจำลองชั้นดิน ซึ่งข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือน ตามความลึก ได้มีการศึกษากันมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้ว ก่อนหน้า สำหรับคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินส่วนใหญ่ได้มาจากการขุดเจาะสำรวจชั้นดิน และ การนำตัวอย่างดินไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งปัจจุบันมีผลการศึกษานี้จำนวนไม่มากนัก และยังเป็น คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนช่วง 30-60 เมตรแรกเท่านั้น (Teachavorasinskun S., 2545 และ Likitlersuang S., 2556) รวมถึงการขุดเจาะสำรวจเพื่อให้ได้คุณสมบัติของชั้นดินที่ระดับลึกหลายร้อย เมตร หรือลึกถึงระดับชั้นหิน ยังคงมีจำนวนไม่มากในปัจจุบัน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555) จึงมี ความจำเป็นต้องเลือกใช้คุณสมบัติของชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในแต่ละ พื้นที่อ้างอิงจากข้อมูลการสำรวจเท่าที่มีอยู่ในปัจจุบันเท่านั้น นอกจากนี้ การเลือกคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับป้อนเข้าสู่แบบจำลองชั้นดิน จะต้องเลือกให้มีความเหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ในกรุงเทพฯ ซึ่งได้จากการศึกษาความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในช่วงคาบการเกิดซ้ำ 2475 ปี หรือมี โอกาส 2% ใน 50 ปี โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกจะต้องมีความเหมาะสมกับแต่ละคาบการสั่นต่าง ๆ เนื่องจากแต่ละคาบการสั่นถูกควบคุมด้วยเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

นอกจากข้อมูลต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ ผลตอบสนองของชั้นดินแล้ว ในปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินมีอยู่ 3 วิธี ได้แก่ วิธี เชิงเส้น (Linear Analysis), วิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear Analysis) และวิธีไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis) ซึ่งวิธีที่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีเชิงเส้นเทียบเท่า เนื่องจากง่ายต่อการศึกษา รวมถึงมีฐานข้อมูลของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินแต่ละประเภทให้ เลือกใช้จำนวนมาก แต่อาจมีข้อจำกัดบางประการ ทำให้ปัจจุบันนักวิจัยเริ่มหันมาใช้วิธีไม่เชิงเส้นใน การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของ ชั้นดินได้สมจริงมากกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า แต่อาจต้องการข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์ที่ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับปัญหาที่สนใจแล้ว อีกปัจจัยที่มีความสำคัญคือ แบบจำลองชั้นดินที่ใช้สำหรับการศึกษา ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ, 2 มิติ และ 3 มิติ นักวิจัยจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องการศึกษา ซึ่งแบบจำลองแต่ละประเภท มีสมมติฐานและความซับซ้อนของโครงสร้างชั้นดินที่แตกต่างกัน

ดังนั้น การวิเคราะห์ผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อแผ่นดินไหวและการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินให้มีความถูกต้องและเหมาะสมกับแต่ละพื้นที่จำเป็นต้องมีการศึกษาคูณลักษณะของชั้นดินให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งประกอบด้วย ค่าคาบอิทธิพลหลัก และโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกถึงระดับชั้นหิน รวมถึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน และรูปแบบของแบบจำลองชั้นดินให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่สนใจศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดิน รวมถึงรูปร่างของแอ่งกรุงเทพฯ ด้วยพารามิเตอร์ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) และระดับความลึกของชั้นหินจากเทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation)
2. เพื่อวิเคราะห์ค่าคาบอิทธิพลหลักของชั้นดิน (Predominant Period, T_p) ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ
3. เพื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) สำหรับใช้ในการแบ่งประเภทของชั้นดิน ตามมาตรฐาน NEHRP (BSSC, 2537)
4. เพื่อศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินโดยเฉพาะความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, S_a) บนพื้นดินสำหรับการนำไปใช้ออกแบบอาคารตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยพ.1302)
5. เพื่อจัดทำแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบโซนย่อย (Seismic Microzonation Map) ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ตามลักษณะของค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการนำไปใช้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้มีความเหมาะสมกับแต่ละพื้นที่มากขึ้น
6. เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยพ.1302) ในส่วนของค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (Design Response Spectrum) ให้มีความถูกต้องเหมาะสม จากข้อมูลที่มีความสมบูรณ์มากกว่าในอดีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) ในพื้นที่ภาคกลางตอนล่างตั้งแต่ละติจูดที่ 13.028452° ถึง 14.361008° และลองจิจูดที่ 99.573335° ถึง 101.433321° โดยมีพื้นที่โดยประมาณ 17,500 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุม 14 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร ฉะเชิงเทรา นครปฐม นครนายก เพชรบุรี ปราจีนบุรี ปทุมธานี ราชบุรี สมุทรสาคร สมุทรสงคราม สมุทรปราการ และจังหวัดชลบุรี โดยมีตำแหน่งการศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 170 ตำแหน่ง
2. ทำการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง (Single Point Microtremor) สำหรับการประเมินค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p) ของชั้นดิน ด้วยวิธี Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (H/V Ratio)
3. ทำการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor) ขนาดใหญ่ สำหรับการประเมินค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ด้วยวิธี Spatial Auto Correlation (SPAC) และวิธี Centerless-Circular Array (CCA) จากนั้นประเมินโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินด้วยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis)
4. ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและใช้แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ เพื่อประมาณค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ และอัตราการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหว
5. ทำการสร้างแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบโซนย่อย (Seismic Microzonation Map) ด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p), ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}), ความลึกของระดับชั้นหิน (Bedrock Depth)
6. ทำการแบ่งเขตแผ่นดินไหวออกเป็นโซนย่อยตามลักษณะความคล้ายกันของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมและความใกล้เคียงกันของพื้นที่ เพื่อใช้เป็นตัวแทนสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้มีความเหมาะสมในแต่ละโซนย่อย

1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษา

1. ทำให้ทราบโครงสร้างชั้นดินและระดับความลึกของชั้นหินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิคการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) ซึ่งมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินรวมถึงลักษณะการขยายกำลังเนื่องจากแผ่นดินไหว
2. ทำให้ทราบค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) ในแต่ละพื้นที่ของแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้ในการแบ่งประเภทของชั้นดินตามมาตรฐาน NEHRP (BSSC, 2537)
3. ทำให้ทราบค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p) ในแต่ละพื้นที่ของแอ่งกรุงเทพฯ
4. ทำให้ทราบค่าความเร่งผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ที่มีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในอดีต ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวในอนาคต
5. ทำให้ได้แผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบโซนอ่อนในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งแบ่งตามลักษณะความคล้ายกันของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมและความใกล้เคียงกันของพื้นที่ ทำให้การออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

คลื่นแผ่นดินไหวจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนตัวผ่านสภาพธรณีต่าง ๆ จนกระทั่งถึงผิวดินบริเวณที่ตั้งของอาคาร เส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจะมีผลอย่างมากในการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของคลื่น โดยเป็นที่เข้าใจกันทั่วไปว่า ชั้นดินหนา มักขยายขนาดความรุนแรงของคลื่นได้ เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ Mexico City เมื่อ 19 กันยายน 2528 เป็นตัวอย่างสำคัญของความเสียหายรุนแรงจากแผ่นดินไหวระยะไกลที่เกิดขึ้นและมีการขยายระดับการสั่นสะเทือนเนื่องจากชั้นดินอ่อน Seed และคณะ ปี 2530 อธิบายว่าเมืองเม็กซิโกซิตีตั้งอยู่บนชั้นดินตะกอนหนาเหนือชั้นหิน โดยฝั่งทางด้านทิศตะวันตกของเมืองตั้งอยู่บนแนวขอบของทะเลสาบเก่า ส่วนทางฝั่งตะวันออกตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของทะเลสาบเก่า จากผลการสำรวจพบว่า ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity, V_s) บริเวณกลางทะเลสาบเก่ามีค่าต่ำประมาณ 40 ถึง 90 เมตรต่อวินาที ในขณะที่บริเวณที่อยู่เหนือชั้นหินแข็งมีค่า V_s อยู่ในช่วง 500 เมตรต่อวินาที หรือมากกว่า จากการศึกษาพบว่า ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวได้เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับของคลื่นแผ่นดินไหว (Multi Reflection Phenomenon) ซึ่งในชั้นดินอ่อนนั้นคลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปด้านบนได้ง่ายกว่า ในขณะที่ชั้นดินแข็งจะมีการสะท้อนกลับของคลื่น ทำให้เกิดการดักคลื่นแผ่นดินไหวไว้และสามารถทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งสามารถขยายขนาดของการสั่นสะเทือนให้สูงขึ้นไปได้ รวมถึงทำให้ระยะเวลาในการสั่นยาวนานขึ้น โดยลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจพบบนชั้นดินอ่อนมีคาบการสั่นยาวประมาณ 2 วินาที และมีขนาดสูงสุดมากกว่าค่าที่ตรวจวัดบนชั้นดินแข็งประมาณ 5 เท่า ผลการขยายคลื่นแบบนี้พบอีกครั้งในเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อ 19 ตุลาคม 2532 ที่เมือง Loma Prieta, California โดยความเสียหายหลักเกิดขึ้นบริเวณอ่าว San Francisco ซึ่งเป็นดินตะกอนหนาเช่นกัน

นอกจากปัจจัยด้านการขยายคลื่นเนื่องจากชั้นดินอ่อนที่เกิดจากคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งแล้ว ปัจจัยที่สำคัญที่อาจทำให้คลื่นแผ่นดินไหวมีระดับรุนแรงเพิ่มขึ้นได้แก่ ผลจากสภาพภูมิประเทศ (Topographic Effect) และผลเนื่องจากขอบของแอ่งชั้นดิน (Basin Edge Effect) Geli และคณะ ปี 2531 ได้รวบรวมผลจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศและการคำนวณเปรียบเทียบ โดยสรุปชัดเจนว่าการสั่นสะเทือนจะถูกขยายตัวได้ที่บริเวณยอดของเนินสูงซึ่งคาบการสั่นสามารถทำนายได้จากการคำนวณแต่ขนาดการขยายคลื่นไม่สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ Chávez-García และคณะ (2539, 2540) ทำการเปรียบเทียบผลจากการวัดและ

การคำนวณ ซึ่งจากข้อมูลแผ่นดินไหวเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี H/V Spectral Ratio ให้ระดับการขยายคลื่นใกล้เคียงกับการคำนวณ และสามารถโต้แย้งข้อสรุปของ Geli และคณะ (2531) ได้ เนื่องจากผลการศึกษาของ Geli อาจได้รับผลกระทบจากจุดอ้างอิงที่ไม่ถูกต้อง จึงเสนอว่า วิธี H/V Spectral Ratio อาจใช้เป็นแนวทางในการประเมินผลจากสภาพภูมิประเทศได้

ผลการศึกษาของ Stewart และคณะ (2544, 2548) แสดงข้อมูลการศึกษาผลของความหนาของชั้นดินถึงด้านล่างแอ่งภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งพบว่า คลื่นแผ่นดินไหวอาจถูกจำกัดไว้และสะท้อนภายในแอ่ง ทำให้อาจเพิ่มขนาดของคลื่นได้ประมาณ 50% ในช่วงคาบการสั่นที่ยาวกว่า 1 วินาทีและระยะเวลาการสั่นอาจยาวได้มากกว่าเดิมเป็นเท่าตัว และสรุปว่ากำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความลึกของแอ่งเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ งานวิจัยใหม่เกี่ยวกับผลของแอ่งชั้นดินได้รับความสนใจในการศึกษามากขึ้น โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ทั่วโลก เช่น Los Angeles California San Francisco ในสหรัฐอเมริกา Grenoble ในฝรั่งเศส Ashigara Osaka และ Sendai ในประเทศญี่ปุ่น (อ้างอิงใน Manakou และคณะ 2553) รวมทั้งอีกหลายเมืองในประเทศ Greece (Apostolidis และคณะ 2549, Manakou และคณะ 2553) โดยมีการสำรวจและสร้างแบบจำลองเป็นแอ่งชั้นดินด้วยแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อให้ผลการศึกษาที่มีความสมจริงมากขึ้น เนื่องจากเมืองเหล่านี้ตั้งอยู่บนที่ราบซึ่งเป็นแอ่งดินอ่อนและได้รับผลกระทบจากลักษณะของแอ่ง

2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินและกำลังขยายคลื่น

2.2.1 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง

ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน อาจทำได้โดยการเจาะสำรวจภาคสนาม (Borehole Method) ซึ่งสามารถได้ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ค่อนข้างแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการเจาะสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ การศึกษาอีกวิธีที่สามารถทำได้คือ ใช้การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจากแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดิน หรือจากแรงต่าง ๆ บนผิวดิน เป็นต้น การตรวจวัดนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดในระดับ Micron และสามารถใช้งานได้แม้ในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของชั้นดินด้วยค่าต่ำ ๆ วิธีนี้เรียกว่า Microtremor ซึ่งเสนอโดย Kannai และ Tanaka (อ้างอิงใน Tokimatsu, 2540) โดยมีแนวคิดที่ว่า แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อชั้นดินมีลักษณะแบบสุ่ม และชั้นดินมีคุณสมบัติทางพลศาสตร์เฉพาะตัว ดังนั้นเมื่อตรวจวัดผลการสั่นสะเทือนโดยแรงดังกล่าวแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแปลงสัญญาณวัดให้อยู่ในรูปของการผสมกันของความถี่หลาย ๆ ค่า เรียกว่า Fourier Amplitude Spectrum และกราฟ

ความสัมพันธ์ของ Fourier Amplitude กับความถี่ จะพบเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งแสดงถึงความถี่หลักในการสั่นหรือ Predominant Frequency ของชั้นดิน เนื่องจากความสั่นไหวในการปฏิบัติงานเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน จึงได้มีการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ ของวิธี Microtremor อย่างต่อเนื่อง Nakamura (2532) ได้แก้ไขข้อขัดแย้งของวิธีนี้ที่ว่า การตรวจวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบนั้นจะแทนคุณลักษณะของดินบริเวณแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวไม่ใช่คุณลักษณะของดินที่บริเวณตรวจวัด เขาจึงได้เสนอวิธีชื่อ H/V Spectrum Ratio โดยทำการลดผลของคุณลักษณะของดินบริเวณแหล่งกำเนิดด้วยการหารค่า Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวราบด้วย Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง และมีสมมติฐาน คือ

1. Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลักคือ คลื่นเฉือน (Shear Wave)
2. การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Vertical Component) จะไม่มีการขยายในชั้นดินอ่อน โดยจะมีเพียง การสั่นสะเทือนในแนวราบ (Horizontal Component) เท่านั้นที่มีการขยาย
3. ไม่มีการขยายคลื่นในทุก ทิศทางในชั้นหิน
4. Rayleigh Wave ถูกสมมุติฐานเป็นคลื่นรบกวน

Nakamura แสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio เกือบจะเท่ากับ S-Wave Transfer Function ระหว่างพื้นดินและชั้นหินด้านล่าง กล่าวคือ H/V Peak Period คือ คาบธรรมชาติของที่ตั้งและค่าตอบสนองสูงสุดคือ ค่าการขยายคลื่น (Amplification Factor) ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การเจาะสำรวจดิน จึงเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดในการใช้งาน วิธีนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายแม้จะขาดทฤษฎีสนับสนุนอย่างชัดเจนก็ตาม

หลังจากปี 2532 ที่ Nakamura เสนอวิธี H/V Spectrum Ratio ก็ยังมีข้อโต้แย้งกันอยู่เกี่ยวกับธรรมชาติของ Microtremor นักวิจัยบางคนยืนยันว่า Microtremor ประกอบด้วยคลื่นพื้นฐานคือ Rayleigh Wave ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานของ Nakamura แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคของ Nakamura ได้นำไปใช้และเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น

Ohmachi (2534) ได้แปลผลที่ได้จากการตรวจวัด Microtremor ในพื้นที่ของซานฟรานซิสโก รวมทั้งในปี 2535 Lermo ได้ใช้วิธี H/V Spectrum Ratio ทำการวิเคราะห์บันทึกข้อมูลของ Microtremor ใน 4 เมืองของเม็กซิโกและผลที่ได้ก็สอดคล้องกับ Spectrum Ratio โดยวิธีการวัดความเร็วแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้

Lermo และ Chavez-Garcia (2536, 2537) แสดงให้เห็นว่า H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura เป็นวิธีการทำนายผลของคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง (Site Effect) แต่อย่างไรก็ตาม สามารถทำนายได้เพียง Fundamental Resonance Peak ของ Transfer Function

จากเหตุผลนี้เป็นการสนับสนุนแนวคิดที่ว่าเทคนิคของ Nakamura ว่ามีประสิทธิภาพในการหาผลของคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

Konno และ Ohmachi (2541) เสนอว่า Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลักคือ Surface Wave อย่างไรก็ตามพวกเขาก็ยืนยันว่า H/V Spectrum Ratio ที่เสนอโดย Nakamura ยังเป็นตัวแทนของลักษณะของสถานที่ได้ โดยการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ Microtremor กับสเปกตรัมของคลื่นหลัก Rayleigh Wave และวิธีเจาะสำรวจดิน (Downhole Method) ซึ่งผลของทั้ง 3 วิธีสามารถเทียบเคียงกันได้

จากงานวิจัยต่าง ๆ ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura มีความสามารถในการหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant period) ของสถานที่ได้ รวมทั้งวิธีดังกล่าวยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.2.2 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย

โครงสร้างชั้นดินโดยเฉพาะโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวได้ ซึ่งปัจจุบันข้อมูลดังกล่าวสามารถได้มาโดยการขุดเจาะสำรวจชั้นดิน เป็นวิธีที่มีความแม่นยำที่สุด แต่ข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน อย่างไรก็ตาม เทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการประเมินโครงสร้างชั้นดินจากข้อมูลความเร็วเฟส (Phase Velocity) เนื่องจากการทดสอบไม่จำเป็นต้องขุดเจาะสำรวจดิน จึงไม่ทำให้พื้นที่เกิดความเสียหาย รวมถึงใช้เวลาไม่นานในการทดสอบ ในอดีตวิธีที่ได้รับความนิยมใช้ในการคำนวณค่าความเร็วเฟสคือ วิธี Spatial Spatial Auto-Correlation Coefficient (SPAC) ซึ่งเสนอโดย Aki ในปีพ.ศ. 2500 วิธี SPAC คือการหาความเร็วเฟสของคลื่นที่ผิวดินโดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินในสภาพธรรมชาติ (โดยไม่มีการกระตุ้น) โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินมีองค์ประกอบหลักคือโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh การตรวจวัดต้องเป็นแบบหลายตำแหน่งพร้อมกัน (Array) และนำข้อมูลที่วัดพร้อมกันมาหาความสัมพันธ์ (Coherency) ในด้านระยะทางและความถี่ของคลื่น จากนั้นนิยามสัมประสิทธิ์ Spatial Autocorrelation ในรูปของค่าเฉลี่ยของ Coherency จากคลื่นในทิศทางต่าง ๆ และด้วยคุณสมบัติที่ความเร็วเฟสมีค่าต่างกันตามความถี่ของคลื่น (Dispersion) จะได้ว่าสัมประสิทธิ์ Spatial Autocorrelation เป็นฟังก์ชันกับความถี่และความเร็วเฟสของคลื่นด้วยรัศมีของการตรวจวัดที่ Array นั้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Dispersion Curve ของชั้นดินขึ้นมา และค่าความเร็วคลื่นเฉือนสามารถวิเคราะห์ได้ต่อไปด้วยการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) สำหรับการสร้างแบบจำลองของชั้นดินตามความลึกสำหรับบริเวณที่ทำการศึกษา

หลังจากวิธี SPAC ได้ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายแต่อาจยังมีจุดที่ต้องได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น ในปี 2547 Morikawa ได้ทำการเสนอวิธี 2sSPAC ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวิธี SPAC โดยใช้วิธีการตรวจวัดพร้อมกันครั้งละ 2 จุดพร้อมกันโดยกำหนดจุดคงที่ไว้จุดหนึ่งแล้วทำการเปลี่ยนจุดวัดจนครบทุกตำแหน่งซึ่งจะประหยัดทั้งเครื่องมือและจำนวนคนที่ทำการตรวจวัดและการตรวจวัดใช้คาบยาวอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที ผลการศึกษาของ Morikawa แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟส กับ ความถี่ (Dispersion Curve) ผลการศึกษาด้วยวิธี 2sSPAC เปรียบเทียบกับวิธี SPAC และวิธี Frequency-Wave Number (F-K) พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี 2sSPAC ที่ใช้วัดความเร็วเฟสที่เกิดจาก Rayleigh Wave ซึ่งต่อมา Abdullah M. Alsamani M. (2547) ได้ใช้วิธี SPAC และ 2sSPAC ทำการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่เมืองซีกูบะ ประเทศญี่ปุ่น โดยความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการวัด Microtremor มีค่าสอดคล้องกับวิธีเจาะสำรวจดิน (PS Logging) และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธี SPAC และวิธี 2sSPAC มีค่าสอดคล้องกัน

นอกจากการคำนวณความเร็วเฟสด้วยวิธี SPAC หรือ 2sSPAC แล้ว ในปี 2549 Ikuo Cho, Taku Tada และ Yuzo Shinozaki ได้ทำการศึกษาวิธีการใหม่สำหรับการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนพื้นดิน โดยวิธีที่ใช้คือ Centerless Circular Array (CCA) ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้เพื่อประเมินค่าความเร็วเฟสเช่นเดียวกับวิธี SPAC โดยหลักการของวิธี CCA คือ การตรวจวัดองค์ประกอบของคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินในแนวตั้งเช่นเดียวกับวิธี SPAC สำหรับการนำไปประเมินค่าความเร็วเฟสของคลื่น Rayleigh ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ ค่าความเร็วเฟสที่คำนวณได้จากวิธีนี้จะมีค่าความยาวคลื่นที่มากกว่าวิธี SPAC หรือ 2sSPAC หลายเท่าถึงแม้ว่าขนาดของ Array จะมีขนาดที่เท่ากันก็ตาม

2.2.3 การศึกษากำลังขยายของคลื่นแผ่นดินไหว

หลังเกิดแผ่นดินไหวใหญ่ที่ Mexico City นักวิจัยจำนวนมากได้ให้ความสนใจกับโอกาสในการเกิดภัยพิบัติในลักษณะดังกล่าวสำหรับบริเวณอื่น ๆ ทั่วโลก Thenhaus P.C. (2529) ได้เสนอบทความเกี่ยวกับความเสี่ยงภัยของกรุงเทพมหานครเนื่องจากแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่มีศูนย์กลางระยะไกลไปหลายร้อยกิโลเมตร และเสนอข้อสังเกตว่า ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่สำคัญที่สุดสำหรับกรุงเทพมหานครมาจากแผ่นดินไหวระยะไกล สภาพชั้นดินของกรุงเทพมหานครเป็นชั้นดินอ่อนหนา ดังนั้น แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่มีคาบในการสั่นไหวค่อนข้างยาวโดยจะส่งผลกระทบต่ออาคารสูง

นอกจากนี้ งานวิจัยด้านกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวในกรุงเทพมหานคร ได้มีการเริ่มต้นศึกษาโดย Ashford และคณะ (2540) โดยทำการจำลองชั้นดินสำหรับกรุงเทพมหานคร ให้มี

ค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกรูปแบบต่าง ๆ โดยประเมินความเร็วคลื่นเฉือนได้ลึกประมาณ 80 เมตรจากผิวดิน และสมมติให้มีชั้นดินคล้ายหินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนเท่ากับ 900 เมตรต่อวินาทีอยู่ที่ระดับต่าง ๆ ซึ่งจำแนกเป็น 3 แบบคือ ที่ระดับ 80 เมตร 160 เมตร และ 300 เมตร และจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวสมมติที่ระดับความรุนแรง 0.02g ถึง 0.10g พบว่าเกิดการขยายคลื่นที่พื้นดินประมาณ 3 ถึง 7 เท่าตัว โดยผลตอบสนองสูงสุดเกิดที่คาบการสั่นประมาณ 1 วินาที ซึ่งผลของระดับชั้นที่มีคุณสมบัติคล้ายหินมีผลเล็กน้อยต่อความเร่งสูงสุดที่พื้นผิว แต่มีผลทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในช่วงคาบการสั่นมากกว่า 1.5 วินาทีสูงขึ้น

ในขณะที่เทคนิคการวัดคลื่นตามธรรมชาติขนาดเล็กที่ผิวดิน (Microtremor) ได้เริ่มมีการศึกษาในประเทศ โดย Tuladhar R. (2545) ได้สร้างแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation Map) ของกรุงเทพมหานครโดยใช้การตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด จำนวน 150 ตำแหน่งในกรุงเทพมหานคร และใช้วิธี H/V Spectrum Ratio สำหรับการหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p) ของการสั่นที่พื้นดินในแต่ละตำแหน่งที่ได้ คำนวณ ผลการศึกษาพบว่า บริเวณพื้นที่ใกล้กับปากอ่าวไทยซึ่งโครงสร้างชั้นดินส่วนใหญ่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อน มีค่าคาบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.8-1.2 วินาที ส่วนพื้นที่ที่อยู่เหนือขึ้นไปพบว่าค่าคาบการสั่นจะค่อย ๆ สั้นลง จนกระทั่งมีค่าคาบการสั่นสั้นกว่า 0.4 วินาที นอกจากนี้พื้นที่บริเวณแอ่งกรุงเทพมหานครสามารถแบ่งออกเป็น 4 โซน ได้แก่ โซน 1 มีค่าคาบอิทธิพลหลักต่ำกว่า 0.4 วินาที, โซน 2 ค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.4-0.6 วินาที, โซน 3 ค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.6-0.8 วินาที และ โซน 4 ค่าคาบอิทธิพลหลักสูงกว่า 0.8 วินาที

จากนั้น Arai และ Yamazaki (2545) ได้สำรวจค่าความเร็วคลื่นเฉือนถึงระดับชั้นหินใต้ชั้นดินกรุงเทพมหานครโดยการสำรวจด้วยเทคนิค Microtremor และวิเคราะห์ด้วยวิธี Frequency-Wave Number (F-K method) ใน 4 ตำแหน่งสำรวจ ผลการศึกษาพบว่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับชั้นหินมีค่าประมาณ 2,000 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความลึกประมาณ 400 ถึง 670 เมตร

Tuladhar R. ปี 2546 ได้ทำการจำแนกคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) ซึ่งประเมินจากสมการโดยประมาณจาก ค่า N-SPT และ S_u (Undrained Shear Strength) ที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน จากการศึกษาจำแนกประเภทของดินออกเป็น 10 ประเภท และทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินด้วยการวิเคราะห์เชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ (One Dimensional Equivalent Linear Analysis) เพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นในแต่ละพื้นที่ ผลการศึกษาพบว่า ชั้นดินเหนียวหนาบริเวณใกล้อ่าวไทย มีกำลังขยายถึงประมาณ 4-5 เท่าที่ค่าคาบการสั่นประมาณ 1.0 ถึง 1.5 วินาที ส่วนบริเวณอื่นที่มีความหนาชั้นดินเหนียวลดลงจะมีกำลังขยายน้อยกว่าและค่าคาบจะมีค่าสั้นลง

นอกจากนี้ กิตติศักดิ์ พิทักษ์ (2553) ได้ทำการสำรวจโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก โดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน และวิเคราะห์ผลด้วยวิธี 2sSPAC และค่าคาบอทธิพลหลัก ด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน จำนวน 1 ตำแหน่ง และวิเคราะห์ผลด้วยวิธี Horizontal to Vertical Spectral Ratio (H/V Spectral Ratio) ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ตำแหน่งเดียวกัน จำนวน 8 ตำแหน่งด้วยวิธีอื่นเช่น Downhole, MASW และ F-K เป็นต้น พบว่ามีโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนที่ความลึก 30 เมตรแรกใกล้เคียงกัน ยกเว้น ตำแหน่งจังหวัดเชียงใหม่ซึ่งชั้นดินจัดอยู่ในประเภทดินแข็งมีความแตกต่างจากวิธีการอื่นถึง 41%

นคร ภู่วโรดม และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์และคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินเพื่อแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี โดยในแต่ละพื้นที่ได้ทำการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินแบบ 1 จุด เพื่อประเมินค่าคาบอทธิพลหลัก และใช้วิธี 2sSPAC สำหรับประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ได้มีการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน แบบ 1 จุด จำนวน 100 จุด และอีก 30 จุด สำหรับตรวจวัดด้วยวิธี 2sSPAC ส่วนพื้นที่จังหวัดเชียงรายได้ทำการตรวจวัดด้วยวิธี 2sSPAC จำนวน 25 จุด และพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีอีก 16 จุด ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบอทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ชัดเจนถึงค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผกผันกับค่าคาบอทธิพลหลัก ผลศึกษาพบว่า บริเวณพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี ชั้นดินจัดอยู่ในประเภท D (ดินแข็ง) และบางพื้นที่สามารถจำแนกให้อยู่ในประเภท C (ดินแข็งมาก กิ่งหิน) ซึ่งส่วนมากเป็นพื้นที่ใกล้กับเชิงเขา สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร ชั้นดินอยู่ใหญ่จัดอยู่ในดินประเภท E (ดินอ่อน)

นนทกร (2555) และ Poovarodom และ Plalinyot (2555) ได้ทำการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินและวิเคราะห์ด้วย SPAC จำนวน 75 ตำแหน่งสำรวจและใช้แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีความสามารถในการขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้ประมาณ 4 ถึง 6 เท่า ในช่วงคาบการสั่นประมาณ 0.6 ถึง 2.5 วินาที

อมรเทพ (2556) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ผลการศึกษาที่มีความสมบูรณ์มากขึ้นจากการศึกษาของ นนนทกร (2555) โดยเพิ่มตำแหน่งตำแหน่งการศึกษาอีกจำนวน 75 ตำแหน่งครอบคลุมพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ และประเมินความลึกของชั้นดินได้ประมาณ 100 เมตร โดยผลการศึกษาพบว่า บริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำและค่าคาบอทธิพลหลักยาวอยู่ใกล้อ่าวไทย ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ ในขณะที่พื้นที่ทางตะวันตกมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนสูงและมีค่าคาบอทธิพล

หลักสั้น หากจัดประเภทชั้นดินพบว่า บริเวณกรุงเทพมหานคร จ้อยู่ในชั้นดินประเภท E หรือ ดินอ่อน ส่วนพื้นที่ที่อยู่รอบนอกของกรุงเทพมหานคร ชั้นดินจัดอยู่ในประเภท D และทางตะวันตกของพื้นที่ศึกษาจัดอยู่ในประเภท C สำหรับผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้น เทียบเท่าพบว่า อัตราการขยายกำลังของคลื่น (Amplification Factor) มีค่าอยู่ในช่วง 3-6 เท่า โดยพื้นที่บริเวณจังหวัดสมุทรปราการมีอัตราการขยายกำลังสูงสุดประมาณ 6 เท่า ในขณะที่พื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีมีอัตราการขยายกำลังประมาณ 3 เท่า และยังพบว่า อัตราการขยายกำลังของคลื่นจะมีค่าลดลงหากขนาดความเร่งที่ขึ้นหิน (Peak Rock Acceleration, PRA) มีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ อมรเทพ และนคร (2557) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณที่ตั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการจำลองคุณสมบัติของชั้นดินต่อลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหว โดยใช้แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนแบบต่าง ๆ เป็นพารามิเตอร์หลักในการศึกษา โดยทำการศึกษาพฤติกรรมด้านการขยายคลื่น คาบการสั่นหลัก และระยะเวลาของการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว จากผลการศึกษาพบว่า กำลังขยายของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าสูงสุดประมาณ 6 เท่าเกิดขึ้นที่คาบการสั่นประมาณ 1.0 วินาที สำหรับแบบจำลองของชั้นดินที่มีระดับความลึกของชั้นหินประมาณ 160 ถึง 300 เมตร สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่มีความลึกของชั้นหินประมาณ 400 ถึง 700 เมตร มีกำลังขยายของคลื่นแผ่นดินไหวสูงสุดในช่วงคาบการสั่นยาว โดยมีค่าประมาณ 2 ถึง 3 วินาที ซึ่งการศึกษาดังกล่าว ทำให้ทราบว่า ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกและระดับความลึกของชั้นหินที่สอดคล้องกับสภาพจริง ส่งผลให้การประเมินผลตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมีความถูกต้องมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, S_a) ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการนำไปใช้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1302)

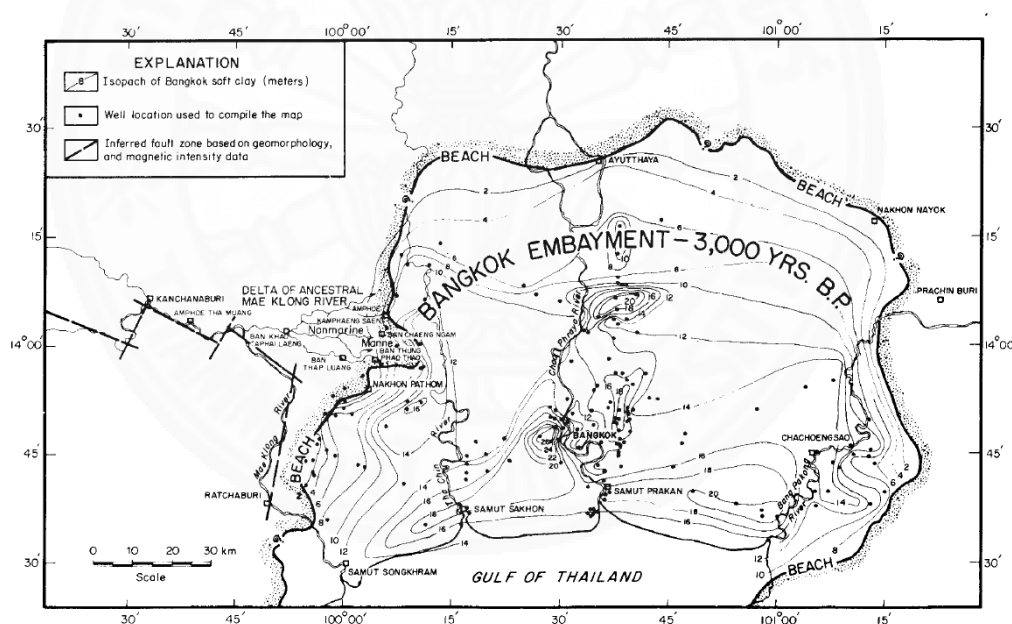
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสภาพทางธรณีวิทยาและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน

Charoen Piancharoen (2519) ได้รวบรวมผลการสำรวจน้ำใต้ดินและการทรุดตัวของชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ โดยผลการศึกษาสรุปว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ของชั้นน้ำใต้ดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ประกอบด้วยทรายและกรวด โดยมีชั้นดินเหนียวแทรกระหว่างชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถแบ่งระดับความลึกของชั้นน้ำใต้ดินออกเป็น 8 ชั้น ได้แก่

1. ที่ระดับความลึก 50 เมตร (Bangkok Auifer)
2. ที่ระดับความลึก 100 เมตร (Phra Pradaeng Aquifer)
3. ที่ระดับความลึก 150 เมตร (Nakhon Luang Aquifer),

4. ที่ระดับความลึก 200 เมตร (Nonthaburi Aquifer)
5. ที่ระดับความลึก 300 เมตร (Sam Khok Aquifer)
6. ที่ระดับความลึก 350 เมตร (Phaya Thai Aquifer)
7. ที่ระดับความลึก 450 เมตร (Thon Buri Aquifer) และ
8. ที่ระดับความลึก 550 เมตร (Pak Nam Aquifer)

นอกจากนี้ จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจทำให้ทราบว่า ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) มีความหนาประมาณ 30 เมตร โดยที่ 15 เมตรแรกเป็นดินเหนียวอ่อน (Bangkok Soft Clay) ซึ่งมีความสามารถในการถูกบีบอัดได้สูง ถัดลงมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Bangkok Stiff Clay) ซึ่งแข็งแกร่งกว่าและมีความสามารถในการบีบอัดได้น้อยกว่า โดยมีความลึกถึงประมาณ 25-30 เมตร (Rau J.L., Nutalaya P., 2526, Ashford และคณะ, 2540,) ภาพที่ 2.1 แสดงถึงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ภาพที่ 2.1 Isopach Map of Bangkok Soft Clay (Rau J.L., Nutalaya P., 2526)

จากข้อมูลการสำรวจชั้นดินสามารถแบ่งลักษณะของชั้นดินและทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ในช่วง 70 เมตรแรก ได้เป็น 4 ชั้น (Ashford และคณะ., 2540, Shibuya S., Hanh L.T., 2544, Shibuya และคณะ, 2546) ประกอบด้วย

1. ชั้นผิวดิน (Crust) มีลักษณะแข็งและมีสีเทาเข้ม โดยมีค่า Shear Strength ประมาณ 40 kPa และมีความหนาประมาณ 1-3 เมตร

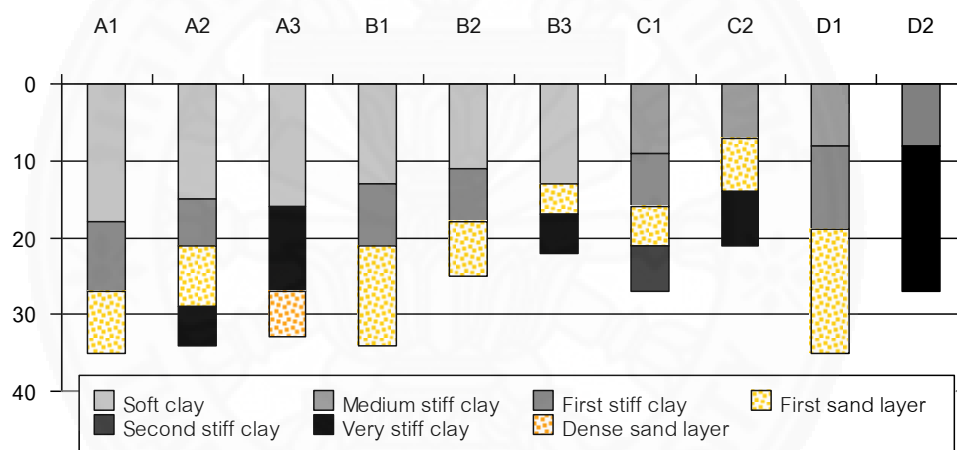
2. ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) มีความหนาประมาณ 12-17 เมตร จากทางตอนเหนือถึงตอนใต้ของแอ่งกรุงเทพฯ และบริเวณกรุงเทพมหานคร มีความหนาประมาณ 14 เมตร ชั้นนี้ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 14000 ตารางกิโลเมตร ลักษณะชั้นดินอ่อนนั้นมีความสามารถในการบีบอัดสูง โดยมีค่า Overconsolidation Ratio OCR ในช่วง 1.0-1.5 สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ประกอบด้วย Water Content มีค่า 60-100%, Liquid Limit 50-100%, Plasticity Index 30-80, และมีค่า Undrained Shear Strength 10-25 kPa
3. ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 7-14 เมตรบริเวณกรุงเทพมหานคร และมีความสามารถในการบีบอัดต่ำ มีค่า OCR สูง และมีค่า Water Content ต่ำ เมื่อเทียบกับชั้นดินเหนียวอ่อน สำหรับค่า Shear Strength จะมีค่าสูงขึ้นตามความลึก โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 kPa
4. ชั้นทราย (Sand) ชั้นนี้จะอยู่ที่ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกและจะมีความลึกถึงประมาณ 70 เมตร นอกจากนี้ ชั้นทรายยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ส่วน มีชื่อเรียกดังนี้ Upper Sand, Stiff Clay, และ Lower Sand โดยชั้น Upper Sand มีความหนาแน่นปานกลางถึงสูง และมีความหนาประมาณ 10-15 เมตร ถูกจัดอยู่ในประเภท Silty Sand (SM) ซึ่งมีค่า SPT ประมาณ 30 ครั้งต่อฟุต ในขณะที่ชั้น Lower Sand มีค่า SPT มากกว่า 50 ครั้งต่อฟุต

นอกจากนี้ Ashford และคณะ (2540) ได้ทำการทดสอบชั้นดินด้วยวิธี Downhole เพื่อใช้คำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนจำนวน 5 ตำแหน่งในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ และได้เสนอสมการสำหรับการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่นี้เช่นกัน โดยแบ่งสมการออกเป็น 4 ชุด ซึ่งสอดคล้องกับประเภทชั้นดินแบบต่างๆ ได้แก่ สมการสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay), ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First Stiff Clay), ชั้นทรายชั้นแรกและชั้นที่สอง (First and Second Sand Layer), และชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง (Second Stiff Clay) จากนั้นทำการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี Downhole และการประมาณด้วยสมการ ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกันสำหรับชั้นดินประเภทต่าง ๆ

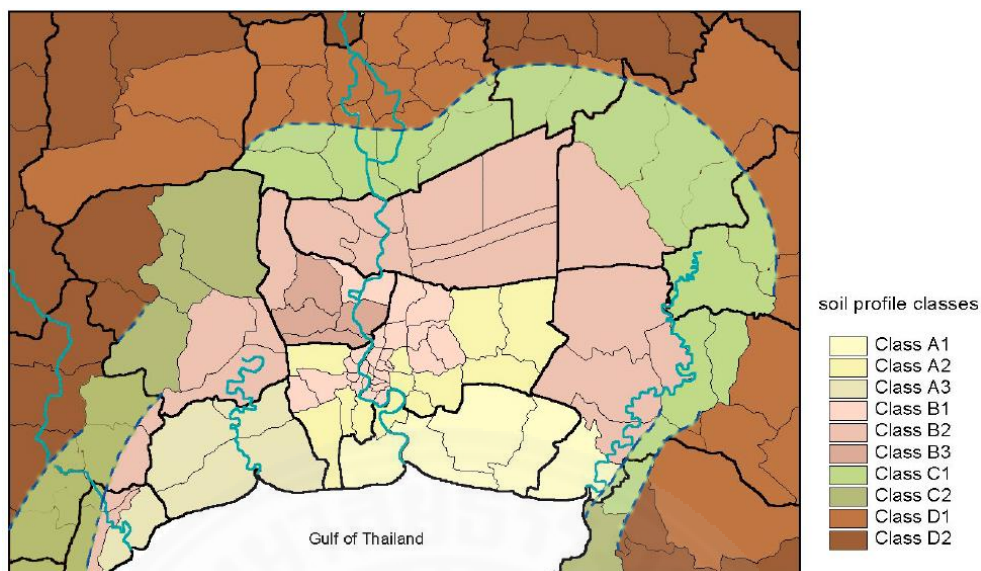
Shibuya และ Tamrakar (2542) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยวิธี Seismic Penetration Test (SCPT) ของดินบริเวณกรุงเทพ พบว่าดินเหนียวอ่อนด้านบนมีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 100 เมตรต่อวินาที และความเร็วคลื่นเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงชั้นดินเหนียวมีค่าอยู่

ระหว่าง 180 เมตรต่อวินาที ถึง 210 เมตรต่อวินาที สำหรับชั้นทรายแรกวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 250 เมตรต่อวินาที

Tuladhar R. (2546) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการสำรวจชั้นดินในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งความลึกของหลุมเจาะสำรวจประมาณ 35 เมตร สำหรับข้อมูลที่ได้จากหลุมเจาะสำรวจ ประกอบด้วย Shear Strength และค่า N-SPT เพื่อนำมาใช้คำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity) ด้วยชุดสมการจากการทดลองที่เหมาะสมกับชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ (Ashford และคณะ, 2540) จากข้อมูลทั้งหมดเมื่อคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนแล้วสามารถแบ่งประเภทชั้นดินในแอ่งกรุงเทพฯ ได้เป็น 10 ประเภท ประกอบด้วย ประเภท A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, D1, และ D2 ซึ่งรายละเอียดการวางตัวของชั้นดินแต่ละชั้นแสดงดังภาพที่ 2.2 สำหรับภาพที่ 2.3 แสดงแผนผังสำหรับการแบ่งประเภทของชั้นดินออกเป็น 10 ประเภทในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ



ภาพที่ 2.2 ลักษณะชั้นดินตามความลึก จำนวน 10 กลุ่ม (ดัดแปลงจาก Tuladhar R., 2546)



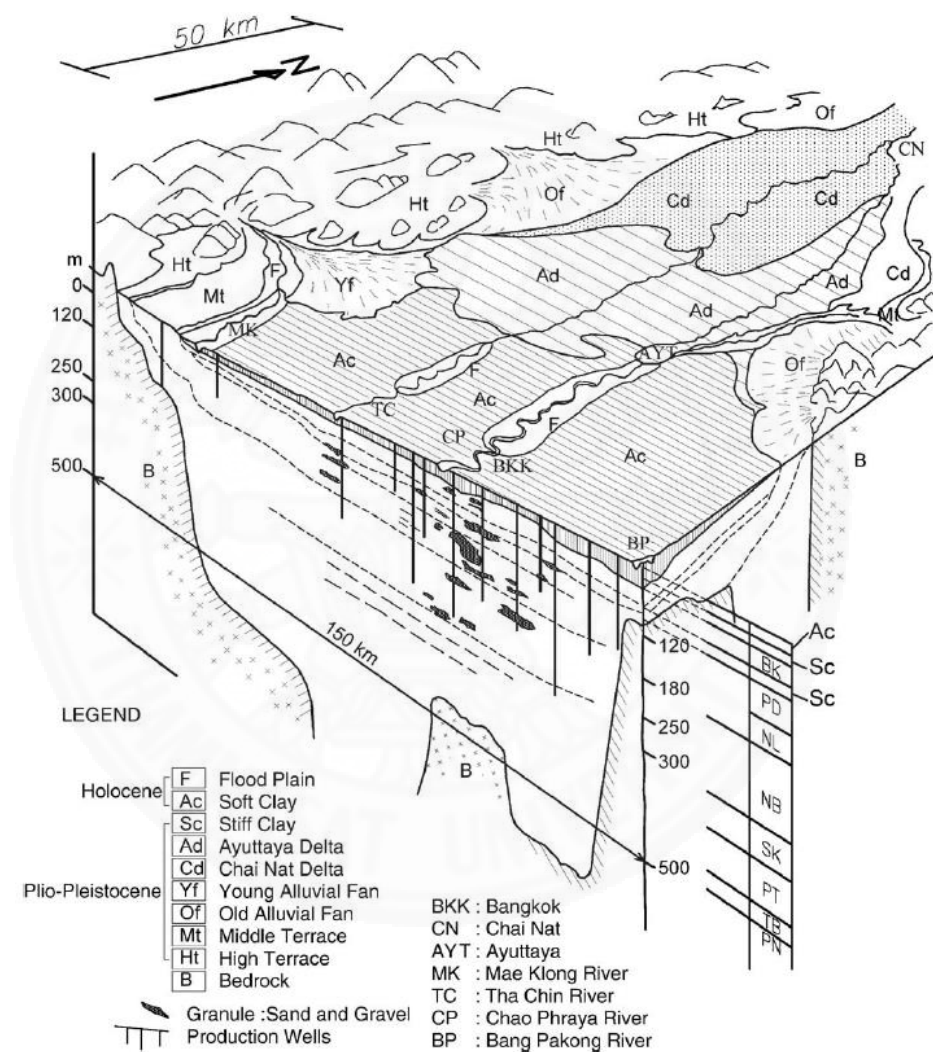
ภาพที่ 2.3 แผนที่แบ่งประเภทชั้นดินจำนวน 10 ประเภทบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ (Tuladhar R., 2546)

ในอดีตข้อมูลชั้นดินส่วนใหญ่ได้มาจากข้อมูลการขุดเจาะสำรวจเพื่อหาระดับน้ำใต้ดิน และการสำรวจน้ำมันใต้ชั้นดิน นอกจากนี้มีการใช้ Seismic Reflection เพื่อศึกษาสภาพชั้นดินและความลึกของชั้นหินที่ระดับความลึก 2,000 – 3,000 เมตรในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ อีกด้วย จากผลการสำรวจต่าง ๆ ทำให้ทราบว่า ระดับความลึกของชั้นหินที่ลึกที่สุดประมาณ 2,100 เมตร บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของแอ่งกรุงเทพฯ แต่ในพื้นที่แนวชายฝั่งไปทางตะวันออกมีความลึกประมาณ 450 เมตร ในขณะที่ข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจชั้นดินระดับลึกบ่งบอกว่า บริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของกรุงเทพฯ มีความลึกของชั้นหินประมาณ 600 เมตร และบริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ มีความลึกประมาณ 1,900 เมตร ส่วนพื้นที่นอกเหนือจากนี้ ไม่สามารถระบุความลึกของชั้นหินได้จากการขุดเจาะสำรวจชั้นดินระดับลึกได้ (Phien-wej N. และคณะ, 2549)

ภาพที่ 2.4 แสดงภาพร่าง 3 มิติ และภาพตัดขวางบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ

ข้อมูลที่ได้จากการขุดเจาะสำรวจ นอกจากจะใช้เพื่ออธิบายลักษณะทางธรณีวิทยาของแอ่งกรุงเทพฯ ได้แล้วยังสามารถนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ประกอบด้วย Modulus of Reduction และความหน่วง (Damping) ได้เช่นกัน เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในพื้นที่นี้ โดย Teachavorasinskun S. และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการนำตัวอย่างดินที่ได้จากการขุดเจาะสำรวจที่มีความลึกประมาณ 30-35 เมตรจำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ มหาวิทยาลัยมหิดล, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการนำตัวอย่างดินมาทดสอบด้วยเครื่องมือ Cyclic Triaxial ซึ่งสามารถวัดความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ได้ที่

ระดับของ Strain ประมาณ 0.01%-10% ได้ จากผลการศึกษาพบว่า Modulus of Reduction ของ ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีค่า Plasticity Index (PI) อยู่ในช่วง 15-50 มีค่าใกล้เคียงกับ งานวิจัยของ Vucetic และ Dobry (1991) ที่มีค่า PI อยู่ในช่วง 15-50 เช่นกัน และสำหรับ Damping มีค่าอยู่ในช่วง 4-5% ที่ระดับ Strain ประมาณ 0.01% และมีค่าประมาณ 25-30% ที่ ระดับ Strain ประมาณ 10%



ภาพที่ 2.4 ภาพร่าง 3 มิติและภาพตัดขวางบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ (Phien-wej N., และคณะ, 2549)

ต่อมาในปีพ.ศ. 2556 Likitlersuang S. และคณะ ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของชั้นดิน รวมถึงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการนำตัวอย่างดินที่ได้จากการขุดชั้นดินสำหรับการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ซึ่งมีความลึกประมาณ 60-65 เมตร จากการศึกษพบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีค่า PI อยู่ในช่วง 30-40 สำหรับพื้นที่จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยมหิดล ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้มีคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินสอดคล้องกับการศึกษาของ Teachavorasinskun S. และคณะ (2545) นอกจากนี้ ค่า Shear Modulus (G_{max}) ที่ระดับ Shear Strain อ่างอิง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนค่า G_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษา Modulus of Reduction กับการศึกษาของ Ishibashi, Zhang (2536) และ Vucetic, Dobry (2534) พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน แต่สำหรับดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ผลการประมาณจากทั้งสองวิธียังคงไม่สอดคล้องกันเท่าที่ควร จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

จากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ในอดีตล้วนมาจากโครงการก่อสร้างต่างๆ หรือการเจาะสำรวจระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความลึกไม่มาก ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ศึกษาต่อเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว หากมีข้อมูลชั้นดินที่มีความลึกถึงระดับชั้นหิน และมีความถูกต้องน่าเชื่อถือจะทำให้การศึกษาก่อนการตอบสนองของชั้นดินบริเวณนี้มีความถูกต้องและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

ในปีพ.ศ. 2555 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ทำการสำรวจและศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างเป็นระบบ ในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการขุดเจาะสำรวจชั้นดินที่มีความลึกถึง 600 เมตร และ 300 เมตร ในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาคร และสมุทรปราการ ตามลำดับ เพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินในบริเวณดังกล่าว โดยแบ่งการขุดเจาะสำรวจออกเป็น 2 วิธี สำหรับความลึกช่วง 120 เมตรแรก ใช้การทดสอบแบบ Boring Log และความลึกมากกว่า 120 เมตร ใช้การทดสอบแบบ Drilling Log จากการศึกษาของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ทำให้ทราบลักษณะของชั้นดินที่ระดับลึกหลายร้อยเมตรจนกระทั่งถึงระดับของชั้นหิน ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์ต่อการนำไปเป็นข้อมูลในการอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ได้เป็นอย่างดีในอนาคต

2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดิน

2.4.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น

ปัจจุบันมีการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear Analysis) เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีการศึกษาและมีผลการทดสอบจำนวนมากยืนยันจนทำให้เกิดการยอมรับและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังถือว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีความง่ายต่อการนำทฤษฎีไปสร้างเป็นโปรแกรมให้วิศวกรได้ใช้งาน ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าจะมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันก็ตาม วิธีการนี้ยังคงมีข้อเสียอยู่บ้าง เช่น ไม่มีความเหมาะสมหากนำไปใช้วิเคราะห์กับแบบจำลองชั้นดินที่มี

ความอ่อนมาก หรือมักพบการขยายกำลังที่มีนัยสำคัญในบริเวณคาบการสั่นที่ใกล้กับค่าคาบในโหมดพื้นฐาน และลดการขยายกำลังลงในคาบการสั่นอื่น ๆ อีกทั้งวิธีการนี้วิเคราะห์ได้เฉพาะ Frequency Domain เท่านั้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี Effective Stress ได้ ยิ่งไปกว่านั้นในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่าน้อยลงเรื่อย ๆ

ในขณะที่การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis) เริ่มมีการศึกษาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในปัจจุบัน เนื่องจากข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นนั้นสามารถแสดงพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ได้ดีและมีความสมจริงมากกว่า และยังให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าในกรณีที่ค่า Peak Shear Strain มีค่าเข้าใกล้กับค่ากำลังของดิน รวมถึงสามารถวิเคราะห์แบบ Effective Stress ได้ นอกจากนี้ ในปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นมีการพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีผลการศึกษาในเชิงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น

William B. Joyner และ Albert T.F. Chen (2518) ทำการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis) ภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่มีความลึก 200 เมตร จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้กับวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า จากผลการศึกษาและเปรียบเทียบพบว่า ผลตอบสนองของชั้นดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าให้ค่าที่ต่ำ (Underestimate) ในช่วงคาบการสั่นระหว่าง 0.1 และ 0.6 วินาที แต่ผลตอบสนองมีแนวโน้มดีขึ้นหากคลื่นแผ่นดินไหวที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองมีระดับของความรุนแรงน้อยลง ในขณะที่ช่วงคาบการสั่นที่ยาว ผลตอบสนองที่วิเคราะห์ได้จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นกลับมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกัน นอกจากนี้ จากการศึกษาได้มีข้อเสนอแนะว่า โดยทั่วไปแล้ววิธีไม่เชิงเส้นให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมกว่าเนื่องจาก พื้นฐานของวิธีไม่เชิงเส้นมีความถูกต้องแม่นยำกว่า แต่วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าอาจนำไปใช้งานได้ดีในหลายวัตถุประสงค์ในกรณีที่ไม่ต้องการความถูกต้องของผลตอบสนองของชั้นดินในช่วงคาบการสั่นสั้นมากนัก

Silva et al. (2543) ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินในรูปของอัตรากำลังขยายคลื่น (Amplification Factor) ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และวิธีไม่เชิงเส้น สำหรับชั้นดินประเภท C และ E ผลการศึกษาพบว่า สำหรับชั้นดินประเภท C ค่าอัตรากำลังขยายคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าสอดคล้องกัน ถึงแม้ว่าระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใส่ป้อนในแบบจำลองมีค่าแตกต่างกันในช่วงความถี่ 1 – 10 เฮิร์ตซ์ ในขณะที่หากระดับความรุนแรงของคลื่นมีค่าสูงกว่า 0.4g ส่งผลให้อัตรากำลังขยายคลื่นของคลื่นในช่วงความถี่สูงกว่า 10 เฮิร์ตซ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นมีค่าสูงกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า เนื่องจากอาจมีความแตกต่างกันในส่วน of ค่าความหน่วง (Damping) ที่ใช้ในแบบจำลอง สำหรับกรณีของชั้นดินประเภท E ซึ่งจัดเป็นชั้นดินอ่อน ผลการวิเคราะห์ค่าอัตรากำลังขยายคลื่นด้วยวิธีไม่เชิงเส้นให้ค่าที่ต่ำกว่าวิธีเชิงเส้น

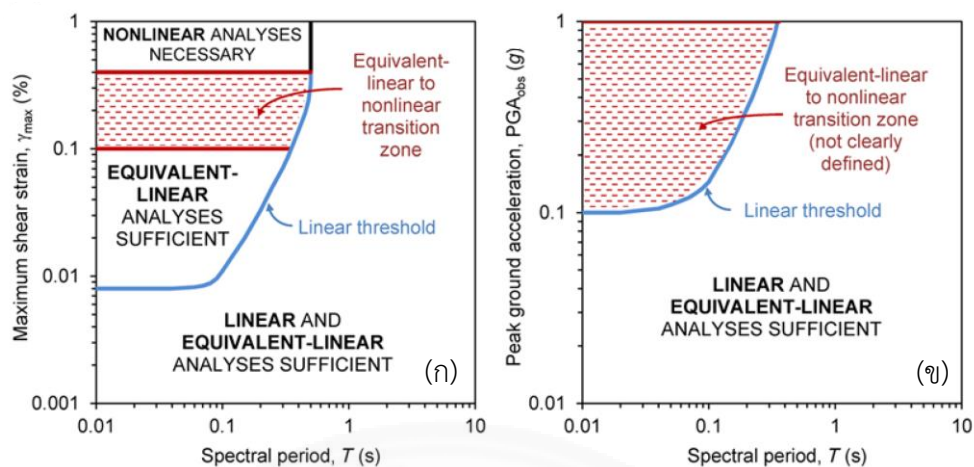
เทียบเท่าเมื่อระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองมีค่าสูง สาเหตุมาจากการใช้แบบจำลอง Backbone Curve ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นนั้นให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าของ Modulus of Reduction แต่การใช้ Masing หรือ Extend Masing Rules กับ Backbone Curve โดยทั่วไปในวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าานั้นจะให้ค่าความหน่วงที่ไม่เหมาะสม อีกสาเหตุที่อัตรากำลังขยายคลื่นมีค่าต่ำเนื่องจาก การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไม่เชิงเส้นสามารถพิจารณาผลของการเสีรูปของดินที่ระดับ Strain สูงได้ ซึ่งค่า Yield บริเวณใกล้ผิวดินจะสามารถลดการสั่นสะเทือนที่ผิวดินในช่วงความถี่สูงได้ ซึ่งพฤติกรรมของชั้นดินแบบนี้จะไม่สามารถประเมินได้หากใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า

Chien-Pine Lee และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยโปรแกรม SHAKE และวิธีไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม NONLI3 สำหรับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ โดยใช้โครงข่ายข้อมูลความเร่งจาก Large Scale Seismic Test (LSST) Downhole ในพื้นที่ของ Lotung ประเทศไต้หวัน เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลความเร่งที่บันทึกได้จริงที่ระดับความลึกแตกต่างกันของหลุมเจาะสำรวจ โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์มีจำนวน 13 เหตุการณ์ จากผลการศึกษาพบว่า หากคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดเล็ก วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นให้ผลที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไม่เชิงเส้น ในทางกลับกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นกลับให้ผลการศึกษาสอดคล้องดีกับผลการตรวจวัดจริงหากคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่วิธีเชิงเส้นจะให้ค่าตอบของผลตอบสนองที่สูงกว่า (Overestimate) ผลการตรวจวัดจริง

James Kaklamanos และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินโดยการใช้ข้อมูลชั้นดินจำนวน 100 ตำแหน่งจาก Kiban-Kyoshin network (KiK net) ประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ยังใช้จำนวนข้อมูลแผ่นดินไหวมากถึง 3,720 ชุด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงคลื่นแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ คลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า PGA มากกว่า 0.3g มีจำนวน 204 ชุด สำหรับวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ ประกอบด้วยวิธีเชิงเส้น และวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยโปรแกรม SHAKE จากผลการศึกษาพบว่า ผลตอบสนองของชั้นดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นและเชิงเส้นเทียบเท่าโดยทั่วไปแล้วประเมินได้ค่าต่ำยกเว้นในช่วงคาบการสั่นประมาณ 0.5 ถึง 2.0 วินาที แต่อย่างไรก็ตามผลจากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าให้ผลที่ดีกว่าวิธีเชิงเส้นในทุก ๆ คาบการสั่น นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินประกอบด้วย ค่าสูงสุดของ Shear Strain ในแบบจำลองชั้นดิน, ขนาดความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Peak Ground Acceleration, PGA) และ ค่าคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์จำนวนมากสามารถสรุปเป็นคำแนะนำสำหรับการเลือกใช้วิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งมีหลักเกณฑ์เลือกใช้อยู่ 2 รูปแบบหลัก

ได้แก่ เกณฑ์การเลือกใช้ค่า Maximum Shear Strain และเกณฑ์สำหรับการเลือกใช้ Peak Ground Acceleration โดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบเชิงเส้นจะเริ่มไม่ถูกต้องหรือประเมินค่าผลตอบสนองได้สูงเกินไปหากแบบจำลองชั้นดินมีค่า Strain อยู่ในช่วง 0.01% - 0.1% แต่หากค่า Strain ในแบบจำลองชั้นดินมีค่าตั้งแต่ 0.1% - 0.4% การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าสามารถช่วยปรับปรุงความถูกต้องของผลตอบสนองของชั้นดินได้ดีกว่าวิธีเชิงเส้น แต่หากค่า Strain มีค่ามากกว่า 0.4% ผลการประเมินที่ได้จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าจะให้ค่าที่ต่ำเกินไป ดังนั้นควรพิจารณาเลือกใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้นเนื่องจากสามารถตรวจจับพฤติกรรมของชั้นดินได้ดีกว่าวิธีเชิงเส้นและเชิงเส้นเทียบเท่า

นอกจากนี้ James Kaklamanos และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และวิธีไม่เชิงเส้น โดยแบบจำลองชั้นดินที่ใช้เป็นแบบ 1 มิติ ด้วยตัวอย่างข้อมูลชั้นดินจาก 6 สถานีที่มีลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกันจากฐานข้อมูล KikK-net ประเทศญี่ปุ่น จากนั้นเปรียบเทียบผลตอบสนองของผิวดินที่วิเคราะห์ได้กับผลการบันทึกได้จริง โดยใช้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความแตกต่างกันทั้งขนาดความรุนแรงรวมถึงระยะเวลาจำนวนมากถึง 191 ชุด สำหรับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยโปรแกรม SHAKE ส่วนวิธีไม่เชิงเส้นใช้โปรแกรม DEEPSOIL และโปรแกรม Abaqus/Explicit จากผลการศึกษานี้ได้สรุปมาเป็นข้อเสนอแนะทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ คือ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเริ่มที่จะประเมินผลตอบสนองได้ไม่ถูกต้องในช่วงระดับ Strain ตั้งแต่ 0.01% ถึง 0.1% (โดยทั่วไปค่า PGA มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 ถึง 0.3g) ในขณะที่แบบจำลองเชิงเส้นเทียบเท่าและแบบจำลองไม่เชิงเส้นสามารถประเมินผลตอบสนองของชั้นดินได้ถูกต้องมากขึ้นหากระดับของ Strain มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.01% ถึง 0.3% นอกจากนี้แบบจำลองไม่เชิงเส้นยังให้ผลตอบสนองของชั้นดินที่เหมาะสมมากกว่าแบบจำลองเชิงเส้นเทียบเท่าอีกด้วยในกรณีที่ระดับ Strain มีค่ามากกว่า 0.05% ขึ้นไป



ภาพที่ 2.5 แผนผังสำหรับการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินอย่างเหมาะสมด้วยเกณฑ์ของ (ก) Maximum Shear Strain, และ (ข) Peak Ground Acceleration

2.4.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ

วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติมีความเหมาะสมสำหรับชั้นดินที่มีลักษณะราบเรียบหรือมีความชันที่ไม่มากและเรียงตัวกันเป็นชั้นในแนวราบ แต่สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ เริ่มมีการศึกษามากขึ้น เนื่องจาก พื้นที่ที่สนใจศึกษานั้นส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนแอ่งดินตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งแบบจำลอง 1 มิติอาจมีความไม่เหมาะสมหรือถูกต้อง ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ถูกต้องมากขึ้น แบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ จึงเข้ามามีความสำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

Tam Larkin และ John Marsh (2534) ได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองแอ่งดินตะกอน 2 มิติ ที่มีความลึก 100 เมตรสำหรับแบบจำลองตื้น และ 500 เมตรสำหรับแบบจำลองลึก โดยคุณสมบัติของวัสดุสำหรับแบบจำลองเป็นแบบไม่เชิงเส้น จากนั้นนำผลตอบสนองของแอ่งดินตะกอนมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ สำหรับโปรแกรมที่ใช้สำหรับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ คือ DENSOR ส่วนแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ ใช้โปรแกรม TENSA ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่ผิวดินบริเวณใกล้กับกึ่งกลางของแอ่งดินตะกอนพบว่า การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติมีค่าลู่ออกจากผลที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ในกรณีที่อัตราส่วนของความกว้างต่อความลึกของแบบจำลองมีค่า 6 เท่าหรือน้อยกว่า ในขณะที่การวิเคราะห์ผลตอบสนองบริเวณใกล้กับขอบของแอ่งดินตะกอนควรให้ความสนใจมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะเมื่อใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า

Kramer (2539) อธิบายผลตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากขอบของแอ่งชั้นดินไว้ว่า รูปทรงของแอ่งมีผลมากต่อการสะท้อนและกักคลื่นไว้ในชั้นดินบริเวณขอบเขตของแอ่ง และ

คลื่นเคลื่อนที่สู่ผิวดินอาจมีความรุนแรงและระยะเวลาในการสั่นสะเทือนนานกว่าการวิเคราะห์ที่คิดเพียงผลของชั้นดิน เช่นการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ โดย Bard และ Gariel (2529) ได้ทำการแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ กับการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ โดยจำลองรูปร่างของขอบแอ่งไปด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่บริเวณช่วงกลางของแอ่งมีผลตอบสนองจากทั้งสองวิธีใกล้เคียงกัน ในขณะที่บริเวณขอบแอ่งผลตอบสนองมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

Jian Zhang และ John X. Zhao (2552) ได้ทำการศึกษาผลของอัตรากำลังขยายคลื่นจากแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติและ 2 มิติ ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น โดยการสร้างแบบจำลองแอ่ง (Basin) จำนวน 3 แบบจำลองที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกเท่ากับ 3, 6, และ 10 เท่าตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์ผลตอบสนองของแอ่งด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้บนชั้นหินที่มีขนาดและระยะทางแตกต่างกันจำนวน 186 จุด นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองแบบ 1 มิติเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยเลือกใช้ชั้นดินบริเวณกึ่งกลางแอ่ง และบริเวณขอบแอ่งที่มีความลึกของชั้นดินเป็นครึ่งหนึ่งของบริเวณกึ่งกลางแอ่ง ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงมาก อัตรากำลังขยายคลื่นระหว่างแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติและ 2 มิติที่บริเวณกึ่งกลางแอ่งมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความลึกของแอ่งมีค่าเท่ากับ 6 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติสามารถนำมาใช้สำหรับประเมินอัตรากำลังขยายคลื่นของชั้นดินได้หากอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของแอ่งมีค่าตั้งแต่ 6 เท่าขึ้นไปสำหรับบริเวณกึ่งกลางแอ่ง ในทางกลับกัน หากพิจารณาบริเวณขอบแอ่งที่มีความลึกของชั้นดินเป็นครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกึ่งกลางแอ่ง พบว่า อัตรากำลังขยายคลื่นสามารถมีค่าที่สูงกว่าบริเวณกึ่งกลางแอ่งได้ในบางช่วงคาบการสั่น ซึ่งหมายถึงอัตรากำลังขยายคลื่นไม่ได้มีค่าลดลงเมื่อความลึกของชั้นดินลดลงเสมอไป

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก

Nakamura, Y. (2532) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธี H/V Spectrum Ratio ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการตรวจวัดองค์ประกอบในแนวราบและแนวตั้งของคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน โดยการตรวจวัดด้วยวิธีนี้จะวัดเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น จากนั้นคำนวณอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมของคลื่นในแนวราบต่อสเปกตรัมของคลื่นในแนวตั้ง ดังสมการที่ 3.1 หลักการนี้มีสมมติฐานเพื่อลดอิทธิพลของแหล่งกำเนิดที่จะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบในแนวราบและแนวตั้ง และผลลัพธ์ที่ได้มานำไปใช้เพื่อประเมินค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และอัตรากำลังขยายคลื่น (Amplification Factor)

$$H / V = \sqrt{\frac{F_{NS}^2 + F_{EW}^2}{2F_{UD}}} \quad (3.1)$$

โดยที่

- F_{NS} = ขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมของคลื่นในแนวเหนือ-ใต้
- F_{EW} = ขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมของคลื่นในแนวตะวันออก-ตะวันตก
- F_{UD} = ขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมของคลื่นในแนวตั้ง

สมมติฐานของวิธี H/V Spectrum Ratio ประกอบด้วย

1. คลื่นผิวดินขนาดเล็ก (Microtremor) ประกอบด้วยคลื่นเฉือนเป็นหลัก
2. อัตราส่วนระหว่าง Transfer function ในแนวราบ ต่อ แนวตั้ง ขึ้นอยู่กับประเภทของดิน จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อดินเป็นดินแข็ง ซึ่งถือว่ามี การสั่นอย่างสม่ำเสมอทุกทิศทาง
3. ส่วนประกอบในแนวราบของคลื่นเฉือน (Shear wave) ถูกขยายโดยชั้นดินอ่อน เนื่องจากปรากฏการณ์สะท้อนกลับของคลื่น (Multiple-Reflection Phenomena) สำหรับส่วนประกอบของคลื่นในแนวตั้งจะไม่ถูกขยาย
4. คลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh wave) พิจารณาเป็นสัญญาณรบกวน Transfer Function (S_T) ที่ชั้นผิวดินนิยามโดยอัตราส่วนระหว่าง Horizontal Tremor Spectrum ของ

พื้นดินชั้นบน (S_{HS}) และ Horizontal Tremor Spectrum ของชั้นหินด้านล่าง (S_{HB}) ดังสมการที่ 3.2

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.2)$$

จากสมการข้างต้น สมมติให้สเปกตรัมขององค์ประกอบคลื่นแนวราบ ของพื้นดินชั้นบน ได้รับผลกระทบจากคลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh Wave) ซึ่งพิจารณาให้เป็นคลื่นรบกวน ดังนั้นจากสมมุติฐานข้างต้น คลื่นเรย์เลห์จะมีผลกระทบกับสเปกตรัมขององค์ประกอบคลื่นแนวตั้ง ที่ผิวดินเท่านั้น แต่ไม่มีผลกระทบกับตำแหน่งชั้นหินด้านล่าง ประกอบกับสมมุติฐานที่ว่าไม่มีการขยายองค์ประกอบคลื่นแนวตั้งในชั้นดินอ่อน ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบจากคลื่นเรย์เลห์สามารถประเมินได้จากอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบคลื่นในแนวตั้งที่พื้นผิวดิน (S_{VS}) และองค์ประกอบคลื่นในแนวตั้งที่พื้นดินชั้นล่าง (S_{VB}) ดังแสดงในสมการ 3.3

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3.3)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณารวมผลกระทบของคลื่นเรย์เลห์ สามารถเขียน Transfer Function (S_{TT}) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{TT} &= \frac{S_T}{E_S} \\ &= \frac{\left(\frac{S_{HS}}{S_{HB}} \right)}{\left(\frac{S_{VS}}{S_{VB}} \right)} \\ &= \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \times \left(\frac{S_{VB}}{S_{HB}} \right) \\ &= \left(\frac{R_S}{R_B} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$R_S = \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \quad : \quad R_B = \left(\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \right)$$

จากสมมุติฐานที่ว่า การแผ่กระจายคลื่นในชั้นดินแข็งหรือชั้นหินมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันในทุกทิศทาง ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมในแนวราบต่อสเปกตรัมในแนวตั้งสำหรับชั้นหินมีค่าเท่ากับ 1 จึงสรุปได้ว่า Transfer Function ของคลื่นเฉือน (Shear Wave) ที่ไม่คิดผลกระทบของคลื่นเรย์เลห์จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมในแนวราบต่อสเปกตรัมในแนวตั้งของพื้นดินชั้นบน ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad R_B &= 1 \\ \text{ดังนั้น} \quad R_S &= S_{TT} = \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

สรุปได้ว่าอัตรากำลังขยายคลื่น (Amplification) ขององค์ประกอบคลื่นในแนวราบสามารถประเมินได้จากค่าสูงสุดของอัตราส่วนสเปกตรัมในแนวราบต่อสเปกตรัมในแนวตั้งที่ได้จากการตรวจวัดที่พื้นดินเท่านั้น และค่าคาบ ณ ตำแหน่งที่อัตราส่วนสเปกตรัมมีค่าสูงสุดที่ใกล้เคียงเหมือนกับค่าคาบธรรมชาติของสถานที่นั้น ๆ อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อขัดแย้งในสมมุติฐานสำหรับทฤษฎีนี้ โดยสมมุติฐานของ Nakamura (1989) ได้สมมุติให้องค์ประกอบคลื่นหลัก คือ Body Wave ซึ่งแย้งกับพื้นฐานของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นคลื่นพื้นผิว (Surface Wave)

3.2 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส

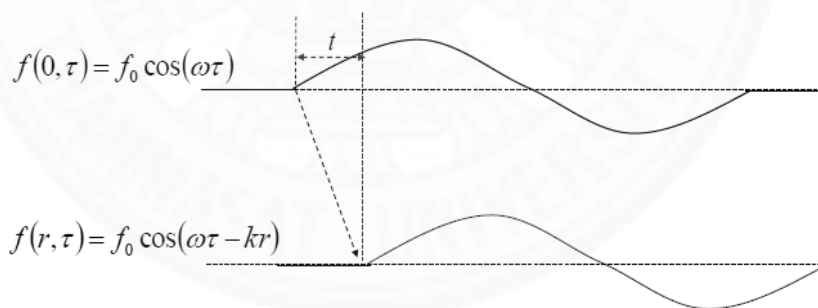
การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor Observation) ในการศึกษาที่ใช้อยู่ 2 วิธีหลัก คือ วิธี Spatial Auto-Correlation Coefficient (SPAC) และวิธี Centerless Circular Array (CCA) โดยทั้งสองวิธีมีวิธีการเก็บข้อมูลที่เหมือนกันโดยการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินในแนวตั้งพร้อมกันหลายตำแหน่ง แต่มีความแตกต่างกันในขั้นตอนของการวิเคราะห์ความเร็วเฟส โดยในการศึกษาได้นำวิธี SPAC มาใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเร็วเฟสของชั้นดินระดับตื้นหรือในช่วงของความถี่สูงเป็นหลัก ในขณะที่วิธี CCA ถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟสของชั้นดินที่ลึกขึ้นหรือในช่วงความถี่ต่ำเป็นหลัก

3.2.1 การวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี Spatial Auto Correlation (SPAC)

วิธี SPAC เสนอโดย Aki K. (2500) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับประเมินค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นผิวดินที่มีค่าแตกต่างกันสำหรับความถี่คลื่นต่าง ๆ เนื่องจากคุณสมบัติกระจายตัวของคลื่น (Dispersive) ของดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละชั้นที่เรียงกันอยู่ บนพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมเชิงระยะทางและเวลาโดยการตรวจวัดองค์ประกอบของคลื่นในแนวตั้ง หลายจุดพร้อมกันในรูปแบบของโครงข่าย (Array) และคลื่นพื้นผิวที่บันทึกได้จะมีองค์ประกอบหลักคือ โหมดพื้นฐานของคลื่นเรย์เลห์ (Fundamental Mode of Rayleigh Wave) สำหรับกาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยหลักการของ Cross-Correlation ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.6

$$C_{xy}(t) \equiv \int x(\tau)y(t + \tau)d\tau \quad (3.6)$$

โดยที่ Cross-Correlation คือ การหาค่าเฉลี่ยของผลคูณระหว่างสัญญาณที่หนึ่ง $x(\tau)$ กับคอนจูเกตของสัญญาณที่ 2 ที่ถูกเลื่อนเวลาไป $y(t + \tau)$ การคำนวณความเร็วเฟสด้วยหลักการ Cross-Correlation สามารถแสดงด้วยฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine) กับความถี่เชิงมุม (ω) จำนวน 1 รอบ แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างคลื่น Cosine จำนวน 1 รอบ (Yokoi T., 2551)

จากภาพที่ 3.1 หากการเหลื่อมของเวลา (Time Lag) เท่ากับ t และระยะห่างระหว่างสองตำแหน่งเท่ากับ r สามารถคำนวณหาความเร็วเฟสที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 3.7 และสามารถคำนวณ Cross-Correlation ได้ดังสมการที่ 3.8

$$c = \frac{r}{t} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}
Cc(0, r, t) &= f_0^2 \int \cos(\omega\tau) \cos(\omega\tau + \omega t - kr) d\tau \\
&= f_0^2 \left[\int \cos^2(\omega\tau) d\tau \cos(\omega t - kr) - \int \cos(\omega\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \sin(\omega t - kr) \right] \\
&\propto f_0^2 \cos(\omega t - kr)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

จากสมการที่ 3.8 ค่าของ Cross-Correlation จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การเลื่อนของเวลา (Time Lag, t) เมื่อพิจารณาข้อมูลในรูปของ Frequency Domain สามารถ คำนวณหาค่า Cross-Correlation ได้ดังสมการที่ 3.9

$$Cc(0, r, \omega) = F(0, \omega) \cdot \overline{F(r, \omega)} = |F(0, \omega)| \cdot |F(r, \omega)| \cdot \exp(i\Delta\phi(\omega)) \tag{3.9}$$

ความต่างเฟสเนื่องจากการกระจายตัวของคลื่น คือ $\Delta\phi = \omega r/c$ เนื่องจาก

$$\exp\left\{i\omega\left(t + \frac{r}{c}\right)\right\} = \exp\left\{i\left(\omega t + \frac{\omega r}{c}\right)\right\} \tag{3.10}$$

ดังนั้นสมการที่ 3.9 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปใหม่ดังสมการที่ 3.11

$$Cc(0, r, \omega) = |F(0, \omega)| \cdot |F(r, \omega)| \cdot \exp\left(i\frac{\omega r}{c}\right) \tag{3.11}$$

ความสอดคล้อง (Coherence) ของคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

$$Coh(0, r, \omega) = \text{Re} \left[\frac{Cc(0, r, \omega)}{|F(0, \omega)| \cdot |F(r, \omega)|} \right] = \text{Re} \left[\exp\left(i\frac{\omega r}{c}\right) \right] = \cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) \tag{3.12}$$

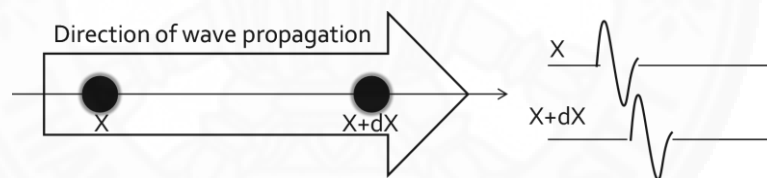
โดยที่ c คือ ความเร็วเฟสที่วัดตามแนวเส้นที่ทำการตรวจวัด สำหรับ Auto-Correlation มีวิธีการ คำนวณที่คล้ายกับ Cross-Correlation แต่ Auto-Correlation ใช้ข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกันในการ วิเคราะห์ ดังสมการที่ 3.13

$$Ac(0, \omega) = Cc(0, 0, \omega) = |F(0, \omega)|^2, \quad Ac(r, \omega) = Cc(r, r, \omega) = |F(r, \omega)|^2 \tag{3.13}$$

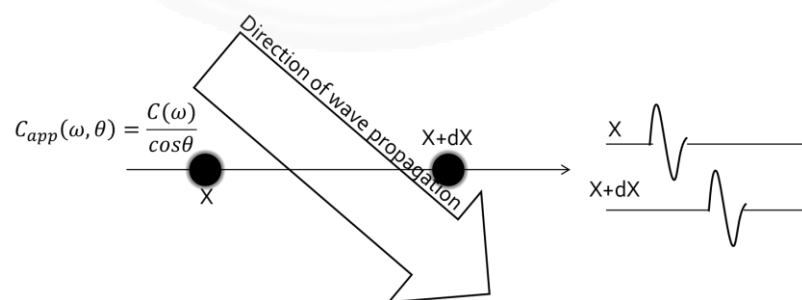
ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่น จากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง dX โดยพิจารณาเพียงทิศทางเดียว ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ Δx สามารถกระทำได้โดยการวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Coherence) ของข้อมูล ณ สองตำแหน่ง ด้วย สมการที่ 3.14

$$\rho(\Delta x, \omega) \equiv \text{Re} \left[\frac{Cc(\Delta x, \omega)}{Cc(0, \omega)} \right] = \frac{|F(x + \Delta x, \omega)|}{|F(x, \omega)|} \text{Re} \left[\exp \left(\frac{i\omega \Delta x}{c(\omega)} \right) \right] \approx \cos \left(\frac{\omega \Delta x}{c(\omega)} \right) \quad (3.14)$$

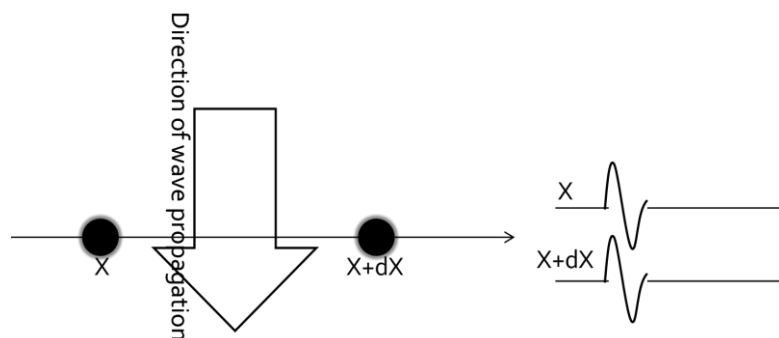
รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบทิศทางเดียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบหลัก ประกอบด้วย รูปแบบที่ 1 คลื่นเคลื่อนที่ขนานกับแนวเส้นทางการตรวจวัดจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X + dX$ ดังภาพที่ 3.2 ส่วนรูปแบบที่ 2 คลื่นเคลื่อนที่ทำมุม θ กับเส้นทางการตรวจวัดจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X + dX$ แต่ความเร็วเฟสที่ได้จากการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ จะไม่ใช่ความเร็วเฟสที่แท้จริง จำเป็นต้องมีการปรับแก้จากมุมที่เกิดขึ้นก่อน แสดงดังภาพที่ 3.3 และ รูปแบบที่ 3 คลื่นเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเส้นทางการตรวจวัด ซึ่งรูปแบบนี้ส่งผลให้คลื่นที่ตรวจวัดได้ ณ สองตำแหน่งมีค่าเท่ากันเสมอ แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นแนวขนานกับเส้นทางการตรวจวัด (Yokoi T., 2551)

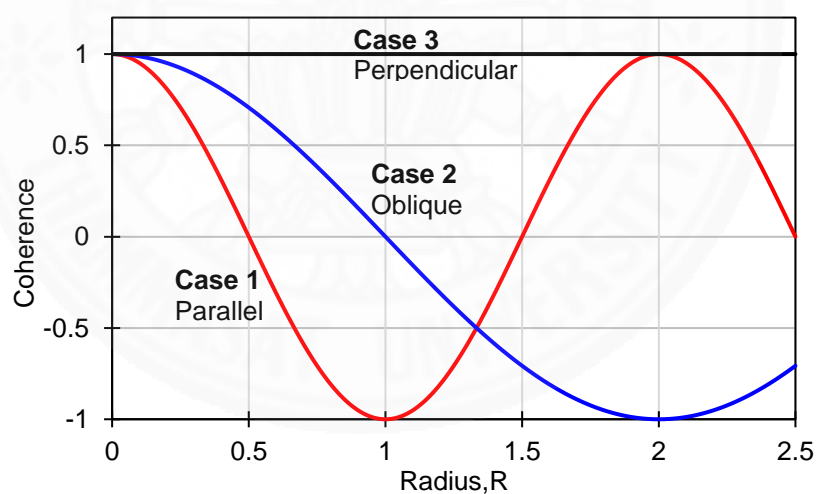


ภาพที่ 3.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นทำมุม θ กับเส้นทางการตรวจวัด (Yokoi T., 2551)



ภาพที่ 3.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับเส้นทางตรวจวัด (Yokoi T., 2551)

จากรูปแบบของการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ เมื่อพิจารณาถึงความสอดคล้อง (Coherence) ของคลื่นพบว่า คลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับตำแหน่ง X และ $X + dX$ มีความสอดคล้องกันมากที่สุด รองลงมาคือการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ทำมุม θ กับตำแหน่ง X และ $X + dX$ ในขณะที่รูปแบบที่ 1 มีความสอดคล้องกันน้อยที่สุด เนื่องจากคลื่นใช้เวลาเดินทางจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X + dX$ ซ้ำกว่ารูปแบบอื่นๆ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ความสอดคล้องของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ (Yokoi T., 2551)

ในความเป็นจริงคลื่นมีการแพร่กระจายไปได้ในทุกทิศทาง ดังนั้นการคำนวณค่า Cross-Correlation ของการเคลื่อนที่ของคลื่นรูปแบบนี้มีข้อแตกต่างจากแบบทิศทางเดียว เนื่องจากจำเป็นต้องมีการพิจารณาผลของมุมที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ Time Domain และ Frequency Domain ดังสมการที่ 3.15-3.16 ตามลำดับ

$$Cc(\xi, \eta, t) = f(x, y, t) * f(x + \xi, y + \eta, t) \quad (3.15)$$

$$Cc(\xi, \eta, \omega) = F(x, y, \omega) \cdot \overline{F(x + \xi, y + \eta, \omega)} \quad (3.16)$$

โดยที่ $\xi = r \cos \psi, \eta = r \sin \psi$ จากนั้นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่มีมากกว่า 1 ทิศทางสามารถทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันความสอดคล้อง (Coherency) ของคลื่นที่มุมต่างๆ ที่ผ่านเข้ามาในตำแหน่งของการตรวจวัด ดังสมการที่ 3.17-3.19

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Coh(\xi, \eta, \omega) d\psi \quad (3.17)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \left[\int_0^{2\pi} \exp \left(\frac{i\omega r}{c_{\text{apparent}}} \right) d\psi \right] \quad (3.18)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \left[\int_0^{2\pi} \exp \left(\frac{i\omega r \cos \psi}{c(\omega)} \right) d\psi \right] \quad (3.19)$$

แต่เนื่องจากเทอมของ $\left[\int_0^{2\pi} \exp \left(\frac{i\omega r \cos \psi}{c(\omega)} \right) d\psi \right]$ เมื่อแก้สมการจะมีค่า

เท่ากับ $2\pi J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right)$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ SPAC จึงมีค่าดังสมการที่ 3.20

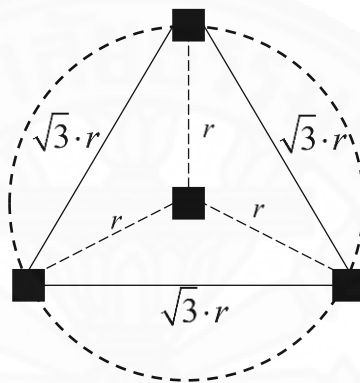
$$\rho(r, \omega) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right) \quad (3.20)$$

โดยที่ค่า $J_0(\cdot)$ หมายถึง Bessel Function ชนิดที่ 1 ลำดับที่ 0 นอกจากนี้ในทางปฏิบัติ การหาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สามารถวิเคราะห์ได้จากข้อมูลใน Frequency Domain ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.21

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\operatorname{real}[S_{CX}(\omega, r, \theta)]}{\sqrt{S_C(\omega, 0, 0) \cdot S_X(\omega, r, \theta)}} d\theta \quad (3.21)$$

- โดยที่ $real[\cdot]$ = ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน
- $S_{CX}(\omega, r, \theta)$ = Cross spectrum ระหว่าง $u(t; \omega, 0, 0)$ และ $u(t; \omega, r, \theta)$
- $S_C(\omega, 0, 0)$ = Spectrum ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง $C(0, 0)$
- $S_C(\omega, r, \theta)$ = Spectrum ที่ตำแหน่ง r ของวงกลม $X(r, \theta)$

รูปแบบของการตรวจวัดด้วยวิธี SPAC ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณจำนวน 4 ชุด โดยวางตามตำแหน่งที่แสดงในภาพที่ 3.6

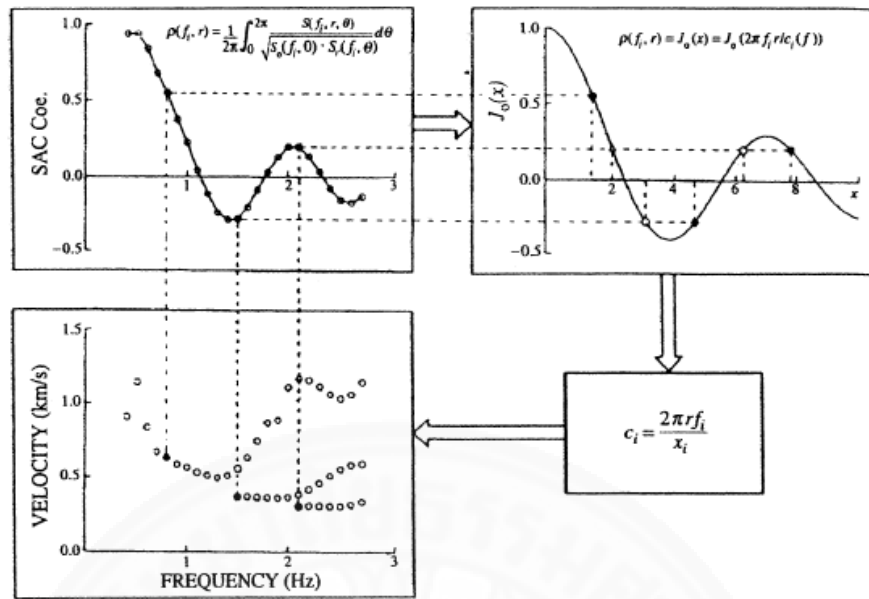


ภาพที่ 3.6 รูปแบบการตรวจวัดแบบ Array ด้วยวิธี SPAC

สำหรับขั้นตอนการคำนวณค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) จากวิธี SPAC นั้นมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.7

1. จากกราฟของ สัมประสิทธิ์ SPAC และกราฟของ Bessel Function of the First Kind with Zero Order กำหนดให้ (S_1, F_1) คือ คู่ลำดับของ สัมประสิทธิ์ SPAC และ (J_1, X_1) คือ คู่ลำดับของ Bessel Function of the First Kind with Zero Order ที่ตำแหน่งเดียวกับ S_1 เท่ากับ J_1 จากนั้นสามารถคำนวณค่าของ X_1 ได้จากคู่ลำดับของ (J_1, X_1)
2. เมื่อได้ค่า X_1 แล้ว สามารถคำนวณค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ได้จากสมการที่ 3.22 และกระทำซ้ำที่ความถี่ต่างๆ

$$Phase\ Velocity\ (C_i) = \left(\frac{2\pi r f_i}{X_i} \right) \quad (3.22)$$



ภาพที่ 3.7 แผนผังแสดงวิธีการคำนวณความเร็วเฟส (Okada H., 2546)

3.2.2 การวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี Centerless Circular Array (CCA)

สำหรับวิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของชั้นดิน คือ วิธี Centerless Circular Array ซึ่งเสนอโดย Cho I. และคณะ ปี 2549 โดยการนำข้อมูลที่ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในแนวตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ มาทำการวิเคราะห์อัตราส่วนสเปกตรัม (Spectral Ratio) โดยเริ่มต้นจากการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่บนเส้นรอบวงกลม $Z_0(t, r)$ และ $Z_1(t, r)$ ดังสมการที่ 3.23 และ 3.24 ตามลำดับ

$$Z_0(t, r) = \int_{-\pi}^{\pi} z(t, r, \theta) d\theta \tag{3.23}$$

$$Z_1(t, r) = \int_{-\pi}^{\pi} z(t, r, \theta) \exp(i\theta) d\theta \tag{3.24}$$

โดยมีสมมติฐานว่า คลื่นเรย์เลห์เฉพาะโหมดพื้นฐานเท่านั้นที่มีลักษณะเด่นต่อองค์ประกอบของคลื่นในแนวราบ จากนั้นทำการวิเคราะห์ Power Spectral Density $G_0(r, r; \omega)$ และ $G_1(r, r; \omega)$ ดังสมการที่ 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ

$$G_{Z_0 Z_0}(r, r, \omega) = 4\pi^2 \sum_{i=1}^{M^R} f_i^{RV}(\omega) J_0^2(rk_i^R(\omega)) \tag{3.25}$$

$$G_{Z1Z1}(r, r, \omega) = 4\pi^2 \sum_{i=1}^{M^R} f_i^{RV}(\omega) J_1^2(rk_i^R(\omega)) \quad (3.26)$$

โดยที่ M^R คือ จำนวนโหมดที่แสดงของคลื่น Rayleigh, f_i^{RV} คือ ความหนาแน่นขององค์ประกอบของคลื่นในแนวตั้งของคลื่น Rayleigh โหมดที่ i^{th} , $J_0(\cdot)$ และ $J_1(\cdot)$ คือ Bessel Function ชนิดแรกลำดับที่ศูนย์และหนึ่งตามลำดับ และ $k_i^R(\omega)$ คือ เลขคลื่นของคลื่น Rayleigh โหมดที่ i^{th} เมื่อนำมาหาอัตราส่วนระหว่าง $G_0(r, r; \omega)$ และ $G_1(r, r; \omega)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.27

$$\frac{G_{Z0Z0}(r, r, \omega)}{G_{Z1Z1}(r, r, \omega)} = \frac{\sum_{i=1}^{M^R} \alpha_i(\omega) J_0^2(rk_i^R(\omega))}{\sum_{i=1}^{M^R} \alpha_i(\omega) J_1^2(rk_i^R(\omega))} \quad (3.27)$$

โดยที่ $\alpha_i(\omega) = f_i^{RV} / f^V(\omega)$, $f^V(\omega) = \sum_{i=1}^{M^R} f_i^{RV}(\omega)$ เมื่อพิจารณาให้เฉพาะโหมดพื้นฐานมีผลต่อการวิเคราะห์ ส่งผลให้สมการที่ 3.27 ลดรูปได้ดังสมการที่ 3.28

$$\frac{G_{Z0Z0}(r, r, \omega)}{G_{Z1Z1}(r, r, \omega)} = \frac{J_0^2(rk(\omega))}{J_1^2(rk(\omega))} \quad (3.28)$$

โดยที่ J_i คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกลำดับที่ศูนย์และหนึ่ง (Bessel Function of the First Kind with the First and Zeroth Order) จากสมการที่ 3.28 สามารถคำนวณหาค่าเลขคลื่น (Wavenumber) ได้จากการคำนวณย้อนกลับ เมื่อทราบค่า r หรือรัศมีของวงกลม โดยฝั่งซ้ายของสมการสามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่ทำการตรวจวัด แต่สมการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถวิเคราะห์ได้ดีในกรณีที่ปราศจากสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งในความเป็นจริงข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงจะมีสัญญาณรบกวนปะปนมาในปริมาณที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ทำการศึกษา ดังนั้น ในการวิเคราะห์หาค่าเลขคลื่น (Wave Number) ให้ได้ค่าที่เหมาะสมและถูกต้องมากยิ่งขึ้นต้องทำการพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนด้วย จากสมการที่ 3.28 เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนเปลี่ยนเป็นสมการที่ 3.29

$$\frac{G_0(r, r, \omega)}{G_1(r, r, \omega)} = \frac{J_0^2(rk(\omega)) + \varepsilon(\omega) / N}{J_1^2(rk(\omega)) + \varepsilon(\omega) / N} \quad (3.29)$$

โดยที่ $\varepsilon(\omega)$ หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณจริง (Noise-to-Signal Ratio) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.30

$$\varepsilon \approx (-B - \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A \quad (3.30)$$

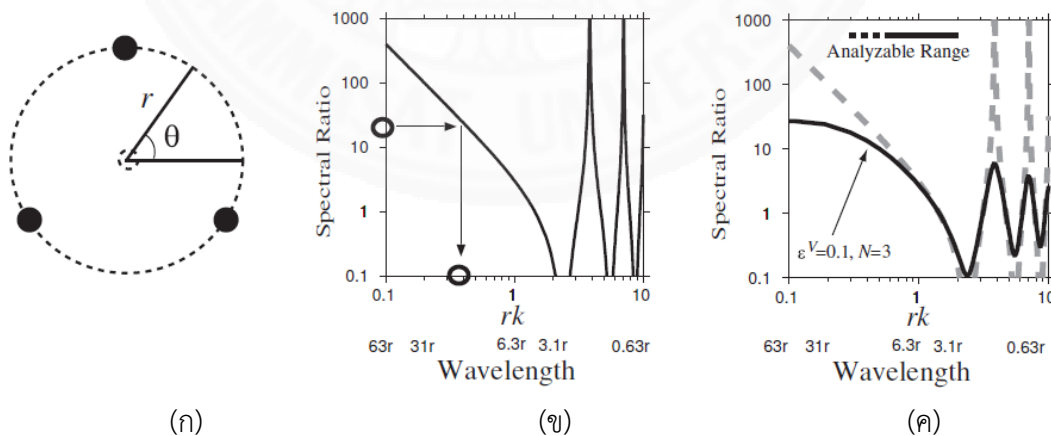
$$\text{โดยที่ } A = -\rho^2, B = \frac{\rho^2}{coh^2} - 2\rho^2 - \frac{1}{N}, C = \rho^2 \left(\frac{1}{coh^2} - 1 \right)$$

ส่วน $coh^2 = \frac{|G_0(0, r; \omega)|^2}{G_0(r, r; \omega)G_0(0, 0; \omega)}$ และ N คือ จำนวนเครื่องมือตรวจวัดที่วางอยู่บนรอบเส้น

รอบรูปวงกลม เมื่อคำนวณหาค่า K ที่แต่ละความถี่เรียบร้อยแล้ว สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟสได้จากสมการที่ 3.31

$$C^R(\omega) = \omega / k^R(\omega) \quad (3.31)$$

ภาพที่ 3.8 (ก) แสดงผังรูปแบบตำแหน่งสำหรับการเก็บข้อมูลด้วยวิธี CCA ซึ่งคล้ายกับรูปแบบของวิธี SPAC ส่วนภาพที่ 3.8 (ข) แสดงเส้นอัตราส่วนของสเปกตรัมด้วยการคำนวณทางทฤษฎีแบบปราศจากสัญญาณรบกวน และภาพที่ 3.8(ค) แสดงแสดงเส้นอัตราส่วนของสเปกตรัมด้วยการคำนวณทางทฤษฎีแบบคิดผลของสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 3.8 แผนผังการวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี CCA (ก) รูปแบบการเก็บข้อมูลสำหรับวิธี CCA, (ข) Theoretical Spectral Ratio สำหรับแบบ Noise Free, (ค) Theoretical Spectral Ratio สำหรับ Noise Inclusive (Cho I., 2549)

สำหรับการคำนวณหาค่าความเร็วเฟสด้วยวิธี CCA นั้น หากใช้สมการสำหรับ ข้อมูลที่ปราศจากสัญญาณรบกวน (Noise Free) ซึ่งในความเป็นจริงข้อมูลที่ใช้นั้นมีสัญญาณรบกวน ปะปนอยู่ ทำให้ค่า rk ที่ได้มีค่าสูงเกินไป และส่งผลให้ความเร็วเฟสมีค่าต่ำเกินไปในช่วงความยาว คลื่นยาว (Long Wavelength) หรือช่วงที่มีค่า rk ต่ำ

3.3 วิธีการลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี Running Variance

ข้อมูลที่ได้มาจากการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็ก (Microtremor) บนผิวดินในแต่ละ ตำแหน่งบนโครงข่าย (Array) ซึ่งถูกบันทึกเป็นระยะเวลาประมาณ 40 นาที โดยมีค่า Sampling Rate เท่ากับ 100 เฮิร์ตซ์ หรือใน 1 วินาทีเก็บข้อมูลจำนวน 100 ข้อมูล ทำให้ข้อมูลทั้งหมดมีจำนวน ประมาณ 240,000 ข้อมูล สำหรับข้อมูลที่เก็บบันทึกได้นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบของคลื่นหรือ รูปแบบของการสั่นสะเทือนซึ่งมีสาเหตุการเกิดมาจากหลากหลายรูปแบบ เช่น การสั่นไหวตาม ธรรมชาติของพื้นดิน การจราจร การเดินหรือการวิ่งในพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ตั้งเครื่องมือ ตรวจวัด ฯลฯ นอกเหนือจากการสั่นไหวตามธรรมชาติแล้ว ปัจจัยอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแล้วแต่ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อผลการวิเคราะห์ซึ่งอาจทำให้ผลการศึกษาทั้งในส่วน ของค่าคาบอิทธิพลหลักและโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินเกิดความผิดพลาด ดังนั้นก่อนการดำเนินการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลที่ตรวจวัดมาแต่ละครั้ง จำเป็นต้องมีการกำจัดหรือลด สัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะบริเวณใกล้กับตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดออกจากสัญญาณ ทั้งหมดก่อน โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เทคนิค Running Variance Method (RVM) มาใช้ในการ ช่วยลดและตัดสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูลทั้งหมด

วิธี RVM เสนอโดย Anzehae M.M. และคณะ ในปีพ.ศ. 2558 โดยมีหลักการพื้นฐาน คือ สัญญาณรบกวนเฉพาะตำแหน่ง (Local Noise) ซึ่งเกิดขึ้นกับบางตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัด การสั่นสะเทือนจะทำให้ค่าความแปรปรวน (Variance) ของข้อมูลช่วงนั้นมีค่าสูงกว่าข้อมูลช่วงอื่น ๆ ที่ไม่มีการรบกวนเกิดขึ้น ดังนั้นการคำนวณค่าความแปรปรวนของข้อมูลซึ่งแบ่งออกเป็นหน้าต่าง (Window) เล็ก ๆ และทำการเลื่อนหน้าต่างออกไปจนกระทั่งถึงข้อมูลสุดท้ายเพื่อให้ได้ค่าความ แปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดออกมาในรูปของกราฟ Histogram ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแปรปรวนในแนวราบกับจำนวนข้อมูลที่สอดคล้องกับค่าความแปรปรวนในแนวตั้ง โดยข้อมูล ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สำหรับการลดสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูล

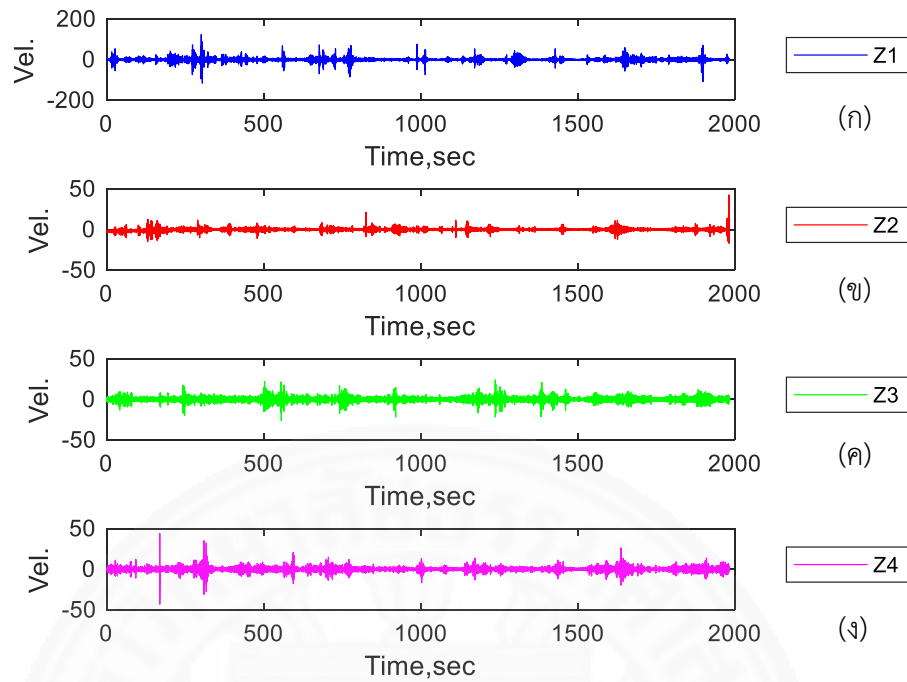
ขั้นตอนถัดมาของวิธี RVM คือการกำหนดเกณฑ์ หรือ Threshold ของค่าความ แปรปรวนสำหรับการนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการช่วยลดสัญญาณรบกวนออกไป ซึ่งปกติแล้วสัญญาณ รบกวนมักจะมีค่าความแปรปรวนที่สุด อีกทั้งจำนวนข้อมูลอาจมีจำนวนไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับ

ข้อมูลทั้งหมด ดังนั้น วิธีการ RVM ได้แนะนำให้ใช้เกณฑ์สำหรับตัดข้อมูลที่ถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน โดยการใช้ค่าที่ระดับความสูง 1 ใน 5 ของค่าสูงสุดจากกราฟ Histogram เมื่อลากเส้นในแนวแกนตั้งที่ตำแหน่งกำหนดค่า Threshold ตัดกับกราฟในแนวราบจะได้ค่าความแปรปรวนที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณทั้งหมด อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ที่ใช้ระดับความสูง 1 ใน 5 อาจเปลี่ยนเป็น 1 ใน 4 หรือ 1 ใน 6 ของค่าสูงสุดจากกราฟ Histogram ได้ ขึ้นอยู่กับค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ถือเป็นสัญญาณปกติกับค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน ดังนั้น เกณฑ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้

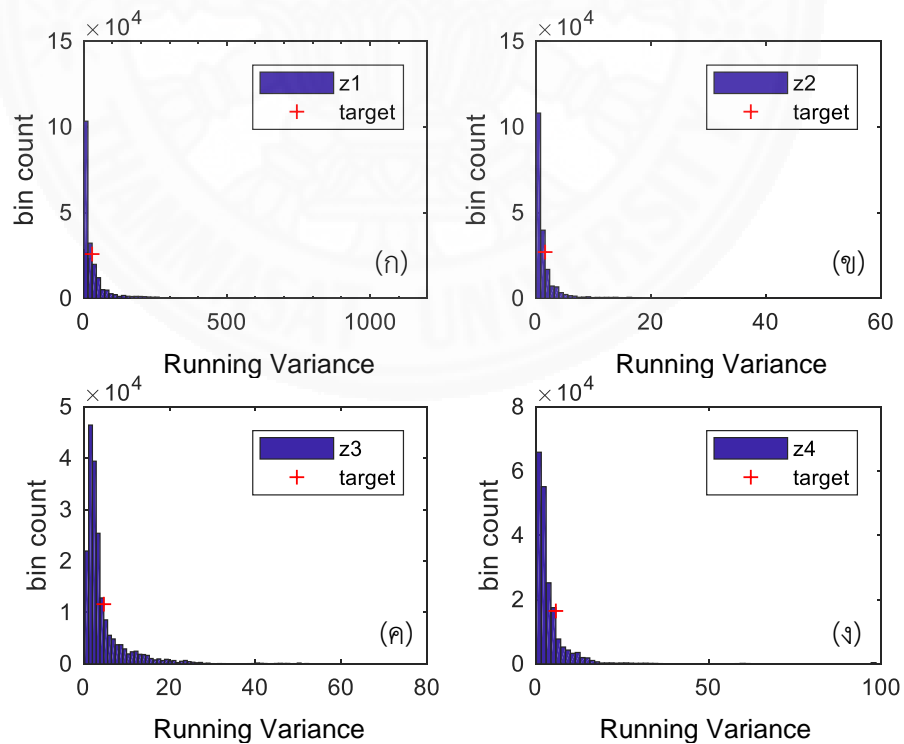
จากความยาวข้อมูลทั้งหมด ทำการคำนวณค่าความแปรปรวนข้อมูลในหน้าต่างเล็ก ๆ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลเท่ากับ 4,096 ข้อมูลอีกครั้ง โดยในครั้งนี้อาจความแปรปรวนของข้อมูลชุดดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่เลือกไว้ ข้อมูลชุดนั้นจะถูกนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป แต่หากค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ข้อมูลส่วนนั้นจะถูกตัดทิ้งไปซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลชุดนั้นเป็นสัญญาณรบกวน จากนั้นทำการเลื่อนหน้าต่างข้อมูลออกไปด้วยความยาวของข้อมูลที่กำหนด เช่น เลื่อนหน้าต่างข้อมูลออกเป็นเท่ากับ 500 ข้อมูล หรือ 5 วินาที เป็นต้น จากนั้นพิจารณาเลือกหรือไม่เลือกข้อมูลชุดนั้นจากเกณฑ์ของค่าความแปรปรวนที่กำหนดจนกระทั่งถึงข้อมูลชุดท้ายขั้นตอนถัดมาคือการนำข้อมูลทุกชุดที่มีค่าความแปรปรวนน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมาเรียงต่อกันเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าคาบอริทิลหลัก หรือค่าความเร็วเฟสตั้งรายละเอียดที่กล่าวมาแล้ว

ภาพที่ 3.9 แสดงตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนพื้นดินในแนวตั้งของเครื่องมือการตรวจวัดทั้ง 4 ตำแหน่งที่วางอยู่บนเส้นรอบวงกลมและตำแหน่งกึ่งกลางวงกลม จากรูปจะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งหมดประกอบด้วยสัญญาณรบกวนในแต่ละตำแหน่งซึ่งแตกต่างกันทั้งเวลาและขนาด ดังนั้นข้อมูลชุดนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้เทคนิค RVM ในการช่วยลดสัญญาณรบกวนออกเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ภาพที่ 3.10 แสดงตัวอย่างกราฟ Histogram ที่คำนวณได้จากข้อมูลทั้งหมดของเครื่องมือวัดทั้ง 4 ตำแหน่ง โดยเครื่องหมายบวกสีแดงเมื่อลากตัดผ่านแนวราบ หมายถึง ค่าความแปรปรวนที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสัญญาณรบกวนออก ซึ่งหากข้อมูลชุดใดที่คำนวณค่าความแปรปรวนแล้วมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน ส่งผลให้ข้อมูลชุดนั้นจะถูกตัดออก ส่วนข้อมูลช่วงใดที่มีค่าความแปรปรวนต่ำกว่าเกณฑ์นี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 3.9 ข้อมูลการสั่นสะเทือนขนาดเล็บบนพื้นดินในแนวตั้งของ (ก) เครื่องมือวัดชุดที่ 1, (ข) เครื่องมือวัดชุดที่ 2, (ค) เครื่องมือวัดชุดที่ 3 และ (ง) เครื่องมือวัดชุดที่ 4

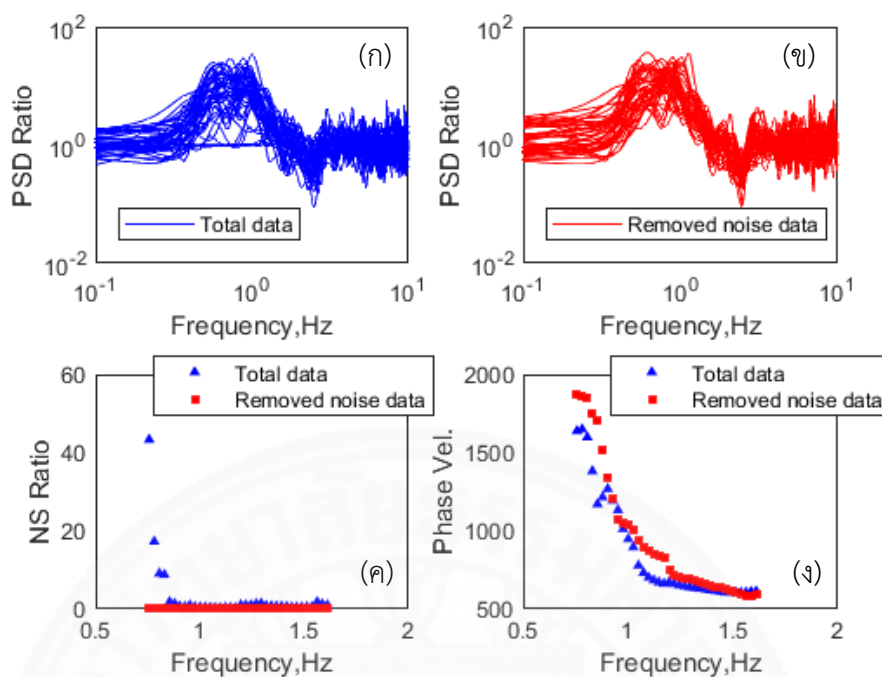


ภาพที่ 3.10 กราฟ Histogram ของค่าความแปรปรวนจากการสั่นสะเทือนของพื้นดินในแนวตั้งของ (ก) เครื่องมือวัดชุดที่ 1, (ข) เครื่องมือวัดชุดที่ 2, (ค) เครื่องมือวัดชุดที่ 3 และ (ง) เครื่องมือวัดชุดที่ 4

ภาพที่ 3.11 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเร็วเฟสของข้อมูลตัวอย่าง โดยที่ภาพที่ 3.11(ก) คือ ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วน Power Spectrum Density ด้วยวิธี CCA ของข้อมูลทั้งหมดที่ไม่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนออก ซึ่งแต่ละเส้นคือผลการวิเคราะห์ที่ได้จากข้อมูลในหน้าต่างเล็ก ๆ ที่มีความยาวข้อมูลเท่ากับ 4,096 ข้อมูล ส่วนภาพที่ 3.11(ข) คือ ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วน Power Spectrum Density ด้วยวิธี CCA ของข้อมูลทั้งหมดที่ใช้วิธี RVM ช่วยลดสัญญาณรบกวนออกไป จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าอัตราส่วน Power Spectrum Density ของชุดข้อมูลที่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนออกด้วยวิธี RVM มีลักษณะที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกันดี ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 3.11(ก) ซึ่งไม่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนออกไป พบว่า ชุดข้อมูลบางช่วงมีค่าอัตราส่วน Power Spectrum Density ไม่ใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับชุดข้อมูลอื่น ๆ จำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลชุดดังกล่าวมีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่จำนวนมากกว่าสัญญาณปกติ

หากพิจารณาภาพที่ 3.11(ค) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณปกติ (Noise to Signal Ratio, NS Ratio) โดยสามเหลี่ยมสีน้ำเงิน คือ ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลทั้งหมดโดยยังไม่ตัดสัญญาณรบกวน ส่วนสี่เหลี่ยมสีแดงคือผลการวิเคราะห์จากข้อมูลที่ไม่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนออกด้วยวิธี RVM ผลการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลตัวอย่างพบว่า ชุดข้อมูลที่ไม่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนออกมีค่า NS Ratio ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิร์ตซ์ สูงกว่าผลการวิเคราะห์ที่มาจากข้อมูลที่ลดสัญญาณรบกวนออกไปอย่างชัดเจน ซึ่งหากนำข้อมูลทั้งหมดที่ไม่มีการลดสัญญาณรบกวนออกมาทำการวิเคราะห์หาความเร็วเฟสจะทำให้ได้ค่าความเร็วเฟสที่ต่ำเกินไป (Underestimate) โดยเฉพาะในช่วงความถี่ที่มีค่า NS Ratio สูง ดังแสดงในภาพที่ 3.11(ง) ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วเฟสจากข้อมูลทั้งสองชุดแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ในช่วงความถี่ที่มีค่า NS Ratio ใกล้เคียงกัน ค่าความเร็วเฟสที่คำนวณได้จากวิธี CCA จะมีค่าใกล้เคียงกัน เช่น ในช่วงความถี่ประมาณ 1 หรือ 1.5 เฮิร์ตซ์ ในขณะที่ในช่วงความถี่ที่มีค่า NS Ratio แตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น ช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิร์ตซ์ หรือช่วงความถี่ 1 – 1.4 เฮิร์ตซ์ ค่าความเร็วเฟสที่คำนวณมาจากชุดข้อมูลที่ไม่มีการลดสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง และมีค่าความเร็วเฟสต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วเฟสที่คำนวณมาจากชุดข้อมูลที่ไม่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี RVM

สำหรับข้อมูลทั้งหมดในการศึกษานี้ ก่อนทำการวิเคราะห์หาคาบอทธิพลหลักด้วยวิธี H/V Spectral Ratio และค่าความเร็วเฟสด้วยวิธี SPAC หรือ CCA ข้อมูลจะถูกลดสัญญาณรบกวนออกด้วยวิธี RVM ก่อนทุกครั้งเพื่อทำให้ผลการวิเคราะห์ในแต่ละวิธีมีความถูกต้องมากที่สุด



ภาพที่ 3.11 (ก) อัตราส่วน Power Spectrum Density จากข้อมูลทั้งหมดซึ่งไม่มีการตัดสัญญาณรบกวน, (ข) อัตราส่วน Power Spectrum Density จากข้อมูลทั้งหมดที่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวน, (ค) อัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณปกติ, และ (ง) ความเร็วเฟสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี CCA

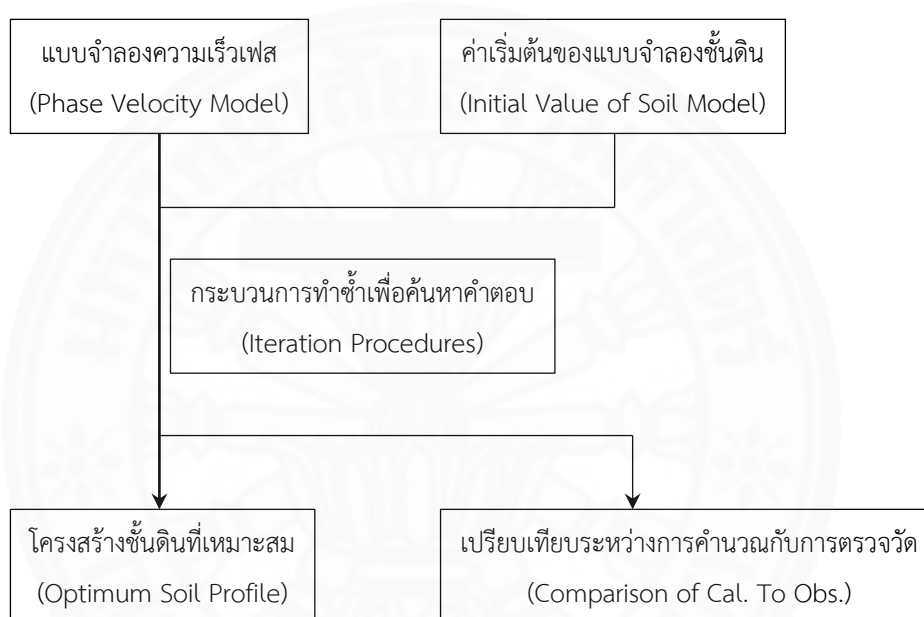
3.4 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก

โครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน (Ground Response Analysis) ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) วิธีนี้เป็นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นดินด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ โดยการพยายามสร้างโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่มีค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity Dispersion Curve) สอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยวิธี SPAC และ CCA วิธีการคำนวณย้อนกลับนี้เสนอโดย Yokoi ในปี 2548 ซึ่งวิธีดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดยการรวมเอาความสามารถจาก 2 วิธี ได้แก่

1. วิธี Down Hill Simplex เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาค่าต่ำสุดเฉพาะที่ (Local Minimum) ซึ่งเร็วกว่าวิธี Geiger โดยไม่จำเป็นต้องคำนวณอนุพันธ์ย่อย (Partial Derivatives) ส่วนผลลัพธ์จากวิธีนี้ถูกควบคุมโดยค่าเริ่มต้น (Initial Values) ที่ป้อนเข้าสู่การวิเคราะห์ซึ่งง่ายต่อการหาค่าต่ำสุดเฉพาะที่

2. วิธี Very Fast Simulated Annealing เป็นวิธีหนึ่งของวิธีการค้นหาและเลือกคำตอบที่ดีที่สุด วิธีนี้สามารถคำนวณค่าต่ำสุดโดยรวม (Global Minimum) ได้ด้วยความน่าจะเป็น ส่วนเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับการค้นหาความน่าจะเป็นที่เหมาะสมสำหรับแต่ละพารามิเตอร์

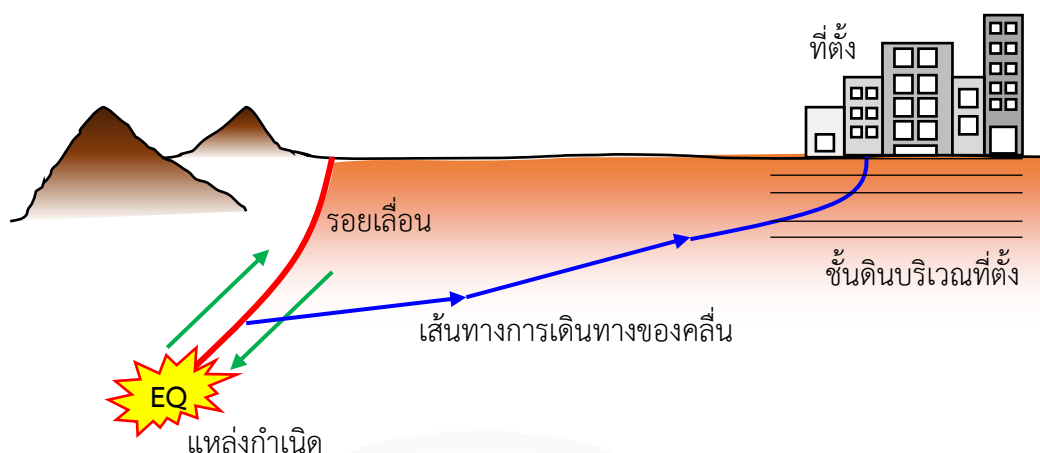
ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างความเร็วคลื่นขึ้นอยู่กับความลึกจากค่าความเร็วเฟสจากหัวข้อก่อนหน้าด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับสามารถแสดงได้เป็นแผนผังดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แผนผังการวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณย้อนกลับ

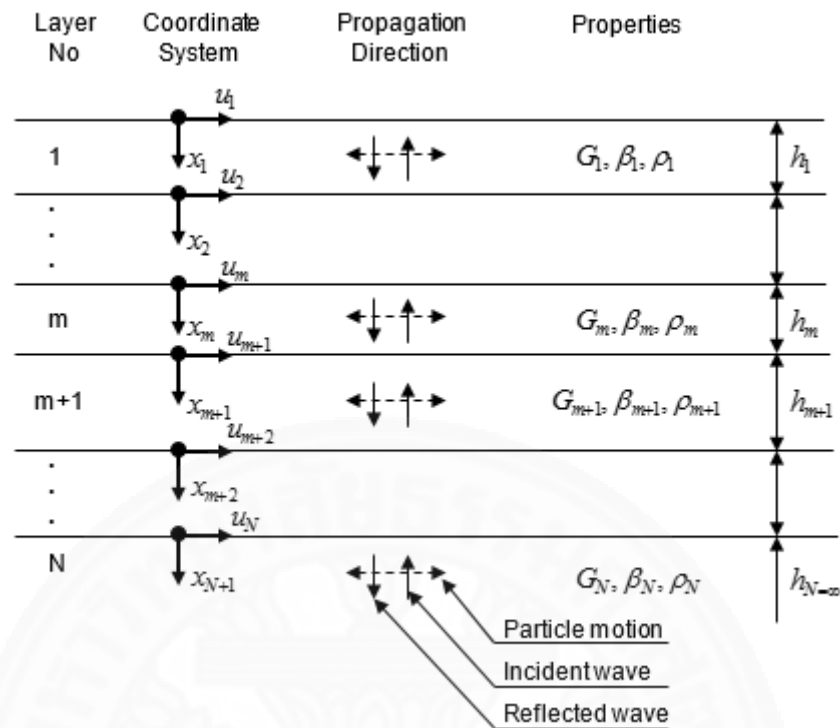
3.5 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ

เมื่อรอยเลื่อนมีการแตกหรือยับภายใต้พื้นเปลือกโลก ส่งผลให้คลื่นหลัก (Body Wave) แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดไปทุกทิศทาง เมื่อคลื่นหลักเคลื่อนที่ไปชนกับขอบ ที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดการกระทบและสะท้อนของคลื่น ส่วนคลื่นที่เอียง เคลื่อนที่กระทบกับชั้นดินในแนวราบ โดยปกติถ้าหากชั้นดินในแนวราบเป็นชั้นดินอ่อน คุณสมบัติของคลื่นแล้วจะสะท้อนขึ้นไปในทิศทางแนวตั้งเป็นหลัก จากชั้นล่างสุดจนกระทั่งแพร่กระจายไปจนถึงผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 3.13 สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินแบบ 1 มิติขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่ว่าขอบเขตของชั้นดินในแนวราบเป็นอนันต์ และการตอบสนองของดินนั้นมีอิทธิพลมาจากการกระจายตัวของคลื่นเฉือน (Shear Wave) ในแนวตั้งจากชั้นหิน (Bedrock) ขึ้นไปด้านบน (Surface) เป็นหลัก



ภาพที่ 3.13 เส้นทางการเดินทางของคลื่นจากแหล่งกำเนิด (Kramer L., 2539)

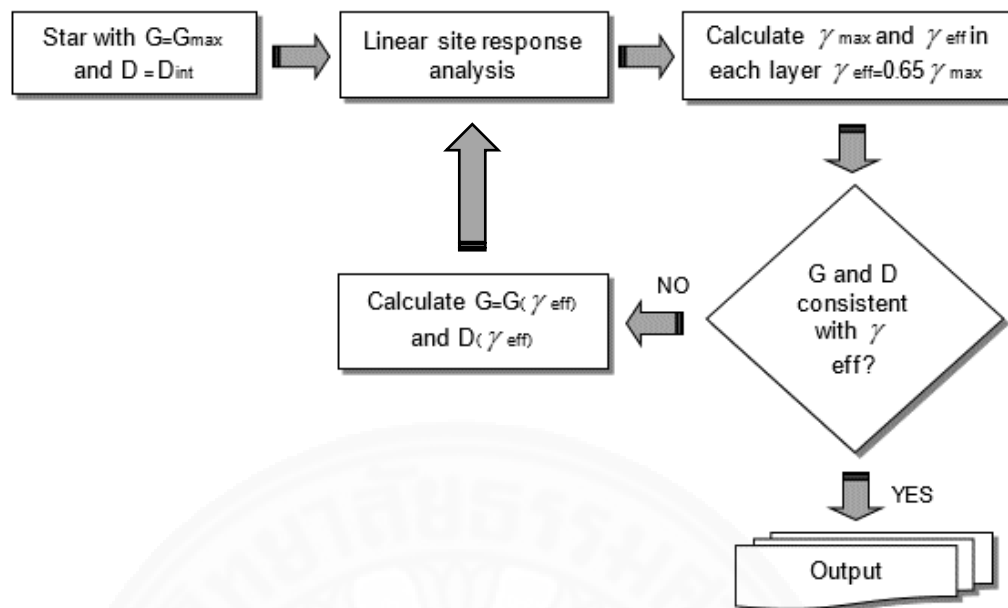
การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ สามารถแบ่งออกเป็นวิธีเชิงเส้น (Linear Approach) และวิธีแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Approach) โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบเชิงเส้น ใช้เพียงค่า Shear Modulus และ Damping Ratio คงที่ ซึ่งไม่เหมาะสมกับระดับความเครียดที่เปลี่ยนไปในแต่ละชั้นของวัสดุ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาเนื่องจากการวิเคราะห์ลักษณะนี้คือการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear Analysis) ในการประมาณพฤติกรรมทางอีลาสติกของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และอัตราส่วน Damping กับระดับของ Shear Strain ที่เปลี่ยนไป ซึ่งได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์จะใช้ค่า Effective shear strain แทนค่าสูงสุด ซึ่งอยู่ในช่วง 50-70% ในปัจจุบันใช้ค่าประมาณ 65% ภาพที่ 3.14 แสดงแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ และทิศทางของการแพร่กระจายของคลื่นในแต่ละชั้น



ภาพที่ 3.14 แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ (Schnabel P.B., Seed H.B., 2515)

หลักการสำคัญของวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบเชิงเส้นเทียบเท่ากับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ คือ การ Trial ค่า Stress และ Strain ให้มีความสอดคล้องกันที่รอยต่อของชั้นดินแต่ละชั้น โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจาก

1. การประมาณค่า Shear Modulus และ Damping Ratio ในแต่ละชั้นให้อยู่ในระดับความเครียดเฉือนเดียวกัน โดยทั่วไปใช้ค่าที่ระดับความเครียดเฉือนต่ำเป็นค่าตั้งต้น
2. วิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ในแต่ละชั้นเพื่อหาค่า Effective Shear Strain จากความเครียดเฉือนที่วิเคราะห์ได้ก่อนหน้า
3. หาค่า Shear Modulus และ Damping Ratio ใหม่จากการใช้ค่า Effective Shear Strain ที่วิเคราะห์ได้ นำไปหาความสัมพันธ์จาก Modulus Reduction และ Damping Curves
4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 และ 3 จนกระทั่งค่าของ Shear Modulus และ Damping Ratio ค่าใหม่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปควรจะไม่เกิน 5-10% ในการทำซ้ำ 3-5 รอบ แผนผังการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแสดงดังภาพที่ 3.15



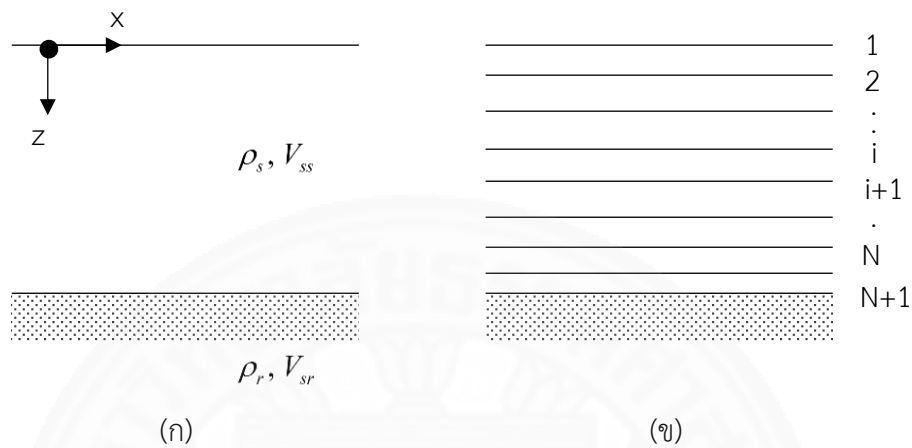
ภาพที่ 3.15 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบเชิงเส้นเทียบเท่า

3.6 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 1 มิติ

ถึงแม้ว่าวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าจะมีความสะดวกในการคำนวณและให้ผลลัพธ์ที่สมเหตุสมผลสำหรับปัญหาทั่วไป อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวยังคงมีการประมาณเกี่ยวกับกระบวนการวิธีไม่เชิงเส้นของผลตอบสนองของชั้นดิน ดังนั้นวิธีไม่เชิงเส้นเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของชั้นดินได้ด้วยการใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในโดเมนของเวลา (Time Domain) โดยการใช้สมการการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ทำให้สามารถใช้แบบจำลอง Stress-Strain ที่เป็นแบบเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้น หรือแบบจำลองขั้นสูงในการวิเคราะห์ได้ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ที่จุดเริ่มต้นของแต่ละเวลา (Time Step) จะถูกนำมาใช้เพื่อเลือกเอาคุณสมบัติของชั้นดินที่เหมาะสม ดังนั้นความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของ Nonlinear Inelastic Stress-Strain จึงสามารถใช้ในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่เพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นได้

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบไม่เชิงเส้นด้วยแบบจำลอง 1 มิติ ส่วนใหญ่อธิบายลักษณะพฤติกรรม Stress-Strain ของชั้นดินโดยใช้แบบจำลอง Cyclic Stress-Strain เช่น Hyperbolic Model, Modified Hyperbolic Model, Ramberg-Osgood Model, และ Iwan-Type Model เป็นต้น

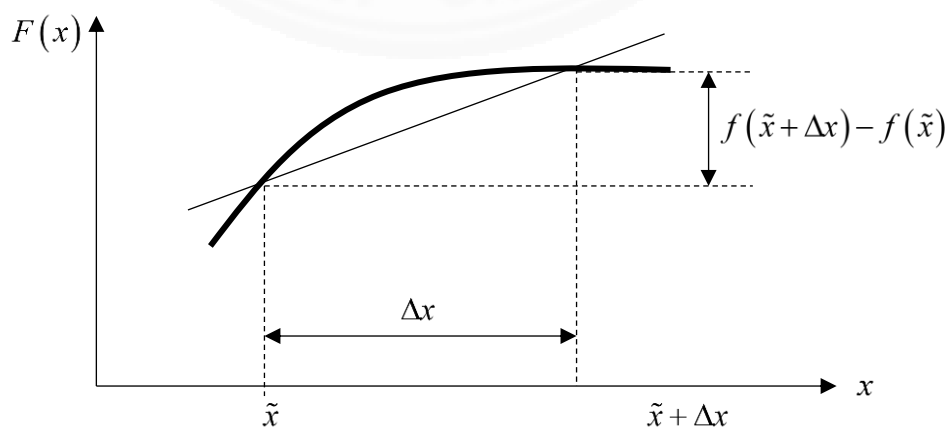
หากพิจารณาแบบจำลองชั้นดินที่มีขอบเขตด้านข้างเป็นอนันต์ในภาพที่ 3.16(ก) หากชั้นดินถูกกระทำด้วยการเคลื่อนที่ในแนวราบที่ระดับชั้นดิน ผลตอบสนองของชั้นดินจะเป็นไปตามสมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 3.32



ภาพที่ 3.16 แบบจำลองชั้นดิน (ก) แบบจำลองชั้นดินที่มีลักษณะสม่ำเสมอและมีขอบเขตด้านข้างเป็นอนันต์ (ข) แบ่งแบบจำลองชั้นดินออกเป็นชั้นย่อยจำนวนเท่ากับ N

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} \tag{3.32}$$

สำหรับวิธี Explicit Finite-Difference หากพิจารณาฟังก์ชัน $f(\tilde{x})$ ที่แสดงในภาพที่ 3.17 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $f(x)$ ที่ตำแหน่ง $x = \tilde{x}$ แสดงได้ดังสมการที่ 3.33



ภาพที่ 3.17 การประมาณด้วยวิธี Forward Difference ของฟังก์ชัน $f(\tilde{x})$

$$\frac{df(\tilde{x})}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(\tilde{x} + \Delta x) - f(\tilde{x})}{\Delta x} \quad (3.33)$$

การประมาณค่าที่สมเหตุสมผลต่ออนุพันธ์อันดับหนึ่งสามารถทำได้โดยการลบข้อจำกัดและการใช้ค่าที่มีขนาดเล็กแต่มีขอบเขต Δx ดังนั้นสมการที่ 3.33 จะหมายถึงการประมาณค่า $df(\tilde{x})/dx$ ด้วยวิธี Forward Difference โดยภาพที่ 3.17 แสดงให้เห็นว่าแท้จริงแล้ววิธี Forward Difference จะให้ผลการประมาณที่ดีขึ้นสำหรับอนุพันธ์ที่ $x = \tilde{x} + \Delta x/2$ มากกว่าที่ตำแหน่ง $x = \tilde{x}$

หากแบ่งชั้นดินออกเป็นชั้นย่อย ๆ จำนวน N ชั้นที่มีความหนาเท่ากับ Δz สำหรับ $u_{i,t} = u(z = i\Delta z, t)$ สามารถใช้เขียนการประมาณ Finite Difference ด้วยอนุพันธ์ดังสมการที่ 3.34 ก และ 3.34 ข

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} \approx \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z} \quad (3.34ก)$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} \approx \frac{\dot{u}_{i,t+\Delta t} - \dot{u}_{i,t}}{\Delta t} \quad (3.34ข)$$

นำสมการที่ 3.34 ก และ 3.34 ข แทนที่ในสมการการเคลื่อนที่จะทำให้สมการเชิงอนุพันธ์สามารถประมาณได้ด้วยสมการของ Explicit Finite Difference ดังสมการที่ 3.35

$$\frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z} = \frac{\dot{u}_{i,t+\Delta t} - \dot{u}_{i,t}}{\Delta t} \quad (3.35)$$

คำนวณค่า $\dot{u}_{i,t+\Delta t}$ ได้ดังสมการที่ 3.36

$$\dot{u}_{i,t+\Delta t} = \dot{u}_{i,t} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}) \quad (3.36)$$

สมการที่ 3.36 แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่เวลา t เป็นอย่างไร ซึ่งสามารถใช้คำนวณค่าที่เวลา $t + \Delta t$ ได้ การใช้สมการที่ 3.36 สำหรับทุกค่าที่ i สามารถคำนวณความเร็วที่เวลา $t + \Delta t$ ได้ จากนั้นใช้ค่าความเร็วที่จุดสิ้นสุดของแต่ละเวลาเป็นความเร็วสำหรับจุดเริ่มต้นในเวลาถัดไป กระบวนการทำซ้ำดังกล่าวจากสมการที่ 3.36 จะทำให้สมการการเคลื่อนที่รวมเป็นอนุกรมของ

ช่วงเวลาสั้น ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ต้องมีความสอดคล้อง เนื่องจากพื้นดินเป็น Free Surface ($\tau = 0$) ดังนั้น

$$\dot{u}_{i,t+\Delta t} = \dot{u}_{i,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z}(\tau_{2,t}) \quad (3.37)$$

เงื่อนไขขอบที่ด้านล่างของชั้นดินขึ้นอยู่กับธรรมชาติของชั้นหินเสมือน ถ้าชั้นหินเสมือนมีลักษณะที่แข็ง (Rigid) ค่าความเร็ว $\dot{u}_b(t) = \dot{u}_{N+1,t}$ จะมีค่าเท่ากับการเคลื่อนที่ที่ป้อนเข้าไป แต่หากชั้นหินเสมือนเป็นอีลาสติก (Elastic) ความต่อเนื่องของความเครียดระบุว่าค่า Shear Stress ที่ด้านล่างของชั้นดิน ($\tau_{N+1,t}$) จะมีค่าเท่ากับค่า Shear Stress ชั้นบนของชั้นดิน ($\tau_{r,t}$) ดังนั้น

$$\dot{u}_{N+1,t+\Delta t} = \dot{u}_{N+1,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z}(\tau_{r,t} - \tau_{N,t}) \quad (3.38)$$

ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นไปโดยผ่านชั้นหินมีความเร็วอนุภาค $\dot{u}_r(t)$ ที่ตำแหน่งเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นดินและชั้นหิน ค่าของ Shear Stress ที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าโดยประมาณดังสมการที่ 3.39

$$\tau_{r,t} \approx \rho_r v_{sr} (2\dot{u}_r(t + \Delta t) - \dot{u}_{N+1,t+\Delta t}) \quad (3.39)$$

แทนที่สมการที่ 3.39 ในสมการที่ 3.38 จะได้

$$\dot{u}_{N+1,t+\Delta t} = \frac{\dot{u}_{N+1,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z} [2\rho_r v_{sr} \dot{u}_r(t + \Delta t) - \tau_{N,t}]}{1 + (\Delta t / \rho\Delta z) \rho_r v_{sr}} \quad (3.40)$$

จากนั้นกระบวนการคำนวณจะเริ่มจากชั้นล่าง ($i = N + 1$) ไปยังชั้นบนสุด ($i = 1$) ของแบบจำลองชั้นดินในแต่ละเวลา การคำนวณจะได้ค่าความเร็วที่จุดสิ้นสุดของแต่ละเวลา แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณนี้จำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้ของค่า Shear Stress ในแต่ละเวลาด้วย

หากชั้นดินเริ่มต้นที่สภาวะหยุดนิ่ง ($\dot{u}_{i,t=0} = 0$) และ ($\tau_{i,t=0} = 0$) สำหรับทุก i เมื่อมีการเคลื่อนที่ในรูปแบบของ $\dot{u}_b(t)$ สำหรับ Rigid Bedrock หรือ $\dot{u}_r(t)$ สำหรับ Elastic Bedrock ส่งความเร็วไปยังชั้นล่างของชั้นดิน (\dot{u}_{N+1}) จะทำให้มีค่าไม่ใช่ศูนย์ และในแต่ละช่วงเวลาค่า

$\dot{u}_N, \dot{u}_{N-1}, \dot{u}_{N-2}, \dots$ จะไม่ใช่ค่าที่เป็นศูนย์เนื่องจากชั้นดินมีการเคลื่อนตัวจากการเคลื่อนที่ที่ป้อนเข้าสู่ชั้นดิน ดังนั้นการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละเวลาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.41

$$\Delta u_{i,t} = \dot{u}_{i,t} \Delta t \quad (3.41)$$

ผลรวมของการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถคำนวณการเคลื่อนที่รวมทั้งหมด $u_{i,t}$ ที่จุดเริ่มต้นของแต่ละเวลาได้ สำหรับค่าความเครียดเฉือนในแต่ละชั้นย่อย (Sublayer) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.42

$$\gamma_{i,t} = \frac{\partial u_{i,t}}{\partial z} \approx \frac{u_{i+1,t} - u_{i,t}}{\Delta z} \quad (3.42)$$

ถ้าชั้นดินถูกสมมติให้เป็น Linear Elastic ค่า Shear Stress จะขึ้นอยู่กับค่า Shear Strain ปัจจุบันเท่านั้น เช่น $\tau_{i,t} = G_i \gamma_{i,t}$ อย่างไรก็ตาม ถ้าชั้นดินเป็นแบบไม่เชิงเส้นและ Inelastic ค่า Shear Stress จะขึ้นอยู่กับค่า Shear Strain ปัจจุบันและประวัติของ Stress-Strain ในกรณีนี้ผลการคำนวณค่า Shear Strain ($\gamma_{i,t}$) และความสัมพันธ์แบบ Cyclic Stress-Strain จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่า Shear Stress ($\tau_{i,t}$) ที่สอดคล้องกันด้วย

วิธี Explicit สามารถให้ผลการคำนวณที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) ได้หากการกำหนดช่วงเวลามีความกว้างมากเกินไป ดังนั้นการใช้วิธี Implicit Finite Difference จึงเป็นวิธีที่กำจัดปัญหาที่เกี่ยวกับความไม่มีเสถียรภาพได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถใช้ช่วงเวลาที่ยาวขึ้นได้ ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานในปัจจุบันสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินใช้รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธี Explicit เป็นส่วนใหญ่

3.7 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ

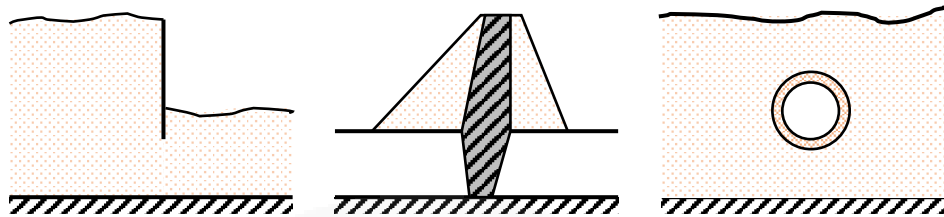
ถึงแม้ว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นจะใช้สำหรับการแก้ปัญหาการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ สมมติฐานและสมการที่ใช้ในการคำนวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความแตกต่างกันไปด้วย จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นจำนวนมาก (Joyner W.B. and Chen A.T.F., 2518) สามารถสรุปความแตกต่างได้ดังต่อไปนี้

1. วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าสามารถทำให้เกิด Spurious Resonances เช่น อัตราการขยายกำลังระดับสูงซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นพร้อมกันขององค์ประกอบที่มีความแรงมากของคลื่นที่ป้อนซึ่งตรงกับความถี่ธรรมชาติหนึ่งของแบบจำลองชั้นดินแบบเชิงเส้นเทียบเท่า
2. การใช้ Effective Shear Strain ในวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าสามารถส่งผลให้ระบบมีความอ่อนมากและมีความหน่วงสูง ในกรณีที่ค่า Peak Shear Strain มีค่ามากกว่าค่า Shear Strain ที่เหลืออยู่ หรือระบบมีความอ่อนน้อยลง หรือความหน่วงต่ำ เมื่อขนาดของ Shear Strain เริ่มมีค่าสม่ำเสมอ
3. วิธีไม่เชิงเส้นสามารถวิเคราะห์แบบ Effective Stress ได้ซึ่งแบบจำลองชั้นดินสามารถ Generation, Redistribution และ Dissipation ของ Excess Pore Pressure ในขณะที่เกิดและหลังการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้ ซึ่งไม่สามารถทำได้ในวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า
4. วิธีไม่เชิงเส้นต้องการแบบจำลอง Stress-Strain ที่มีความน่าเชื่อถือ แต่ข้อมูลดังกล่าวในปัจจุบันยังมีการศึกษาไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า ซึ่งจำเป็นต้องมีการสำรวจภาคสนามและทดสอบทางห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้แบบจำลองคุณสมบัติของชั้นดินดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน
5. ข้อแตกต่างของผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับระดับความไม่เชิงเส้นของผลตอบสนองของดิน สำหรับปัญหาที่มีระดับ Strain ที่ต่ำ เช่น ชั้นดินแข็ง หรือคลื่นที่ใช้วิเคราะห์ไม่รุนแรง ผลการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีให้คำตอบที่สอดคล้องกันดี แต่สำหรับปัญหาที่มีระดับ Strain ที่สูง โดยเฉพาะปัญหาที่ค่า Shear Stress เข้าใกล้กำลังรับแรงเฉือนของชั้นดิน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า

3.8 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ

วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติที่อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้เหมาะสมสำหรับชั้นดินที่มีลักษณะราบเรียบหรือมีความชันที่ไม่มากและเรียงตัวกันเป็นชั้นในแนวราบ แต่สำหรับปัญหาอีกหลายประเภทไม่สามารถใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยการใช้แบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติได้ ตัวอย่างเช่น พื้นดินที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือมีการเปลี่ยนแปลงความชันของพื้น, โครงสร้างที่มีน้ำหนักมากหรือมีความแข็งมากกดทับ, โครงสร้างฝังลงไปชั้นดิน, หรือกำแพงและอุโมงค์ ซึ่ง

ตัวอย่างต่าง ๆ เหล่านี้ต้องการการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ หรือแม้แต่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 3 มิติ ซึ่งภาพที่ 3.18 แสดงถึงตัวอย่างโครงสร้างทั่วไปที่ต้องใช้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ

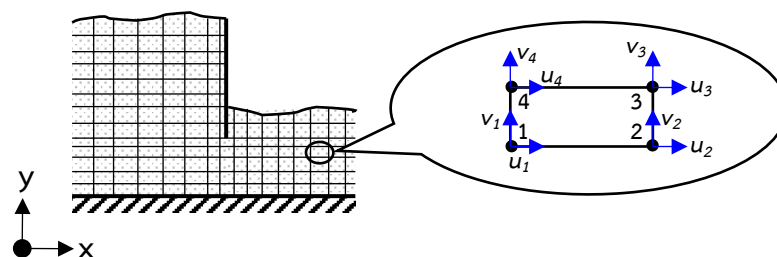


ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างของโครงสร้างที่วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 มิติ (ก) กำแพงกันดิน, (ข) เขื่อนดิน, (ค) อุโมงค์ (Kramer L., 2539)

สำหรับวิธีการที่นำมาใช้ประยุกต์วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งนำมาใช้กับปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้มีทั้งแบบ Frequency Domain (Complex Response) และ Time Domain (Direct Integration) โดยวิธีการเหล่านี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปัญหาต่าง ๆ ที่แสดงในภาพที่ 3.18 ซึ่งเป็นปัญหาของแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 หรือ 3 มิติ และ Soil Structure Interaction ส่วนใหญ่และโดยทั่วไปใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Dynamic Finite Element

3.8.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Dynamic Finite Element

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการประกอบกันของชิ้นส่วนเล็ก ๆ ซึ่งขอบเขตถูกกำหนดไว้ด้วย Nodal Point และมีสมมติฐานว่า ผลตอบสนองของความต่อนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยผลตอบสนองของ Nodal Point ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น แบบจำลองหรือโครงสร้างที่สนใจจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วน (Element) ขนาดเล็กดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างกำแพงกันดิน และ Degree of Freedom ของชิ้นส่วนที่ใช้แบบสี่เหลี่ยมและมี 4 โหนด (Kramer L., 2539)

สำหรับการเคลื่อนที่ของดินที่จุดต่าง ๆ ในชิ้นส่วน $\{V\}^T = \{u\ v\}$ ถูกแสดงให้อยู่ในเทอมของการเคลื่อนที่ของโหนด $\{q\}^T = \{u_1\ u_2\ u_3\ u_4\ v_1\ v_2\ v_3\ v_4\}$ ด้วยสมการที่ 3.43

$$\{v\} = [N]\{q\} \quad (3.43)$$

โดยที่ $[N]$ คือ Shape Function สำหรับ Strain-Displacement, $[B]$ อนุญาตให้ Strain สามารถคำนวณได้จากการเคลื่อนที่ของโหนดดังสมการที่ 3.44

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \quad (3.44)$$

สำหรับ Stress-Strain $[D]$ มีความสอดคล้องกับ Strain ดังสมการที่ 3.45

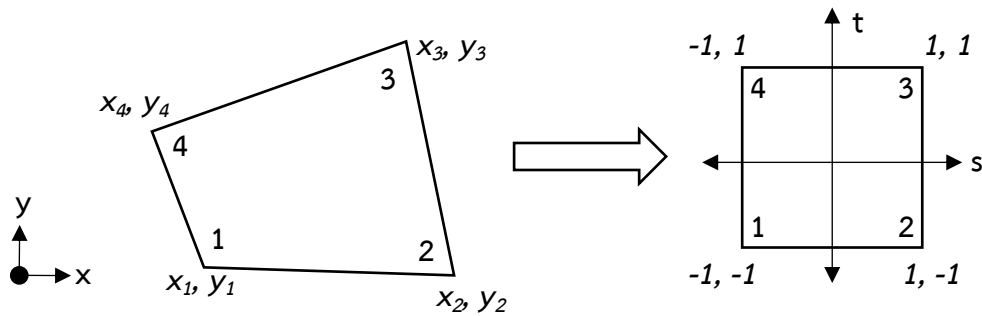
$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.45)$$

กำหนดให้ Local Coordinate System, (s, t) ของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 3.20 และใช้ Strain-Displacement และ ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ทำให้สามารถเขียนสมการของ Element Stiffness Matrix ได้ดังสมการที่ 3.46 โดยกำหนดให้ความหนาของชิ้นส่วนอยู่ในทิศทาง z

$$[k_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] |J| ds dt \quad (3.46)$$

โดยที่ Jacobian สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.47

$$|J| = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 x_i \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} \frac{\partial N_j}{\partial t} - \frac{\partial N_i}{\partial t} \frac{\partial N_j}{\partial s} \right) y_i \quad (3.47)$$



ภาพที่ 3.20 การแปลงชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมจากรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอในระบบ x-y ไปยังรูปร่างสี่เหลี่ยมในระบบ s-t (Kramer L., 2539)

สำหรับความสอดคล้องกันของมวลของชิ้นส่วนเขียนได้ดังสมการที่ 3.48 โดยสมมติว่าความหนาแน่นมีค่าคงที่ภายในชิ้นส่วน

$$[m_e] = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [N] |J| ds dt \quad (3.48)$$

อีกทางเลือกหนึ่ง วิธีการ Lump Element Mass Matrix สามารถทำได้โดยการสมมติว่า มวลของชิ้นส่วนถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งของ Nodal Point แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ความสอดคล้องกันของมวลของชิ้นส่วนนั้นมีแนวโน้มที่จะมีค่าความถี่ธรรมชาติของระบบสูงเกินไป นอกจากนี้ การใช้วิธีการรวมมวลไว้ที่ตำแหน่ง Nodal Point อาจทำให้ Lump Mass Matrix มีค่าที่ต่ำเกินไป ดังนั้น ในปี 2517 Lysmer และคณะ ได้เสนอแนวทางการใช้ Mixed Element Mass Matrix ซึ่งเป็นการหาค่าเฉลี่ยระหว่างความสอดคล้องและการรวมมวลแมทริกซ์

สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบไม่เชิงเส้นนั้น ผลของความหน่วงเบื้องต้นมาจากพฤติกรรมของ Hysteretic ของดิน จากนั้นได้รวมเข้ามาสำหรับการคิด Stiffness Matrix ภายใต้แรง Cyclic หลายรูปแบบ โดยที่ Viscouse Damping จำนวนน้อยอาจจะรวมเข้ากับการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบ 2 มิติ เพื่อใช้สำหรับการคิดค่าความหน่วงที่ระดับของ Strain ที่มีค่าต่ำมากและยังช่วยในการลดปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ไม่มีค่าของความหน่วง สำหรับเมตริกซ์ของความสอดคล้องของความหน่วงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.49

$$[c_e] = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [\eta] [B] |J| ds dt \quad (3.49)$$

โดยที่ $[m]$ คือ เมตริกซ์ของความหน่วง สำหรับสมการการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.50

$$[m_e]\{\ddot{q}\} + [c_e]\{\dot{q}\} + [k_e]\{q\} = \{Q(t)\} \quad (3.50)$$

โดยที่ เวกเตอร์แรงของชิ้นส่วนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.51

$$\{Q(t)\} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T \{W\} |J| ds dt + \int_S [N]^T \{T\} dS \quad (3.51)$$

และ $\{W\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงภายในที่กำหนดไว้ และ $\{T\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงดึงภายนอกที่อาจจะถูกนำไปใช้ในบางพื้นผิว, S

ภายหลังจากการได้มาของสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วนแล้ว จะถูกรวมกันในทิศทางที่ทำให้การเคลื่อนที่มีความสอดคล้องกันเพื่อที่จะได้ Global Equation of Motion ดังสมการที่ 3.52

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R(t)\} \quad (3.52)$$

โดยที่ $[M]$ คือ Global Mass Matrix, $[C]$ คือ Global Damping Matrix, $[K]$ คือ Global Stiffness Matrix, $\{u\}$ คือ Global Nodal Point Displacement Vector, และ $\{R(t)\}$ คือ Global Nodal Point Force Vector สำหรับกรณีของแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่ฐานสมการของ Global Equation of Motion สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.53

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M][1]\ddot{u}_b(t) \quad (3.53)$$

ขนาดของชิ้นส่วน (Element) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและแบบไม่เชิงเส้น เช่น ในกรณีที่ใช้ Finite Element Meshes แบบหยาบจะสามารถส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของคลื่นในช่วงความถี่สูงซึ่งความยาวคลื่นช่วงสั้นไม่สามารถสร้างได้เนื่องจากระยะห่างระหว่างโหนดมีความกว้างมาก สำหรับขนาดมากที่สุดของชิ้นส่วนใด ๆ ควรจะไม่เกิน 1 ต่อ 8 ถึง 1 ต่อ 5 ของความยาวคลื่นสั้นที่สุดที่ใช้ในการวิเคราะห์

เพื่อให้การคำนวณเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเร็วขึ้นจำเป็นต้องมีการลดจำนวนชิ้นส่วนในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ลง เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ที่สุดของชิ้นส่วนโดยทั่วไปแล้ว ถูกควบคุมโดยการแพร่กระจายความเร็วคลื่นและช่วงความถี่ที่สนใจ โดยทั่วไปการลดจำนวนของชิ้นส่วนลงมักเป็นการลดขนาดของขอบเขตแบบจำลอง แต่ถ้าหากขอบเขตแบบจำลองมีขนาดเล็กลงจะทำให้ Boundary Condition จะมีนัยสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองเพิ่มขึ้น

สำหรับปัญหาผลตอบสนองทางพลศาสตร์และ Soil Structure Interaction การวิเคราะห์ด้วยวิธี Dynamic Finite Element มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจำลองประเภท Boundary ให้มีความเหมาะสม ซึ่ง Boundary ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ประกอบด้วย

3.8.1.1 Elementary Boundaries

เงื่อนไขของการไม่มีการเคลื่อนที่หรือไม่มีค่า Stress ถูกกำหนดให้เป็น Elementary Boundaries ดังภาพที่ 3.21(ก) ซึ่ง Boundary ประเภทนี้สามารถใช้สร้างแบบจำลองให้ Ground Surface มีความถูกต้องยิ่งขึ้นได้ สำหรับ Boundary ด้านข้างหรือด้านล่าง คุณลักษณะการสะท้อนอย่างสมบูรณ์ของ Elementary Boundaries สามารถที่จะดักพลังงานไว้ใน Mesh ที่ซึ่งในความเป็นจริงควรจะแพร่กระจายผ่าน Boundary ออกไปและไกลออกจากพื้นที่ที่สนใจ เป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ Box Effect ขึ้น ซึ่งจะสร้างความผิดพลาดอย่างมากกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินหรือ Soil-Structure Interaction แต่ถ้าหาก Elementary Boundaries นี้อยู่ไกลออกไปอย่างเพียงพอจากพื้นที่ที่สนใจ ผลกระทบดังกล่าวอาจมีค่าลดลงได้

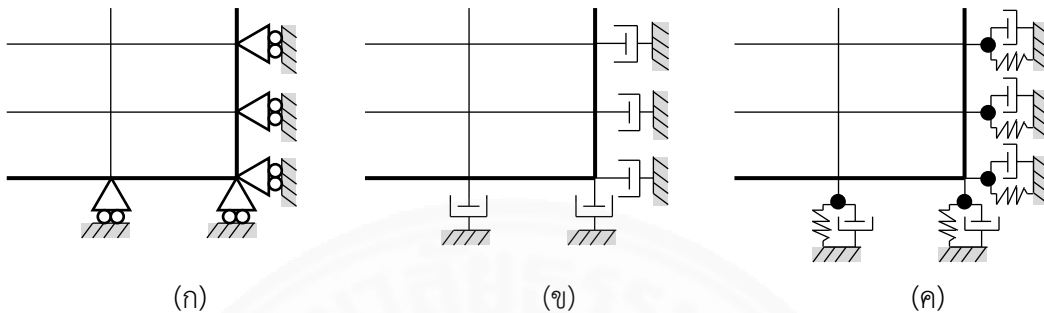
3.8.1.2 Local Boundaries

การใช้งานของ Viscous Dashpots ดังภาพที่ 3.21(ข) แสดงถึงรูปแบบของ Local Boundary โดยค่าสัมประสิทธิ์ Dashpot มีความจำเป็นสำหรับการดูดซับพลังงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมการเอียงของคลื่นที่มากระทบ ดังนั้น คลื่นที่เข้ามากระทบกับ Boundary ที่มีมุมต่าง ๆ Local Boundary ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของ Dashpots จะสะท้อนพลังงานเหล่านั้นออกไป ส่วนความยากที่เพิ่มเติมเข้ามาเกิดขึ้นเมื่อ Dispersive Surface Wave เข้าใกล้ Local Boundary เนื่องจากความเร็วเฟสของ Surface Wave ดังกล่าวขึ้นอยู่กับความถี่ และ Frequency-Dependent Dashpot อาจจะต้องการดูดซับพลังงานทั้งหมด ซึ่งผลกระทบจากการสะท้อนของคลื่นจาก Local Boundary นี้สามารถลดลงได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่าง Boundary กับพื้นที่ที่สนใจให้มากขึ้น

3.8.1.3 Consistent Boundaries

Boundary ประเภทนี้สามารถดูดซับ Body Waves ได้ทุกประเภท และ Surface Waves ที่เข้ามาได้ทุกทิศทางและทุกความถี่ ซึ่ง Boundary ประเภทนี้สามารถแทนได้ด้วย Frequency-Dependent Boundary ซึ่ง Stiffness Matrix ได้มาจากสมการของ Boundary

Integral หรือวิธี Boundary Element ตัวอย่างเช่น การพัฒนาแบบจำลอง Lumped-Parameter ซึ่งประกอบด้วยการรวมกันของ Discrete Springs, มวล, และ Dashpots ซึ่งสามารถประมาณพฤติกรรมของ Consistent Boundary โดยรายละเอียดแสดงในภาพที่ 3.21(ค)

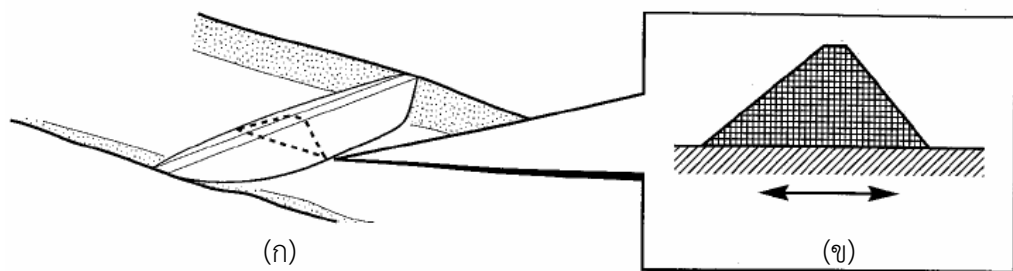


ภาพที่ 3.21 Boundary สำหรับไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) Elementary Boundary, (ข) Local Boundary, และ (ค) Lumped-Parameter Consistent Boundary (Kramer L., 2539)

3.8.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า

วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าของแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติที่มีความคล้ายคลึงกันกับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ สำหรับระบบชั้นดิน-โครงสร้าง (Soil-Structure) ซึ่งแสดงด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ส่วนคลื่นที่ใช้สำหรับป้อนเข้าสู่แบบจำลองอยู่ในรูปแบบของ Fourier Series และสมการการเคลื่อนที่จะถูกวิเคราะห์สำหรับแต่ละความถี่ของอนุกรม จากนั้นรวมผลเพื่อให้ได้ผลตอบสนองทั้งหมด

หากพิจารณาปัญหาของเขื่อนดินดังแสดงในภาพที่ 3.22(ก) โดยสมมติให้แกนของเขื่อนมีความยาวที่สัมพันธ์กับความสูงของเขื่อน ซึ่งผลตอบสนองที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเขื่อนนี้สามารถสมมติให้เป็นแบบจำลอง 2 มิติได้ ส่วน Dynamic Equilibrium ของแบบจำลองที่แสดงในภาพที่ 3.22(ข) เป็นไปตามสมการการเคลื่อนที่ ดังสมการที่ 3.54



ภาพที่ 3.22 แบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน (ก) ตำแหน่งที่เลือกใช้สร้างแบบจำลองเขื่อน, (ข) หน้าตัด 2 มิติของเขื่อน (Kramer L., 2539)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K^*]\{u\} = -[M][1]\ddot{u}_b(t) \quad (3.54)$$

โดยที่ $[M]$ คือ Mass Matrix, $[K^*]$ คือ Complex Stiffness Matrix, $[K^*] = [K] + i\omega[C]$, $\{u\}$ คือ เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ที่โหนดที่ยังไม่ทราบค่า (สัมพันธ์กับฐาน), และ $\ddot{u}_b(t)$ คือ ความเร่งที่ฐานในรูปของประวัติเวลา สำหรับ Mass และ Stiffness Matrices ถูกประกอบขึ้นมาจาก Stiffness Matrix ของ Element ด้วยการใช้กระบวนการมาตรฐานของไฟไนท์เอลิเมนต์และความหน่วงถูกนำมาใช้ในการคำนวณโดยผ่านการใช้ Complex Shear Moduli เมื่อ Forming Complex Element Stiffness Matrices

ถ้าหากสมมติว่าการเคลื่อนที่ที่ฐานเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่สัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.55

$$\{u\} = \{H(\omega)\}\ddot{u}_b(\omega)e^{i\omega t} \quad (3.55)$$

โดยที่ $\{H(\omega)\}$ คือ เวกเตอร์ของ Transfer Function และ $\ddot{u}_b(\omega)$ คือ Fourier Transfer ของ $\ddot{u}_b(t)$ จากนั้นนำสมการ 3.44 แทนที่ในสมการของการเคลื่อนที่จะได้ดังสมการที่ 3.56

$$-\omega^2 [M]\{H(\omega)\}\ddot{u}_b(\omega)e^{i\omega t} + [K^*]\{H(\omega)\}\ddot{u}_b(\omega)e^{i\omega t} = -[M][1]\ddot{u}_b(\omega)e^{i\omega t} \quad (3.56)$$

จากนั้นทำการเรียงสมการใหม่จะได้สมการของ Transfer Function ดังสมการที่ 3.57 และวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองจะมีวิธีที่เหมือนกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบ 1 มิติ

$$\{H(\omega)\} = \frac{[M]}{\omega^2 [M] - [K^*]} \quad (3.57)$$

3.8.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธีไม่เชิงเส้น

การวิเคราะห์แบบจำลอง 2 มิติแบบไม่เชิงเส้นสามารถใช้ประเมินการเสียรูปอย่างถาวรของชั้นดินที่มีความชัน, โครงสร้างกันดิน, และโครงสร้างอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ซึ่งการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นนี้ สามารถกระทำได้ด้วยการสร้างสมการการเคลื่อนที่ Global จากไฟไนท์เอลิเมนต์ จากนั้นทำการรวมผลตอบสนองในรูปของ Time Domain ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักตามลักษณะพฤติกรรมของดิน โดยกลุ่มแรกใช้แบบจำลอง Cyclic Nonlinear Stress-Strain และกลุ่มที่สอง ใช้แบบจำลอง Advanced Constitutive

3.9 พื้นที่การศึกษา

การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor) กระทำในพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ละติจูดที่ 13.028452° ถึง 14.361008° และลองจิจูดที่ 99.573335° ถึง 101.433321° มีพื้นที่โดยประมาณ 17,500 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุม 14 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร ฉะเชิงเทรา นครปฐม นครนายก เพชรบุรี ปราจีนบุรี ปทุมธานี ราชบุรี สมุทรสาคร สมุทรสงคราม สมุทรปราการ และจังหวัดชลบุรี โดยมีตำแหน่งการศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 170 ตำแหน่ง ภาพที่ 3.23 คือ แผนที่แสดงตำแหน่งการเก็บข้อมูลในพื้นที่ที่ศึกษาโดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
1	AY01	วัดราชบุรุษบำรุง	ลาดบัวหลวง	พระนครศรีอยุธยา	14.124	100.415
2	AY02	โรงเรียนอัลฟอรอนศึกษา	ลาดบัวหลวง	พระนครศรีอยุธยา	14.164	100.345
3	AY03	โรงเรียนไทยรัฐวิทยา 2 (วัดช้างใหญ่)	บางไทร	พระนครศรีอยุธยา	14.161	100.514
4	AY04	โรงเรียนวัดจระเข้ไล่	เสนา	พระนครศรีอยุธยา	14.238	100.300
5	AY05	โรงเรียนวัดคูสลอดวุฒิโสภณ	ลาดบัวหลวง	พระนครศรีอยุธยา	14.215	100.409
6	AY06	วัดลาดกระโทง	บางปะอิน	พระนครศรีอยุธยา	14.247	100.535
7	AY07	วัดสุคันธาราม	วังน้อย	พระนครศรีอยุธยา	14.231	100.636
8	AY08	วัดสุทธาโภชน์	เสนา	พระนครศรีอยุธยา	14.304	100.415
9	AY09	วัดปากน้ำ	บางไทร	พระนครศรีอยุธยา	14.299	100.487
10	AY10	วัดบ้านช้าง	อุทัย	พระนครศรีอยุธยา	14.305	100.686
11	AY11	วัดธรรมาราม	วังน้อย	พระนครศรีอยุธยา	14.300	100.804
12	AY12	วัดประดู่โลกเชษฐ์	เสนา	พระนครศรีอยุธยา	14.379	100.406
13	AY13	วัดลาดบัวขาว	เมือง	พระนครศรีอยุธยา	14.372	100.523
14	AY14	แคมป์คนงานใกล้วัดใหญ่ชัยมงคล	เมือง	พระนครศรีอยุธยา	14.340	100.593
15	AY15	โรงเรียนวัดอุทัย (เขาวนวิทยา)	อุทัย	พระนครศรีอยุธยา	14.398	100.686
16	BK01	โรงเรียนพิทยาลงกรณ์พิทยาคม	บางขุนเทียน	กรุงเทพมหานคร	13.528	100.418
17	BK02	วัดแท่นวันดี	บางขุนเทียน	กรุงเทพมหานคร	13.605	100.379
18	BK03	ซอยเทียนทะเล 20	บางขุนเทียน	กรุงเทพมหานคร	13.620	100.422
19	BK04	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ทุ่งครุ	กรุงเทพมหานคร	13.650	100.492
20	BK05	สนามฟุตบอลซอยเอกชัย 91	บางบอน	กรุงเทพมหานคร	13.664	100.413
21	BK06	วัดวงษ์ลาภาราม	หนองแขม	กรุงเทพมหานคร	13.715	100.358
22	BK07	ถนนพุทธมณฑลสาย 2	บางแค	กรุงเทพมหานคร	13.731	100.395
23	BK08	คริสตจักรที่ 1 สำเหร่	ธนบุรี	กรุงเทพมหานคร	13.705	100.494

ตารางที่ 3.1

รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
24	BK09	กรมอุตุนิยมวิทยา	บางนา	กรุงเทพมหานคร	13.667	100.605
25	BK10	สวนหลวง ร.9	ประเวศ	กรุงเทพมหานคร	13.682	100.661
26	BK11	สวนลุมพินี	ปทุมวัน	กรุงเทพมหานคร	13.732	100.543
27	BK12	มัสยิดดารุ้ลมุสตกีน	อ่อนนุช	กรุงเทพมหานคร	13.719	100.654
28	BK13	หมู่บ้านกรีนวิลล์	ทวีวัฒนา	กรุงเทพมหานคร	13.794	100.399
29	BK14	วัดศีลมหาสนิท สวนผัก	ตลิ่งชัน	กรุงเทพมหานคร	13.797	100.451
30	BK15	สวนวชิรเบญจทัศ	จตุจักร	กรุงเทพมหานคร	13.812	100.554
31	BK16	สถาบันรัชต์ภาคย์	วังทองหลาง	กรุงเทพมหานคร	13.761	100.603
32	BK17	สวน 60 พรรษามหาราชินีนาถ	ลาดกระบัง	กรุงเทพมหานคร	13.764	100.731
33	BK18	วัดสุทธาโกชน์ (วัดมอญ)	ลาดกระบัง	กรุงเทพมหานคร	13.740	100.795
34	BK19	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2	บางกะปิ	กรุงเทพมหานคร	13.815	100.654
35	BK20	ชุมชนติดถนนราษฎร์อุทิศ	มีนบุรี	กรุงเทพมหานคร	13.822	100.755
36	BK21	ตลาดสดสี่แยกหนองจอก	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13.810	100.833
37	BK22	ลำต้อยติ่ง	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13.793	100.884
38	BK23	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	บางเขน	กรุงเทพมหานคร	13.875	100.591
39	BK24	สนามหลังบริษัท ยูเนี่ยนเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด	คลองสามวา	กรุงเทพมหานคร	13.857	100.697
40	BK25	ซอยวัดเวฬุวนาราม 1	ดอนเมือง	กรุงเทพมหานคร	13.927	100.563
41	BK26	ถนนสุขาภิบาล 5 ซอย 60	สายไหม	กรุงเทพมหานคร	13.904	100.669
42	BK27	ซอยราษฎร์นิมิตร 2	คลองสามวา	กรุงเทพมหานคร	13.915	100.736
43	BK28	สนามแข่งรถวิบาก	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13.885	100.794
44	BK29	มัสยิดอรัเราะห์มาน	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13.879	100.844
45	BK30	วัดสี่ชมพู	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13.929	100.821
46	BK31	ถนนคลองสิบสาม	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13.931	100.895
47	CB01	วัดตาล้อม	เมือง	ชลบุรี	13.272	100.940
48	CB02	วัดจตุรราษฎร์	เมือง	ชลบุรี	13.327	100.972
49	CB03	วัดสำนักบก	เมือง	ชลบุรี	13.364	101.062
50	CB04	วัดหนองกาน้ำ	พานทอง	ชลบุรี	13.370	101.123
51	CB05	วัดแหลมแค	พานทอง	ชลบุรี	13.487	101.092
52	CC01	โรงเรียนวัดหล่อเจริญราษฎร์	บางปะกง	ฉะเชิงเทรา	13.514	100.900
53	CC02	วัดใหม่สงเคราะห์ราษฎร์	บางปะกง	ฉะเชิงเทรา	13.492	100.953
54	CC03	วัดบางผึ้ง	บางปะกง	ฉะเชิงเทรา	13.533	101.040
55	CC04	วัดกลางราษฎร์บำรุง	บ้านโพธิ์	ฉะเชิงเทรา	13.625	100.977
56	CC05	วัดบางปรงธรรมโชติการาม	เมือง	ฉะเชิงเทรา	13.663	101.034
57	CC06	วัดดอนสินนท์	บ้านโพธิ์	ฉะเชิงเทรา	13.605	101.113
58	CC07	วัดเสม็ดใต้	บางคล้า	ฉะเชิงเทรา	13.652	101.215
59	CC08	วัดสุทธาวาส	เมือง	ฉะเชิงเทรา	13.731	100.891

ตารางที่ 3.1

รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
60	CC09	วัดบางปลานัก	เมือง	ฉะเชิงเทรา	13.732	100.982
61	CC10	วัดถวิลศิลามงคล	เมือง	ฉะเชิงเทรา	13.749	101.052
62	CC11	วัดก้อนแก้ว	คลองเขื่อน	ฉะเชิงเทรา	13.745	101.145
63	CC12	วัดแสนภูมราวาส	ราชสาสน์	ฉะเชิงเทรา	13.729	101.258
64	CC13	วัดคลองเจ้า	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13.792	100.969
65	CC14	โรงเรียนวัดบางสาย	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13.815	101.024
66	CC15	วัดวังขอน	คลองเขื่อน	ฉะเชิงเทรา	13.829	101.132
67	CC16	วัดทางข้ามน้อย	บางคล้า	ฉะเชิงเทรา	13.810	101.236
68	CC17	วัดบึงน้ำรักษ์	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13.880	100.925
69	CC18	วัดโพธิ์แสงกาญจนราษฎร์	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13.895	101.030
70	CC19	วัดวิเวกวาราม	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13.964	100.941
71	NB01	วัดต้นเชือก	บางใหญ่	นนทบุรี	13.839	100.339
72	NB02	วัดโดนด	เมือง	นนทบุรี	13.848	100.466
73	NB03	โรงเรียนวัดเพรงาย	บางบัวทอง	นนทบุรี	13.916	100.328
74	NB04	วัดท่าอิฐ	ปากเกร็ด	นนทบุรี	13.899	100.481
75	NB05	โรงเรียนญามาลุดดิน	บางบัวทอง	นนทบุรี	13.952	100.393
76	NB06	โรงเรียนวัดราษฎร์นิยม	ไทรน้อย	นนทบุรี	14.104	100.326
77	NP01	วัดปริตาราม	สามพราน	นครปฐม	13.691	100.142
78	NP02	วัดอ้อมใหญ่	สามพราน	นครปฐม	13.690	100.261
79	NP03	โรงเรียนพอเงินวิทยาคม	เมือง	นครปฐม	13.732	100.074
80	NP04	วัดหนองดินแดง	เมือง	นครปฐม	13.796	99.991
81	NP05	วัดน้อย	นครชัยศรี	นครปฐม	13.790	100.146
82	NP06	โรงเรียนบ้านคลองมหาสวัสดิ์	พุทธมณฑล	นครปฐม	13.808	100.250
83	NP07	พุทธมณฑล	พุทธมณฑล	นครปฐม	13.777	100.320
84	NP08	วัดหนองกระโดน	เมือง	นครปฐม	13.882	99.931
85	NP09	วัดทุ่งผักกูด	ดอนตูม	นครปฐม	13.909	100.103
86	NP10	วัดบางพระ	นครชัยศรี	นครปฐม	13.897	100.211
87	NP11	บ้านพักตำรวจ	ดอนตูม	นครปฐม	13.984	100.068
88	NP12	วัดลำพระยา	บางเลน	นครปฐม	13.959	100.204
89	NP13	วัดดอนสามสิบ	บางเลน	นครปฐม	14.063	100.141
90	NP14	วัดคลองเสมียนตรา	บางเลน	นครปฐม	14.031	100.271
91	NP15	วัดบางน้อยใน	บางเลน	นครปฐม	14.141	100.116
92	NP16	วัดนิลเพชร	บางเลน	นครปฐม	14.139	100.254
93	NY01	โรงเรียนบ้านคลอง 22	องครักษ์	นครนายก	14.001	100.996
94	NY02	โบสถ์พระนางมาเรีย	องครักษ์	นครนายก	14.019	101.127
95	NY03	วัดสว่างอารมณ์	องครักษ์	นครนายก	14.084	100.977

ตารางที่ 3.1

รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
96	NY04	โรงเรียนบ้านคลองสามวิทยา	เมือง	นครนายก	14.120	101.090
97	NY05	วัดใหม่บำเพ็ญผล	เมือง	นครนายก	14.113	101.201
98	NY06	วัดกลางคลองสามสิบ	องครักษ์	นครนายก	14.189	100.991
99	NY07	วัดบ้านพริก	บ้านนา	นครนายก	14.282	100.998
100	NY08	ที่โล่งใกล้ร้านซ่อมรถ	บ้านนา	นครนายก	14.278	101.112
101	NY09	ทุ่งนาใกล้วัดเกาะกระชาย	เมือง	นครนายก	14.251	101.198
102	NY10	สวนดี	ปากพลี	นครนายก	14.219	101.306
103	NY11	วัดศรีกระอาง	บ้านนา	นครนายก	14.369	101.086
104	PB01	ที่โล่งใกล้สำนักสงฆ์วิเวกลำเนาไพร	เขาย้อย	เพชรบุรี	13.125	99.802
105	PB02	วัดหนองปรัง	เขาย้อย	เพชรบุรี	13.166	99.836
106	PB03	วัดบางหอย	บ้านแหลม	เพชรบุรี	13.203	99.911
107	PB04	ที่โล่งใกล้สำนักสงฆ์โค้งสวรรค์	เขาย้อย	เพชรบุรี	13.224	99.772
108	PB05	วัดท้ายตลาด	เขาย้อย	เพชรบุรี	13.236	99.842
109	PB06	วิทยาลัยการอาชีพเขาย้อย	เขาย้อย	เพชรบุรี	13.282	99.772
110	PB07	วัดศิลาคูณธรรม	เขาย้อย	เพชรบุรี	13.313	99.824
111	PJ01	โรงเรียนศรีรักรักษ์ราษฎร์บำรุง	บ้านสร้าง	ปราจีนบุรี	13.897	101.168
112	PJ02	วัดวังขอน	บ้านสร้าง	ปราจีนบุรี	13.899	101.304
113	PJ03	วัดคลองเฒ่า	บ้านสร้าง	ปราจีนบุรี	13.968	101.149
114	PJ04	วัดพิทักษ์โสภณ	บ้านสร้าง	ปราจีนบุรี	13.971	101.286
115	PJ05	วัดวิษลขันธ	บ้านสร้าง	ปราจีนบุรี	14.045	101.244
116	PT01	วัดบัวขวัญ	ลาดหลุมแก้ว	ปทุมธานี	14.009	100.425
117	PT02	วัดบางกะดี	เมือง	ปทุมธานี	13.997	100.549
118	PT02	วัดกลางคลองสี่	ลำลูกกา	ปทุมธานี	13.960	100.688
119	PT04	วัดป่าเจริญราช	ลำลูกกา	ปทุมธานี	13.997	100.836
120	PT05	วัดบัวสุวรรณประดิษฐ์	ลาดหลุมแก้ว	ปทุมธานี	14.071	100.383
121	PT06	วัดป่าจิว	สามโคก	ปทุมธานี	14.085	100.534
122	PT07	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	คลองหลวง	ปทุมธานี	14.071	100.610
123	PT08	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	ชัยบุรี	ปทุมธานี	14.033	100.727
124	PT09	วัดแสงมณี	หนองเสือ	ปทุมธานี	14.075	100.825
125	PT10	วัดผลาหาญ	คลองหลวง	ปทุมธานี	14.114	100.730
126	PT11	วัดบึงบาประภาสวัด	หนองเสือ	ปทุมธานี	14.131	100.822
127	PT12	วัดอู่ข้าว	คลองหลวง	ปทุมธานี	14.190	100.754
128	PT13	วัดราษฎร์บำรุง	หนองเสือ	ปทุมธานี	14.197	100.824
129	PT14	วัดธรรมราชเจริญผล	หนองเสือ	ปทุมธานี	14.178	100.894
130	PT15	โรงเรียนวัดสร้างบุญ	วิหารแดง	สระบุรี	14.246	100.892
131	RB01	วัดหทัยนเรศวร	ปากท่อ	ราชบุรี	13.348	99.714

ตารางที่ 3.1

รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา (ต่อ)

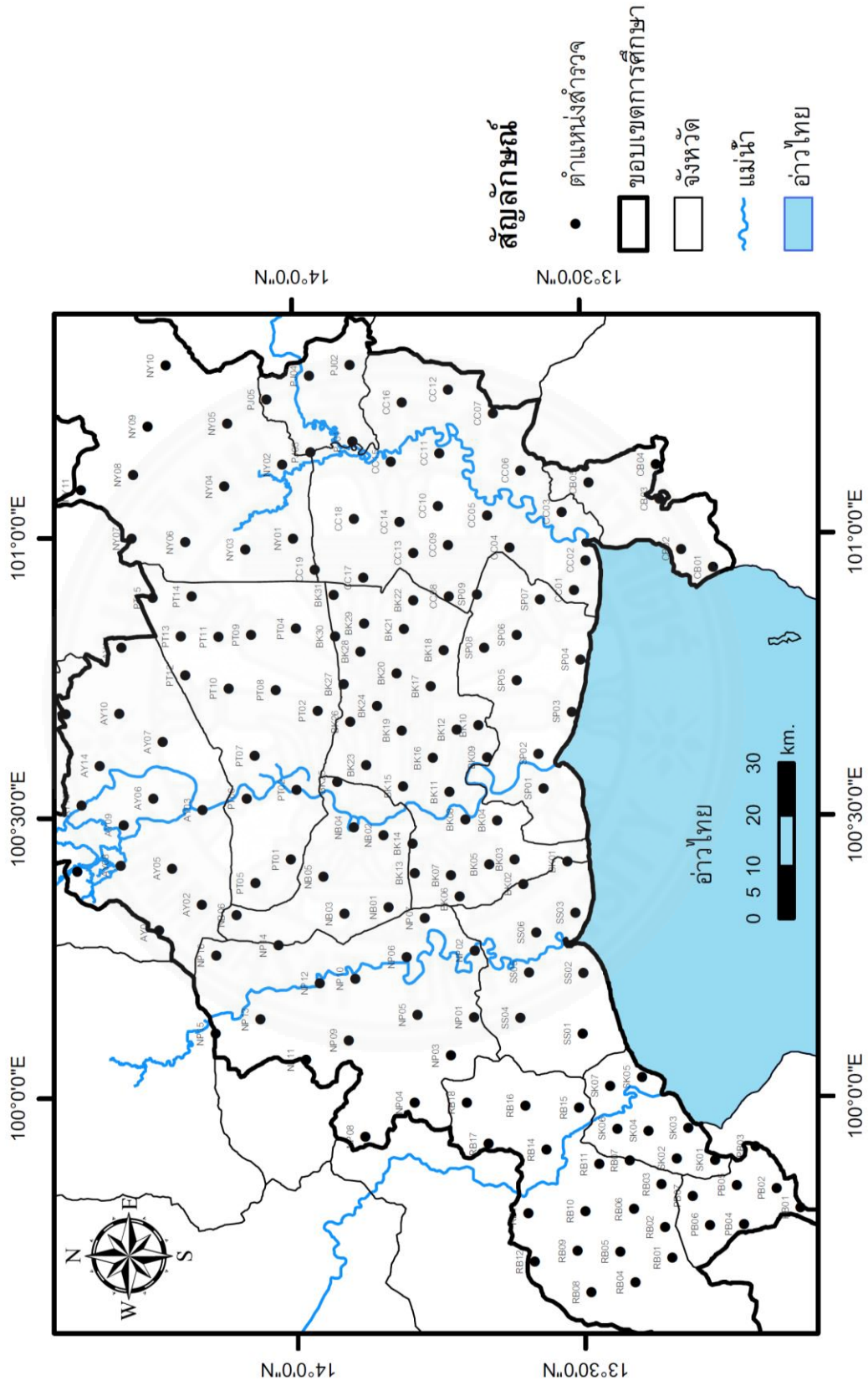
ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
132	RB02	โรงเรียนบ้านไพรสะเดา	ปากท่อ	ราชบุรี	13.361	99.767
133	RB03	วัดดาวลอย	ปากท่อ	ราชบุรี	13.367	99.844
134	RB04	โรงเรียนวัดสันติการามวิทยา	ปากท่อ	ราชบุรี	13.412	99.671
135	RB05	วัดทุ่งหลวง	ปากท่อ	ราชบุรี	13.439	99.725
136	RB06	วัดเลิศคุณิตตาราม	ปากท่อ	ราชบุรี	13.414	99.801
137	RB07	วัดแจ้งเจริญ	วัดเพลง	ราชบุรี	13.422	99.886
138	RB08	กลุ่มอาชีพเพาะเห็ดบ้านอ่างหิน	ปากท่อ	ราชบุรี	13.489	99.652
139	RB09	โรงเรียนวัดห้วยไผ่	เมือง	ราชบุรี	13.513	99.726
140	RB10	วัดใหม่นครบาล	เมือง	ราชบุรี	13.500	99.796
141	RB11	วัดเกาะศาลพระ	วัดเพลง	ราชบุรี	13.475	99.880
142	RB12	โรงเรียนบ้านทุ่งน้อย	เมือง	ราชบุรี	13.588	99.707
143	RB13	โรงเรียนวัดบางกระ	เมือง	ราชบุรี	13.599	99.794
144	RB14	โรงเรียนวัดท่าเรือ	ดำเนินสะดวก	ราชบุรี	13.567	99.907
145	RB15	วัดพิทักษ์เทพาวาส	ดำเนินสะดวก	ราชบุรี	13.511	99.981
146	RB16	โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา พัฒนาการ	ดำเนินสะดวก	ราชบุรี	13.603	99.985
147	RB17	โรงเรียนวัดธรรมนบ	บางแพ	ราชบุรี	13.667	99.917
148	RB18	วัดดอนใหญ่	บางแพ	ราชบุรี	13.705	99.990
149	SK01	โรงเรียนบ้านต้นลำแพน	อัมพวา	สมุทรสงคราม	13.273	99.887
150	SK02	วัดเจริญรัตนาราม	อัมพวา	สมุทรสงคราม	13.341	99.890
151	SK03	วัดธรรมประสิทธิ์	เมือง	สมุทรสงคราม	13.320	99.944
152	SK04	วัดประชาโมฆิตาราม	อัมพวา	สมุทรสงคราม	13.389	99.939
153	SK05	โรงเรียนบ้านบางบ่อ	เมือง	สมุทรสงคราม	13.400	100.034
154	SK06	วัดอมรเทพ	บางคนที	สมุทรสงคราม	13.444	99.944
155	SK07	วัดลาดเป้ง	เมือง	สมุทรสงคราม	13.455	100.020
156	SP01	วัดแหลม	พระสมุทรเจดีย์	สมุทรปราการ	13.569	100.549
158	SP03	วัดตำหรุ	เมือง	สมุทรปราการ	13.519	100.685
159	SP04	วัดศรีจันทาราม	เมือง	สมุทรปราการ	13.503	100.777
160	SP05	วัดโกลงโน	บางพลี	สมุทรปราการ	13.614	100.740
161	SP06	วัดเสาธงกลาง	บางเสาธง	สมุทรปราการ	13.613	100.821
162	SP07	วัดบ้านระกาศ	บางบ่อ	สมุทรปราการ	13.573	100.884
163	SP08	วัดศรีวารีน้อย	บางเสาธง	สมุทรปราการ	13.670	100.799
164	SP09	วัดเป็ร็กราษฎร์	บางบ่อ	สมุทรปราการ	13.682	100.894
165	SS01	วัดธรรมโชติ	บ้านแพ้ว	สมุทรสาคร	13.503	100.112
166	SS02	วัดศรีวนาราม	เมือง	สมุทรสาคร	13.501	100.220
167	SS03	วัดสหกรณ์โคสิตาราม	เมือง	สมุทรสาคร	13.515	100.327
168	SS04	โรงเรียนหลักสองสงเสริมวิทยา	บ้านแพ้ว	สมุทรสาคร	13.611	100.141

ตารางที่ 3.1

รายละเอียดตำแหน่งการศึกษา (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด
169	SS05	วัดเกาะ	เมือง	สมุทรสาคร	13.596	100.221
170	SS06	วัดเทพนรรัตน์	เมือง	สมุทรสาคร	13.583	100.292

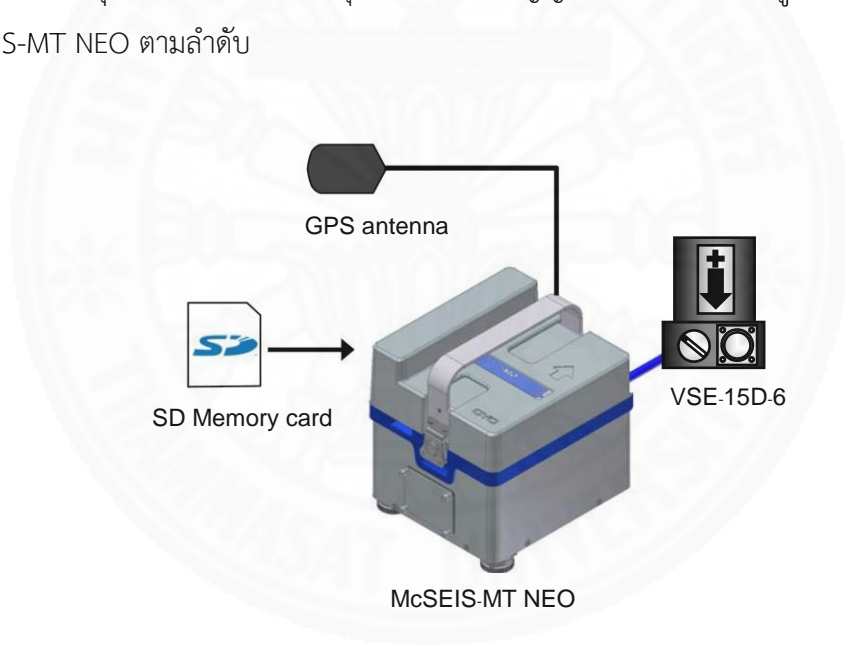




ภาพที่ 3.23 แผนที่แสดงตำแหน่งการศึกษา

3.10 เครื่องมือสำหรับการศึกษา

เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินเป็นชนิดหัววัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็ว รุ่น VSE-15D-6 ผลิตโดยบริษัท Tokyo Sokushin ประเทศญี่ปุ่น ทำหน้าที่ตรวจจับการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งที่ติดตั้งในรูปของความเร็ว สำหรับอุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูลการสั่นสะเทือน รุ่น McSEIS-MT NEO ผลิตโดยบริษัท OYO Cooperation ประเทศญี่ปุ่น ทำหน้าที่รับสัญญาณจากหัววัดการสั่นสะเทือนมาเพื่อขยายกำลัง แปลงให้เป็นข้อมูลเชิงดิจิทัล แล้วบันทึกผลการวัดความจำ (Memory Card) นอกจากนี้ยังทำหน้าที่บันทึกเวลาที่ตรวจวัดด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1/100 วินาที และบันทึกตำแหน่งที่ตั้งหัววัดโดยการรับสัญญาณกับระบบดาวเทียม GPS แสดงดังภาพที่ 3.24 โดยมีคุณสมบัติทางเทคนิคตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 สำหรับหัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร็วรุ่น VSE-15D-6 และอุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูลการสั่นสะเทือนรุ่น McSEIS-MT NEO ตามลำดับ



ภาพที่ 3.24 ชุดอุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดิน (OYO, 2010)

ตารางที่ 3.2

คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็ว รุ่น VSE-15D-6

รายการ	คุณสมบัติ
Model	VSE-15D-6
Measuring Frequency Range	0.1 ~ 70 Hz
Full Scale Range	± 10 kine

ตารางที่ 3.2

คุณสมบัติของหัววัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็ว รุ่น VSE-15D-6 (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ
Sensitivity	Velocity (L): 100V/m/s, (H): 1000V/m/s Tilt output approx. 730mV/degree
Output Resistance	510 Ω or less
Maximum Output Voltage	\pm 11V
Resolution	Approx. 2×10^{-6} gal or less
Linearity	0.05% or less
Lateral Sensitivity	0.3% or less
Calibration Coil	Approx. 6 μ A/gal
Supply Power	\pm 15V (\pm 3%)
Consumption Current	Approx. 15mA
Operating Temperature Range	-10 °C ~ 50 °C
Maximum Allowable Acceleration	30G (within 0.1sec)
Dimension	60x77x85 (mm)
Case Structure	Aluminum case, full airtight structure
Weight	Approx. 350g
Output Connector	Tajimi 8 pin (Waterproof type)

ตารางที่ 3.3

คุณสมบัติของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูล รุ่น McSEIS-MT NEO

รายการ	คุณสมบัติ
Built-in Sensor	Servo accelerometer (one vertical component or 3 components) Vertical component has 1G cancellation function
Dynamic Range	120 dB
System Dynamic Range	156 dB
Input Impedance	1 M Ω
Preamplifier Gain	4 times
Frequency Band	0.1-200 Hz
A/D Converter	32-bit delta sigma type
Time Correction	By GPS
Sampling Time	2, 4, 10, 20, 50 ms (low pass filter f_c = 206 Hz)

ตารางที่ 3.3

คุณสมบัติของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูล รุ่น McSEIS-MT NEO (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ
Data Recording Mode	MANUAL: started by key operation or communication command AUTO: started by turning ON the power supply TIMER: started by specifying the time
Indicator	128x64 dots monochrome LCD
Data Recording Media	SD memory card (FAT16)
Data Format	Binary
Power Supply	Built-in lead-acid battery 12V, 7.2Ah External power supply, DC19-20V (supplied from the accessory AC adapter)
Consumption Current	500 mA or less (DC12V) without wireless LAN connection 1200 mA or less (DC12V) with wireless LAN connection
Use Temperature Range	-20 ° C to 55 ° C (without dew condensation)
Storage Temperature Range	-30 ° C to 60 ° C (without dew condensation)
Case	Water-proof construction (equivalent to IP43)
Level adjustment mechanism	Three-point type level adjustment leg (with level gauge)
External Dimensions	250mm(H) x 220mm(W) x 245mm(D); however, protrusion is excluded
Weight	Approximately 7.5 kg (main unit, 5kg; built-in battery, 2.5kg)

3.11 วิธีการดำเนินการศึกษา

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาคสนามประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง (Single Point Microtremor) เพื่อใช้ประเมินค่าคาบอิทธิพลหลักของชั้นดิน และการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor) สำหรับใช้ในการประเมินความเร็วเฟสและความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละพื้นที่ได้ดังนี้

1. เริ่มต้นเก็บข้อมูลโดยการวางเครื่องมือตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเดียวกันหรือใกล้กันมากที่สุด จากนั้นเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของคลื่นในแนวตั้งเป็นระยะเวลาประมาณ 30 นาที โดยการกำหนดค่า Sampling Rate เท่ากับ 100

เฮิร์ตซ์ เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันของเครื่องมือ (Coherency) และช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้สำหรับบริเวณที่ต้องการศึกษา

2. ขั้นตอนถัดมาคือการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง โดยการตรวจวัดในขั้นตอนนี้ทำการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งประกอบด้วย การสั่นสะเทือนในแนวราบ 2 ทิศทาง และการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง 1 ทิศทาง โดยที่ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 40 นาที และกำหนดค่า Sampling Rate เท่ากับ 100 เฮิร์ตซ์
3. ขั้นตอนถัดมาคือการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบ โคจรข่ายด้วยเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนจำนวนทั้งหมด 4 ชุด โดยตำแหน่งของเครื่องมือวัดที่จุดศูนย์กลางจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงของการเก็บข้อมูล สำหรับเครื่องมือวัดอีก 3 ชุดจะวางไว้ที่ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 3.6 จากนั้นเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของคลื่นในแนวตั้งเท่านั้นพร้อมกันทั้ง 4 ตำแหน่ง สำหรับระยะเวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 40 นาที และค่า Sampling Rate เท่ากับ 100 เฮิร์ตซ์ จากนั้นเริ่มเก็บข้อมูลจากระยะห่างของเครื่องมือตรวจวัดที่เล็กก่อนแล้วขยายระยะทางออกไปให้ไกลมากขึ้น โดยแต่ละระยะห่างทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาประมาณ 40 นาทีเช่นเดียวกัน

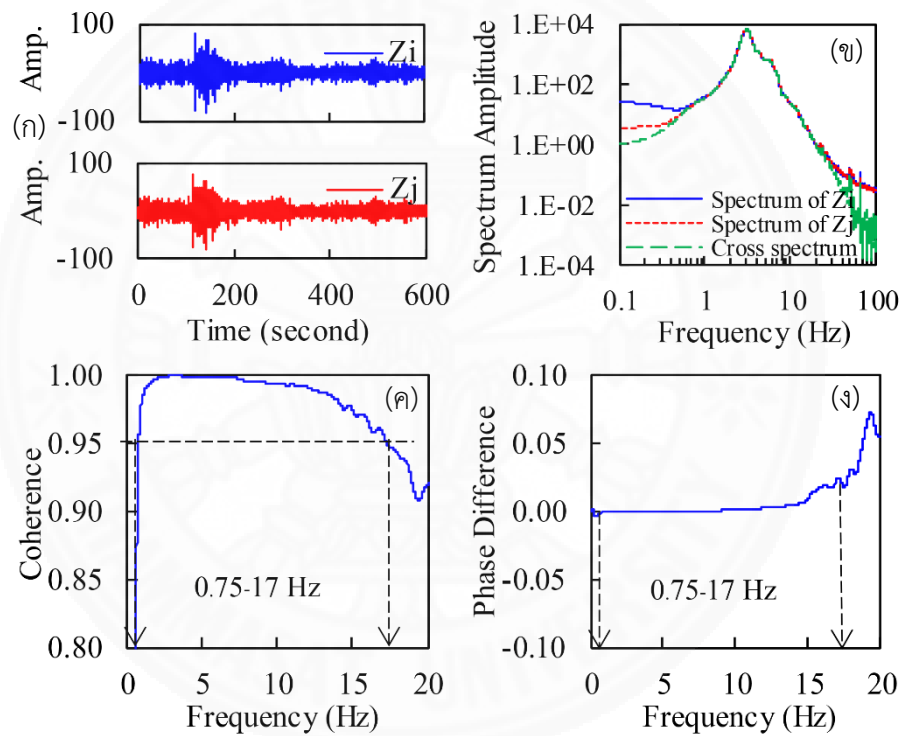
3.12 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความสอดคล้องของเครื่องมือ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสอดคล้องกันของเครื่องมือ ขั้นตอนนี้กระทำเพื่อตรวจสอบช่วงความถี่ต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องมือที่สามารถใช้ได้สำหรับพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้น ๆ โดยการวางเครื่องมือวัดทุกชุดที่ตำแหน่งเดียวกันหรือใกล้กันมากที่สุด เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณที่เครื่องมือแต่ละชุดเป็นสัญญาณชุดเดียวกัน และทำการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของพื้นในแนวตั้งเป็นระยะเวลาประมาณ 30 นาที สำหรับการวิเคราะห์หาความสอดคล้องหรือ Coherence ของเครื่องมือสามารถคำนวณได้จาก Spectrum และ Cross-Spectrum ของเครื่องมือวัดแต่ละคู่ สมการที่ 3.58 และ 3.59 แสดงวิธีการคำนวณหาค่า Coherency และ Phase Coherency สำหรับเครื่องมือวัดแต่ละคู่ตามลำดับ

$$Coherence = \text{real} \left(\frac{(P_{XY})}{\sqrt{P_{XX} \cdot P_{YY}}} \right) \quad (3.58)$$

$$Phase\ Coherence = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{img(P_{XY})}{real(P_{XY})}\right)}{\sqrt{P_{XX} \cdot P_{YY}}} \quad (3.59)$$

โดยที่ P_{XY} , P_{XX} , และ P_{YY} คือ Cross-Spectrum สำหรับเครื่องมือคู่ที่พิจารณา และ Spectrum ของเครื่องมือชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ ภาพที่ 3.25 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความสอดคล้องกันของเครื่องมือเพื่อหาช่วงความถี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้ซึ่งตัวการผลการตรวจวัดพบว่า ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้อยู่ในช่วง 0.75 – 17 เฮิร์ตซ์

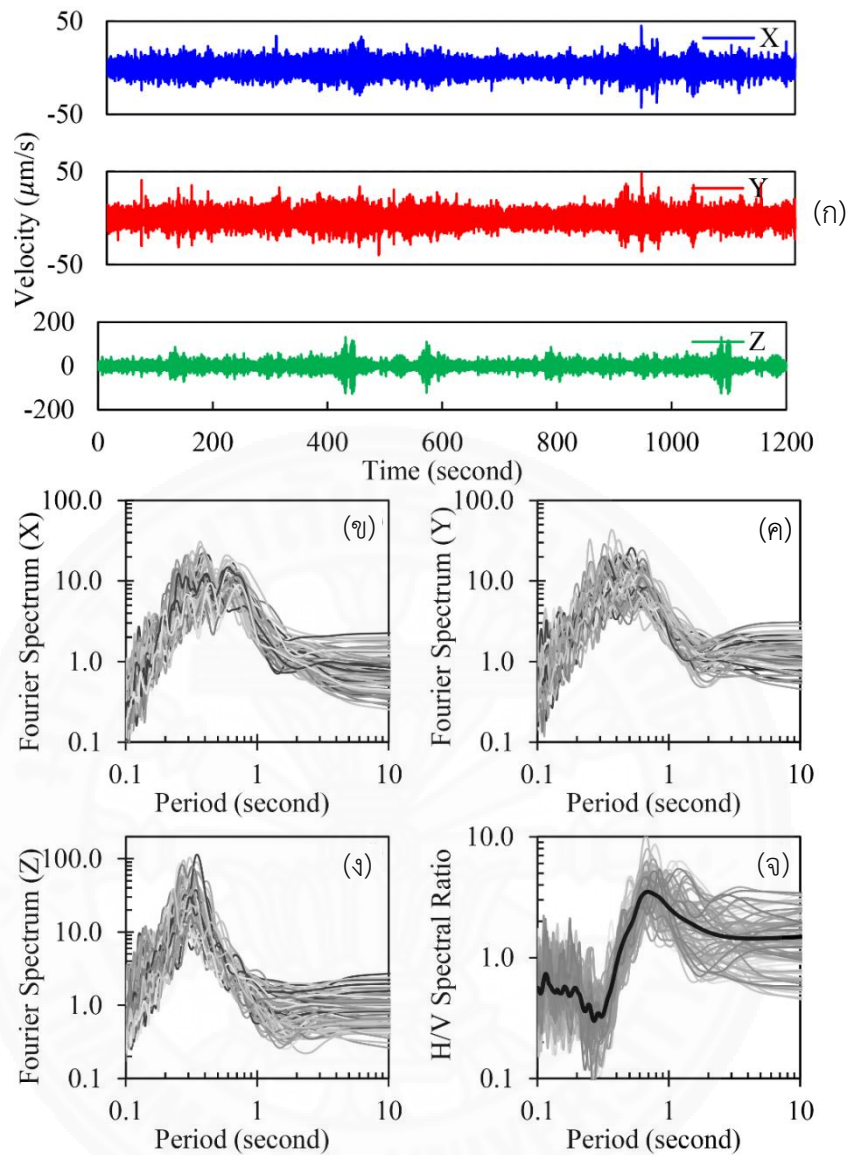


ภาพที่ 3.25 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Coherence (ก) ข้อมูลการตรวจวัด 2 ตำแหน่ง, (ข) Spectrum และ Cross-Spectrum, (ค) Coherence และ (ง) Phase Difference (Radian)

3.13 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก

ในการวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก โดยวิธี H/V Spectrum Ratio จากผลการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กน้อยบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ทำการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง โดยการตรวจวัดในขั้นตอนนี้ทำการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งประกอบด้วย การสั่นสะเทือนในแนวราบ 2 ทิศทาง และการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง 1 ทิศทาง โดยที่ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลประมาณ 40 นาที และกำหนดค่า Sampling Rate เท่ากับ 100 เฮิร์ตซ์
2. จากข้อมูลการตรวจซึ่งจัดเก็บอยู่ในรูปของ Time Domain นำมาคำนวณขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทั้ง 3 ทิศทางจากนั้นนำขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมทั้ง 3 ทิศทางมาคำนวณหาค่าคาบอิทธิพลหลักโดยใช้สมการที่ 3.1 ซึ่งได้ผลแสดงดังภาพที่ 3.26 สำหรับข้อมูลตัวอย่าง โดยการแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H/V Spectral Ratio กับคาบการสั่น
3. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H/V Spectral Ratio กับคาบการสั่น หากพิจารณาจุดตัดที่จุดสูงสุดของ H/V Spectral Ratio ที่แกนราบ หมายถึง ค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p) ของพื้นที่ที่ทำการศึกษา ในขณะที่จุดตัดที่จุดสูงสุดของ H/V Spectral Ratio ที่แกนตั้ง หมายถึง อัตรากำลังขยายคลื่นของคลื่น

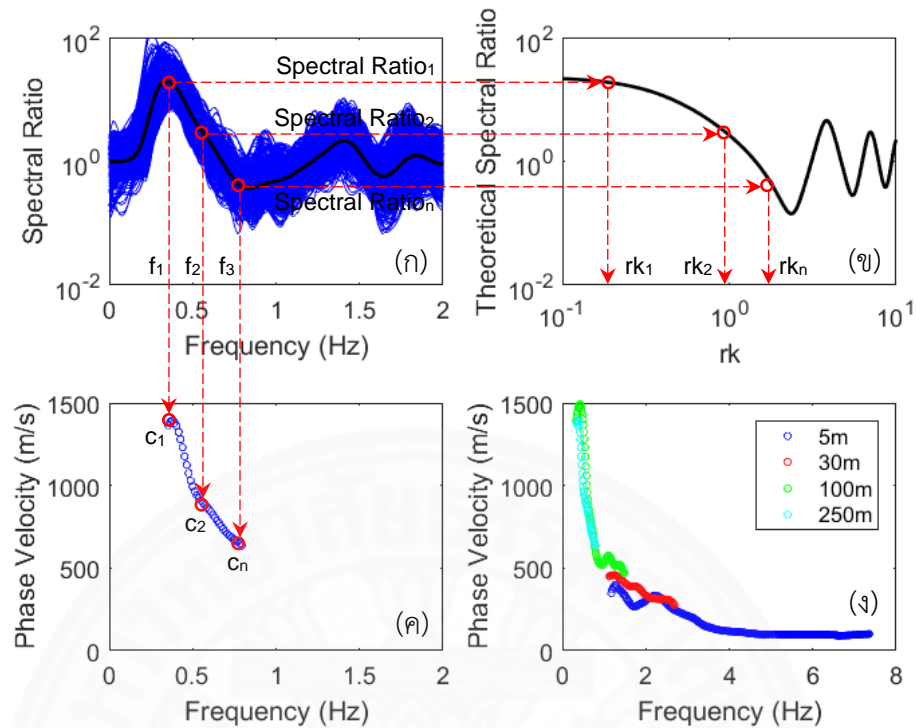


ภาพที่ 3.26 ขั้นตอนวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก (ก) ข้อมูลการตรวจวัด 3 ทิศทาง, (ข) Fourier Spectrum สำหรับแกน X, (ค) Fourier Spectrum สำหรับแกน Y, (ง) Fourier Spectrum สำหรับแกน Z และ (จ) H/V Spectral Ratio

3.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเร็วเฟสด้วยวิธี Centerless Circular Array (CCA) ที่ใช้เป็นวิธีหลักในการศึกษานี้มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของพื้นดินในแนวตั้งพร้อมกันหลายตำแหน่ง จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลการตรวจวัดสำหรับเครื่องมือวัดที่ตั้งอยู่บนเส้นรอบวงด้วยสมการที่ 3.23 และ 3.24 ตามลำดับ
2. ขั้นตอนถัดมาคือการนำผลการคำนวณในขั้นตอนก่อนหน้ามาคำนวณหาค่า Power Spectral Density ตามสมการที่ 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ
3. จากผลการคำนวณ Power Spectral Density ในขั้นตอนที่ 2 นำมาใช้ต่อในการคำนวณอัตราส่วนของสเปกตรัมจากผลการคำนวณก่อนหน้าด้วยสมการที่ 3.29 ซึ่งสมการนี้ได้คิดผลของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในข้อมูลการตรวจวัดแล้ว สำหรับตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนของสเปกตรัมแสดงได้ดังภาพที่ 3.27(ก)
4. ขั้นตอนถัดมาคือการคำนวณหาค่าเลขคลื่น (Wave Number, k) เพื่อใช้สำหรับคำนวณหาค่าความเร็วเฟสตามสมการที่ 3.31 โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสเปกตรัมที่คำนวณมาจากผลการตรวจวัดจริงกับอัตราส่วนสเปกตรัมตามทฤษฎีที่คำนวณมาจากฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกลำดับที่ศูนย์และหนึ่งซึ่งสามารถคำนวณได้จากฝั่งขวาของสมการที่ 3.29 โดยผลการคำนวณแสดงได้ดังภาพที่ 3.27(ข)
5. ขั้นตอนถัดมาคือการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟสที่ความถี่ต่าง ๆ โดยทำการเลือกจุดใด ๆ บนกราฟอัตราส่วนของสเปกตรัมที่คำนวณจากข้อมูลการตรวจวัดจริง จะทำให้ได้คู่อันดับความถี่และอัตราส่วนของสเปกตรัมสำหรับความถี่ที่จุดนั้น ๆ จากนั้นที่ระดับความสูงเดียวกัน อ่านค่า rk จากกราฟอัตราส่วนสเปกตรัมตามทฤษฎีเพื่อคำนวณค่าเลขคลื่น (Wave Number, k) โดยที่ r คือ รัศมีของวงกลมซึ่งเป็นตัวแปรที่ทราบค่า ดังภาพที่ 3.27(ข) จากนั้นคำนวณความเร็วเฟสจากสมการที่ 3.31 จะได้ค่าความเร็วเฟสแสดงดังภาพที่ 3.27(ค)
6. ในกรณีที่ทำการเก็บข้อมูลการตรวจวัดด้วยระยะ r มากกว่า 1 ระยะ ให้คำนวณความเร็วเฟสสำหรับระยะอื่นด้วยขั้นตอนที่ 2 – 5 อีกครั้งจนครบ สุดท้ายจะได้ความเร็วเฟสสำหรับทุกระยะของ r ดังแสดงในภาพที่ 3.27(ง)



ภาพที่ 3.27 แผนผังแสดงการวิเคราะห์หาความเร็วเฟสด้วยวิธี CCA (ก) ค่าเฉลี่ยของ Spectral Ratio จากข้อมูลการตรวจวัด (ข) Spectral Ratio ตามทฤษฎี (ค) ความเร็วเฟสสำหรับโครงข่ายที่มีคาร์ซีเมเท่ากับ 250 เมตร และ (ง) ความเร็วเฟสรวมสำหรับข้อมูลตัวอย่าง

3.15 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก

ขั้นตอนถัดมาหลังจากการคำนวณความเร็วเฟส หรือ Phase Velocity Dispersion Curve คือการคำนวณโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) ด้วยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) ด้วยโปรแกรม Yokoi โดยพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ประกอบด้วย Phase Velocity Dispersion Curve จากขั้นตอนก่อนหน้าโดยตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 3.28 และคุณสมบัติเบื้องต้นของชั้นดินบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น ช่วงของความลึกของชั้นดินแต่ละชั้น, ช่วงของความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity) ของชั้นดินแต่ละชั้น, และช่วงของค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของชั้นดินแต่ละชั้นเป็นต้น ดังภาพที่ 3.29

สำหรับหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ การพยายามเปรียบเทียบค่าระหว่าง Dispersion Curve ที่ได้จากการตรวจวัดจริงแต่ละรอบ ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Yokoi นี้ ในรอบแรกของการวิเคราะห์กระทำเพื่อต้องการทราบค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่รอบ

การวิเคราะห์เท่ากับ 1,000 รอบ จากนั้นป้อนค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในโปรแกรมอีกครั้งเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าตอบที่ดีที่สุด ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.30

Vel_model.dat	
freq.(Hz)	Vel.(km/s)
0.3906	1.3820
0.4028	1.3608
0.4150	1.3251
.	.
.	.
.	.
7.2998	0.1004
7.3242	0.1008
7.3486	0.1011

ภาพที่ 3.28 ตัวอย่างการป้อนแบบจำลองความเร็วเฟส

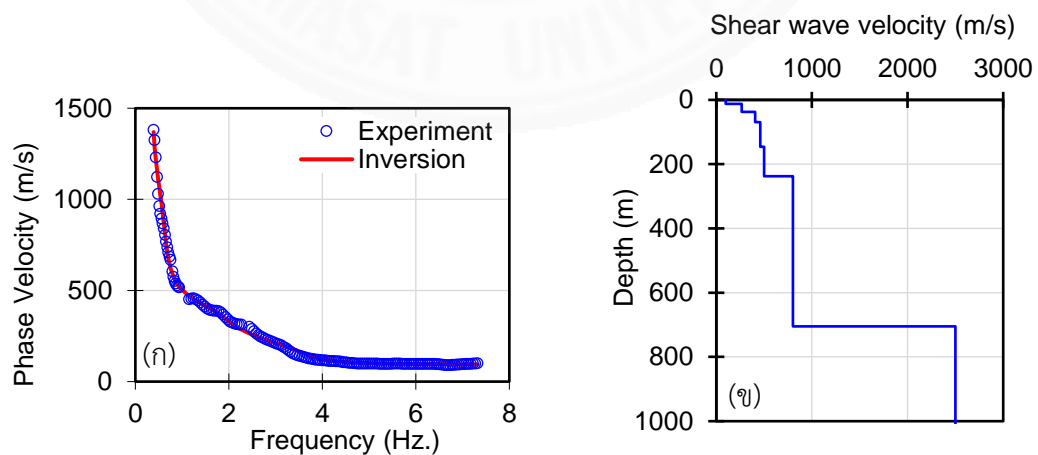
Str_range.dat						
S_ & L_ Example	: Model(a)					
8	: IL(I5),Layer Number					
1.50	1.600	0.001	0.030	0.05	0.20	: density,Vp,hmin,hmax,vmin,vmax
1.60	1.800	0.005	0.030	0.10	0.40	
1.70	2.000	0.005	0.030	0.10	0.60	
1.80	2.200	0.005	0.030	0.10	0.80	
1.90	2.400	0.005	0.100	0.10	1.00	
2.00	2.600	0.010	0.300	0.10	2.00	
2.20	3.000	0.010	0.500	0.10	2.50	
2.50	3.500	998.0	999.0	2.00	3.50	

ภาพที่ 3.29 ตัวอย่างการกำหนดค่าเริ่มต้น

disp_sma1.prm	
1 1. 0.6 1.3 1000 5	:idum,t0,a,c,ntemp,j0
0.0106	:eps0 ← (ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
1 1	:n_roh,n_vp
1 0 1	:ini_flg,ndsp_flg,n_err
0 1	:kflg,jflg
0 0	:n_vs,n_th
str_range.dat	:File name for the initial velocity model (a25).
vel_model.dat	:File name for the observed dispersion relation (a25).
vel_cal.dat	:File name for the estimated velocity structure (a25)
disp_cal.dat	:File name for the calculated dispersion relation (a25)

ภาพที่ 3.30 ตัวอย่างการป้อนค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หลังจากวิเคราะห์เสร็จสิ้น โปรแกรมจะให้ผลการคำนวณซึ่งประกอบด้วย ค่าความเร็วเฟสที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับเปรียบเทียบกับความเร็วเฟสที่ได้จากการตรวจวัด เมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่า ความเร็วเฟสที่ได้จากสองวิธีมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 3.31(ก) นอกจากนี้โปรแกรมยังให้ผลลัพธ์สำหรับโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่สอดคล้องกับความเร็วเฟสดังกล่าว ดังภาพที่ 3.31(ข) โครงสร้างชั้นดินที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นแบบจำลองชั้นดินในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 3.31 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ (ก) Dispersion Curve ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ (ข) ความเร็วคลื่นเฉือน

3.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า 1 มิติ

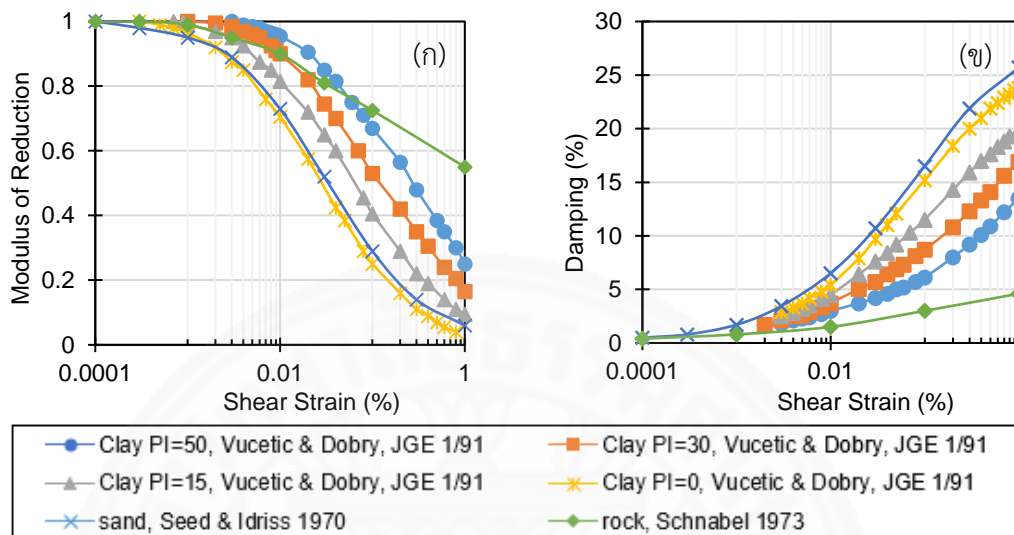
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ก่อนหน้า ถูกนำมาเพื่อใช้สำหรับการประเมินลักษณะการสั่นสะเทือนที่ผิวดินภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว โดยพิจารณาว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่เดินทางมาจากจุดศูนย์กลางการเกิดจนถึงชั้นหินใต้ตำแหน่งที่ตั้งหนึ่ง ๆ นั้น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวนอน อาจถูกขยายขนาดความรุนแรง และถูกเปลี่ยนแปลงคาบการสั่นหลักของคลื่นได้ การวิเคราะห์เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ผลการตอบสนองของพื้นดิน (Ground Response Analysis) โดยผลตอบสนองของพื้นผิวดินที่ได้นี้ มีความสำคัญสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหวอย่างยิ่ง ซึ่งใช้ในการประเมินความเสี่ยงเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว เช่น การประเมินการขยายขนาดและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว นอกจากนี้ยังใช้เป็นวิธีหลักในการสร้างสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินสามารถจำแนกแบบจำลองชั้นดินออกเป็น 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามความซับซ้อนของสภาพธรณีวิทยาของที่ตั้ง โดยการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ มีความเหมาะสมที่จะใช้สำหรับชั้นดินที่เรียงตัวค่อนข้างสม่ำเสมอในแนวราบ เช่น ชั้นดินของกรุงเทพมหานคร โดยที่มีสมมุติฐานหลักอยู่ 3 ประการคือ

1. การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับพื้นผิวดินซึ่งมีลักษณะเรียงตัวเป็นชั้น ๆ โดยเกิดจากการแพร่กระจายขององค์ประกอบในแนวตั้งของคลื่นเฉือน
2. ลักษณะของชั้นดินเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ ในแนวนอนจนถึงชั้นหินด้านล่าง
3. คุณสมบัติของดินแต่ละชั้นมีความเป็น Homogeneous Viscoelastic แต่มีพฤติกรรมของดินเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Schnabel และคณะ 2515)

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติมีดังนี้

1. นำแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในระดับลึกถึงชั้นที่มีคุณสมบัติคล้ายหินของพื้นที่ศึกษามาพิจารณาตามแต่ละชั้น โดยจำแนกตามค่าความเร็วคลื่นเฉือน และคุณสมบัติทางกายภาพตามชนิดของชั้นดิน และประเมินค่า Shear Modulus ที่สภาพเริ่มต้นของชั้นดินจากค่าความเร็วคลื่นเฉือนของแต่ละชั้น
2. เลือกใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน ประกอบด้วยค่า Shear Modulus และ Damping Ratio ที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น และขึ้นกับระดับของการตอบสนอง

ภายใต้แผ่นดินไหว (ในรูปของค่า Strain) ให้เหมาะสมกับสภาพชั้นดินของพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์ ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.32 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน (ก) Modulus of Reduction Curves, (ข) Damping Curves

เนื่องจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจที่มีความลึกหลายร้อยเมตร กระทั่งถึงความลึกของชั้นหินในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ยังคงมีจำนวนไม่มาก ดังนั้นการศึกษานี้ได้ทำการอ้างอิงข้อมูลหลุมเจาะสำรวจจากรายงานของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2555) ซึ่งการศึกษานี้ได้มีการขุดเจาะสำรวจชั้นดินที่มีความลึกถึง 600 เมตร และ 300 เมตร ในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาคร และสมุทรปราการ ตามลำดับ เพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินในบริเวณดังกล่าว โดยแบ่งการขุดเจาะสำรวจออกเป็น 2 วิธี สำหรับที่มีความลึกช่วง 120 เมตรแรก ใช้การทดสอบแบบ Boring Log และความลึกมากกว่า 120 เมตร ใช้การทดสอบแบบ Drilling Log ภาพที่ 3.33 และภาพที่ 3.34 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบ Boring Log สำหรับบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ และสมุทรสาคร ตามลำดับ ในขณะที่ภาพที่ 3.35 และภาพที่ 3.36 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Drilling Log สำหรับบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ และสมุทรสาคร ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการแบ่งช่วงของแบบจำลองชั้นดินในพื้นที่ต่าง ๆ ออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ประกอบด้วย รูปแบบที่ 1 การแบ่งช่วงของแบบจำลองชั้นดินที่มีความลึกมากกว่า 300 เมตร โดยมีรายละเอียดความลึกและประเภทของชั้นดินที่ใช้ตามตารางที่ 3.4 และ รูปแบบที่ 2 การแบ่งช่วงของแบบจำลองชั้นดินที่มีความลึกน้อยกว่า 300 เมตร โดยมีรายละเอียดความลึกและประเภทของชั้นดินที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.5

BORING LOG OF BORE HOLE

PHISUT TECHNOLOGY CO.,LTD.

WORK Soil InvestigationHOLE NO SPK SHEET 1 OF 3PROJECT TOTAL DEPTH 120 M. GROUND WATER 0.50 M.
LOCATION Bang Pu Village, Samut Pha Kam Province GROUND ELEVATION _____ MSL

METHOD OF BORING	TEST DEPTH / M.	LAYER DEPTH	SAMPLE RECOVERY	CORE RECOVERY	SYMBOL	Number Of Blow count-N				SOIL DISCRPTION	REMARKS
						1	2	3	N-VALUE		
	0	0.00				0	-	-	0	Ground Surface	Sample Recovery By Split Spoon Sample Core Recovery By Sherbly Tube and Double Tube Core barrel Ø ID.3" size (denisson Sample)
		1.80				0	-	-	0		
						0	-	-	0		
		5				0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
						0	-	-	0		
		17.00				0	-	-	0		
		18.60				3	3	3	6	17.00 m - 18.60 m SM; Silty SAND,sand is fine to coarse, non-plastic, very loose to loose.brownish gray. App.80-85 % sand	
						4	8	12	20		
						6	11	11	22		
						6	9	12	21		
						9	11	13	24		
						10	11	15	26		
						11	14	15	29		
						12	17	22	39	18.60 m. - 33.40 m CL; Silty CLAY,some fine sand,medium to high plasticity, very stiff to hard,grayish brown. App.10-15 % fine sand	
						12	17	24	41		
						10	15	17	32		
						10	14	19	33		
						9	12	13	25	33.40-34.60 m SC; Clayey SAND,sand is fine to coarse,medium to high plasticity, dense,grayish brown. App.70-80 % sand	
						11	13	14	27		
						14	16	16	32		
						12	12	15	27		
		33.40				13	15	17	32		
		34.60				14	16	16	34		
						15	19	20	39		
						20	31	33	64	34.60-47.70 m SM-SW; Silty SAND to Well garded SAND,sand is fine to coarse,non-plastic,dense to very dense, grayish brown. App.85-95 % sand	
						13	17	40	57		
						15	20	34	54		
						25	33	36	69		
						36	35	36	71		
						13	23	33	56		
						18	24	42	66		
						19	35	40	75		
						21	30	38	68	47.70-49.90 m. CL; Silty CLAY,some fine sand,medium to high plasticity, hard,grayish brown. App.10 -15 % fine sand	
						24	38	38	76		
						24	31	34	65		
		47.70				22	27	28	66		
						21	34	40	74		
		49.90				20	40	40/13	100		
						28	39	327/10	100		

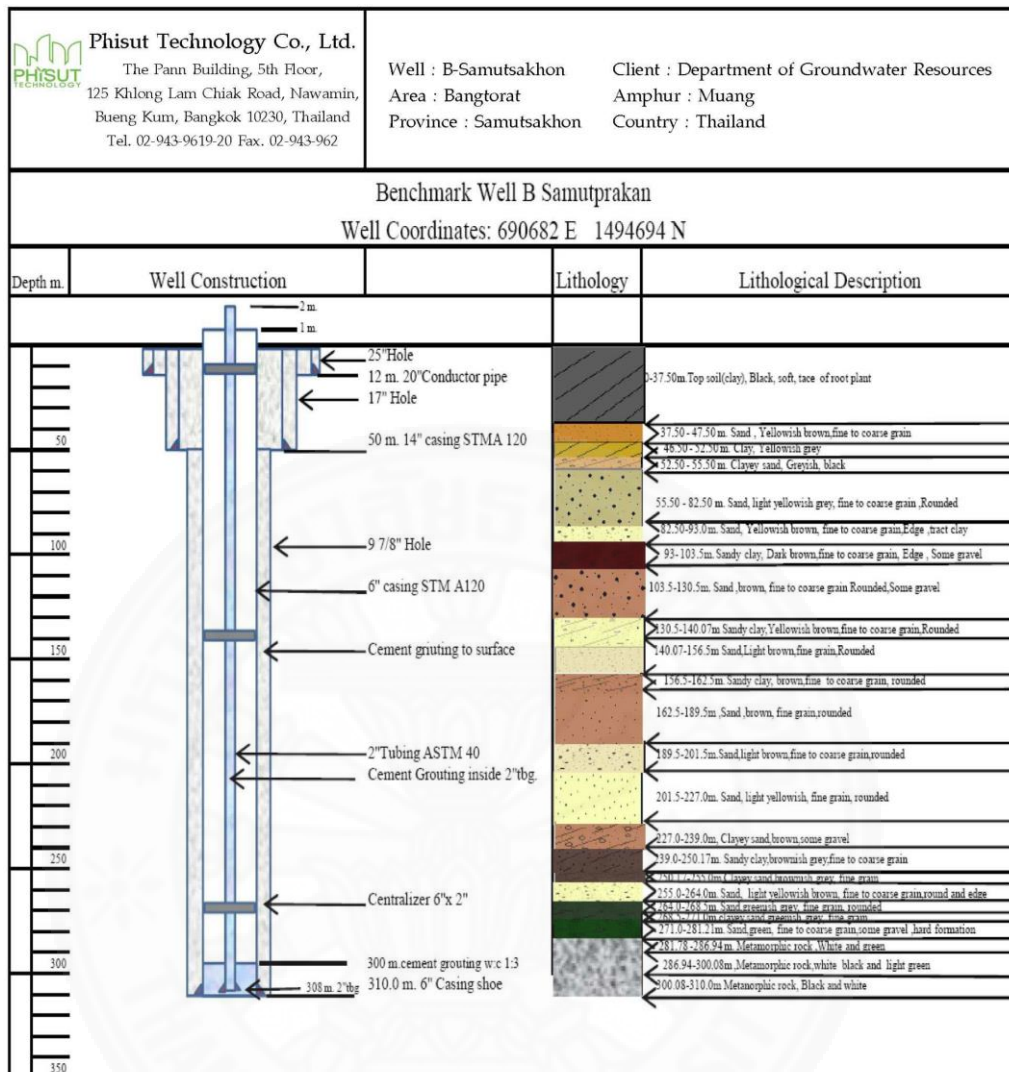
Contractor Phisut Technology Co.,Ltd.Equipment: Tone Rotary Drilling Machine

Logged By: _____

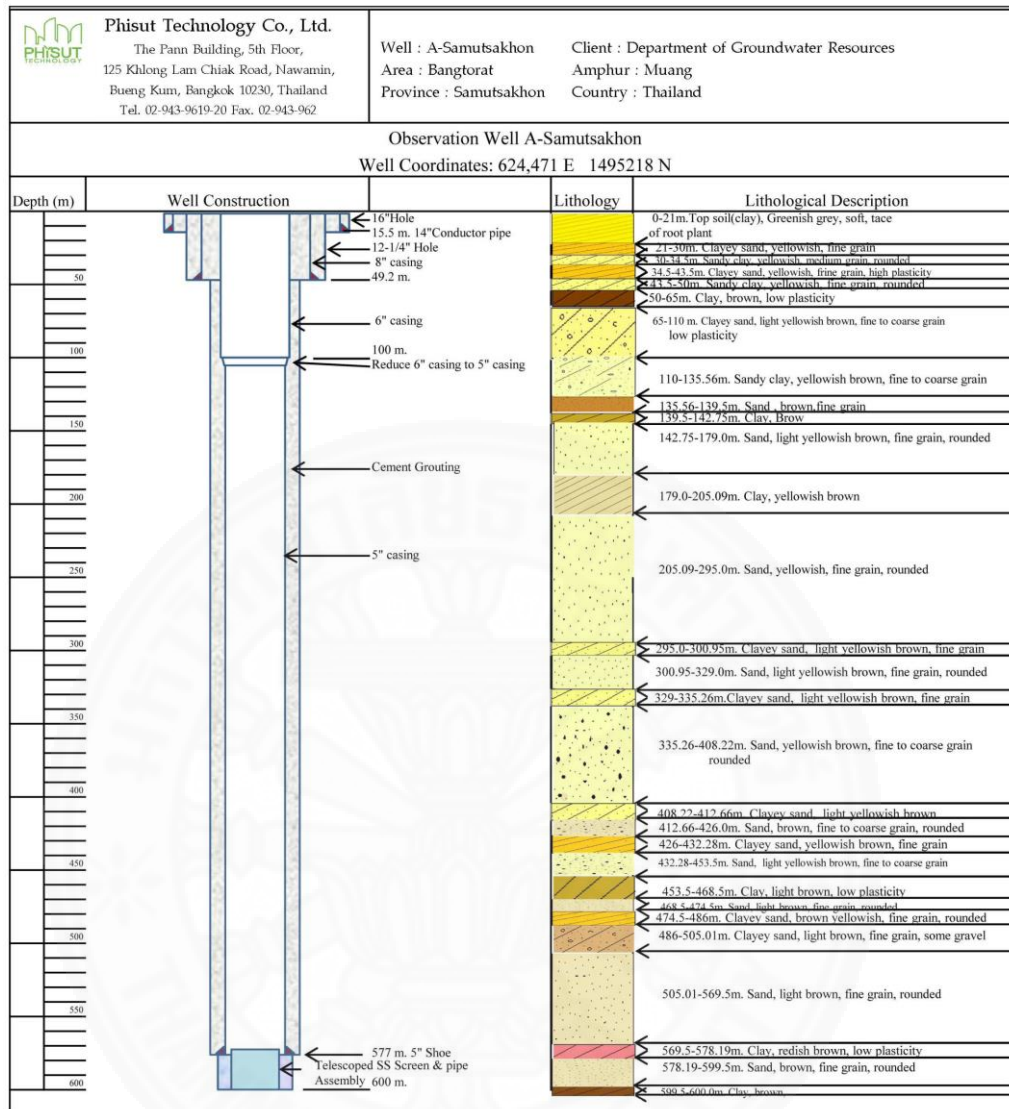
Notes Commenced Date: 9 June 2011Completed Date: 8 August 2011

Checked By: _____

ภาพที่ 3.33 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Boring Log บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ
(กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555)



ภาพที่ 3.35 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Drilling Log บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ
(กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555)



ภาพที่ 3.36 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Drilling Log บริเวณจังหวัดสมุทรสาคร
(กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555)

ตารางที่ 3.4

Dynamic soil properties สำหรับการชั้นดินที่มีความลึกมากกว่า 300 เมตร

ลำดับ	ความลึก (ม.)	ประเภทดิน	Dynamic Soil Properties
1	0-15	Clay PI=50	Vucetic and Dobry 1991
2	15-20	Sand	Seed and Idriss 1970
3	20-75	Clay PI=30	Vucetic and Dobry 1991
4	75-80	Sand	Seed and Idriss 1970
5	80-140	Clay PI=15	Vucetic and Dobry 1991
6	140 - rock	Sand	Seed and Idriss 1970
7	Rock	Rock	Schnabel 1973

ตารางที่ 3.5

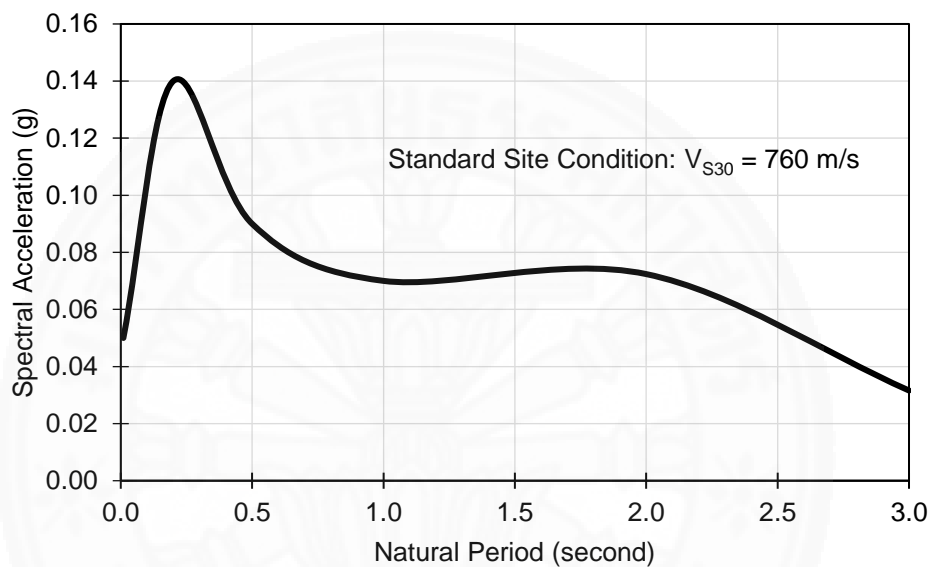
Dynamic soil properties สำหรับการชั้นดินที่มีความลึกน้อยกว่า 300 เมตร

ลำดับ	ความลึก (ม.)	ประเภทดิน	Dynamic Soil Properties
1	0-17	Clay PI=50	Vucetic and Dobry 1991
2	17-20	Sand	Seed and Idriss 1970
3	20-35	Clay PI=30	Vucetic and Dobry 1991
4	35-45	Sand	Seed and Idriss 1970
5	45-50	Clay PI=30	Vucetic and Dobry 1991
6	50-55	Sand	Seed and Idriss 1970
7	55-65	Clay PI=15	Vucetic and Dobry 1991
8	65-80	Sand	Seed and Idriss 1970
9	80-105	Clay PI=15	Vucetic and Dobry 1991
10	105 - Rock	Sand	Seed and Idriss 1970
11	Rock	Rock	Schnabel 1973

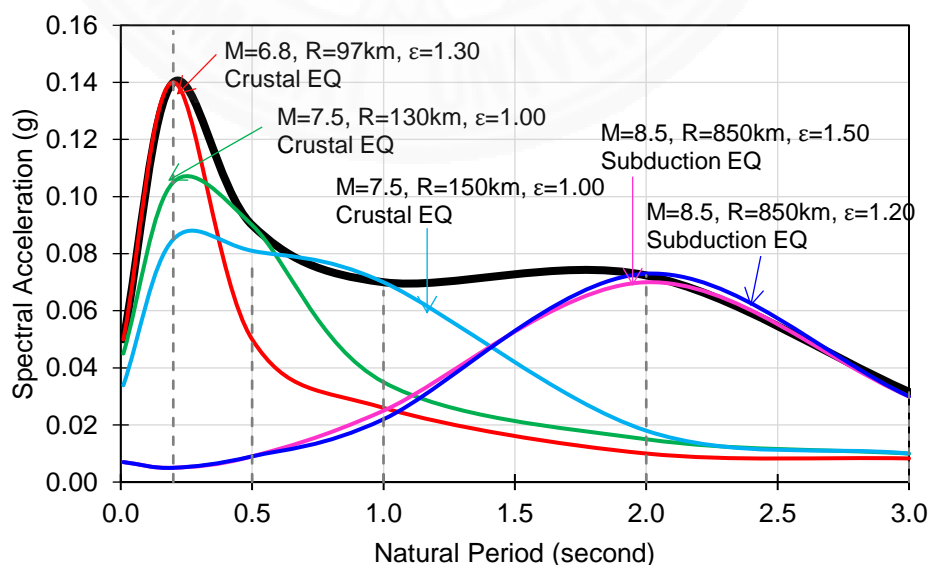
3.16.1 ขั้นตอนการเลือกแผ่นดินไหวสำหรับวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน

ขั้นตอนการเลือกคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ Uniform Hazard Spectrum (UHS) สำหรับพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ ด้วยชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร (V_{S30}) เท่ากับ 760 เมตร ต่อวินาที ที่คาบการเกิดซ้ำ 2,475 ปี หรือมีโอกาสเกิดขึ้น 2% ในแต่ละ 50 ปี ภาพที่ 3.37 แสดงถึง UHS ตัวอย่างสำหรับกรุงเทพมหานคร ซึ่งค่าสเปกตรัมของ UHS แต่ละคาบการสั่นเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความแตกต่างกัน เช่น ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที เกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ระยะใกล้จากกาณจนบุรีขนาด 6.7 – 7.5 หรือที่คาบการสั่น 2.0 วินาที ถูกควบคุมด้วยคลื่นแผ่นดินไหวขนาดใหญ่กว่า 8.5 ระยะไกลจากประเทศพม่า เป็นต้น ดังนั้นการเลือกคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับคาบการสั่นต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน ส่งผลให้เทคนิค Conditional Mean Spectrum (CMS) ถูกนำมาใช้เป็นวิธีการเลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความแตกต่างกันในขณะที่มีค่าคาบการเกิดซ้ำที่เท่ากันได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.38



ภาพที่ 3.37 ตัวอย่าง Uniform Hazard Spectrum สำหรับแอ่งกรุงเทพฯ



ภาพที่ 3.38 ชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับ Uniform Hazard Spectrum ที่คาบการสั่นต่างๆ

การกำหนดค่าคาบการสั่นต่าง ๆ สำหรับ CMS ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ที่สอดคล้องกับ UHS ทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่จะเลือกใช้ในแต่ละชุดของค่าคาบการสั่นได้จากผลการวิเคราะห์ Deaggregation จากนั้นทำการเลือกชุดคลื่นแผ่นดินไหวให้สอดคล้องกับ Uniform Hazard Spectrum ดังกล่าว ที่คาบการสั่น 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 วินาทีตามลำดับ โดยวิธีการเลือกชุดคลื่นแผ่นดินไหวในแต่ละคาบการสั่น จะต้องมียอดประกอบตรงตามคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กำหนด ได้แก่ ขนาดของแผ่นดินไหว ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว และรูปแบบของการเกิดแผ่นดินไหว ดังภาพที่ 3.38

ในแต่ละค่าคาบการสั่นประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกเฉพาะแนบราบ 2 ทิศทางในแต่ละสถานีตรวจวัดจำนวนทั้งหมด 4 สถานี ดังนั้นจำนวนคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในการศึกษานี้มีทั้งหมดเท่ากับ 40 ชุดข้อมูลต่อแบบจำลองชั้นดิน 1 ตำแหน่ง ตัวอย่างรายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกมาให้สอดคล้องกับค่า CMS ที่คาบการสั่น 2 วินาทีบริเวณกรุงเทพมหานครแสดงดังตารางที่ 3.6 และภาพที่ 3.39 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกจาก 4 สถานี สถานีละ 2 ทิศทางในรูปแบบของประวัติเวลา (Time History) โดยภาพที่ 3.40 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, S_a) โดยคำนวณจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือก โดยมีคุณสมบัติสอดคล้องกับ CMS ที่คาบการสั่น 2 วินาที

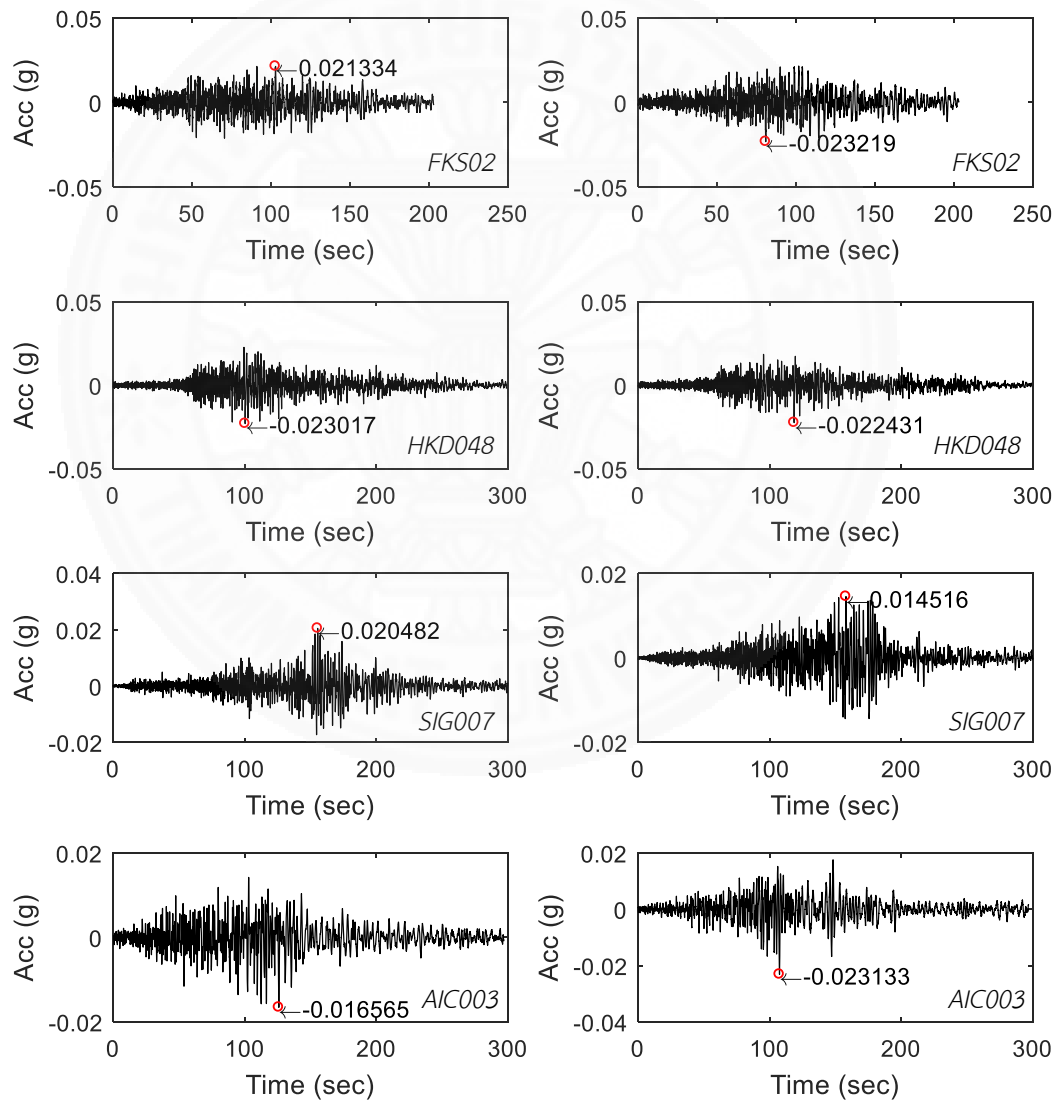
สำหรับการเลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในแต่ละพื้นที่ของแอ่งกรุงเทพฯ ถูกแบ่งย่อยออกเป็น 10 พื้นที่หลัก ประกอบด้วย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา, ปทุมธานี, กรุงเทพมหานคร, นครนายก, ฉะเชิงเทรา, ชลบุรี, สมุทรปราการ, สมุทรสาคร, นครปฐม, และราชบุรี โดยตำแหน่งที่เลือกของแต่ละจังหวัดแสดงดังภาพที่ 3.41 โดยสัญลักษณ์สีเหลี่ยมแสดงถึงตำแหน่งที่ใช้เป็นตัวแทนในการเลือกชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่จะนำมาวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในพื้นที่นั้น ๆ ทั้ง 10 พื้นที่ สำหรับพื้นที่จังหวัดที่มีขนาดเล็กสามารถใช้คลื่นแผ่นดินไหวร่วมกับจังหวัดใกล้เคียงได้ ได้แก่ จังหวัดนนทบุรี ใช้ชุดคลื่นแผ่นดินไหวเดียวกับกรุงเทพมหานคร, จังหวัดปราจีนบุรี ใช้ชุดคลื่นแผ่นดินไหวร่วมกับจังหวัดฉะเชิงเทรา และจังหวัดสมุทรสงครามใช้ชุดคลื่นแผ่นดินไหวร่วมกับจังหวัดสมุทรสาคร

ภาพที่ 3.42 – 3.46 แสดงค่า Envelope ของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกมาสอดคล้องกับทุกค่าคาบการสั่นของ CMS สำหรับจังหวัดพระนครศรีอยุธยา, ปทุมธานี, กรุงเทพมหานคร, นครนายก, ฉะเชิงเทรา, ชลบุรี, สมุทรปราการ, สมุทรสาคร, นครปฐม, และราชบุรี ตามลำดับ เพื่อใช้ป้อนที่ชั้นหินของแบบจำลองชั้นดินทั้ง 10 พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ

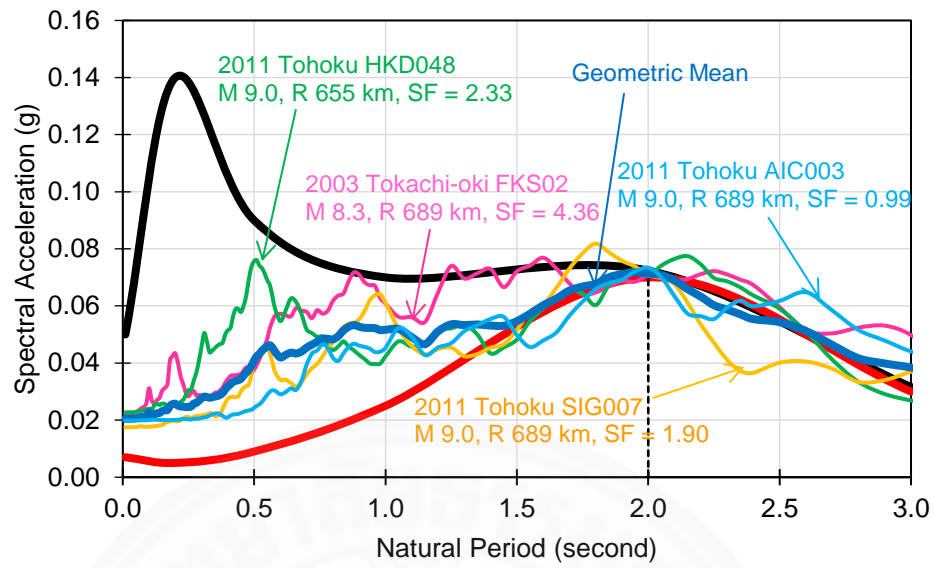
ตารางที่ 3.6

รายละเอียดคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับจังหวัดกรุงเทพมหานคร CMS=2.0 วินาที

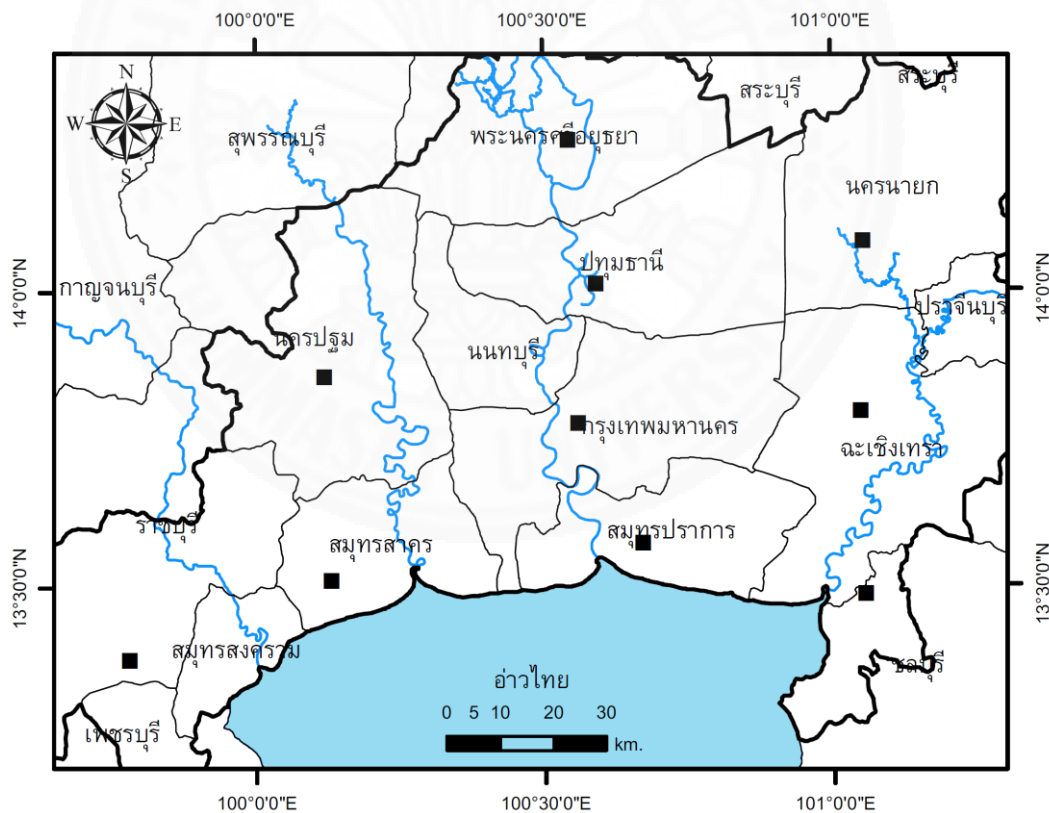
Event	Year	Station	Mag.	Mechanism	R (km)	Scale Factor
Tohoku	2011	HKD048	9.0	Thrust	655	2.330
Tohoku	2011	SIG007	9.0	Thrust	689	1.900
Tokachi-oki	2003	FKS02	8.3	Thrust	550	4.360
Tohoku	2011	AIC003	9.0	Thrust	689	0.993



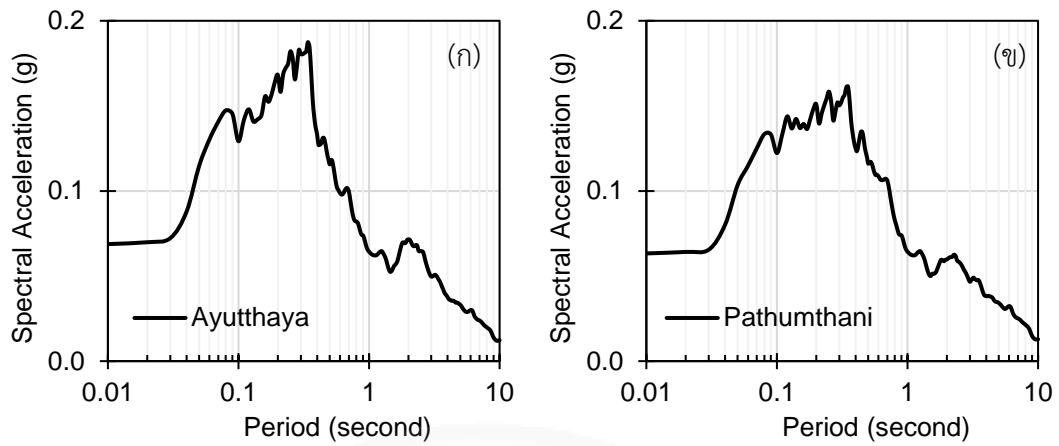
ภาพที่ 3.39 คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกมาใช้สำหรับ CMS=2 วินาที ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร



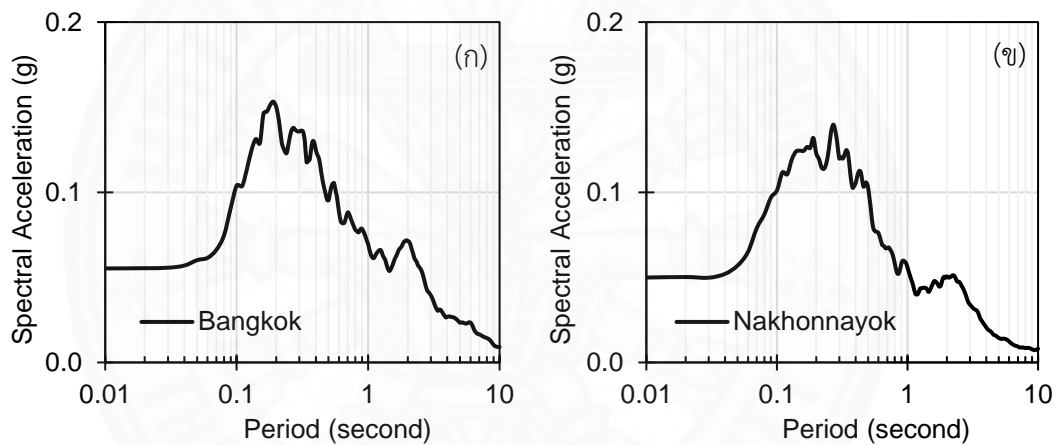
ภาพที่ 3.40 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับ CMS ที่คาบการสั่น 2.0 วินาที



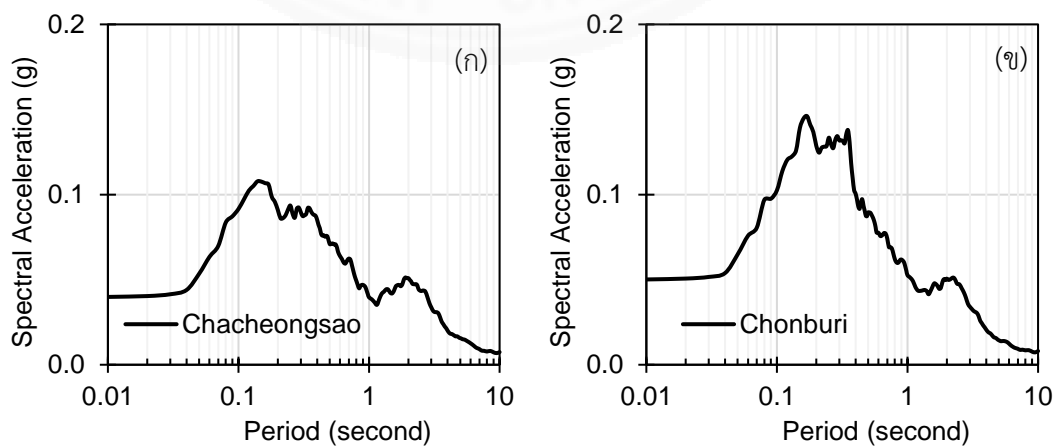
ภาพที่ 3.41 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับเลือกคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน



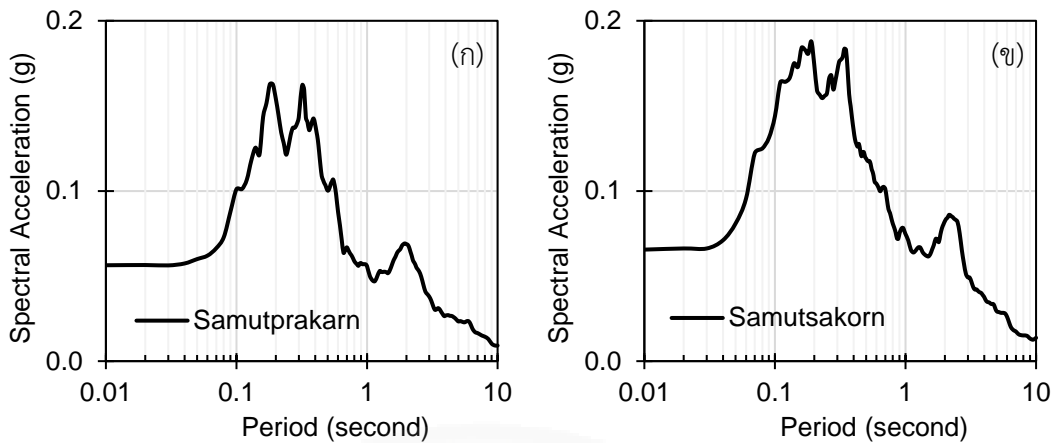
ภาพที่ 3.42 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข) จังหวัดปทุมธานี



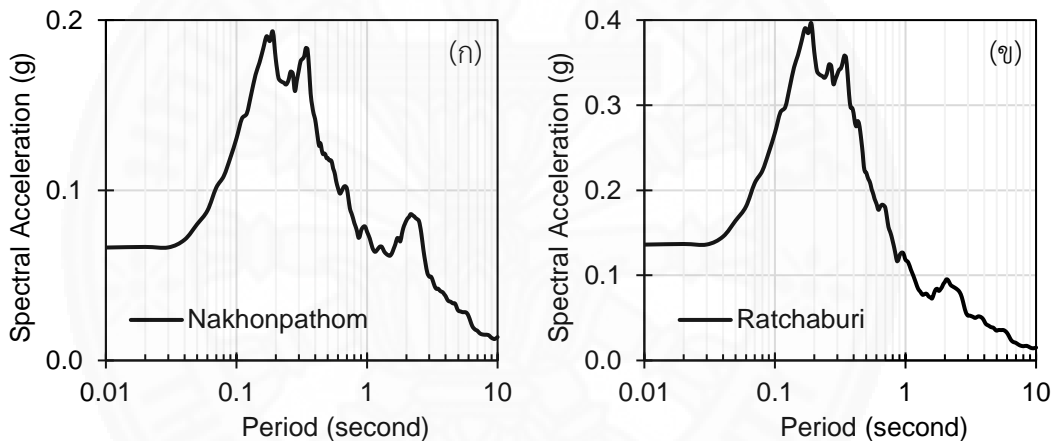
ภาพที่ 3.43 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดกรุงเทพมหานคร (ข) จังหวัดนครนายก



ภาพที่ 3.44 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดฉะเชิงเทรา (ข) จังหวัดชลบุรี



ภาพที่ 3.45 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดสมุทรปราการ (ข) จังหวัดสมุทรสาคร



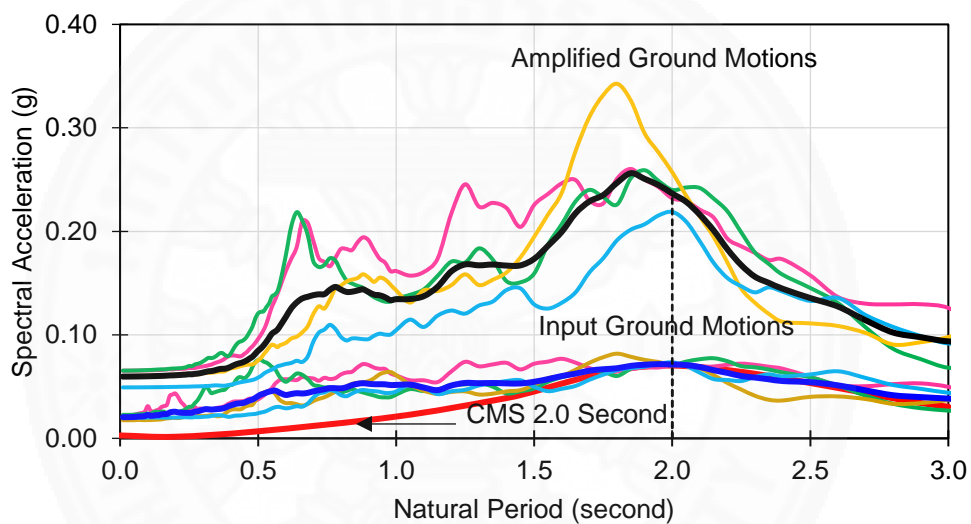
ภาพที่ 3.46 Spectral Acceleration สำหรับ (ก) จังหวัดนครปฐม (ข) จังหวัดราชบุรี

3.16.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน

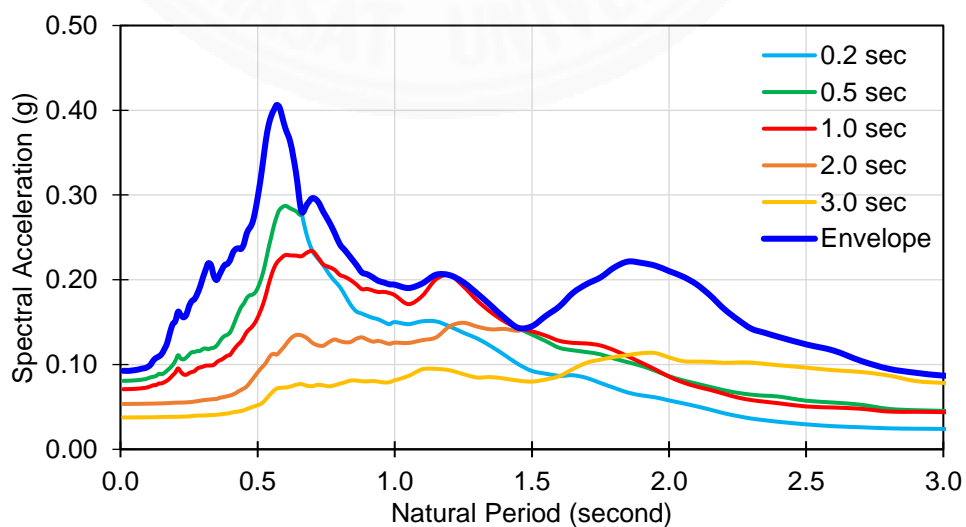
ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินโดยการใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับ CMS ที่คาบการสั่น 2.0 วินาที แสดงดังภาพที่ 3.50 โดยเส้นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, S_a) ของ CMS ที่คาบการสั่น 2.0 วินาทีที่แสดงด้วยเส้นหนาและเรียบ (สีแดง) เมื่อทำการเลือกชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ค่า S_a ที่ 2.0 วินาทีตรงกับค่าเป้าหมายและนำมาเปรียบเทียบกันจึงแสดงได้ด้วยเส้นบางเป็นคลื่นป้อนเข้าสู่แบบจำลองชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ ส่วนผลการวิเคราะห์แสดงเป็นค่า S_a ที่ถูกขยายขึ้นที่ผิวดินด้านบน แสดงไว้ในภาพที่ 3.47 เช่นเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยแสดงด้วยเส้นหนาและเรียบ (สีดำ) ซึ่งจากตัวอย่างแบบจำลองชั้นดินนี้พบว่าเกิดการขยายสำหรับค่า S_a ได้ประมาณ 3-4 เท่าตัว และค่า S_a ที่ถูกขยายขึ้นนี้จะถูกนำไปพิจารณา

ร่วมกับผลจากการวิเคราะห์ของ CMS ชุดอื่น เพื่อสร้างเป็นค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบต่อไป

ขั้นตอนสุดท้ายผลของค่า S_a ที่คำนวณได้ที่ผิวดินสำหรับแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนสำหรับชุด CMS ที่คาบการสั่นนั้น และค่าเฉลี่ยสำหรับแต่ละชุด CMS เมื่อนำมาแสดงรวมกันด้วยเส้นบาง ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.48 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงถึงค่า S_a ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นสำหรับแต่ละประเภทของโครงสร้างตามหลักการการวิเคราะห์จาก CMS และเพื่อเป็นการพิจารณาอย่างปลอดภัย ค่าสูงสุดจาก S_a ในแต่ละชุดจะถูกนำมารวมกันสร้างเป็นเส้นที่ครอบคลุมเส้นทั้งหมด (แสดงด้วยเส้นหนา) ซึ่งจะถูกพิจารณาใช้เป็น S_a สำหรับพื้นที่ที่ศึกษา



ภาพที่ 3.47 Spectral Acceleration สำหรับคาบการสั่น 2.0 วินาที



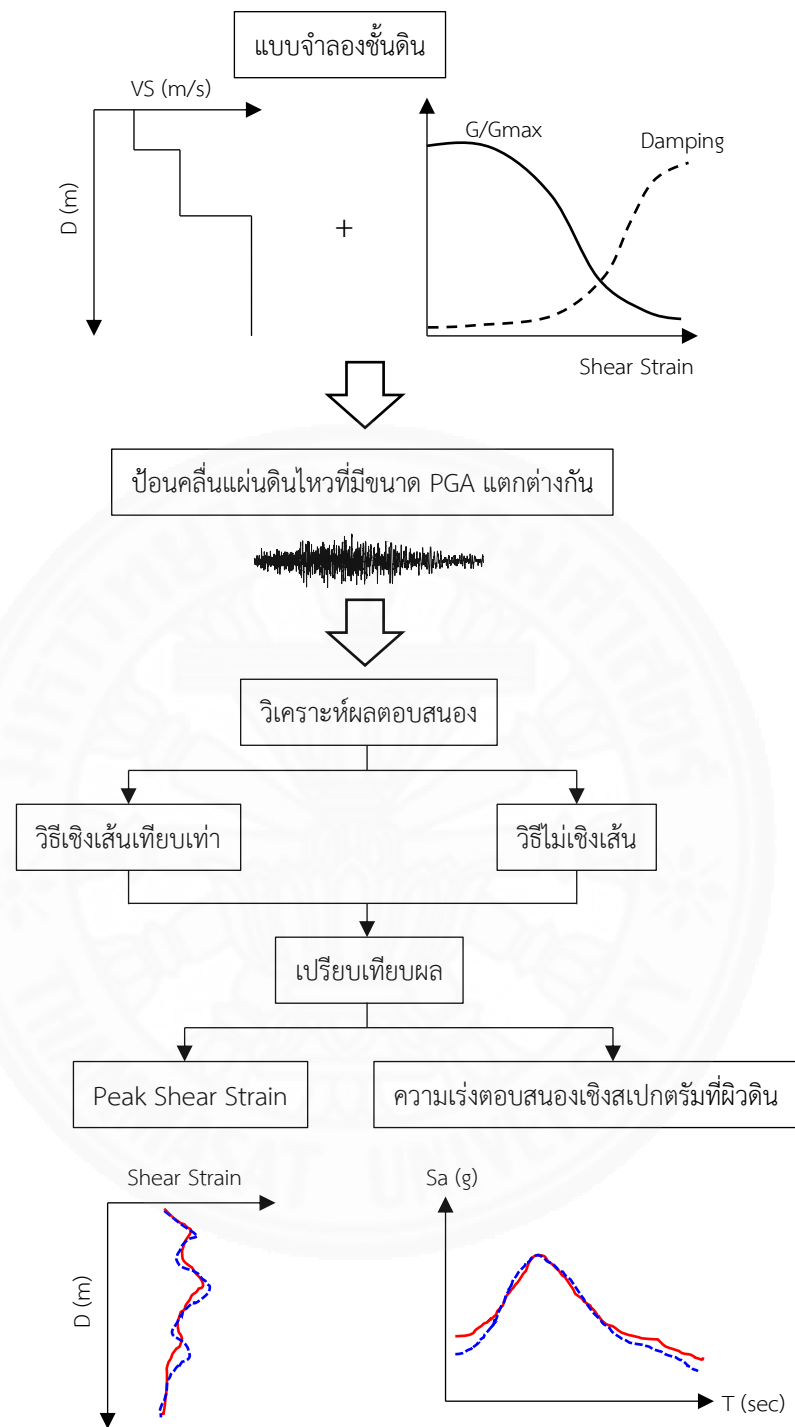
ภาพที่ 3.48 Spectral Acceleration สำหรับตำแหน่งที่ศึกษา

3.17 ขั้นตอนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และวิธีไม่เชิงเส้น

ปัจจุบันมีการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีการศึกษาและมีผลการทดสอบจำนวนมากยืนยันจนทำให้เกิดการยอมรับและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันก็ตาม วิธีการนี้ยังคงมีข้อเสียอยู่บ้าง เช่น ไม่มีความเหมาะสมหากนำไปใช้วิเคราะห์กับแบบจำลองชั้นดินที่มีความอ่อนมาก หรือมักพบการขยายกำลังที่มีนัยสำคัญในบริเวณคาบการสั่นที่ใกล้กับค่าคาบในโหมดพื้นฐาน และลดการขยายกำลังลงในคาบการสั่นอื่น ๆ อีกทั้งวิธีการนี้วิเคราะห์ได้เฉพาะ Frequency Domain เท่านั้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์แบบ Effective Stress ได้ นอกจากนี้ ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่าอย่างลงเรื่อย ๆ ในขณะที่การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้นเริ่มมีการศึกษาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นนั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ได้ดีและมีความสมจริงมากกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และยังให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าในกรณีที่ค่า Peak Shear Strain มีค่าเข้าใกล้กับค่ากำลังของดิน รวมถึงสามารถวิเคราะห์แบบ Effective Stress ได้ นอกจากนี้ ในปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นมีการพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีผลการศึกษาในเชิงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นจำนวนมากขึ้น

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น ด้วยโปรแกรม Deepsoil (Hashash, Y.M.A และคณะ 2559) โดยเลือกใช้แบบจำลองชั้นดินตัวอย่างในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งการศึกษานี้ และแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่า Shear Strain Profile และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นบน โดยมีแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาแสดงในภาพที่ 3.49

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบนี้ใช้ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวในการศึกษานี้ป้อนเข้าสู่แบบจำลองชั้นดิน ซึ่งกำหนดให้มีขนาดความรุนแรงของแตกต่างกัน ประกอบด้วย คลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า Peak Ground Acceleration (PGA) เท่ากับ 0.01g, 0.02g, 0.04g, 0.08g, 0.10g, และ 0.20g ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินในกรณีที่ขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้นจากทั้งสองวิธี



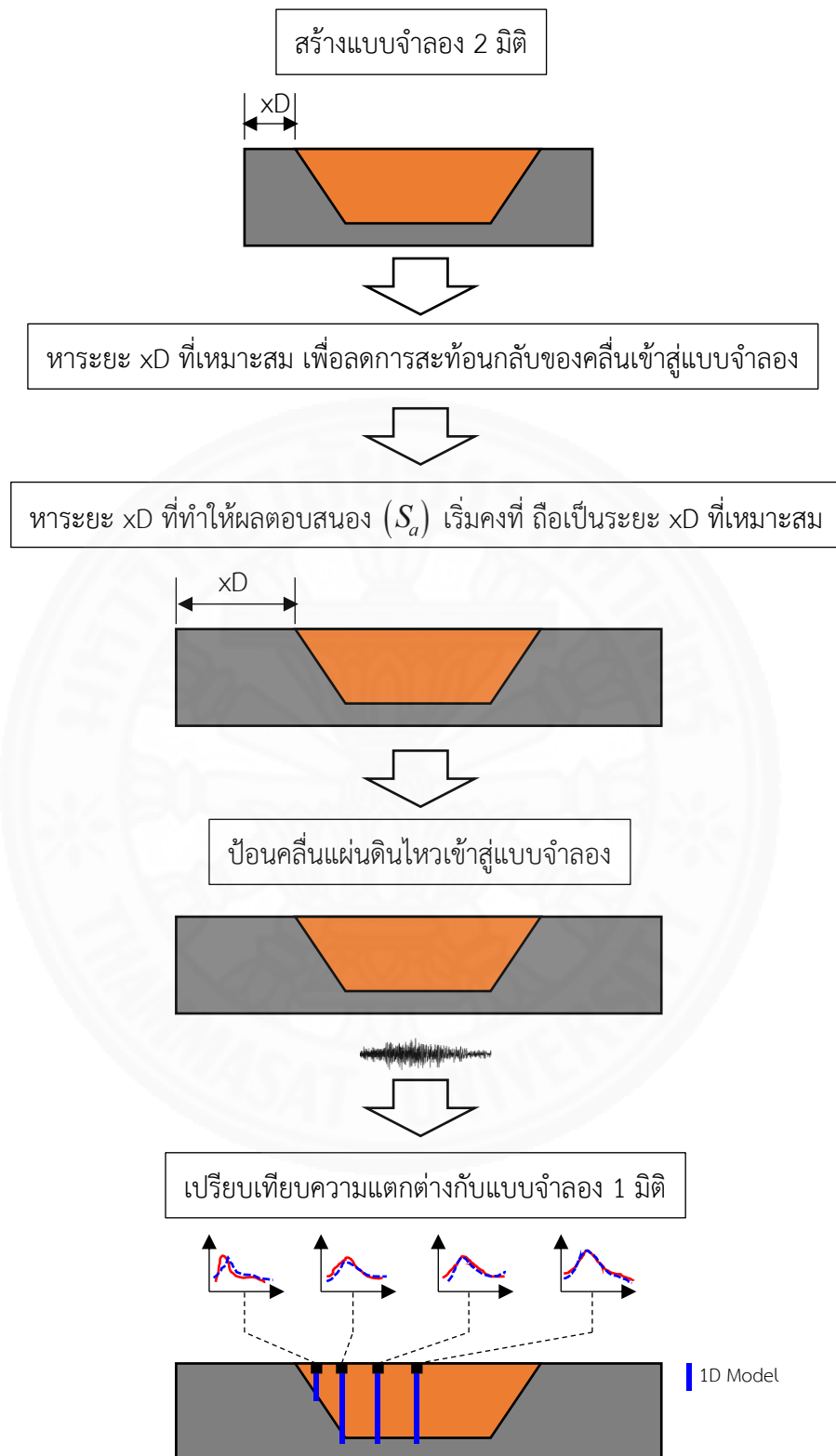
ภาพที่ 3.49 แผนผังแสดงขั้นตอนวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และวิธีไม่เชิงเส้นสำหรับการศึกษาส่วนที่ 1

3.18 ขั้นตอนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ สามารถใช้ได้ อย่างเหมาะสมในกรณีที่ชั้นดินมีลักษณะราบเรียบหรือมีความชันที่ไม่มากและเรียงตัวกันเป็นชั้นใน แนวราบ แต่หากแบบจำลองชั้นดินที่ต้องการศึกษามีลักษณะที่ซับซ้อนหรือแตกต่างจากลักษณะ ดังกล่าว เช่น เขื่อน, อุโมงค์, หรือแอ่งดินตะกอน (Basin) ที่มีรูปร่างซับซ้อน เป็นต้น การเลือกใช้ แบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ เริ่มมีความไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการศึกษา ดังนั้น แบบจำลอง ชั้นดินแบบ 2 มิติ จึงถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองชั้นดินภายใต้แรงกระทำ แผ่นดินไหวกับโครงสร้างดังกล่าวมากขึ้นในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีการศึกษาผลตอบสนองของแอ่งดินตะกอนด้วยแบบจำลอง 2 มิติ เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากชั้นดินมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน นอกจากนี้ ยังเป็นพื้นที่ที่มักพบการ ขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวที่มาจากระยะไกลอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้น การศึกษานี้ส่วนนี้ได้ทำการสร้าง แบบจำลองของแอ่งดินตะกอนตัวอย่างขึ้นมาเพื่อศึกษาเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างจากการ วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ สำหรับวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ วิธีไม่เชิง เส้น (Nonlinear) นอกจากนี้ ทำการเปรียบเทียบกับผลที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear) จากแบบจำลอง 1 มิติด้วยเช่นกัน

สำหรับแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ กำหนดให้เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) คือ Elementary Boundary ดังนั้น ก่อนเริ่มศึกษาผลตอบสนองของแบบจำลองตัวอย่างนี้ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและหาความกว้างที่วัดจากขอบของแอ่งดินตะกอนถึงขอบของแบบจำลอง เพื่อลด ผลกระทบที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นแผ่นดินไหวเข้าสู่แบบจำลองให้น้อยที่สุด เมื่อได้ความ กว้างของแบบจำลองที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการวิเคราะห์ผลตอบสนองของแอ่งดินตะกอน ตัวอย่าง และทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้กับแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบไม่ เชิงเส้น รวมถึงเปรียบเทียบความแตกต่างหากใช้วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าด้วย สำหรับแผนผังขั้นตอนการ วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 มิติ กับ 1 มิติ แสดงดังภาพที่ 3.50



ภาพที่ 3.50 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาและเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองแอ่งดิน
ตะกอน 2 มิติ กับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่า T_p , V_{S30} และความลึกของชั้นดิน

จากการเก็บข้อมูลคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor) ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินหาโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (Shear Wave Velocity Profile) และระดับความลึกของชั้นหิน (Bedrock Depth) ได้ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการศึกษา นอกจากนี้ ได้ทำการเก็บข้อมูลคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินแบบ 1 ตำแหน่ง (Single Point Microtremor) เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p) ของชั้นดินตำแหน่งที่ทำการศึกษา โดยผลการศึกษาที่ได้สามารถแสดงได้ในรูปของแผนที่เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ และตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดผลการศึกษาค่าความลึกของชั้นหิน, V_{S30} และค่า T_p ของแต่ละตำแหน่งที่ทำการศึกษารวม 170 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4.1

ผลการศึกษาค่าความลึกของชั้นหิน, V_{S30} และค่า T_p

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	ความลึก, ม.	V_{S30}	T_p
1	AY01	วัดราษฎร์บำรุง	385	184	0.82
2	AY02	โรงเรียนอัลฟอรอนศึกษา	367	196	0.73
3	AY03	โรงเรียนไทยรัฐวิทยา 2 (วัดช้างใหญ่)	446	176	0.93
4	AY04	โรงเรียนวัดจระเข้ไล่	311	213	0.43
5	AY05	โรงเรียนวัดคู่อุดมศิลา	305	201	0.73
6	AY06	วัดลาดระโง	391	198	0.73
7	AY07	วัดสุคันธาราม	437	195	0.82
8	AY08	วัดสุทธาโกชน	356	195	0.68
9	AY09	วัดปากน้ำ	214	197	0.62
10	AY10	วัดบ้านช้าง	434	230	0.76
11	AY11	วัดธรรมาราม	330	226	0.73
12	AY12	วัดประตูลอกเขมร	326	145	0.68
13	AY13	วัดลาดบัวขาว	296	195	0.79
14	AY14	แคมป์คนงานใกล้วัดใหญ่ชัยมงคล	335	138	0.79
15	AY15	โรงเรียนวัดคูทัย (เขาวนวิทยา)	218	251	0.79
16	BK01	โรงเรียนพิทยาลงกรณ์พิทยาคม	739	117	0.89
17	BK02	วัดแท่นวันดี	470	141	0.82

ตารางที่ 4.1

ผลการศึกษาความลึกของชั้นหิน , V_{S30} และค่า T_p (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	ความลึก, ม.	V_{S30}	T_p
18	BK03	ซอยเทียนทะเล 20	553	119	0.89
19	BK04	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	564	134	0.82
20	BK05	สนามฟุตบอลซอยเอกชัย 91	898	127	0.89
21	BK06	วัดวงษ์ลาภาราม	858	173	0.66
22	BK07	ถนนพุทธมณฑลสาย 2	641	157	0.85
23	BK08	คริสตจักรที่ 1 สำเหร่	830	142	0.82
24	BK09	กรมอุตุณิมวิทยา	531	112	0.89
25	BK10	สวนหลวง ร.9	755	134	0.66
26	BK11	สวนลุมพินี	738	159	0.82
27	BK12	มัสยิดดารุ้ลมุสตะกิน	429	116	0.79
28	BK13	หมู่บ้านกรีนวิลล์	647	152	0.89
29	BK14	วัดศีลมหาสนิท สวนผัก	760	139	0.79
30	BK15	สวนวชิรเบญจทัศ	608	154	0.82
31	BK16	สถาบันรัชต์ภาคย์	873	119	0.79
32	BK17	สวน 60 พรรษามหาราชินีนาถ	464	117	0.85
33	BK18	วัดสุทธาโกชน (วัดมอญ)	529	138	0.85
34	BK19	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2	795	132	0.79
35	BK20	ชุมชนติดถนนราษฎร์อุทิศ	583	137	0.85
36	BK21	ตลาดสดสี่แยกหนองจอก	550	114	0.85
37	BK22	ลำด้อยตั้ง	679	95	0.85
38	BK23	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	626	154	0.82
39	BK24	สนามหลังบริษัท ยูเนี่ยนเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด	529	138	0.79
40	BK25	ซอยวัดเวฬุวนาราม 1	659	148	0.66
41	BK26	ถนนสุขาภิบาล 5 ซอย 60	584	125	0.85
42	BK27	ซอยราษฎร์นimit 2	676	134	0.79
43	BK28	สนามแข่งรถวิบาก	577	121	0.85
44	BK29	มัสยิดอรัระห์มาน	532	139	0.85
45	BK30	วัดสี่ชมพู	558	135	0.85
46	BK31	ถนนคลองสีบสาม	578	135	0.85
47	CB01	วัดตาล้อม	48	370	0.3
48	CB02	วัดจตุรราษฎร์	118	633	0.3
49	CB03	วัดสำนักบก	25	787	0.3
50	CB04	วัดหนองกาน้ำ	65	557	0.3
51	CB05	วัดแหลมแค	163	239	0.42
52	CC01	โรงเรียนวัดหล่อเจริญราษฎร์	292	114	0.93
53	CC02	วัดใหม่สงเคราะห์ราษฎร์	250	116	0.93

ตารางที่ 4.1

ผลการศึกษาความลึกของชั้นหิน , V_{S30} และค่า T_p (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	ความลึก, ม.	V_{S30}	T_p
54	CC03	วัดบางผึ้ง	174	134	0.76
55	CC04	วัดกลางราษฎร์บำรุง	270	111	0.93
56	CC05	วัดบางปรองธรรมโชติการาม	268	123	0.98
57	CC06	วัดดอนสีนันท	254	155	0.71
58	CC07	วัดเสม็ดใต้	200	198	0.98
59	CC08	วัดสุทธาวาส	449	102	0.98
60	CC09	วัดบางปลานัก	435	138	0.82
61	CC10	วัดถวิลศิลามงคล	383	108	0.85
62	CC11	วัดก้อนแก้ว	233	167	0.78
63	CC12	วัดแสนภูมราวาส	194	281	0.93
64	CC13	วัดคลองเจ้า	303	109	0.85
65	CC14	โรงเรียนวัดบางสาย	321	114	0.71
66	CC15	วัดวังขอน	344	102	0.93
67	CC16	วัดทางข้ามน้อย	138	158	0.64
68	CC17	วัดบึงน้ารักษ์	396	109	0.79
69	CC18	วัดโพธิ์แสงกาญจนราษฎร์	349	104	0.71
70	CC19	วัดวิเวกวาราม	279	102	0.89
71	NB01	วัดต้นเชือก	277	149	0.76
72	NB02	วัดโตนด	368	161	0.82
73	NB03	โรงเรียนวัดเพรงาย	496	122	0.79
74	NB04	วัดท่าอิฐ	463	159	0.79
75	NB05	โรงเรียนญามาลุดดิน	484	165	0.66
76	NB06	โรงเรียนวัดราษฎร์นิยม	234	159	0.76
77	NP01	วัดปรีดาราม	504	162	0.49
78	NP02	วัดอ้อมใหญ่	366	158	0.49
79	NP03	โรงเรียนพอเงินวิทยาคม	329	183	0.48
80	NP04	วัดหนองดินแดง	405	258	0.79
81	NP05	วัดน้อย	420	202	0.79
82	NP06	โรงเรียนบ้านคลองมหาสวัสดิ์	583	173	0.62
83	NP07	พุทธมณฑล	647	159	0.76
84	NP08	วัดหนองกระโดน	335	304	0.47
85	NP09	วัดทุ่งผักกูด	410	214	0.82
86	NP10	วัดบางพระ	416	273	0.71
87	NP11	บ้านพักตำรวจ	374	256	0.79
88	NP12	วัดลำพระยา	438	164	0.73
89	NP13	วัดดอนสามสิบ	440	206	0.76

ตารางที่ 4.1

ผลการศึกษาความลึกของชั้นหิน , V_{S30} และค่า T_p (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	ความลึก, ม.	V_{S30}	T_p
90	NP14	วัดคลองเสมียนตรา	268	141	0.76
91	NP15	วัดบางน้อยใน	462	249	0.73
92	NP16	วัดนิลเพชร	452	182	0.76
93	NY01	โรงเรียนบ้านคลอง 22	296	130	0.76
94	NY02	โบสถ์พระนางมาเรีย	253	151	0.76
95	NY03	วัดสว่างอารมณ์	400	139	0.76
96	NY04	โรงเรียนบ้านคลองสามวิทยา	388	195	0.79
97	NY05	วัดใหม่บำเพ็ญผล	279	254	0.82
98	NY06	วัดกลางคลองสามสิบ	338	182	0.79
99	NY07	วัดบ้านพริก	119	340	0.79
100	NY08	ที่โล่งใกล้ร้านซ่อมรถ	44	379	0.24
101	NY09	ทุ่งนาใกล้วัดเกาะกระชาย	51	448	0.16
102	NY10	สวนดี	53	457	0.27
103	NY11	วัดศรีกระอาง	73	630	0.25
104	PB01	ที่โล่งใกล้สำนักสงฆ์วิเวกลำเนาไพร	14	1080	0.2
105	PB02	วัดหนองปรัง	75	297	0.71
106	PB03	วัดบางหอ	290	134	0.68
107	PB04	ที่โล่งใกล้สำนักสงฆ์โค้งสวรรค์	74	301	0.53
108	PB05	วัดท้ายตลาด	254	725	0.24
109	PB06	วิทยาลัยการอาชีพเขาย้อย	27	1066	0.23
110	PB07	วัดศิลคุณธรรม	180	382	0.19
111	PJ01	โรงเรียนศรีรัษฎาราชบุรีบำรุง	236	131	0.79
112	PJ02	วัดวังขอน	242	153	0.64
113	PJ03	วัดคลองเฒ่า	252	151	0.71
114	PJ04	วัดพิทักษ์โสภณ	293	195	0.73
115	PJ05	วัดวิษลขันธุ์	249	153	0.76
116	PT01	วัดบัวขวัญ	369	158	0.66
117	PT02	วัดบางกะดี	573	183	0.76
118	PT02	วัดกลางคลองสี่	657	125	0.82
119	PT04	วัดป่าเจริญราช	517	135	0.89
120	PT05	วัดบัวสุวรรณประดิษฐ์	538	167	0.73
121	PT06	วัดป่าจิว	468	143	0.76
122	PT07	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	637	128	0.66
123	PT08	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	559	148	0.64
124	PT09	วัดแสงมณี	346	157	0.73
125	PT10	วัดผลาหาญ	412	194	0.76

ตารางที่ 4.1

ผลการศึกษาความลึกของชั้นหิน , V_{S30} และค่า T_p (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	ความลึก, ม.	V_{S30}	T_p
126	PT11	วัดบึงบาประภาสวัด	402	174	0.79
127	PT12	วัดอู่ข้าว	291	163	0.79
128	PT13	วัดราชบุรุษบำรุง	365	175	0.79
129	PT14	วัดธรรมราชเจริญผล	346	160	0.79
130	PT15	โรงเรียนวัดสร้างบุญ	296	287	0.76
131	RB01	วัดหทัยเรศร์	86	509	0.12
132	RB02	โรงเรียนบ้านไพรสะอาด	158	233	0.76
133	RB03	วัดดาวลอย	280	298	0.82
134	RB04	โรงเรียนวัดสันติการามวิทยา	76	515	0.16
135	RB05	วัดทุ่งหลวง	109	440	0.24
136	RB06	วัดเลิศดุสิตดาราม	121	316	0.76
137	RB07	วัดแจ้งเจริญ	182	216	0.71
138	RB08	กลุ่มอาชีพเพาะเห็ดบ้านอ่างหิน	13	773	0.12
139	RB09	โรงเรียนวัดห้วยไผ่	52	1025	0.27
140	RB10	วัดใหม่นครบาล	228	354	0.76
141	RB11	วัดเกาะศาลพระ	204	238	0.71
142	RB12	โรงเรียนบ้านทุ่งน้อย	31	758	0.17
143	RB13	โรงเรียนวัดบางกระ	232	226	0.56
144	RB14	โรงเรียนวัดท่าเรือ	421	221	0.57
145	RB15	วัดพิทักษ์เทพवास	485	200	0.71
146	RB16	โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา พัฒนาการ	480	206	0.71
147	RB17	โรงเรียนวัดธรรมนบ	475	238	0.71
148	RB18	วัดดอนใหญ่	438	249	0.76
149	SK01	โรงเรียนบ้านต้นลำแพน	321	148	0.93
150	SK02	วัดเจริญรัตนาราม	312	186	0.55
151	SK03	วัดธรรมประสิทธิ์	370	118	0.79
152	SK04	วัดประชาโฆษิตาราม	347	135	0.64
153	SK05	โรงเรียนบ้านบางป่อ	462	151	0.82
154	SK06	วัดอมรเทพ	220	192	0.71
155	SK07	วัดลาดเป้ง	420	137	0.73
156	SP01	วัดแหลม	503	132	0.76
157	SP02	วัดพุทธภาวนาราม	491	127	0.85
158	SP03	วัดตำหุ	361	126	0.82
159	SP04	วัดศรีจันทาราม	482	117	0.98
160	SP05	วัดโผลงโน	498	122	1.1
161	SP06	วัดเสาชงกลาง	550	117	0.98

ตารางที่ 4.1

ผลการศึกษาความลึกของชั้นหิน , V_{S30} และค่า T_P (ต่อ)

ที่	ชื่อไซต์	สถานที่	ความลึก, ม.	V_{S30}	T_P
162	SP07	วัดบ้านระกาศ	497	111	1.21
163	SP08	วัดศรีวารีน้อย	608	97	0.93
164	SP09	วัดเปร็งราษฎร์	548	107	1.14
165	SS01	วัดธรรมโชติ	431	127	0.79
166	SS02	วัดศรีวนาราม	491	130	0.85
167	SS03	วัดสหกรณ์โคสีดารา	745	148	0.82
168	SS04	โรงเรียนหลักสองส่งเสริมวิทยา	694	152	0.79
169	SS05	วัดเกาะ	632	138	0.82
170	SS06	วัดเทพนรรัตน์	718	127	0.82

แผนที่แสดงความลึกของชั้นหินของแต่ละตำแหน่งที่ได้ทำการศึกษา แสดงดังภาพที่ 4.1 โดยระดับความลึกของชั้นหินสามารถประเมินได้จากระดับความลึกที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับชั้นหินมีค่าประมาณ 2,000 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป โดยบริเวณที่แทนด้วยสีน้ำตาลเข้มหมายถึงความลึกของชั้นดินหรือระดับของชั้นหินบริเวณนั้นมีความลึกมากกว่า 800 เมตร โดยพบอยู่ในพื้นที่ส่วนกลางของพื้นที่ที่ทำการศึกษารอบคลุมพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ และสมุทรสาคร รวมถึงพื้นที่บางส่วนของจังหวัดนนทบุรีและจังหวัดปทุมธานี โดยความลึกของชั้นดินมีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเมื่อพื้นที่ที่ทำการศึกษาอยู่ห่างออกจากพื้นที่ดังกล่าว โดยพื้นที่ที่มีความลึกของระดับชั้นดินหรือระดับของชั้นหินตื้นสุดอยู่ในพื้นที่บริเวณขอบของพื้นที่การศึกษาซึ่งแทนด้วยสีเขียวเข้ม โดยมีความลึกน้อยกว่า 70 เมตร ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ใกล้เชิงเขาซึ่งมีสภาพชั้นดินเป็นดินแข็งหรือหิน

ภาพที่ 4.2 คือ แผนที่แสดงเส้นตัดขวาง (Cross-Section Line) จำนวน 4 ทิศทางในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เพื่อแสดงให้เห็นถึงรูปร่างของแอ่งกรุงเทพฯ ในแต่ละทิศทางได้อย่างชัดเจน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เส้นตัดขวางแนว A-A' เป็นแนวที่แสดงรูปร่างของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ในแนวเหนือ-ใต้ โดยเริ่มต้นที่บริเวณอำเภอเมืองจังหวัดพระนครศรีอยุธยาผ่านจังหวัดปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานคร และอำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ สำหรับความยาวของแนว A-A' มีค่าประมาณ 100 กิโลเมตร ซึ่งภาพตัดขวางของแอ่งกรุงเทพฯ แนว A-A' แสดงในภาพที่ 4.3 จากผลการศึกษาพบว่า จังหวัดพระนครศรีอยุธยามีความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ ประมาณ 300 เมตร จากนั้นความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงบริเวณเขตปทุม

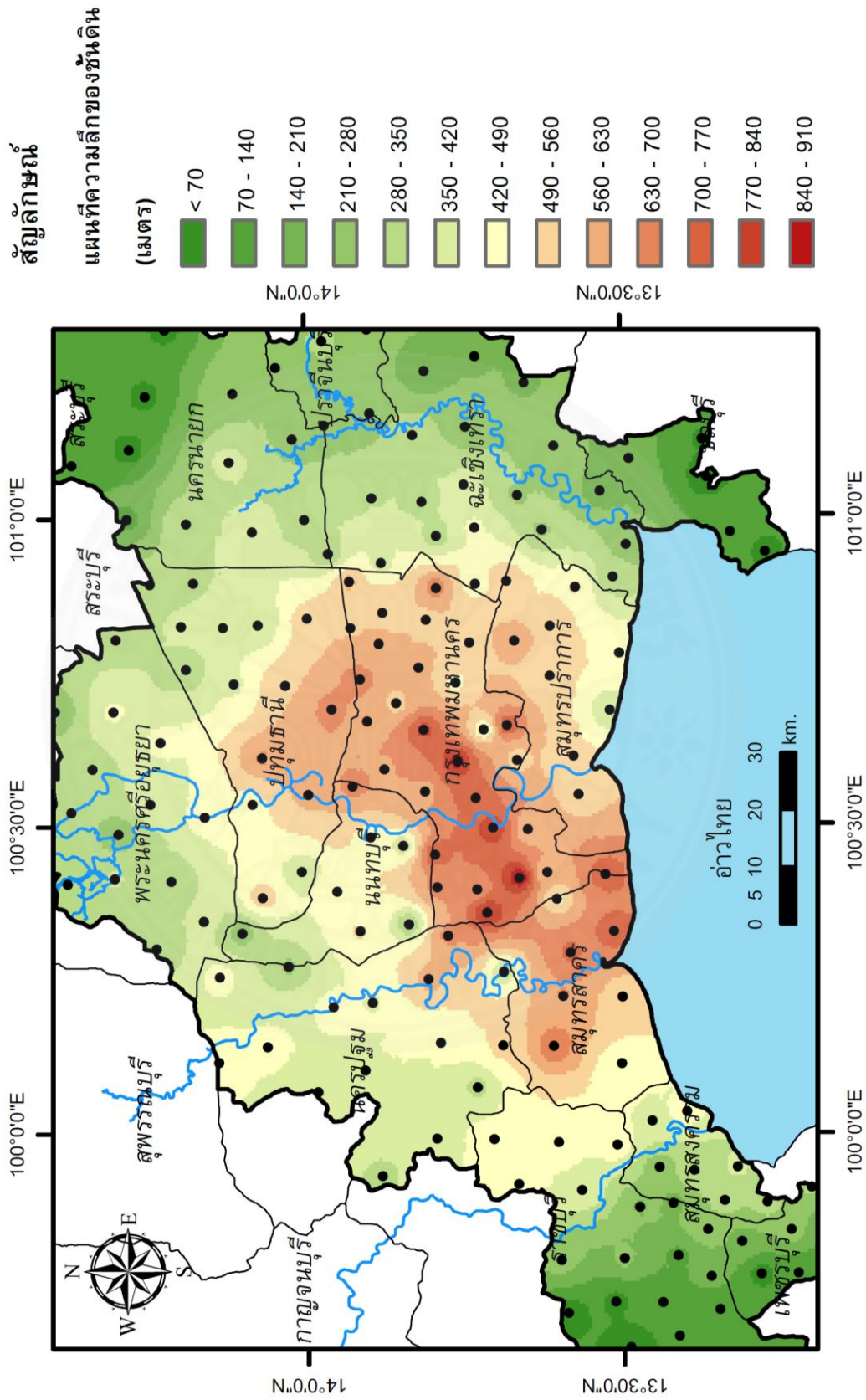
- วัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีความลึกสุดอยู่ที่ระดับ 736 เมตร แต่เมื่อพื้นที่เข้าใกล้ปากอ่าวไทยในเขตจังหวัดสมุทรปราการ พบว่า ความลึกของชั้นดินมีค่าเพิ่มขึ้น โดยระดับความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ ในบริเวณนี้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 527 เมตร
2. เส้นตัดขวางแนว B-B' เป็นแนวที่แสดงรูปร่างของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นช่วงที่ยาวที่สุด โดยลากผ่านพื้นที่ภาคตะวันตกที่อำเภอเขาชัยย้อย จังหวัดเพชรบุรี ผ่านจังหวัดสมุทรสงคราม สมุทรสาคร กรุงเทพมหานคร ปทุมธานี และสิ้นสุดที่อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก ซึ่งมีความยาวรวมประมาณ 200 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จากผลการศึกษาพบว่า บริเวณขอบของพื้นที่การศึกษาบริเวณจังหวัดเพชรบุรี และนครนายก ความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าต่ำกว่า 100 เมตร แต่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของชั้นดินเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเหนือ-ใต้ โดยพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครมีความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มากที่สุดประมาณ 750 เมตร ซึ่งภาพตัดขวางของแอ่งกรุงเทพฯ แนว B-B' นี้มีรูปร่างคล้ายแอ่งกระทะ
 3. เส้นตัดขวางแนว C-C' เป็นแนวที่แสดงรูปร่างของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งตัดผ่านตะวันตก-ตะวันออก โดยเริ่มจากพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ผ่านกรุงเทพมหานคร และสิ้นสุดที่พื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา รวมระยะทางประมาณ 145 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จากผลการศึกษาพบว่า ความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดนครปฐมมีค่าประมาณ 400 เมตร จากนั้นความลึกของชั้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงพื้นที่เขตวังทองหลาง จังหวัดกรุงเทพมหานครซึ่งมีความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ สูงสุดที่ระดับความลึกประมาณ 867 จากนั้นความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าน้อยลงเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฝั่งนครปฐมเข้ามายังพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าประมาณ 200 เมตร บริเวณพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา
 4. เส้นตัดขวางแนว D-D' เป็นแนวที่แสดงรูปร่างของชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ซึ่งตัดผ่านแนวตะวันตกเฉียงเหนือบริเวณอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ผ่านพื้นที่จังหวัดนนทบุรี กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ ฉะเชิงเทรา และสิ้นสุดที่บริเวณภาคตะวันออกในพื้นที่ของอำเภอบางปะกง จังหวัดชลบุรี โดยมีระยะทางประมาณ 140 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ผลการศึกษาพบว่า ความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ บริเวณอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐมมีความลึกประมาณ 400 เมตร จากนั้นความลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งลึกสุดประมาณ 735 เมตร ในพื้นที่เขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร จากนั้นความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าลดลงเรื่อย ๆ

จนกระทั่งถึงพื้นที่อำเภอพานทอง จังหวัดชลบุรี ซึ่งความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ อยู่ที่ระดับประมาณ 70 เมตร

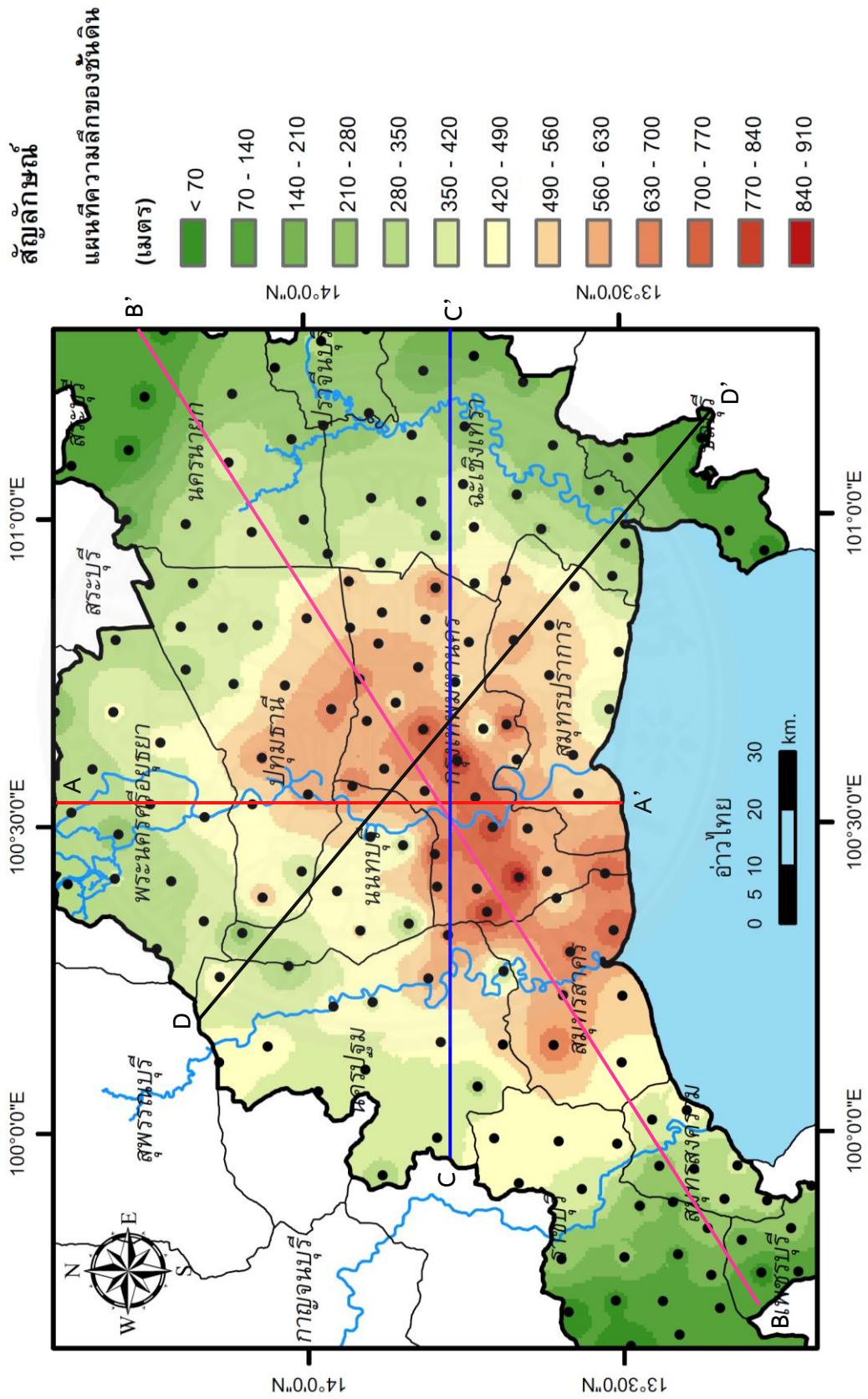
จากผลการศึกษา หากพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ พบว่า ความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ ในแนวเหนือ-ใต้ มีลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าในแนวตะวันตก-ตะวันออก กล่าวคือ ความลึกของแอ่งในแนวเหนือ-ใต้ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะที่ความลึกของแอ่งในแนวตะวันตก-ตะวันออก มีการเปลี่ยนแปลงความลึกอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะใกล้กับขอบแอ่งทิศตะวันตก ตะวันออกเฉียงเหนือ และตะวันออกของพื้นที่ศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ติดกับเขตภูเขา ซึ่งชั้นดินมีลักษณะเป็นดินแข็งหรือหิน ในพื้นที่อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี, อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก และอำเภอพานทอง จังหวัดชลบุรี

ภาพที่ 4.7 คือ แผนที่แสดงค่าคาบอิทธิพลหลักของชั้นดินบริเวณตำแหน่งที่ทำการศึกษา โดยพื้นที่ที่มีสีน้ำตาลเข้ม หมายถึง เป็นพื้นที่ที่มีค่าคาบอิทธิพลหลักในช่วงค่าคาบการสั่นที่ยาว (Long Period) โดยมีค่าสูงสุดยาวกว่า 1.2 วินาที ในพื้นที่บริเวณอำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการติดกับจังหวัดฉะเชิงเทรา สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.7 – 0.9 วินาทีในขณะที่พื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.7 – 0.8 วินาที ยกเว้นบริเวณใกล้กับแนวเขาในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี นครนายก และชลบุรี จะมีค่าคาบอิทธิพลหลักสั้นกว่า 0.2 วินาที โดยในแผนที่แสดงเป็นสีเขียวเข้ม

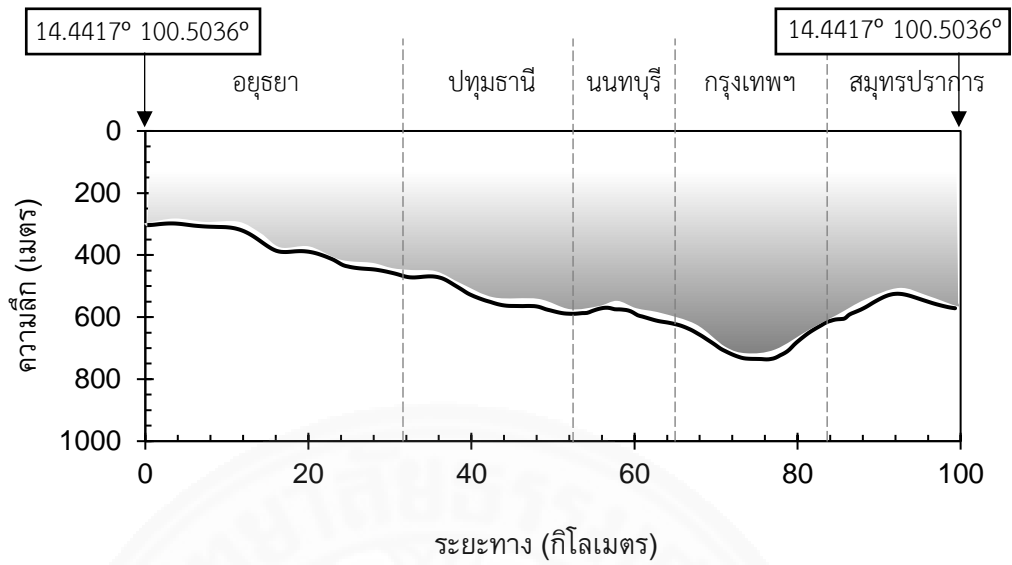
ภาพที่ 4.8 คือ แผนที่แสดงผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่ระดับผิวดินถึงความลึก 30 เมตร (V_{s30}) ซึ่งจากการศึกษาและวิเคราะห์ผล พบว่า ค่า V_{s30} ของพื้นที่ที่ศึกษาส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 180 เมตรต่อวินาที หากจัดประเภทของชั้นดินตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว (มยผ.1302) จะจัดอยู่ในกลุ่มชั้นดินประเภท E ซึ่งหมายถึง ดินอ่อน ส่วนพื้นที่โดยรอบส่วนใหญ่จะมีค่า V_{s30} มากกว่า 180 เมตรต่อวินาทีจนถึงค่าประมาณ 540 เมตรต่อวินาที ซึ่งจัดเป็นชั้นดินประเภท D ถึง C และจะมีค่าสูงสุดอยู่ในบริเวณใกล้กับแนวเขาในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี นครนายก และชลบุรี โดยมีค่า V_{s30} ตั้งแต่ 540 – 1,080 เมตรต่อวินาที จัดอยู่ในชั้นดินประเภท C ถึง B ซึ่งถือว่าเป็นชั้นดินแข็ง ถึง หิน



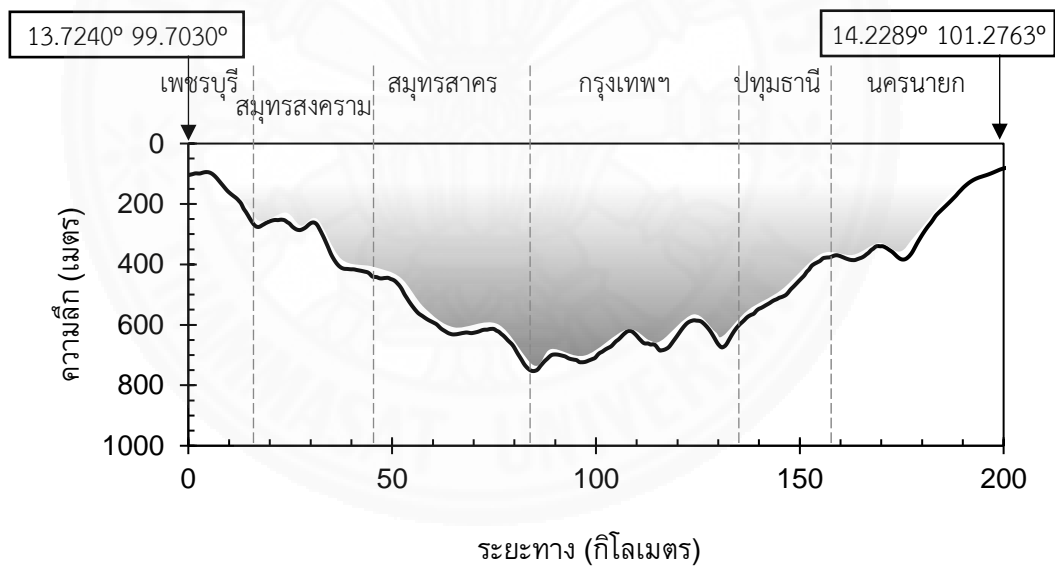
ภาพที่ 4.1 แผนที่แสดงความลึกของชั้นหิน



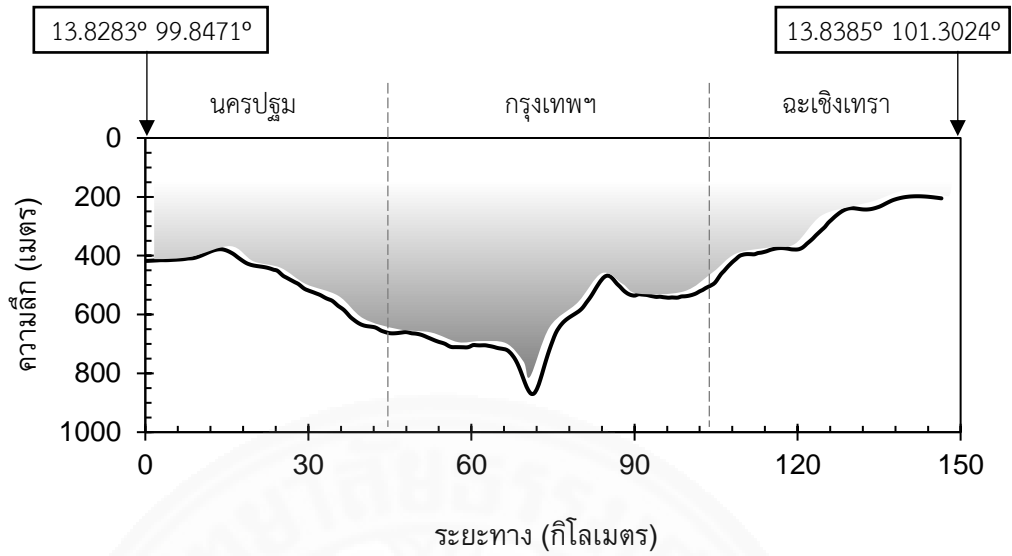
ภาพที่ 4.2 แผนที่แสดงความลึกของชั้นดินและแนวเส้นสำหรับภาพตัดขวาง



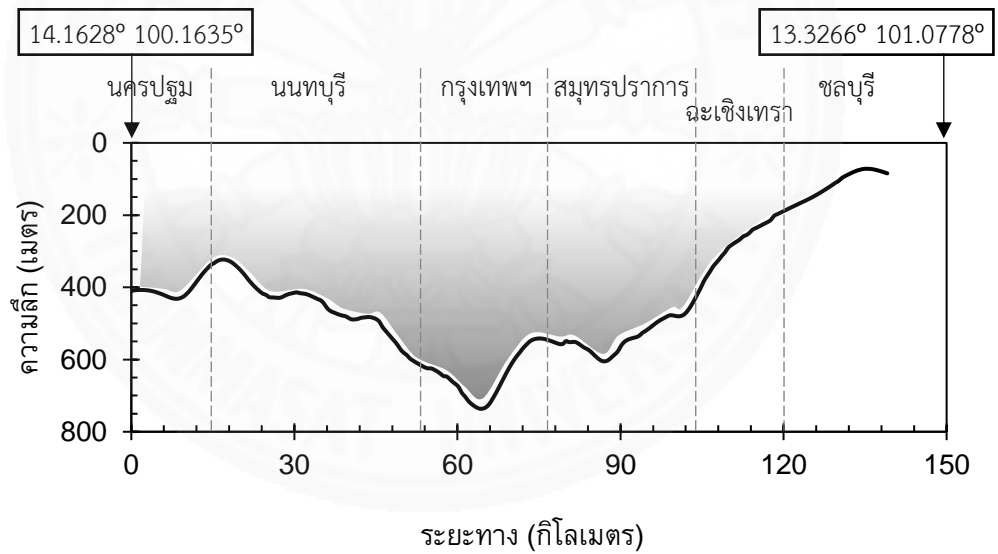
ภาพที่ 4.3 แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว A-A' ของแอ่งกรุงเทพฯ



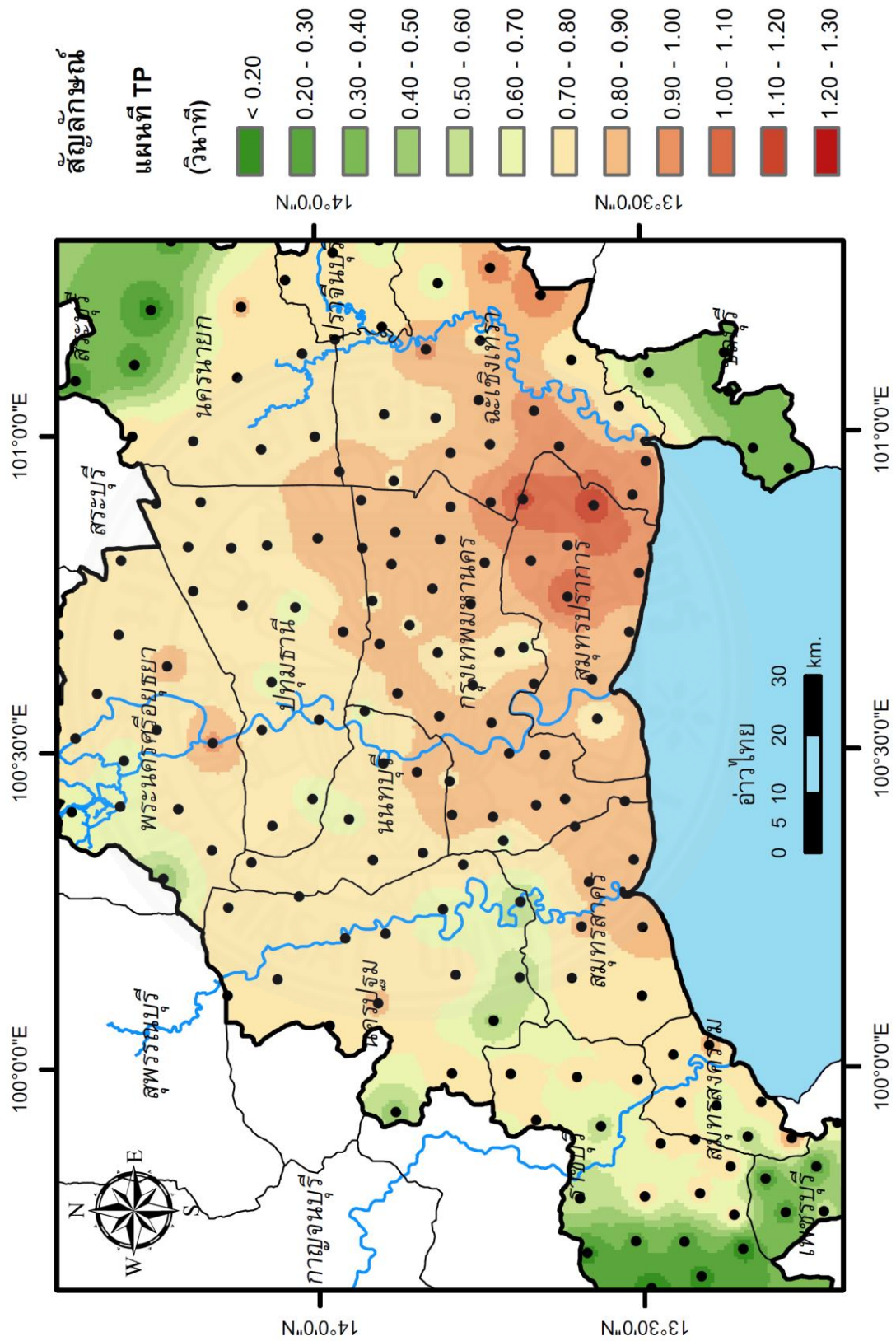
ภาพที่ 4.4 แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว B-B' ของแอ่งกรุงเทพฯ



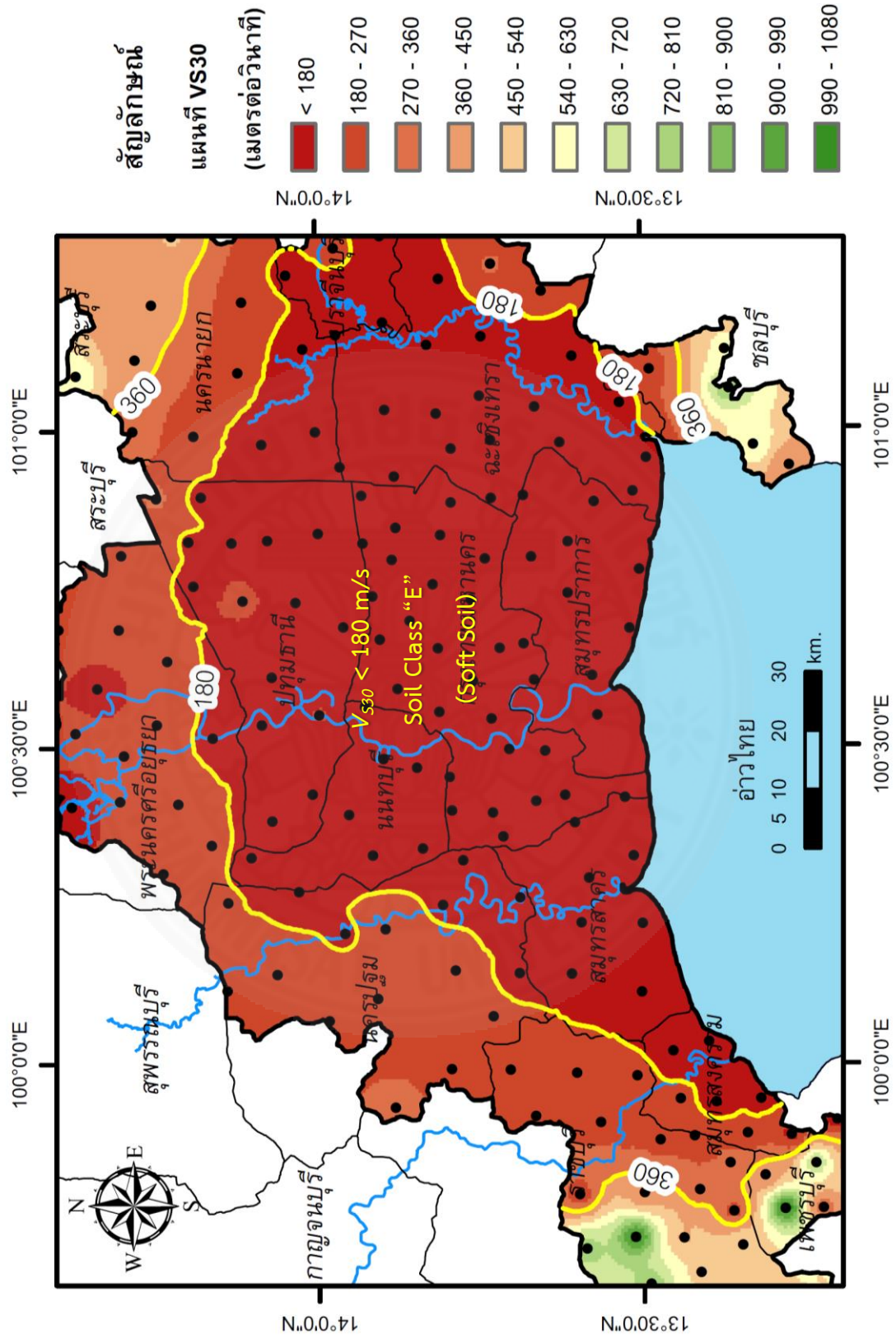
ภาพที่ 4.5 แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว C-C' ของแอ่งกรุงเทพฯ



ภาพที่ 4.6 แผนที่แสดงภาพตัดขวางแนว D-D' ของแอ่งกรุงเทพฯ



ภาพที่ 4.7 แผนที่แสดงค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p)

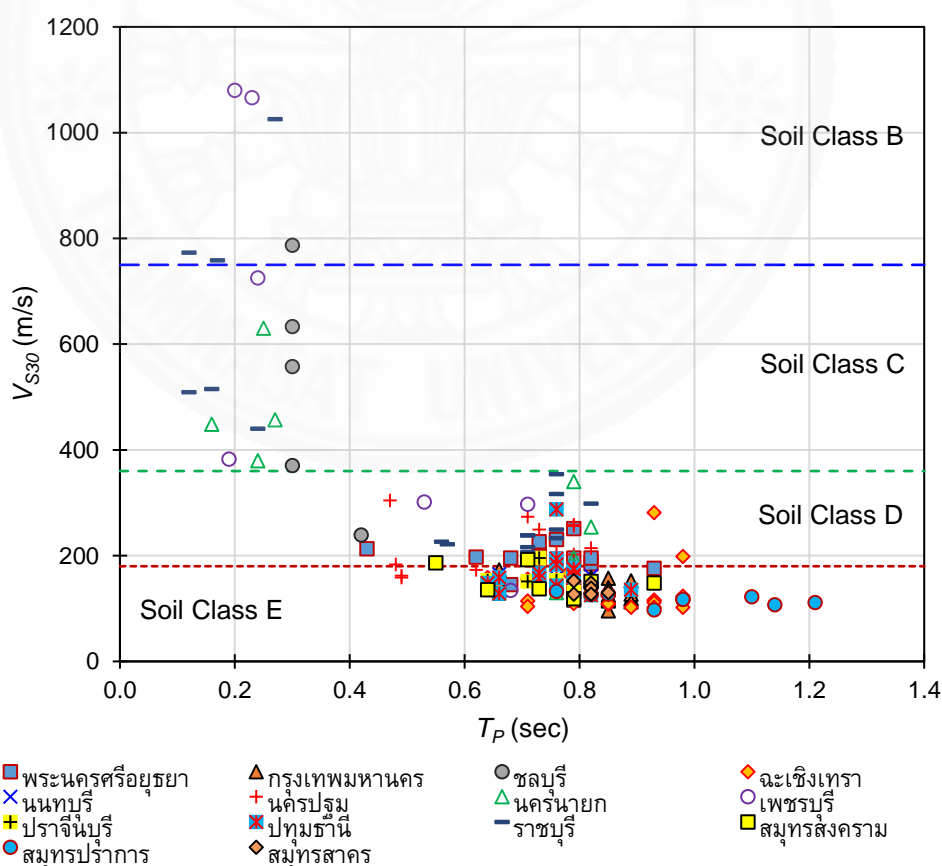


ภาพที่ 4.8 แผนที่แสดงค่า V_{S30}

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{S30} กับ T_p ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ

หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบอทธิพลหลัก (T_p) กับค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เมตร (V_{S30}) จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 170 ตำแหน่ง พบว่า ค่า T_p มีค่าแปรผกผันกับค่า V_{S30} กล่าวคือ บริเวณดินอ่อนซึ่งมีค่า T_p ยาว จะมีค่า V_{S30} ต่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับบริเวณดินแข็ง เนื่องจากมีค่า T_p สั้น แต่ค่า V_{S30} สูง ดังแสดงในภาพที่ 4.9

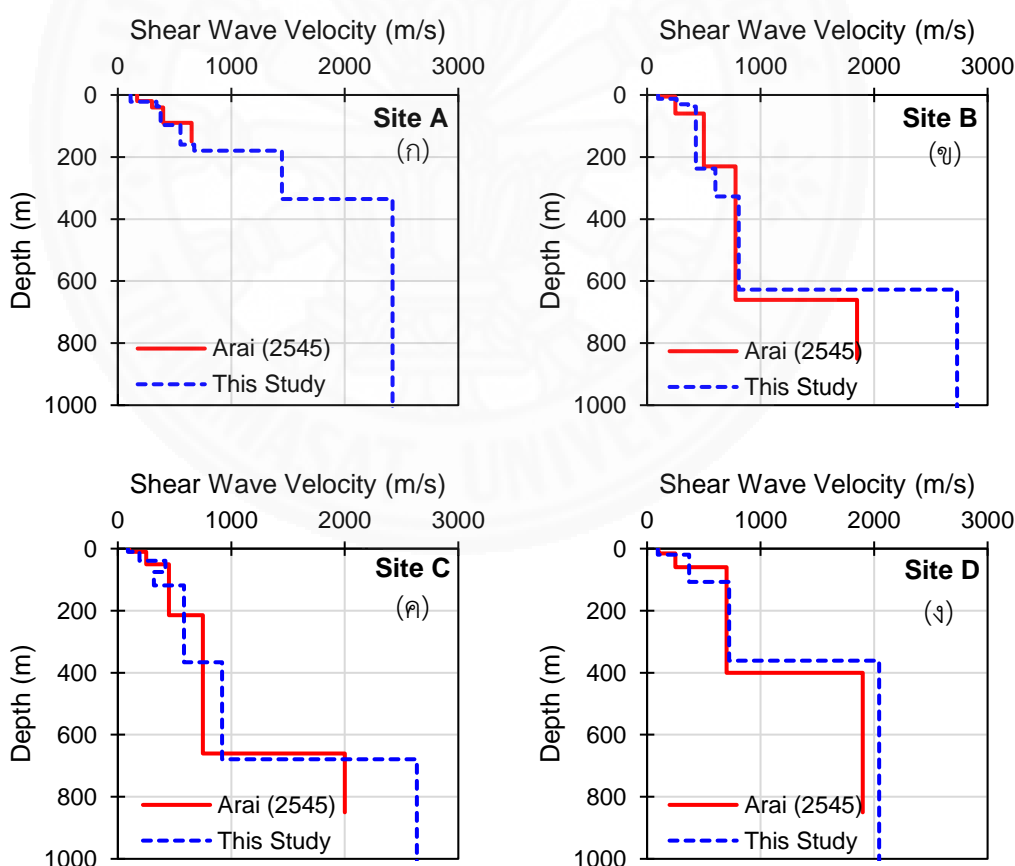
จากภาพที่ 4.9 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งส่วนใหญ่ในพื้นที่การศึกษาตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท E (ค่า V_{S30} ต่ำกว่า 180 เมตรต่อวินาที) ถึงชั้นดินประเภท D (ค่า V_{S30} อยู่ในช่วง 180 - 360 เมตรต่อวินาที) และมีค่า T_p อยู่ในช่วง 0.6 - 1.0 วินาที ยกเว้นพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการที่มีค่า T_p ยาวถึง 1.2 วินาที สำหรับตำแหน่งศึกษาที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี นครนายก และชลบุรี (บริเวณติดขอบพื้นที่การศึกษา) ชั้นดินจัดอยู่ในประเภท C (ค่า V_{S30} อยู่ในช่วง 360 - 750 เมตรต่อวินาที) ถึงชั้นดินประเภท B (ค่า V_{S30} อยู่ในช่วง 750 - 1,500 เมตรต่อวินาที) โดยมีค่า T_p อยู่ในช่วง 0.1 - 0.3 วินาที



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_p ในแนวราบกับค่า V_{S30} ในแนวตั้ง

4.3 การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกกับงานวิจัยในอดีต

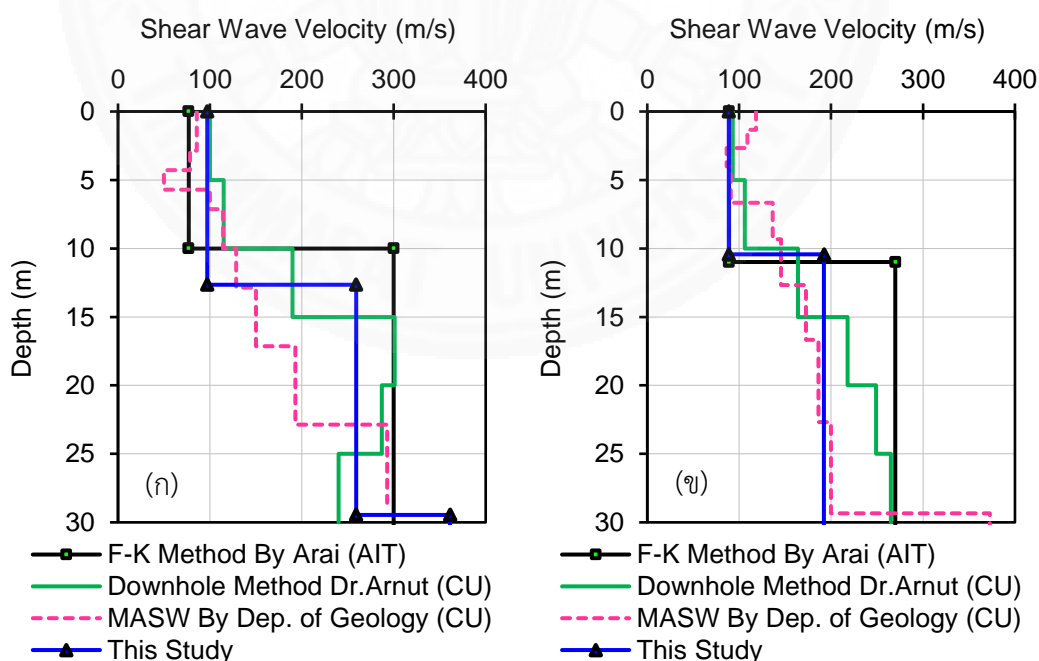
การศึกษาโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) ในพื้นที่แห่งกรุงเทพฯ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างชั้นดินและระดับความลึกของกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) เริ่มต้นโดย Arai และ Yamazaki (2545) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี Frequency-Wave Number (F-K method) ใน 4 ตำแหน่งสำรวจ ได้แก่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจังหวัดสมุทรปราการ ผลการศึกษาพบว่า ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับชั้นหินมีค่าประมาณ 2,000 เมตรต่อวินาที โดยที่ระดับความลึกของกรุงเทพฯ อยู่ที่ประมาณ 400 ถึง 670 เมตร เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันระหว่างผลการศึกษาดังกล่าวกับผลการศึกษานี้ จึงได้ทำการเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่พื้นที่เดียวกันจำนวน 4 ตำแหน่ง แสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกจากการศึกษานี้กับวิธี F-K (ก) พระนครศรีอยุธยา, (ข) AIT, (ค) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ (ง) สมุทรปราการ

จากภาพที่ 4.10 พบว่า โครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกทั้ง 4 ตำแหน่งจากผลการศึกษาของ Arai และ Yamazaki (2545) และจากผลการศึกษานี้ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี ทั้งค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกต่าง ๆ และระดับความลึกของชั้นหิน โดยความลึกของชั้นดินบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ในภาพที่ 4.10(ข) อยู่ที่ระดับ 628 และ 660 เมตร สำหรับผลการศึกษานี้และผลการศึกษาก่อนหน้าตามลำดับ ส่วนความลึกของชั้นดินบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาพที่ 4.10(ค) อยู่ที่ระดับ 679 และ 660 เมตร สำหรับผลการศึกษานี้และผลการศึกษาก่อนหน้าตามลำดับ สำหรับความลึกของชั้นดินบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ในภาพที่ 4.10(ง) อยู่ที่ระดับ 361 และ 400 เมตร สำหรับผลการศึกษานี้และผลการศึกษาก่อนหน้าตามลำดับ ในขณะที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในภาพที่ 4.10(ก) จากผลการศึกษานี้อยู่ที่ระดับ 335 เมตร ส่วนผลการศึกษาก่อนหน้าไม่สามารถระบุความลึกของระดับชั้นดินได้

นอกจากนี้ หากพิจารณาความเร็วคลื่นเฉือนในช่วง 30 เมตรแรกจากการศึกษานี้เปรียบเทียบกับผลการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยวิธี Downhole ซึ่งเป็นการทดสอบที่ให้ผลถูกต้องและน่าเชื่อถือที่สุด และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค F-K และ MASW ที่ตำแหน่งสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) จังหวัดปทุมธานี และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร พบว่า มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับวิธีอื่นที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.11(ก) และ 4.11(ข)



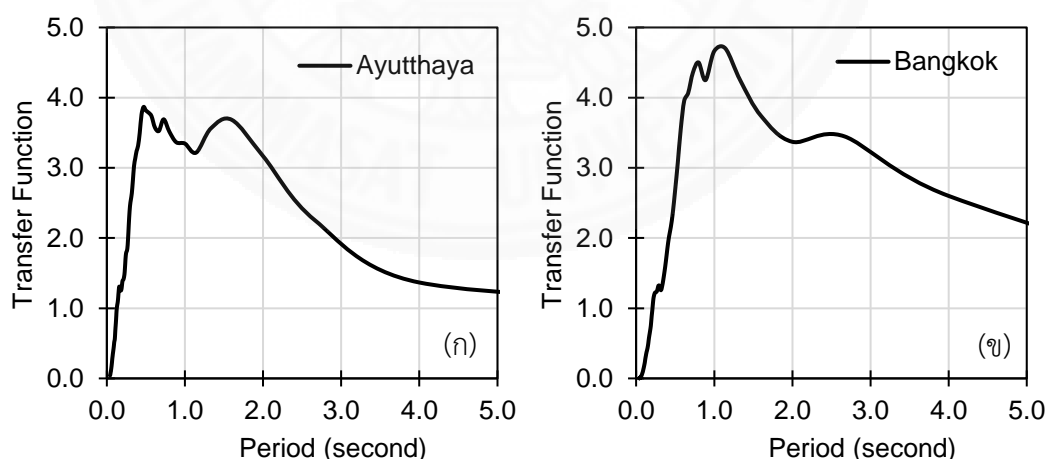
ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกในช่วง 30 เมตรแรกจากการศึกษานี้กับวิธี F-K, Downhole, และ MASW สำหรับตำแหน่ง (ก) AIT, (ข) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ

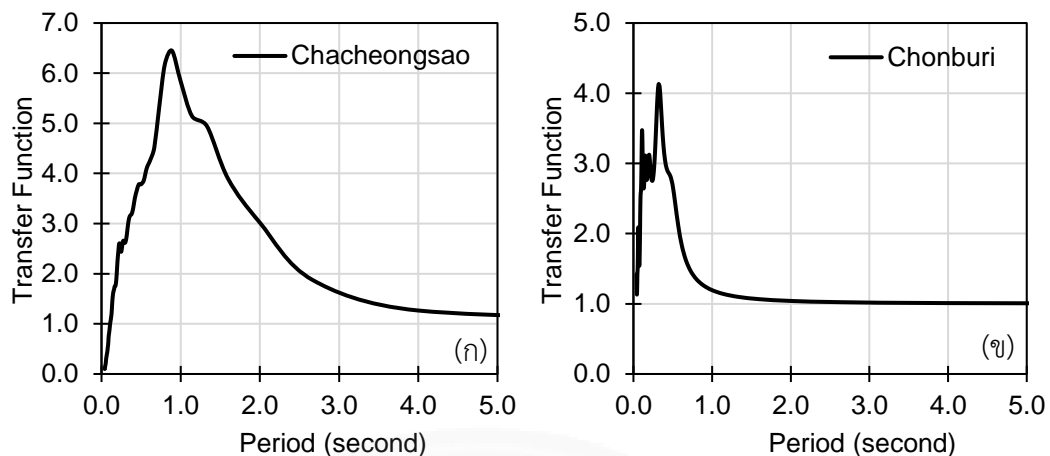
4.4.1 Transfer Function

Transfer Function คือ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างชั้นดินโดยไม่คิดผลของแผ่นดินไหว เพื่อศึกษาถึงค่าคาบธรรมชาติ (Natural Peirod) และขนาดของกำลังขยายของคลื่นแผ่นดินไหวโดยประมาณของชั้นดิน ณ ตำแหน่งที่ทำการศึกษา ในการวิเคราะห์ Transfer Function กำหนดให้ค่าความหน่วง (Damping) มีค่าเท่ากับ 5% สำหรับชั้นดิน และ 1% สำหรับชั้นหิน ภาพที่ 4.12 – 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยของ Transfer Function ที่ผ่านการวิเคราะห์ซึ่งถือเป็นตัวแทนสำหรับจังหวัดพระนครศรีอยุธยา, กรุงเทพมหานคร, ฉะเชิงเทรา, ชลบุรี, นครปฐม, นครนายก, นนทบุรี, เพชรบุรี, ปราจีนบุรี, ปทุมธานี, ราชบุรี, สมุทรปราการ, สมุทรสาคร, และสมุทรสงคราม ตามลำดับ

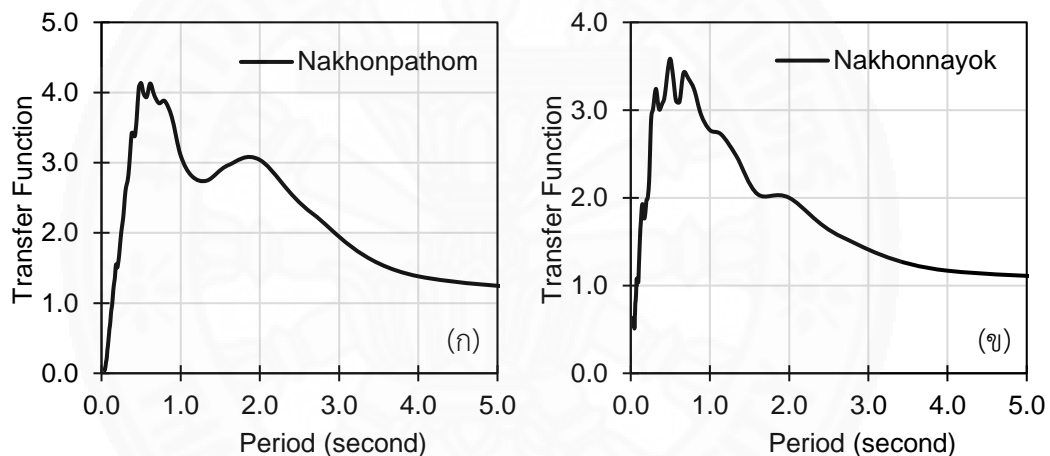
จากผลการวิเคราะห์ Transfer Function พบว่า ค่าคาบธรรมชาติของจังหวัดชลบุรีมีค่าสั้นที่สุดประมาณ 0.3 วินาที ในขณะที่จังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี และนครนายก มีค่าคาบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.3 - 0.5 วินาที สำหรับจังหวัดอื่นที่อยู่ในพื้นที่กลางแอ่งกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่มีค่าคาบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.7 - 1.0 วินาที นอกจากนี้ บางจังหวัดมียอด (Peak) ของ Transfer Function มากกว่า 1 ตำแหน่ง โดยของค่าคาบธรรมชาติในช่วงประมาณ 2.0 วินาที พบได้ในพื้นที่จังหวัด สมุทรสาคร นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรสงคราม นครปฐม ส่วนจังหวัดกรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ มีค่าคาบธรรมชาติในช่วงคาบยาวประมาณ 2.5 - 3.0 วินาที



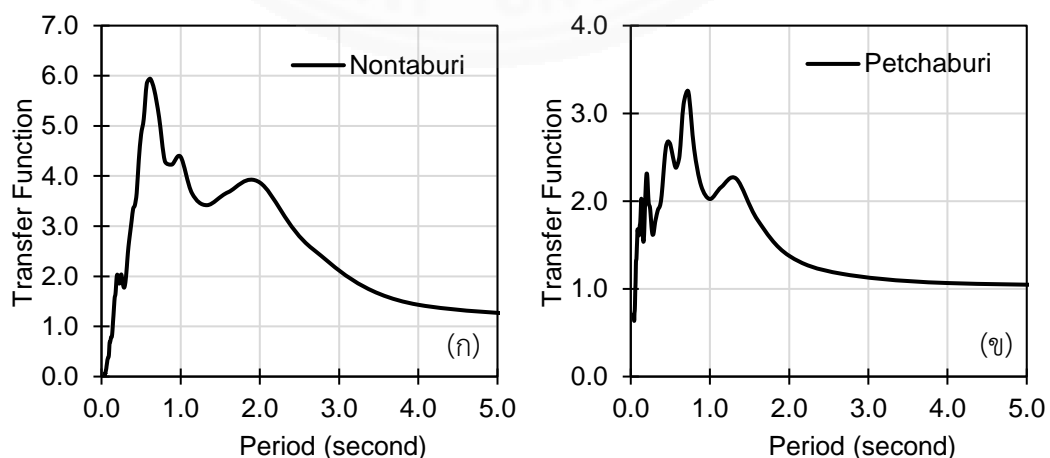
ภาพที่ 4.12 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข) จังหวัดกรุงเทพมหานคร



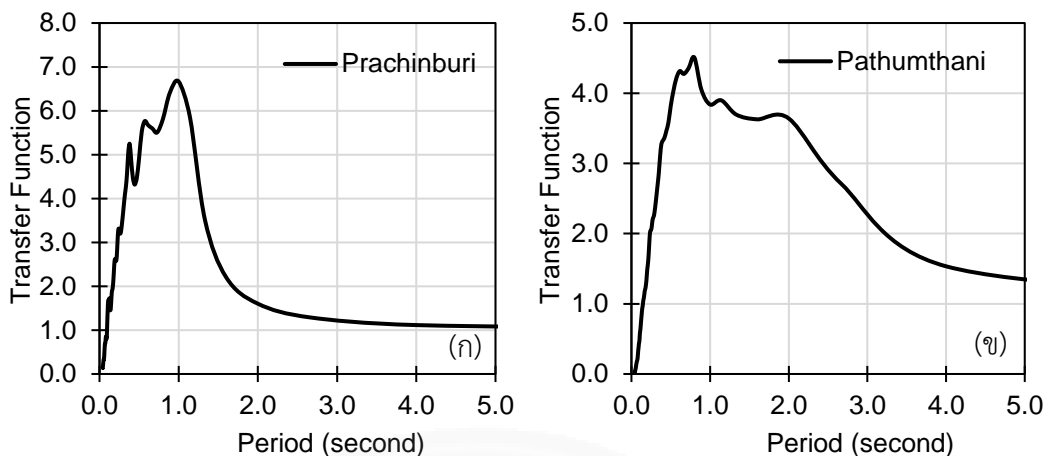
ภาพที่ 4.13 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดฉะเชิงเทรา (ข) จังหวัดชลบุรี



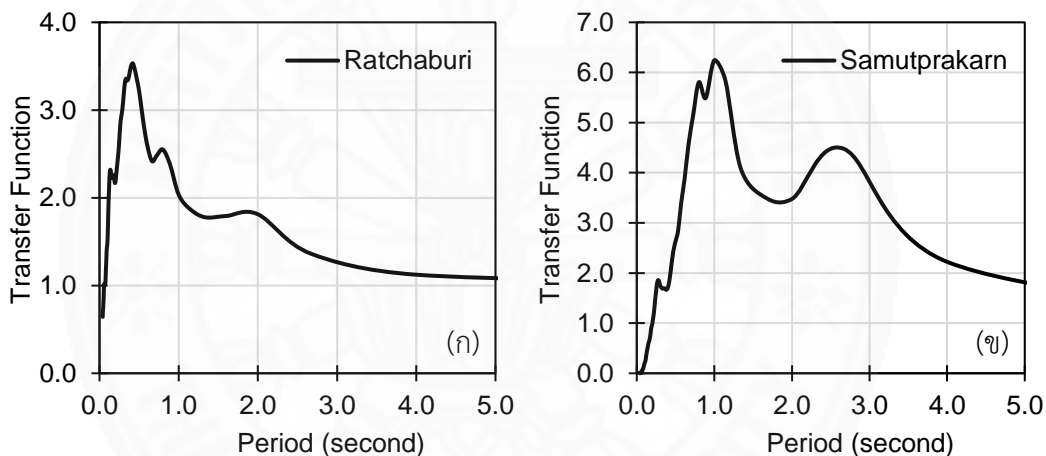
ภาพที่ 4.14 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดนครปฐม (ข) จังหวัดนครนายก



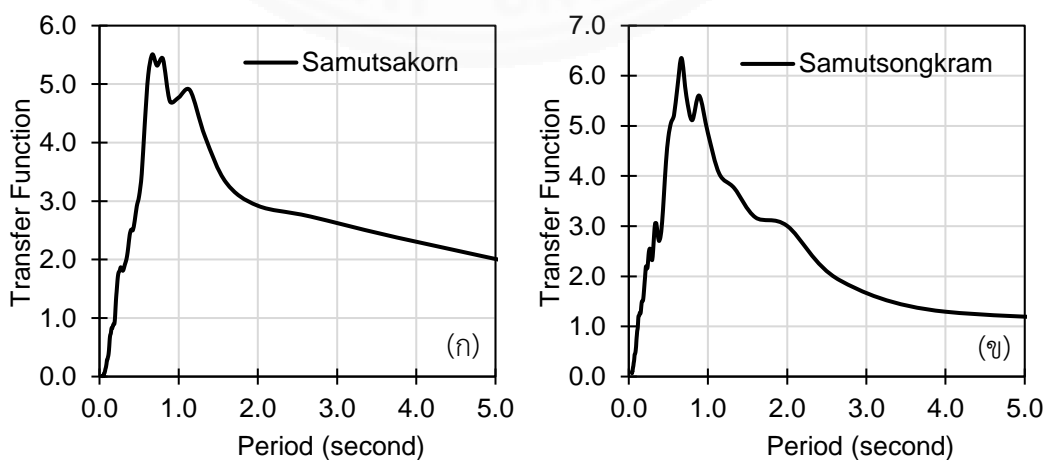
ภาพที่ 4.15 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดนนทบุรี (ข) จังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 4.16 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดปราจีนบุรี (ข) จังหวัดปทุมธานี



ภาพที่ 4.17 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดราชบุรี (ข) จังหวัดสมุทรปราการ



ภาพที่ 4.18 ค่าเฉลี่ย Transfer Function (ก) จังหวัดสมุทรสาคร (ข) จังหวัดสมุทรสงคราม

4.4.2 อัตราการกระจายของคลื่นแผ่นดินไหว

อัตราการกระจายคลื่นของคลื่นแผ่นดินไหว สามารถคำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดินต่อความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวหิน (SA at Soil Surface / SA at Rock Outcrop) โดยการพิจารณาผลของแผ่นดินไหวที่กระทำต่อชั้นดิน ซึ่งแตกต่างจาก Transfer Function ที่ยังคิดผลเฉพาะโครงสร้างชั้นดินอย่างเดียวเท่านั้น ดังภาพที่ 4.19 – 4.25 โดยการวิเคราะห์อัตราการกระจายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวและนำค่าสูงสุด (Envelope) ของค่าเฉลี่ยแต่ละ CMS ของแต่ละตำแหน่งการศึกษา เพื่อนำมาหาเป็นค่าเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งการศึกษาในพื้นที่จังหวัดเดียวกัน ซึ่งถือเป็นตัวแทนสำหรับจังหวัดนั้น ๆ โดยผลการศึกษาพบว่า

จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งอยู่บนพื้นที่ที่มีชั้นดินเป็นดินแข็งมีอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 2 เท่าที่คาบการสั่นตั้งแต่ 1.5 วินาทีลงมา ในขณะที่คาบการสั่นยาวกว่า 1.5 วินาที ค่าอัตราการกระจายคลื่นมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็น 1 หรือไม่มีการขยายกำลัง

พื้นที่จังหวัดชลบุรี ซึ่งอยู่บนพื้นที่ดินแข็ง พบว่ามีค่าอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 2.5 เท่า ที่คาบการสั่นสั้นกว่า 0.3 วินาที ในขณะที่อัตราการกระจายคลื่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่คาบการสั่น 0.3 วินาทีเป็นต้นมาจนกระทั่งไม่มีการขยายกำลังของคลื่นตั้งแต่ช่วงคาบการสั่น 1.0 วินาที

พื้นที่จังหวัดนครนายก และจังหวัดราชบุรี มีอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 2.5 - 3 เท่า ที่คาบการสั่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 - 1.0 วินาที จากนั้นอัตราการกระจายคลื่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดประมาณ 1.5 เท่า ที่ช่วงค่าคาบการสั่นยาวประมาณ 4.0 - 5.0 วินาที

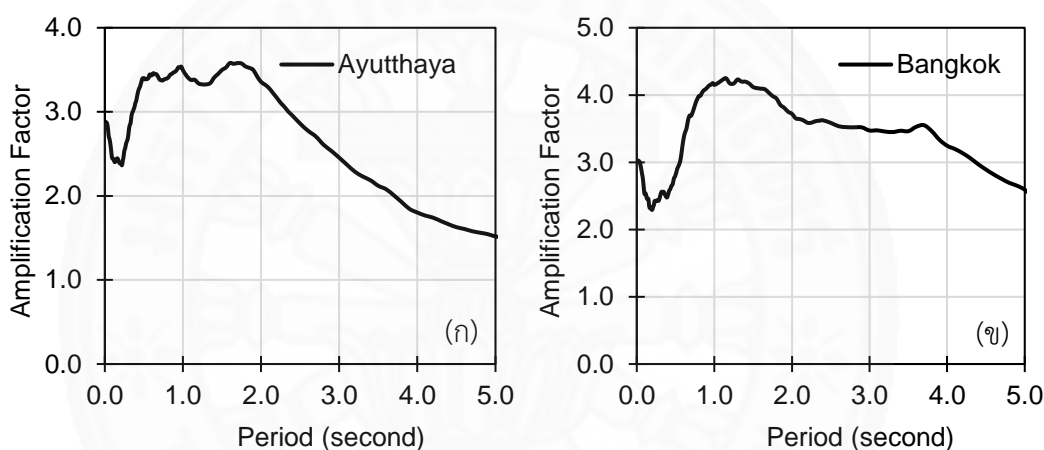
พื้นที่จังหวัดนครปฐม และจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีอัตราการกระจายคลื่นโดยเฉลี่ยประมาณ 3.5 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 0.5 - 1.0 วินาที นอกจากนี้ยังมีค่าอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 3 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 2.0 - 3.0 วินาที สำหรับจังหวัดนครปฐม สำหรับจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 3.5 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 1.7 วินาที

พื้นที่จังหวัดปทุมธานี และจังหวัดกรุงเทพมหานคร มีอัตราการกระจายคลื่นโดยเฉลี่ยประมาณ 4.2 เท่า ที่คาบการสั่นประมาณ 1.0 - 2.0 วินาที จากนั้นอัตราการกระจายคลื่นมีค่าลดลงสำหรับจังหวัดปทุมธานี ในขณะที่อัตราการกระจายคลื่นของจังหวัดกรุงเทพมหานครมีค่าลดลงช้ากว่า โดยมีค่าประมาณ 3.5 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 3.7 วินาที

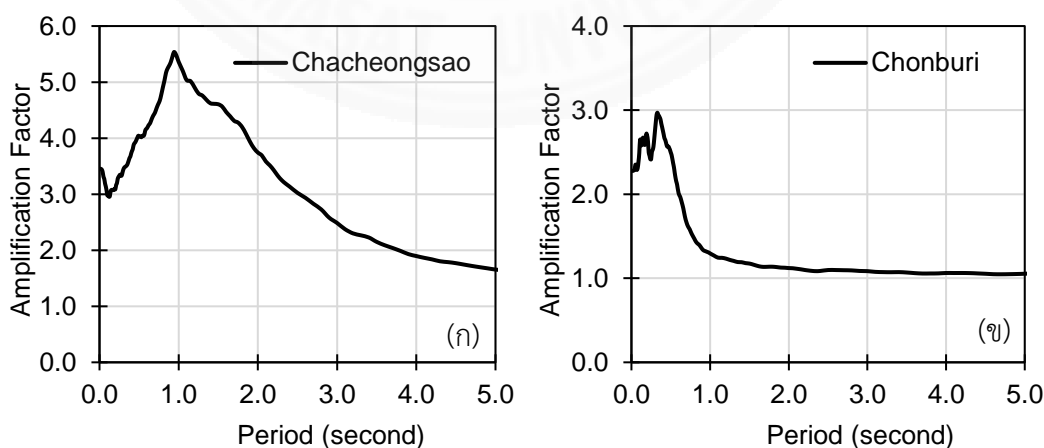
พื้นที่จังหวัดนนทบุรี มีอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 5 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 0.7 วินาที จากนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่จังหวัดสมุทรสาคร มีอัตราการกระจายคลื่นประมาณ 5 เท่าเช่นเดียวกัน แต่อยู่ในค่าคาบการสั่นประมาณ 1.0 - 1.5 วินาที และมีค่าลดลงช้ากว่าจังหวัดนนทบุรี โดยมีค่าประมาณ 3 เท่า ตั้งแต่คาบการสั่นประมาณ 3.0 วินาทีเป็นต้นไป

พื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี ฉะเชิงเทรา และสมุทรสงคราม มีอัตรากำลังขยายคลื่นประมาณ 5.5 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 1.0 วินาที จากนั้นอัตรากำลังขยายคลื่นมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ยกเว้นจังหวัดปราจีนบุรีที่มีค่าอัตรากำลังขยายคลื่นลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าประมาณ 2 เท่าที่ตำแหน่งคาบการสั่นประมาณ 2.0 วินาที ในขณะที่จังหวัดฉะเชิงเทรา และสมุทรสงครามมีค่าประมาณ 3.6 เท่า

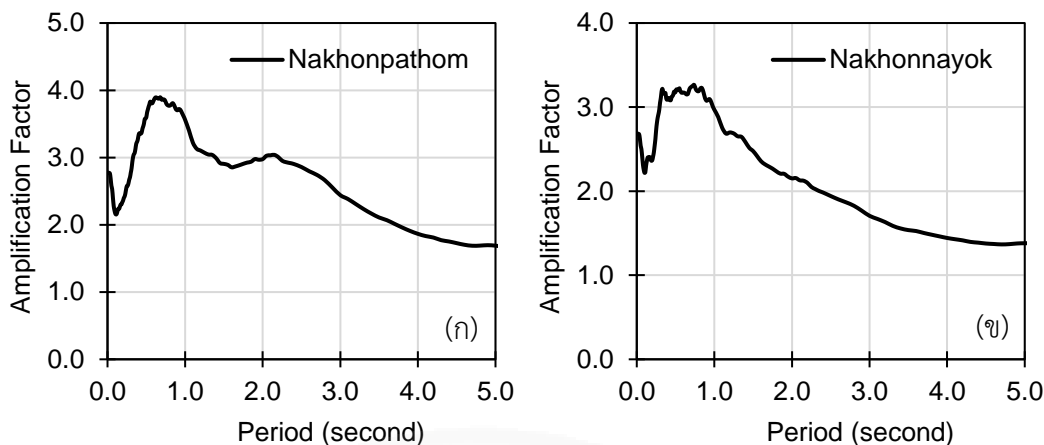
พื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ มีอัตรากำลังขยายคลื่นประมาณ 5.5 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 1.2 วินาที หลังจากนั้นมีการลดลงถึงประมาณ 4 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 2.0 วินาที นอกจากนี้ ค่าอัตรากำลังขยายคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าสูงประมาณ 4 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 3.0 - 4.0 วินาที



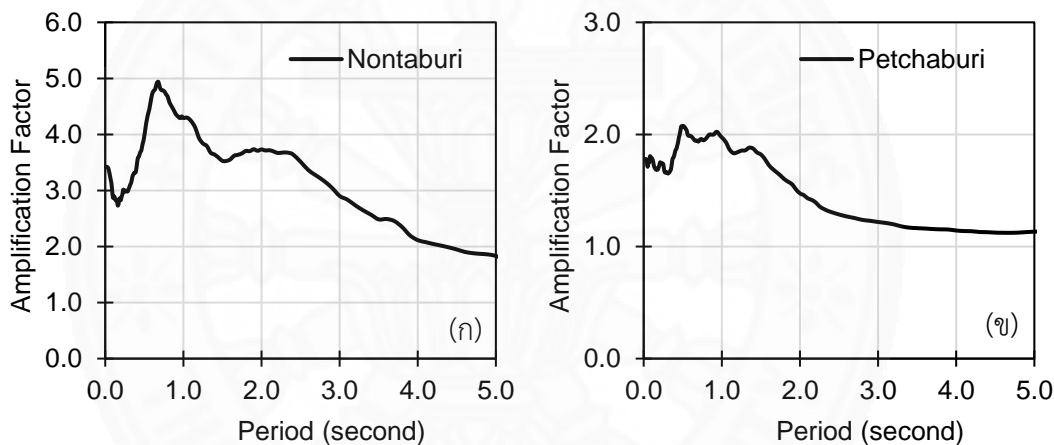
ภาพที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข) จังหวัดกรุงเทพมหานคร



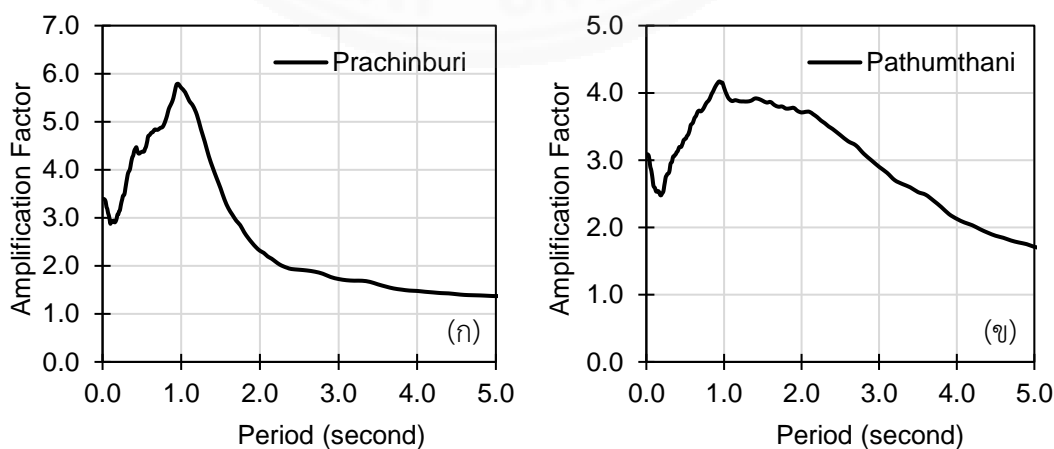
ภาพที่ 4.20 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดฉะเชิงเทรา (ข) จังหวัดชลบุรี



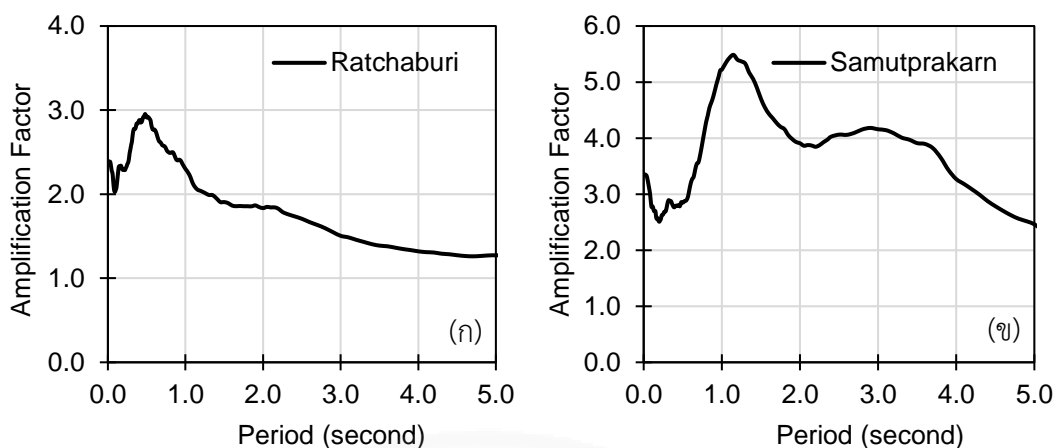
ภาพที่ 4.21 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดนครปฐม (ข) จังหวัดนครนายก



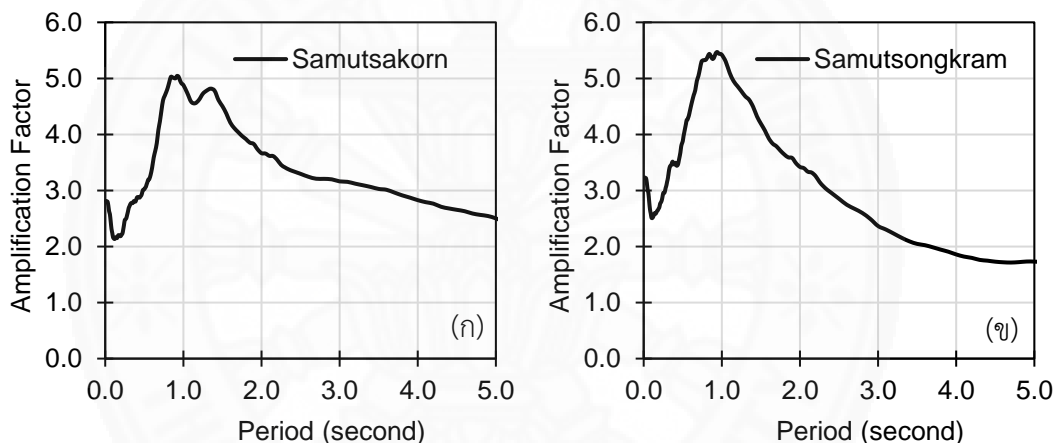
ภาพที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดนนทบุรี (ข) จังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 4.23 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดปราจีนบุรี (ข) จังหวัดปทุมธานี



ภาพที่ 4.24 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดราชบุรี (ข) จังหวัดสมุทรปราการ



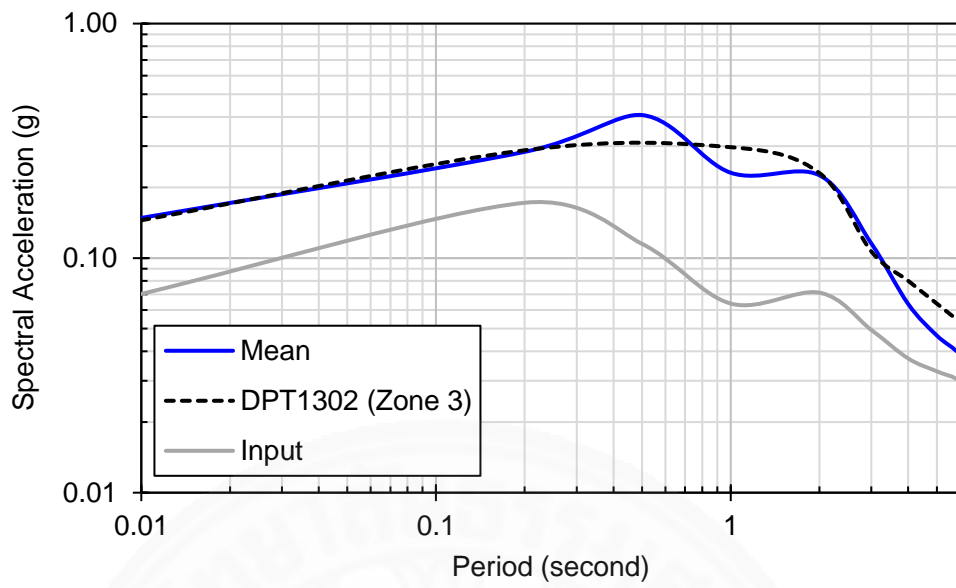
ภาพที่ 4.25 ค่าเฉลี่ยอัตรากำลังขยายคลื่น (ก) จังหวัดสมุทรสาคร (ข) จังหวัดสมุทรสงคราม

4.4.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

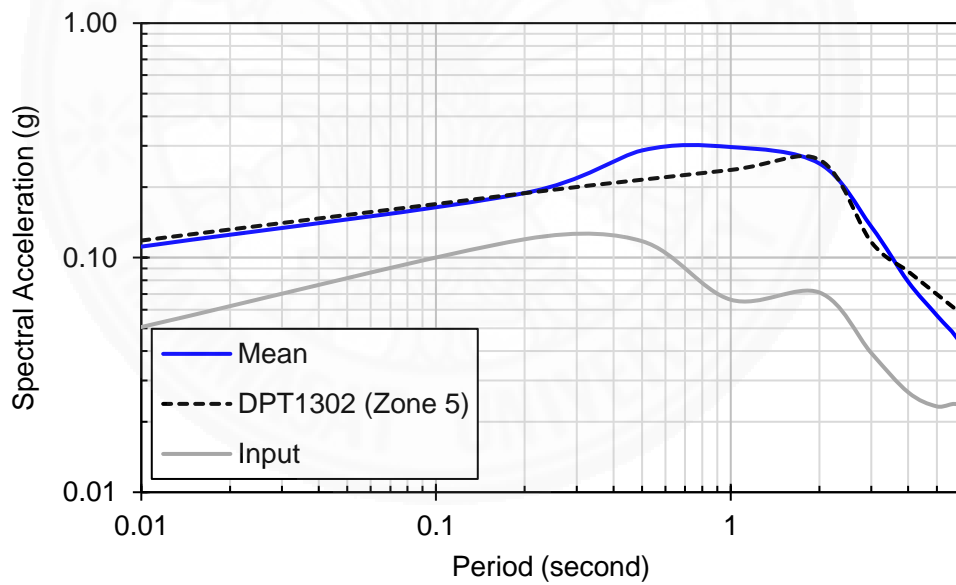
ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดินภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหว เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้สำหรับคำนวณแรงที่กระทำต่ออาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 40 ชุดต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน 1 ตำแหน่ง โดยแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มตามค่าคาบการสั่น ประกอบด้วย 0.2 วินาที, 0.5 วินาที, 1.0 วินาที, 2.0 วินาที, และ 3.0 วินาที โดยแต่ละคาบการสั่นประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 8 คลื่น ซึ่งมาจากคลื่นแผ่นดินไหวในทิศทางแกนราบจำนวน 2 ทิศทางจาก 4 สถานีตรวจวัด แต่ละคลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกมาจะต้องมีคุณสมบัติตามที่กำหนดเพื่อให้สอดคล้องกับ Conditional Mean Spectrum (CMS) ในแต่ละคาบการสั่นของพื้นที่นั้น ๆ โดยมีคาบการเกิดซ้ำที่ 2,475 ปี (รายละเอียด

สามารถดูได้ในหัวข้อที่ 3.16.1) โดยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่ได้เข้าไปยังชั้นล่างสุดของแบบจำลองชั้นดิน จากนั้นวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายคลื่นแผ่นดินไหวจากชั้นล่างสุดขึ้นมาบนผิวดินผ่านแบบจำลองชั้นดิน และทำการวิเคราะห์หาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, S_a) โดยกำหนดความหน่วงเท่ากับ 5% จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์แต่ละชุดของคาบการสั่นและนำมารวมกันเพื่อสร้างเส้น Envelope ซึ่งถือว่าเป็นค่า S_a ที่มีโอกาสเป็นไปได้สูงสุดสำหรับใช้เป็นตัวแทนประจำตำแหน่งการศึกษานั้น ๆ ขึ้นตอนถัดมาคือการหาค่าเฉลี่ยจากเส้น Envelope จากทุกตำแหน่งการศึกษาในจังหวัดนั้น ๆ เพื่อสร้างเป็นตัวแทนของแต่ละจังหวัด จากนั้นทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของ S_a ที่ได้จากการศึกษานี้กับมาตรฐานออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52) ในพื้นที่เดียวกัน ซึ่งการเปรียบเทียบนี้เป็นการเปรียบเทียบค่า S_a ที่มีค่าคาบการเกิดซ้ำ 2,475 ปี แสดงดังภาพที่ 4.26 – 4.39 สำหรับจังหวัดพระนครศรีอยุธยา, กรุงเทพมหานคร, ฉะเชิงเทรา, ชลบุรี, นครปฐม, นครนายก, นนทบุรี, เพชรบุรี, ปราจีนบุรี, ปทุมธานี, ราชบุรี, สมุทรปราการ, สมุทรสาคร, และสมุทรสงคราม ตามลำดับ โดยที่เส้นทึบสีเทาแสดงถึงค่า S_a ที่ใช้ป้อนเข้าสู่ชั้นดินของแบบจำลองชั้นดิน ส่วนเส้นทึบสีน้ำเงินแสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่า S_a ที่คำนวณจากทุกตำแหน่งการศึกษาในจังหวัดนั้น ๆ สำหรับเส้นประสีดำ และสีเขียว แสดงถึงค่า S_a ในพื้นที่เดียวกันที่อยู่ในมาตรฐานออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52)

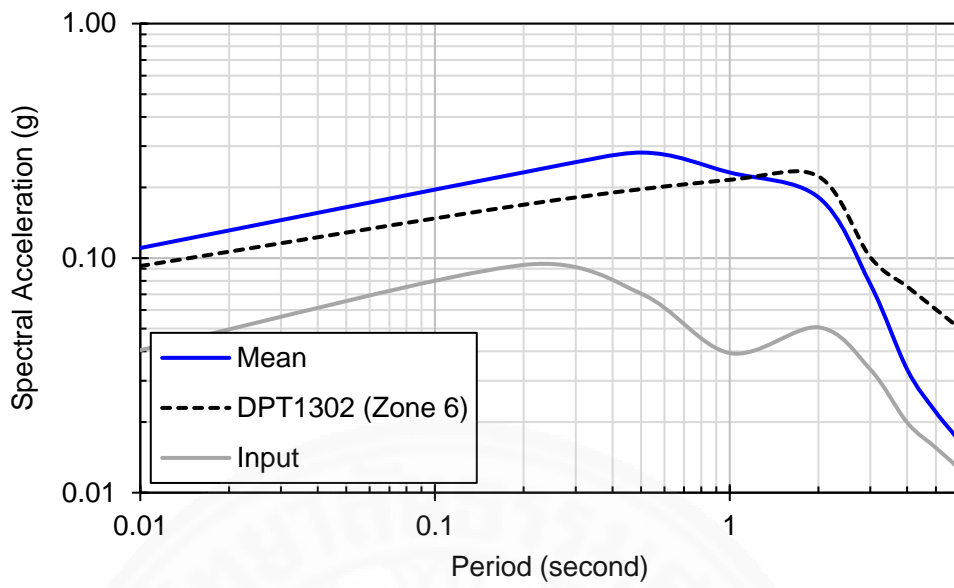
จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับมาตรฐานออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52) พบว่า S_a ที่ผิวดินมีค่าสอดคล้องกันในบางช่วงของคาบการสั่น และมีบางช่วงคาบการสั่นที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองมีจำนวนมากขึ้น รวมถึงข้อมูลแบบจำลองชั้นดินที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงทำให้ค่า S_a มีการปรับปรุงไปจากเดิมในมาตรฐานออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52)



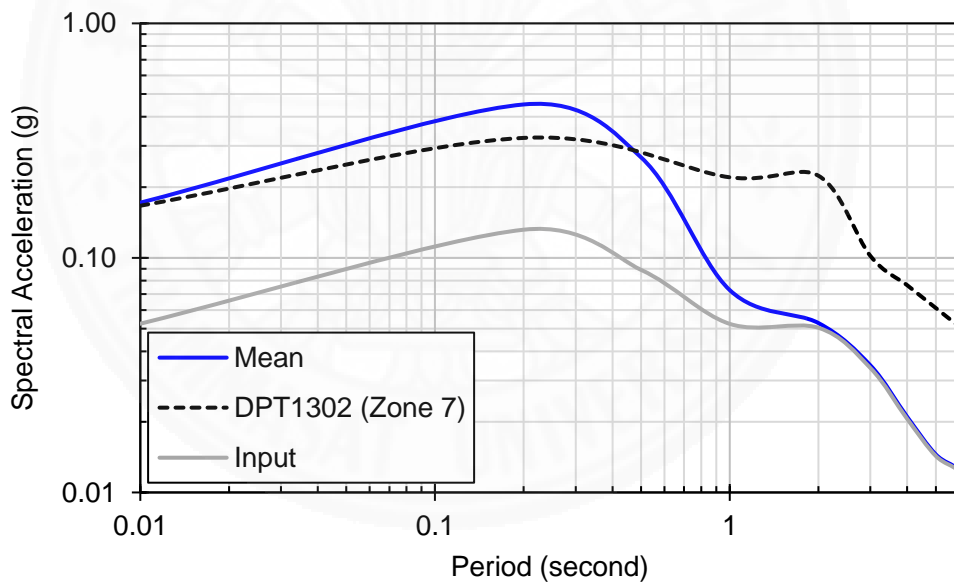
ภาพที่ 4.26 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดพระนครศรีอยุธยา



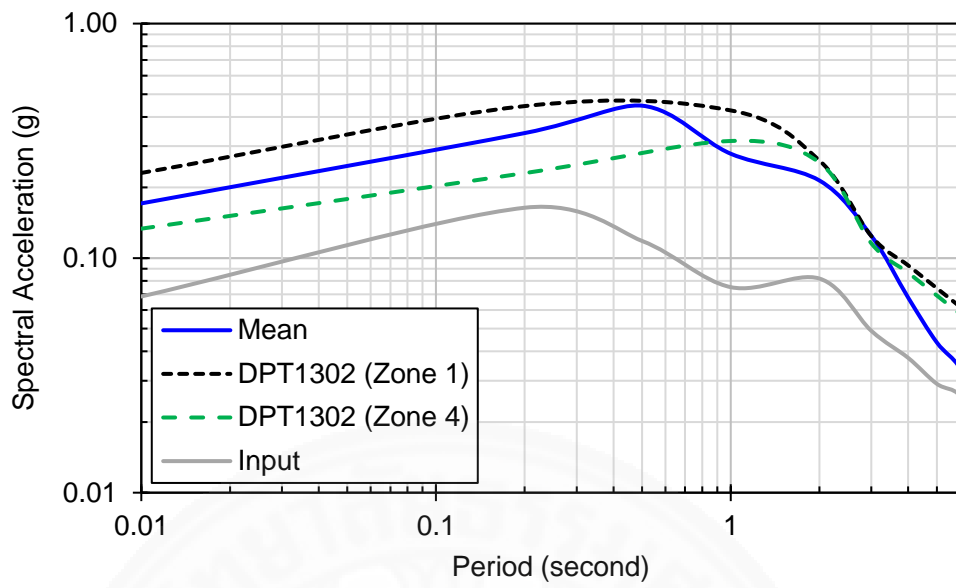
ภาพที่ 4.27 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดกรุงเทพมหานคร



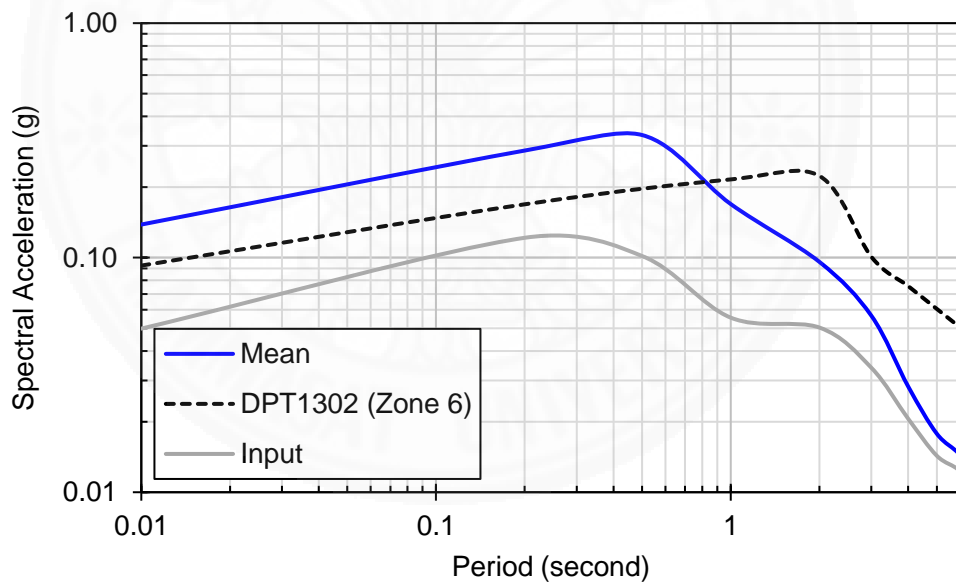
ภาพที่ 4.28 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดเชียงใหม่



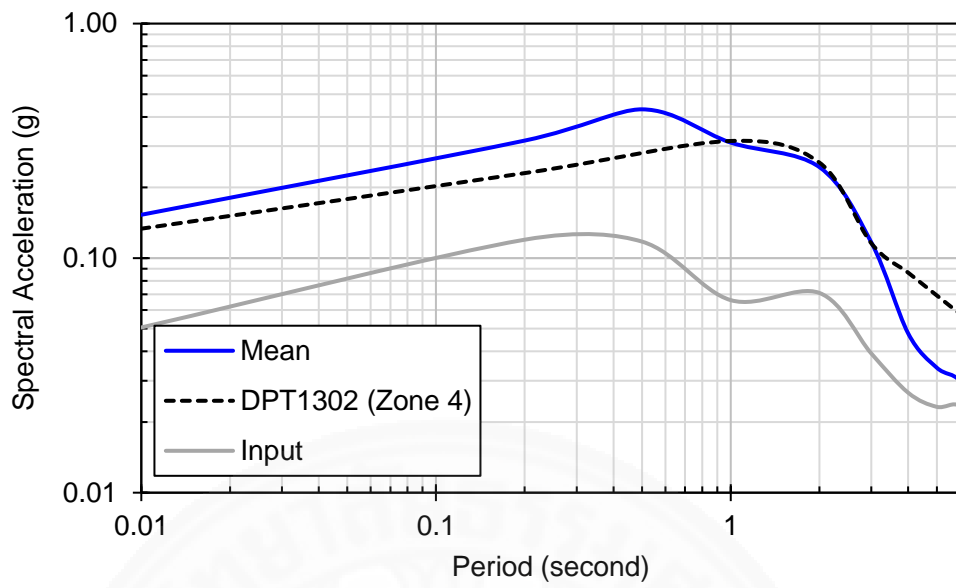
ภาพที่ 4.29 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดชลบุรี



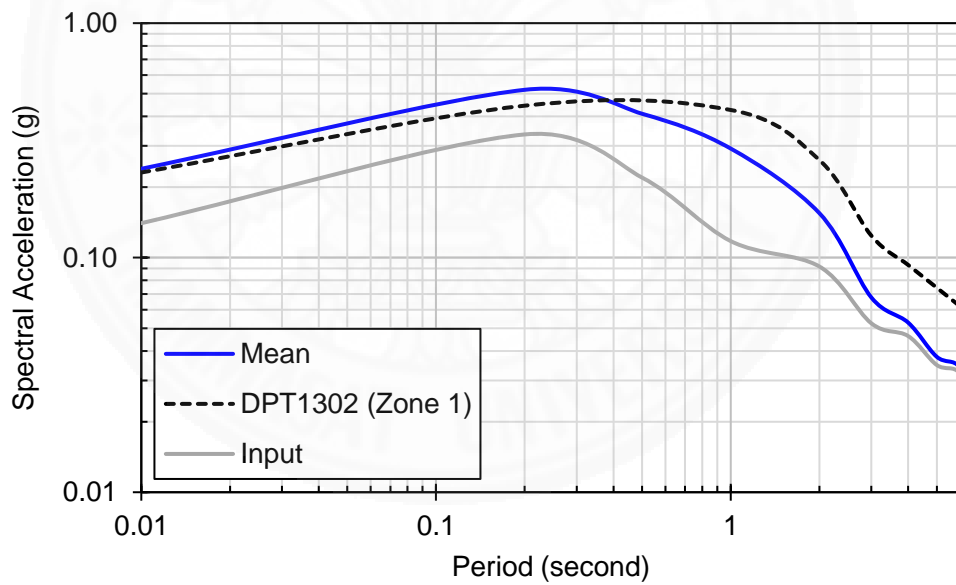
ภาพที่ 4.30 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดนครปฐม



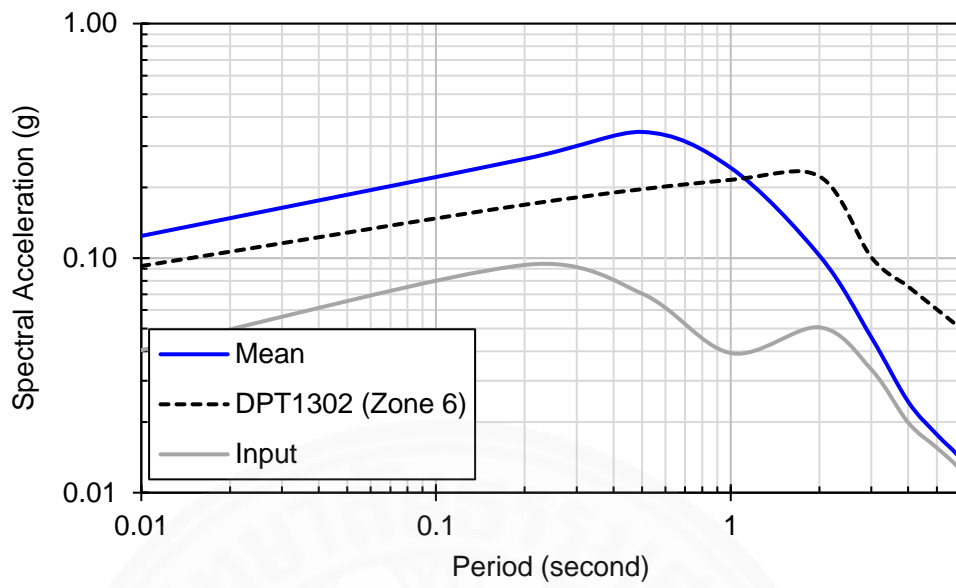
ภาพที่ 4.31 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดนครนายก



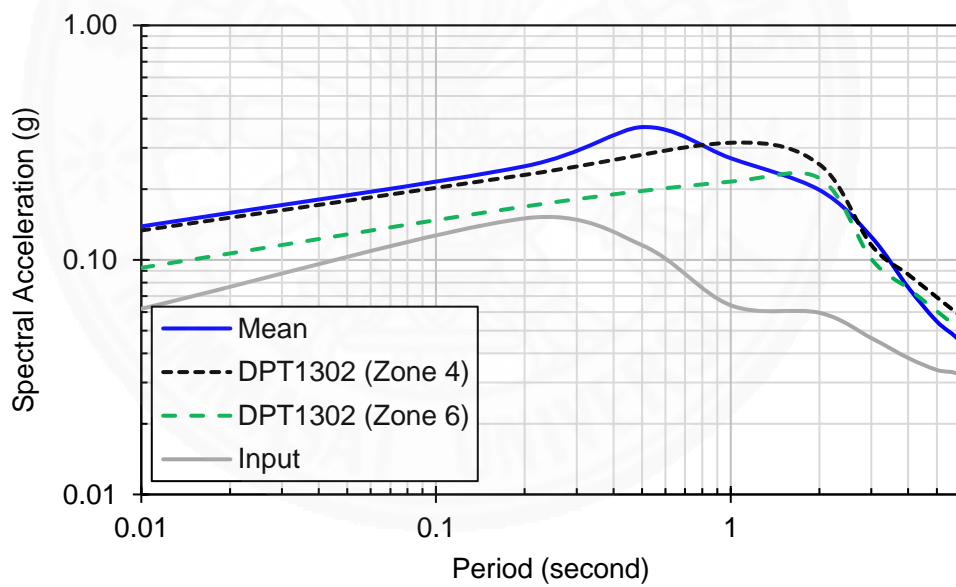
ภาพที่ 4.32 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดนนทบุรี



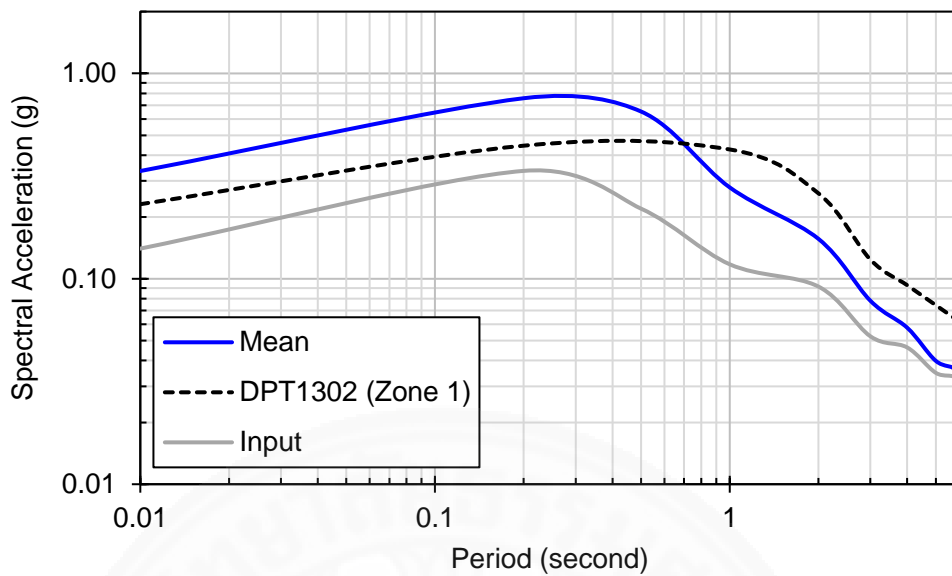
ภาพที่ 4.33 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดเพชรบุรี



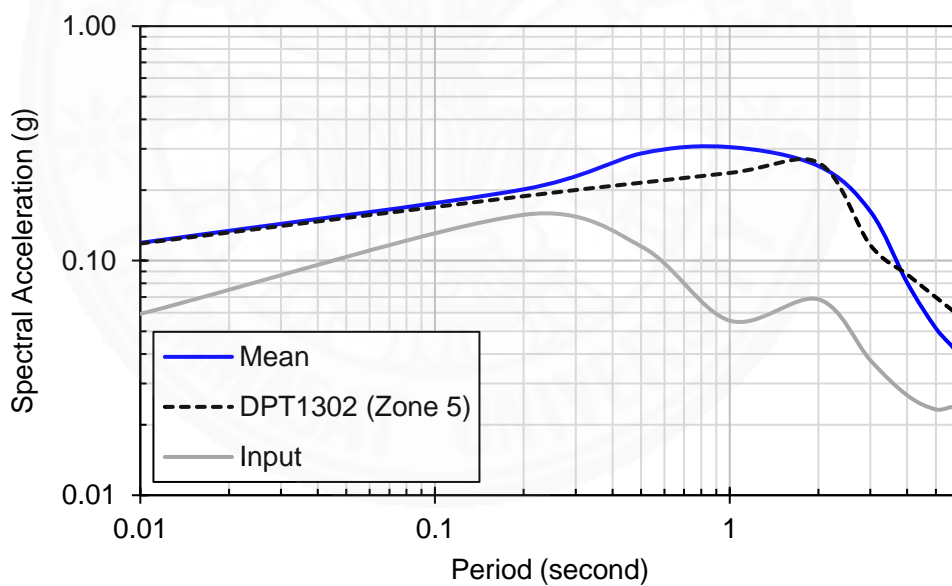
ภาพที่ 4.34 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดปราจีนบุรี



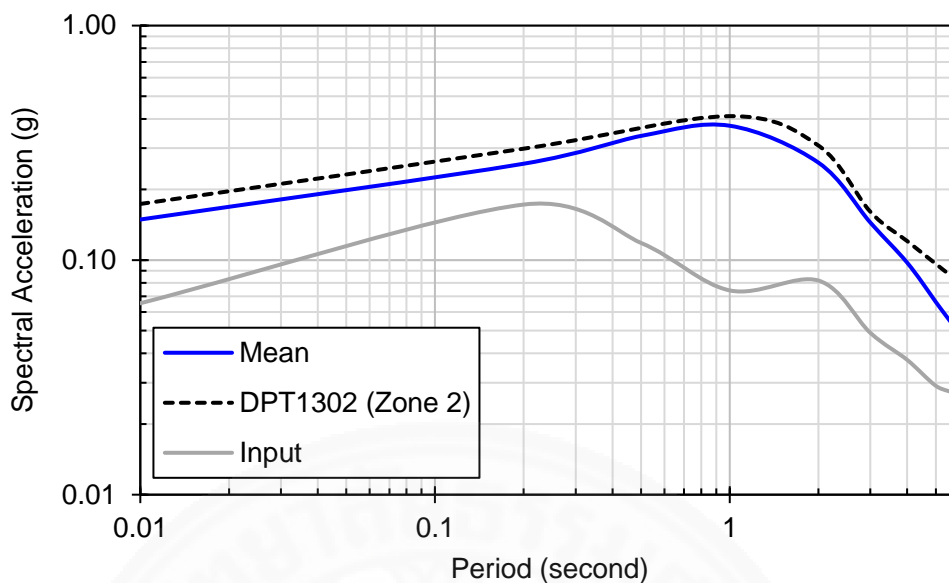
ภาพที่ 4.35 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดปทุมธานี



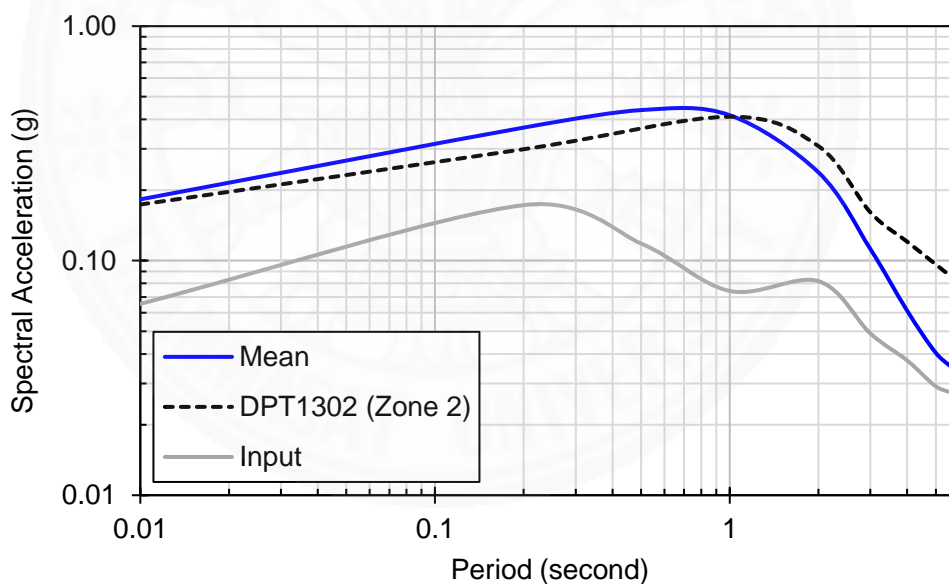
ภาพที่ 4.36 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดราชบุรี



ภาพที่ 4.37 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดสมุทรปราการ



ภาพที่ 4.38 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดสมุทรสาคร



ภาพที่ 4.39 Spectral Acceleration สำหรับจังหวัดสมุทรสงคราม

4.4.4 การกำหนดค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบในพื้นที่ย่อย

ในการวางแผนจัดการป้องกันภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหว ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่พื้นถูกกำหนดด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น และสำหรับบริเวณเมืองสำคัญที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว เช่น ในเขตกรุงเทพมหานครและพื้นที่

ใกล้เคียง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการพิจารณาจำแนกความเสี่ยงภัยออกเป็นเขตย่อยอย่างละเอียด เพื่อประเมินระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นและพฤติกรรมของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวอย่างถูกต้องที่สุด ซึ่งการดำเนินการดังกล่าว คือ การแบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบแบ่งโซนย่อย (Seismic Microzonation) หมายถึง การแบ่งพื้นที่ที่ศึกษาออกเป็นเขตย่อยตามความแตกต่างของความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น เพื่อกำหนดลักษณะของแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมและการวางแผนการจัดการความเสี่ยงของการใช้พื้นที่ โดยมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับเมืองใหญ่ ผลจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินและการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของชั้นดินสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ จะถูกนำมาสร้างเป็นแผนที่ที่แสดงถึงระดับความรุนแรงและลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งเรียกว่า แผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวแบบแบ่งโซนย่อย (Seismic Microzonation Map)

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_d) ทุกตำแหน่งจำนวน 170 ตำแหน่ง ด้วยข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าคาบการเกิดซ้ำ 2,475 ปี ถูกนำมาคูณกับ 2/3 เพื่อให้กลายเป็นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (Design Spectral Acceleration) ถูกนำมาพล็อตรวมกันทั้งหมดเพื่อจับกลุ่มโดยการใช้ความคล้ายคลึงกันของ S_d และความใกล้เคียงกันของพื้นที่ เพื่อแบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนย่อยสำหรับจัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวแบบแบ่งโซนย่อย (Seismic Microzonation Map) จากผลการจับกลุ่มสรุปได้ว่า พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ สามารถแบ่งเป็นโซนย่อยตามความคล้ายคลึงกันของ S_d และความใกล้เคียงกันของพื้นที่ได้เป็น 10 โซน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.40 โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

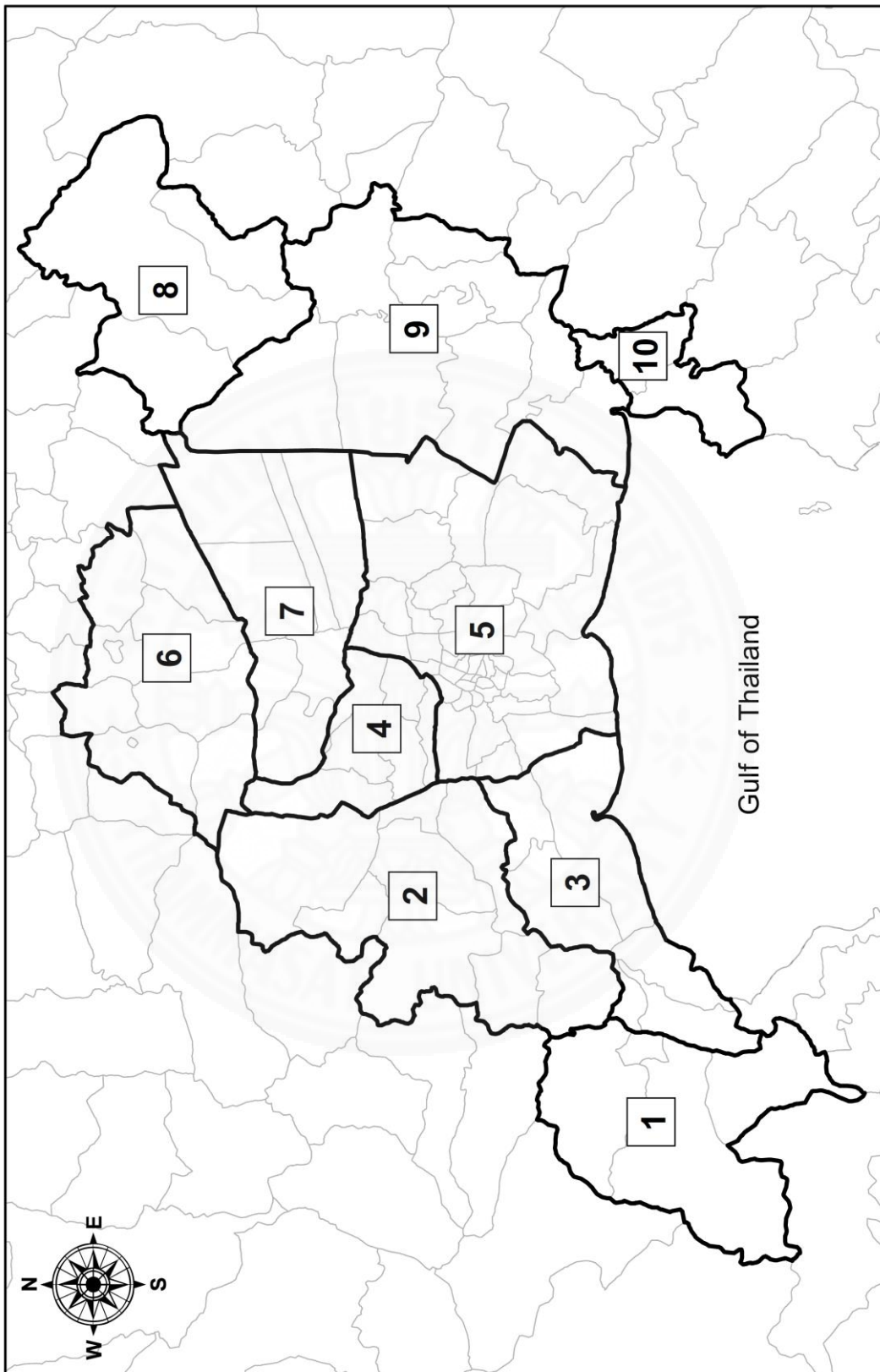
รายละเอียดพื้นที่ในแต่ละโซนย่อยจำนวน 10 โซน

โซน	พื้นที่ครอบคลุม
1	อำเภอเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี; อำเภอปากท่อ อำเภอวัดเพลง และอำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี
2	อำเภอดำเนินสะดวก, อำเภอบางแพะ จังหวัดราชบุรี; อำเภอสามพราน, อำเภอพุทธมณฑล, อำเภอนครชัยศรี, อำเภอดอนตูม, อำเภอบางเลน และอำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม
3	อำเภอกระทุ่มแบน, อำเภอบ้านแพ้ว, อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร; อำเภอบางคนที, อำเภออัมพวา และอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม
4	อำเภอบางกรวย, อำเภอบางบัวทอง, อำเภอบางใหญ่, อำเภอปากเกร็ด, อำเภอเมืองนนทบุรี และอำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี

ตารางที่ 4.2

รายละเอียดพื้นที่ในแต่ละโซนย่อยจำนวน 10 โซน (ต่อ)

โซน	พื้นที่ครอบคลุม
5	เขตคลองเตย, เขตคลองสาน, เขตคลองสามวา, เขตคันนายาว, เขตจตุจักร, เขตจอมทอง, เขตดอนเมือง, เขตดินแดง, เขตดุสิต, เขตตลิ่งชัน, เขตทวีวัฒนา, เขตทุ่งครุ, เขตธนบุรี, เขตบางกอกน้อย, เขตบางกอกใหญ่, เขตบางกะปิ, เขตบางขุนเทียน, เขตบางเขน, เขตบางคอแหลม, เขตบางแค, เขตบางซื่อ, เขตบางนา, เขตบางบอน, เขตบางพลัด, เขตบางรัก, เขตบึงกุ่ม, เขตปทุมวัน, เขตประเวศ, เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย, เขตพญาไท, เขตพระโขนง, เขตพระนคร, เขตภาษีเจริญ, เขตมีนบุรี, เขตยานนาวา, เขตราชเทวี, เขตราชบุรีบูรณะ, เขตลาดกระบัง, เขตลาดพร้าว, เขตวังทองหลาง, เขตวัฒนา, เขตสวนหลวง, เขตสะพานสูง, เขตสัมพันธวงศ์, เขตสาทร, เขตสายไหม, เขตหนองแขม, เขตหนองจอก, เขตหลักสี่, เขตห้วยขวาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร; กิ่งอำเภอบางเสาธง, อำเภอบางบ่อ, อำเภอบางพลี, อำเภอพระประแดง, อำเภอพระสมุทรเจดีย์ และอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ
6	อำเภอลาดบัวหลวง, อำเภอบางไทร, อำเภอบางปะอิน, อำเภอวังน้อย, อำเภอเสนา, อำเภออุทัย, อำเภอท่าเรือ, อำเภอบางบาล และอำเภอเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
7	อำเภอลองหลวง, อำเภอชัยบุรี, อำเภอเมืองปทุมธานี, อำเภอลาดหลุมแก้ว, อำเภอลำลูกกา, อำเภอสามโคก และอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี
8	อำเภอบางนา, อำเภอปากพลี และอำเภอเมือง จังหวัดนครนายก
9	อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก อำเภอบ้านสร้าง จังหวัดปราจีนบุรี; อำเภอบางน้ำเปรี้ยว, อำเภอบางคล้า, อำเภอราชสาสน์, อำเภอลองเชื่อน, อำเภอบ้านโพธิ์, อำเภอบางปะกง และอำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา
10	อำเภอพานทอง และอำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี



ภาพที่ 4.40 แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวแบบแบ่งเขตย่อยจำนวน 10 โซน

ตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นต่าง ๆ ของโซนย่อยทั้ง 10 โซน โดยความหน่วงเท่ากับ 2.5% ใช้สำหรับการออกแบบอาคารสูง และความหน่วงเท่ากับ 5.0% สำหรับการออกแบบอาคารทั่วไป ตามลำดับ ส่วนกราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบของโซน 1-10 แสดงดังภาพที่ 4.41-4.50 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับความหน่วง 2.5%

คาบ (วินาที)	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (S_a, g)									
	โซน 1	โซน 2	โซน 3	โซน 4	โซน 5	โซน 6	โซน 7	โซน 8	โซน 9	โซน 10
PGA	0.2077	0.1360	0.1114	0.1021	0.0755	0.0989	0.0927	0.0846	0.0800	0.1147
0.2	0.6542	0.3181	0.2655	0.2599	0.1481	0.2263	0.2001	0.2358	0.2054	0.3826
0.5	0.4515	0.4387	0.3204	0.3300	0.2197	0.3404	0.2914	0.2095	0.2688	0.2252
1	0.2331	0.2487	0.3534	0.2635	0.2498	0.1976	0.2311	0.0972	0.1939	0.0592
2	0.1100	0.1956	0.2170	0.2177	0.2233	0.2066	0.1774	0.0550	0.1444	0.0473
3	0.0527	0.1083	0.1089	0.1005	0.1262	0.0926	0.1032	0.0327	0.0611	0.0307
4	0.0420	0.0578	0.0638	0.0388	0.0666	0.0527	0.0639	0.0178	0.0256	0.0171
5	0.0313	0.0377	0.0442	0.0287	0.0470	0.0397	0.0459	0.0122	0.0172	0.0119
6	0.0290	0.0303	0.0336	0.0266	0.0378	0.0345	0.0402	0.0107	0.0131	0.0105
7	0.0178	0.0182	0.0196	0.0175	0.0231	0.0257	0.0283	0.0080	0.0092	0.0079
8	0.0143	0.0152	0.0160	0.0143	0.0179	0.0198	0.0225	0.0069	0.0073	0.0068
9	0.0123	0.0124	0.0130	0.0092	0.0113	0.0125	0.0138	0.0063	0.0066	0.0062
10	0.0121	0.0121	0.0123	0.0078	0.0092	0.0108	0.0115	0.0064	0.0066	0.0064

ตารางที่ 4.4

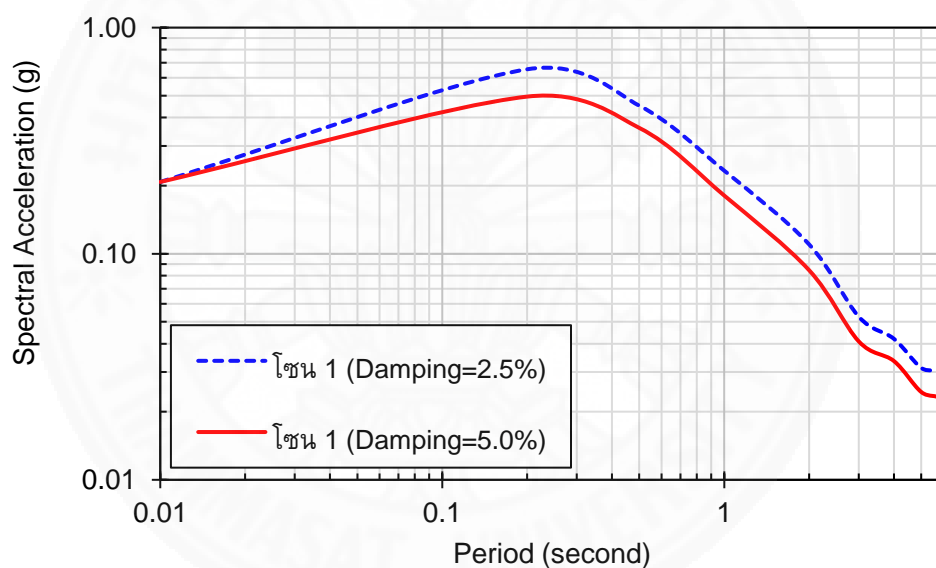
ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับความหน่วง 5.0%

คาบ (วินาที)	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (S_a, g)									
	โซน 1	โซน 2	โซน 3	โซน 4	โซน 5	โซน 6	โซน 7	โซน 8	โซน 9	โซน 10
PGA	0.2077	0.1360	0.1114	0.1021	0.0755	0.0989	0.0926	0.0846	0.0800	0.1147
0.2	0.4954	0.2570	0.2119	0.2114	0.1277	0.1893	0.1672	0.1890	0.1652	0.3007
0.5	0.3600	0.3523	0.2617	0.2873	0.1911	0.2716	0.2455	0.1617	0.2136	0.1789
1	0.1809	0.1926	0.2648	0.2073	0.1989	0.1542	0.1809	0.0748	0.1565	0.0486
2	0.0846	0.1511	0.1655	0.1628	0.1682	0.1503	0.1324	0.0409	0.1069	0.0352
3	0.0410	0.0837	0.0847	0.0777	0.0944	0.0770	0.0835	0.0247	0.0483	0.0232

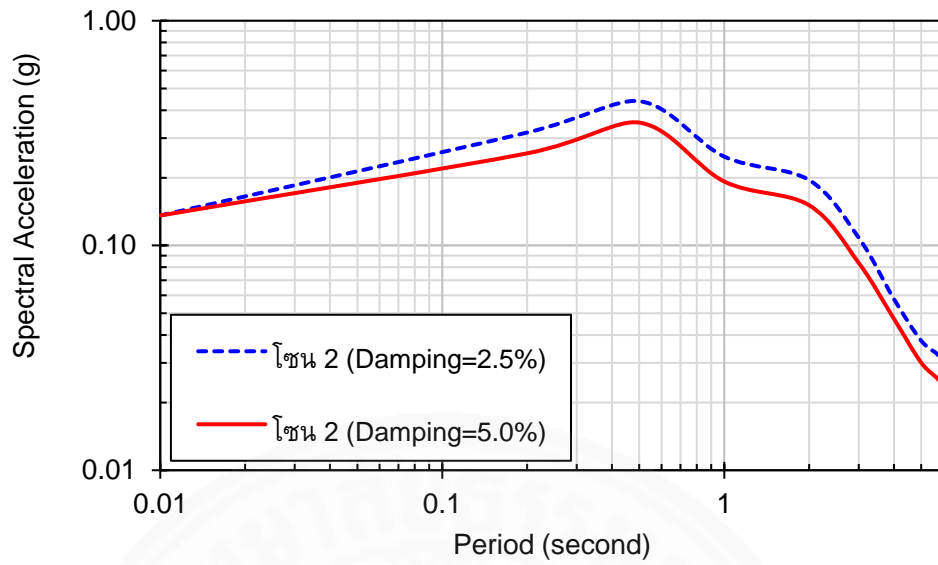
ตารางที่ 4.4

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับความหน่วง 5.0% (ต่อ)

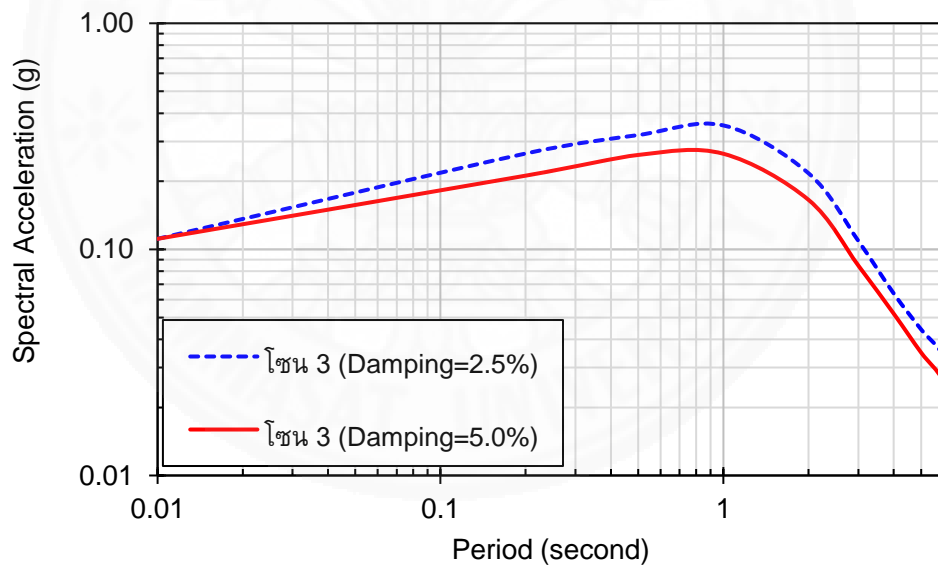
คาบ (วินาที)	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (S_a, g)									
	โซน 1	โซน 2	โซน 3	โซน 4	โซน 5	โซน 6	โซน 7	โซน 8	โซน 9	โซน 10
4	0.0335	0.0472	0.0520	0.0318	0.0529	0.0425	0.0509	0.0146	0.0216	0.0140
5	0.0245	0.0301	0.0349	0.0227	0.0371	0.0312	0.0365	0.0099	0.0141	0.0097
6	0.0222	0.0236	0.0262	0.0199	0.0282	0.0258	0.0299	0.0084	0.0107	0.0083
7	0.0142	0.0150	0.0160	0.0134	0.0177	0.0193	0.0214	0.0064	0.0076	0.0063
8	0.0114	0.0124	0.0131	0.0112	0.0140	0.0153	0.0174	0.0058	0.0063	0.0057
9	0.0103	0.0107	0.0112	0.0081	0.0101	0.0108	0.0121	0.0052	0.0057	0.0051
10	0.0103	0.0105	0.0106	0.0068	0.0081	0.0092	0.0099	0.0054	0.0056	0.0054



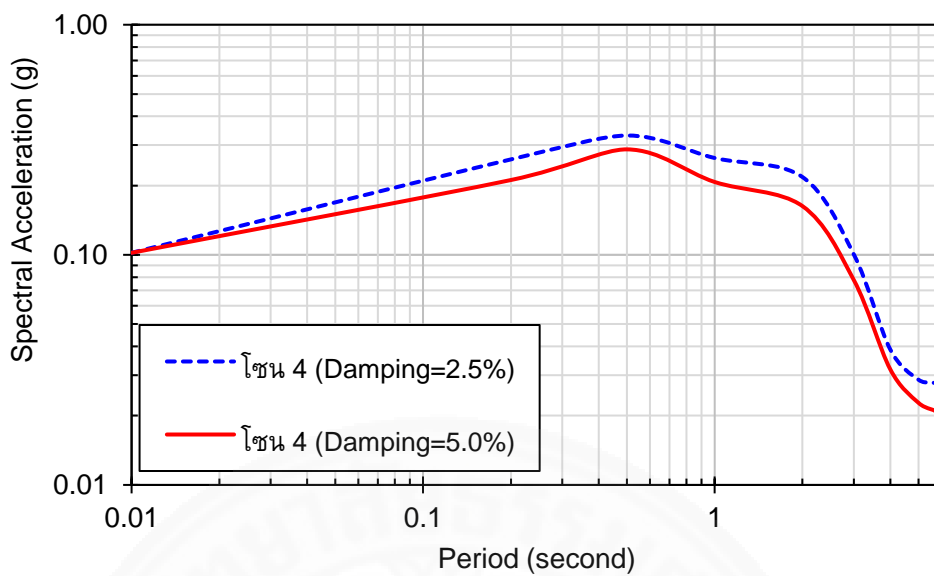
ภาพที่ 4.41 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 1



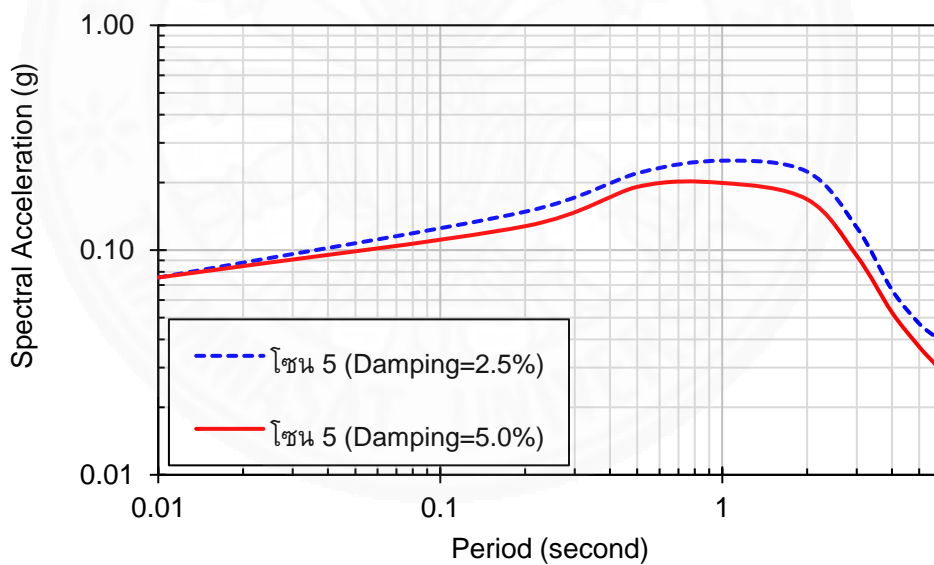
ภาพที่ 4.42 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 2



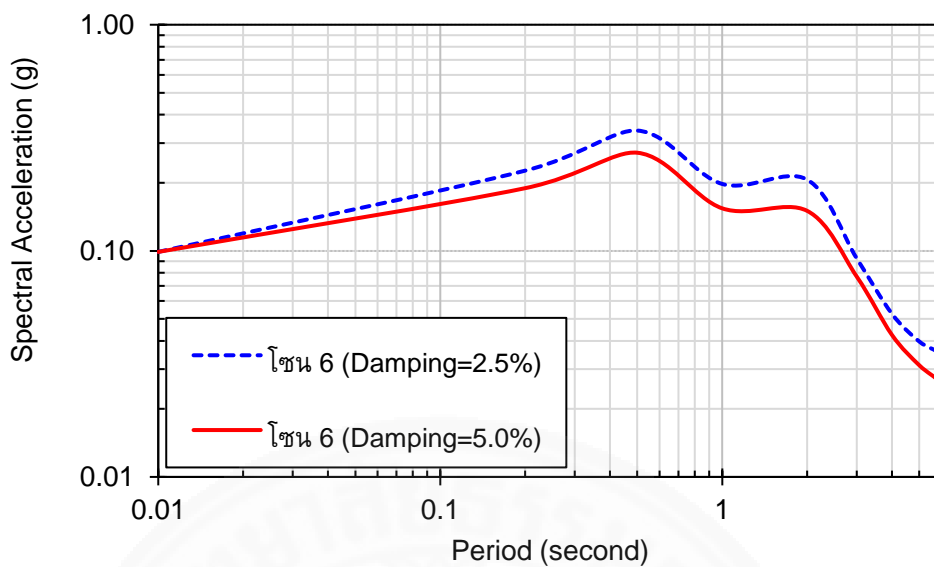
ภาพที่ 4.43 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 3



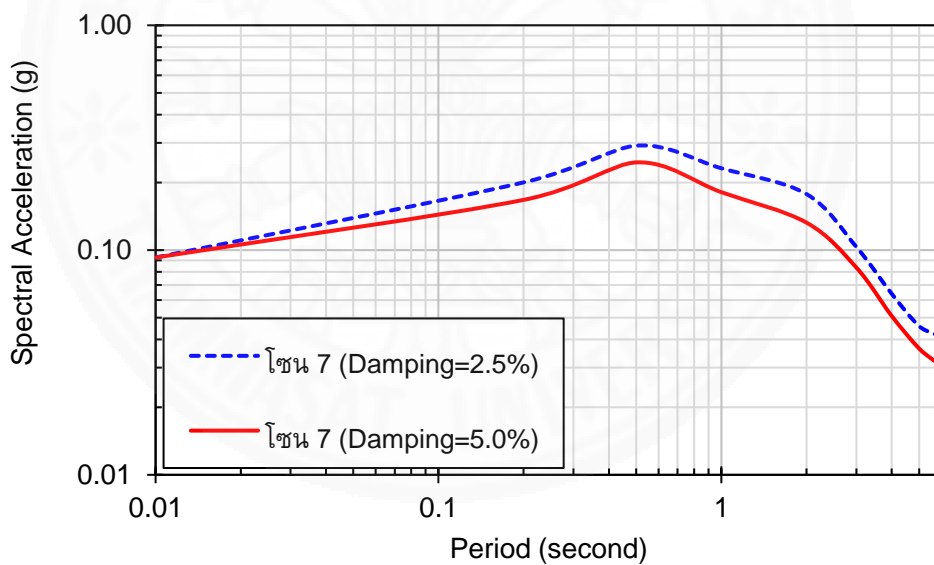
ภาพที่ 4.44 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 4



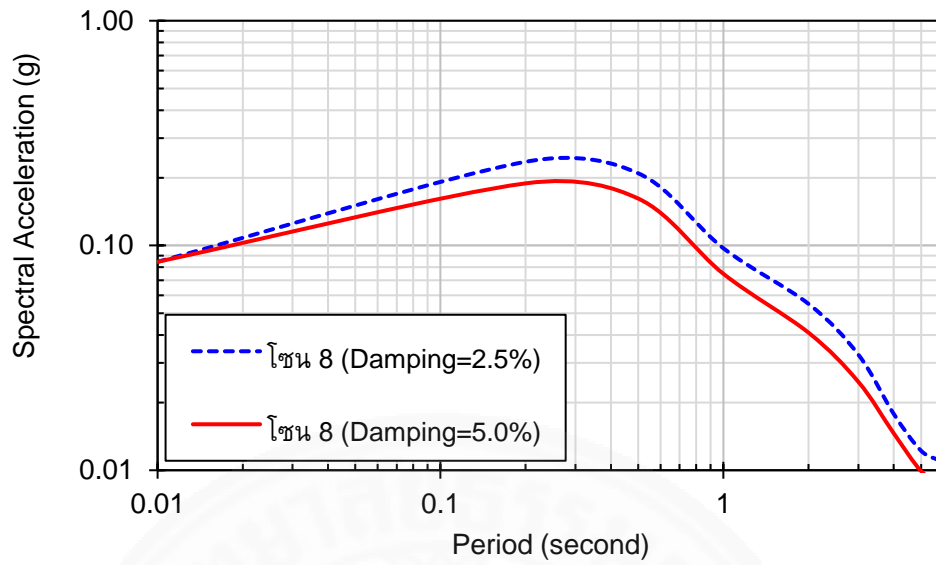
ภาพที่ 4.45 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 5



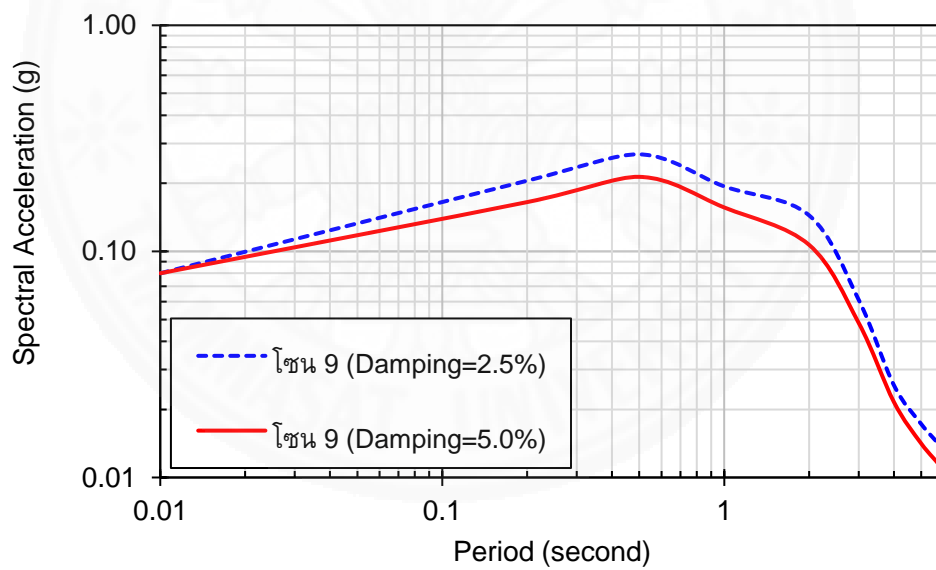
ภาพที่ 4.46 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 6



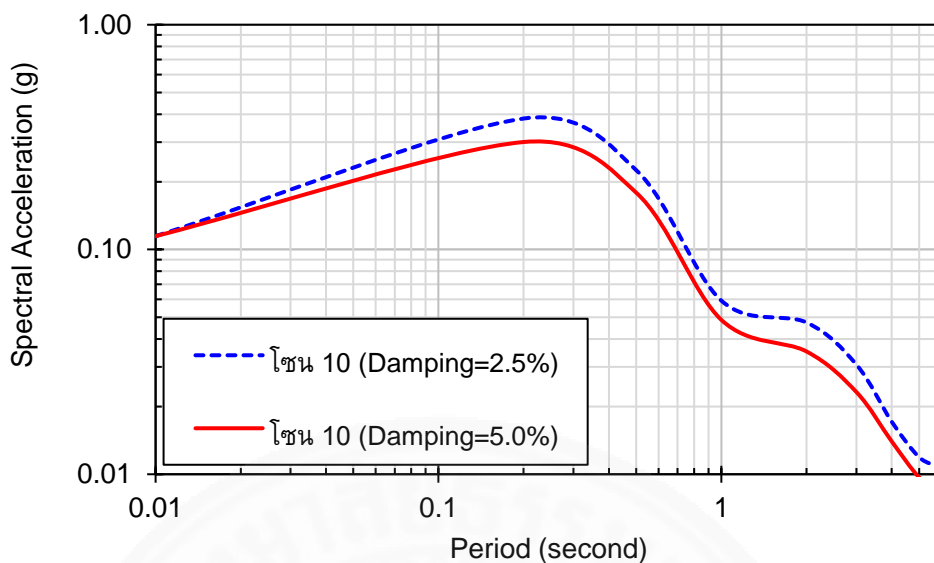
ภาพที่ 4.47 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 7



ภาพที่ 4.48 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 8



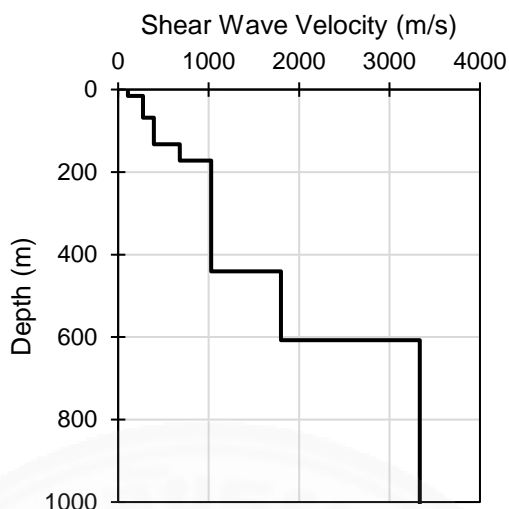
ภาพที่ 4.49 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 9



ภาพที่ 4.50 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่โซน 10

4.5 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น

วัตถุประสงค์ของการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear) และวิธีไม่เชิงเส้น (Nonlinear) คือ การเปรียบเทียบความแตกต่างของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Acceleration Response Spectrum) ที่ชั้นบนของแบบจำลองชั้นดิน ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานแรงกระทำจากแผ่นดินไหว ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ทำการนำแบบจำลองชั้นดินตัวอย่างในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีความลึกของชั้นดินประมาณ 600 เมตร แสดงดังภาพที่ 4.51 และมีรายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองดังตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.51 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน
ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 4.5

รายละเอียดแบบจำลองชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น

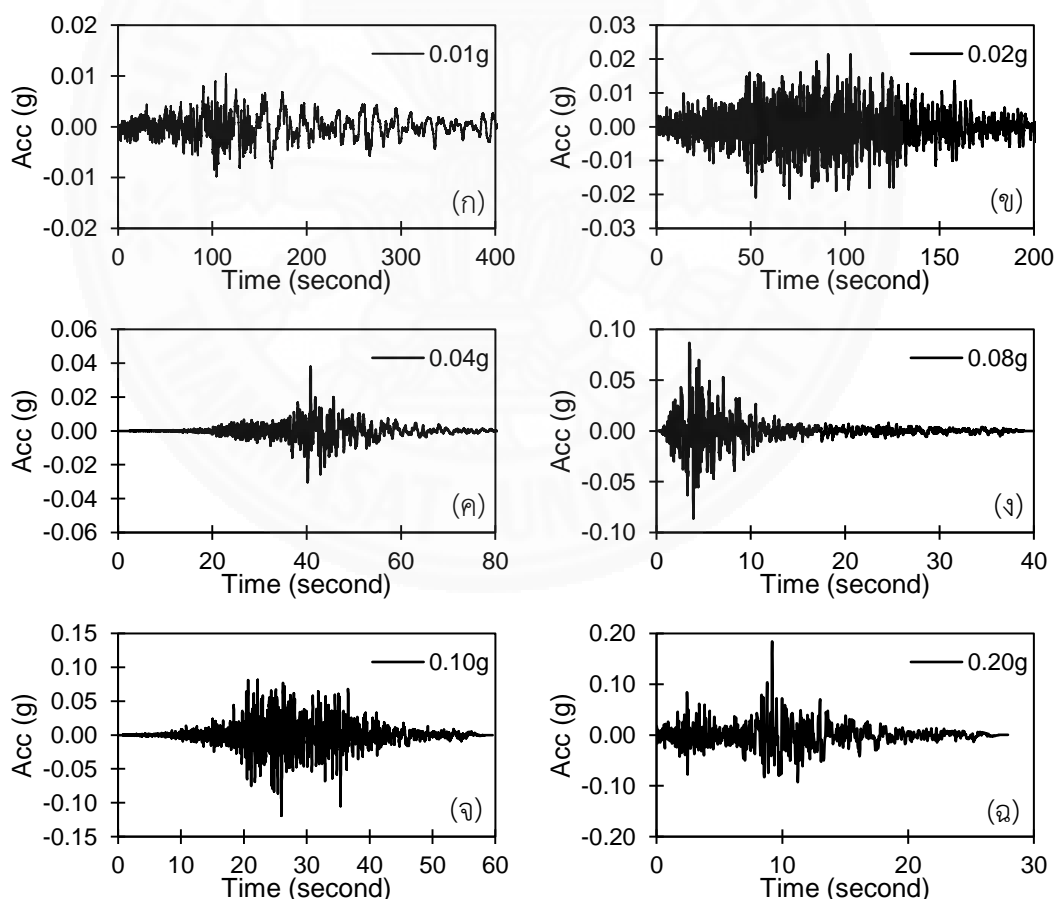
No.	Thickness (m.)	Unit Weight (kN/m ³)	Shear Wave Velocity (m/s)	Soil Properties
1	15	15	108	Clay PI=50
2	5	16	274	Sand
3	48	17	274	Clay PI=30
4	12	18	396	Sand
5	52	19	396	Clay PI=15
6	40	20	683	Sand
7	268	21	1030	Sand
8	167	22	1800	Sand

สำหรับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Soil Properties) ของชั้นดินที่เลือกใช้ในแต่ละระดับความลึก สามารถดูรายละเอียดการเลือกได้ในหัวข้อที่ 3.16 นอกจากนี้ ในการสร้างแบบจำลองชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธีไม่เชิงเส้นจำเป็นต้องกำหนดความหนาของแต่ละชั้นโดยต้องใช้ความหนาของแต่ละชั้นไม่เกินกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งจากแบบจำลองชั้นดินตัวอย่างนี้สามารถแบ่งชั้นดินได้จำนวน 103 ชั้น

$$H_{\max,i} = \frac{V_{Si}}{4f_{\max}} \quad (4.1)$$

โดยที่ $H_{\max,i}$ = ความหนามากที่สุดของชั้นดินที่ i
 V_{Si} = ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่ i
 f_{\max} = ความถี่สูงสุดที่ต้องการคำนวณได้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 25 เฮิรตซ์

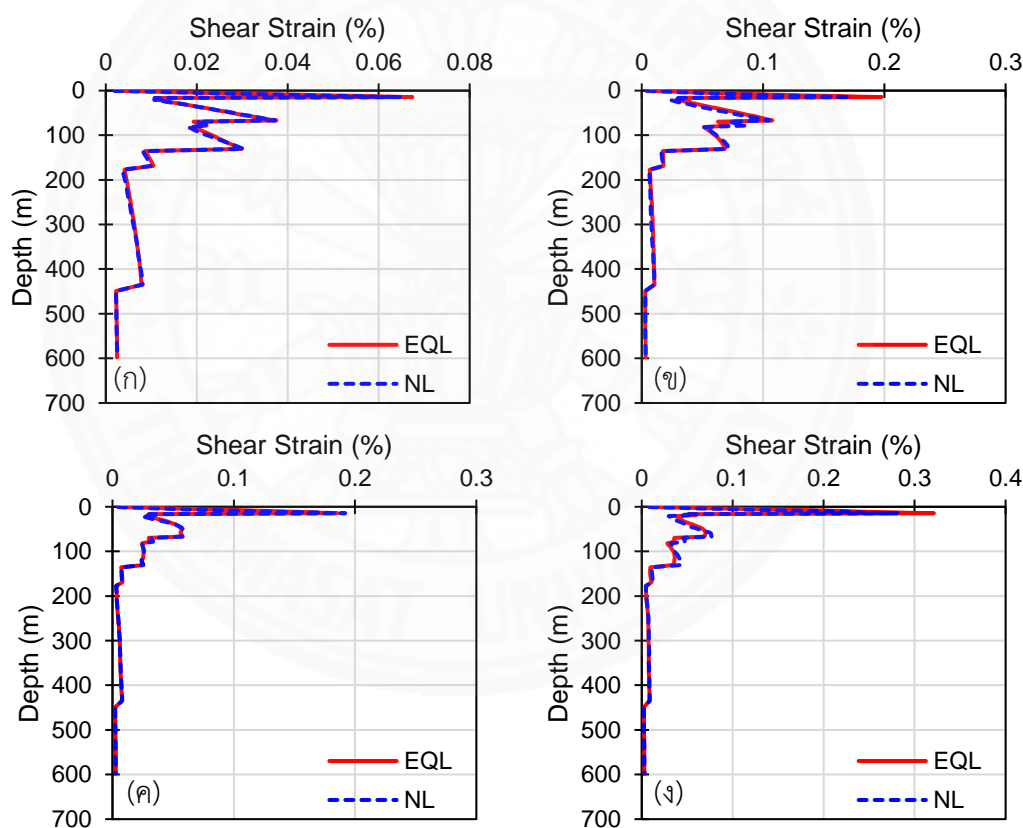
สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบนี้กำหนดให้มีขนาดความรุนแรงของคลื่นแตกต่างกัน ได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า Peak Ground Acceleration (PGA) เท่ากับ 0.01g, 0.02g, 0.04g, 0.08g, 0.10g, และ 0.20g แสดงดังภาพที่ 4.52(ก) – 4.52(ฉ) ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในกรณีที่ขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากทั้งสองวิธี



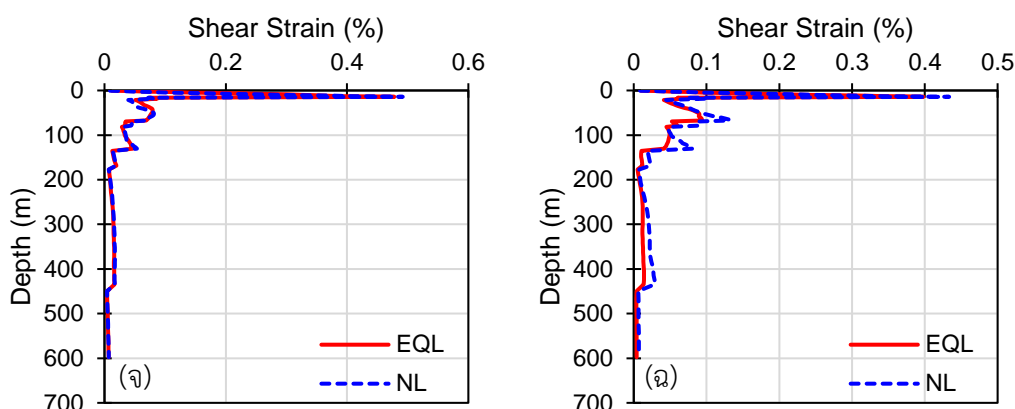
ภาพที่ 4.52 คลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด (ก) PGA=0.01g, (ข) PGA=0.02g, (ค) PGA=0.04g, (ง) PGA=0.08g, (จ) PGA=0.10g, และ (ฉ) PGA=0.20g

ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลการเปรียบเทียบค่า Shear Strain Profile และ ผลการเปรียบเทียบค่า Spectral Acceleration (S_a) ที่ชั้นบนของแบบจำลองชั้นดิน จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้น

ภาพที่ 4.53 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Shear Strain Profile ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า แสดงด้วยเส้นทึบสีแดง กับวิธีไม่เชิงเส้น แสดงด้วยเส้นประสีน้ำเงิน ด้วยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า PGA เท่ากับ 0.01g, 0.02g, 0.04g, 0.08g, 0.10g, และ 0.20g ตามลำดับ ผลการศึกษาพบกว่าค่า Shear Strain ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน และมีค่าสูงสุดจากทั้ง 2 วิธีใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 0.065%, 0.198%, 0.192%, 0.321%, 0.492%, และ 0.433% ตามลำดับ



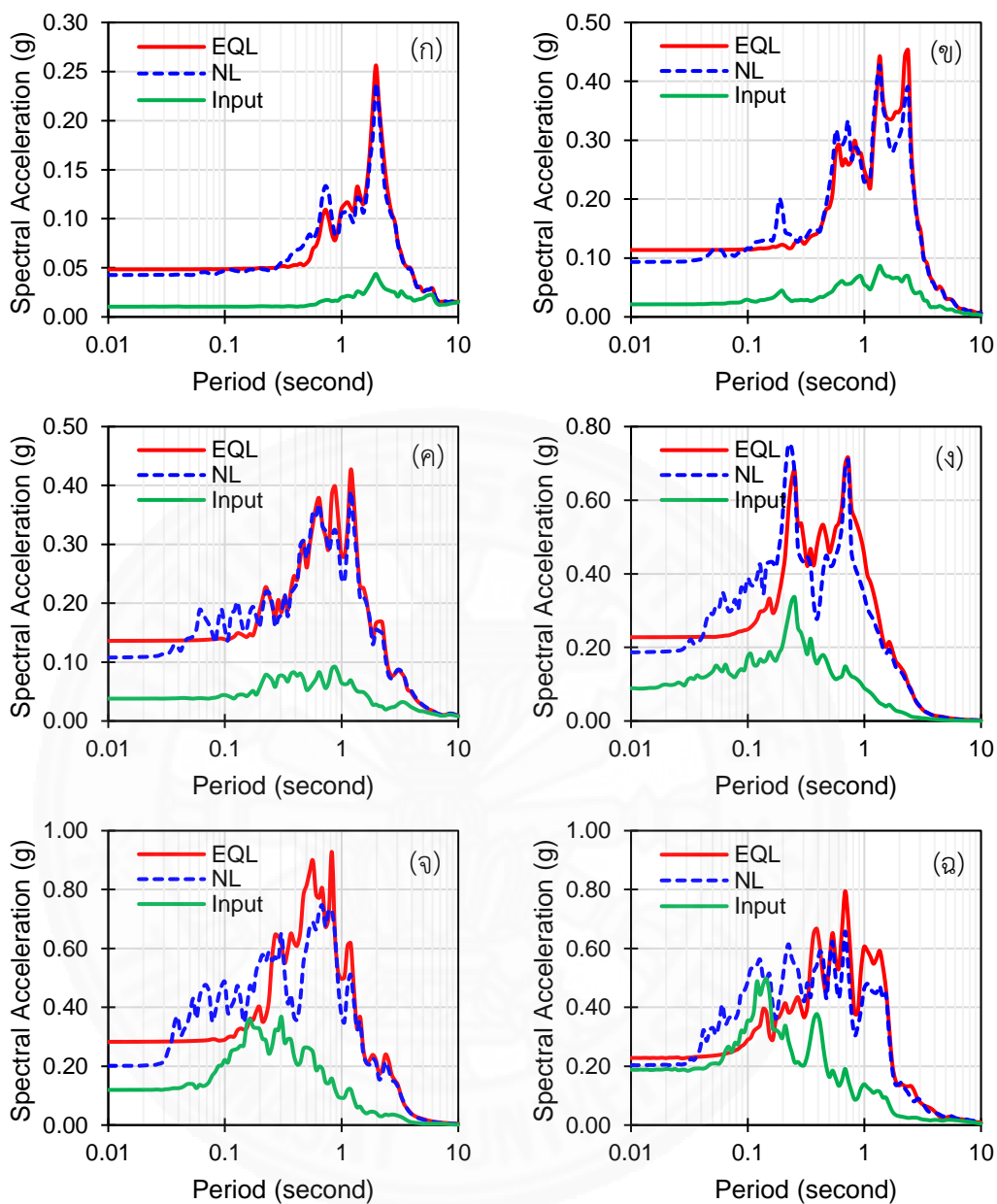
ภาพที่ 4.53 ผลการเปรียบเทียบ Shear Strain Profile ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ากับวิธีไม่เชิงเส้น โดยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA เท่ากับ (ก) 0.01g, (ข) 0.02g, (ค) 0.04g, (ง) 0.08g, (จ) 0.10g, และ (ฉ) 0.20g



ภาพที่ 4.53 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบ Shear Strain Profile ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบกับวิธีไม่เชิงเส้น โดยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA เท่ากับ (ก) 0.01g, (ข) 0.02g, (ค) 0.04g, (ง) 0.08g, (จ) 0.10g, และ (ฉ) 0.20g

หากพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่า S_a ที่ชั้นบนของแบบจำลองในภาพที่ 4.54(ก)-4.54(ฉ) จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า แสดงด้วยเส้นทึบสีแดง และวิธีไม่เชิงเส้น แสดงด้วยเส้นประสีน้ำเงิน ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าต่ำกว่า 0.10% ซึ่งเป็นผลมาจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดเล็กที่มีค่า PGA เท่ากับ 0.01g ทำให้ผลการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องและมีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4.53(ก) สำหรับกรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าอยู่ในช่วง 0.10% - 0.20% ผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่า S_a มีความสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะช่วงคาบการสั่นยาว หรือค่าคาบการสั่นตั้งแต่ 1.50 วินาที แต่พบที่ค่า S_a จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าในช่วงคาบการสั่นที่มีค่าต่ำกว่า 0.70 วินาที เริ่มมีค่าต่ำกว่าวิธีไม่เชิงเส้น แสดงดังภาพที่ 4.54(ข) และ 4.54(ค)

สำหรับกรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.30% ซึ่งวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA เท่ากับ 0.08g, 0.10g, และ 0.20g ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่า S_a ในช่วงคาบการสั่นยาวกว่า 1.50 วินาทีเป็นต้นไป มีความสอดคล้องและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองวิธี ในขณะที่ค่า S_a ในช่วงคาบการสั่น 0.30 - 1.50 วินาที ค่า S_a มีลักษณะคล้ายกันแต่วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าที่มีค่าสูงกว่าวิธีไม่เชิงเส้น แต่ในช่วงคาบการสั่น 0.04 - 0.30 วินาที ค่า S_a จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าที่มีค่าต่ำกว่าวิธีไม่เชิงเส้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 4.54(ง), 4.54(จ), และ 4.54(ฉ) สำหรับกรณีที่ค่า PGA ของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.08g, 0.10g, และ 0.20g ตามลำดับ



ภาพที่ 4.54 ผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า กับวิธีไม่เชิงเส้น โดยการป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA เท่ากับ (ก) 0.01g, (ข) 0.02g, (ค) 0.04g, (ง) 0.08g, (จ) 0.10g, และ (ฉ) 0.20g

จากผลการศึกษาและผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นในการศึกษานี้พบว่า ผลตอบสนองของชั้นดินในช่วงคาบการสั่นตั้งแต่ 1.50 วินาทีเป็นต้นไป มีความสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ใช้จะมีค่า PGA ต่ำหรือสูง หรือค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าต่ำหรือสูงเท่าไรก็ตาม

นอกจากนี้ ค่าสูงสุดของ Shear Strain ยังถือเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินให้มีความเหมาะสม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

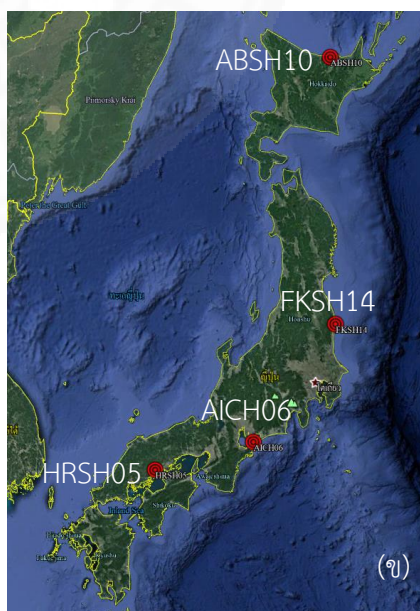
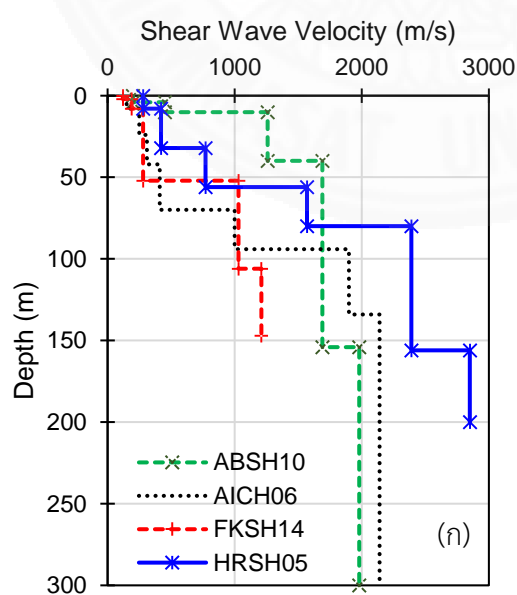
1. กรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่า 0.10% สามารถเลือกวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าหรือวิธีไม่เชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์ได้ทั้งสองวิธี
2. กรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าอยู่ในช่วง 0.10–0.20% การพิจารณาเลือกใช้วิธีเชิงเส้นเทียบเท่ายังคงสามารถใช้ได้ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับวิธีไม่เชิงเส้น แต่อาจได้รับค่า S_u ในช่วงคาบการสั่นสั่นมีค่าต่ำกว่าวิธีไม่เชิงเส้น ดังนั้นหากปัญหาที่สนใจไม่เน้นผลตอบสนองในช่วงคาบการสั่นสั่นสามารถใช้วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแทนวิธีไม่เชิงเส้นได้
3. กรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับ 0.30% ผลการเปรียบเทียบระบุว่า ค่า S_u ในช่วงคาบการสั่นสั่นกว่า 0.30 วินาที จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ามีค่าต่ำกว่าวิธีไม่เชิงเส้นอย่างชัดเจน ในขณะที่ในช่วงคาบการสั่น 0.30–1.50 วินาที ค่า S_u มีลักษณะคล้ายกันแต่วิธีเชิงเส้นเทียบเท่ามีค่า S_u สูงกว่าวิธีไม่เชิงเส้น ดังนั้นในกรณีที่คลื่นแผ่นดินไหวที่ต้องการนำมาวิเคราะห์มีขนาดความรุนแรงสูง หรือค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับ 0.30% ควรพิจารณาเลือกใช้วิธีไม่เชิงเส้นสำหรับวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน

หากเปรียบเทียบผลการศึกษากับผลการวิจัยอื่นที่ผ่านมาพบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าให้ผลตอบสนองที่ต่ำ (Underestimate) ในช่วงคาบการสั่นสั่น (William B. Joyner และ Albert T.F. Chen, 2518; James Kaklamanos และคณะ, 2556) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากคลื่นแผ่นดินไหวมีขนาดความรุนแรงลดลงจะทำให้ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ามีแนวโน้มที่จะมีค่าใกล้เคียงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไม่เชิงเส้น

นอกจากขนาดความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินที่ส่งผลต่อผลการคำนวณแล้ว ค่าสูงสุดของ Shear Strain ที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองชั้นดินเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ามีความไม่ถูกต้องหากเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ที่ไม่เหมาะสม โดยหากค่าสูงสุดของ Shear Strain จากแบบจำลองชั้นดินมีค่าต่ำกว่า 0.30 - 0.40% วิธีเชิงเส้นเทียบเท่ายังคงให้คำตอบที่ถูกต้องและเหมาะสม โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาเลือกใช้วิธีไม่เชิงเส้น แต่สามารถใช้ได้กับปัญหาที่ไม่สนใจศึกษาผลตอบสนองของแบบจำลองในช่วง

คาบการสั่นสั้น แต่หากค่าสูงสุดของ Shear Strain ของแบบจำลองชั้นดินมีค่ามากกว่า 0.30-0.40% ให้พิจารณาเลือกใช้วิธีไม่เชิงเส้นในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแทน (James Kaklamanos และคณะ, 2556 และ 2558) แต่อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองที่คาบการสั่นยาวตั้งแต่ 1.50 วินาที หรือผลตอบสนองช่วงคาบการสั่นยาว จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าหรือวิธีไม่เชิงเส้น ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องและมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลตอบสนองชั้นดินระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ากับวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 1 มิติ ซึ่งไม่มีผลการตรวจวัดจริงมาทำการเปรียบเทียบ ดังนั้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลตอบสนองชั้นดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ากับวิธีไม่เชิงเส้นเพิ่มเติม จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเลือกใช้ข้อมูลชั้นดินและข้อมูลแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูล National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED, 2018) ประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากข้อมูลมีความสมบูรณ์ทั้งโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก และสถานีตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหวที่ใต้ชั้นดินและบนชั้นดิน ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้สำหรับการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินจากทั้งสองวิธีได้อย่างชัดเจน โดยการศึกษานี้ได้ทำการเลือกข้อมูลชั้นดินที่มีความลึกตั้งแต่ 147-300 เมตร ซึ่งมีสภาพชั้นดินแตกต่างกันจำนวน 4 ตำแหน่ง โดยมีโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) แสดงดังภาพที่ 4.55(ก) สำหรับแผนที่แสดงตำแหน่งแต่ละสถานีแสดงในภาพที่ 4.55(ข) และมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.6



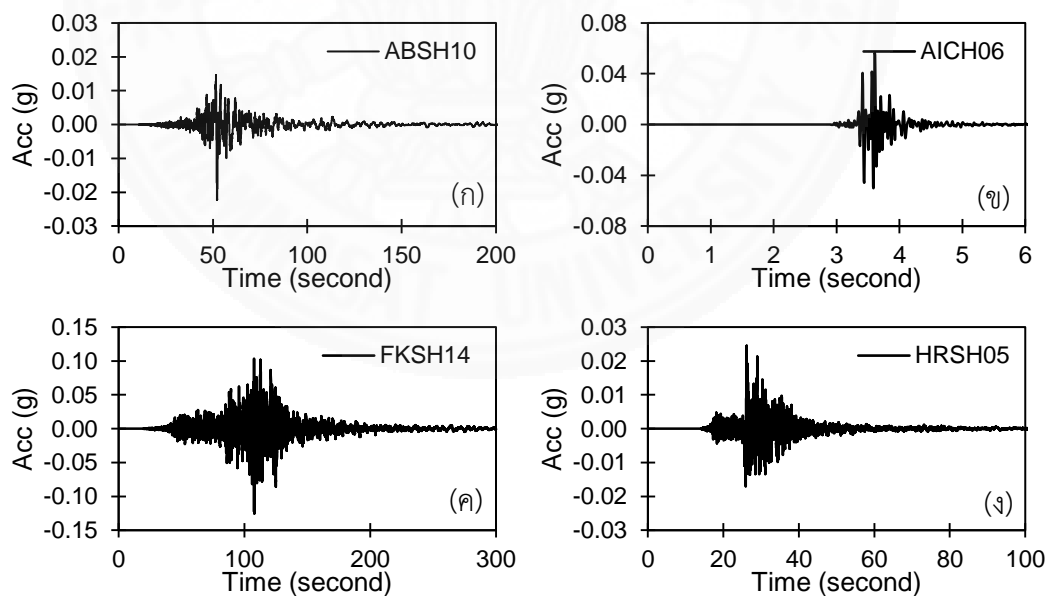
ภาพที่ 4.55 (ก) ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกทั้ง 5 ตำแหน่ง (ข) ตำแหน่งสถานี

ตารางที่ 4.6

รายละเอียดตำแหน่งที่ใช้สำหรับการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดิน

Site No	Station Code	Prefecture	Latitude	Longitude	Depth (m)	V_{S30} (m/s)
1	ABSH10	Hokkaido	44.0813	143.9455	300	610
2	AICH06	Aichi	34.6158	137.0419	300	219
3	FKSH14	Fukushima	37.0264	140.9702	147	237
4	HRS05	Hiroshima	34.5566	133.4179	200	371

สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบและวิธีไม่เชิงเส้นกับผลการตรวจวัดได้จริงจากสถานีตรวจวัดทั้ง 4 ตำแหน่ง ได้เลือกใช้เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดความรุนแรงแตกต่างกันในช่วงปี 2543-2561 ที่มีบันทึกอยู่ฐานข้อมูลดังกล่าว ภาพที่ 4.56(ก)-4.56(ง) แสดงค่าความเร่งตามเวลา (Acceleration Time History) ที่เลือกมาใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งรายละเอียดของแผ่นดินไหวแต่ละเหตุการณ์แสดงในตารางที่ 4.7



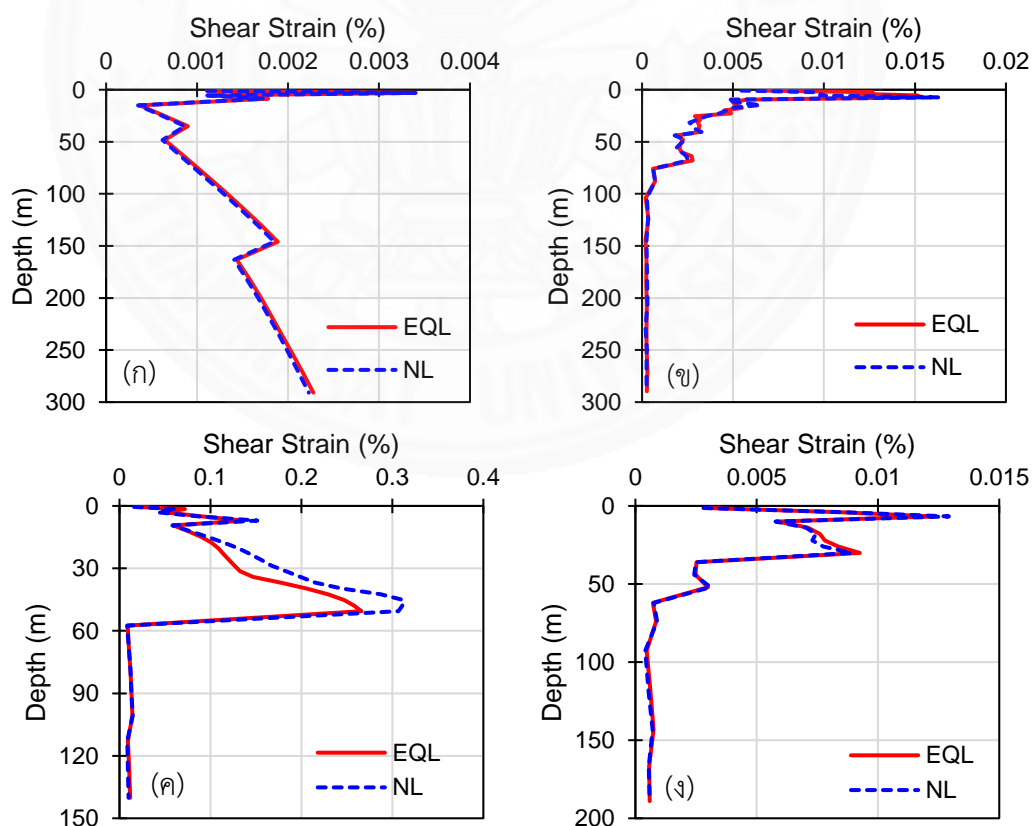
ภาพที่ 4.56 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง (ก) ABSH10, (ข) AICH06, (ค) FKSH14, และ (ง) HRSM05

ตารางที่ 4.7

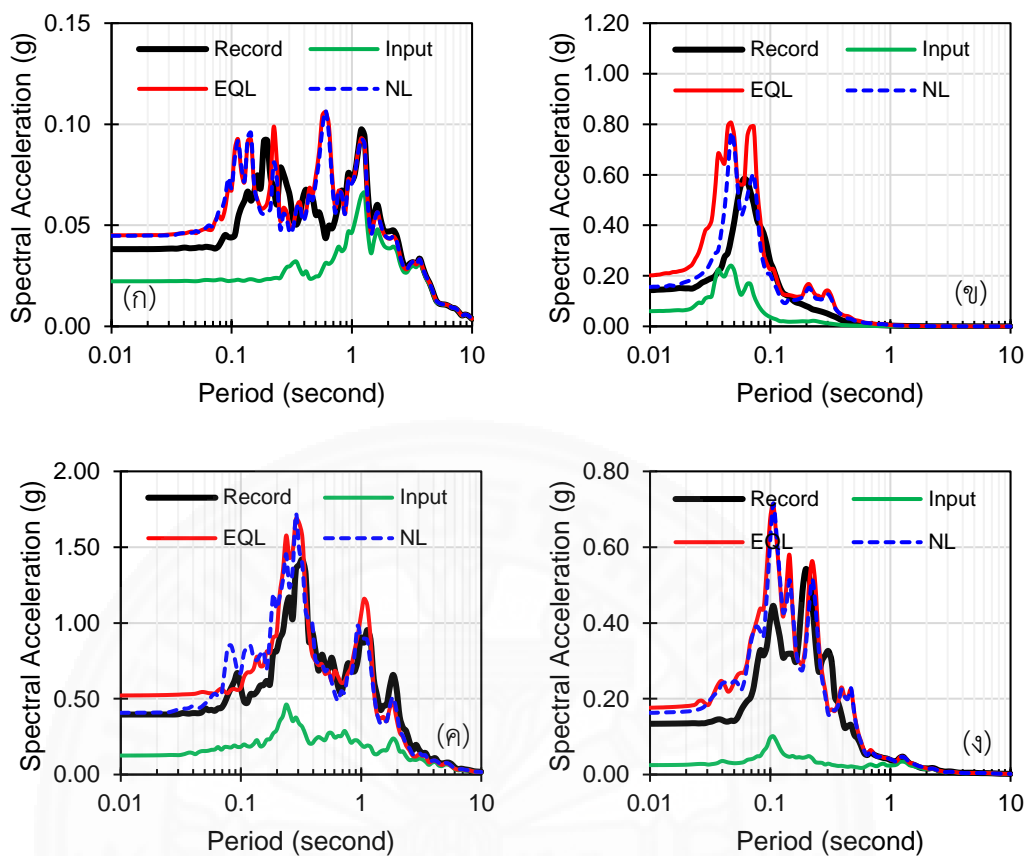
รายละเอียดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการศึกษา

Station Code	YY/MM/DD	Depth (km)	Magnitude	Max. Acc. (g)
ABSH10	2003/09/26	42	8.0	0.022
AICH06	2000/01/27	8	3.5	0.055
FKSH14	2011/03/11	24	9.0	0.123
HRSH05	2000/10/06	11	7.3	0.024

ผลการศึกษสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลการเปรียบเทียบค่า Shear Strain Profile และ ผลการเปรียบเทียบค่า Spectral Acceleration (S_a) ที่ชั้นบนของแบบจำลองชั้นดิน จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นเช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้า โดยผลการเปรียบเทียบ Shear Strain Profile ของแต่ละตำแหน่งแสดงดังภาพที่ 4.57(ก)-4.57(ง) และผลการเปรียบเทียบค่า S_a แสดงดังภาพที่ 4.58(ก)-4.58(ง) สำหรับตำแหน่ง ABSH10, AICH06, FKSH14, และ HRSM05 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.57 ผลการเปรียบเทียบ Shear Strain Profile ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ากับวิธีไม่เชิงเส้นที่ตำแหน่ง (ก) ABSH10, (ข) AICH06, (ค) FKSH14, และ (ง) HRSM05



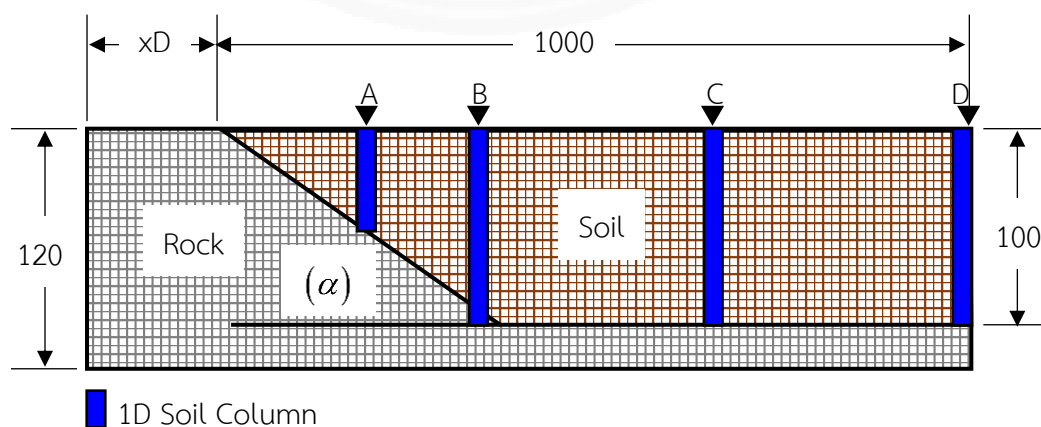
ภาพที่ 4.58 ผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า กับวิธีไม่เชิงเส้น ที่ตำแหน่ง (ก) ABSH10, (ข) AICH06, (ค) FKSH14, และ (ง) HRSM05

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า กับวิธีไม่เชิงเส้นในภาพที่ 4.57-4.58 พบว่า ค่าสูงสุดของ Shear Strain สำหรับตำแหน่ง ABSH10 และ HRSM05 ในภาพที่ 4.57(ก) และ 4.57(ง) ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่า 0.015% ซึ่งถือว่ามีความต่ำมาก เนื่องจากชั้นดินจัดอยู่ในประเภทดินแข็ง ส่งผลให้ผลตอบสนองที่วิเคราะห์จากสองวิธี มีค่าไม่แตกต่างกัน สำหรับผลตอบสนองที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดได้จริง แต่มีค่าสูงกว่าในช่วงคาบการสั่นสั้นกว่า 0.20 วินาที ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วง Shear Strain ที่มีค่าต่ำมาก ๆ ค่าความหน่วงจะมีค่าต่ำมากเข้าใกล้ศูนย์ อาจทำให้ผลตอบสนองของชั้นดินที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าผลที่ตรวจวัดได้จริง ดังแสดงในภาพที่ 4.58(ก) และ 4.58(ง) ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain ที่ตำแหน่ง AICH06 ในภาพที่ 4.57(ข) ซึ่งชั้นดินจัดอยู่ในประเภท D มีค่าสูงสุดของ Shear Strain ประมาณ 0.016% เมื่อพิจารณาผลตอบสนองที่ผิวดินจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีในภาพที่ 4.58(ข) พบว่า มีความสอดคล้องกัน ยกเว้นในช่วงคาบการสั่นกว่า 0.10 วินาที ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นมีค่าต่ำกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และมีแนวโน้มที่

ผลตอบสนองมีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดจริงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า สำหรับตำแหน่ง FKSH14 ซึ่งใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงมากกว่าตำแหน่งศึกษาอื่น ส่งผลให้ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าสูงสุดประมาณ 0.31% และ 0.25% จากวิธีไม่เชิงเส้น และวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.57(ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินที่วิเคราะห์มาจากสองวิธีกับผลการตรวจวัดจริง พบว่า ค่า S_u ที่วิเคราะห์จากวิธีไม่เชิงเส้นให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดจริงได้ดีกว่าวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า นอกจากนี้ ค่า S_u ในช่วงคาบการสั่น 0.05-0.20 วินาที ผลตอบสนองจากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ามีค่าต่ำกว่าวิธีไม่เชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น ในกรณีที่ค่าสูงสุดของ Shear Strain มีค่าสูงกว่า 0.30% (William B. Joyner และ Albert T.F. Chen, 2518; James Kakkamanos และคณะ, 2556)

4.6 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือ การเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองแอ่งดินตะกอน (Basin) ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ กับแบบ 1 มิติ เนื่องจาก รูปร่างแอ่งดินตะกอนที่สนใจศึกษาผลตอบสนองในพื้นที่หลายแห่งอาจมีลักษณะการวางตัวของชั้นดินไม่สม่ำเสมอ รวมถึงมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งสมมติฐานในการใช้แบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ อาจไม่เพียงพอหรือเหมาะสมต่อการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินภายในแรงกระทำแผ่นดินไหวได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง ซึ่งมีความกว้างทั้งหมดเท่ากับ 2 กิโลเมตร ลึก 100 เมตร สำหรับชั้นดิน โดยแอ่งดินตะกอนตัวอย่างมีความชัน (α) เท่ากับ 10, 25 และ 45 องศา ดังภาพที่ 4.59 ซึ่งในภาพแสดงเพียงครึ่งเดียวของแบบจำลองเท่านั้น



ภาพที่ 4.59 แบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างแบบ 2 มิติ

ตำแหน่ง A, B, C, และ D คือ ตำแหน่งที่ต้องการศึกษาผลตอบสนองและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ และแบบจำลอง 1 มิติ ที่ตำแหน่งเดียวกันโดยแสดงเป็นสีเหลี่ยมสีน้ำเงิน สำหรับรายละเอียดของแบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8

รายละเอียดของแบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง

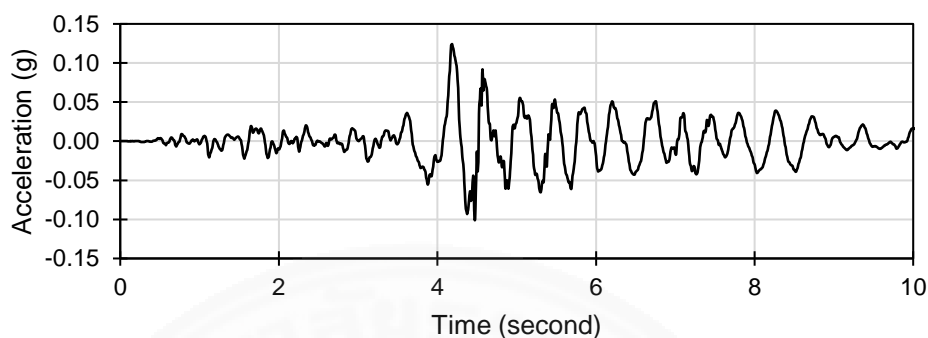
Layer	Depth (m.)	V_s (m/s)	Unit Weight (kN/m ³)	Material	Element Size (m.)
Soil	0 – 100	180	16	Clay PI = 30	5x5
Rock	100 - 120	1,000	22	Rock	5x5

เนื่องจากเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ที่ใช้สำหรับแบบจำลองนี้ คือ แบบ Elementary Boundary ซึ่งสามารถสะท้อนพลังงานหรือคลื่นกลับเข้าสู่แบบจำลองที่สนใจได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบจากการสะท้อนของคลื่นจากขอบของแบบจำลองเข้าสู่พื้นที่ที่สนใจศึกษาหรือพื้นที่ของแอ่งดินตะกอน (Basin) จำเป็นต้องหาระยะ xD ในภาพที่ 4.59 ให้มีความกว้างมากพอเพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นน้อยที่สุด โดยการกำหนดระยะห่างจากขอบของแอ่งถึงขอบของแบบจำลองที่มีความกว้างแตกต่างกัน 6 ระยะ โดย xD หมายถึง ระยะห่างจากขอบแอ่งตัวอย่างถึงขอบของแบบจำลองเป็นจำนวนเท่าของความลึก (D) ของแบบจำลอง ในที่นี้ D เท่ากับ 120 เมตร ดังนั้น ระยะห่างระหว่างขอบแอ่งถึงขอบแบบจำลองได้แก่ 120 เมตร (1D), 360 เมตร (3D), 600 เมตร (5D) , 720 เมตร (6D) , 960 เมตร (8D) , และ 1200 เมตร (10D) ตามลำดับ

สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบหาระยะที่เหมาะสมแสดงดังภาพที่ 4.60 ซึ่งมีค่า Peak Ground Acceleration (PGA) เท่ากับ 0.113g โดยระยะเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำต่อแบบจำลองเท่ากับ 10 วินาที จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินเพื่อเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, S_d) ที่ผิวดินด้วยวิธีเชิงเส้น (Linear Site Response Analysis) สำหรับตำแหน่ง A ถึง D จากแบบจำลองที่มีระยะ xD ต่างกันทั้ง 6 ระยะ

กำหนดให้ตำแหน่ง A คือ ตำแหน่งที่มีความลึกของชั้นดินเท่ากับ 50 เมตร ซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของของแอ่งที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา ส่วนตำแหน่ง B คือตำแหน่งที่มีความลึกเท่ากับ 100 เมตร และเป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนความชันของฐานและขอบแอ่ง สำหรับตำแหน่ง C และ D

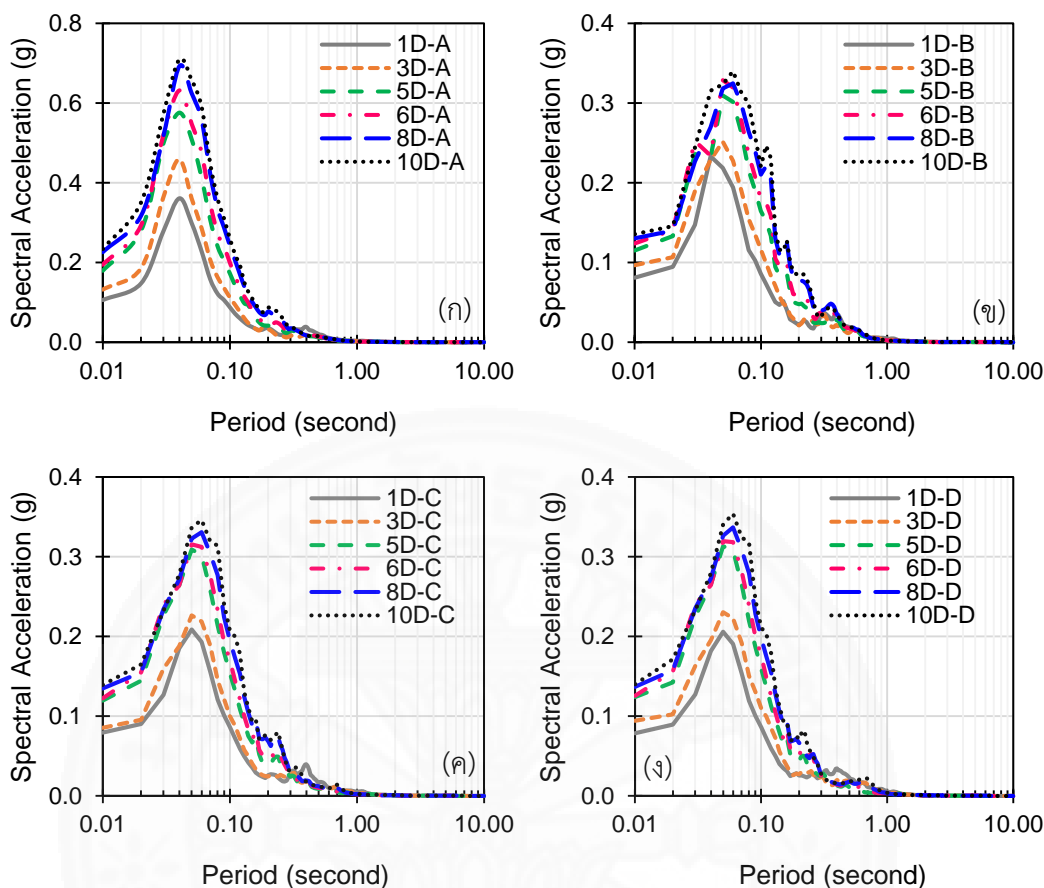
มีความลึกเท่ากับ 100 เมตร โดยตำแหน่ง C อยู่ระหว่างกึ่งกลางแอ่งกับตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน ส่วนตำแหน่ง D คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลองแอ่งดินตะกอน



ภาพที่ 4.60 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง

การศึกษานี้ นำโปรแกรม GiD (Coll, A. และคณะ, 2559) และ GiD+OpenSees (Papanikolaou, V.K. และคณะ 2560) มาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองตัวอย่าง โดยการกำหนดคุณสมบัติของชั้นดินและชั้นหิน รวมถึงการแบ่งชิ้นส่วน (Element Mesh) ของแอ่งดินตะกอน ตัวอย่าง จากนั้นนำข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ Text File ไปวิเคราะห์ต่อยังโปรแกรม OpenSees (Mazzoni, S. และคณะ, 2549) ซึ่งเป็น Opensource Software สำหรับการศึกษากฎการของแบบจำลองชั้นดินภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว

ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบความเร่งเชิงสเปกตรัม (S_a) ที่ตำแหน่ง A ถึง D แสดงดังภาพที่ 4.61(ก)-4.61(ง) ตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบค่า S_a ที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า ระยะ xD ที่ทำให้ค่า S_a เริ่มลู่ออกค่าคงที่ หรือผลจากคลื่นสะท้อนกลับเข้าสู่แบบจำลองน้อยที่สุดอยู่ที่ระยะมากกว่าหรือเท่ากับ 8 เท่าของความลึก ดังนั้น การเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองแอ่งดินตะกอนแบบ 2 มิติ กับแบบ 1 มิติ ในขั้นตอนถัดไป ระยะ xD ที่ใช้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของความลึก ดังนั้น แบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างมีความกว้างทั้งหมดเท่ากับ 4,400 เมตร ในขณะที่มีความลึกเท่ากับ 120 เมตร สำหรับอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของแบบจำลองตัวอย่างนี้มีค่าประมาณ 37 เท่า



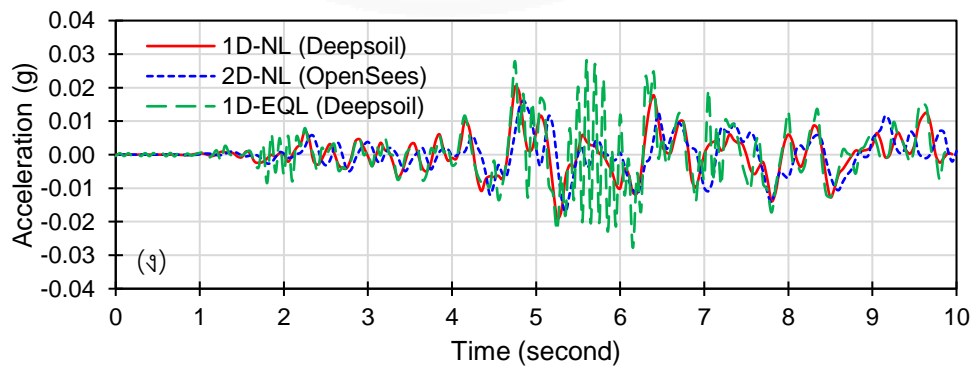
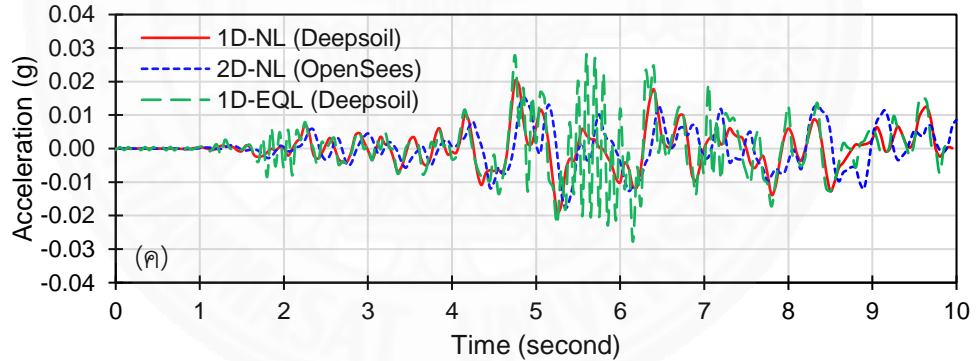
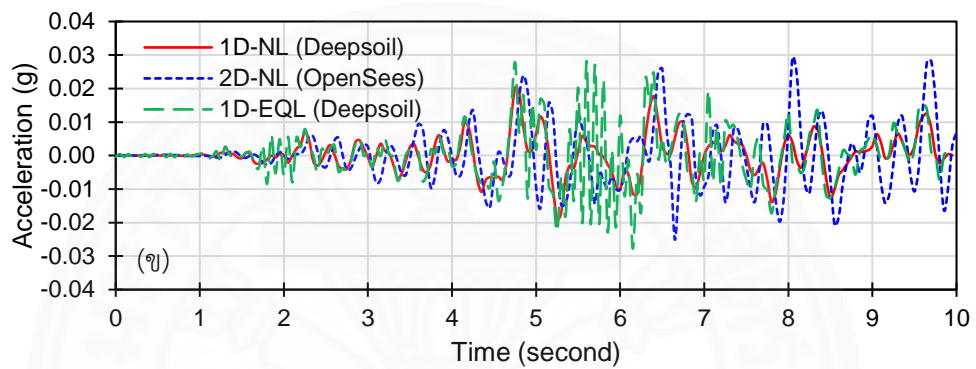
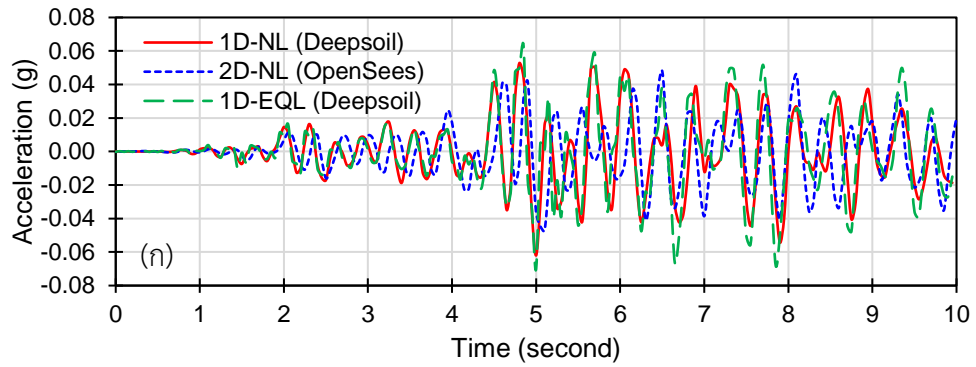
ภาพที่ 4.61 ผลการเปรียบเทียบค่า S_d ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D

ภายหลังจากได้ระยะ x_D ที่ทำให้ผลกระทบจากคลื่นสะท้อนเข้าสู่แบบจำลองมีค่าน้อยที่สุดแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการนำแบบจำลองที่มีระยะ x_D เท่ากับ 10 เท่า มาวิเคราะห์ผลตอบสนองของแบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยวิธีไม่เชิงเส้น จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 1 มิติ รวมถึงเปรียบเทียบกับวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยโปรแกรม Deepsoil (Hashash, Y.M.A และคณะ, 2559)

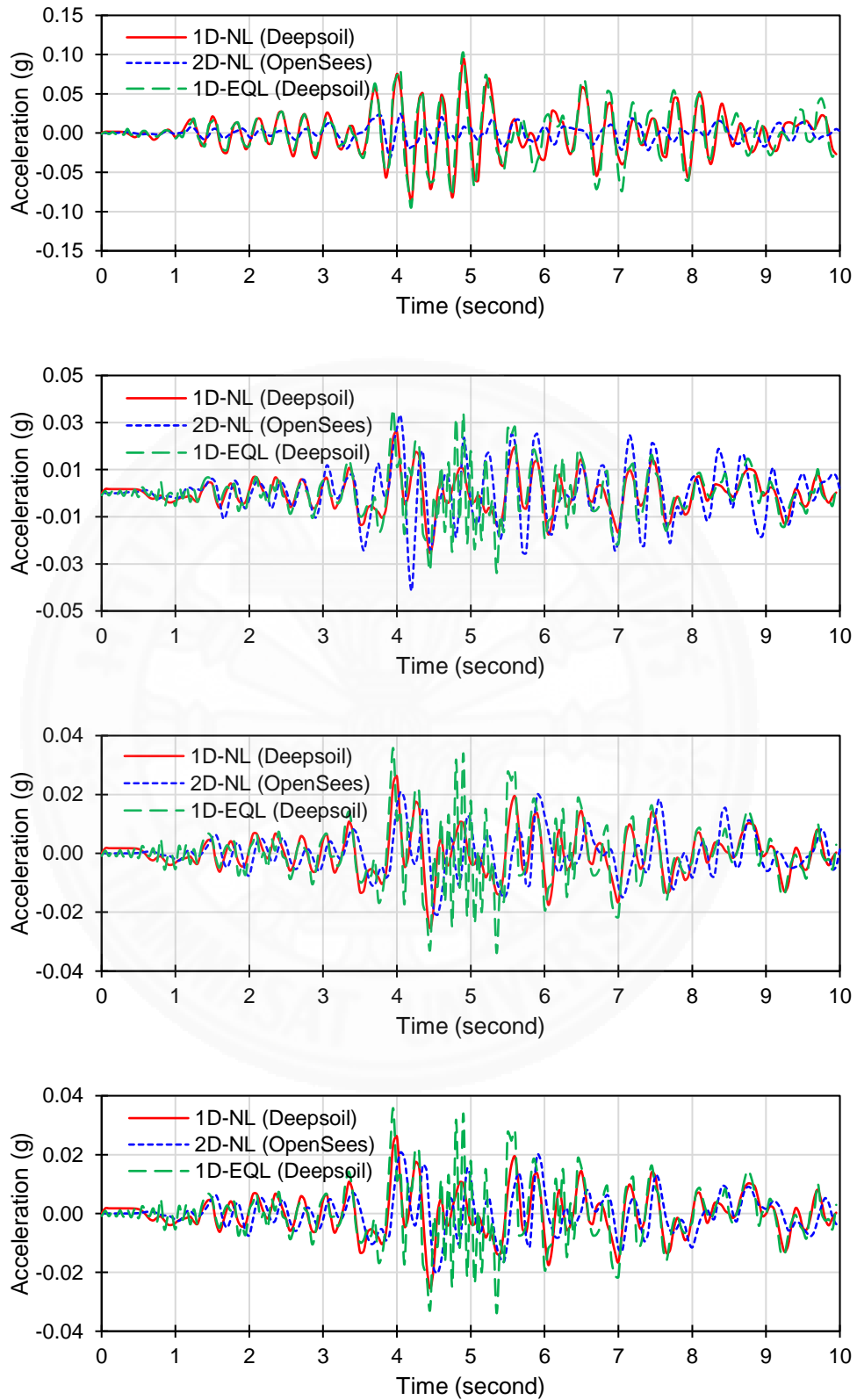
สำหรับความหน่วง (Damping) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบ Rayleigh Damping เนื่องจากเป็นรูปแบบความหน่วงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไป ดังนั้น การเปรียบเทียบผลตอบสนองในการศึกษานี้มาจากการใช้ความหน่วงแบบ Rayleigh เท่านั้น ซึ่งค่าความหน่วงที่ระดับ Strain ต่ำ ๆ สำหรับแบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1.0%

ผลการศึกษาและเปรียบเทียบผลตอบสนองของแองดินตะกอนตัวอย่างที่มีความชัน (α) เท่ากับ 10, 30, และ 45 องศา ระหว่างแบบจำลองแบบ 2 มิติและ 1 มิติ ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นและวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าที่ตำแหน่ง A, B, C, และ D ดังแสดงในภาพที่ 4.58 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลการเปรียบเทียบด้วยแบบจำลองที่มีความลึกเท่ากับ 50 เมตร บริเวณตำแหน่ง A และส่วนที่ 2 คือผลการเปรียบเทียบด้วยแบบจำลองที่มีความลึกเท่ากับ 100 เมตร แต่มีตำแหน่งที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบความเร่งที่ผิวดิน (Acceleration Time History) ระหว่างแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ที่ตำแหน่ง A-D สำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา แสดงดังภาพที่ 4.62(ก)-4.62(ง) สำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 30 องศา แสดงดังภาพที่ 4.63(ก)-4.63(ง) และสำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 45 องศา แสดงดังภาพที่ 4.64(ก)-4.64(ง)

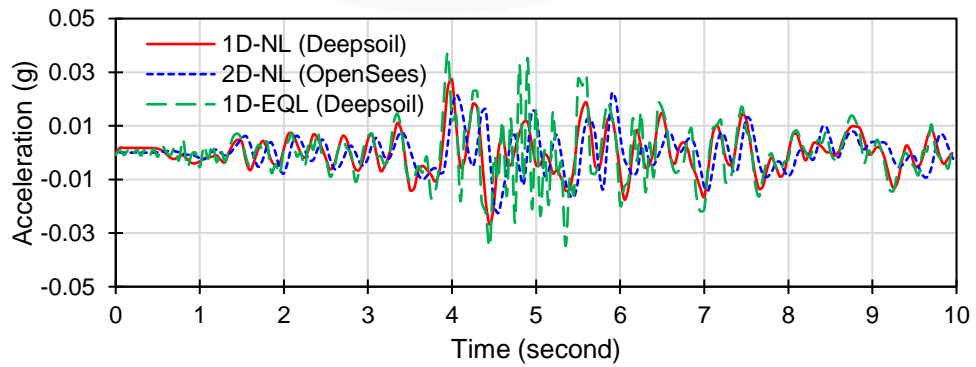
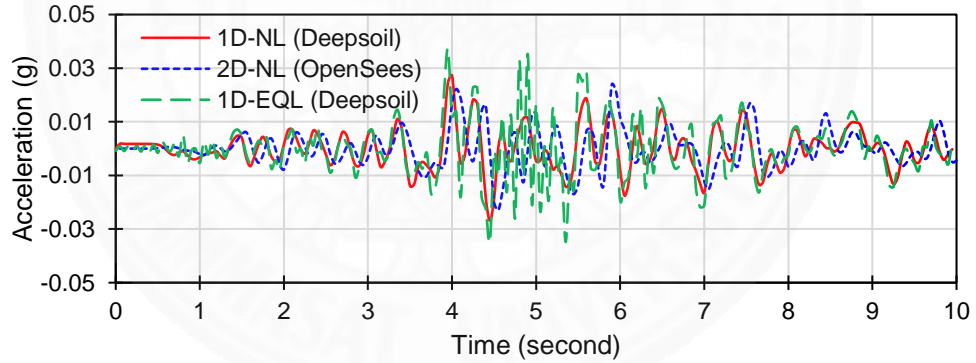
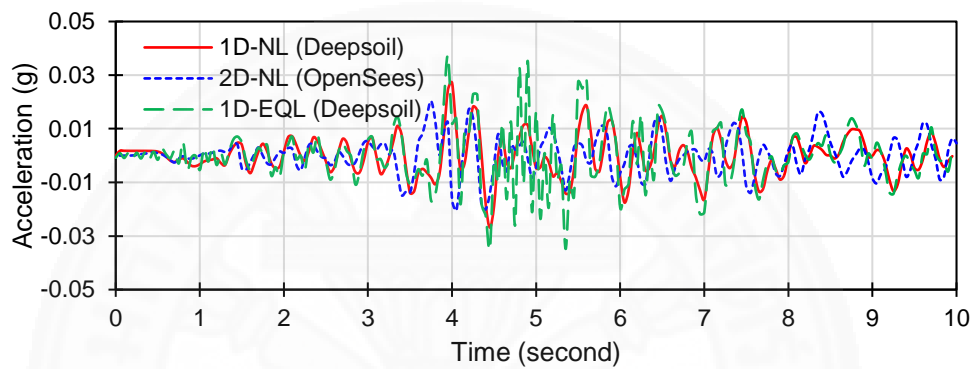
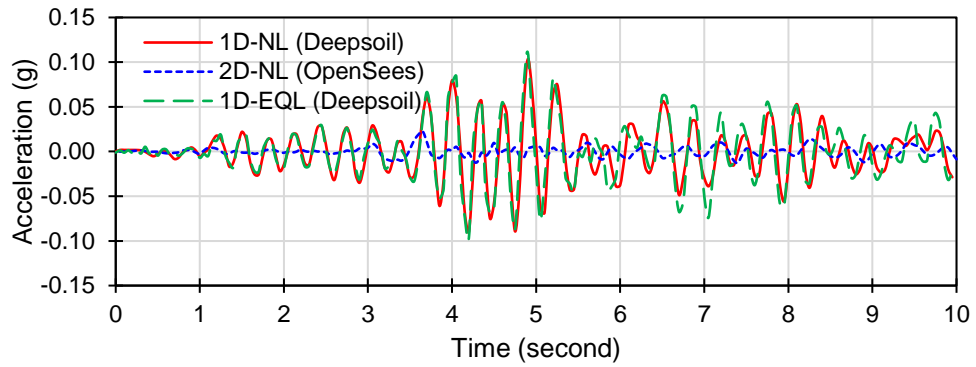




ภาพที่ 4.62 เปรียบเทียบความเร่งตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D ระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10 องศา



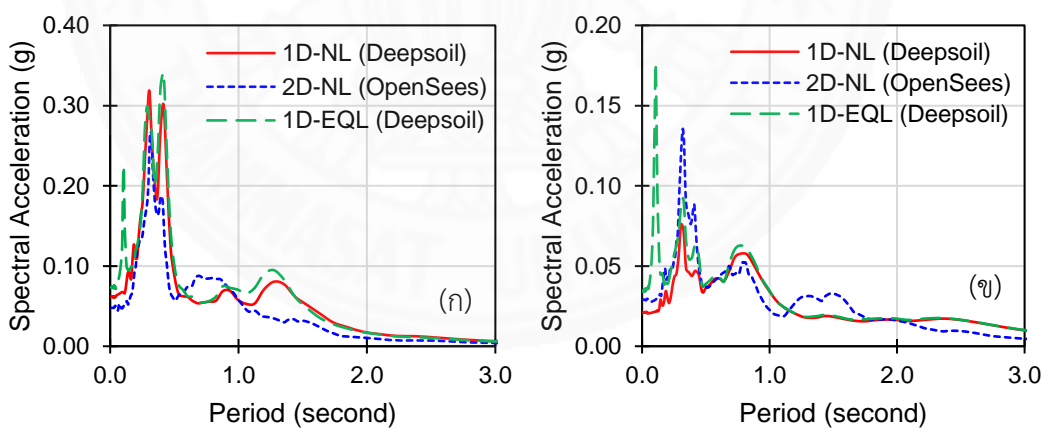
ภาพที่ 4.63 เปรียบเทียบความเร่งตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D ระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 30 องศา



ภาพที่ 4.64 เปรียบเทียบความเร่งตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D ระหว่างแบบจำลอง 1 และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 45 องศา

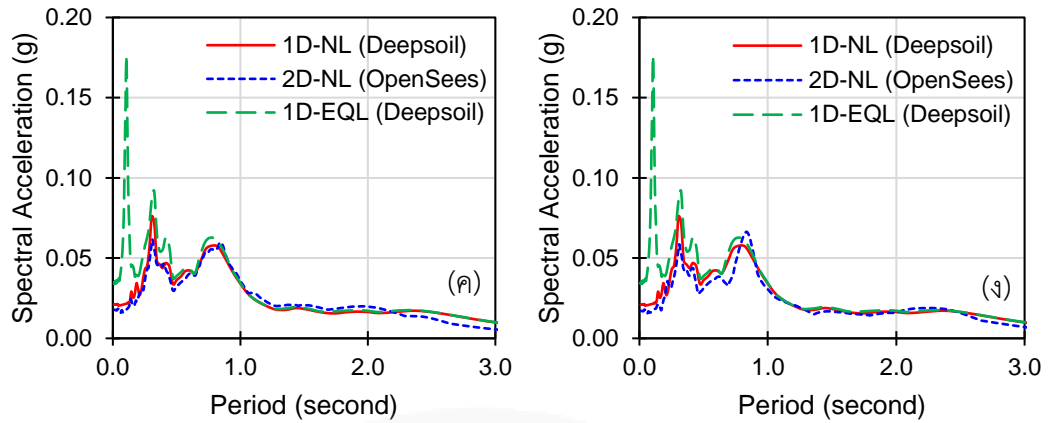
จากผลการเปรียบเทียบความเร่งที่ผิวดินแต่ละเวลาด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นจากแบบจำลองแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา พบว่า มีค่าที่สอดคล้องและมีความใกล้เคียงกัน ยกเว้น ค่าความเร่งที่วิเคราะห์จากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า ในตำแหน่ง B, C, และ D ซึ่งมีความลึก 100 เมตร ในช่วงเวลาที่ 5-6 วินาที เกิดการสั่นพ้องในช่วงความถี่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นพร้อมกันขององค์ประกอบที่มีความแรงแรงมากของคลื่นที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติหนึ่งของแบบจำลองชั้นดินซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Joyner W.B. and Chen A.T.F., 2518) สำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 30 และ 45 องศา ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ค่าความเร่งที่ผิวดินแต่ละเวลา มีความสอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และ 2 มิติ แต่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนสำหรับบริเวณตำแหน่ง A ซึ่งเป็นตำแหน่งของขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง โดยมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และมีแนวโน้มที่ค่าความเร่งลดลงเมื่อความชันของแบบจำลองเพิ่มมากขึ้น

สำหรับผลการเปรียบเทียบค่า S_u ที่ผิวดินระหว่างแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ที่ตำแหน่ง A-D สำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา แสดงดังภาพที่ 4.65(ก)-4.65(ง) ส่วนแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 30 องศา แสดงดังภาพที่ 4.66(ก)-4.66(ง) และสำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 45 องศา แสดงดังภาพที่ 4.67(ก)-4.67(ง)

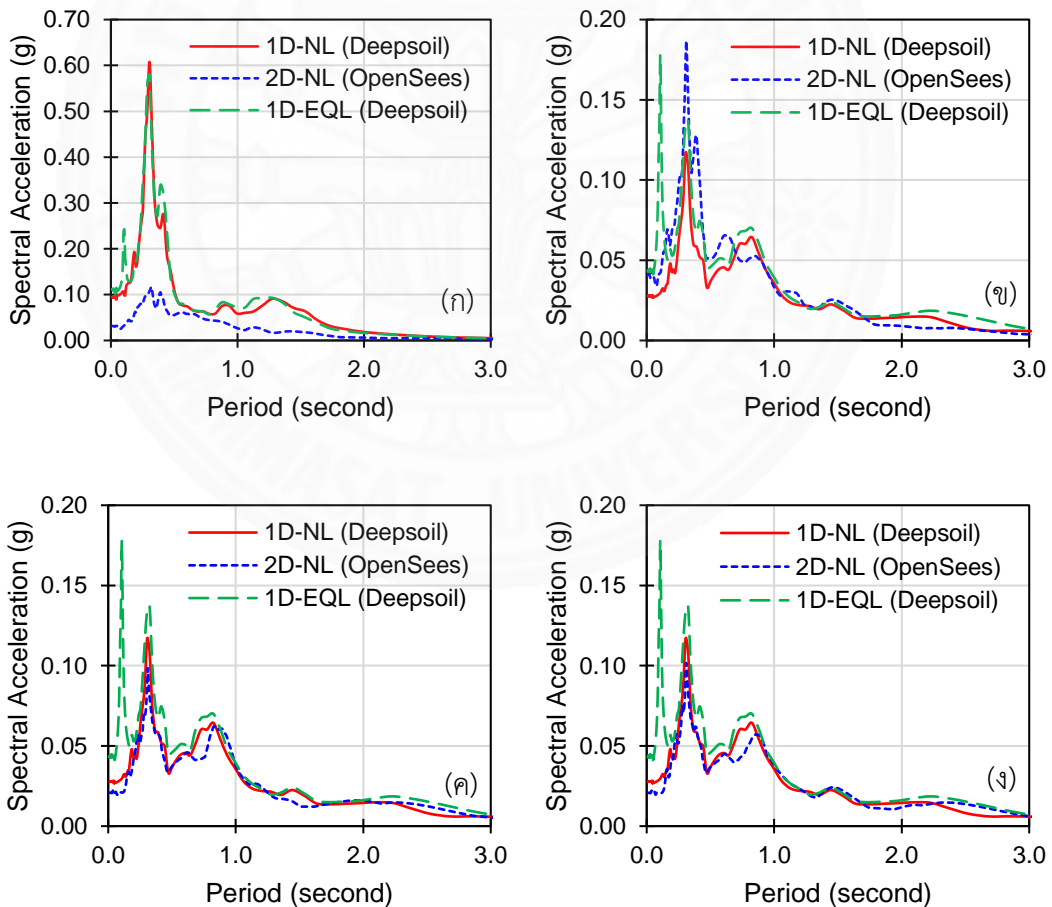


ภาพที่ 4.65 เปรียบเทียบค่า S_u สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10 องศา

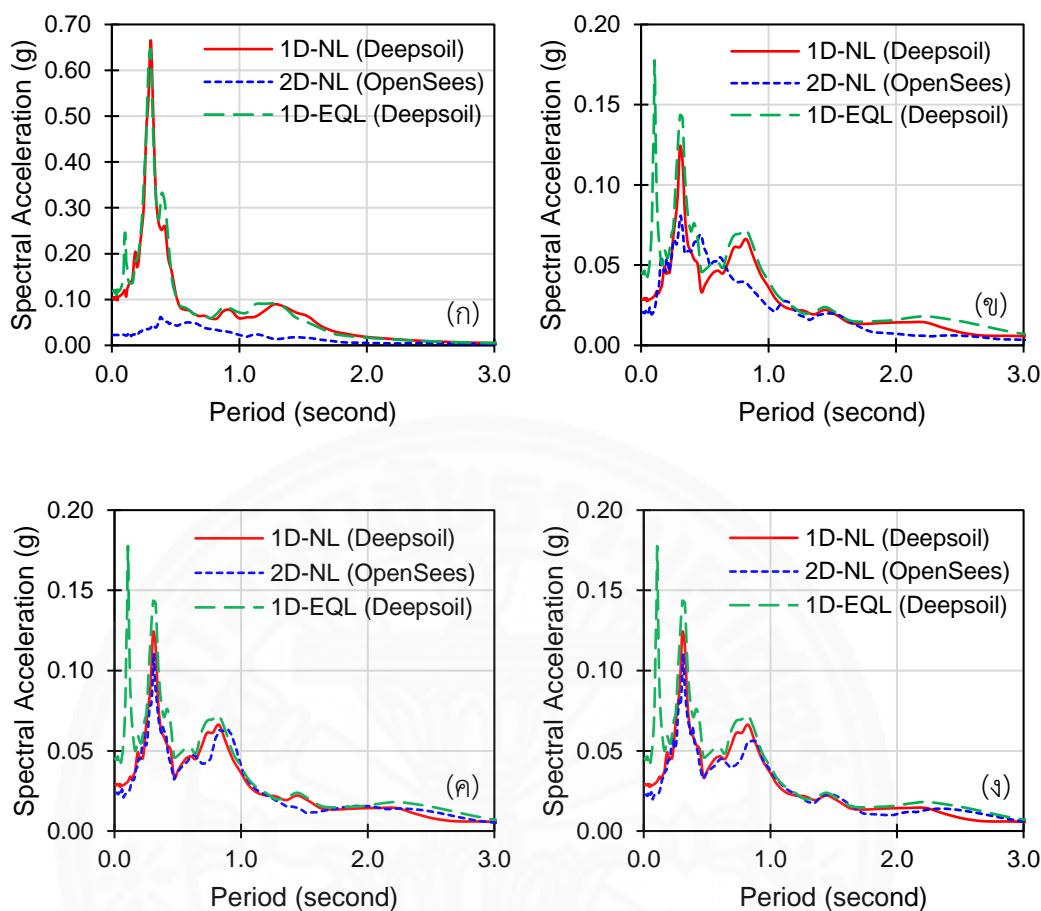
ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D



ภาพที่ 4.65 (ต่อ) เปรียบเทียบค่า S_a สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10 องศา
ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D



ภาพที่ 4.66 เปรียบเทียบค่า S_a สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 30 องศา
ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D



ภาพที่ 4.67 เปรียบเทียบค่า S_a สำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 45 องศา
ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D

ผลการเปรียบเทียบค่า S_a ที่ตำแหน่ง A, B, C, และ D ด้วยแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา ซึ่งเป็นค่าความชันที่ต่ำ พบว่า ค่า S_a ที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะตำแหน่ง C และ D ซึ่งอยู่ภายในแบบจำลองและมีระยะห่างออกมาจากขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง ในขณะที่พบความแตกต่างกันที่ตำแหน่ง A ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ มี Peak ที่คาบการสั่นประมาณ 0.80 วินาที แต่ผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ พบมี Peak ที่คาบการสั่นประมาณ 1.40 วินาที และตำแหน่ง B ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ มี Peak ที่คาบการสั่นประมาณ 1.50 วินาที ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ ที่คาบการสั่นนั้นมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ ที่บริเวณคาบการสั่นประมาณ 0.30 วินาที ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ มีค่า S_a สูงกว่าแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากลักษณะของขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง หากพิจารณาผลตอบสนองของ

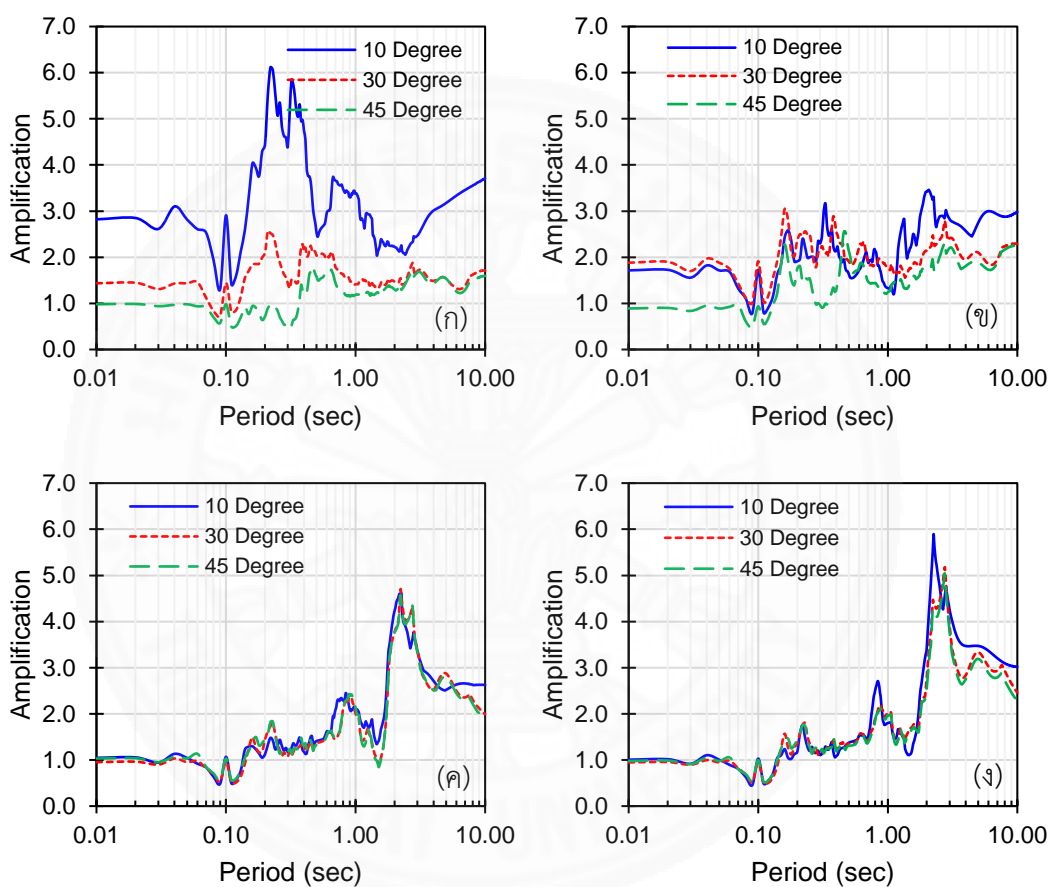
แบบจำลองด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ พบว่า ค่า S_u มีค่าใกล้เคียงกันกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 1 มิติ แต่ในช่วงคาบการสั่นสั้น หรือช่วงความถี่สูง พบว่าค่า S_u มีค่าสูงกว่าผลการศึกษาอื่น เนื่องจากเกิดการสั่นพ้องในช่วงความถี่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นพร้อมกันขององค์ประกอบที่มีความแรงมากของคลื่นที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติหนึ่งของแบบจำลองชั้นดินซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Joyner W.B. and Chen A.T.F., 2518)

สำหรับแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 30 และ 45 องศา พบว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 1 มิติ มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันดี ยกเว้นในช่วงคาบการสั่นสั้น หรือช่วงความถี่สูง ซึ่งมีสาเหตุมาจากคำอธิบายก่อนหน้านี้ แต่เมื่อเปรียบเทียบผลกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบ 2 มิติ พบว่า ที่ตำแหน่ง A ซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่าง โดยมีความลึก 50 เมตร ให้ค่า S_u ต่ำกว่าแบบจำลอง 1 มิติ อย่างชัดเจน และมีค่าลดลงเมื่อความชันของแอ่งดินตะกอนตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อตำแหน่งการศึกษาเข้าใกล้ช่วงกึ่งกลางของแบบจำลองที่ตำแหน่ง C และ D ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันดี เนื่องจากอิทธิพลของขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่างที่สะท้อนและหักเหการเคลื่อนที่ของคลื่นลดลง

หากพิจารณาเปรียบเทียบอัตราขยายกำลังของคลื่นที่ตำแหน่ง A, B, C, และ D สำหรับแบบจำลองที่มีความชันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.68(ก)-4.68(ง) พบว่า ที่ตำแหน่ง A ค่าอัตราขยายกำลังของคลื่นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา มีค่าสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตำแหน่ง B ที่อยู่บริเวณตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันของแบบจำลองมีค่าอัตราขยายกำลังของคลื่นใกล้เคียงกันระหว่างแบบจำลองที่มีความชัน 10 และ 30 องศา ในขณะที่แบบจำลองที่มีความชัน 45 องศา ไม่พบการขยายกำลังของคลื่น หรือมีค่าอัตราขยายกำลังของคลื่นเท่ากับ 1 ในช่วงคาบการสั่นสั้นกว่า 0.10 วินาที แต่เมื่อตำแหน่งที่ศึกษาเข้าใกล้กึ่งกลางของแบบจำลองที่ตำแหน่ง C และ D พบว่า ค่าอัตราขยายกำลังของคลื่นจากแบบจำลองที่มีความชันแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันดี นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราขยายกำลังของคลื่นบริเวณขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่างในบางช่วงของคาบการสั่นมีค่าสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง เช่น ในช่วงคาบการสั่นสั้นกว่า 1.0 วินาที อัตราขยายกำลังของคลื่นบริเวณขอบแอ่งมีค่าสูงกว่าบริเวณกึ่งกลาง เป็นต้น

หากพิจารณาเปรียบเทียบกับผลจากการศึกษาอื่น พบว่า ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และ 2 มิติ มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ บริเวณตำแหน่งช่วงกลางของแบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกันระหว่างแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และ 2 มิติ โดยอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความลึกของแบบจำลองต้องมีค่ามากกว่า 6 เท่า ในขณะที่ผลตอบสนองของชั้นดินบริเวณ

ขอบของแอ่งดินตะกอนตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ (Tam Larkin และ John Marsh, 2534; Bard และ Gariel, 2529; Jian Zhang และ John X. Zhao, 2552) นอกจากนี้ อัตราการกระจายคลื่นสามารถมีค่าที่สูงกว่าบริเวณกึ่งกลางแอ่งได้ในบางช่วงคาบการสั่น ซึ่งหมายถึงอัตราการกระจายคลื่นไม่ได้มีค่าลดลงเมื่อความลึกของชั้นดินลดลงเสมอไป



ภาพที่ 4.68 เปรียบเทียบอัตราการขยายกำลังสำหรับแบบจำลองที่มีความชัน 10, 30, และ 45 องศา ที่ตำแหน่ง (ก) A, (ข) B, (ค) C, และ (ง) D

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน

การศึกษานี้ได้นำเทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) มาใช้สำหรับการศึกษาคูณสมบัติของชั้นดินในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ประกอบด้วย ค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period, T_p) ซึ่งใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบ 1 ตำแหน่ง (Single Point Microtremor) และวิเคราะห์ด้วยวิธี Horizontal to Vertical Spectral Ratio (H/V Spectral Ratio) ส่วนโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) ใช้วิธีการตรวจวัดแบบโครงข่าย (Array Microtremor) เพื่อคำนวณหาความเร็วเฟส ซึ่งนำมาใช้ต่อในการประเมินโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) โดยมีจำนวนตำแหน่งการศึกษาทั้งหมด 170 ตำแหน่ง ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p)

ค่าคาบอิทธิพลหลักในช่วงค่าคาบการสั่นที่ยาว (Long Period) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.2 วินาที พบอยู่ในพื้นที่บริเวณอำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการติดกับจังหวัดฉะเชิงเทราและปากอ่าวไทย สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.7 – 0.9 วินาที ในขณะที่พื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.7 – 0.8 วินาที ยกเว้นบริเวณใกล้กับแนวเขาในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี นครนายก และชลบุรี จะมีค่าคาบอิทธิพลหลักสั้นกว่า 0.2 วินาที

5.1.2 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนจากผิวดินถึงความลึก 30 เมตร (V_{s30})

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่ระดับผิวดินถึงความลึก 30 เมตร (V_{s30}) ของพื้นที่ที่ศึกษาส่วนใหญ่ในบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าต่ำกว่า 180 เมตรต่อวินาที จัดเป็นชั้นดินประเภท E ซึ่งเป็นชั้นดินอ่อน ส่วนพื้นที่โดยรอบส่วนใหญ่มีค่า V_{s30} อยู่ในช่วง 180 เมตรต่อวินาที จนถึงค่าประมาณ 540 เมตรต่อวินาที ซึ่งจัดเป็นชั้นดินประเภท D ถึง C และมีค่า V_{s30} สูงสุดตั้งแต่ 540 – 1,080 เมตรต่อวินาที โดยพบอยู่ในพื้นที่บริเวณใกล้กับแนวเขาในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี นครนายก และชลบุรี เมื่อจัดประเภทชั้นดินแล้วพื้นที่ดังกล่าวจัดอยู่ในชั้นดินประเภท C ถึง B ซึ่งถือว่าเป็นชั้นดินแข็ง ถึง หิน

5.1.3 โครงสร้างแอ่งกรุงเทพฯ

ผลการศึกษาโครงสร้างแอ่งกรุงเทพฯ จากโครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกพบว่า บริเวณส่วนกลางของแอ่งกรุงเทพฯ มีความลึกมากที่สุดประมาณ 900 เมตร จากนั้นความลึกของชั้นดินมีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเมื่อพื้นที่ทำการศึกษาเข้าใกล้ขอบแอ่งกรุงเทพฯ โดยมีค่าต่ำกว่า 70 เมตร ในพื้นที่ของอำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี, อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก และอำเภอพานทอง จังหวัด นอกจากนี้ หากพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ พบว่าความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ ในแนวเหนือ-ใต้ มีลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าในแนวตะวันตก-ตะวันออก กล่าวคือ ความลึกของแอ่งในแนวเหนือ-ใต้ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะที่ความลึกของแอ่งในทิศทางตะวันตก-ตะวันออก มีการเปลี่ยนแปลงความลึกไวกว่า นอกจากนี้ ผลการศึกษาสามารถระบุได้ว่ารูปร่างหรือลักษณะของแอ่งกรุงเทพฯ มีลักษณะคล้ายกับแอ่งกระทะค่อนข้าง โดยกันแอ่งอยู่ในพื้นที่บริเวณจังหวัดกรุงเทพมหานคร

5.2 สรุปผลการศึกษาผลตอบแทนของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ

ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนของชั้นดินภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ สำหรับพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ พบว่า อัตราการขยายกำลังของคลื่นในพื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 4-6 เท่า ในช่วงคาบการสั่น 1.0-2.0 วินาที หากพิจารณาความแตกต่างระหว่างผลการศึกษานี้กับมาตรฐานออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52) พบว่าค่า S_a ที่ผิวดินในแต่ละจังหวัดมีค่าสอดคล้องกันในบางช่วงของคาบการสั่น และมีบางช่วงคาบการสั่นที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบแทนมีการศึกษาและปรับปรุงให้มีความถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุดในปัจจุบัน รวมถึงข้อมูลของแบบจำลองชั้นดินมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ค่า S_a มีความแตกต่างไปจากเดิม ซึ่งถือว่าเป็นการพัฒนาและปรับปรุงข้อมูลความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ

5.3 สรุปผลการแบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบแบ่งโซนย่อย

ผลการแบ่งเขตแผ่นดินไหวแบบแบ่งโซนย่อยสำหรับพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ด้วยการเปรียบเทียบลักษณะความคล้ายคลึงกันของค่า S_a สำหรับการออกแบบในแต่ละคาบการสั่นและความใกล้เคียงกันของพื้นที่ สรุปได้ว่า พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ สามารถแบ่งเป็นโซนย่อยได้เป็น 10 โซน นอกจากนี้ ได้แสดงค่า S_a สำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นต่าง ๆ ของแต่ละโซนออกเป็น 2

รูปแบบ ได้แก่ ค่า S_u ที่มีความหน่วงเท่ากับ 2.5% สำหรับการออกแบบอาคารสูง และความหน่วงเท่ากับ 5.0% สำหรับการออกแบบอาคารทั่วไป ตามลำดับ

5.4 สรุปผลการศึกษาการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไม่เชิงเส้น

ผลการศึกษาและผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นในการศึกษานี้พบว่า ผลตอบสนองของชั้นดินในช่วงคาบการสั่นตั้งแต่ 1.50 วินาทีเป็นต้นไป มีความสอดคล้องกันและมีใกล้เคียงกันดีจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี ในขณะที่การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าให้ผลตอบสนองที่ต่ำ (Underestimate) ในช่วงคาบการสั่นสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไม่เชิงเส้น โดยทั่วไปแล้วหากคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดความรุนแรงลดลงจะทำให้ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่ามีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ หากค่าสูงสุดของค่า Shear Strain มีค่าต่ำกว่า 0.30% ผลการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันดี แต่หากค่าสูงสุดของค่า Shear Strain มีค่าสูงกว่า 0.30% ผลการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงคาบการสั่นสั้น

5.5 สรุปผลการศึกษาการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 มิติ

ผลการเปรียบเทียบความเร่งที่ผิวดินแต่ละเวลาด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไม่เชิงเส้นจากแบบจำลองแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ โดยแบบจำลองมีความชันแตกต่างกัน พบว่า มีค่าที่สอดคล้องกันและมีความใกล้เคียงกันในกรณีที่มีความชันของแบบจำลองไม่มาก เช่น 10 องศา เป็นต้น ในขณะที่ค่าความเร่งที่ผิวดินมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนสำหรับบริเวณขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่างเมื่อความชันเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และมีแนวโน้มที่ค่าความเร่งจะมีค่าลดลงเมื่อความชันของแบบจำลองเพิ่มมากขึ้นสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบอัตราการขยายกำลังของคลื่นที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนแบบจำลองที่มีความชันแตกต่างกัน พบว่า บริเวณขอบแอ่งดินตะกอนตัวอย่างมีค่าอัตราการขยายกำลังของคลื่นแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยแบบจำลองที่มีความชันเท่ากับ 10 องศา มีค่าสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความชันเพิ่มขึ้น เมื่อตำแหน่งการศึกษาเข้าใกล้กึ่งกลางของแบบจำลอง อัตราการขยายกำลังจากแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และ 2 มิติ มีแนวโน้มที่จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

5.6 ข้อเสนอแนะ

1. โครงสร้างความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (Shear Wave Velocity Profile) ที่ประเมินได้จากการศึกษานี้ ถือเป็นโครงสร้างชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ที่มีความลึกหลายร้อยเมตร และเป็นข้อมูลที่มีความสมบูรณ์มากที่สุดการศึกษาหนึ่งในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาอาจมีข้อผิดพลาดหรือไม่ถูกต้องเกิดขึ้นได้ เนื่องจากเป็นการคำนวณด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการเจาะสำรวจชั้นดินจริงในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เพื่อยืนยันความถูกต้องอีกครั้ง ซึ่งปัจจุบันข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินถึงระดับความลึกของชั้นหิน หรือมีความลึกหลายร้อยเมตร ยังคงมีข้อมูลในปริมาณที่น้อย
2. อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของแอ่งกรุงเทพฯ มีค่าประมาณ 190 เท่า ในทิศทางตะวันตก-ตะวันออก และมีค่าประมาณ 110 เท่า ในทิศทางเหนือ-ใต้ ดังนั้น การเลือกใช้แบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ จึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า นอกจากนี้ค่าสูงสุดของ Shear Strain ที่เกิดขึ้นยังมีค่าต่ำกว่า 0.30% ทำให้การเลือกใช้วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินจึงยังคงมีความเหมาะสมต่อพื้นที่ดังกล่าว
3. แอ่งกรุงเทพฯ มีขนาดใหญ่ ดังนั้นหากต้องการศึกษาผลกระทบของชั้นดินด้วยแบบจำลอง 2 หรือ 3 มิติ ควรพิจารณาถึงเรื่องระยะเวลาในการคำนวณรวมถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ควรมีประสิทธิภาพในการคำนวณอย่างสูงในการทำงาน
4. หากคลื่นแผ่นดินไหวที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินมีระดับความรุนแรงหรือมีค่า Peak Ground Acceleration ที่ต่ำ สามารถพิจารณาใช้วิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแทนการใช้วิธีไม่เชิงเส้นได้
5. ในกรณีที่วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแล้วค่า สูงสุดของ Shear Strain ในแบบจำลองชั้นดินมีค่ามากกว่า 0.30% ให้เปลี่ยนวิธีคำนวณเป็นวิธีไม่เชิงเส้นแทน เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
6. แบบจำลองแอ่งดินตะกอนตัวอย่างแบบ 2 มิติ ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินกับแบบจำลอง 1 มิติ ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นเพียงแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้สำหรับการศึกษาความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ เท่านั้น ดังนั้น หากต้องการให้ผลตอบสนองมีความสมจริงมากยิ่งขึ้นควรปรับปรุงให้

แบบจำลองมีจำนวนชั้นดินเพิ่มมากขึ้น รวมถึงลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองให้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

7. สำหรับประเทศไทย พื้นที่แอ่งดินตะกอนนอกจากแอ่งกรุงเทพฯ แล้ว ยังมีแอ่งดินตะกอนอื่น ๆ เช่น แอ่งดินตะกอนบริเวณภาคกลางตอนบน หรือภาคเหนือ เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างแอ่งดินตะกอนรวมถึงการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในบริเวณดังกล่าว จึงมีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการนำข้อมูลมาศึกษาเพื่อการพัฒนาความแรงตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นในอนาคต
8. สำหรับแอ่งดินตะกอนอื่น เช่น แอ่งดินตะกอนภาคเหนือ ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ หรือเชียงราย เป็นต้น ในอนาคตอาจทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยการใช้แบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กและยังมีลักษณะทางภูมิประเทศที่สลับซับซ้อนมากกว่าแอ่งกรุงเทพฯ

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2555). *โครงการสำรวจ และศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างเป็นระบบ ในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล*. กรุงเทพฯ.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2552). *มยผ.1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการ สั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์บริษัท ดิจิตอล ออฟเซต เอเชีย แปซิฟิก จำกัด.
- Kramer, L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. United States of America: Prentice-Hall, Inc.
- Okada, H. (2003). *The Microtremor Survey Method*. United State of America: Society of Exploration Geophysicists.
- OYO. (2010). *Operation Manual Model 1134 McSEIS-MT NEO*. Japan: OYO corporation.
- Tokyo Sokushin Co., LTD. *Servo Velocity Meter (VSE-15D-6) Operational Manual*. Japan: Tokyo Sokushin Co., LTD.

บทความวารสาร

- นคร ภู่วโรดม และคณะ (2553). คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของ ชั้นดินเพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่. *รายงาน การวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 2)*.
- อมรเทพ จิรศักดิ์จัญญศรี และนคร ภู่วโรดม (2557). อิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของ ชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณที่ตั้ง. *วิศวกรรมสถานฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 25 ฉบับที่ 2 เมษายน – มิถุนายน พ.ศ. 2557*.
- Aki, K. (1957). "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors." *Earthquake Research Institute, Japan*.
- Anzehaee, M.M., Adib, A., and Heydarzadeh, K. (2015). "Using the down sampling technique and running variance method for microtremor data filtering." *Journal of Earthquake Engineering*. Vol.19, pp.1013-1036.

- Apostolidis, P., Raptakis, D., Pandi, K., Manakou, M. and Pitilakis, K. (2006). "Definition of subsoil structure and preliminary ground response in Aigion city (Greece) using microtremor and earthquakes." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, No. 10, pp. 922-940.
- Arai, H. and Yamazaki, F. (2002). "Exploration of S-wave Velocity Structures using Microtremor Arrays in Bangkok, Thailand." *Earthquake Disaster Mitigation Research Center, Japan*.
- Ashford, S. A., Jakrapyanun, W. and Lukkanaprasit, P. (1997). "Amplification of Earthquake Ground Motions in Bangkok." Final Report on Reserch Sponsored by the Royal Thai Government, *Public Works Department, Ministry of Interior, Thailand*.
- Bard, P.Y. and Gariel, J.C (1986). "The seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.76, No.2, pp.343-346.
- Building Seismic Safety Council. (1995). "1994 Edition NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings." FEMA 222A/223A, Vol. 1 (Provisions) and Vol. 2 (Commentary), *Developed for the Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.*
- Chávez-García, F.J., Sánchez, L.R. and Hatzfeld, D. (1996). "Topographic site effects and HVSR: A comparison between observations and theory." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.86, pp.1559-1573.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M., Field, E.H. and Hatzfeld, D. (1997). "Topographic site effect: A comparison of two nonreference methods." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.87, pp.1667-1673.
- Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y. (2006). "Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh wave in broad wavelength range using microtremor records." *Journal of geophysical research*, Vol.111, B09315.
- Coll, A., Rib, R., Pasenau, M., Escolano, E., Perez, J.S., Melendo, A., Monros, A. (2016). "GiD v.14 user manual." <https://www.gidhome.com>.

- Geli, L., Bard, P.Y., and Jullien, B. (1988). "The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.78, pp.42-63.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2016) "DEEPSOIL 6.1, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ishibashi, I., and Zhang, X. (1993). "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay." *Soils and Foundations*, Vol.33(1), pp.182-191.
- Joyner, W. B., and Chen, A. T. F. (1975). "Calculation of nonlinear ground response in earthquakes." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65(5), pp.1315–1336.
- Kaklamanos, J., Bradley, B. A., Thompson, E. M., and Baise, L. G. (2013). "Critical Parameters Affecting Bias and Variability in Site-Response Analysis using KiK-net Downhole Array Data." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No.3, pp.1733-1749.
- Kaklamanos, J., Baise, L.G., Thompson, E.M., and Dorfmann, L. (2015). "Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 69, pp.207-219.
- Konno, K., and Ohmachi, T. (1998). "Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241.
- Larkin, T., and Marsh, J. (1991). "Two-dimensional nonlinear site response analysis." *Pacific Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand,
- Lee, C. P., Tsai, Y.B., and Wen, K. L. (2006). "Analysis of nonlinear site response using the LSST downhole accelerometer array data." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.26(5), pp.435–460.
- Lermo, J., Francisco, S., and Chavez-Garcia, F.J. (1992). "Site effects evaluation using microtremor: a review(abstract)." *EOS* 73, 352.

- Lermo, J., and Chavez-Garcia, F.J. (1993). "Site effects evaluation using spectral ratios with only one station." *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 83, No. 5, pp.1574-1594.
- Lermo, J., and Chavez-Garcia, F.J. (1994). "Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp.1350-1364.
- Likitlersuang, S., Teachavorasinskun, S., Surarak, C., Oh, E., and Balasuramaniam, A. (2013). "Small strain stiffness and degradation curves of Bangkok clays." *Soil and Foundations*, Vol.53, No.4, pp.498-509.
- Manakou, M. V., Raptakis, D. G., Chavez-Garcia, F. J., Apostolidis, P. I., and Pitilakis, K. D. (2010). "3D soil structure of the Mygdonia basin for site response analysis." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, pp.1198–1211.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006). "OpenSees command language manual; Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees). *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*. University of California, Berkeley, California, USA.
- Morikawa, H., Sawada, S., and Akamatsu, J. (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.
- Nakamura, Y. (1989). "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface." *Quarterly Report of RTRI*, vol. 30, No.1, Page 25-33.
- Ohmachi, T., Nakamura, Y., and Toshinawa, T. (1991). "Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by microtremor measurements." *Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Adv. In Geol. Earth. Eng. And Soil Dyn.* 11-15 March, St. Louis, Missouri, pp.1643-1648.
- Papanikolaou, V. K., Kartalis-Kaounis, T., Protopapadakis, V.K. and Papadopoulos, T. (2017). "GiD+ OpenSees Interface: An Integrated Finite Element Analysis Platform." *Lab of R/C and Masonry Structures, Aristotle University of Thessaloniki, Greece*.

- Phien-wej, N., Giao, P.H., and Nutalaya, P. (2006). "Land subsidence in Bangkok, Thailand." *Engineering Geology*, Vol. 82, pp. 187-201.
- Piancharoen, C. (1976). "Ground water and land subsidence in Bangkok, Thailand." *International Association of Hydrological Sciences Proceedings of the Anaheim Symposium*.
- Poovarodom, N. and Plalinyot, N. (2012). "Evaluation of Site Effects in the Greater Bangkok by Microtremor Observations." *Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, paper No. 4115, Lisbon, Portugal.
- Rau, J.L., and Nutalaya, P. (1983). "Geology of the Bangkok clay." *Geological Society of Malaysia Bulletin Vol.16*. pp.99-116.
- Schnabel, P.B., Seed, H.B. and Lysmer, J. (1972). "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites." *Report No. UCB/EERC-72/12*, University of California, Berkeley, December, 102p.
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J.I., Jaime A. and Lysmer J. (1987). "Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions in Mexico City in the Earthquake of September 19, 1985." *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. UCB/EERC-87/15.
- Shibuya, S. and Hanh, L.T. (2001). "Estimating undrained shear strength of soft clay ground improved by pre-loading with PVD case history in Bangkok." *Soils and Foundations*. Vol.41, Issue 4, pp.95-101.
- Shibuya, S. and Tamrakar, S.B. (1999). "In-situ and laboratory investigations into Engineering properties of Bangkok clay." *Proc. Of Int. Symp. Characterization of Soft Marine Clays Bothkennar, Drammen, Quebec and Ariake Clays*, Ballkema.
- Shibuya, S., Tamrakar, S.B., and Manakul, W. (2003). "Geotechnical hazards in Bangkok-present and future." *Lowland Technology International*, 5(1), pp.1-13.
- Silva, W.J., R.B. Darragh, N. Gregor, G. Martin, N.A. Abrahamson, and C. Kircher (2000). "Reassessment of site coefficients and near-fault factors for building code provisions." *Report to U.S. Geological Survey*, National Earthquake Hazards Reduction Program.

- Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A. (2001). "Ground motion evaluation procedures for performance-based design." *PEER Report 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.*
- Stewart, J.P., Choi, Y., Graves, R.W. (2005). "Empirical characterization of site conditions on strong ground motion." *PEER Report 2005/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.*
- Teachavorasinskun, S., Thongchim, P., and Lukkunaprasit, P. (2002). "Shear modulus and damping of soft Bangkok clays." *Can. Geotech. J., Vol.39*, pp.1201-1208.
- Thenhaus, P.C. (1986). "Site Response from Distant Large Earthquake and Issues Concerning the Earthquake Hazard at Bangkok, Thailand." *Proc. 1st Workshop on Earthquake Engineering and Hazard Mitigation, Bangkok, Thailand.*
- Tokimatsu, K. (1997). "Geotechnical Site Characterization Using Surface Wave." *Proc., 1st International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, 3, pp.1333-1367.
- Tuladhar, R. (2002). "Seismic Microzonation of the Greater Bangkok Area using Microtremor Observations." *Asian Institute of Technology Thailand.*
- Tuladhar, R. (2003). "Classification of Soil Profile and Seismic Response Analysis (Elastic) in the Greater Bangkok Area." *Asian Institute of Technology, Thailand.*
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). "Effect of plasticity on cyclic response." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 117* (1), pp.89-107.
- Yokoi, T. (2005). "Combination of Down Hill Simplex Algorithm with Very Fast Simulated Annealing Method-an Effective Cooling Schedule for Inversion of Surface Wave's Dispersion Curve." *Proc. of the Fall Meeting of Seismological Society of Japan.* B049.
- Yokoi, T. (2008). "Microtremor Array Exploration Technique, SPAC Method." *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, Japan.*

Zhang, J., and Zhao, J.X. (2009). “Response spectral amplification ratios from 1- and 2-dimensional nonlinear soil site models.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol.29, pp.563-573.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED): Strong-motion Seismograph Networkks (K- NET, KiK- net) . (2018) . <http://www.kyoshin.bosai.go.jp>. Accessed 10 July 2018.

วิทยานิพนธ์

กิตติศักดิ์ พิทักษ์วงศ์. “การวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัดการสั่นของคลื่นผิวดินแบบ 2 จุดพร้อมกัน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2553.

นนทกร ผลินยศ. “คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2555.

อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี. “การแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียดโดยคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งสำหรับกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2556.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายอมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี
วันเดือนปีเกิด	17 มกราคม 2531
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2560: ปรัชญาดุขฎฐิบัณทิต สาขาวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่ง	-
ทุนการศึกษา (ถ้ามี)	2559: ทุนวิจัยต่างประเทศระยะสั้นสำหรับนักศึกษา ระดับปริญญาเอก 2557-2559: ทุนการศึกษามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับนักศึกษาปริญญาเอก 2553: ทุนการศึกษาต่อเนื่องสำหรับนักศึกษาระดับ ปริญญาตรีจากบริษัท พุกกษา เรียลเอสเตท จำกัด (มหาชน) 2552-2553: ทุนนักศึกษาแลกเปลี่ยนโครงการ STEPS ณ มหาวิทยาลัยไซตามะ ประเทศญี่ปุ่น 2551: ทุนเรียนดีสำหรับนักศึกษาที่ได้ผลการเรียนสูงสุด ในรุ่นประจำปีการศึกษา 2551

ผลงานทางวิชาการ

นคร ภูวโรตม และ อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี. (2558). “ผลจากคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งต่อการสิ้นสะท้อนในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม 2557.” วารสารวิศวกรรมฉบับวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน 2558.

อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี และ ศรีณยู ลอยอ่ำ. “การทบทวนข้อมูลทางธรณีเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2554.

- อมรเทพ จิรศักดิ์จํารูญศรี. “การแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียดโดยคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งสำหรับกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2556.
- อมรเทพ จิรศักดิ์จํารูญศรี และ นคร ภู่วโรดม. (2557). “อิทธิพลของความเร็วคลื่นเฉือนและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินต่อความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับกรุงเทพมหานคร.” *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19*. 14-16 พฤษภาคม 2557 จ.ขอนแก่น.
- อมรเทพ จิรศักดิ์จํารูญศรี และ นคร ภู่วโรดม. (2557). “อิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณที่ตั้ง.” *วารสารวิศวกรรมฉบับวิจัยและพัฒนา*. ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน 2557.
- Jirasakjamroonsri, A., Poovarodom, N. (2015). “Estimation of phase velocity of deep soil in Bangkok by spatial autocorrelation (spac) and centerless circular array (cca) methods.” *The 4th international symposium of engineering, energy and environment*. 8-10 November 2015, Thammasat University, Thailand.
- Jirasakjamroonsri, A., Poovarodom, N. (2017). “Simple techniques for estimating shear wave velocity profiles.” *The 15th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 11-13 October 2017. Xi’an, China.
- Jirasakjamroonsri, A., Poovarodom, N., and Warnitchai, P. (2018). “Seismic site characteristics of shallow sediments in Bangkok metropolitan region and their inherent relations.” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1220-3>.
- Poovarodom, N., Chamlagain, D., Jirasakjamroonsri, A., and Warnitchai, P. (2018). “Investigation of site effects in Kathmandu basin from array microtremor observations.” *Eleventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Integrating Science, Engineering & Policy*. 25-29 June 2018. Los Angeles, California.
- Poovarodom, N., Jirasakjamroonsri, A. (2014). “Evaluation of seismic site effects in Chiangrai, Thailand after 2014 earthquake.” *5th Asia Conference on Earthquake Engineering*. 16-18 October 2014. Taipei, Taiwan.

- Poovarodom, N., Jirasakjamroonsri, A. (2014). "Evaluation of seismic site effects for Bangkok deep basin." *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. 25-29 August 2014. Istanbul, Turkey.
- Poovarodom, N., Jirasakjamroonsri, A., and Plalinyot, N. (2014). "Exploration of the site characteristics by microtremor observation in the central area of Thailand." *10th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, March 1-2, 2013, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- Poovarodom, N., Jirasakjamroonsri, A. (2015). "Investigation of long period amplifications in the greater Bangkok basin by microtremor observations." *Proceedings of the tenth pacific conference of earthquake engineering building and earthquake resiliant pacific*. 6-8 November 2015, Sydney, Australia.
- Poovarodom, N., and Jirasakjamroonsri, A. (2016). "Seismic site effects of soil amplification in Bangkok." *Thammasat International Journal of Science and Technology Vol.21(3)*, pp.59-69.
- Poovarodom, N., Chamlagain, D., Jirasakjamroonsri, A., and Warnitchai, P. (2017). "Site characteristics of Kathmandu valley from array microtremor observations." *Earthquake Spectra Vol.33(S1)*. Doi. 10.1193/121516EQS234M.
- Poovarodom, N. Jirasakjamroonsri, A. and Warnitchai, P. (2017). "Development of new design spectral accelerations for Bangkok considering deep basin effects." *16th World Conference on Earthquake*. 9-13 January 2017. Santiago, Chile.
- Poovarodom, N. Jirasakjamroonsri, A. and Warnitchai, P. (2017). "New Design spectral acceleration of soft and deep deposits in Bangkok." *International Conference on Earthquake engineering and Structural Dynamics*. 12- 14 June 2017. Reykjavik, Iceland.
- Poovarodom, N., Chamlagain, D., Jirasakjamroonsri, A., and Warnitchai, P. (2018). "Investigation of site effects in Kathmandu basin from array microtremor observations." *Eleventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering*. 25-29 June 2018. Los Angeles, California.

ประสบการณ์ทำงาน

2560: นักวิจัย

โครงการตรวจสอบหอบังคับการบินทั่วประเทศจำนวน 30 แห่ง สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบอาคารให้ใหม่หรือปรับปรุงโครงสร้างเดิมให้มีความแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

2554-2559: นักวิจัย

โครงการสำรวจลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observation) ในพื้นที่ของ 14 จังหวัดภาคกลางตอนล่าง, ภาคตะวันตก และภาคเหนือ

2558: นักวิจัย

โครงการสำรวจลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor Observation) ในพื้นที่ของแอ่งดินตะกอนเมือง Kathmandu ประเทศเนปาล

2557: นักวิจัย

โครงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนบนหอบังคับการบินสุวรรณภูมิแบบ Long-Term เพื่อดูระดับการสั่นไหวที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำภายนอก

2557: วิศวกรอาสา

โครงการสำรวจความเสียหายของบ้านเรือนในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว และทำการสำรวจลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินในพื้นที่ของจังหวัดเชียงราย

2556: นักวิจัย

โครงการสำรวจลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบโครงข่าย (Array Microtremor Observation) ในพื้นที่ของเมือง Manila ประเทศฟิลิปปินส์

2555: นักวิจัย

โครงการสำรวจลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วย
วิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กบนผิวดินแบบ
โครงข่าย (Array Microtremor Observation) ในพื้นที่
ของเมือง Mymensingh ประเทศบังคลาเทศ

