

## การต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว Earthquake Resistance of Non-Ductile Reinforce Concrete Building

อมรชัย ไจยงค์<sup>1</sup> และ ชานนท์ กวางเจริญ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

\*Corresponding author; E-mail address: jaiyong@eng.buu.ac.th

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียวในประเทศไทย อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนำมาใช้เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยอาคารจะถูกระบุให้ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทยที่มีระดับความรุนแรงในการเกิดแผ่นดินไหวแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ บริเวณพื้นที่เฝ้าระวัง บริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 โดยโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกพิจารณาเป็นแบบจำลองสองมิติ พฤติกรรมความเสียหายของอาคารจะแสดงอยู่ในรูปของจุดหมุนพลาสติก ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมหมุนกับโมเมนต์ดัด ซึ่งกฎของความสัมพันธ์นี้จะถูกควบคุมด้วยโมเมนต์ที่จุดคราก โมเมนต์สูงสุดและมุมหมุนสูงสุด จากผลการศึกษาเส้นโค้งสมรรถนะของโครงสร้างพบว่า โครงสร้างอาคารจะยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเมื่อแรงแผ่นดินไหวที่กระทำไม่เกิน 10653 กิโลกรัม และโครงสร้างอาคารสามารถต้านทานแรงสูงสุดในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้ไม่เกิน 17,140 กิโลกรัมก่อนที่โครงสร้างจะเข้าสู่สภาวะพังทลายและเมื่ออาคารถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดินไหวจากพื้นที่เสี่ยงภัยทั้ง 3 โซน พบว่าอาคารเกิดความเสียหายที่เสาและคานอย่างรุนแรง โดยพฤติกรรมโดยรวมของอาคารเกิดกว่าระดับสมรรถนะป้องกันการพังทลายนั้นหมายถึงอาคารจะเกิดการวิบัติเมื่อถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดินไหวสูงสุดจากเขตพื้นที่เสี่ยงภัยดังกล่าว

คำสำคัญ: การต้านทานแผ่นดินไหว, อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, ปราศจากความเหนียว

### Abstract

This study emphasized to investigate the earthquake force resistance of non-ductile the reinforced concrete building constructed in Thailand. The 4-story RC building was adopted to evaluate the earthquake resistance capacity when it subjected to earthquake forces. A 4-story RC building is assumed to locate in three intensity levels of Thailand's hazard area, surveillance zone, the first zone, and the second zone. The RC frame was modeled as a two-dimensional. The moment-rotation relationship consists of the yielding moment, capping moment, and capping rotation obtained in the plastic

hinge model. The capacity curve indicated that the 4-story RC building remains elastic behavior when the earthquake force regarded as base shear subjected to the building not more than 10653-kilogram forces and it can resist the maximum base shear in an inelastic range around 17140-kilogram forces before the collapse. When the building subjected to the earthquake forces from three intensity levels of Thailand's hazard area, the beam and column were severely damaged and the global behavior of the building beyond the level of collapse prevention means the building is collapse.

### 1. คำนำ

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก แม้ว่าประเทศไทยจะไม่ได้อยู่ในบริเวณที่ก่อให้เกิดความเสียหายมากนัก แต่จากหลายเหตุการณ์ที่ผ่านมา กลับพบว่า เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวแต่ละครั้งมักก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน ซึ่งล้วนแล้วเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่อยู่ในเกณฑ์บังคับให้ต้องออกแบบและให้รายละเอียดโครงสร้างเป็นกรณีพิเศษเพื่อต้านทานแรงจากแผ่นดินไหว ซึ่งระดับความเสียหายของโครงสร้างอาคารก็จะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหวและระดับความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวทั้งในด้านกำลังของโครงสร้างอาคารและความสามารถในการเคลื่อนตัวของอาคารภายหลังเกิดความเสียหายหรือที่เรียกว่าค่าความเหนียว (ductility)

สำหรับอาคารขนาดเล็ก เช่น อาคารพักอาศัย ตึกแถว และอาคารพาณิชย์ จัดเป็นประเภทอาคารที่มีได้อยู่ในเกณฑ์บังคับตามประกาศกฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 ดังนั้นจากอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน การออกแบบและก่อสร้างอาคารประเภทนี้ จึงเป็นเพียงการออกแบบเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานและแรงลมโดยทั่วไป ซึ่งมิได้มีการพิจารณาออกแบบเหล็กเสริมพิเศษสำหรับต้านทานแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงแล้วอาคารเหล่านี้จึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายขึ้นได้ง่าย แต่ถึงกระนั้น ถึงแม้ว่าอาคารเหล่านี้จะมีได้เสริมเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว แต่ด้วยรายละเอียดการเสริมเหล็กที่มั่วๆอยู่แล้วในโครงสร้างเสาและคานก็พอจะช่วยเพิ่มความความสามารถในการต้านทาน

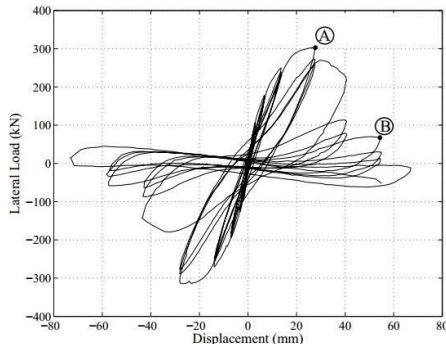
แผ่นดินไหวและช่วยให้ระบบโครงสร้างมีค่าความเหนียวในระดับหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดไม่รุนแรงนัก อาคารเหล่านี้ก็ยังคงพอต้านทานอยู่ได้โดยไม่เกิดการพังทลาย แต่ก็อาจทำให้โครงสร้างบางส่วนเกิดความเสียหายขึ้น

ดังนั้นเพื่อให้วิศวกรรมถึงเจ้าของอาคารได้ทราบถึงระดับความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวซึ่งถือเป็นอาคารประเภทที่ปราศจากความเหนียว (Non-ductile) นี้ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยได้เลือกระบบโครงสร้างอาคารพาณิชย์ความสูง 4 ชั้น มาทำการศึกษาในครั้งนี้

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พฤติกรรมของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กปราศจากความเหนียว

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียวซึ่งหมายถึงชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่ได้มีการให้รายละเอียดเหล็กเสริมเป็นกรณีพิเศษเพื่อใช้ในการป้องกันแรงกระทำที่มีลักษณะเป็นวงรอบหรือวัฏจักร โดยพฤติกรรมของชิ้นส่วนประเภทนี้เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกระทำแบบวัฏจักรจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมถอยของกำลัง (Strength degradation) และค่าสติฟเนส (Stiffness degradation) ดังแสดงในรูปที่ 1

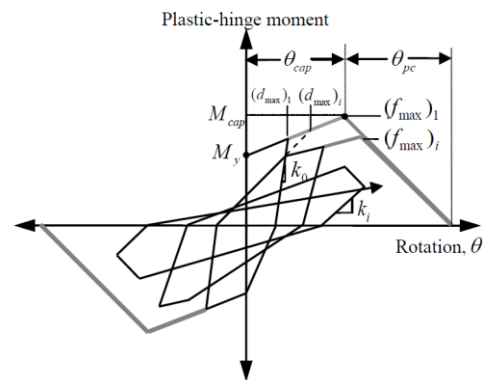


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างกับการเคลื่อนที่ของเสาที่ปราศจากความเหนียว [1]

ซึ่งการเสื่อมถอยของกำลังและสติฟเนสในชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียวนี้ ส่งผลทำให้โครงสร้างอาคารสูญเสียสติฟเนสและกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวอย่างรวดเร็ว ในแง่ผลการศึกษาการตอบสนองของโครงสร้างที่ปราศจากความเหนียวอย่างง่าย เช่น ผลตอบสนองของระบบชั้นเดียว (single degree of freedom, SDF) ของระบบที่ปราศจากความเหนียว พบว่า เมื่อโครงสร้างประเภทนี้ถูกกระตุ้นด้วยแรงแบบวัฏจักรหรือคลื่นแผ่นดินไหว กำลังต้านทานทางด้านข้าง (Lateral resisting force) จะมีอัตราลดลงมากกว่าระบบทั่วไป อีกทั้งยังมีแนวโน้มว่าโครงสร้างที่ปราศจากความเหนียวจะมีการเคลื่อนตัวสูงกว่า [2] ซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดความเสียหายได้ง่าย ทำให้ค่าสติฟเนสเกิดการเสื่อมถอย (Stiffness degradation) ลงรวดเร็วกว่าอาคารที่มีความเหนียว รวมถึงผลการศึกษาที่เกี่ยวกับผลตอบสนองของ

แบบจำลองระบบหลายระดับขั้นเสรี (Multi degree of freedom, MDF) ก็พบว่า การเคลื่อนตัวที่พื้นชั้นต่างๆ รวมถึงค่าการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นมีแนวโน้มขยายตัวสูงกว่าแบบจำลองทั่วไปที่ไม่ได้คำนึงถึงผลของการเสื่อมถอยที่เกิดจากชิ้นส่วนประกอบปราศจากความเหนียว [3] ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเก่าซึ่งจัดเป็นอาคารที่ปราศจากความเหนียว (ซึ่งเป็นประเภทอาคารที่ไม่ได้มีการเสริมเหล็กพิเศษเพื่อให้อาคารมีความเหนียว) จึงต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเสื่อมถอยเหล่านี้เข้าไว้ในการศึกษาวิเคราะห์ โดยพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนโครงสร้างเมื่อเกิดความเสียหายจะแสดงในรูปของจุดหมุนพลาสติก

จุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) จะเป็นจุดที่แสดงการเกิดความเสียหายเนื่องจากการัดจนทำให้เกิดมุมหมุน โดยแบบจำลองที่ใช้จะมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมหมุนดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมหมุนของจุดหมุนพลาสติกที่คำนึงถึงการเสื่อมถอย [4]

ในการศึกษานี้ เส้นขอบสูงสุด (Envelope curve) ซึ่งแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมหมุนของจุดหมุนพลาสติกจะถูกควบคุมด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวแปร ดังนี้: โมเมนต์ตัดที่จุดคราก ( $M_y$ ) [5], โมเมนต์ตัดที่จุดสูงสุด ( $M_c$ ), มุมหมุนที่จุดสูงสุด ( $\theta_{cap}$ ) และมุมหมุนที่สภาวะสุดท้ายที่ก้ำกัทางด้านข้างเป็นศูนย์ ( $\theta_{pc}$ ) โดยค่าพารามิเตอร์  $M_c$ ,  $\theta_{cap}$  และ  $\theta_{pc}$  คำนวณได้จากสมการที่ 1-3 [6]

$$M_c = (1.25)(0.89)^{\nu} (0.91)^{0.01c_{mits} f'_c} \cdot M_y \quad (1)$$

$$\theta_{cap} = 0.13(1 + 0.55a_{sl})(0.13)^{\nu} (0.02 + 40\rho_{sh})^{0.65} (0.57)^{0.01c_{mits} f'_c} \quad (2)$$

$$\theta_{pc} = (0.76)(0.031)^{\nu} (0.02 + 40\rho_{sh})^{1.02} \quad (3)$$

เมื่อ  $\nu$  = อัตราส่วนแรงในแนวแกน ( $P / A_g f'_c$ )

$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

$f'_c$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

$c_{mits}$  = 1.0 เมื่อหน่วยของกำลังอัดคอนกรีตมีหน่วยเป็น MPA

$\rho_{sh}$  = อัตราส่วนพื้นที่ของเหล็กปลอก ( $A_{sh} / sb$ )

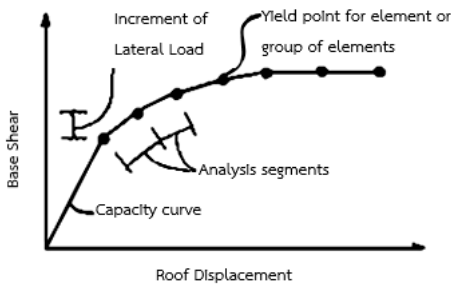
$A_{sh}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกรับแรงเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)

$s$  = ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก,  $b$  = ความกว้างคาน

ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในแบบจำลองคุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติก เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโครงสร้างรับแรงจากความเหนียวต่อไป

### 2.2 การสร้างเส้นสมรรถนะของอาคารด้วยวิธีแรงกระทำด้านข้าง (Pushover Analysis)

การสร้างเส้นสมรรถนะของอาคารจะดำเนินการโดยกำหนดแรงกระทำด้านข้างตลอดความสูงอาคารที่มีการกระจายแรงประสิทธิผลในโหมดพื้นฐาน (effective modal force) จาก  $s_i^* = m\phi$  โดยที่  $m$  คือ เมทริกซ์มวล และ  $\phi$  คือ โหมดรูปร่างของการสั่นไหวที่ 1 โดยจะค่อยๆ เพิ่มแรงผลักต่ออาคารจนกระทั่งอาคารเกิดการพังทลาย (Collapse) จากขั้นตอนนี้จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ผลักด้านข้างอาคารกับแรงเฉือนที่ฐาน (Base shear) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เส้นโค้งสมรรถนะของอาคาร [7]

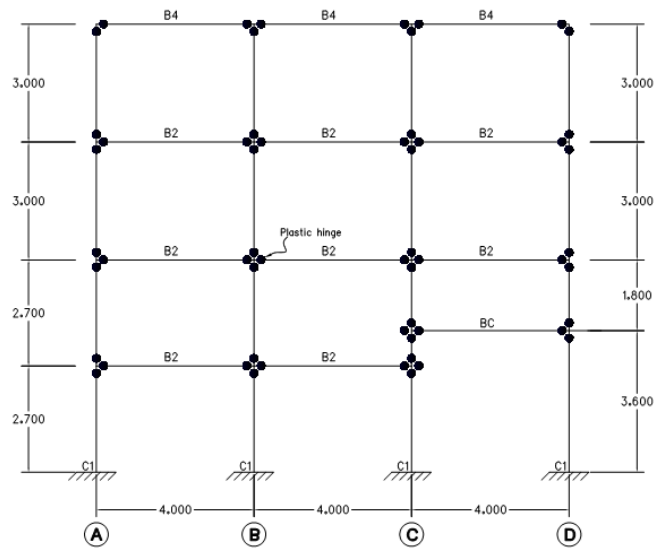
ซึ่งเส้นสมรรถนะของอาคารนี้จะถูกนำไปใช้ในการประเมินความสามารถหรือกำลังในการต้านทานแรงด้านข้างเมื่อถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ต่อไป

## 3. การดำเนินงานวิจัย

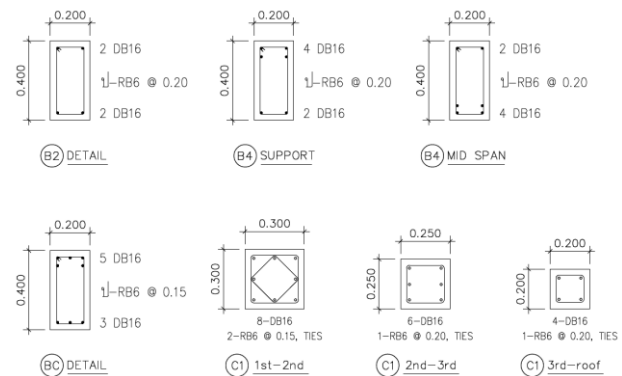
### 3.1 อาคารที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้เลือกแบบอาคารเก่าคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น ที่มีได้ออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยถูกใช้เป็นอาคารพาณิชย์ มาเป็นกรณีศึกษา โดยมีรายละเอียดของโครงสร้างดังต่อไปนี้

- รูปแบบอาคารเป็นอาคารพาณิชย์หน้ากว้าง 4 เมตร ความลึกตัวอาคารเท่ากับ 12 เมตร แบ่งเป็น 3 ช่วงเสา ช่วงเสาละ 4 เมตร อาคารมีความสูงจากพื้นดินถึงชั้นหลังคาตลาดฟ้าเท่ากับ 11.40 เมตร ตำแหน่งการเกิดความเสียหายสมมติให้อยู่ในบริเวณปลายคานและเสา ดังแสดงในรูปที่ 4
- กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหล็กเสริมหลักใช้เหล็กข้ออ้อยเกรด SD30 มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 3000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยรายละเอียดหน้าตัดคานและเสาของอาคารที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แบบจำลองอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้นและตำแหน่งจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinges) ที่ระบุในแบบจำลอง



รูปที่ 5 รายละเอียดหน้าตัดคานและเสาของอาคารที่ใช้ในการศึกษา

น้ำหนักอาคารแต่ละชั้นจะพิจารณาจากน้ำหนักเสา คานและวัสดุปูผิว ดังแสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 น้ำหนักในแต่ละชั้นและน้ำหนักรวมทั้งหมดของอาคาร

ชั้น	น้ำหนัก (กิโลกรัม)					
	ผนัง	คาน	พื้น	กระเบื้อง	เสา	รวม
ตลาดฟ้า	3,168	2,304	11,520	0	116	17,108
4	6,600	2,304	11,520	4,800	240	25,464
3	6,600	2,304	11,520	4,800	375	25,599
2	5,808	2,304	11,520	4,800	476	24,908
1	5,808	2,304	11,520	4,800	476	24,908
รวมทั้งหมด						117,987

จากผลการวิเคราะห์หาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์พบว่า อาคารนี้มีค่าการสั่นไหวประจำโหมดพื้นฐาน ( $T_1$ ) เท่ากับ 0.34 วินาที

### 3.2 แรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับอาคารตัวอย่าง

แรงแผ่นดินไหวของอาคารที่ใช้ในการศึกษานี้จะพิจารณาโดยสมมติให้อาคารตัวอย่างนี้ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทยซึ่งแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ เขตพื้นที่เฝ้าระวัง พื้นที่บริเวณที่ 1 และพื้นที่บริเวณที่ 2 โดยสำหรับเขตพื้นที่เฝ้าระวังและพื้นที่บริเวณที่ 2 จะทำการเลือกค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่รุนแรงสูงสุดที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ( $S_s$ ) และคาบการสั่น 1 วินาที ( $S_1$ ) ณ ตำแหน่งที่ตั้งที่มีค่าสูงสุดของแต่ละโซนมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ออกโดยกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ. 1301/1302-61) [8] ของแต่ละโซน โดยเริ่มจากการหาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร โดยการคูณปรับแก้ค่า  $S_s$  ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารสำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที ( $F_a$ ) ดังสมการที่ 4 และทำการคูณปรับแก้ค่า  $S_1$  ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารสำหรับคาบการสั่น 1 วินาที ( $F_v$ ) ดังสมการที่ 5

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (4)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (5)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์  $F_a$  และ  $F_v$  แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งในการศึกษานี้จะสมมติให้พื้นดินบริเวณที่ตั้งอาคารมีลักษณะเป็นดินประเภทชั้นดิน D สำหรับทั้ง 3 พื้นที่เสี่ยงภัย

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร  $F_a$

ประเภทของชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่คาบ 0.2 วินาที				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร  $F_v$

ประเภทของชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่คาบ 1.0 วินาที				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

ต่อจากนั้นจึงทำการปรับค่าสเปกตรัม  $S_{MS}$  และ  $S_{M1}$  ไปเป็นค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ( $S_{DS}$ ) และที่คาบการสั่น 1 วินาที ( $S_{D1}$ ) ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (6)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (7)$$

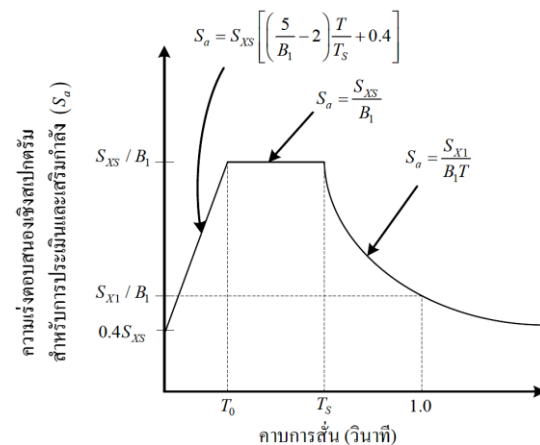
จากนั้นจึงหาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ( $S_{XS}$ ) และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินที่คาบการสั่น 1 วินาที ( $S_{X1}$ ) ตามมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1303-57) [9] ดังสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

$$S_{XS} = 0.5 S_{DS} \quad (8)$$

$$S_{X1} = 0.5 S_{D1} \quad (9)$$

ซึ่งสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารตัวอย่างสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินและเสริมกำลังกับคาบการสั่น ซึ่งกำหนดไว้ใน มยพ.1303-57 ดังรูปที่ 6

สำหรับพื้นที่ที่ถูกสมมติให้เป็นตัวแทนที่ตั้งอาคารตัวอย่างในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยทั้ง 3 โซน ประกอบด้วย (1) **บริเวณเฝ้าระวัง** เลือกใช้ข้อมูลของพื้นที่ อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง (2) **บริเวณที่ 1** เป็นพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เลือกใช้ข้อมูลของพื้นที่โซน 1 ครอบคลุมจังหวัดราชบุรีและเพชรบุรี และ (3) **บริเวณที่ 2** เลือกใช้ข้อมูลของพื้นที่ อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ โดยข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4



รูปที่ 6 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมินและออกแบบเสริมกำลัง [9]

เมื่อ  $T_s = S_{X1} / S_{XS}$ ,  $T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}$  และ  $B_1 = 4 / [5.6 - \ln(100\beta)]$

โดยที่  $\beta$  = อัตราส่วนความหน่วงมีค่าเท่ากับ 0.05

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรสำหรับคำนวณค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินของอาคารตัวอย่างแบ่งตามโซนพื้นที่เสี่ยงภัย

ค่าตัวแปร	บริเวณเฝ้าระวัง	บริเวณที่ 1	บริเวณที่ 2	มาตรฐานอ้างอิง
$S_s$ (g)	0.355	-	1.086	มยพ.1301/1302-61
$S_1$ (g)	0.112	-	0.275	มยพ.1301/1302-61
$F_a$	1.52	-	1.066	มยพ.1301/1302-61
$F_v$	2.35	-	1.85	มยพ.1301/1302-61
$S_{MS}$ (g)	0.540	-	1.158	มยพ.1301/1302-61
$S_{M1}$ (g)	0.260	-	0.509	มยพ.1301/1302-61
$S_{DS}$ (g)	0.360	-	0.772	มยพ.1301/1302-61
$S_{D1}$ (g)	0.173	-	0.339	มยพ.1301/1302-61
$S_{XS}$ (g)	0.180	-	0.386	มยพ.1303-57
$S_{X1}$ (g)	0.087	-	0.170	มยพ.1303-57
$T_s$	0.483	-	0.440	มยพ.1302
$T_0$	0.096	-	0.088	มยพ.1302
$S_a$ (g)	0.180	0.190	0.385	มยพ.1303-57

หลังจากได้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบของแต่ละพื้นที่ดังที่กล่าวมาแล้ว จะนำความเร่งเหล่านี้มาคำนวณหาแรงแผ่นดินไหวสูงสุดจากมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1301/1302-61) ซึ่งแสดงในรูปของแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Seismic base shear,  $V$ ) ดังสมการที่ 10

$$V = S_a \left( \frac{I}{R} \right) W \quad (10)$$

โดยที่  $S_a$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร,  $I$  คือ ตัวประกอบความสำคัญของอาคารมีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับอาคารทั่วไป และ  $R$  คือ ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ซึ่งในขั้นตอนการประเมินจะใช้ค่า  $R = 1.0$  เพื่อให้ได้ค่าแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่กระทำกับอาคารทั้งหลัง โดยอยู่ในรูปของแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Base shear,  $V_b$ ) ดังตารางที่ 5 นี้

ตารางที่ 5 ค่าแรงเฉือนที่ฐานของอาคารแบ่งตามโซนพื้นที่เสี่ยงภัย

โซนพื้นที่เสี่ยงภัย	ค่าแรงเฉือนที่ฐาน ( $V_b$ ) (กิโลกรัม)
บริเวณเฝ้าระวัง	21,238
บริเวณที่ 1	22,418
บริเวณที่ 2	45,424

และทำการกระจายแรงในแนวตั้งตามตารางที่ 5 ไปสู่แรงกระทำด้านข้างในแนวราบด้วยสมการที่ 11

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V_b \quad (11)$$

เมื่อ  $k = 1.0$  กรณีที่  $T_1 < 0.5$  วินาที

ดังนั้นจากสมการที่ 11 จะได้แรงกระทำด้านข้างที่ชั้นต่างๆของอาคารแบ่งตามโซนพื้นที่เสี่ยงภัยซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าแรงกระทำด้านข้างอาคารแบ่งตามโซนพื้นที่เสี่ยงภัย

ระดับชั้น	แรงกระทำด้านข้างอาคารแบ่งตามโซนพื้นที่เสี่ยงภัย (กิโลกรัม)		
	บริเวณเฝ้าระวัง	บริเวณที่ 1	บริเวณที่ 2
หลังคา	6,741	7,116	14,419
ชั้น 4	7,394	7,805	15,815
ชั้น 3	4,778	5,043	10,218
ชั้น 2	2,325	2,454	4,972
ชั้น 1	0	0	0
รวม	21,238	22,418	45,424

### 3.3 การประเมินการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารตัวอย่าง

การประเมินการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารจะพิจารณาจาก ค่าร้อยละการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของอาคารแต่ละชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่มากระทำ แล้วนำมาเทียบกับเกณฑ์ระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7 โดยการวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์จะใช้วิธีสถิตไม่เชิงเส้น โดยรวมผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ ( $Q_D$ ) และน้ำหนักบรรทุกจร ( $Q_L$ ) เข้าไว้ด้วยดังสมการที่ 12 ซึ่งในการวิเคราะห์ได้คำนึงถึงผลของ  $P-\Delta$  ด้วยแล้ว

$$Q_c = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (12)$$

ค่าร้อยละการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (% Story drift) จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างโดยจะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy level, IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life safety level, LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention level, CP) โดยพิจารณาจากเกณฑ์การยอมรับสำหรับโครงสร้างแรงดัดคอนกรีต แสดงในตารางที่ 7

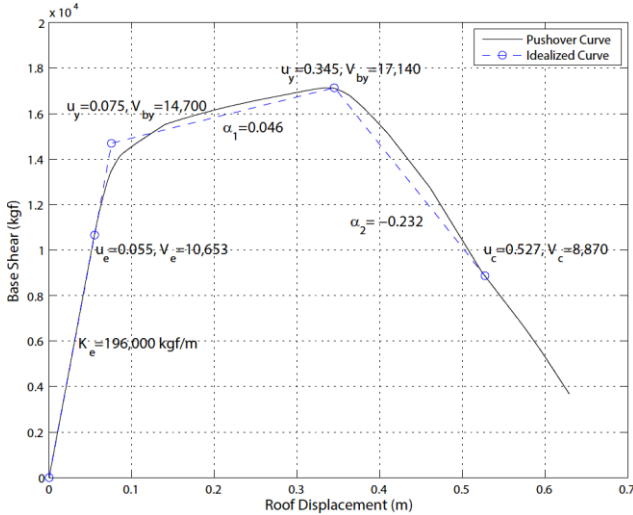
ตารางที่ 7 ค่าร้อยละการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสำหรับจำแนกระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย [10]

ประเภทโครงสร้าง	ระดับป้องกันการพังทลาย (CP)	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS)	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO)
โครงสร้างแรงดัดคอนกรีต	< 4%	< 2%	< 1%



#### 4. ผลการวิจัย

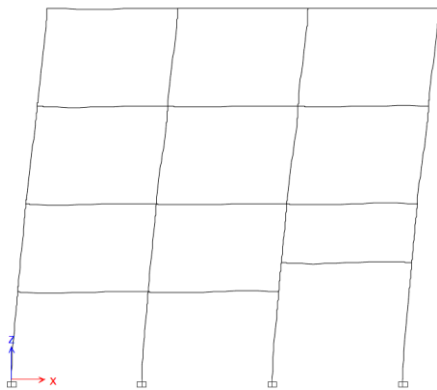
จากการสร้างเส้นสมรรถนะของอาคารด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear static analysis) โดยการผลักอาคารด้วยแรงกระจายแรงประสิทธิผลในโหมดพื้นฐาน ( $s_1^*$ ) โดยเพิ่มขนาดของแรงขึ้นเรื่อยๆจนโครงสร้างพังจะได้เส้นสมรรถนะของอาคารดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เส้นสมรรถนะของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น

##### 4.1 พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นของอาคาร

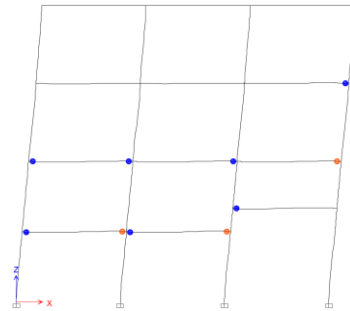
จากเส้นสมรรถนะของอาคารดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำกับอาคารในช่วงไม่เกิน 10,653 กิโลกรัม แรงกระทำระดับนี้ไม่ทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นในโครงสร้างอาคารซึ่งหมายถึงความเสียหายในโครงสร้างอาคารอยู่ในระดับต่ำมากและไม่ส่งผลให้ตัวอาคารเกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นแบบถาวร อาคารยังคงสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างดี โครงสร้างโดยรวมยังคงสติเฟสนและกำลังส่วนใหญ่ไว้ได้ดี โดยมีขอบเขตการเคลื่อนที่ที่ยอดอาคารสูงสุด 0.055 เมตร โดยอาคารเกิดการเคลื่อนตัวดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปร่างการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น ช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น

##### 4.2 สมรรถนะของอาคารในระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที

เป็นช่วงที่โครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจากสภาวะยืดหยุ่นส่งผลให้แรงภายในชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นถึงจุดที่ก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยแรงแผ่นดินไหวที่ทำให้พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างอยู่ในสภาวะครากมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 14,700 กิโลกรัม ที่ระยะเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร 0.075 เมตร โดยการเสียรูปของอาคารและตำแหน่งการเกิดความเสียหาย (จุดหมุนพลาสติก) แสดงไว้ในรูปที่ 9 สำหรับค่าการเคลื่อนที่ที่ชั้นต่างๆ รวมถึงค่าร้อยละการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ในสภาวะคราก แสดงไว้ในตารางที่ 8



รูปที่ 9 การเสียรูปของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น ในระดับสมรรถนะเข้าใช้อาคารได้ทันที

##### ตารางที่ 8 ค่าการเคลื่อนตัวและการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ที่สภาวะคราก

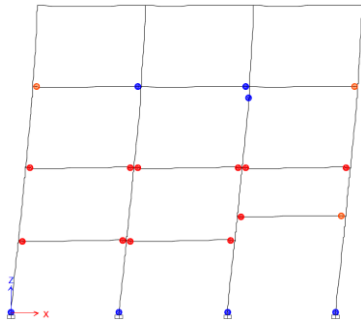
ชั้น	ความสูงระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนตัว (เมตร)	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ (%)	เกณฑ์ระดับ IO
หลังคา	3	0.102	0.022	0.73	< 1%
4	3	0.08	0.029	0.97	< 1%
3	2.7	0.05	0.025	0.93	< 1%
2	2.7	0.025	0.025	0.93	< 1%
1	0	0	-	-	-

จากรูปที่ 9 โดยส่วนใหญ่โครงสร้างเกิดความเสียหายขึ้นที่คานชั้น 2 ถึงชั้น 3 โดยเป็นความเสียหายที่เกิดจากการตัด และระดับสมรรถนะของโครงสร้างอยู่ในระดับ IO ซึ่งยังมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน

##### 4.3 สมรรถนะของอาคารในระดับปลอดภัยต่อชีวิต

เป็นช่วงที่อาคารถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำจนทำให้พฤติกรรมโครงสร้างโดยรวมเกินกว่าที่กิดที่สภาวะคราก ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารมีแนวโน้มเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นและเสียหายรุนแรงมากขึ้น โดยจากเกณฑ์ระดับ

สมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหายสำหรับระดับปลอดภัยต่อชีวิตในตารางที่ 7 กำหนดให้ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในทุกชั้นต้องมีค่าไม่เกินกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งภายใต้เงื่อนไขนี้ โครงสร้างจะสามารถต้านทานแรงด้านข้างได้สูงสุดไม่เกิน 16,094 กิโลกรัม ที่การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารเท่ากับ 0.193 เมตร โดยรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นแสดงไว้ดังรูปที่ 10 และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แสดงไว้ในตารางที่ 9



รูปที่ 10 การเสีรูปของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น ในระดับสมรรถนะปลอดภัยต่อชีวิต

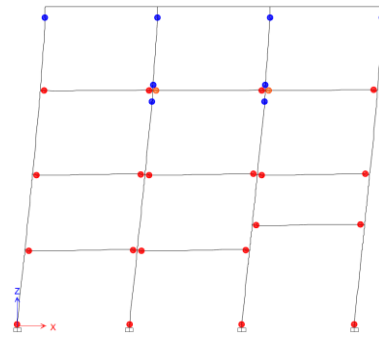
ตารางที่ 9 ค่าการเคลื่อนตัวและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่สภาวะแรงต้านสูงสุด

ชั้น	ความสูงระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนตัว (เมตร)	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (%)	เกณฑ์ระดับ LS
หลังคา	3	0.194	0.032	1.1	< 2%
4	3	0.162	0.054	1.8	< 2%
3	2.7	0.108	0.053	1.96	< 2%
2	2.7	0.054	0.053	1.96	< 2%
1	0	0	-	-	-

สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างอาคาร จะเกิดจากการดัดที่คานทุกตัวตั้งแต่ชั้น 2 จนถึงชั้น 4 ในขณะที่เดียวกันก็เกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้างเสาโดยเฉพาะในบริเวณโคนเสาชั้นล่าง

#### 4.3 สมรรถนะของอาคารในระดับป้องกันการพังทลาย

เป็นช่วงที่โครงสร้างสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวและการเคลื่อนที่ได้สูงสุดซึ่งมีค่ากำลังต้านทานเท่ากับ 17,140 กิโลกรัม และการเคลื่อนตัวที่จุดยอดอาคารเท่ากับ 0.345 เมตร ก่อนที่โครงสร้างจะมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างลดลง ถึงกระนั้นระบบโครงสร้างอาคารก็ยังรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งได้ สำหรับค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นอื่นๆ และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แสดงไว้ในตารางที่ 10 สำหรับการเสีรูปของอาคารเป็นไปตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเสีรูปของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น ในระดับสมรรถนะป้องกันการพังทลาย

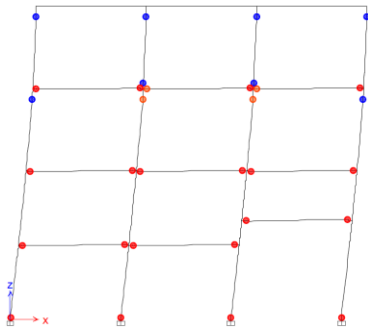
ตารางที่ 10 ค่าการเคลื่อนตัวและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่สภาวะแรงต้านสูงสุด

ชั้น	ความสูงระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนตัว (เมตร)	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (%)	เกณฑ์ระดับ CP
หลังคา	3	0.338	0.058	1.93	< 4%
4	3	0.28	0.094	3.13	< 4%
3	2.7	0.186	0.093	3.44	< 4%
2	2.7	0.093	0.093	3.44	< 4%
1	0	0	-	-	-

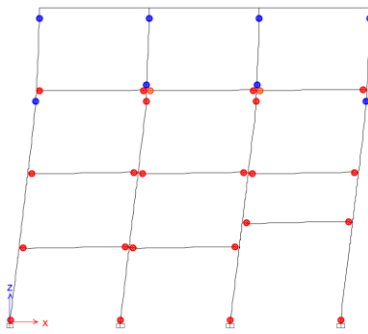
ในสภาวะนี้คานชั้น 2 ถึง 4 รวมถึงโคนเสาชั้นล่างจะเกิดรอยแตกร้าวอย่างรุนแรงและเหล็กเสริมหลักเกิดการคราก ในขณะที่หัวเสารับพื้นชั้น 4 และชั้นหลังคาเกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อย ซึ่งในสภาวะ CP นี้ จะสังเกตเห็นว่าบริเวณเสาชั้น 1 ถึงชั้น 3 (ยกเว้นโคนเสาชั้น 1) เกิดความเสียหายน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของเสาที่มีความแข็งแรง ในขณะที่ความเสียหายหลักๆเกิดที่คาน เหตุผลที่ทำให้เสามีความแข็งแรงตามที่ได้กล่าวมานี้เนื่องจาก ในแบบก่อสร้างผู้ออกแบบได้กำหนดให้ใช้ขนาดหน้าตัดและรายละเอียดเหล็กเสริมของสำหรับเสาชั้นหนึ่งต่อเนื่องไปจนถึงหัวเสารับพื้นชั้นสาม ซึ่งทำให้ชิ้นส่วนเสาบริเวณชั้นสองมีกำลังต้านทานสูงกว่าปกติเมื่อเทียบกับกำลังของเสาในชั้นอื่น

#### 4.4 ความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารแบ่งตามเขตพื้นที่เสี่ยงภัย

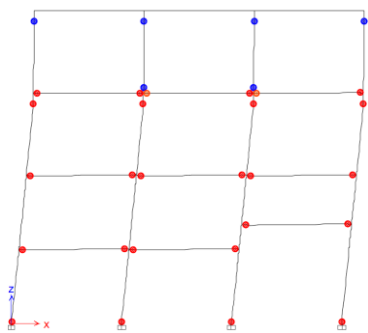
เมื่อทำการวิเคราะห์การเสีรูปของอาคารด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นโดยการผลึกอาคารด้วยแรงกระทำด้านข้างด้วยแรงแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยตามตารางที่ 6 จะได้ผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกดังนี้



รูปที่ 12 ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกในโครงสร้างที่ถูกผลักด้วยแรง  
แผ่นดินไหวบริเวณฝ้าระวาง



รูปที่ 13 ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกในโครงสร้างที่ถูกผลักด้วยแรง  
แผ่นดินไหวบริเวณที่ 1



รูปที่ 14 ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกในโครงสร้างที่ถูกผลักด้วยแรง  
แผ่นดินไหวบริเวณที่ 2

จากรูปที่ 12-14 รูปแบบการเกิดจุดหมุนพลาสติกในโครงสร้างเมื่อถูกกระทำด้วยแรงด้านข้างที่มีขนาดตามแรงแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยทั้ง 3 โซน จะพบว่า เสาคู่ต้นเกิดจุดหมุนพลาสติกที่โคนเสาชั้นหนึ่งและที่บริเวณหัวเสาบริเวณชั้นดาดฟ้า และเมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนที่ที่ยึดตามตารางที่ 11 พบว่า การเคลื่อนที่ตัวที่ยอดอาคารมีค่าเกิดกว่าค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดที่ระดับป้องกันการพังทลาย (CP) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของโครงสร้างอาคารจากแรงแผ่นดินไหวทั้ง 3 โซน อยู่ในสภาวะที่อาคารเกิดการวิบัติ (Collapse)

ตารางที่ 11 การเคลื่อนที่ตัวที่ยอดอาคารแบ่งตามเขตพื้นที่เสี่ยงภัย

ตำแหน่งการเคลื่อนตัว	ฝ้าระวาง (เมตร)	บริเวณ 1 (เมตร)	บริเวณ 2 (เมตร)
หลังคา	0.415	0.465	0.829

และเมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้น (Story drift) ของอาคารจำแนกตามความรุนแรงของแผ่นดินไหวจากบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัยทั้ง 3 โซน ตามตารางที่ 8 พบว่า ค่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นเกินกว่าเกณฑ์การป้องกันการพังทลาย (CP) สอดคล้องกับการประเมินจากผลการเคลื่อนที่ตัวที่ยอดอาคาร

ตารางที่ 12 การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นแบ่งตามเขตพื้นที่เสี่ยงภัย

ชั้น	ความสูงระหว่างชั้น (เมตร)	การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น (เมตร)		
		(% story drift)		
		ฝ้าระวาง	บริเวณ 1	บริเวณ 2
หลังคา	3	0.059 (1.97%)	0.05 (1.67%)	0.033 (1.1%)
4	3	0.110 (3.67%)	0.154 (5.13%)	0.25 (8.33%)
3	2.7	0.117 (4.33%)	0.161 (5.96%)	0.27 (10%)
2	2.7	0.123 (4.56%)	0.163 (6.04%)	0.27 (10%)
1	0	-	-	-

## 5. สรุปและวิเคราะห์ผล

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นของอาคารพาณิชย์คอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 4 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารเก่าและไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว ในวันหนึ่งเมื่ออาคารเหล่านี้ได้รับแรงแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงเทียบเท่าแรงแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยทั้ง 3 โซน ตัวโครงสร้างอาคารมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงและอาจก่อให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างนำมาซึ่งความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบอาคารรวมถึงเจ้าของอาคารและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องควรต้องคำนึงถึงการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในระดับป้องกันการพังทลาย ถึงแม้ว่าอาคารประเภทนี้จะไม่จัดเป็นอาคารที่ถูกบังคับให้ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวก็ตาม



## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและสถานที่ทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านในการประสานงานและสนับสนุนด้านข้อมูลวิจัย โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ 9/2555

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sezen, H. (2002). *Seismic behavior and modeling of reinforced concrete building columns*. Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- [2] Chenouda, M. and Ayoub, a. (2008). Inelastic displacement ratios of degrading system. *Journal of Structural Engineering*. 134:6, 1030-1045
- [3] Jaiyong, A. and Chintanapakdee, C. (2011). *Modal Pushover Analysis for Degrading Structures*. Ph.D. Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- [4] Lowes, L.N., Mitra, N. and Altoontash, A. (2003). A Beam Column Joint Model for Simulating the Earthquake Response of Reinforced Concrete Frame, *PEER Report 2003/ 10*. Berkeley: Pacific Engineering Research Center, University of California
- [5] Panagiotakos, T.B. and Fardis, M.N. (2001). Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. *ACI Structural Journal*. 98:2, 135-147.
- [6] Haselton, C.B. and Deierlein, G.G. (2007). Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment-frame buildings, *Report No. 152*. California: John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.
- [7] Applied Technology Council (ATC-40), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", Vol. 1-2, California, 1996, pp 8-6.
- [8] กรมโยธาธิการและผังเมือง, "มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2561.
- [9] กรมโยธาธิการและผังเมือง, "มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1302", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552.
- [10] กรมโยธาธิการและผังเมือง, "มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1303-57," พิมพ์ครั้งที่ 1,

กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2557.