การประยุกต์ใช้โครงสร้างวีเรนดีลในโครงสร้างระบบเอาริกเกอร์ในอาคารสูง

APPLICATION OF VIERENDEEL IN OUTRIGGER STRUCTURAL SYSTEM IN HIGHRISE BUILDINGS

นิรวิทย์ เทียนดำ[1,*] และ อาทิตย์ เพชรศศิธร[2]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีกระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร
*Corresponding author address: Nirawit_top@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำโครงสร้างวีเรนดีลหรือคานที่มีช่องเปิดตามความยาวของคานโดยที่จะนำโครงสร้างนี้มาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างระบบเอาริกเกอร์ ซึ่งปัจจุบันระบบเอาริกเกอร์นี้ถูกนำมาใช้ในอาคารสูงมากมายเพื่อเพิ่มค่าสติฟเนส (Stiffness) ขององค์อาคาร เนื่องจากองค์อาคารมีการรับแรงทางด้านข้างอันเป็นผลมาจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหว ซึ่งทำให้องค์อาคารเกิดการเคลื่อนตัวไปทางข้างมากขึ้นเมื่อมีความสูงที่มากขึ้น ประโยชน์ของการนำโครงสร้างวีเรนดีลไปประยุกต์ใช้ในเอาท์ริกเกอร์ จะทำให้มีบริเวณและพื้นที่ในชั้นมากขึ้นรวมถึงความสามารถการใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นอีกด้วย โดยทำการวิจัยด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์อิลิเมนต์และวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารแต่ละชั้น โมเมนต์ดัด แรงตามแนวแกน ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างของอาคาร อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยมีการออกแบบแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวโดยกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1302-52) และได้ใช้ตัวอย่างอาคาร อื้อจือเหลียง ซึ่งเป็นอาคารสูงที่ไม่มีชั้นเอาท์ริกเกอร์ ผลการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวนั้น อาคารอื้อจือเหลียงไม่สามารถรับแรงแผ่นดินไหวตาม มาตรฐาน มยผ.1302-52 ได้ทั้งเรื่องของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่แต่ละชั้นของอาคารและกำลังรับแรงของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงได้ทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของอาคารโดยใช้เอาท์ริกเกอร์ที่เป็นผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างของอาคารเมื่อเปลี่ยนโครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างวีเรนดีล จากการวิเคราะห์พบว่าตำแหน่งของโครงสร้างวีเรนดีลในชั้นเอาริกเกอร์ที่เหมาะสมสำหรับอาคารดังกล่าวอยู่ที่ชั้น 29 และ 23 หรือที่ความสูงประมาณ 2/4 ถึง 3/4 เท่าของความสูงอาคารทั้งหมด โดยสามารถเพิ่มความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: *ระบบเอาท์ริกเกอร์, โครงสร้างวีเรนดีล, ผนังรับแรงเฉือน, คานลึก, มยผ.1302-52*

Abstract

This paper proposes the possibility to introduce a vierendeel structure, a beam with longitudinal openings, to apply in the outrigger system. For decades, the outrigger system has been used in high rise buildings to increase the lateral stiffness of the building. Due to the fact that the buildings are exposed to lateral loads as a result of wind and earthquakes load conditions which causes the increment of lateral displacement when the buildings become taller. The benefits of using vierendeel in outriggers are that it provides more area and space, as well as more usability. The research was conducted by finite element analysis programming. Analysis of the story drift, bending moments and axial forces that occurred in the structural members of the U-Chu Ling building was conducted to verify whether these members meet the standard or not. From the analysis, it was found that story drift, and internal forces occurred in members do not meet the DPT 103-52 standard. Therefore, it was necessary to analyze the optimal position of the building with shear wall later used the reinforced concrete vierendeel and steel truss. It can be summarized from the analysis that the optimum position of the vierendeel for U-Chu Ling building is on 29th and 23th floor which is approximately located on 2/4 to 3/4 of the overall buildings height. IT can be effectively increase the seismic resistance of the building.

Keywords: *Outrigger system, Vierendeel Structure, Shear wall, Deepbeam, DPT1302-52*

1. บทนำ

ปัจจุบันอาคารสูงกำลังเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ที่มีมากขึ้นในขณะที่พื้นที่การใช้สอยมีจำนวนจำกัดอีกทั้งมูลค่าของที่ดินก็มีราคาสูงขึ้นอีกทั้งความต้องการในการใช้งานอาคารสูงอาทิ เช่น สำนักงานและที่พักอาศัย ดังนั้นในการออกแบบที่ดีสิ่งแรกที่ วิศวกรต้องคำนึงถึงมากที่สุด คือ ความปลอดภัยในการใช้งาน จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างขึ้นมาเพื่อให้ เหมาะแก่การใช้งานของลักษณะอาคารที่ต่างกันออกไป ซึ่ง

ในการออกแบบโครงสร้างอาคารสูงนี้ต้อง คำนึงถึง ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยต่างๆเช่น แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเกิดจากน้ำหนักของ องค์อาคารและน้ำหนักบรรทุกจร รวมถึงแรงด้านข้างที่กระทำต่อตัวองค์อาคาร เช่น แรงลมและแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น แต่เมื่อความสูงของตัวอาคารเพิ่มขึ้นและมีความชะลูดมากขึ้น ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำด้านข้างนั้นลดลง ทำให้ตัวอาคารมีเสถียรภาพลดลง การเคลื่อนตัวบริเวณ ชั้นบนสุดของอาคารเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด จากเหตุผลที่กล่าวไว้ จึงมีการนำระบบเอาริกเกอร์และ ผนังรัด (Outrigger and belt wall system) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบผนังหรือคานลึกประมาณ 1-2 ชั้น จากความสูงของตัวอาคาร โดยมีการเสริมเหล็กยื่นออกมาจากผนังรับแรงเฉือนบริเวณแกนกลางของ อาคารถึงเสารอบนอกและยึดเสาแต่ละต้นด้วยผนังรัด ซึ่งช่วยเพิ่มสติฟเนสในการรับแรงด้านข้างให้ โครงอาคารมากขึ้นบริเวณชั้นดังกล่าว ซึ่งส่วนมากนั้นชั้นที่มีการใช้ระบบเอาท์ริกเกอร์ ชั้นนั้นจะไม่สามารถใช้การได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเป็นโครงสร้างคานขนาดใหญ่ ซึ่งถ้านำโครงสร้างวีเรนดีลมาประยุกต์ใช้จะสามารถทำให้มีการใช้พื้นที่ของชั้นนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

โดยปัจจุบันมี การศึกษาถึงพฤติกรรมของระบบเอาริกเกอร์และผนังรัด (Outrigger and belt wall system) ว่ามีส่วนช่วยในการลดแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นกับองค์อาคารสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเอาโครงสร้างวีเรนดีล มาประยุกต์ในระบบเอาริกเกอร์และผนังรัด (Outrigger and belt wall system) มาใช้กับองค์อาคารสูง โดยจะทำการวิเคราะห์อาคารจากการใช้โครงสร้างวีเรนดีลในชั้นที่มีการใช้โครงสร้างเอาท์ริกเกอร์ของอาคารเดิมภายใต้การจำลองฐานรากแบบยึดแน่นโดยวิเคราะห์จากพฤติกรรมและผลตอบสนอง ของโครงสร้างวีเรนดีลในระบบเอาริกเกอร์ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงกระทำด้านข้าง จากการจำลองอาคารขึ้น โดยโปรแกรมทางไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพื่อการเลือกใช้โครงสร้างระบบเอาริกเกอร์ (Outrigger Structural System) ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

2.1. วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างวีเรนดีลกับคานลึก ในชั้นเอาท์ริกเกอร์ ในกรณีที่รับแรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักบรรทุกของอาคาร โดยใช้มาตรฐาน มยผ.1302-61

2.2. ขอบเขตงานวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารและโครงสร้างเอาท์ริกเกอร์ เพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า โดยการจำลองอาคารอื้อจือเหลียง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบพฤติกรรมโครงสร้างอาคารทั้งก่อนและหลังใช้โครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ทั้งที่เป็นโครงสร้างวีเรนดีล กับ คานลึก

โดยได้เปรียบเทียบ 1.การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว 2.การเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว 3.แรงตามแนวแกนเสาเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหว 4.แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนังรับแรงเฉือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว 5.โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในผนังรับแรงเฉือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

3. วิธีการวิเคราะห์และการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเมื่อมีการรับแรงแผ่นดินไหว โดยใช้มาตรฐาน มยผ 1302-52 โดยได้กำหนดลักษณะโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

3.1. วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

วิธีแรงสถิตเทียบเท่าเป็นวิธีการคำนวณแรงแผ่นดินไหวอย่างง่ายโดยคำนวณเพื่อหาแรงเฉือนที่ฐาน (Seisimic Base Shear, V) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การตอบสนองของแผ่นดินไหว (C_S) และน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล (W) ได้จากสมการที่ (1)

$$V = C_S W \tag{1}$$

โดยค่า C_S คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$C_S = S_a\left(\frac{I}{R}\right) \geq 0.01g \tag{2}$$

S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับใช้ออกแบบแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวซึ่งสามารถใช้ค่าจากตารางในมาตราฐาน มยผ.1302-52

การคำนวณจะต้องปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_S) และคาบการสั่น 1.0 วินาที (S_1) ซึ่งจะต้องปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปคตรัมด้วยสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (F_a) และคาบการสั่น 1.0 วินาที (F_v) เพื่อหาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปคตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{DS}) และคาบการสั่น 1.0 วินาที (S_{D1}) คำนวณจากสมการที่ (3) และสมการที่(4)

$$S_{DS} = \frac{2}{3}F_s S_s \tag{3}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3}F_v S_1 \tag{4}$$

ตารางที่ 1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์

พารามิเตอร์	รายละเอียด
1. ลักษณะโครงสร้าง	โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก Transfer Beam ที่ชั้น 29th, 33th
2. วัสดุงานโครงสร้าง	เสาส่วน Tower (F'c=600ksc. , SD40) ผนังคสล.และเสาอื่นๆ (F'c=400ksc. , SD40) พื้น คานคสล. (F'c=350ksc. , SD40)
3. สถานที่ตั้งอาคาร	จ.กรุงเทพมหานคร
4. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปคตรัม สำหรับวิธีStatic	S_a=0.061g
5. ขนาดของอาคาร	กว้าง 38.9ม. ยาว 199ม. และ สูง 128ม. (39 ชั้น)
6. น้ำหนักบรรทุก (Live Load and Super Imposed Dead Load)	1. ลานจอดรถ LL=400 kg/m^2 , SDL=50 kg/m^2 2. พื้นที่ร้านค้า LL=400 kg/m^2 , SDL=350 Ton/m^2 3. ห้องงานระบบ LL=500 kg/m^2 , SDL=200 kg/m^2 4. โถงลิฟต์และบันได LL=300 kg/m^2 , SDL=100 kg/m^2 5. ทางเดินและสำนักงาน LL=250 kg/m^2 , SDL=250kg/m^2 6. หลังคาคสล. LL=200 kg/m^2 , SDL=100 kg/m^2
7. ประเภทการออกแบบต้านแผ่นดินไหว (Design Category)	ค
8. ประเภทความสำคัญอาคาร (Important Factor)	III
9. ระบบโครงสร้าง	ระบบโครงอาคาร (Building Frame System)
10. ระบบต้านแรงด้านข้าง	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)
11. ตัวประกอบผลตอบสนอง R (Response Modification Factor)	5
12. ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน Ω_0 (System Overstrength Factor)	2.5
13. ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว C_d (Deflection Amplification Factor)	4.5
14. ค่าสติฟเนสขององค์อาคารคอนกรีต	1. เสา I_{eff} = 0.70Ig และ A_{eff} = 1.0A_g 2. กำแพงรับแรงเฉือน I_{eff} = 0.70Ig 3. พื้น Post-tension I_{eff} = 0.50Ig

แต่เนื่องจากอาคารนี้ตั้งอยู่ใน กรุงเทพมหานคร จึงสามารถหาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบกับคาบการสั่นแสดงดังรูปที่ 1

การคำนวณค่าคาบการสั่นพื้นฐาน (Fundamental Period, T) ในมาตรฐาน มยผ.1302-52 ได้ระบุการคำนวณได้ 2 วิธี

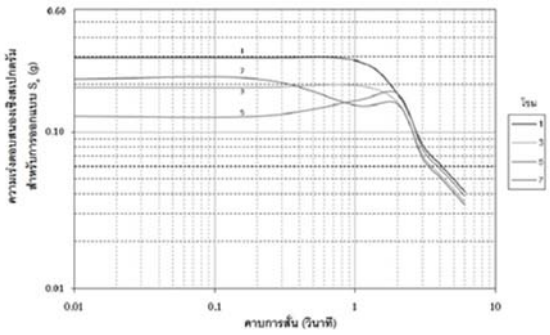
วิธี ก. คาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$T = 0.02H \quad (5)$$

วิธี ข. สามารถคำนวณได้จากลักษณะการกระจายมวล(หรือน้ำหนัก)ภายในอาคาร และสติฟเนสของระบบโครงสร้างต้านแรงด้านข้าง และคาบการสั่นพื้นฐานที่คำนวณได้จากวิธี ข. จะต้องไม่เกิน 1.5เท่าของค่าที่คำนวณได้จากวิธี ก.

การหาค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Story Drifts, **Δ**) คือผลต่างระหว่างการเคลื่อนตัวในแนบราบของชั้นบนและชั้นล่างได้จากสมการที่ (6)

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \quad (6)$$

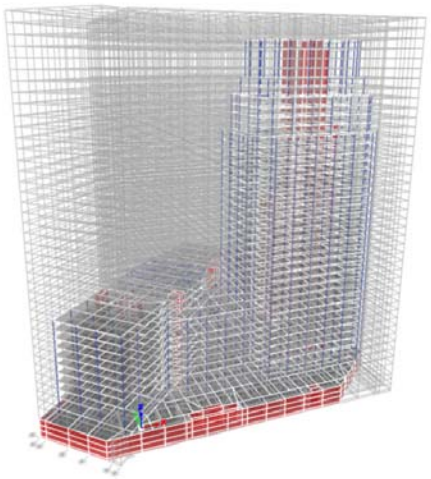


รูปที่ 1 ความเร่งตอบสนองเชิงเสปกตรัมการออกแบบด้วยวิธีสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร โซน 1 3 5 7

3.2. แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 39 ชั้น มีผนังรับแรงเฉือนอยู่บริเวณกลาง

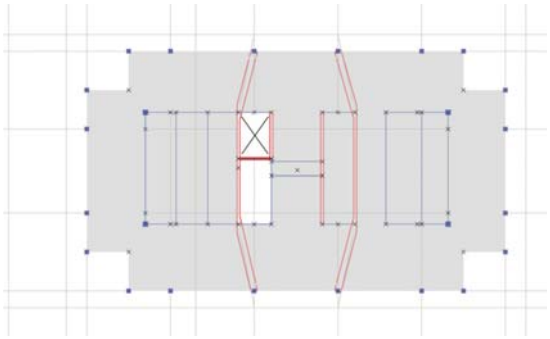
อาคาร และมีเสาตั้งอยู่รอบนอก และพื้นเป็นระบบพื้นไร้คาน แต่ละชั้นมีความสูงโดยประมาณ 3.7 เมตร และมี Transfer beam ที่ชั้น 29 และ ชั้น 33 อาคารตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ETABS แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองสามมิติของอาคารอี้อจือเหลียง

3.2.1. แบบจำลองโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์

การวิเคราะห์หาตำแหน่งโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ที่เหมาะสมที่สุดของอาคารนี้โดยการสร้างเอาท์ริกเกอร์ที่เป็นคานลึกขนาด ความหนา 70ซม. เชื่อมต่อระหว่างเสากับผนังรับแรงเฉือนแกนกลางของอาคารในแต่ละชั้นโดยเริ่มจากชั้นที่ 39 แสดงดังรูปที่ 3

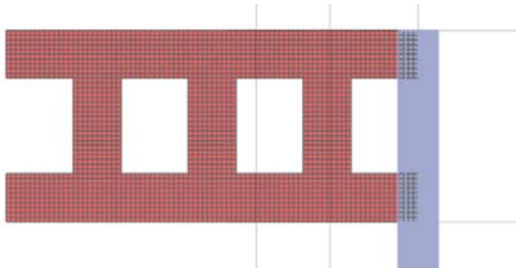


รูปที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างเอาท์ริกเกอร์ของชั้น 39

จากนั้นทำการหาค่าการหาค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่สุดที่น้อยที่สุดเมื่อทำการสร้างแบบจำลองเอาท์ริกเกอร์ในแต่ละชั้น

3.2.2. แบบจำลองโครงสร้างวีเรนดีล

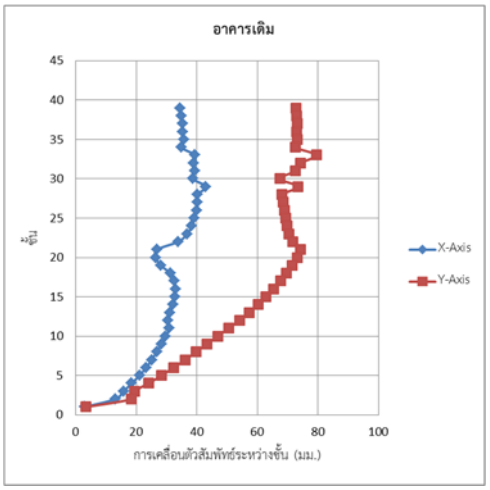
หลังจากทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ ทำการวิเคราะห์อาคารด้วยการจำลองโครงสร้างวีเรนดีลแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ที่เป็นโครงสร้างวีเรนดีล

4. ผลการวิจัย

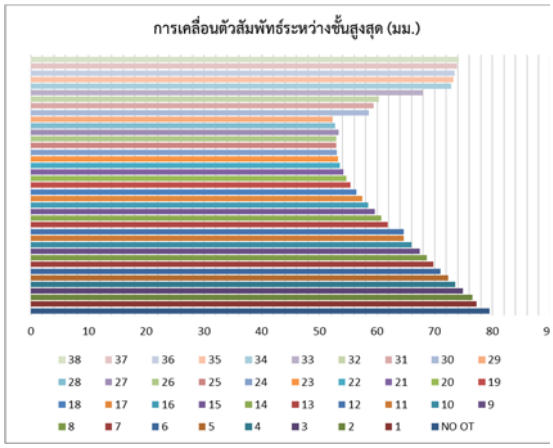
จากการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวอาคารอี้อจือเหลียงนั้นมีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของอาคาร เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน มยผ.1302-52 สำหรับอาคารที่จัดอยู่ในประเภทความสำคัญแบบ III จะต้องไม่เกิน $0.015h_x$ ซึ่งความสูงมาตรฐานของอาคารเท่ากับ 3.7 เมตร ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ยอมให้มีค่าเท่ากับ 0.0555 ม. โดยค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารที่เกิดขึ้นนั้น ในแกนX มีค่าเท่ากับ 0.0429 ม. แกน Y มีค่าเท่ากับ 0.0795 ม. แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคารเดิม

4.1. การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์

การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์นั้นหาได้จากการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารที่อยู่ในค่าที่ยอมให้ของมาตรฐาน มยผ. 1302-52



รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเมื่อจำลองเอาท์ริกเกอร์ตั้งแต่ ชั้น 1-38

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งชั้นของโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ที่เหมาะสมที่สุดนั้นอยู่ที่ 29 มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงสุดอยู่ที่ 52.286 มม. ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมตามมาตรฐาน มยผ. 1302-52

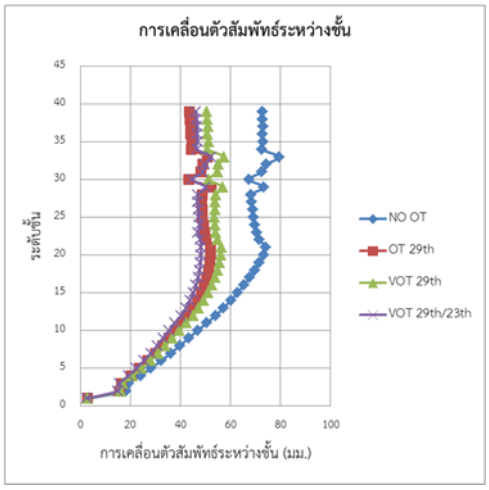
4.2. การใช้โครงสร้างวีเรนดีลแทนคานลึกในชั้นโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของอาคารด้วยการใช้โครงสร้างวีเรนดีลแทนคานลึกในชั้นโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ ปรากฏว่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดมีค่า 57.557 มม. ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานอ้างอิง ดังนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาชั้นของโครงสร้างวีเรนดีลเพิ่มจนได้ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่มีต่ำที่สุด ณ ตำแหน่งที่ชั้น 29 กับ 23 มีค่าเท่ากับ 52.330 มม.

4.3. พฤติกรรมตอบสนองของอาคารเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

4.3.1. การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคาร

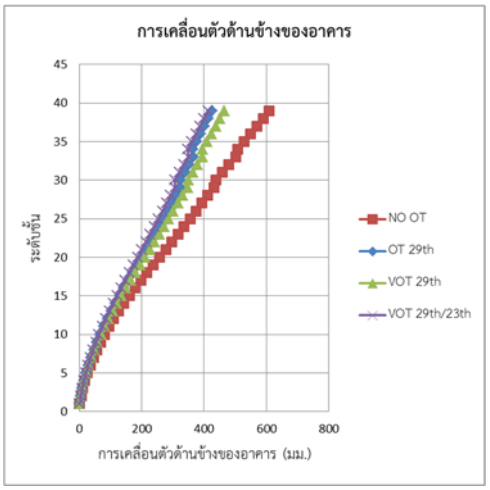
จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น โดย สัญลักษณ์ “NO OT” หมายถึง อาคารเดิมที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ มีการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นสูงสุด 79.459 มม. คิดเป็น 0.0215 ของความสูงระหว่างชั้น 3.7 เมตร สัญลักษณ์ “OT 29th” หมายถึง คานลึกที่ชั้น 29 มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเท่ากับ 52.286 มม. คิดเป็น 0.0141 สัญลักษณ์ “VOT 29th” หมายถึง โครงสร้างวีเรนดีลที่ชั้น29 มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเท่ากับ 57.557 มม. คิดเป็น 0.0156 และสัญลักษณ์ “VOT 29th/23th” หมายถึง โครงสร้างวีเรนดีลที่ชั้น29และชั้น23 มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเท่ากับ 52.330 มม. คิดเป็น 0.0141



รูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเนื่องจากรับแรงแผ่นดินไหวในแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

4.3.2. การเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร

การโก่งตัวในแนวระนาบที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวจะต้องมีค่าไม่เกินค่าการโก่งตัวที่ยอมรับได้ (Permissible Deflection) คือการการโก่งตัวที่โครงสร้างยังคงสามารถคงความสมบูรณ์เชิงโครงโครงสร้างและสามารถต้านแรงกระทำตามที่ออกแบบไว้ได้

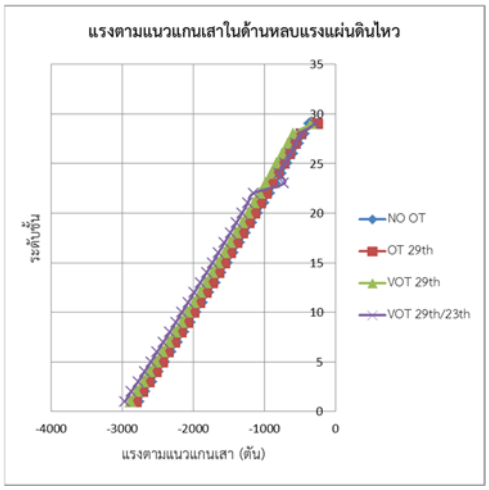


รูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารเนื่องจากรับแรงแผ่นดินไหวในแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

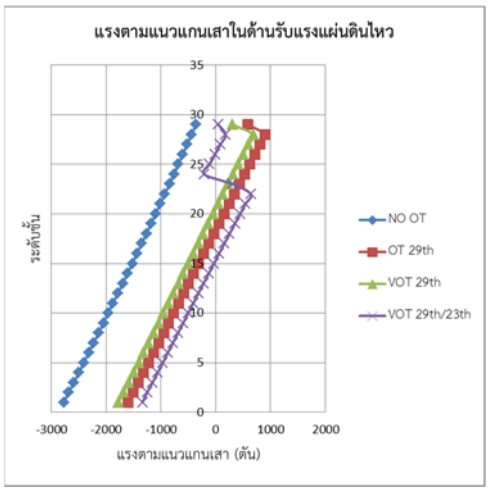
จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร ณ ตำแหน่งชั้นต่างๆ โดยค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของแต่ละกรณีมีค่า ดังนี้ 1.อาคารเดิม มีค่า 609.534 มม. 2.โครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ชนิดคานลึกชั้นที่29 มีค่าเท่ากับ 426.103 มม. 3.โครงสร้างวีเรนดีลชั้นที่ 29 มีค่าเท่ากับ 465.51 มม. 4.โครงสร้างวีเรนดีลชั้นที่ 29 และ23 มีค่าเท่ากับ 412.931 มม. คิดเป็น 0.43, 0.30, 0.33 และ 0.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4.3.3. แรงตามแนวแกนเสาเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหว

แรงตามแนวแกนจะพิจารณาแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงร่วมกับแรงแผ่นดินไหวทั้งด้านหลบแรงแผ่นดินไหวและด้านรับแรงแผ่นดินไหว แสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 แรงตามแนวแกนเสาในด้านหลบแรงแผ่นดินไหวเนื่องจากรับแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหวในแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

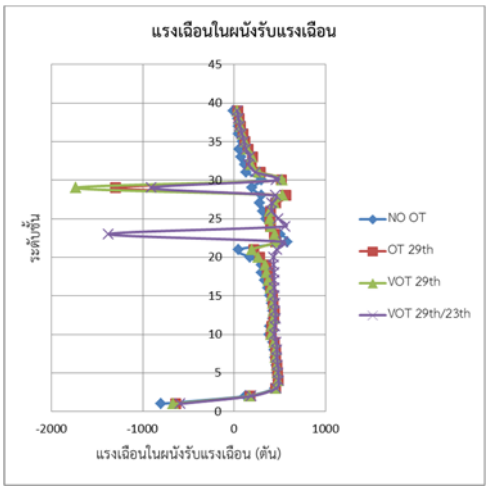


รูปที่ 10 แรงตามแนวแกนเสาในด้านรับแรงแผ่นดินไหวเนื่องจากรับแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหวในแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์แรงตามแนวแกนเสาในด้านหลบแรงแผ่นดินไหว การเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์สามารถลดแรงอัดตามแนวแกนเสาได้ในช่วงที่มีการเริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ ส่วนแรงตามแนวแกนเสาในด้านรับแรงแผ่นดินไหว โครงสร้างเดิมที่ยังไม่มีการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์นั้นมีแรงอัดลดลงเนื่องจากเกิดแรงดึงในเสาเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว แบบจำลองที่มีการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ เกิดแรงดึงขึ้นแทนในช่วงที่มีการเสริมด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ สำหรับการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างวีเรนดีลสองชั้นนั้นสามารถลดแรงดึงที่เกิดขึ้นในเสาได้

4.3.4. แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนังรับแรงเฉือน

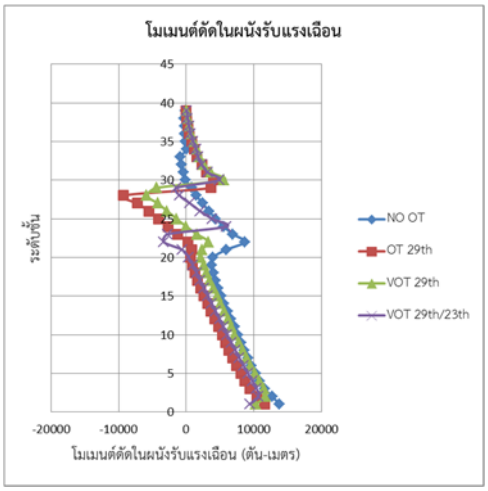
แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนังรับแรงเฉือนเมื่อรับแรงแผ่นดินแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แรงเฉือนในผนังรับแรงเฉือนเนื่องจากรับแรงแผ่นดินไหวในแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

จากรูปที่ 11 พบว่าผนังรับแรงเฉือนเกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดในชั้นที่มีการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ เมื่อใช้โครงสร้างวีเรนดีลแทนคานลึกปรากฏว่าแรงเฉือนของผนังรับแรงเฉือนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคานลึกและลดน้อยลงเมื่อมีการเสริมโครงสร้างวีเรนดีลเพิ่มที่ชั้น23 และมีค่าสูงที่สุดที่ชั้น 23

4.3.5. โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในผนังรับแรงเฉือน



รูปที่ 12 โมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือนเนื่องจากรับแรงแผ่นดินไหว ในแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในผนังรับแรงเฉือนเมื่อรับแรงแผ่นดินแสดงดังรูปที่ 12 โมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือน มีค่าลดเมื่ออาคารมีการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์และสูงสุดในชั้นที่มีโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ เมื่อใช้โครงสร้างวีเรนดีลแทนโครงสร้างคานลึกในชั้นโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ สามารถลดโมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือนได้น้อยกว่าคานลึก และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของโครงสร้างวีเรนดีล โมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือนลดลงน้อยกว่าประเภทคานลึก แต่โมเมนต์ดัดสูงสุดนั้นมีค่าน้อยกว่ามาก

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาการประยุกต์แบบจำลองโครงสร้างวีเรนดีลแทนคานลึกในชั้นโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

อาคารอื้อจือเหลียงมีค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเท่ากับ 79.50 มม. ในแนวแกนY ซึ่งมีค่ามากกว่าตามมาตรฐาน มยผ.1302-52 กำหนด 55.50 มม. ซึ่งทำให้ได้นำอาคารอื้อจือเหลียงมาเพื่อวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

การเสริมกำลังอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์สำหรับอาคารอื้อจือเหลียง ชั้นที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์หนึ่งชั้น คือ ชั้นที่ 29 ซึ่งมีความสูง 103.1 ม. จากพื้นดิน ซึ่งคิดเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ของความสูงทั้งอาคาร เนื่องจากโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ประเภทวีเรนดีลจำนวน1ระดับ ไม่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว ทำให้มีการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างวีเรนดีลสองชั้น คือ ชั้นที่ 29 กับชั้นที่ 23

พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างอาคารในแต่ละแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุด
    - คานลึกจำนวนหนึ่งระดับ มีค่า 52.286 มม.
    - โครงสร้างวีเรนดีลสองระดับ มีค่า 52.330 มม.
    - โครงสร้างวีเรนดีลจำนวนหนึ่งดับ มีค่า 57.557 มม.
2. การเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร

โครงสร้างวีเรนดีลสองระดับนั้นสามารถลดการเคลื่อนตัวสูงสุดของอาคารได้มากที่สุดคือ 32.25เปอร์เซ็นต์ คานลึกหนึ่งระดับสามารถลดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้ 30.09 เปอร์เซ็นต์ และวีเรนดีลหนึ่งระดับสามารถลดค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดได้ 23.63 เปอร์เซ็นต์

3. แรงตามแนวแกนของเสา

แรงตามแนวแกนของเสาได้แบ่งเป็นสองกรณีกรณีรับแรงแผ่นดินไหวกับกรณีหลบแรงแผ่นดินไหวซึ่งด้านรับแรงแผ่นดินไหวนั้นจะทำให้เกิดแรงดึงในเสา ส่งผลให้แรงอัดของเสามีค่าลดลง และเมื่อมีการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ ทำให้แรงแนวแกนในเสาเกิดแรงดึงเพิ่มมากขึ้นและแรงอัดลดลงอย่างมาก ซึ่งโครงสร้างวีเรนดีลหนึ่งระดับสามารถลดแรงอัดได้น้อยกว่าคานลึก แต่เกิดแรงดึงที่น้อยกว่าคานลึก ส่วนโครงสร้างวีเรนดีลสองระดับสามารถลดแรงอัดได้มากกว่าคานลึกและ เกิดแรงดึงขั้นน้อยกว่าคานลึก ในกรณีด้านหลบแรงแผ่นดินไหว โครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ประเภทคานลึกสามารถลดแรงอัดในเสาได้มากที่สุด แต่โครงสร้างวีเรนดีลสองระดับสามารถลดแรงอัดในเสาในระหว่างชั้นที่ 23 ถึงชั้น29 ได้มีค่าใกล้เคียงกับคานลึก

4. แรงเฉือนในผนังรับแรงเฉือน

เมื่อมีการใช้โครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์นั้นทำให้แรงเฉือนในผนังรับแรงเฉือนกลางอาคารมีค่าเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างวีเรนดีลหนึ่งระดับทำให้แรงเฉือนในผนังรับแรงเฉือนที่ชั้นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด ส่วนโครงสร้างระบบวีเรนดีลสองระดับให้ค่าแรงเฉือนน้อยกว่าโครงสร้างวีเรนดีลหนึ่งระดับแต่ก็ยังมีค่ามากกว่าคานลึก

5. โมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือน

โมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือน การเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์สามารถลดโมเมนต์ดัดในผนังรับแรงเฉือนได้แต่จะเกิดโมเมนต์ในทิศทางตรงข้ามในชั้นโครงร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ ซึ่งโครงสร้างวีเรนดีลสองชั้นนั้นสามารถโมเมนต์ดัดได้ทั้งอาคารและในชั้นที่การใช้โครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์

จากสรุปผลการวิเคราะห์แสดงว่า โครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ประเภทโครงสร้างวีเรนดีลหนึ่งระดับนั้นยังไม่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการเพิ่มวีเรนดีลอีกหนึ่งระดับนั้นทำให้พฤติกรรมของอาคารมีความใกล้เคียงกับโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์ประเภทคานลึก และในด้านของการใช้งานพื้นที่อาคาร การใช้โครงสร้างวีเรนดีลในโครงสร้างระบบเอาท์ริกเกอร์นั้นทำให้สามารถใช้งานพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำช่องเปิดให้เป็นช่องประตู หรืออย่างอื่นขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดของโครงสร้างวีเรนดีล แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างอาคารเป็นหลัก

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงได้เป็นอย่างดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในทุกด้านของงานวิจัย

ขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งกำลังใจในการศึกษา จนสำเร็จด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1302-52. กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพ, ประเทศไทย

[2] สุวิศาล ถือทอง, อำนวย พานิชกุลพงศ์ (2558), พฤติกรรมของระบบเอาท์ริกเกอร์และผนังรัดสำหรับอาคารสูงบนฐานรากแบบยืดหยุ่น, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 8-10 กรกฎาคม *2558,* จ.ชลบุรี

[3] Kiran Kamath, N. Divya, Asha U Rao. (2012). “A Study on Static and Dynamic Behaviour of Outrigger Structure system for Tall Building”. Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, **4**(2), pp. 15-20.

[4] Po Seng Kian, Frits Torang Siahaan. (2001). “The Use of Outrigger and Belt Truss System for High-Rise Concrete Building”.Dimensi Teknik Sipil, **3**(2), pp. 36-41.

[5] Hi Sun Choi, Leonard Joseph (2012) . “Outrigger System Design Considerations”. International Journal of High-Rise Buildings, **1**(3), 237-246.

[6] Daril John Prasad, Srinidhilakshmish Kumar. (2016). “Comparison of Seismic Performance of Outrigger And Belt Truss System in a RCC Building with Vertical Irregularity”.International Journal of Research in Engineering and Technology, **5**(20).

[7] Bengi Aykac, Ilker Kalkan, Sabahattin Aykac, Yusuf Emre Egriboz. (2013). “Flexural Behavior of RC Beams with Regular Square or Circular Web Openings”. Engineering Structure 56, 2165-2174.