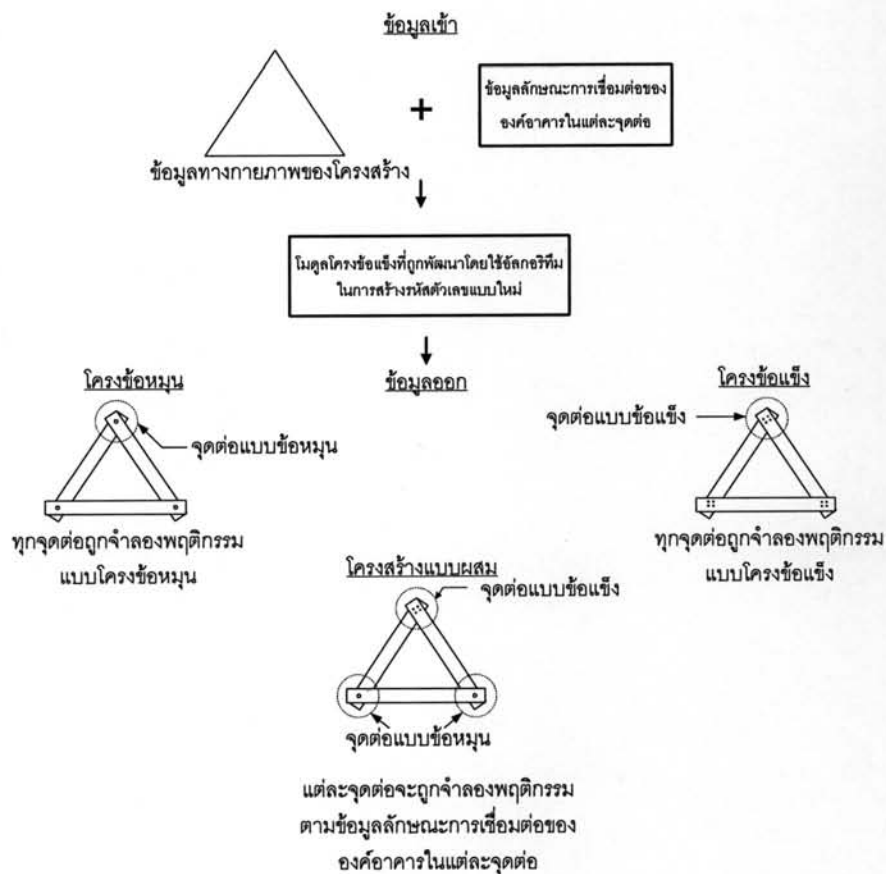


บทที่ 3

อัลกอริทึมการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

3.1 แบบจำลองใหม่สำหรับการพัฒนาไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

ในบทนี้จะนำเสนอเทคนิคใหม่ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง ซึ่งเทคนิคใหม่นี้ปรับปรุงจากแนวคิดปัจจุบันในการพัฒนาซอฟต์แวร์อยู่ 2 เรื่องหลัก คือ แบบจำลองในการพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้าง และอัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลข ซึ่งแบบจำลองใหม่นี้จะปรับปรุงมาจากแบบจำลองปัจจุบันในการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้าง โครงข้อแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในบทที่ผ่านมา ส่วนอัลกอริทึมใหม่สำหรับสร้างรหัสตัวเลขก็จะถูกปรับปรุงให้สามารถสนับสนุนการสร้างสมการสำหรับวิเคราะห์ได้ทั้งโครงสร้าง โครงข้อหมุน โครงข้อแข็ง และโครงสร้างแบบผสม แบบจำลองการพัฒนาซอฟต์แวร์ตามแนวคิดใหม่แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองใหม่ของการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างใน 2 มิติ

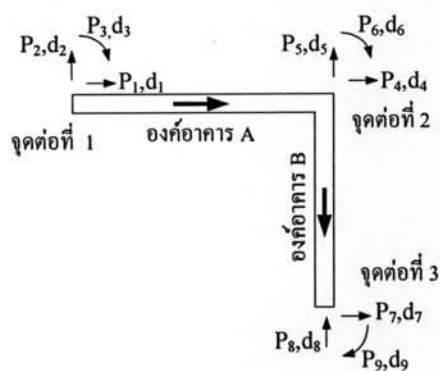
ในแบบจำลองการพัฒนาซอฟต์แวร์ตามแนวคิดใหม่นี้ต้องการเพียงเอลิเมนต์โครงสร้างข้อแย้งเท่านั้นในการพัฒนา ซึ่งแตกต่างจากแนวคิดในปัจจุบันตรงที่ แบบจำลองการพัฒนาซอฟต์แวร์ในปัจจุบัน การเลือกชนิดของข้อต่อทั้งโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับ โมดูลหรือชนิดของเอลิเมนต์ที่ถูกเลือกมา ดังนั้นในการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับจำลองพฤติกรรม โครงสร้างทั้งโครงสร้างข้อแย้ง และโครงสร้างหมุนจึงต้องแยกพัฒนาเป็น 2 ส่วน ซึ่งในละส่วนจะใช้จำลองพฤติกรรม โครงสร้างแต่ละประเภทแยกกัน แต่ในแบบจำลองใหม่นี้จะเปลี่ยนไป จุดต่อแต่ละอันใน โครงสร้างสามารถถูกกำหนดได้อย่างอิสระ ข้อมูลลักษณะจุดต่อในแต่ละจุดต่อจะถูกนำไปใช้ในการสร้างรหัสตัวเลขด้วย ดังนั้นเทคนิคใหม่จึงสามารถจำลองพฤติกรรม โครงสร้างได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น จากที่กล่าวมาในข้างต้นนอกเหนือจากแบบจำลองในการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ได้ปรับเปลี่ยนใหม่แล้ว อัลกอริทึมสำหรับการสร้างรหัสตัวเลขก็เปลี่ยนใหม่ด้วย ซึ่งการปรับอัลกอริทึมใหม่ จะใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากการสังเกตพฤติกรรมของจุดต่อและรหัสตัวเลขมาปรับปรุงอัลกอริทึม ดังนั้นก่อนที่อัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลขจะถูกนำมาเสนอ ในหัวข้อถัดไปความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ของรหัสตัวเลขกับลักษณะของข้อต่อจะถูกเสนอก่อน

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างรหัสตัวเลขกับพฤติกรรมของข้อต่อ

เนื่องจากอัลกอริทึมสำหรับการสร้างรหัสตัวเลขที่นำเสนอใหม่นี้สร้างรหัสตัวเลขโดยอาศัยความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ระหว่างรหัสตัวเลขและพฤติกรรมของข้อต่อ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงถึงที่มาของความสัมพันธ์เหล่านี้

- 1) ทิศทางใดภายในจุดต่อที่องค์อาคารมาเชื่อมต่อกันและมีการเคลื่อนที่ด้วยกัน ใช้รหัสตัวเลขร่วมกัน
- 2) ทิศทางใดภายในจุดต่อขององค์อาคารใดที่เป็นอิสระไม่ขึ้นกับองค์อาคารใดๆ ใช้รหัสตัวเลขแยกกัน

ความสัมพันธ์เหล่านี้พิสูจน์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ด้านคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 3.2

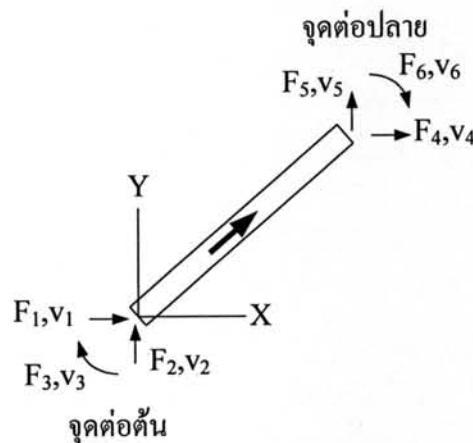


รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวอย่าง

ในการสร้างสมการเพื่อแทนพฤติกรรมของโครงสร้างนั้นสมการหลักในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างคือ $[P] = [S][d]$ ซึ่งสมการนี้ได้จากการประกอบสมการย่อยของแต่ละองค์อาคาร ดังนั้นในขั้นตอนแรกสมการขององค์อาคาร $[F] = [K][v]$ จะถูกสร้างขึ้นก่อนโดยที่ $[F]$ คือ เมตริกของแรงที่ปลายขององค์อาคาร ส่วน $[K]$ คือ สติเฟเนสเมตริกขององค์อาคาร และ $[v]$ คือ เมตริกการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายขององค์อาคาร ซึ่งสมการนี้สามารถเขียนในรูปขยายได้ดังนี้

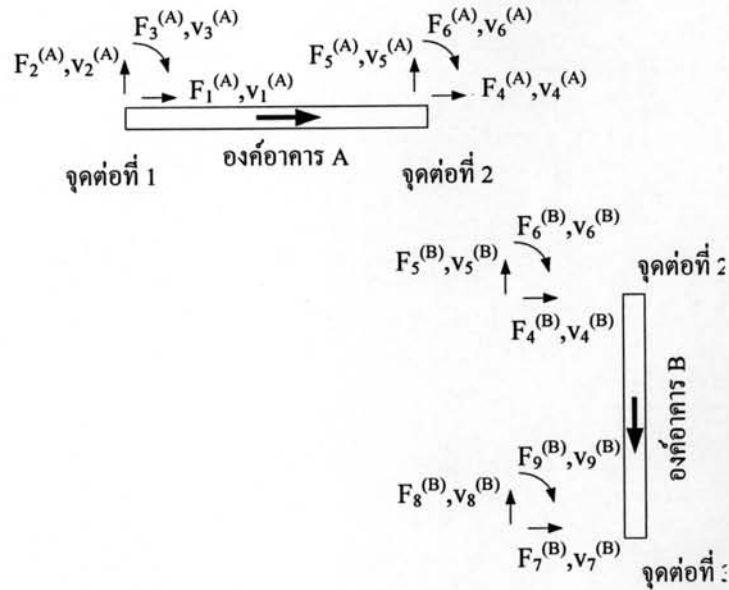
$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{61} & \dots & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

จากสมการ 3.1 ความสัมพันธ์ในแต่ละแถวจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละทิศทาง ดังนั้นก่อนที่จะแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ การกำหนดทิศทางที่เคลื่อนที่ได้อิสระขององค์อาคารและทั้งโครงสร้างจะถูกนำเสนอก่อน เพื่ออธิบายเกี่ยวกับทิศทางของแรงและทิศทางของการเปลี่ยนตำแหน่งโปรคดูรูปที่ 3.3 ประกอบคำอธิบาย การกำหนดทิศทางของแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละองค์อาคารเป็นดังนี้ ในแต่ละองค์อาคารจะมีทิศทางที่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระอยู่ 6 ทิศทาง ซึ่งในแต่ละทิศทางจะมีรหัสตัวเลขเฉพาะสำหรับอ้างอิงทิศทาง การสร้างรหัสตัวเลขจะเริ่มที่จุดต่อด้านก่อนตามแกน X แกน Y และแกน Z และต่อไปที่จุดต่อปลายตามแกน X แกน Y และแกน Z โดยมีหัวลูกศรตรงกลางองค์อาคารเป็นตัวกำหนดจุดต่อด้านและจุดต่อปลาย



รูปที่ 3.3 แรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งภายในองค์อาคาร

ส่วนทิศทางของแรงภายใน และทิศทางของการเปลี่ยนตำแหน่งของทั้งโครงสร้างนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้าง

การอ้างอิงทิศทางตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งขององค์อาคาร A และองค์อาคาร B ดังที่แสดงในสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} F_4 \\ \vdots \\ F_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{44} & \dots & K_{49} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{94} & \dots & K_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_4 \\ \vdots \\ v_9 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

เมื่อได้สมการของแต่ละองค์อาคาร ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างสมการของทั้งโครงสร้าง สมการในแต่ละองค์อาคารจะถูกแทนลงในสมการสมดุล (Equilibrium Equations) ดังสมการที่ 3.3 ในตัวอย่างนี้จะแสดงเฉพาะการหาสมการของโครงสร้างตามแนวแกน X ที่จุดต่อที่ 2 เท่านั้น การสร้างสมการตามแกนอื่นๆ จะใช้หลักการเช่นเดียวกันกับที่แสดงในตัวอย่าง

$$\sum F_x = 0 \quad (3.3)$$

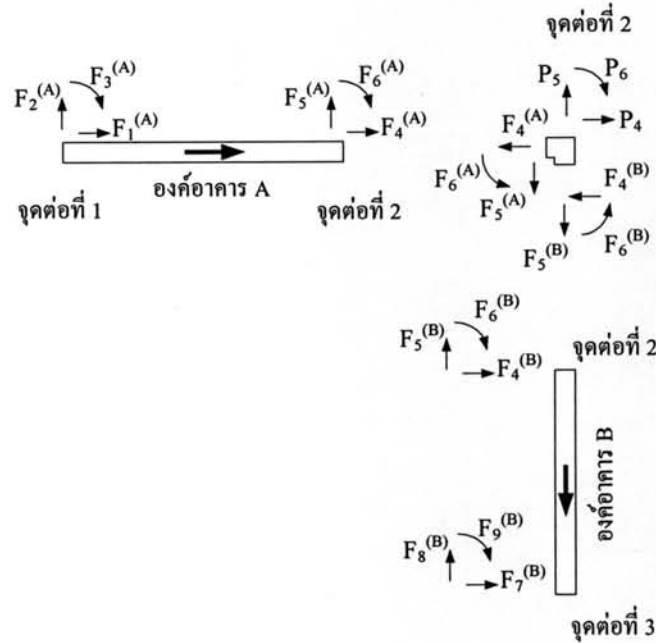
จากสมการที่ 3.3 ให้พิจารณารูปที่ 3.5 ที่จุดต่อที่ 2 เมื่อรวมแรงทั้งหมดตามแนวแกน X ที่จุดต่อที่ 2 สมการจะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\sum F_x = P_4 - F_4^{(A)} - F_4^{(B)} \quad (3.4)$$

หลังจากนั้นจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$P_4 = F_4^{(A)} + F_4^{(B)} \quad (3.5)$$

แทนค่าสมการที่ 3.1 และ 3.2 ลงในสมการที่ 3.5 จะได้สมการที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แผนภาพวัตถุอิสระ (Free Body Diagram) ของโครงสร้าง

$$\begin{aligned} P_4 = & K_{41}^{(A)} v_1^{(A)} + K_{42}^{(A)} v_2^{(A)} + K_{43}^{(A)} v_3^{(A)} + \\ & K_{44}^{(A)} v_4^{(A)} + K_{45}^{(A)} v_5^{(A)} + K_{46}^{(A)} v_6^{(A)} + \\ & K_{44}^{(B)} v_4^{(B)} + K_{45}^{(B)} v_5^{(B)} + K_{46}^{(B)} v_6^{(B)} + \\ & K_{47}^{(B)} v_7^{(B)} + K_{48}^{(B)} v_8^{(B)} + K_{49}^{(B)} v_9^{(B)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

อ้างอิงตามรูปที่ 3.2 และ 3.4 แปลงการเปลี่ยนตำแหน่งในองค์อาคารให้อยู่ในรูปการเปลี่ยนตำแหน่งของทั้งโครงสร้างดังนี้ $d_1 = v_1^{(A)}$, $d_2 = v_2^{(A)}$, $d_3 = v_3^{(A)}$, $d_4 = v_4^{(A)} = v_4^{(B)}$, $d_5 = v_5^{(A)} = v_5^{(B)}$, $d_6 = v_6^{(A)} = v_6^{(B)}$, $d_7 = v_7^{(B)}$, $d_8 = v_8^{(B)}$, $d_9 = v_9^{(B)}$ แล้วแทนค่า d_1 ถึง d_9 ลงในสมการที่ 3.6 จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} P_4 = & K_{41}^{(A)} d_1 + K_{42}^{(A)} d_2 + K_{43}^{(A)} d_3 + \\ & K_{44}^{(A)} d_4 + K_{45}^{(A)} d_5 + K_{46}^{(A)} d_6 + \\ & K_{44}^{(B)} d_4 + K_{45}^{(B)} d_5 + K_{46}^{(B)} d_6 + \\ & K_{47}^{(B)} d_7 + K_{48}^{(B)} d_8 + K_{49}^{(B)} d_9 \end{aligned} \quad (3.7)$$

จัดรูปสมการที่ 3.7 เพื่อให้สังเกตได้ง่ายขึ้น

$$\begin{aligned}
 P_4 = & K_{41}^{(A)}d_1 + K_{42}^{(A)}d_2 + K_{43}^{(A)}d_3 + \\
 & (K_{44}^{(A)} + K_{44}^{(B)})d_4 + (K_{45}^{(A)} + K_{45}^{(B)})d_5 + \\
 & (K_{46}^{(A)} + K_{46}^{(B)})d_6 + K_{47}^{(B)}d_7 + \\
 & K_{48}^{(B)}d_8 + K_{49}^{(B)}d_9
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

แสดง K_{ij} ในรูปแบบของ S_{ij}

$$\begin{aligned}
 P_4 = & S_{41}d_1 + S_{42}d_2 + S_{43}d_3 + \\
 & S_{44}d_4 + S_{45}d_5 + S_{46}d_6 + \\
 & S_{47}d_7 + S_{48}d_8 + S_{49}d_9
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 จะเห็นว่า S_{ij} เป็นผลรวม K_{ij} ขององค์อาคาร A และองค์อาคาร B ในทิศทางเดียวกัน โดยที่ i เป็นทิศทางของแรงภายนอกและ j เป็นทิศทางของการเปลี่ยนตำแหน่ง ดังนั้น S_{ij} จึงหาได้โดยการหาผลรวมทั้งหมดของ K_{ij} โดยอ้างอิงตามตำแหน่งของ i และ j ตัวอย่างเช่น $S_{44} = K_{44}^{(A)} + K_{44}^{(B)}$ ก็จะได้จากผลรวมของ $K_{44}^{(A)}$ และ $K_{44}^{(B)}$ ซึ่งเลข 4 ด้านล่างตัวแรก (Subscript) จะหมายถึงทิศทางของแรงในแกน X ของจุดต่อที่ 2 ในขณะที่เลข 4 ด้านล่างตัวที่สองจะหมายถึงทิศทางของการเปลี่ยนตำแหน่งในแกน X ของจุดต่อที่ 2 ดังนั้น S_{ij} จึงหาได้จากผลรวมของ K_{ij} ที่มี i และ j เหมือนกัน ซึ่ง i และ j ที่ใช้ในการกำกับทิศทางนี้เรียกว่ารหัสตัวเลขและรหัสตัวเลขเหล่านี้จะใช้ในการจัดเก็บ K_{ij} ในรูปแบบเมตริกดังแสดงตามสมการที่ 3.10 และ 3.11

$$[K]^{(A)} = \begin{bmatrix} K_{11}^{(A)} & K_{12}^{(A)} & K_{13}^{(A)} & K_{14}^{(A)} & K_{15}^{(A)} & K_{16}^{(A)} \\ K_{21}^{(A)} & K_{22}^{(A)} & K_{23}^{(A)} & K_{24}^{(A)} & K_{25}^{(A)} & K_{26}^{(A)} \\ K_{31}^{(A)} & K_{32}^{(A)} & K_{33}^{(A)} & K_{34}^{(A)} & K_{35}^{(A)} & K_{36}^{(A)} \\ K_{41}^{(A)} & K_{42}^{(A)} & K_{43}^{(A)} & K_{44}^{(A)} & K_{45}^{(A)} & K_{46}^{(A)} \\ K_{51}^{(A)} & K_{52}^{(A)} & K_{53}^{(A)} & K_{54}^{(A)} & K_{55}^{(A)} & K_{56}^{(A)} \\ K_{61}^{(A)} & K_{62}^{(A)} & K_{63}^{(A)} & K_{64}^{(A)} & K_{65}^{(A)} & K_{66}^{(A)} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

และ

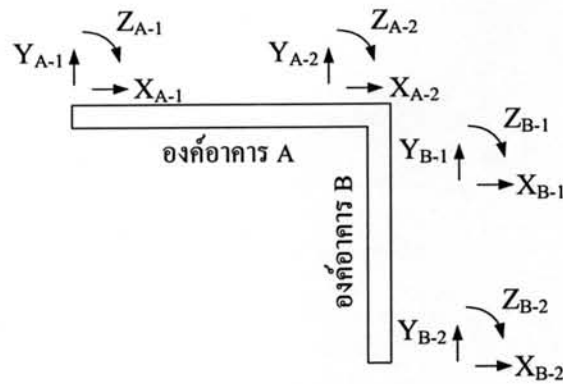
$$[K]^{(B)} = \begin{bmatrix} K_{44}^{(B)} & K_{45}^{(B)} & K_{46}^{(B)} & K_{47}^{(B)} & K_{48}^{(B)} & K_{49}^{(B)} \\ K_{54}^{(B)} & K_{55}^{(B)} & K_{56}^{(B)} & K_{57}^{(B)} & K_{58}^{(B)} & K_{59}^{(B)} \\ K_{64}^{(B)} & K_{65}^{(B)} & K_{66}^{(B)} & K_{67}^{(B)} & K_{68}^{(B)} & K_{69}^{(B)} \\ K_{74}^{(B)} & K_{75}^{(B)} & K_{76}^{(B)} & K_{77}^{(B)} & K_{78}^{(B)} & K_{79}^{(B)} \\ K_{84}^{(B)} & K_{85}^{(B)} & K_{86}^{(B)} & K_{87}^{(B)} & K_{88}^{(B)} & K_{89}^{(B)} \\ K_{94}^{(B)} & K_{95}^{(B)} & K_{96}^{(B)} & K_{97}^{(B)} & K_{98}^{(B)} & K_{99}^{(B)} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

เนื่องจาก [S] ได้จากการรวมกันของ $[K]^{(A)}$ และ $[K]^{(B)}$ โดยอ้างอิงตามรหัสตัวเลขที่มีทิศทางเดียวกัน จากการสร้างสมการด้วยเทคนิคนี้ จะเห็นว่ารหัสตัวเลขเป็นเหมือนตัวแทนของทิศทาง และเมื่อสังเกตที่จุดต่อก็จะเห็นว่าทิศทางใดที่องค์อาคารมาเชื่อมต่อกันและการมีการเคลื่อนที่ไปด้วยกันก็จะใช้รหัสตัวเลขตัวเดียวกัน ส่วนทิศทางใดที่จุดต่อขององค์อาคารใดๆ ที่มีการเคลื่อนที่อิสระไม่มีการเชื่อมต่อกับองค์อาคารใดๆ ก็จะมีรหัสตัวเลขที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นข้อสังเกตที่นำไปออกแบบอัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลขและอัลกอริทึมใหม่นี้จะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.3 อัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลข

ในอัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลขของ S.S. Tezcan จะสร้างโดยเรียงตามจุดต่อ แต่ในอัลกอริทึมใหม่ที่น่าเสนอจะเรียงตามองค์อาคารแทน จากเดิมทีในแต่ละจุดต่อจะประกอบด้วยจำนวนรหัสตัวเลขที่แน่นอน ในอัลกอริทึมใหม่นี้จำนวนรหัสตัวเลขในแต่ละจุดต่อจะไม่คงที่ แต่จะขึ้นกับลักษณะของข้อต่อ อย่างไรก็ตามเมื่อรหัสตัวเลขถูกนำไปใช้เป็นตัวเลขระบุพิกัดของเมตริกเพื่อใช้ในการประกอบสตีเฟนสมตริกของทั้งโครงสร้าง ในแต่ละองค์อาคารก็ยังมีรหัสตัวเลขเป็น 6 ตัวเท่าเดิม ทำให้ยังสามารถใช้ได้กับเอลิเมนต์โครงข้อแข็งได้เหมือนเดิม เนื่องด้วยในแต่ละจุดต่อจะมีรหัสตัวเลขไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมของจุดต่อ ดังนั้นอัลกอริทึมใหม่นี้จึงถูกเรียกว่า “Dynamic Nodal Numbering Algorithm”

ในการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่ รหัสตัวเลขจะถูกสร้างโดยเรียงอันดับตามองค์อาคาร แทนแบบเดิมที่เรียงตามจุดต่อ ซึ่งในการเรียงลำดับตามองค์อาคารนั้น ในแต่ละองค์อาคารจะแบ่งเป็น 2 จุดต่อ คือ จุดต่อที่ต้นองค์อาคาร และจุดต่อที่ปลายองค์อาคาร ซึ่งในแต่ละจุดต่อจะประกอบด้วย 3 แกน คือ แกน X แกน Y และแกน Z ซึ่งการสร้างรหัสตัวเลขในแต่ละองค์อาคาร จะเริ่มที่จุดต่อ ต้นก่อนและจุดต่อปลาย และในแต่ละจุดต่อก็จะเริ่มที่แกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ และมีการตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆ ดังอัลกอริทึมที่แสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 ภาพประกอบคำอธิบายอัลกอริทึมใหม่สำหรับสร้างรหัสตัวเลข

ตารางที่ 3.1 อัลกอริทึมใหม่สำหรับสร้างรหัสตัวเลข

Define,

m is a member,

X_{m-1} is a code number in x-axis of the beginning node of the member m

Y_{m-1} is a code number in y-axis of the beginning node of the member m

Z_{m-1} is a code number in z-axis of the beginning node of the member m

X_{m-2} is a code number in x-axis of the ending node of the member m

Y_{m-2} is a code number in y-axis of the ending node of the member m

Z_{m-2} is a code number in z-axis of the ending node of the member m

1. Assign order number to all members.

2. Code number = 0

3. For all members

If a beginning node already exists then

X_{m-1} = Code number along x-axis from the an existing node

Y_{m-1} = Code number along y-axis from the an existing node

If the beginning node of member m is connected to existing node as rigid

Z_{m-1} = Code number along z-axis from the existing node

Else

Code number = Code number + 1

Z_{m-1} = Code number

End if

Else

Code number = Code number + 1

X_{m-1} = Code number

Code number = Code number + 1

Y_{m-1} = Code number

Code number = Code number + 1

Z_{m-1} = Code number

End if

If an ending node already exists then

X_{m-2} = Code number along x-axis from the an existing node

Y_{m-2} = Code number along y-axis from the an existing node

If the ending node of member m is connected to existing node as rigid

Z_{m-2} = Code number along z-axis from the an existing node

Else

Code number = Code number + 1

Z_{m-2} = Code number

End if

Else

Code number = Code number + 1

X_{m-2} = Code number

Code number = Code number + 1

Y_{m-2} = Code number

Code number = Code number + 1

Z_{m-2} = Code number

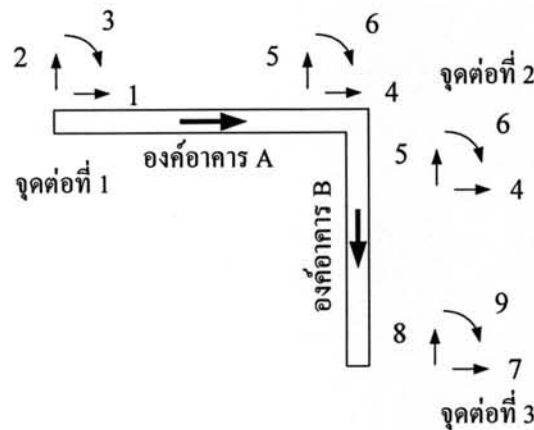
End if

End loop

เพื่อให้เห็นภาพการทำงานของอัลกอริทึมใหม่ได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างการสร้างรหัสตัวเลขสำหรับโครงข่ายรูปแบบต่างๆ โดยอัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลขจะถูกนำมาแสดงและอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

3.4 สาธิตการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่เพื่อสร้างความสัมพันธ์ในจุดต่อแบบยึดแน่น

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการสร้างรหัสตัวเลขโดยอัลกอริทึมใหม่สำหรับใช้ในสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างโครงข่าย ตัวอย่างที่ถูกเลือกในการสาธิตการสร้างรหัสตัวเลขแสดงดังในรูปที่ 18 ในโครงสร้างตัวอย่างจะประกอบด้วย 2 องค์อาคาร (Member) และ 3 จุดต่อ (Node) ซึ่งทั้งสององค์อาคารเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบแข็งเกร็ง



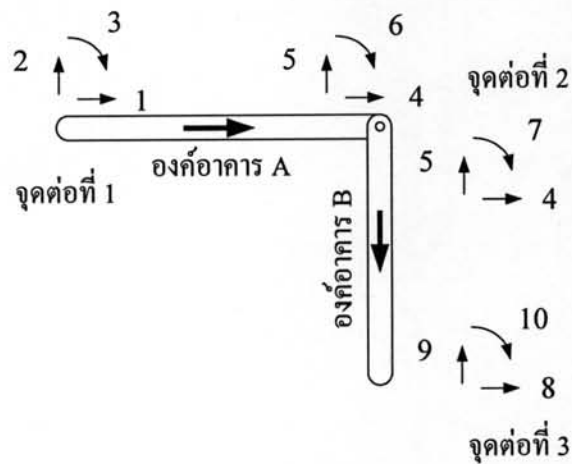
รูปที่ 3.7 รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข่ายโครงข่าย

การสร้างรหัสตัวเลขสำหรับโครงสร้างตัวอย่างจะเริ่มที่องค์อาคาร A ในจุดต่อเริ่มต้นก่อน (หัวลูกศรตรงกลางองค์อาคารเป็นตัวกำหนดทิศทางขององค์อาคาร) และปลายจุดต่อตามลำดับ โดยในแต่ละจุดต่อจะสร้างรหัสตัวเลขเริ่มจากแกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ เนื่องจากรหัสตัวเลขในองค์อาคาร A ถูกสร้างมาก่อน และไม่มีรหัสตัวเลขที่ถูกสร้างมาก่อนที่จุดต่อเริ่มต้นและจุดต่อปลายขององค์อาคาร A ดังนั้นรหัสตัวเลขสำหรับองค์อาคาร A จะถูกสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมดตั้งแต่หมายเลข 1 ถึง 6 หลังการสร้างรหัสตัวเลขสำหรับองค์อาคาร A เรียบร้อยแล้วรหัสตัวเลขสำหรับองค์อาคาร B จะถูกสร้างเป็นลำดับถัดไปโดยเริ่มจากจุดต่อเริ่มต้นและดำเนินการต่อที่จุดต่อปลายเช่นกัน เนื่องจากในจุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร B นั้นเชื่อมต่อกับจุดต่อปลายขององค์อาคาร A ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบข้อต่อแข็งซึ่งทำให้จุดต่อของทั้งสององค์อาคารเคลื่อนที่ไปด้วยกันทุกทิศทาง ดังนั้นการสร้างรหัสตัวเลขที่จุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร B จึงใช้รหัสตัวเลขชุดเดียวกับจุด

ต่อปลายขององค์อาคาร A ส่วนในจุดต่อปลายขององค์อาคาร B นั้นไม่มีการเชื่อมต่อกับองค์อาคารใดเลย รหัสตัวเลขจึงถูกสร้างขึ้นใหม่หมดโดยไล่ตามแกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ

3.5 สาธิตการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่เพื่อสร้างความสัมพันธ์ในจุดต่อแบบหมุนอิสระ

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการสร้างรหัสตัวเลขสำหรับใช้จำลองพฤติกรรมของโครงสร้างโครงข้อหมุนตามอัลกอริทึมใหม่ ตัวอย่างที่ถูกเลือกในการสาธิตการสร้างรหัสตัวเลขแสดงในรูปที่ 3.8 ในโครงสร้างตัวอย่างจะประกอบด้วย 2 องค์อาคารและ 3 จุดต่อ ทั้งสององค์อาคารเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบข้อหมุนที่จุดต่อที่ 2 ซึ่งโครงสร้างโครงข้อหมุนที่นำมาเป็นตัวอย่างเหมือนกันกับตัวอย่างโครงสร้างโครงข้อแข็งต่างกันเพียงข้อต่อที่เชื่อมระหว่างสององค์อาคารเข้าด้วยกัน



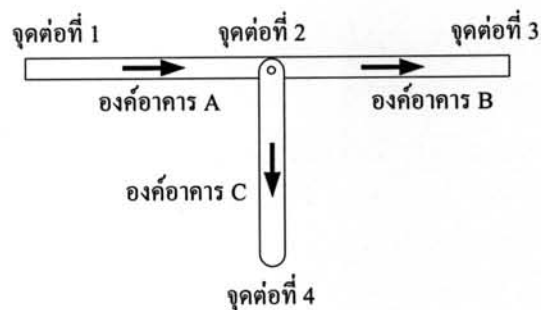
รูปที่ 3.8 รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อหมุน

การสร้างรหัสตัวเลขจะเริ่มที่จุดต่อเริ่มต้นและจุดต่อปลายขององค์อาคาร A ตามลำดับ รหัสตัวเลขในแต่ละจุดต่อจะถูกสร้างตามแกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ ในตัวอย่าง องค์อาคาร A เกิดจาก 2 จุดต่อคือ จุดต่อที่ 1 และ จุดต่อที่ 2 เนื่องจาก จุดต่อที่ 1 ไม่ได้เชื่อมต่อกับองค์อาคารใดอีกและใน จุดต่อที่ 2 ยังไม่ได้มีการสร้างรหัสตัวเลขขึ้นดังนั้นรหัสตัวเลขจะถูกสร้างขึ้นใหม่หมดเป็นหมายเลข 1 – 6 ดังแสดงในรูปที่ 22 หลังจากนั้นรหัสตัวเลขจะถูกสร้างขึ้นสำหรับองค์อาคาร B เนื่องจากจุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร B เชื่อมต่อกับจุดต่อปลายขององค์อาคาร A ดังนั้นรหัสตัวเลขตามแกน X และแกน Y จะถูกคัดลอกจากจุดต่อปลายขององค์อาคาร A มาใช้กับจุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร B (เนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยกันตามแกน X และแกน Y แต่แกน Z อิสระจากกัน) ส่วนรหัสตัวเลขตามแกน Z ของจุดต่อเริ่มต้น B จะถูกสร้างขึ้นใหม่ ส่วนจุดต่อปลาย

ขององค์อาคาร B ไม่ได้เชื่อมต่อกับองค์อาคารอื่นอีกดังนั้นรหัสตัวเลขทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นใหม่หมด ซึ่งรหัสตัวเลขที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.8

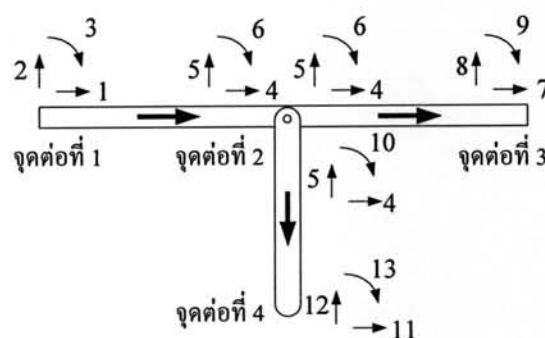
3.6 สาธิตการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่เพื่อสร้างความสัมพันธ์ในจุดต่อแบบผสม

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการสร้างรหัสตัวเลขสำหรับใช้จำลองพฤติกรรมของโครงสร้างผสมตามอัลกอริทึมใหม่ ตัวอย่างที่ถูกเลือกในการสาธิตการสร้างรหัสตัวเลขแสดงดังในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างโครงสร้างผสม

ในโครงสร้างตัวอย่างจะประกอบด้วย 3 องค์อาคารและ 4 จุดต่อ องค์อาคารทั้งหมดเชื่อมต่อกันที่จุดต่อที่ 2 การเชื่อมต่อระหว่างองค์อาคาร A และ B จะเชื่อมต่อกันแบบแข็งเกร็ง ส่วนองค์อาคาร C จะเชื่อมต่อกับองค์อาคาร A และ B ด้วยข้อต่อแบบข้อหมุน ซึ่งองค์อาคาร C สามารถหมุนได้อิสระจากองค์อาคาร A และ B



รูปที่ 3.10 รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างสำหรับการจำลองพฤติกรรม โครงสร้างที่มีข้อต่อผสม

การสร้างรหัสตัวเลขจะเริ่มจากองค์อาคาร A, B และ C ตามลำดับ การสร้างรหัสตัวเลขในแต่ละองค์อาคารจะเริ่มที่จุดต่อเริ่มต้นก่อนแล้วจึงสร้างรหัสตัวเลขที่จุดต่อปลาย โดยมีหัวลูกศรเป็น

ตัวกำหนดจุดต่อเริ่มต้นและจุดต่อปลาย และในแต่ละจุดต่อจะสร้างรหัสตัวเลขตามแกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ

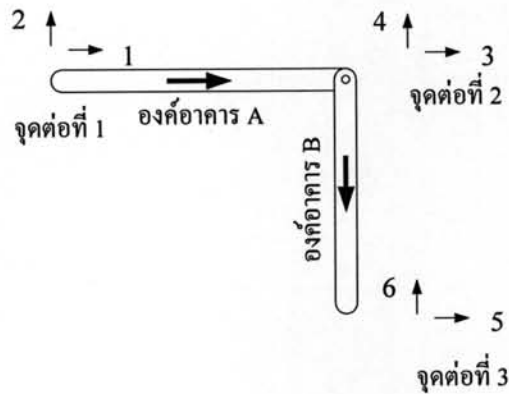
ตามรูปที่ 3.10 รหัสตัวเลขจะถูกสร้างที่จุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร A ก่อนเป็น 1, 2 และ 3 เนื่องจากจุดต่อปลายขององค์อาคาร A ยังไม่มีการสร้างรหัสตัวเลขขึ้นมา ก่อน รหัสตัวเลขจึงถูกสร้างใหม่หมดเป็น 4, 5 และ 6 หลังจากนั้น รหัสตัวเลขสำหรับองค์อาคาร B จะถูกสร้างขึ้นเนื่องจากจุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร B เชื่อมต่อแบบข้อแฉ่งกับองค์อาคาร A ที่มีการสร้างรหัสตัวเลขขึ้นมาแล้ว (มีการเคลื่อนที่ด้วยกันหมดทุกแกน) ดังนั้นรหัสตัวเลขที่จุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร B จึงถูกคัดลอกมาจากจุดต่อปลายขององค์อาคาร A เป็น 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนจุดต่อปลายขององค์อาคาร B ไม่มีการเชื่อมต่อกับองค์อาคารใด รหัสตัวเลขจึงถูกสร้างขึ้นใหม่หมดเป็น 7, 8 และ 9 หลังจากนั้น รหัสตัวเลขที่จุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร C จะถูกสร้างขึ้น เนื่องจากจุดต่อ C เชื่อมต่อกับองค์อาคาร A และ B ที่จุดต่อที่ 2 โดยข้อหมุน (มีการเคลื่อนที่ด้วยกันตามแกน X และ Y ส่วนแกน Z อิสระ) ดังนั้นรหัสตัวเลขที่จุดต่อเริ่มต้นขององค์อาคาร C จะคัดลอกมาจากจุดต่อปลายขององค์อาคาร A เฉพาะแกน X และแกน Y ส่วนแกน Z จะถูกสร้างขึ้นใหม่เป็น 10 ส่วนจุดต่อปลายขององค์อาคาร C ไม่มีการเชื่อมต่อกับองค์อาคารอื่น รหัสตัวเลขจึงถูกสร้างขึ้นใหม่หมดเป็น 11, 12 และ 13

3.7 วิเคราะห์เปรียบเทียบอัลกอริทึมการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

แม้ว่าการใช้เทคนิคใหม่ในการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างจะใช้เพียงเอลิเมนต์เพียงชนิดเดียวในการพัฒนาซึ่งง่ายต่อการขยายความสามารถซอฟต์แวร์และยังคงความสามารถในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างได้ทั้งโครงข้อหมุน โครงข้อแฉ่ง รวมทั้งโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสม แต่ก็ยังมีประเด็นในเรื่องของการใช้ทรัพยากรและเรื่องของประสิทธิภาพที่ต้องคำนึงถึงด้วย ซึ่งในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการให้เห็นถึงทรัพยากรที่ต้องใช้ในการคำนวณ โครงสร้างแบบต่างๆ

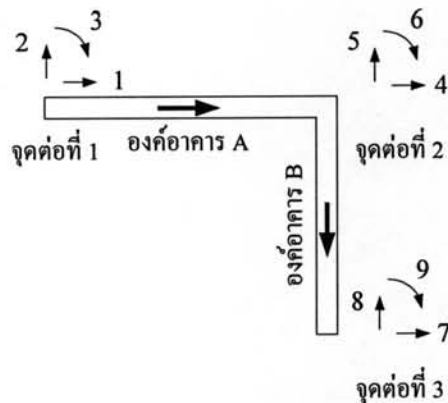
ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง จำนวนดิกรีอิสระหรือรหัสตัวเลขที่ถูกสร้างขึ้นจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคำนวณ เนื่องจากจำนวนสมการจะถูกสร้างขึ้นเท่ากับจำนวนของดิกรีอิสระหรือรหัสตัวเลข ในเทคนิคปัจจุบันที่ต้องการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง โครงข้อหมุนและโครงข้อแฉ่ง จะใช้เอลิเมนต์ 2 ชนิดและพัฒนาแยกส่วนกัน ซึ่งจำนวนดิกรีอิสระหรือจำนวนรหัสตัวเลขต่อจุดต่อจะขึ้นอยู่กับชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการพัฒนา ในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์โครงข้อหมุนในการจำลองโครงสร้างดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.11 หนึ่งจุดต่อจะพิจารณาดิกรีอิสระเฉพาะตามแกน X และแกน Y แต่ไม่สนใจแกน Z ดังนั้นในหนึ่งจุดต่อจะมี 2 ดิกรีอิสระ เมื่อนับจำนวนดิกรีอิสระของทั้งโครงสร้างจะต้องจะได้เท่ากับ $2n$ เมื่อ

n คือจำนวนของจุดต่อในโครงสร้าง ซึ่งตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.11 จะมี 3 จุดต่อ ดังนั้นจำนวนดีกรีอิสระหรือจำนวนสมการจะเป็น 6



รูปที่ 3.11 ดีกรีอิสระในโครงสร้างโครงข้อหมุน

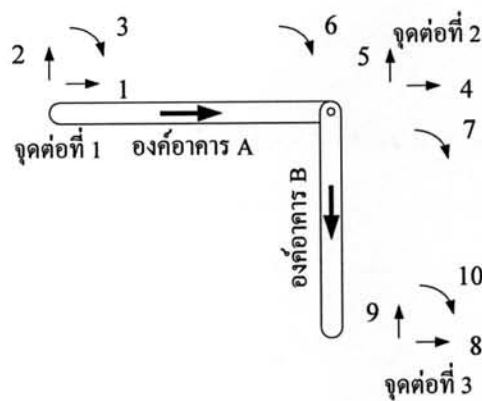
สำหรับกรณีที่ใช้เอลิเมนต์โครงข้อแข็งจำลองพฤติกรรมของ โครงสร้างโครงข้อแข็งดังแสดงในรูปที่ 3.12 จำนวนดีกรีอิสระจะมี 3 ดีกรีต่อ 1 จุดต่อ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y และแกน Z ดังนั้นจำนวนดีกรีอิสระสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงข้อแข็งจะเท่ากับ $3n$ เมื่อ n คือจำนวนจุดต่อ ซึ่งโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 3.12 มีจำนวนจุดต่อทั้งหมด 3 จุดต่อ จึงมีดีกรีอิสระทั้งโครงสร้างเป็น 9



รูปที่ 3.12 ดีกรีอิสระในโครงสร้างโครงข้อแข็ง

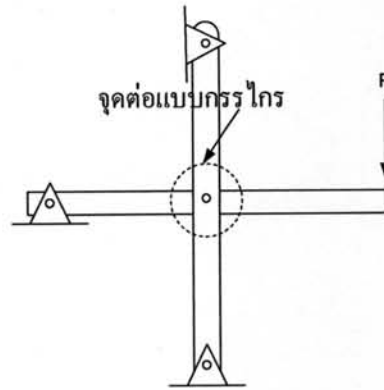
แต่ในอัลกอริทึมใหม่ที่น่าสนใจ จำนวนดีกรีอิสระที่สร้างขึ้นสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงข้อแข็งจะไม่แตกต่างจากเดิม แต่หากใช้ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างโครงข้อหมุน จะมีความแตกต่าง เนื่องจากในอัลกอริทึมใหม่ จำนวนดีกรีอิสระจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของจุดต่อ โดยดีกรีอิสระจะถูกสร้างขึ้นในจุดต่อก่อน 2 ดีกรี ตามแกน X และแกน Y เมื่อพิจารณาที่ตามองค์อาคาร องค์อาคาร 1 ตัวจะประกอบด้วย 2 จุดต่อ ซึ่งถ้าปลายองค์อาคารมีการเคลื่อนที่ได้ตามแนวหมุนได้อิสระจะมีการสร้างดีกรีอิสระขึ้นเฉพาะสำหรับองค์อาคารที่จุดต่อดันและจุดต่อปลาย

ตามแนวแกน Z อีกจุดต่อละตัว ด้วยเหตุนี้คิกรีสระจะเพิ่มขึ้น 2 ตัวต่อ 1 องค์อาคารที่เพิ่ม ดังนั้น หากใช้อัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลขจำนวนคิกรีสระในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง โครงข่ายโครงข่าย จำนวนคิกรีสระที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็น $2n + 2m$ เมื่อ n คือจำนวนจุดต่อและ m เป็นจำนวนองค์อาคาร สังเกตรูปที่ 3.13 คิกรีสระหมายเลข 1, 2, 4, 5, 8 และ 9 จะถูกสร้างขึ้นที่จุดต่อ แต่คิกรีสระหมายเลข 3 และ 6 จะถูกสร้างขึ้นสำหรับองค์อาคาร A ส่วนคิกรีสระหมายเลข 7 กับ 10 จะถูกสร้างขึ้นสำหรับองค์อาคาร B ดังนั้นองค์อาคาร โครงข่ายโครงข่ายในรูปที่ 3.13 จะมีจำนวนคิกรีสระทั้งหมดเป็น $2*3+2*2 = 10$



รูปที่ 3.13 คิกรีสระในโครงข่ายโครงข่าย

สำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่มีประกอบด้วยจุดต่อแบบผสม จำนวนคิกรีสระจะขึ้นกับรูปแบบของจุดต่อ ซึ่งจำนวนคิกรีสระที่สร้างขึ้นในการจำลองโครงสร้างที่มีพฤติกรรมในบางจุดต่อเป็นแบบผสมจะเป็น $3n + f$ โดยที่ f เป็นจำนวนทิศทางเคลื่อนที่อิสระที่เพิ่มขึ้นตามแนวหมุนในจุดต่อ พิจารณาตัวอย่างในรูปที่ 3.14 จากโครงสร้างนี้หากต้องใช้เทคนิคในปัจจุบันจะต้องใช้เอลิเมนต์ในสามมิติมาช่วยดังแสดงในตัวอย่างที่ 3.15 ซึ่งในการคำนวณด้วยเอลิเมนต์ในสามมิติจะมีจำนวนคิกรีสระต่อ 1 จุดต่อเป็น 6 ดังนั้น จำนวนสมการที่ถูกสร้างขึ้นโดยการประยุกต์ใช้เอลิเมนต์ในสามมิติจะเป็น $6n$ เมื่อ n เป็นจำนวนจุดต่อ ดังนั้นในตัวอย่างในรูปที่ 3.14 เมื่อใช้เทคนิคในปัจจุบันจะต้องสร้างจำนวนคิกรีสระใน 6 จุดต่อถึง 36 คิกรีสระ ในขณะที่เทคนิคที่นำเสนอใหม่นี้มีเพียง 5 จุดต่อ และสร้างสมการขึ้นเพียง 16 คิกรีสระเท่านั้น ตัวอย่างที่นำเสนอให้เป็นโครงสร้างขนาดเล็กหากเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นจำนวนคิกรีสระที่ถูกสร้างขึ้นก็จะยังมีความแตกต่าง นอกจากนั้นเทคนิคทางอ้อมที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองพฤติกรรมในปัจจุบันยังมีความยุ่งยากกว่าในการป้อนข้อมูลอีกด้วย



รูปที่ 3.14 โครงสร้างผสม

จากที่กล่าวมาจำนวนดีกรีอิสระในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างโดยเทคนิคปัจจุบันกับเทคนิคที่นำเสนอใหม่สรุปได้ดังตารางที่ 3.2

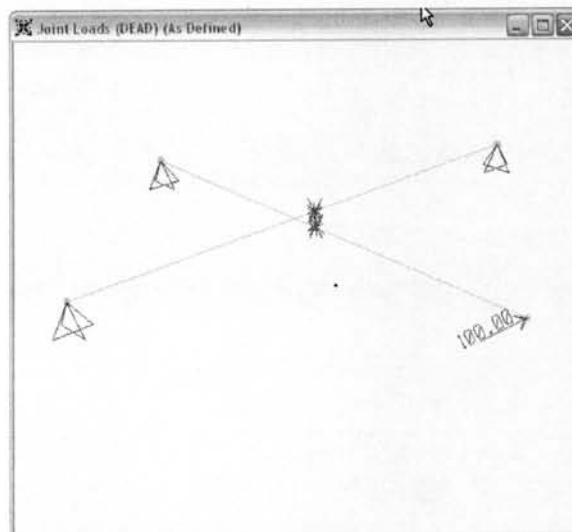
ตารางที่ 3.2 จำนวนดีกรีอิสระในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

	โครงข้อแข็ง	โครงข้อหมุน	โครงสร้างผสม
เทคนิคปัจจุบัน	$3n$	$2n$	$6n$
เทคนิคใหม่	$3n$	$2n+2m$	$3n+f$

โดยที่ n เป็นจำนวนจุดต่อ

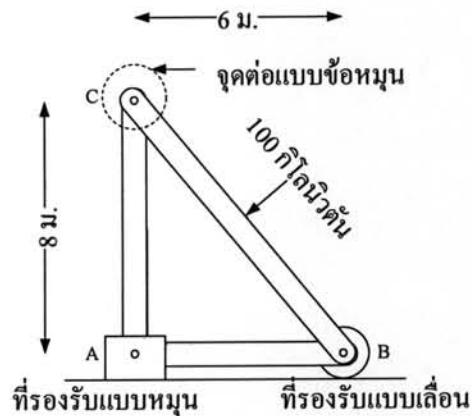
m เป็นจำนวนองค์อาคาร

f เป็นจำนวนทิศทางเคลื่อนที่อิสระที่เพิ่มขึ้นตามแนวหมุนในจุดต่อ



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างผสมโดยเอลิเมนต์ 3 มิติ

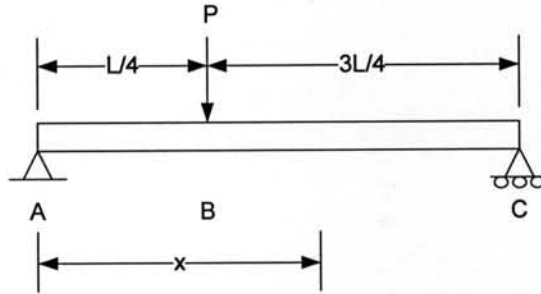
แม้ว่าอัลกอริทึมใหม่ที่น่าเสนอจะสร้างจำนวนสมการมากกว่าเมื่อจำลองพฤติกรรมโครง
 ซ้อน แต่ก็จะรายงานผลลัพธ์ในแนวแกน Z ด้วย ซึ่งผลลัพธ์การเคลื่อนที่ตามแกน Z รอบจุดหมุน
 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณการแอ่นตัวขององค์อาคารได้ ตัวอย่างในรูปที่ 3.16 ตัวอย่างเป็น
 โครงสร้างที่มีแรงกระทำที่กลางองค์อาคารระหว่างจุดต่อ B และ C ซึ่งหากต้องการหาการแอ่นตัว
 ในองค์อาคารระหว่างจุดต่อ B และ C ด้วยเทคนิคปัจจุบันในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง
 จำเป็นจะต้องเพิ่มจุดต่อเข้าไปจำนวนระหว่างจุดต่อ B และ C เป็นจำนวนมากเพื่อรายงานการ
 เคลื่อนตัวตามแกน X และ Y ในแต่ละจุดต่อ ซึ่งการเพิ่มจำนวนจุดต่อนี้จะมีผลกระทบต่อจำนวน
 สมการที่ต้องสร้างเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เสียเวลาเพิ่มขึ้นในการคำนวณการแอ่นตัว ในขณะที่การ
 คำนวณหาการแอ่นตัวโดยใช้เทคนิคที่น่าเสนอใหม่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มจุดต่อเข้าไป แต่ผลที่ได้จาก
 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาการแอ่นตัวได้โดยใช้วิธีดับเบิ้ลอิน
 ทีเกรชัน (Double Integration Method) [31] ซึ่งผลที่ได้จะได้การแอ่นตัวที่ต่อเนื่องและมี
 ประสิทธิภาพในการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องเพิ่มจำนวนจุดต่อเข้าไปอีก 100 จุดต่อเพื่อหาค่าการ
 แอ่นตัวในองค์อาคารที่เชื่อมต่อระหว่างจุดต่อ B และ C จำนวนสมการที่จะต้องถูกเพิ่มจะเป็น $2n$
 หรือ 200 สมการ ในขณะที่เทคนิคใหม่ไม่จำเป็นต้องแทนจุดต่อ เพียงแต่แทนค่าระยะทางจากจุดต่อ
 C จนถึงระยะที่ต้องการทราบค่าแอ่นตัว



รูปที่ 3.16 คีกรีสระในโครงสร้างโครงข้อหมุน

ตัวอย่างที่ 3.17 แสดงการหาการแอ่นตัวด้วยวิธีดับเบิ้ลอินทีเกรชัน ในตัวอย่างเป็นคานที่มี
 ความยาว L มีแรงกระทำขนาด P ที่ระยะ $L/4$ ห่างจากจุด A การหาค่าการแอ่นตัวในช่วง A ถึง B
 หาได้จากสมการที่ 3.12, 3.13 ส่วนสมการที่ 3.14, 3.15 ใช้หาค่าการแอ่นตัวในช่วง B ถึง C ใน
 สมการที่ 3.12 และ 3.13 จะมีตัวที่ไม่ทราบค่าคือ C_1 เพื่อหาค่า C_1 จะต้องทราบค่า θ_1 ซึ่งได้จาก
 ผลลัพธ์ในแกน Z ที่จุด A ซึ่ง $x = 0$ ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง เมื่อแทนค่า θ_1 ลงใน
 สมการที่ 3.12 ก็จะทราบ C_1 เมื่อทราบ C_1 ก็นำไปแทนในสมการที่ 3.13 เพื่อหาค่า C_2 โดยที่ค่า y_1

ได้จากผลลัพธ์ในแกน Y ที่จุด A ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง เมื่อทราบค่า C_1 และ C_2 ก็จะได้สมการที่ 3.12 และ 3.13 ที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถใช้หาค่าการแอ่นตัวที่ระยะ x ใดๆ ในช่วง A ถึง B หลังจากนั้นจะสามารถหา C_3 และ C_4 ได้จากการแทนค่า θ_1 และ y_2 ลงในสมการ 3.12 และ 3.13 โดยที่ θ_1 และ y_2 หาได้จากสมการที่ 3.12 และ 3.13 เมื่อแทนค่า $x = L/4$ เนื่องจากที่ $x = L/4$ คือจุด B ซึ่งเป็นจุด $\theta_1 = \theta_2$ และ $y_1 = y_2$



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการหาการแอ่นตัวด้วยวิธีดัดเบิกลินที่เกรงชัน

สมการที่ 3.12 ใช้ในการหาการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวมุมในช่วง A ถึง B

$$\theta_1 = \frac{\left(\frac{3}{8}Px^2 + C_1\right)}{(EI)} \quad (3.12)$$

โดยที่ θ_1 เป็นการหมุนรอบแกน Z

P เป็นขนาดของน้ำหนักบรรทุก

E เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

I เป็น โมเมนต์ความเฉื่อย

x เป็นระยะตั้งแต่จุดเริ่มต้น ไปถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า θ_1

C_1 เป็นค่าคงที่

สมการที่ 3.13 ใช้ในการหาการแอ่นตัวตามแนวแกน Y ในช่วง A ถึง B

$$y_1 = \frac{\left(\frac{1}{8}Px^3 + C_1x + C_2\right)}{(EI)} \quad (3.13)$$

โดยที่ y_1 เป็นการแอ่นตัวตามแนวแกน Y

P เป็นขนาดของน้ำหนักบรรทุก
 E เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
 I เป็น โมเมนต์ความเฉื่อย
 x เป็นระยะตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า θ ,
 C_2 เป็นค่าคงที่

สมการในการหาการแอ่นตัวตามแนวแกน Y และการหมุนในช่วง B ถึง C หาได้จากสมการที่ 3.14 และสมการที่ 3.15 ตามลำดับ

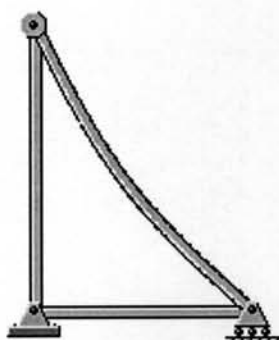
$$\theta_2 = \frac{\left(-\frac{1}{8}Px^2 + \frac{1}{4}PLx + C_3\right)}{(EI)} \quad (3.14)$$

โดยที่ θ_2 เป็นการหมุนรอบแกน Z
 P เป็นขนาดของน้ำหนักบรรทุก
 E เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
 L เป็นความยาวขององค์อาคาร
 I เป็น โมเมนต์ความเฉื่อย
 x เป็นระยะตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า θ ,
 C_3 เป็นค่าคงที่

$$y_2 = \frac{\left(-\frac{1}{24}Px^3 + \frac{1}{8}PLx^2 + C_3x + C_4\right)}{(EI)} \quad (3.15)$$

โดยที่ y_2 เป็นการแอ่นตัวตามแนวแกน Y ในช่วง B ถึง C
 P เป็นขนาดของน้ำหนักบรรทุก
 E เป็น โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
 I เป็น โมเมนต์ความเฉื่อย
 x เป็นระยะตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า θ ,
 C_4 เป็นค่าคงที่

ผลการจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของโครงสร้างในรูปที่ 3.16 โดยวิธีดับเบิลอินทิเกรชัน แสดงอยู่ในรูปที่ 3.18



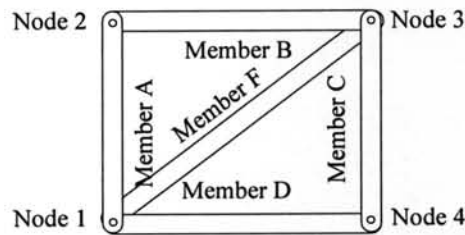
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการคำนวณการแอ่นตัวของโครงสร้างด้วยเทคนิคที่นำเสนอ

จากผลที่แสดงในตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อแข็งจำนวนสมการที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคปัจจุบันไม่แตกต่างกันเนื่องจากรหัสตัวเลขที่ถูกสร้างขึ้นด้วยอัลกอริทึมใหม่ถูกนำไปใช้กับอิลลิเมนต์โครงข้อแข็งเช่นเดียวกับเทคนิคปัจจุบัน สำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อหมุน เทคนิคใหม่จะสร้างสมการขึ้นในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างมากกว่าเนื่องจากเทคนิคเดิมจะใช้อิลลิเมนต์โครงข้อหมุนซึ่งจะไม่พิจารณาผลลัพธ์ตามแนวแกน Z ด้วยเหตุที่ในโครงข้อหมุนไม่มีการส่งถ่ายแรงกันตามแนวแกน Z ดังนั้นในแต่ละจุดต่อจะรายงานเฉพาะแกน X และแกน Y ในขณะที่เทคนิคใหม่จะสร้างสมการมากกว่าแต่ก็รายงานผลลัพธ์การแอ่นตัวตามแนวแกน Z ออกมาให้ สำหรับการจำลองโครงสร้างผสมด้วยเทคนิคปัจจุบันจะต้องใช้อิลลิเมนต์ใน 3 มิติเข้าช่วยซึ่งจะต้องสร้างสมการขึ้น 6 สมการต่อหนึ่งจุดต่อ ในขณะที่เทคนิคที่นำเสนอใหม่ใช้การสร้างสมการ 3 สมการต่อจุดต่อและเพิ่มขึ้นอีก 1 สมการต่อทิศทางอิสระที่เพิ่มขึ้น (ดังตัวอย่างที่แสดงให้เห็นในท้ายข้อนี้) จากที่อธิบายสามารถสรุปเป็นตารางจุดแข็งจุดอ่อนของเทคนิคที่นำเสนอใหม่เทียบกับเทคนิคปัจจุบันได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อดีข้อเสียของเทคนิคที่นำเสนอ

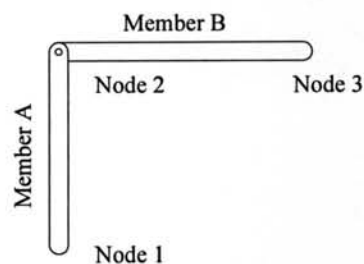
	ข้อดี	ข้อเสีย
โครงข้อแข็ง	จำนวนสมการที่ถูกสร้างขึ้นไม่แตกต่างกันแต่เทคนิคใหม่สามารถพัฒนาโปรแกรมโดยใช้เพียงอิลลิเมนต์โครงข้อหมุนเพียงอย่างเดียว ทำให้การต่อยอดพัฒนาโปรแกรมทำได้ง่าย	
โครงข้อหมุน	รายงานผลลัพธ์ตามแนวแกน Z ด้วย	จำนวนสมการที่ถูกสร้างมากกว่า
โครงสร้างผสม	จำนวนสมการที่ถูกสร้างขึ้นน้อยกว่า	-

จากผลที่ได้แสดงในตารางสรุปได้ว่าการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อแข็ง เทคนิคปัจจุบันและเทคนิคใหม่ที่น่าเสนอใช้สมการเท่ากันในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อแข็ง ในขณะที่เทคนิคใหม่จะดีกว่าเทคนิคปัจจุบันในเรื่องของสมการที่ถูกสร้างขึ้นมากกว่าซึ่งจะต้องใช้เวลามากกว่าในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบในการจำลองพฤติกรรมโครงข้อหมุน ส่วนโครงสร้างผสมอัลกอริทึมใหม่จะสร้างสมการน้อยกว่าและใช้เวลาในการแก้สมการในการหาคำตอบได้เร็วกว่าเทคนิคปัจจุบัน โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีจำนวนจุดต่อมากและเมื่อพิจารณาความซับซ้อนของอัลกอริทึมปัจจุบันกับอัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลข อัลกอริทึมปัจจุบันมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมเท่ากับ $O(n)$ โดยที่ n คือจำนวนจุดต่อและความซับซ้อนของอัลกอริทึมใหม่เท่ากับ $O(m)$ โดยที่ m เป็นจำนวนองค์อาคาร ด้วยเหตุนี้อัลกอริทึมปัจจุบันและอัลกอริทึมใหม่จะเหมาะสมกับปัญหาที่แตกต่างกันไปซึ่งด้านล่างเป็นตัวอย่างที่ถูกนำมาแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง



รูปที่ 3.19 ตัวอย่าง โครงสร้างวงรอบปิด

ในตัวอย่างตามรูปที่ 3.19 โครงสร้างจะประกอบด้วย 4 จุดต่อ 5 องค์อาคารเชื่อมต่อกันเป็นลักษณะวงรอบปิด 2 วง ในกรณีนี้อัลกอริทึมปัจจุบันจะใช้จำนวนรอบในการสร้างรหัสตัวเลขน้อยกว่าเนื่องจาก n เท่ากับ 4 จุดต่อแต่อัลกอริทึมที่น่าเสนอมี n เท่ากับ 5 องค์อาคาร

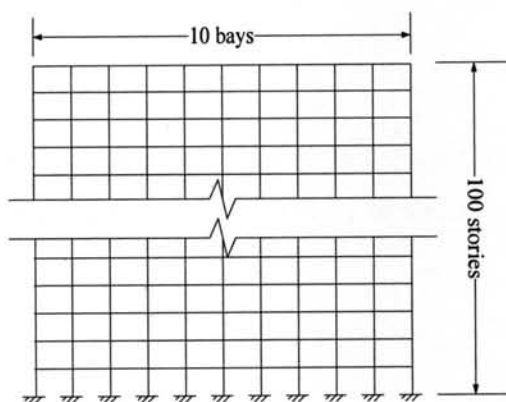


รูปที่ 3.20 ตัวอย่างที่โครงสร้างวงรอบเปิด

สำหรับตัวอย่างตามรูปที่ 3.20 โครงสร้างจะประกอบด้วย 3 จุดต่อ 2 องค์อาคาร ในกรณีนี้ อัลกอริทึมที่น่าเสนอใหม่จะใช้จำนวนรอบน้อยกว่าในการสร้างรหัสตัวเลขโดยที่อัลกอริทึมปัจจุบัน

จะมี n เท่ากับ 3 จุดต่อในขณะ n ของอัลกอริทึมใหม่จะเท่ากับ 2 องค์อาคาร จากข้อสังเกตนี้จะพบว่าอัลกอริทึมปัจจุบันเหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงรอบปิดจำนวนมาก ในขณะที่อัลกอริทึมใหม่ที่น่าเสนอเหมาะกับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงรอบเปิด

อย่างไรก็ตามจำนวนรอบในการสร้างรหัสตัวเลขมีนัยสำคัญน้อยมากสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างจริง ตัวอย่างเช่น โครงสร้างตัวอย่างที่นำมาเสนอเป็น โครงสร้างอาคารขนาดใหญ่ซึ่งมีจำนวน 100 ชั้นและมี 10 คูหาซึ่งตัวอย่างนี้จะมีจุดต่อและองค์อาคารอยู่ประมาณหลักพันเท่านั้น ซึ่งไม่ได้เป็นปัญหาสำคัญสำหรับความสามารถของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน

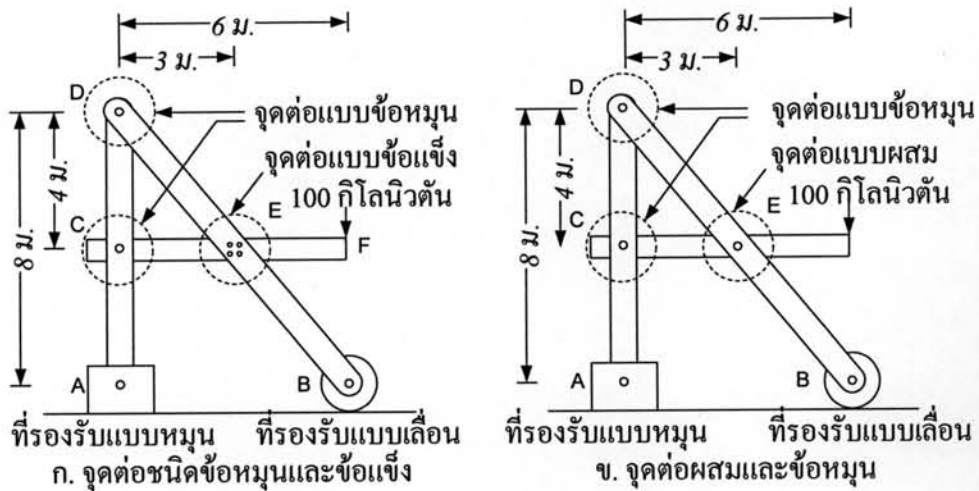


รูปที่ 3.21 ตัวอย่างโครงสร้างขนาดใหญ่

จากที่น่าเสนอจะพบว่าอัลกอริทึมใหม่จะทำงานได้ดีในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง โครงสร้างข้อแข็งและโครงสร้างผสมแต่ทำงานช้ากว่าเมื่อจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง โครงสร้างข้อหมุน เนื่องจากมีจำนวนสมการที่ถูกสร้างขึ้นมากกว่า อย่างไรก็ตามเทคนิคใหม่ที่น่าเสนอต้องการเพียงอิลิเมนต์เดียวในการพัฒนา โปรแกรมคืออิลิเมนต์โครงสร้างข้อหมุนซึ่งช่วยให้การพัฒนาต่อยอด โปรแกรมสามารถทำได้ง่ายไม่ต้องแยกการพัฒนาเป็นสองส่วนเหมือนเทคนิคในปัจจุบัน

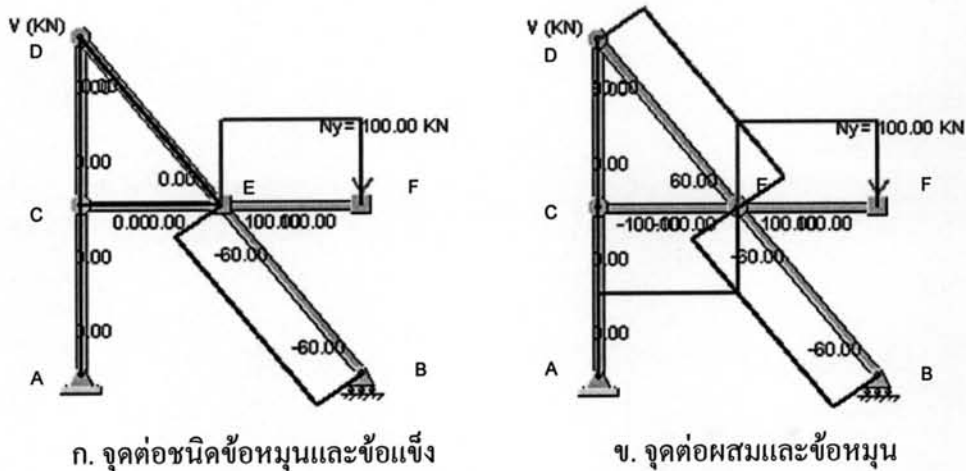
3.8 ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่มีจุดต่อผสม

เพื่อแสดงให้เห็นความสามารถในการจำลองพฤติกรรม โครงสร้างผสม โดยเทคนิคที่น่าเสนอ ตัวอย่างที่มีรูปแบบข้อต่อที่แตกต่างกันจะถูกนำมาแสดงในรูปที่ 3.22 ในตัวอย่างที่ 3.22(ก) จุดต่อ E จะเป็นข้อแข็ง ในขณะที่ตัวอย่างที่ 3.22 (ข) จุดต่อ E จะเป็นข้อต่อผสมลักษณะคล้ายข้อต่อกรรไกร ทั้งสองตัวอย่างมีคุณสมบัติวัสดุทุกตัวเหมือนกัน และมีน้ำหนักบรรทุกกระทำที่จุด F โครงสร้างตัวอย่างมีความสูง 8 ม. และกว้าง 6 ม. โครงสร้างในตัวอย่างจะถูกคำนวณโดยโปรแกรม SUTStructor [32] ซึ่งเป็น โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคที่น่าเสนอ



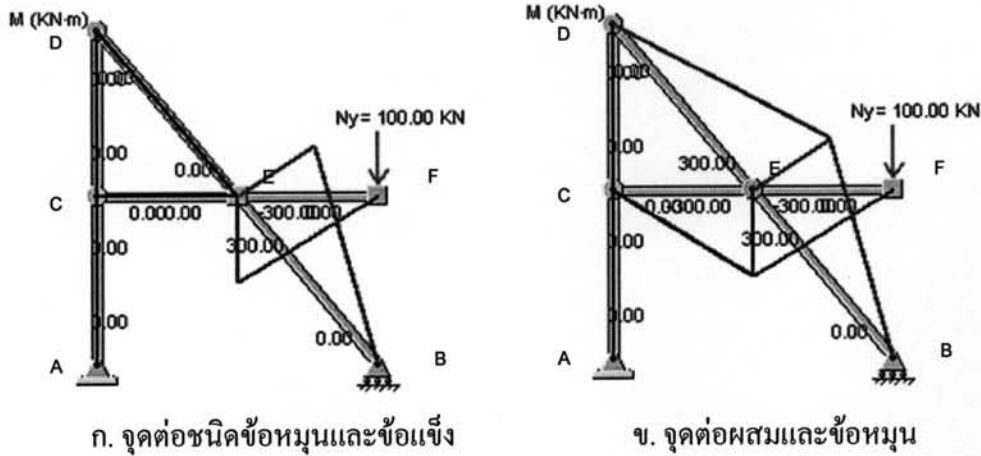
รูปที่ 3.22 ตัวอย่าง โครงสร้างที่มีจุดต่อแตกต่างกัน

ผลการคำนวณจากโปรแกรมแสดงในรูปที่ 3.23 รูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ซึ่งแผนภาพแรงเฉือนแสดงในรูปที่ 3.23(ก) และรูปที่ 3.23(ข) ส่วนแผนภาพแรงดัดแสดงในรูปที่ 3.24(ก) และรูปที่ 3.24(ข) เนื่องจากจุดต่อ E ในรูปที่ 3.24(ก) เป็นข้อแข็งแรงดัดที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะองค์อาคาร EF และ BE ในขณะที่จุดต่อ E ในรูปที่ 3.24 (ข) เป็นข้อต่อแบบกรรไกร ดังนั้นแรงดัดที่เกิดขึ้นจะมีที่ องค์อาคาร CE และ DE ด้วย

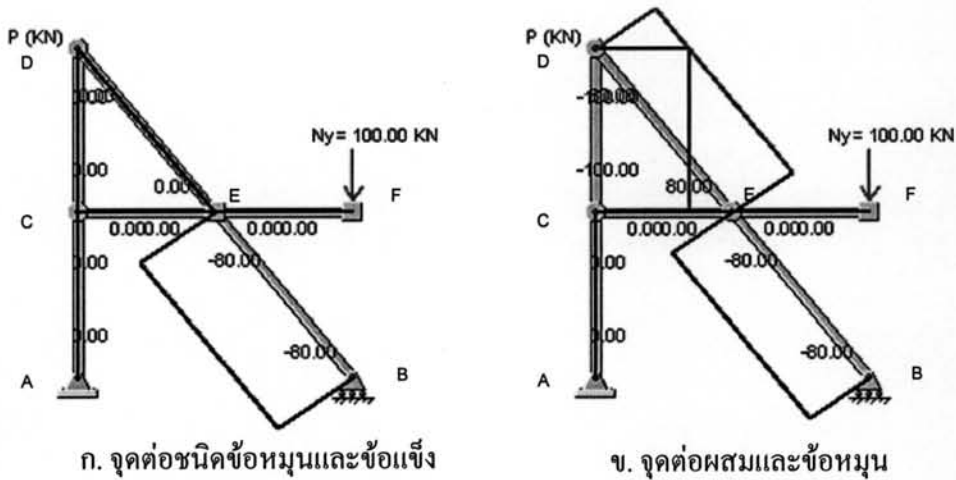


รูปที่ 3.23 แผนภาพแรงเฉือน

เมื่อพิจารณาแรงตามแนวแกน โครงสร้างที่มีจุดต่อต่างกันก็จะมีผลลัพธ์ที่แตกต่าง ในรูปที่ 3.25(ก) ซึ่งข้อต่อที่จุด E เป็นแบบข้อแข็ง แรงในแนวแกนจะเกิดขึ้นในองค์อาคาร BE ขนาด 80 กิโลนิวตัน ในขณะที่เมื่อจุด E เป็นข้อต่อแบบกรรไกรในรูปที่ 3.25(ข) จะมีแรงตามแนวแกนเกิดขึ้นที่ องค์อาคาร CD และ DE ขนาด 100 และ 80 กิโลนิวตันตามลำดับ



รูปที่ 3.24 แผนภาพแรงคัต



รูปที่ 3.25 แผนภาพแรงตามแนวแกน

จากที่แสดงมาจะเห็นว่าผลจากการเปลี่ยนรูปแบบของจุดมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ซึ่งถ้าผู้ออกแบบมีทางเลือกในการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างได้หลากหลายก็อาจพบกับรูปแบบที่เหมาะสมที่ช่วยลดขนาดของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ ในบทนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่สามารถจำลองพฤติกรรมโครงสร้างได้ทั้งโครงข้อแข็ง โครงข้อหมุน และโครงสร้างผสม ผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างจะเป็นแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตามแม้จะทราบแรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารแล้วหากออกแบบด้วยเทคนิคธรรมดาที่ใช้อยู่ปัจจุบันก็อาจจะได้โครงสร้างที่ยังไม่น่าหนักสูงซึ่งหมายถึงค่าใช้จ่ายที่มากกว่า ดังนั้นในบทถัดไปจะนำเสนอผลการศึกษาการประยุกต์การจำลองการอบเหนียวมาเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม ซึ่งเทคนิคนี้จะช่วยให้การออกแบบโครงสร้างยังได้มาตรฐานแต่สามารถที่จะน้ำหนักของโครงสร้างได้