



ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องของโครงข้อแข็ง 2 มิติ Dynamic Increase Factor to Progressive Collapse Analysis of Planar Frames

ฉัตรชัย อัครอำนวย* และ เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย

Chatchai Akkaraamnuay* and Griengsak Kaewkulchai

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

*E-mail : Chatchai.ak.58@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องทางพลศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครงข้อแข็งใน 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปในการวิเคราะห์โครงสร้าง ตัวอย่างการศึกษาเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 5 ตัวอย่าง ที่มีความสูง 3 ถึง 7 ชั้นโดยแต่ละชั้นสูง 3 ม. กว้างช่วงละ 5 ม. ใช้หน้าตัดคานขนาด 25 x 65 ซม. และหน้าตัดเสาขนาด 25 x 25 ซม. กำหนดการเลือกรูปแบบการวิบัติเริ่มต้นของโครงสร้างจากการวิบัติบริเวณริมเสาของอาคารในการวิเคราะห์ทำการแบ่งชิ้นส่วนคานออกเป็น 8 ชิ้นส่วนย่อย การจำลองมวลสำหรับการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ใช้วิธีการจำลองมวลแบบเป็นก้อน และการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเชิงเส้นใช้วิธีการจำลองจุดหมุนแบบพลาสติกที่ปลายของชิ้นส่วนคานจากผลการศึกษา พบว่าจำนวนชั้นที่มากขึ้นจะส่งผลให้โมเมนต์พลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมากขึ้น และยังส่งผลให้ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแบบสถิตยไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบกับวิธีแบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์มีค่าตั้งแต่ 1.35 ถึง 1.53 ซึ่งน้อยกว่า 2.0 อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวคูณพลศาสตร์ 2.0 ที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องเป็นการออกแบบโครงสร้างที่เกินความเป็นจริงมากเกินไป

คำสำคัญ : การพังทลายต่อเนื่อง ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

Abstract

This Research project studies the dynamic factor for nonlinear dynamic progressive collapse of planar frames by using ready-made computer program. The study samples are reinforced concrete structures with 3-meter floor height and 5-meter bay width, using a beam cross section of 25 x 65 cm and a column cross section of 25 x 25 cm. of 5 case studies for three to seven story. Starting of In progressive collapse analysis was employed by removing of an outside column. For each case, the beam members were modeled by using 8 elements. 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, it was found that the higher the number of floors results in more plastic moment in the structure. As the number of floors increases higher Dynamic Increase Factor is obtained. In structural analysis, the dynamic increase factors obtained by the nonlinear static analysis method compared with the nonlinear dynamics analysis method range from 1.35 to 1.53, significantly less than 2.0, which currently generally used in analysis. It shows that value of 2.0 is obviously too conservative design.

Keywords : Progressive Collapse, Dynamic Increase Factor



บทนำ

การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารเป็นการพังทลายต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ โดยเกิดจากความเสียหายส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลลุกลามไปยังส่วนอื่นจนทำให้โครงสร้างทั้งหมดเกิดความเสียหายเนื่องจากโครงสร้างไม่สามารถรับน้ำหนักส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นจากการวิบัติ ซึ่งในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิต (Statics structure) และการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ (Dynamics structure) ซึ่งพฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องในความเป็นจริงจะสอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ เนื่องจากมีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่แปรผันตามเวลา พร้อมทั้งปัจจัยที่เกิดจากการสั่นโดยธรรมชาติ ความหน่วง มวล สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ซึ่งในการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อแรงในวัสดุยังไม่เลยจุดคราก แต่หากโครงสร้างเลยจุดครากไปจะทำให้ผลของการวิเคราะห์ไกลจากความเป็นจริงไปเรื่อย ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นจึงมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์โครงสร้างได้แม่นยำกว่า เนื่องจากโครงสร้างทุกชนิดล้วนมีความไม่เป็นเชิงเส้น

การจำลองพฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องจึงใช้การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นซึ่งจะให้การวิเคราะห์โครงสร้างใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น เป็นการวิเคราะห์ที่มีความยุ่งยากในการวิเคราะห์หาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จึงมีการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น โดยอาศัยตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Increase Factor, DIF) เพื่อคูณขยายผลการวิเคราะห์โครงสร้างสถิตไม่เชิงเส้น ให้เทียบเท่ากับพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยมีมาตรฐานที่แนะนำในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง คือมาตรฐาน GSA (2013) ซึ่งกำหนดให้ใช้ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์จากการกำหนดจุดหมุนที่ยอมให้ของหน้าตัดโครงสร้าง อย่างไรก็ตามเนื่องจากคำแนะนำตามมาตรฐานในการหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) ในการวิเคราะห์ผลของการพังทลายต่อเนื่องมีที่มาจากสมการคานอย่างง่าย (Simple beam) โดยยังไม่มีการศึกษาในระบบโครงสร้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเพื่อพิจารณาหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) ให้เหมาะสมกับโครงสร้างที่มีลักษณะหลายช่วงและหลายชั้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่แนะนำ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการเปรียบเทียบการจำลองพฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น กับ การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตไม่เชิงเส้น ด้วยการวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้น และการเสียรูปสูงสุดของโครงสร้าง พร้อมทั้งหาตัวคูณทางพลศาสตร์ (DIF) ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตเชิงเส้น

วิธีการวิจัย

1. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องเกิดจากการวิบัติจากจุดใดจุดหนึ่งที่ลุกลามไปยังส่วนอื่นของโครงสร้างซึ่งในการจำลองพฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะต้องทำการวิเคราะห์โดยพลศาสตร์โครงสร้างเนื่องจากสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของโครงสร้างได้ พร้อมทั้งความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุด้วย การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นสามารถศึกษาผลของการเสียรูปของโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากการครากของหน้าตัด

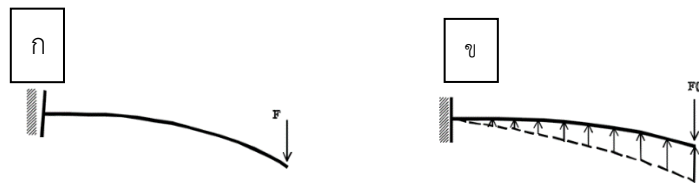
1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ (Structure dynamics)

เป็นที่ทราบกันดีว่าในปัจจุบันนี้เครื่องจักรกลและ ยานพาหนะต่าง ๆ ได้ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความเร็วรอบสูง ๆ เช่น เครื่องของรถยนต์ รถไฟความเร็ว สูง เครื่องบิน เรือเดินทะเล รวมทั้งอาคารได้ถูกออกแบบให้มีความสูงเพิ่มขึ้นเป็นต้น ยานพาหนะหรืออาคารเหล่านี้จะมีแรงกระทำแบบพลศาสตร์ (Dynamic load) กระทำตลอดเวลาซึ่งจะมีขนาดมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและสภาพแวดล้อม ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอาคาร ต้องพิจารณาให้สามารถทนต่อสภาพแปรปรวนของแรงทางพลศาสตร์ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากขนาดทิศทางและตำแหน่งของแรงทางพลศาสตร์ที่กระทำต่อ

โครงสร้างจะขึ้นอยู่กับเวลาเสมอ ด้วยเหตุนี้การตอบสนองของโครงสร้างจึงแปรเปลี่ยนตามเวลาด้วย โดยการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างทางพลศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งกล่าวว่าผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลย่อมเท่ากับผลคูณของมวลและความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังสมการ (1)

$$F(t) = m\ddot{x} \quad (1)$$

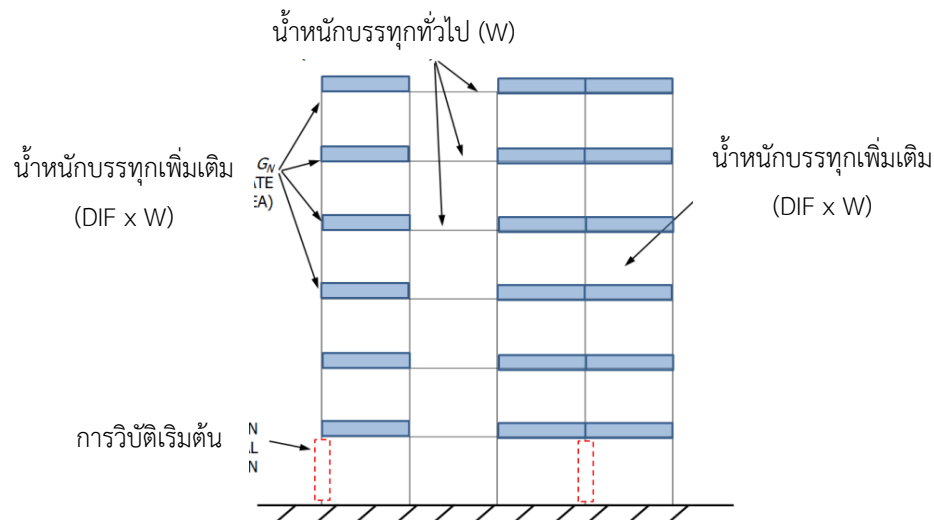
การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์และทางสถิตมีข้อแตกต่างกันสองประการคือ ลักษณะของแรงที่กระทำและการตอบสนองของระบบต่อแรงนั้น ๆ เช่น คานในภาพ 1(ก) มีแรงแบบสถิต F กระทำที่ปลาย การโก่งของคานและความเค้นที่เกิดขึ้นในคานจะขึ้นอยู่กับทิศทางของแรง $F(t)$ ส่วนคานในภาพ 1(ข) จะขึ้นอยู่กับกระจายของแรงเฉื่อย



ภาพที่ 1 (ก) คานรับแรงแบบสถิต (ข) คานรับแรงแบบพลศาสตร์ (เดช, 2548)

1.2 มาตรฐาน General services administration (GSA, 2013)

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องตามมาตรฐาน GSA มีการกำหนดน้ำหนักบรรทุกในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งวิธี สถิตเชิงเส้น สถิตไม่เชิงเส้น และพลศาสตร์เชิงเส้น ดังแสดงในภาพที่ 2

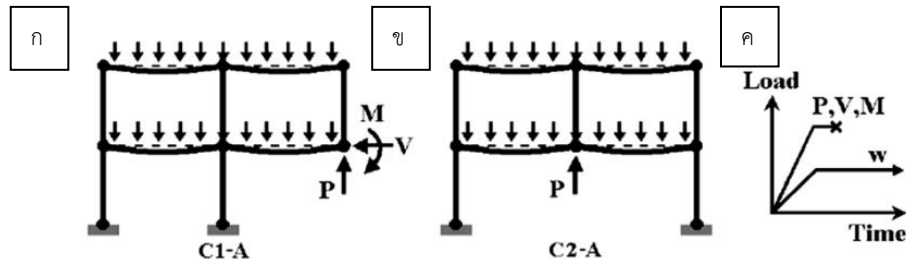


ภาพที่ 2 การกำหนดน้ำหนักบรรทุกในการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง (GSA, 2013)

จากภาพที่ 2 สามารถวิเคราะห์อาคารได้ด้วยการวิเคราะห์แบบวิธีสถิตซึ่งต้องกำหนดตัวคูณเพิ่มตามข้อกำหนดในมาตรฐานในบริเวณที่ทำการถอดเสาออก การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องใช้ค่าคูณเพิ่ม ซึ่งหลักการวิเคราะห์จะกล่าวในหัวข้อถัดไป ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักบรรทุกทางเลือก (Alternate load path) สามารถวิเคราะห์ได้โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิธีสถิตเชิงเส้น วิธีสถิตไม่เชิงเส้น และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

1.3 วิธีนำน้ำหนักบรรทุกทุกทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

เส้นทางน้ำหนักบรรทุกทุกทางเลือก (Alternate load path) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ง่ายในการศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดการพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารหรือโครงสร้างในกรณีเกิดการวิบัติขององค์อาคารหรือชิ้นส่วนรับน้ำหนักหลักดังภาพที่ 3 ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีเส้นทางน้ำหนักบรรทุกทุกทางเลือกจะสมมุติให้องค์อาคารหรือชิ้นส่วนรับน้ำหนักหลักเกิดการวิบัติและทำการลบชิ้นส่วนหลักนี้ออกจากการจำลองโครงสร้าง โครงสร้างที่เหลือจะถูกวิเคราะห์เพื่อพิจารณาแรงภายในชิ้นส่วนที่เหลือซึ่งอาจทำให้องค์อาคารหรือชิ้นส่วนรับน้ำหนักอื่น ๆ (เกรียงศักดิ์, 2547)



ภาพที่ 3 การวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง (Kaewkulchai, 2003)

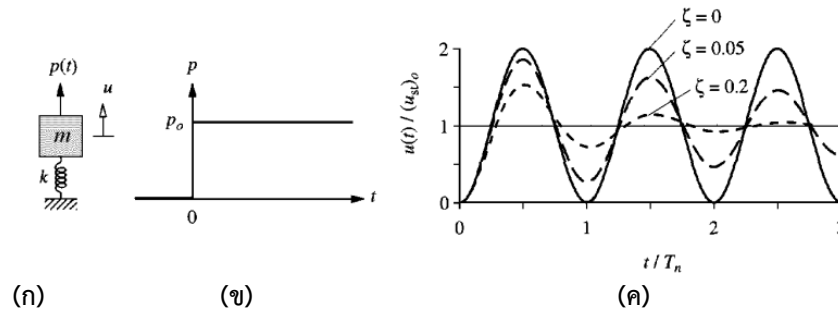
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นของวัสดุจะถูกกำหนดจุดหุนพลาสติกที่ปลาย โดยการจำลองแรงเริ่มต้นที่แรงเป็นศูนย์แล้วเพิ่มแรงแบบคงที่ (เสายังไม่ถูกถอดออก) จนกว่าจะถึงสมดุลของโครงสร้าง หลังจากนั้นถึงจุดสมดุลของโครงสร้างแล้วให้ถอดเสาออกทันที ซึ่งระยะเวลาในการถอดต้องน้อยกว่าหนึ่งในสิบของระยะเวลาที่เกี่ยวข้องกับโหมดการตอบสนองของโครงสร้าง ซึ่งในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างในโปรแกรม Sap2000 การถอดเสาออกในทันทีจะถูกจำลองด้วยการแทนที่เสาด้วยปฏิกิริยาที่เท่ากันที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตของอาคารโดยแทนด้วยโมเมนต์ดัดแรงเฉือน และแรงตามแกนที่เกิดขึ้น ณ รอยต่อ นั้น ซึ่งแรงเหล่านี้จะถูกลบออกเมื่อเวลาผ่านไปเพื่อแทนการถอดเสาออก

1.4 ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Increase Factor, DIF)

ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Increase Factor, DIF) เป็นฟังก์ชันของเวลากับแรง ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของแรง ซึ่งมักถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของการ โกงตัว หรือความเค้น การกระจัด เมื่อวิเคราะห์แรงแบบพลศาสตร์ซึ่งเปรียบเทียบกับกระจัดจากแรงทางสถิต ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$DIF = \frac{U_{Max}}{U_{St}} \quad (2)$$

ในภาพที่ 4 เป็นการพิจารณาการตอบสนองของระบบระดับความเร็วต่อแรงภายนอกในรูปแบบแรงมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Step Force) ดังภาพที่ 3(ข) จะมีการตอบสนองดังภาพที่ 3(ค)



ภาพที่ 4 การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำฟังก์ชันขั้นบันได (Chopra, 2014)

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในระหว่างที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพังทลายต่อเนื่องโดยเริ่มจากผลการศึกษาของ Kaewkulchai and Williamson (2003) โดยได้ศึกษาผลของการกระจายแรงแบบพลาสติกหลังจากการวิบัติของโครงสร้างอย่างน้อยหนึ่งเอเลเมนต์ โดยใช้แบบจำลองเป็นก้อน (Lumped plasticity model) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด และการเสื่อมถอยของกำลังสติเฟนเนส พบว่าผลการวิเคราะห์การกระจายแรงด้วยวิธีพลาสติกเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง และควรนำมาพิจารณาเพื่อหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ที่สิ้นเปลืองมากเกินไป และต่อมาเกรียงศักดิ์และคณะ (2548) ได้วิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารโครงข้อแข็งโดยทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางสถิติ และพลาสติกของอาคารโครงข้อแข็ง 2 ชั้น โดยอาคารโครงข้อแข็งนั้นรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอขนาด 0.4 kips/in ที่กระทำต่อคานสำหรับการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีนั้นอาคารโครงข้อแข็งจะถูกวิเคราะห์โดยเริ่มหลังจากการวิบัติเริ่มต้นสมมุติของเสา โดยใช้รูปร่างดั้งเดิมของอาคารโครงข้อแข็ง ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้รูปร่างที่เสียรูปในขณะที่เกิดการวิบัติเริ่มต้นสมมุติของเสาจะให้การตอบสนองของอาคารโครงข้อแข็งที่แตกต่างไม่มากสำหรับการวิเคราะห์ทางพลาสติก น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่สม่ำเสมอจะมีลักษณะเป็น pulse สี่เหลี่ยมผืนผ้าตลอดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ขนาดของ Time step มีค่าเท่ากับ 0.01 วินาที และมวลในแต่ละข้างของคานมีค่าเท่ากับ 0.124 kips-s in จากการวิเคราะห์พบว่า การตอบสนองทางพลาสติกสามารถนำไปสู่การเสียรูปพลาสติกที่สูงขึ้นอย่างมากผลที่ตามมาจากการต้องการของการเสียรูป (Deformation demand) ที่เพิ่มขึ้นอาจจะทำให้เกิดการวิบัติของชิ้นส่วนต่าง ๆ และก่อให้เกิดการพังทลายอย่างต่อเนื่องขึ้น ในส่วนของความเสียหายโดยปัจจัยบริเวณที่เกิดการวิบัติมีการศึกษาในส่วนการพิจารณาผลของเวลาที่ใช้ในการจำลอง (Time load) Tavakoli and Kiakojoori (2013) ได้ทำการศึกษากการตอบสนองของโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นภายใต้การวิบัติของเสาอย่างกะทันหัน พบว่าการวิบัติของเสาที่ระดับที่สูงกว่าจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งมากกว่าการวิบัติเสาในชั้นแรกเนื่องจากมีโครงสร้างในการดูดซับพลังงานน้อยกว่าการถอดเสาชั้นล่าง และการวิบัติเสาอย่างกะทันหันทำให้การตอบสนองของโครงสร้างที่มากกว่าการวิบัติเสาที่ละน้อย เมื่อดำเนินการวิบัติเสาที่ละน้อยเกิน 0.5 วินาที การเสียรูปในแนวตั้งสูงสุดจะลดลงถึง 45 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาผลของตัวคูณเพิ่มทางพลาสติก (Dynamic increase factor) ได้โดย Fu (2009) ได้ทำการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง โดยการจำลองโมเดลทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ABAQUS เพื่อจำลองพฤติกรรมของอาคารหลายชั้นภายใต้การการวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักบรรทุกทุกทางเลือก (Alternate load path) ซึ่งพิจารณาลักษณะของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear material) และเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric nonlinear) พบว่าแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ โดยโปรแกรมสามารถแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างหลักทั้งหมดของอาคารหลายชั้นได้อย่างแม่นยำ และสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้ ผลการตอบสนองทางพลาสติกของโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบหลังการถอดเสาออกเป็นตัวกำหนดแรงที่เกิดขึ้น



ในโครงสร้างของอาคาร ซึ่งขึ้นส่วนของโครงสร้าง และรอยต่อทั้งหมดในระนาบที่ทำการถอดเสาออกที่เป็นไปได้ควรได้รับการออกแบบให้มีแรงในแนวแกนทางสถิตยอย่างน้อยสองเท่าที่ได้รับเมื่อใช้การรวมน้ำหนักบรรทุก 1.0DL+0.25LL และ McKay (2012) ได้ทำการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่องโดยการจำลองโมเดลทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติด้วยโปรแกรม Sap2000 เพื่อจำลองพฤติกรรมของอาคารภายใต้การวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักบรรทุกทางเลือก (Alternate load path) โดยพิจารณา ลักษณะของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear material) และเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric nonlinear) โดยสร้างโมเดลจริงสองชั้นถูกสร้างขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าตัวคูณพลศาสตร์บนแรง 2.0 ที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการวิเคราะห์ (ALP) เป็นการออกแบบโครงสร้างที่เกินความเป็นจริงมากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีท่อน้ำที่อนุญาตให้มีการเสีรูปร่างขนาดใหญ่ผลการศึกษพบว่า สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) มีตั้งแต่ 1.05 ถึง 1.75 ซึ่งน้อยกว่า 2.0 อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ (Normalized rotations) มากกว่า 1 ในทำนองเดียวกันสำหรับการวิเคราะห์อาคารเหล็กสามารถหาตัวคูณเพิ่มพลศาสตร์ (DIF) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.2 ถึง 1.8

การวิเคราะห์การกระจายแรงแบบพลศาสตร์เป็นคุณลักษณะที่สำคัญของการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง ซึ่งสามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ด้วยการกระจายมวล (Lumped Mass) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติจริง และในการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP 2000 ในการวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ของจุดหมุนพลาสติกในการจำลองโครงสร้างด้วยซึ่งในการวิเคราะห์ผลของตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) จากการวิเคราะห์คานอย่างง่าย (Simple beam) พบว่าสำหรับอาคารเสริมคอนกรีตตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.05 ถึง 1.75 โครงสร้างเหล็กตัวคูณเพิ่มพลศาสตร์ (DIF) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.2 ถึง 1.8 ซึ่งในการศึกษาที่เกี่ยวข้อง มาจากมาตรฐาน GSA (2013), UFC 4-023-03 (2016) และงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) ที่ใช้ได้มาจากคานอย่างง่าย (Simple beam) ซึ่งไม่ได้พิจารณาจากการวิเคราะห์โครงข้อแข็ง (Frame structure)

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

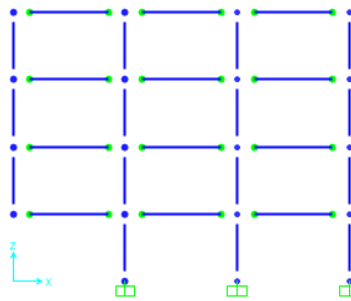
ในหัวข้อกล่าวถึงแนวคิดในการศึกษาการตอบสนองของของโครงสร้างครากการวิบัติต่อเนื่อง โดยใช้โครงสร้างที่กำหนดในหัวข้อที่ 2.2 โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างในระบบ 2 มิติในการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างเบื้องต้นด้วยวิธีการ วิสถิตเชิงเส้น (Linear statics) เพื่อหาแรงตามแกน (Axial force) แรงเฉือน (Shear force) และโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่เกิดขึ้นที่เสาก่อนทำการปลดออก พร้อมทั้งโมเมนต์ประลัย (M_u) ที่ใช้ในการกำหนดหน้าตัดของโครงสร้าง และโมเมนต์พลาสติก (M_p) หลังจากกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดแล้ว โดยในการจำลองพฤติกรรมความไม่เชิงเส้นของวัสดุและการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าการตอบสนองของโครงสร้าง ซึ่งจะพิจารณาตามหัวข้อที่ 2.1 และการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear statics) และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear dynamics) เพื่อหาการเสีรูปร่างสูงสุดของโครงสร้างทั้ง 2 วิธี แล้วนำการเสีรูปร่างของทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกันเพื่อทำการวิเคราะห์แบบพฤติกรรมที่ควบคุมด้วยการเสีรูปร่างเพื่อทำให้การกระจัดของโครงสร้างให้มีการเคลื่อนที่เทียบเท่ากันทั้ง 2 วิธี แล้วนำแรงที่เพิ่มมากขึ้นจากวิธีสถิตไม่เชิงเส้นมาเปรียบเทียบกับวิธีทางพลศาสตร์เพื่อหาค่าตัวคูณกำลัง (DIF) ตามหัวข้อที่ 2.3 พร้อมทั้งสร้างสมการแนะนำในการออกแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง ที่เป็นฟังก์ชันของจำนวนชั้นของโครงสร้าง (n)

2.1 สมมติฐานของแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองจะสร้างแบบจำลองโครงสร้างในระบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการพังทลายต่อเนื่องด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ซึ่งตัวแปรในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วย

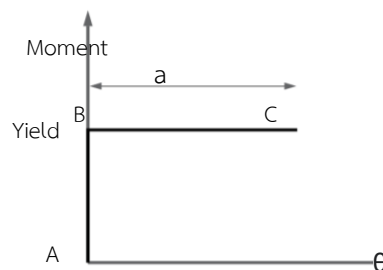
(1) สมมติฐานของแบบจำลอง ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กำลังรับแรงอัดคอนกรีต กำลังดึงในเหล็กเสริม ใช้หน่วยแรงตามข้อกำหนดของ วสท. ไม่พิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลง

ของโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเสา และคาน พิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างตามลักษณะการใช้งานจริง ซึ่งกำหนดตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ในส่วนน้ำหนักของอาคารจะแบ่งน้ำหนักแต่ละชั้นลงหัวเสาพร้อมทั้งกำหนดจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น (Fixed support) พร้อมทั้งแบบจำลองแบบรวมพฤติกรรมพลาสติก (Lumped plasticity model) ซึ่ง จะกำหนดจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) ที่ปลายทั้งสองของคาน โดยคำนึงถึงพฤติกรรมของโครงสร้างในขณะที่รับแรง จะเกิดโมเมนต์สูงสุดบริเวณปลายชิ้นส่วนทำให้บริเวณดังกล่าวมีความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะเกิดการครากได้มากที่สุด นอกจากนี้ หากเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดจุดหมุนพลาสติกก็จะสมมติให้บริเวณนั้นมีความแข็งแรงสูง โดยสมมติให้ชิ้นส่วนดังกล่าว มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับมุมหมุนพลาสติกเป็นแบบแข็งเกร็งพลาสติก (Rigid plastic) จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปสร้างแบบจำลองอาคารดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์

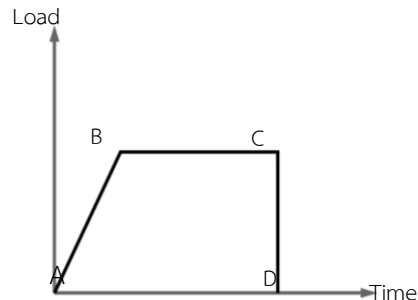
(2) การจำลองจุดหมุนพลาสติก ซึ่งจะกำหนดจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) ที่ปลายทั้งสองของคาน ให้มีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ (Elastic perfectly plastic) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป ที่สามารถแสดงพฤติกรรมการเสียรูปที่เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียว (Monotonically increasing deformation) ในกรณีการวิเคราะห์ โดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น และกรณีการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ตามภาพที่ 6 เมื่อโครงสร้างรับแรงในแนวตั้งและแรงกระทำทางด้านข้าง ชิ้นส่วนโครงสร้างจะเกิดมุมหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์ดัดจนถึงจุด B แล้วจะเสียกำลังรับโมเมนต์ทำให้ มุมหมุนเพิ่มมากขึ้นแต่ยังสามารถต้านโมเมนต์ดัดต่อไปจนถึงจุด C เป็นจุดที่มุมหมุนพลาสติกสามารถต้านโมเมนต์ดัดได้สูงสุด (Plastic rotation angle) มีค่าเท่ากับ α ซึ่งสามารถเกิดจุดหมุนได้จนกว่าโครงสร้างจะเกิดกลไกการวิบัติ (Collapse mechanism)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปจากการเกิดมุมหมุนพลาสติก

(3) การจำลองแรงทางพลศาสตร์ของโครงสร้างในการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายต่อเนื่องตัวแปรสำคัญ ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์โดยการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งจะทำกรจำลองแรง เป็น 3 ช่วง ในช่วงแรก (จุด A ถึงจุด B) เป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ของ

โครงสร้าง ช่วงที่สอง (จุด B ถึงจุด C) จะทำการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่เป็นเส้นตรง (Constant load) เพื่อเปรียบเสมือนโครงสร้างจริงที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต และในช่วงที่สาม (จุด C ถึงจุด D) เป็นการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหัน (Sudden) ซึ่งจะมีผลกระทบในการเสียรูปของโครงสร้างมากที่สุด

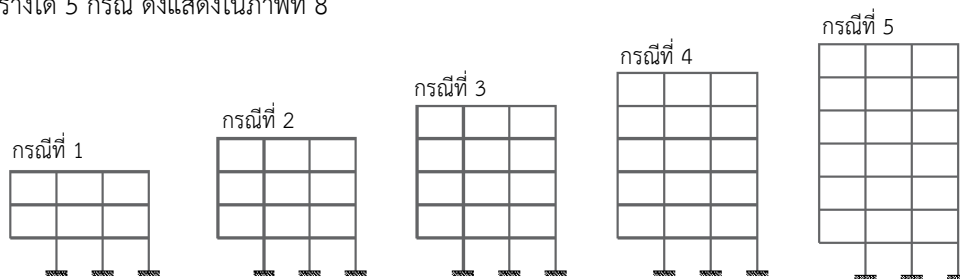


ภาพที่ 7 การจำลองแรงทางพลศาสตร์

2.2 การสร้างแบบจำลอง

ในการศึกษาผลของการจำลองมวลต่อการวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่อง โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นและวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ในลักษณะโครงข้อแข็งใน 2 มิติได้ใช้แบบจำลองของโครงข้อแข็ง 5 แบบ ได้แก่

(1) โครงสร้างอาคาร 3 ถึง 7 ชั้น มีความสูงชั้นละ 3.00 เมตร และคานมีความยาวช่วงละ 5.00 เมตร ศึกษารูปแบบโครงสร้างได้ 5 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา

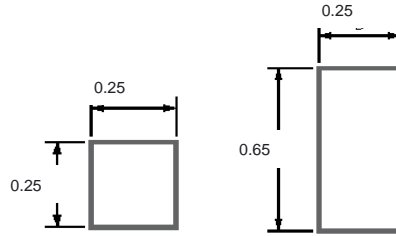
(2) ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้ง 5 กรณี ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของจำนวนชั้น และกำลังต้านทานโมเมนต์สูงสุด (M_p) ของโครงสร้าง ดังนั้นจะกำหนดหน้าตัดของวัสดุตั้งภาพที่ 9 เพื่อโครงสร้างของอาคารทั้งหมดที่ทำกรวิเคราะห์ทั้งหมด ซึ่งพิจารณา 3 ปัจจัยคือ

- การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้ จะแยกออกเป็นคอนกรีต และเหล็กเสริม ซึ่งมีคุณสมบัติดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ชนิดของวัสดุ	ชั้นคุณภาพ	กำลังอัด	กำลังดึง	กำลังดึงประลัย	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	หน่วยน้ำหนัก
คอนกรีต	-	240	$\approx 10\%$	-	$15,100\sqrt{f'_c}$	0.17	2,400
เหล็กเสริม	SR 24	2,400	2,400	3,900	2,040,000	0.30	7,850
	SD 40	4,000	4,000	5,700	2,040,000	0.30	7,850

- การพิจารณากำลังของหน้าตัดจะพิจารณา 2 ประการคือ ประการที่ 1 กำหนดให้เสาไม่เกิดการวิบัติ ประการที่ 2 กำหนดให้คานไม่เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนแต่จะพิจารณาผลของกำลังต้านโมเมนต์ดัด (M_p) ซึ่งจะกำหนดให้เท่าโมเมนต์ประลัย (M_u) ของคานสามารถหาได้หลังจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 9 หน้าตัดเสาและคานที่ใช้ในการวิเคราะห์

- การพิจารณาผลของโมเมนต์เฉื่อย (Moment of Inertia) นอกจากจะพิจารณาในด้านแรงภายในแล้วยังพิจารณาการเสีรูปด้วย ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการสร้างแบบจำลองผู้วิจัยได้ทำการแปลงโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ดังกล่าวโดยคำนวณจากหน้าตัดคอนกรีตโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (3)$$

โดย

- I_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน X
- b คือ ความกว้างหน้าตัด
- h คือ ความสูงหน้าตัด

(3) การกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง (Load combination) ในการวิเคราะห์พฤติกรรม การพังทลายต่อเนื่องของโครงสร้างนอกเหนือน้ำหนักของคานและเสา จะอ้างอิงจากมาตรฐาน GSA (2013) โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกรวม $1.2DL+0.5LL$ และมีการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกดังนี้

- ผนังอิฐมวลอ่อนก่อแบบครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบสองด้านหนา 0.10 ม. มีน้ำหนัก $180 \times 1.2 = 216$ กก./ตร.ม.
- น้ำหนักพื้นหนา 0.15 ม. มีน้ำหนัก $360 \times 1.2 = 432$ กก./ตร.ม.
- น้ำหนักวัสดุทับหน้า 0.05 ม. และอื่นๆ มีน้ำหนัก $120 \times 1.2 = 144$ กก./ตร.ม.
- น้ำหนักบรรทุกจร $300 \times 0.5 = 150$ กก./ตร.ม.

จากข้อมูลข้างต้นสามารถวิเคราะห์รูปแบบทางสถาปัตยกรรมเพื่อคำนวณน้ำหนักบรรทุก ในแต่ละตำแหน่งของ เสา ซึ่งสรุปได้ตามตารางที่ 2

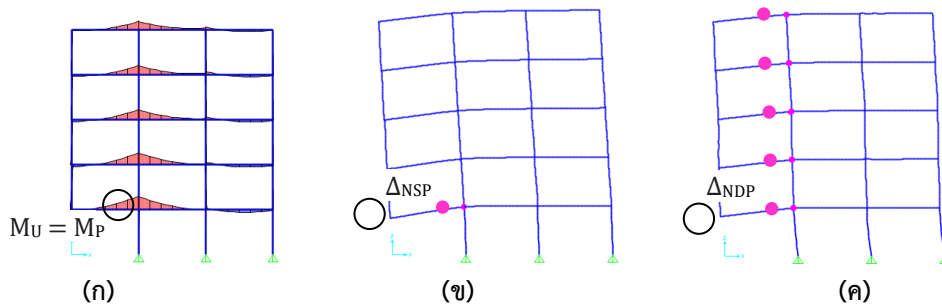
ตารางที่ 2 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

น้ำหนักบรรทุก	น้ำหนักผนัง สูง 2.35 ม. (กก./ม.)	น้ำหนักพื้น กว้าง 2.5 ม. (กก./ม.)	วัสดุทับหน้า กว้าง 2.5 ม. (กก./ม.)	น้ำหนักจร กว้าง 2.5 ม. (กก./ม.)	น้ำหนักรวม (กก./ม.)
	508	1,080	360	450	2,398

2.3 การหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF)

ในการพิจารณาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของการตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐาน GSA, (2013) ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

(1) ทำการวิเคราะห์แบบสถิตเชิงเส้น (LSP) โดยวิเคราะห์โครงสร้างหาโมเมนต์ประลัย (M_U) และกำหนดโมเมนต์พลาสติก (M_p) ของหน้าตัดคานให้เท่ากับโมเมนต์ประลัย (M_U) ดังแสดงในภาพ 10(ก) เพื่อหาการเสียรูปเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตให้เทียบเท่าการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์



ภาพที่ 10 การกำหนดโมเมนต์พลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง และการเสียรูปทางสถิตและพลศาสตร์

(2) ทำการวิเคราะห์ผลแบบสถิตไม่เชิงเส้น (NSP) และพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDP) เพื่อหาค่าการเสียรูปในแนวดิ่งดังแสดงในภาพที่ 10(ข) และภาพที่ 10(ค) เพื่อหาค่าการเสียรูปเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางสถิตให้เทียบเท่าการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์ ซึ่งจะสามารถหาการเสียรูปเพิ่มเติม Δ_{IC} ได้ดังสมการที่ (4) เพื่อนำไปหาตัวคูณเพิ่มกำลังทางพลศาสตร์ (DIF) ในขั้นตอนต่อไป

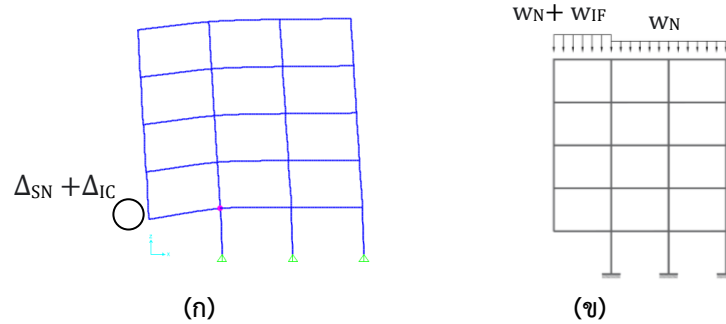
$$\Delta_{IC} = \Delta_{NDP} - \Delta_{NSP} \quad (4)$$

โดย

Δ_{NDP} คือ การเสียรูปจากการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

Δ_{NSP} คือ การเสียรูปจากการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น

(3) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างครั้งที่ 2 โดยกำหนดการเสียรูปเพิ่มเติม Δ_{IC} ลงในการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้นดังในรูป 11(ก) เพื่อให้การเสียรูปทางสถิตเทียบไม่เชิงเส้นเทียบเท่าวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมที่ควบคุมด้วยการเสียรูป (Deformation-Controlled action) เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมโดยใช้โปรแกรม Sap2000 ช่วยในการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม W_{IF} ดังแสดงภาพที่ 11(ข)



ภาพที่ 11 (ก) การการวิเคราะห์การเสีรูปเพิ่มเติม (ข) การการวิเคราะห์การเสีรูปเพิ่มเติม

เมื่อได้การแรงเพิ่มเติม w_{IF} การวิเคราะห์โครงสร้างครั้งที่ 2 แล้วทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทั่วไป w_N เพื่อสร้างสมการในการหาตัวคูณทางพลศาสตร์ (DIF) ดังสมการที่ (5)

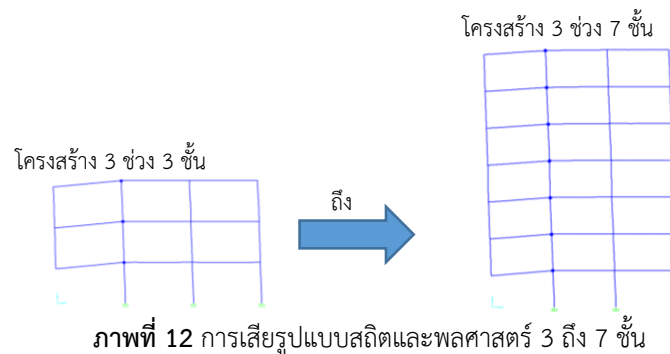
$$DIF = \frac{w_N + w_{IF}}{w_N} \quad (5)$$

โดย

w_N คือ น้ำหนักบรรทุกทั่วไป w_{IF} คือ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม

ผลการวิจัย

การจำลองมวต่อการวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องทางพลศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครง ข้อแข็งใน 2 มิติ มีการจำลองโครงสร้างทั้ง 5 ตัวอย่าง ได้แก่ โครงสร้าง 3 ช่วง มีจำนวนชั้น 3 ถึง 7 ชั้น ด้วยการวิบัติเริ่มต้นของโครงสร้างจากการวิบัติบริเวณริมเสาของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 12



ภาพที่ 12 การเสีรูปแบบสถิตและพลศาสตร์ 3 ถึง 7 ชั้น

จากภาพที่ 12 เป็นผลการจำลองโครงสร้าง แสดงการเสีรูปของโครงสร้าง การเสีรูปในแนวตั้ง จากการวิเคราะห์ทางสถิตไม่เชิงเส้น และพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น พร้อมทั้งแสดงผลการวิเคราะห์โมเมนต์พลาสติก (M_p) โดยพิจารณาจากโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้โปรแกรม SAP2000 ในการวิเคราะห์ผล



ตารางที่ 3 โมเมนต์พลาสติกและการเสียรูปในแนวตั้งของโครงสร้าง

จำนวนชั้น	M_p (กก./ม.)	Δ_{NDP} (มม.)	Δ_{NSP} (มม.)	Δ_{IC} (มม.)
3 ชั้น	31,899	69.34	26.59	42.75
4 ชั้น	32,828	73.25	28.29	44.96
5 ชั้น	34,939	71.20	30.59	40.61
6 ชั้น	36,434	73.48	33.34	40.14
7 ชั้น	38,864	73.01	36.45	36.56

จากตารางที่ 3 สามารถพิจารณาได้ 2 ประการคือ ประการที่ 1 พบว่าอาคารที่ความสูง 3 ถึง 7 ชั้น มีการเสียรูปเพิ่มเติมเท่ากับ 42.75 ถึง 36.56 มม. ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ประการที่ 2 พบว่าอาคารที่ความสูง 3 ถึง 7 ชั้น มีโมเมนต์พลาสติก 31,899 ถึง 38,864 กก./ม. ซึ่งเพิ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนชั้น

การพิจารณาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อพิจารณาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) จะเป็นการพิจารณาการเสียรูปในแนวตั้ง ของโครงสร้างทั้งวิธีแบบสถิตไม่เชิง และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยปรับเทียบการเสียรูปให้การเสียรูปแบบสถิตไม่เชิงเส้นมีความเทียบ กับผลการเสียรูปแบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ด้วยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกในโครงสร้าง โดยสามารถหาตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบ ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์(DIF)

จำนวนชั้น	W_N (กก./ม.)	W_{IF} (กก./ม.)	DIF
3 ชั้น	2788	972	1.35
4 ชั้น	2788	1,135	1.41
5 ชั้น	2788	1,268	1.45
6 ชั้น	2788	1,383	1.50
7 ชั้น	2788	1,475	1.53

จากตารางที่ 4 ซึ่งแสดงผลของการตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) ของโครงข้อแข็ง ทั้ง 5 กรณี พบว่าอาคารที่ความสูง 3 ถึง 7 ชั้น จะตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) เท่ากับ 1.35 ถึง 1.53 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีจำนวนชั้นสูงมากขึ้นจะทำให้ตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์เพิ่มสูงมากขึ้นด้วย

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าจำนวนชั้นส่งผลต่อการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาผลการศึกษารวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตไม่เชิงเส้น เปรียบเทียบกับแบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาอัตราส่วนของโมเมนต์ตัด $M_U/M_P = 1.0$ ซึ่งไม่ได้พิจารณาขอบเขตของแรงเฉือนและแรงตามแกน และอัตราส่วนของโมเมนต์ตัด พร้อมทั้งควรศึกษาประเด็นอื่นๆ เพื่อพิจารณาตัวคูณเพิ่มที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปพบว่า มีค่าการเสียรูปสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะพบว่า จำนวนชั้นไม่ได้ส่งผลต่อการเสียรูปทางพลศาสตร์ แต่มีผลต่อการวิเคราะห์ทางสถิตตามลำดับชั้นความสูงอย่างมีนัยสำคัญ



2. จากการเปรียบเทียบโมเมนต์พลาสติก (MP) ในคานพบว่า จำนวนชั้นส่งผลให้โมเมนต์ดัดเพิ่มมากขึ้นเปรียบเทียบกับความสูง 3 ชั้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 100%, 103%, 110%, 114% และ 122% ตามลำดับ

3. จากการเปรียบเทียบตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) พบว่า ในโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์มีค่าตัวคูณเพิ่มสูงมากขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1.35, 1.41, 1.45, 1.50 และ 1.53 ตามลำดับ

สรุปผลการศึกษา

1. ตัวคูณพลศาสตร์บนแรง 2.0 ที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการวิเคราะห์การพังทลายต่อเนื่อง เป็นการออกแบบโครงสร้างที่เกินความเป็นจริงมากเกินไป

2. โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DIF) มีตั้งแต่ 1.35 ถึง 1.53 ซึ่งน้อยกว่า 2.0 อย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย. (2547). การวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารโครงข้อแข็ง. *วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9*.

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา, วิวัฒน์ พัทธศานานนท์ และ กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย. (2548). การวิเคราะห์การพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคารโครงข้อแข็ง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10*.

เดช พุทธเจริญทอง. (2548). *การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์*. กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.

Chopra A. K. (2014). *dynamics of structures. 4 th Edition*. Pearson Education

Fu, F. (2009). "Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6), 1269-1278

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

Kaewkulchai, G. and Williamson, E. B. (2003). Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis. *Computers and Structures*, 82, 639-651.

Mckay, A. (2012). Alternate Path Method in Progressive Collapse Analysis: Variation of Dynamic and Nonlinear Load Increase Factors. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 17(4), 152-160.

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(7), 685-692.