*สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*
**Corresponding author E-mail: Chatchai.ak.58@ubu.ac.th*

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นของโครงข้อแข็งใน 2 มิติ พร้อมทั้งเลือกรูปแบบการวิบัติเริ่มต้น 3 ประเภทคือการวิบัติของเสาภายนอก การวิบัติของเสาภายในต่อเนื่อง 1 ช่วง และการวิบัติของเสาภายในต่อเนื่อง 2 ช่วง แบบอาคารที่ใช้ศึกษาเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสูง 2 ถึง 7 ชั้นโดยแต่ละชั้นสูง 3.0 ม. กว้างช่วงละ 5.0 ม. ใช้หน้าตัดคานขนาด 25x65 ซม. และหน้าตัดเสาขนาด 25x25 ซม. การศึกษาจะวิเคราะห์สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นเทียบกับพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์ด้วยวิธีการจำลองมวลแบบเป็นก้อนด้วยการแบ่งชิ้นส่วนคานออกเป็น 8 ชิ้นส่วนย่อย และการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเชิงเส้นใช้วิธีการจำลองจุดหมุนแบบพลาสติกที่ปลายของชิ้นส่วนคาน จากการศึกษาโครงสร้างจำนวน 108 ตัวอย่างพบว่าการวิเคราะห์โครงสร้างสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นจะมีปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์คืออัตราส่วนของโมเมนต์ดัด จำนวนชั้น และประเภทของโครงสร้าง ซึ่งอัตราส่วนของโมเมนต์ดัดที่มีค่าลดลงจะส่งผลให้ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น จำนวนชั้นที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และภายใต้เงื่อนไขเดียวกันลักษณะโครงสร้างไม่มีผลต่อตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำผลของตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์มาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จะสามารถสร้างสมการที่มีร้อยละของความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.0-8.8 เปอร์เซ็นต์ โดยสมการที่ใช้วิเคราะห์จะกำหนดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

คำสำคัญ: การพังทลายต่อเนื่อง, ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ , พลศาสตร์ไม่เชิงเส้น, สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น

This research project studies dynamic increase factor to analysis progressive collapse nonlinear statics method. The study of planar frames along with samples starting of progressive collapse analysis was employed by removing of 3 types: outside column, internal columns at 1 continuous and internal columns at 2 continuous for reinforced concrete structures at two to seven story with 3-meter floor height to 5-meter bay width, using a beam cross section of 25x65 cm and a column cross section of 25x25 cm. The study will analyze nonlinear statics comparable to nonlinear dynamics. For each case. In the nonlinear dynamic analysis, a method of lumped mass for dynamic analysis was applied and a plastic hinge at each end of the beam members was employed. From the study, Dynamic increase Factor for Progressive Collapse Analysis of Planar Frames 108 samples, it was found that analysis structure nonlinear static structures, the factors that affect the dynamic increase factor are the ratio of bending moments, number of layers, and type of structure. Which decreasing the bending moment ratio results in an increase in the Dynamic Increase Factor. An Increasing the number of layers will also result in an increase in the Dynamic Increase Factor. Under the same conditions, the structural characteristics had no significant effect on Dynamic Increase Factor, respectively. The experimental data sets were used to generate mathematical equations for Dynamic Increase Factor of Progressive Collapse by equation have error of 0.0-8.8 percent. the equation used for analysis is given in the form of an exponential function.

Keywords: Progressive Collapse, Dynamic Increase Factor, Non-linear Dynamics Analysis, Non-linear Statics Analysis

การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารเป็นการพังทลายต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ โดยเกิดจากความเสียหายส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลลุกลามไปยังส่วนอื่นจนทำให้โครงสร้างทั้งหมดเกิดความเสียหายเนื่องจากโครงสร้างไม่สามารถรับน้ำหนักส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากการวิบัติ ซึ่งในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้แก่ การวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์เป็นการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อวัตถุหนึ่งภายใต้ภาวะสมดุล และกาวิเคราะห์ทางพลศาสตร์เป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่

ของวัตถุหนึ่งภายใต้แรงกระทำ ซึ่งพฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องในความเป็นจริงสอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ เนื่องจากมีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่แปรผันตามเวลา พร้อมทั้งปัจจัยที่เกิดจากการสั่นโดยธรรมชาติ ความหน่วง มวล พร้อมทั้งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างได้ทั้งในแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ซึ่งในการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อวัสดุยังไม่เลยจุดคราก แต่หากโครงสร้างเลยจุดครากไปแล้วจะทำให้ผลของการวิเคราะห์ไกลจากความเป็นจริงไปเรื่อย ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นจึงมีประสิทธิรูปในการวิเคราะห์โครงสร้างได้แม่นยำกว่าเนื่องจากพฤติกรรมจริงของโครงสร้างทุกชนิดล้วนมีความไม่เป็นเชิงเส้น

การจำลองพฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องจึงใช้การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจึงทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดแต่เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์ที่ต้องมีพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์หลายปัจจัยมาประกอบกัน เพื่อวิเคราะห์หาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องของโครงสร้าง โดยอาศัยตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Increase Factor ,DIF) เพื่อทำการวิเคราะห์ให้สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นเทียบเท่ากับพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดย DIF มีมาตรฐานที่แนะนำในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องคือมาตรฐาน GSA (2013) ได้กำหนดให้ใช้ DIF จากการกำหนดจุดหมุนที่ยอมให้ (  ) ของหน้าตัดภายในโครงสร้างได้มาจากจุดหมุนพลาสติกซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ไม่เชิงเส้นเท่านั้นจึงทำให้สมการของมาตรฐาน GSA (2013) ต้องทำการสุ่มตัวแปรด้วยการลองผิดลองถูก (trial and error) เพื่อหา  แล้วนำไปหา DIF ซึ่งการวิเคราะห์หา DIF ทำให้กระบวนการวิเคราะห์หา DIF ซ้ำซ้อนหลายขั้นตอน ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเพื่อพิจารณาหา DIF ได้อย่างเหมาะสม กับโครงสร้างที่มีลักษณะแตกต่างกันและจำนวนชั้น ซึ่งจะอ้างอิงขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจากมาตรฐานที่แนะนำ และเมื่อได้ DIF ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแล้วจะนำ DIF มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่อ้างอิง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการหา DIF ในโครงข้อแข็ง 2 มิติด้วยการพิจารณาจาก 2 ปัจจัยได้แก่ โมเมนต์สูงสุดของหน้าตัด ($M_U$) และจำนวนชั้นเพื่อนำมาเป็นพารามิเตอร์หลักในการวิเคราะห์โครงสร้างพร้อมทั้งสร้างสมการที่เหมาะสมในการคำนวณหา DIF ต่อไป

Keywords: Progressive Collapse, Dynamic Increase Factor, Non-linear Dynamics Analysis, Non-linear Statics Analysis

### *2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์*

เป็นที่ทราบกันดีว่าในปัจจุบันนี้เครื่องจักรกลและ ยานพาหนะต่าง ๆได้ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความเร็วรอบสูงๆ เช่น เครื่องของรถยนต์ รถไฟความเร็วสูง เครื่องบิน เรือเดินทะเลรวมทั้งอาคารได้ถูกออกแบบให้มีความสูงเพิ่มขึ้นเป็นต้น โดยอาคารหรือยานพาหนะเหล่านี้จะมีแรงกระทำแบบพลศาสตร์ (dynamic load) กระทำตลอดเวลาซึ่งจะมีขนาดมากน้อยเพียงใดย่อมขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและสภาพแวดล้อม ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอาคารต้องพิจารณาให้สามารถทนต่อสภาพแปรปรวนของแรงทางพลศาสตร์ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากขนาดทิศทางและตำแหน่งของแรงทางพลศาสตร์ที่กระทำต่อโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับเวลาเสมอ ด้วยเหตุนี้การตอบสนองของโครงสร้างจึงแปรเปลี่ยนตามเวลาด้วย โดยการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างทางพลศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน กล่าวว่าผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลย่อมเท่ากับผลคูณของมวลและความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังสมการ (1)

(1)

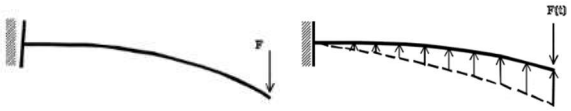
คือ มวลและคุณสมบัติความเฉื่อย (Inertia) ของโครงสร้าง

คือ สตีฟเนสเป็นแรงคืนตัวยืดหยุ่น

คือ ความหน่วงต่อการเคลื่อนที่

คือ ใช้แทนแรงภายนอกที่มากระทำต่อโครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์และทางสถิตยศาสตร์มีข้อแตกต่างกันสองประการคือ ลักษณะของแรงที่กระทำและการตอบสนองของระบบต่อแรงนั้น ๆ เช่นคานในรูป 1(ก) มีแรงแบบสถิตยศาสตร์ F กระทำที่ปลาย การโก่งของคาน และความเค้นที่เกิดขึ้นในคานจะขึ้นอยู่กับทิศทางของแรง F(t) ส่วนคานในรูป 1(ข) จะขึ้นอยู่กับการกระจายของแรงเฉื่อย




(ก) Statics Load (ข) Dynamics Load

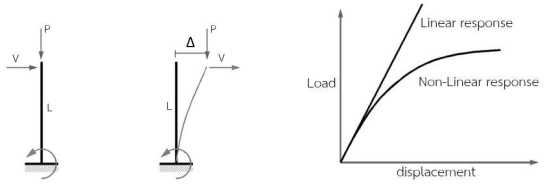
แรงแบบสถิตยศาสตร์ และแรงแบบพลศาสตร์ [1]

### *2.2 ประเภทของพฤติกรรมโครงสร้าง*

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถแบ่งออกได้ 4 วิธี คือ สถิตยศาสตร์เชิงส้น พลศาสตร์เชิงเส้น สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น และพลศาสตร์ไม่เชิงส้น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่จะใช้วิธี สถิตยศาสตร์เชิงส้น (Linear Statics Analysis) และพลศาสตร์เชิงเส้น (Linear Dynamics Analysis) ซึ่งวิธีดังกล่าวให้ค่าตอบสนองที่ถูกต้องภายใต้ ขอบเขตพฤติกรรมของโครงสร้างที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น การวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่นจำเป็นต้องใช้วิธี สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Statics Analysis) และพลศาสตร์ไม่เชิงส้น (Nonlinear Dynamics Analysis)

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสามารถใช้การวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่มีการเสียรูปเกินพิกัดยืดหยุ่นไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่าใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่าวิธีเชิงเส้น (Linear) เนื่องจากมีขั้นตอนการวิเคราะห์หลายขั้นตอนและมีความสลับซับซ้อนมากกว่า ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่าควรจะวิเคราะห์โครงสร้างเป็นแบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสม

เนื่องจากวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถวิเคราะห์ได้ 2 วิธี ได้แก่เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) และวัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) ดังแสดงในรูปที่ 2

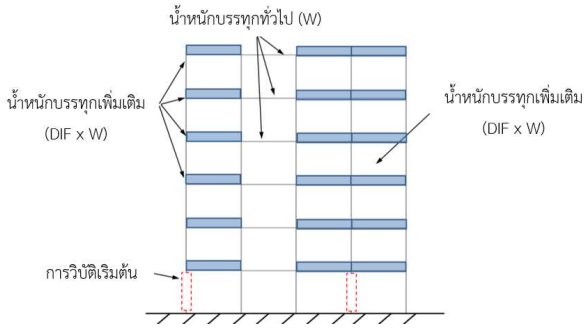



(ก) P-Delta Effect (ข)ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป

การวิเคราะห์โครงสร้างไม่เชิงเส้น

*2.3 มาตรฐาน GENERAL SERVICES ADMINISTRATION [2]*

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องตามมาตรฐาน GSA มีการกำหนดน้ำหนักบรรทุกในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งวิธี สถิตยศาสตร์เชิงเส้น สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น และพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3




น้ำหนักบรรทุกในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง [2]

จากรูปที่ 3 สามารถวิเคราะห์อาคารได้ด้วยการวิเคราะห์แบบวิธีสถิตยศาสตร์ซึ่งต้องกำหนดตัวคูณเพิ่มตามข้อกำหนดในมาตรฐานในบริเวณที่ทำการถอดเสาออก และการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องใช้ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ โดยหลักการวิเคราะห์จะกล่าวในหัวข้อถัดไป ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักบรรทุกทางเลือกจะสามารถวิเคราะห์ได้โดย วิธีสถิตยศาสตร์เชิงเส้น วิธีสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์สถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างดังตารางที่ 1 คือการหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ ( ) ซึ่งจะต้องพิจารณา

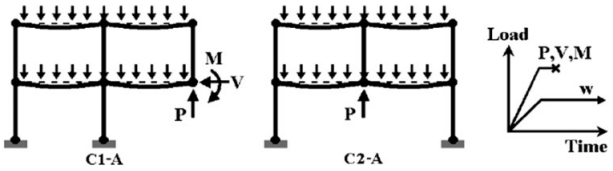
คือหมุนพลาสติกตามที่เกณฑ์ยอมรับสำหรับเอลิเมนต์ตามในมาตรฐาน GSA และ คือจุดหมุนพลาสติก ซึ่งในการกำหนดสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมด ให้เลือกอัตราส่วนที่น้อยที่สุดของ สำหรับเอลิเมนต์คาน หรือรอยต่อของโครงสร้าง

Dynamic Increase Factors (ΩN )

| Material | Structure Type | |
|---|---|---|
| Steel | Framed | ——— |
| Reinforced Concrete | Framed | ——— |
| | Load-bearing Wall | |
| Masonry | Load-bearing Wall | |
| Wood | Load-bearing Wall | |
| Cold-formed Steel | Load-bearing Wall | |

*2.4 วิธีน้ำหนักบรรทุกทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง*

เส้นทางน้ำหนักบรรทุกทางเลือกเป็นเทคนิคการวิเคราะห์อย่างง่าย ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดการพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารหรือโครงสร้างในกรณีเกิดการวิบัติขององค์อาคารหรือชิ้นส่วนรับน้ำหนักหลักดังรูปที่ 4 ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีเส้นทางน้ำหนักบรรทุกทางเลือกจะสมมุติให้องค์อาคารหรือชิ้นส่วนรับ น้ำหนักหลักเกิดการวิบัติและทำการลบชิ้นส่วนหลักนี้ออกจากการจำลองโครงสร้าง โครงสร้างที่เหลือจะถูกวิเคราะห์เพื่อพิจารณาแรงภายในชิ้นส่วนที่เหลือซึ่งอาจทำให้องค์อาคารหรือชิ้นส่วนรับน้ำหนักอื่น ๆ [3]




การวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง [4]

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นของวัสดุจะถูกกำหนดจุดหมุนพลาสติกที่ปลาย โดยการจำลองแรงเริ่มต้นที่แรงเป็นศูนย์แล้วเพิ่มแรงแบบคงที่ (เสายังไม่ถูกถอดออก) จนกว่าจะถึงสมดุลของโครงสร้าง หลังจากถึงจุดสมดุลของโครงสร้างแล้วให้ถอดเสาออกทันที ซึ่งระยะเวลาในการถอดต้องน้อยกว่าหนึ่งในสิบของระยะเวลาที่เกี่ยวข้องกับโหมดการตอบสนองของโครงสร้าง ซึ่งในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างในโปรแกรม Sap2000 การถอดเสาออกในทันทีจะถูกจำลองด้วยการแทนที่เสาด้วยปฏิกิริยาที่เท่ากันที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตยศาสตร์ของอาคารโดยแทนด้วยโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงตามแกนที่เกิดขึ้น ณ รอยต่อนั้น ซึ่งแรงเหล่านี้จะถูกลบออกเมื่อเวลาผ่านไปเพื่อแทนการถอดเสาออก

*2.5 ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์*

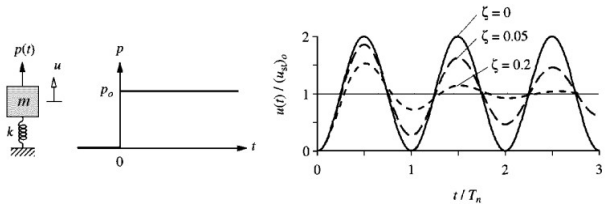
ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์เป็นฟังก์ชันของเวลากับแรง ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของแรงซึ่งมักถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของการโก่งตัวหรือความเค้น การกระจัด เมื่อวิเคราะห์แรงแบบพลศาสตร์ซึ่งเปรียบเทียบกับการกระจัดจากแรงทางสถิตยศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (2)

——— (2)

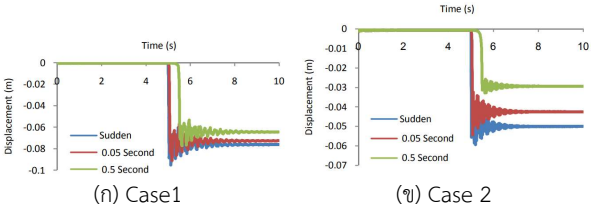
คือ การเคลื่อนที่สูงสุด

คือ การเคลื่อนที่สถิตยศาสตร์

ในรูปที่ 4 เป็นการพิจารณาการตอบสนองของระบบระดับความเสรีเดียวต่อแรงภายนอกดังแสดงรูปที่ 5(ก) ในรูปแบบแรงมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Step Force) ดังรูปที่ 5(ข) จะมีการตอบสนองของโครงสร้างดังรูปที่ 5(ค)




การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำฟังก์ชันขั้นบันได [5]




(ก) Case1 (ข) Case 2

Influence of column removal time [7]

*2.6 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการพังทลายต่อเนื่อง*

ในระยะที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการพังทลายต่อเนื่องโดยเริ่มจากผลการศึกษาของ Kaewkulchai and Williamson [4] โดยได้ศึกษาผลของการกระจายแรงแบบพลศาสตร์หลังจากการวิบัติของโครงสร้างอย่างน้อยหนึ่งเอเลเมนต์ โดยใช้แบบจำลองเป็นก้อน (lumped plasticity model) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด และการเสื่อมถอยของกำลังสติฟเนส พบว่าผลการวิเคราะห์การกระจายแรงด้วยวิธีพลศาสตร์เป็นคุณลักษณะที่สำคัญของการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง และควรนำมาพิจารณาเพื่อหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ที่สิ้นเปลืองมากเกินไป และต่อมาเกรียงศักดิ์และคณะ [6] ได้วิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารโครงข้อแข็งโดยทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ของอาคารโครงข้อแข็ง 2 ชั้น โดยอาคารโครงข้อแข็งนั้นรับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอขนาด 0.4 kips/in ที่กระทำต่อคานสำหรับการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีนั้นอาคารโครงข้อแข็งจะถูกวิเคราะห์โดยเริ่มหลังจากการวิบัติเริ่มต้นสมมุติของเสา โดยใช้รูปร่างดั้งเดิมของอาคารโครงข้อแข็ง ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้รูปร่างที่เสียรูปในขณะเกิดการวิบัติเริ่มต้นสมมุติของเสาจะให้การตอบสนองของอาคารโครงข้อแข็งที่แตกต่างไม่มากสำหรับการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ น้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอจะมีลักษณะเป็น Pulse สี่เหลี่ยมผืนผ้าตลอดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ขนาดของ Time step มีค่าเท่ากับ 0.01 วินาที และมวลในแต่ละข้างของคานมีค่าเท่ากับ 0.124 kips-s in จากการวิเคราะห์พบว่าการตอบสนองทางพลศาสตร์สามารถนำไปสู่การเสียรูปพลาสติกที่สูงขึ้นอย่างมากผลที่ตามมาจากความต้องการของการเสียรูป (Deformation demand) ที่เพิ่มขึ้นอาจจะทำให้เกิดการวิบัติของชิ้นส่วนต่างๆ และก่อให้เกิดการพังทลายอย่างต่อเนื่องขึ้น ในส่วนของของความเสียหายโดยปัจจัยบริเวณที่เกิดการวิบัติมีการศึกษา ในส่วนการพิจารณาผลของเวลาที่ใช้ในการจำลอง (Time load) Tavakoli and Kiakojouri [7] ได้ทำการศึกษาการตอบสนองของโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นภายใต้การวิบัติของเสาอย่างกะทันหัน พบว่าการวิบัติของเสาที่ระดับที่สูงกว่าจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งมากกว่าการวิบัติเสาในชั้นแรก เนื่องจากมีโครงสร้างในการดูดซับพลังงานน้อยกว่าการถอดเสาชั้นล่าง และการวิบัติเสาอย่างกะทันหันทำให้การตอบสนองของโครงสร้างที่มากกว่าการวิบัติเสาทีละน้อย เมื่อดำเนินการวิบัติเสาทีละน้อยเกิน 0.5 วินาที การเสียรูปในแนวดิ่งสูงสุดจะลดลงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 6

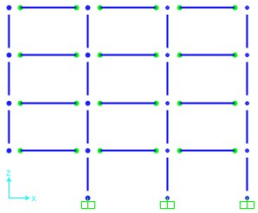
ตามด้วย Aldo McKay et al. [8] ได้ทำการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องโดยการจำลองโมเดลทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติด้วยโปรแกรม sap2000 เพื่อจำลองพฤติกรรมของอาคารภายใต้การการวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักบรรทุกทางเลือก (Alternate Load Path ,ALP) โดยพิจารณาลักษณะของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear material) และเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) โดยสร้างแบบจำลองจริงสองชั้นขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้อง ของการสร้างแบบจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์บนน้ำหนักบรรทุก 2.0 ที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการวิเคราะห์ ALP เป็นการออกแบบโครงสร้างที่เกินความเป็นจริงมากเกินไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่อนุญาตให้มีการเสียรูปขนาดใหญ่ (Large Deformations) ผลการศึกษาพบว่า สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ มีตั้งแต่ 1.05 ถึง 1.75 ซึ่งน้อยกว่า 2.0 อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ (Normalized rotations) มากกว่า 1.0 ในการพิจารณาในรูปแบบเดียวกันสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กสามารถหาตัวคูณเพิ่มพลศาสตร์ (DIF) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.2 ถึง 1.8

ในหัวข้อกล่าวถึงแนวคิดในการศึกษาการตอบสนองของของโครงสร้างรากการวิบัติต่อเนื่อง โดยใช้โครงสร้างที่กำหนดในหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างในระบบ 2 มิติในการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างเบื้องต้นด้วยวิธีสถิตยศาสตร์เชิงเส้นเพื่อหาแรงตามแกนแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบริเวณเสาก่อนทำการปลดออกซึ่งจะพิจารณาตามหัวข้อที่ 3.1 พร้อมทั้งการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างด้วยวิธีสถิตยศาสตร์เชิงเส้น และวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นเพื่อหาการเสียรูปสูงสุดของโครงสร้างทั้ง 2 วิธีแล้วนำการเสียรูปมาเปรียบเทียบกันเพื่อทำการวิเคราะห์แบบพฤติกรรมที่ควบคุมด้วยการเสียรูปเพื่อทำให้การกระจัดของโครงสร้างให้มีการเคลื่อนที่เทียบเท่ากันทั้ง 2 วิธีแล้วนำแรงที่เพิ่มมากขึ้นจากวิธีสถิตยศาสตร์เชิงเส้นมาเปรียบเทียบกับวิธีทางพลศาสตร์เพื่อหาค่าตัวคูณกำลังตามหัวข้อที่ 3.3 ในงานวิจัยชิ้นนี้จะแนะนำในการออกแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง

*3.1 สมมติฐานของแบบจำลอง*

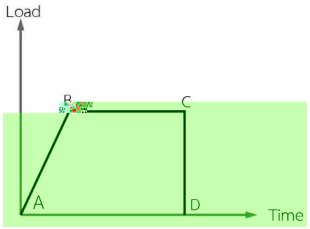
ในการสร้างแบบจำลองจะสร้างแบบจำลองโครงสร้างในระบบ 2 มิติเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการพังทลายต่อเนื่องด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นซึ่งตัวแปรที่ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วย

3.1.1 สมมติฐานของแบบจำลอง ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กำลังรับแรงอัดคอนกรีตกำลังดึงในเหล็กเสริม ใช้หน่วยแรงตามข้อกำหนดของ วสท. ไม่พิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเสาและคาน พิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างตามลักษณะการใช้งานจริงซึ่งกำหนดตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) [9] ในส่วนน้ำหนักของอาคารจะแบ่งน้ำหนักแต่ละชั้นลงหัวเสาพร้อมทั้งกำหนดจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support) จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปสร้างแบบจำลองอาคารดังแสดงในรูปที่ 7



การจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์

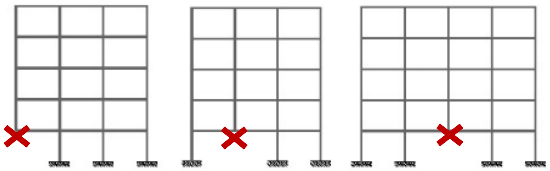
3.1.2 การจำลองแรงทางพลศาสตร์ของโครงสร้างในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์โดยการการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะทำการจำลองแรงเป็น 3 ช่วง ในช่วงแรก (จุด A ถึงจุด B) เป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ของโครงสร้างช่วงที่สอง (จุด B ถึงจุด C) จะทำการจำลองน้ำหนักบรรทุกเป็นเส้นตรง (constant load) เพื่อเปรียบเสมือนโครงสร้างจริงที่มีน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์ และช่วงที่สาม (จุด C ถึงจุด D) เป็นการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหัน ซึ่งจะมีผลกระทบในการเสียรูปของโครงสร้างมากที่สุด




8 การจำลองแรงทางพลศาสตร์

*3.2 การสร้างแบบจำลอง*

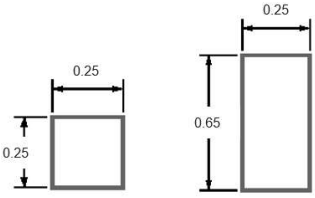
ในการศึกษาผลของการจำลองมวลต่อการวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่อง โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นและวิธีสถิตยศาสตร์เชิงเส้น ในลักษณะโครงข้อแข็งใน 2 มิติได้กำหนดการเลือกรูปแบบการวิบัติเริ่มต้นได้ 3 แบบ ได้แก่การวิบัติของเสาภายนอก (CASE E) การวิบัติของเสาภายในต่อเนื่อง 1 ช่วง (CASE I) และการวิบัติของเสาภายในต่อเนื่อง 2 ช่วง (CASE C) ดังแสดงในรูปที่ 9 ของอาคารที่มีความสูง 2-7 ชั้นโดยมีความสูงชั้นละ 3.0 ม. และคานมีความยาวช่วงละ 5.0 ม.



(ก) CASE E (ข) CASE I (ค) CASE C

โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา

จากรูปที่ 9 เป็นลักษณะของอาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์นอกจากลักษณะของโครงสร้างแล้วจำเป็นต้องพิจารณาผลของชิ้นส่วนโครงสร้างด้วย ซึ่งจะสามารถพิจารณาลักษณะชิ้นส่วนได้ทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ ปัจจัยที่ 1 กำหนดให้เสาไม่เกิดการวิบัติ ปัจจัยที่ 2 กำหนดให้คานไม่เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน และปัจจัยที่ 3 การพิจารณาผลของโมเมนต์เฉื่อย (Moment of Inertia) นอกจากจะพิจารณาในด้านแรงภายในแล้วยังพิจารณาการเสียรูปด้วยดังรูปที่ 10




หน้าตัดเสาและคานที่ใช้ในการวิเคราะห์

เพื่อความสะดวกในการสร้างแบบจำลองผู้วิจัยได้ทำการแปลงโมเมนต์ความเฉื่อยดังกล่าวโดยคำนวณจากหน้าตัดคอนกรีตโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ (3)

—— (3)

คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน X

คือ ความกว้างหน้าตัด

คือ ความลึกหน้าตัด

การกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง (Load Combination) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องของโครงสร้างนอกเหนือน้ำหนักของคาน และเสาจะอ้างอิงจากมาตรฐาน GSA ปี2013 โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกรวม 1.2DL + 0.5LL และมีการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

| น้ำหนักคาน | น้ำหนักผนังสูง 2.35 ม. | น้ำหนักพื้นกว้าง 2.5 ม. | วัสดุทับหน้ากว้าง 2.5 ม. | น้ำหนักจรกว้าง 2.5 ม. | น้ำหนักรวม |
|---|---|---|---|---|---|
| (กก./ม) | (กก./ม) | (กก./ม) | (กก./ม) | (กก./ม) | (กก./ม) |
| 390 | 508 | 1,080 | 360 | 450 | 2,788 |

*3.3 การหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์*

ในการพิจารณาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของการตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐาน GSA ปี 2013 ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์เชิงเส้น โดยวิเคราะห์โครงสร้างหาโมเมนต์ประลัย และกำหนดโมเมนต์พลาสติก ดังแสดงในรูป 11(ก) เพื่อหาการเสียรูปเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตยศาสตร์ให้เทียบเท่าการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์

(ก) (ข)

การเสียรูปที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์

ขั้นตอนที่ 2 ทำการวิเคราะห์ผลแบบสถิตยศาสตร์เชิงเส้น และพลศาสตร์เชิงเส้นเพื่อหาค่าการเสียรูปในแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 11(ก) และรูปที่ 11(ข) เพื่อหาค่าการเสียรูปเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางสถิตยศาสตร์ให้เทียบเท่าการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์ ซึ่งจะสามารถหาการเสียรูปเพิ่มเติม ได้ดังสมการที่ (4) เพื่อนำไปหาตัวคูณเพิ่มกำลังทางพลศาสตร์ในขั้นตอนต่อไป

(4)

คือ การเสียรูปจากการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

คือ การเสียรูปจากการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างครั้งที่ 2 โดยกำหนดการเสียรูปเพิ่มเติม ลงในการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์เชิงเส้นดังในรูป 12(ก) เพื่อทำให้การเสียรูปทางสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นให้เทียบเท่าวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมที่ควบคุมด้วยการเสียรูปเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมโดยใช้โปรแกรม Sap2000 ช่วยในการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม ดังแสดงรูปที่ 12(ข)

(ก) (ข)

การเสียรูปเพิ่มเติม และการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเตม รรทุกเพ อน า าก ปโ โ□

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมของโครงสร้างทั้ง 3 ประเภท

| กรณี | $M_U/M_P$ | น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม ($W_{IF}$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CASE E | 0.5 | 2,584 | 2,497 | 2,592 | 2,506 | 2,493 | 2,583 |
| | 0.6 | 2,160 | 2,075 | 2,348 | 2,414 | 2,482 | 2,471 |
| | 0.7 | 1,591 | 1,606 | 1,879 | 2,102 | 2,228 | 2,256 |
| | 0.8 | 1,226 | 1,224 | 1,606 | 1,715 | 1,899 | 1,930 |
| | 0.9 | 993 | 1,012 | 1,275 | 1,432 | 1,571 | 1,684 |
| | 1.0 | 892 | 972 | 1,133 | 1,268 | 1,383 | 1,475 |
| CASE I | 0.5 | 2,303 | 2,444 | 2,375 | 2,357 | 2,324 | 2,339 |
| | 0.6 | 2,275 | 2,384 | 2,350 | 2,289 | 2,324 | 2,272 |
| | 0.7 | 1,994 | 2,071 | 2,182 | 2,150 | 2,259 | 2,181 |
| | 0.8 | 1,466 | 1,554 | 1,702 | 1,944 | 2,110 | 2,127 |
| | 0.9 | 1,087 | 1,155 | 1,293 | 1,484 | 1,709 | 1,894 |
| | 1.0 | 803 | 866 | 972 | 1,138 | 1,351 | 1,584 |
| CASE C | 0.5 | 2,308 | 2,364 | 2,373 | 2,285 | 2,362 | 2,450 |
| | 0.6 | 2,231 | 2,326 | 2,370 | 2,348 | 2,355 | 2,406 |
| | 0.7 | 1,889 | 2,045 | 2,132 | 2,151 | 2,216 | 2,324 |
| | 0.8 | 1,331 | 1,488 | 1,765 | 2,007 | 2,139 | 2,273 |
| | 0.9 | 868 | 1,008 | 1,252 | 1,571 | 1,891 | 2,137 |
| | 1.0 | 498 | 622 | 841 | 1,128 | 1,459 | 1,926 |

ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์โครงสร้างทั้ง 3 ประเภท

| กรณี | $M_U/M_P$ | ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CASE E | 0.5 | 1.93 | 1.90 | 1.93 | 1.90 | 1.89 | 1.93 |
| | 0.6 | 1.77 | 1.74 | 1.84 | 1.87 | 1.89 | 1.89 |
| | 0.7 | 1.57 | 1.58 | 1.67 | 1.75 | 1.80 | 1.81 |
| | 0.8 | 1.44 | 1.44 | 1.58 | 1.62 | 1.68 | 1.69 |
| | 0.9 | 1.36 | 1.36 | 1.46 | 1.51 | 1.56 | 1.60 |
| | 1.0 | 1.32 | 1.33 | 1.41 | 1.45 | 1.50 | 1.53 |
| CASE I | 0.5 | 1.83 | 1.88 | 1.85 | 1.85 | 1.83 | 1.84 |
| | 0.6 | 1.82 | 1.86 | 1.84 | 1.82 | 1.83 | 1.81 |
| | 0.7 | 1.72 | 1.74 | 1.78 | 1.77 | 1.81 | 1.78 |
| | 0.8 | 1.53 | 1.56 | 1.61 | 1.70 | 1.76 | 1.76 |
| | 0.9 | 1.39 | 1.41 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.68 |
| | 1.0 | 1.29 | 1.31 | 1.35 | 1.41 | 1.48 | 1.57 |
| CASE C | 0.5 | 1.83 | 1.85 | 1.85 | 1.84 | 1.85 | 1.88 |
| | 0.6 | 1.80 | 1.83 | 1.85 | 1.84 | 1.84 | 1.86 |
| | 0.7 | 1.68 | 1.73 | 1.76 | 1.77 | 1.79 | 1.83 |
| | 0.8 | 1.48 | 1.53 | 1.63 | 1.72 | 1.77 | 1.82 |
| | 0.9 | 1.31 | 1.36 | 1.45 | 1.56 | 1.68 | 1.77 |
| | 1.0 | 1.18 | 1.22 | 1.30 | 1.40 | 1.52 | 1.69 |

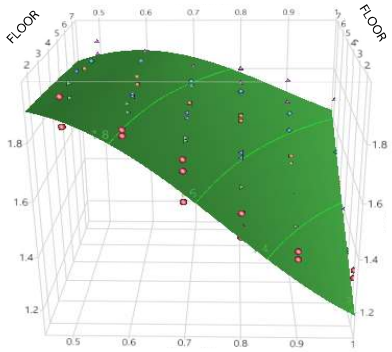
จากตารางที่ 5 เป็นผลการวิเคราะห์หา DIF ของโครงสร้างทั้ง 3 ประเภทได้แก่ โครงสร้างที่วิบัติของเสาภายนอก โครงสร้างที่วิบัติของเสาภายในต่อเนื่อง 1 ข้าง และโครงสร้างที่วิบัติของเสาภายในต่อเนื่อง 2 ข้าง ด้วยการพิจารณาอัตราส่วนของโมเมนต์สูงสุดกับโมเมนต์พลาสติกของหน้าตัดคานจาก 0.5 ถึง 1.0 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์หาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์พบว่า

1. การวิบัติของเสาภายนอก โครงสร้าง 2 ชั้นมีDIF 1.99-1.32 โครงสร้าง 3 ชั้นมีDIF 1.90-1.35 โครงสร้าง 4 ชั้นมีDIF 1.93-1.41 โครงสร้าง 5 ชั้นมีDIF 1.90-1.45 ที่โครงสร้าง 6 ชั้นมีDIF 1.89-1.50 และโครงสร้าง 7 ชั้นมีDIF 1.93-1.53

2. การวิบัติของเสาภายในที่โครงสร้างต่อเนื่อง 1 ข้าง โครงสร้าง 2 ชั้นมีDIF 1.83-1.29 โครงสร้าง 3 ชั้นมีDIF 1.88-1.31 โครงสร้าง 4 ชั้นมีDIF 1.85-1.35 โครงสร้าง 5 ชั้นมีDIF 1.85-1.41 ที่โครงสร้าง 6 ชั้นมีDIF 1.83-1.48 และโครงสร้าง 7 ชั้น มีDIF 1.84-1.57

3. การวิบัติของเสาภายในที่โครงสร้างต่อเนื่อง 2 ข้าง โครงสร้าง 2 ชั้นมีDIF 1.83-1.18 โครงสร้าง 3 ชั้นมีDIF 1.85-1.22 โครงสร้าง 4 ชั้นมีDIF1.85-1.30 โครงสร้าง 5 ชั้น มีDIF1.82-1.40 ที่โครงสร้าง 6 ชั้นมีDIF1.85-1.52 และโครงสร้าง 7 ชั้นมีDIF1.88-1.69

จากผลการหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของโครงสร้างทั้ง 3 ประเภท สามารถนำผลมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการในการหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปดังแสดงในรูปที่ 12




การสร้างสมการในการคำนวณหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

จากรูปที่ 12 เป็นการแสดงกราฟวิเคราะห์ DIF เพื่อนำมาสร้างสมในการวิเคราะห์หา DIF โดยทำการจำนวน 1 สมการ อัตราส่วน$M_U/M_P$ 0.50-1.00 เป็นการรวมผลของตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของโครงสร้างทั้ง 3 กรณี จำนวน 108 ตัวอย่าง ของโครงสร้างทั้ง 3 ประเภทไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่จำนวนชั้นของอาคารส่งผลต่อ DIF จึงต้องจัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) โดยจะทำให้มีรูปแบบสมการมีความไม่ซับซ้อนซึ่งสามารถรวมผลของจำนวนชั้นในโครงสร้างได้ ดังนั้นจึงกำหนดสมการให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันดังแสดงในสมการที่ 6

—— (6)

เมื่อ —— = 0.50 - 1.00 และ = 3 – 7

คือ ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF)

คือ โมเมนต์สูงสุด (Moment yield)

คือ โมเมนต์พลาสติก (Moment Plastics)

คือ จำนวนชั้น (floor)

จากสมการที่ 6 และรูปที่ 11 เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างสมการในการวิเคราะห์โครงสร้างจากโครงสร้างทั้ง 3 ประเภทให้อยู่ในสมการเดียว ซึ่งพบว่าสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่า $R^2$ อยู่ที่ 0.958 แต่เมื่อพิจารณาร้อยละของความคลาดเคลื่อน 0.0-8.8 ของตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องเมื่อพิจารณาผลการศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบกับแบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของความหน่วง การเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็ง พร้อมทั้งควรศึกษาปัจจัยของจำนวนแล้วและ อัตราส่วนของโมเมนต์ดัด ที่มีค่ามากขึ้นเพื่อพิจารณาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปเพิ่มเติมพบว่า โครงสร้างที่วิบัติบริเวณริมเสามีการเสียรูปมากที่สุด ตามด้วยโครงสร้างที่วิบัติของเสาภายในที่คานต่อเนื่อง 1 ข้าง และโครงสร้างที่วิบัติของเสาภายในที่คานต่อเนื่อง 2 ข้าง ตามลำดับ

2. ตัวคูณพลศาสตร์บนแรง 2.0 ที่ใช้ในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นเป็นการออกแบบที่สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย

3. การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้นจะเห็นได้ว่าตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ จะมีปัจจัยที่ส่งผลต่อ DIF คือ อัตราส่วนของโมเมนต์ดัด จำนวนชั้น ซึ่งอัตราส่วนของโมเมนต์ดัดที่มีค่าเพิ่มลดลงจะส่งผลให้ DIF มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเข้าใกล้ 2.0 จำนวนชั้นที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ DIF มีค่าเพิ่มมากขึ้น และภายใต้เงื่อนไขเดียวกันลักษณะโครงสร้างไม่มีผลต่อตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[1] เดช พุทธเจริญทอง. (2548). *การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์*. กรุงเทพฯ. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, หน้า 1-3.

[2] GSA. (2013). *Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance*, General Service Administration, Washington, DC.

[3] เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย. (2547). การวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารโครงข้อแข็ง. *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี*, 19-21 พฤษภาคม 2547.

[4] Kaewkulchai G. and Williamson E. B. (2003a). Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis. *Computers and Structures 82,* pp.639–651.

[5] Chopra A. K. (2014). *dynamics of structures*. 4 th Edition. Pearson Education, pp.129-131.

[6] เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย ,สถาพร โภคา ,วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์ และ กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย. (2548). การวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารโครงข้อแข็ง. *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10 พัทยา จ.ชลบุรี*, 2-4 พฤษภาคม 2548.

[7] Tavakoli, H.R. and Kiakojouri, F. (2013). Numerical study of progressive collapse in framed structures: A new approach for dynamic column removal. *International Journal of Engineering. Transaction A: Basics, 26*, pp.685-692.

[8] Aldo Mckay. (2012). Alternate Path Method in Progressive Collapse Analysis: Variation of Dynamic and Nonlinear Load Increase Factors. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 17, pp.152-160.

[9] กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527). *ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 101 ตอนที่ 143*. 11 ตุลาคม 2527