

การวิเคราะห์ผลตอบแทนของชั้นดินกรุงเทพต่อแผ่นดินไหวโดยคำนึงถึงความแปรปรวนของความเร็ว  
คลื่นเฉือนในดิน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

SITE RESPONSE ANALYSIS OF BANGKOK CONSIDERING VARIATION OF SHEAR WAVE  
VELOCITY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering  
Department of Civil Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2017  
Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพต่อ  
แผ่นดินไหวโดยคำนึงถึงความแปรปรวนของความเร็วคลื่น  
เฉือนในดิน

โดย

นายภาณุสรณ์ เปล่งสิริ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรวัตร บุญญะฐิติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

ภาณุสรณ์ เปล่งสิริ : การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพต่อแผ่นดินไหวโดยคำนึงถึงความแปรปรวนของความเร็วคลื่นเฉือนในดิน (SITE RESPONSE ANALYSIS OF BANGKOK CONSIDERING VARIATION OF SHEAR WAVE VELOCITY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, หน้า.

ปัจจุบันประเทศไทยประสบเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงบ่อยครั้งขึ้น เช่นในปี พ.ศ.2554 และ พ.ศ.2557 เกิดแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อกรุงเทพมหานคร ผู้คนที่อาศัยอยู่ในอาคารสูงสามารถรับรู้ถึงแรงสั่นไหวได้อย่างชัดเจน เนื่องจากชั้นดินเหนียวอ่อนหนาสามารถขยายกำลังคลื่นสั่นไหวได้ แม้จุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวจะอยู่ไกลก็ตาม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมผลตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพจากคลื่นสั่นไหวโดยคำนึงถึงความแปรปรวนของความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน ใช้แบบจำลองมอดัลคาลโลเพื่อวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว ด้วยการสุ่มข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของชั้นดินกรุงเทพและประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและจำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน อีกทั้งใช้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวที่ประมาณได้จากค่าดัชนีพลาสติก การวิเคราะห์จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ที่สถานีตรวจวัดแม่สายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวทาร์เลย์ในปี พ.ศ.2554 ส่งผ่านมาถึงชั้นดินกรุงเทพด้วยแบบจำลองการลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่ ในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวด้วยวิธีหนึ่งมิติแบบไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม DEEPSOIL และแสดงผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของชั้นดินกรุงเทพในรูปแบบของ ความเร่งผิวดินสูงสุด ความเร่งเชิงสเปกตรัม และแพกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน อีกทั้งยังหาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรก ( $V_{s30}$ ) และความหนาของชั้นดินอ่อน ที่มีต่อแพกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน นอกจากนี้ยังสามารถนำผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวทาร์เลย์มาเปรียบเทียบกับกฎหมายการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถแสดงผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวได้ครอบคลุมในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และแสดงให้เห็นว่าชั้นดินอ่อนสามารถขยายกำลังของคลื่นสั่นไหวได้อย่างชัดเจน อีกทั้งเสนอผลทางสถิติของการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวในอนาคตได้อย่างเหมาะสม

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970285221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: GROUND RESPONSE ANALYSIS / NONLINEAR ANALYSIS / 3D GEOLOGICAL MODEL / TARLAY EARTHQUAKE

PANUSORN PLENGSIRI: SITE RESPONSE ANALYSIS OF BANGKOK CONSIDERING VARIATION OF SHEAR WAVE VELOCITY. ADVISOR: PROF. SUCHED LIKITLERSUANG, DPhil., pp.

Currently, Thailand experiences frequent earthquakes such as the events in 2011 and 2014. The recent earthquakes have affected to Bangkok area in which many people live in the high-rise buildings could obviously feel the shaking. Since the thick soft Bangkok soil can magnify ground acceleration even the epicenter of earthquake is very far. This work aims to study the ground response of Bangkok subsoils due to remote earthquake considering variation of shear wave velocity. Monte Carlo Simulation is performed to analyze the statistical values of ground response. Based on the 3D geological model of Bangkok, the random soil profile can be generated. The shear wave velocity can be calculated from the empirical formulae. The input ground motion employs the recorded ground motion at Mae Sai Station during Tarlay Earthquake 2011 in cooperated with the NGA model. The analysis is based on the one-dimensional nonlinear ground response analysis method using DEEPSOIL program. The analysis results present the peak ground acceleration (PGA), spectral acceleration (SA) and amplification factor. The results can suggest the relationships of the average shear-wave velocity in the top 30 m ( $V_{s30}$ ), the thickness of soft clay layer and the amplification factor. In addition, the spectral accelerations of Tarlay earthquake 2011 are compared with the earthquake resistance design code of Thailand. The results of ground response analysis indicate that the characteristic of Bangkok subsoils can significantly amplify the ground motion due to remote earthquake. Finally, a summary of the statistical values from ground response analysis presented in this study can be used to improve the building design code in the future.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำงานวิจัยครั้งนี้รวมถึงช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่มีในงานวิจัยครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษชน และ รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวีตร บุญญะฐิติ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำแนะนำในการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ รวมถึงให้ความรู้เพิ่มเติม ตรวจสอบ แก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ่งต่อ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจระหว่างการดำเนินงาน

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ผู้เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้ความรู้ในศาสตร์สาขาต่างๆ ผู้เขียนจะระลึกถึงพระคุณเหล่านี้จนกว่าชีวิตจะหาไม่

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนการศึกษาวิศวกรรมโยธา 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## สารบัญ

|                                                                  | หน้า |
|------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                             | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                          | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                             | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                      | ช    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                | 1    |
| สารบัญตาราง.....                                                 | 4    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                | 5    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                          | 5    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                 | 6    |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....                                          | 6    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                               | 7    |
| 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....                                      | 7    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                       | 8    |
| 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหว.....                       | 8    |
| 2.2 ความรุนแรงและขนาดของแผ่นดินไหว.....                          | 9    |
| 2.2.1 ความรุนแรงของแผ่นดินไหว.....                               | 9    |
| 2.2.2 ขนาดของแผ่นดินไหว.....                                     | 10   |
| 2.3 ตัวแปรด้านขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว (Amplitude parameters)..... | 13   |
| 2.3.1 ความเร่งสูงสุด (Peak acceleration).....                    | 13   |
| 2.3.2 ความเร็วสูงสุด (Peak velocity).....                        | 14   |
| 2.3.3 การเคลื่อนตัวสูงสุด (Peak displacement).....               | 14   |
| 2.3.4 Sustained maximum acceleration and velocity.....           | 14   |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.5 Effective design acceleration .....                                   | 14 |
| 2.4 ระบบการตรวจวัดแผ่นดินไหวในประเทศไทย .....                               | 14 |
| 2.5 แผ่นดินไหวในพม่าปี พ.ศ. 2554.....                                       | 15 |
| 2.6 แบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่น (Attenuation Model) .....                     | 15 |
| 2.7 สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพฯ.....                                        | 17 |
| 2.7.1 ชั้นดินกรุงเทพฯ .....                                                 | 17 |
| 2.7.2 ชั้นหินแข็ง .....                                                     | 18 |
| 2.8 การจัดทำฐานข้อมูลทางธรณีวิทยาของชั้นดินกรุงเทพฯ .....                   | 19 |
| 2.9 การจำแนกชั้นดินที่ตั้งของอาคาร.....                                     | 20 |
| 2.10 ความเร็วคลื่นเฉือนในดิน ( $V_s$ ) .....                                | 20 |
| 2.11 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรก ( $V_{s30}$ ).....              | 21 |
| 2.12 คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร .....                                        | 22 |
| 2.13 ผลกระทบจากที่ตั้ง (Site Effects).....                                  | 22 |
| 2.14 สเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ..... | 23 |
| 2.15 โปรแกรม DEEPSOIL .....                                                 | 23 |
| 2.16 สมมติฐานชั้นหินของโปรแกรม DEEPSOIL .....                               | 24 |
| 2.16.1 Rigid half space .....                                               | 24 |
| 2.16.2 Elastic half space.....                                              | 24 |
| 2.17 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                   | 25 |
| บทที่ 3     วิธีการดำเนินงาน .....                                          | 29 |
| 3.1 พื้นที่ที่สนใจในการศึกษา .....                                          | 29 |
| 3.2 การรวบรวมและสร้างข้อมูลชั้นดิน.....                                     | 31 |
| 3.3 การจำลองชั้นดินเพื่อวิเคราะห์และการสร้าง Input Files .....              | 32 |

|         |                                                                 |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.4     | คลื่นแผ่นดินไหวและแบบจำลองลดทอนพลังงาน .....                    | 35 |
| 3.5     | การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยแบบจำลองมอนติคาร์โล .....              | 35 |
| บทที่ 4 | ผลการวิจัย .....                                                | 37 |
| 4.1     | การสุ่มตำแหน่งข้อมูลชั้นดิน .....                               | 37 |
| 4.2     | ชั้นดินอ่อนของชั้นดินกรุงเทพ .....                              | 39 |
| 4.3     | $V_{S30}$ ของชั้นดินกรุงเทพ .....                               | 41 |
| 4.4     | ความเร่งสูงสุดผิวดินจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL .....   | 43 |
| 4.5     | แพกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน .....                               | 45 |
| 4.6     | พิจารณาผลของ $V_{S30}$ ต่อ Amplification factor .....           | 47 |
| 4.7     | พิจารณาผลของความหนาของชั้นดินอ่อนต่อ Amplification factor ..... | 47 |
| 4.8     | Spectral Acceleration of ground surface .....                   | 48 |
| 4.9     | เปรียบเทียบ SA กับมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว .....   | 50 |
| บทที่ 5 | สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....                               | 51 |
| 5.1     | สรุปและอภิปรายผลการวิจัย .....                                  | 51 |
| 5.2     | ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ในงานวิจัย .....                         | 52 |
| 5.3     | ข้อเสนอแนะ .....                                                | 53 |
|         | .....                                                           | 57 |
|         | รายการอ้างอิง .....                                             | 57 |
|         | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....                                | 59 |



## สารบัญรูปภาพ

|          |                                                                                                                                                                                     |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูป 2-1  | ภาพแนวแผ่นดินไหว และรอยเลื่อนของประเทศไทย .....                                                                                                                                     | 8  |
| รูป 2-2  | ภาพแสดงขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณโดยวิธีต่างๆ .....                                                                                                                                  | 13 |
| รูป 2-3  | คลื่นสั้นไหวที่บันทึกได้จากสถานีตรวจวัดแม่สายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวทาร์เลย์ ..                                                                                                      | 15 |
| รูป 2-4  | ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในกรุงเทพฯที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี Array<br>microtremor .....                                                                                          | 18 |
| รูป 2-5  | แบบจำลองความหนาชั้นดินแบบ Stratigraphy.....                                                                                                                                         | 19 |
| รูป 2-6  | ภาพตัดสามมิติจำลองความหนาชั้นดินและตำแหน่งของแต่ละหลุมเจาะ .....                                                                                                                    | 19 |
| รูป 2-7  | ตำแหน่งต่างๆขณะเกิดแผ่นดินไหว.....                                                                                                                                                  | 22 |
| รูป 2-8  | สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับโซนต่างๆ<br>ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ .....                                                                                | 23 |
| รูป 2-9  | Soil column overlaying rigid bedrock.....                                                                                                                                           | 24 |
| รูป 2-10 | Soil column overlaying elastic bedrock.....                                                                                                                                         | 25 |
| รูป 2-11 | Variation of normalized modulus ratio with shear strain and Variation<br>of damping ratio with shear strain for different frequencies.....                                          | 26 |
| รูป 2-12 | Relations between $G/G_{mm}$ versus cyclic shear strain and Damping<br>ratio versus cyclic shear strain Curves and Soil Plasticity for Normally<br>and Overconsolidated Soils ..... | 26 |
| รูป 2-13 | PGA ที่ประมาณได้จาก NGA models เทียบกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง<br>แผ่นดินไหว .....                                                                                                  | 28 |
| รูป 3-1  | แผนที่แสดงเขต 50 เขตของกรุงเทพมหานคร .....                                                                                                                                          | 29 |
| รูป 3-2  | ตำแหน่งหลุมเจาะบริเวณกรุงเทพฯและจังหวัดใกล้เคียง .....                                                                                                                              | 31 |
| รูป 3-3  | การกำหนดตำแหน่งของ 3D Geological Model ของกรุงเทพฯ .....                                                                                                                            | 31 |
| รูป 3-4  | ข้อมูลชั้นดินที่ได้จาก 3D geological model ของกรุงเทพฯ .....                                                                                                                        | 32 |

|          |                                                                                                           |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูป 3-5  | ตัวอย่างไฟล์ .dp ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL .....                                       | 32 |
| รูป 3-6  | หน้าต่างการใช้งานและการใส่ Input ของโปรแกรม DEEPSOIL .....                                                | 33 |
| รูป 3-7  | สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์.....                                                                           | 34 |
| รูป 3-8  | คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับเป็นคลื่นเริ่มต้นในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อ<br>แผ่นดินไหว .....                | 35 |
| รูป 3-9  | ตำแหน่งของชั้นดินที่ถูกสร้างขึ้นมาจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของ<br>กรุงเทพ.....                       | 36 |
| รูป 4-1  | ความหนาของชั้นดินอ่อนจากชั้นดิน 1,000 ตำแหน่ง .....                                                       | 39 |
| รูป 4-2  | การกระจายตัวของความหนาของชั้นดินอ่อนในพื้นที่กรุงเทพ .....                                                | 40 |
| รูป 4-3  | แผนที่เส้นชั้นความสูงของความหนาของชั้นดินอ่อนกรุงเทพ.....                                                 | 40 |
| รูป 4-4  | ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรกของชั้นดินกรุงเทพ .....                                             | 41 |
| รูป 4-5  | ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรกแต่ละตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพ.....                                   | 42 |
| รูป 4-6  | แผนที่เส้นชั้นความสูงของ $V_{s30}$ ของพื้นที่กรุงเทพ.....                                                 | 42 |
| รูป 4-7  | PGA ในแต่ละระดับความลึกของชั้นดิน .....                                                                   | 43 |
| รูป 4-8  | การกระจายตัวของได้จากการหาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวทาร์เลย์ .....                                            | 44 |
| รูป 4-9  | แผนที่เส้นชั้นความสูงของ PGA ในพื้นที่กรุงเทพ .....                                                       | 44 |
| รูป 4-10 | การกระจายตัวของแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินที่ได้จากการวิเคราะห์หา<br>ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวทาร์เลย์ ..... | 45 |
| รูป 4-11 | การกระจายตัวของแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพ.....                                           | 46 |
| รูป 4-12 | แผนที่เส้นชั้นความสูงของแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพ .....                                 | 46 |
| รูป 4-13 | ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{s30}$ และ Amplification factor .....                                              | 47 |
| รูป 4-14 | ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นดินอ่อนต่อแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน.....                                   | 48 |
| รูป 4-15 | ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากคลื่นสั้นไหวทาร์เลย์.....                                                         | 49 |
| รูป 4-16 | อัตราการขยายกำลังเชิงสเปกตรัมจากคลื่นสั้นไหวทาร์เลย์ .....                                                | 49 |

|          |                                                                                                              |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูป 4-17 | การเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวเชิงสเปกตรัมกับมาตรฐานการ<br>ออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว มยผ. 1302 ..... | 50 |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## สารบัญตาราง

|           |                                                                |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------|----|
| ตาราง 2-1 | อันดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์คัลลี.....           | 9  |
| ตาราง 2-2 | ประเภทดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพ .....        | 18 |
| ตาราง 2-3 | การจำแนกประเภทชั้นดิน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552).....     | 20 |
| ตาราง 3-1 | รายชื่อเขตในกรุงเทพเรียงตามขนาดพื้นที่ .....                   | 29 |
| ตาราง 3-2 | คุณสมบัติของดินสำหรับการวิเคราะห์ Site response analysis ..... | 34 |
| ตาราง 4-1 | เขตการปกครองและข้อมูลจากการสุ่ม .....                          | 37 |
| ตาราง 5-1 | ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่ได้จากการวิเคราะห์.....               | 51 |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยประสบเหตุการณ์แผ่นดินไหวบ่อยครั้ง ทั้งในภาคเหนือ, ภาคตะวันตก, และภาคใต้ของประเทศไทยเนื่องจากมีรอยเลื่อนกระจายตัวอยู่ จึงทำให้เกิดผลกระทบทั้งในระดับเล็กน้อยซึ่งประชากรไม่รับรู้ถึงความสั่นไหว ไปจนถึงความรุนแรงที่สร้างความเสียหายให้กับสิ่งปลูกสร้างและบ้านเรือน เมื่อไม่นานมานี้ มีแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2554 เกิดขึ้นในประเทศพม่ามีศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากจังหวัดเชียงรายเพียง 70 กิโลเมตร สร้างความเสียหายแก่อาคารสถานที่ เส้นทางคมนาคม และบ้านเรือนของประชาชน และปี พ.ศ. 2557 เกิดแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย เป็นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดอาคารพังถล่มลงมาเป็นครั้งแรก และเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ที่มีค่าความเร่งผิวดินสูงสุด (PGA) สูงที่สุดที่เคยวัดได้ในประเทศไทย ทั้ง 2 คลื่นมีความรุนแรงเพียงพอที่ผู้คนที่อาศัยอยู่ในอาคารสูงบริเวณกรุงเทพมหานครสามารถรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจน

ที่ผ่านมาได้มีการทำวิจัยถึงผลกระทบที่เกิดจากแผ่นดินไหว เป็นแบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่น (Attenuation model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถประมาณความเร่งของดินได้จากระยะทางที่ห่างออกมาจากแหล่งกำเนิดคลื่น เมื่อคลื่นแผ่นดินไหวเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดมายังผิวดินกรุงเทพฯ คลื่นแผ่นดินไหวจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นชั้นหินมาจนถึงหินบริเวณใต้ชั้นดินกรุงเทพฯ และเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินของกรุงเทพฯมายังผิวดิน แต่เนื่องจากดินกรุงเทพฯมีสภาพเป็นดินเหนียวอ่อน ทำให้สามารถขยายความรุนแรงของการสั่นสะเทือนได้

กรุงเทพฯมีความแปรปรวนของชั้นดินในด้านความลึก, ความแข็งแรง, และความหนาแน่น ซึ่งมีอิทธิพลมาจากดินตะกอนลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งในปัจจุบันมีการจัดทำข้อมูลชั้นดินกรุงเทพฯออกมาในรูปแบบของแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ (3D geological model) โดยใช้ข้อมูลหลุมเจาะจำนวนมากในบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลในการสร้างภาพตัดขวาง และจัดทำชุดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ 3



มิติ โดยใช้การระบุตำแหน่งด้วยระบบพิกัดกริดแบบยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator - UTM) เพื่อใช้ในการค้นหาข้อมูลชั้นดิน

การคำนวณหาผลตอบสนองแผ่นดินไหวใช้การวิเคราะห์ 1 มิติแบบไม่เชิงเส้น (1D Non-Linear Time Domain Analysis) ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL โดยใช้ข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ และคลื่นแผ่นดินไหวในปีพ.ศ. 2554 เพื่อหาความเร่งผิวดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) ความเร่งเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration, SA) และแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน (Amplification factor) ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในการสุ่มข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ เพื่อให้การวิเคราะห์ครอบคลุมความเสี่ยงที่เกิดจากความแปรปรวนของชั้นดินกรุงเทพซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว และหาผลเชิงสถิติของค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรก ( $V_{S30}$ ) ความเร่งผิวดินสูงสุด (PGA) ความเร่งเชิงสเปกตรัม (SA) และ แฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน (Amplification factor) ของชั้นดิน 30 เมตรแรกของกรุงเทพจากคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์ในปีพ.ศ. 2554

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพจากคลื่นสั้นแผ่นดินไหว
2. ประมาณแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินของชั้นดินกรุงเทพในเชิงสถิติ
3. วิเคราะห์ผลความเร่งเชิงสเปกตรัมเทียบกับมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของชั้นดิน 30 เมตรแรกต่อคลื่นแผ่นดินไหว
2. ใช้ข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ
3. ศึกษาการตอบสนองของชั้นดินในลักษณะ 1 มิติแบบไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม DEEPSOIL
4. ใช้คลื่นแผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554 ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว
5. ใช้แบบจำลองการลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่ี่พัฒนาโดย Abrahamson and Silva (2008) ในการประมาณความเร่งผิวดินสูงสุดของคลื่นสั้นไหวในกรุงเทพ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์หาความเร่งผิวดินสูงสุดและความเร่งเชิงสเปกตรัมด้วยวิธี 1 มิติแบบไม่เชิงเส้น
2. สามารถประเมินפקเตอร์กำลังขยายของชั้นดินในแต่ละพื้นที่ในกรุงเทพฯ
3. สามารถเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวกับมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวในพื้นที่กรุงเทพฯ

#### 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. สุ่มข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติด้วยภาษา Python และโปรแกรม Excel
2. สร้างข้อมูล input files สำหรับวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL จากภาษา Python
3. ใช้แบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่มใหม่เพื่อใช้ในการประมาณความเร่งผิวดินสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการวิเคราะห์
4. นำข้อมูลชั้นดินและคลื่นแผ่นดินไหวมาวิเคราะห์ด้วยวิธี 1D Non-Linear Time Domain Analysis ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL
5. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลความเร่งผิวดินสูงสุด ความเร่งเชิงสเปกตรัม และ พกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินเชิงสถิติภายในพื้นที่กรุงเทพฯ

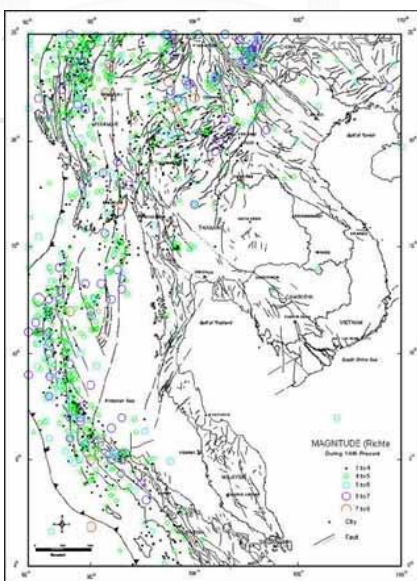
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหวนั้นเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติเพื่อปรับให้เปลือกโลกเข้าสู่ในสภาวะสมดุล ด้วยการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของการสั่นสะเทือน เพื่อระบายความร้อนใต้ชั้นผิวโลกอย่างฉับพลัน โดยทั่วไปแผ่นดินไหวมักเกิดจากรอยเลื่อนที่กระจายตัวอยู่ตามผิวโลก

แผ่นดินไหวเกิดจากการสั่นสะเทือนอันเป็นเหตุผลมาจาก การเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน (fault) จากทฤษฎีที่ว่าด้วยการคืนตัวของวัสดุ (elastic rebound theory) เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ถึงจุดจุดหนึ่ง วัตถุจะขาดออกจากกัน และเสียรูปอย่างมากพร้อมกับการปลดปล่อยพลังงานออกมา และหลังจากนั้นวัตถุก็คืนตัวกลับสู่รูปเดิม ทฤษฎีนี้สนับสนุนแนวความคิดที่ว่า แผ่นดินไหวมีกลไกการกำเนิดเกี่ยวข้องโดยตรงและใกล้ชิดกับรอยเลื่อนที่มีพลัง (active fault) ที่เกิดขึ้นจากผลพวงของการแปรสัณฐานของเปลือกโลก (plate tectonics) ซึ่งในประเทศไทยมีแนวรอยเลื่อนต่างๆ ได้แก่ แนวรอยเลื่อนในประเทศเพื่อนบ้าน พม่า จีนตอนใต้ สาธารณรัฐประชาชนลาว แนวรอยเลื่อนภายในประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันตกแสดงดังรูป 2-1



รูป 2-1 ภาพแนวแผ่นดินไหว และรอยเลื่อนของประเทศไทย

(บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2549)

## 2.2 ความรุนแรงและขนาดของแผ่นดินไหว

ความรุนแรงและขนาดของแผ่นดินไหวนั้นสามารถกำหนดได้หลายวิธี เริ่มจากกระประมาณแบบหยาบด้วยการวัดด้วยความรู้สึก วัดด้วยการเปรียบเทียบ หรือการวัดอย่างละเอียดด้วยเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว

### 2.2.1 ความรุนแรงของแผ่นดินไหว

การวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวเป็นการวัดเชิงคุณภาพถึงความเสียหายและปฏิกิริยาตอบสนองของคน ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่มีต่อแผ่นดินไหว โดยการประมาณความรุนแรงที่นิยมใช้กันในปัจจุบันนิยมใช้การวัดระดับความรุนแรงมาตรา Modified Mercalli Intensity (MMI) ดังตาราง 2-1

ตาราง 2-1      *อันดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์คัลลี*

(สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2559)

| อันดับ | เหตุการณ์แผ่นดินไหว                                                                                                                                                    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I      | ไม่รู้สึกสั่นไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ                                                                                                                              |
| II     | รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว                                                                                                              |
| III    | ผู้อยู่ในอาคารรู้สึก เฉพาะอย่างยิ่งผู้อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว                                                                      |
| IV     | ในเวลากลางวันผู้คนในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้อยู่นอกอาคารรู้สึกบางคน จาน หน้าต่าง ประตูสั่น ความรู้สึกเหมือนรถบรรทุกชนอาคาร                                                |
| V      | เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้ แกว่งไกว                                                                                           |
| VI     | ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน ปล่องไฟแตก เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร                                                                                             |
| VII    | ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เสียหาย เสียหายเล็กน้อยถึงปานกลางกับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดา เสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ขับรถรู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว |

ตาราง 2-1      *อันดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอรัคัลลี*

(สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2559)

| อันดับ | เหตุการณ์แผ่นดินไหว                                                                                                                                                                |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VIII   | เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคารพังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ปล่องไฟพัง ดินและทรายพุ่งขึ้นมา |
| IX     | เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงสร้างก่อสร้างบิดเบนจากแนวตั้ง เสียหายอย่างมากกับอาคารและบางส่วนพังทลาย ตัวอาคารเคลื่อนจากฐานราก พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก                     |
| X      | อาคารไม้ที่สร้างไว้ไม่ดี เสียหาย โครงสร้างอาคารพังทลาย รางรถไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งจากพื้นดิน                                                         |
| XI     | สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่น้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รางรถไฟบิดงอมาก                                                                                   |
| XII    | เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายตาบิดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็นในอากาศ                                                                                               |

### 2.2.2 ขนาดของแผ่นดินไหว

การวัดขนาดแผ่นดินไหวสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ซึ่งในปัจจุบันเครื่องมือการวัดการสั่นสะเทือนได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถใช้ในการนิยามและประมวลผลของขนาดแผ่นดินไหวได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 5 ประเภท แสดงใน

รูป 2-2

Seismic Moment

จากทฤษฎีการคืนตัวทางอีลาสติก (Elastic rebound theory) สามารถประมาณพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากจุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวในรูปของ Seismic Moment ได้ดังสมการ

(1)

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot \bar{D} \quad (1)$$

เมื่อ  $\mu$  = กำลังรับน้ำหนักของหินตลอดแนวรอยเลื่อนแผ่นดินไหว  
 $A$  = พื้นที่การวิบัติ  
 $\bar{D}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของรอยแตก

Richter local magnitude

เป็นประมาณขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระดับตื้น และ จุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ห่างออกไปไม่เกิน 600 กิโลเมตร โดยสามารถประมาณขนาดของแผ่นดินไหวไว้ตั้งสมการ (2)

$$M_L = \log_{10} A_{100} \quad (2)$$

เมื่อ  $M_L$  = ขนาดของแผ่นดินไหวตามคำนิยามของ Richter  
 $A_{100}$  = ขนาดการเคลื่อนที่สูงสุดที่วัดโดย Wood – Anderson Seismograph ( $\mu\text{m}$ ) ที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวเป็นระยะทาง 100 กิโลเมตร

Surface wave magnitude

เป็นวิธีการคำนวณขนาดแผ่นดินไหวที่อยู่ห่างออกจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวมากๆ Body wave ส่วนใหญ่จึงถูกดูดกลืน ทำให้ Surface wave เป็นคลื่นที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของพื้นดิน สามารถประมาณขนาดของแผ่นดินไหวในกรณีนี้ตั้งสมการ (3)

$$M_s = \log_{10} A + 1.66 \log_{10} \Delta + 2.0 \quad (3)$$

เมื่อ  $A$  = ขนาดการเคลื่อนตัวที่ผิวดินสูงสุด ( $\mu\text{m}$ )  
 $\Delta$  = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวของเครื่องมือตรวจวัด

## Body wave magnitude

เป็นการประมาณขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดในระดับลึกมากๆ ทำให้การวัดคลื่นพื้นผิวทำได้ยาก การประมาณขนาดแผ่นดินไหวในลักษณะนี้จึงใช้การคำนวณจาก p-wave ที่ตรวจวัดได้ โดยสามารถประมาณขนาดของแผ่นดินไหวไว้ดังสมการ (4)

$$m_b = \log_{10} A - \log_{10} T + 0.01\Delta + 5.9 \quad (4)$$

เมื่อ  $A$  = ขนาดสูงสุดของ p-wave ( $\mu\text{m}$ )

$T$  = คาบการเคลื่อนตัวของ p-wave

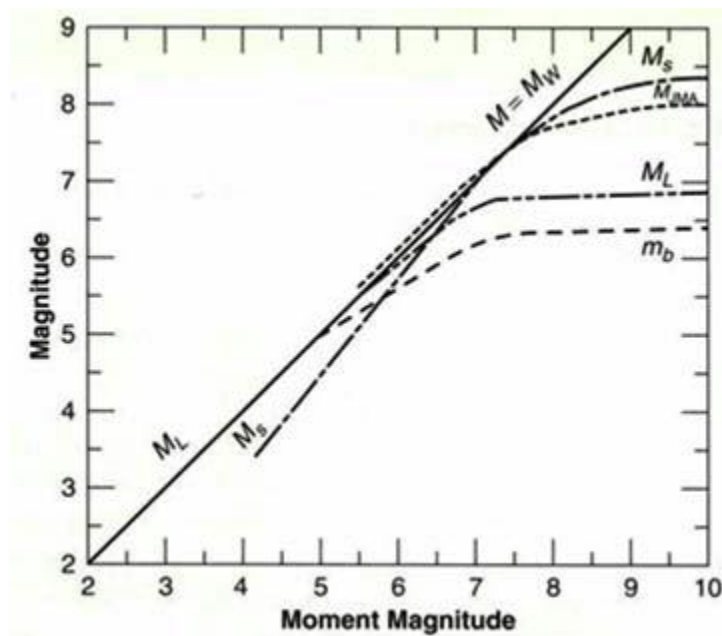
## Moment magnitude

การเคลื่อนตัวของชั้นดินที่สามารถวัดได้จากเครื่องมือตรวจวัดจะไม่ตอบสนองต่อขนาดแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นดังการคำนวณข้างต้น โดย  $m_b$  และ  $M_L$  จะเริ่มอ้อมตัวที่ขนาดประมาณ 6 – 7 และ  $M_s$  จะเริ่มอ้อมตัวที่ขนาดประมาณ 8 ดังรูป 2-2 สามารถประมาณขนาดของ Moment magnitude จากขนาดของแผ่นดินไหวจากค่า Seismic moment ( $M_0$ ) ดังสมการ (5)

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 10.7 \quad (5)$$

เมื่อ  $M_0$  = Seismic moment (dyne-cm)

โดยการวัดขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระดับตื้น โดย  $M_L$  และ  $m_b$  เหมาะสำหรับแผ่นดินไหวที่มีขนาดประมาณ 3 – 7  $M_s$  เหมาะสำหรับแผ่นดินไหวขนาด 5 – 7.5 และ  $M_w$  เหมาะสำหรับแผ่นดินไหวที่มีขนาดมากกว่า 7.5 ขึ้นไป (สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2559)



รูป 2-2 ภาพแสดงขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณโดยวิธีต่างๆ  
(สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2559)

### 2.3 ตัวแปรด้านขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว (Amplitude parameters)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวแผ่นดินไหวโดยละเอียดสามารถทำได้โดยแสดงความสัมพันธ์คือการแสดงกราฟในรูปแบบของความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนตัว กับเวลา

#### 2.3.1 ความเร่งสูงสุด (Peak acceleration)

ค่าความเร่งสูงสุดเป็นค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในแนวราบเนื่องจากส่งผลกระทบต่อโครงสร้างมากกว่าความเร่งในแนวตั้ง เพราะการออกแบบทางโครงสร้างจะมีความปลอดภัยจากแรงโน้มถ่วงสูง และค่าความเร่งสูงสุดในแนวราบมีความสัมพันธ์กับมาตราวัดความรุนแรงแผ่นดินไหว แต่ต้องใช้ระยะเวลา และ ส่วนประกอบความถี่ในการพิจารณาคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนด้วย



### 2.3.2 ความเร็วสูงสุด (Peak velocity)

ค่าความเร็วสูงสุดตามแนวราบเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญเช่นเดียวกับกับความเร่งสูงสุด เนื่องจาก กราฟของความเร็วที่ได้รับอิทธิพลจากคลื่นที่มีความถี่ปานกลาง จึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างอาคารได้ดีกว่าความเร่งสูงสุดแนวราบ

### 2.3.3 การเคลื่อนตัวสูงสุด (Peak displacement)

การเคลื่อนตัวสูงสุดตามแนวราบเป็นตัวแปรที่นิยมใช้กันน้อยมาก เนื่องจากการคำนวณจาก กราฟ ความเร่งสูงสุด และ ความเร็วสูงสุด เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจำนวนมากในกราฟของการเคลื่อนตัว

### 2.3.4 Sustained maximum acceleration and velocity

เป็นการใช้ค่าความเร่งสูงสุดหรือค่าความเร็วสูงสุดที่มีจำนวนรอบของการเกิด 3 และ 5 รอบเป็นตัวแทนของตัวแปรด้านขนาด แต่การคำนวณดังกล่าวมีความซับซ้อนมาก ต้องทำการวิเคราะห์ กราฟความเร่งและความเร็วอย่างละเอียด ทั้งนี้ Sustained maximum acceleration and velocity เป็นตัวชี้วัดที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ความเร่งสูงสุด และ ความเร็วสูงสุด

### 2.3.5 Effective design acceleration

เป็นการหาค่าความเร่งสูงสุดจากคลื่นที่ผ่านการกรองคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 8 Hz แล้ว เนื่องจากความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่สูง ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างมากนัก และ Effective design acceleration จะมีค่าเท่ากับ 1.25 เท่าของความเร่งสูงสุดอันดับที่ 3 ที่ได้จากคลื่นที่ผ่านการกรองเรียบร้อยแล้ว (สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2559)

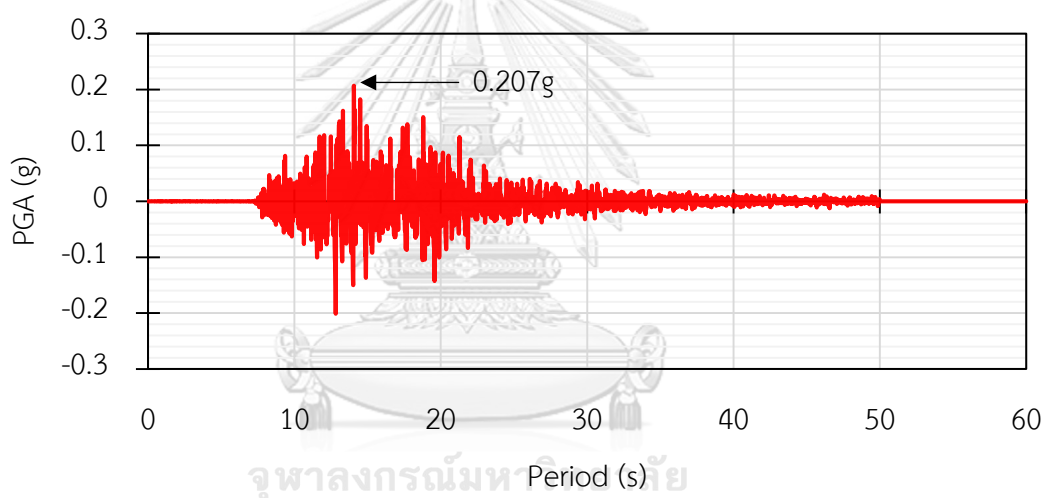
## 2.4 ระบบการตรวจวัดแผ่นดินไหวในประเทศไทย

ระบบเครือข่ายตรวจแผ่นดินไหวในประเทศไทยมี 4 ระบบประกอบด้วย 1. สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักแบบอัตโนมัติสำหรับการหาดำแหน่งศูนย์กลาง ขนาด เวลาเกิด และตรวจวัดความเร่ง

ของพื้นดินเพื่องานวิศวกรรมแผ่นดินไหวในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว 2. สถานีวัดความเร่งของพื้นดินแบบดิจิตอล 3. สถานีวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก และ 4. สถานีวัดระดับน้ำทะเล

## 2.5 แผ่นดินไหวในพม่าปี พ.ศ. 2554

ในวันที่ 24 มีนาคม ปีพ.ศ. 2554 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.8 แมกนิจูดมีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ในประเทศพม่าลึกลงไป 10 กิโลเมตร สามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ ถึงตำแหน่งขนาด เวลาเกิด วัดค่าความเร่งผิวดินสูงสุดได้ 0.207g ที่สถานีตรวจวัดความเร่งผิวดิน MAES ซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวเพียง 31 กิโลเมตร โดยเครือข่ายการตรวจวัดแผ่นดินไหว สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ดังรูป 2-3



รูป 2-3 คลื่นสั้นไหวที่บันทึกได้จากสถานีตรวจวัดแม่สายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวทาร์เลย์ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

## 2.6 แบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่น (Attenuation Model)

แบบจำลองการลดทอนพลังงานคลื่นเป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวกับความเร่งของพื้นดิน ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองการลดทอนพลังงานคลื่นในการประมาณความเร่งของพื้นดิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ไกลออกมาจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

ในปีค.ศ. 2008 ได้มีการเผยแพร่แบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่ (Next Generation Attenuation Model, NGA model) โดย Pacific Earthquake Engineering Research (PEER)

สำหรับประมาณค่าความเร่งผิวดินสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งแบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่นั้นเหมาะสมสำหรับการประมาณคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดจากแผ่นดินไหวตื้น และสามารถแบ่งแบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่ตามความเหมาะสมในการใช้งานได้ 2 ประเภท คือ แบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่สำหรับการประมาณความเร่งผิวดินสูงสุดเมื่อที่ตั้งอาคารเป็นดิน ได้แก่ NGA models ของ Abrahamson and Silva (2008) Boore and Atkinson (2008) Campbell and Bozorgnia (2008) และ Chiou and Youngs (2008) และ แบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่สำหรับการประมาณความเร่งผิวดินสูงสุดเมื่อที่ตั้งอาคารเป็นหิน ได้แก่ NGA model ที่พัฒนาโดย Idriss (2008)

Abrahamson and Silva (2008) พัฒนาแบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่จากแบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นก่อนหน้า (Abrahamson and Silva, 1997) โดยแบบจำลองลดทอนพลังงานคลื่นรุ่นใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถประมาณค่าความเร่งผิวดินสูงสุดของคลื่นสั้นไหวที่อยู่ไกลออกไปได้ดังสมการ (6)

$$\begin{aligned} \ln Sa(g) = & f_1(M, R_{rup}) + a_{12} F_{RV} + a_{13} F_N + f_5(PGA_{1100}, V_{S30}) \\ & + F_{HW} f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, dip, Z_{top}, M) + F_{RV} f_6(Z_{top}) + (1 - F_{RV}) f_7(Z_{top}) \\ & + f_8(R_{rup}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) \end{aligned} \quad (6)$$

- เมื่อ  $M$  = Moment magnitude
- $R_{rup}$  = Rupture distance (km)
- $R_{jb}$  = Joyner-Boore distance (km)
- $R_x$  = Horizontal distance (km) from top edge of rupture  
(Measured perpendicular to the fault strike)
- $Z_{top}$  = Depth-to-top of rupture (km)
- $F_{RV}$  = Flag for reverse faulting earthquakes  
(1 for reverse and reverse/oblique earthquakes defined by rake angles between 30 and 150 degrees, 0 otherwise)

|              |   |                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F_N$        | = | Flag for normal faulting earthquakes<br>(1 for normal earthquakes defined by rake angles between -60 and -120 degrees, 0 otherwise)                                                                                                        |
| $F_{AS}$     | = | Flag for aftershocks<br>(1 for aftershocks, 0 for mainshocks, foreshocks, and swarms)                                                                                                                                                      |
| $F_{HW}$     | = | Flag for hanging wall sites<br>(1 for sites on the hanging wall side of the fault, 0 otherwise. The boundary between the FW and HW is defined by the vertical projection of the top of the rupture. For dips of 90 degrees, $F_{HW} = 0$ ) |
| $Dip$        | = | Fault dip in degrees                                                                                                                                                                                                                       |
| $V_{S30}$    | = | Shear-wave velocity over the top 30 m (m/s)                                                                                                                                                                                                |
| $Z_{1.0}$    | = | Depth to $V_S = 1.0$ km/s at the site (m)                                                                                                                                                                                                  |
| $PGA_{1100}$ | = | Median peak acceleration (g) for $V_{S30} = 1100$ m/s                                                                                                                                                                                      |
| $W$          | = | Down-dip rupture width (km)                                                                                                                                                                                                                |

## 2.7 สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพฯ

### 2.7.1 ชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯเป็นชั้นดินเหนียวที่ค่อนข้างหนา มีความหนาประมาณ 10 – 14 เมตร ซึ่งมีอิทธิพลมาจากดินตะกอนปากแม่น้ำเจ้าพระยาซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นชั้นตามคุณสมบัติได้ดังนี้ ความลึกที่ 0 – 1 เมตรเป็น made ground ความลึกที่ 1 – 10 เมตร เป็น very soft to soft clay ความลึกที่ 10 – 14 เมตร เป็น medium stiff clay ความลึกที่ 14 – 26 เมตร เป็น stiff clay และ first dense sand ที่ระดับความลึก 26 – 37 เมตร very stiff clay ที่ระดับความลึก 37 – 45 เมตร second dense sand ที่ระดับความลึก 45 – 52 เมตร และลึกกว่าระดับนี้จะเป็น hard clay โดยมีคุณสมบัติดังตาราง 2-2

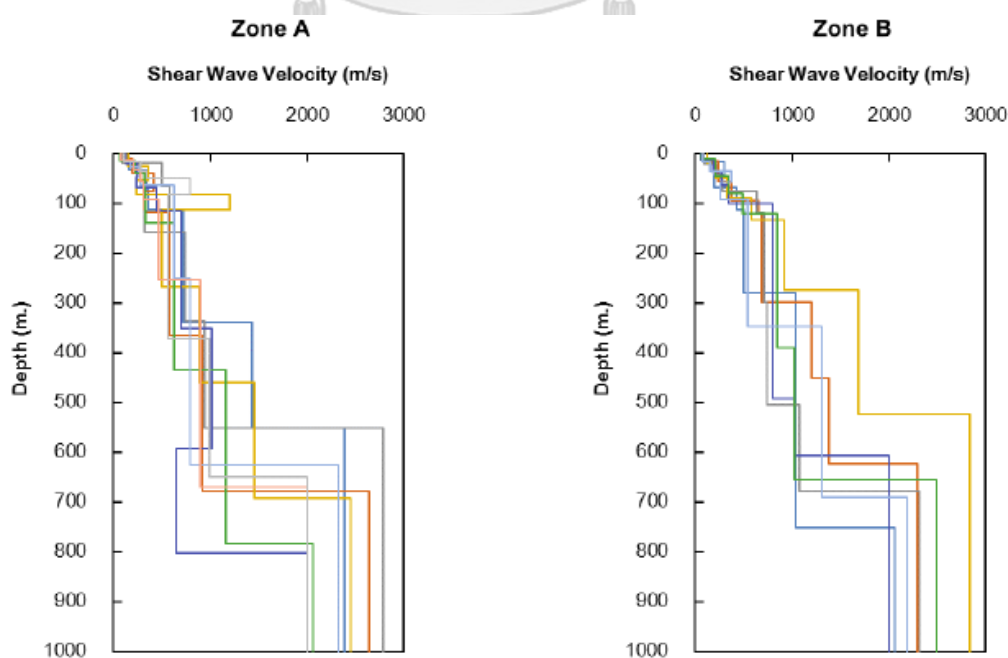
ตาราง 2-2 ประเภทดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพ

ดัดแปลงมาจาก (Horpibulsuk *et al.*, 2007)

| Soil type                | Thickness<br>(m) | Wn<br>(%) | LL<br>(%) | PL<br>(%) | Su<br>(kPa) | Gs     | PI |
|--------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|--------|----|
| Soft clay                | 10±3             | 71±15     | 74±14     | 27±4      | 16±2        | 2.64±2 | 47 |
| Medium stiff clay        | 4±1              | 55±9      | 70±10     | 26±4      | 32±8        | 2.64±3 | 44 |
| Stiff to very stiff clay | 5±3              | 28±5      | 50±13     | 22±5      | 117±25      | 2.65±2 | 28 |
| First sand layer         | 5±4              | 21±6      | —         | —         | —           | Na     |    |
| Very stiff clay          | 16±4             | 21±3      | 48±14     | 21±4      | 270±52      | Na     | 27 |

### 2.7.2 ชั้นหินแข็ง

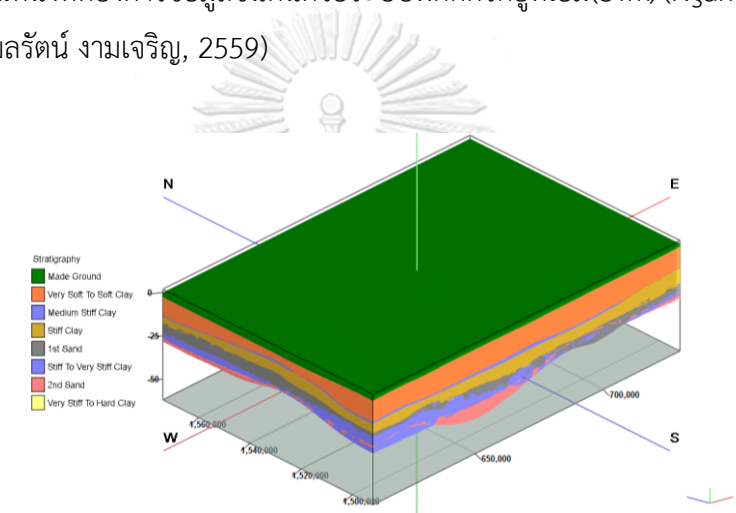
ชั้นหินแข็ง (Bedrock) ของกรุงเทพนั้นวางตัวอยู่ลึกมากจากผิวดิน มีสมมุติฐานว่าชั้นหินแข็งนั้นวางตัวอยู่ลึกใต้กรุงเทพมากถึง 800 เมตรจากผิวดิน ต่อมาได้มีการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยวิธี Microtremor technics และจำแนกประเภทของชั้นดินพบว่าชั้นหินแข็งหรือชั้นที่มีเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเฉือนมากกว่า 2,000 เมตรต่อวินาทีวางตัวอยู่ใต้กรุงเทพมหานครลึกประมาณ 600 – 800 เมตร ดังรูป 2-4 (Poovarodom and Jirasakjamroonsri, 2014)



รูป 2-4 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในกรุงเทพที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี Array microtremor

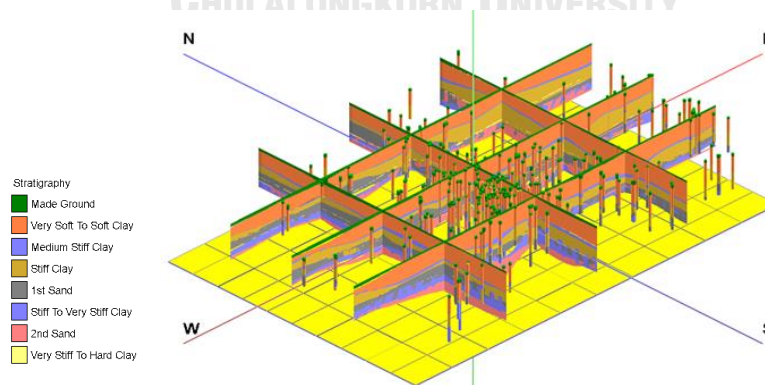
## 2.8 การจัดทำฐานข้อมูลทางธรณีวิทยาของชั้นดินกรุงเทพ

การจัดทำฐานข้อมูลทางธรณีวิทยาของชั้นดินกรุงเทพ เป็นการรวบรวมข้อมูลชั้นดินจากโครงการต่างๆ เพื่อสร้างแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ (3D geological model) ดังรูปรูป 2-5 เพื่อจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบและสามารถนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ต่อได้สะดวก ใช้วิธีการสร้างภาพตัดภาพขวางจากคุณสมบัติดินที่ได้จากการทดสอบในสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ ข้อมูลหลุมเจาะกว่า 500 ตำแหน่งเพื่อความน่าเชื่อถือของแบบจำลองดังรูป 2-6 โดยแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิตินั้น จะแสดงความหนาของชั้นดินเพื่อแสดงการเรียงตัวและคุณสมบัติของชั้นดินในแต่ละพื้นที่สามารถระบุตำแหน่งที่ต้องการข้อมูลชั้นดินด้วยระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม (UTM) (Ngamcharoen *et al.*, 2016) และ (กมลรัตน์ งามเจริญ, 2559)



รูป 2-5 แบบจำลองความหนาชั้นดินแบบ Stratigraphy

(กมลรัตน์ งามเจริญ, 2559)



รูป 2-6 ภาพตัดสามมิติจำลองความหนาชั้นดินและตำแหน่งของแต่ละหลุมเจาะ

(กมลรัตน์ งามเจริญ, 2559)

## 2.9 การจำแนกชั้นดินที่ตั้งของอาคาร

การจำแนกของชั้นดินจะพิจารณาจากคุณสมบัติของชั้นดินตั้งแต่ผิวดินจนถึงความลึก 30 เมตร โดยรายละเอียดการจำแนกประเภทของชั้นดินจะอยู่ดังตาราง 2-3

ตาราง 2-3 การจำแนกประเภทชั้นดิน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)

| ประเภทชั้นดิน | $V_{S30}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | N หรือ $N_{ch}$ | $S_u$        |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|
| A             | >1500 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -               | -            |
| B             | 750 – 1500 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | -               | -            |
| C             | 362 – 750 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | >50             | >100kPa      |
| D             | 180 – 360 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 15 - 50         | 50 – 100 kPa |
| E             | <180 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <15             | <50kPa       |
| F             | <p>มีชั้นดินที่มีความหนามากกว่า 3 เมตร ที่มีคุณสมบัติดังนี้</p> <p>Plasticity Index (PI) &gt; 20</p> <p>Moisture Content (w) &gt; 40%</p> <p><math>S_u &lt; 25</math> kPa</p> <p>ชั้นดินมีโอกาสวิบัติภายใต้แผ่นดินไหว</p> <p>ชั้นดินเหนียวมีวัตถุอินทรีย์อยู่มาก และ มีความหนามากกว่า 3 เมตร</p> <p>มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (มีความหนามากกว่า 7.6 เมตร และมีค่า PI มากกว่า 75)</p> |                 |              |

## 2.10 ความเร็วคลื่นเฉือนในดิน ( $V_s$ )

การทดสอบเพื่อหาความเร็วคลื่นเฉือนในดินสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Cross-hole and Down-hole Seismic Test, Seismic Penetration Test, Spectral Analysis of Surface Waves Test, Micro Tremor Test สำหรับดินทรายสามารถประมาณความเร็วคลื่นเฉือนจาก N-SPT ดังสมการ (7) (Imai, 1981) นอกจากนี้สามารถประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือนจาก down-hole seismic test และ multichannel analysis of surface wave (MASW)

กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ดังสมการ (8) และ (9) ตามลำดับ (Likitlersuang and Kyaw, 2010)

$$V_s = 97N^{0.310} \quad (7)$$

$$V_s = 187\left(\frac{s_u}{p_a}\right)^{0.372} \quad (8)$$

$$V_s = 228\left(\frac{s_u}{p_a}\right)^{0.510} \quad (9)$$

เมื่อ  $V_s$  = ความเร็วคลื่นเฉือนหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที  
 $N$  = จำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน  
 $s_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหน่วยเป็น kPa  
 $p_a$  = แรงดันบรรยากาศหน่วยเป็น kPa

## 2.11 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรก ( $V_{S30}$ )

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรก ( $V_{S30}$ ) เป็นความเร็วเฉลี่ยของคลื่นเฉือนในดินตั้งแต่ผิวดินลงไปจนถึงความลึก 30 เมตร โดยค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรก ( $V_{S30}$ ) ของชั้นดินสามารถคำนวณได้จากสมการ (10)

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (10)$$

เมื่อ  $d_i$  = ความหนาของชั้น  $i$  ใดๆ ในช่วง 30 เมตรแรก  
 $v_{si}$  = เป็นความเร็วคลื่นเฉือนในชั้น  $i$  ใดๆ (m/s)  
 $n$  = จำนวนชั้นดินในช่วงความลึก 30 เมตรแรก



## 2.12 คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร

คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (Fundamental Period,  $T$ ) สามารถประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างคาบการสั่นพื้นฐานและความสูงของอาคารสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและอาคารโครงสร้างเหล็กดังสมการ (11) และ (12) ตามลำดับ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)

$$T = 0.02H \quad (11)$$

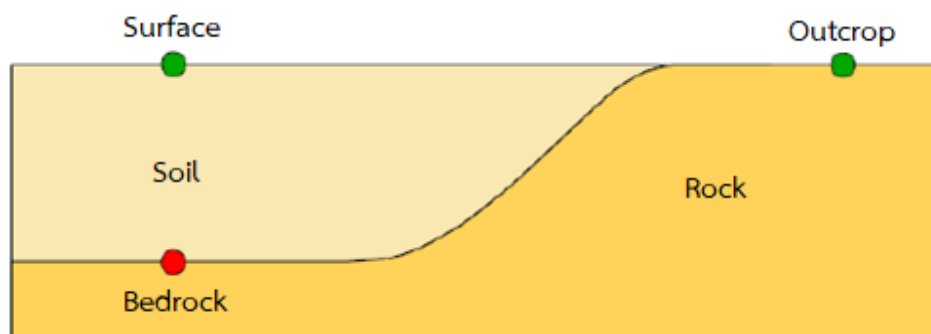
$$T = 0.03H \quad (12)$$

เมื่อ  $T$  = คาบการสั่นพื้นฐานของอาคารหน่วยเป็นวินาที  
 $H$  = ความสูงของอาคารวัดจากพื้นดินหน่วยเป็นเมตร

## 2.13 ผลกระทบจากที่ตั้ง (Site Effects)

เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นสั่นไหวเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเดินทางจากชั้นหินแข็งมายังผิวดิน โดยผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะมีความรุนแรงมากขึ้นหรือลดลงนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน โดยสามารถบอกได้ถึงความสามารถในการเพิ่มหรือลดความรุนแรงของที่ตั้งได้จากสมการ (13)

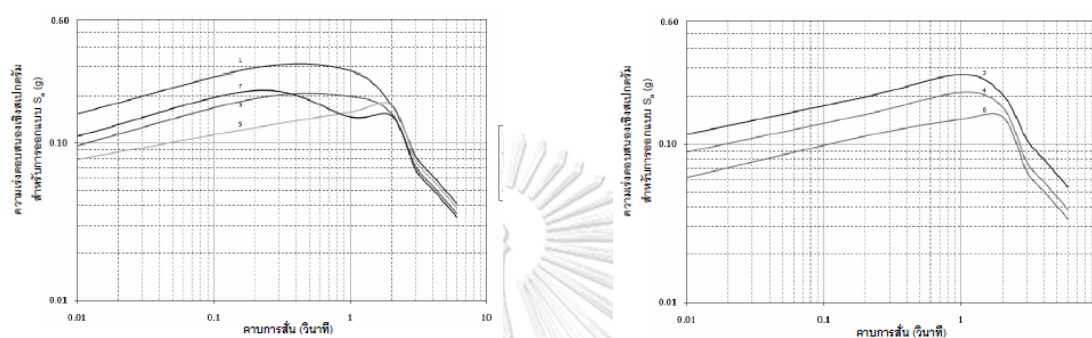
$$\text{Amplification factor} = \frac{a_{\text{free surface}}}{a_{\text{outcrop}}} \quad (13)$$



รูป 2-7 ตำแหน่งต่างๆขณะเกิดแผ่นดินไหว

## 2.14 สเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพ

สำหรับพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพทั้งกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงหลายจังหวัดได้ถูกแบ่งออกเป็น 7 พื้นที่ ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับการออกแบบในพื้นที่ต่างๆ ถูกจัดทำขึ้นสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์แสดงไว้ดังรูป 2-8 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)



(ก) สำหรับโซน 1, 3, 5 และ 7

(ข) สำหรับโซน 2, 4 และ 6

รูป 2-8 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับโซนต่างๆของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

## 2.15 โปรแกรม DEEPSOIL

การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวโดยทั่วไปนั้นจะใช้วิธี Newmark  $\beta$  Method หรือ Duhamel integral solutions เพื่อประมาณผลตอบสนองของระบบแบบตัวแปรอิสระตัวเดียว (Single Degree of Freedom, SDOF)

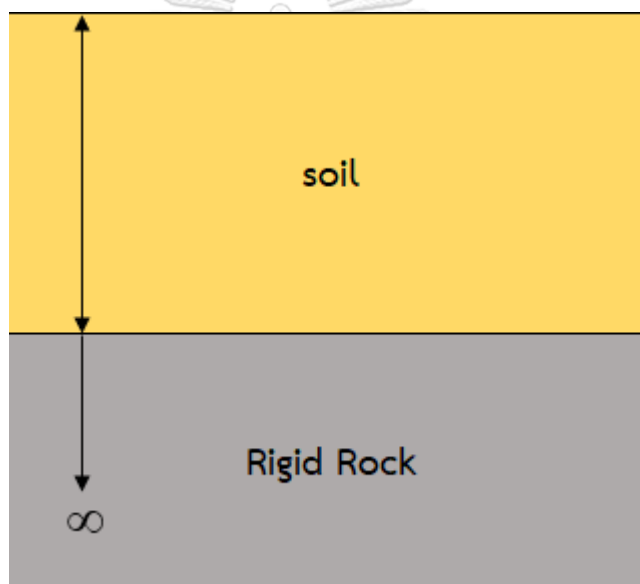
Hashash *et al.* (2016) พัฒนาโปรแกรม DEEPSOIL เพื่อใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว สามารถใช้วิเคราะห์ด้วยวิธี 1 มิติแบบไม่เชิงเส้น (Newmark  $\beta$  Method) ที่ไม่พิจารณาแรงดันจากน้ำใต้ดิน (Pore water pressure) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวได้แก่ ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G) อัตราส่วนทอนกำลัง (Damping ratio) กับ ความเครียดเฉือน (Shear strain) สมมติฐานของชั้นหินแข็ง (Bedrock) และ คลื่นแผ่นดินไหวเพื่อใช้เป็นคลื่นเริ่มต้นในการวิเคราะห์ (Time history ground motion)

## 2.16 สมมติฐานชั้นหินของโปรแกรม DEEPSOIL

ในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวนั้นจะต้องกำหนดสมมติฐานของชั้นหินแข็ง เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยายคลื่นซึ่งโปรแกรม DEEPSOIL ที่พัฒนาโดย Hashash *et al.* (2016) นั้นแบ่งประเภทของชั้นหินเอาไว้ 2 ลักษณะดังนี้

### 2.16.1 Rigid half space

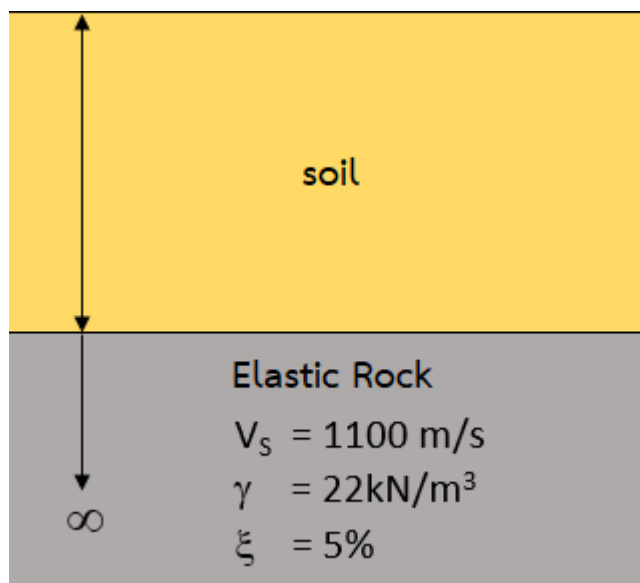
เป็นสมมติฐานของชั้นหินที่ไม่มีการเคลื่อนตัวและวางตัวอยู่ที่ชั้นดินที่สร้างขึ้นลึกลงไปเรื่อยๆ ดังรูป 2-9 โดยจะสามารถใช้สมมติฐาน Rigid half space ได้ก็ต่อเมื่อคลื่นสั้นไหวเริ่มต้นของการวิเคราะห์นั้นเป็นคลื่น ณ ตำแหน่งที่กำหนดชั้นหิน



รูป 2-9 Soil column overlaying rigid bedrock

### 2.16.2 Elastic half space

เป็นสมมติฐานที่ใช้วิเคราะห์สำหรับเหตุการณ์ต่างๆไปโดยชั้นหินที่กำหนดนั้นสามารถเคลื่อนตัวได้เล็กน้อยวางตัวอยู่ที่ชั้นดินที่สร้างขึ้นลึกลงไปเหมือน Rigid half space แต่ชั้นหินมีคุณสมบัติ Elastic ซึ่งสามารถกำหนดค่าความเร็วคลื่นเฉือน หน่วยน้ำหนัก และ อัตราส่วนลดทอนได้ดังรูป 2-10 โดยจะใช้สมมติฐาน Elastic half space เมื่อคลื่นสั้นไหวเริ่มต้นของการวิเคราะห์นั้นเป็นคลื่น ณ ตำแหน่ง Outcrop



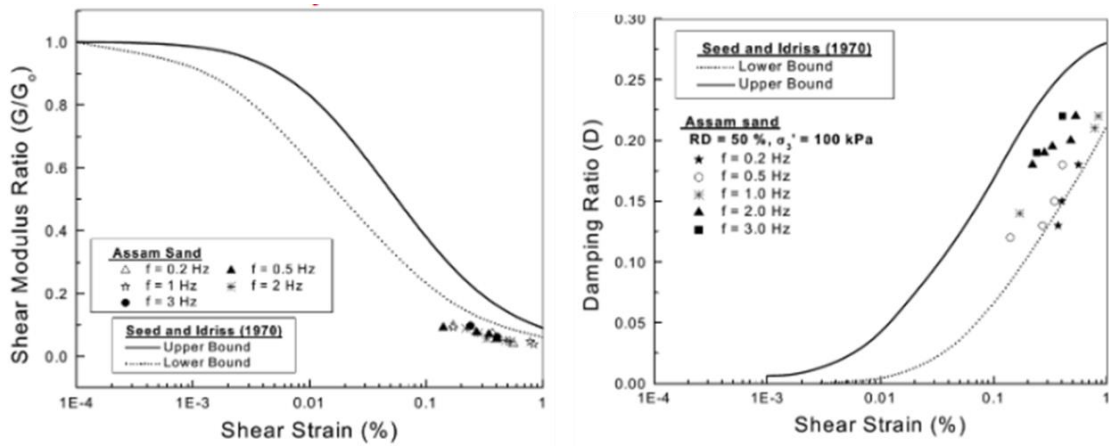
รูป 2-10 Soil column overlying elastic bedrock

## 2.17 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปีพ.ศ. 2528 เกิดเหตุแผ่นดินไหวรุนแรงที่เม็กซิโกซึ่งตีสร้าง ความเสียหายอย่างมากกับตัวเมือง Seed *et al.* (1987) กล่าวถึงสาเหตุถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยมีสาเหตุหลักของการเกิดการขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวคือชั้นดินเหนียวอ่อนที่วางตัวอยู่ใต้เม็กซิโกซิตี ซึ่งการขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวส่วนใหญ่นี้มีอิทธิพลมาจากชั้นดินอ่อนที่วางตัวอยู่บนชั้นดินแข็ง และลักษณะของคลื่นสั้นไหวมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเฉือนในชั้นดินแม้จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

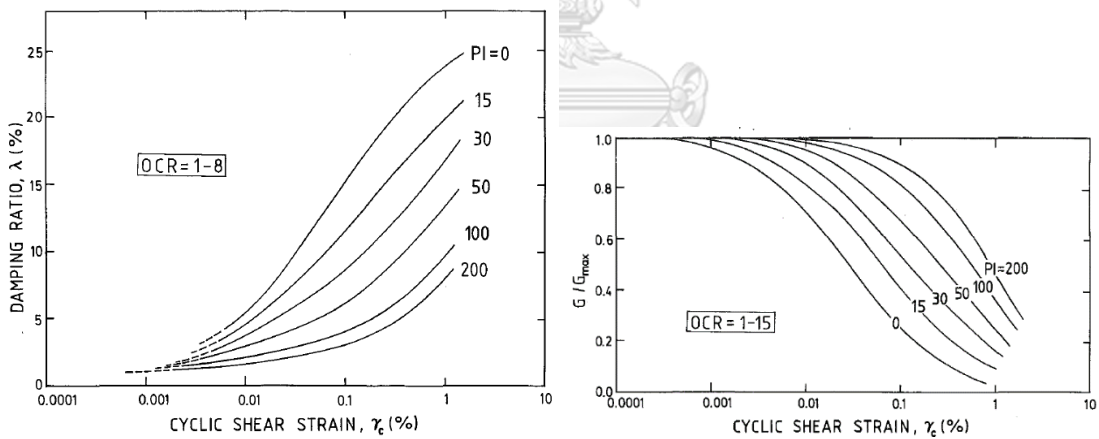
Guignard (1971) ได้วิจัยถึงการรับรู้แรงสั่นไหวของมนุษย์ซึ่งแตกต่างกันออกไปในความรู้สึกต่างๆ ซึ่งมีช่วงการรับรู้ถึงความสั่นไหวของมนุษย์นั้นกว้างกว่าช่วงการได้ยิน ซึ่งผลการวิจัยระบุว่ามนุษย์เราสามารถรับรู้ถึงความสั่นไหวได้ถึงระดับ  $1 \text{ cm/s}^2$

Seed and Idriss (1970) ได้หาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของดินทรายโดยสรุปความสัมพันธ์ของ  $G/G_{\max}$  และ Damping Ratio กับ Shear Strain ของแต่ละความถี่ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ดังรูป 2-11



รูป 2-11 Variation of normalized modulus ratio with shear strain and Variation of damping ratio with shear strain for different frequencies (Seed and Idriss, 1970)

Vucetic and Dobry (1991) ได้เสนอผลของ Plasticity Index ของดินต่อ cyclic loading สามารถสรุปได้ว่า ค่า Plasticity Index (PI) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า  $G/G_{max}$  และ Damping ratio ของดิน เมื่อ PI เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ เพิ่มขึ้น และ Damping ratio มีค่าลดลง ดังรูป 2-12



รูป 2-12 Relations between  $G/G_{mm}$  versus cyclic shear strain and Damping ratio versus cyclic shear strain Curves and Soil Plasticity for Normally and Overconsolidated Soils (Vucetic and Dobry, 1991)

Choi and Stewart (2005) ได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Site amplification และ  $V_{S30}$  พบว่าชั้นดินอ่อนหรือชั้นดินที่จำแนกด้วยเกณฑ์ของ NEHRP ประเภท E ( $V_{S30} < 180$  m/s) นั้นจะมีค่า Site amplification factor สูง และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ  $V_{S30}$  สูงขึ้น

ในปีพ.ศ. 2552 ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เนื่องจากแผ่นดินไหวโดยใช้การศึกษาการตอบสนองของชั้นดินในลักษณะ 1 มิติ ด้วยการวิเคราะห์เชิงเส้น ด้วยข้อมูลหลุมเจาะและใช้คลื่นแผ่นดินไหว 7 คลื่นในการ และสรุปว่า Amplification factor จากคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละครั้งแตกต่างกันออกไป และมีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.4 – 3.0 กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณกรุงเทพฯ (อำนาจ ยานูวิริยะกุล, 2552)

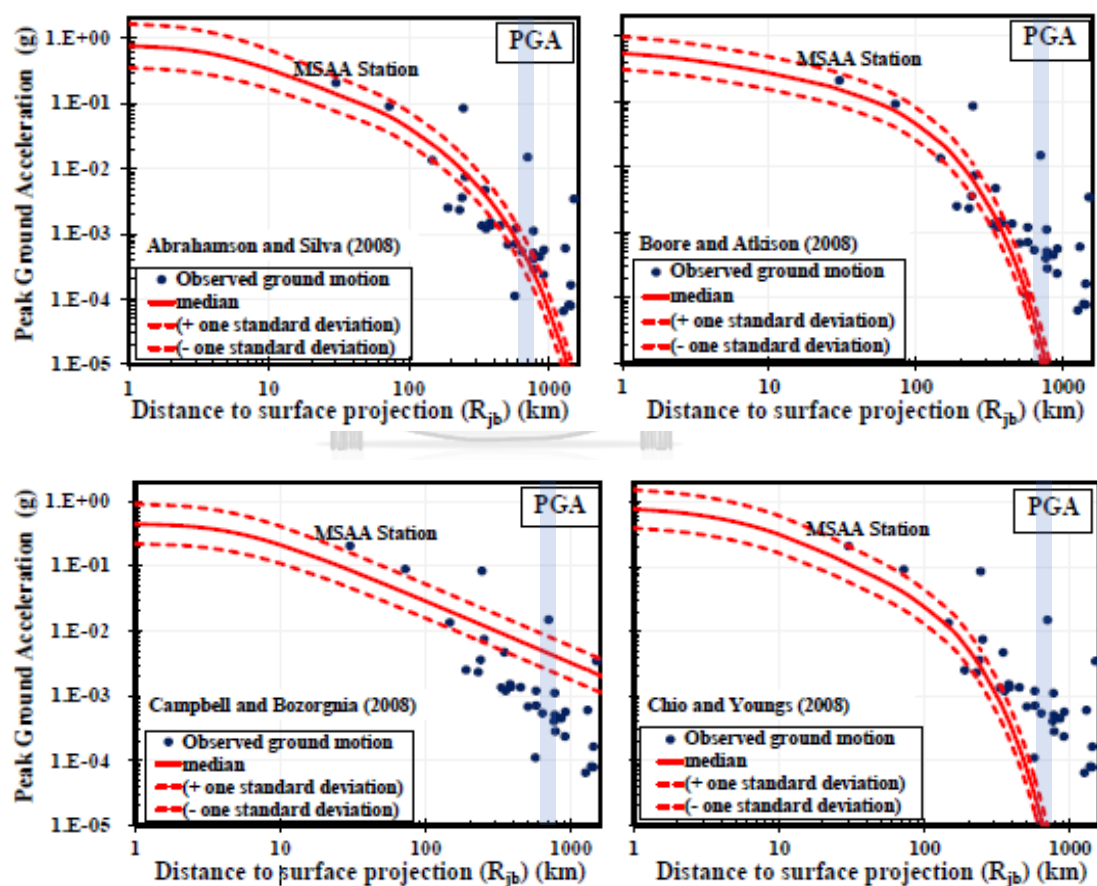
ในปีพ.ศ. 2553 ได้มีการศึกษาผลตอบสนองแผ่นดินไหวของผิวดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวสามารถสรุปได้ว่า การตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวจะแตกต่างกันไปตามแต่สภาพทางธรณีวิทยาซึ่งส่งผลแตกต่างกันกับอาคารด้วย และ ดินตะกอนที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำจะส่งผลต่อการขยายความเร่งการสั่นสะเทือนมากกว่าบริเวณชั้นหินโผล่ อีกทั้งชั้นดินเหนียวอ่อนสามารถขยายความเร่งสูงสุดของคลื่นสั้นไหวได้อย่างชัดเจน (สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ และคณะ, 2553)

Hosseini *et al.* (2010) ได้พิจารณาข้อจำกัดของการวิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหวด้วยวิธี Equivalent Linear Analysis จากการวิเคราะห์พื้นที่ที่แตกต่างกัน 4 แห่ง ด้วยวิธี Linear และ Non-Linear Site Response Analysis พบว่าวิธีการวิเคราะห์แบบ Equivalent Linear ใน 1 มิติ จะทำให้การประมาณค่าความเร่งสูงสุด และ อัตราส่วนคลื่นสเปกตรัมสูงกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ และเมื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเร่งในช่วงที่คลื่นมีความถี่สูง วิธี Equivalent Linear ใน 1 มิติ จะให้ค่าความเร่งที่สูงขึ้นอีก ดังนั้นการใช้ทฤษฎีอีลาสโตพลาสติกเข้ามาเกี่ยวข้อง จะเหมาะสมในการคำนวณมากกว่าวิธี Equivalent Linear

Poovarodom and Jirasakjamroonsri (2014) ได้มีการศึกษาผลกระทบของพื้นที่จากความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่กรุงเทพฯและจังหวัดใกล้เคียงด้วยวิธีการสำรวจโดย Microtremor Observations สามารถสรุปความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในความลึกต่างๆ ได้ดังนี้ ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 10 เมตร มีค่าประมาณ 80 – 120 เมตรต่อวินาที ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 30 เมตร มีค่าประมาณ 100 – 180 เมตรต่อวินาที และ ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 90 เมตร มีค่าประมาณ 180 – 260 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในแต่ละระดับความลึกมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของชั้นดินกรุงเทพฯที่แตกต่างกัน

ในปีพ.ศ. 2559 ได้มีการจัดทำ 3D modelling for Bangkok subsoils ขึ้นมาเพื่อใช้ในการประมาณชั้นดินของพื้นที่กรุงเทพฯและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งโปรแกรมนี้จะให้ค่า undrained shear strength, N-SPT ประเภทและความหนาของชั้นดิน จากการสร้างภาพตัดขวางด้วยข้อมูลหลุมเจาะทั่วบริเวณกรุงเทพฯ (Ngamcharoen *et al.*, 2016) และ (กมลรัตน์ งามเจริญ, 2559)

(Mase, 2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ NGA model ในประเทศไทยกับคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์หรือคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554 พบว่า NGA model ที่เหมาะสมมากที่สุดในการประมาณค่า PGA ในช่วงระยะ 600 – 800 กิโลเมตรจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวคือ NGA model ของ Abrahamson and Silva ที่พัฒนาขึ้นในปี 2008 ดังรูป 2-13



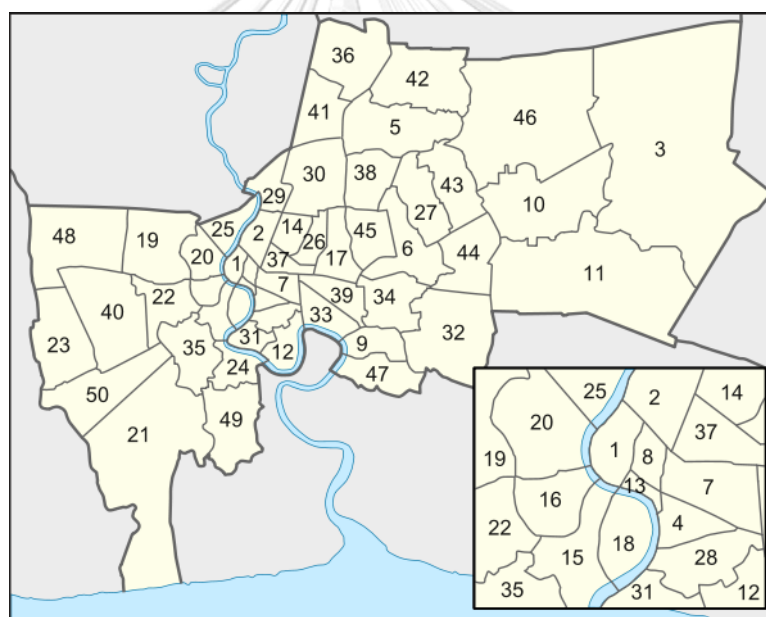
รูป 2-13 PGA ที่ประมาณได้จาก NGA models เทียบกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Mase, 2017)

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

##### 3.1 พื้นที่ที่สนใจในการศึกษา

กรุงเทพฯ เป็นเมืองที่มีประชากรอาศัยมากที่สุดและเป็นเมืองหลวงของประเทศไทย เป็นศูนย์กลางความเจริญของประเทศไทย มีอาคารสูงและตึกระฟ้ามากที่สุดเป็นอันดับที่ 15 ของโลก มีพื้นที่ 1,568.7 ตารางกิโลเมตร ซึ่งแบ่งเป็นเขตการปกครองออกเป็น 50 เขตการปกครองดังรูป 3-1 และ ตาราง 3-1



รูป 3-1 แผนที่แสดงเขต 50 เขตของกรุงเทพมหานคร

ตาราง 3-1 รายชื่อเขตในกรุงเทพฯ เรียงตามขนาดพื้นที่

| อันดับ | เขต         | พื้นที่ (ตร.กม.) | อันดับ | เขต       | พื้นที่ (ตร.กม.) |
|--------|-------------|------------------|--------|-----------|------------------|
| 1      | หนองจอก     | 236.261          | 26     | บางนา     | 18.789           |
| 2      | ลาดกระบัง   | 123.859          | 27     | ภาษีเจริญ | 17.834           |
| 3      | บางขุนเทียน | 120.687          | 28     | ยานนาวา   | 16.662           |



| อันดับ | เขต        | พื้นที่ (ตร.กม.) | อันดับ | เขต               | พื้นที่ (ตร.กม.) |
|--------|------------|------------------|--------|-------------------|------------------|
| 4      | คลองสามวา  | 110.686          | 29     | ราชบุรีบูรณะ      | 15.782           |
| 5      | มีนบุรี    | 63.645           | 30     | ห้วยขวาง          | 15.033           |
| 6      | ประเวศ     | 52.5             | 31     | พระโขนง           | 13.986           |
| 7      | ทวีวัฒนา   | 50.219           | 32     | คลองเตย           | 13               |
| 8      | สายไหม     | 44.615           | 33     | วัฒนา             | 12.565           |
| 9      | บางแค      | 44.456           | 34     | บางกอกน้อย        | 11.944           |
| 10     | บางเขน     | 42.123           | 35     | บางซื่อ           | 11.5             |
| 11     | ดอนเมือง   | 36.803           | 36     | บางพลัด           | 11.36            |
| 12     | หนองแขม    | 35.825           | 37     | บางคอแหลม         | 10.921           |
| 13     | บางบอน     | 34.745           | 38     | คูสิต             | 10.7             |
| 14     | จตุจักร    | 32.908           | 39     | พญาไท             | 9.595            |
| 15     | ทุ่งครุ    | 30.741           | 40     | สาทร              | 9.326            |
| 16     | ตลิ่งชัน   | 29.479           | 41     | ธนบุรี            | 8.551            |
| 17     | บางกะปิ    | 28.523           | 42     | ดินแดง            | 8.4              |
| 18     | สะพานสูง   | 28.124           | 43     | ปทุมวัน           | 8.37             |
| 19     | จอมทอง     | 26.265           | 44     | ราชเทวี           | 7.126            |
| 20     | คันนายาว   | 25.98            | 45     | บางกอกใหญ่        | 6.18             |
| 21     | บึงกุ่ม    | 24.311           | 46     | คลองสาน           | 6.051            |
| 22     | สวนหลวง    | 23.678           | 47     | บางรัก            | 5.54             |
| 23     | หลักสี่    | 22.841           | 48     | พระนคร            | 5.536            |
| 24     | ลาดพร้าว   | 21.5             | 49     | ป้อมปราบศัตรูพ่าย | 1.931            |
| 25     | วังทองหลาง | 18.905           | 50     | สัมพันธวงศ์       | 1.416            |

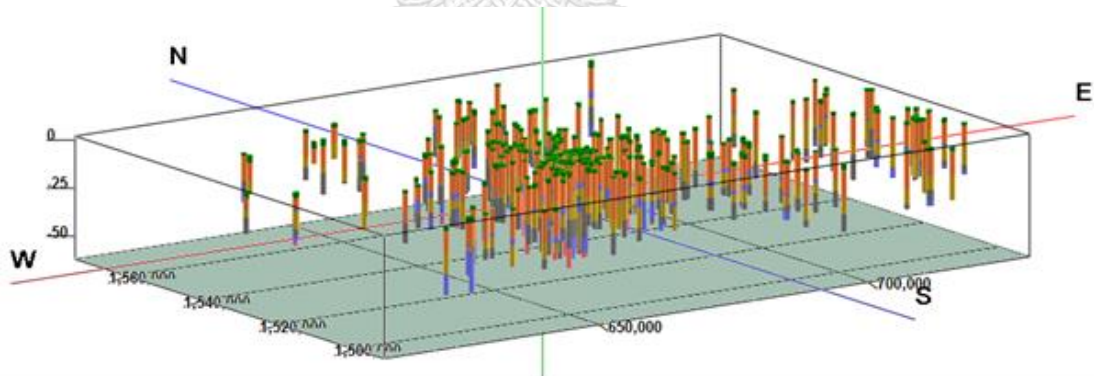
กรุงเทพฯ มีระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 1.5 – 2 เมตร พื้นที่ส่วนมากของกรุงเทพฯ เป็นที่ราบลุ่มตั้งอยู่บริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา มีชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อนซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากดินตะกอนลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา เมื่อเกิดคลื่นสั่นไหวชั้นดินอ่อนมีความสามารถที่จะขยายความมรณะของคลื่นแผ่นดินไหวได้แม้ว่าแผ่นดินไหวจะเกิดขึ้นในระยะไกล

ในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554 เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นที่ประเทศพม่า ศูนย์กลางแผ่นดินไหวนั้นห่างจากกรุงเทพฯ เป็นระยะทางประมาณ 600 – 800 กิโลเมตร แต่ผู้คนที่อาศัยอยู่บน

อาคารสูงในพื้นที่กรุงเทพฯ ต่างสามารถรับรู้ถึงแรงสั่นไหวอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะไกลออกไปได้อย่างชัดเจน

### 3.2 การรวบรวมและสร้างข้อมูลชั้นดิน

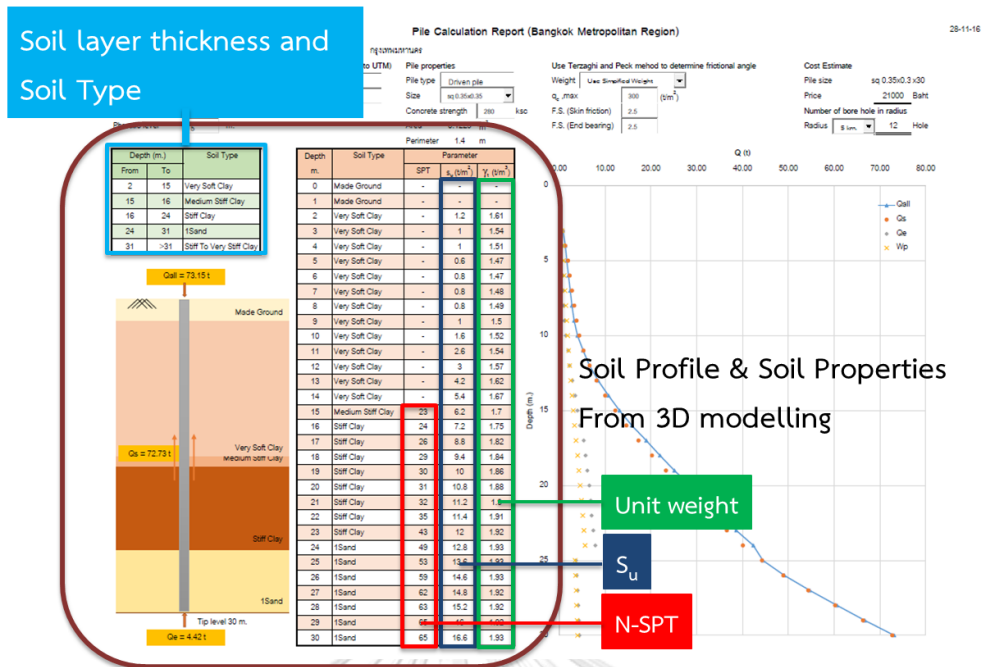
แบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ (3D geological model) เป็นฐานข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินต่างๆ เช่น ประเภทของดิน (Soil Type) ความหนาของชั้นดิน (Soil Thickness) หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain shear strength) ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression test) จำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน (N-SPT) ตั้งแต่ผิวดินจนถึง 30 เมตร จากการเจาะสำรวจและนำข้อมูลมาสร้างข้อมูลชั้นดิน 3 มิติด้วยการใช้ส่วนตัดส่วนขวางในการจำลองชั้นดินทั่วพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ และจังหวัดใกล้เคียง ดังรูป 3-2 และสามารถกำหนดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ด้วยระบบพิกัดกริดแบบยูทีเอ็ม (UTM) เพื่อจำลองข้อมูลชั้นดิน 30 เมตร ณ ตำแหน่งนั้นๆ ภายในพื้นที่กรุงเทพฯ จากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ ดังรูป 3-3 และรูป 3-4



รูป 3-2 ตำแหน่งหลุมเจาะบริเวณกรุงเทพฯ และจังหวัดใกล้เคียง

|                 |                |                                      |               |
|-----------------|----------------|--------------------------------------|---------------|
| Name            | Default        | เขตปทุมวัน                           | กรุงเทพมหานคร |
| Location in UTM |                | Convert Lat., Long. (Decimal to UTM) |               |
| Easting         | 665760 Meters  | Latitude                             | N 13.735842   |
| Northing        | 1519039 Meters | Longitud                             | E 100.533050  |

รูป 3-3 การกำหนดตำแหน่งของ 3D Geological Model ของกรุงเทพฯ



รูป 3-4 ข้อมูลชั้นดินที่ได้จาก 3D geological model ของกรุงเทพฯ

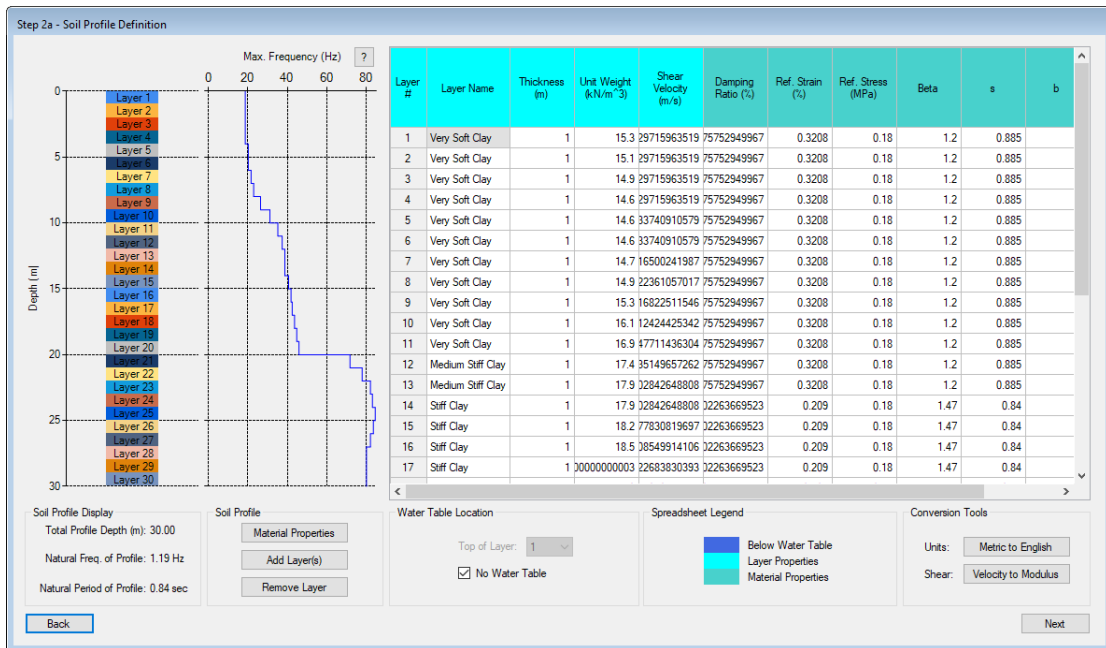
### 3.3 การจำลองชั้นดินเพื่อวิเคราะห์และการสร้าง Input Files

โปรแกรม DEEPSOIL นั้นสามารถสร้างข้อมูลการวิเคราะห์โดยใช้การสร้างไฟล์ .dp หรือไฟล์ที่มีลักษณะเฉพาะของโปรแกรม DEEPSOIL ซึ่งสามารถเขียนขึ้นมาด้วยโปรแกรมเขียน text ทั่วไป เช่น Notepad, Matlab และ Python ดังรูป 3-5 หรือสามารถกรอกข้อมูลลงบนหน้าต่างการใช้งานของโปรแกรมได้โดยตรงดังรูป 3-6

```

P0001.dp - Notepad
File Edit Format View Help
[FILE_VERSION]:[1]
[ANALYSIS_DOMAIN]:[TIME]
[ANALYSIS_TYPE]:[NONLINEAR]
[SHEAR_TYPE]:[VELOCITY]
[MAX_ITERATIONS]:[5]
[ERROR_TOL]:[0.00001]
[STEP_CONTROL]:[FLEXIBLE] [MAX_STRAIN_INC]:[5E-05] [INTERPOLATION]:[LINEAR]
[VISCOUS_DAMPING]:[FREQ_IND]
[DAMPING_UPDATE]:[FALSE]
[NUM_LAYERS]:[30]
[WATER_TABLE]:[0]
[LAYER]:[1]
[THICKNESS]:[1] [WEIGHT]:[16.9] [SHEAR]:[86.82016500241987] [SS_DAMP]:[0.009822752949967]
[MODEL]:[MKZ] [REFERENCE_STRAIN]:[0.003208] [REFERENCE_STRESS]:[0.18] [BETA]:[1.2] [S]:[0.885] [B]:[0] [D]:[0]
[MRDF]:[NONE]
[OUTPUT]:[FALSE]
[LAYER]:[2]
[THICKNESS]:[1] [WEIGHT]:[16.4] [SHEAR]:[81.15033740910579] [SS_DAMP]:[0.009822752949967]
[MODEL]:[MKZ] [REFERENCE_STRAIN]:[0.003208] [REFERENCE_STRESS]:[0.18] [BETA]:[1.2] [S]:[0.885] [B]:[0] [D]:[0]
[MRDF]:[NONE]
[OUTPUT]:[FALSE]
[LAYER]:[3]
[THICKNESS]:[1] [WEIGHT]:[15.700000000000001] [SHEAR]:[74.93129715963519] [SS_DAMP]:[0.009822752949967]
[MODEL]:[MKZ] [REFERENCE_STRAIN]:[0.003208] [REFERENCE_STRESS]:[0.18] [BETA]:[1.2] [S]:[0.885] [B]:[0] [D]:[0]
[MRDF]:[NONE]
[OUTPUT]:[FALSE]
[LAYER]:[4]
    
```

รูป 3-5 ตัวอย่างไฟล์ .dp ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL



รูป 3-6 หน้าต่างการใช้งานและการใส่ Input ของโปรแกรม DEEPSOIL

ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้การสร้าง Input files (.dp) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL เพื่อพิจารณาอิทธิพลของชั้นดิน 30 เมตรแรกของพื้นที่กรุงเทพฯเป็นหลัก โดยมีข้อมูลการวิเคราะห์เป็นคุณสมบัติชั้นดินที่ได้จาก 3D geological model ของกรุงเทพฯ และ สมมติฐานของชั้นดินแข็งใต้ดินดังนี้

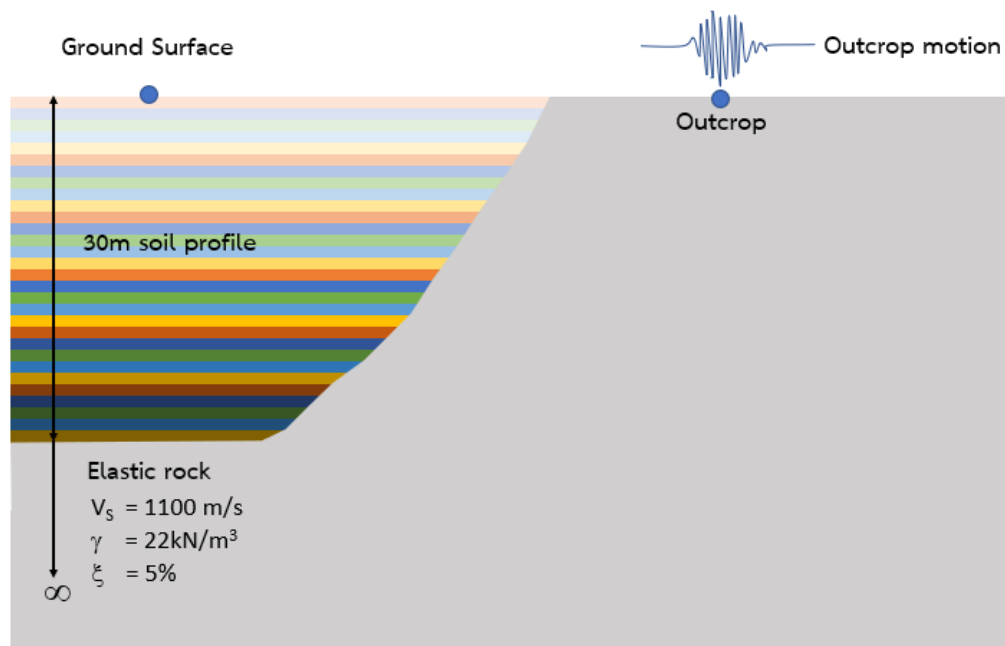
1. วิเคราะห์ด้วยวิธี 1 มิติแบบไม่เชิงเส้น (1D Non-linear time domain analysis)
2. ไม่พิจารณาแรงดันน้ำใต้ดิน
3. สร้างข้อมูลชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็น 30 ชั้น ชั้นละ 1 เมตร
4. ประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ( $V_s$ ) กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) และ จำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน (N-SPT) ที่พัฒนาโดย Likitlersuang and Kyaw (2010) และ Imai (1981) ตามลำดับ
5. กำหนดคุณสมบัติของชั้นดินที่ได้จาก 3D geological model ของกรุงเทพฯตามความสัมพันธ์ของ Shear modulus degradation กับ Damping ratio และ Shear Strain จาก PI ที่ถูกพัฒนาโดย Seed and Idriss (1970) และ Vucetic and Dobry (1991) ดังตาราง 3-2

6. ชั้นหินแข็งใช้สมมติฐาน Elastic half-space โดยมีความเร็วคลื่นเฉือน = 1,100 m/s  
หน่วยน้ำหนัก = 22 kN/m<sup>3</sup> และ Damping Ratio = 5%

ตาราง 3-2 คุณสมบัติของดินสำหรับการวิเคราะห์ Site response analysis

| Properties        | Very Soft | Medium     |            | Very Stiff |            |
|-------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
|                   | Clay      | Stiff Clay | Stiff Clay | Clay       | First sand |
| PI                | 47        | 44         | 28         | 27         | -          |
| Damping Ratio     | 0.98227   | 0.98227    | 0.95690    | 0.95690    | 0.37034    |
| Ref. Strain (%)   | 0.3208    | 0.3208     | 0.209      | 0.209      | 0.0658     |
| Ref. Stress (MPa) | 0.18      | 0.18       | 0.18       | 0.18       | 0.18       |
| Beta              | 1.2       | 1.2        | 1.47       | 1.47       | 1.545      |
| s                 | 0.885     | 0.885      | 0.84       | 0.84       | 0.855      |
| b                 | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          |
| d                 | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          |

ข้อมูลในการวิเคราะห์จะมีสมมติฐานเป็นชั้นดิน 30 ชั้นมีความหนาชั้นละ 1 เมตรโดยมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป วางตัวอยู่บนชั้นหิน Elastic เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวที่อยู่บริเวณ Outcrop ดังรูป 3-7

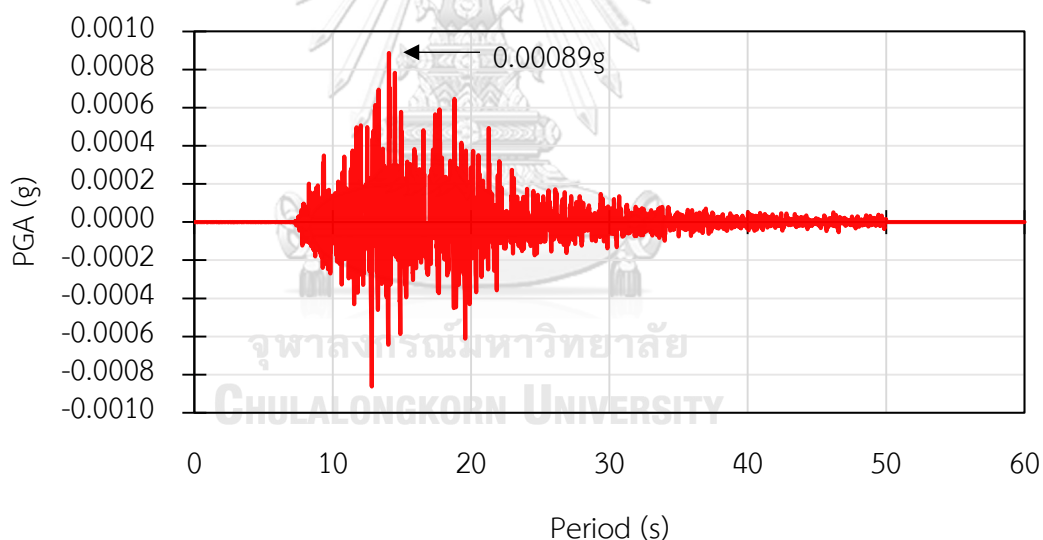


รูป 3-7 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์

### 3.4 คลื่นแผ่นดินไหวและแบบจำลองลดทอนพลังงาน

ข้อมูลแผ่นดินไหวได้มาจากการเก็บข้อมูลจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว และสถานีตรวจวัดความเร่งของพื้นดิน ของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา โดยประเทศไทยมีสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวกระจายอยู่ทั่วประเทศไทยถึง 41 แห่ง โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวทาร์เลียมมากที่สุดคือสถานีตรวจวัดความเร่งผิวดิน MAES อยู่ที่ว่าการอำเภอจังหวัดเชียงราย (Latitude 20.4276, Longitude 99.8865)

สถานีตรวจวัดความเร่งผิวดิน MAES ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็งจึงใช้สมมติฐานว่าคลื่นที่ตรวจวัดได้เป็นคลื่นสั้นไหวเดียวกันกับที่ชั้นหิน และใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้เป็นคลื่นเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว โดยมีความเร่งสูงสุดเท่ากับ PGA ที่ประมาณได้จากแบบจำลองลดทอนพลังงานที่พัฒนาโดย Abrahamson and Silva (2008) ที่ไม่พิจารณาการขยายตัวเนื่องจากชั้นดิน จะได้คลื่นแผ่นดินไหวที่มี PGA เท่ากับ  $8.9 \times 10^{-4}g$  ดังรูป 3-8



รูป 3-8 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับเป็นคลื่นเริ่มต้นในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว

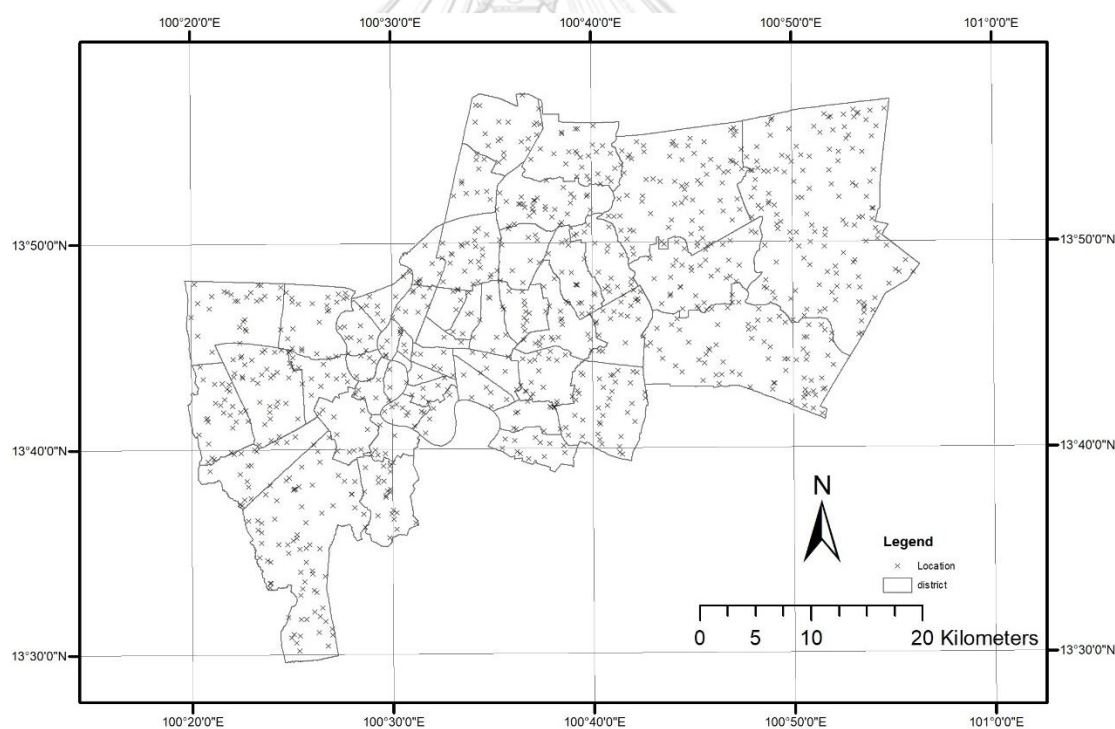
### 3.5 การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยแบบจำลองมอนติคาร์โล

การสุ่มเป็นปัจจัยควบคุมในการเกิดความน่าจะเป็น การสุ่มตัวอย่างของสิ่งที่สนใจจะต้องให้โอกาสในการถูกเลือกมาเป็นตัวอย่างเท่าๆกันเพื่อให้เหตุการณ์ต่างๆเป็นไปตามธรรมชาติ สามารถ

เรียกการทำการทดลองนี้ว่าการทดลองแบบสุ่ม (Random Experiment) แบบจำลองมอนติคาร์ล โลเป็นการทดลองสุ่มตัวอย่างซ้ำๆ เพื่อสร้างข้อมูลที่จำลองหรือวิเคราะห์ขึ้นในเชิงสถิติศาสตร์

ชั้นดินกรุงเทพ นั้นมีความแปรปรวนทั้งความลึก ความแข็งแรง ความหนา ชนิดของดิน และความอ่อนไหวต่อแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงใช้การสุ่มตัวแปรต่างๆพร้อมกันด้วยวิธีการสุ่มตำแหน่งชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ เพื่อนำข้อมูลชั้นดินแต่ละตำแหน่งที่ได้จากการสุ่มมาวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวในรูปของ PGA SA และ Amplification factor

ทำการสุ่มข้อมูลชั้นดินด้วยการสุ่มพิกัดตำแหน่งเพื่อใช้ในการสร้างข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติทั้งหมด 1,000 ตำแหน่งทั่วกรุงเทพ ดังรูป 3-9 และวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว PGA SA และ Amplification factor ที่เกิดจากชั้นดิน 30 เมตรแรกด้วยโปรแกรม DEEPSOIL และจัดทำผลในรูปของกราฟแจกแจงความถี่ และ แผนที่เส้นชั้นความสูง



รูป 3-9 ตำแหน่งของชั้นดินที่ถูกสร้างขึ้นมาจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

จากข้อมูลชั้นดิน 30 เมตรแรกที่ได้จากการสุ่มแบบสุ่มจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ ของกรุงเทพ ทั้งหมด 1,000 ข้อมูลชั้นดิน ถูกนำมาวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวแบบ 1 มิติด้วยวิธีไม่เชิงเส้น กับคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ที่สถานี MAES โดยมี PGA เท่ากับ PGA จากการประมาณด้วย NGA ของ Abrahamson and Silva (2008) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 4.1 การสุ่มตำแหน่งข้อมูลชั้นดิน

หลังจากสุ่มข้อมูลจาก 3D geological model ของกรุงเทพ ทั้งหมด 1,000 ครั้ง สามารถสรุปจำนวนข้อมูลที่สุ่มได้ตามเขตการปกครองได้ดังตาราง 4-1 คิดเป็นพื้นที่ต่อการสุ่มเฉลี่ยเท่ากับ 1.74 ตร.กม./ข้อมูล เมื่อเทียบกับการใช้พื้นที่กรุงเทพ/จำนวนครั้งการสุ่มเท่ากับ 1.57 ตร.กม./ข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลการสุ่มนั้นกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพ

ตาราง 4-1 เขตการปกครองและข้อมูลจากการสุ่ม

| เขต            | พื้นที่ (ตร.กม.) | ข้อมูล | พื้นที่/ข้อมูล |
|----------------|------------------|--------|----------------|
| เขตหนองจอก     | 236.26           | 140    | 1.69           |
| เขตลาดกระบัง   | 123.86           | 77     | 1.61           |
| เขตบางขุนเทียน | 120.69           | 76     | 1.59           |
| เขตคลองสามวา   | 110.69           | 78     | 1.42           |
| เขตมีนบุรี     | 63.65            | 36     | 1.77           |
| เขตประเวศ      | 52.49            | 38     | 1.38           |
| เขตทวีวัฒนา    | 50.22            | 28     | 1.79           |
| เขตสายไหม      | 44.62            | 28     | 1.59           |
| เขตบางแค       | 44.46            | 38     | 1.17           |
| เขตบางเขน      | 42.12            | 31     | 1.36           |

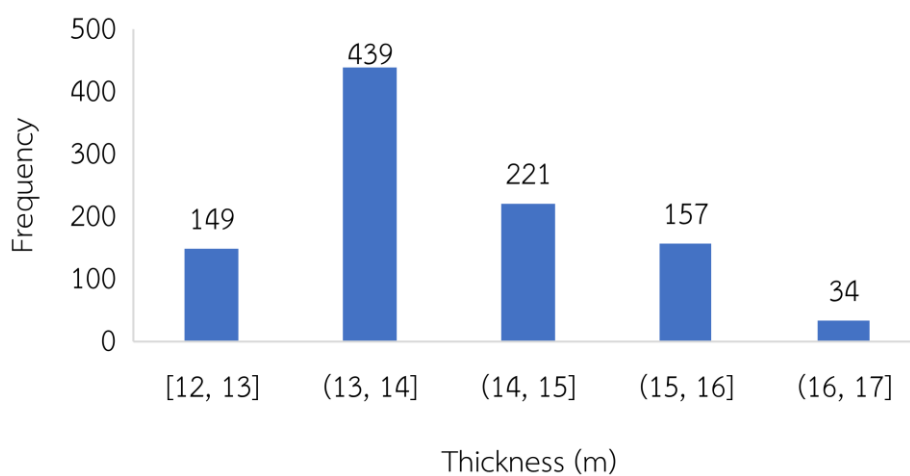


| เขต             | พื้นที่ (ตร.กม.) | ข้อมูล | พื้นที่/ข้อมูล |
|-----------------|------------------|--------|----------------|
| เขตดอนเมือง     | 36.8             | 21     | 1.75           |
| เขตหนองแขม      | 35.83            | 27     | 1.33           |
| เขตบางบอน       | 34.75            | 17     | 2.04           |
| เขตจตุจักร      | 32.91            | 28     | 1.18           |
| เขตทุ่งครุ      | 30.74            | 22     | 1.40           |
| เขตตลิ่งชัน     | 29.48            | 23     | 1.28           |
| เขตบางกะปิ      | 28.52            | 17     | 1.68           |
| เขตสะพานสูง     | 28.12            | 19     | 1.48           |
| เขตจอมทอง       | 26.27            | 12     | 2.19           |
| เขตคันนายาว     | 25.98            | 19     | 1.37           |
| เขตบึงกุ่ม      | 24.31            | 18     | 1.35           |
| เขตสวนหลวง      | 23.68            | 18     | 1.32           |
| เขตหลักสี่      | 22.84            | 12     | 1.90           |
| เขตลาดพร้าว     | 21.86            | 9      | 2.43           |
| เขตวังทองหลาง   | 19.57            | 13     | 1.51           |
| เขตบางนา        | 18.79            | 12     | 1.57           |
| เขตภาษีเจริญ    | 17.83            | 11     | 1.62           |
| เขตยานนาวา      | 16.66            | 4      | 4.17           |
| เขตราชบุรีบูรณะ | 15.78            | 6      | 2.63           |
| เขตห้วยขวาง     | 15.03            | 8      | 1.88           |
| เขตพระโขนง      | 13.99            | 11     | 1.27           |
| เขตคลองเตย      | 12.99            | 6      | 2.17           |
| เขตวัฒนา        | 12.57            | 8      | 1.57           |
| เขตบางกอกน้อย   | 11.94            | 9      | 1.33           |
| เขตบางซื่อ      | 11.55            | 7      | 1.65           |
| เขตบางพลัด      | 11.36            | 9      | 1.26           |
| เขตบางคอแหลม    | 10.92            | 9      | 1.21           |
| เขตดุสิต        | 10.67            | 9      | 1.19           |
| เขตพญาไท        | 9.6              | 3      | 3.20           |

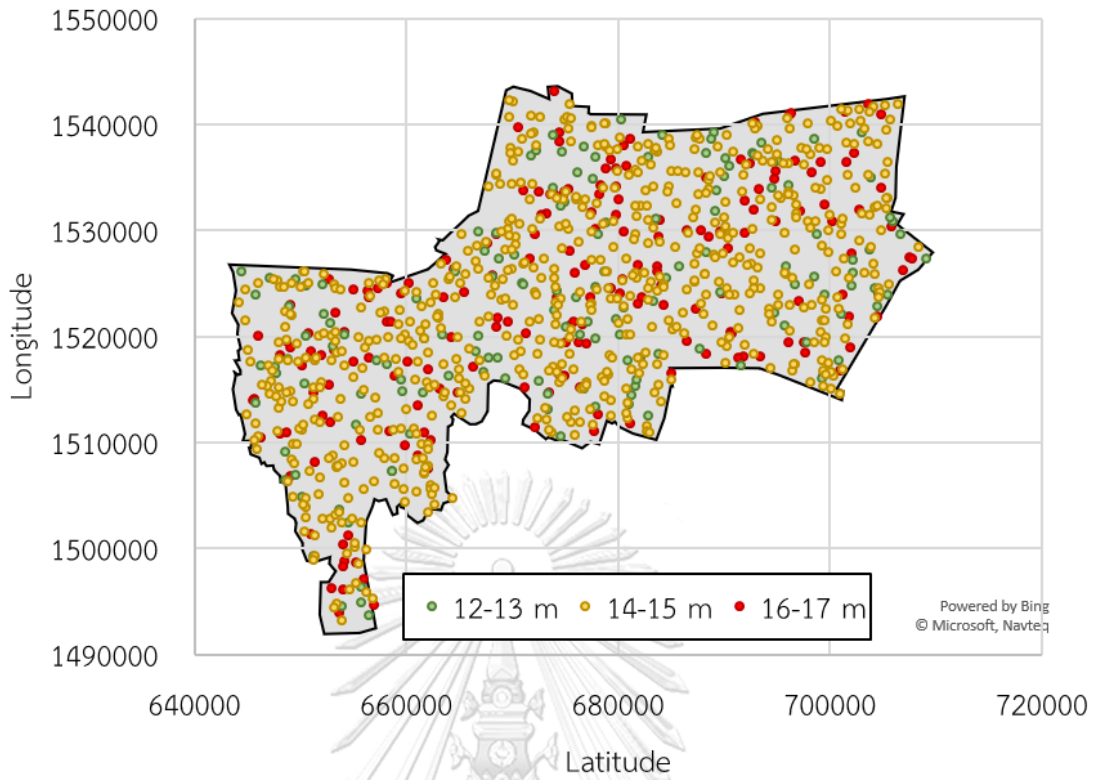
| เขต                  | พื้นที่ (ตร.กม.) | ข้อมูล | พื้นที่/ข้อมูล |
|----------------------|------------------|--------|----------------|
| เขตสาทร              | 9.33             | 7      | 1.33           |
| เขตธนบุรี            | 8.55             | 3      | 2.85           |
| เขตปทุมวัน           | 8.37             | 6      | 1.40           |
| เขตดินแดง            | 8.35             | 6      | 1.39           |
| เขตราชเทวี           | 7.13             | 2      | 3.57           |
| เขตบางกอกใหญ่        | 6.18             | 5      | 1.24           |
| เขตคลองสาน           | 6.05             | 4      | 1.51           |
| เขตบางรัก            | 5.54             | 1      | 5.54           |
| เขตพระนคร            | 5.54             | 7      | 0.79           |
| เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย | 1.93             | 2      | 0.97           |
| เขตสัมพันธวงศ์       | 1.42             | 0      | 0.00           |
| รวม                  | 1568.8           | 1000   | 1.57           |

#### 4.2 ชั้นดินอ่อนของชั้นดินกรุงเทพ

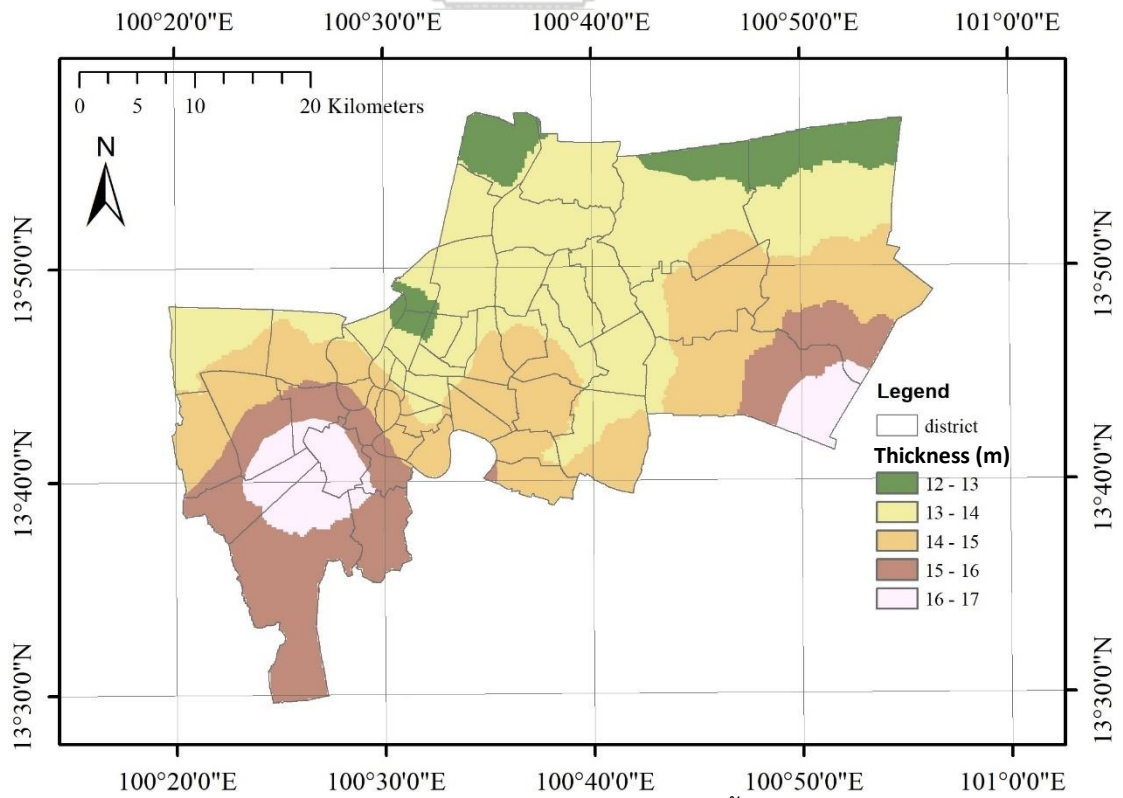
จากการจำแนกชั้นดินตาม NEHRP พบว่าชั้นดินทั้งหมด 1,000 ชั้นดินที่สร้างจาก 3D geological model ของกรุงเทพ เป็นชั้นดินอ่อนประเภท E (มี  $V_{s30} < 180\text{m/s}$ ) และมีชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งแบ่งตามกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u < 5\text{ t/m}^2$ ) วางตัวอยู่ที่ผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 12 – 17 เมตรดังรูป 4-1 ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วกรุงเทพ ดังรูป 4-2 และรูป 4-3



รูป 4-1 ความหนาของชั้นดินอ่อนจากชั้นดิน 1,000 ตำแหน่ง



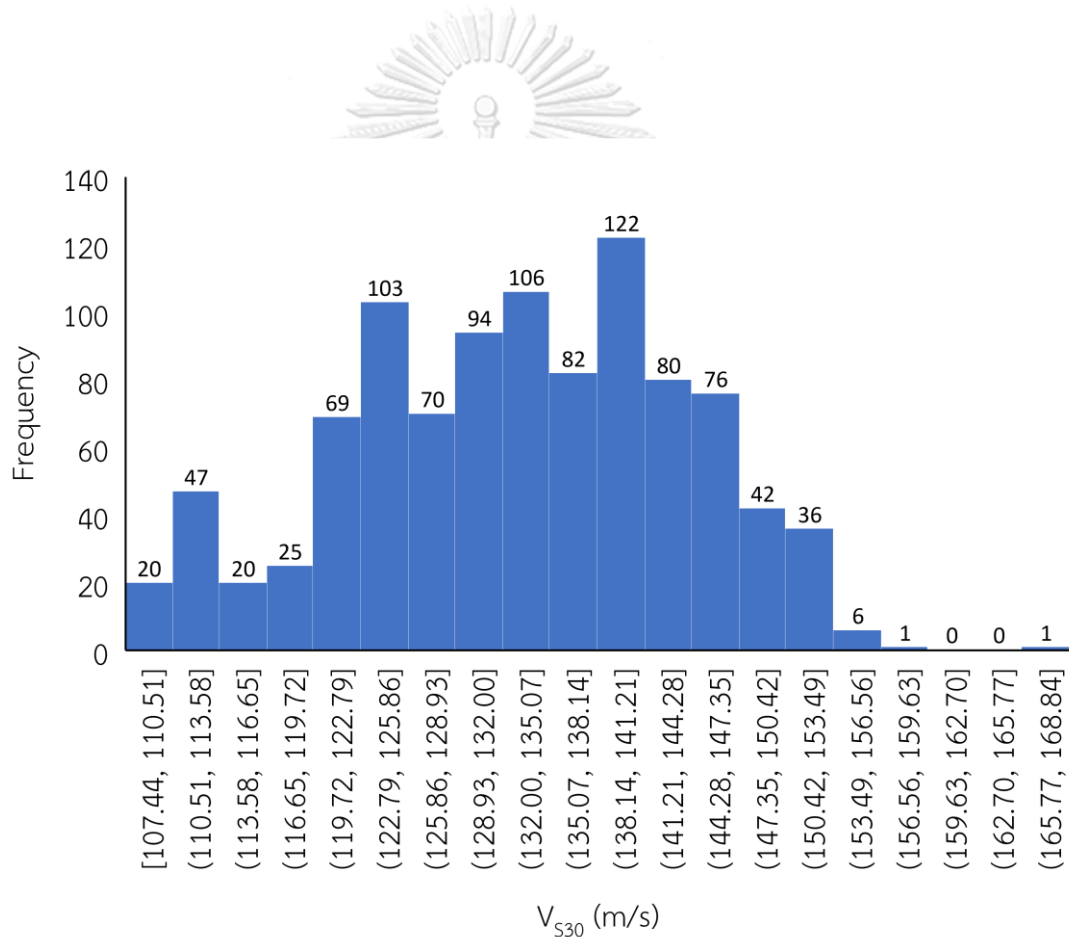
รูป 4-2 การกระจายตัวของความหนาของชั้นดินอ่อนในพื้นที่กรุงเทพฯ



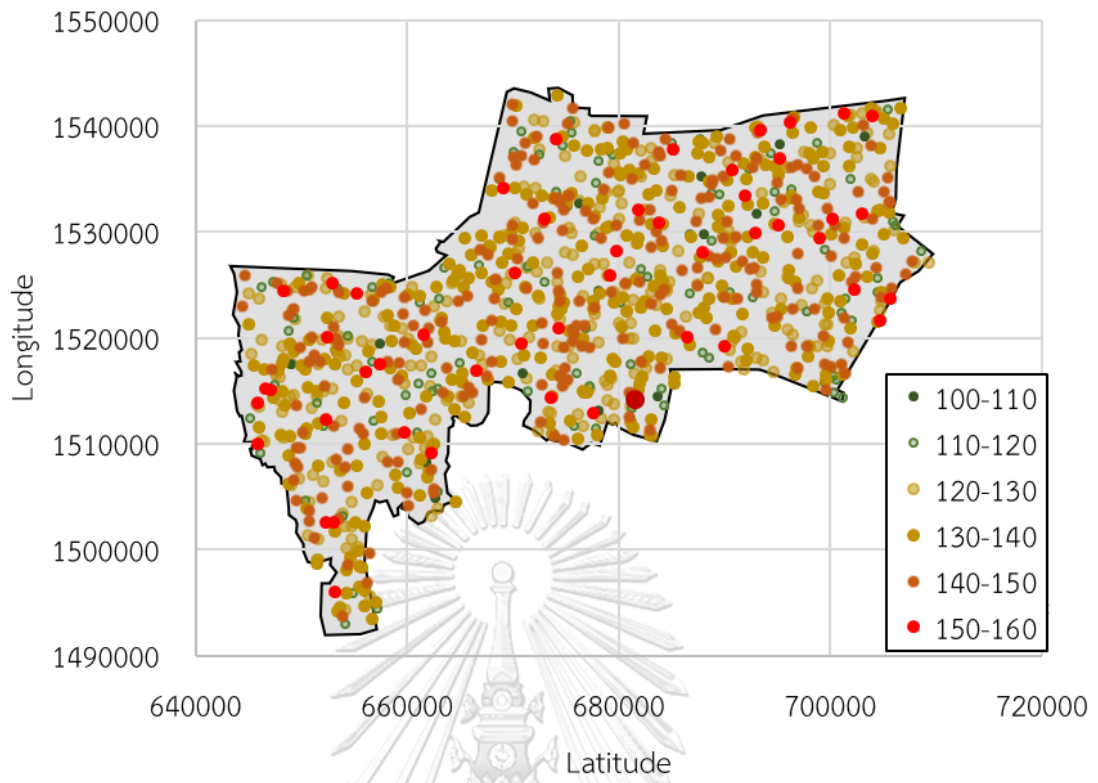
รูป 4-3 แผนที่เส้นชั้นความสูงของความหนาของชั้นดินอ่อนกรุงเทพฯ

### 4.3 $V_{S30}$ ของชั้นดินกรุงเทพ

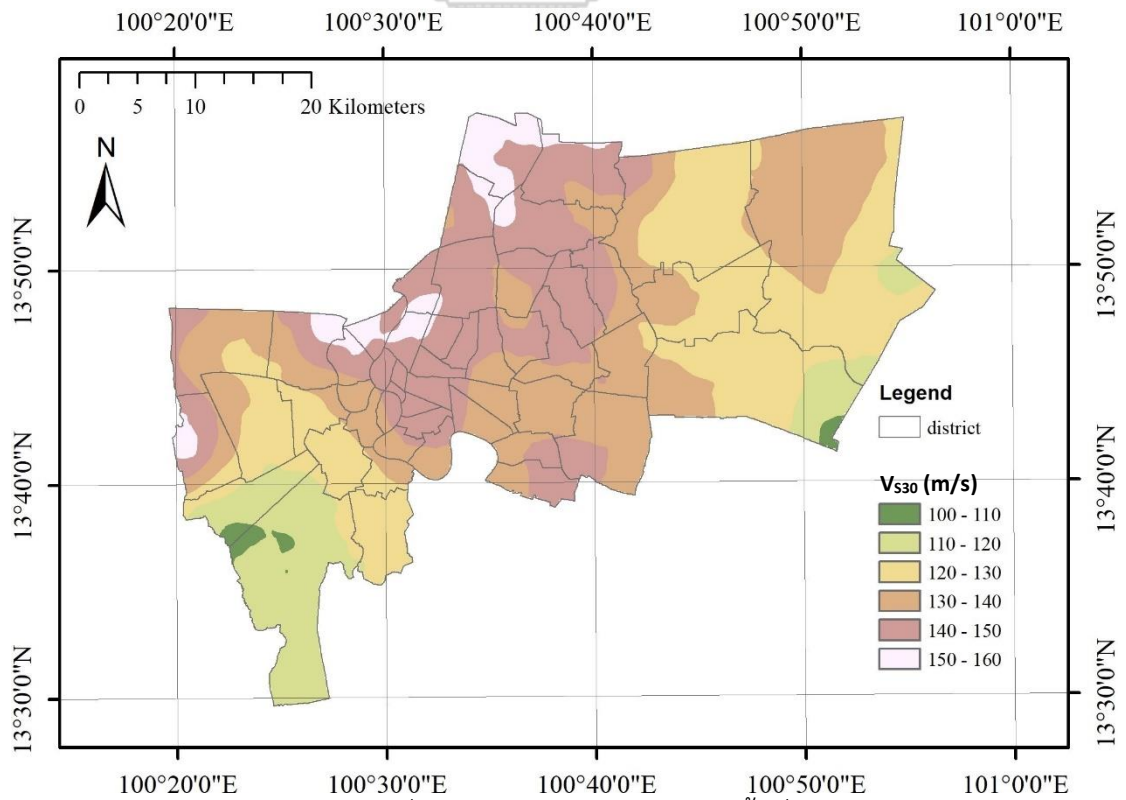
ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพนั้นประมาณจากสมการความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือน ( $V_S$ ) กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) และ จำนวนครั้งที่การตอกมาตรฐาน (N-SPT) ด้วยข้อมูลชั้นดินที่สร้างจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ มีค่าอยู่ในช่วง 100 – 170 m/s Mean = 133 m/s Meidan = 133 m/s Variance = 119 SD = 11 STDERR = 0.34 CV = 8.21% และมีเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของ  $V_{S30}$  = 150 m/s ดังรูป 4-4 ซึ่งสามารถดูการกระจายตัวของ  $V_{S30}$  ในพื้นที่กรุงเทพได้ดังรูป 4-5 และรูป 4-6



รูป 4-4 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือน 30 เมตรแรกของชั้นดินกรุงเทพ



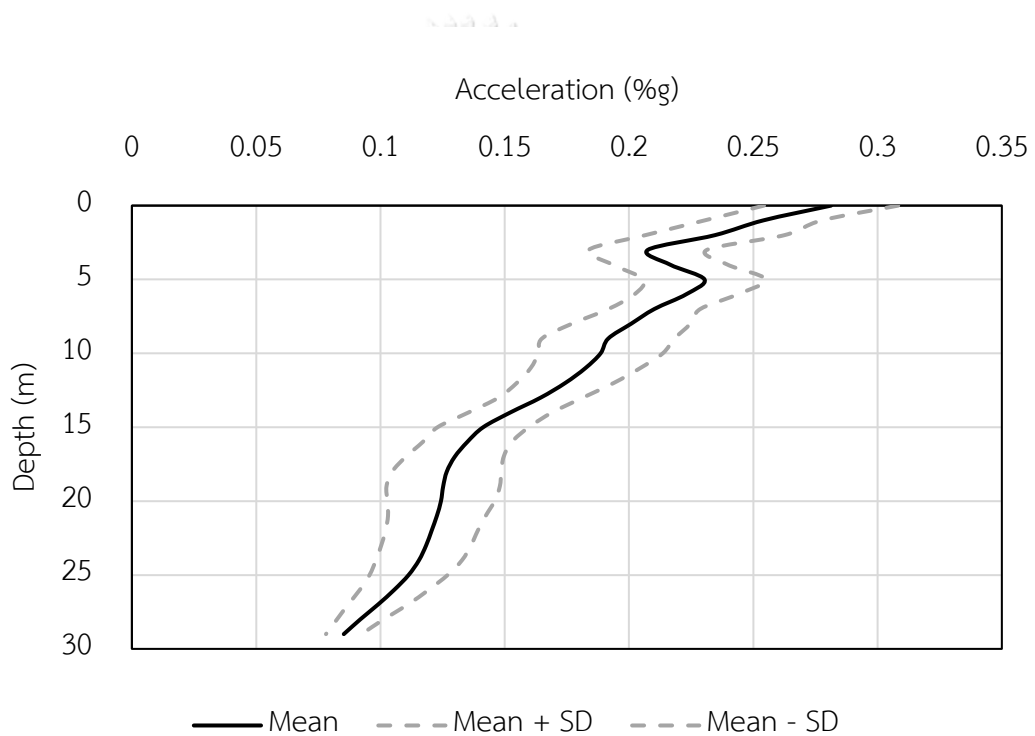
รูป 4-5 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเหนือ 30 เมตรแรกแต่ละตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพฯ



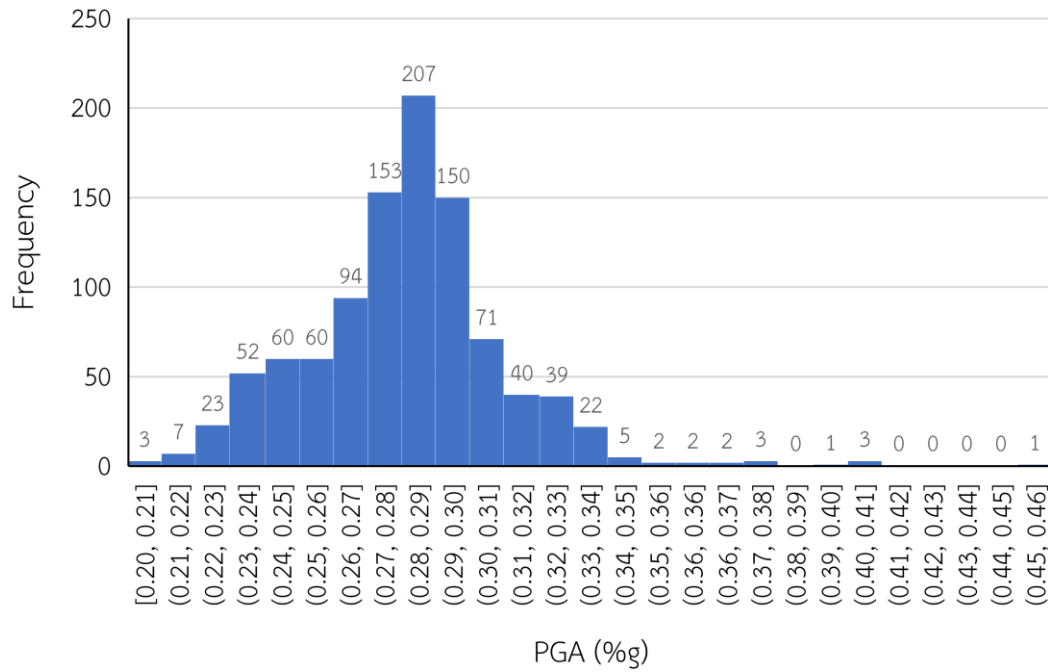
รูป 4-6 แผนที่เส้นชั้นความสูงของ  $V_{s30}$  ของพื้นที่กรุงเทพฯ

#### 4.4 ความเร่งสูงสุดผิวดินจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL

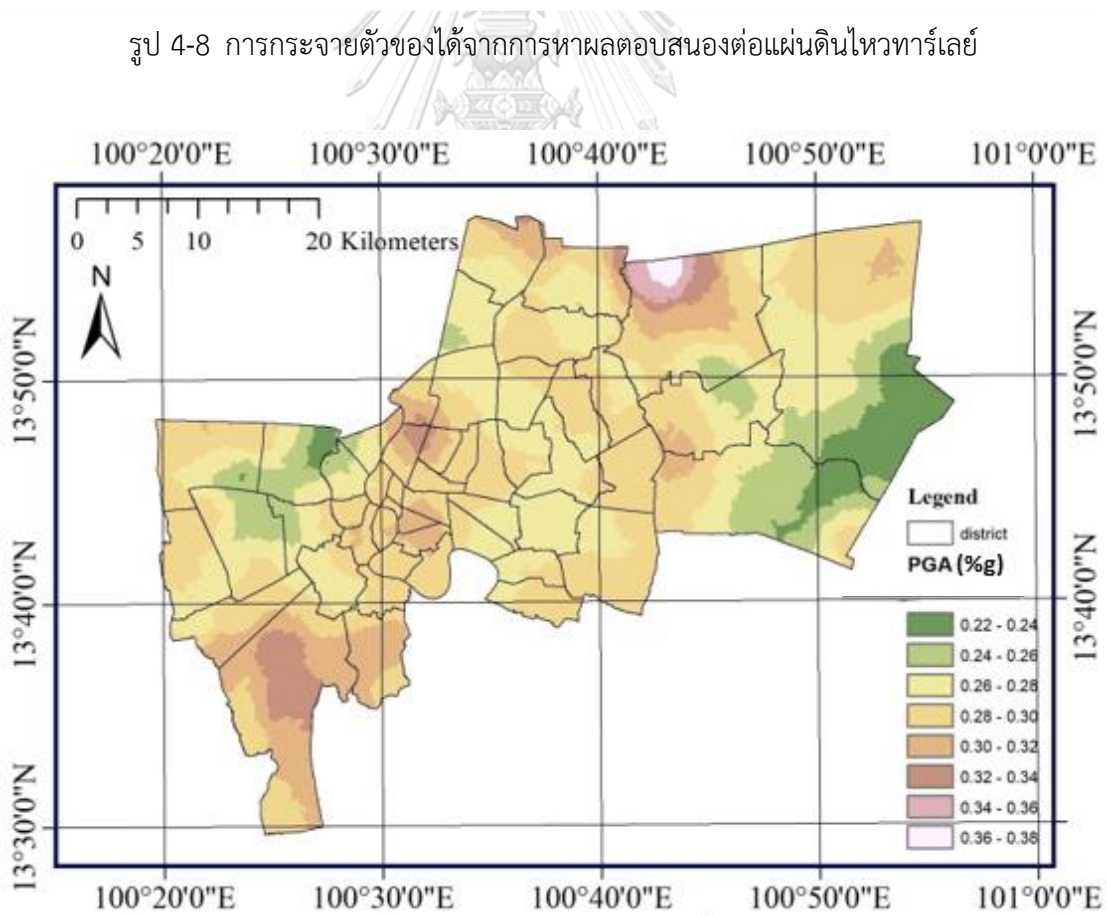
PGA ที่ผิวดินของทุกชั้นดินที่นำมาวิเคราะห์มีค่าสูงขึ้นจาก PGA ของคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาวิเคราะห์ดังรูป 4-7 โดยมีค่า PGA อยู่ในช่วง 0.0020g – 0.0045g Mean = 0.0028g Median = 0.0028g Variance =  $7.29 \times 10^{-8}$  SD =  $2.70 \times 10^{-4}$ g STDERR =  $8.54 \times 10^{-6}$  CV = 9.59% และมีเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของ PGA =  $3.25 \times 10^{-3}$ g ซึ่งสามารถดูการกระจายตัวของค่า PGA ได้ดังรูป 4-9 และ รูป 4-8



รูป 4-7 PGA ในแต่ละระดับความลึกของชั้นดิน



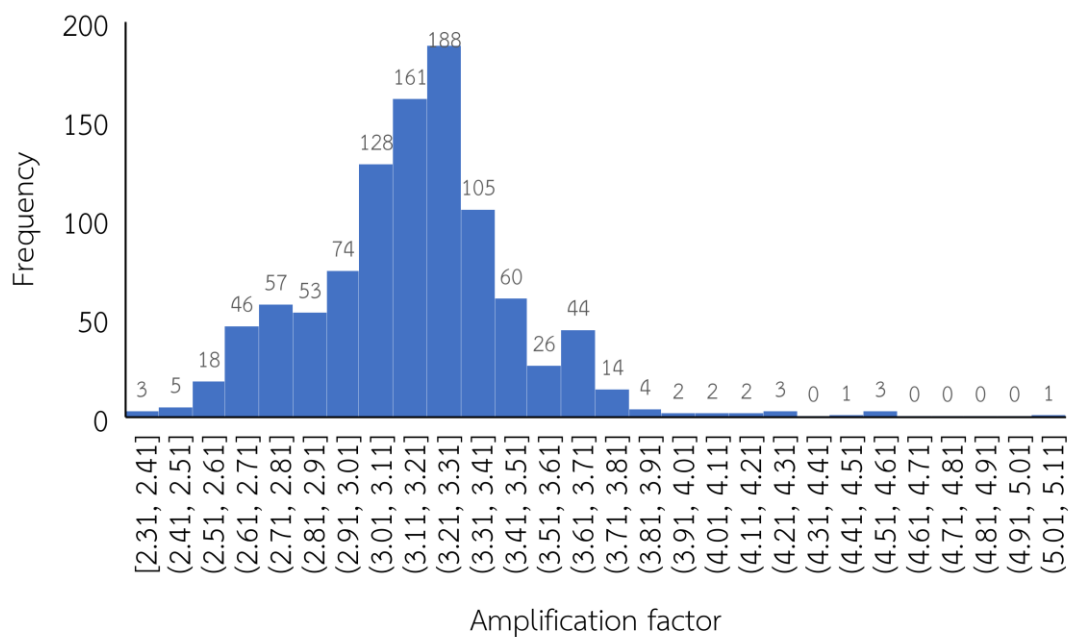
รูป 4-8 การกระจายตัวของได้จากการหาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวทาร์เลย์



รูป 4-9 แผนที่เส้นชั้นความสูงของ PGA ในพื้นที่กรุงเทพฯ

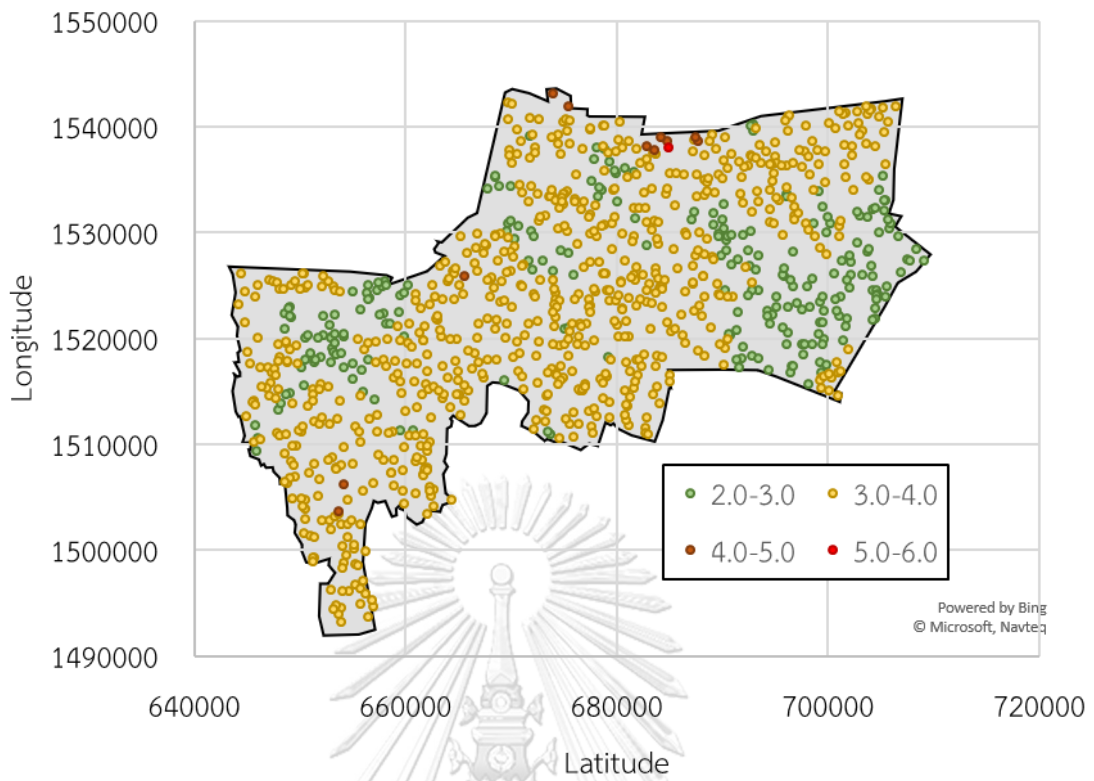
#### 4.5 แฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดิน

อัตราการขยายตัวของความเร่งผิวดินของกรุงเทพมหานครนั้นขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินเฉพาะที่ โดยมีค่า Amplification factor อยู่ในช่วง 2.3 - 5.1 เท่า Mean = 3.17 เท่า Median = 3.19 เท่า Variance = 0.09 SD = 0.30 เท่า STDERR =  $9.6 \times 10^{-3}$  CV = 9.59% และมีเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของ Amplification factor = 3.67 เท่า โดยสามารถดูการกระจายตัวทางสถิติได้ดังรูป 4-10 และสามารถดูการกระจายตัวในแต่ละพื้นที่ได้ดังรูป 4-11 และ รูป 4-12

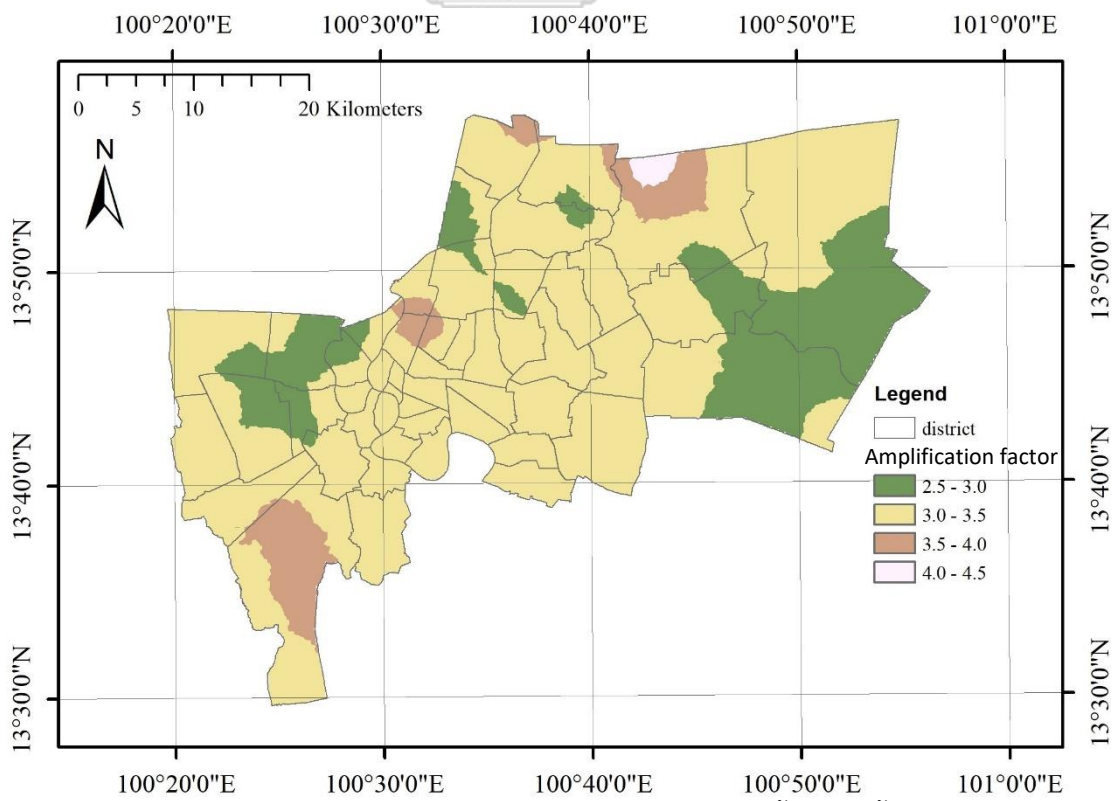


รูป 4-10 การกระจายตัวของแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินที่ได้จากการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวทาร์เลย์





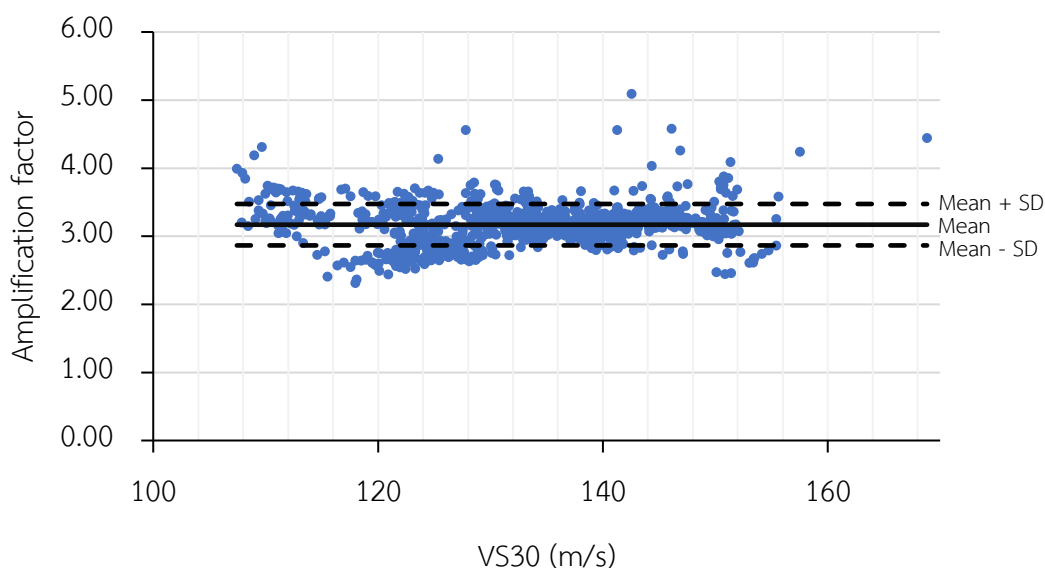
รูป 4-11 การกระจายตัวของแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ



รูป 4-12 แผนที่เส้นชั้นความสูงของแฟกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ

#### 4.6 พิจารณาผลของ $V_{S30}$ ต่อ Amplification factor

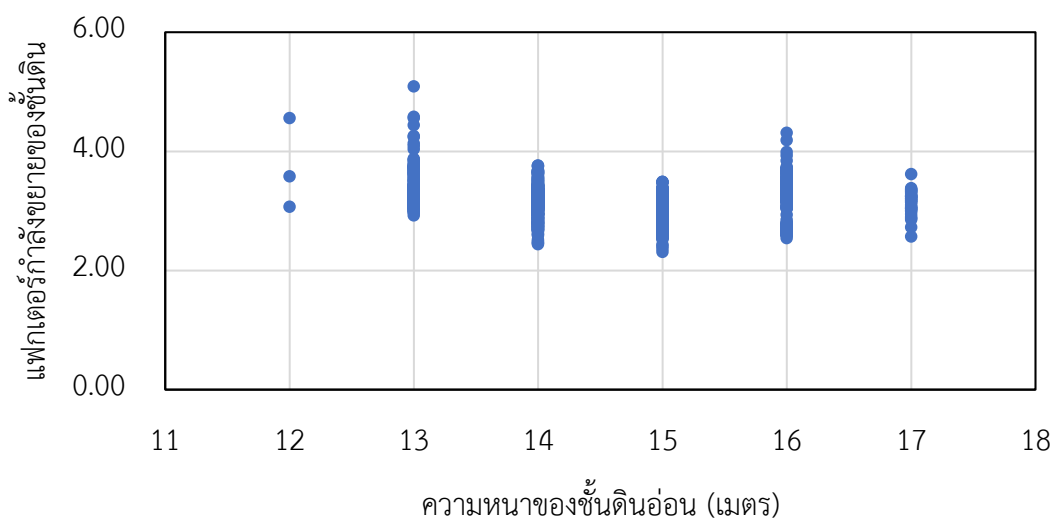
เมื่อพิจารณาผลของ  $V_{S30}$  ต่ออัตราการขยายกำลังของชั้นดิน  $V_{S30}$  ที่มีค่าน้อยกว่า 180 m/s หรือชั้นดินประเภท E จากการจำแนกประเภทโดย (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552) ซึ่งชั้นดินที่มี  $V_{S30} < 180$  m/s นั้นสามารถขยายกำลังคลื่นแผ่นดินไหวให้สูงขึ้น (Choi and Stewart, 2005) แต่ความแตกต่างของ  $V_{S30}$  ในช่วง 110 – 170 m/s กลับไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการขยายกำลังอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวทั้งหมด 1,000 ครั้ง ดังรูป 4-13



รูป 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{S30}$  และ Amplification factor

#### 4.7 พิจารณาผลของความหนาของชั้นดินอ่อนต่อ Amplification factor

เมื่อพิจารณาผลของความหนาของชั้นดินอ่อนที่จำแนกตามกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ หรือชั้นดินที่มี  $S_u < 5$  t/m<sup>2</sup> พบว่าชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12 - 13 เมตร จะส่งผลต่อ Amplification factor ของชั้นดินสูงที่สุด โดยมีค่า Amplification factor อยู่ในช่วง 2.9 – 5.1 เท่า และชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินอ่อนประมาณ 16 เมตร จะมีค่า Amplification factor สูงรองลงมาซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 – 4.2 เท่า ดังรูป 4-14

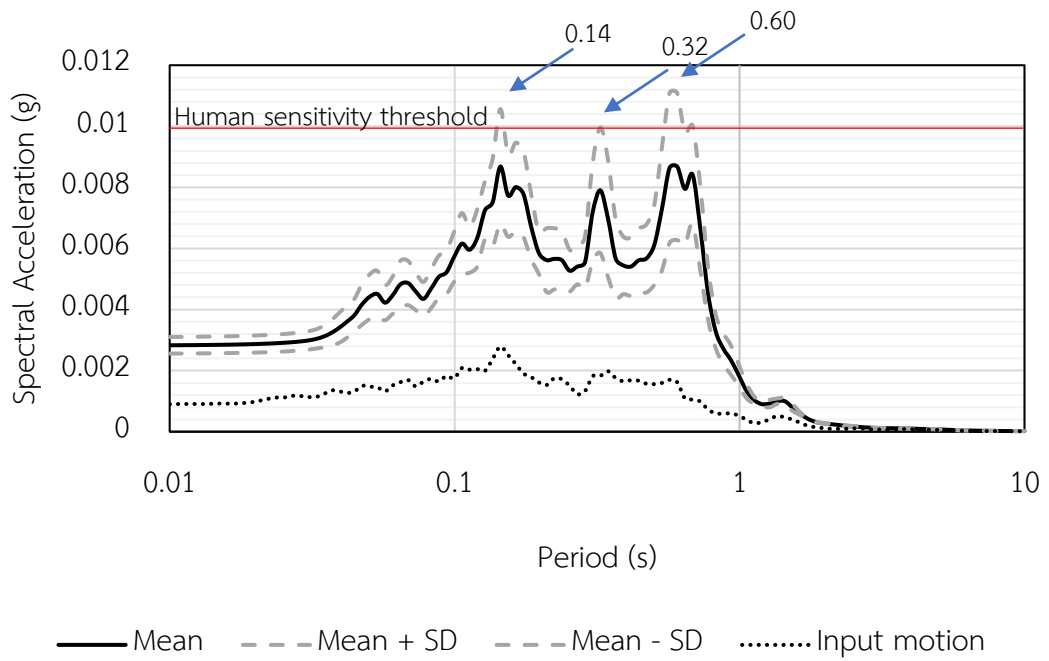


รูป 4-14 ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นดินอ่อนต่อแอมพลิจูดกำลังขยายของชั้นดิน

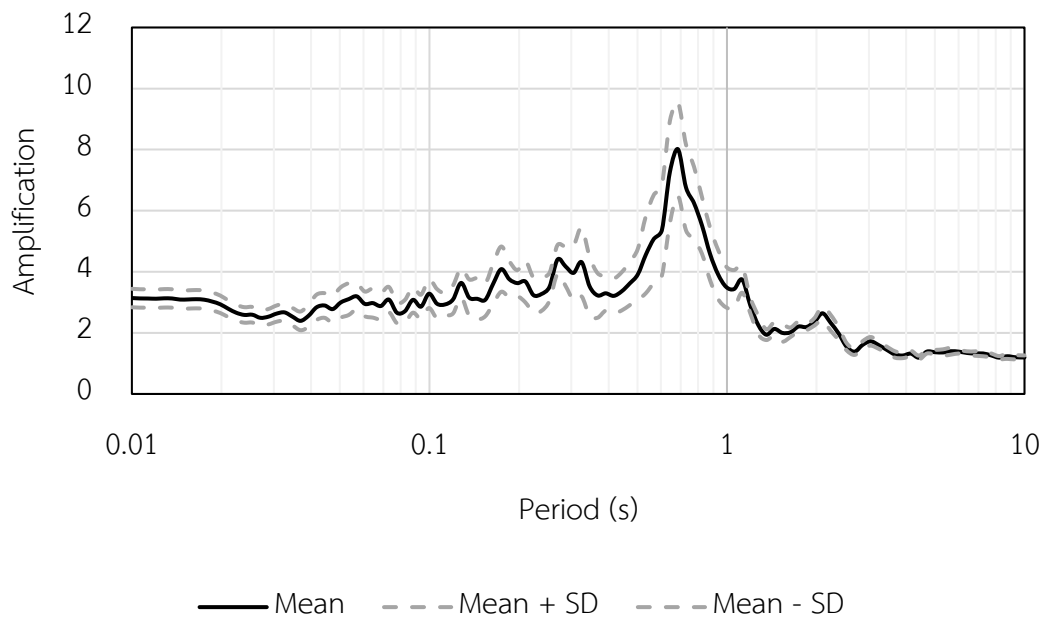
#### 4.8 Spectral Acceleration of ground surface

ความเร่งเชิงสเปกตรัมของผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวถูกนำมาแสดงดังรูป ซึ่งมีความเร่งเชิงสเปกตรัมสูงสุดทั้งหมด 3 จุดที่คาบการสั่นธรรมชาติ 0.14, 0.32 และ 0.60 วินาทีดังรูป 4-15 เมื่อประมาณความสูงของอาคารที่จะได้รับผลกระทบจากคาบการสั่นไหวธรรมชาติจากมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว (มยผ-1302) พบว่าอาคารที่จะมีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตรงกับคาบสั่นไหวธรรมชาติของความเร่งเชิงสเปกตรัมคือ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงประมาณ 7, 16 และ 30 เมตร หรืออาคารเหล็กที่มีความสูงประมาณ 5, 11 และ 20 เมตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอัตราการขยายกำลังเชิงสเปกตรัมพบว่าความเร่งเชิงสเปกตรัมสามารถขยายตัวได้สูงสุด 12.3 เท่า ที่คาบการสั่นไหวเท่ากับ 0.6 วินาที 11.7 เท่า ที่คาบการสั่นไหวเท่ากับ 0.14 วินาที และ 11.05 เท่า ที่คาบการสั่นไหวเท่ากับ 0.32 วินาทีตามลำดับ ดังรูป 4-16



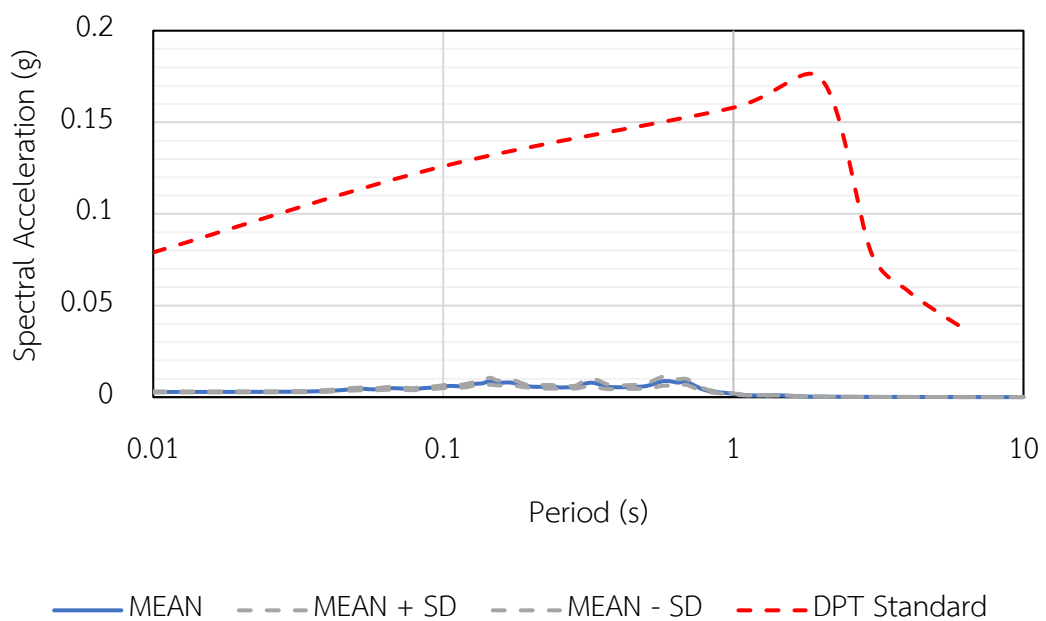
รูป 4-15 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากคลื่นสั้นไหวพาร์เลย์



รูป 4-16 อัตราการขยายกำลังเชิงสเปกตรัมจากคลื่นสั้นไหวพาร์เลย์

#### 4.9 เปรียบเทียบ SA กับมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว

พื้นที่กรุงเทพฯมีมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว โดยพื้นที่กรุงเทพฯจัดอยู่ในโซน 5 ของมาตรฐานการออกแบบมยผ-1302 เมื่อนำมาตรฐานการออกแบบมาเปรียบเทียบกับความเร่งเชิงสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์พบว่าการสั่นไหวอยู่ภายใต้มาตรฐานการออกแบบอย่างปลอดภัย ดังรูป 4-17



รูป 4-17 การเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวเชิงสเปกตรัมกับมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว มยผ. 1302

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้แสดงผลของชั้นดิน 30 เมตรแรกของกรุงเทพต่อแผ่นดินไหวทาร์เลย์เมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554 จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 1 มิติแบบไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม DEEPSOIL ทั้งหมด 1,000 ครั้ง โดยใช้  $V_S$  ของชั้นดินจากการประมาณด้วยสมการความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือน ( $V_S$ ) กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) และ จำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน (N-SPT) จากข้อมูลชั้นดินที่สร้างจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพ สามารถสรุป  $V_{S30}$ , PGA และ Amplification factor ได้ดังตาราง 5-1

ตาราง 5-1 ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่ได้จากการวิเคราะห์

| Statistical Value | $V_{S30}$ (m/s) | PGA at ground surface (%g) | Amplification factor |
|-------------------|-----------------|----------------------------|----------------------|
| Max               | 169             | 0.45                       | 5.1                  |
| Min               | 107             | 0.20                       | 2.3                  |
| Average           | 133             | 0.28                       | 3.2                  |
| Median            | 133             | 0.28                       | 3.2                  |
| Variance          | 119             | $7.29 \times 10^{-6}$      | 0.09                 |
| SD                | 11              | 0.027                      | 0.30                 |
| STD ERR           | 0.34            | $8.54 \times 10^{-4}$      | $9.6 \times 10^{-3}$ |
| CV                | 8.21%           | 9.59%                      | 9.59%                |
| Percentile 95     | 150             | 0.33                       | 3.67                 |

ชั้นดินกรุงเทพฯมี  $V_{S30}$  อยู่ในช่วง 110 – 170 m/s สามารถขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวได้สูง สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Choi and Stewart (2005) ที่กล่าวว่าชั้นดินที่มี  $V_{S30} < 180$  m/s สามารถขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวได้มากหรือมีค่า Amplification factor สูง แต่เมื่อพิจารณาถึง

ความแตกต่างจากผลของ  $V_{S30}$  ในช่วง 110 – 170 m/s ผลจาก  $V_{S30}$  ในช่วงดังกล่าวให้ผลการขยายกำลังคลื่นสั้นไหวไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดหรือให้ผลใกล้เคียงกัน

จากการวิเคราะห์จำนวนมากผลจากความแปรปรวนของความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 30 เมตร แรกนั้นสามารถอธิบายเชิงสถิติได้ด้วยค่า  $CV = 8.21\%$  ซึ่งส่งผลต่อความแปรปรวนของแพกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินด้วย  $CV = 9.59\%$  โดยมีแพกเตอร์กำลังขยายของชั้นดินนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 2.3 – 5.1 เท่า

เมื่อพิจารณาผลจากความหนาของชั้นดินอ่อนซึ่งได้จากการจำแนกด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u < 5 \text{ t/m}^2$ ) พบว่าชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินอ่อนประมาณ 12 – 13 เมตร นั้นมีค่า Amplification factor สูงที่สุด (2.9 - 5.1 เท่า) และ ชั้นดินที่มี Amplification factor สูงรองลงมาคือชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินอ่อน 16 เมตร (2.5 – 4.2 เท่า) ซึ่งมีค่า Amplification factor สูงกว่าชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินอ่อนประมาณ 14, 15 และ 17 เมตร โดยชั้นดินดังกล่าวมีค่า Amplification factor ประมาณ (2.3 – 3.6 เท่า)

ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลียในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554 จะมีความเร่งเชิงสเปกตรัมสูงเมื่อมีคาบการสั่นไหวธรรมชาติเท่ากับ 0.14, 0.32 และ 0.60 วินาที ซึ่งสูงเพียงพอความสามารถของมนุษย์ที่จะรับรู้ถึงความสั่นไหวในเหตุการณ์ครั้งนี้ และตรงกับคาบการสั่นไหวธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงประมาณ 7, 16 และ 30 เมตร หรืออาคารเหล็กที่มีความสูงประมาณ 5, 11 และ 20 เมตร ตามลำดับ

เมื่อนำมาเทียบกับมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว(มยผ-1302) พบว่าคลื่นสั้นไหวจากภายใต้มาตรฐานการออกแบบภายในพื้นที่กรุงเทพอย่างปลอดภัยเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวทาร์เลีย่นั้นเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดปานกลาง ซึ่งในอนาคตอาจจะเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงมากกว่าเหตุการณ์นี้

## 5.2 ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ในงานวิจัย

1. ด้วยข้อจำกัดของข้อมูลชั้นดิน งานวิจัยฉบับนี้จึงพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของชั้นดิน 30 เมตร แรกที่มีต่อผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวเท่านั้น ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมถึงอิทธิพลของชั้นดินในระดับลึกของกรุงเทพได้

2. คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นคลื่นที่ตรวจวัดได้ที่สถานีแม่สายที่ผ่านการแปลงจากสูตรเชิงประสพการณ์มาเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่กรุงเทพ ซึ่งเมื่อนำมาใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองพบว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่สูงอาจไม่ได้ถูกลดทอนกำลังลง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์เพียงคลื่นเดียวเพื่อความถูกต้องควรใช้คลื่นแผ่นดินไหวอื่นที่เกิดขึ้นในประเทศไทยหรือบริเวณใกล้เคียงในภูมิภาคเดียวกันมาวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวเพิ่มเติม

2. ฐานข้อมูลแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิตินั้น ยังขาดข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนที่วัดโดยตรงซึ่งในปัจจุบันสามารถใช้เครื่องมือตรวจวัดภาคสนามได้





- Abrahamson, N., and Silva, W. (1997). *Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, Seismological research letters, V. 68, No. 1.*
- Abrahamson, N., and Silva, W. (2008). *Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations, Earthquake spectra, V. 24, No. 1.*
- Boore, D.M., and Atkinson, G.M. (2008). *Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, p. 99-138.*
- Campbell, K.W., and Bozorgnia, Y. (2008). *NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0,01 to 10 s, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, p.139-171.*
- Chiou, B.J., and Youngs, R.R. (2008). *An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, p. 173-215.*
- Choi, Y., and Stewart, J.P. (2005). *Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity, Earthquake Spectra, Vol. 21(1), p. 1-30.*
- Guignard, J. C. (1971). *Human sensitivity to vibration. Journal of sound and vibration, 15(1), 11-16.*
- 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, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.*
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K., and Katkan, W. (2007). *Assessment of engineering properties of Bangkok clay, Canadian Geotechnic, Vol.44, p.173-187.*

- Hosseini, S. M., Pajouh, M. A., and Hosseini, F. (2010). *The Limitations of Equivalent Linear Site Response Analysis Considering Soil Nonlinearity Properties*. 2010 - Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Idriss, I. (2008). *An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes*, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1, p. 217-242.
- Imai, T. (1981). *Correlation of Nvalue with S-wave velocity and shear modulus*, *The second European symposium on penetration testing*.
- Likitlersuand, S., and Kyaw, K. (2010). *A study of shear wave velocity correlations of Bangkok subsoil*. *Revista de Ingenieria Civil*.
- Mase, L.Z. (2017). *Study of liquefaction mechanism in Chiang Rai province*. (Degree of Doctor of Philosophy), Chulalongkorn University.
- Ngamcharoen, K., Likitlersuang, S., & Boonyatee, T. (2016). *Development of 3D Geological Modelling for Bangkok Subsoils*. *The Twenty-Ninth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering*.
- Poovarodom, N., and Jirasakjamroonsri, A. (2014). *Evaluation of seismic site effects for Bangkok deep basin*, Paper presented at the *Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey.
- Seed, H., and Idriss, I. (1970). *Soil moduli and damping factors for dynamic analysis*. Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J.P., Jaime, A., and Lysmer, J. (1987), *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico city in the earthquake of Sept.19,1985*.
- Vucetic, M., and Dobry, R. (1991). *Effect of soil plasticity on cyclic response*, *Journal of geotechnical engineering*, V. 117, No. 1, p. 89-107.

กมลรัตน์ งามเจริญ, 2559. ฐานข้อมูลทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคของชั้นดินกรุงเทพฯสำหรับการ  
ออกแบบฐานรากเสาเข็ม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2552). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของ  
แผ่นดินไหว (มยผ. 1302).

บุรินทร์ เวชบรรเทิง. (2549). ความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับแผ่นดินไหว, สำนักแผ่นดินไหว, กรม  
อุตุนิยมวิทยา

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บรรพต กุลสุวรรณ, วรากร ไม้เรียง และ อติชาติ สุรินทร์คำ. (2553). การพัฒนา  
ฐานข้อมูลดินทางวิศวกรรมเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐาน :  
กรณีศึกษาพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, โยธาสาร : ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์.

สุพจน์ เตชวรสินสกุล. (2549). พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

อำนาจ ยานูวิริยะกุล, 2552. การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ  
เนื่องจากแผ่นดินไหว, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

## รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ภาคผนวก



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาณุสรณ์ เปล่งสิริ เกิดวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**