



## พฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เชิงพื้นที่เนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

## Response behaviors of soft Bangkok clay induce by earthquake forces

อำนาจ ยานูวิริยะกุล (Amnarj Yanuviriyakul)<sup>1</sup>สุทธิศักดิ์ สรลัมพ์ (Suttisak Soralum)<sup>2</sup><sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, [juleit\\_88@hotmail.com](mailto:juleit_88@hotmail.com)<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, [soralump\\_s@yahoo.com](mailto:soralump_s@yahoo.com)

**บทคัดย่อ :** แผ่นดินไหวสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง เช่น บ้านพักอาศัย ตึกสูง โครงสร้างพื้นฐาน และเขื่อน ซึ่งจะนำไปสู่ความสูญเสียต่อชีวิตอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยเฉพาะชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Moh et al., 1969) บริเวณแอ่งตะกอนดินเหนียวบริเวณภาคกลางตอนล่าง ซึ่งชั้นดินเหนียวอ่อนทำให้ตัวแปรของคลื่นแผ่นดินไหวเปลี่ยนแปลง และอาจก่อให้เกิดการสั่นพ้องระหว่างอาคารกับชั้นดิน การศึกษานี้ได้นำเสนอถึงปัจจัยที่มีผลกระทบบต่อการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยพิจารณาปัจจัย ได้แก่ ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ระดับความลึกของชั้นเสมือนชั้นหิน (Rock-liked layer) ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งระดับลึก และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน โดยการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินดำเนินการโดยการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนาม เปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) เพื่อเลือกใช้ค่าตัวแปรคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมกับแบบจำลองสำหรับงานวิจัย การวิเคราะห์ดำเนินการโดยวิธีการตอบสนองในลักษณะ 1 มิติ โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์แบบ Linear equivalent และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาเพื่อปรับให้เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ จากนั้นได้ประเมินการตอบสนองเชิงพื้นที่ตามพฤติกรรมตอบสนองของชั้นดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหวที่วิเคราะห์จากข้อมูลหลุมเจาะ 39 ตำแหน่ง ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากการศึกษพบว่าระดับความลึกของชั้นเสมือนชั้นหินที่เหมาะสมของแบบจำลองอยู่ที่ความลึก 120 เมตร และชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ในระดับลึกไม่มีผลต่อการตอบสนองที่ผิวดิน นอกจากนี้ยังพบว่าการขยายอัตราเร่งที่ผิวดินแปรผกผันกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน และมีคาบการสั่นไหวของพื้นดินแปรผันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

**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 are compared with shear wave velocity obtained from empirical equations in order to choose suitable equation for the model. The study found that the appropriate elevation of rock-liked layer for the model is 120 meter 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 will increase when soft clay thickness decreased.

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

## 1. บทนำ

การศึกษาการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวดำเนินการโดยจำลองลักษณะและคุณสมบัติชั้นดินในแบบจำลองการตอบสนองคลื่น 1 มิติ โดยวิเคราะห์ในลักษณะ Linear equivalent คุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ อันได้แก่ ค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus) และความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shear wave velocity) ได้จากการทดสอบในสนามและการคำนวณจากสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) ซึ่งในกรณีหลังอาศัยคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจากหลุมเจาะสำรวจ การหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดในชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางต้องอาศัย ตัวแปรสำคัญอันได้แก่ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง ( $e$ ) และค่า Over-consolidation ratio (OCR) ที่สามารถประเมินได้จากตัวอย่างดินคงสภาพในขณะที่ดินเหนียวแข็งไม่สามารถหาค่าดังกล่าวได้โดยง่ายเพราะไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินคงสภาพได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็ง

นอกจากนั้นในการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองจำเป็นต้องคำนึงถึงอิทธิพลของระดับชั้นเสมือนหิน สำหรับใช้เป็นระดับกระตุ้นโดยคลื่นแผ่นดินไหวในแบบจำลอง รวมทั้งจากการศึกษาข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินระดับลึกถึงระดับ 600 เมตร [1] พบว่าระดับชั้นดินที่ลึกลงไปจะมีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่เป็นระยะการวิจัยนี้จึงศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าวว่ามีผลต่อการตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวหรือไม่ รวมทั้งอิทธิพลความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีความหนาประมาณ 6-18 เมตร ที่อาจมีผลต่อตัวแปรการตอบสนองของชั้นดิน

จากผลการศึกษาข้างต้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพฯ เชิงพื้นที่โดยวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินจากฐานข้อมูลชั้นดินที่ถูกจัดเก็บรวบรวมในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อให้ได้ลักษณะการตอบสนองของชั้นดินในพื้นที่ขอบเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

## 2. คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินกรุงเทพฯ

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว คือ โมดูลัสเฉือนสูงสุด หรือความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินและ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสเฉือน และอัตราส่วนความหน่วง กับความเครียดเฉือน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

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

โดยทั่วไปแล้ว  $G_{max}$  สามารถทดสอบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น Cyclic triaxial test และ Bender element test [9] เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถหาได้จากการทดสอบในสนาม เช่น Downhole seismic test [4], Spectrum Analysis of Surface Wave test (SASW) [6] และ Multichannel Analysis of Surface Wave Method (MASWM) [12] เป็นต้น โดยการทดสอบในสนามดังกล่าวจะทำให้ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด ดังสมการที่ (1)

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

โดย  $\gamma$  คือหน่วยน้ำหนักกรวม,  $g$  คือความเร่งตามแรงโน้มถ่วงของโลก และ  $V_s$  คือความเร็วคลื่นแรงเฉือน

งานศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบในสนามด้วยวิธีต่างๆ เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางสถิติศาสตร์ของดิน เช่น อัตราส่วนช่องว่าง ( $e$ ), หน่วยน้ำหนักกรวม ( $\gamma_t$ ), กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) และ ค่า SPT (N-value) เป็นต้น โดยแตกต่างกันตามชนิดดิน และมี Empirical equation ในรูปทั่วไปสามารถใช้ได้กับดินทุกชนิดซึ่งนำเสนอไว้โดย [7] ดังสมการที่ (2)

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

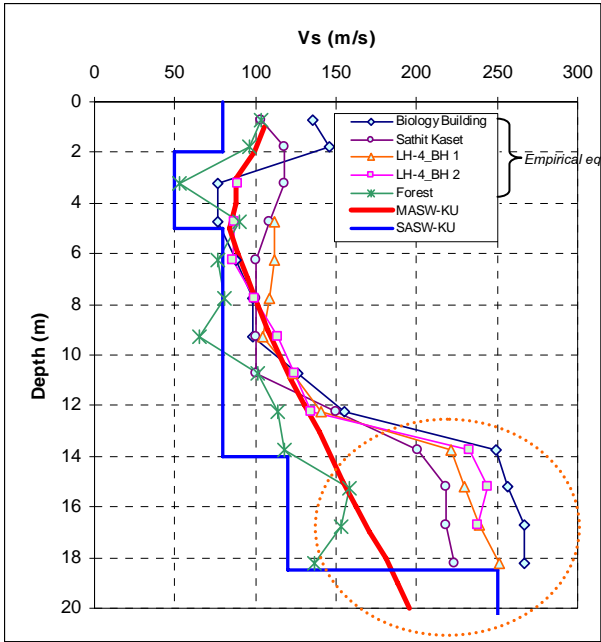
โดย  $e$  คือ อัตราส่วนช่องว่าง, OCR คือ Overconsolidation ratio,  $k$  คือค่าคงที่,  $\sigma'_m$  คือหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (kPa)

เนื่องจากสมการที่ (2) มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมากเพื่อความสะดวกในการหาค่า  $G_{max}$  สำหรับชั้นทราย จึงมีผู้คิดค้นสมการโดยใช้ความสัมพันธ์ของ SPT (N-corrected) นำเสนอไว้โดย [11] 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, MASWM กับค่าที่ได้จาก Empirical equation จากข้อมูลหลุมเจาะ โดยการทดสอบในสนามดำเนินการภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับหลุมเจาะสำรวจในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนระหว่างผลทดสอบในสนามด้วย SASW, MASW กับค่าคำนวณด้วย Empirical equation จากข้อมูลจำนวน 5 หลุมเจาะบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงกับความเครียด

Teachavorasinskun et al. (2002) ได้ทดสอบเพื่อหา Modulus reduction curve ( $G/G_{max}$  กับ %-Shear Strain) และ Damping curve ( $\lambda$  กับ %-Shear Strain) สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าการกระจายตัวของผลการทดสอบอยู่ในช่วงของค่า PI ระหว่าง 15% - 50% ซึ่งตรงกับที่เสนอไว้โดย Vucetic and Dorby (1991) จึงสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

## 3. ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลอง

### 3.1 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับงานวิจัย

การเลือกคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์พิจารณาจากระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวกับศูนย์กลางกรุงเทพฯ

โดยพิจารณารอยเลื่อนมีพลังที่สำคัญใกล้กรุงเทพฯ ได้แก่ กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์จังหวัดกาญจนบุรีที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางกรุงเทพฯ ประมาณ 200 กิโลเมตร และ กลุ่มรอยเลื่อนองครักษ์จังหวัดนครนายกมีระยะห่าง ประมาณ 80 กิโลเมตร โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกคลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลของ PEER Strong Motion โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ แสดงในตารางที่ 1

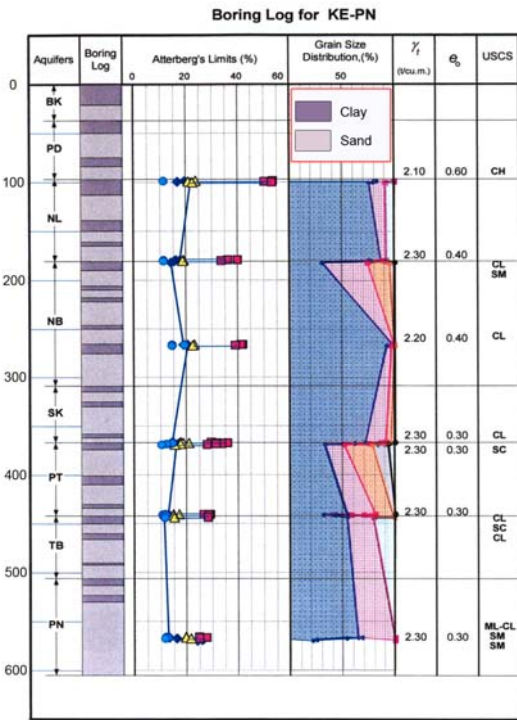
ตารางที่ 1 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์

No.	เหตุการณ์แผ่นดินไหว	วันที่	ขนาด ( $M_s, M_r, M_l$ )	ระยะจากศูนย์กลาง (km)	PGA (g)
1	Chi Chi	20/09/1999	7.3	53	0.036
2	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

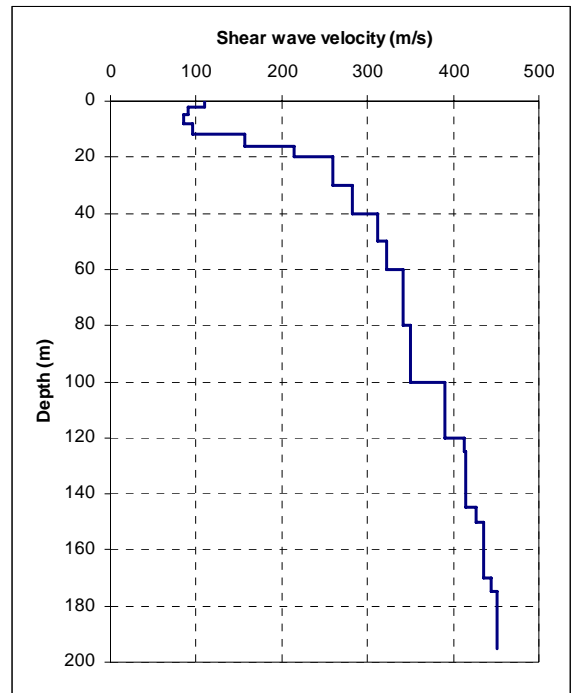
### 3.2 ความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลอง

ในส่วนนี้ได้ศึกษาระดับความลึกของชั้นเสมือนหินของชั้นดินกรุงเทพฯ ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง 1 มิติเพื่อใช้เป็นชั้น Outcrop สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว โดยที่ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้น Engineering bedrock มีค่าสูงกว่า 400 m/s [8] จากการศึกษาคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์เบื้องต้น พบว่าระดับความลึกของชั้นหินที่มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนมากกว่า 760 m/s หากคำนวณค่าโดย Empirical equation มีระดับความลึกประมาณ 800-1,000 เมตร อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองให้ครอบคลุมความลึกดังกล่าวไม่มีข้อมูลไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมเพราะการขยายความเร่งแผ่นดินไหวส่วนใหญ่เกิดจากชั้นดินเหนียวอ่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาระดับความลึกที่เหมาะสมน้อยที่สุดที่สามารถใช้เป็นขอบเขตของแบบจำลอง

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



ภาพที่ 2 ลักษณะชั้นดินของหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร บริเวณบางขุนเทียน กรุงเทพฯ, KE Station

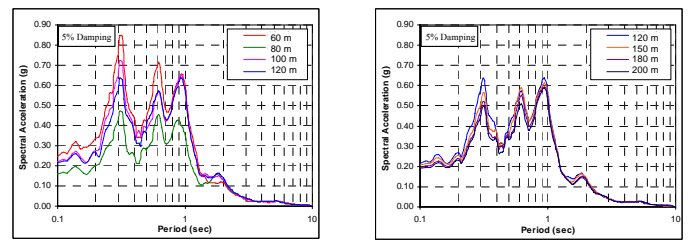


ภาพที่ 3 Shear wave velocity profile ของชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับการวิเคราะห์หัตถ์พลความลึกชั้นเสมือนหิน

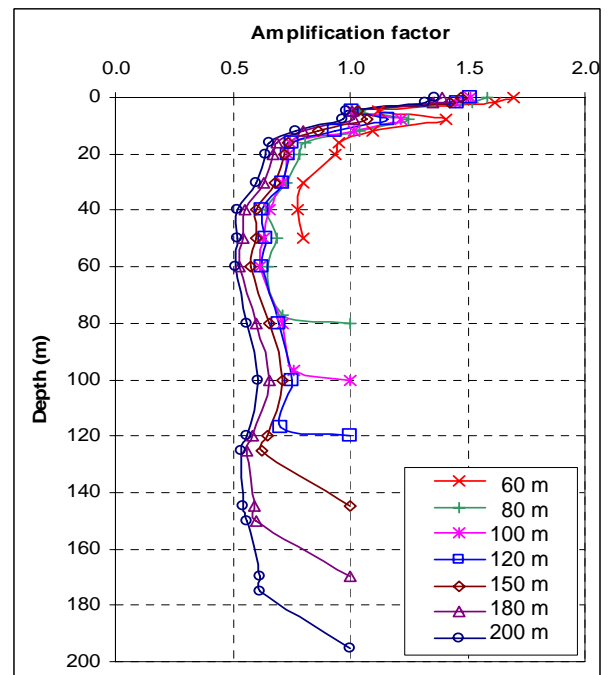
การวิเคราะห์ส่วนแรกนี้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ที่ 2 จากตารางที่ 1 (California earthquake) โดยกำหนดระดับของชั้นเสมือนหินเพื่อเป็น Outcrop ของคลื่นแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันตั้งแต่ 60 - 200 เมตรซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4 และ 5 พบว่าการตอบสนองของชั้นดินมีความแปรปรวนอย่างชัดเจนเมื่อระดับความลึกของชั้นเสมือนหินเปลี่ยนแปลงในช่วง 60-120 เมตร ในขณะที่กรณีระดับความลึก 120-200 เมตร พบว่าไม่มีผลต่อการตอบสนองของชั้นดินโดยค่า  $T_p$  ของคลื่นตอบสนองที่ผิวดินลงที่ และการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินก็ไม่แตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกชั้นเสมือนหิน

### 3.3 อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งแทรกระดับลึก

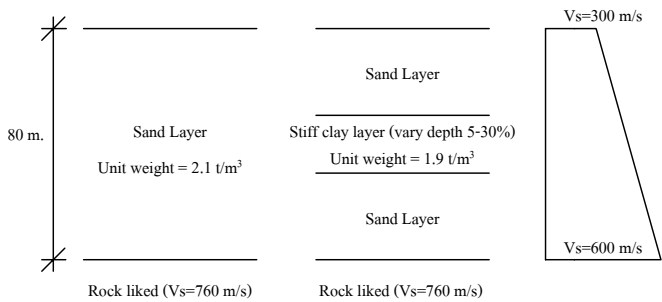
การศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นดินเหนียวระดับลึกของชั้นดินกรุงเทพฯ (ใต้ชั้นทรายชั้นที่ 3 ความลึกมากกว่า 60 เมตร) ดำเนินการโดยกำหนดแบบจำลองชั้นดินสมมติขึ้นมา ซึ่งชั้นดินดังกล่าวเป็นชั้นทรายหนา 80 เมตรและมีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่ระหว่างกึ่งกลางชั้นตามสภาพลักษณะชั้นดินระดับลึก ของชั้นดินกรุงเทพฯ โดยการวิเคราะห์ได้เพิ่มความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งตั้งแต่ 0% - 30% ของความหนาทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 6



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

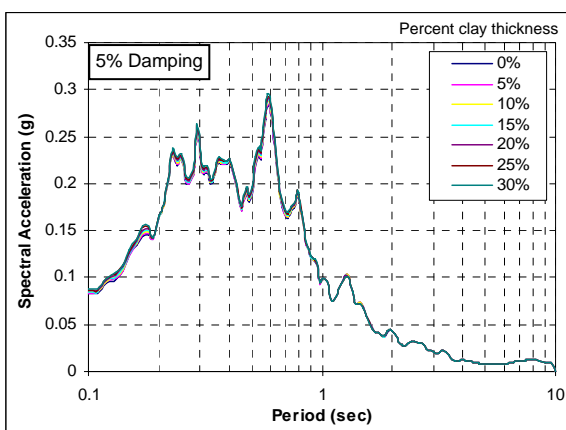


ภาพที่ 5 Amplification factor เมื่อระดับความลึกของชั้นเสมือนหินเท่ากับ 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร



ภาพที่ 6 ลักษณะชั้นดินสำหรับหารวิเคราะห์กรณีชั้นดินเหนียวแข็งแทรก

การวิเคราะห์ใช้คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ที่ 2 จากตารางที่ 1 (California earthquake) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ในชั้นทรายระดับลึกนั้น ไม่มีอิทธิพลต่อการตอบสนอง เนื่องจากชั้นดินในระดับลึกจะมีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) สูงมากกว่า 350 m/s จึงทำให้การตอบสนองต่อการสั่นไหวไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 7) ซึ่งเหมือนกันในทุกๆ กรณีของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นทราย



ภาพที่ 7 Acceleration Response Spectra กรณีชั้นดินเหนียวแข็งแทรก

### 3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นแรงเฉือนกับคุณสมบัติดินในสนาม

จากปัญหาในการใช้ Empirical equation สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดสอบหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามโดยวิธี MASWM [12] 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 [13] และ ค่า  $V_s$  ได้ถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับข้อมูล  $S_u$  และความชื้นในดินตามธรรมชาติ (%-Natural water content,  $w_n$ ) ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

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

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

เมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่เสนอไว้โดย [4] ซึ่งเหมาะสมสำหรับการหาค่า  $V_s$  ในดินเหนียวอ่อน พบว่าหากใช้กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งปานกลางขึ้นไปจะได้ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่สูงกว่าผลการทดสอบในสนาม ดังแสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 8

### 3.5 การศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นดินเหนียวอ่อน

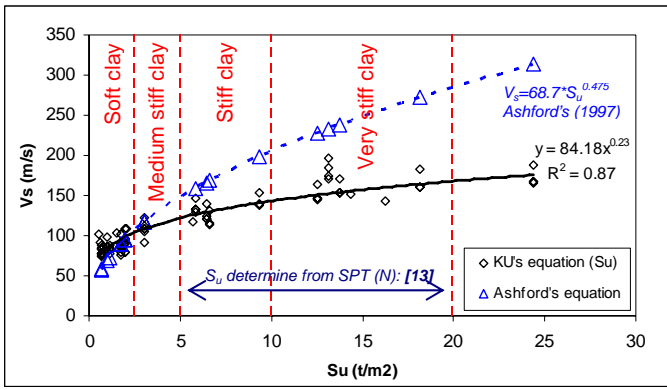
การศึกษาในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะการวางตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

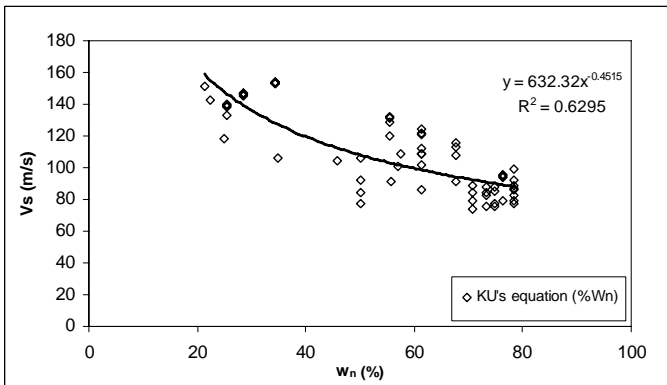
การวิเคราะห์นี้ดำเนินการโดยอาศัยข้อมูลการศึกษาการวางตัวของชั้นดินกรุงเทพฯ ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินทั่วพื้นที่ทำการศึกษาจำนวน 3,755 หลุมเจาะ ซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยดำเนินการวิเคราะห์ระดับความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน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

นอกจากนั้นการศึกษาดังกล่าวได้ทำการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน และเฉลี่ยค่าในพื้นที่ตารางย่อยขนาด 5X5 ตารางกิโลเมตร ซึ่งในการศึกษาที่นำเสนอในบทความนี้ได้นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้แปลเป็นค่าคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์โดยอาศัยผลการศึกษาในหัวข้อ 3.4 สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองใน 1 มิติเชิงพื้นที่

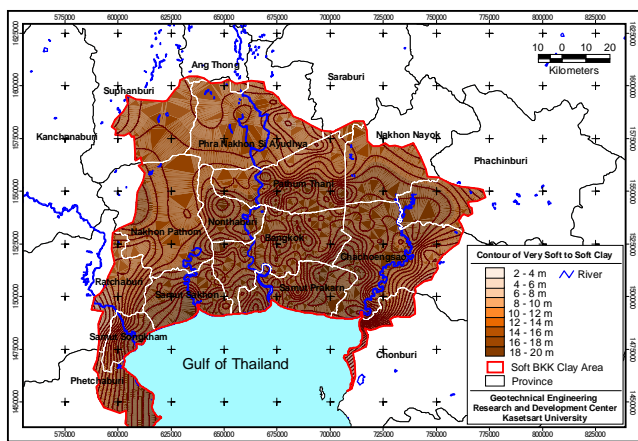




ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u$  กับ  $V_s$  ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



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



ภาพที่ 10 เส้นชั้นความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

### 3.5.2 อิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนต่อ

#### Amplification factor

การศึกษาดำเนินการ โดยใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่จำเป็นกับแบบจำลอง โดยการศึกษานี้ได้ทดลองเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-18 เมตร โดยให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน

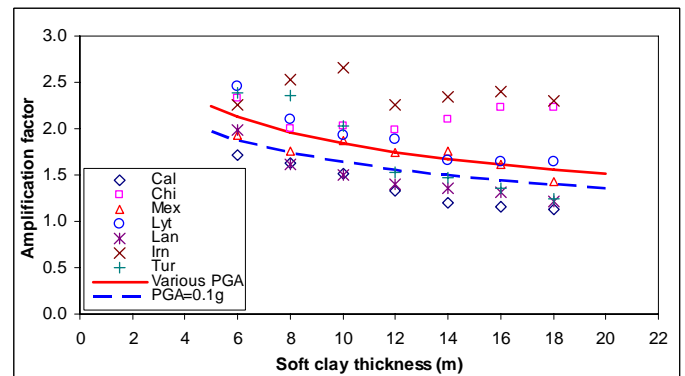
คงที่และใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะคลื่นแตกต่างกันจำนวน 7 เหตุการณ์จากตารางที่ 1 และกรณีที่ปรับขนาด PGA เท่ากับ 0.1g เท่ากันทั้ง 7 เหตุการณ์ ซึ่งพบว่าการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ของคลื่นแผ่นดินไหวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 11 โดยที่ Amplification factor สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) [3]

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

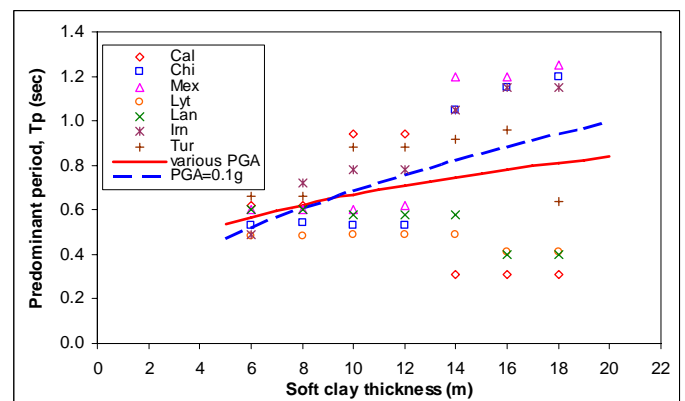
### 3.5.3 อิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนต่อ

#### Predominant Period

จากการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้ยังสามารถพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของคาบเด่นของการสั่นไหวของคลื่นที่ผิวดินกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนได้ โดยพบว่าคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดินเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 12



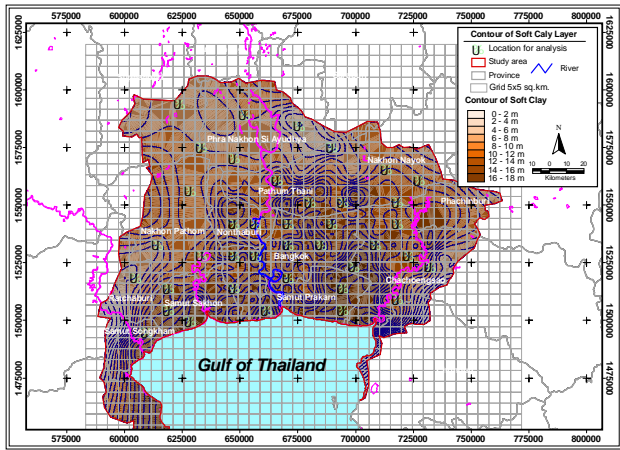
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลง Amplification factor ต่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลง Predominant period ต่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

#### 4. การตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวเชิงพื้นที่ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การกำหนดพื้นที่ของการวิเคราะห์นั้น ได้จากข้อมูลเส้นชั้นความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในภาพที่ 10 โดยกำหนดให้ตำแหน่งของการวิเคราะห์อยู่กระจายตัวในพื้นที่ ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นทุกๆ 2 เมตร ตั้งแต่ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน 6-18 เมตร โดยนำข้อมูลคุณสมบัติดินเฉลี่ยจากหลุมเจาะสำรวจในแต่ละพื้นที่ย่อย (5X5 ตารางกิโลเมตร) มาแปลค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนตามสมการที่ได้เสนอไว้ข้างต้น ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินทั้งหมด 39 พื้นที่ย่อย (ภาพที่ 13) และจำลองความลึกชั้นเสมือนหินที่ระดับ 120 เมตร โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์จากตารางที่ 1 และกรณีที่ปรับขนาด PGA เท่ากับ 0.1g เท่ากันทั้ง 7 เหตุการณ์



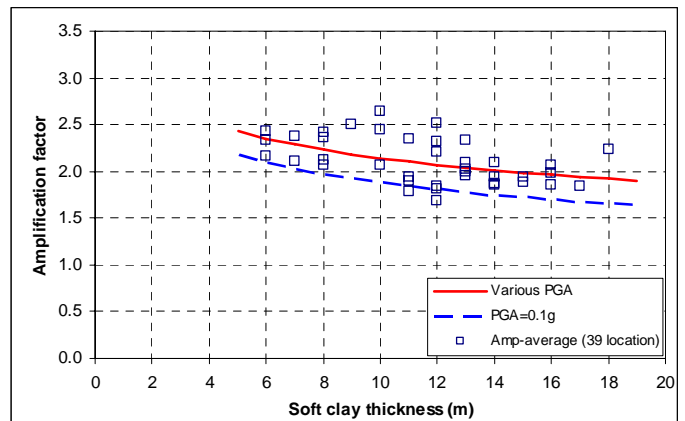
ภาพที่ 13 ตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นที่

#### 4.1 Amplification factor ของพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

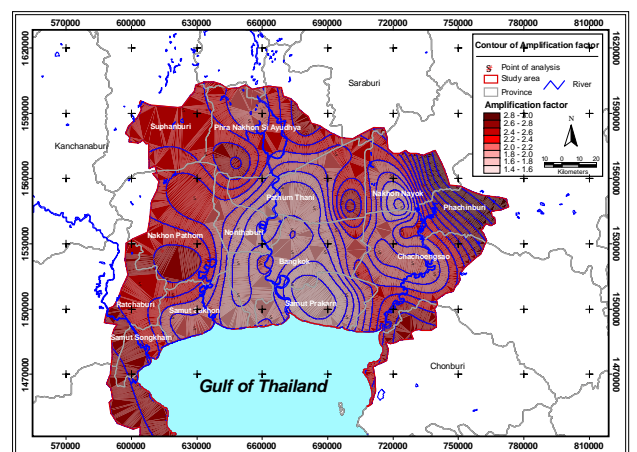
การศึกษาการขยายอัตราเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณผิวดินเชิงพื้นที่ ผลการศึกษาพบว่าสอดคล้องกับการศึกษาอิทธิพลของชั้นดินเหนียวอ่อนในแบบจำลองก่อนหน้านี้ โดยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนา 5-10 เมตร มีการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน 2.2 - 2.5 เท่า ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10-15 เมตร มีการขยายอัตราเร่งสูงสุด 2.0-2.2 เท่า และชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนามากกว่า 15 เมตร สามารถขยายอัตราเร่งสูงสุด 1.7-2.0 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 15

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

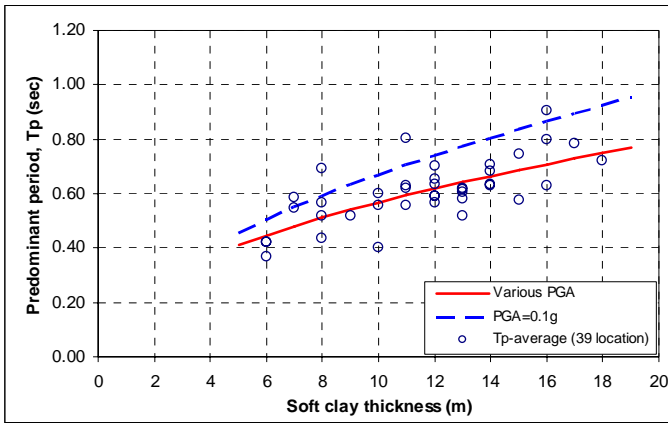
สำหรับค่า Predominant period ( $T_p$ ) ของคลื่นที่ผิวดินพบว่ามีความแตกต่างกันไปตามความหนาของชั้นดิน และคุณสมบัติของชั้นดินที่แตกต่างกันดังภาพที่ 17 โดยบริเวณพื้นที่บริเวณปากอ่าวไทยมี  $T_p$  เท่ากับ 0.8-1.0 วินาที และลดลงเหลือ 0.3-0.4 วินาที บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตามการลดลงของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน โดยมีความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 16 ซึ่งสอดคล้องกับที่เสนอไว้โดย [10] ว่าค่า  $T_p$  ของพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ จะแปรผันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยมีค่าเท่ากับ 0.8-1.2 วินาทีบริเวณพื้นที่ใกล้กับอ่าวไทย และลดลงเหลือ 0.4 วินาที เมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนลดลงบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา นอกจากนี้ [16] ได้เสนอว่า  $T_p$  บริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ เท่ากับ 0.5-1.0 วินาที ซึ่งจากผลการศึกษาที่เสนอในบทความนี้ พบว่าคาบการสั่นไหวที่ผิวดินบริเวณดังกล่าวมีคาบการสั่นไหวเท่ากับ 0.6-0.8 วินาที ซึ่งสอดคล้องกัน



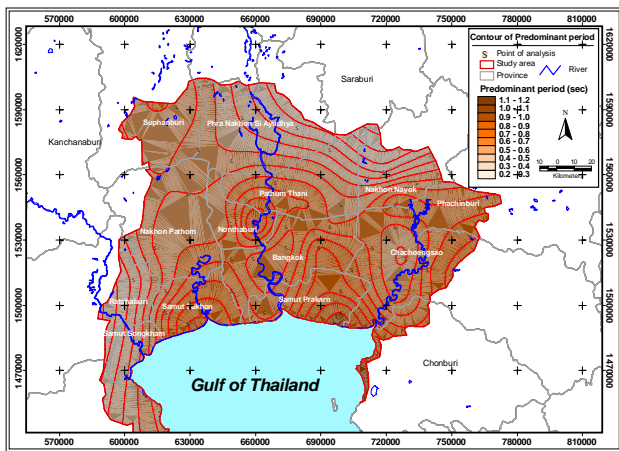
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ภาพที่ 15 Amplification factor บริเวณพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการคาดเดาของการสั่นไหวที่ผิวดินกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ภาพที่ 17 Predominant period บริเวณพื้นที่ที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

#### 4.3 Design response spectrum บริเวณพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

จากการศึกษาพบว่าสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดินแตกต่างกันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยการวิเคราะห์ใช้คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ 7 เหตุการณ์ ดังตารางที่ 1 และสรุปจากการวิเคราะห์พื้นที่ตัวแทน 39 ตำแหน่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยนำสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดินของ 7 คลื่นแผ่นดินไหวมาเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งทั้ง 39 ตำแหน่ง หลังจากนั้นทำการจำแนกตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนได้ 4 พื้นที่ดังนี้ 6-9 เมตร 10-12 เมตร 13-15 เมตร และ 16-18 เมตร และเฉลี่ยสเปกตรัมตอบสนองในแต่ละพื้นที่โดยวิเคราะห์ค่า Bandwidth เพื่อกำหนดช่วงของคาบการตอบสนองต่อการสั่นไหวของคลื่นที่ผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 18-21

ผลการศึกษาโดยสรุปในภาพที่ 21 แสดง Design response spectrum ทุกช่วงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ศึกษาพบว่าช่วงความกว้างของคาบการสั่นไหวที่ผิวดินจะแปรผันตาม

ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่มากขึ้น แต่ในส่วนของกาขยายคลื่นแผ่นดินไหวจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้น โดยมีช่วงคาบการสั่นไหวระหว่าง 0.3-0.7 วินาที 0.3-1.0 วินาที 0.3-1.3 วินาที และ 0.3-1.5 วินาที และขนาดของการขยายคลื่นแผ่นดินไหวเท่ากับ 3.0, 2.75, 2.5 และ 2.5 สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร 10-12 เมตร 13-15 เมตร และ 16-18 เมตร ตามลำดับ สุดท้ายผลการศึกษายังสรุปได้ว่าชั้นดินที่มีความหนาทึบตามลำดับดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดการสั่นพ้องกับอาคารสูง 3-7, 3-10, 3-13, 3-15 ชั้นตามลำดับ

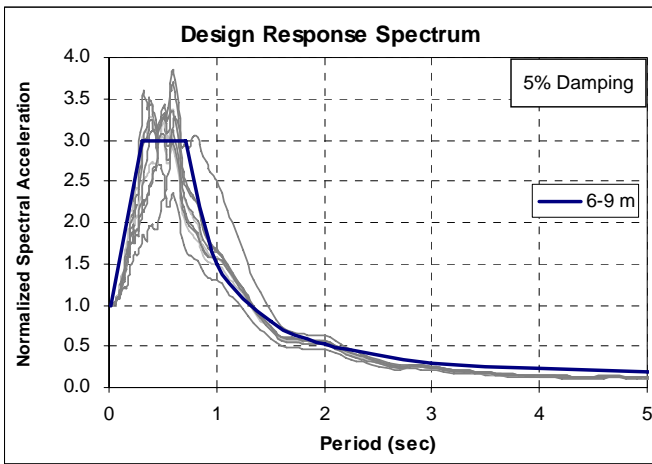
#### 5. สรุปผลการศึกษา

- ระดับความของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลองอยู่ที่ระดับ 120 เมตร เนื่องจากกรณีที่ระดับความลึกมากกว่า 120 เมตรลงไป พบว่าสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดิน และการขยายความเร่งที่ผิวดินไม่แตกต่างกัน
- ชั้นดินเหนียวอ่อนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นทรายในระดับลึกไม่มีอิทธิพลต่อแบบจำลอง เพราะสเปกตรัมตอบสนองที่ผิวดินเหมือนกันทุกกรณี
- สมการสำหรับค่า  $G_{max}$  หรือ  $V_s$  จากความสัมพันธ์ของค่า  $S_u$  และ SPT N-value สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ได้แก่
 
$$V_s = 84.18 \cdot S_u^{0.23} \quad (\text{ดินเหนียวอ่อน})$$

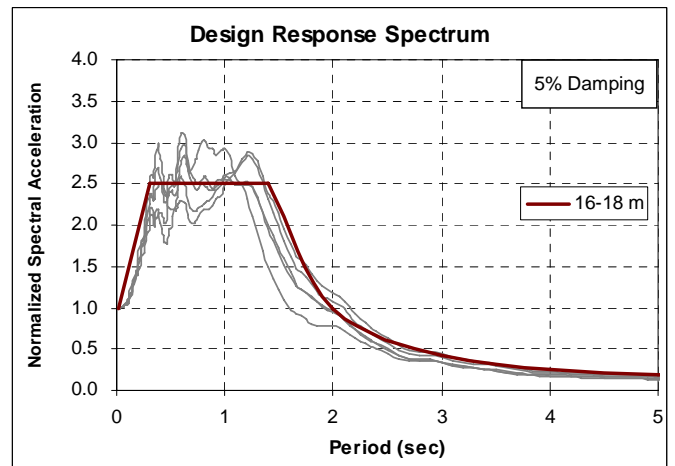
$$V_s = 75.55 \cdot N^{0.23} \quad (\text{ดินเหนียวแข็งปานกลาง})$$

$$G_{max} = 1,000(K_2)_{max} (\sigma'_m)^{1/2} \quad (\text{ดินทราย})$$
- การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) แปรผกผันกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน
- คาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period,  $T_p$ ) แปรผันกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน
- Amplification factor ของพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ จะมีค่า 1.5-2.0 และบริเวณจังหวัดนครนายกและปราจีนบุรีจะมีค่า Amplification factor สูงสุด 2.5-3.0
- Predominant period บริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ มีค่า 0.6-0.8 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นไหวของอาคารที่มีความสูง 5-10 ชั้น
- ลักษณะของ Design response spectrum มีช่วงความกว้างของคาบการสั่นไหวที่ผิวดินจะมากขึ้น และการขยายคลื่นแผ่นดินไหวจะลดลง เมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น

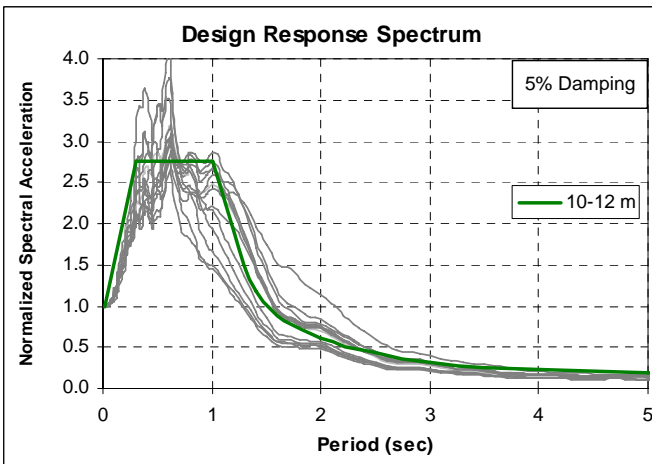




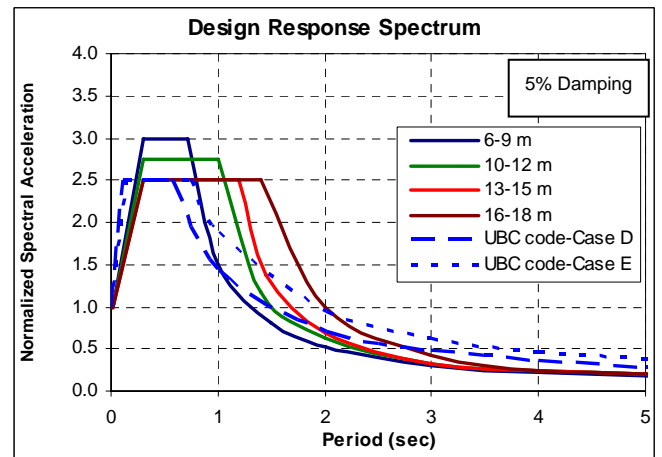
ภาพที่ 18 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร



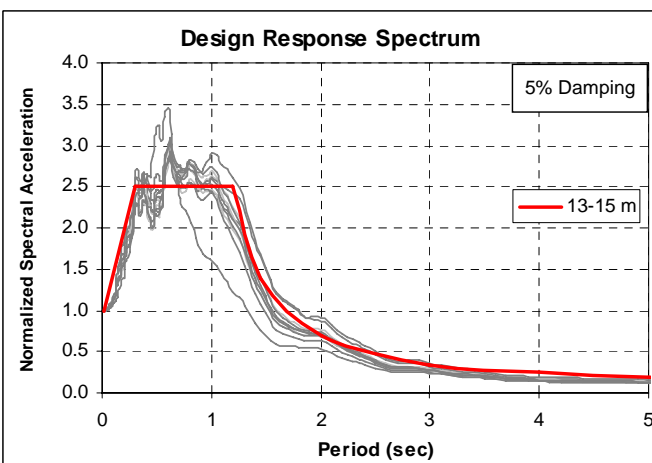
ภาพที่ 21 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 16-18 เมตร



ภาพที่ 19 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10-12 เมตร



ภาพที่ 22 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน



ภาพที่ 20 Design response spectrum สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 13-15 เมตร

### 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. โครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ปัญหาการใช้ น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 103/2551

- [2] เป็นหนึ่ง วานิชชัย และคณะ.(2548). เอกสารสรุปผลงานวิจัยโครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 1). สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย. RDG4530032
- [3] สุพจน์ เดชวรสินสกุล และ รัตน์มณี นันทสาร.(2548). การศึกษาการเพิ่มความรุนแรงของแผ่นดินไหวเนื่องมาจากสภาพดิน (Site Amplification) ในบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงใหม่. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.). RDG4530032
- [4] สุพจน์ เดชวรสินสกุล. (2549). พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร
- [5] Ashford et al. (1997). Amplification of Earthquake Ground motions in Bangkok. CU\CE\EVR 1997.002
- [6] Bay, J.A. and Chaiprakaikeow, S. (2007). Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Testing of Kasetsart University. Summary Report
- [7] 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.
- [8] Izuru Takewaki. (2005). Frequency-domain analysis of earthquake input energy to structure–pile systems. Engineering Structures 27 549–563.
- [9] Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster / A Viacom Company, New Jersey.
- [10] Rabin Tuladhar (2002). Seismic microzonation of greater Bangkok area using microtremor observations, Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology.
- [11] Seed et al. (1986). Moduli and damping factor for dynamic analyses of cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.11, 1017-1032
- [12] 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
- [13] Terzaghi, K. and R.B. Peck. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York.
- [14] Teachavorasinskun et al. (2002). Shear modulus and damping of soft Bangkok clay. Canadian Geotechnical Journal, 39, no.5, 1201-1208
- [15] Vucetic, M. and R. Dobry (1991). Effect of plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No.1, 89-107
- [16] Warnitchai, P., C. Sangarayakul and S.A. Ashford. (2001). Seismic hazard in Bangkok due to distant earthquakes. Urban Safety Engineering