

อุปสงค์การเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นของระบบ SDOF ที่มีต่อคลื่นแผ่นดินไหวของบริเวณกรุงเทพ ฯ

Inelastic Deformation Demands of SDOF Systems Subjected to Ground Motions for Bangkok Area

โสธร พรหมแก้ว* และ นเรศ ลิ้มสัมพันธ์เจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: psothorn.civil@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอุปสงค์การเสียรูปของระบบ SDOF แบบพลาสติกโดยสมบูรณที่มีต่อจุดคลื่นแผ่นดินไหวของบริเวณกรุงเทพ ฯ ในโซนที่ 5 ตามการจัดแบ่งพื้นที่ของมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาได้จากฐานข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวของมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ของพื้นที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างการเสียรูปสูงสุดระหว่างกรณีแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นและแบบจำลองแบบเชิงเส้น อัตราส่วนดังกล่าวเป็นค่าที่ขึ้นกับประเภทของชั้นดินและเป็นหนึ่งในค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญในการประมาณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของอาคารด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มยผ.1303-57 งานวิจัยได้นำเสนอสูตรในการประมาณค่าอัตราส่วนดังกล่าวที่เหมาะสมกับกรุงเทพ ฯ

คำสำคัญ: ระบบ SDOF, มยผ.1303-57, วิธีสถิตไม่เชิงเส้น, การเคลื่อนที่เป้าหมาย, พฤติกรรมไม่เชิงเส้น

Abstract

In this paper, a seismic ground motion database in Zone 5 of the Bangkok basin, classified in the DPT 1301/1302-61 standard, has been adopted to evaluate the seismic displacement demand of a perfectly plastic SDOF system. The results have been presented in the ratio of displacement of inelastic and corresponding linear systems. This ratio is the parameter that depends on the properties of the subsoil and is also an important coefficient to determine the target displacement in nonlinear static analysis, according to DPT 1303-57. In addition, this paper proposes a formula for estimating the coefficient that is suitable for Bangkok area.

Keywords: SDOF Systems, DPT 1303-57, Pushover Analysis, Target Displacement, Inelastic Action

1. คำนำ

การวิเคราะห์โดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (โดยในที่นี้ใช้วิธี Push-over Analysis) เป็นวิธีหนึ่งในการประเมินสมรรถนะของอาคารในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความถูกต้องมากกว่าวิธีสถิตเชิงเส้นและพลศาสตร์เชิงเส้นเนื่องจากการประเมินสมรรถนะโดยพิจารณาพฤติกรรมโครงสร้างในช่วงไม่เชิงเส้น ในการวิเคราะห์โดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นนั้นจะกระทำโดยใช้แรงเข้ากระทำด้านข้างของอาคารด้วยรูปแบบของแรงที่มีลักษณะสอดคล้องกับการเสียรูปในโหมดพื้นฐานของโครงสร้าง (fundamental mode) จากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มขนาดของแรงที่กระทำขึ้นเรื่อย ๆ จนการเคลื่อนที่ที่จุดยอดของอาคารมีค่าเท่ากับค่าที่เรียกว่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement, δ_t) ซึ่งคือค่าการเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว และที่การเคลื่อนที่เท่ากับการเคลื่อนที่เป้าหมายนี้การเสียรูปและแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทั้งในระดับชิ้นส่วนและในระดับองค์รวมจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อประเมินสมรรถนะ

ในมาตรฐาน มยผ.1303-57 [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคารที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวได้ให้แนวทางในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นไว้ โดยการคำนวณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายในมาตรฐานฉบับดังกล่าวจะคำนวณโดยใช้วิธีสัมประสิทธิ์ (Coefficient method) ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับที่ระบุในมาตรฐาน ASCE41-06 ของประเทศสหรัฐอเมริกา [2] ดังนี้

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

โดย T_e คือคาบการสั่นพื้นฐานประสิทธิผล, S_a คือความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในกรณียึดหยุ่นเชิงเส้น, g คืออัตราเร่งโน้มถ่วง, C_0 คือสัมประสิทธิ์ปรับขนาดการเคลื่อนที่ของระบบ SDOF ให้เป็นการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งยอดอาคาร, C_1 คือสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของระบบไม่เชิงเส้นแบบพลาสติกโดยสมบูรณและการ

เคลื่อนที่สูงสุดของระบบเชิงเส้น, และ C_2 คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับพฤติกรรมการเสียรูปแบบวัฏจักรและการเสื่อมถอยของกำลังและความแข็งแรง สัมประสิทธิ์ทั้งสามของสมการที่ (1) นั้นมีที่มาจากทฤษฎีการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ SDOF ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาจากการศึกษาของ FEMA 440 [3] ซึ่งเป็นต้นแบบของมาตรฐาน ASCE41-06

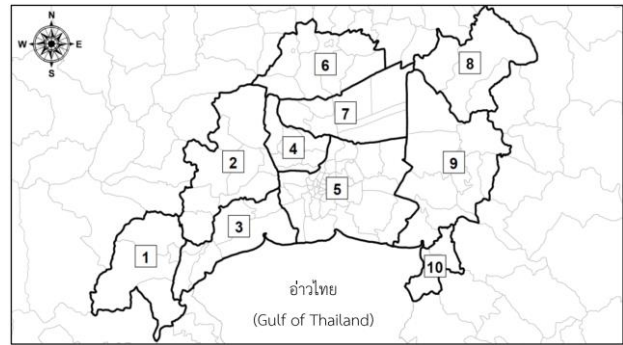
ในบรรดาสัมประสิทธิ์ทั้งสามนั้น มีเพียงสัมประสิทธิ์ C_1 ที่เป็นสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของชั้นดิน โดยมีค่าเท่ากับ 1.0 ในกรณีที่ T_e เกินกว่า 1.0 วินาที และมีค่าเกินกว่า 1.0 ในกรณีที่ T_e มีค่าน้อยกว่า 1.0 วินาที โดยในช่วงคาบดังกล่าวนี้ค่าของ C_1 จะมีมากขึ้นตามระดับความอ่อนของชั้นดิน สำหรับชั้นดินปกติทั่วไป สูตรโดยประมาณของ C_1 ที่ระบุใน FEMA 440 นั้นให้ค่าของ C_1 ที่สอดคล้องกับผลงานวิจัยในอดีตเช่น Chopra and Chintanapakee [4] และ Miranda and Ruiz-Garcia [5] อย่างไรก็ดี FEMA 440 ได้ระบุว่าสูตรโดยประมาณดังกล่าวนี้มีระดับความน่าเชื่อถือน้อยลงในกรณีชั้นดินอ่อนประเภท E และ F เนื่องจากความเป็ยงเบนของผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในระดับสูงมาก Ruiz-Garcia and Miranda [6] ได้ศึกษาค่า C_1 ของชั้นดินอ่อนในสหรัฐอเมริกาและเม็กซิโก และได้เสนอสูตรโดยประมาณที่เหมาะสมจำเพาะสำหรับชั้นดินอ่อนของสองบริเวณดังกล่าว

เป็นที่ทราบกันว่าชั้นดินบริเวณกรุงเทพฯ นั้นเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก การศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมของค่า C_1 ที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่เป้าหมายตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มยผ. 1303-57 สำหรับชั้นดินอ่อนของพื้นที่กรุงเทพฯ โดยในการศึกษาเบื้องต้นนี้จะกำหนดขอบเขตเฉพาะพื้นที่บริเวณโซนที่ 5 ของกรุงเทพฯ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

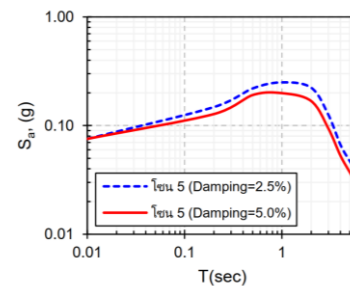
2.1 สเปกตรัมตอบสนองโซนที่ 5 ของกรุงเทพฯ ตามการจัดแบ่งของมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61

พื้นที่กรุงเทพฯ คือพื้นที่บริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำภาคกลางที่มีพื้นที่ครอบคลุมกรุงเทพฯ และปริมณฑลรวม 16 จังหวัดลักษณะของชั้นดินบริเวณนี้จะมีลักษณะจำเพาะที่เรียกว่าชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Soft Clay) โดยเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามากซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษที่สามารถขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้ประมาณ 3-4 เท่า เพื่อพิจารณาถึงผลดังกล่าวที่อาจสร้างความเสียหายให้แก่อาคารที่ตั้งอยู่บนพื้นที่กรุงเทพฯ มาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 [7] จึงได้จัดทำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คำนึงถึงลักษณะชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารขึ้นเฉพาะสำหรับกรุงเทพฯ เพื่อความถูกต้องสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว โดยพื้นที่กรุงเทพฯ สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 10 โซนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ของกรุงเทพฯ [7]

ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินสมรรถนะของอาคารโดยวิธีสเถิตไม่เชิงเส้นนั้นตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1303-57 กำหนดให้ใช้ค่า S_a สำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์เป็นเพียงครั้งหนึ่งของค่า S_a ในการออกแบบอาคารใหม่ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 สเปกตรัมอัตราเร่งการตอบสนองดังกล่าวนี้มีที่มาจากการศึกษาของอมรเทพ [8] โดยสเปกตรัมดังกล่าวเป็นค่า Envelope ของ S_a จากคลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับ Conditional Mean Spectrum (CMS) ที่คาบการสั่น 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 วินาที โดยเป็นค่าที่ได้รวมการพิจารณาผลจากการขยายขนาดเนื่องจากอิทธิพลของชั้นดินอ่อน รูปที่ 2 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมโซน 5 ของกรุงเทพฯ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61



รูปที่ 2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมโซน 5 ของกรุงเทพฯ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ [7]

2.2 อัตราส่วนการเสียรูปไม่เชิงเส้น

สมการควบคุมการเสียรูป $u(t)$ ที่เวลาใดๆของระบบ SDOF ที่มีมวล m ถูกกระตุ้นจากอัตราเร่งของฐานเนื่องจากแผ่นดินไหว $\ddot{u}_g(t)$ สามารถเขียนได้สองรูปแบบดังนี้

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + f_s / m = -\ddot{u}_g(t) \quad (2a)$$

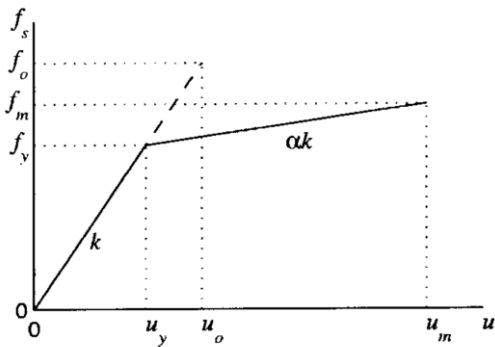
หรือ

$$\ddot{u}' + 2\zeta\omega_n\dot{u}' + f_s / m = 0 \quad (2b)$$

โดย \dot{u} , \ddot{u} และ $\ddot{u}' = \ddot{u} + \ddot{u}_g$ คือความเร็ว อัตราเร่ง และอัตราเร่งรวมของ
ก้อนมวลตามลำดับ, ω_n คือความถี่ธรรมชาติของระบบ, ζ คือ
อัตราส่วนความหน่วง และ f_s คือแรงสตีฟเนสของระบบ ความสัมพันธ์
ระหว่างแรง f_s และการเสียรูป u ของระบบเชิงเส้นคู่ (bilinear system)
แสดงได้ดังรูปที่ 3 เมื่อ k คือสตีฟเนสเชิงเส้นและ αk คือสตีฟเนสหลังการ
คราก โดยที่ α คืออัตราส่วนสตีฟเนสหลังการครากและเมื่อ $\alpha = 0$ ระบบ
จะถูกนิยามให้มีพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ f_y คือ
กำลังที่จุดคราก u_y คือการเสียรูปที่จุดคราก การเพิ่มแรงหรือลดแรงของ
ระบบ hysteretic เกิดขึ้นโดยไม่มีการเสื่อมถอยทั้งในด้านกำลังและสตีฟเนส
นิยามให้ตัวคูณลดกำลังที่จุดคราก, R , คือ

$$R = \frac{f_o}{f_y} = \frac{u_o}{u_y} \quad (3)$$

โดย f_o และ u_o คือค่าสูงสุดของแรงสตีฟเนสและการเสียรูปในกรณีที่ระบบ
มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น และ f_m และ u_m คือค่าสูงสุดของแรง
สตีฟเนสและการเสียรูปของระบบไม่เชิงเส้นตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบเชิงเส้นคู่ของระบบ SDOF
แบบไม่เชิงเส้นและแบบเชิงเส้นที่สอดคล้องกัน [4]

การเสียรูปของระบบไม่เชิงเส้นและการเสียรูปของระบบเชิงเส้นที่
สอดคล้องกันสามารถคำนวณได้โดยใช้กรรมวิธีแก้ปัญหาเชิงตัวเลข
(numerical solution) ตามสมการที่ (2a) ด้วยค่า R ที่ระบุ ซึ่งจะได้
ผลลัพธ์คือการเสียรูปสูงสุด u_m และ u_o ตามลำดับอันนำไปสู่ค่าอัตราส่วน
การเสียรูปไม่เชิงเส้นของระบบสำหรับแต่ละค่าของ R ดังนี้

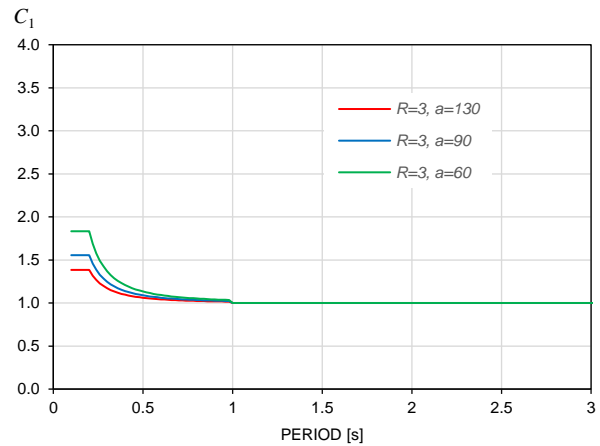
$$C_1 = \frac{u_m}{u_o} \quad (4)$$

ในมาตรฐาน มยผ.1303-57 กำหนดสูตรโดยประมาณของ C_1 ใน
สมการที่ (5)

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{aT_e^2} \quad (5)$$

โดย a คือสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งของอาคารมีค่าเท่ากับ 130
สำหรับชั้นดินชนิด A และ B เท่ากับ 90 สำหรับชั้นดินชนิด C และเท่ากับ
60 สำหรับประเภทชั้นดินชนิด D, E และ F และกำหนดให้กรณีที่คาบการ
สั่นพื้นฐานน้อยกว่า 0.2 วินาทีให้ใช้ค่า C_1 เท่ากับค่า C_1 ที่คาบการสั่น
พื้นฐานเท่ากับ 0.2 วินาทีและกรณีคาบการสั่นพื้นฐานมากกว่า 1 วินาที ให้
ใช้ค่า C_1 เท่ากับ 1.0

ดินประเภท D, E และ F นั้นเป็นดินประเภทดินอ่อนและมีค่า a เท่ากับ
60 ดังนั้นชั้นดินอ่อนของกรุงเทพฯ ฯ ตามมาตรฐานนี้จึงต้องใช้ a เท่ากับ
60 เช่นเดียวกัน ค่า C_1 นั้นแปรผันตรงกับค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายดังนั้นค่า
 C_1 ที่มากขึ้นหรือน้อยลงมีผลทำให้ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายมากขึ้นหรือ
น้อยลงตามไปด้วยอันจะส่งผลโดยตรงต่อขนาดของแรงและการเสียรูปทั้งใน
ระดับชิ้นส่วนและระดับระบบของโครงสร้างที่จะต้องถูกนำมาพิจารณา รูปที่
3 แสดงการเขียนกราฟของ C_1 จากสมการที่ (5) สำหรับค่า a ต่าง ๆ ใน
กรณี $R = 3.0$



รูปที่ 4 C_1 จากสมการที่ (5) สำหรับค่า a ต่างๆกรณี $R = 3$

3. ขั้นตอนการศึกษา

3.1 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาจาก
ฐานข้อมูลของมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 โซนที่ 5 ของกรุงเทพฯ ฯ
ซึ่งมีจังหวัดที่ตั้งอยู่ประกอบไปด้วยกรุงเทพมหานครและสมุทรปราการโดย
ในการศึกษาจะใช้คลื่นที่สอดคล้องกับ CMS สำหรับคาบการสั่นที่ 0.2, 0.5,
1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 วินาที โดยคลื่นดังกล่าวที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถ
แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งเป็นคลื่นที่สอดคล้องกับ CMS ที่คาบ
การสั่น 0.2, 0.5 และ 1.0 วินาที คลื่นกลุ่มนี้เป็นตัวแทนของคลื่นกรณีที่เกิด
จากแผ่นดินไหวระยะใกล้ในประเทศจากจังหวัดกาญจนบุรี จำนวนของคลื่น
กลุ่มนี้ในแต่ละคาบการสั่นประกอบด้วยคลื่นที่ตั้งฉากกันจำนวน 4 คู่ รวมมี
คลื่นทั้งหมด 24 คลื่น ในบทความฉบับนี้จะเรียกคลื่นกลุ่มนี้ว่า “คลื่นกลุ่ม
Short Condition Period (Short CP)” คลื่นกลุ่มที่สองได้แก่คลื่นที่

สอดคล้องกับ CMS ที่คาบการสั้น 1.5, 2.0 และ 3.0 วินาที คลื่นกลุ่มนี้เป็นตัวแทนของคลื่นกรณี่ที่เกิดจากแผ่นดินไหวระยะไกลที่เกิดขึ้นในประเทศพม่า จำนวนของคลื่นกลุ่มนี้สำหรับคาบการสั้น 1.5 วินาที ประกอบด้วยคลื่นที่ตั้งฉากกันจำนวน 3 คู่ และสำหรับคาบการสั้น 2.0 และ 3.0 วินาที ประกอบด้วยคลื่นที่ตั้งฉากกันจำนวน 4 คู่สำหรับแต่ละคาบการสั้น รวมมีคลื่นทั้งหมด 22 คลื่น และในบทความฉบับนี้จะเรียกคลื่นกลุ่มนี้ว่า “คลื่นกลุ่ม Long Condition Period (Long CP)” โดยคลื่นทั้งสองกลุ่มนี้เป็นคลื่นที่ผ่านการรวมผลเนื่องจากอิทธิพลของชั้นดินของกรุงเทพฯ ฯ แล้วและพิจารณาคาบการเกิดซ้ำที่ 2475 ปี [8]

3.2 กระบวนการวิเคราะห์

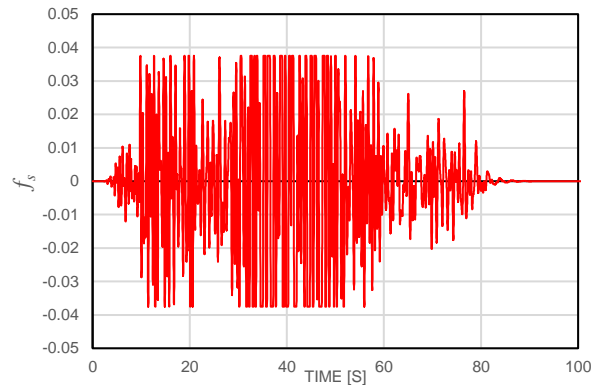
ในขั้นตอนนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนด้วยภาษา Python โดยใช้ OpenSeesPy Library [9] จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ SDOF ที่มีพฤติกรรมสองแบบคือแบบเชิงเส้น (linear elastic) และแบบไม่เชิงเส้นซึ่งพฤติกรรมหลังจากการคราก (yield) กำหนดให้เป็นแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ (elastic perfectly plastic, EPP) จึงเรียกแบบจำลองของระบบที่มีพฤติกรรมในแบบที่สองในการศึกษาครั้งนี้ว่าระบบที่มีพฤติกรรมแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบ SDOF ที่ใช้ในการศึกษามีค่าคงที่เท่ากับ 0.05 และใช้ค่า R ในการศึกษาเท่ากับ 1.5, 2, 3, 4 และ 6 คาบการสั้นของระบบ SDOF ในการศึกษาจะเริ่มต้นที่ 0.1 วินาทีและเพิ่มคาบการสั้นทีละ 0.02 วินาทีจนถึงคาบการสั้นที่ 6 วินาที ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คือการเลือกรูปสูงสุดของระบบที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ในแต่ละคาบการสั้นของคลื่นกลุ่ม Long CP และ Short CP

4. ผลการศึกษา

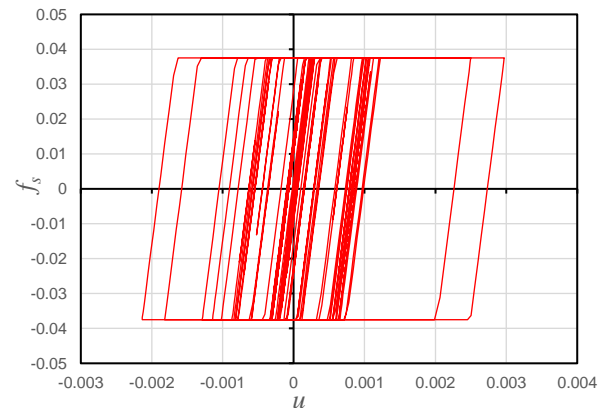
4.1 ผลการวิเคราะห์การเลือกรูปสูงสุด

ประวัติเวลาของแรงสติฟเนสของระบบ SDOF ที่มีพฤติกรรมหลังการครากเป็นแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ในกรณี $T_n = 0.5$ วินาที, $R = 3$, $\zeta = 0.05$ และกำลังครากเท่ากับ 0.038 แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 5 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงสติฟเนสและการเลือกรูปของระบบ SDOF ที่สอดคล้องกันนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปที่ 5 นั้นแสดงให้เห็นว่า f_s ที่เวลาต่าง ๆ นั้นจะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.038 และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 6 นั้นแสดงให้เห็นว่า ที่ $f_s = 0.038$ ระบบจะเกิดการครากและมีพฤติกรรมหลังการครากแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ที่กำหนดเงื่อนไขไว้ในหัวข้อที่ 3.2

รูปที่ 7 แสดงค่า envelope ของการเลือกรูปสูงสุดของระบบที่มีคาบการสั้นต่าง ๆ เส้นสีน้ำเงินแสดงกรณีที่เกิดจากคลื่นกลุ่ม Short CP และเส้นสีแดงแสดงกรณีที่เกิดจากคลื่นกลุ่ม Long CP เส้นทึบแสดงถึงกรณีที่เป็นเชิงเส้นส่วนเส้นประแสดงถึงกรณีไม่เชิงเส้นที่ R ต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า พฤติกรรมการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นของระบบ SDOF นั้นถูกควบคุมโดยคลื่นกลุ่ม Long CP ซึ่งจะเห็นได้จากในกรณีที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น ($R > 1$) การเลือกรูปของคลื่นกลุ่ม Long CP นั้นมีค่ามากกว่าการเลือกรูปของคลื่นกลุ่ม Short CP ตั้งแต่คาบการสั้น 0.1 วินาทีซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่แสดงในกราฟ

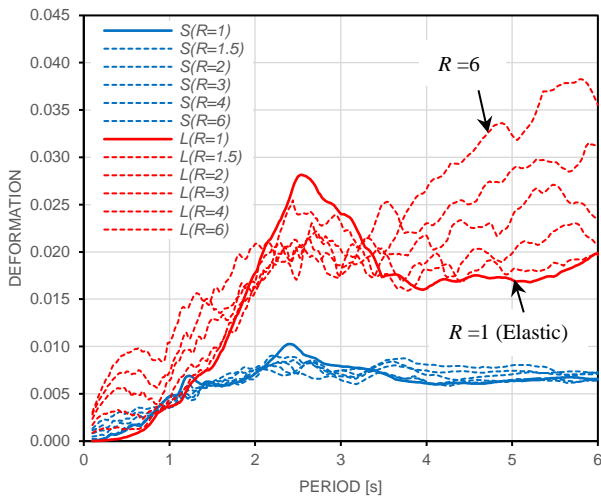


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในสปริงของระบบ SDOF ที่เวลาต่างๆ กรณี $T_n = 0.5$ วินาที, $R = 3$, $\zeta = 0.05$ เมื่อถูกกระตุ้นโดยตัวอย่างของคลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับกรณี CMS ที่คาบการสั้น 0.5 วินาที



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเลือกรูปของระบบที่มีพฤติกรรมหลังการครากเป็นแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ของระบบดังรูปที่ 5

เนื่องจากสมการที่ (5) ระบุให้ C_1 มีค่าเท่ากับ 1.0 ในกรณีที่คาบเกินกว่า 1.0 วินาที จึงเป็นเหตุให้การเลือกรูปสูงสุดของระบบไม่เชิงเส้นที่คำนวณได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐานนั้นไม่ขึ้นกับค่าของ R และมีค่าเท่ากับ การเลือกรูปสูงสุดของระบบเชิงเส้นซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบสีแดง จากรูปที่ 7 จึงเห็นได้ว่าการเลือกรูปสูงสุดของระบบไม่เชิงเส้นที่วิเคราะห์ได้นั้นมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานทั้งในช่วงคาบที่น้อยกว่า 2.1 วินาที และมากกว่า 3.1 วินาที



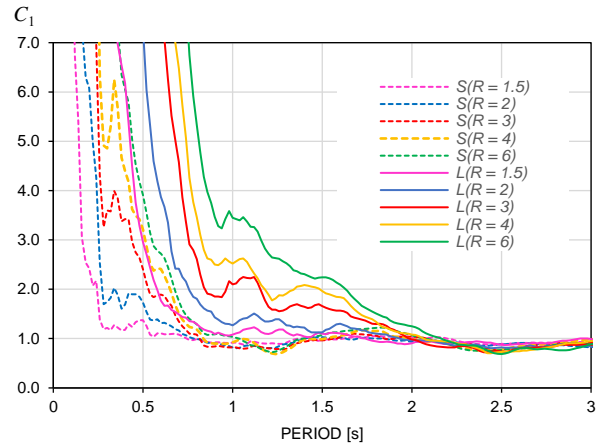
รูปที่ 7 การเลือกรูปสูงสุดหน่วย g ของระบบที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและพลาสติกโดยสมบูรณ์ของคลื่นกลุ่ม Short CP และ Long CP

4.2 ผลการวิเคราะห์อัตราการเสียรูปไม่เชิงเส้น

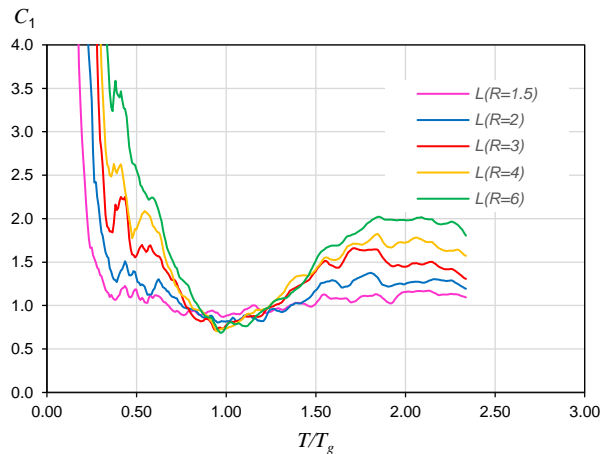
ค่า C_1 ของแอ่งกรุงเทพฯ โซน 5 ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยเส้นประแสดงถึงค่า C_1 จากคลื่นกลุ่ม Short CP และเส้นทึบแสดงค่า C_1 จากคลื่นกลุ่ม Long CP จากภาพจะเห็นได้ว่าที่ค่า R เท่ากันและคาบการสั่นเดียวกันนั้นค่า C_1 ของคลื่นกลุ่ม Short CP และ Long CP จะมีค่าที่ต่างกันโดยคลื่นกลุ่ม Long CP นั้นจะมีค่า C_1 ที่สูงกว่าในช่วงคาบสั่นจนถึงที่คาบการสั่นประมาณเท่ากับ 2.1 วินาที ค่า C_1 ของคลื่นทั้งสองกลุ่มจึงจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันประมาณเท่ากับ 1 ในทุกค่าของ R คลื่นกลุ่ม Short CP นั้นจะลู่เข้าสู่ค่าประมาณเท่ากับ 1 ก่อนคลื่นกลุ่ม Long CP ที่คาบการสั่นเท่ากับ 0.85 วินาที ส่วนคลื่นกลุ่ม Long CP นั้นจะลู่เข้าสู่ค่าประมาณเท่ากับ 1 ที่คาบการสั่นเท่ากับ 2.1 วินาทีจึงกล่าวได้ว่าคลื่นกลุ่ม Long CP นั้นเป็นคลื่นที่ควบคุมพฤติกรรมการตอบสนองของระบบ SDOF นี้

Ruiz-Garcia and Miranda [6] ได้ศึกษาค่า C_1 ของชั้นดินอ่อนในสหรัฐอเมริกาและเม็กซิโกและได้เสนอว่าพฤติกรรมของ C_1 สำหรับชั้นดินอ่อนสามารถอธิบายได้เมื่อแสดงค่าในรูปของ T/T_g โดย T_g คือคาบการสั่นที่มีความเร็วตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_v) สูงสุด รูปที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ย C_1 ของแอ่งกรุงเทพฯ โซน 5 ของคลื่นกลุ่ม Long CP ที่คาบการสั่นแสดงในรูป T/T_g โดย T_g ของคลื่นกลุ่ม Long CP มีค่าเท่ากับ 2.57 วินาที โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 10 ซึ่งเป็นค่า C_1 ของชั้นดินประเภท E ซึ่งเป็นดินอ่อนมากที่แสดงไว้ในมาตรฐาน FEMA 440 โดยคาบการสั่นแสดงในรูป T/T_g เช่นเดียวกันพบว่าค่า C_1 ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ลู่เข้าสู่ค่าประมาณเท่ากับ 1 ที่ T/T_g เท่ากับ 0.80 ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของ C_1 ในรูปที่ 10 ของ FEMA 440 ที่ลู่เข้าสู่ค่าประมาณเท่ากับ 1 ที่ T/T_g เท่ากับ 0.75 และเมื่อลองพิจารณาว่าค่า C_1 กรณี $R = 4$ ที่ T/T_g เท่ากับ 0.5 จากทั้งสองรูปพบว่า ค่า C_1 จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าประมาณเท่ากับ 1.9 ส่วน C_1 ของ FEMA 440 นั้นมีค่าประมาณเท่ากับ 1.7 จึงถือได้ว่า

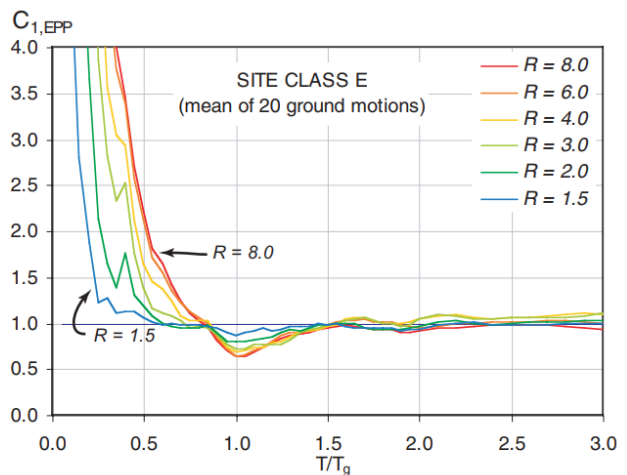
พฤติกรรมของ C_1 ของชั้นดินโซนที่ 5 ของแอ่งกรุงเทพฯ มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางที่คล้ายคลึงกับพฤติกรรมของชั้นดินประเภท E ที่แสดงใน FEMA 440



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ย C_1 ของแอ่งกรุงเทพฯ โซน 5



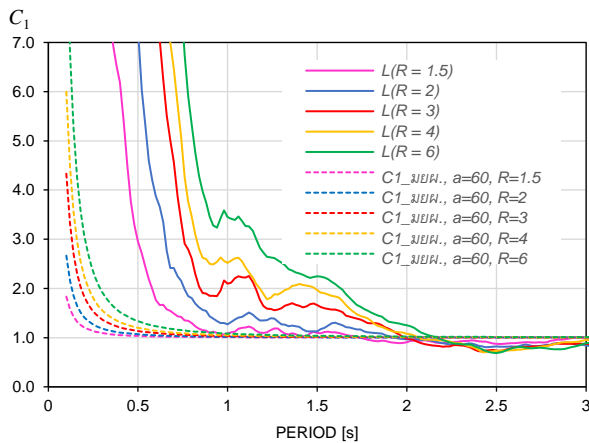
รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ย C_1 ของแอ่งกรุงเทพฯ โซน 5 ของคลื่นกลุ่ม Long CP ที่คาบการสั่นแสดงในรูป T/T_g



รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ย C_1 ของชั้นดินประเภท E จากมาตรฐาน FEMA 440

[3]

รูปที่ 11 แสดงกราฟเมื่อนำค่า C_1 ของคลื่นกลุ่ม Long CP มาแสดงเปรียบเทียบกับค่า C_1 ที่คำนวณโดยใช้สมการที่ (5) ที่นำมาจากมาตรฐาน มยผ.1303-57 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน a เท่ากับ 60 ซึ่งเป็นค่าสำหรับชั้นดินอ่อนและมีค่าต่ำสุดในมาตรฐานดังกล่าว พบว่าสมการของ มยผ.1303-57 ให้ค่า C_1 ต่ำกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจริงในครั้งนี้อย่างมากในช่วงคาบสั้นที่คาบต่ำกว่า 2.1 วินาที โดยลักษณะกราฟที่ได้จากสมการที่ (5) นั้นมีลักษณะลดลงจนเข้าสู่ค่าเท่ากับ 1 ที่คาบการสั่นเท่ากับ 1 วินาทีแบบโค้งหงาย ส่วนกราฟที่ได้จากการศึกษานั้น จะมีค่าลดลงแบบโค้งหงายในช่วงแรกจนถึงคาบการสั่นประมาณเท่ากับ 0.87 วินาทีจากนั้นจะลดลงแบบเส้นตรงในช่วงที่สองจนเข้าสู่ค่าเท่ากับ 1 ที่คาบการสั่นเท่ากับ 2.1 วินาที หลังจากคาบการสั่นเท่ากับ 2.1 วินาทีนั้น ค่า C_1 ในแต่ละค่า R จะลดลงต่ำกว่า 1 เล็กน้อยแบบโค้งหงายและจะกลับเข้าสู่ 1 อีกครั้งที่คาบการสั่นเท่ากับ 3 วินาที และเมื่อพิจารณาว่า C_1 ในกรณี $R = 4$ ที่คาบการสั่นเท่ากับ 1 วินาทีซึ่งค่า C_1 จากสมการที่ (5) มีค่าประมาณเท่ากับ 1 นั้น กลับพบว่าค่า C_1 จากผลการศึกษามีค่าเท่ากับ 2.6 ซึ่งมากกว่าอย่างมาก ทำให้เห็นว่าสมการที่ (5) นั้นไม่เหมาะสมสำหรับชั้นดินอ่อนของกรุงเทพมหานคร ฯ ในโซนที่ 5 นี้



รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ย C_1 ของกรุงเทพมหานคร ฯ เทียบกับค่าตาม มยผ. 1303-57 กรณี $a=60$

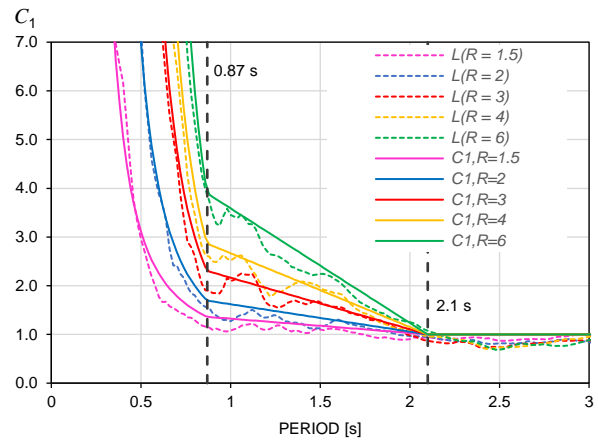
4.3 สมการการคำนวณ C_1 ที่ได้จากผลการศึกษา

รูปที่ 12 แสดงกราฟของสมการการประมาณค่า C_1 ของคลื่นกลุ่ม Long CP ที่ปรับปรุงให้เหมาะสมสำหรับพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร ฯ โซนที่ 5 โดยการ Fit กราฟให้เข้ากับผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้อย่างเหมาะสมจะแบ่งออกเป็นสามช่วงคือช่วงแรก C_1 จะลดลงแบบโค้งหงายจนถึงคาบการสั่นเท่ากับ 0.87 วินาทีซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (6) ดังนี้

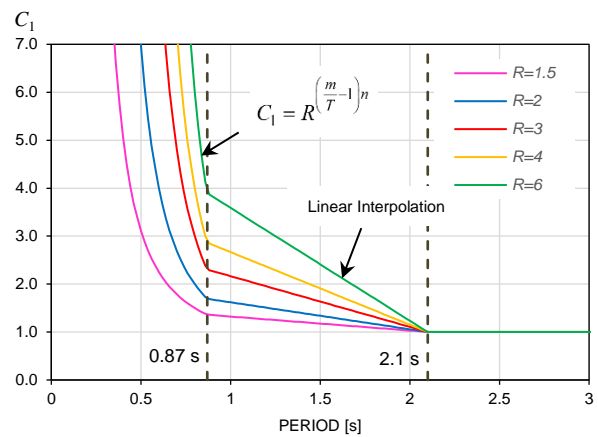
$$C_1 = R \left(\frac{m}{T} - 1 \right)^n \quad (6)$$

โดย m และ n คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1.2 และ 2.0 ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่สองจะลดลงแบบเส้นตรงจนมีค่าเท่ากับ 1 ที่คาบการสั่น 2.1 วินาที และช่วงที่สามตั้งแต่คาบการสั่น 2.1-3 วินาที C_1 จะคงที่เท่ากับ 1 และรูป

ที่ 13 แสดงภาพรวมของการประมาณค่า C_1 จากสมการที่ (6) สำหรับโซนที่ 5 ของพื้นที่แห่งกรุงเทพ ฯ ที่นำเสนอ



รูปที่ 12 ค่าเฉลี่ย C_1 ของกรุงเทพมหานคร ฯ ของคลื่นกลุ่ม Long CP เทียบกับค่าที่เสนอโดยผลจากการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 13 การคำนวณค่า C_1 ที่เสนอโดยใช้ผลจากการศึกษาครั้งนี้

5. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้อัตราส่วนการเสียรูปไม่เชิงเส้นหรือ C_1 ซึ่งเป็นหนึ่งในค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่เป้าหมายในการวิเคราะห์โดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นและหาได้จากอัตราส่วนระหว่างการเสียรูปสูงสุดของระบบ SDOF ที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนด้วยภาษา Python โดยใช้ OpenSeesPy Library ข้อมูลของชุดคลื่นที่ใช้ศึกษานั้น นำมาจากฐานข้อมูลของมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ของกรุงเทพมหานคร ฯ โซน 5 ที่มาของคลื่นที่ใช้ศึกษาสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือคลื่นที่มีแหล่งกำเนิดระยะใกล้ Short CP และคลื่นที่มีแหล่งกำเนิดระยะไกล Long CP

จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของระบบ SDOF ถูกควบคุมโดยคลื่นกลุ่ม Long CP และเมื่อเปรียบเทียบ C_1 ที่ได้จากการศึกษาของคลื่นกลุ่ม Long CP กับ C_1 ที่คำนวณโดยใช้สมการที่ (5) ที่กำหนดไว้

ในมาตรฐาน มยผ.1303-57 พบว่าค่า C_1 ที่คำนวณโดยใช้สมการที่ (5) ด้วย a เท่ากับ 60 ตามข้อแนะนำของมาตรฐานนั้นจะทำให้ค่าการเคลื่อนที่เป่าหมายที่ต่ำกว่าผลการวิเคราะห์ห้อย่างมีนัยสำคัญในช่วงคาบที่น้อยกว่า 2.0 วินาที งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสูตรในการประมาณค่า C_1 สำหรับพื้นที่โซนที่ 5 ของกรุงเทพฯ ฯ ในสมการที่ (6) และรูปที่ 13

6. ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษานี้ครั้งนี้แนะนำให้เสนอเฉพาะค่า C_1 ที่เหมาะสมของกรุงเทพฯ ฯ โซน 5 ซึ่งยังไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของกรุงเทพฯ ฯ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับพื้นที่อีก 9 โซนที่เหลือ อีกทั้งในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาพฤติกรรมหลังการครากแบบพลาสติกโดยสมบูร์มที่ไม่คิดผลของ strain hardening หลังการครากซึ่งจากการศึกษาของ Chopra และ Chintanapakdee [4] พบว่ามีผลในการช่วยลดอัตราส่วนการเสียรูปไม่เชิงเส้นลงได้จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลดังกล่าวสำหรับพื้นที่ของกรุงเทพฯ ฯ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). *มาตรฐานการประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1303-57)*. นนทบุรี: บริษัท สหมิตรพรินต์ติ้งพับลิชชิ่ง จำกัด.
- [2] American Society of Civil Engineer (ASCE). (2007). *Seismic rehabilitation of existing buildings (ASCE 41/SEI 41-06)*, Reston, VA.
- [3] Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440)*, prepare by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [4] Chopra, A. K., and Chintanapakdee, C. (2004). Inelastic Deformation Ratios for Design and Evaluation of Structures: Single-Degree-of-Freedom Bilinear Systems. *Journal of Structural Engineering*, 130(9), pp.1309-1319
- [5] Miranda, E., and Ruiz-Garcia, J. (2002). Evaluation of Approximate Methods to Estimate Maximum Inelastic Displacement Demands. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), pp.539-560
- [6] Ruiz-Garcia, and Miranda, E. (2004). Inelastic Displacement Ratios for Design of Structures on Soft Soils Sites. *Journal of Structural Engineering*, 130(12), pp.2051-2061
- [7] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2564). *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. (1301/1302-61 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1)*. กรุงเทพฯ ฯ: บริษัท เอส.พี.เอ็ม.การพิมพ์ จำกัด

- [8] อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี. (2560). *การประเมินผลของชั้นดินที่ติดตั้งแผ่นดินไหวและการพัฒนาความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบในพื้นที่กรุงเทพฯ ฯ*. คุชฎินพนธ์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- [9] Zhu, M., McKenna, F., and Scott M. H. (2017). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX*, 7, pp.6-11