การออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวขั้นเบื้องต้น

Perliminary Seismic Design of Buildings

ไพบูลย์ ปัญญากะโห *

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวขั้นเบื้องต้น สำหรับโครงสร้างปกติทั่วไปที่ผังอาคารมีความสมมาตร โดยจะต้องมีการตรวจสอบหาค่าความปลอดภัยของโครงสร้างอาคาร อันประกอบด้วย การตรวจสอบค่าระยะโยกตัวในแต่ละระดับชั้นของอาคาร การตรวจสอบค่าความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำของอาคารและการตรวจสอบผลกระทบของโมเมนต์ลำดับสอง อันเนื่องมาจากน้ำหนักกระทำลงสู่เสาเยื้องศูนย์ไปจากแนวดิ่ง ขั้นตอนเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญ เพื่อที่จะทราบว่าอาคารมีรูปทรง สัดส่วนที่ดีพอเหมาะที่จะทำให้มีเสถียรภาพต่อแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ก่อนที่จะดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบในขั้นรายละเอียดต่อไป

Abstract

The preliminary seismic design of buildings is presented in this paper. For typical structures that are symmetric in plan view, stability of structures must be evaluated. This procedure includes the evaluation of story drift, safety factor against overturning, and the effect of secondary moment (P-delta effect). This is an important step for the evaluation of stability of buildings to resist the lateral force due to an earthquake.

บทนำ

แม้ว่าในปัจจุบันนี้ จะมีกฎหมายเกี่ยวกับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว คือ กฎกระทรวง ฉบับที่ 49 (เสรี 2541) ซึ่งออกมาเพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบ อาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2540 และครอบคลุมพื้นที่ใน 9 จังหวัดทางภาคเหนือ ได้แก่ เชียงราย เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำพูน ลำปาง พะเยา แพร่ น่าน ตาก และ อีก 1 จังหวัดทางภาคตะวันตก คือ กาญจนบุรี แต่ในทางปฏิบัติวิศวกรผู้ออกแบบอาคารอาจยังไม่คุ้นเคยกับการออกแบบอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวว่ามีข้อกำหนดแตกต่างจากการออกแบบอาคารโดยทั่วไปอย่างไร ในบทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวขั้นเบื้องต้น ซึ่งประกอบด้วย การคำนวณแรงกระทำทางด้านข้างด้วยวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่าและการตรวจสอบ

* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ความมั่นคงของโครงสร้างอาคาร ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญก่อนการออกแบบขั้นรายละเอียด เพื่อให้เข้าใจแนวทางการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ซึ่งต่างจากการออกแบบอาคารโดยทั่วไปได้

การออกแบบอาคารทั่วไปจะคำนวณน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกเท่านั้น ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่ขององค์อาคาร (DL) และน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ตามพ.ร.บ.ควบคุมอาคารสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 49 จะต้องคำนวณหาแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปของแรงเฉือนที่ฐานอาคาร ซึ่งเทียบเท่ากับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว เรียกว่าวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่า (equivalent static force) วิธีการนี้นำมาจากข้อกำหนดของ Uniform Building Code (UBC - 1985) ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสหรัฐอเมริกา และหลายประเทศทั่วโลกก็พัฒนาวิธีการออกแบบมาจาก UBC นี้ แต่การจะนำเอาวิธีการนี้ไปใช้ได้ โครงสร้างอาคารจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

ก) โครงสร้างทั้งหมด ที่อยู่ในเขต Seismic Zone 1 และโครงสร้างปกติทั่วไปที่อยู่ในเขต Zone 2 ส่วนอาคารที่อยู่ในเขต Zone 3 และ 4 วิธีการนี้ใช้ได้กับอาคารที่มีความสูงจำกัด ซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทของโครงสร้าง

ข) โครงสร้างปกติที่มีผังอาคารสมมาตร และมีความสูงน้อยกว่า 73 เมตร

ค) โครงสร้างไม่ปกติ เช่น ผังอาคารมีรูปร่างไม่สมมาตรหรือโครงสร้างอาคารที่มีมวล หรือสติฟเนสที่แปรเปลี่ยนในระหว่างชั้น เป็นต้น ซึ่งมีความสูงน้อยกว่า 5 ชั้น หรือ 20 เมตร

ง) โครงสร้างซึ่งมีส่วนบนมีลักษณะยืดหยุ่น เช่น หอสูง เป็นต้น ซึ่งตั้งอยู่บนฐานรากที่แข็งแรงมั่นคง

สำหรับโครงสร้างอาคารที่มีคุณสมบัตินอกเหนือจากข้อกำหนดนี้ จะใช้วิธีการคำนวณแบบแรงสถิตย์เทียบเท่าไม่ได้ โดย Uniform Building Code เสนอให้ใช้การคำนวณออกแบบโดยวิธีจลศาสตร์ (dynamic method) แทน

การคำนวณหาแรงเฉือนที่ฐานอาคาร

แรงเฉือนที่ฐานอาคารโดยวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่าตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 49 คำนวณจาก

$$V = ZIKCSW \qquad (1)$$

V คือ แรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดิน

Z คือ สัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 0.38 หรือมากกว่า

I คือ ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคารมีค่าระหว่าง 1.00-1.50

K คือ สัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบมีค่าระหว่าง 0.67-2.50

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงแผ่นดินไหว หาค่าได้จากสูตร

$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}} \leq 0.12 \qquad (2)$$

T คือ คาบการแกว่งตามธรรมชาติของอาคาร

S คือ สัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติ ระหว่างอาคารและชั้นดินที่ตั้งอาคารมีค่าระหว่าง 1.0-1.5

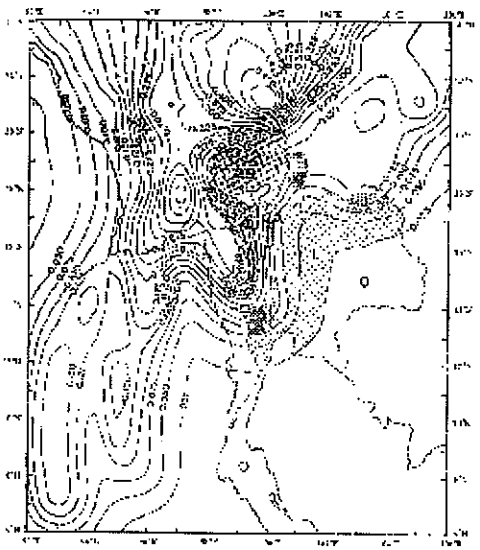
W คือ น้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมด รวมทั้งน้ำหนักของวัสดุอุปกรณ์ซึ่งตรึงกับที่โดยไม่รวมน้ำหนักบรรทุกจร สำหรับอาคารทั่วไป หรือน้ำหนักของตัวอาคาร

ทั้งหมดรวมกับร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกจร สำหรับโกดังหรือคลังสินค้า

มีข้อที่น่าสังเกตจากสูตรนี้คือ ค่า Z (Zone Factor) เป็นค่าที่แสดงความเข้มของเขตแผ่นดินไหว ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามระยะห่างจากแนวแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว โดยแสดงอยู่ในรูปของแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหว จากข้อกำหนดของ UBC-1985 ค่าสัมประสิทธิ์ Z นี้พอจะเทียบความเข้มของแผ่นดินไหวกับแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวของประเทศไทย ซึ่งจัดทำโดยเป็นหนึ่งและอาเด (2537) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเทียบการแบ่งเขตเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ Z จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ความเข้มของเขตแผ่นดินไหวกับค่า Z

เขตความเข้ม	เขตในแผนที่	ค่า Z
ปานกลาง	2A	0.38
ปานกลางค่อนข้างแรง	2B	0.50
รุนแรง	3	0.75



รูปที่ 1 แผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวของประเทศไทย (เป็นหนึ่งและอาเด, 2537)

อนึ่งค่า Z ที่แสดงในตารางนี้เทียบตามค่าสัมประสิทธิ์ที่เสนอโดยUBC-1985 ซึ่งเป็นข้อกำหนดซึ่งใช้ในกฎกระทรวงฉบับที่ 49 ดังนั้น จึงแตกต่างจากค่า Z ที่กำหนดโดย UBC-1994 และ UBC-1997 ซึ่งมีการปรับปรุงใหม่ในปัจจุบัน

การกระจายแรงเฉือนที่ฐานเป็นแรงกระทำด้านข้างในแต่ละชั้นอาคาร

แรงเฉือนที่ฐานอาคาร V สามารถกระจายเป็นแรงกระทำในแต่ละชั้นอาคารได้ตามสูตร ดังนี้

$$F_t = 0.07TV \quad \text{(ใช้ไม่เกิน } 0.25V\text{)} \qquad (3ก)$$

$$= 0 \quad (T \le 0.7 \text{ วินาที}) \qquad (3ข)$$

$$F_x = \frac{(V - F_t)W_x h_x}{\sum_{i=1}^{n} W_i h_i} \qquad (4)$$

และ $$V = F_t + \Sigma F_x \qquad (5)$$

โดยที่

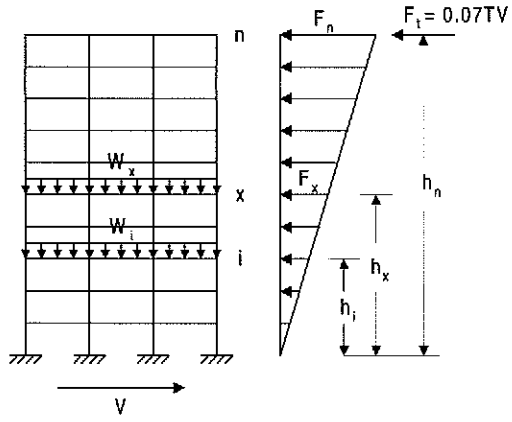
F_x คือ แรงกระทำทางด้านข้างกระทำอยู่ชั้น อาคาร x

F_t คือ ส่วนหนึ่งของแรงเฉือนที่ฐานอาคารกระทำที่ยอดอาคารเพิ่มไปจากแรง F_n

h_x, h_i คือ ความสูงของระดับพื้น x และ i จากฐานอาคาร ตามลำดับ

W_x, W_i คือ น้ำหนักอาคารที่ระดับพื้น x และ i ตามลำดับ

n คือ จำนวนชั้นอาคารเหนือฐานอาคารนั้น การกระจายแรงกระทำด้านข้างอาคารนี้ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกระจายแรงเฉือนที่ฐานเป็นแรงกระทำด้านข้าง

3. การตรวจสอบความมั่นคงของโครงสร้างอาคาร

การคำนวณหาความมั่นคงของโครงสร้างอาคารต่อแรงกระทำทางด้านข้างตามข้อกำหนดของ UBC เพื่อตรวจสอบว่า อาคารมีรูปทรงสัดส่วนที่ดี และมีขนาดหน้าตัดเสาที่พอเหมาะที่จะทำให้มีเสถียรภาพต่อแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ซึ่งมีขั้นตอนในการตรวจสอบ 3 ขั้น คือ

ก. ตรวจสอบค่าระยะการโยกตัวในแต่ละระดับขั้น (Story Drift)

หากตั้งสมมติฐานว่าพื้นอาคารเป็นพื้นแข็ง (rigid floor) ไม่มีการยืดหดตัวหรือโก่งตัว เนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง ดังนั้นแรงกระทำด้านข้างที่แต่ละระดับชั้นอาคารจะต้านทานด้วยแรงเฉือนในเสาแต่ละชั้นและระยะโยกไหวระหว่างชั้น (interstory drift) ของอาคารคำนวณได้จาก

$$\Delta_i = \frac{V_i}{K_i} \qquad (6)$$

โดยที่

Δ_i คือ ค่าระยะโยกไหวระหว่างชั้น (inter-story drift) ของอาคาร

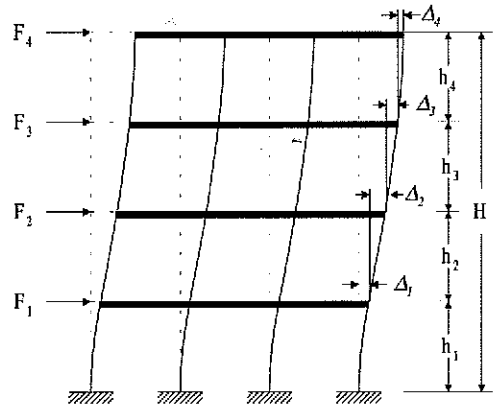
V_i คือ แรงเฉือนที่เสาสำหรับชั้นที่ i เนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง

K_i คือ ค่าสติฟเนสของเสาสำหรับชั้นที่ i มีค่าเท่ากับ $12EI_i/h_i^3$

E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสา

I_i คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาสำหรับชั้นที่ i

h_i คือ ค่าความสูงของเสาสำหรับชั้นที่ i



รูปที่ 3 การโก่งตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอาคาร

UBC กำหนดค่า story drift ดังนี้

สำหรับโครงสร้างซึ่งมีคาบการสั่นธรรมชาติน้อยกว่า 0.7 วินาที ค่า story drift ไม่เกิน 0.04hi/Rw หรือไม่เกิน 0.005 hi เมื่อ Rw คือค่าตัวประกอบเกี่ยวกับคุณสมบัติการดูดซับพลังงานที่แตกต่างกันของโครงสร้างแต่ละชนิด (ไพบูลย์ 2545)

สำหรับโครงสร้างซึ่งมีคาบการสั่นธรรมชาติเท่ากับหรือมากกว่า 0.7 วินาที ค่า story drift ไม่เกิน $0.03h_i/R_w$ หรือไม่เกิน $0.004\ h_i$ หากค่า story drift เกินจากที่กำหนดนี้แสดงว่า ขนาดเสามีหน้าตัดเล็กเกินไป ควรขยายขนาดเสาใหม่ให้ใหญ่ขึ้นและตรวจสอบอีกครั้งหนึ่งจนกว่าจะผ่านการวิบัติในลักษณะที่มีการโก่งตัวมากเกินไปนี้ อาจเกิดขึ้นได้ดังกรณี เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น ปีพ.ศ. 2538 แสดงในรูปที่ 4 อาคารนี้มีขนาดเสาที่ค่อนข้างเล็กทำให้เกิดระยะการโก่งตัวที่มาก จึงมีความเสี่ยงต่อการวิบัติแบบนี้

รูปที่ 4 อาคารที่เกิดการเอียงเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ พ.ศ. 2538

ข. ตรวจสอบค่าความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์ (Safety Factor Against Overturning Moment, SF)

ค่าความปลอดภัยต่อโมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำคำนวณจาก

$$SF = \frac{M_{react}}{M_{act}} = \frac{W_T \cdot L/2}{\sum_i^n F_i H_i} \qquad (7)$$

โดยที่

M_{reac} คือ โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำของอาคาร

M_{act} คือ โมเมนต์ที่กระทำให้เกิดการพลิกคว่ำของอาคาร

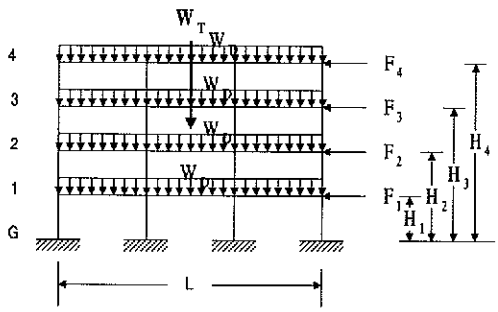
F_i คือ แรงกระทำด้านข้างที่ระดับชั้น i

H_i คือ ความสูงจากฐานของอาคารไปยังระดับชั้น i

W_T คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดของอาคาร

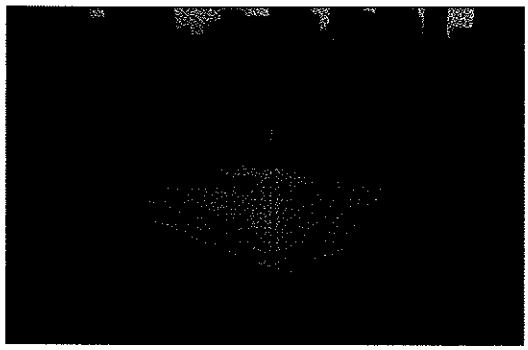
L คือ ความกว้างของอาคาร

SF คือ ค่าความปลอดภัย ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 ($S.F. \geq 1.5$)



รูปที่ 5 แรงกระทำให้เกิดการพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์

หากค่าความปลอดภัยนี้เกินจากที่กำหนดแสดงว่าอาคารมีรูปทรงสัดส่วนที่ไม่ดีทำให้ไม่มีเสถียรภาพเพียงพอต่อแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ซึ่งควรปรับแก้ขนาดรูปทรงใหม่ โดยอาจขยายส่วนฐานของอาคารให้กว้างขึ้น ปรากฏการณ์ของการวิบัติของอาคารในลักษณะนี้เคยเกิดขึ้นแล้ว ดังกรณีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะสังเกตได้ว่าอาคารนี้มีด้านกว้างที่แคบ ทำให้อัตราส่วนของความสูงต่อความกว้าง (H/L) มีค่าสูง จึงมีความเสี่ยงต่อการวิบัติแบบนี้



รูปที่ 6 *อาคารที่เกิดการพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ พ.ศ. 2538*

ค. ตรวจสอบผลประทบของ PΔ

ผลกระทบของ PΔ หมายถึงโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลคูณระหว่างน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาโมเมนต์นี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า โมเมนต์ลำดับที่สอง (secondary moment) ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้างได้ หากมีค่ามากเกินไป UBC กำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความมั่นคง (Stability Coefficient, θ) ดังนี้

$$\theta = \frac{P_x \Delta_x}{V_x h_x} \qquad (8)$$

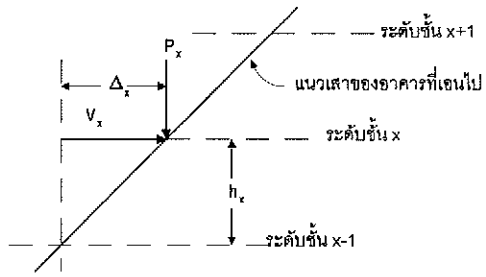
โดยที่

P_x คือ น้ำหนักอาคารทั้งหมด (W) ที่ระดับชั้น x และเหนือขึ้นไป

Δ_x คือ ระยะโยกของระดับชั้น x (story drift)

V_x คือ แรงเฉือนที่ระดับชั้น x

h_x คือ ความสูงของระดับชั้น x



รูปที่ 7 *การคำนวณผลกระทบของ* PΔ

UBC กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความมั่นคง (Stability Coefficient, (θ) สำหรับเขตแผ่นดินไหวต่าง ๆ กัน ดังนี้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในเขตZone 1และ 2 ค่า $\theta < 0.10$

โครงสร้างที่อยู่ในเขต Zone 3 และ 4 ค่า $\theta < 0.02/R_W$

ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์ความมั่นคง มีค่าน้อยกว่าที่กำหนดนี้ ก็ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบจาก PΔ แต่ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความมั่นคงเกินจากที่กำหนดจะต้องมีการคำนวณออกแบบเสาเป็นพิเศษเพื่อให้สามารถต้านทานโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ ซึ่งอาจใช้การขยายขนาดเสาให้มีค่าสติฟเนสมากขึ้น หรือเสริมปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น

ลักษณะของการวิบัติของอาคารแบบนี้คล้ายคลึงกับอาคารที่เกิดเอียงทรุดในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งน้ำหนักของอาคารที่สะสมลงสู่เสา เมื่อกระทำต่อเสาที่เกิดการโยกตัวเยื้องศูนย์ไป

จากแนวดิ่งมาก ทำให้เกิดค่าโมเมนต์เพิ่มขึ้นในเสา จึงเสี่ยงต่อการวิบัติแบบนี้

รูปที่ 8 *อาคารที่เกิดการเอียงเนื่องจากเหตุการณ์* แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ พ.ศ. 2538

4. สรุป

การออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่กล่าวมานี้เป็นการออกแบบขั้นเบื้องต้นที่สำคัญ โดยจะต้องคำนวณตรวจสอบความมั่นคงของอาคารต่อแรงกระทำจากแผ่นดินไหว อันประกอบด้วย

ก) การตรวจสอบค่าระยะโยกตัวในแต่ละระดับชั้นของอาคาร

ข) การตรวจสอบค่าความปลอดภัย ต่อการพลิกคว่ำของอาคาร

ค) การตรวจสอบผลกระทบของโมเมนต์ ลำดับสองอันเนื่องมาจากน้ำหนักกระทำลงสู่เสาเยื้องศูนย์ไปจากแนวดิ่ง

ขั้นตอนเหล่านี้เป็นการตรวจสอบ เพื่อให้ทราบว่าอาคารมีรูปทรงสัดส่วนที่ดีและมีขนาดหน้าตัดเสาที่พอเหมาะที่จะทำให้มีเสถียรภาพต่อแรงกระทำทางด้านข้าง เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวได้หรือไม่ จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบขั้นรายละเอียดสำหรับการเสริมเหล็กในองค์อาคารต่าง ๆ ซึ่งยังมีขั้นตอนและวิธีการออกแบบอีกต่างหาก ซึ่งแตกต่างไปจากการออกแบบอาคารทั่วไป วิศวกรผู้สนใจสามารถดูรายละเอียด ได้จากเอกสารอ้างอิงข้างท้ายนี้ได้ ○

บรรณานุกรม

เป็นหนึ่ง วานิชชัย และอาเด ลิซานโตโน (2537). **การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย,** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ไพบูลย์ ปัญญาคะโป (2545). **การออกแบบอาคาร** สำนักพิมพ์ ไลบรารี่ นาย.

เสรี สุธรรมชัย (2541). **กฎกระทรวงฉบับที่ 49 : ว่าด้วยการออกแบบอาคารให้สามารถต้านแรงแผ่นดินไหว,** โยธาสาร มกราคม-กุมภาพันธ์.

ICBO (1994, 1997) International Conference of Building Officials. **Uniform Building Code,** Whittier, California USA.