

กำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารโดยวิธีการผลัดแบบรวมโหมดด้วย SRSS

SEISMIC CAPACITY OF BUILDING BY SRSS PUSHOVER ANALYSIS

ไพบูลย์ ปัญญาอะโป (Phaiboon Panyakapo)¹

¹รองศาสตราจารย์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีปทุม e-mail: phaiboon.pa@spu.ac.th

บทคัดย่อ: บทความนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์กำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารด้วยวิธีการผลัดอาคาร โดยที่การกระจายแรงกระทำคำนวณได้จากผลของการรวมแรงเฉือนในแต่ละรูปแบบการสั่น (mode shape) ด้วยวิธีการหารากที่สองของผลรวมกำลังสอง (The Square Root of the Sum of the Squares, SRSS) เพื่อใช้ในวิเคราะห์กำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารโดยวิธีการออกแบบเชิงพฤติกรรม ผลที่ได้แสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานและการเคลื่อนที่ของอาคาร พร้อมทั้งค่าระดับความเสียหายของอาคารตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์สำหรับอาคารสูง 15 ชั้นพบว่า ค่าความเสียหายของอาคารที่ระดับชั้นที่สองถึงชั้นที่สี่ มีค่าสูงกว่าในชั้นอื่นๆ และค่าระดับความเสียหายสำหรับแรงกระทำคำนวณจากผลของการรวมโหมดที่สูงขึ้นไปให้ค่าระดับความเสียหายที่มากขึ้นจากโหมดแรก เนื่องจากการคำนึงถึงผลของการสั่นในรูปแบบการสั่นอื่นด้วย ดังนั้น วิธีการผลัดอาคารแบบรวมโหมดด้วย SRSS จึงให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าวิธีการผลัดแบบที่พิจารณาเพียงรูปแบบการสั่นแบบแรก

คำสำคัญ : แผนผังกำลังต้านทานแผ่นดินไหว การออกแบบเชิงพฤติกรรม ความเสียหายคงที่ การวิเคราะห์การผลัดวิธีการหารากที่สองของผลรวมกำลังสอง

ABSTRACT: This paper is to present the analysis of seismic capacity of buildings by SRSS Pushover method. In this method, the lateral force distribution has been computed from the result of the combination of story shear in each mode by the Square Root of the Sum of the Squares (SRSS) technique. The obtained result can be applied for performance based design of buildings. It is presented in the form of capacity diagram which is the relationship between capacity and displacement including the levels of seismic damage of structures along the curve. The analysis results for 15 stories building reveal that seismic damage between the 2nd and 4th stories are higher than those of the other stories. In addition, the seismic damages resulting from the higher modes are greater than those of the first mode. Therefore, the SRSS Pushover analysis is more reliable than the conventional Pushover method considering only the first mode.

KEYWORDS: Seismic capacity diagram, Performance based design, Constant-damage, Pushover analysis, SRSS method.

1. บทนำ

ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคาร นิยมใช้วิธีการผลัดอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ ก) วิธี Capacity Spectrum หรือวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linearization) มีวิธีการรายละเอียดตามข้อเสนอแนะในเอกสารATC-40 [1] และ ข) วิธี Displacement Modification ตามข้อเสนอแนะในเอกสาร FEMA 356 [2] ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้ ใช้แรงกระทำซึ่งมีการกระจายแรงต่างกันใน การวิเคราะห์ผลัดอาคารดังนี้ แรงกระทำแบบจุด (Concentrate load) แรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอ (Uniform load) แรงกระทำแบบสามเหลี่ยม (Triangular load) แรงกระทำกระจายตามข้อกำหนดของการ ออกแบบ (Code distribution load) แรงกระจายตามรูปแบบการสั่นแบบแรก (First mode load) แรงกระจายตามรูปแบบการสั่นแบบแรกและปรับค่าตามการลดลงของค่าสติเฟนส (Adaptive load) แรงกระจายตาม การรวมแรงเฉือนในแต่ละรูปแบบการสั่นด้วยวิธีการหารากที่สองของการรวมแบบกำลังสอง (The Square Root of the Sum of the Squares, SRSS) และแรงกระจายและผลัดตามรูปแบบการสั่นในแต่ละโหมด (Multi-mode Pushover Analysis, MPA) ผลการวิเคราะห์หึ่งขึ้นอยู่กับ การเลือกรูปแบบการกระจายของแรงกระทำนั้น สำหรับ อาคารสูงซึ่งมีรูปแบบการสั่นได้หลายโหมด วิธีการผลัด ซึ่งคำนึงถึงผลกระทบของรูปแบบการสั่นใน โหมด สูงๆขึ้นไป จึงเป็นวิธีการที่น่าเชื่อถือมากกว่าวิธีการอื่น ในจำนวนวิธีการเหล่านี้ การผลัดตามรูปแบบการสั่นใน แต่ละโหมดน่าจะเป็นวิธีการที่ดีกว่าวิธีอื่น แต่ ผลการวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่า วิธี MPA ให้ผลการ คำนวณที่ดีสำหรับค่าการเคลื่อนตัวของพื้นอาคาร และ การโยกตัวระหว่างชั้น แต่ให้ผลการคำนวณที่ไม่ น่าเชื่อถือสำหรับการเกิดข้อหมุนพลาสติก โดยเฉพาะ อย่างยิ่ง มีการพบว่า กราฟของการผลัดอาคารมีการกลับ ทิศทางสำหรับการผลัดในรูปแบบการสั่นที่สองและ

สาม ซึ่งทำให้มีการปรับปรุงวิธีการ MPA ใหม่ [4] โดย การรวมผลตอบสนองในรูปแบบการสั่น 3 โหมดแรก ด้วยวิธี SRSS อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยก็ยังไม่เป็นที่น่า พอใจ สำหรับการนำไปใช้

บทความนี้ เป็นการนำเสนอการผลัดอาคารด้วย วิธีการกระจายแรงตามการรวมแรงเฉือนในแต่ละ รูปแบบการสั่นด้วยวิธี SRSS ซึ่งเป็นวิธีการที่พิจารณา ถึงผลของการสั่นในรูปแบบที่สูงขึ้นไปด้วย โดยมีข้อ ดีกว่า วิธีMPA คือ การผลัดอาคารมีทิศทางเดียว เนื่องจากผลรวมของแรงกระทำมีทิศทางเดียวกันเสมอ และการใช้งานง่ายกว่าวิธี MPA

2. วิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้นด้วยการกระจาย แรงกระทำแบบ SRSS

ในงานวิจัยนี้ จะคำนวณหากราฟกำลังต้านทาน แรงแผ่นดินไหวที่แสดงค่าดัชนีความเสียหายได้โดยตรง จึงทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RUAUMOKO ซึ่ง สามารถวิเคราะห์ โดยวิธี Pushover Analysis ได้ ขึ้นตอนและรายละเอียดที่สำคัญ มีดังนี้

2.1 จัดทำแบบจำลอง Finite element ของอาคาร ที่ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาพฤติกรรม การตอบสนอง ของอาคาร เมื่อถูกแรงกระทำด้านข้างในช่วงการเปลี่ยน รูปแบบยืดหยุ่นและเกินพิกัดยืดหยุ่น

2.2 นำแรงสถิตย์กระทำด้านข้างอาคารโดยมีแรง กระทำแปรเปลี่ยนตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างใน แต่ละรูปแบบ (Mode shape) แรงกระทำที่แต่ละ ระดับชั้นอาคารคำนวณจาก

$$F_{xm} = C_{xm}V_m \quad (1)$$

โดยที่ F_{xm} คือ ค่าแรงกระทำทางด้านข้างของแต่ละ ระดับชั้น

x และแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ m

C_{xm} คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงแผ่นดินไหวของ แต่ละ

ระดับชั้น x และแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ m ซึ่งคำนวณได้จาก

$$C_{xm} = \frac{\phi_{xm} W_x}{\sum_{i=1}^N \phi_{im} W_i} \quad (2)$$

โดยที่ ϕ_{xm} , ϕ_{im} คือ ค่าการเคลื่อนที่ของแต่ละ

ระดับชั้น x, i และแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ m

W_x , W_i คือ น้ำหนักของอาคารของแต่ละระดับชั้น x, i

N คือ จำนวนชั้นของอาคาร

V_m คือ ค่าแรงเฉือนที่ฐานของแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ m ซึ่งคำนวณจาก

$$V_m = W_m S_{am} \quad (3)$$

โดยที่ S_{am} คือ อัตราเร่งตอบสนองของแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ (modal spectral acceleration)

W_m คือ น้ำหนักประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่ m

คำนวณได้จาก

$$W_m = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \phi_{im} W_i \right]^2}{\sum_{i=1}^N \phi_{im}^2 W_i} \quad (4)$$

2.3 แบบจำลองพฤติกรรมกรรับแรงของโครงสร้างแบบวิฤจักร (hysteretic model) ใช้แบบ Modified Takeda model (MT) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.4 วิเคราะห์หาการเปลี่ยนรูป (lateral deformation) ของอาคารที่เกิดจากแรงกระทำนี้ โดยค่อยๆ ปรับระดับของแรงเพิ่มขึ้นเป็นขั้นๆ ในแต่ละชั้น ค่ากำลังและสตีเฟนส ของแต่ละองค์อาคารจะถูกปรับให้เป็นไปตามสภาพภายหลังการรับแรงในแต่ละชั้น ทำการวิเคราะห์ในลักษณะนี้อย่างต่อเนื่อง เพื่อผลักให้อาคารมีการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอาคารเกิดการวิบัติ

2.5 กรณีการผลักแบบ SRSS ค่าแรงกระทำจะแปรเปลี่ยนตามลักษณะของรูปแบบการเคลื่อนที่ในแต่ละแบบ โดยการคำนวณแรงเฉือนในแต่ละรูปแบบการเคลื่อนที่จาก

$$V = \sqrt{\sum_{m=1}^N V_m^2} \quad (5)$$

2.6 สำหรับการศึกษาใช้แรงกระทำซึ่งให้แรงเฉือนจากการรวมรูปแบบการเคลื่อนที่ 1, 1+2 และ 1+2+3 มากระจายเป็นแรงผลักอาคาร

2.7 คำนวณค่าระดับความเสียหายของโครงสร้างด้วยแบบจำลองความเสียหายที่พัฒนาโดย Park and Ang [5]

2.8 นำผลการวิเคราะห์มาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนที่ฐานอาคารกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ยอดอาคาร ซึ่งเป็น Capacity curve

3. อาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 15 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารเรียนของสถานศึกษาแห่งหนึ่งในเขตกรุงเทพมหานครมาเป็นกรณีศึกษา โดยมีรูปตัดของโครงสร้างแสดงในภาพที่ 1 และมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

3.1 ผังอาคารมีขนาด 28.90x47.00 เมตร ความสูงทั้งหมด 52.50 เมตร ภายในอาคารแต่ละชั้นมีการกันผนังด้วยวัสดุเบาเพื่อใช้เป็นห้องเรียน

3.2 พื้นอาคารตั้งแต่ชั้นที่ 1-5 เป็นแผ่นพื้นไร้คานท้องเรียบ S1 (Flat plate) คอนกรีตเสริมเหล็กหนา 32 ซม. ตั้งแต่ชั้นที่ 6-15 เป็นแผ่นพื้นไร้คานท้องเรียบ S2 คอนกรีตอัดแรงหนา 25 ซม. โครงสร้างอาคารเป็นระบบพื้น-เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก

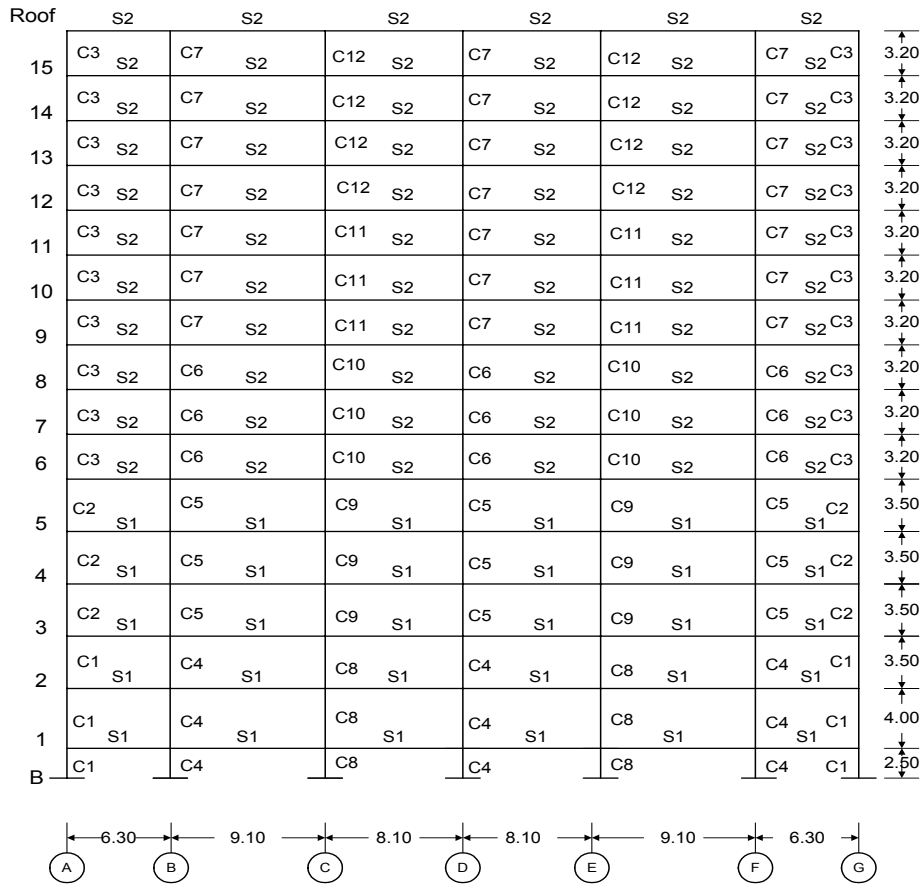
3.3 เสาในแนวแกน 4 ซึ่งใช้พิจารณาในการวิเคราะห์นี้มีขนาด 0.6x1.50 ม. โดยมีการเสริมเหล็กแตกต่างกัน ตั้งแต่ C1-C12

3.4 คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 300 กก./ซม.² เหล็กข้ออ้อยใช้เกรด SD40 เหล็กกลมใช้เกรด SR24

เนื่องจากระบบพื้นเป็นแผ่นพื้นไร้คาน ดังนั้น ในการวิเคราะห์ได้จำลองแผ่นพื้นเป็นเสมือนคานกว้างมีขนาดความกว้างเท่ากับช่วงระยะความลึกของช่วงเสา (bay) เรียกว่าคานเสมือน เพื่อใช้เป็นระบบคาน-เสา จากการวิเคราะห์ Pushover Analysis สำหรับอาคารสูง 15

ชั้น ซึ่งมีแรงสถิตกระทำทางด้านข้างแบบ Force control
 และมีกระจายแรงตามแต่ละรูปแบบการสั่น โดย
 เป็นผลรวมของแรงในแต่ละรูปแบบการสั่น 3 รูปแบบ

ตามวิธีการรวมแรงแบบ Square Root of the Sum of the
 Square (SRSS)

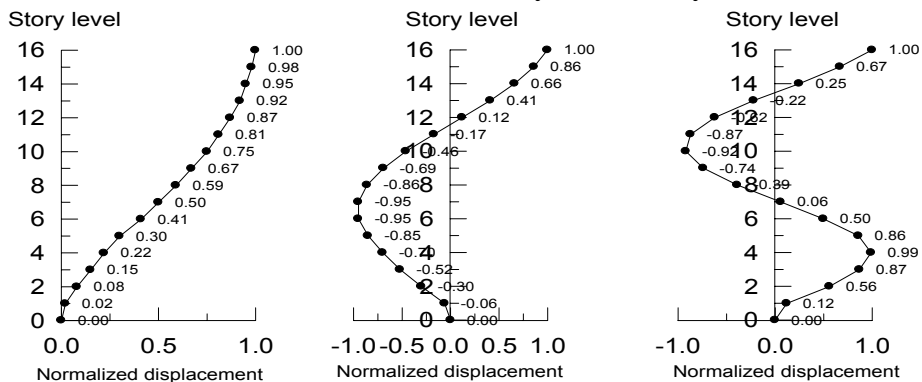


ภาพที่ 1 รูปตัดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 15 ชั้น

4. ผลการวิเคราะห์

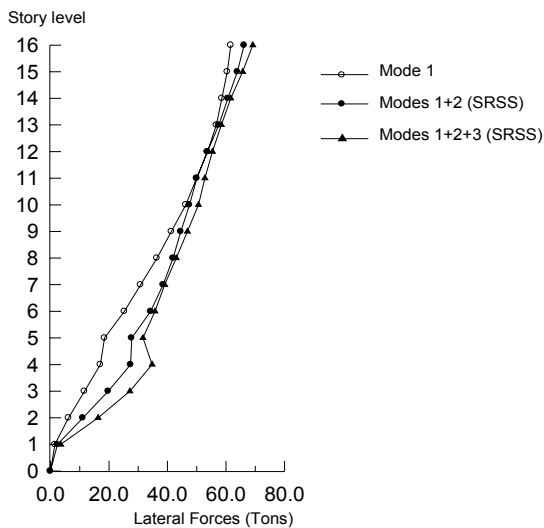
จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธี Pushover
 Analysis ซึ่งคำนวณด้วยโปรแกรม RUAUMOKO

จะได้รูปร่างการสั่นในแต่ละรูปแบบ (mode shape) ทั้ง
 3 รูปแบบ แสดงในรูปที่ 2

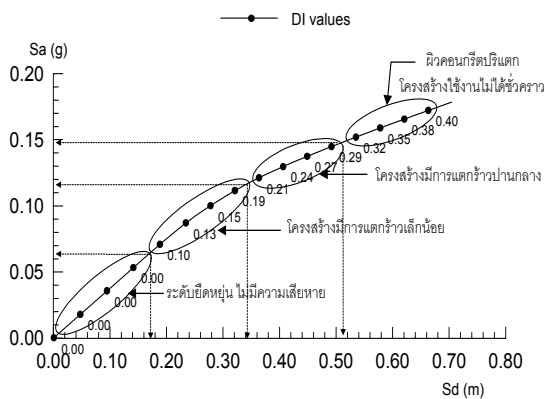


ภาพที่ 2 รูปร่างการสั่นในแต่ละรูปแบบ (mode shape) ทั้ง 3 รูปแบบ

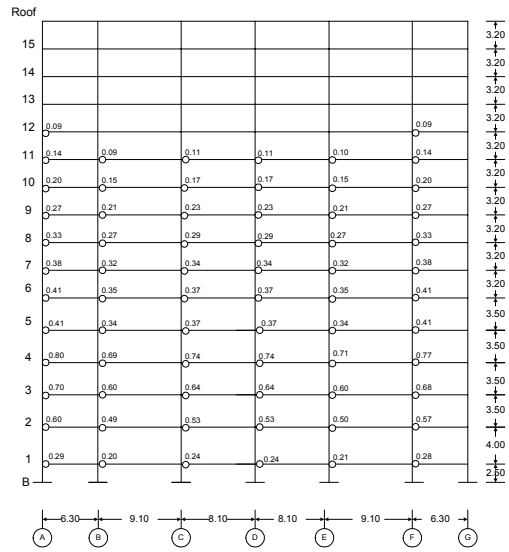
การกระจายของแรงกระทำด้านข้างตามรูปแบบการสั่นในแต่ละรูปแบบคือ mode 1 mode 1+2 และ mode 1+2+3 โดยวิธี SRSS แสดงในภาพที่ 3 จะสังเกตได้ว่าแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งรวมผลของรูปแบบการสั่นที่สูงขึ้น (mode 1+2 และ mode 1+2+3) มีค่าสูงกว่ารูปแบบที่ 1 (mode 1) เล็กน้อยผลการคำนวณจากโปรแกรม RUAUMOKO สำหรับแรงกระทำกระจายตาม mode 1 นำมาเขียนเป็นกราฟการผลึกอาคาร (Pushover curve) และกราฟกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว (Capacity Diagram) ซึ่งเป็นการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานอาคารและการเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคาร โดยเป็นภาพรวมของโครงสร้างทั้งหมด แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 3 การกระจายแรงตามรูปร่างการสั่นในแต่ละรูปแบบ



ภาพที่ 4 แผนผังกำลังต้านทานของอาคารสำหรับการผลึกในโหมดที่ 1



ภาพที่ 5 การเกิดข้อหมุนพลาสติกและดัชนีความเสียหายสำหรับ Pushover ในรูปแบบที่ 1 (mode 1)

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเสียหายที่ข้อหมุนพลาสติกในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นค่าดัชนีความเสียหายเมื่อโครงสร้างเคลื่อนตัวไปสูงสุด พบว่า ความเสียหายเกิดขึ้นในระดับชั้นล่างมากกว่าระดับชั้นบน หากจำแนกระดับความเสียหายของชั้นอาคารจะได้ ดังนี้

1) ระดับความเสียหายเล็กน้อย ค่าดัชนีความเสียหายระหว่าง 0.00-0.19 พบในระดับชั้นบนตั้งแต่ชั้นที่ 10 ขึ้นไป โดยที่โครงสร้างมีการแตกร้าวเล็กน้อยที่ปลายช่วงพื้น อาคารยังใช้งานต่อไปได้โดยอาจไม่จำเป็นต้องมีการซ่อมแซม

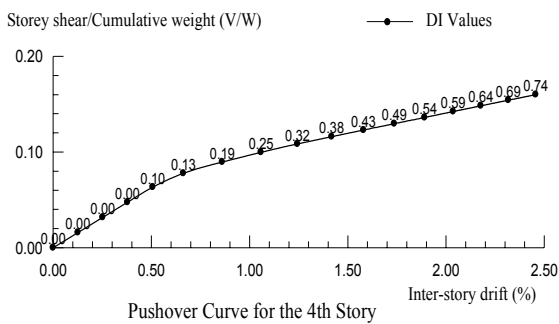
2) ระดับความเสียหายส่วนน้อยแต่จำเป็นต้องมีการซ่อมแซม ค่าดัชนีความเสียหายระหว่าง 0.20-0.30 พบในระดับชั้นที่ 8-9 และชั้นที่ 1 ซึ่งโครงสร้างมีการแตกร้าวปานกลางที่ปลายช่วงพื้นซึ่งเป็นรอยต่อเสาคานเสมือน

3) ระดับความเสียหายปานกลาง ค่าดัชนีความเสียหายระหว่าง 0.31-0.60 พบในระดับชั้นที่ 5-7 และชั้นที่ 2 ซึ่งตัวคอนกรีตมีรอยปริแตกที่ปลายช่วงพื้นซึ่งอาจเห็นได้ชัดเจน จำเป็นต้องมีการซ่อมแซม ทำให้อาคารใช้งานไม่ได้ชั่วคราว

4) ระดับความเสียหายรุนแรง ค่าดัชนีความเสียหายระหว่าง 0.61-0.80 พบในระดับชั้นที่ 3-4 โดยเฉพาะใน

ระดับชั้นที่ 4 ซึ่งมีความเสียหายมากที่สุด ซึ่งนอกจากผิวคอนกรีตจะปริแตก มากแล้ว อาจสังเกตเห็นเหล็กเสริมโก่งตัวเนื่องจากการแตกของคอนกรีตมากได้

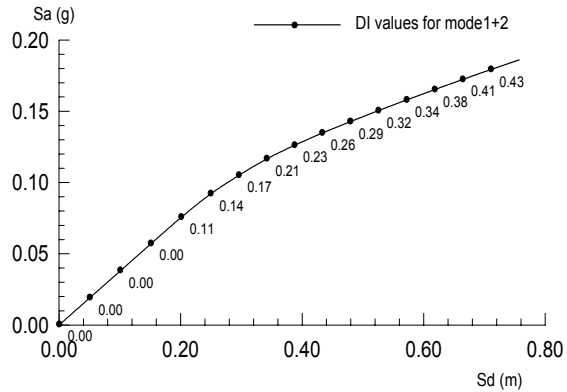
เมื่อพิจารณาในระดับชั้นที่มีความเสียหายมาก อาจวิเคราะห์ในรายละเอียดของพฤติกรรมความเสียหายของแต่ละระดับชั้นได้ โดยพิจารณาจากกราฟการผลัดอาคาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในแต่ละชั้นและการเลื่อนตัวในระหว่างชั้น (Inter-story drift) ดังแสดงในภาพที่ 6



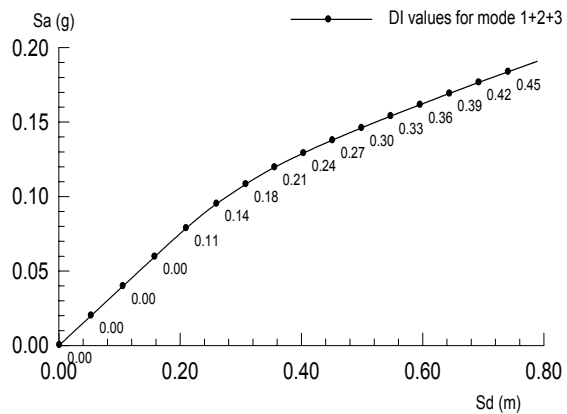
ภาพที่ 6 กราฟการผลัดอาคารสำหรับชั้นที่ 4

จากภาพที่ 6 พบว่าหากการเลื่อนตัวในระหว่างชั้นอยู่ในระดับยืดหยุ่น โครงสร้างจะยังไม่ปรากฏความเสียหาย (DI = 0) เมื่อการเลื่อนตัวเลยจุดครากไปแล้ว จะเกิดความเสียหายขึ้น แต่ระดับความเสียหาย (DI) อาจไม่สัมพันธ์กับค่าการเลื่อนตัวในระหว่างชั้น (inter-story drift) ทั้งนี้เนื่องจากค่าดัชนีความเสียหายคำนวณจากการโก่งตัวและพลังงานที่สะสมในข้อหมุนพลาสติกที่เกิดในบริเวณปลายคานเสมือน แต่ค่าการเลื่อนตัวในระหว่างชั้นคำนวณจากการโก่งตัวของเสาเป็นหลัก ดังนั้นการโก่งตัวของเสาเพียงอย่างเดียวไม่ได้เป็นตัวชี้บอกความเสียหายของชั้นอาคารได้

เมื่อนำแรงกระทำทางด้านข้างจากการรวมรูปแบบการสั่นในแต่ละแบบ มาวิเคราะห์การผลัดอาคาร จะได้แผนผังกำลังต้านทานของอาคารดังแสดงในภาพที่ 7-8 สำหรับรูปแบบที่ 1+2 และ 1+2+3 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 แผนผังกำลังต้านทานของอาคารสำหรับการผลัดในโหมดที่ 1+2 (SRSS)



ภาพที่ 8 แผนผังกำลังต้านทานของอาคารสำหรับการผลัดในโหมดที่ 1+2+3 (SRSS)

5. สรุป

5.1 การใช้ค่าการเลื่อนตัวในระหว่างชั้น (inter-story drift) ตามข้อกำหนด Uniform Building Code (UBC-1997) เพียงอย่างเดียว ไม่เพียงพอในกำหนดความเสียหายของอาคาร ควรนำค่าดัชนีความเสียหายมาพิจารณาประกอบด้วย

5.2 ค่าระดับความเสียหายสำหรับแรงกระทำคำนวณจากผลของการรวมโหมดที่สูงขึ้นไปให้ค่าระดับความเสียหายที่มากขึ้นจากโหมดแรก เนื่องจากมีการคำนึงถึงผลของการสั่นในรูปแบบการสั่นอื่นด้วย ดังนั้นวิธีการผลัดอาคารแบบรวมโหมดด้วย SRSS จึงให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าวิธีการผลัดแบบที่พิจารณาเพียงรูปแบบการสั่นแบบแรก

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Applied Technology Council, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (Report No. ATC-40). California.
- [2] FEMA, 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of buildings (FEMA356). Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- [3] Chopra, A. K. and Goel, R. K., 2002. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 31: 561-582.
- [4] Chopra, A. K. and Goel, R. K. and Chintanapakdee, C., 2004. Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands. Earthquake Spectr., EERI : 757-778.
- [5] Park, Y. J. and Ang, A. H., 1985. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. Journal of Structural Engineering. ASCE, 111(4): 722-739.