บทที่ 5

การพัฒนาวิธีการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

5.1 บทนำ

วิธีคำนวณหาแรงจากแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย นิยมนำข้อกำหนดที่ใช้อยู่ในต่างประเทศมาประยุกต์ ด้วยการใช้ค่าความเร่งสูงสุดสำหรับออกแบบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในประเทศไทย แทนค่าความเร่งสูงสุดสำหรับออกแบบที่ใช้อยู่ในข้อกำหนดของประเทศนั้นๆ ซึ่งอาจจะไม่ถูกต้องเพียงพอเพราะการคำนวณหาแรงจากแผ่นดินไหว โดยใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่า ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้น ๆ ซึ่งคลื่นแผ่นดินไหวจะมีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศ ในบทนี้จึงพัฒนาการหาค่าความเร่งสำหรับนำไปใช้ออกแบบโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ด้วยการนำลักษณะคลื่นที่จำลองขึ้นตามลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทย เพื่อให้ได้ค่าแรงจากแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์หาค่าแรงจากแผ่นดินไหว โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า มีพื้นฐานมาจากการคำนวณหาค่าแรงกระทำที่ฐานของโครงสร้างโดยมีค่าเท่ากับมวลของโครงสร้างคูณกับค่าความเร่งตอบสนองของโครงสร้างอันเนื่องมาจากคลื่นแผ่นดินไหวที่มากระทำต่อโครงสร้าง มวลของโครงสร้างที่นำมาวิเคราะห์ คือค่าน้ำหนักตายตัวของโครงสร้าง ค่าน้ำหนักดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยใช้น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยของโครงสร้าง คูณกับขนาดของโครงสร้าง จึงเป็นค่าที่คำนวณได้อย่างตรงไปตรงมา ไม่ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ

ค่าความเร่งตอบสนองของโครงสร้างเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างและลักษณะคาบของโครงสร้าง คลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณต่าง ๆ มีลักษณะที่แตกต่างกันไป ทำให้การนำข้อกำหนดในการออกแบบต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวจากสภาพพื้นที่หนึ่ง ๆ มาใช้กับอีกสภาพพื้นที่หนึ่ง อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของคลื่นแผ่นดินไหวต่าง ๆ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงพิจารณาลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นตามลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทย ซึ่งเป็นค้นตอของแรงจากแผ่นดินไหว มาเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาวิเคราะห์เป็นคลื่นที่จำลองขึ้นภายใต้เงื่อนไขของลักษณะ

ภูมิประเทศ, ชั้นดิน ตามลักษณะของประเทศไทย เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเร่งตอบสนองและเสนอเป็นสูตรเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ จากนั้น จึงทำการวิเคราะห์ว่า สูตรค่าความเร่งตอบสนองที่เสนอแนะดังกล่าว เพื่อนำไปใช้ในวิธีแรงสถิตเทียบเท่าว่ามีความปลอดภัยเพียงพอหรือไม่ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีพลศาสตร์ และพิจารณาด้วยว่า วิธีแรงสถิตเทียบเท่าดังกล่าว ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์กับโครงสร้างที่ระดับความสูงเท่าใด

5.2 แบบจำลองสำหรับคำนวณหาแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างเกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางคือพื้นผิวโลกมากระทบกับโครงสร้าง จึงเป็นลักษณะแรงกระทำที่ฐานของโครงสร้างโดยอยู่ในรูปของคลื่นความเร่งเนื่องจากการเคลื่อนตัวของผิวโลก ดังนั้นการหาแรงกระทำที่ฐานของโครงสร้างสามารถหาได้จากกฎของนิวตัน

$$F = ma \tag{5.1}$$

เมื่อ F = แรงกระทำ
m = มวลของวัตถุที่ถูกกระทำ
a = ความเร่ง

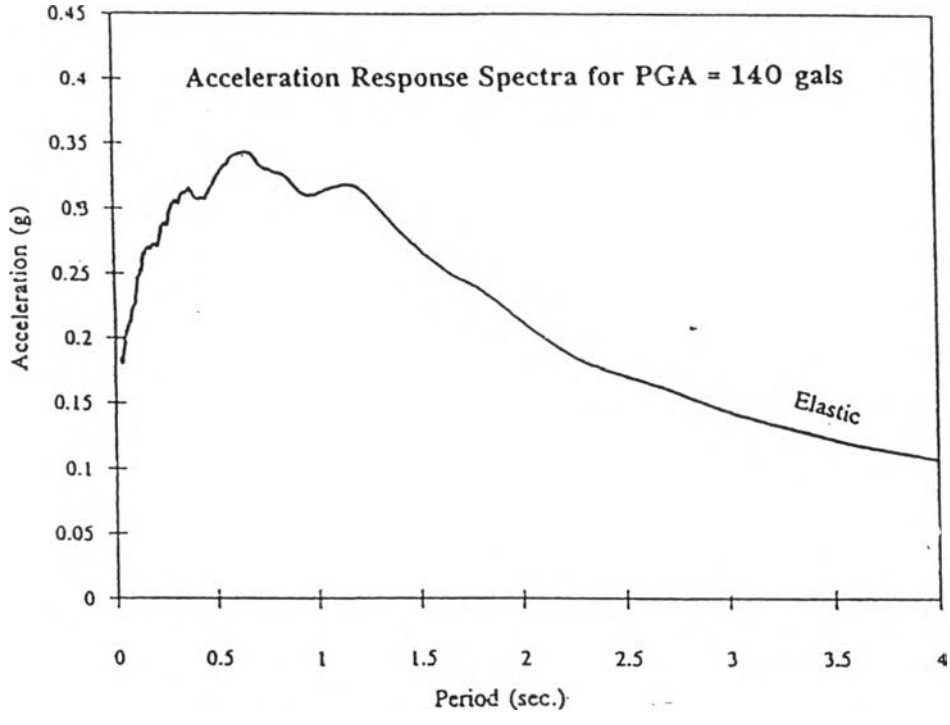
หรือเขียนอยู่ในรูป

$$V = Wa \tag{5.2}$$

เมื่อ V = แรงกระทำที่ฐานของโครงสร้าง
W = น้ำหนักของโครงสร้าง
a = ความเร่ง ตอบสนองของโครงสร้างต่อคลื่นแผ่นดินไหว

ซึ่งความเร่งตอบสนองของโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างเช่น คาบของโครงสร้าง อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง และสติฟเนสของโครงสร้าง เป็นต้น โดยสามารถคำนวณได้จากวิธีพลศาสตร์ ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.4.2 ได้ผลเป็นค่าความเร่งตอบสนองของโครง

สร้างที่คาบของโครงสร้างค่าหนึ่ง ๆ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถหาค่าความเร่งตอบสนองของโครงสร้างที่คาบโครงสร้างต่าง ๆ กัน และสามารถแสดงในรูปของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.1

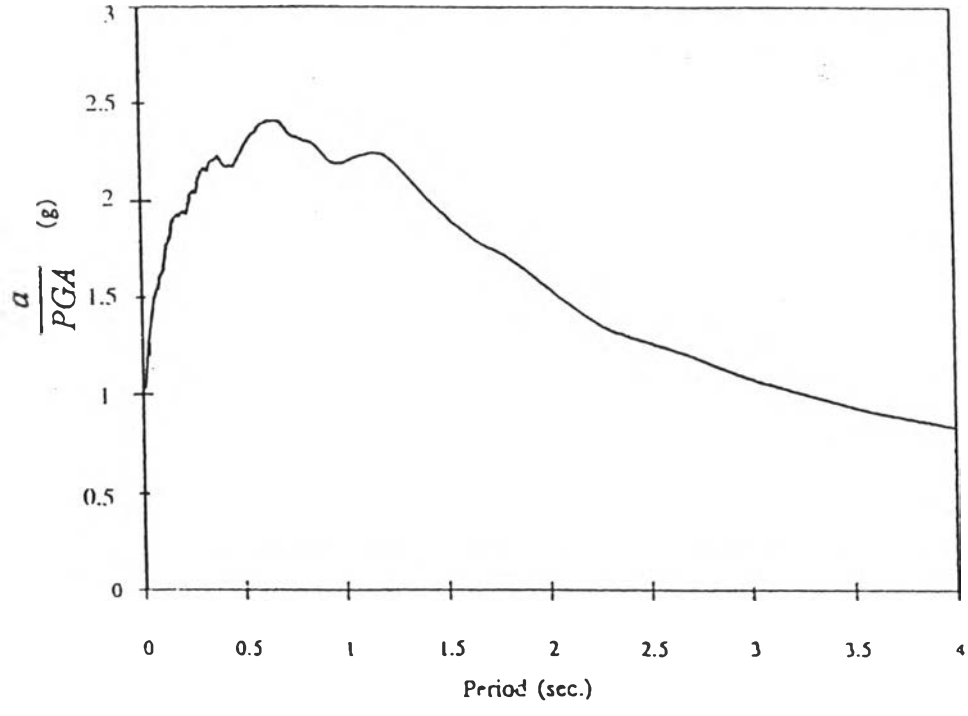


รูปที่ 5.1 สเปกตรัมการตอบสนองของความเร่ง [14]

ดังนั้นเมื่อรู้ค่าคาบของโครงสร้างก็สามารถหาค่าความเร่งตอบสนองได้จากกราฟดังกล่าว ค่าความเร่งนี้เองเป็นตัวแปรสำคัญที่จะนำไปคำนวณหาแรงจากแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าต่อไป

กราฟค่าความเร่งตอบสนอง ในรูปที่ 5.1 ได้มาจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ โดยมีแรงกระทำจากคลื่นความเร่งแผ่นดินไหวที่จำลองขึ้นตามพื้นที่ประเทศไทย ที่แตกต่างกัน 100 คลื่น ได้ค่าความเร่งตอบสนอง 100 ค่า สำหรับคาบโครงสร้างค่าหนึ่งๆ ค่าความเร่งตอบสนองที่แสดงในกราฟที่คาบใดๆ เป็นค่าความเร่งเฉลี่ยจาก จำนวน 100 ค่าบวกกับค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน ซึ่งจะนำมาใช้ในการปรับปรุงวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับประเทศไทย

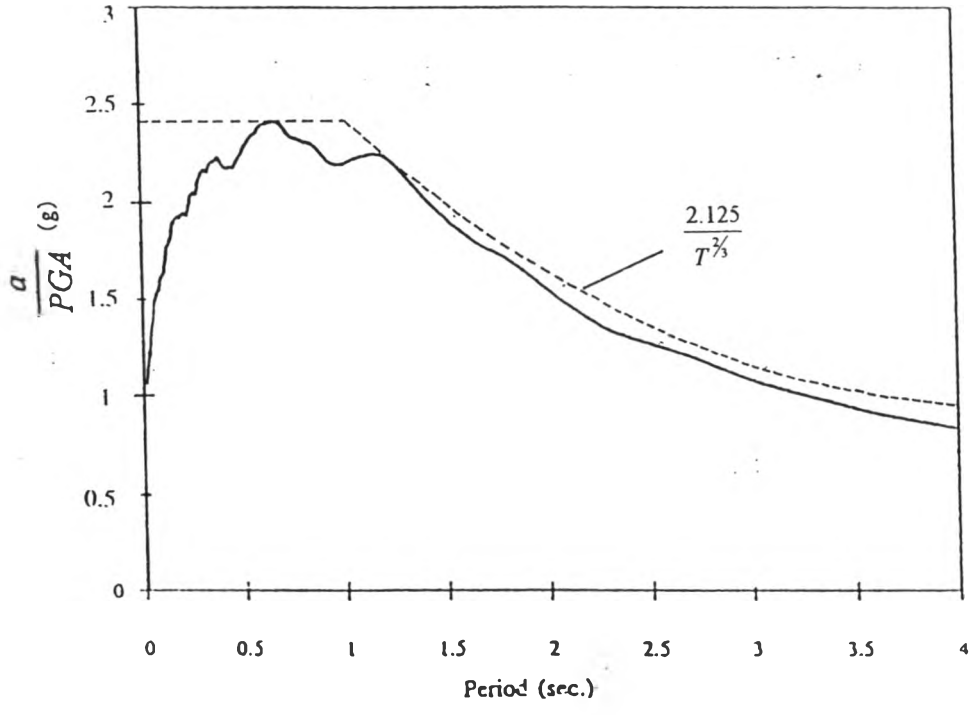
กราฟค่าความเร่งตอบสนองในรูปที่ 5.1 เป็นกราฟที่มีค่าความเร่งสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) เท่ากับ 0.14g หารค่าความเร่งตอบสนองทุกๆ จุดในกราฟรูปที่ 5.1 ด้วยค่าความเร่งสูงสุด (PGA) = 0.14 ได้กราฟค่าความเร่ง $\frac{a}{PGA}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 **กราฟค่าความเร่งตอบสนองปกติ** (Normalized acceleration response spectrum) **สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบ**

จากรูปที่ 5.2 เสนอสมการในการหาค่าความเร่ง $\frac{a}{PGA}$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับคาบของโครงสร้างดังนี้

$$\frac{a}{PGA} = \begin{cases} 2.45 & \text{เมื่อ} \quad T \le 1 \text{ วินาที} \\ \dfrac{2.125}{T^{2/3}} & \text{เมื่อ} \quad T > 1 \text{ วินาที} \end{cases} \qquad (5.3)$$



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบสูตรสัมประสิทธิ์แรงแผ่นดินไหวที่เสนอแนะกับค่าความเร่งตอบสนองปกติ

หรือ

$$a = \begin{cases} 2.45 \cdot PGA & \text{เมื่อ} \quad T \le 1 \text{ วินาที} \\ \dfrac{2.125}{T^{2/3}} \cdot PGA & \text{เมื่อ} \quad T > 1 \text{ วินาที} \end{cases} \tag{5.4}$$

เมื่อ

a = ค่าความเร่งสำหรับใช้หาค่าแรงโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

PGA = ค่าความเร่งสูงสุด (Peak Ground Acceleration)

ค่าความเร่งสูงสุด (PGA) หรือเรียกว่าค่าความเร่งสูงสุดสำหรับออกแบบ มีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละพื้นที่ ซึ่งสามารถหาได้จากแผนที่ความเร่งแผ่นดินไหวสำหรับออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.12

แทนค่าความเร่ง a ลงในสมการที่ 5.2 สามารถเขียนค่าแรงกระทำที่ฐานได้ในรูป

$$V = \begin{cases} 2.45\, m \cdot PGA & \text{เมื่อ} \quad T \le 1 \text{ วินาที} \\ \dfrac{2.125\, m}{T^{2/3}} \cdot PGA & \text{เมื่อ} \quad T > 1 \text{ วินาที} \end{cases} \tag{5.5}$$

สมการที่ (5.5) เป็นสมการที่เสนอแนะเพื่อคำนวณหาค่าแรงกระทำที่ฐานของโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าความเร่งตอบสนองจากคลื่นแผ่นดินไหวที่จำลองเพื่อใช้สำหรับประเทศไทย จากนั้นทำการกระจายค่าแรงกระทำที่ฐาน ให้เป็นแรงกระทำที่แต่ละชั้นของโครงสร้างโดยกระจายตามน้ำหนักของโครงสร้างแต่ละชั้นโดยใช้วิธีการกระจายน้ำหนักตามข้อกำหนดของ UBC. ดังนี้

$$F = F_t + \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{5.6}$$

โดยที่

F_t = แรงกระทำที่ชั้นบนสุดของอาคาร

$$F_t = 0.07TV \quad \text{แต่มีค่าไม่เกิน } 0.25V$$
$$= 0 \quad \text{เมื่อ} \quad T < 0.7$$

$$F_x = \frac{(V-F_t)w_x h_x}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i}$$

เมื่อ F_1 F_2 F_3..... คือค่าแรงกระทำที่ชั้นหลังคา เรียงลงมาจนถึงชั้นล่างสุดตามลำดับ

5.3 ผลการเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์

การทดสอบส่วนแรกในการวิเคราะห์โครงสร้างด้านทานแรงแผ่นดินไหวในงานวิจัยนี้ คือ การตรวจสอบว่าผลตอบสนองของโครงสร้างต่อคลื่นแผ่นดินไหวในประเทศสหรัฐอเมริกา กับผลการตอบสนองของโครงสร้างต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่จำลองตามสภาพพื้นที่ของประเทศไทยมีค่าที่คล้ายกันหรือแตกต่างกันอย่างไรเมื่อกำหนดให้มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากัน เพื่อพิจารณาว่าการนำข้อกำหนดในการออกแบบโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าซึ่งพัฒนามากจากคลื่นที่มีสภาพพื้นที่ต่างกันจะสามารถนำมาใช้โดยตรงโดยไม่ต้องปรับปรุงข้อกำหนดนั้นๆได้หรือไม่ โดยการเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากการทดลองเกี่ยวกับแผ่นดินไหวโดยความร่วมมือของประเทศสหรัฐอเมริกากับประเทศญี่ปุ่นโดย J. Wight, V. Bertero และ H. Aoyama โดยจำลองคลื่นตามคลื่นแผ่นดินไหวจริงกระทำกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 7 ชั้นที่มีขนาดเท่าของจริงดังแสดงในรูปที่ 5.4 เพื่อดูผลการตอบสนองของต่อคลื่นแผ่นดินไหวโดยมีระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวหลายๆระดับ ในงานวิจัยนี้จึงอาศัยค่าตอบสนองของโครงสร้างอาคาร 7 ชั้นของงานวิจัยดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าการตอบสนองของอาคารเดียวกันแต่ใช้คลื่นที่จำลองขึ้นเพื่อใช้ในประเทศไทยที่ระดับความรุนแรงเดียวกันคือที่ระดับความรุนแรงเท่ากับ 0.0235g เพื่อดูว่าผลตอบสนองของโครงสร้างต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่จำลองขึ้นเพื่อใช้สำหรับประเทศไทยมีความแตกต่างจากคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยที่ทดลองบนโครงสร้างอาคาร 7 ชั้นขนาดเท่าของจริงเพียงใดที่ระดับความรุนแรงเดียวกันซึ่งถ้าผลตอบสนองออกมาไม่แตกต่างกันก็จะบอกได้ว่าสามารถนำข้อกำหนดในการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้นๆมาใช้กับประเทศไทยได้เนื่องจากให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน แต่หากค่าผลการตอบสนองออกมาไม่เหมือนกัน การจะนำข้อกำหนดดังกล่าวมาใช้ในประเทศไทยก็จำเป็นจะต้องปรับปรุงให้สอดคล้องกับลักษณะของคลื่นที่อาจจะเกิดขึ้นในประเทศไทย

ผลการทดสอบปรากฏว่า ค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองที่ชั้นบนสุดคือชั้นที่ 7 มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.1 นิ้ว แต่ค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ฐานมีค่าแตกต่างกันโดยค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จาก

การวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์กระทำด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่จำลองสำหรับประเทศไทยให้ค่าสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5.1 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คลื่นทั้ง 2 แหล่งกำเนิดมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะค่าแรงเฉือนที่ได้ออกมาไม่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดจะมีค่าออกมาใกล้เคียงกันก็ตาม ทั้งนี้เพราะค่าแรงเฉือนที่ฐานมีความสำคัญในการนำไปใช้ออกแบบมากกว่า ดังนั้นการนำข้อกำหนดในการออกแบบมาใช้จึงควรมีการปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพคลื่นแผ่นดินไหวที่จำลองขึ้นใช้สำหรับประเทศไทย

ทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่เสนอแนะกับค่าการตอบสนองที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้ข้อกำหนดของ UBC โดยค่าแรงกระทำต่อโครงสร้างและค่าแรงเฉือนที่ฐานที่คำนวณได้จากข้อกำหนดของ UBC ที่นำมาใช้เปรียบเทียบนี้เป็นค่าแรงที่ยังไม่ได้หารด้วยค่า Reduction factor เพราะต้องการเปรียบเทียบค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นโดยที่ยังไม่ได้ลดค่าลงเนื่องจากความสามารถในการสลายพลังงานแผ่นดินไหวของโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากข้อกำหนดของ UBC เสนอว่าการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวจะไม่ออกแบบเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นเต็ม 100 เปอร์เซ็นต์ เพราะลักษณะของสติฟเนส ความยืดหยุ่นตัวของโครงสร้างจะสามารถรับแรงและสลายพลังงานเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวไปได้ส่วนหนึ่ง และเหตุผลในด้านของความประหยัด เนื่องจากถ้าต้องออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว 100 เปอร์เซ็นต์โครงสร้างจะต้องแข็งแรงมากและสิ้นเปลืองในการก่อสร้างมาก จึงยอมให้มีการลดแรงกระทำของแผ่นดินไหวลงโดยยอมให้โครงสร้างมีการชำรุดได้ภายใต้การเกิดแผ่นดินไหวแต่ต้องเป็นลักษณะความชำรุดที่ไม่รุนแรงและสามารถซ่อมแซมได้

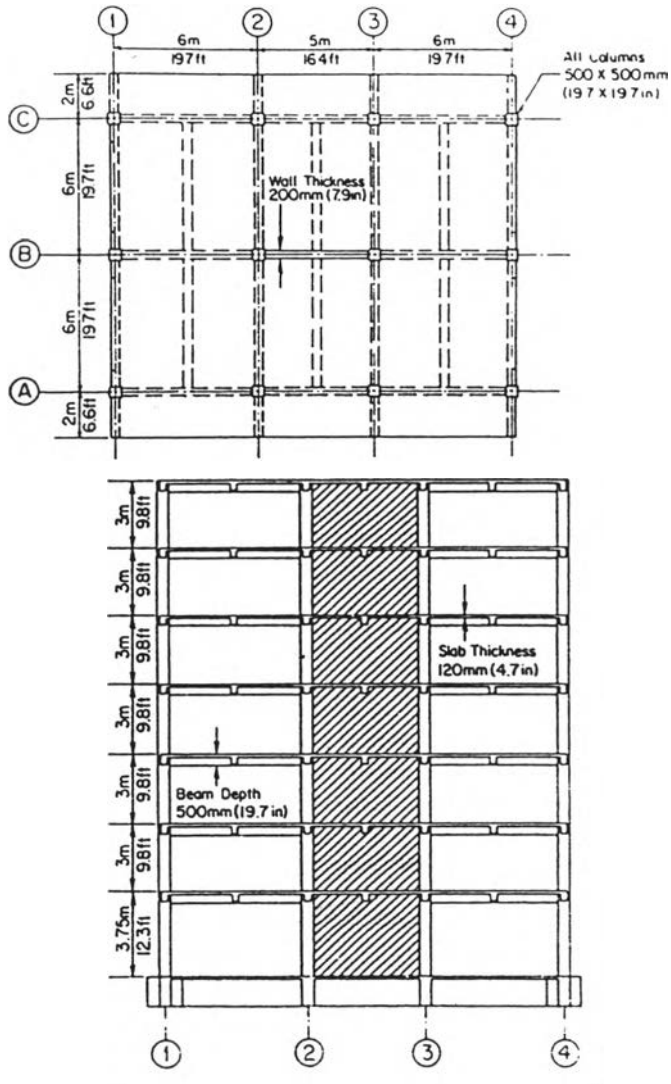
พิจารณาค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ เปรียบเทียบกับวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ได้จากการปรับปรุงการหาค่าความเร่งโดยสมการที่ (5.4) พบว่าค่าแรงเฉือนที่ฐานจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าสูงกว่าค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จากวิธีพลศาสตร์อยู่ในช่วง 1 – 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโครงสร้าง 10 - 30 ชั้น แต่โครงสร้าง 40 ชั้นที่มีความสูง 168 เมตร ค่าแรงเฉือนที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า มีค่าน้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าที่ปลอดภัยเฉพาะโครงสร้าง 10 – 30 ชั้นในด้านการพิจารณาค่าแรงเฉือนที่ฐาน

พิจารณาค่าโมเมนต์พลิกคว่ำ (Overturning Moment) ที่ฐานโครงสร้าง เปรียบเทียบระหว่างวิธีพลศาสตร์กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า พบว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าโมเมนต์ที่ฐานของโครงสร้างน้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ อยู่ในช่วง 2 - 8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโครงสร้าง 10 – 30 ชั้น แต่สำหรับโครงสร้าง 40 ชั้น ค่าโมเมนต์ที่ฐานของโครงสร้างที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้น้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสำหรับโครงสร้าง 40 ชั้น ความสูง 168 เมตร อาจไม่เหมาะที่จะออกแบบต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าเมื่อพิจารณาในด้านของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของโครงสร้าง

พิจารณาค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง เปรียบเทียบระหว่างวิธีพลศาสตร์กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากวิธีพลศาสตร์อยู่ในช่วง 18 – 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง

จากสูตรความเร่งตอบสนองที่เสนอสำหรับนำไปหาค่าแรงจากแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าในสมการที่ (5.5) เป็นฟังก์ชันของคาบโครงสร้าง การประมาณค่าคาบของโครงสร้างตามความสัมพันธ์ที่เสนอในบทที่ 3 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ย่อมส่งผลให้ค่าความเร่งตอบสนองมีค่าคลาดเคลื่อนไปด้วย แต่จากการทดสอบหาค่าตัวประกอบการกรรโชกโดยที่ค่าคาบของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความเร่งตอบสนองมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 6 % เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และจากผลการตอบสนองของแรงเฉือนที่ฐานและโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐาน สำหรับอาคาร 10 – 30 ชั้น ที่มีความสูงอยู่ในช่วง 32 – 96 เมตร ยังคงให้ค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย แสดงว่าสูตรการประมาณค่าคาบดังกล่าวสามารถนำมาใช้ได้สำหรับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

ดังนั้นการคำนวณโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับแรงแผ่นดินไหวที่เสนอแนะ เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางศาสตร์ ให้ความปลอดภัยเพียงพอในการนำไปใช้สำหรับโครงสร้าง 10 ชั้น, 20 ชั้น และ 30 ชั้น ที่มีความสูง 32 เมตร, 64 เมตร และ 96 เมตรตามลำดับ แต่สำหรับโครงสร้าง 40 ชั้นที่มีความสูง 168 เมตรที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พบว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าแรงเฉือนที่ฐาน และค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานน้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ค่อนข้างมากจึงอาจไม่ปลอดภัยในการออกแบบกับอาคารที่มีความสูงขนาดนี้



รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะโครงสร้างอาคาร 7 ชั้น

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าการตอบสนองของโครงสร้าง 7 ชั้น

การทดลอง	ความเร่งสูงสุดที่ใช้	คาบของโครงสร้าง (วินาที)	ระยะการเคลื่อนตัวสูงสุด ที่ชั้นบนสุด (นิ้ว)	ค่าแรงเฉือนสูงสุด ที่ฐานของโครงสร้าง (kip)
คลื่นที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา	0.0235g	0.43	0.1	70
คลื่นที่จำลองใช้ในประเทศไทย	0.0235g	0.425	0.11	76

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าความเร่งสำหรับออกแบบเมื่อคาบเปลี่ยนไป

จำนวนชั้น	คาบ (วินาที)	ค่าคาบที่เปลี่ยนแปลง	ค่าความเร่งสำหรับออกแบบ (m/s^2)	ค่าความเร่งสำหรับออกแบบที่เปลี่ยนแปลง
10	1.130	0%	1.96	0.0%
	1.243	10%	1.84	-6.2%
20	1.900	0%	1.39	0.0%
	2.090	10%	1.30	-6.2%
30	2.780	0%	1.07	0.0%
	3.058	10%	1.01	-6.2%
40	4.47	0%	0.78	0%
	4.917	10%	0.73	-6.2%

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้าง

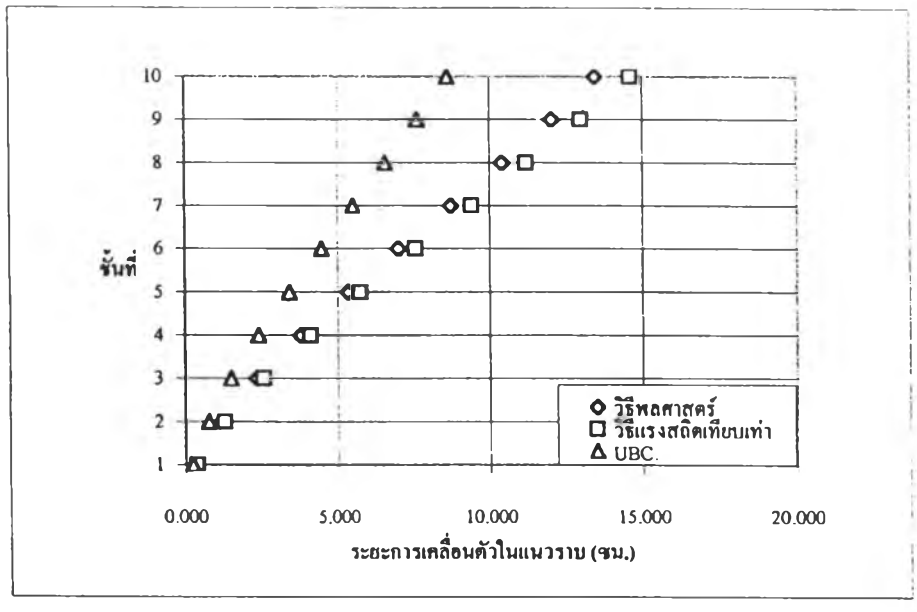
ลักษณะของโครงสร้าง	คาบของโครงสร้าง (วินาที)	ค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้าง (ตัน)			เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับวิธี พลศาสตร์	
		วิธีพลศาสตร์	วิธีที่เสนอแนะ	ข้อกำหนดของ UBC	วิธีที่เสนอแนะ	ข้อกำหนดของ UBC
คสล. 10 ชั้น	1.130	222.9	224.06	131.80	1%	-41%
คสล. 20 ชั้น	1.900	464.5	473.90	278.80	2%	-40%
คสล. 30 ชั้น	2.780	682.5	697.58	410.34	2%	-40%
คสล. 40 ชั้น	4.470	1936.5	1594.91	938.18	-18%	-52%

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าโมเมนต์ที่ฐานของโครงสร้าง

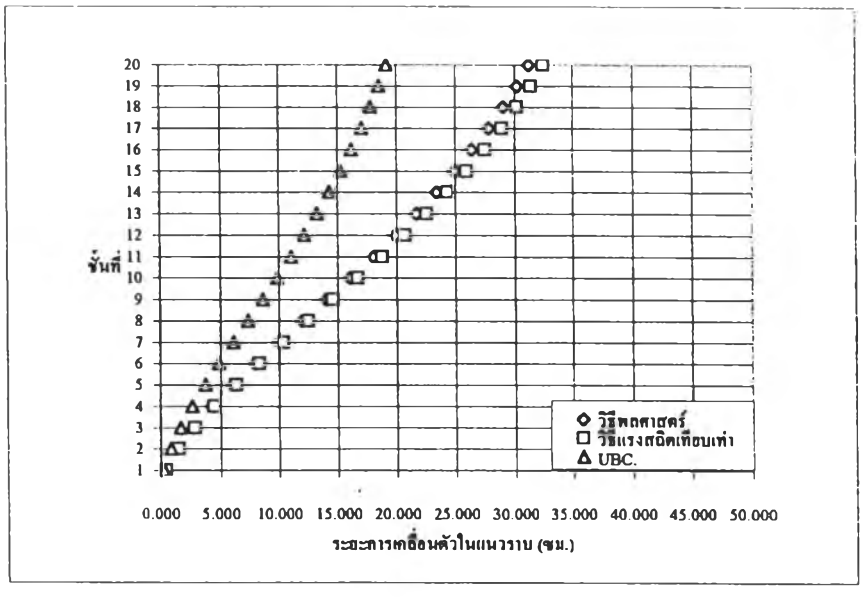
ลักษณะของโครงสร้าง	คาบของโครงสร้าง (วินาที)	โมเมนต์ที่ฐานของโครงสร้าง (ตัน-เมตร)			เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับวิธี พลศาสตร์	
		วิธีพลศาสตร์	วิธีที่เสนอแนะ	ข้อกำหนดของ UBC	วิธีที่เสนอแนะ	ข้อกำหนดของ UBC
คสล. 10 ชั้น	1.130	5282.0	5192.60	3054.47	-2%	-42%
คสล. 20 ชั้น	1.900	23068.0	22009.40	12946.71	-5%	-44%
คสล. 30 ชั้น	2.780	54123.0	49927.90	29369.35	-8%	-46%
คสล. 40 ชั้น	4.470	249659.0	202685.70	119226.88	-19%	-52%

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองสูงสุดที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง

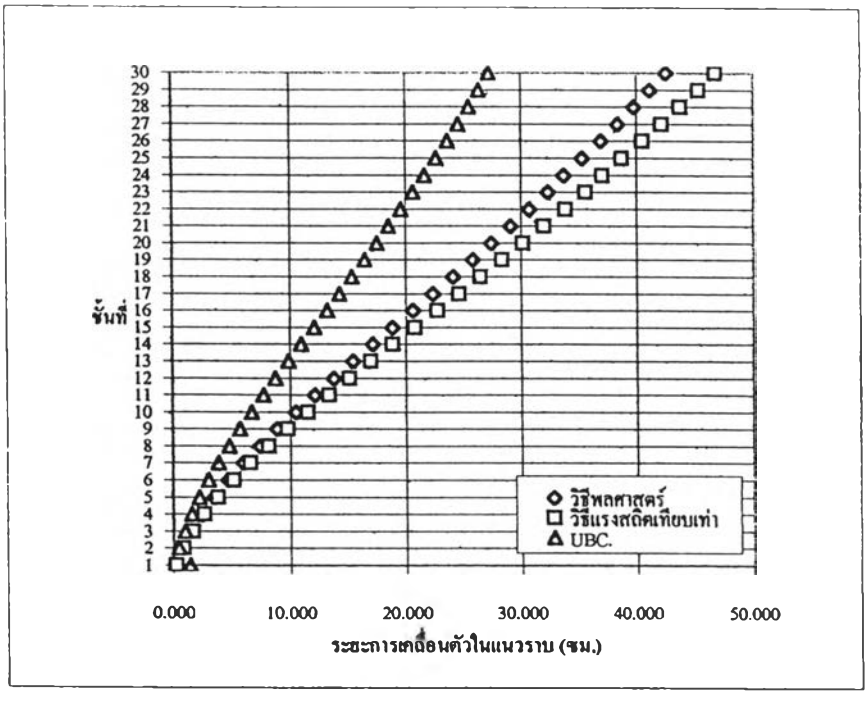
ลักษณะของโครงสร้าง	คาบของโครงสร้าง	ระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบ (ซม.)			เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับวิธี พลศาสตร์	
	(วินาที)	วิธีพลศาสตร์	วิธีที่เสนอแนะ	ข้อกำหนดของ UBC	วิธีที่เสนอแนะ	ข้อกำหนดของ UBC
คสล. 10 ชั้น	1.130	13.45	14.61	8.60	9%	-36%
คสล. 20 ชั้น	1.900	30.78	32.60	19.18	6%	-38%
คสล. 30 ชั้น	2.780	42.50	46.81	27.17	10%	-36%
คสล. 40 ชั้น	4.470	63.20	67.90	41.08	7%	-35%



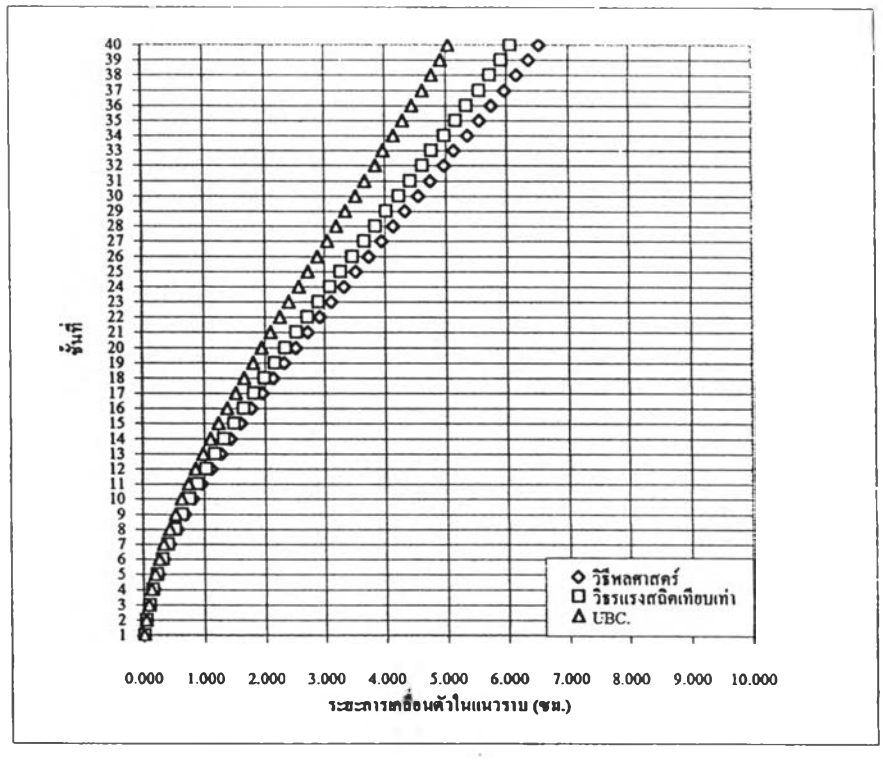
รูปที่ 5.5 แสดงระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว สำหรับโครงสร้างอาคาร 10 ชั้น



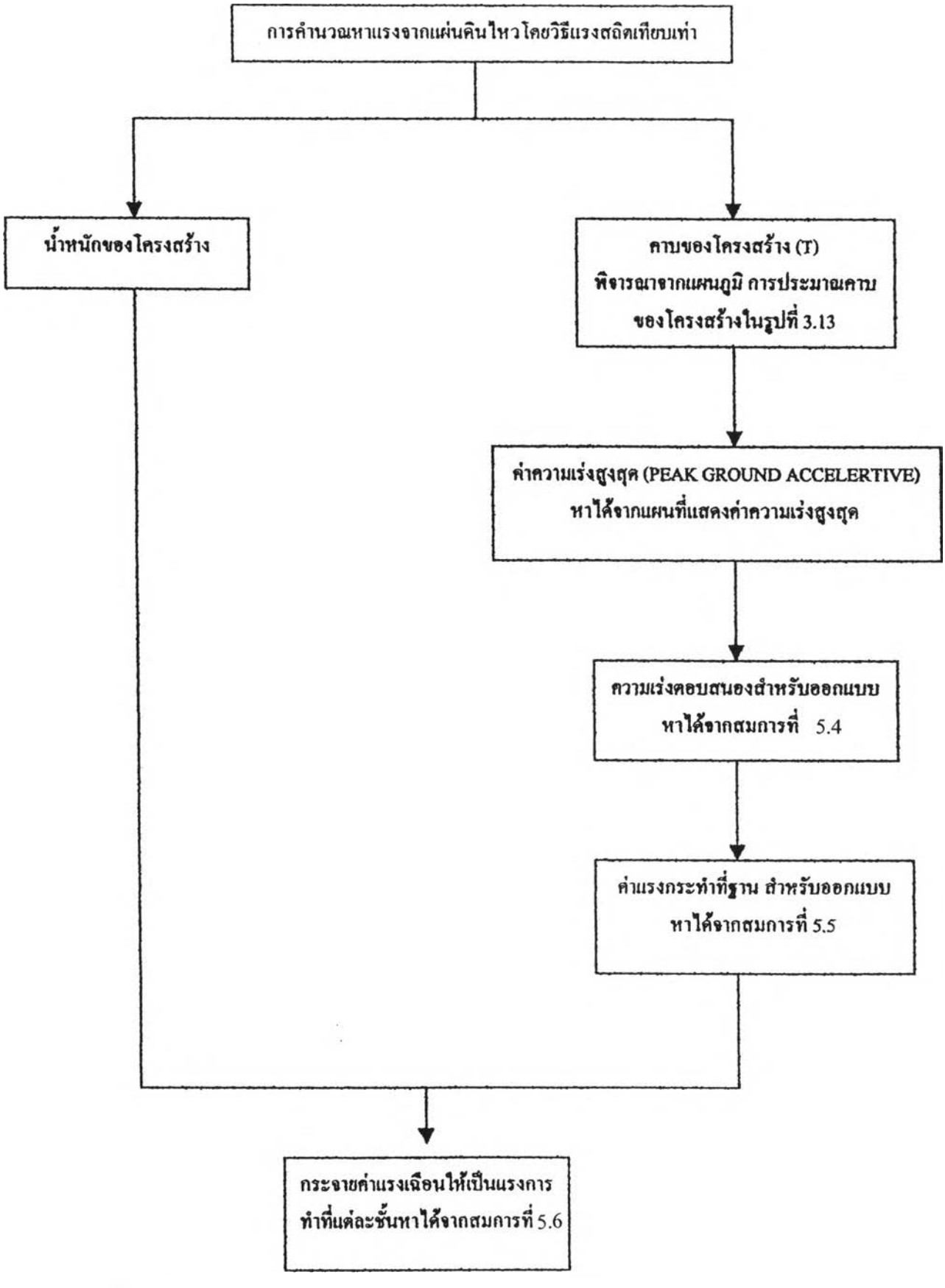
รูปที่ 5.6 แสดงระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว
สำหรับโครงสร้างอาคาร 20 ชั้น



รูปที่ 5.7 แสดงระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว
สำหรับโครงสร้างอาคาร 30 ชั้น



รูปที่ 5.8 แสดงระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว
สำหรับโครงสร้างอาคาร 40 ชั้น



รูปที่ 5.9 แผนภูมิแสดง การคำนวณหาแรงจากแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า