

# การประยุกต์แบบจำลองธรณีวิทยา 3 มิติของชั้นดินกรุงเทพในการ วิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว

## Application of Bangkok 3D Geological Model for Seismic Site Response Analysis

ภาณุสรณ์ เปล่งศิริ กมลรัตน์ งามเจริญ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์แผ่นดินไหวของชั้นดินกรุงเทพโดยอาศัยแบบจำลองธรณีวิทยา 3 มิติ ในการเลือกชั้นดิน สมมติฐานความหนาของชั้นดินอ่อนส่งผลต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวถูกนำมาใช้ในงานวิจัย การศึกษานี้ได้ใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวด้วยวิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นหนึ่งมิติโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว ที่เคยเกิดขึ้นจริงในประเทศไทย สมการความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังรับแรงเฉือนและจำนวนครั้งการตอกมาตรฐานถูกนำมาใช้ในแบบจำลอง ผลการศึกษาแสดงค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินและผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์ งานวิจัยฉบับนี้พบว่าผลของชั้นดินอ่อนในพื้นที่กรุงเทพนั้นส่งผลต่ออัตราคูณขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหว เมื่อความหนาของชั้นดินอ่อนสูงขึ้นอัตราคูณขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน

**คำสำคัญ :** แบบจำลองธรณีวิทยา 3 มิติ แผ่นดินไหวทาร์เลย์ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินต่อแผ่นดินไหวแบบไม่เชิงเส้น ชั้นดินกรุงเทพ

### Abstract

This paper presents the results of seismic site response analysis of Bangkok subsoil by applying a 3D geological model of Bangkok. The study is based on the assumption that the thickness of soft soil layer can influence the seismic ground response. 1D non-linear ground response analyses are performed with an input of actual ground motion used to happen in Thailand. The shear wave velocities of ground are calculated based on correlations from undrained shear strength and SPT-N value. The results show the peak ground acceleration and spectral acceleration of Bangkok subsoil from Tarlay earthquake. This study shows that Bangkok soft soils have influence on ground amplification factor. The increasing of soft soil thickness affects to the increasing of amplification factor.

**Keywords :** 3D geological model, Tarlay earthquake, Non-linear site response analysis, Bangkok subsoil

## 1. บทนำ

ในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยเผชิญกับแผ่นดินไหวขนาดใหญ่กว่า 6 ริคเตอร์ถึง 2 ครั้ง คือแผ่นดินไหวทาร์เลย์ในปี พ.ศ. 2554 ขนาด 6.3 ริคเตอร์ ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่บริเวณประเทศพม่าห่างจากชายแดนของประเทศไทยเพียง 27 กิโลเมตร และ แผ่นดินไหวแม่ลาวในปี พ.ศ. 2557 ขนาด 6.1 ริคเตอร์ มีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย แม้ว่ากรุงเทพฯจะอยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวทั้ง 2 ครั้งมากถึง 600 – 800 กิโลเมตร แต่ผู้คนที่ย้ายอยู่ในอาคารสูงบริเวณกรุงเทพฯสามารถรับรู้ถึงแรงสั่นไหวเหล่านี้ได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจหมายความว่าชั้นดินอ่อนในเมืองหลวงของประเทศไทยสามารถขยายแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวได้ แม้ว่าแผ่นดินไหวจะเกิดขึ้นในระยะไกลก็ตาม

กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงของประเทศไทยมีผู้คนอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก และมีอาคารหลากหลายรูปแบบ โดยมีชั้นดินใต้กรุงเทพฯเป็นชั้นดินอ่อนที่มีอิทธิพลมาจากดินตะกอนปากแม่น้ำเจ้าพระยา มีความหนาประมาณ 5 – 15 เมตร และต่อเนื่องลงไปเป็นดินเหนียวแข็งหนาประมาณ 10 เมตร ลึกลงไปนั้นเป็นชั้นทรายสลับกับชั้นดินเหนียวแข็งจนถึงชั้นหินซึ่งอยู่ลึกมาก

ที่ผ่านมา Ngarmcharoen[5] ได้พัฒนาแบบจำลองและฐานข้อมูลชั้นดินของกรุงเทพฯในรูปแบบแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ เพื่อจำลองข้อมูลต่างๆของชั้นดินไปใช้ในงานทางวิศวกรรม โดยเริ่มจากการนำไปใช้ออกแบบฐานรากเสาเข็ม นอกจากนี้ ฐานข้อมูลชั้นดินอาจนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น หาพื้นที่ที่เหมาะสมในการฝังกลบขยะ คำนวณการทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากน้ำหนักอาคาร รวมทั้งการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินต่อแรงแผ่นดินไหว Soralump *et al.*[12]

งานวิจัยนี้จึงพิจารณาประยุกต์แบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพฯที่พัฒนาโดย Ngarmcharoen[5] มาใช้ประมาณคุณสมบัติของชั้นดิน

เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว โดยเลือกข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์ที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดความเร่งแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา มาใช้ในการวิเคราะห์ ตลอดจนเพื่อพิจารณาผลของชั้นดินอ่อนที่มีต่อผลตอบสนองแผ่นดินไหวด้วย

## 2. ผลจากชั้นดินอ่อนต่อคลื่นสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว

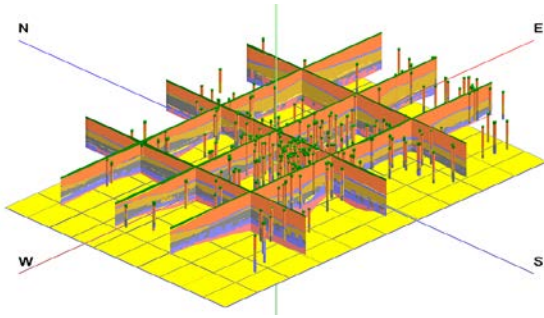
เมื่อกคลื่นแผ่นดินไหวเดินทางผ่านชั้นดินอ่อนที่มีความหนามากเพียงพอจะมีความเป็นไปได้ที่ชั้นดินจะขยายแรงสั่นไหวจากคลื่นแผ่นดินไหวได้ งานวิจัยของ Seed *et al.*[4] ได้กล่าวถึงเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เม็กซิโกซิตี ในปี พ.ศ. 2528 สร้างความเสียหายแก่อาคารบริเวณใกล้เคียงเป็นอย่างมาก ซึ่งความเสียหายส่วนใหญ่ส่งผลมาจากความสามารถในการขยายแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวของชั้นดินที่มีอิทธิพลมาจากชั้นดินอ่อนที่หนาวางตัวอยู่บริเวณใต้พื้นที่เมืองเม็กซิโกซิตี

จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวผ่านชั้นดินอ่อนกรุงเทพฯพบว่ามีความเป็นไปได้ว่าชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯอาจช่วยขยายความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวได้ Warnitchai[9] สามารถหาสัมประสิทธิ์อัตราคูณขยายกำลังของคลื่นสั่นไหว(Amplification factor) ได้ดังสมการที่(1)

$$\text{Amplification factor} = \frac{\text{PGA at ground surface}}{\text{PGA at rock outcrop}} \quad (1)$$

## 3. แบบจำลองธรณีวิทยา 3 มิติ ของกรุงเทพฯ

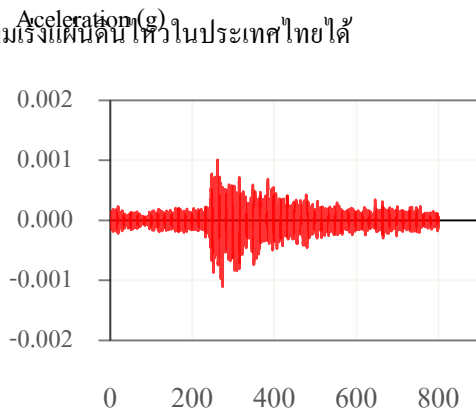
กรุงเทพฯมีโครงการก่อสร้างอาคารเป็นจำนวนมาก ฐานข้อมูลชั้นดินได้ถูกรวบรวมจากข้อมูลหลุมเจาะรอบบริเวณกรุงเทพฯ และใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดภาพขวางในการสร้างแบบจำลองชั้นดินขึ้นมาในรูปแบบของแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติ เพื่อใช้ในการประมาณคุณสมบัติของชั้นดินในตำแหน่งต่าง ๆ ของกรุงเทพฯ Ngarmcharoen[5] และ Ngarmcharoen[6]



รูปที่ 1 การพัฒนาแบบจำลองธรณีวิทยา 3 มิติและฐานข้อมูลชั้นดินกรุงเทพ (จาก Ngarmcharoen[5])

#### 4. คลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์ พ.ศ. 2554

แผ่นดินไหวในพม่าเกิดขึ้นวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554 มีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ลึกลงไปจากผิวดิน 10 กิโลเมตร ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 700 – 800 กิโลเมตร สามารถวัดความรุนแรงได้ 6.8 แมกนิจูด ซึ่งสามารถตรวจวัดคลื่นสั้นไหวได้ที่สถานีตรวจวัดความเร่งแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้



รูปที่ 2 ค่าความเร่งตรวจวัดแผ่นดินไหวของคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์ที่บันทึกได้ที่สถานีบางนา กรุงเทพฯ (ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา)

#### 5. โปรแกรม DEEPSOIL

เป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่ถูกพัฒนาโดย Hashash *et al.*[15] โดยสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี 1 มิติไม่เชิงเส้นโดยอาศัยหลักการคำนวณด้วยวิธี Newmark -  $\beta$  เพื่อประมาณผลตอบสนองของระบบตัวแปรอิสระตัวเดียว (Single Degree of Freedom, SDOF) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ

ในการวิเคราะห์ได้แก่ ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G) อัตราส่วนทอนกำลัง (Damping ratio) กับ ความเครียดเฉือน (Shear strain) สมมติฐานของชั้นหินแข็ง (Bedrock) และคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อใช้เป็นคลื่นเริ่มต้นในการวิเคราะห์ (Time history ground motion)

#### 6. วิธีการวิเคราะห์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

วิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหวหนึ่งมิติแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม DEEPSOIL ที่พัฒนาโดย Hashash *et al.*[15] และใช้ความสัมพันธ์ของโมดูลัสเฉือน (Shear modulus) กับ อัตราส่วนดทอน (Damping ratio) และ ความเครียดเฉือน (Shear strain) ที่พัฒนาโดย Seed and Idriss[3] และ Vucetic and Dobry[7] ในการกำหนดคุณลักษณะของดิน

ข้อมูลชั้นดินของสถานที่ที่มีความแตกต่างกันของความหนาของชั้นดินอ่อนตามการจำแนกด้วยความเร็วคลื่นเฉือน Boore[1] ได้ถูกจำลองจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพฯ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหว ความเร็วคลื่นเฉือนที่ใช้เป็นค่าป้อนเข้าคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนของสมการความสัมพันธ์ความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ Likitlersuang and Kyaw[10] และ Likitlersuang *et al.*[11] ดังสมการที่ (2) และ (3) และ ความเร็วคลื่นเฉือนกับจำนวนครั้งการตอกมาตรฐานสำหรับดินทราย Imai[13] ดังสมการที่(4)

$$V_s = 187 \left( \frac{S_u}{p_a} \right)^{0.372} \quad (\text{Down-hole seismic test}) \quad (2)$$

$$V_s = 228 \left( \frac{S_u}{p_a} \right)^{0.510} \quad (\text{MASW}) \quad (3)$$

$$V_s = 97N^{0.310} \quad (4)$$

เมื่อ  $V_s$  = ความเร็วคลื่นเฉือนหน่วย m/s

$N$  = จำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน

$s_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหน่วย kPa

$p_a$  = แรงดันบรรยากาศหน่วย kPa

ในการศึกษาครั้งนี้สถานที่และข้อมูลชั้นดินที่ถูกเลือกมาทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1 ข้อมูลชั้นดินที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

Soil Type	Thickness (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vs (m/s)	PI
Very Soft Clay	9	15.97	93	47
Medium Stiff Clay	1	18.10	144	44
Stiff Clay	4	18.95	187	28
Sand	7	19.61	328	-
Very Stiff Clay	9	19.75	263	27

ตารางที่ 2 ข้อมูลชั้นดินที่เขตบางขุนเทียน (BKT)

Soil Type	Thickness (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vs (m/s)	PI
Very Soft Clay	6	14.92	63	47
Very Soft Clay	9	16.44	99	47
Medium Stiff Clay	1	19.00	155	44
Stiff Clay	6	19.30	184	28
Sand	5	18.54	302	-
Very Stiff Clay	3	19.15	217	27

ตารางที่ 3 ข้อมูลชั้นดินที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU)

Soil Type	Thickness (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vs (m/s)	PI
Very Soft Clay	11	16.30	94	47
Medium Stiff Clay	3	17.87	153	44
Stiff Clay	10	19.28	217	28
Sand	6	19.56	318	-

ตารางที่ 4 ข้อมูลชั้นดินที่สนามบินสุวรรณภูมิ (SA)

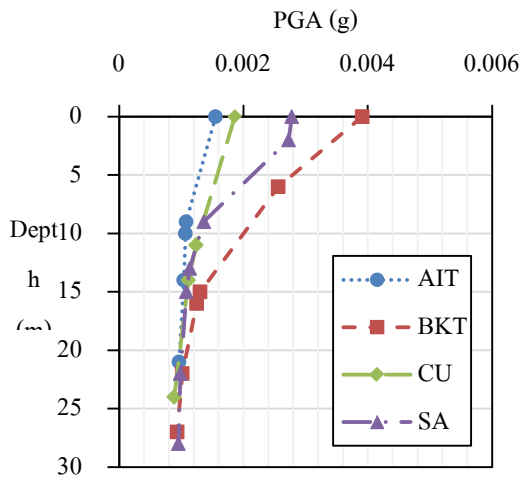
Soil Type	Thickness (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vs (m/s)	PI
Very Soft Clay	2	16.05	89	47
Very Soft Clay	7	14.34	74	47
Very Soft Clay	4	15.20	113	47
Medium Stiff Clay	2	16.30	150	44
Stiff Clay	7	18.81	202	28
Sand	6	19.88	373	-
Very Stiff Clay	2	19.50	261	27

กำหนดคุณสมบัติชั้นหินเป็นชั้นหินเชิงวิศวกรรม (Engineering bedrock) แบบอีลาสติก (Elastic half-space) และใช้คลื่นแผ่นดินไหวทาร์เล่ย์ที่ถูกลดทอนกำลังตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวจากแบบจำลองลดทอนพลังงาน (Next Generation Attenuation, NGA model) ที่พัฒนาโดย Abrahamson and Silva[8] ด้วยลักษณะคลื่นที่ตรวจวัดได้ที่สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแม่สายจังหวัดเชียงราย โดยไม่พิจารณาผลของการขยายตัวของคลื่น เป็นคลื่นเริ่มต้นของการแผ่ขยายคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหิน สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว

### 7. ผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวด้วยวิธีหนึ่งมิติแบบไม่เชิงเส้นในแต่ละพื้นที่ที่มีความหนาของชั้นดินอ่อนแตกต่างกัน ผลที่ได้พบว่าค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินอยู่ในช่วง 0.001g – 0.004g ซึ่งล้วนมีค่าสูงขึ้นจากคลื่นแผ่นดินไหวที่แผ่ขยายมาจากชั้นหิน เมื่อคลื่นเดินทางผ่านชั้นดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนน้อยกว่าจะขยายขนาดเพิ่มขึ้นมากกว่าในชั้นที่มีความเร็วคลื่นเฉือนมาก ดังรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 30 เมตรแรกของชั้นดิน กับ แฟกเตอร์ขยายกำลังคลื่น เมื่อ  $V_{s30} < 180$  m/s จะส่งผลให้ชั้นดินนั้นมีกำลังการขยายกำลังคลื่นสั้น

ไหวมาก หรือจะมีความเร่งผิวดินที่เพิ่มขึ้นจากความเร่งเริ่มต้นของคลื่นสั้นไหว Choi and Stewart[14]



รูปที่ 4 ความเร่งการสั่นไหวของชั้นดินในแต่ละพื้นที่

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความหนาของชั้นดินอ่อนกับสัมประสิทธิ์อัตราขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวพบว่าเมื่อชั้นดินมีชั้นดินอ่อนที่มากขึ้น อัตราการขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวจะมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นดินอ่อนกับความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 30 เมตรแรก ( $V_{s30}$ ) พบว่าชั้นดินมีชั้นดินอ่อนมากขึ้นความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย 30 เมตรแรกจะมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เล่ย์เชิงสเปกตรัม ความเร่งเชิงสเปกตรัมมีความรุนแรงสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนที่คาบสั้นไหวธรรมชาติ 0.35 และ 0.8 วินาที แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

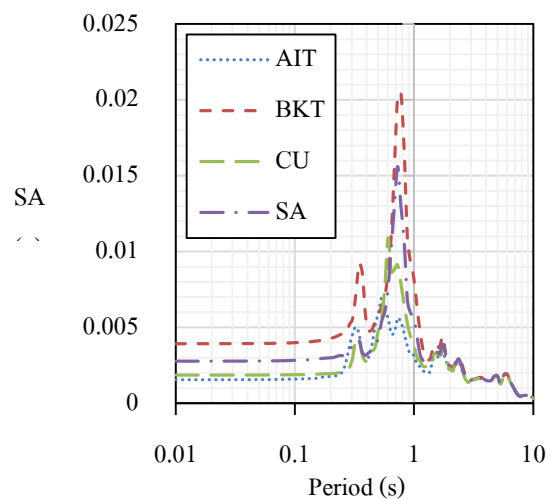
ตารางที่ 5 ผลเปรียบเทียบในแต่ละพื้นที่

Sites	Soft soil layer (m)	$V_{s30}$ (m/s)	Amplification factor
BKT	16	117	4.4
SA	15	134	3.1
CU	14	149	2.1
AIT	10	166	1.7

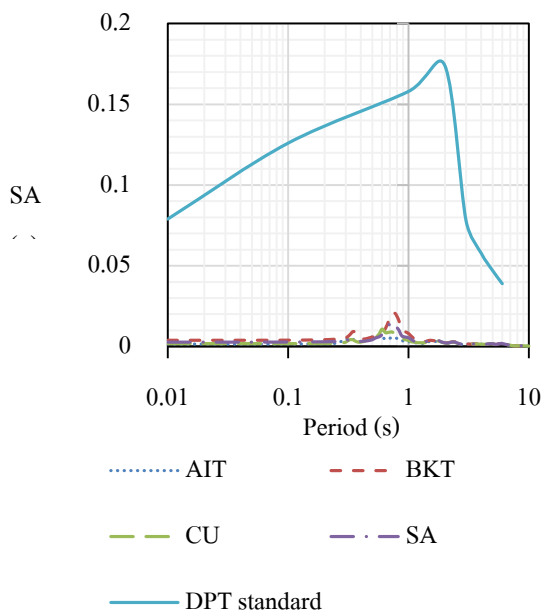
โดยผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมสามารถลำดับความรุนแรงในแต่ละพื้นที่ได้คือ บางขุนเทียน สนามบินสุวรรณภูมิ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียตามลำดับ

ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บางขุนเทียน และ สนามบินสุวรรณภูมิ คลื่นแผ่นดินไหวทาร์เล่ย์มีความรุนแรงสูงสุดที่คาบสั้นไหวธรรมชาติประมาณ 0.8 วินาที หรือเทียบเท่ากับคาบสั้นไหวธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงประมาณ 40 เมตร แต่พื้นที่ของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียชั้นดินไหวทาร์เล่ย์มีความรุนแรงที่คาบสั้นไหวธรรมชาติประมาณ 0.6 วินาที หรือเทียบเท่ากับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงประมาณ 30 เมตร (DPT (1302-52)[2]) ดังรูปที่ 8

แม้ว่าชั้นดินอ่อนจะสามารถขยายกำลังคลื่นสั้นไหวได้ แต่เมื่อนำผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ DPT (1302-52)[2] พบว่ามาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวในพื้นที่กรุงเทพฯสามารถรองรับแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวทาร์เล่ย์ได้อย่างปลอดภัย ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมกับคาบการสั่นไหว



**รูปที่ 9** การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากการวิเคราะห์กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวในพื้นที่กรุงเทพฯ

## 8.สรุป

งานวิจัยฉบับนี้เสนอการประยุกต์ข้อมูลชั้นดินจากแบบจำลองทางธรณีวิทยา 3 มิติของกรุงเทพฯ มาวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์ในปี พ.ศ. 2554 ที่ส่งผลถึงกรุงเทพฯ โดยใช้ลักษณะคลื่นสั้นไหวที่ตรวจวัดได้ที่สถานีบางนาวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินต่อแผ่นดินไหว 1 มิติ แบบไม่เชิงเส้น สามารถสรุปประเด็นได้ดังนี้

- 1) ชั้นดินอ่อนกรุงเทพฯมีแนวโน้มที่จะขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหวให้มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นชั้นดินอ่อนที่ค่อนข้างหนา โดยผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวทาร์เลย์ในกรุงเทพฯมีค่าความเร่งสูงสุดผิวดินอยู่ในช่วง 0.001g – 0.004g และ อัตราการขยายกำลังคลื่นสั้นไหวของชั้นดินอ่อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อชั้นดินอ่อนมีความหนามากขึ้นโดยมีสัมประสิทธิ์อัตราคูณขยายกำลังของคลื่นสั้นไหวอยู่ที่ 1.7 – 4.4

- 2) คลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์มีความรุนแรงที่คาบสั้นไหว 0.35 วินาที และ 0.8 วินาที แตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออาคารสูงปานกลางจนถึงสูงมากในพื้นที่กรุงเทพฯ

- 3) มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวในพื้นที่กรุงเทพฯนั้นสามารถรองรับแรงจากคลื่นแผ่นดินไหวทาร์เลย์นี้ได้อย่างปลอดภัย

ทั้งนี้เพื่อการศึกษาข้อมูลผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่ครอบคลุมและแม่นยำเพิ่มขึ้นควรศึกษาผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวจากชั้นดินกรุงเทพฯด้วยคลื่นแผ่นดินไหวขนาดใหญ่อื่นที่เกิดขึ้นในบริเวณประเทศไทยและส่งผลถึงกรุงเทพฯเพิ่มเติมเช่นแผ่นดินไหวแม่ลาวในปี พ.ศ. 2557

## 9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนการศึกษาวิศวกรรมโยธา 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 10. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. M. Boore, “Estimating Vs(30) (or NEHRP sire classes) from shallow velocity models (depths < 30 m)”, Bulletin of the seismological society of America, Vol. 94(2), pp. 591-597, 2004.
- [2] Department of Public Works and Town & Country Planning, “Earthquake Resistance Building Design Standards (DPT standard 1302-52)”, 2009.
- [3] H. B. Seed., and I. M. Idriss, “Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses”, Retrieved from California, 1970.
- [4] H. B. Seed., M. Romo., J. Sun., A. Jaime., and J. Lysmer, “The mexico earthquake of September 19, 1985 – Relationships between soil conditions and earthquake ground motions”, Earthquake Spectra, Vol. 4(4), pp. 687-729, 1988.

- [5] K. Ngarmcharoen, "Geotechnical engineering database of Bangkok subsoils for pile foundation design", Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn, 2015.
- [6] K. Ngarmcharoen., S. Likitlersuang., and T. Boonyatee, "Development of 3D Geological Modelling for Bangkok Subsoils", The Twenty-Ninth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, 2016.
- [7] M. Vucetic., and R. Dobry, "Effect of soil plasticity on cyclic response" *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 117(1), 1991.
- [8] N. Abrahamson., and W. Silva, "Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations", *Earthquake Spectra*, Vol. 24(1), pp. 67-97, 2008.
- [9] P. Warnitchai, "Development of seismic design requirements for buildings in Bangkok against the effects of distant large earthquakes", The 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, 2004.
- [10] S. Likitlersuang., and K. Kyaw, "A study of shear wave velocity correlations of Bangkok subsoil", *Obras y Proyectos:Revista de Ingenieria*, Vol. 155(7), pp. 27-33, 2010.
- [11] S. Likitlersuang., S. Teachavorasinsakun., C. Surarak., E. Oh., and A.S. Balasubramaniam, "Small Strain Stiffness and Stiffness Degradation Curve of Bangkok Clays", *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 4, pp. 498 – 509, 2013.
- [12] S. Soralump., B. Kunsuwan., W. Mairaing., and A. Surinkum, "Development of soil database for supporting the development and maintenance of infrastructure : A case study of soft Bangkok clay", *CIVIL ENGINEERING MAGAZINE*, pp. 47-69, 2010.
- [13] T. Imai, "Correlation of Nvalue with S-wave velocity and shear modulus", The second European symposium on penetration testing, 1981.
- [14] Y. Choi, and J. P. Stewart, "Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity", *Earthquake Spectra*, Vol. 21(1), pp. 1-30, 2005.
- [15] Y. M. A. Hashash., M. I. Musgrove., J. A. Harmon., D. R. Groholski., C. A. Phillips., and D. Park, "DEEPSOIL 6.1, User Manual", Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2016.