บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการใช้ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

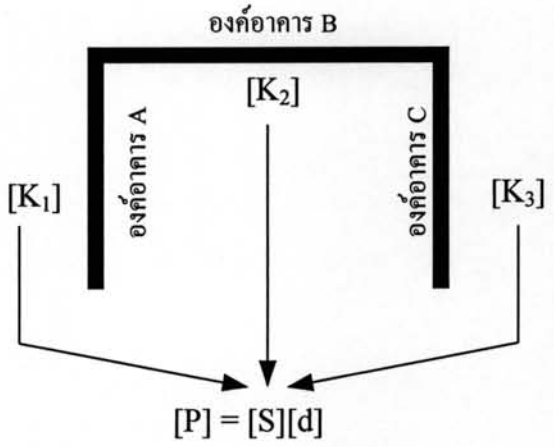
การจำลองพฤติกรรมโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของโครงสร้าง ซึ่งสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง คือ

$$[P]=[S][d] \tag{2.1}$$

เมื่อ [P] คือ เมตริกของแรงภายนอก (Structural External Force Matrix)

[S] คือ สติฟเนสเมตริกของโครงสร้าง (Structural Stiffness Matrix)

[d] คือ เมตริกของการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละจุดต่อของโครงสร้าง (Structural Displacement Matrix)



รูปที่ 2.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งระบบ

ความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ด้านบนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายนอกและการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดต่อทั้งหมดในโครงสร้าง โดยมีสติฟเนสเมตริกเป็นสัมประสิทธิ์ที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนตำแหน่ง ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงสร้างทั้งระบบจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆ ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้างก็คือองค์อาคารแต่ละตัว ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 ในตัวอย่างจะประกอบด้วย 3 ชิ้นส่วน คือ องค์อาคาร A องค์อาคารที่ B และองค์อาคารที่ C ในแต่ละชิ้นส่วนจะมีสติฟเนสเมตริกแยกกัน สติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคารจะแทนด้วย [K] ซึ่งเมตริกเหล่านี้ถูกคำนวณมาจากคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชิ้นส่วน เช่น พื้นที่หน้าตัด โมดูลัสอิลาสติก (Modulus of Elasticity) โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ความยาวขององค์อาคาร และมุมของการวางองค์อาคาร เป็นต้น จากนั้นสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคารจะถูกนำไปประกอบกันเป็นสติฟเนสของทั้งโครงสร้างโดยอ้างอิงตามรหัสตัวเลข โดยรหัสตัวเลขเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นจากอัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลข หลังจากนั้นสติฟเนสเมตริกของทั้งระบบพร้อมทั้งเมตริกของแรงภายนอกและเมตริกของการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละจุดต่อจะถูกจัดเรียงให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกดังแสดงในสมการด้านบน

2.2 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการทำงานของของซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ

2.2.1. ขั้นตอนการสร้างสมการคณิตศาสตร์ของโครงสร้าง

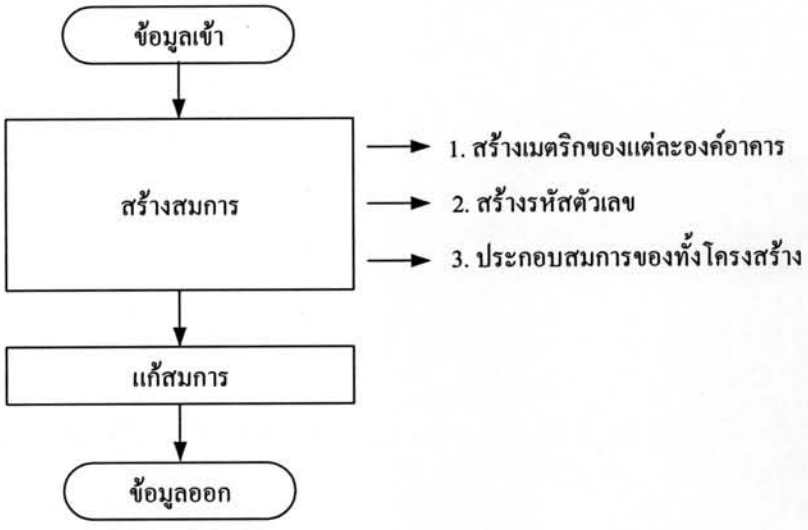
ในขั้นตอนนี้สมการที่เป็นตัวแทนพฤติกรรมของโครงสร้างจะถูกสร้างขึ้นจากสมการย่อยของแต่ละองค์อาคาร ซึ่งสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ขั้นตอนย่อยดังแสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วย

1) ขั้นตอนการสร้างสมการของแต่ละองค์อาคารซึ่งจะถูกจัดอยู่ในรูปของเมตริก
2) ขั้นตอนการสร้างรหัสตัวเลข ซึ่งรหัสตัวเลขเหล่านี้จะใช้ในการประกอบสมการของแต่ละองค์อาคารขึ้นเป็นสมการของโครงสร้าง ในขั้นตอนนี้อัลกอริทึมที่นำเสนอโดย S.S. Tezcan [5] เพื่อสร้างรหัสตัวเลขจะถูกแทนที่ด้วยอัลกอริทึมสร้างรหัสตัวเลขแบบใหม่ที่นำเสนอ
3) ขั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งระบบ ซึ่งได้จากการประกอบสมการของแต่ละองค์อาคารขึ้นเป็นสมการความสัมพันธ์ของทั้งโครงสร้าง ในขั้นตอนนี้สมการจะถูกประกอบขึ้นโดยอ้างอิงตามรหัสตัวเลข

2.2.2. ขั้นตอนการแก้สมการของโครงสร้าง

ในขั้นตอนนี้สมการของโครงสร้างจะถูกจัดอยู่ในรูปเมตริกซึ่งเป็นสมการพีชคณิตหลายตัวแปร โดยจำนวนของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและขนาดของสมการจะขึ้นกับขนาดและรูปแบบของโครงสร้าง การแก้สมการสามารถใช้วิธีการที่มีอยู่แล้วได้ เช่น วิธีเกาส์จอร์แดน และวิธียูแอล เป็น

ต้น หลังจากการแก้สมการผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแปลผลและแสดงในรูปแบบของข้อความหรือกราฟิกต่อไป

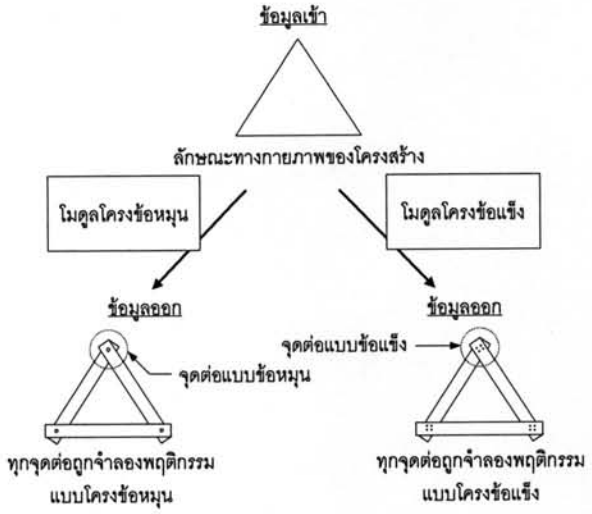


รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบอื่นๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะมีขั้นตอนเหมือนกับที่กล่าวมาคือมีการสร้างสมการย่อยของแต่ละชิ้นส่วนและนำไปประกอบกันจนเป็นสมการของทั้งระบบและทำการแก้สมดังกล่าวเพื่อหาคำตอบ การนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ในงานที่แตกต่างกันก็เพียงแต่เปลี่ยนสมการของแต่ละชิ้นส่วนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ในงานด้านการวิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติ จะเลือกใช้เอลิเมนต์ 2 ชนิดมาใช้สร้างสมการรวมของทั้งระบบนั่นคือ เอลิเมนต์โครงข้อแข็งและเอลิเมนต์โครงข้อหมุน โดยเอลิเมนต์ทั้ง 2 ชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันที่พฤติกรรมของข้อต่อที่ปลายขององค์อาคาร ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอภาพรวมของขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมของระบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอแบบจำลองที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อให้เห็นแนวทางในการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างได้ดีขึ้น

2.3 แบบจำลองสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติในปัจจุบัน

แบบจำลองสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์จำลองพฤติกรรมโครงระนาบ (Plane Structure) ในปัจจุบันจะถูกแยกพัฒนาออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ โมดูลโครงข้อหมุน (Truss Module) และโมดูลโครงข้อแข็ง (Frame Module) เพื่อใช้วิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อแข็งและโครงข้อหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองในการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์โครงสร้าง

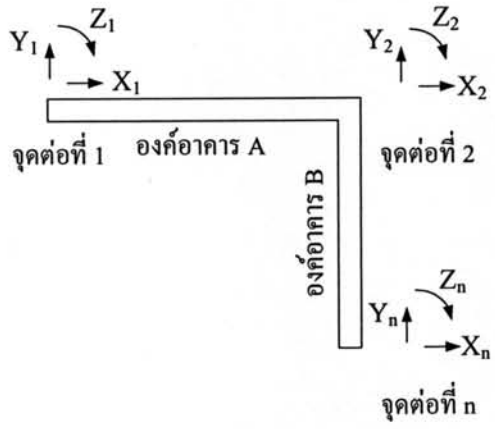
จากรูปที่ 2.3 แต่ละโมดูลจะใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่มีพฤติกรรมทางกายภาพแตกต่างกันดังนี้

1) โมดูลโครงข้อหมุน (Truss Module) จะถูกใช้สำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อหมุนซึ่งมีจุดต่อภายในโครงสร้างเป็นจุดหมุนทั้งหมด โมดูลนี้จะถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้เอลิเมนต์โครงข้อหมุน
2) โมดูลโครงข้อแข็ง (Frame Module) จะถูกใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมโครงข้อแข็ง ซึ่งมีจุดต่อภายในโครงสร้างเป็นข้อแข็งทั้งหมด โมดูลนี้จะถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้เอลิเมนต์โครงข้อแข็ง

ความแตกต่างของทั้งสองโมดูลในเชิงของการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างคือข้อต่อภายในของโครงสร้าง กรณีที่ใช้โมดูลโครงข้อหมุนในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง ข้อต่อทั้งหมดภายในโครงสร้างจะถูกจำลองให้เป็นข้อต่อข้อหมุนซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างโครงข้อหมุน ในทางตรงข้ามหากโมดูลโครงข้อแข็งถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง ข้อต่อภายในทั้งหมดจะถูกจำลองเป็นข้อแข็งซึ่งเป็นพฤติกรรมของโครงสร้างโครงข้อแข็ง ด้วยเหตุนี้ซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาด้วยเทคนิคที่ใช้กันในปัจจุบันจึงไม่มีความสามารถครอบคลุมในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีข้อต่อผสม วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนออัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลขซึ่งรหัสตัวเลขเหล่านี้มีความสำคัญในการสร้างสมการเพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะนำเสนออัลกอริทึมปัจจุบันที่ใช้ในการสร้างรหัสตัวเลข หลังจากนั้นตัวอย่างการใช้รหัสตัวเลขในการหาสติฟเนสเมตริกของโครงสร้างจะถูกแสดงถัดไป เพื่อให้เห็นแนวคิดของอัลกอริทึมการสร้างรหัสตัวเลขที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

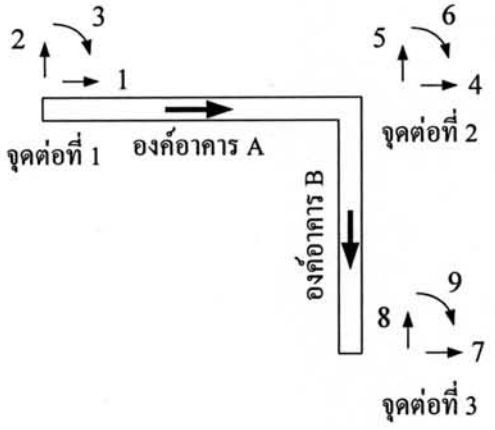
2.4 อัลกอริทึมการสร้างรหัสตัวเลขในปัจจุบันสำหรับจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

เนื่องจากเทคนิคใหม่ที่นำเสนอปรับปรุงมาจากเทคนิคเดิมของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อแข็ง โดยมีการปรับอัลกอริทึมในส่วนของการสร้างรหัสตัวเลขใหม่ ดังนั้นในหัวข้อนี้อัลกอริทึมปัจจุบันในการสร้างรหัสตัวเลขสำหรับการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างโครงข้อแข็งจึงถูกนำมาแสดง



รูปที่ 2.4 อัลกอริทึมสำหรับการสร้างรหัสตัวเลขในปัจจุบัน

อัลกอริทึมที่ใช้ในปัจจุบันที่นำเสนอโดย S.S. Tezcan แสดงดังรูปที่ 2.4 ในอัลกอริทึมนี้การสร้างรหัสตัวเลขจะอ้างอิงตามจุดต่อโดยไล่จากจุดต่อที่มีอันดับที่ต่ำไปอันดับที่สูงกว่า และในแต่ละจุดต่อจะเริ่มจากแกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ เมื่อรหัสตัวเลขแต่ละจุดต่อถูกสร้างแล้ว รหัสตัวเลขของแต่ละองค์อาคารจะได้จากการอ้างอิงไปยังจุดต่อที่ปลายทั้งสองขององค์อาคาร เพื่อให้เห็นหลักการทำงานของอัลกอริทึมโปรดดูรูปที่ 2.5 ประกอบคำอธิบาย



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างรหัสตัวเลขที่ถูกสร้างโดยอัลกอริทึมปัจจุบัน

ในตัวอย่างรูปที่ 2.5 รหัสตัวเลขจะถูกสร้างที่จุดต่อที่ 1 ตามแนวแกน X แกน Y และแกน Z เป็นหมายเลข 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นรหัสตัวเลขที่จุดต่อที่ 2 จะถูกสร้างเป็นหมายเลข 4, 5 และ 6 หลังจากนั้นที่จุดต่อที่ 3 รหัสตัวเลขจะถูกสร้างเป็นอันดับสุดท้าย คือ หมายเลข 7, 8 และ 9 การสร้างรหัสตัวเลขตามที่ได้อธิบายมา แสดงได้ด้วยอัลกอริทึมดังนี้

ตารางที่ 2.1 อัลกอริทึมปัจจุบันสำหรับสร้างรหัสตัวเลข

Define

n is a node,

X_n is a code number in x-axis of node n,

Y_n is a code number in y-axis of node n and

Z_n is a code number in z-axis of node n

1. Assign ordering number to all nodes.
2. Code number = 0
3. For all nodes

    Code number = Code number + 1

    X_n = Code number

    Code number = Code number + 1

    Y_n = Code number

    Code number = Code number + 1

    Z_n = Code number

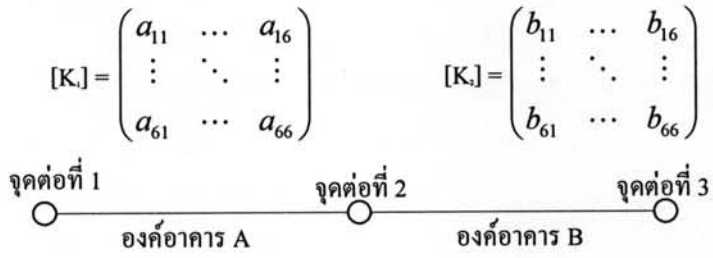
End loop

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมปัจจุบันในการสร้างรหัสตัวเลขแล้ว ซึ่งรหัสตัวเลขจะถูกนำไปใช้ต่อในการสร้างสมการของทั้งระบบ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอการนำรหัสตัวเลขไปใช้ในการสร้างสมการของทั้งโครงสร้าง

2.5 ตัวอย่างการใช้รหัสตัวเลขในการสร้างสมการของทั้งโครงสร้าง

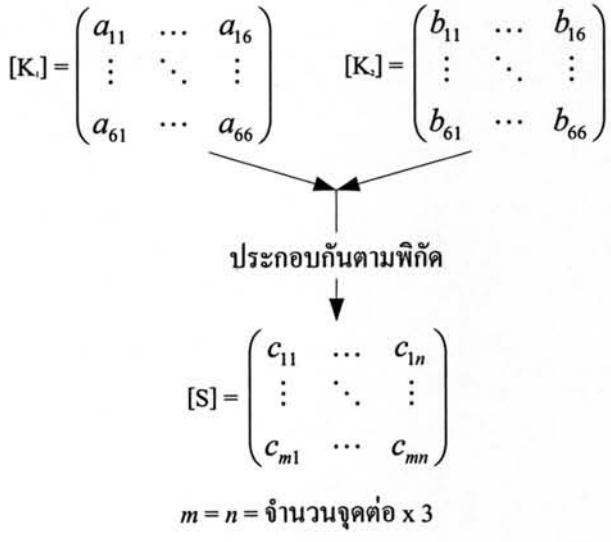
ในการสร้างสมการของทั้งโครงสร้าง เมตริกที่จำเป็นต้องสร้างก่อนคือ เมตริกของแรงภายนอก เมตริกของการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละจุดต่อของโครงสร้าง และสติฟเนสเมตริกของแต่

ละองค์อาคาร เมตริกของของแรงภายนอกและเมตริกของการเปลี่ยนตำแหน่งนั้นสามารถหาได้โดยตรงจากแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งที่กระทำต่อโครงสร้าง ส่วนสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างนั้นจะได้มาจากการประกอบกันของสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคาร ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการประกอบสติฟเมตริกของแต่ละองค์อาคารให้เป็นสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้าง ในรูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างของโครงสร้างโครงข้อแข็งที่ใช้ประกอบคำอธิบายซึ่งจุดต่อที่ 1จุดต่อที่ 2 และจุดต่อที่ 3 จะมีการเชื่อมต่อกันแบบแข็งเกร็ง อันดับแรกสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคารจะถูกสร้างขึ้น ในตัวอย่างนี้มีองค์อาคารอยู่สองชิ้น ดังนั้นสติฟเนสเมตริกจะมีสองเมตริกคือ $[K_1]$ และ $[K_2]$ ซึ่งเมตริกทั้งสองจะมีขนาด 6 x 6 เนื่องจากในตัวอย่างใช้เอลิเมนต์โครงข้อแข็ง ในการคำนวณ



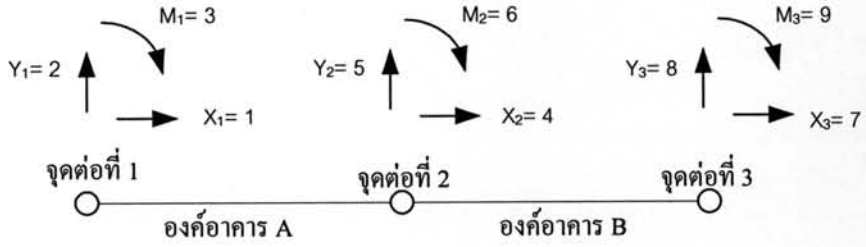
รูปที่ 2.6 สติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคาร

เมื่อสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคารได้ถูกสร้างขึ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประกอบสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคารเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การสร้างสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้าง

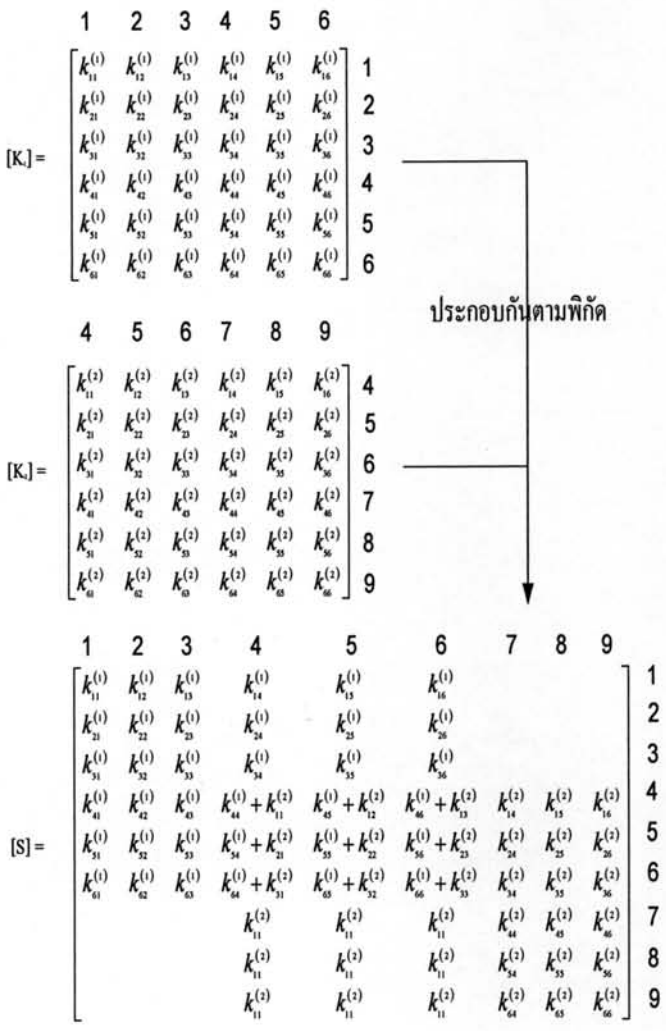
การประกอบสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคารเป็นสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างนั้น จะใช้รหัสตัวเลขสำหรับอ้างอิงตำแหน่ง ซึ่งจากตัวอย่างรหัสตัวเลขจะถูกสร้างโดยอัลกอริทึมของ S.S. Tezcan ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในขั้นตอนประกอบสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างรหัสตัวเลขเหล่านี้จะถูกใช้เป็นพิกัดของตำแหน่งของเมตริกดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยรหัสตัวเลขคือตัวเลขที่อยู่ภายนอกเมตริกบริเวณด้านบนและด้านข้าง



รูปที่ 2.8 รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างเพื่อใช้สำหรับประกอบสติฟเนสของโครงสร้าง

การวางหมายเลขที่ใช้กำหนดพิกัดของสติฟเนสเมตริกในรูปที่ 2.9 รหัสตัวเลขจะเริ่มจากจุดต่อต้นขององค์อาคารไปยังจุดต่อปลายขององค์อาคาร โดยภายในจุดต่อจะเรียงจาก แกน X แกน Y และแกน Z ดังนั้นในโครงสร้างตัวอย่าง องค์อาคาร A จึงมีการเรียงหมายเลขที่แสดงพิกัดของสติฟเนสเมตริกเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับและในองค์อาคาร B จะมีหมายเลขแสดงพิกัดเป็น 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ พิกัดของสติฟเนสเมตริกจะถูกระบุตามแกนนอนด้านบนเมตริกและระบุตามแกนตั้งด้านข้างของสติฟเนสเมตริก หลังจากนั้นสติฟเนสเมตริกรวมของทั้งโครงสร้างจะได้จากการจัดสติฟเนสเมตริกของและละองค์อาคารไปลงยังสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างตามพิกัดที่ระบุ ซึ่งในกรณีที่มีตำแหน่งลงซ้ำกันจะนำค่าเก่าที่เคยจัดลงแล้วมาบวกกับค่าใหม่ดังนั้นการประกอบสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างจึงเป็นอย่าง $[S]$ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

จากตัวอย่างที่นำเสนอ โครงสร้างประกอบด้วย 2 องค์อาคาร สำหรับกรณีอื่นๆ ที่มีจำนวนองค์อาคารแตกต่างจากนี้ ขั้นตอนในการหาสติฟเนสเมตริกรวมจะเหมือนกับที่ได้แสดงในตัวอย่าง คือ สร้างรหัสตัวเลขขึ้นมาก่อนและนำรหัสตัวเลขมาใช้ในการกำหนดพิกัดในสติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคาร หลังจากนั้นจึงประกอบสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างตามพิกัดของเมตริก จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่ารหัสตัวเลขมีความเกี่ยวข้องกับการสร้างสมการที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างอย่างชัดเจน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนออัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลข ซึ่งรหัสตัวเลขที่ถูกสร้างขึ้นตามอัลกอริทึมใหม่นอกจากจะสนับสนุนการจำลองโครงสร้างที่เป็นโครงข้อหมุนและโครงข้อแข็งแล้วยังสามารถจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่มีข้อต่อแบบผสมได้อีกด้วย ซึ่งอัลกอริทึมใหม่นี้จะถูกนำเสนอในบทถัดไป



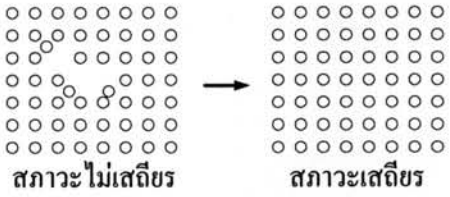
รูปที่ 2.9 การประกอบสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้าง

นอกจากวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนออัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลขเพื่อนำไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างแล้ว ยังนำเสนอการนำเอาการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างไปใช้ร่วมกับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเพื่อเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมอีกด้วย เพื่อให้รู้ถึงหลักการของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวที่จะนำมาประยุกต์ใช้ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจึงได้นำเสนอหลักการของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

2.6 หลักการของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

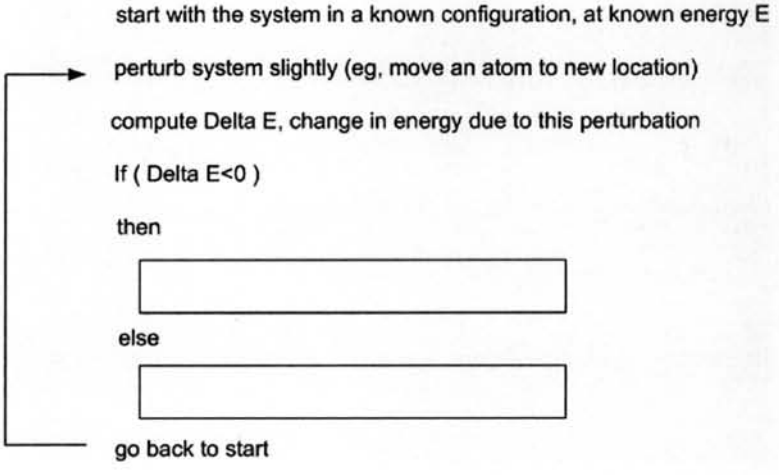
หลักการของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) พัฒนาขึ้นโดยการเลียนแบบพฤติกรรมการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก [23]-[25] จากการเรียงตัว

ที่ไม่เป็นระเบียบไปสู่การเรียงตัวที่เป็นระเบียบโดยที่ค่อยๆ ปล่อยพลังงานออกมาเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเรียงตัวของโครงสร้างผลึก

ในตอนแรกสถานะของระบบจะเป็นแบบไม่เสถียรซึ่งภายในระบบจะมีพลังงานอยู่มาก และการจัดเรียงของอะตอมภายในโครงสร้างจะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อพลังงานค่อยๆ ลดลงระบบจะพยายามปรับไปสู่สถานะที่สมบูรณ์ ซึ่งสถานะที่สมบูรณ์นี้อะตอมจะเรียงเป็นระเบียบมากที่สุด โดยสถานะที่สมบูรณ์ของการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างนั้นจะเป็นไปได้สองกรณี คือ กรณีแรกอะตอมของโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และกรณีที่สอง คือ พลังงานภายในลดต่ำลงกว่าสถานะที่อะตอมที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งการที่จะเข้าสู่สถานะที่พลังงานของอะตอมจะลดลงจนเสถียรนั้น อะตอมจะมีการเคลื่อนที่ไปรอบๆ และค่อยๆ ปล่อยพลังงานไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหยุดนิ่งเมื่อหมดพลังงาน ซึ่งอัลกอริทึมที่เลียนแบบพฤติกรรมการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของอะตอมของโลหะในกระบวนการอบเหนียวเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

จากรูปที่ 2.11 การทำงานของอัลกอริทึมจะเริ่มจากการสร้างระบบเริ่มต้นขึ้นมา หลังจากนั้นจะมีการสร้างระบบใหม่จากระบบเดิมโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงระบบเล็กน้อย ซึ่งการสร้างระบบใหม่ขึ้นมาจะถูกสร้างแบบสุ่ม หลังจากนั้นจะมีการเปรียบเทียบระบบเก่ากับระบบใหม่โดยการหาผลต่างของฟังก์ชันต้นทุน (Cost Function) ของระบบใหม่และระบบเก่า ซึ่งผลต่างนี้จะถูก

เก็บในตัวแปร Delta E ดังนั้นค่า Delta E จะเป็นตัววัดความดีของระบบใหม่ ซึ่งถ้าค่า Delta E น้อยกว่าศูนย์แสดงว่าระบบใหม่ดีกว่าระบบเก่าก็ให้เก็บระบบใหม่ไว้ แต่ถ้า Delta E มีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าระบบใหม่ไม่ดีหรืออยู่ในสถานะที่แย่กว่า ก็ต้องตรวจสอบดูว่าควรจะเก็บสถานะใหม่ไว้หรือไม่ โดยตรวจสอบจากการคำนวณ exp (-Delta E/KT) และผลของการสุ่มค่า r ตามเงื่อนไขดังนี้ ถ้า r น้อยกว่า exp (-Delta E/KT) ให้เก็บระบบใหม่ไว้ แต่ถ้าไม่ใช่ให้ทิ้งระบบใหม่ไป โดยที่ T คือค่าอุณหภูมิของระบบซึ่งจะลดลงเรื่อยๆ และ K เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของ Boltzmann ใช้สำหรับการปรับแต่งค่าให้หลุดจากคำตอบที่ดีที่สุดแบบสัมพัทธ์ จากหลักการตรงนี้สามารถนำไปเขียนเป็นคำสั่งเทียม (Pseudo Code) ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คำสั่งเทียมของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

```
Start with the system in a known configuration, at known energy E
T = temperature = hot; frozen = false;
While (! frozen) {
        Repeat {
                Perturb system slightly (e.g., move particles)
                Compute Delta E, change in energy due to perturbation
                If (Delta E < 0)
                Then accept this perturbation, this is the new system configuration
                Else accept maybe, with probability = exp (- Delta E /KT)
        } until (the system is in thermal equilibrium at this T)
        If (Delta E still decreasing over the last few temperatures)
                Then T = 0.9 T // Cool the temperature; do more perturbations
        Else frozen = true
}
Return (final configuration as low-energy solution)
```

จากคำสั่งเทียมด้านบนสามารถจำแนกองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวที่ต้องพิจารณาสำหรับการนำไปประยุกต์กับการเลือกขนาดวัสดุได้ดังนี้

1) โครงแบบ (Configuration) หรือการปรับเปลี่ยนตัวแปรเสริม (Parameter) ของคำตอบในระบบที่เราต้องการหาคำตอบที่เหมาะสม

2) การหากลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้สำหรับการเปลี่ยนแปลงจากกรณีเริ่มต้นไปสู่กรณีใหม่ (Move Set)
3) ฟังก์ชันต้นทุน (Cost Function) ใช้สำหรับประเมินความดีของคำตอบที่สร้างขึ้น
4) กำหนดการอบเหนียว (Cooling Schedule) เป็นอัตราการลดพลังงาน ซึ่งในอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวก็คือเทคนิคที่ใช้ในการกำหนดการทำงานและการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม

ในการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมในการออกแบบโครงสร้างที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หลักการของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาประยุกต์เข้ากับความสามารถในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างผสมที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย ซึ่งนอกเหนือจากความรู้ในเรื่องของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวแล้ว การสร้างฟังชันก์ต้นทุนจำเป็นจะต้องรู้หลักการของการออกแบบและการเลือกขนาดวัสดุ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะแสดงหลักการโดยรวมของการเลือกขนาดวัสดุในการการออกแบบ

2.7 การเลือกขนาดวัสดุในการออกแบบโครงสร้าง

ขั้นตอนการเลือกขนาดวัสดุเพื่อใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างในปัจจุบันจะเริ่มจากการที่วิศวกรกำหนดรูปแบบโครงสร้างและแรงที่กระทำกับโครงสร้าง หลังจากนั้นก็จะทำการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยในตอนแรกจะสมมุติให้ขนาดของวัสดุทุกตัวในโครงสร้างมีขนาดเดียวกันทั้งหมดแล้วทำการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง หลังจากรู้แรงที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์อาคารแล้ว แรงในแต่ละองค์อาคารจะถูกนำไปคำนวณเพื่อกำหนดขนาดวัสดุต่ำสุดที่จะสามารถเลือกได้โดยประมาณ หลังจากนั้นขนาดวัสดุในทุกองค์อาคารของโครงสร้างจะถูกเลือกให้มีขนาดเล็กที่สุดแต่ไม่ต่ำกว่าวัสดุที่กำหนดไว้แล้วจึงทำการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นจริงในองค์อาคารอีกครั้งเนื่องจากผลของการเปลี่ยนขนาดวัสดุ หลังจากคำนวณแรงได้เรียบร้อยแล้วก็ทำการตรวจสอบอีกครั้งว่ายังมีองค์อาคารใดที่มีขนาดเล็กเกินกว่าแรงที่เกิดจริงในองค์อาคารหรือไม่ ถ้ามีก็ทำการเปลี่ยนขนาดขององค์อาคารนั้นให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วทำการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นอีกครั้ง ทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งไม่มีองค์อาคารใดที่มีขนาดเล็กเกินกว่าจะรับแรงที่เกิดขึ้นจริงได้ ขั้นตอนที่กล่าวมานี้ก็คืออัลกอริทึมปกติวิศวกรใช้กันอยู่ในปัจจุบันซึ่งสามารถเขียนเป็นผังการทำงานได้ดังตารางที่ 2.3

จากผังการทำงานที่แสดงในตารางที่ 2.3 ขนาดของวัสดุที่เลือกมาแทนตัวเดิมที่ไม่สามารถรับแรงได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าทุกขนาดที่เลือกมาให้สำหรับทุกองค์อาคารสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นจริงในองค์อาคารได้ทั้งหมด โดยไม่ได้คำนึงถึงว่าเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดวัสดุ ผลของ

การเปลี่ยนแปลงนั้นอาจทำให้แรงเพิ่มขึ้นในบางองค์อาคารแต่ในบางองค์อาคารก็มีแรงลดลงด้วย ดังนั้นในการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมหากสามารถลดขนาดหน้าตัดเหล็กในองค์อาคารที่มีแรงลดลงก็อาจจะได้โครงสร้างที่ยังสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างได้และมีปริมาตรของเหล็กที่ใช้ลดลง และทุกครั้งที่มีการปรับขนาดหน้าตัดของเหล็กก็ต้องมีการตรวจสอบความสามารถในการรับแรง ซึ่งการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกนี้จะแสดงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2.3 อัลกอริทึมปกติสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ [4, 26, 27]

1. Assume material sizes of all members in the structure are the same size
2. Simulate the structure to know forces
3. Compute approximated minimum size of each member[1]
4. While the selected member sizes of all members are not enough for load
3.2 Select the greater member sizes for unsatisfied members[2]
3.3 Simulate the structure to know forces
3.4 Check all members are enough for load[3]
Loop

[1]การประมาณขนาดหน้าตัดเหล็กแสดงในหัวข้อที่ 2.9 เรื่องการประมาณค่าหน้าตัดต่ำสุดสำหรับเลือกหน้าตัดกรณีไม่ใช้อัลกอริทึมปกติ

[2]ขนาดหน้าตัดเหล็กแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. หน้าตัดเหล็กที่เลือกจะต้องมีค่ามากกว่าหน้าตัดที่ได้จากการประมาณหน้าตัดต่ำสุด

[3]การตรวจสอบว่าองค์อาคารมีหน้าตัดเพียงพอต่อการรับแรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารหรือไม่ แสดงในหัวข้อที่ 2.8 เรื่องการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีแรงที่ยอมให้

2.8 การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีแรงที่ยอมให้

การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีแรงที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) ของ AISC 2005 [28] ใช้หลักการของกำลังที่ยอมให้ของหน้าตัดขององค์อาคาร และมีตัวคูณความปลอดภัยที่เหมาะสม โดยมีสมการดังนี้

กำลังที่ต้องการ $\leq$ กำลังที่ออกแบบไว้

$$\sum R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \tag{2.2}$$

โดยที่ R_a = น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อองค์อาคาร

R_n = ค่ากำลังต้านทานขององค์อาคาร

Ω = ตัวคูณความปลอดภัย (Safety Factor)

ในการออกแบบต้องพิจารณาจัดรวมน้ำหนักหรือแรงกระทำต่างๆ ให้ได้น้ำหนักบรรทุกใช้งานสูงสุดที่กระทำต่อโครงสร้างดังนี้

กรณีที่ 1	DL	(2.3)
กรณีที่ 2	$DL + LL$	(2.4)
กรณีที่ 3	$0.75(DL + LL+WL)$	(2.5)
กรณีที่ 4	$0.75(0.85DL + (WL$ หรือ $EL))$	(2.6)
กรณีที่ 5	$0.75(0.85DL - (WL$ หรือ $EL))$	(2.7)

โดยที่ DL = น้ำหนักบรรทุกคงที่

LL = น้ำหนักบรรทุกจร

WL = น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากลม

EL = น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแผ่นดินไหว

ในการหาน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการใช้งานสูงสุด จะคำนวณในทุกกรณีแล้วเลือกเอากรณีที่ทำให้เกิดแรงในองค์อาคารมากที่สุด หลังจากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับแรงที่ยอมให้จากการออกแบบ ซึ่งการคำนวณแรงที่ยอมให้จะต้องพิจารณา แรงดึง แรงอัด แรงดัด แรงเฉือน และแรงที่ยอมให้กรณีที่เกิดแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน

2.8.1 องค์อาคารรับแรงดึง

สมมุติให้หน่วยแรงดึงรับแรงดึงกระจายตลอดทั้งหน้าตัดขององค์อาคาร จะหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ดังสมการ

$$T_a \le F_y A_g / \Omega_t \tag{2.8}$$

โดยที่ T_a = แรงดึงที่ยอมให้

F_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด

Ω_t = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.67

2.8.2 องค์อาคารรับแรงอัด

สำหรับแรงอัดที่ยอมให้ขององค์อาคารจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูดขององค์อาคารซึ่งคำนวณได้จาก

$$\lambda = \frac{KL}{r} \tag{2.9}$$

โดยที่ λ = อัตราส่วนความชะลูด

K = สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล

L = ความยาวอิสระที่ไม่มีการยึดด้านข้าง

r = รัศมีไจเรชัน

การคำนวณความสามารถในการรับแรงได้ขององค์อาคารนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 องค์อาคารมีพฤติกรรมการรับแรงอยู่ในช่วงอิลาสติก [17] และกรณีที่ 2 องค์อาคารมีพฤติกรรมการรับแรงอัดอยู่ในช่วงอินอิลาสติก โดยใช้อัตราส่วนความชะลูดในการแบ่งพฤติกรรม ซึ่งสมการที่ใช้แบ่งพฤติกรรมคือ

$$\lambda_c = 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{2.10}$$

โดยที่ λ_c = อัตราส่วนความชะลูดที่ใช้แบ่งพฤติกรรม

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

F_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

กรณีที่ 1 เมื่อค่า $\lambda \geq \lambda_c$ เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก ซึ่งแรงอัดที่ยอมให้เกิดในองค์อาคารจะคำนวณได้จาก

$$P_a = \frac{0.877F_eA_g}{\Omega_c} \tag{2.12}$$

โดยที่ P_a = แรงอัดที่ยอมให้

F_e = หน่วยแรงของออยเลอร์ = $\dfrac{\pi^2 E}{\left(\dfrac{KL}{r}\right)^2}$

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด

Ω_c = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.67

กรณีที่ 2 เมื่อค่า $\lambda < \lambda_c$ เสาจะมีพฤติกรรมการพังในช่วงอินอิลาสติก ซึ่งแรงอัดที่ยอมให้เกิดในองค์อาคารจะคำนวณได้จาก

$$P_a = \left(0.658^{\frac{Fy}{Fe}}\right)\frac{F_y A_g}{\Omega_c} \qquad (2.11)$$

โดยที่ P_a = แรงอัดที่ยอมให้

F_e = หน่วยแรงของออยเลอร์ = $\dfrac{\pi^2 E}{\left(\dfrac{KL}{r}\right)^2}$

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

K = สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล

L = ความยาวอิสระที่ไม่มีการยึดด้านข้าง

r = รัศมีไจเรชัน

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด

Ω_c = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.67

2.8.3 องค์อาคารรับแรงดัด

ในกรณีที่องค์อาคารมีแรงดัดเกิดขึ้นภายในองค์อาคาร โดยที่องค์อาคารมีการค้ำยันเพียงพอแรงดัดที่ยอมให้เกิดในองค์อาคารสามารถคำนวณได้จาก

$$M_r \le M_c \qquad (2.13)$$

โดยที่ M_r = โมเมนดัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

M_c = โมเมนดัดที่ยอมให้ = $\dfrac{M_n}{\Omega_b}$

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.67

M_n = ค่ากำลังต้านแรงดัดสำหรับเหล็กกลมกลวง = F_yZ

F_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

S = ค่าโมดูลัสหน้าตัด (Section Modulus)

Z = ค่าพลาสติกโมดูลัส (Section Modulus) = 1.27εS สำหรับเหล็กกลมกลวง

2.8.4 องค์อาคารรับแรงเฉือน

สำหรับองค์อาคารที่รับแรงเฉือน ค่าแรงเฉือนที่ยอมให้คำนวณได้จาก

$$V_a \leq \frac{V_n}{\Omega_v} \tag{2.14}$$

โดยที่ V_a = แรงเฉือนที่ยอมให้

V_n = ค่ากำลังต้านแรงเฉือนขององค์อาคาร ซึ่งในงานวิจัยนี้หน้าตัดเหล็กที่ใช้เป็น

ท่อกลมกลวง = $\frac{F_{cr}A_g}{2}$

$F_{cr} = 0.6\,F_y$

Ω_v = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.5

2.8.5 องค์อาคารรับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน

ในกรณีที่องค์อาคารมีแรงอัดและแรงดัดเกิดขึ้นภายในองค์อาคารพร้อมกัน การตรวจสอบความสามารถในการรับแรงสามารถทำได้โดยการรวมค่าอัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นจริงกับแรงที่ยอมให้สำหรับโมเมนต์ดัดกับค่าของอัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นจริงกับแรงที่ยอมให้สำหรับแรงในแนวแกน โดยมีค่าไม่เกิน 1 ซึ่งผลที่ได้เรียกว่า ผลรวมของแรงอัดและแรงดัด (Interaction) สำหรับการคำนวณผลรวมของแรงอัดและแรงดัดจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

กรณี 1 อัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นจริงกับแรงที่ยอมให้สำหรับแรงในแนวแกน มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 0.2 ตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยสมการ

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \leq 1 \tag{2.15}$$

กรณี 2 อัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นจริงกับแรงที่ยอมให้สำหรับแรงในแนวแกนมีค่าน้อยกว่า 0.2 ตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยสมการ

$$\frac{P_r}{2P_c}+\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right)\leq 1 \qquad (2.16)$$

โดยที่ P_r = แรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

P_c = แรงในแนวแกนที่ยอมให้

$\frac{P_r}{P_c}$ = อัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นจริงกับแรงที่ยอมให้สำหรับแรงในแนวแกน

M_{cx} = โมเมนดัดที่ยอมให้ ซึ่งกรณีเหล็กกลมกลวง = $\frac{F_y \times 1.27 \times S_x}{\Omega}$

M_{rx} = กำลังดัดอันดับสองที่เกิดขึ้น (Second-Order Flexural Strength)

$= B_1 M_{nt}$ ซึ่งโครงสร้างต้องไม่มีการโย้เอียง

M_{nt} = โมเมนต์ที่เกิดในองค์อาคารสำหรับโครงสร้างที่ไม่มีการโย้เอียง

$B_1 = \frac{C_m}{\left(1-1.6\mathrm{P_r}/P_{el}\right)} \geq 1$

C_m = $0.6\text{-}0.4(M_1/M_2)$ เมื่อ $M_1 \geq M_2$ และ M_1/M_2 เป็นบวกเมื่อแรงดัดทำให้องค์อาคารเป็นแบบโค้งดัดกลับ (Double Curvature)

$P_{el} = \frac{\pi^2 EI}{\left(KL\right)^2}$

Ω = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.67

2.9 การประมาณค่าหน้าตัดต่ำสุดสำหรับเลือกหน้าตัดกรณีใช้อัลกอริทึมปกติ

การประมาณหน้าตัดต่ำสุดหรือค่าโมดูลัสหน้าตัดต่ำสุด ในอัลกอริทึมที่แสดงในรูปที่ 2.12 หลังจากมีสมมุติขนาดหน้าตัดและจำลองพฤติกรรมไปแล้ว จะประมาณค่าหน้าตัดต่ำสุดหรือค่าโมดูลัสหน้าตัดต่ำสุดจากการประมาณโดยสมการเหล่านี้

การประมาณหน้าตัดจากผลของแรงดึงคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$\text{พื้นที่หน้าตัดต่ำสุด} = \frac{T_{\max}}{0.6F_y} \qquad (2.17)$$

โดยที่ T_{max} = แรงดึงที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

F_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

การประมาณหน้าตัดจากผลของแรงอัด เมื่อค่า $\lambda \geq \lambda_c$ เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก พื้นที่หน้าตัดต่ำสุดโดยประมาณขององค์อาคารจะคำนวณได้จาก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดต่ำสุด} = \frac{P_{\max} \cdot \Omega_c}{F_y \cdot \left(0.658^{\frac{Fy}{Fe}}\right)} \tag{2.18}$$

โดยที่ P_{max} = แรงอัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

F_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

F_e = หน่วยแรงของออยเลอร์ = $\dfrac{\pi^2 E}{\left(\dfrac{KL}{r}\right)^2}$

λ และ λ_c คำนวณจากสมการ 2.9 และ 2.10

การประมาณหน้าตัดจากผลของแรงอัด เมื่อค่า $\lambda < \lambda_c$ เสาจะมีพฤติกรรมการพังในช่วงอินอิลาสติก พื้นที่หน้าตัดต่ำสุดโดยประมาณขององค์อาคารจะคำนวณได้จาก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดต่ำสุด} = \frac{P_{\max} \cdot \Omega_c}{0.877 F_e} \tag{2.19}$$

โดยที่ P_{max} = แรงอัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

F_e = หน่วยแรงของออยเลอร์ = $\dfrac{\pi^2 E}{\left(\dfrac{KL}{r}\right)^2}$

การประมาณหน้าตัดจากผลของแรงดัด

$$\text{ค่าโมดูลัสหน้าตัดต่ำสุด} = \frac{\left(\dfrac{\Omega_b \cdot M_{\max}}{F_y}\right)}{1.27} \tag{2.20}$$

โดยที่ M_{max} = โมเมนดัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย = 1.67

F_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

การประมาณหน้าตัดจากผลของแรงอัดและแรงดัดพร้อมกันต้องตรวจสอบ 2 กรณี

กรณีที่ 1 แรงอัดมีค่ามากกว่าแรงดัด คำนวณ P_{max} จากสมการ 2.21 แล้วนำไปตรวจสอบหน้าพื้นที่หน้าตัดต่ำสุดโดยสมการที่ 2.18 หรือ 2.19

$$P_{max} = P_r + \frac{2M_{rx}}{d} \tag{2.21}$$

โดยที่ P_{max} = แรงอัดสูงสุดโดยประมาณ

P_r = แรงอัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

M_{rx} = แรงดัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

d = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

กรณีที่ 2 แรงดัดมีค่ามากกว่าแรงอัด คำนวณ M_{max} จากสมการ 2.22 แล้วนำไปตรวจสอบค่าโมดูลัสหน้าตัดต่ำสุดโดยสมการที่ 2.20

$$M_{max} = M_{rx} + P_r\left(\frac{d}{2}\right) \tag{2.22}$$

โดยที่ M_{max} = แรงดัดสูงสุดโดยประมาณ

P_r = แรงอัดที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร

d = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

M_{rx} = กำลังดัดอันดับสองที่เกิดขึ้น (Second-Order Flexural Strength)

$= B_1 M_{nt}$ ซึ่งโครงสร้างต้องไม่มีการโย้เอียง

M_{nt} = โมเมนต์ที่เกิดในองค์อาคารสำหรับโครงสร้างที่ไม่มีการโย้เอียง

$$B_1 = \frac{C_m}{\left(1-1.6P_r/P_{el}\right)} \geq 1$$

$C_m = 0.6\text{-}0.4(M_1/M_2)$ เมื่อ $M_1 \geq M_2$ และ M_1/M_2 เป็นบวกเมื่อแรงดัดทำให้องค์อาคารเป็นแบบโค้งดัดกลับ (Double Curvature)

$$P_{el} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

2.10 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 อัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลขที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบัน

เทคนิคปัจจุบันในการสร้างสมการในรูปแบบของเมตริกเพื่อใช้จำลองพฤติกรรมของโครงสร้างถูกพัฒนาขึ้นโดย S.S Tezcan ในปี ค.ศ. 1963 [5] ผู้พัฒนาได้นำเสนอการใช้รหัสตัวเลขเพื่อใช้ในการสร้างสมการอย่างเป็นระบบ ซึ่งทำให้การพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างทำได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคที่นำเสนอก็มีข้อจำกัดคือ การวิเคราะห์โครงสร้างจะขึ้นอยู่กับชนิดของ

เอลิเมนต์ที่เลือกใช้ ในกรณีที่ใช้เพียงเอลิเมนต์โครงข้อแข็งก็สามารถครอบคลุมการวิเคราะห์โครงข้อแข็งเท่านั้น ไม่สามารถวิเคราะห์โครงข้อหมุนหรือโครงสร้างที่มีลักษณะข้อต่อแบบผสมได้ นอกจากนั้นหากจะใช้เทคนิคเก่าในการพัฒนาซอฟต์แวร์ให้มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมได้ทั้งโครงสร้างโครงข้อแข็งและโครงข้อหมุนแล้วต้องใช้เอลิเมนต์โครงข้อแข็งและเอลิเมนต์โครงข้อหมุนซึ่งการพัฒนาส่วนแสดงผลก็ต้องแยกเป็นสองส่วนด้วย ในขณะที่เทคนิคใหม่ใช้เพียงเอลิเมนต์โครงข้อแข็งซึ่งทำให้การพัฒนาส่วนแสดงผลไม่ต้องแยกกันอีกต่อไป

2.10.2 การลดขนาดการจัดเก็บข้อมูลในเมตริกซ์

ในอดีตการใช้หน่วยความจำสำหรับการจัดเก็บข้อมูลเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กและราคาแพง ด้วยเหตุนี้ในปี ค.ศ. 1968 Richard Rosen [29-30] จึงได้นำเสนออัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลขที่ช่วยให้การใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างลดลง (The Matrix Bandwidth Minimization) ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้ ใช้การปรับอัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลขเพื่อให้ข้อมูลในการสร้างสมการไม่กระจาย ช่วยให้การจัดเก็บสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้างลดลง อย่างไรก็ตามแม้เทคนิคนี้จะใช้การปรับอัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลขแต่ก็มุ่งเน้นเรื่องจากการลดการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บสติฟเนสเมตริก ไม่ได้มุ่งเน้นในเรื่องของการเพิ่มความสามารถในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง และช่วยให้การพัฒนาทำได้รวดเร็วขึ้น

2.10.3 เทคนิคการปลดปล่อยจุดต่อองค์อาคาร

เนื่องจากแบบจำลองของการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบเดิมนั้นสนับสนุนการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะข้อต่อข้อแข็งและข้อหมุนเท่านั้น เทคนิคปลดปล่อยจุดต่อองค์อาคาร (Member Releases) [6] จึงได้ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อแข็งที่มีจุดต่อบางส่วนเป็นโครงข้อหมุนได้บ้าง แต่เทคนิคนี้ก็ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ข้อต่อผสมได้บางแบบเท่านั้น หลักการของเทคนิคนี้คือ สร้างเอลิเมนต์ขึ้นมาอีกสามชนิดซึ่งเอลิเมนต์แต่ละชนิดมีข้อแตกต่างดังนี้

1) ปลายด้านซ้ายขององค์อาคารหมุนได้อิสระ
2) ปลายด้านขวาขององค์อาคารหมุนได้อิสระ
3) ปลายสองด้านขององค์อาคารหมุนได้อิสระ

แม้ว่าจะเทคนิคการปลดปล่อยจุดต่อองค์อาคารจะสามารถจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมได้ในบางรูปแบบ แต่ก็ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบกรรไกรได้