



การเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารสูงระหว่างการก่อสร้างโดยใช้การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น

LATERAL DISPLACEMENT OF HIGH-RISE BUILDINGS DURING CONSTRUCTION

USING STAGED CONSTRUCTION ANALYSIS

ณัฐภัทร วงศ์ภักดี^{1*} และนิติกร แสงสว่าง²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²บริษัท อินฟรา กรุ๊ป จำกัด

*Corresponding author, E-mail: nattapatw@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 30 ชั้น ขนาด 24×24 เมตร ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ระหว่างการก่อสร้าง (Construction dead load) โดยไม่รวมผลของแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว เพื่อประเมินผลของลำดับการก่อสร้างและรูปแบบการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือน (ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร) ต่อพฤติกรรมของระบบต้านแรงด้านข้าง โดยพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างสามมิติภายใต้พฤติกรรมวัสดุเชิงเส้น พิจารณาผล $P-\Delta$ และเปรียบเทียบการวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis) กับการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น (Staged construction analysis) สำหรับกรณีระบบต้านแรงด้านข้างแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า การวิเคราะห์แบบทันทีให้ค่าการกระจัดด้านข้างเพิ่มขึ้นตามความสูงและมีค่าสูงสุดที่ชั้นบนสุดเท่ากับ 66.8 มม. ขณะที่การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นให้ค่าสูงสุดที่ชั้น 21 เท่ากับ 17.5 มม. ทั้งนี้กรณีไม่สมมาตรให้ค่าการกระจัดสูงกว่ากรณีสมมาตร (17.5 มม. เทียบกับต่ำกว่า 1 มม.) และการเคลื่อนตัวเด่นชัดในทิศทางที่มีความแข็งด้านข้างโดยรวมของระบบต่ำกว่า ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นการเคลื่อนตัวเชิงแกนเดียว (Sway) มากกว่าการบิด และมีค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวต่อชั้นสูงสุด (maximum inter-story drift ratio) ประมาณ 0.09% (0.45/500) ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมเชิงสภาพการใช้งานทั่วไป (1/400 ถึง 1/500) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งและขนาดการเสียบูในช่วงก่อสร้างแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบทันที สรุปได้ว่า การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นมีความเหมาะสมสำหรับการประเมินการเสียบูในช่วงก่อสร้าง โดยเฉพาะอาคารที่มีระบบต้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร ซึ่งตำแหน่งการกระจัดสูงสุดอาจไม่เกิดที่ชั้นบนสุดเสมอไป

คำสำคัญ: อาคารสูง; การวิเคราะห์แบบทันที; การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น; การเคลื่อนตัวด้านข้าง; ระบบต้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร

ABSTRACT

This study investigates the lateral displacement of a 30-story reinforced concrete building (24×24 m) under construction dead load. Wind and earthquake loads are excluded. The aim is to evaluate the effects of the construction sequence and of the shear-wall layout (symmetric and asymmetric). A three-dimensional structural model was developed using linear-elastic material behavior and including $P-\Delta$ effects. The results from instantaneous analysis (IA) were compared with those from staged

construction analysis (SCA) for both symmetric and asymmetric lateral systems. IA predicts a monotonic increase in lateral displacement with height, reaching 66.8 mm at the top floor. In contrast, SCA gives a maximum of 17.5 mm at the 21st floor. The asymmetric case shows much larger displacement than the symmetric case (17.5 mm versus less than 1 mm). The displacement is largest in the direction of lower overall lateral stiffness. This response is mainly a one-directional sway rather than torsion. The maximum inter-story drift ratio is about 0.45/500, well within the typical serviceability limit (1/400 to 1/500). These findings indicate that both the location and magnitude of peak deformation during construction can differ from those predicted by instantaneous analysis. It can be concluded that staged construction analysis is appropriate for evaluating deformation during construction. This is especially true for high-rise buildings with asymmetric lateral systems, where the maximum displacement may not occur at the top floor.

KEYWORDS: High-rise buildings; Instantaneous analysis; Staged construction analysis; Lateral displacement; Asymmetric lateral load-resisting system

1. บทนำ

อาคารสูงคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมด้านโครงสร้างซับซ้อนภายใต้แรงด้านข้าง เนื่องจากความชะลูดสูง [1] ความซับซ้อนดังกล่าวเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งโครงสร้างยังอยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์และรับเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่จากการก่อสร้าง (Construction dead load) โดยยังไม่ได้รับแรงด้านข้างภายนอก เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว สภาพดังกล่าวส่งผลให้การเคลื่อนตัวด้านข้างและการเสีรูปของอาคารมีความไวต่อการจัดวางระบบต้านแรงด้านข้างมากกว่าอาคารทั่วไป [2] โดยเฉพาะในอาคารที่มีข้อจำกัดด้านผังสถาปัตยกรรมซึ่งไม่สามารถจัดวางองค์อาคารรับแรงให้สมมาตรได้อย่างสมบูรณ์ ลักษณะดังกล่าวทำให้พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารสูงเป็นประเด็นสำคัญทั้งในด้านการออกแบบและการควบคุมงานก่อสร้าง

ในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์และออกแบบอาคารสูงนิยมใช้การวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis) ซึ่งสมมติให้โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์และรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดในคราวเดียว [3] วิธีการดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการประเมินพฤติกรรมของอาคารเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ อย่างไรก็ตาม ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง โครงสร้างยังอยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์ โดยระบบต้านแรงด้านข้างยังขาดความต่อเนื่องและความสูงไม่ครบถ้วน อีกทั้งเส้นทางการถ่ายแรงภายในและความแข็งด้านข้างของโครงสร้าง เปลี่ยนแปลงไปตามลำดับการเพิ่มองค์อาคาร [4] ส่งผลให้พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างในช่วงดังกล่าวอาจแตกต่างจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบทันที

ประเด็นดังกล่าวมีความสำคัญมากขึ้นในอาคารสูงที่มีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนในลักษณะไม่สมมาตร ซึ่งทำให้ความแข็งด้านข้างของโครงสร้างแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง [2, 5] ความไม่สมดุลของระบบต้านแรงด้านข้างสามารถส่งผลให้เกิดการสะสมของการเคลื่อนตัวด้านข้างในบางช่วงความสูงของอาคารตั้งแต่ระยะเริ่มต้นของการก่อสร้าง และทำให้รูปแบบการเสีรูปที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้างแตกต่างจากพฤติกรรมของโครงสร้างในสภาวะสมบูรณ์ หากไม่ได้รับการประเมินอย่างเหมาะสม อาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนในการคาดการณ์การเคลื่อนตัวด้านข้างและแรงภายในของอาคารสูง

การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น (Staged construction analysis) เป็นแนวทางการวิเคราะห์ที่สามารถจำลองกระบวนการก่อสร้างจริงได้ใกล้เคียงมากขึ้น โดยพิจารณาการเพิ่มองค์อาคารและน้ำหนักบรรทุกทุกตามลำดับ พร้อมทั้งคงค่าแรงภายในและการเสีรูปที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ไว้เป็นสภาวะตั้งต้นสำหรับการวิเคราะห์ในลำดับขั้นถัดไป [4, 6] วิธีการนี้ช่วยให้

สามารถประเมินการสะสมการเคลื่อนตัวด้านข้างและการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมโครงสร้างในระหว่างการก่อสร้างได้ใกล้เคียงสภาพจริงมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีอาคารสูงที่มีความไม่สมมาตรของระบบต้านแรงด้านข้าง

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารสูงคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อิทธิพลของลำดับการก่อสร้างและรูปแบบการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือน โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบทันทีกับการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นสำหรับอาคารที่มีรูปแบบการจัดวางระบบต้านแรงด้านข้างแตกต่างกัน ผลการศึกษามุ่งอธิบายลักษณะและตำแหน่งของการเสียรูปด้านข้างที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้าง พร้อมทั้งนำเสนอข้อพิจารณาประกอบการเลือกวิธีการวิเคราะห์ ผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางสนับสนุนการออกแบบและการควบคุมงานก่อสร้างอาคารสูงที่มีระบบต้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร ทั้งนี้การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง (Construction dead load) โดยไม่รวมผลของแรงด้านข้างภายนอก เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์แบบทันที

การวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้ เนื่องจากมีความสะดวกในการคำนวณ โดยตั้งสมมติฐานว่าโครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์และรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรในคราวเดียวหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ [1, 3] อย่างไรก็ตาม สมมติฐานดังกล่าวมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะอาคารสูง เนื่องจากในสภาพความเป็นจริงโครงสร้างจะถูกก่อสร้างทีละชั้น (Floor-by-floor) และน้ำหนักบรรทุกคงที่จากน้ำหนักตัวเองของโครงสร้าง (Self-weight) จะเกิดขึ้นตามลำดับการก่อสร้าง ส่งผลให้เส้นทางการถ่ายแรง (Load path) และความแข็ง (Stiffness) ของโครงสร้างมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการก่อสร้าง [6]

การวิเคราะห์แบบทันทีละเลยผลของลำดับขั้นการก่อสร้าง อาจไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการสะสมของแรงและการเสียรูปที่เกิดขึ้นจริงได้ [1, 3, 6] วิธีการนี้มักประเมินค่าการเสียรูปและแรงภายในต่ำเกินไปในชั้นล่าง และสูงเกินไปในชั้นบนเมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างระหว่างการก่อสร้าง ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจนำไปสู่การออกแบบที่ไม่ปลอดภัย (Unsafe) ในบางตำแหน่ง หรือทำให้การออกแบบมีความสิ้นเปลือง (Uneconomic) เกินความจำเป็นในตำแหน่งอื่น

2.2 การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น

การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น (Staged construction analysis) เป็นแนวทางการวิเคราะห์โครงสร้างที่จำลองกระบวนการก่อสร้างจริง โดยพิจารณาการเพิ่มองค์อาคารตามลำดับขั้น พร้อมทั้งคงค่าแรงภายในและการเสียรูปที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงไว้เป็นสภาวะตั้งต้นสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นถัดไป [1, 6] วิธีการนี้สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบทันทีที่สมมติให้โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์และรับน้ำหนักทั้งหมดในคราวเดียว ในช่วงระหว่างการก่อสร้าง ความแข็งของระบบโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับการเพิ่มองค์อาคารและน้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้การเสียรูปและการเคลื่อนตัวด้านข้างในช่วงนี้แตกต่างจากสภาวะหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ นอกจากนี้การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นสามารถจำลองผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เกิดขึ้นตามลำดับ (Sequential loading) จากน้ำหนักของโครงสร้างเองได้โดยตรง ทำให้สามารถประเมินการสะสมการเสียรูปและแรงภายในที่เกิดขึ้นจริงตลอดกระบวนการก่อสร้าง

การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมการเสถียรทางด้านข้างของอาคารสูงในกรณีดังกล่าว เนื่องจากสามารถจำลองการพัฒนาโครงสร้างตามลำดับชั้นได้สอดคล้องกับสภาพจริงมากกว่าการวิเคราะห์แบบทันที [4, 6] แนวทางดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีรูปทรงและเงื่อนไขทางเรขาคณิตที่ซับซ้อน เช่น อาคารที่มีการเปลี่ยนระดับความสูงตามแนวตั้ง (Setback buildings) และอาคารที่ก่อสร้างบนพื้นที่ลาดเอียง [4, 7] อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงอย่างกะทันหัน [7] และเป็นรูปแบบอาคารที่ถูกจัดว่ามีความเปราะบางเชิงโครงสร้าง [8] เมื่อพิจารณาลำดับการก่อสร้างร่วมกับผลของความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ($P-\Delta$ effects) จึงอาจส่งผลต่อค่าการเคลื่อนตัวและแรงภายในขององค์อาคาร โดยเฉพาะบริเวณส่วนล่างของอาคารที่ต้องแบกรับน้ำหนักสะสมจากการก่อสร้าง [4] ดังนั้นการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินความปลอดภัยและสภาพการใช้งานของอาคารในระหว่างที่การก่อสร้างยังไม่แล้วเสร็จได้

ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง [9, 10] เอื้อให้สามารถประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [4, 6] โดยสามารถจำลองการเพิ่มองค์อาคาร การคงค่าแรงภายใน และการเสถียรสะสม รวมถึงการพิจารณาความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตได้อย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิเคราะห์และงานวิจัยด้านอาคารสูงในช่วงที่ผ่านมา

2.3 พฤติกรรมด้านโครงสร้างของอาคารสูงและการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือน

พฤติกรรมด้านโครงสร้างของอาคารสูงภายใต้แรงด้านข้างขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งด้านข้าง (Lateral stiffness) การกระจายมวล (Mass distribution) และตำแหน่งของศูนย์กลางความแข็ง (Center of rigidity) เมื่อเทียบกับศูนย์กลางมวลของอาคาร (Center of mass) [2, 11, 12] ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดรูปแบบการเคลื่อนตัวด้านข้างและการถ่ายแรงภายในของโครงสร้าง เมื่ออาคารมีความสูงเพิ่มขึ้น จะเกิดสถานะที่เรียกว่า “ค่าพรีเมียมของความสูง” (Premium for height) ซึ่งทำให้ความต้องการวัสดุเพื่อต้านทานแรงด้านข้างเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วกว่าภาระน้ำหนักแนวตั้ง [13, 14, 15] ภายใต้บริบทดังกล่าว การกระจายความแข็งที่ไม่สม่ำเสมอในระบบต้านแรงด้านข้างอาจทำให้การตอบสนองของโครงสร้างแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง โดยเฉพาะอาคารที่มีข้อจำกัดด้านผังอาคารที่ไม่สามารถจัดวางระบบโครงสร้างให้มีความสมมาตรได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้รูปแบบการเคลื่อนตัวด้านข้างและการกระจายการเสถียรของโครงสร้างมีความไม่สม่ำเสมอ [2, 11]

ในกรณีที่มีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนในลักษณะไม่สมมาตร ตำแหน่งศูนย์กลางความแข็งของอาคารจะไม่ตรงกับศูนย์กลางมวล แม้กำแพงรับแรงเฉือนแต่ละชั้นจะมีขนาดหน้าตัดเท่ากัน แต่ตำแหน่งการจัดวางกำแพงที่เอียงออกจากศูนย์กลางอาคาร ส่งผลให้ความแข็งด้านข้างโดยรวมของระบบ (System lateral stiffness) มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง และทำให้การเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่าสูงกว่าในทิศทางที่มีความแข็งโดยรวมต่ำกว่า [2, 5] ทั้งนี้ การเอียงศูนย์กลางระหว่างศูนย์กลางมวลและศูนย์กลางความแข็งดังกล่าวยังเป็นต้นเหตุของการตอบสนองแบบประกอบกันระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างและการบิดของอาคาร (coupled lateral-torsional response) ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมพลศาสตร์ของอาคารไม่สมมาตรพบว่าสามารถขยายการเคลื่อนตัวขององค์อาคารแนวตั้งบริเวณขอบอาคารให้สูงกว่ากรณีสมมาตรได้อย่างมีนัยสำคัญ [16]

พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนการตอบสนองที่ไม่สมดุลของโครงสร้าง แม้อยู่ภายใต้แรงด้านข้างเพียงทิศทางเดียว และส่งผลโดยตรงต่อค่าการกระจัดและรูปแบบการเสถียรของอาคารสูง สำหรับอาคารที่มีความสูงมากกว่า 10 ชั้น ขนาดหน้าตัดขององค์อาคารแนวตั้งมักถูกกำหนดโดยเกณฑ์การควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral drift criteria) เพื่อรักษาเสถียรภาพ (Stability) และสภาพการใช้งาน (Serviceability) มากกว่าการพิจารณาเพียงกำลังรับน้ำหนักตามปกติ [6, 12] ดังนั้นการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนที่

ไม่สมดุล อาจเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดการสะสมของการเสียรูปที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งผิวด้านอาคาร และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคารที่เพิ่มขึ้น [2, 5]

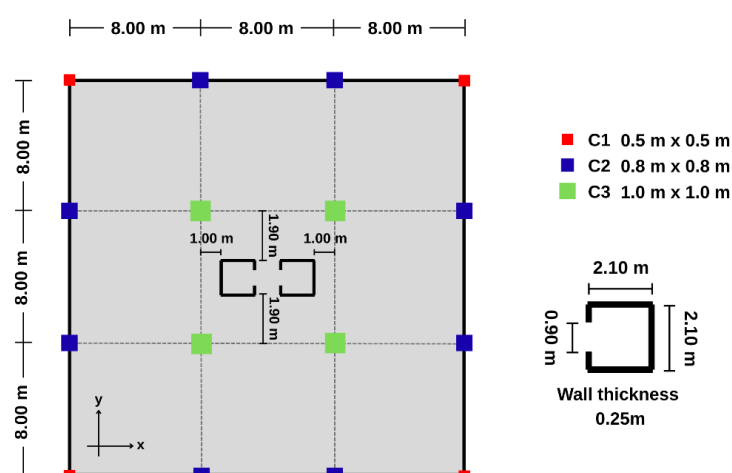
สำหรับอาคารสูงที่มีระบบต้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร ผลของลำดับการก่อสร้างมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากความแตกต่างของความแข็งแรงด้านข้างในแต่ละทิศทางสามารถปรากฏให้เห็นได้ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการก่อสร้าง [4] ในระหว่างที่โครงสร้างยังไม่เสร็จสมบูรณ์ ความแข็งแรงโดยรวมของระบบมีค่าน้อย และเส้นทางการถ่ายแรงมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามลำดับการเพิ่มขึ้นของชั้นอาคาร ส่งผลให้การเคลื่อนตัวด้านข้างและการเสียรูปมีแนวโน้มสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการก่อสร้างชั้นใหม่ [4] พฤติกรรมดังกล่าวทำให้รูปแบบการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารมีลักษณะเฉพาะ โดยมีค่ามากที่สุด ในทิศทางที่ระบบมีความแข็งแรงด้านข้างโดยรวมต่ำกว่า ซึ่งให้เห็นว่าการประเมินพฤติกรรมของอาคารสูงที่มีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนไม่สมมาตรจำเป็นต้องพิจารณาผลของลำดับการก่อสร้างควบคู่ไปกับรูปแบบการจัดวางระบบต้านแรงด้านข้าง เพื่อให้สามารถประเมินการเคลื่อนตัวสะสมและแรงภายในที่เกิดขึ้นจริงได้ [2, 4, 6]

3. อาคารตัวอย่าง

3.1 ภาพรวมอาคารและมิติโครงสร้าง

อาคารตัวอย่างเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 30 ชั้น มีขนาดอาคารโดยรวม 24×24 เมตร และมีความสูงชั้นเท่ากับ 3.50 เมตรตลอดความสูงอาคาร ระบบพื้นเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned slab) หนา 0.25 เมตร โดยเสาถูกจัดวางให้มีระยะห่างประมาณ 8 เมตรในทั้งสองทิศทาง

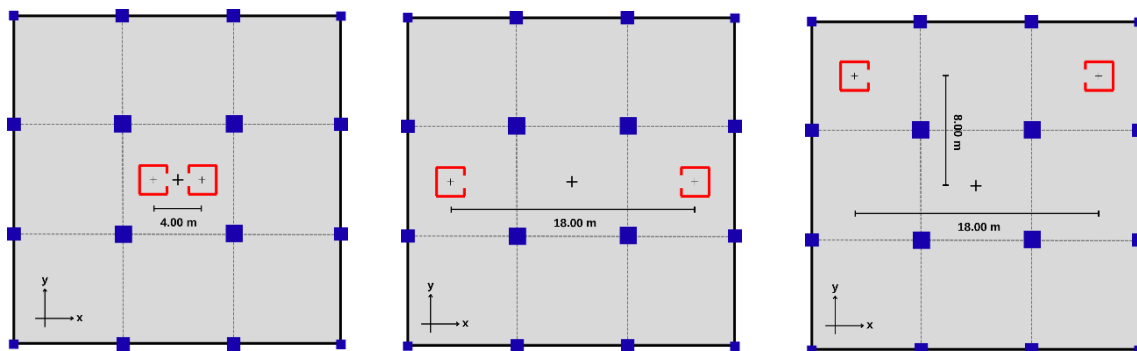
เสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารแบ่งเป็น 3 ขนาด ได้แก่ เสามุมอาคาร (C1) ขนาด 0.50×0.50 เมตร เสาริมอาคาร (C2) ขนาด 0.80×0.80 เมตร และเสาภายในอาคาร (C3) ขนาด 1.00×1.00 เมตร ปล่องลิฟต์ทำหน้าที่เป็นระบบกำแพงรับแรงเฉือนหลักของอาคาร โดยมีขนาดหน้าตัดโดยรวมประมาณ 2.10×2.10 เมตร กำแพงมีความหนา 0.25 เมตร และมีช่องเปิดลิฟต์กว้าง 0.90 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบแปลนอาคารตัวอย่าง

3.2 ตำแหน่งกำแพงรับแรงเฉือน

ในการศึกษานี้ พิจารณาแบบจำลองอาคารตัวอย่างจำนวน 3 แบบ เพื่อประเมินผลของตำแหน่งการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือน ต่อพฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารในช่วงระหว่างการก่อสร้าง โดยแบบจำลองทั้งสามมีลักษณะทางเรขาคณิต คุณสมบัติวัสดุ และเงื่อนไขการวิเคราะห์เหมือนกันทุกประการ แตกต่างกันเฉพาะตำแหน่งการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของรูปแบบการจัดวางกำแพงได้โดยตรง ตำแหน่งการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนของแบบจำลองทั้งสามแสดงไว้ในรูปที่ 2



ก) แบบจำลองที่ 1 (M1)

ข) แบบจำลองที่ 2 (M2)

ค) แบบจำลองที่ 3 (M3)

รูปที่ 2 ตำแหน่งกำแพงรับแรงเฉือน

1. แบบจำลองที่ 1 (M1) เป็นกรณีอ้างอิงที่กำแพงรับแรงเฉือนของปล่องลิฟต์ถูกจัดวางในลักษณะสมมาตรบริเวณกึ่งกลางอาคาร โดยกึ่งกลางของกำแพงรับแรงเฉือนทั้งสองอยู่ห่างกัน 4 เมตร ส่งผลให้ระบบต้านแรงด้านข้างมีความสมมาตรในทั้งสองทิศทาง และตำแหน่งศูนย์กลางความแข็งแรงของโครงสร้างอยู่ใกล้กับตำแหน่งกึ่งกลางอาคาร
2. แบบจำลองที่ 2 (M2) กำแพงรับแรงเฉือนถูกจัดวางแยกออกจากกันตามแนวแกน X โดยยังคงความสมมาตรของระบบโครงสร้างโดยรวม ทั้งนี้ตำแหน่งของกำแพงรับแรงเฉือนถูกกำหนดให้มีระยะห่างจากตำแหน่งกึ่งกลางของอาคารเท่ากับ 18 เมตรในทิศทางตรงข้าม ส่งผลให้ตำแหน่งศูนย์กลางความแข็งแรงของโครงสร้างยังคงอยู่บริเวณกึ่งกลางอาคาร แต่ระดับความแข็งแรงด้านข้างของระบบต้านแรงด้านข้างเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบการจัดวางดังกล่าว
3. แบบจำลองที่ 3 (M3) มีรูปแบบการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนเหมือนกับแบบจำลองที่ 2 ในแนวแกน X แต่ถูกเลื่อนตำแหน่งขึ้นตามแนวแกน Y เป็นระยะ 8 เมตร ทำให้ระบบต้านแรงด้านข้างเกิดความไม่สมมาตรในแนวแกน X ขณะที่ยังคงความสมมาตรในแนวแกน Y แบบจำลองนี้ถูกใช้เพื่อศึกษาผลของความไม่สมมาตรของระบบต้านแรงด้านข้างต่อรูปแบบและระดับการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารในช่วงระหว่างการก่อสร้าง

ความไม่สมมาตรของแต่ละแบบจำลอง ได้พิจารณาดำเนินการศูนย์กลางมวลและศูนย์กลางความแข็งแรง รวมถึงค่าความเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity) ระหว่างสองตำแหน่งดังกล่าวในแต่ละทิศทาง ดังแสดงในตารางที่ 1 แบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 ซึ่งจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนแบบสมมาตร มีตำแหน่งศูนย์กลางความแข็งแรงใกล้เคียงกับศูนย์กลางมวลทั้งในแกน X และแกน Y โดยมีความเยื้องศูนย์กลางในทุกทิศทางน้อยมาก (ไม่เกินประมาณ 0.05 เมตร) แสดงว่าน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งกระทำผ่านแนวที่ใกล้เคียงกับศูนย์กลางความแข็งแรงของโครงสร้าง จึงไม่ก่อให้เกิดผลในเชิงเยื้องศูนย์กลาง ในทางตรงกันข้าม แบบจำลองที่ 3 ซึ่งจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนแบบไม่สมมาตร

มีศูนย์ความแข็งในแกน Y เลื่อนออกจากศูนย์มวล โดยมีความเยื้องศูนย์ในแกน Y สูงถึงประมาณ 4.6 ถึง 7.7 เมตร ขณะที่ความเยื้องศูนย์ในแกน X ยังคงมีค่าน้อยมาก ความเยื้องศูนย์ในแกน Y ที่มีค่าสูงนี้สอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารที่เกิดขึ้นในแกน Y และเป็นปัจจัยที่ทำให้หน้าทับรทุกในแนวตั้งก่อให้เกิดการเอียงตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้าง นอกจากนี้ ความเยื้องศูนย์ในแกน Y ของแบบจำลองที่ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความสูง ซึ่งสอดคล้องกับการสะสมของการกระจัดด้านข้างที่เพิ่มขึ้นในชั้นบนของอาคาร

ตารางที่ 1 ตำแหน่งศูนย์มวล ศูนย์ความแข็ง และความเยื้องศูนย์

แบบจำลอง	ตำแหน่งศูนย์มวล (เมตร)		ตำแหน่งศูนย์ความแข็ง (เมตร)		ความเยื้องศูนย์ (เมตร)	
	แกน X	แกน Y	แกน X	แกน Y	แกน X	แกน Y
M1 (สมมาตร)	0.000	0.000	0.002-0.027	0.002-0.039	0.002-0.027	0.002-0.039
M2 (สมมาตร)	0.000	0.000	0.001-0.037	0.002-0.024	0.001-0.037	0.002-0.024
M3 (ไม่สมมาตร)	0.000	0.047-0.080	0.001-0.025	4.673-7.671	0.001-0.025	4.594-7.715

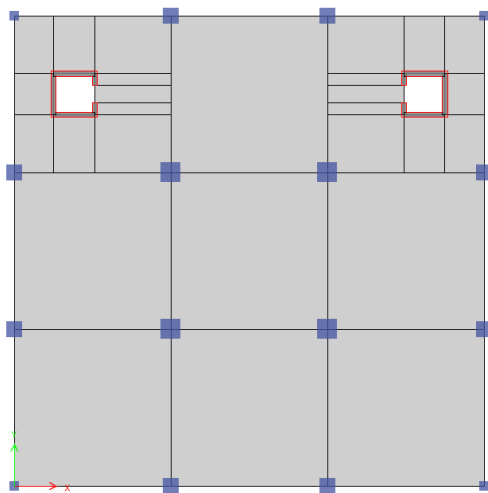
หมายเหตุ: ค่าพิทักศูนย์มวลและศูนย์ความแข็งวัดจากจุดกึ่งกลางอาคาร ความเยื้องศูนย์ (e) คำนวณจากผลต่างระหว่างศูนย์ความแข็งและศูนย์มวล โดยแสดงเป็นช่วงค่าตั้งแต่ชั้นล่างสุดถึงชั้นบนสุด

3.3 วัสดุและน้ำหนักบรรทุก

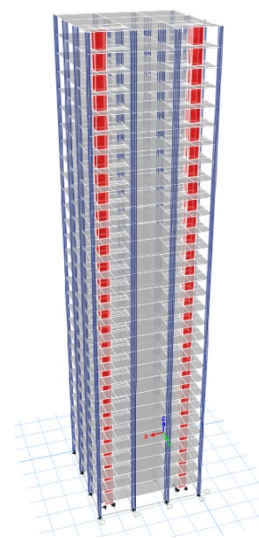
กำหนดคุณสมบัติวัสดุขององค์อาคารให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของอาคารสูงคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเสาและกำแพงรับแรงเฉือนใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วันเท่ากับ 40 เมกะปาสคาล (MPa) ขณะที่ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงภายหลัง (Post-tensioned slab) ใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัยเท่ากับ 32 เมกะปาสคาล (MPa) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำหนดจากค่ากำลังอัดประลัยตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง [17] โดยใช้ค่าเดียวกันในทุกแบบจำลอง ทั้งนี้กำหนดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเท่ากับ 24 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) ของโครงสร้าง และกำหนดน้ำหนักบรรทุกระหว่างก่อสร้าง (Construction dead load) เท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เพื่อสะท้อนน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจากวัสดุ อุปกรณ์ และกิจกรรมก่อสร้างในแต่ละชั้น ทั้งนี้ ไม่ได้พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ในการวิเคราะห์ เพื่อมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของลำดับการก่อสร้างและรูปแบบการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารโดยตรง

3.4 แบบจำลองโครงสร้าง

แบบจำลองโครงสร้างในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสามมิติ (3D structural model) ซึ่งสร้างและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ETABS [9] โดยกำหนดพฤติกรรมวัสดุเป็นแบบเชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear elastic) ซึ่งความเค้นและความเครียดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงตลอดช่วงการวิเคราะห์ ทั้งนี้ได้พิจารณาผลของความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต (Geometric non-linearity) ผ่านการพิจารณาผลของ $P-\Delta$ แบบวนซ้ำตามกรณีน้ำหนักบรรทุก (Iterative based on load cases) เพื่อสะท้อนอิทธิพลของแรงอัดตามแนวตั้งที่มีต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3



ก) แปลนการจัดวางองค์อาคารโครงสร้าง



ข) แบบจำลองโครงสร้างสามมิติ

รูปที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างของอาคารตัวอย่างสำหรับกรณีจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนไม่สมมาตร (แบบจำลองที่ 3)

ในการสร้างแบบจำลอง องค์อาคารประเภทเสาและคานถูกจำลองด้วยชิ้นส่วนแบบเฟรม (Frame element) ส่วนพื้นและกำแพงรับแรงเฉือนถูกจำลองด้วยชิ้นส่วนแบบเปลือก (Shell element) โดยการแบ่งตาข่าย (Mesh) แบบอัตโนมัติของโปรแกรมที่ควบคุมขนาดชิ้นส่วนไม่เกิน 1.0 เมตร กำหนดให้พื้นในแต่ละระดับชั้นทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรมแข็ง (Rigid diaphragm) และกำหนดเงื่อนไขรองรับที่ฐานอาคารเป็นแบบข้อต่อหมุนได้ (Pinned support) เพื่อมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างส่วนบน โดยลดอิทธิพลจากความแข็งแรงของระบบฐานรากต่อผลการวิเคราะห์ ทั้งนี้การพิจารณาเงื่อนไขรองรับแบบยึดแน่น (Fixed base) ร่วมด้วยเป็นแนวทางที่สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในอนาคต เพื่อประเมินอิทธิพลของความแข็งแรงฐานรากและปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้าง

สำหรับค่าปรับลดสติเฟนส (Stiffness modifier) ขององค์อาคาร เนื่องจากการศึกษานี้มุ่งประเมินการเคลื่อนตัวด้านข้างซึ่งเป็นพฤติกรรมในระดับสภาพการใช้งาน (Serviceability) มิใช่การวิเคราะห์ที่ระดับกำลังประลัย (Strength) จึงเลือกใช้ค่าสติเฟนสที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ระดับสภาพการใช้งานตามแนวทางของ ACI 318-19 [18] กล่าวคือ สำหรับเสาและพื้นใช้ค่าสติเฟนสในการวิเคราะห์ระดับกำลังตามมาตรฐานปรับเปลี่ยนด้วยตัวคูณ 1.4 ตามข้อกำหนดการวิเคราะห์ที่ระดับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ส่งผลให้ค่าปรับลดโมเมนต์ความเคี้ยวของเสาเท่ากับประมาณ 1.0 (ไม่ปรับลด) และของพื้นไร้คานอัดแรงเท่ากับ 0.7 ขณะที่กำแพงรับแรงเฉือนใช้ค่าสติเฟนสในสถานะไม่แตกร้าว (Uncracked) เท่ากับ 0.7 ทั้งนี้ ค่าปรับลดสติเฟนสชุดเดียวกันถูกใช้กับทุกแบบจำลอง การเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการวิเคราะห์และรูปแบบการจัดวางกำแพงจึงไม่ขึ้นกับค่าสัมบูรณ์ของตัวปรับลดดังกล่าว

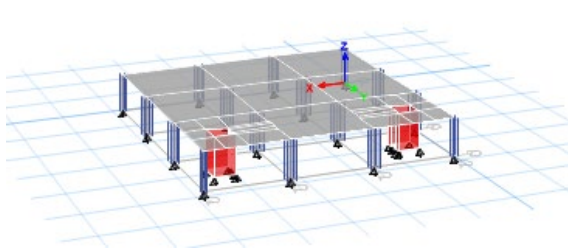
อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไม่นำผลกระทบเชิงเวลาของคอนกรีต เช่น การคืบ (Creep) และการหดตัว (Shrinkage) มาพิจารณา เพื่อมุ่งเน้นศึกษาผลของลำดับการก่อสร้างและรูปแบบการจัดวางระบบด้านแรงด้านข้างต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารโดยตรง ทั้งนี้ ผลกระทบเชิงเวลาดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสียรูปสะสมระยะยาวของอาคารคอนกรีตสูง จึงเป็นข้อจำกัดของงานวิจัยนี้และควรพิจารณาเพิ่มเติมในการศึกษาต่อไป

3.5 ลำดับการก่อสร้าง

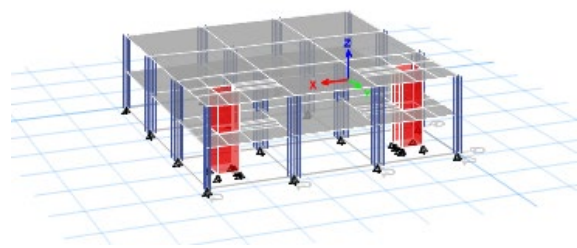
การวิเคราะห์ลำดับการก่อสร้างในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แนวคิดการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น (Staged construction analysis) เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการพัฒนาความแข็งแรง การถ่ายแรง และการสะสมการเสียรูปของอาคารสูงในช่วงระหว่างการก่อสร้าง โดยกำหนดให้ดำเนินการก่อสร้างทีละชั้นจากชั้นล่างขึ้นสู่ชั้นบน (Floor-by-floor construction) โดยลำดับขั้นตอนการก่อสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงเป็นตัวอย่างไว้ในรูปที่ 4

ในแต่ละลำดับขั้น กำหนดให้ก่อสร้างโครงสร้างครบทั้งชั้น โดยองค์อาคารของชั้นนั้น ได้แก่ เสา พื้น และกำแพงรับแรงเฉือน จะถูกก่อสร้างให้ครบถ้วนก่อนเริ่มการก่อสร้างในชั้นถัดไป น้ำหนักบรรทุกถาวรและน้ำหนักบรรทุกระหว่างก่อสร้างจะถูกนำมาพิจารณาเพิ่มเข้าไปตามลำดับขั้น เพื่อสะท้อนสภาพการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละช่วงของกระบวนการก่อสร้าง

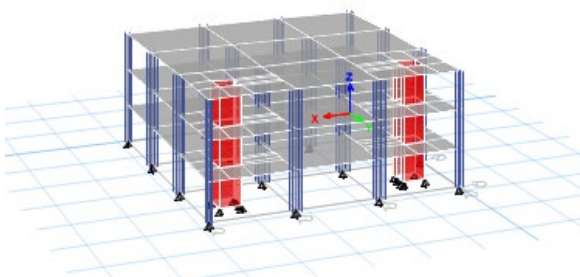
ในการวิเคราะห์ ผลการคำนวณแรงภายในและการเคลื่อนตัวของโครงสร้างจากลำดับขั้นก่อนหน้าจะถูกนำมาใช้เป็นสภาวะตั้งต้นของลำดับขั้นถัดไป ทำให้สามารถประเมินการสะสมของการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการก่อสร้างได้



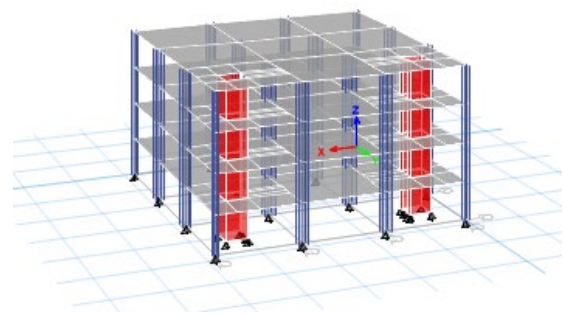
ก) ก่อสร้างชั้นที่ 1



ข) ก่อสร้างชั้นที่ 2



ค) ก่อสร้างชั้นที่ 3



ง) ก่อสร้างชั้นที่ 4

รูปที่ 4 ลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง

4. ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์โครงสร้างในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis) และการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น (Staged construction analysis) ประยุกต์ใช้กับแบบจำลองอาคารทั้งสามรูปแบบที่มีความแตกต่างกันในด้านตำแหน่งการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของลำดับการก่อสร้างและระดับความไม่สมมาตรของระบบด้านแรงด้านข้างต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของด้านข้างของอาคารสูง

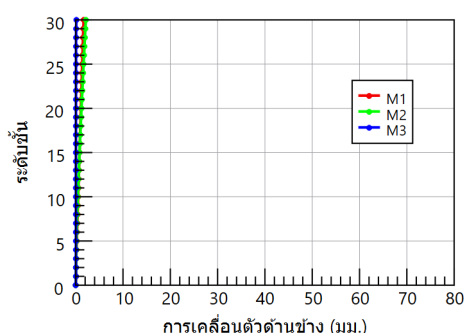
4.1 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง (Model validation)

เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของระเบียบวิธีการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้เปรียบเทียบพฤติกรรมเชิงรูปแบบของผลการวิเคราะห์กับงานของ Elansary et al. [6] ซึ่งใช้ระเบียบวิธีเดียวกัน โดยมุ่งพิจารณาความสอดคล้องของแนวโน้มการเสยรูป มิใช่ค่าเชิงปริมาณโดยตรง เนื่องจากอาคารตัวอย่างและขอบเขตการศึกษาของทั้งสองงานแตกต่างกัน ผลการเปรียบเทียบพบความสอดคล้องใน 3 ประเด็น ได้แก่ (1) การวิเคราะห์แบบทันทีให้ค่าการเสยรูปสูงสุดที่ชั้นบนสุด (2) การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นให้ตำแหน่งการเสยรูปสูงสุดเลื่อนลงมาที่ช่วงกึ่งกลางความสูงอาคาร (ชั้นที่ 21) และ (3) การวิเคราะห์แบบทันทีมีแนวโน้มประเมินค่าการเสยรูปในชั้นบนสูงเกินจริง ซึ่งทั้งสามประเด็นตรงกับข้อสรุปของ Elansary et al. [6] แสดงว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมเฉพาะของการก่อสร้างตามลำดับขั้นได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

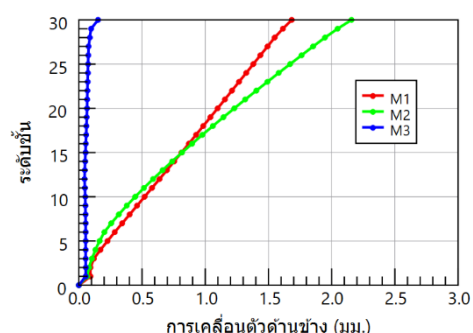
4.2 การวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis)

ผลการวิเคราะห์แบบทันทีแสดงพฤติกรรมการเสยรูปด้านข้างของอาคารภายใต้สมมติฐานที่อาคารก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์ และรับน้ำหนักทั้งหมดในคราวเดียว โดยไม่พิจารณาผลของลำดับการก่อสร้าง พบว่าการเคลื่อนตัวของด้านข้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงของอาคารอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของโครงสร้างอาคารสูงภายใต้สภาวะการใช้งานหลังการก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 5

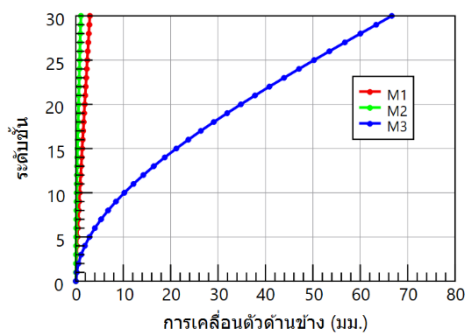
สำหรับแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนในลักษณะสมมาตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของด้านข้างมีค่าค่อนข้างต่ำในทั้งสองทิศทางหลัก สะท้อนถึงความแข็งด้านข้างของระบบด้านแรงที่อยู่ในระดับสูงและการกระจายแรงภายในที่มีความสมดุล ส่งผลให้รูปแบบการเสยรูปของอาคารมีความสมมาตรตลอดความสูง



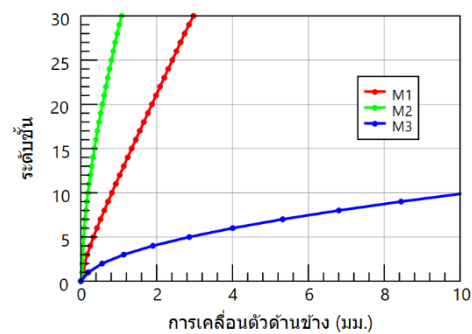
ก) แกน X



ข) แกน X (0.0-3.0 มม.)



ค) แกน Y



ง) แกน Y (0.0-10.0 มม.)

รูปที่ 5 ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์แบบทันที

ในกรณีของแบบจำลองที่ 2 ซึ่งมีการแยกตำแหน่งกำแพงรับแรงเฉือนออกจากบริเวณกึ่งกลางอาคารในแนวแกนนอน แต่ยังคงความสมมาตรของระบบด้านแรงด้านข้างโดยรวม พบว่าพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวด้านข้างมีแนวโน้มใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 ทั้งในเชิงรูปแบบและระดับของการเสียรูป เนื่องจากตำแหน่งศูนย์กลางความแข็งแรงของโครงสร้างยังคงอยู่ใกล้กับกึ่งกลางอาคาร

สำหรับแบบจำลองที่ 3 ซึ่งมีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนในลักษณะไม่สมมาตรตามแนวแกน X ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างเกิดขึ้นเป็นหลักในทิศทางแกน Y ซึ่งเป็นทิศทางที่มีความแข็งแรงด้านข้างโดยรวมของระบบต่ำกว่า โดยมีค่าการกระจัดด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 66.8 มม. ที่บริเวณชั้นบนสุด ขณะที่การเคลื่อนตัวในทิศทางแกน X มีค่าอยู่ในระดับต่ำตลอดความสูงของอาคาร ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงอิทธิพลของความไม่สมดุลของความแข็งแรงในระบบด้านแรงด้านข้างจากการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนแบบไม่สมมาตร ซึ่งส่งผลให้รูปแบบการเสียรูปของโครงสร้างแตกต่างจากกรณีที่มีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนแบบสมมาตร

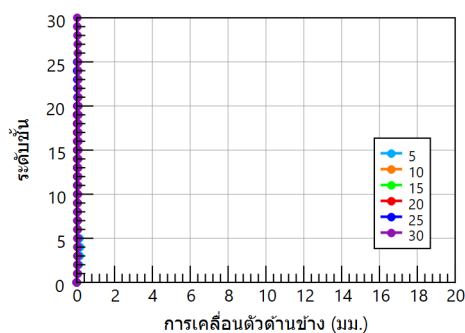
การเคลื่อนตัวด้านข้างในกรณีนี้มีได้เกิดจากแรงกระทำภายนอก แต่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง (น้ำหนักตัวเองและน้ำหนักบรรทุกทุกที่) ร่วมกับความไม่สมมาตรของระบบด้านแรงด้านข้าง การจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนแบบเอียงศูนย์ทำให้เกิดความไม่สอดคล้องกันระหว่างตำแหน่งศูนย์กลางความแข็งแรง (Center of rigidity) และศูนย์กลางมวล (Center of mass) ความเอียงศูนย์นี้ทำให้น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งก่อให้เกิดผลเชิงเอียงศูนย์ ผลักให้ระนาบพื้นเอียงตัวและเคลื่อนตัวด้านข้างไปในทิศทางแกน Y ซึ่งมีความแข็งแรงด้านข้างโดยรวมของระบบต่ำกว่า โดยผลเชิงเอียงศูนย์ดังกล่าวปรากฏในรูปของการหดตัวตามแนวแกนที่ไม่เท่ากัน (Differential axial shortening) ระหว่างบริเวณที่มีกำแพงรับแรงเฉือนซึ่งมีความแข็งแรงตามแกนสูงกับบริเวณที่มีเฉพาะเสา เป็นกลไกที่ทำให้ระนาบพื้นเกิดการเอียงตัวสะสมในทิศทางดังกล่าว

นอกจากนี้ การเสียรูปยังถูกขยายผลเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ($P-\Delta$ effect) เนื่องจากน้ำหนักแนวดิ่งที่สะสมตามความสูงกระทำผ่านระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง ก่อให้เกิดโมเมนต์พลิกคว่ำเพิ่มเติมและขยายพฤติกรรมการเสียรูปให้รุนแรงขึ้นในอาคารสูงจะลุด สำหรับการวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis) ซึ่งตั้งสมมติฐานให้โครงสร้างรับน้ำหนักทั้งหมดพร้อมกัน ผลของความเอียงศูนย์และ $P-\Delta$ จะกระทำเต็มที่ตลอดความสูง โครงสร้างจึงเกิดการกระจัดด้านข้างสะสมอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ชั้นบนสุดเท่ากับ 66.8 มม.

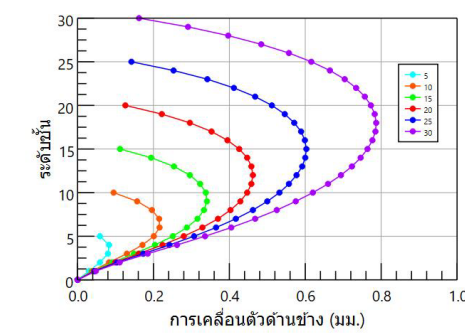
ผลการวิเคราะห์แบบทันทีที่สามารถใช้เป็นกรณีอ้างอิงเพื่อประเมินอิทธิพลของรูปแบบการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนต่อพฤติกรรมการเสียดทานด้านข้างของอาคารได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่สามารถแสดงผลของการสะสมการเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลำดับการก่อสร้าง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากผลการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นในหัวข้อถัดไป

4.3 การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น (Staged construction analysis)

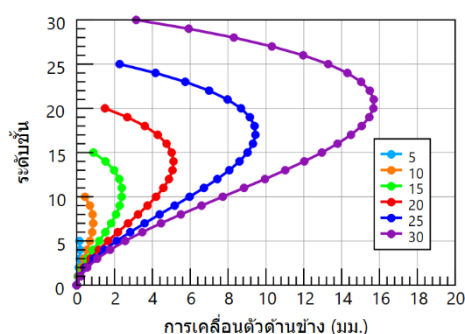
ผลการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นของแบบจำลองที่ 3 ซึ่งเป็นอาคารที่มีความไม่สมมาตรในผังอาคาร แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างภายใต้ลำดับการก่อสร้างจริง ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบทันที โดยพบว่าพฤติกรรมการเสียดทานด้านข้างของอาคารไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดความสูงจนถึงระดับชั้นบนสุด แต่มีรูปแบบการพัฒนาการเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามลำดับชั้นของการก่อสร้าง เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการเสียดทานของโครงสร้างในช่วงที่การก่อสร้างดำเนินไปถึงชั้นที่ 5 10 15 20 25 และ 30 รูปแบบการเสียดทานดังกล่าวแสดงถึงผลของการพัฒนาโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางการถ่ายแรงในแต่ละช่วงของกระบวนการก่อสร้าง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6



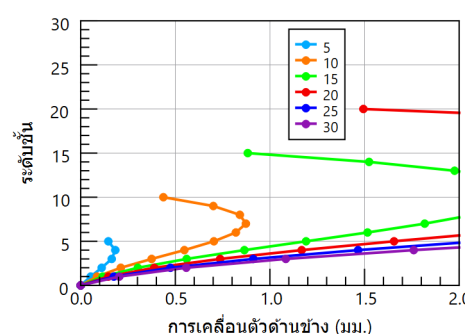
ก) แกน X



ข) แกน X (0.0-0.2 มม.)



ค) แกน Y



ง) แกน Y (0.0-2.0 มม.)

รูปที่ 6 การเสียดทานด้านข้างของอาคารจากการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นของแบบจำลองที่ 3
เมื่อการก่อสร้างดำเนินไปถึงชั้นที่ 5 10 15 20 25 และ 30

การเคลื่อนตัวด้านข้างในแกน X มีค่าอยู่ในระดับต่ำและมีรูปแบบการเสียดทานที่ใกล้เคียงกันในทุกลำดับชั้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างที่มีความสมมาตรตามแนวแกน Y ส่งผลให้การตอบสนองด้านการเคลื่อนตัวในทิศทางแกน X เป็นไปอย่าง

สม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้าม การเคลื่อนตัวด้านข้างในแกน Y เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนชั้นที่ก่อสร้างเพิ่มขึ้น และแสดงรูปแบบการเสียรูปที่ไม่สมมาตรตลอดความสูงของอาคาร อันเป็นผลจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างตามแนวแกน X

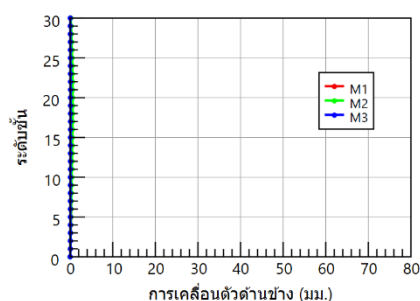
แบบจำลองที่ 3 มีความเยื้องศูนย์กลางระหว่างศูนย์กลางมวลและศูนย์กลางความแข็งแรงเฉพาะในทิศทางแกน Y ดังแสดงในตารางที่ 1 ในขณะที่ทิศทางแกน X มีความเยื้องศูนย์กลางน้อยมากจนถือได้ว่าสมมาตร การตอบสนองภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งจึงเป็นการเคลื่อนตัวด้านข้างเชิงเลื่อนแนวแกนเดียว (Sway) ในทิศทางแกน Y เป็นหลัก โดยไม่เกิดการบิดของผนังรอบแกนดิ่ง (Plan torsion) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแตกต่างจากการตอบสนองแบบประยกบกันระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างและการบิด (Coupled lateral-torsional response) ที่พบในกรณีอาคารไม่สมมาตรภายใต้แรงพลศาสตร์ด้านข้าง [16] ค่าการหมุนของไดอะแฟรมรอบแกนดิ่ง (Diaphragm rotation, R_z) ของแบบจำลองที่ 3 จากผลการวิเคราะห์ พบว่ามีค่าน้อยมากตลอดความสูงอาคาร (0.000012 เรเดียน) เมื่อเทียบกับขนาดการเคลื่อนตัวด้านข้างเชิงเลื่อนในแกน Y แสดงว่าการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งในช่วงก่อสร้างเป็นการเคลื่อนตัวด้านข้างเป็นหลัก โดยองค์ประกอบการบิดในผนังมีบทบาทน้อยมาก

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวบ่งชี้ว่าลักษณะความสมมาตรของโครงสร้างในผังอาคารมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างในช่วงระหว่างการก่อสร้างมากกว่าค่าความแข็งด้านข้างเพียงอย่างเดียว โดยรูปแบบการเสียรูปที่เกิดขึ้นในแบบจำลองนี้สามารถใช้อธิบายความไวของอาคารไม่สมมาตรต่อผลของลำดับการก่อสร้างได้

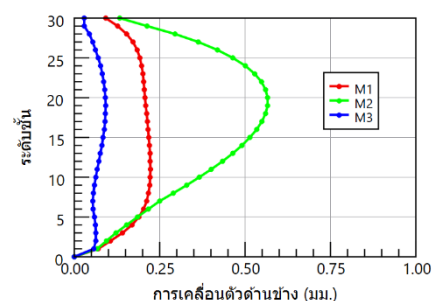
รูปที่ 7 นำเสนอการเปรียบเทียบรูปแบบการเสียรูปด้านข้างของอาคารจากการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นสำหรับแบบจำลองที่ 1-3 ซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายความแตกต่างของพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดขึ้นจากลักษณะการจัดวางระบบด้านแรงด้านข้างที่แตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง

สำหรับแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีการจัดวางระบบด้านแรงด้านข้างในลักษณะสมมาตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงของอาคาร โดยการเสียรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากฐานไปยังช่วงกึ่งกลางของอาคาร และลดลงเล็กน้อยในบริเวณชั้นบน พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงผลของการพัฒนาความต่อเนื่องและความสูงของระบบด้านแรงด้านข้างตามลำดับการก่อสร้าง ซึ่งช่วยจำกัดการสะสมการเสียรูปในช่วงชั้นบนของอาคาร

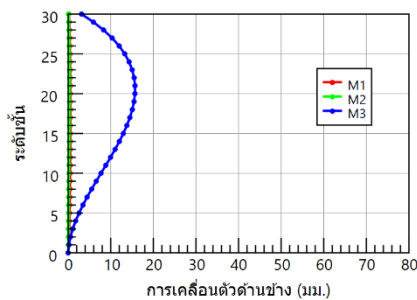
ในกรณีของแบบจำลองที่ 2 ซึ่งมีการปรับตำแหน่งของกำแพงรับแรงเฉือนออกจากกึ่งกลางอาคารในแนวแกนนอน แต่ยังคงความสมมาตรของระบบด้านแรงด้านข้างโดยรวม พบว่าพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนตำแหน่งของกำแพงรับแรงเฉือนภายใต้ระบบที่ยังคงมีความสมมาตร ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารในช่วงระหว่างการก่อสร้าง



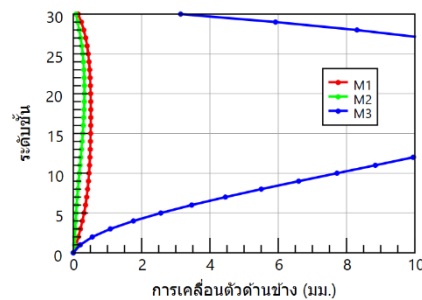
ก) แกน X



ข) แกน X (0.0-1.0 มม.)



ค) แกน Y



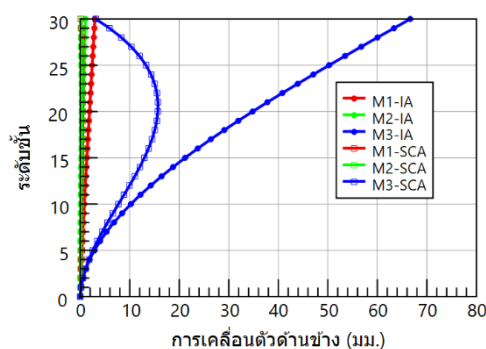
ง) แกน Y (0.0-10.0 มม.)

รูปที่ 7 ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น

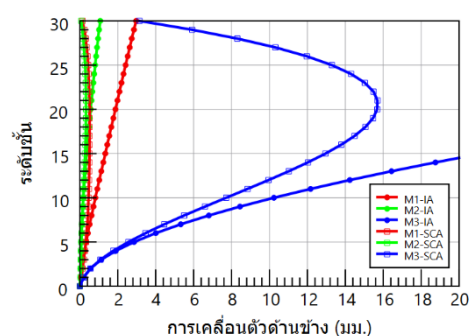
สำหรับแบบจำลองที่ 3 ซึ่งมีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนในลักษณะไม่สมมาตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นแนวโน้มการเคลื่อนตัวด้านข้างที่แตกต่างจากแบบจำลองที่มีความสมมาตร โดยระดับของการเคลื่อนตัวด้านข้างในทิศทางหลักมีค่าสูงกว่า และการกระจายการเสียดทานมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้นตลอดความสูงของอาคาร ทั้งนี้จากการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นพบว่าค่าการกระจัดด้านข้างสูงสุดเกิดขึ้นที่ชั้น 21 โดยมีค่าเท่ากับ 17.5 มม.

4.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบทันทีและแบบก่อสร้างตามลำดับชั้น

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์แบบทันทีและแบบก่อสร้างตามลำดับชั้น พบว่าพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการกระจายการเคลื่อนตัวตามความสูงของอาคารดังแสดงในรูปที่ 8 วิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันให้รูปแบบและตำแหน่งของการเสียดทานด้านข้างที่ไม่เหมือนกัน แม้จะใช้แบบจำลองโครงสร้างและเงื่อนไขการรับแรงเดียวกัน



ก) ภาพรวม



ข) แบบขยายช่วง 0.0-20.0 มม.

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารที่มีระบบต้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร

ผลการวิเคราะห์แบบทันทีแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับความสูง และมีค่าสูงสุดที่บริเวณชั้นบนสุดเท่ากับ 66.8 มม. ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สมมติฐานที่อาคารก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์และรับน้ำหนักทั้งหมดในคราวเดียว เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งทั้งหมดถูกกระทำพร้อมกันบนโครงสร้างที่

สมบูรณ์เต็มความสูง การเอียงตัวและการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในชั้นล่างจึงถูกส่งต่อขึ้นไปยังชั้นที่อยู่เหนือขึ้นไปทั้งหมดและสะสมต่อเนื่องในลักษณะคล้ายคานยื่น ส่งผลให้ค่าการกระจัดสะสมมีค่ามากที่สุดที่ชั้นบนสุด

ในทางตรงกันข้าม ผลจากการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นแสดงให้เห็นว่าการเสีรูปด้านข้างมีการกระจายตัวตามช่วงความสูงของอาคาร โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 17.5 มม. ที่บริเวณช่วงกึ่งกลางของอาคาร (ชั้น 21) ก่อนจะลดลงในช่วงชั้นบน พฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลจากการที่แต่ละชั้นถูกก่อสร้างและปรับให้ได้ระดับบนโครงสร้างส่วนล่างที่ได้เสีรูปไปแล้วในลำดับชั้นก่อนหน้า (Concrete levelling) การเสีรูปที่สะสมอยู่ในชั้นล่างจึงไม่ถูกส่งต่อขึ้นไปเป็นการเคลื่อนตัวแบบวัตถุแข็ง (Rigid-body) ของชั้นที่ก่อสร้างภายหลัง โดยการเสีรูปของแต่ละชั้นจะสะสมเฉพาะจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มเข้ามาภายหลังจากชั้นนั้นถูกก่อสร้างแล้วเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ ชั้นบนสุดซึ่งถูกก่อสร้างในช่วงท้ายและมีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเหนือขึ้นไปเพียงเล็กน้อย จึงมีการเสีรูปสะสมน้อยกว่าบริเวณกึ่งกลางอาคารที่ยังต้องรับการสะสมการเสีรูปจากน้ำหนักของชั้นที่ก่อสร้างเพิ่มเหนือขึ้นไปจำนวนมาก

ความแตกต่างของพฤติกรรมดังกล่าวปรากฏชัดเจนในแบบจำลองที่ 3 เนื่องจากโครงสร้างมีความไม่สมมาตรของระบบต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน X ส่งผลให้การสะสมการเคลื่อนตัวด้านข้างในทิศทางแกน Y ได้รับอิทธิพลจากทั้งลำดับการเพิ่มน้ำหนักและการพัฒนาเชิงลำดับของความแข็งด้านข้างของโครงสร้าง ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าวิธีการวิเคราะห์แบบทันทีประเมินค่าการเสีรูปด้านข้างในชั้นบนสูงเกินจริง (Overestimate) และไม่สามารถสะท้อนตำแหน่งและรูปแบบการเสีรูปด้านข้างที่เกิดขึ้นจริงในช่วงระหว่างการก่อสร้างได้อย่างครบถ้วน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น [3, 6]

นอกเหนือจากค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง เมื่อพิจารณาในรูปของอัตราส่วนการเคลื่อนตัวต่อชั้น (story drift ratio) จากผลในรูปที่ 8 การวิเคราะห์แบบทันทีให้การเคลื่อนตัวรวมที่ชั้นบนสุดเท่ากับ 66.8 มม. ต่อความสูงอาคาร 105 ม. หรือคิดเป็นอัตราส่วนการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุด (roof drift ratio) ประมาณ $1/1,570$ ขณะที่การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นให้ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวต่อชั้นสูงสุด (maximum inter-story drift ratio) ที่ชั้นบนสุดประมาณ 0.09% ($0.45/500$) ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดเชิงสภาพการใช้งานทั่วไป ($1/400$ ถึง $1/500$) บ่งชี้ว่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการก่อสร้างจากน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งเพียงอย่างเดียวยังอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสภาพการใช้งาน

ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเลือกวิธีการวิเคราะห์มีผลโดยตรงต่อการประเมินรูปแบบและตำแหน่งของการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารสูง โดยเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างมีความไม่สมมาตรของระบบต้านแรงด้านข้าง ซึ่งการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นสามารถแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในช่วงระหว่างการก่อสร้างได้เหมาะสมกว่าการวิเคราะห์แบบทันที

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 30 ชั้นเป็นอาคารตัวอย่าง เพื่อประเมินอิทธิพลของลำดับการก่อสร้างและรูปแบบการจัดวางระบบต้านแรงด้านข้าง (กำแพงรับแรงเฉือน) ต่อการเสีรูปของโครงสร้าง การวิเคราะห์ดำเนินการด้วยแบบจำลองโครงสร้างสามมิติภายใต้สมมติฐานพฤติกรรมวัสดุเชิงเส้นและการพิจารณาผลของ $P-\Delta$ โดยเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ 2 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์แบบทันที (Instantaneous analysis) ซึ่งสมมติให้อาคารก่อสร้างแล้วเสร็จและรับน้ำหนักทั้งหมดในคราวเดียว และการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น (Staged construction analysis) ซึ่งพิจารณาการพัฒนาโครงสร้างและการถ่ายแรงตามลำดับการก่อสร้างจริง ทั้งนี้ได้พิจารณาทั้งกรณีที่ระบบต้านแรงด้านข้างมีความสมมาตรและไม่สมมาตร เพื่อประเมินความแตกต่างของพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารในแต่ละกรณี

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์แบบทันทีให้ค่าการกระจัดด้านข้างที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความสูงของอาคาร และมีค่าสูงสุดที่ระดับชั้นบนสุดในทุกกรณี ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างในสถานะที่อาคารก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงการสะสมของแรงและการเสียรูปที่เกิดขึ้นตามลำดับการก่อสร้างจริง ส่งผลให้ค่าการกระจัดที่ได้มีลักษณะปลอดภัยเกินกว่าที่จำเป็น ซึ่งอาจนำไปสู่การกำหนดขนาดหน้าตัดขององค์อาคารที่สูงเกินความจำเป็นเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์ด้านเสถียรภาพ (Stability) และสภาพการใช้งาน (Serviceability) ในขณะที่การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นสามารถแสดงลักษณะการสะสมการเสียรูปของโครงสร้างในแต่ละช่วงการก่อสร้างได้อย่างชัดเจนกว่า โดยเฉพาะในช่วงต้นและช่วงกลางของความสูงอาคาร ซึ่งเป็นช่วงที่ความแข็งแรงของโครงสร้างยังพัฒนาไม่เต็มที่

เมื่อพิจารณารูปแบบการจัดวางระบบด้านแรงด้านข้าง พบว่าอาคารที่มีระบบด้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตรมีพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างที่แตกต่างจากกรณีสมมาตรอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความไม่สมมาตรดังกล่าวเกิดจากการปรับตำแหน่งของกำแพงรับแรงเฉือน โดยการเสียรูปมักเกิดเด่นชัดในทิศทางที่มีความแข็งด้านข้างโดยรวมต่ำกว่า ผลดังกล่าวปรากฏชัดขึ้นเมื่อพิจารณาด้วยการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น ซึ่งสามารถสะท้อนอิทธิพลร่วมกันของลำดับการก่อสร้างและความไม่สมดุลของความแข็งแรงในระบบโครงสร้างได้ดีกว่าการวิเคราะห์แบบทันที นอกจากนี้ ยังพบว่ากรณีการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นให้ตำแหน่งการกระจัดด้านข้างสูงสุดอยู่บริเวณช่วงกึ่งกลางความสูงอาคาร ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบทันทีที่ให้ค่าสูงสุดที่ระดับชั้นบนสุด ความแตกต่างของตำแหน่งการกระจัดสูงสุดนี้มีนัยสำคัญต่อการออกแบบ เนื่องจากหากวิศวกรใช้ผลจากการวิเคราะห์แบบทันทีเป็นเกณฑ์ อาจกำหนดขนาดหน้าตัดและการกระจายแรงภายในในแต่ละชั้นไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในช่วงระหว่างการก่อสร้าง

การวิเคราะห์แบบทันทีให้ค่าการกระจัดด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 66.8 มม. ที่ชั้นบนสุด (ชั้นที่ 30) ขณะที่การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้นให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 17.5 มม. ที่ชั้นที่ 21 คิดเป็นค่าที่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 74 พร้อมกับตำแหน่งการกระจัดสูงสุดที่ขยับลงจากชั้นบนสุดมาอยู่ที่ประมาณร้อยละ 70 ของความสูงอาคาร อาคารที่มีระบบด้านแรงด้านข้างแบบสมมาตร (แบบจำลองที่ 1) ให้ค่าการกระจัดด้านข้างที่น้อยมากและเข้าใกล้ศูนย์ (ไม่เกิน 1 มม.) ตลอดความสูงอาคาร แสดงให้เห็นว่าระบบที่จัดวางสมมาตรแทบไม่เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง ในขณะที่อาคารที่มีการจัดวางกำแพงรับแรงเฉือนแบบไม่สมมาตร (แบบจำลองที่ 3) เกิดการกระจัดด้านข้างสูงกว่ามาก ผลดังกล่าวยืนยันว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลักจากความไม่สมมาตรของการจัดวางระบบด้านแรงด้านข้าง

แม้การศึกษาจะจำกัดขอบเขตที่การเคลื่อนตัวด้านข้างจากน้ำหนักบรรทุกทุกในช่วงระหว่างการก่อสร้าง โดยไม่รวมแรงด้านข้างภายนอก แต่ผลที่ได้มีความเชื่อมโยงกับพฤติกรรมในช่วงใช้งานจริง เนื่องจากการเสียรูปและการเคลื่อนตัวสะสมที่เกิดขึ้นเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ ถือเป็นสภาวะตั้งต้นของโครงสร้างก่อนเข้ารับแรงด้านข้างภายนอก เช่น แรงลมและแรงแผ่นดินไหว ดังนั้น การประเมินการเคลื่อนตัวสะสมในช่วงก่อสร้างด้วยการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น จึงช่วยให้การประเมินพฤติกรรมของอาคารในช่วงใช้งานมีความสอดคล้องกับสภาพจริงมากขึ้น

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นแนวทางประกอบการเลือกวิธีวิเคราะห์ตามลักษณะของอาคาร กล่าวคือ สำหรับอาคารที่มีระบบด้านแรงด้านข้างจัดวางแบบสมมาตร การวิเคราะห์แบบทันทีและแบบก่อสร้างตามลำดับขั้นให้พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์แบบทันทีจึงเพียงพอสำหรับการประเมินเบื้องต้นในกรณีดังกล่าว ในทางกลับกัน สำหรับอาคารสูงที่มีระบบด้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร ผลจากสองวิธีมีความแตกต่างกันมากทั้งในด้านขนาดและตำแหน่งของการกระจัดสูงสุด การประเมินพฤติกรรมในช่วงระหว่างการก่อสร้างของอาคารกลุ่มนี้จึงควรพิจารณาด้วยการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับขั้น เพื่อให้สามารถสะท้อนตำแหน่งและรูปแบบการเสียรูปที่เกิดขึ้นจริง โดยเฉพาะเมื่อตำแหน่งการกระจัดสูงสุดไม่ได้เกิดที่ชั้นบนสุด ซึ่งอาจส่งผลต่อการกำหนดขนาดหน้าตัดและการตรวจสอบเกณฑ์การเคลื่อนตัวด้านข้างในแต่ละชั้น

ในทางปฏิบัติ วิศวกรควรกำหนดเกณฑ์ตรวจสอบการเคลื่อนตัวสะสมในแต่ละช่วงชั้นระหว่างการก่อสร้าง เช่น การสำรวจระดับและตำแหน่งของโครงสร้างด้วยเครื่องมือสำรวจในแต่ละชั้นคอนของการก่อสร้าง เปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการสะสมเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะบริเวณช่วงกึ่งกลางความสูงอาคารซึ่งมีแนวโน้มเกิดการกระจัดสูงสุดในกรณีที่ระบบต้านแรงด้านข้างไม่สมมาตร

โดยสรุป การวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นมีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับการประเมินพฤติกรรมการถ่ายแรงและการเสียดรูปของอาคารในช่วงระหว่างการก่อสร้าง โดยเฉพาะในกรณีอาคารสูงที่มีระบบต้านแรงด้านข้างแบบไม่สมมาตร และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการเลือกวิธีการวิเคราะห์และการออกแบบอาคารสูง สำหรับกรณีที่โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างไม่รองรับฟังก์ชันการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้น วิศวกรอาจพิจารณาประยุกต์ใช้แนวทางการวิเคราะห์แยกส่วนรายชั้น (Floor-by-Floor Analysis) ทดแทนได้เบื้องต้น ทั้งนี้ควรมีการตรวจสอบความถูกต้องเปรียบเทียบกับกรณีการวิเคราะห์แบบก่อสร้างตามลำดับชั้นในงานวิจัยต่อไป นอกจากนี้ งานวิจัยนี้กำหนดน้ำหนักบรรทุกระหว่างก่อสร้างเป็นค่าคงที่เพียงกรณีเดียวเพื่อควบคุมตัวแปรและมุ่งเน้นศึกษาผลของลำดับการก่อสร้างและรูปแบบการจัดวางระบบต้านแรงด้านข้างโดยตรง การศึกษาการแปรผันของน้ำหนักบรรทุกระหว่างก่อสร้างและรูปแบบลำดับการก่อสร้าง (Parametric study) จึงเป็นแนวทางที่ควรพิจารณาในงานวิจัยต่อไป เพื่อประเมินความไวของผลลัพธ์ต่อสมมติฐานด้านน้ำหนักและลำดับการก่อสร้าง

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Smith, B. S. and Coull, A. *Tall Building Structures: Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [2] Pezeshky, P., et al. *Static Analysis of Nonsymmetric High-Rise Buildings with Asymmetric Shear Walls under Lateral Loads*. Journal of Structural Engineering, 2025, 151(10): p. 04025168.
- [3] Chakrabarti, S. C., Nayak, G. C. and Agarwala, S. K. *Effect of sequence of construction in the analysis of multistoreyed building frame*. Building and Environment, 1978, 13(1): p. 1-6.
- [4] Balaji, G. C. and Vivek, S. S. *Construction sequence analysis of multi-storey setback building placed in slope with p-delta and time-dependent effects*. Revista de la Construcción. Journal of Construction, 2022, 21(2): p. 408-426.
- [5] Alam, Z., et al., *Global performance of multi-story stiffness-eccentric RC structures subjected to progressive seismic excitations: Shaking table investigations*. Journal of Building Engineering, 2023, 64: p. 105582.
- [6] Elansary, A. A., Metwally, M. I. and El-Attar, A. *Staged construction analysis of reinforced concrete buildings with different lateral load resisting systems*. Engineering Structures, 2021, 242: p. 112535.
- [7] Jiang, H., et al., *Seismic performance of RC frame-shear wall structures with vertical setback*. Structures, 2021, 33: p. 4203-4217.
- [8] Kumar, R. D. S., et al., *Structural score and score modifiers to quantify seismic vulnerability of irregular buildings*. Structures, 2025, 73: p. 108424.
- [9] Computers and Structures, Inc., *CSI Analysis Reference Manual 2025*, Computers and Structures, Inc. : Berkeley, California.
- [10] MIDAS IT, *Analysis Manual for MIDAS/Gen. 2024*, MIDAS IT Co., Ltd.
- [11] Thambiratnam, D. P. and Thevendran, V. *Simplified analysis of asymmetric buildings subjected to lateral loads*. Computers & Structures, 1992, 43(5): p. 873-880.
- [12] Taranath, B. S., *Reinforced concrete design of tall building*. 2010, Boca Raton, FL: CRC Press.

- [13] Khan, F. R. *Recent structural systems in steel for high-rise buildings*. In: *British Constructional Steelwork Association Conference on Steel in Architecture*, 1969.
- [14] Khan, F. R. *Influence of design criteria on selection of structural systems for tall buildings*. In: *Canadian Structural Engineering Conference*, 1972.
- [15] Khan, F. R. *Evolution of structural systems for high rise buildings in steel and concrete*. In: *Regional Conference on Tall Buildings*, 1973, Bratislava, Czechoslovakia.
- [16] Chandler, A. M. and Hutchinson, G. L. *Torsional coupling effects in the earthquake response of asymmetric buildings*. *Engineering Structures*, 1986, 8(4): p. 222-236.
- [17] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, *มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (Building Code Requirements for Reinforced Concrete Building By Strength Method)*, ปรับปรุงครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2564.
- [18] ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.