

การประยุกต์ใช้เสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงในโครงสร้างที่พักอาศัย

Application of High-Strength Concrete-Filled Steel Tube Columns in Residential Structures

พีรณย์ ลออรอดพงศ์^{1,*} และ ทศพล ปิ่นแก้ว²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: pheeradon.la@gmail.com

บทคัดย่อ

งานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง (High-Strength Concrete-Filled Steel Tube, HSCFST) ในการประยุกต์ใช้กับบ้านพักอาศัย อันเป็นการตอบสนองต่อปัญหาการขาดแคลนแรงงานฝีมือ การเพิ่มขึ้นของค่าแรง และความจำเป็นในการลดระยะเวลาการก่อสร้างและต้นทุน การศึกษาได้พิจารณากรณีบ้านพักอาศัยสูง 3 ชั้น จำนวน 4 หลัง โดยทำการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม ETABS เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการรับแรงในแนวดิ่งและแรงจากแผ่นดินไหวของโครงสร้าง ซึ่งการออกแบบเสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงอ้างอิงมาตรฐาน AISC 360-22 และวิธีการออกแบบแบบ LRFD ผลการออกแบบพบว่าสามารถลดขนาดเสาให้เล็กลงเหลือ 125 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร เพื่อให้มีขนาดไม่เกินความหนาของผนังบ้านได้เมื่อใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 60 เมกะปาสกาล ร่วมกับเสาเหล็กกล่องชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยโครงสร้างที่ได้ออกแบบทั้ง 4 หลัง พบว่ามีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกและแรงแผ่นดินไหวดีกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเดิมในทุกด้าน ทั้งยังพบว่ามีต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง, บ้านพักอาศัย, แรงแผ่นดินไหว

Abstract

This study aims to investigate and evaluate the efficiency of high-strength concrete-filled steel tube (HSCFST) structures for residential applications. It addresses challenges such as the shortage of skilled labor, rising labor costs, and the need to reduce construction time and expenses. The study examines four three-story residential buildings by modeling their structures using ETABS software to analyze their vertical and seismic load-bearing behavior. The design of the HSCFST columns follows the AISC 360-22 standard and the Load and Resistance Factor Design (LRFD) method. The design results indicate that the column size can be reduced to 125 mm and 150 mm, ensuring that the column dimensions do not exceed the wall thickness by using concrete with a compressive strength exceeding 60 MPa in combination with commercially available steel tubes. The analysis of all four buildings demonstrates that the designed structures exhibit superior load-bearing and seismic performance compared to conventional reinforced concrete

structures in all aspects. Furthermore, the findings reveal that HSCFST columns significantly reduce construction costs compared to reinforced concrete columns.

Keywords: High-strength concrete-filled steel tube, Residential house, Seismic load

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมก่อสร้างโดยเฉพาะในภาคที่พักอาศัยกำลังเผชิญกับความท้าทายหลายประการ ทั้งปัญหาการขาดแคลนแรงงานฝีมือ การเพิ่มขึ้นของค่าแรง และความจำเป็นในการเร่งระยะเวลาการก่อสร้างเพื่อลดต้นทุนและตอบสนองความต้องการที่พักอาศัยในพื้นที่เมืองใหญ่ที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ความคาดหวังของผู้บริโภคที่สูงขึ้นทั้งในด้านคุณภาพ ความแข็งแรง และความทนทานของที่อยู่อาศัย ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบต้องมองหาเทคโนโลยีการก่อสร้างที่สามารถตอบโจทย์ได้อย่างครอบคลุม เสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง (High-Strength Concrete-Filled Steel Tube, HSCFST) จึงกลายมาเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในแวดวงการก่อสร้าง ด้วยคุณสมบัติที่ผสานความแข็งแรงของคอนกรีตเข้ากับเสาเหล็กที่มีความเหนียวสูง ช่วยเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้างและตอบสนองต่อความต้องการด้านความเร็วในการก่อสร้างได้อย่างลงตัว

โครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดปริมาณแรงงานในหน้างานและทำให้กระบวนการก่อสร้างมีความคล่องตัวมากขึ้น เนื่องจากเสาเหล็กกล่องทำหน้าที่เป็นแบบหล่อคอนกรีตในตัว จึงไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งหรือถอดแบบหล่อเพิ่มเติม ทำให้ลดขั้นตอนที่ซับซ้อนและประหยัดเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การไม่ต้องใช้เหล็กเสริมยังช่วยลดขั้นตอนการวางและผูกเหล็ก ซึ่งเป็นงานที่ต้องใช้ทั้งแรงงานและเวลาอย่างมาก ข้อดีอีกประการของโครงสร้างเสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงคือช่วยเพิ่มพื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร เนื่องจากเสาและคานที่ใช้เสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตมีขนาดเล็กกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม ทำให้สามารถออกแบบพื้นที่ภายในให้ใช้งานได้เต็มที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้การใช้สอยพื้นที่มีความคุ้มค่าและเหมาะสม นอกจากนี้ โครงสร้างเสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงยังมีความทนทานต่อแรงกระทำภายนอก เช่น แรงแผ่นดินไหวและแรงลม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างที่พักอาศัยที่มีความปลอดภัยสูง ด้วยคุณสมบัติของเสาเหล็กกล่องที่ช่วยดูดซับแรงกระแทกและเพิ่มความยืดหยุ่น ขณะที่คอนกรีตภายในเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างทนทานต่อการกดทับได้ดี

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างเสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงยังมีข้อเสียบางประการ เช่น ความสามารถในการทนไฟที่จำกัด เนื่องจากเมื่อ

เกิดเพลิงไหม้ ความร้อนจะส่งผ่านเหล็กอย่างรวดเร็ว ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสื่อมลง ส่งผลให้โครงสร้างอาจเสียความสามารถในการรับน้ำหนักได้ในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ วัสดุองค์ประกอบของโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงยังมีราคาที่สูงกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งอาจทำให้ต้นทุนการก่อสร้างสูงขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ในโครงการขนาดเล็กหรือที่พักอาศัยทั่วไป

ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างที่พักอาศัย โดยเฉพาะในด้านการหาต้นทุนโดยรวม และการยกระดับความปลอดภัยของที่พักอาศัย การศึกษานี้จะเป็นการขยายขอบเขตความรู้ในด้านการใช้เหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงในโครงสร้างที่พักอาศัยขนาดเล็ก ซึ่งปัจจุบันยังมีการวิจัยไม่มากนักเมื่อเทียบกับโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูงและสะพาน เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาศึกษาตัวอย่างบ้านพักอาศัย 3 ชั้น จากโครงการแบบบ้านยืมเพื่อประชาชน ระยะที่ 3 ของสำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร ก่อสร้างเสาและคานด้วยเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง แล้วทำการวิเคราะห์ห่อแบบโครงสร้างตามกฎหมายควบคุมอาคารและมาตรฐานโครงสร้างวัสดุผสม AISI 360-22 ด้วยวิธีการออกแบบแบบ LRFD โดยใช้โปรแกรม ETABS

2. เสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง

2.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน AISI 360-22 [1] เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างเหล็ก รวมถึงการออกแบบองค์อาคารวัสดุผสมไว้หลายประเภท แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงเฉพาะการคำนวณกำลังเสาเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงที่มีหน้าตัดอัดแน่นด้วยวิธีการออกแบบแบบ LRFD

2.1.1 กำลังรับแรงอัดสำหรับองค์อาคารหน้าตัดอัดแน่น

สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงอัดตามการออกแบบ (Design Compressive Strength, $\phi_c P_n$) จะมีการพิจารณา 2 ส่วน คือ การคำนวณกำลังของหน้าตัดและการคำนวณกำลังที่พิจารณาการโก่งเดาะ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

$$\phi_c = 0.75$$

$$P_{no} = F_y A_s + 0.85 f'_c (A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c}) \quad (1)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{L_c^2} \quad (2)$$

$$(EI)_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_3 E_c I_c \quad (3)$$

$$C_3 = 0.45 + 3 \left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g} \right) \leq 0.9 \quad (4)$$

$$\frac{P_{no}}{P_e} \leq 2.25$$

$$P_n = P_{no} (0.658 \frac{P_{no}}{P_e}) \quad (5)$$

$$\frac{P_{no}}{P_e} > 2.25$$

$$P_n = 0.877 P_e \quad (6)$$

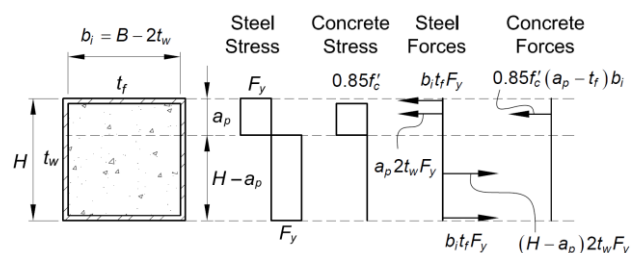
โดย ϕ_c คือ ตัวคูณลดกำลัง, P_{no} คือ กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนระบุ, P_e คือ กำลังรับแรงอัดวิกฤตการโก่งตัวในสภาวะยืดหยุ่น, F_y คือ หน่วยแรงครากของเหล็ก, f'_c คือ หน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กกล่อง, A_{sr} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต, A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด, E_s คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก, E_c คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต, $(EI)_{eff}$ คือ ความต้านทานแรงดัดของหน้าตัดเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีต, C_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณความต้านทานแรงดัด, I_c คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีต, I_s คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเหล็กกล่อง, I_{sr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเหล็กเสริม และ L_c คือ ความยาวประสิทธิผลขององค์อาคาร

2.1.2 กำลังรับแรงดัดสำหรับองค์อาคารหน้าตัดอัดแน่น

มาตรฐาน AISI 360-22 [1] จะไม่ได้ให้สมการคำนวณการรับแรงดัดตามการออกแบบ (Design Flexural Strength, $\phi_b M_n$) ไว้โดยตรง แต่จะให้เป็นรูปแสดงบล็อกหน่วยแรงและตำแหน่งบล็อกดังรูปที่ 1 จากนั้นสามารถนำมาคำนวณหาค่า M_p ได้

$$\phi_b = 0.90 \quad (7)$$

$$M_n = M_p \quad (8)$$



$$\text{Neutral axis location for force equilibrium: } a_p = \frac{2F_y H t_w + 0.85 f'_c b_f t_f}{4t_w F_y + 0.85 f'_c b_f}$$

(a) Compact composite section—stress blocks for calculating M_p

รูปที่ 1 วัสดุผสมหน้าตัดอัดแน่น-บล็อกหน่วยแรงที่ใช้ในการคำนวณ

โดย M_p คือ โมเมนต์ที่สอดคล้องกับการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกทั่วหน้าตัด

2.1.3 สมการปฏิสัมพันธ์สำหรับองค์อาคารรับแรงผสม

สมการปฏิสัมพันธ์เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมในการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดัดสำหรับองค์อาคารวัสดุผสม โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{P_r}{P_c} < 0.2$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (11)$$

โดย M_r คือ กำลังรับแรงดัดที่ต้องการ, M_c คือ กำลังรับแรงดัดที่สามารถรับได้, P_r คือ กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ, P_c คือ กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้, x คือ สัญลักษณ์ตัวห้อยสำหรับการดัดรอบแกนหลัก และ y คือ สัญลักษณ์ตัวห้อยสำหรับการดัดรอบแกนรอง

2.2 อัตราส่วนแรงภายในต่อกำลังต้านทานที่รับได้ขององค์อาคาร

อัตราส่วนระหว่างแรงที่เกิดขึ้นจริงในองค์อาคารกับกำลังต้านทานสูงสุดขององค์อาคาร คือ DCR โดยหากค่า DCR น้อยกว่า 1.0 แสดงว่าโครงสร้างมีกำลังต้านทานที่เพียงพอ แต่ถ้าหากค่า DCR มากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 แสดงว่าโครงสร้างอาจไม่สามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้และมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหาย หากพิจารณาองค์อาคารรับแรงอัดหรือแรงดัด อย่างใดอย่างหนึ่งให้คำนวณ DCR จากสมการ (12) แต่ถ้าพิจารณาองค์อาคารรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน DCR ต้องคำนวณจากหัวข้อ 2.1.3

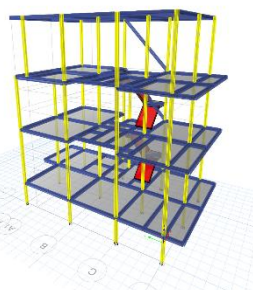
$$DCR = \frac{\text{Demand}}{\text{Capacity}} \quad (12)$$

โดยที่ DCR คือ อัตราส่วนแรงภายในต่อกำลังต้านทานขององค์อาคาร, Demand คือ แรงภายในที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร และ Capacity คือ กำลังต้านทานที่รับได้ขององค์อาคาร

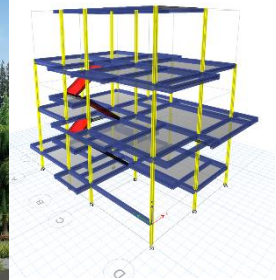
3. การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างบ้านตัวอย่าง

3.1 บ้านตัวอย่าง

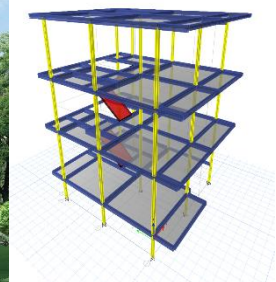
บ้านพักอาศัยตัวอย่างที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มาจากโครงการแบบบ้านยืมเพื่อประชาชน ระยะที่ 3 ของสำนักงานโยธากรุงเทพมหานคร ซึ่งจะเลือกศึกษาบ้านพักอาศัยตัวอย่าง 3 ชั้น จำนวน 4 แบบ ได้แก่ บ้านเสลา บ้านแสนสาร บ้านหยาดน้ำค้าง และบ้านหางนกยูง โดยนำมาสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ETABS ดังรูปที่ 2 3 4 และ 5 ตามลำดับ



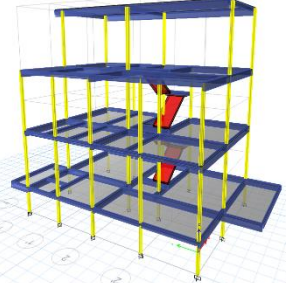
รูปที่ 2 รูปและแบบจำลองบ้านเสลา [2]



รูปที่ 3 รูปและแบบจำลองบ้านแสนสาร [2]



รูปที่ 4 รูปและแบบจำลองบ้านหยาดน้ำค้าง [2]



รูปที่ 5 รูปและแบบจำลองบ้านหางนกยูง [2]

3.2 การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างเหล็กกล่องเดิมคอนกรีตกำลังสูง

3.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยตรง (Direct Analysis Method, DAM)

วิธีการวิเคราะห์โดยตรงเป็นแนวทางที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเหล็กหรือโครงสร้างวัสดุผสมโดยคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างโดยตรง โดยมีองค์ประกอบหลัก 4 ประการ ได้แก่ การวิเคราะห์อิลาสติกลำดับสอง (P-Δ effect), การคำนึงถึงผลของความไม่สมบูรณ์แบบ, การปรับลดค่าสติฟเนสของโครงสร้าง และการละเว้นค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพ ($K=1$) [1]

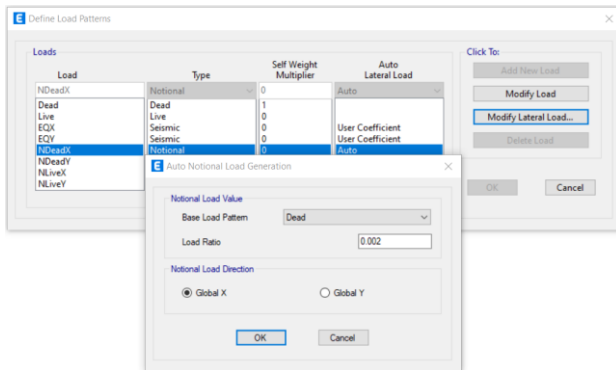
การคำนึงถึงผลของความไม่สมบูรณ์แบบ เป็นการนำปัจจัยที่พบบ่อยมาใช้ในการวิเคราะห์ตั้งแต่เริ่มต้น เช่น ความไม่ตรงขององค์อาคาร (Member out-of-Straightness) และความเอียงของชั้นอาคาร (Story out-of-Plumbness) โดยหนึ่งในแนวทางที่ใช้สะท้อนผลของความไม่สมบูรณ์นี้คือแรงเสมือนในแนวนอน (Notional Load)

การปรับลดค่าสติฟเนสของโครงสร้าง เนื่องจากความเค้นคงค้าง (Residual Stress) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็ก ซึ่งความเค้นคงค้างจะมีค่าไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดทำให้มีหน้าตัดบางจุดถึงจุดครากก่อนจุดอื่นๆ นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงผลการแตกร้าวของคอนกรีตด้วย โดยจะมีการปรับลดค่าสติฟเนสดังสมการ (13) และ (14)

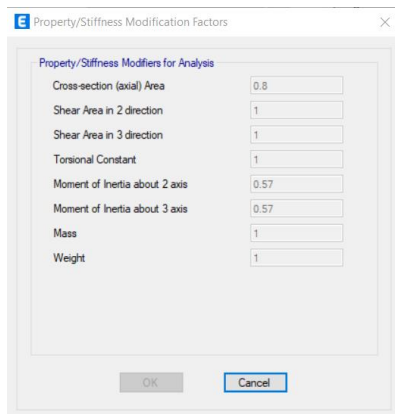
$$EI^* = 0.64(EI)_{eff} \quad (13)$$

$$EA^* = 0.8(E_s A_s + E_s A_{sr} + E_c A_c) \quad (14)$$

โดย $(EI)_{eff}$ คือ ความต้านทานแรงดัดของหน้าตัดเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตดัดสมการ (4)



รูปที่ 6 การสร้างแรงเสมือนในโปรแกรม ETABS



รูปที่ 7 ตัวอย่างการปรับลดค่าสติฟเนสของหน้าตัดในโปรแกรม ETABS

3.2.2 ข้อมูลวัสดุและหน้าตัด

การศึกษานี้จะทำการปรับเปลี่ยนระบบเสาคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบไว้เดิม มาเป็นระบบเสาคานเหล็กกล่องเติมคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล่องที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.107 [3] เกรด STKR490 ซึ่งจะมีค่าหน่วยแรงครากขั้นต่ำเท่ากับ 325 เมกะปาสคาล และพิจารณาใช้คอนกรีตกำลังสูงที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับ 60 เมกะปาสคาล และ 24 เมกะปาสคาล เติมนิส่วนของเหล็กกล่องเสาคานตามลำดับ โดยหน้าตัดเสาที่ใช้จะขนาด 125 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร

3.2.3 ระบบโครงสร้างและประเภทความสำคัญของอาคาร

ระบบโครงสร้างของบ้านตัวอย่างมีสมมติฐานให้เป็นระบบโครงต้านแรงดัดวัสดุผสมระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่มีความเหนียวปานกลาง (Steel and Concrete Composite Intermediate Moment Frame) ตามมาตรฐาน ASCE 7-22 [4] ซึ่งมีค่าตัวประกอบที่สำคัญดังนี้ $R = 5$, $\Omega_0 = 3$, $C_d = 4.5$ และ $I = 1$

โดยที่ R คือ ค่าตัวประกอบปรับลดผลตอบสนอง, Ω_0 คือ ค่าตัวประกอบกำลังส่วนเกิน, C_d คือ ค่าตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว และ I คือ ค่าตัวประกอบความสำคัญ

3.3 การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างบ้าน

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างบ้านด้วยโปรแกรม ETABS จะทำการประเมินสมรรถนะจากอัตราส่วนแรงภายในต่อกำลังต้านทานขององค์อาคาร (DCR) ซึ่งค่ากำลังต้านทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะคำนวณจากมาตรฐาน ACI 318-08 [5] ที่มีการปรับค่าตัวคูณลดกำลังให้เป็นไปตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 [6] และในส่วนของค่ากำลังต้านทานของโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงจะคำนวณจากมาตรฐาน AISC 360-22 [1]

3.3.1 สมรรถนะของโครงสร้างบ้านภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามแนวดิ่ง

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างบ้านภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง เป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบสมรรถนะเบื้องต้นก่อนการออกแบบโครงสร้างต้านแรงแผ่นดินไหว กระบวนการนี้ช่วยยืนยันว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักและรักษาเสถียรภาพในสภาวะการใช้งานปกติ ดังนั้นจึงใช้สมการรวมแรงกรณี 1.4D + 1.7L ในการประเมิน [7-9]

3.3.2 สมรรถนะของโครงสร้างบ้านภายใต้แผ่นดินไหว

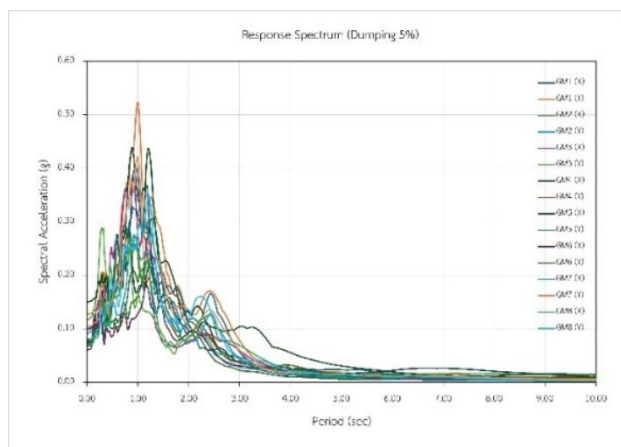
การประเมินสมรรถนะโครงสร้างบ้านภายใต้แผ่นดินไหวจะทำการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์แบบประวัติเวลาเชิงเส้น ตามมยผ. 1301/1302-61 [7] ด้วยชุดข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินตามแนวทางเลือกใหม่ (Alternative Ground Motion) โดยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินเพื่อการออกแบบอาคารของกรมโยธาธิการและผังเมือง เลือกใช้เฉพาะกลุ่มคลื่นแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะทำให้โครงสร้างมีการตอบสนองที่วิกฤตที่สุดของพื้นที่โซน 5 จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยพิจารณาจากคาบธรรมชาติของบ้านพักอาศัยตัวอย่างที่ทั้งหมดจะมีคาบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.49 ถึง 1.16 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นจึงเลือกใช้แผ่นดินไหวที่มีคาบการสั่นไหวเท่ากับ 0.5 และ 1.0 วินาที จำนวนอย่างละ 4 คู่คลื่น ดังแสดงในรูปที่ 8

สำหรับความรุนแรงของแผ่นดินไหว วิทยานิพนธ์นี้มีสมมติฐานเลือกใช้แรงแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาในการออกแบบ (Maximum Considered Earthquake, MCE) สำหรับการพิจารณาแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) และใช้สมการการรวมแรงกรณี $0.75(1.4D + 1.7L) \pm 1.0E$ และ $0.9D \pm 1.0E$ ในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง [7-9]

โดย E คือ ผลที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว (Seismic Load Effects), D คือ ผลที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load), L คือ ผลที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

ตารางที่ 1 คาบธรรมชาติการสั่นไหวของแต่ละโครงสร้างบ้านพักอาศัย

แบบบ้าน	Modal direction	Period (sec)	
		RC	HCFST
บ้านเสลา	X	0.72	1.07
	Y	0.54	0.81
บ้านแสนสาร	X	0.55	0.74
	Y	0.49	0.66
บ้านหยาดน้ำค้าง	Y	0.84	1.16
	X	0.58	0.78
บ้านทางนกยูง	X	0.85	1.01
	Y	0.78	0.98



รูปที่ 8 สเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างบ้านภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามแนวดิ่ง

จากการวิเคราะห์บ้านตัวอย่างทั้ง 4 หลัง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามแนวดิ่ง (1.4D + 1.7L) แล้วนำค่า DCR สูงสุดและค่า DCR เฉลี่ยของเสากับคานในแต่ละชั้นมาแสดงดังตารางที่ 2-5 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) และโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูง (HSCFST) พบว่าเสาคานส่วนใหญ่ของโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงมีค่า DCR สูงสุดและค่า DCR เฉลี่ยในแต่ละชั้นต่ำกว่าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับทุกแบบบ้าน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้น้ำหนักบรรทุกของบ้านเสา

Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.75	0.54	0.50	0.40
	Beam	0.62	0.44	0.33	0.23
Story 1	Column	0.64	0.54	0.42	0.38
	Beam	0.57	0.55	0.31	0.23
Story 2	Column	0.69	0.53	0.42	0.35
	Beam	0.73	0.54	0.35	0.26
Story 3	Column	0.53	0.40	0.31	0.23
	Beam	0.37	0.28	0.24	0.14
Average	Column	0.65	0.50	0.41	0.34
	Beam	0.57	0.45	0.31	0.22

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้น้ำหนักบรรทุกของบ้านแสมสาร

Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.80	0.72	0.59	0.51
	Beam	0.35	0.34	0.19	0.17
Story 1	Column	0.91	0.80	0.59	0.51
	Beam	0.61	0.51	0.23	0.18
Story 2	Column	0.95	0.57	0.61	0.41
	Beam	0.45	0.50	0.21	0.17
Story 3	Column	0.95	0.57	0.73	0.45
	Beam	0.80	0.37	0.49	0.22
Average	Column	0.90	0.66	0.63	0.47
	Beam	0.55	0.43	0.28	0.19

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้น้ำหนักบรรทุกของบ้านหาดน้ำค้าง

Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.61	0.77	0.51	0.50
	Beam	0.47	0.43	0.23	0.19
Story 1	Column	0.87	0.67	0.60	0.53
	Beam	0.48	0.40	0.24	0.19
Story 2	Column	0.69	0.49	0.54	0.40
	Beam	0.46	0.39	0.24	0.20
Story 3	Column	0.62	0.37	0.38	0.23
	Beam	0.40	0.32	0.21	0.15
Average	Column	0.70	0.58	0.51	0.42
	Beam	0.45	0.39	0.23	0.18

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้น้ำหนักบรรทุกของบ้านหางนกยูง

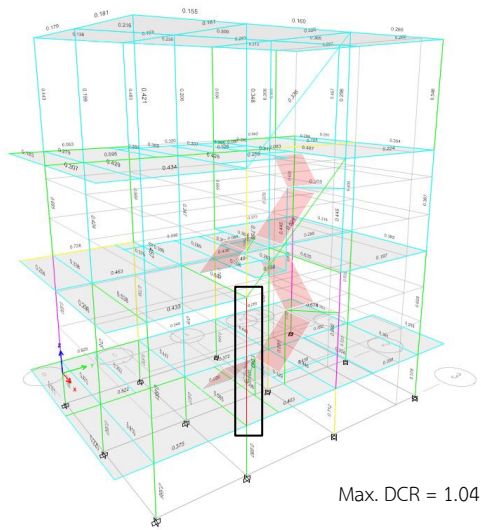
Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.86	0.74	0.58	0.39
	Beam	0.40	0.33	0.19	0.19
Story 1	Column	1.20	0.70	0.79	0.38
	Beam	0.40	0.53	0.25	0.24
Story 2	Column	1.16	0.53	0.76	0.31
	Beam	0.80	0.44	0.25	0.20
Story 3	Column	1.01	0.46	0.78	0.42
	Beam	0.49	0.40	0.30	0.24
Average	Column	1.06	0.61	0.73	0.38
	Beam	0.52	0.43	0.25	0.22

แต่จากตารางที่ 3 4 และ 5 จะมีคานชั้น 2 ของบ้านแสมสาร เสาชั้นตอม่อของบ้านหาดน้ำค้าง และคานชั้น 1 ของบ้านหางนกยูง ตามลำดับ ที่มีค่า DCR สูงสุดไม่ได้เป็นตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้า แม้จะเป็นเช่นนั้น แต่เมื่อลองเปรียบเทียบค่า DCR เฉลี่ยในชั้นนั้นๆ หรือค่า DCR สูงสุดเฉลี่ยทุกชั้นจะพบว่าโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงยังคงมีสมรรถนะที่สูงกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

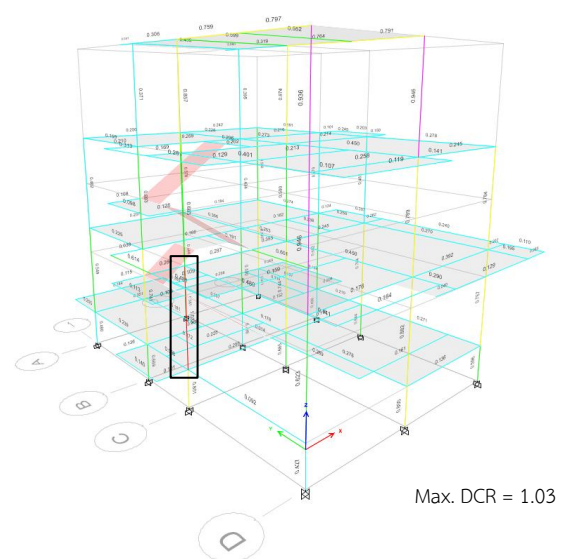
จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกบ้านหางนกยูงที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีค่า DCR สูงสุดมากกว่า 1 ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างมีความเสี่ยงที่จะเกิดการพังเสียหาย แต่ไม่ได้หมายความว่าผู้ออกแบบบ้านหลังนี้ออกแบบผิดแต่อย่างใด อาจเกิดจากการใช้สมมติฐานหรือมาตรฐานในการออกแบบที่แตกต่างกัน

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างบ้านภายใต้แรงแผ่นดินไหว

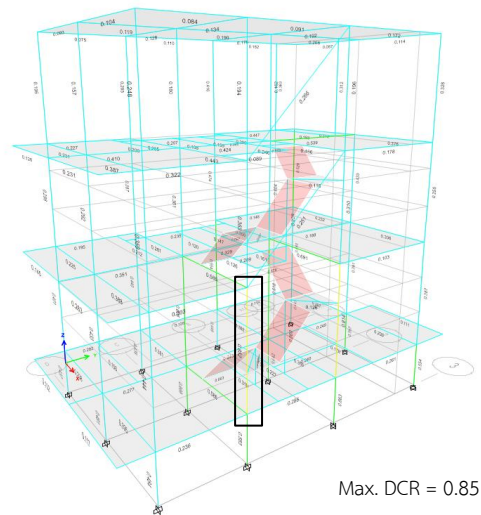
จากการวิเคราะห์บ้านตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวด้วยสมการการรวมแรงกรณี $0.75(1.4D + 1.7L) \pm 1.0E$ และ $0.9D \pm 1.0E$ พบว่าการอภิปรายผลจะคล้ายกับการวิเคราะห์ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกตามแนวดิ่ง แต่จะแตกต่างตรงที่ค่า DCR ของทุกโครงสร้างจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และค่า DCR สูงสุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเริ่มมีค่ามากกว่า 1 ในทุกแบบบ้าน ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัยเมื่อต้องรับมือกับแผ่นดินไหว ในขณะที่โครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่า DCR สูงสุดไม่เกิน 0.85 สำหรับทุกแบบบ้าน จึงกล่าวได้ว่าโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงสามารถรับมือกับแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 9-16 และแสดงเป็นตัวเลขเปรียบเทียบดังตารางที่ 6-9



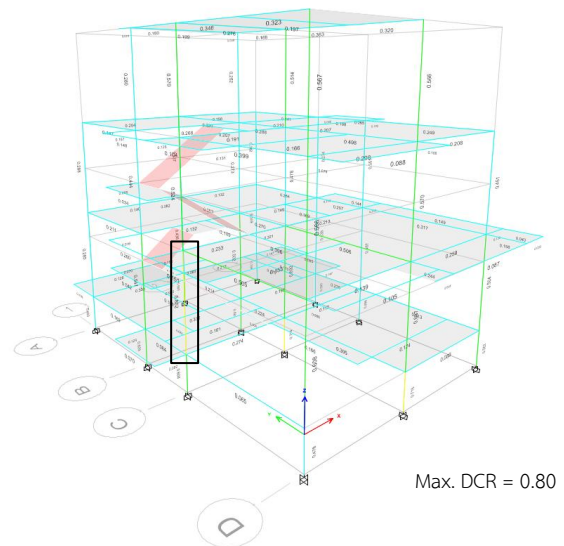
รูปที่ 9 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านเสลาแบบ RC



รูปที่ 11 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านแสมสารแบบ RC



รูปที่ 10 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านเสลาแบบ HSCFST



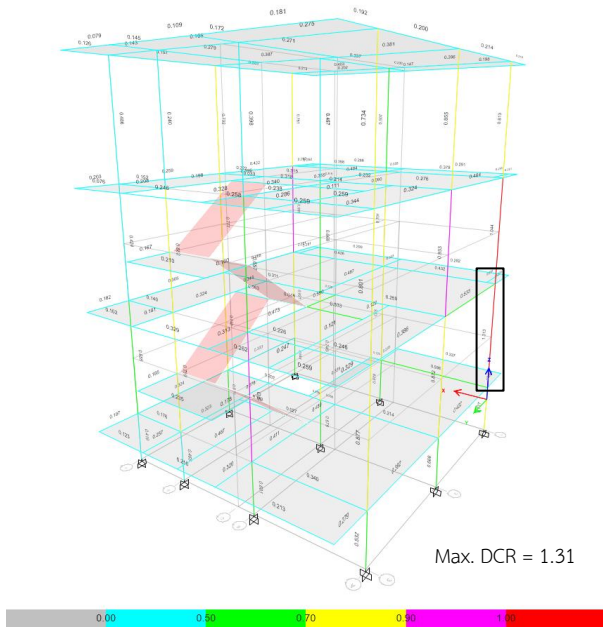
รูปที่ 12 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านแสมสารแบบ HSCFST

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวบ้านเสลา

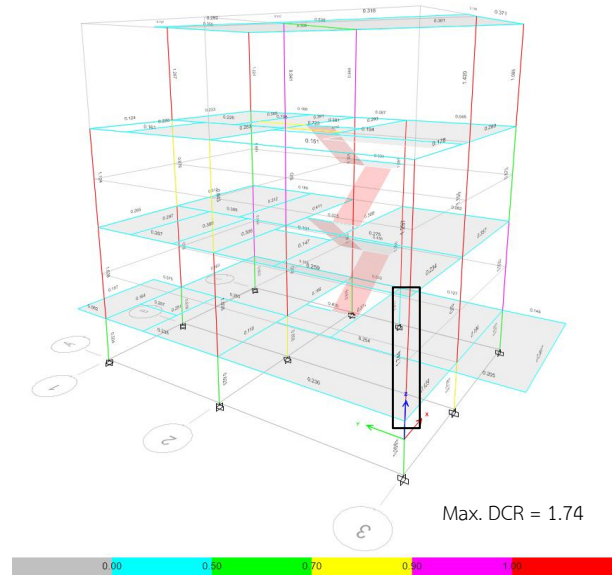
Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.75	0.67	0.60	0.53
	Beam	0.63	0.59	0.38	0.25
Story 1	Column	1.04	0.85	0.73	0.53
	Beam	0.73	0.69	0.38	0.27
Story 2	Column	0.76	0.53	0.51	0.36
	Beam	0.73	0.54	0.37	0.26
Story 3	Column	0.64	0.42	0.40	0.25
	Beam	0.37	0.26	0.24	0.14
Average	Column	0.80	0.62	0.56	0.42
	Beam	0.61	0.52	0.34	0.23

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวบ้านแสมสาร

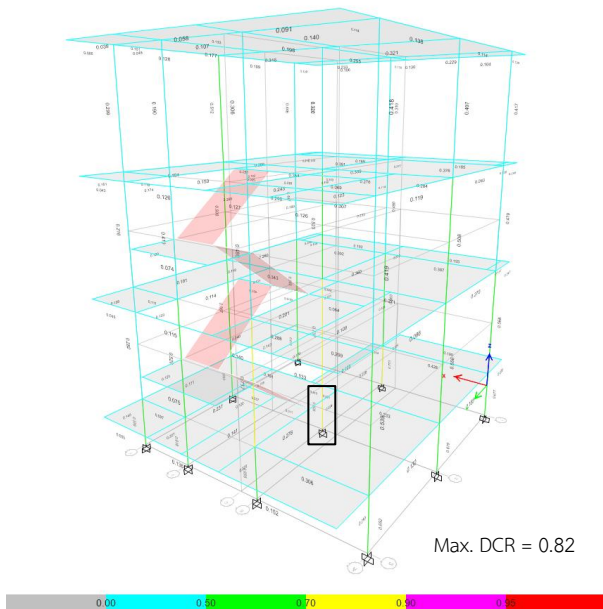
Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.80	0.72	0.59	0.54
	Beam	0.35	0.34	0.20	0.17
Story 1	Column	1.03	0.80	0.70	0.52
	Beam	0.61	0.51	0.24	0.19
Story 2	Column	0.95	0.57	0.62	0.41
	Beam	0.45	0.50	0.21	0.17
Story 3	Column	0.95	0.57	0.73	0.46
	Beam	0.80	0.37	0.49	0.22
Average	Column	0.93	0.66	0.66	0.48
	Beam	0.55	0.43	0.29	0.19



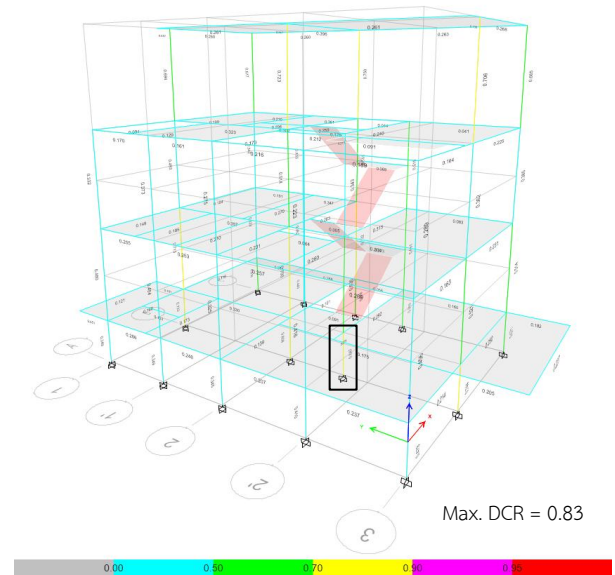
รูปที่ 13 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านหยาดน้ำค้างแบบ RC



รูปที่ 15 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านทางนกยูงแบบ RC



รูปที่ 14 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านหยาดน้ำค้างแบบ HSCFST



รูปที่ 16 สมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านทางนกยูงแบบ HSCFST

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านหยาดน้ำค้าง

Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.78	0.82	0.60	0.67
	Beam	0.60	0.46	0.29	0.24
Story 1	Column	1.31	0.74	0.85	0.57
	Beam	0.59	0.53	0.29	0.23
Story 2	Column	1.04	0.52	0.79	0.45
	Beam	0.48	0.39	0.26	0.21
Story 3	Column	0.86	0.51	0.60	0.37
	Beam	0.40	0.32	0.22	0.15
Average	Column	1.00	0.65	0.71	0.52
	Beam	0.52	0.43	0.27	0.21

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้แรงแผ่นดินไหวของบ้านทางนกยูง

Story	Type	Max DCR		Average DCR	
		RC	HSCFST	RC	HSCFST
Story 0	Column	0.86	0.83	0.62	0.56
	Beam	0.40	0.34	0.20	0.21
Story 1	Column	1.74	0.73	1.25	0.53
	Beam	0.44	0.53	0.27	0.25
Story 2	Column	1.30	0.56	1.00	0.40
	Beam	0.80	0.44	0.26	0.21
Story 3	Column	1.42	0.76	1.15	0.71
	Beam	0.49	0.40	0.30	0.24
Average	Column	1.33	0.72	1.00	0.55
	Beam	0.53	0.43	0.26	0.23

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

แบบบ้าน	Inelastic Max. Story Drift	
	RC	HSCFST
บ้านเสลา	0.01	0.02
บ้านแสงสาร	0.01	0.01
บ้านหยาดน้ำค้าง	0.02	0.02
บ้านหางนกยูง	0.02	0.02

จากการวิเคราะห์โครงสร้างบ้านภายใต้แรงแผ่นดินไหว พบว่าทั้งระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและระบบโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงมีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างชั้นต่ำกว่าหรือเท่ากับค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้มีค่าเท่ากับ 0.02 ตามมาตรฐาน มยพ. 1301/1302-61 [7]

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุและค่าแรงการก่อสร้าง

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบต้นทุนวัสดุและค่าแรงการก่อสร้าง

แบบบ้าน	Type	Cost (Baht)		
		RC	HSCFST	% Diff
บ้านเสลา	Column	91,304	84,420	-7.54%
	Beam	256,371	193,773	-24.42%
	Total	347,675	278,192	-19.99%
บ้านแสงสาร	Column	64,037	59,651	-6.85%
	Beam	318,905	289,032	-9.37%
	Total	382,942	348,684	-8.95%
บ้านหยาดน้ำค้าง	Column	69,132	66,273	-4.14%
	Beam	278,550	223,906	-19.62%
	Total	347,682	290,179	-16.54%
บ้านหางนกยูง	Column	64,437	110,415	71.35%
	Beam	453,056	374,705	-17.29%
	Total	517,493	485,120	-6.26%

จากตารางที่ 11 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุและค่าแรงการก่อสร้างพบว่าโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงมีต้นทุนรวมที่ถูกกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทุกแบบบ้าน แต่จะสังเกตเห็นว่าบ้านหางนกยูงเสาโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงจะมีต้นทุนที่สูงกว่าเสาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่มาก เนื่องจากแบบโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงของบ้านหางนกยูงมีการเพิ่มจำนวนเสาและฐานรากให้มากขึ้นแต่ปลอดภัยตามเกณฑ์เพื่อให้ได้ต้นทุนรวมที่ถูกลง

5. สรุปผล

การออกแบบโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงให้มีขนาดเสาเล็กเล็กลง 125 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร เพื่อให้มีขนาดไม่เกินความหนาของผนังบ้านเมื่อใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 60 เมกะปาสกาล ร่วมกับเหล็กกล่องชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จากผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างเหล็กกล่องเติมด้วยคอนกรีตกำลังสูงที่ได้ออกแบบทั้ง 4 หลัง มีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกและแรงแผ่นดินไหว

ดีกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเดิมในทุกด้าน ทั้งยังพบว่าต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว ที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และแนวทางในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาของการดำเนินงาน จนทำให้บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท เอ็นจิเนียริง เอ็กซ์เพิร์ท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุน เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่จำเป็นในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนให้ความร่วมมือและเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] AISC 360-22. (2022). Specification for structural steel buildings. *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL, USA.
- [2] ทวีศักดิ์ เลิศประพันธ์ และคณะ. (2557). โครงการแบบบ้านยั่งยืนเพื่อประชาชน ระยะที่ 3. *สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร*.
- [3] มอก. 107-2561. (2561). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป. *สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร.
- [4] ASCE 7-22. (2022). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. *American Society of Civil Engineers*. USA
- [5] ACI 318-08. (2008). Building code requirements for structural concrete and commentary. *American Concrete Institute*. USA.
- [6] วสท. 1008-38. (2538). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. *วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย*. กรุงเทพมหานคร.
- [7] มยพ. 1301/1302-61. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. *กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย*. กรุงเทพมหานคร.
- [8] กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. ๒๕๖๔. (2564). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม ๑๓๘ ตอนที่ ๑๖ ก หน้า ๑๓-๑๘.
- [9] กฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. ๒๕๖๖. (2566). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม ๑๔๐ ตอนที่ ๕๔ ก หน้า ๔-๒๐.