การวิเคราะห์ราคาค่าก่อสร้างของอาคารเตี้ยที่ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว
CONSTRCUTION COST ANALYSIS FOR EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF LOW-RISE BUILDINGS

ภูวดล กลพิมาย[1] บุญมี ชินนาบุญ[2,*] และ สมชาย ชูชีพสกุล[3]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
[3]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: boonme.chi@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ตามประกาศกฎกระทรวง พ.ศ.2564 ได้กำหนดให้พื้นที่ที่รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวออกเป็น 3 บริเวณ ตามลำดับความรุนแรงของผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว กฎกระทรวง พ.ศ.2564 บริเวณที่ 3 ได้ระบุถึงอาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 10 เมตร หรือ 3 ชั้นขึ้นไป และ อาคารอยู่อาศัยที่ดำเนินการตามกฎหมายว่าด้วยการจัดสรรนั้น ซึ่งเป็นอาคารที่มีการก่อสร้างปริมาณสูงในปัจจุบัน การออกแบบอาคารตามข้อกำหนดดังกล่าวให้ต้านทานแผ่นดินไหวด้วยนั้นทำให้ค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้น การศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ราคาค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นกับอาคารที่ทำการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว โดยเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2-3 ชั้น ก่อสร้างในพื้นที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ (พื้นที่ในบริเวณที่ 3 ตามกฎกระทรวง พ.ศ. 2564) โดยมีอัตราเร่งตอบสนองที่ 0.2 วินาที คือ 1.080g การศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์อาคารด้วยวิธีสถิตเทียบเท่าและวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นตามที่กำหนดในมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ผลการวิเคราะห์พบว่า วิธีสถิตเทียบเท่าและพลศาสตร์เชิงเส้น มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นร้อยละ 8-10 เมื่อเทียบกับอาคารที่มิได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและมิได้เสริมเหล็กให้มีความเหนียวตามมาตรฐานของ มยผ. 1301/1302-61

คำสำคัญ: ค่าก่อสร้าง, อาคารเตี้ย, การออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว, วิธีสถิตเทียบเท่า, วิธีพลศาสตร์

Abstract

According to the Ministerial Regulation B.E. 2564, the earthquake-affected areas are designated as three categories depending on severity of the earthquake load. The Area No. 3 according to the Ministerial Regulations B.E. 2564 identifies buildings with heights from 10 meters or 3 stories or above as well as housing estates. These are buildings with high volume of construction nowadays. The design of buildings in accordance with such requirements to resist earthquakes leads to an increase in construction costs. Thus, in this paper, the low-rise buildings designed to resist the earthquake load are studied for an increase in construction costs. The reinforced concrete buildings with 2-3 stories constructed in Muang, Chiangmai (Area No. 3 according to the Ministerial Regulation B.E. 2564) that possesses a ground response acceleration at 0.2 sec. equal to 1.080g are investigated. This study analyzes the buildings by using two approaches, i.e. the equivalent static method and linear dynamics (modal response spectrum analysis) according to DPT Standard 1301/ 1302-61. From the analysis result, the construction costs from structural design by using the equivalent static method and modified response spectrum analysis increase about 8-10 percent comparing with the buildings that are not designed and not ductile to withstand the earthquake load according to DPT Standard 1301/1302-61.

Keywords: Construction cost, low-Rise buildings, earthquake-resistance design, equivalent method, dynamic method

1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบอาคารในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ได้มีกำหนดกฎกระทรวงใหม่ “กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทานความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2564 [1]” ได้แบ่งพื้นที่ตามความรุนแรงของแผ่นดินไหวเป็น 3 บริเวณ เป็นบริเวณเฝ้าระวัง, บริเวณได้รับผลกระทบระดับความมั่นคงแข็งแรง และระดับผลกระทบระดับสูง ซึ่งใน

ข้อกำหนด บริเวณที่ 3 ได้พิจารณาถึงอาคารสูงตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป และอาคารอยู่อาศัยและอาคารพานิชย์ที่ดำเนินตามกฎหมายว่าด้วยการจัดสรรที่ดิน เนื่องด้วยอาคารประเภทดังกล่าวในการออกแบบและก่อสร้างยังไม่มีการนิยมออกแบบหรือก่อสร้างอาคารลักษณะดังกล่าวให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวมากนัก โดยการศึกษาที่ผ่านมา

อมรชัย และชานนท์(2563) [5] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับอาคาร คสล. สูง 4 ชั้น วิเคราะห์โครงสร้างลักษณะ 2 มิติ โดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [3] พบว่าอาคารมีความเสียหายรุนแรงบริเวณเสาและคานเกินกว่าระดับความคงทนของโครงสร้างได้

อดิเทพ และทรงพล(2564) [6] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว ตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 [3] นั้น โดยพิจารณาที่ตั้งอาคารบริเวณด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี โดยพิจารณาอาคารสูง 1-4 ชั้น พบว่าปริมาณขนาดของโครงสร้างมีขนาดเพิ่มขึ้นและมีปริมาณวัสดุก่อสร้างคอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุก่อสร้างเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากวิธีการออกแบบ Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) เป็นหลัก

เนื่องจากข้อกำหนดจากกฎกระทรวงดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาราคาค่าก่อสร้างที่อาจจะเพิ่มขึ้นของอาคารเตี้ย ที่มีความสูงประมาณ 2-3 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารที่ใช้อาศัยและทางพานิชย์เป็นจำนวนมากในปัจจุบัน โดยทำการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวเป็นไปตามกฎกระทรวงฯ พ.ศ.2654 [1] และเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารให้ต้านทานแผ่นดินไหว โดยพิจารณาให้อาคารตั้งอยู่ที่ อ.เมืองเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม S_S = 1.080g และที่ S_1 = 0.317g โดยในส่วนการการวิเคราะห์ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ETABS) ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว ทั้งวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Force หรือ Equivalent Lateral Force, ELF) และวิธีพลศาสตร์ (Dynamic load) เป็นวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis, MRSA) และการวิเคราะห์วิธีปรับปรุงการตอบสนองแบบโหมด (Modified Response Spectrum Analysis, MRSA) ตามมาตรฐานของ มยผ.1301/1302-61 [3] และนำผลการออกแบบทำการประมาณราคาค่าก่อสร้างที่เปลี่ยนไป เทียบกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารให้ต้านแรงแผ่นดินไหว

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราค่าก่อสร้างที่อาจเพิ่มขึ้น เนื่องจากการออกแบบอาคารให้ต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [3] สำหรับอาคารพักอาศัย คสล. 2 ชั้น และอาคารพักอาศัยรวม คสล. 3 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารที่นิยมก่อสร้างในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณราคาค่าก่อสร้างเบื้องต้นสำหรับประมาณราคาค่าก่อสร้าง เช่น เหล็กเสริมคอนกรีต ปริมาณคอนกรีต ปริมาณไม้แบบที่ใช้ในการก่อสร้าง และค่าแรงงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดอาคารที่เปลี่ยนไปภายใต้การออกแบบอาคารให้ต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว โดยการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นลักษณะ 3 มิติ พิจารณาให้อาคารตั้งอยู่บนพื้นที่ประเภท “ง” ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบอย่างเข้มงวดที่สุด และเป็นบริเวณที่มีแรงแผ่นดินไหวกระทำทั้ง 2 ทิศทางพร้อมกัน

2.2 ขอบเขตของงานวิจัย

2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างใช้การสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ETABS [7] โดยการวิจัยพิจารณาการออกแบบโครงสร้าง คสล. เท่านั้น ยกเว้นส่วนของฐานราก คสล. เนื่องจากแต่ละพื้นที่ดินมีคุณสมบัติแตกต่างกันมาก ชั้นดินที่ใช้พิจารณาในการวิเคราะห์โครงสร้าง เป็นชั้นดินประเภท ปกติ (D) การวิเคราะห์นี้มิได้พิจารณาผลของผนังอิฐก่อ ตามมาตรฐานของ มยผ.1301/1302-61 [3]

2.2.2 การออกแบบอาคารด้านกำลังของวัสดุ กำหนดกำลังประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน f_c' 240 ksc. เหล็กเสริมหลักของโครงสร้างใช้เกรด SD 40 (fy > 4,000 ksc.) และเหล็กเสริมรอง เกรด SR 24 (fy > 2,400 ksc.) และการกำหนดน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างใช้ตามกฎกระทรวง [6]

2.2.3 คุณสมบัติของหน้าตัดองค์อาคาร คาน คสล. เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าขั้นต่ำ ขนาด 0.20x0.40 ม. เสา คสล. ขนาด 0.20x0.20 ม. เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น ในกรณีต้องเปลี่ยนขนาดจะพิจารณาเป็นเสา คสล. หน้าตัดจัตุรัสเช่นเดียวกัน พื้นสำหรับระเบียงอาคารและสำหรับห้องน้ำภายในอาคารพิจารณาโครงสร้างเป็นพื้น คสล. หล่อในที่มีความหนา 0.10 ม. และพื้นภายในห้องเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง หนา 0.05 ม. และมีคอนกรีตทับหน้า แผ่นพื้นสำเร็จรูป (Topping) หนา 0.05 ม.

3. การออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 [3]

3.1 วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Force) [3]

วิธีแรงสถิตเทียบเท่านั้น เป็นวิธีการวิเคราะห์และคำนวณหาผลของแรงเฉือนที่ฐานของคาร (Seismic base shear, V) ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับผลของค่าสัมประสิทธิ์การตอบสนองของแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (Seismic response coefficient, C_s) และขึ้นกับน้ำหนักของโครงสร้างอาประสิทธิผลของอาคาร (Effective seismic weight, W) โดยสามารถหาผลของแรงเฉือนดังกล่าวได้จากสมการที่ (1)

Seismic base shear : $$V = C_s W \quad (1)$$

โดยที่ค่า Seismic response coefficient, C_s คำนวณจากสมการที่ (2)

$$C_s = S_a \left(\frac{I}{R} \right) \quad (2)$$

โดยที่ S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร หน่วย g

I คือ ค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

และ R คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองของอาคาร

โดยที่หาก C_S ที่คำนวณได้มี < 0.01 กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.01 [3]

คาบการสั่นพื้นฐาน (Fundamental Period, T) มีหน่วยเป็นวินาที (s) สามารถคำนวณจากสูตรการประมาณค่า ดังนี้

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก $T=0.02H$ (3)

อาคารโครงสร้างเหล็ก $T=0.03H$ (4)

โดยที่ H คือ ความสูงของอาคารวัดจากพื้นดินมีหน่วยเป็นเมตร (m.)

การกระจายแรงเฉือนที่ฐานให้เป็นแรงกระทำด้านข้างต่ออาคารในชั้นต่างๆของอาคาร (Vertical Distribution of Seismic Forces) สามารถคำนวณจากสมการที่ (5) และ (6)

$$F_x = C_{vx}V \quad (5)$$

และ

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k} \quad (6)$$

โดยที่ Vertical distribution factor, C_{vx} คือตัวประกอบกระจายในแนวดิ่ง

w_i และ w_x คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้น i และ x ตามลำดับ หน่วย นิวตัน (N)

h_i และ h_x คือ ความสูงที่ระดับ i และ x ตามลำดับ (m.)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำหนดรูปแปปการกระจายแรง ซึ่งมีค่าดังนี้

$k = 1.0$ เมื่อ $T \le 0.5$ วินาที

$k = 1 + \frac{T - 0.5}{2}$ เมื่อ $0.5 < T < 2.5$ วินาที

$k = 2.0$ เมื่อ $T \ge 2.5$ วินาที

3.2 *วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) [3]*

การวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) [3] จะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อคำนวณหาค่าคาบการสั่นและรูปร่างโหมดธรรมชาติของการสั่นไหวของโครงสร้างอาคารนั้นๆ สำหรับการออกแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด จะต้องเป็นสเปกตรัมสำหรับอัตราส่วนความหน่วงที่สอดคล้องกับอัตราส่วนความหน่วงของอาคารที่กำลังออกแบบนั้น โดยจำนวนโหมดที่พิจารณาจะต้องสอดคล้องและเพียงพอที่จะทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมด (Effective Modal Weight, or Modal Weight Participation) มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร [3]

หากคำนวณหาค่าแรงเฉือนรวมที่ฐาน (Total Base Shear, V_t) ซึ่งพิจารณาจากการรวมผลหลายโหมดด้วยกัน โดยรวมแบบวิธีรากที่สองของผลรวมของค่ากำลังสอง (Square Root of Sum of Squares, SRSS) หรือรวมด้วยวิธีการรวมแบบสมบูรณ์ของค่ากำลังสอง (Complete Quadratic Combination, CQC) โดยที่ทุกโหมดนั้นจะถูกคูณด้วยค่า I/R จึงจะได้ค่าแรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Total Base Shear, V_t) และสำหรับตัวคูณปรับแก้ค่าที่ใช้ในการคำนวณปรับผลของแรงเฉือนที่ฐานนั้น (S_F) ให้ใช้ตามสมการที่ (8) แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี SRSS เนื่องจากสามารถใช้ปรับแก้ใช้งานกับวิธี Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) [3] ตามสมการที่ (9) ได้ง่าย

$$V_t = \frac{I}{R}\sqrt{V_{b,1e}^2 + V_{b,2e}^2 + V_{b,3e}^2 + \cdots} \quad (7)$$

โดยที่ $V_{b,ie}$ คือ แรงเฉือนที่ฐานในโหมด i ของระบบยืดหยุ่นเชิงเส้น

ค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Modal Base Shear, V_t) ซึ่งหากคำนวณจากการรวมการตอบสนองของโหมดต่างๆ ตามสมการที่ (7) แล้วมีค่าน้อยกว่า 85% ของค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear, V) ที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า จะต้องปรับค่าแรงภายในของโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ โดยคูณด้วยตัวประกอบปรับค่า (Scaling Factor, S_F) ที่คำนวณจากสมการที่ (8) ดังนี้

$$S_F = 0.85\frac{V}{V_t} \quad (8)$$

โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำการคูณปรับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งพื้น (Floor Displacements) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drifts) ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์

การคำนวณค่าแรงเฉือนสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างแนวดิ่งเป็นรายชิ้นส่วน (Individual Vertical Member) สำหรับโหมดที่มีค่า Mass Participation ratio สูงที่สุดของการสั่นไหวในแต่ละทิศทางในแนวราบจะต้องทำการคูณค่าแรงเฉือนสูงสุดของชิ้นส่วนนั้น ในระบบยืดหยุ่นเชิงเส้นด้วย $\frac{S_F I \Omega_o}{R}$ โดยที่ Ω_0 คือตัวประกอบกำลังส่วนเกิน และ S_F คือตัวคูณปรับค่าตามสมการ (8) สำหรับโหมดอื่นๆ ให้คูณค่าแรงเฉือนสูงสุดของชิ้นส่วนนั้นในระบบยืดหยุ่นเชิงเส้นด้วย I จะได้ค่าแรงเฉือนที่ต้องต้านทานเพื่อใช้ในการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของชิ้นส่วนโครงสร้างแนวดิ่งตามสมการที่ (9) ซึ่งเรียกว่าวิธี Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) [3]

$$V = I\sqrt{\left(\frac{S_F \Omega_0 V_{1e}}{R}\right)^2 + V_{2e}^2 + V_{3e}^2 + \cdots} \quad (9)$$

โดยที่ V_{1e}, V_{2e} และ V_{3e} คือ แรงเฉือนในระบบยืดหยุ่นเชิงเส้นในโหมดที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ในการออกแบบแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเสาที่ใช้ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ค่าที่วิเคราะห์ได้จากสมการที่ 9 นั้นถือว่าเป็นการคูณตัวประกอบกำลังส่วนเกินไปแล้วไม่ต้องทำการคูณซ้ำอีกครั้งตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 [3]

4. อาคารตัวอย่างและผลการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงภายในของอาคารตัวอย่างจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนท์ ETABS [7] ในการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้าง โดยเป็นโครงสร้างอาคารพักอาศัย คสล. สูง 2 ชั้น (รูปที่ 1) ความกว้าง 5.55 ม. ยาว 11.60 ม. ความสูงของอาคารจากพื้นดิน

ถึงยอดหลังคาความยาวรวม 7.10 ม. และอาคารพักอาศัยรวม คสล. 3 ชั้น (รูปที่ 2) ความกว้าง 8.50 ม. ยาว 31.00 ม. และความสูงของอาคารจากพื้นดินถึงยอดหลังคาความยาวรวม 11.70 ม. ขนาดขององค์อาคารเริ่มต้นการวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.2.3 โดยฐานรากของอาคารนั้นกำหนดให้เป็นแบบยึดแน่น (Fixed) และรายละเอียดของน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้ง 2 อาคาร แสดงดังตารางที่ 1

รูปที่ 1 แบบจำลองอาคาร คสล. 2 ชั้น
(กว้าง 5.55 ม. ยาว 11.60 ม. สูง 7.10 ม.)

รูปที่ 2 แบบจำลองอาคาร คสล. 3 ชั้น
(กว้าง 8.50 ม. ยาว 31.00 ม. สูง 11.70 ม.)

4.1 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ใช้ออกแบบ

4.1.1 ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [3]

ค่าของแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบนั้น จะอยู่ในลักษณะของแรงเฉือนกระทำที่ฐาน (Total Base Shear) โดยกำหนดให้โครงสร้างมีค่าความหน่วง (Damping ratio) โดยประมาณ 5% และมีค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และมีค่า S_S = 1.080g และที่ S_1 = 0.317g แล้วทำฏ 'มีค่า

7	Lateral Resisting Frame Type	Intermediate Moment Frame
8	Response Modification factor, R	5
9	System Overstrength Factor, Ω_0	3
10	Deflection Amplification Factor, C_d	4.5
11	S_S	0.963
12	S_1	0.248
13	Mass Source	100% DL
14	Superimposed dead load	120 KSM.
15	Live load	200 KSM.
16	Brick Wall	90 KSM.
17	Building Height	11.70 m.

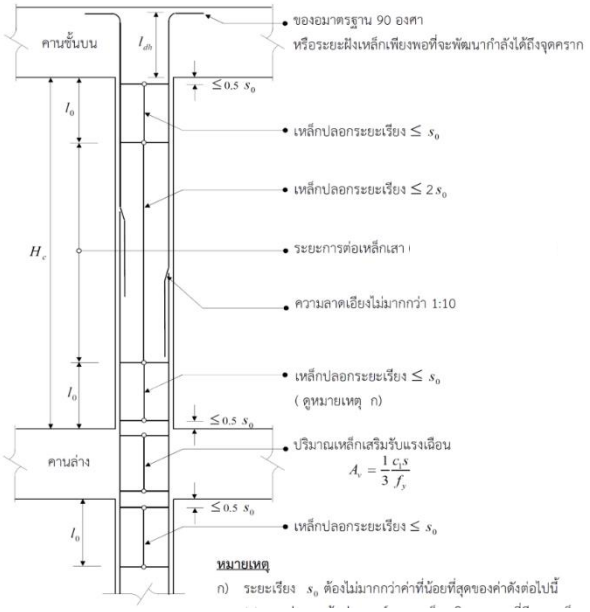
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

No.	พารามิเตอร์	Detail
1	Compressive strength of concrete	240 ksc. Cylinder at 28 days.
2	Deformed Bar	Grade SD40
3	Round Bar	Grade SR24
4	Solid Plank	For Live Load > 200 KSM. 0.05 M. THK.

ตารางที่ 3 Load Combinations [3]

No.	Method of load combination	Detail
1	Gravity	1.4DL + 1.7LL
2	Response Spectrum Analysis	0.9DL + 1.0EQX + 0.3EQY
3	Response Spectrum Analysis	0.9DL + 0.3EQX + 1.0EQY
4	Response Spectrum Analysis	0.9DL - 1.0EQX - 0.3EQY
5	Response Spectrum Analysis	0.9DL - 0.3EQX - 1.0EQY
6	Response Spectrum Analysis	0.75(1.4DL + 1.7LL) + 1.0EQX + 0.3EQY
7	Response Spectrum Analysis	0.75(1.4DL + 1.7LL) + 0.3EQX + 1.0EQY
8	Response Spectrum Analysis	0.75(1.4DL + 1.7LL) - 1.0EQX - 0.3EQY
9	Response Spectrum Analysis	0.75(1.4DL + 1.7LL) - 0.3EQX - 1.0EQY
10	เพิ่มกำลังแรงแผ่นดินไหวเป็น 2 เท่าสำหรับ Load Case ที่ 2–9	2 x EQ (LC2 – LC9)
11	Modified Response Spectrum Analysis	ใช้ Load Combination ตาม Load Case ที่ 2-9

ในการออกแบบเหล็กปลอกในโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับเหล็กปลอกเสา จะกำหนดให้การออกแบบเหล็กปลอกต้องไม่น้อยไปกว่าที่กฎกระทรวงกำหนด [1] ตามรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสาตามกฎกระทรวง [1]

ในกรณีเหล็กปลอกเดี่ยว จะต้องเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวให้มีระยะเรียงทางขวาง (S) ตลอดช่วงความยาวที่วัดออกมาจากขอบของข้อต่อเสา (l_0) ไม่มากกว่าค่า S_0 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดของค่าตามรายการดังนี้

1. 8 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดเล็กสุด
2. 24 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก
3. ครึ่งหนึ่งของมิติที่เล็กที่สุดของหน้าตัดเสา (c_2)
4. 300 มม.

และเหล็กปลอกแรกจะต้องอยู่ห่างจากขอบของข้อต่อโครงสร้างเป็นระยะไม่มากกว่า $0.5S_o$

สำหรับความยาว l_o จะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่มากที่สุดของค่า ดังต่อไปนี้

1. หนึ่งในหกของความสูงจากขอบถึงขอบของเสา (H_c / 6)
2. มิติที่มากที่สุดของหน้าตัดเสา (c_1)
3. 500 มม.

ข้อต่อระหว่างเสาและคาน หรือระหว่างเสาและแผ่นพื้นในกรณีแผ่นพื้นไร้คานจะต้องมีการเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวเป็นปริมาณไม่น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กปลอกเดี่ยว (A_v หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร) ที่คำนวณจากสมการที่ (10)

$$A_v = \frac{c_1 s}{3 f_y} \quad (10)$$

โดยที่ s คือ ระยะเรียงของเหล็กตามขวาง (mm.)

f_y คือ กำลังครากของเหล็กปลอกเดี่ยว (MPa)

โดยที่เหล็กเสริมนี้จะต้องเสริมภายในเสาเป็นความลึกไม่น้อยกว่าความลึกของคานที่ลึกที่สุดที่ข้อต่อนั้น

ระยะเรียงของเหล็กปลอกเดี่ยวในส่วนที่นอกเหนือจากช่วง l_o จะต้องไม่มากกว่าสองเท่าของระยะ s_o และการต่อเหล็กเสริมในเสาควรต่อบริเวณช่วงกลางความสูงเสา

4.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

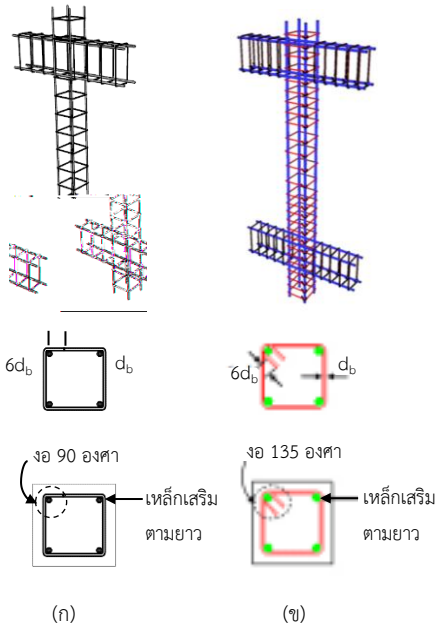
ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง สำหรับอาคาร คสล. 2 ชั้น โดยวิธีวิเคราะห์โครงสร้างการตอบสนองเชิงสเปกตรัมแบบโหมด RSA นั้น ให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานเมื่อเทียบกับวิธี ELF ได้ 69% สำหรับในทิศทางของแรงแผ่นดินไหว X-Direction และ 68% สำหรับทิศทาง Y-Direction ตามลำดับ สำหรับอาคาร คสล. 3 ชั้น โดยวิธี RSA นั้น ให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานเมื่อเทียบกับวิธี ELF ได้ 29% สำหรับทิศทาง X-Direction และ 38% สำหรับทิศทาง Y-Direction ตามลำดับ ซึ่งต้องใช้ตัวคูณปรับแก้ค่าแรงเฉือนที่ฐาน (S_F) ตามสมการที่ (8) ใน สเปกตรัมตอบสนองของทั้งสองอาคาร และหลังจากการรวมแรงจาก Load Combinations ดังแสดงในตารางที่ 3 แล้ว พบว่าแรงภายในโครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีสถิตเทียบเท่า (ELF) ที่ทำการคูณค่ากำลังส่วนเกินแล้ว และวิธี Modified Response Spectrum (MRSA) [3] นั้น ให้แรงเฉือนภายในโครงสร้างแนวดิ่งที่ใช้สำหรับออกแบบในภาพรวมใกล้เคียงกันทั้งกรณีอาคาร คสล. 2 ชั้น และอาคาร คสล. 3 ชั้น แต่วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด (RSA) นั้นให้ค่าแรงเฉือนน้อยกว่าวิธี ELF และ MRSA และแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับกรณีออกแบบรับแรงดัดในกรณีทั้งแรงดัดภายในโครงสร้าง เสา และคาน ของทั้งสองวิธี คือ ELF และ MRSA นั้นให้ค่าโมเมนต์ดัด ในโครงสร้างเสา และคาน ใกล้เคียงกันทั้งกรณีอาคาร คสล. 2 ชั้น และอาคาร คสล. 3 ชั้น แต่ค่าโมเมนต์ดัดในโครงสร้างเสา และคาน มีค่ามากกว่า อาคารที่ไม่ได้พิจารณาแรงกระทำจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ทั้งกรณีอาคาร คสล. 2 ชั้น และอาคาร คสล. 3 ชั้น

4.2 ผลการวิเคราะห์ราคาค่าก่อสร้าง

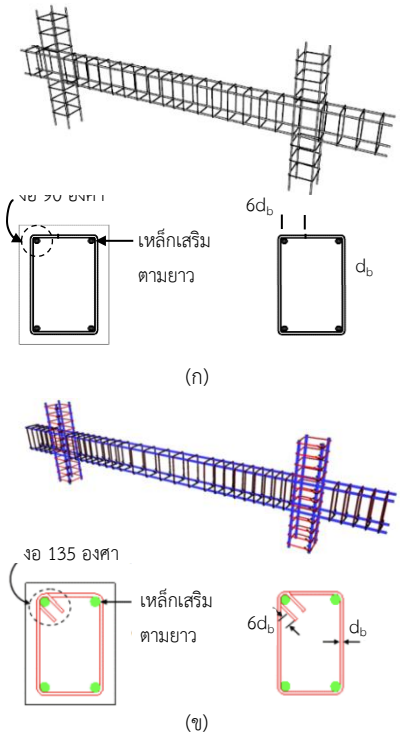
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าก่อสร้างโดยรวมของอาคาร คสล. 2 ชั้น

จากข้อกำหนดด้านกำลังวัสดุ น้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้าง แรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง และหลักการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามหลักการ Capacity Design และวิธีการออกแบบโดยวิธีกำลัง (Strength Design Method) และการเสริมเหล็กปลอกในโครงสร้างของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว และออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว แดสงดังรูปที่ 7 สำหรับเสา และรูปที่ 8 สำหรับคาน พบว่าโครงสร้างคานของอาคารพักอาศัย คสล. 2 ชั้น มีการขยายขนาดของหน้าตัดโครงสร้างคาน เนื่องจากผลของแรงภายในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว ในโครงสร้างเสาหน้าตัดของโครงสร้างยังคงสามารถใช้งานได้ โดยมีเพียงการเปลี่ยนขนาดของเหล็กเสริมหลักในโครงสร้างเสา ดังแสดงในตารางที่ 4 และการเสริมเหล็กโครงสร้างคาน แสดงดังตารางที่ 5 ตามลำดับ

\



รูปที่ 7 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสากรณีไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (รูปที่ 7 (ก)) และกรณีออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (รูปที่ 7 (ข))



รูปที่ 8 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคานกรณีไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (รูปที่ 8 (ก)) และกรณีออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (รูปที่ 8 (ข))

ตารางที่ 4 ขนาดของเสาอาคาร คสล. 2 ชั้น

อาคาร	Descriptions	Result Design		
		Non-EQ.	ELF	RSA / MRSA
ตอม่อ - เสาชั้น 1 อาคาร 2 ชั้น	Column size	 0.20x0.20	 0.20x0.20	 0.20x0.20
	Main Rebar	6–DB 12	6-DB 16	6-DB 16
	Stirrup (l_O)	RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.10 m.	RB 6 mm. @0.10 m.
	Stirrup (H_C - $2l_O$)		RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.15 m.
เสาชั้น 2 อาคาร 2 ชั้น	Column size	 0.20x0.20	 0.20x0.20	 0.20x0.20
	Main Rebar	6–DB 12	6-DB 12	6-DB 12
	Stirrup (l_O)	RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.10 m.	RB 6 mm. @0.10 m.
	Stirrup (H_C - $2l_O$)		RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.15 m.

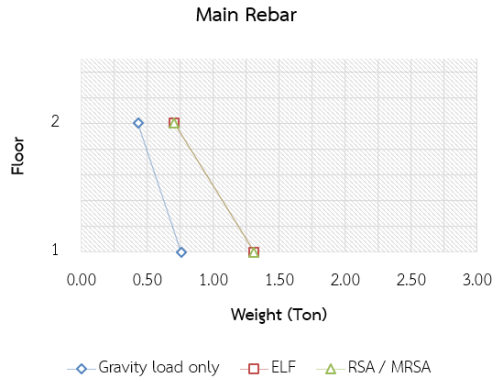
จากตารางที่ 4 โครงสร้างเสา คสล. ใช้เป็นขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบเดียวกันทั้งอาคาร

ตารางที่ 5 ขนาดของคานอาคาร คสล. 2 ชั้น

Beam Direction		Result Design
Beam X-Y Direction Non-EQ. Mid Span	0.40  0.20	3–DB 12 RB 6 mm.@0.15 m. 2-DB 12 Extra 3-DB 12
Beam X-Y Direction Non-EQ. End Span	0.40  0.20	3–DB 12 2-DB 12 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 12
Beam X-Y Direction ELF Mid Span	0.50  0.20	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16
Beam X-Y Direction ELF End Span	0.50  0.20	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16
Beam X-Y Direction RSA/MRSA Mid Span	0.50  0.20	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16
Beam X-Y Direction RSA/MRSA End Span	0.50  0.20	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16

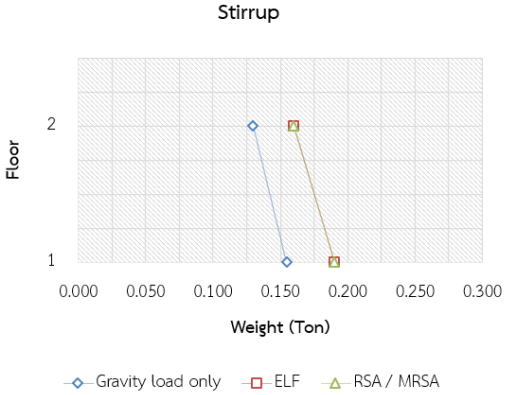
จากตารางที่ 5 โครงสร้างคาน คสล. ใช้เป็นขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบเดียวกันทั้ง ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของอาคาร คสล. 2 ชั้น

การประมาณราคาวัสดุก่อสร้างสำหรับวิเคราะห์อาคาร คสล. 2 ชั้น พบว่า องค์อาคารรับแรงดัดทั้งเสา และคาน มีแรงดัดสูงขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารไม่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ทำให้โครงสร้างหลังจากการออกแบบมีขนาดองค์อาคารที่ใหญ่ขึ้น มีปริมาณเหล็กเสริมหลักเพิ่มขึ้นถึง 1.7 เท่า และเหล็กปลอกในคานและเสามีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.25 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ และจากแรงกระทำจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวดังกล่าว ทำให้ขนาดของเสา และขนาดของคานต้องเพิ่มขนาดหน้าตัดของโครงสร้าง จึงทำให้มีปริมาณคอนกรีตเพิ่มขึ้น 1.2 เท่า และปริมาณไม้แบบที่ใช้สำหรับก่อสร้างงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 1.05 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ตามลำดับ และจากผลกระทบดังกล่าว ได้แสดงปริมาณวัสดุก่อสร้างในภาพรวมดังแสดงตารางที่ 6 และผลการประมาณราคาค่าก่อสร้างในภาพรวมดังแสดงในตารางที่ 7 ตามลำดับ



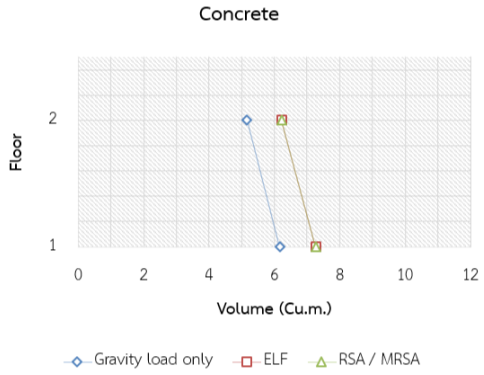
รูปที่ 9 เปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมหลักของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 9 ปริมาณเหล็กเสริมหลักในโครงสร้างอาคาร คสล. 2 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.7 เท่าโดยน้ำหนัก เมื่อเทียบปริมาณเหล็กเสริมหลักในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



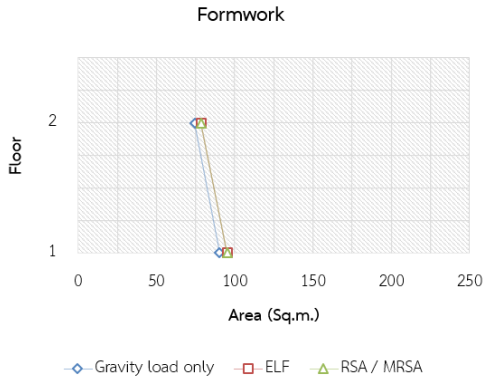
รูปที่ 10 เปรียบเทียบปริมาณเหล็กปลอกของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 10 ปริมาณเหล็กปลอกในโครงสร้างอาคาร คสล. 2 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.23 เท่าโดยน้ำหนัก เมื่อเทียบปริมาณเหล็กปลอกในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 11 เปรียบเทียบปริมาณคอนกรีตของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 11 ปริมาณคอนกรีตของโครงสร้างอาคาร คสล. 2 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.19 เท่าโดยปริมาตร เมื่อเทียบปริมาณคอนกรีตในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 12 เปรียบเทียบปริมาณไม้แบบของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 12 ปริมาณไม้แบบสำหรับโครงสร้างอาคาร คสล. 2 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.05 เท่าโดยพื้นที่ เมื่อเทียบปริมาณในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

อาคาร	Item	Method for Design	
		ELF (%)	RSA / MRSA (%)
2 ชั้น	Main Rebar (Weight)	68%	70%
	Stirrup (Weight)	23%	23%
	Concrete (Volume)	19%	19%
	Formwork (Area)	5%	5%

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่าก่อสร้างส่วนงานโครงสร้าง และเปรียบเทียบกับมูลค่างานทั้งโครงการกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

อาคาร	Description	Estimate Cost (%)
2 ชั้น	ค่าวัสดุ	22%
	ค่าแรง	15%
	รวมค่าวัสดุและค่าแรงส่วนงานโครงสร้าง	20%
	อัตราค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าก่อสร้างทั้งโครงการ	8%

จากตารางที่ 7 แสดงค่าวัสดุก่อสร้าง (เหล็กเสริมคอนกรีต, ไม้แบบ และ คอนกรีต) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณวัสดุก่อสร้างของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวในส่วนของงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 22% ค่าแรงส่วนงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 15% ภาพรวมค่าวัสดุและค่าแรงในหมวดงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 20% และค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบมูลค่าทั้งโครงการ (รวมงานสถาปัตยกรรม, งานระบบ และอื่นๆ) มีมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8% ของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าก่อสร้างโดยรวมของอาคาร คสล. 3 ชั้น

จากการประมาณราคาวัสดุก่อสร้างสำหรับวิเคราะห์อาคาร คสล. 3 ชั้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า องค์อาคารรับแรงดัดทั้งเสา และคาน มีแรงดัดสูงขึ้นมาก และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาและคานมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารไม่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว จากการออกแบบโครงสร้างโดยวิธีกำลัง พบว่า ทำให้มีปริมาณเหล็กเสริมหลัก 1.62 เท่า และเหล็กปลอกในคานและเสามีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.26 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14 ตามลำดับ และจากแรงภายในที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว ทำให้ขนาดของเสา และขนาดของคานต้องเพิ่มขนาดหน้าตัดของโครงสร้าง จึงทำให้มีปริมาณคอนกรีตเพิ่มขึ้น 1.32 เท่า และปริมาณไม้แบบที่ใช้สำหรับก่อสร้างงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 1.15 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ และจากผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวดังกล่าว ได้แสดงปริมาณวัสดุก่อสร้างในภาพรวมดังตารางที่ 8 และผลการประมาณราคาค่าก่อสร้างในภาพรวมดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ขนาดของเสาอาคาร คสล. 3 ชั้น

อาคาร	Descriptions	Result Design		
		Non-EQ.	ELF	RSA / MRSA
ตอม่อ - เสาชั้น 1 อาคาร 3 ชั้น	Column size	0.25x0.25	0.30x0.30	0.30x0.30
	Main Rebar	6–DB 16	6-DB 20	6-DB 20
	Stirrup (l_o)	RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.10 m.	RB 6 mm. @0.10 m.
	Stirrup (H_c - $2l_o$)		RB 6 mm. @0.175 m.	RB 6 mm. @0.175 m.

เสาชั้น 2 อาคาร 3 ชั้น	Column size	0.25x0.25	0.30x0.30	0.30x0.30
	Main Rebar	6–DB 16	6-DB 16	6-DB 16
	Stirrup (l_o)	RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.10 m.	RB 6 mm. @0.10 m.
	Stirrup (H_c - $2l_o$)		RB 6 mm. @0.175 m.	RB 6 mm. @0.175 m.
เสาชั้น 3 อาคาร 3 ชั้น	Column size	0.20x0.20	0.20x0.20	0.20x0.20
	Main Rebar	6–DB 12	8-DB 12	8-DB 12
	Stirrup (l_o)	RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.10 m.	RB 6 mm. @0.10 m.
	Stirrup (H_c - $2l_o$)		RB 6 mm. @0.15 m.	RB 6 mm. @0.15 m.

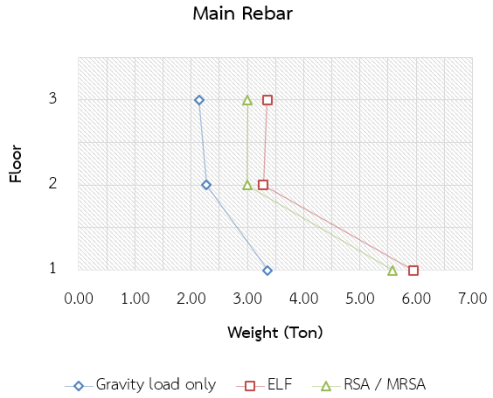
จากตารางที่ 6 โครงสร้างเสา คสล. อาคาร 3 ชั้น ใช้เป็นขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบเดียวกันทั้งอาคาร

ตารางที่ 9 ขนาดของคานอาคาร คสล. 3 ชั้น

Beam Direction		Result Design
Beam X-Y Direction Non-EQ. Mid Span	0.40 0.20	3–DB 12 RB 6 mm.@0.15 m. 2-DB 12 Extra 3-DB 12
Beam X-Y Direction Non-EQ. End Span	0.40 0.20	3–DB 12 2-DB 12 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 12
Beam X-Y Direction ELF Mid Span	0.50 0.25	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16
Beam X-Y Direction ELF End Span	0.50 0.25	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16
Beam X-Y Direction RSA/MRSA Mid Span	0.50 0.25	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16
Beam X-Y Direction RSA/MRSA End Span	0.50 0.25	3–DB 16 RB 6 mm.@0.10 m. 3-DB 16

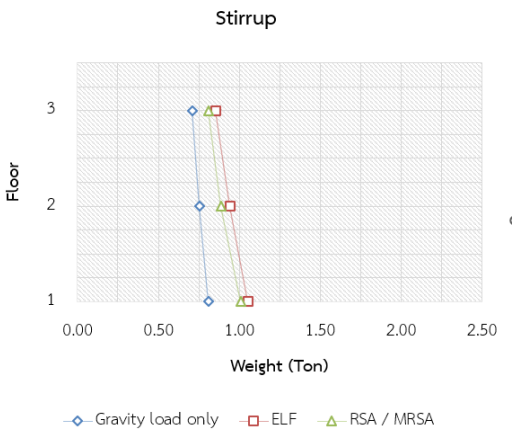
จากตารางที่ 9 โครงสร้างคาน คสล. ใช้เป็นขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบเดียวกันทั้ง ชั้นที่ 1, 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ ของอาคาร คสล. 3 ชั้น

จากการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างแสดงผลการเปรียบเทียบในภาพรวมทั้งอาคารในส่วนของโครงสร้างเสา คาน ที่มีปริมาณที่เปลี่ยนไปจากการออกแบบ ส่วนงานเหล็กเสริมคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 13 ส่วนงานเหล็กปลอกเสาและคาน แสดงดังรูปที่ 14 ส่วนงานคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 15 และส่วนงานไม้แบบ แสดงดังรูปที่ 16



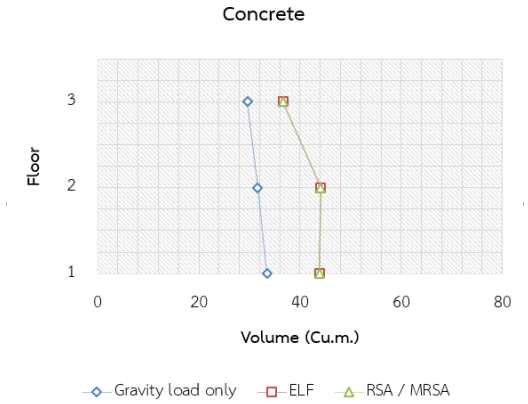
รูปที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมหลักของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 13 ปริมาณเหล็กเสริมหลักในโครงสร้างอาคาร คสล. 3 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลต่างกันประมาณ 10% และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.62 เท่า และ 1.49 เท่าโดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเทียบปริมาณเหล็กเสริมหลักในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



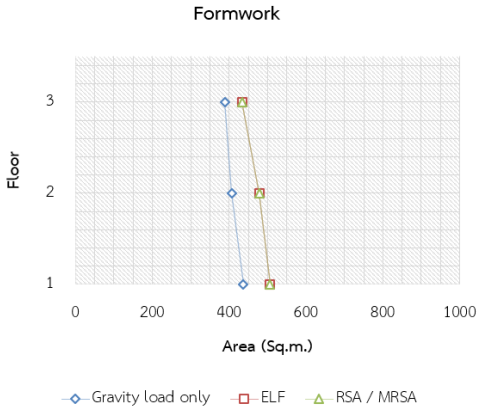
รูปที่ 14 เปรียบเทียบปริมาณเหล็กปลอกของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 14 ปริมาณเหล็กปลอกในโครงสร้างอาคาร คสล. 3 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลต่างกันเพียง 5% และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.19 เท่า และ 1.25 เท่าโดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเทียบปริมาณเหล็กปลอกในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 15 เปรียบเทียบปริมาณคอนกรีตของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 15 ปริมาณเหล็กปลอกในโครงสร้างอาคาร คสล. 3 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.30 เท่าโดยน้ำหนัก เมื่อเทียบปริมาณเหล็กปลอกในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 16 เปรียบเทียบปริมาณไม้แบบของโครงสร้างแต่ละชั้น

จากรูปที่ 16 ปริมาณไม้แบบสำหรับโครงสร้างอาคาร คสล. 3 ชั้น ของการออกแบบโครงสร้างวิธี ELF และ RSA/MRSA ให้ผลใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้น 1.15 เท่าโดยพื้นที่ เมื่อเทียบปริมาณไม้แบบในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบปริมาณวัสดุก่อสร้างเทียบกับอาคารไม่ได้ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

อาคาร	Item	Method for Design	
		ELF (%)	RSA / MRSA (%)
3 ชั้น	Main Rebar (Weight)	62%	49%
	Stirrup (Weight)	26%	19%
	Concrete (Volume)	32%	32%
	Formwork (Area)	15%	15%

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบค่าก่อสร้างส่วนงานโครงสร้างกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

อาคาร	Description	Estimate Cost (%)
3 ชั้น	ค่าวัสดุ	25%
	ค่าแรง	18%
	รวมค่าวัสดุและค่าแรงส่วนงานโครงสร้าง	23%
	อัตราค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นเทียบกับค่าก่อสร้างทั้งโครงการ	10%

จากตารางที่ 11 แสดงค่าวัสดุก่อสร้าง (เหล็กเสริมคอนกรีต, ไม้แบบ และ คอนกรีต) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณวัสดุก่อสร้างของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวในส่วนของงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 25% ค่าแรงส่วนงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 18% ภาพรวมค่าวัสดุและค่าแรงในหมวดงานโครงสร้างเพิ่มขึ้น 23% และค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบมูลค่าทั้งโครงการ (รวมงานสถาปัตยกรรม, งานระบบ และอื่นๆ) มีมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10% ของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว

5. บทสรุป

จากการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.1301/1302-61 [3] ทำให้มีแรงภายในองค์อาคารสูงขึ้นจากผลของการวิเคราะห์ วิธี ELF นั้นให้แรงภายในสูงกว่า วิธี RSA/MRSA สำหรับอาคาร คสล. 2 – 3 ชั้นที่พิจารณา จึงทำให้โครงสร้างอาคาร ต้องขยายขนาดโครงสร้างขึ้น ซึ่งทำให้ราคาค่าก่อสร้างของอาคารเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนี้

1. อาคาร คสล. สูง 2 ชั้น โดยที่ออกแบบอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ เทียบกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีมูลค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้นเป็น 8% เมื่อเทียบกับมูลค่างานก่อสร้างทั้งโครงการ ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2. อาคาร คสล. สูง 3 ชั้น โดยที่ออกแบบอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ เทียบกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีมูลค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้นเป็น 10% เมื่อเทียบกับมูลค่างานก่อสร้างทั้งโครงการ ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

3. ปริมาณเหล็กเสริมหลักที่เพิ่มขึ้นมีผลเนื่องจากแรงดัดในองค์อาคารในแนวดิ่ง และปริมาณเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมาตรฐานการเสริมเหล็กของอาคารให้มีความเหนียวตามมาตรฐานของ มยผ.1301/1302-61 [3] โดยปริมาณเหล็กเสริมหลักในคานไม่ได้มีผลกระทบมากนักเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างได้ทำการขยายหน้าตัดของคานเพื่อให้สามารถต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น อนึ่ง ผลการประมาณราคาค่าก่อสร้างนี้เป็นไปตามขอบเขตของวัสดุสำหรับออกแบบโครงสร้าง หากเปลี่ยนกำลังของวัสดุจะทำให้ผลของการประมาณราคาค่าก่อสร้างเปลี่ยนแปลงได้

6. ข้อเสนอแนะ

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวนั้น วิธีแรงสถิตเทียบเท่าเป็นวิธีการวิเคราะห์ค่อนข้างง่ายในทางปฏิบัติ และเหมาะสำหรับกับอาคารเตี้ย หรืออาคารที่มีความสูงไม่มากนัก เนื่องจากใช้โหมดเดียวในการวิเคราะห์โครงสร้าง ไม่เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากๆ และปัจจุบัน มยผ.1301/1302-61 [3] ยังคงบังคับให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานของอาคารที่ได้จากวิธีตอบสนองแบบโหมด (Response Spectrum Analysis, RSA) ต้องไม่น้อยกว่า 85% ของวิธีสถิตเทียบเท่า (Equivalent Letteral Force, ELF) ซึ่งข้อกำหนดนี้ในมาตรฐาน ASCE 7-16 ได้บังคับให้ใช้ค่าแรงเฉือนที่ฐานของอาคารเป็น 100% ของวิธีสถิตเทียบเท่า (Equivalent Letteral Force, ELF) แล้ว

เอกสารอ้างอิง

[1] กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 เล่ม 138 ตอนที่ 16 ก ราชกิจจานุเบกษา 4 มีนาคม 2564

[2] ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 เล่ม 138 ตอนพิเศษ 275 ง ราชกิจจานุเบกษา 9 พฤศจิกายน 2564

[3] มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 ปี2561 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพ, ประเทศไทย

[4] กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 เล่มที่101 ฉบับพิเศษ ตอนที่143 ราชกิจจานุเบกษา 11 ตุลาคม 2527

[5] อมรชัย ใจยงค์ และชานนท์ กวางเจริญ (2563). การต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2564, หน้า 1266-1274.

[6] อดิเทพ อิศรางกูร ณ อยุทธยา และ ทรงพล จารุวิศิษฏ์ (2564). การเปรียบเทียบปริมาณวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมในการออกแบบอาคารเตี้ยเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวระหว่างอ้างอิงกฎกระทรวงและตามมาตรฐาน มยผ. ตัวใหม่ สำหรับบริเวณ อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี. *การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 10-12 มีนาคม 2564, หน้า 102-109.

[7] Computers and Structures Inc. (2021). Integrated Building Design Software, User's guide ETABS version 19, USA.