

การประเมินประสิทธิภาพต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตสำเร็จรูป ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดเชียงใหม่

ภาคิน สังขรัตน์^{1*} และ มงคล จิรวัชรเดช²

บทคัดย่อ

แผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก จังหวัดเชียงใหม่ตั้งอยู่ทางภาคเหนือซึ่งมีรอยเลื่อนแผ่นดินไหวหลายรอยเลื่อน บ่งชี้ว่าจังหวัดเชียงใหม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหว ในการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบเชิงสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตสำเร็จรูป และทำการจำลองอาคารอพาร์ทเมนท์สูง 10 ชั้น ซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ อาคารจะออกแบบตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1302-61 และทำการประเมินประสิทธิภาพต้านทานแผ่นดินไหวโดยใช้การวิเคราะห์วิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้น โดยใช้ค่าความเร่งของแผ่นดินไหวที่บันทึกได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริงจำนวน 7 คลื่น และปรับให้เข้ากับสเปกตรัมการออกแบบ โดยใช้ซอฟต์แวร์ ETABS การกำหนดคุณสมบัติจุดหมุนไม่เชิงเส้นของกำแพงรับแรงเฉือนและโมเมนต์ค้ำโดยใช้แบบจำลองความเค้นและความเครียดสำหรับคอนกรีตและเหล็กกล้าที่กำหนดในมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1303-57 จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตเชิงเส้นจะนำไปออกแบบและประเมินสมรรถนะด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นและวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้น รวมถึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทั้ง 3 วิธีมาเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนที่ของอาคาร แรงเฉือนที่ฐาน และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ประวัติเวลาไม่เชิงเส้น, การออกแบบเชิงสมรรถนะ, กำแพงรับแรงเฉือน, วิถีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น, อาคารคอนกรีตสำเร็จรูป

รับพิจารณา: 16 ตุลาคม 2562

แก้ไข: 5 กุมภาพันธ์ 2563

ตอบรับ: 5 กุมภาพันธ์ 2563

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้มีพันธบัตรประสานงาน โทร. +669 3326 9552 อีเมล: pakinskr@gmail.com



Evaluation of Seismic Performance of a Precast Concrete Building Located in Chiang Mai Thailand

Phakhin Sangkharat^{1*} and Mongkol Jirawacharadet²

Abstract

Earthquakes are natural disasters that cause a significant loss of life and property. Chiang Mai is located in the north, with many earthquake faults indicating that Chiang Mai is at risk of an earthquake. This study demonstrates the importance of seismic performance base design of precast concrete buildings (PC). A 10-story apartment precast concrete building is modeled located in Mueang Chiang Mai, Chiang Mai. The building is designed as per Department of Public Works and Town & Country Planning DPT1302-18. The building is evaluated for earthquake resistance performance using nonlinear time history analysis, which uses the acceleration of the earthquake recorded from earthquakes of 7 waves. The acceleration of the earthquake is matched to the design spectrum using ETABS software. The analysis identifies the plastic hinge properties of shear walls and moment curvature by using the stress and strain model for concrete and steel as specified in the Department of Public Works and Town & Country Planning DPT.1303-14. The results of analysis of the linear static analysis is designed and evaluated by the nonlinear static analysis and the nonlinear dynamic analysis. The analysis results from all 3 methods are compared for the displacement of buildings, Base shear and Story drift.

Keywords: Nonlinear Dynamics Procedure, Nonlinear Time History Analysis, Performance base design, Precast Concrete Buildings, Shear walls

Received: October 16, 2019

Revised: February 5, 2020

Accepted: February 5, 2020

¹ Graduate Student, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel. +669 3326 9552 e-mail: pakinskr@gmail.com

1. บทนำ

แผ่นดินไหวเป็นภัยธรรมชาติที่ก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเนื่องจากแผ่นดินไหวอาจก่อให้เกิดการพังทลายของอาคารที่อ่อนแอ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นบ่อย และรุนแรงมากขึ้นจนก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารต่าง ๆ โดยเฉพาะพื้นที่บริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของไทย เช่น แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 แผ่นดินไหวขนาด 4.9 ที่อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อวันที่ 30 ธันวาคม 2561 ได้ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่ง ดังนั้นวิศวกรควรให้ความสำคัญในการวิเคราะห์และการออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

อุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศไทยในปัจจุบันมีการเติบโตมากขึ้น เพื่อรับรองการขยายตัวของงานก่อสร้าง แนวโน้มการก่อสร้างระบบพริคาสท์หรือระบบคอนกรีตสำเร็จรูปจึงเป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากลดระยะเวลาในการก่อสร้างเมื่อเทียบกับการก่อสร้างระบบปกติ แต่สำหรับอาคารต้านทานแผ่นดินไหว ระบบอาคารคอนกรีตสำเร็จรูปยังไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก เพราะที่ผ่านมาเคยมีอาคารคอนกรีตสำเร็จรูปล่มสาเหตุมาจากแผ่นดินไหว ดังเช่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Emilia Earthquake ขนาดโมเมนต์แมกนิจูดเท่ากับ 5.8-6.1 ทางตอนเหนือของประเทศอิตาลี เมื่อวันที่ 20 และ 29 พฤษภาคม 2555 แผ่นดินไหวครั้งนั้นทำให้อาคารคอนกรีตสำเร็จรูปจำนวนมากกว่า 2000 หลังพังทลายและเสียหายจากแผ่นดินไหว โดยสาเหตุหลักของการพังทลายคืออาคารหล่อสำเร็จรูปไม่ได้ถูกออกแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหว [1]

มาตรฐานการออกแบบที่วิศวกรของไทยส่วนใหญ่ใช้ในการออกแบบ คือมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว มยผ.1302-61 [2] มีการแนะนำวิธีสถิตเชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตามอาคารที่ออกแบบมานั้นการพิจารณาการเสียรูปทรงของอาคารยังอยู่ในช่วงอีลาสติก แต่ในความเป็นจริงการเสียรูปทรงของอาคารอาจอยู่ในช่วงอินอีลาสติกด้วยเมื่อเกิดแผ่นดินไหวในระดับการออกแบบ อาคารควรมีความแข็งแรงและความเหนียว

พอที่จะหลีกเลี่ยงการพังทลายในระหว่างเกิดแผ่นดินไหวรุนแรง ดังนั้นการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจึงถูกนำมาใช้ในการประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างที่ออกแบบตามมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1303-57 [3]

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการต้านทานคลื่นไหวสะเทือนของอาคารคอนกรีตสำเร็จรูปที่ออกแบบตามมาตรฐาน มยผ.1302-61 โดยใช้การวิเคราะห์แบบสถิตเชิงเส้นและพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ผลการวิเคราะห์จะนำเสนอในเรื่องของระดับสมรรถนะของโครงสร้างรวมถึง Interstory Drift, Base Shear และ Displacement การตอบสนองของโครงสร้างได้รับการประเมินเพื่อกำหนดความปลอดภัยโดยรวมของโครงสร้างภายใต้ความต้องการแผ่นดินไหว

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

N. H. Tam [4] ทำการศึกษาความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้นไร้คาน โดยจำลองอาคารที่פקกาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 9 ชั้น และอาคารสำนักงานในกรุงเทพฯสูง 15 ชั้น แล้วทำการประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวจากตามข้อเสนอแนะของ ATC-40 [5] และ FEMA 273 [6] ด้วยวิธี Nonlinear static pushover โดยพิจารณาผลของกำแพงกออิฐ และระบบฐานราก พบว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้นไร้คานมีความสามารถรับแรงด้านข้าง และมีค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของยอดอาคาร ต่ำกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเสา-คาน การวิบัติแบบแรงเฉือนทะเลจะเกิดขึ้นที่จุดต่อพื้น-เสาภายในของอาคาร และยังพบอีกว่ากำแพงรับแรงเฉือนจะช่วยลดค่าการโก่งตัวด้านข้าง และเพิ่มความสามารถในการรับแรงด้านข้างให้กับอาคารอย่างเห็นได้ชัด

S. Kiattivisanchai [7] ศึกษาความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามข้อเสนอแนะของ ATC-40 และ FEMA 273 โดยจำลองอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโครงข้อแข็งประเภทเสา-คาน แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear static pushover การประเมินใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 9 ชั้น เป็นอาคารפקกาศัยในกรุงเทพฯ พบว่าอาคารมีความสามารถ



ด้านทานแผ่นดินไหวได้ดีพอสมควร สำหรับการปรับปรุงอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว การใช้วิธีลดระยะห่างเหล็กเสริมตามขวางของคานขวาง และเพิ่มขนาดหน้าตัดเสา ช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของอาคาร ส่วนการเพิ่มจำนวนเหล็กเสริมตามยาวในคานจะทำให้อาคารสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวระดับรุนแรงที่สุดได้อย่างปลอดภัย

P. Imarb [8] ทำการศึกษาวีธีที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ การประเมิน และการปรับปรุงความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี Pushover และ Capacity Spectrum ตามข้อเสนอแนะของ ATC-40 จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารด้วยวิธี Nonlinear Static Pushover ด้วยโปรแกรม SAP2000 และแสดงผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานอาคารกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของยอดอาคาร (Capacity Curve) ในส่วนของการประเมินได้ใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 9 ชั้น ในกรุงเทพฯ พบว่าการปรับปรุงอาคารโดยวิธีค้ำยันทางข้างด้วยเหล็กยึดทแยง ด้วยผนังแรงเฉือน และขยายหน้าตัดเสา จะเพิ่มความสามารถต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของอาคาร นอกจากนี้ยังเพิ่มความสามารถในการเสีรูปขององค์อาคารช่วยเพิ่มความสามารถการโยกตัวทางด้านข้างของอาคารก่อนการวิบัติ

N. Intaboot [9] ทำการศึกษาวีธีที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ การประเมิน และการปรับปรุงความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้นไร้คาน โดยวิธี Pushover และ Capacity Spectrum ตามข้อเสนอแนะของ ATC-40 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าวด้วยวิธี Nonlinear Static Pushover ด้วยโปรแกรม SAP2000 และแสดงผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานอาคารกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของยอดอาคาร (Capacity Curve) วิธี Capacity Spectrum ใช้การคำนวณ Capacity Curve ร่วมกับการคำนวณ Demand curve ในส่วนของการประเมินได้ใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้นไร้คานสูง 9 ชั้น และ 30 ชั้น ในกรุงเทพฯ พบว่าแม้กำแพงอิฐก่อไม่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงด้านข้างสูงสุด แต่ก็เพิ่มค่าความแข็งแรงให้กับอาคารในช่วงก่อนเกิดการวิบัติของกำแพงอิฐก่อ การปรับปรุงอาคารให้สามารถ

ต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้เพิ่มขึ้นโดยวิธีค้ำยันทางด้านข้างด้วยผนังแรงเฉือนและเพิ่มความแข็งแรงบริเวณหัวเสาจะสามารถเพิ่มความสามารถต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของอาคาร นอกจากนี้การปรับปรุงโดยการเพิ่มเหล็กเสริมหลักจะช่วยเพิ่มความสามารถเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารก่อนการวิบัติ และผลการวิจัยยังพบว่าอาคารสูง 9 ชั้น โครงสร้างหลักจะเกิดความเสียหายขององค์อาคารบางส่วน ส่วนอาคารสูง 30 ชั้น พฤติกรรมยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก โดยโครงสร้างหลักยังไม่เกิดความเสียหาย

N. Choopool [10] ทำการศึกษาวีธีการประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่ก่อสร้างแล้วในกรุงเทพมหานครโดยวิธี Capacity Demand Diagram method ตามข้อเสนอแนะของ ATC-40 จากนั้นวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าวด้วยวิธี Nonlinear Static Pushover ด้วยโปรแกรม SAP2000 และแสดงผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานอาคารกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของยอดอาคาร (Capacity Curve) และนำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับระดับกำลังต้านทานและความเหนียวที่อาคารจำเป็นต้องมี โดยพิจารณาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro และข้อมูลการสั่นไหวที่ตรวจวัดที่ฐานตึกไบหยก 1 การประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวพบว่าอาคารที่มีความสูง 9 ชั้น มีความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวอยู่ในระดับใช้ได้และปลอดภัย ยกเว้นกรณีที่ไม่เสริมเหล็กปลอกภายในจุดต่อเสาคาน อาคารอาจเกิดการวิบัติที่จุดต่อเสาคาน และพบว่าในกรณีอาคาร 20 ชั้น มีความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวอยู่ในระดับที่ดีและปลอดภัย ในส่วนของการปรับปรุงอาคารสูง 9 ชั้น ให้มีความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวเพิ่ม ทำได้โดยใช้ กำแพงรับแรงเฉือน การขยายหน้าตัดเสา และการเพิ่มความสามารถในการเสีรูปขององค์อาคาร

T. A. Ozkul et al. [11] ศึกษาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังเฉือนที่ได้รับ ความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหว Van 2011 และพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์วิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้นโดยใช้ข้อมูลความเร่งแผ่นดินไหวของ Van 2011 การวิเคราะห์วิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้นได้ทำการวิเคราะห์โดย

SAP2000 นอกจากนี้ยังเพิ่มคุณภาพวัสดุและผนังเฉือนซึ่งออกแบบตามข้อกำหนดของการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของ Turkish Seismic Code 2007 [12] ทำการวิเคราะห์วิธีประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นสำหรับอาคารที่ได้รับการเสริมประสิทธิภาพแล้วและมีการพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีการเปรียบเทียบความเสียหายของอาคารที่มีอยู่และที่เสริมประสิทธิภาพแล้ว การประเมินผลจะนำมาใช้เพื่อกระจายความเสียหายแม้ว่าจะมีการเพิ่มคุณภาพของคอนกรีตและผนังรับแรงเฉือนในการออกแบบอาคารยกเว้นคานและเสา จากผลการศึกษาพบว่าการใช้วัสดุที่เหมาะสมและเสริมผนังรับแรงเฉือนสามารถป้องกันความเสียหายหนักได้

P. Naik and S. Annigeri [13] ทำการศึกษาการประเมินสมรรถนะการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารที่อยู่อาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 9 ชั้น ตั้งอยู่ในเมือง Panaji city of Goa ตัวอาคารใช้มาตรฐานการออกแบบ IS 456:2000 [14] และทำการประเมินประสิทธิภาพต้านทานแผ่นดินไหวโดยวิธี Nonlinear Pushover Analysis โดยวิเคราะห์โมเมนต์โปรแกรม ETABS สำหรับการวิเคราะห์ Moment Curvature Analysis ขึ้นอยู่กับ Stress Strain การกำหนดค่าคอนกรีตและเหล็กเสริม รวมถึงค่าคุณสมบัติ Plastic Hinge ของคานและเสา กำหนดโดย IS 456:2000 ซึ่งจะนำผลเฉือนที่ฐานที่ได้จากการออกแบบอาคารมาเปรียบเทียบกับแรงเฉือนที่ฐานที่แรงแผ่นดินไหวที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของอาคารจะอยู่ในรูปของ Capacity Curve, Hinge Location และ Ductility Ratio ที่ใช้สำหรับคาดการณ์ความปลอดภัยของอาคารที่แรงแผ่นดินไหวที่ต้องการ

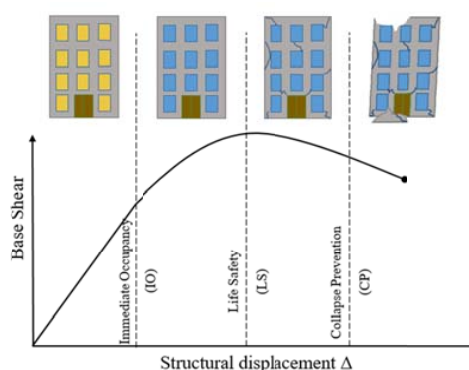
H. Duan and M. B. D. Hueste [15] ทำการศึกษาการประเมินสมรรถนะการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 5 ชั้น ที่ออกแบบตามข้อกำหนดของมาตรฐานการออกแบบแรงแผ่นดินไหวของจีน GB50011-2010 [16] โดยมีข้อมูลคลื่นความเร่งแผ่นดินไหวธรรมชาติจำนวน 7 คลื่น โดยทำการปรับให้เข้ากับสเปกตรัมการออกแบบที่จะใช้ ตัวอาคารจะประเมินโดยใช้การวิเคราะห์ 2 วิธี คือ Nonlinear Static (Push-Over) และ Nonlinear Time History Analysis การประเมินประสิทธิภาพของแผ่นดินไหวจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานของจีน จากผลการวิเคราะห์พบว่าอาคารที่

ออกแบบโดยมาตรฐาน GB50011-2010 แสดงพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นและการตอบสนองที่กำหนดโดยมาตรฐานและข้อกำหนดข้อจำกัดของ The Interstory Drift and Maximum Plastic Rotation Limits ที่แนะนำโดย ASCE/SEI 41-06 [17] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์โดยวิธี Push Over Analysis ซึ่งให้เห็นศักยภาพของกลไกชั้นแรกที่เป็น Soft Story ภายใต้ความต้องการด้านข้างที่สำคัญ

3. การออกแบบเชิงสมรรถนะ

ขั้นตอนการออกแบบในปัจจุบัน ทำได้โดยการประมาณความต้องการจากแรงแผ่นดินไหวและการออกแบบตามมาตรฐาน แต่การออกแบบนี้ไม่สามารถรับประกันได้ว่าอาคารที่ออกแบบจะตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ตั้งแต่เริ่มต้น ดังนั้นวิศวกรโครงสร้างจึงจำเป็นต้องใช้แนวคิดการออกแบบเชิงสมรรถนะ (Performance Based Design) ซึ่งในวิธีการนี้จะทำการประเมินหลังจากออกแบบเบื้องต้นว่าการออกแบบนั้นตรงตามวัตถุประสงค์ด้านประสิทธิภาพหรือไม่และสุดท้ายทำการออกแบบและประเมินใหม่ จนกว่าจะบรรลุวัตถุประสงค์ด้านประสิทธิภาพที่ต้องการ

มยผ. 1303-57 กำหนดระดับสมรรถนะของอาคารไว้ 4 ระดับ คือ ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level, IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level, LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level, CP) ระดับสมรรถนะภายใต้แผ่นดินไหวแสดงดังรูปที่ 1



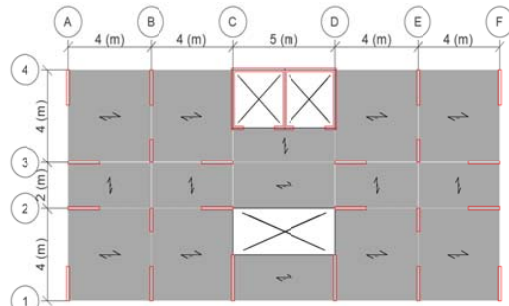
รูปที่ 1 สมรรถนะภายใต้แผ่นดินไหว

การประเมินสมรรถนะสามารถทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Static Pushover Analysis หรือการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น เพื่อความละเอียดในการประเมิน จึงได้ใช้วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamics Procedure) หรือการวิเคราะห์ประวัติเวลาไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นนั้นสามารถดำเนินการโดยใช้คุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ที่กำหนดตามหลักเกณฑ์ของ มยผ. 1303-57

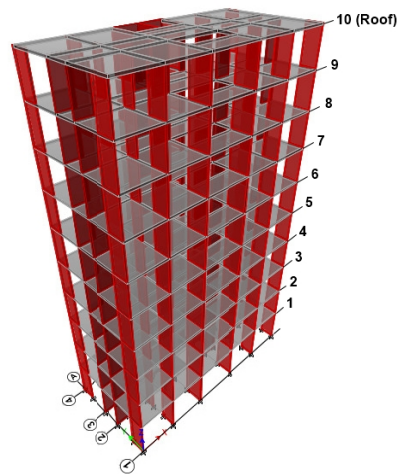
4. วิธีการวิจัย

ทำการจำลองอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตสำเร็จรูปสูง 10 ชั้น ที่มีเฉพาะโครงสร้างผนังเฉือน (Structural Wall) ตั้งอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งอยู่ในโซนที่ 2 ของแผนที่การแบ่งเขตแผ่นดินไหวของไทย โดยใช้โปรแกรม ETABS ในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของอาคาร รวมถึงเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์วิธีสถิตเชิงเส้น (Linear Static Procedure, LSP) วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Procedure, NSP) และวิธีประวัติเวลา (Time History Analysis) แบบจำลองของอาคารแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 รายละเอียดของโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ในมาตรฐาน มยผ. 1303-57 การกำหนด เป้าหมายความมั่นคงแข็งแรงของอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารที่มีอยู่เดิม อาคารที่ทำการศึกษานี้จัดอยู่ในกลุ่มอาคารทั่วไป ให้เสริมความมั่นคงแข็งแรงขั้นต่ำด้วยระดับเป้าหมายเพื่อความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน (Basic Safety Objective, BSO) โดยที่อาคารอาจเกิดความเสียหายพอสมควร แต่ต้องไม่พังทลาย และอาคารมีสมรรถนะในระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Performance Level) ภายใต้แผ่นดินไหวระดับปานกลางที่มีคาบการกลับ 225 ปี ซึ่งแผ่นดินไหวระดับดังกล่าวนิยามว่า แผ่นดินไหวระดับความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน (Basic Safety Earthquake, BSE)



รูปที่ 2 แบบแปลนของอาคารคอนกรีตสำเร็จรูป



รูปที่ 3 มุมมอง 3 มิติของโครงสร้าง

ตารางที่ 1 รายละเอียดของโครงสร้าง

Plan Dimension	10 m x 21 m
No. of Storeys	10 storeys (35.5 m)
Structure	Precast Concrete Structures
Other Storeys Height	3.5 m
First Storeys Height	4.0 m
Base Consideration	Fixed
Wall Thickness	0.30 m
Slab Thickness	0.20 m

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

Grade of Concrete	C300
Concrete Compressive Strength (f'_c)	30 MPa
Grade of Steel	SD40
Yield Strength (F_y)	392.40 MPa
Tensile Strength (F_u)	559.17 MPa

4.1 วิธีสถิติเชิงเส้น

4.1.1 น้ำหนักบรรทุก

ใช้น้ำหนักบรรทุก และแรงกระทำตามข้อกำหนดของกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ในการวิเคราะห์โมเดล แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในโครงสร้าง

Gravity Load	
Structural Dead Load	Wall 7.1 kN/m ²
	Typical floors 4.7 kN/m ²
	Roof 4.7 kN/m ²
	Floor Finish 1.5 kN/m ²
Live Load	Typical floors 3.0 kN/m ² Roof 1.0 kN/m ²

4.1.2 แรงแผ่นดินไหว

ใช้มาตรฐานว่าด้วยการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ.1302-61 แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์แผ่นดินไหว

Type of Soil	D
Seismic Data	Zone II
Damping	5.0%
Importance Factor (I)	1.25
Category	Intermediate Precast Shear Wall
Reduction Factor (R)	4.0
System Over Strength (Ω_0)	2.5
Deflection Amplification (C_d)	4.0
Spectral Acceleration at Period of 0.2 s (S_0)	0.963g
Spectral Acceleration at Period of 1.0 s (S_1)	0.248g

4.2 วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

วิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์คือการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวโดยการคำนวณผลตอบสนองของอาคารที่ทุกขณะเวลาตลอดช่วงที่เกิดการ

สั่นไหวโดยใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวในรูปของความเร่งที่พื้นดินตามที่บ้านที่กได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีต ผลตอบสนองที่ได้จะมีลักษณะที่เปลี่ยนไปตามเวลาจึงเรียกวิธีนี้ว่า วิธีประวัติเวลา ในที่นี้จะศึกษาเฉพาะวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้น คิดในกรณีที่แผ่นดินไหวมีความรุนแรงโครงสร้างเกิดความเสียหายอยู่ในช่วงอินอีลาสติก มีผลตอบสนองต่อแรงไม่เป็นเส้นตรง

ตามมาตรฐาน มยพ. 1302-61 แนะนำว่าข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน (Ground Acceleration Time Histories) ที่เหมาะสมกระทำที่ฐานอาคารควรมีไม่น้อยกว่า 3 ชุด และในการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองของอาคารต่อแผ่นดินไหวแต่ละชุดในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ โดยใช้การสั่นไหวของพื้นดินในแนวราบกระทำต่ออาคารทั้งสองทิศทางพร้อมกัน ซึ่งมาจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเดียวกัน การสั่นไหวของพื้นดินที่ใช้ในการ ศึกษา ประกอบด้วยข้อมูลการสั่นไหว 7 ข้อมูล ดังตารางที่ 5

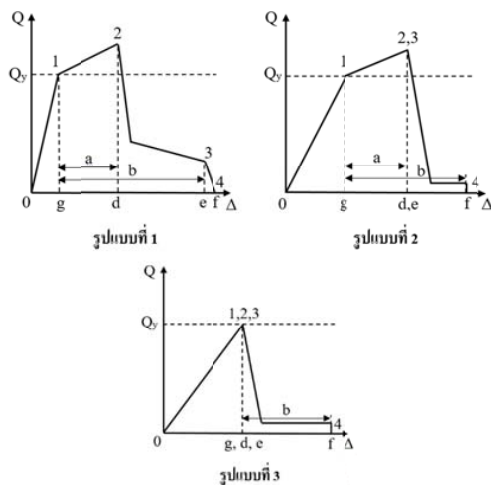
ตารางที่ 5 ข้อมูลการสั่นไหวจากคลื่นแผ่นดินไหว

Event	Station	EQ ID	Year	Magnitude	Scale Factor
Imperial Valley	El Centro	ECETO	1979	6.53	1.2963
Victoria Mexico	SAHOP Casa Flores	VICTO	1980	6.33	1.9603
Kobe Japan	Kakogawa	KOBE	1995	6.9	0.7257
Northwest China	Jiashi	NOWST	1997	6.1	0.5853
Denali Alaska	R109 (temp)	DENLI	2002	7.9	2.2789
Chi-Chi Taiwan	CHY014	CHICHI	1999	6.2	0.9326
Tottori Japan	HRS003	TOTTO	2000	6.61	2.5453

ซึ่งตามมาตรฐาน มยพ.1302-61 การสั่นไหวของพื้นดินจะต้องถูกคูณปรับค่าด้วยค่าคงที่ โดยต้องทำให้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมการตอบสนองที่มีอัตราส่วนความหน่วง 5% มีค่าไม่ต่ำกว่าสเปกตรัมการตอบสนองที่ใช้ในการออกแบบตลอดช่วงคาบการสั่นระหว่าง 0.2T ถึง 1.5T โดยที่ T คือ ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างในทิศทางที่ทำกรวิเคราะห์ โดยใน ETABS ฟังก์ชัน Matched to Response Function ไว้สำหรับปรับค่าข้อมูลประวัติเวลาการสั่นพื้นดินเพื่อใช้สำหรับอาคารเพื่อให้ตรงกับสเปกตรัมเป้าหมาย

4.3 จุดหมุนพลาสติก (Plastic hinges)

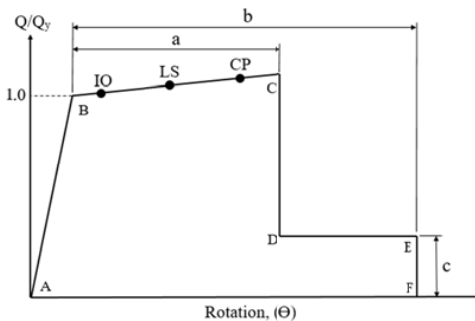
พฤติกรรมของชิ้นส่วนสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ พฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยการเสียรูป (Deformation Controlled) และพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรง (Force Controlled) ซึ่งพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของชิ้นส่วนดังที่แสดงในรูปที่ 4 ความสัมพันธ์ในรูปแบบที่ 1 ซึ่งเป็นลักษณะของชิ้นส่วนที่มีพฤติกรรมแบบเหนียว รูปแบบที่ 2 มีลักษณะเหมือนกับรูปแบบที่ 1 แต่ที่แตกต่างก็คือเกิดการสูญเสียกำลัง และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก หากมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปดังรูปแบบที่ 3 แสดงว่าชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนรองจัดว่ามีพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรง



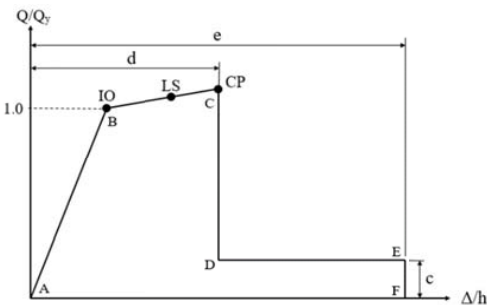
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป

ในการศึกษาจุดหมุนพลาสติกจะจำลองพฤติกรรมโดยใช้ ETABS ตามมาตรฐานที่ระบุใน มยผ.1302-61 โดยกำหนดให้คุณสมบัติของจุดหมุนเป็นแบบ P-M3 สำหรับผนังรับแรงเฉือนดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ซึ่งระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level, IO) จะเกิดรอยร้าวขนาดเล็กบนผนังความกว้างน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level, LS) จะเกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่เนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือน รวมถึงเกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อเล็กน้อย และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse

Prevention Level, CP) จะทำให้ผนังเกิดการแตกร้าวและหมดสภาพ รวมถึงบริเวณรอบช่องเปิดพังเสียหาย จากนั้นกำหนดจุดหมุนพลาสติกตามที่กำหนดใน มยผ.1303-57 สำหรับแบบจำลองและเกณฑ์การยอมรับเชิงตัวเลขสำหรับวิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังตารางที่ 6 และตารางที่ 7



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของผนังรับแรงเฉือนที่ควบคุมโดยแรงดัด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและอัตราส่วนการเสียรูปของผนังรับแรงเฉือนที่ควบคุมโดยแรงเฉือน

ตารางที่ 6 ค่าที่กำหนดสำหรับแบบจำลองและเกณฑ์การยอมรับเชิงตัวเลขสำหรับวิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกควบคุมโดยแรงดัด

เงื่อนไข		ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง			เกณฑ์การยอมรับ		
		มุมหมุนพลาสติก (เรเดียน)		อัตราส่วนกำลังค้ำ	มุมหมุนพลาสติกที่ยอมให้ (เรเดียน)		
					ระดับสมรรถนะ		
$\frac{(A_s - A'_s)f_y + P}{t_w l_w f'_c}$	$\frac{V}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$	a	b	c	IO	LS	CP
≤ 0.1	≤ 0.33	0.008	0.015	0.60	0.002	0.004	0.008
≤ 0.1	≥ 0.5	0.006	0.010	0.30	0.002	0.004	0.006
≥ 0.25	≤ 0.33	0.003	0.005	0.25	0.001	0.002	0.003
≥ 0.25	≥ 0.5	0.002	0.004	0.20	0.001	0.001	0.002

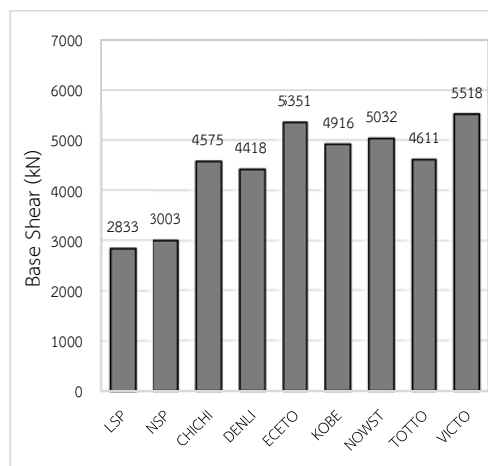
ตารางที่ 7 ค่าที่กำหนดสำหรับแบบจำลองและเกณฑ์การยอมรับเชิงตัวเลขสำหรับวิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกควบคุมโดยแรงเฉือน

เงื่อนไข	อัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์รวม (Total Drift Ratio) (ร้อยละ) หรือมุมหมุนของชิ้นส่วน (Chord Rotation) (เรเดียน)			อัตราส่วนกำลังค้ำ		การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (ร้อยละ) หรือมุมหมุนของชิ้นส่วนที่ยอมให้ (เรเดียน)		
	d	e	g	c	f	ระดับสมรรถนะ		
						IO	LS	CP
$\frac{(A_s - A'_s)f_y + P}{t_w l_w f'_c} \leq 0.05$	1.0	2.0	0.4	0.20	0.6	0.4	0.75	1.0
$\frac{(A_s - A'_s)f_y + P}{t_w l_w f'_c} > 0.05$	0.75	1.0	0.4	0.0	0.6	0.4	0.55	0.75

5. ผลการวิจัย

5.1 แรงเฉือนที่ฐานและแรงเฉือนในแต่ละชั้น

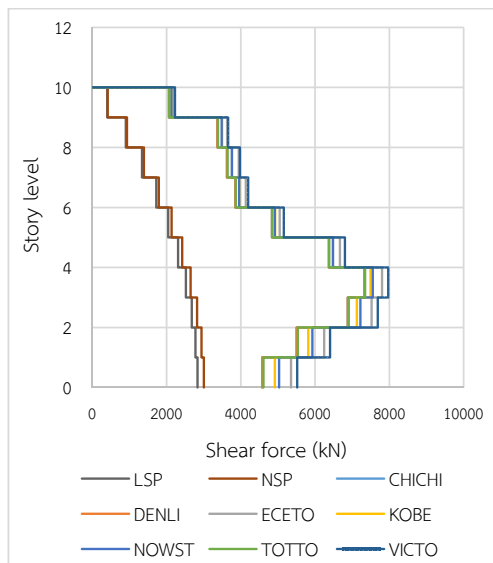
จากผลการวิเคราะห์พบว่าแรงแผ่นดินไหวประวัติเวลาจากคลื่นแผ่นดินไหว Victoria ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ฐานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 5518 kN และแรงสถิตเชิงเส้นทำให้เกิดแรงเฉือนที่ฐานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 2833 kN แสดงดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังพบว่าแรงเฉือนที่ฐานที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตเชิงเส้นและวิธีสถิตไม่เชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแรงเฉือนในแต่ละชั้นพิจารณาจากการกระจายแรงด้านข้างตามสัดส่วนสติฟเนสด้านข้างขององค์อาคารในชั้นนั้น ๆ และการวิเคราะห์วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นใช้ค่าที่เวลา 2.414 วินาที ซึ่งเกิดโหมตการสั่นไหวครั้งแรก พบว่าแต่ละคลื่นแผ่นดินไหวทำให้เกิดแรงเฉือนที่ฐานใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 7



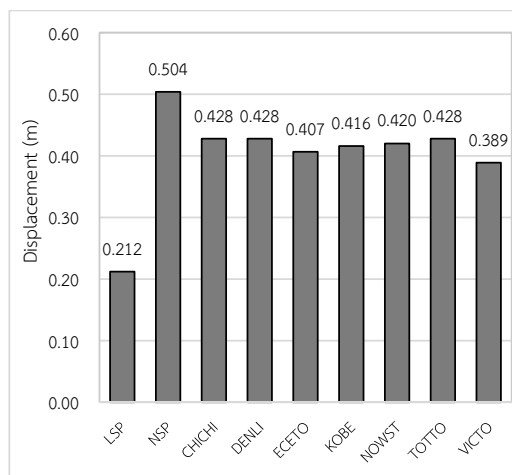
รูปที่ 7 แรงเฉือนที่ฐานเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตเชิงเส้น สถิตไม่เชิงเส้นและพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

5.2 การเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคาร

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแรงสถิตไม่เชิงเส้นทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.504 m และแรงสถิตเชิงเส้นทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.212 m แสดงดังรูปที่ 8 นอกจากนี้ยังพบว่าการวิเคราะห์วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นใช้ค่าที่เวลา 2.414 วินาที ซึ่งเกิดโหมดการสั่นไหวครั้งแรกทั้ง 7 คลื่นแผ่นดินไหว ทำให้การเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารมีค่าอยู่ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตเชิงเส้นและวิธีสถิตไม่เชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 9



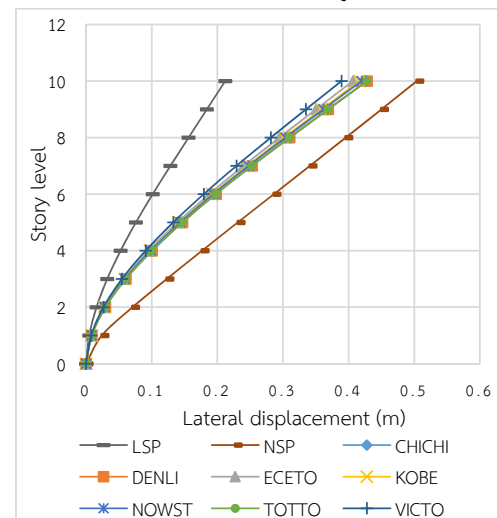
รูปที่ 8 แรงเฉือนในแต่ละชั้น



รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของอาคารที่ชั้นบนสุด

5.3 อัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น

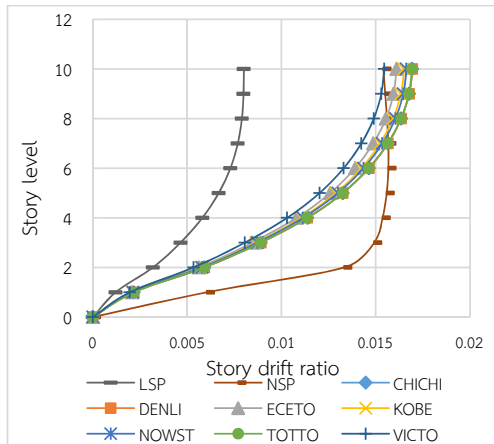
จากผลการวิเคราะห์พบว่าแรงสถิตเชิงเส้นทำให้เกิด Storey Drift Ratio น้อยที่สุด และพบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นใช้ค่าที่เวลา 2.414 วินาที ซึ่งเกิดโหมดการสั่นไหวครั้งแรก ทั้ง 7 คลื่นแผ่นดินไหวทำให้ Storey Drift Ratio มีค่าอยู่ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตเชิงเส้นและวิธีสถิตไม่เชิงเส้นในชั้นแรกถึงชั้นที่ 7 และมีค่า Storey Drift Ratio มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นในชั้นที่ 7 ถึงชั้นที่ 10 เนื่องจากวิธีสถิตไม่เชิงเส้นพิจารณารูปทรงโหมดการสั่นไหวเพียงโหมดแรก แต่วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นพิจารณารูปทรงโหมดการสั่นไหวหลายโหมดรวมกัน แสดงดังรูปที่ 10



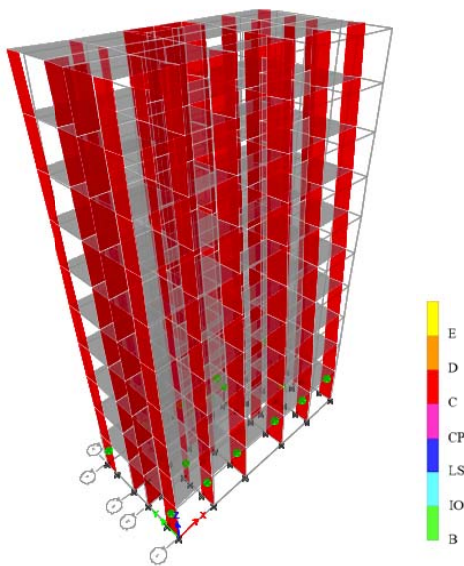
รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวของอาคาร

5.4 ผลการประเมินสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหว

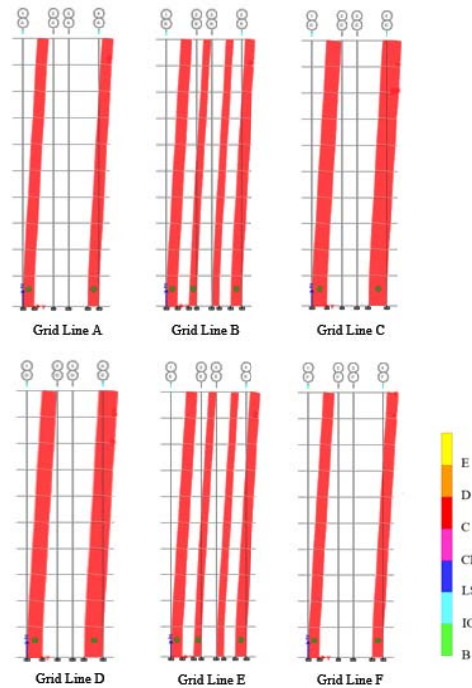
ผลการประเมินสมรรถนะด้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตสำเร็จรูปพบว่าจุดหมุนพลาสติกของกำแพงรับแรงเฉือนอยู่ในระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level, IO) ซึ่งอยู่ในระดับที่ดีกว่าระดับเป้าหมาย คือระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Performance Level, LS) ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ดังนั้นอาคารคอนกรีตสำเร็จรูปจึงมีความสามารถด้านทานแรงแผ่นดินไหวอยู่ในระดับที่ดีและปลอดภัย แสดงดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12



รูปที่ 11 อัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น



รูปที่ 12 ระดับสมรรถนะของจุดหมุนพลาสติก



รูปที่ 13 ระดับสมรรถนะของจุดหมุนพลาสติก

6. สรุปผล

ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวนั้น ควรพิจารณาวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมเนื่องจากแต่ละวิธีให้ผลการวิเคราะห์ที่ต่างกันซึ่งจากค่าแรงเฉือน ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดและค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น วิธีสถิตเชิงเส้นให้ค่าน้อยที่สุดเนื่องจากพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างเพียงช่วงอีลาสติกเท่านั้น แต่วิธีสถิตไม่เชิงเส้นและวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้นพบว่ามีความมากกว่าวิธีสถิตเชิงเส้นเนื่องจากในการวิเคราะห์วิธีไม่เชิงเส้นจะเพิ่มการคูณตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification, C_d) และมีการกำหนดคุณสมบัติจุดหมุนพลาสติกของผนังรับแรงเฉือนทำให้พิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงอินอีลาสติกด้วย จึงได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

ผลการประเมินสมรรถนะจะเห็นได้ว่าอาคารมีระดับสมรรถนะอยู่ในระดับที่ดีกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ ในการออกแบบอาคารลดความแข็งแรงของอาคารลงไปอีกระดับเพื่อให้เกิดความประหยัดในการก่อสร้าง เพราะโดยทั่วไปแล้วอาคารพริคาสท์ที่มีอยู่ในไทยส่วนใหญ่จะ

เป็นระบบกำแพงรับแรงเฉือนล้วนจึงมีความแข็งแรงมาก การประเมินสมรรถนะจึงสามารถช่วยให้ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างได้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการออกแบบเชิงสมรรถนะ (Performance Based Design) ใช้เป็นแนวทางสำหรับการประเมินความสามารถการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่ออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวได้ โดยอาคารจะได้รับการตรวจสอบว่ามีความปลอดภัยตรงตามความต้องการของแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นหรือไม่ สุดท้ายนี้ อาคารที่ตั้งอยู่ในเขตที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว สามารถประเมินประสิทธิภาพเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้ปลอดภัยตามเป้าหมายความต้องการของแผ่นดินไหวได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Savoia, N. Buratti and L. Vincenzi, "Damage and collapses in industrial precast buildings after the 2012 Emilia earthquake," *Engineering Structures*, vol. 137, pp. 162-180, 2017.
- [2] Department of Public Works and Town & Country Planning, Standard of Earthquake resistant building design, Bangkok, 2018. (in Thai)
- [3] Department of Public Works and Town & Country Planning, Standard of Assessment and strengthening of the building Structures in areas of the earthquake zone, Bangkok, 2014. (in Thai)
- [4] N. H. Tam, "Pushover analysis of reinforced concrete slab-column frame buildings," M.Eng. dissertation (Civil Engineering), Asian Institute of Technology, Bangkok, 2003. (in Thai)
- [5] Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofitting of concrete Buildings, vol. 1 and 2, Redwood City, 1996.
- [6] Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Redwood City, California, 1997.
- [7] S. Kiattivisanchai, "Evaluation of seismic performance of an existing medium-rise reinforced concrete frame building in Bangkok," M.Eng. dissertation (Civil Engineering), Asian Institute of Technology, Bangkok, 2001. (in Thai)
- [8] P. Imarb, "Evaluation of Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings," M.Eng. dissertation (Civil Engineering), Thammasat University, Bangkok, 2002. (in Thai)
- [9] N. Intaboot, "Evaluation of Seismic Capacity of Reinforce Concrete Flat-Slab Building," M.Eng. dissertation (Civil Engineering), Thammasat University, Bangkok, 2003. (in Thai)
- [10] N. Chooool, "Evaluation of Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings by Considering Beam-Column Details," M.Eng. dissertation (Civil Engineering), Thammasat University, Bangkok, 2004. (in Thai)
- [11] T. A. Ozkul, A. Kurtbeyoglu, M. Borekci, B. Zengin and A. Kocak, "Effect of shear wall on seismic performance of RC frame buildings," *Engineering Failure Analysis*, vol. 100, pp. 60-75, 2019.
- [12] Turkish Ministry of Public Works and Settlement, Specification for Buildings to be Built on Seismic Areas, Ankara, 2007.
- [13] P. Naik and S. Annigeri, "Performance Evaluation of 9 Storey RC Building Located in North Goa," *Procedia Engineering*, vol. 173, pp. 1841-1846, 2017.
- [14] Bureau of Indian Standards, Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures, New Delhi, 2002.



- [15] H. Duan and M. B. D. Hueste, "Seismic performance of a reinforced concrete frame building in China," *Engineering Structures*, vol. 41, pp. 77-89, 2012.
- [16] China Architecture and Building Press, National Standard of the People's Republic of China, 2010.
- [17] American Society of Civil Engineers, Minimum design loads for building and other structures, 2010.