



## อิทธิพลความหนาของชั้นดินกรุงเทพฯ ต่อพฤติกรรมการตอบสนองเนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

INFLUENCE OF BANGKOK SOIL LAYER THICKNESS ON RESPONSIVE BEHAVIOR  
FROM EARTHQUAKE FORCESอำนาจ ยานูวิริยะกุล (Ammarj Yanuviriyakul)<sup>1</sup>สุทธิศักดิ์ สรลัมภ์ (Suttisak Sorlump)<sup>2</sup><sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (juleit\_88@hotmail.com)<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (sorlump\_s@yahoo.com)

**บทคัดย่อ :** แผ่นดินไหวสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง เช่น บ้านพักอาศัย ตึกสูง โครงสร้างพื้นฐาน และเขื่อน ซึ่งจะนำไปสู่ความสูญเสียต่อชีวิตอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยเฉพาะชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บริเวณแอ่งตะกอนดินเหนียวบริเวณภาคกลางตอนล่าง ซึ่งชั้นดินเหนียวอ่อนทำให้ตัวแปรของคลื่นแผ่นดินไหวเปลี่ยนแปลง และอาจก่อให้เกิดการสั่นพ้องระหว่างอาคารกับชั้นดิน การศึกษานี้ได้นำเสนอถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยพิจารณาปัจจัย ได้แก่ ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ระดับความลึกของชั้นเสมือนชั้นหิน (Rock-liked layer) ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งระดับลึก และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน โดยการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินดำเนินการโดยการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนาม เปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) เพื่อเลือกใช้ค่าตัวแปรคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมกับแบบจำลองสำหรับงานวิจัย การวิเคราะห์ดำเนินการโดยวิธีการตอบสนองในลักษณะ 1 มิติ โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์แบบ Linear equivalent และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาเพื่อปรับให้เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ จากนั้นได้ประเมินการตอบสนองเชิงพื้นที่ตามพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหวที่วิเคราะห์จากข้อมูลหลุมเจาะ 39 ตำแหน่ง ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากการศึกษพบว่าระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมของแบบจำลองอยู่ที่ความลึก 120 เมตร และชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ในระดับลึกไม่มีผลต่อการตอบสนองที่ผิวดิน นอกจากนี้ยังพบว่าการขยายอัตราเร่งที่ผิวดินจะแปรผันตามความหนาของชั้นดินอ่อน แต่หากชั้นดินอ่อนมีความหนามากถึงระดับหนึ่งจะเริ่มแปรผกผัน

**Abstract :** Earthquake is a natural hazard that could cause a serious damage to civil engineering structures. Especially when seismic wave passes through soft Bangkok clay in which amplification of ground acceleration might be occurred. This research studied the factors that affected soil's response due to seismic wave. The effect from soft clay thickness, depth to rock-liked layer, an influence of stiff clay layer and dynamic soil properties were considered. Moreover shear wave velocity of soil layer obtain from field tests were compared with shear wave velocity obtained from empirical equations in order to choose suitable equation for the model. A method in linear equivalent will be analyzed with 39 soil data in this research. The study found that the appropriate elevation of rock-liked layer for the model is 120 meter below the surface and stiff clay layer in the deeper depth doesn't have an effect to the response of ground surface. Besides, the result shows that the amplification factor is increased when soft clay thickness increases to some magnitude and decreased after that.

**Keyword :** Geotechnical earthquake engineering, Earthquakes, Soft Bangkok clay, Amplification factor, Shear wave velocity

## 1. บทนำ

การศึกษาการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวดำเนินการโดยจำลองพฤติกรรมการตอบสนองคลื่น 1 มิติ โดยกำหนดให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์เปลี่ยนแปลงในลักษณะ Linear equivalent และค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus) หรือความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shear wave velocity) ได้จากการทดสอบในสนามและการคำนวณจากสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) ซึ่งในกรณีหลังคำนวณโดยอาศัยคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจากหลุมเจาะสำรวจ การหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดในชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางต้องอาศัย ตัวแปรสำคัญอันได้แก่ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง ( $e$ ) และค่า Over-consolidation ratio (OCR) ที่สามารถประเมินได้จากตัวอย่างดินคงสภาพในขณะที่ดินเหนียวแข็งไม่สามารถหาค่าดังกล่าวได้โดยง่ายเพราะไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินคงสภาพได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางพลศาสตร์และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็ง

นอกจากนั้นการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองจำเป็นต้องคำนึงถึงอิทธิพลของระดับชั้นเสมือนหิน สำหรับใช้เป็นระดับกระตุ้นโดยคลื่นแผ่นดินไหวในแบบจำลอง รวมทั้งจากการศึกษาข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินระดับลึกถึงระดับ 600 เมตร [1] พบว่าระดับชั้นดินที่ลึกลงไปจะมีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่เป็นระยะๆ การวิจัยนี้จึงศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าวว่ามีผลต่อพฤติกรรมตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวหรือไม่ สำหรับอิทธิพลความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีความหนาประมาณ 6-18 เมตร เป็นหัวข้อสำคัญที่ได้ศึกษาในบทความนี้

จากผลการศึกษาข้างต้นเพื่อให้ได้ภาพรวมต่อความปลอดภัยของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพฯ เชิงพื้นที่โดยวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินจากฐานข้อมูลชั้นดินที่ถูกจัดเก็บรวบรวมในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อให้ได้ลักษณะการตอบสนองของชั้นดินในพื้นที่ขอบเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

## 2. คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินกรุงเทพฯ

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว คือ โมดูลัสเฉือนสูงสุด หรือความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินและ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน โมดูลัสเฉือน และอัตราส่วนความหน่วง กับ ความเครียดเฉือน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1 โมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus, $G_{max}$ )

โดยทั่วไปแล้ว  $G_{max}$  สามารถทดสอบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น Cyclic triaxial test และ Bender element test [2] เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถหาได้จากการทดสอบในสนาม เช่น Downhole seismic test [3], Spectrum Analysis of Surface Wave test (SASW) [4] และ Multichannel Analysis of Surface Wave Method (MASWM) [5] เป็นต้น โดยการทดสอบในสนามดังกล่าวจะให้ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด ดังสมการที่ (1)

$$G_{max} = \frac{\gamma}{g} \cdot V_S^2 \quad (1)$$

โดย  $\gamma$  คือหน่วยน้ำหนักกรัม ( $t/m^3$ ),  $g$  คือความเร่งตามแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ ) และ  $V_S$  คือความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $m/s$ )

งานศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบในสนามด้วยวิธีต่างๆ เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ของดิน เช่น อัตรา ส่วนช่องว่าง ( $e$ ), หน่วยน้ำหนักรวม ( $\gamma$ ), กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) และ ค่า Standard Penetration Test (SPT, N-value) เป็นต้น โดยแตกต่างกันตามชนิดดิน และมี Empirical equation ในรูปทั่วไปสามารถใช้ได้กับดินทุกชนิดซึ่งนำเสนอไว้โดย [6] ดังสมการที่ (2)

$$G_{max} = 3,230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} OCR^k \cdot \sigma_m^{0.5} \quad (2)$$

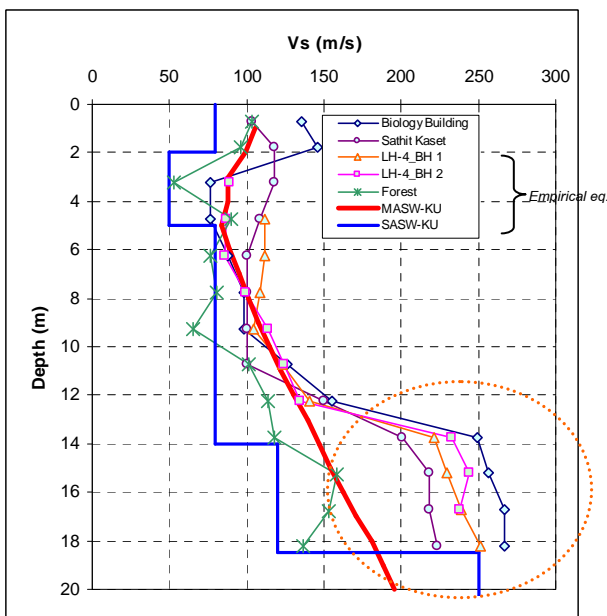
โดย  $e$  คือ อัตราส่วนช่องว่าง, OCR คือ Overconsolidation ratio,  $k$  คือค่าคงที่,  $\sigma'_m$  คือหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (kPa)

เนื่องจากสมการที่ (2) มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมาก เพื่อความสะดวกในการหาค่า  $G_{max}$  สำหรับชั้นทราย จึงมีผู้คิดค้นสมการโดยใช้ความสัมพันธ์ของ SPT (N-corrected) นำเสนอไว้โดย [7] ดังสมการที่ (3)

$$G_{max} = 1,000(K_2)_{max} (\sigma'_m)^{1/2} \quad (3)$$

โดยที่  $(K_2)_{max} = 20 \cdot (N_1)_{60}^{1/3}$ ,  $\sigma'_m$  คือหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (lb/ft<sup>2</sup>)

จากการศึกษาพบว่า สมการที่ (2) และ (3) ใช้ได้ดีสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน และในชั้นทรายตามลำดับ แต่สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งสมการดังกล่าวจะให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบในสนาม ดังผลเปรียบเทียบการทดสอบ SASW และ MASWM กับค่าที่ได้จาก Empirical equation จากข้อมูลหลุมเจาะ โดยการทดสอบในสนามดำเนินการภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับหลุมเจาะสำรวจในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนระหว่างผลทดสอบในสนามด้วยวิธี SASW และ MASW กับการคำนวณด้วย Empirical equation จากข้อมูลหลุมสำรวจจำนวน 5 หลุมเจาะ บริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงกับความเครียด

Seng et al. (2007) ([5]) ได้ทดสอบเพื่อหา Modulus reduction curve ( $G/G_{max}$  กับ %-Shear Strain) และ Damping curve ( $\lambda$  กับ %-Shear Strain) สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าการกระจายตัวของผลการทดสอบอยู่ในช่วงของค่า PI ระหว่าง 15% - 50% ซึ่งตรงกับที่เสนอไว้โดย Terzaghi and Peck (1948) [8] จึงสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

## 3. ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลอง

### 3.1 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับงานวิจัย

การเลือกคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์พิจารณาจากระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวกับศูนย์กลางกรุงเทพฯ โดยพิจารณารอยเลื่อนมีพลังที่สำคัญใกล้กรุงเทพฯ ได้แก่ กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์จังหวัดกาญจนบุรีที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางกรุงเทพฯ ประมาณ 200 กิโลเมตร และกลุ่มรอยเลื่อนองครักษ์จังหวัดนครนายกมีระยะห่างประมาณ 80 กิโลเมตร โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกคลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลของ PEER Strong Ground Motion ที่วัดได้จากสถานีที่อยู่บนชั้นหินและอยู่ห่างจากสถานีวัดในระยะต่าง ๆ โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ ดังแสดง ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์

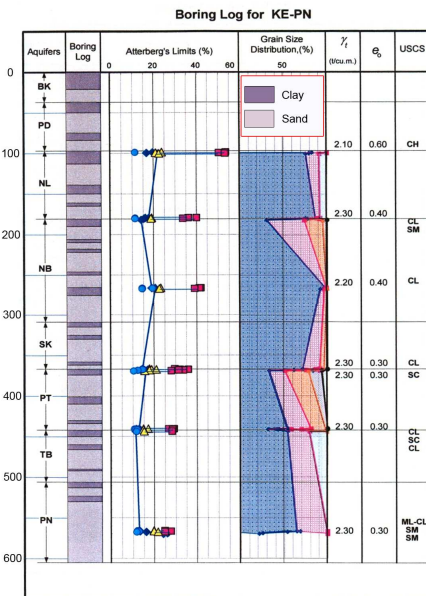
| No. | เหตุการณ์แผ่นดินไหว  | วันที่     | ขนาด ( $M_s, M_w, M_f$ ) | ระยะจากศูนย์กลางถึงสถานีวัด (km) | PGA (g) |
|-----|----------------------|------------|--------------------------|----------------------------------|---------|
| 1   | Chi Chi              | 20/09/1999 | 7.3                      | 53                               | 0.036   |
| 2   | Trinidad, California | 08/11/1980 | 7.2                      | 72                               | 0.134   |
| 3   | Victoria, Mexico     | 09/06/1980 | 6.4                      | 58                               | 0.068   |
| 4   | Lytle creek          | 12/09/1970 | 5.4                      | 108                              | 0.026   |
| 5   | Lander               | 28/06/1992 | 7.4                      | 175.6                            | 0.066   |
| 6   | Tabas, Iran          | 16/09/1978 | 7.4                      | 199.1                            | 0.034   |
| 7   | Kocaeli, Turkey      | 17/08/1999 | 7.8                      | 237.1                            | 0.106   |

### 3.2 ความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลอง

ในส่วนนี้ได้ศึกษาระดับความลึกของชั้นเสมือนหินของชั้นดินกรุงเทพฯ ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง 1 มิติ เพื่อใช้เป็นชั้นที่คลื่นแผ่นดินไหวถูกปล่อยเข้าสู่ระบบโดยที่ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้น Engineering bedrock มีค่าสูงกว่า 400 m/s [9] จากการศึกษาคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์เบื้องต้น พบว่าระดับความลึกของชั้นหินที่มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนมากกว่า 760 m/s (เทียบเท่าชั้นเสมือนหิน) หากคำนวณค่าโดย Empirical equation พบว่ามีระดับความลึกประมาณ 800-1,000 เมตร อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองให้ครอบคลุมความลึกดังกล่าวนั้นมีข้อมูลไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาระดับความลึกที่เหมาะสมน้อยที่สุดที่สามารถใช้เป็นขอบเขตของแบบจำลอง

ข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินที่นำมาสร้างแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์กรณีนี้ได้มาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจจริง ซึ่งมีความลึก 60 เมตร ส่วนที่ลึกกว่านี้ประเมินจากข้อมูลหลุมเจาะระดับลึกหลายหลุมประกอบกัน (ลึกที่สุด 600 เมตร บริเวณบางขุนเทียน) [1] ดังแสดงในภาพที่ 2 ทำให้สามารถประเมิน Shear wave velocity profile ได้ดังภาพที่ 3

การวิเคราะห์ส่วนแรกนี้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ที่ 2 จากตารางที่ 1 (California earthquake) โดยกำหนดระดับของชั้นเสมือนหินเพื่อเป็นชั้นกระตุ้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับแตกต่างกัน ตั้งแต่ 60 - 200 เมตรซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4 และ 5 พบว่าการตอบสนองของชั้นดินมีความแปรปรวนอย่างชัดเจนเมื่อระดับความลึกของชั้นเสมือนหินเปลี่ยนแปลงในช่วง 60-120 เมตร ในขณะที่กรณีระดับความลึก 120-200 เมตร พบว่าไม่มีผลต่อการตอบสนองของชั้นดินโดยค่า  $T_p$  ของคลื่นตอบสนองที่ผิวดินคงที่ และการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินก็ไม่แตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกชั้นเสมือนหิน ดังนั้นการวิเคราะห์ต่อไปจะได้พิจารณาความลึกที่จะปล่อยคลื่นแผ่นดินไหวเข้าสู่ระบบ (ชั้นเสมือนหิน) ที่ระดับความลึก 120 เมตร

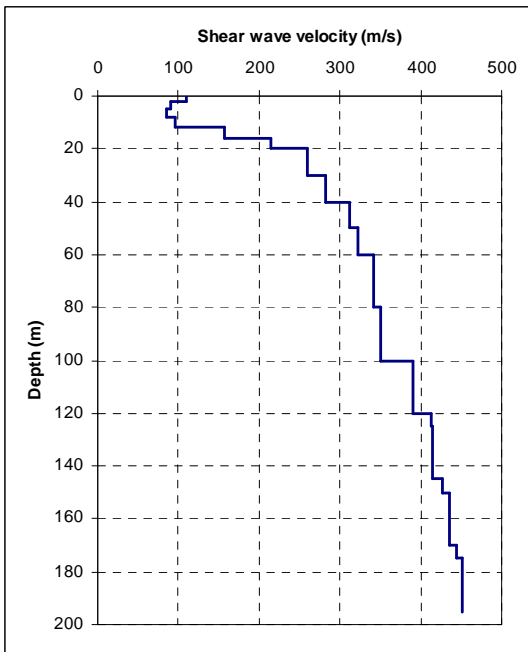


ภาพที่ 2 ลักษณะชั้นดินของหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร บริเวณบางขุนเทียน กรุงเทพฯ, KE Station [1]

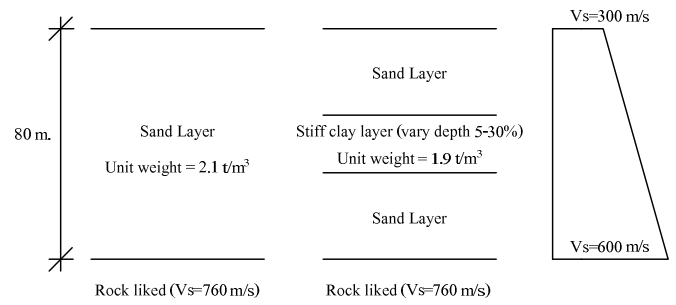
### 3.3 อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งแทรกระดับลึก

การศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นดินเหนียวระดับลึกของชั้นดินกรุงเทพฯ (ได้ชั้นทรายชั้นที่ 3 ที่มีความลึกมากกว่า 60 เมตร) ดำเนินการโดยกำหนดแบบจำลองชั้นดินสมมติขึ้นมา ซึ่งชั้นดินดังกล่าวเป็นชั้นทรายหนา 80 เมตรและมีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่ระหว่างกึ่งกลางชั้นตามสภาพลักษณะชั้นดินระดับลึกของชั้นดินกรุงเทพฯ โดยการวิเคราะห์ได้เพิ่มความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งตั้งแต่ 0% - 30 % ของความหนาทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 6

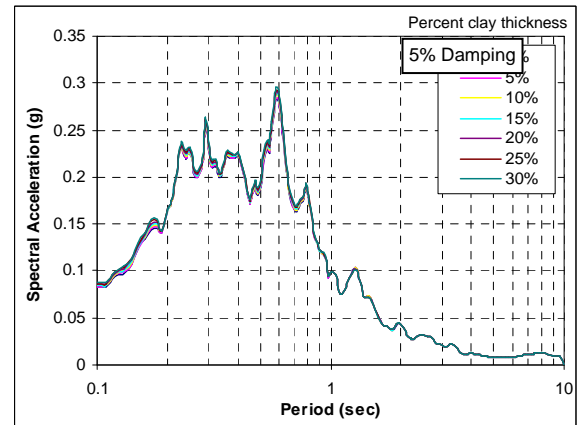
การวิเคราะห์ใช้คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ที่ 2 จากตารางที่ 1 (California earthquake) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ในชั้นทรายระดับลึกนั้น ไม่มีอิทธิพลต่อการตอบสนอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าชั้นดินในระดับลึกนั้นมีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) สูงมากกว่า 350 m/s จึงทำให้การตอบสนองต่อการสั่นไหวไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 7) ซึ่งเหมือนกันในทุกๆ กรณีของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นทราย



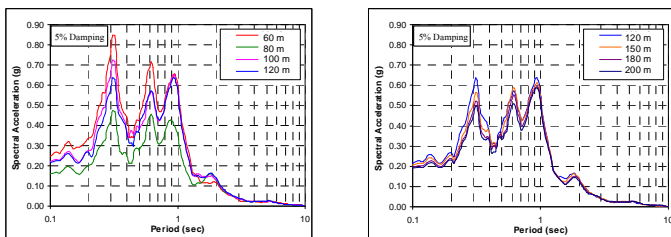
ภาพที่ 3 Shear wave velocity profile ของชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับการวิเคราะห์หัตถิพลความลึกชั้นเสมือนหิน



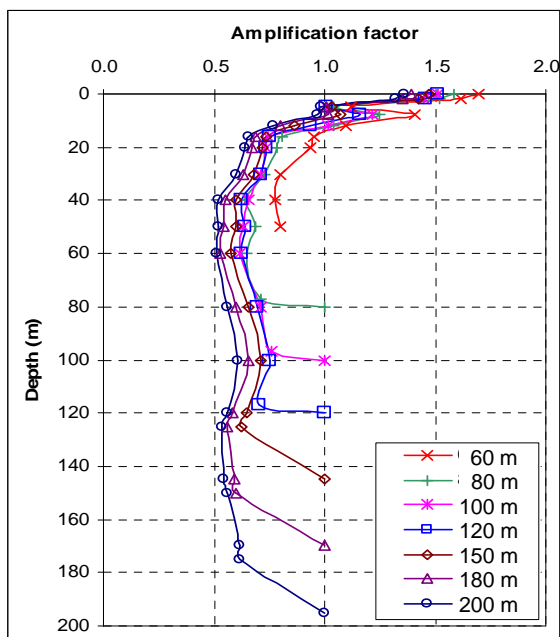
ภาพที่ 6 ลักษณะชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์กรณีชั้นดินเหนียวแข็งแทรก



ภาพที่ 7 Acceleration Response Spectra กรณีชั้นดินเหนียวแข็งแทรก



ภาพที่ 4 Acceleration Response Spectra กรณีระดับความลึกของชั้นหินเสมือนเท่ากับ 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร



ภาพที่ 5 Amplification factor เมื่อระดับความลึกของชั้นหินเสมือนเท่ากับ 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร

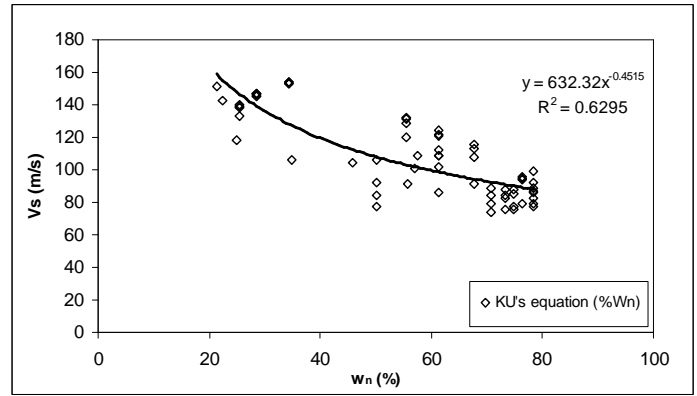
### 3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นแรงเฉือนกับคุณสมบัติดินในสนาม

จากปัญหาในการใช้ Empirical equation สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดสอบหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามโดยวิธี MASWM เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับข้อมูลคุณสมบัติดินจากการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณสนามรักบี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งทดสอบตัวอย่างดินโดยห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยเน้นความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) ซึ่งได้จากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UC) โดยการทดสอบดังกล่าวเหมาะสมสำหรับตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay) สำหรับดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) เนื่องจากไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินคงสภาพได้ จึงต้องหาค่า  $S_u$  จากค่า SPT(N) ตามความสัมพันธ์ของ [8] และ ค่า  $V_s$  ได้ถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับข้อมูล  $S_u$  และความชื้นในดินตามธรรมชาติ (%-Natural water content,  $w_n$ ) ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$V_s = 84.18 \cdot S_u^{0.23} \quad (4)$$

$$V_s = 632.32 \cdot w_n^{-0.45} \quad (5)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่เสนอไว้โดยสุพจน์ (2549) [3] ซึ่งเหมาะสมสำหรับการหาค่า  $V_s$  ในดินเหนียวอ่อนพบว่าหากใช้กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งปานกลางขึ้นไปจะได้ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่สูงกว่าผลการทดสอบในสนาม ดังแสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 8



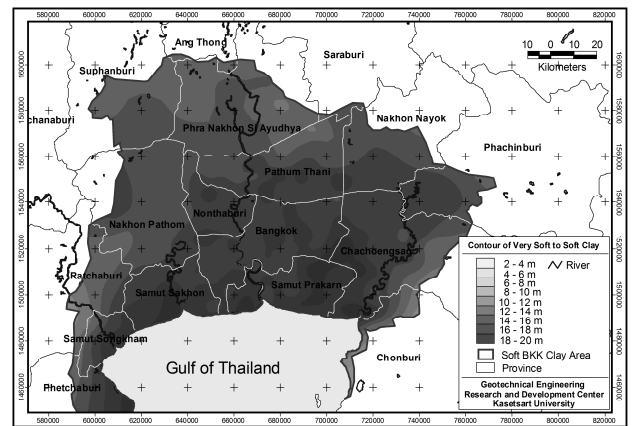
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $w_n$  (%) กับ  $V_s$  ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### 3.5 การศึกษาอิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน

การศึกษาในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

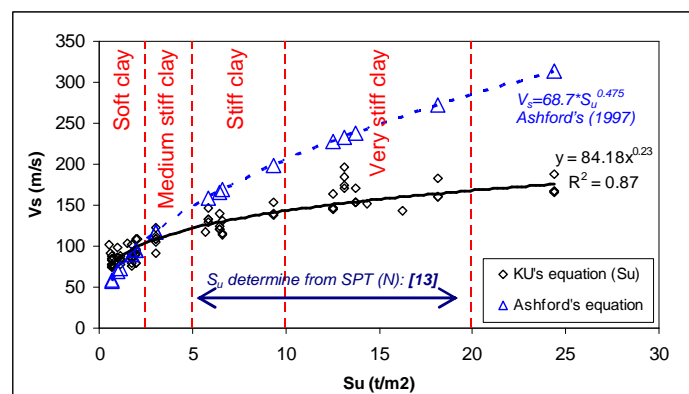
#### 3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะการวางตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การวิเคราะห์นี้ดำเนินการโดยอาศัยข้อมูลการศึกษาการวางตัวของชั้นดินกรุงเทพฯ ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินทั่วพื้นที่ทำการศึกษารวม 3,755 หลุมเจาะ ซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยดำเนินการวิเคราะห์ระดับความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เส้นชั้นความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

นอกจากนั้นการศึกษาดังกล่าวได้ทำการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน และเฉลี่ยค่าในพื้นที่ตารางย่อยขนาด 5X5 ตารางกิโลเมตร ซึ่งในการศึกษาที่นำเสนอในบทความนี้ได้นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้แปลเป็นค่าคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์โดยอาศัยผลการศึกษาในหัวข้อ 3.4 สำหรับประเมินค่า  $V_s$  เพื่อใช้ในวิเคราะห์แบบจำลองการตอบสนองใน 1 มิติเชิงพื้นที่ต่อไป



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u$  กับ  $V_s$  ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

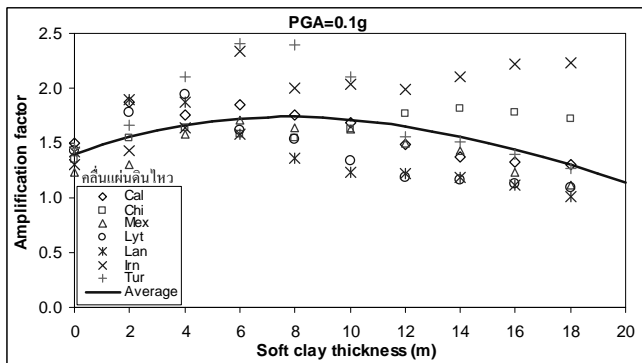
#### 3.5.2 อิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนต่อการขยายอัตราเร่งที่ผิวดิน (Amplification factor)

การศึกษาดำเนินการโดยใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่จำเป็นกับแบบจำลอง โดยการศึกษานี้ได้ทดลองเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 0-20 เมตร โดยให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินคงที่และใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะคลื่นแตกต่างกันจำนวน 7 เหตุการณ์จากตารางที่ 1 โดยปรับขนาดให้มี PGA เท่ากับ 0.1g เท่ากันทั้ง 7 เหตุการณ์ พบว่าการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน

(Amplification factor) มีลักษณะเป็นรูปโค้งคว่ำ โดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนในช่วง 0-6 เมตร และมีค่าสูงสุดบริเวณช่วงชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-10 เมตร หลังจากนั้นการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) มีค่าลดลงเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 11 การขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification Factor, Amp.) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) [10]

จากภาพดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่าการขยายคลื่นแผ่นดินไหวจากคลื่นแผ่นดินไหวหลายคลื่นมีแนวโน้มพฤติกรรมคล้ายกันดังที่ได้กล่าวมา ยกเว้นคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศอิหร่านพบว่ามีการขยายค่า PGA เพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นดินเพียงอย่างเดียว เมื่อทำการตรวจสอบอย่างละเอียดพบว่าคลื่นดังกล่าวมีลักษณะคล้ายคลื่นแผ่นดินไหวที่วัดจากสถานีที่ไม่ได้วางอยู่บนหินแข็ง

$$Amp. = \frac{PGA_{Surface}}{PGA_{Outcrop}} \quad (6)$$

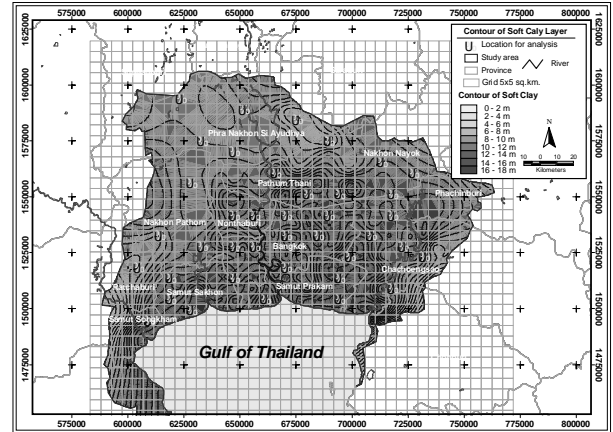


ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลง Amplification factor ต่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 0-20 เมตร

#### 4. การตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวเชิงพื้นที่ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การกำหนดพื้นที่ของการวิเคราะห์นั้นได้จากข้อมูลเส้นชั้นความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในภาพที่ 10 โดยกำหนดให้ตำแหน่งของการวิเคราะห์อยู่กระจายตัวในพื้นที่ ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นทุกๆ 2 เมตร ตั้งแต่ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน 6-18 เมตร ทั้งนี้ความหนาของชั้นดินที่น้อยกว่านี้ไม่ได้พิจารณา เพราะอยู่บริเวณขอบของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยนำข้อมูลคุณสมบัติดินเฉลี่ยจากหลุมเจาะสำรวจในแต่ละพื้นที่ย่อย (5x5 ตารางกิโลเมตร) มาแปลค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนตามสมการที่ได้เสนอไว้ข้างต้น ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้น

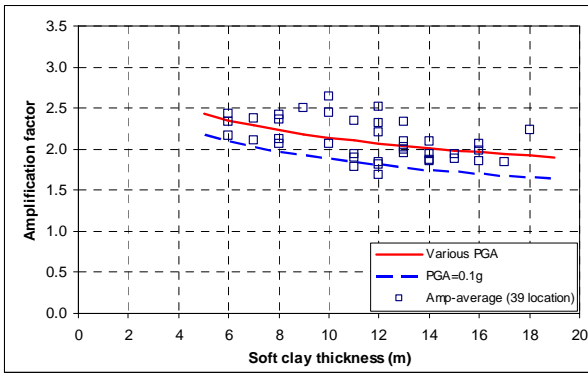
ดินทั้งหมด 39 พื้นที่ย่อย (ภาพที่ 12) และจำลองความลึกชั้นเสมือนหินที่ระดับ 120 เมตร โดยทำการศึกษา 2 กรณี เช่นเดียวกับหัวข้อการศึกษาอิทธิพลของชั้นดินเหนียวอ่อน (หัวข้อ 3.5.2)



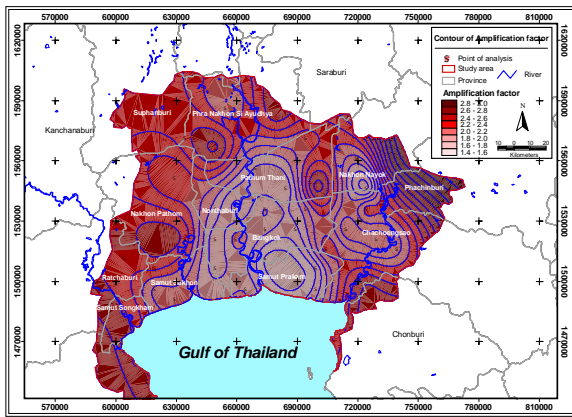
ภาพที่ 12 ตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นที่

#### 4.1 การขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor, Amp) ของพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

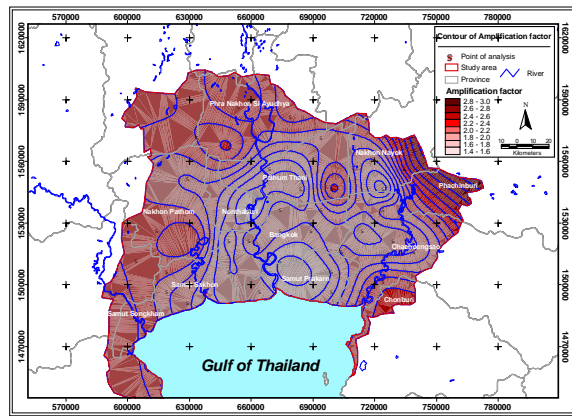
การศึกษาการขยายอัตราเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณผิวดินเชิงพื้นที่ ผลการศึกษาพบว่าสอดคล้องกับการศึกษาอิทธิพลของชั้นดินเหนียวอ่อนในแบบจำลองก่อนหน้านี้ โดยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนา 5-10 เมตร มีการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน 2.2 - 2.5 เท่า ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10-15 เมตร มีการขยายอัตราเร่งสูงสุด 2.0-2.2 เท่า และชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนามากกว่า 15 เมตร สามารถขยายอัตราเร่งสูงสุด 1.7-2.0 เท่า และเมื่อความรุนแรงของแผ่นดินไหว (PGA) สูงขึ้นการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินจะลดต่ำลง ภาพที่ 13 แสดงการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินที่ลดลงเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น (โดยดูประกอบกับลักษณะการวางตัวของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนในภาพที่ 10) ดังแสดงแผนที่ของการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินในพื้นที่ศึกษาในภาพที่ 14 (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 1) และภาพที่ 15 (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 2)



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ภาพที่ 14 Amplification factor บริเวณพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 1: Various PGA)

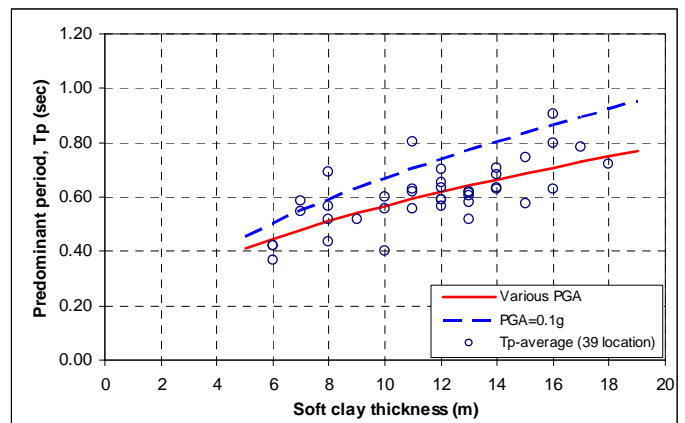


ภาพที่ 15 Amplification factor บริเวณพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 2: PGA=0.1g)

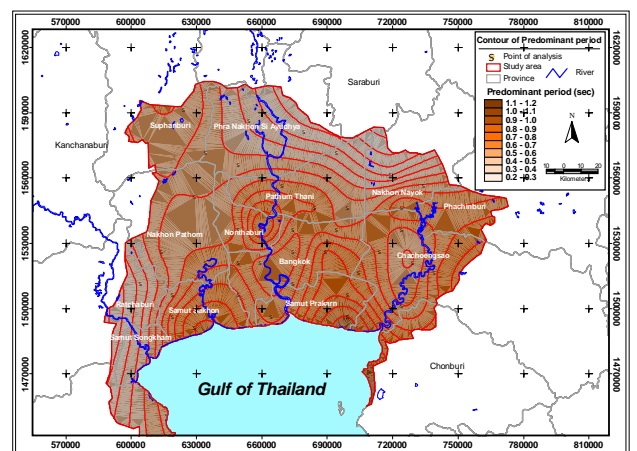
#### 4.2 คาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period, $T_p$ ) ของพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

สำหรับค่าคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period,  $T_p$ ) พบว่ามีความแตกต่างกันไปตามความหนาของชั้นดิน และคุณสมบัติของชั้นดินที่แตกต่างกัน โดยมีความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 16 ซึ่งสอดคล้องกับที่เสนอไว้โดย [11] ว่าค่า  $T_p$  ของพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ จะแปรผันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนโดยมีค่าเท่ากับ 0.8-1.2 วินาที

บริเวณพื้นที่ใกล้กับอ่าวไทย และลดลงเหลือ 0.4 วินาที เมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนลดลงบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา นอกจากนี้ [12] ได้เสนอว่า  $T_p$  บริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ จะมีค่าเท่ากับ 0.5-1.0 วินาที ซึ่งจากผลการศึกษาที่เสนอในบทความนี้พบว่าคาบการสั่นไหวที่ผิวดินบริเวณดังกล่าวมีคาบการสั่นไหวเท่ากับ 0.6-0.8 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุพจน์และรัตนมณี (2548) โดยพื้นที่บริเวณปากอ่าวไทยมีค่า  $T_p$  เท่ากับ 0.8-1.0 วินาที และลดลงเหลือ 0.3-0.4 วินาทีที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตามการลดลงของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในแผนที่ของคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดินดังภาพที่ 17 (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 1) และคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดินจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความรุนแรงของแผ่นดินไหว (PGA) เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่า 1.0-1.2 วินาที บริเวณปากอ่าวไทย ดังแสดงในภาพที่ 18 (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 2)

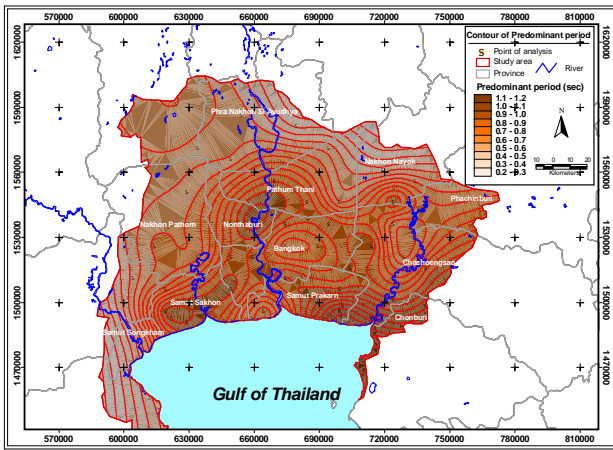


ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ภาพที่ 17 Predominant period บริเวณพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 1: Various PGA)





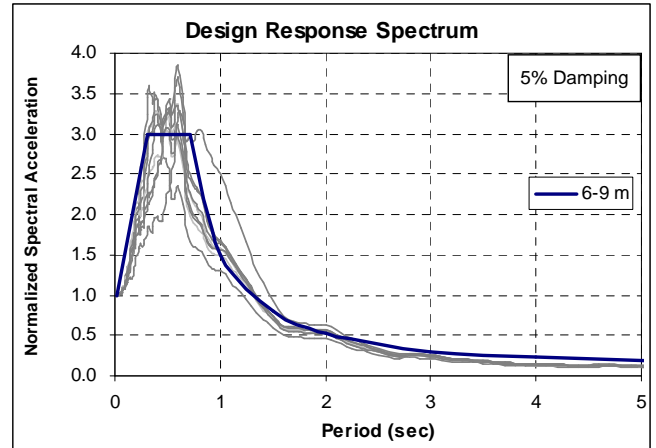
ภาพที่ 18 Predominant period บริเวณพื้นที่ที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ (คลื่นแผ่นดินไหวกรณีที่ 2:  $PGA=0.1g$ )

### 4.3 Design response spectrum บริเวณพื้นที่ที่ชั้นดินเหนียว กรุงเทพฯ

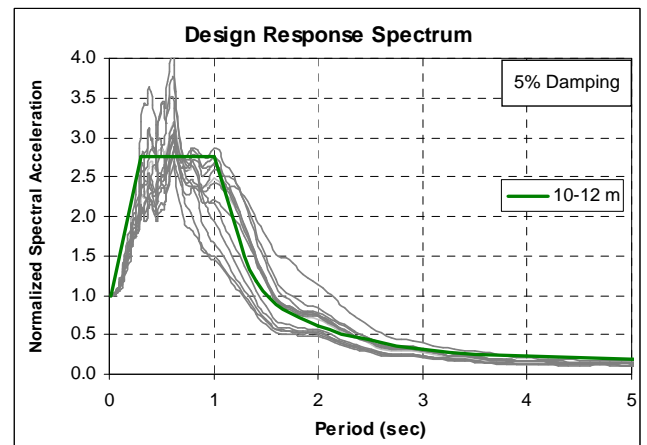
จากการศึกษาพบว่าสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดินแตกต่างกันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยการวิเคราะห์ใช้คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ 7 เหตุการณ์ ดังตารางที่ 1 และสรุปจากการวิเคราะห์พื้นที่ตัวแทน 39 ตำแหน่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยนำสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดินของ 7 คลื่นแผ่นดินไหวมาเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งทั้ง 39 ตำแหน่ง หลังจากนั้นทำการจำแนกตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนได้ 4 พื้นที่ได้แก่ 6-9 เมตร 10-12 เมตร 13-15 เมตร และ 16-18 เมตร และเฉลี่ยสเปกตรัมตอบสนองในแต่ละพื้นที่โดยวิเคราะห์ค่า Bandwidth เพื่อกำหนดช่วงของคาบการตอบสนองต่อการสั่นไหวของคลื่นที่ผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 19-22

ผลการศึกษาโดยสรุปในภาพที่ 23 แสดง Design response spectrum ทุกช่วงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ศึกษาพบว่าช่วงความกว้างของคาบการสั่นไหวที่ผิวดินจากการใช้ค่า Bandwidth จะแปรผันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่มากขึ้น แต่ในส่วนของการขยายคลื่นแผ่นดินไหวจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีช่วงของคาบการสั่นไหวแตกต่างกับ Design response spectrum ที่ได้จาก Uniform Building Codes (1997) โดยที่ Design response spectrum จากงานวิจัยนี้มีช่วงคาบการสั่นไหวระหว่าง 0.3-0.7 วินาที 0.3-1.0 วินาที 0.3-1.3 วินาที และ 0.3-1.5 วินาที และขนาด

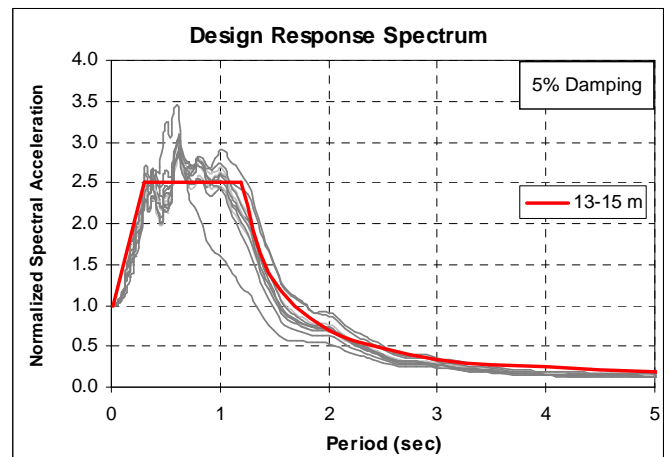
ของการขยายคลื่นแผ่นดินไหวเท่ากับ 3.0, 2.75, 2.5 และ 2.5 สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร 10-12 เมตร 13-15 เมตร และ 16-18 เมตร ตามลำดับ สุดท้ายผลการศึกษายังสรุปได้ว่าชั้นดินที่มีความหนาดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดการสั่นพ้องกับอาคารสูง 3-7, 3-10, 3-13, 3-15 ชั้นตามลำดับ



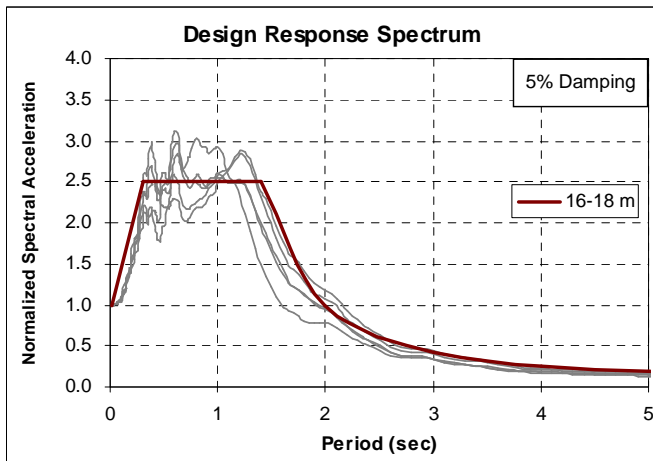
ภาพที่ 19 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร



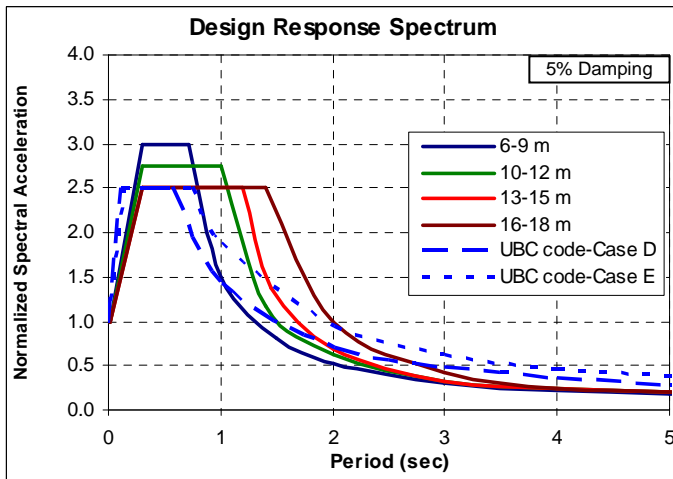
ภาพที่ 20 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10-12 เมตร



ภาพที่ 21 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน  
หน้า 13-15 เมตร



ภาพที่ 22 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน  
หน้า 16-18 เมตร



ภาพที่ 23 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน

## 5. สรุปผลการศึกษา

1. ระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลองอยู่ที่ระดับ 120 เมตร ซึ่งเป็นระดับที่มีความเร็วคลื่นแรงเฉือนประมาณ 400 m/s โดยอยู่ในช่วงของความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ “Engineering Bedrock” เนื่องจากกรณีที่ระดับความลึกมากกว่า 120 เมตรลงไปที่มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนสูงกว่า 400 m/s พบว่าสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดิน และการขยายความเร่งที่ผิวดินไม่แตกต่างกัน

2. ชั้นดินเหนียวที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นทรายในระดับลึกไม่มีอิทธิพลต่อแบบจำลอง เพราะสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดินเหมือนกันทุกกรณี

3. สมการที่แนะนำสำหรับวิเคราะห์ค่า  $G_{max}$  หรือ  $V_s$  จากความสัมพันธ์ของค่า  $S_u$  และ SPT N-value สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ได้แก่

$$V_s = 84.18 \cdot S_u^{0.23} \quad (\text{ดินเหนียวอ่อน})$$

$$V_s = 75.55 \cdot N^{0.23} \quad (\text{ดินเหนียวแข็งปานกลาง})$$

$$G_{max} = 1,000(K_2)_{max} (\sigma'_m)^{1/2} \quad (\text{ดินทราย}) [7]$$

4. การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) กับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมีความสัมพันธ์กันในลักษณะรูปโค้งคว่ำ โดยเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรก และมีค่าสูงสุดที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-10 เมตร หลังจากนั้นจึงลดลงเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้น

5. คาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period,  $T_p$ ) แปรผันกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

6. Amplification factor ของพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ จะมีค่า 1.5-2.0 และบริเวณจังหวัดนครนายกและปราจีนบุรีจะมีค่า Amplification factor สูงสุด 2.5-3.0

7. Predominant period บริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ มีค่าเฉลี่ย 0.6-0.8 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นไหวของอาคารที่มีความสูง 6-8 ชั้น

8. ลักษณะของ Design response spectrum มีช่วงความกว้างของคาบการสั่นไหวที่ผิวดินจะมากขึ้น และการขยายคลื่นแผ่นดินไหวจะลดลง เมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับข้อมูลและความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ อีกทั้งขอขอบคุณ รศ.ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ ที่ได้ให้คำปรึกษารวมทั้งให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการทดสอบ MASWM และขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัย มก. รหัสโครงการวิจัย ว-ท(ค)53.51 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- [1] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2547. โครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ปัญหาการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 103/2551
- [2] Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster / A Viacom Company, New Jersey.
- [3] สุพจน์ เดชวรสินสกุล. (2549). พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร
- [4] Bay, J.A. and Chaiprakaikeow, S. (2007). Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Testing of Kasetsart University. Summary Report
- [5] Seng et al. (2007). Application of Multichannel Analysis of Surface Wave to shallow site investigation for Bangkok subsurface. Proceeding of The 13<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering. GTE-017
- [6] Hardin, B.O. and Black, W.L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division., ASCE, 98(6), 603-624.
- [7] Seed et al. (1986). Moduli and damping factor for dynamic analyses of cohesion less soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.11, 1017-1032
- [8] Terzaghi, K. and R.B. Peck. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York.
- [9] Izuru Takewaki. (2005). Frequency-domain analysis of earthquake input energy to structure-pile systems. Engineering Structures 27. 549-563.
- [10] สุพจน์ เดชวรสินสกุล และ รัตน์มณี นันทสาร.(2548). การศึกษาการเพิ่มความรุนแรงของแผ่นดินไหวเนื่องมาจากสภาพดิน (Site Amplification) ในบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงราย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.). RDG4530032
- [11] Rabin Tuladhar (2002). Seismic microzonation of greater Bangkok area using microtremor observations, Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology.
- [12] Warnitchai, P. ,C. Sangaranyakul and S.A. Ashford. (2001). Seismic hazard in Bangkok due to distant earthquakes. Urban Safety Engineering