บทที่ 2

วิธีวิเคราะห์

2.1 ความนำ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนรับแรงกระทำด้านข้างร่วมกัน เป็นการนำเอาโครงสร้างที่มีพฤติกรรมต่างกันมารวมเข้าด้วยกัน โดยที่โครงข้อแข็งเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างจะเกิดการโก่งตัวแบบแรงเฉือน (Shear Mode) เป็นหลัก ส่วนผนังต้านแรงเฉือนจะเกิดการโก่งตัวแบบแรงดัด (Bend Mode) เป็นหลัก เมื่อนำโครงสร้างทั้ง 2 ชนิดมารวมเข้ากันโดยเชื่อมต่อด้วยคานเชื่อมที่ชั้นต่าง ๆ และรับแรงกระทำทางด้านข้างร่วมกัน จะเกิดการต้านการโก่งตัวโดยอิสระของแต่ละแบบ ดังนั้นพฤติกรรมของโครงสร้างแต่ละชนิดจะแปรเปลี่ยนไป เมื่อทราบพฤติกรรมดังกล่าวจึงสามารถแยกวิเคราะห์โครงสร้างแต่ละชนิด โดยที่โครงสร้างแต่ละชนิดจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขความสอดคล้อง (Compatibility Condition) และเงื่อนไขการสมดุลย์ (Equilibrium Condition)

2.2 ข้อสมมุติฐาน

2.2.1 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulas of Elasticity) ของชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละประเภทมีค่าเท่านั้น

2.2.2 พฤติกรรมขององค์อาคารทุกชิ้นส่วนภายใต้แรงกระทำ จะมีค่าอยู่ในช่วงอิลาสติก (Elastic)

2.2.3 ที่จุดต่อทุกจุดต่อในโครงสร้างเป็นจุดต่อข้อแข็ง (Rigid Joint)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4 พื้นมีความแข็งแกร่งในระนาบสูง ทำให้การโก่งตัวในแนวราบขององค์อาคารที่ชั้นเดียวกันมีค่าเท่ากัน

2.2.5 ในโครงข้อแข็งไม่คำนึงถึงผลจากการโก่งตัวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Deformation) แต่ในผนังด้านเฉือนคู่คิดถึงผลดังกล่าวด้วย

2.2.6 ไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากการยืดหดและแรงในแนวแกน

2.2.7 แรงกระทำเป็นแรงกระทำทางด้านข้างในแนวราบ กระทำที่จุดต่อและแรงกระทำสมมาตรกับโครงสร้างจนไม่ทำให้เกิดแรงบิด

2.3 การกำหนดชื่อเรียกชื่อจุดต่อและชิ้นส่วนในโครงสร้าง

ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เพื่อความสะดวกจึงกำหนดให้มีการเรียกชื่อจุดต่อและชิ้นส่วนในโครงสร้างดังนี้

2.3.1 จุดต่อ (Joint)

จุดต่อเป็นจุดที่ปลายขององค์อาคารมายึดต่อเข้าด้วยกัน การเรียกชื่อจุดต่อจะกำหนดเป็นดัชนี 2 ตัวคือ i, j โดยที่ i แสดงตำแหน่งชั้น j แสดงตำแหน่งเสาหรือผนังต้านแรงเฉือนที่อ้างถึง เช่น จุดต่อ (3, 2) คือจุดต่อที่ชั้นที่ 3 ตำแหน่งเสาต้นที่ 2 จากขวา ดังแสดงในรูป 2.2

2.3.2 ชิ้นส่วนย่อย (Member)

คือชิ้นส่วนที่ยึดต่อเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้าง อันได้แก่ เสา คาน และผนังต้านแรงเฉือน การเรียกชื่อจะเรียกชื่อตามชิ้นส่วนนั้นและใช้ตัว i, j แสดงเช่นเดียวกันกับจุดต่อ ดังรูป 2.3

ก.) b (i, j) คือ คานที่อยู่ด้านขวามือของจุดต่อ (i, j)

ข.) c (i, j) คือ เสาที่อยู่ด้านล่างของจุดต่อ (i, j)

2.4 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้าง

ในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง โครงสร้างแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมในการรับแรงกระทำที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.4.1 พฤติกรรมในการรับแรงกระทำด้านข้างของโครงข้อแข็ง จะเกิดการโก่งตัวแบบแรงเฉือน (Shear Mode) เป็นหลัก กล่าวคือจะเกิดจุดดัดกลับ (Inflection Point) ขึ้นภายในเสาแต่ละต้น ดังรูป 2.4

2.4.2 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว จะเกิดการโก่งตัวแบบแรงดัด (Bend Mode) เป็นหลัก กล่าวคือจะเกิดโค้งเดี่ยวไม่มีจุดดัดกลับ ดังรูป 2.5

2.4.3 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของผนังต้านแรงเฉือนคู่ จะเกิดการโก่งตัวทั้งแบบแรงดัด (Bend Mode) และ แรงเฉือน (Shear Mode) แต่เนื่องจากว่าค่าสติฟเนสของคานเชื่อมมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผนังต้านแรงเฉือน ดังนั้นการโก่งตัวจึงจะเป็นไปในแบบแรงดัด (Bend Mode) เป็นหลักมากกว่า ดังรูป 2.6

เมื่อทราบพฤติกรรมในการรับแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้างแต่ละชนิด แล้วนำโครงสร้างเหล่านี้มาเชื่อมต่อกันด้วยคานเชื่อมเพื่อรับแรงกระทำด้านข้างร่วมกัน โครงสร้างแต่ละชนิดซึ่งมีพฤติกรรมต่างกันจะเกิดการต้านการโก่งตัวโดยอิสระของแต่ละแบบ ดังนั้นพฤติกรรมของโครงสร้างรวมจะเปลี่ยนแปลงไป ดังรูป 2.7 ซึ่งแสดงการโก่งตัวของโครงสร้างที่ประกอบด้วยโครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างร่วมกัน

2.5 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ เมื่อทราบพฤติกรรมของโครงสร้างแต่ละชนิดแล้วสามารถทำการแยกวิเคราะห์โครงสร้างแต่ละชนิดได้ และเมื่อนำมารับแรงกระทำด้านข้างร่วมกันพฤติกรรมรวมจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขกับการสอดคล้อง (Compatibility Condition) และเงื่อนไขการสมดุลย์ (Equilibrium condition) ซึ่งได้แก่เงื่อนไขดังต่อไปนี้

ก.) ค่าการโก่งตัวในแนวราบของโครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวที่ระดับชั้นเดียวกันจะต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นการสอดคล้องกับเงื่อนไขการสอดคล้อง

ข.) ผลรวมของแรงเฉือนในแนวราบที่เกิดขึ้นในเสาของโครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว ที่ชั้นต่าง ๆ จะต้องมีค่าเท่ากับขนาดของแรงภายนอกที่กระทำที่ชั้นนั้น ๆ ซึ่งเป็นการสอดคล้องกับเงื่อนไขการสมดุลย์

การวิเคราะห์ในงานวิจัยจะใช้วิธีทำซ้ำโดยสมการมุมและการโก่ง (Iteration Method by Slope-Deflection Equation) ซึ่งวิธีทำซ้ำเป็นการแทนค่าตัวแปรที่ได้จากการสมมุติขึ้นมาในรอบแรก และแทนค่าตัวแปรเหล่านี้ลงไปในสมการที่ได้จากคุณสมบัติของโครงสร้างและเงื่อนไขดังที่กล่าวมาแล้ว ทำซ้ำจนกระทั่งค่าตัวแปรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับรอบที่ผ่านมาของกระทำซ้ำ ค่าตัวแปรที่ได้คือคำตอบ

ในวิธีวิเคราะห์โครงสร้างในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยโครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว โดยจำลองเป็นโครงระนาบ ดังรูป 2.8 และผนังต้านแรงเฉือนคู่จะถูกจำลองให้อยู่ในรูปคานที่มีส่วนปลายยึดแน่น (Beam with Rigid End Zone) ดังรูป 2.9 โครงสร้างแต่ละชนิดเชื่อมต่อกันด้วยคานเชื่อมที่มีปลายหมุนได้ทั้งสองข้าง หรือ ปลายยึดแน่นที่โครงข้อแข็งและอีกปลายหมุนได้ ดังรูปที่ 2.10

ขั้นตอนในการวิเคราะห์จะเริ่มต้นจากการที่สมมุติในแรงกระทำด้านข้างทั้งหมดนั้นกระทำต่อผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวก่อน ซึ่งจะสามารถหาค่าการโก่งตัวในแนวราบและค่าการหมุนที่ชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างได้โดยใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้างทั่ว ๆ ไป ค่าที่ได้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการกระทำซ้ำ เมื่อทราบค่าการโก่งตัวในแนวราบจะสมมติให้ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และโครงข้อแข็งมีค่าการโก่งตัวในแนวราบที่ชั้นต่าง ๆ เท่ากับค่าดังกล่าว แต่เนื่องจากทั้งผนังต้านแรงเฉือนคู่และโครงข้อแข็งไม่สามารถจะโก่งตัวโดยอิสระด้วยค่าการโก่งตัวในแนวราบดังกล่าวได้นั้น คือจะต้องมีค่ามุมหมุนที่จุดต่อซึ่งสอดคล้องกับการโก่งตัวในแนวราบอันนั้น ค่ามุมหมุนนี้สามารถหาได้โดยใช้สมการมุมหมุนและการโก่งประกอบกับสมการสมดุลย์รอบจุดต่อ เมื่อเราทราบค่าการโก่งและมุมหมุนที่จุดต่อต่าง ๆ ในผนังต้านแรงเฉือนคู่และโครงข้อแข็งก็จะสามารถหาค่าแรงเฉือนที่ผนังและเสาต้นต่าง ๆ ได้ ต่อจากนั้นโดยใช้สมการสมดุลย์ระหว่างแรงภายนอก แรงเฉือนในผนัง และ แรงเฉือนในเสา จะสามารถหาค่าแรงกระทำในคานเชื่อมได้ โดยที่แรงกระทำในคานเชื่อมที่ได้ก็จะเป็นแรงกระทำต่อผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวที่แปรเปลี่ยนไปจากตอนแรก (ซึ่งสมมุติให้แรงกระทำด้านข้างทั้งหมดกระทำต่อผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว) และนำไปคำนวณหาค่าการโก่งตัวในแนวราบใหม่ ทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งค่าการโก่งตัวในแนวราบที่ได้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรอบก่อน ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขความสอดคล้องและเงื่อนไขการสมดุลย์

2.5.1 <u>สมการมุมและการโก่ง (Slope - Deflection Equation)</u>

ในการวิเคราะห์โดยวิธีทำซ้ำในงานวิจัยนี้ จะใช้สมการมุมและการโก่งเป็นหลักโดยใช้ร่วมกับสมการสมดุลย์รอบจุดต่อต่าง ๆ ในส่วนโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนส่วนสมการมุมหมุนและโก่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันไป ดังนี้

2.5.1.1 สมการมุมและการโก่งสำหรับโครงข้อแข็ง

พิจารณาชิ้นส่วน AB สามารถใช้สมการมุมและการโก่งโดยทั่ว ๆ ไปที่ใช้จากรูป 2.11 ค่าโมเมนต์ดัดที่ปลายชิ้นส่วน

$$M_{AB} = \frac{EI}{L}(4\theta_A + 2\theta_B - 6\phi)$$

(2.1)

$$M_{BA} = \frac{EI}{L}(2\theta_A + 4\theta_B - 6\phi)$$

2.5.1.2 สมการมุมและการโก่งสำหรับผนังต้านแรงเฉือนคู่

เนื่องจากในส่วนของผนังต้านแรงเฉือนคู่ตัวผนังจะมีความกว้างมาก พฤติกรรมของส่วนผนังจะเหมือนกับคานลึก (Deep Beam) สมการมุมและการโก่งที่ใช้จึงคำนึงผลเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Deformation) ด้วย

สมการมุมและการโก่งในส่วนผนังต้านแรงเฉือนคู่ ได้แก่

$$M_{AB} = \frac{EI}{L}(X\theta_A + Y\theta_B - Z\phi)$$

(2.2)

$$M_{BA} = \frac{EI}{L}(Y\theta_A + X\theta_B - Z\phi)$$

โดยที่ X,Y และ Z เป็นค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงผลเนื่องจากแรงเฉือนด้วย(ดูภาคผนวก ค.2)

ในส่วนของคานเชื่อม การวิเคราะห์จะจำลองผนังต้านแรงเฉือนคู่ให้อยู่ในรูปของโครงข้อแข็งที่มีช่วงปลายยึดแน่น (Rigid End Zone) ดังรูป 2.12 ทำให้สมการมุมและการโก่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการมุมและการโก่งตัวสำหรับคานที่มีช่วงปลายยึดแน่น (Beam With Rigid End Zone) ได้แก่ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค.)

$$M_{AB} = \frac{EI}{L}\{A\theta_A + B\theta_B - (A+B)\phi\}$$

$$M_{BA} = \frac{EI}{L}\{C\theta_A + D\theta_B - (C+D)\phi\} \qquad (2.3)$$

โดยที่ A, B, C และ D เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับช่วงปลายยึดแน่น

2.5.2 การวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวของผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว

ในขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์โดยวิธีทำซ้ำ เริ่มที่สมมุติในแรงกระทำทางด้านข้างทั้งหมดกระทำต่อผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวก่อน จากนั้นวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวในแนวราบที่ชั้นต่าง ๆ ของผนังต้านแรงเฉือนโดยใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานทั่วไป เช่น วิธีโมเมนต์พื้นที่ (Moment Area) หรือคานคอนจูเกต (Conjugate Beam) ดังรูป 2.13

จากค่าการโก่งตัวในแนบราบที่ชั้นต่าง ๆ ของผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวที่ได้สามารถนำไปหาค่าการหมุนของคอร์ด (Chord Rotation) ที่ใช้ในสมการมุมและการโก่งสำหรับชิ้นส่วนเสาในโครงข้อแข็งหรือผนังในผนังต้านแรงเฉือนคู่ ซึ่งก็คืออัตราส่วนของการโก่งตัวในแนวราบเทียบกับความสูงชั้นต่าง ๆ

$$\phi(i) = \frac{\Delta(i) - \Delta(i-1)}{H(i)} \qquad (2.4)$$

เมื่อ $\phi(i)$ = อัตราส่วนการโก่งตัวในแนบราบเทียบกับความสูงของชั้นที่ i

$\Delta(i)$ = ค่าการโก่งตัวในแนบราบของผนังต้านแรงเฉือนที่ชั้น i

$H(i)$ = ความสูงของชั้นที่ i

2.5.3 การวิเคราะห์หาค่าการหมุนที่จุดต่อต่าง ๆ บนโครงข้อแข็งที่สอดคล้องกับการโก่งตัวของผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว

เป็นการวิเคราะห์หาค่ามุมหมุนที่จุดต่อบนโครงข้อแข็ง โดยอาศัยสมการมุมและการโก่งประกอบกับสมการสมดุลย์รอบจุดต่อต่าง ๆ ทำซ้ำจนได้ค่ามุมหมุนที่สอดคล้องกับค่าการโก่งตัวในแนวราบที่ได้จากผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว และค่ามุมหมุนที่จุดต่อต่าง ๆ บนโครงข้อแข็งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของคานเชื่อมที่เชื่อมระหว่างโครงข้อแข็งกับผนังต้านแรงเฉือนคู่ ในงานวิจัยนี้แยกเป็น 2 ลักษณะ คือ

ก.) ปลายทั้งสองข้างหมุนได้

ข.) ปลายข้างหนึ่งยึดติดกับโครงข้อแข็ง อีกข้างหนึ่งหมุนได้

ในโครงข้อแข็งจุดต่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะมีค่าการหมุนต่างกันออกไป ซึ่งในการวิเคราะห์ได้แยกสมการออกได้ตามชนิดคานเชื่อมดังนี้

2.5.3.1 ค่ามุมหมุนที่ตำแหน่งเสาด้านในสุด (ขวามือสุด)

ก) คานเชื่อมที่ปลายทั้งสองข้างหมุนได้

ในส่วนจุดหมุนที่อยู่ติดกับคานเชื่อม กรณีนี้ค่าการโก่งตัวในแนวราบที่ชั้นต่าง ๆ เท่านั้นที่จะมีผลต่อการหมุนที่จุดต่อต่าง ๆ ในโครงข้อแข็ง จากรูป 2.14 ใช้สมการมุมและการโก่งประกอบกับสมการสมดุลย์รอบจุด i, j

$$M_r(i,j) = 0$$

$$M_l(i,j) = K_b(i,j-1)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i,j)\}$$

$$M_t(i,j) = K_c(i+1,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\}$$

$$M_b(i,j) = K_c(i,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\}$$

(2.5)

เมื่อ $M_r(i,j)$, $M_l(i,j)$, $M_t(i,j)$ และ $M_b(i,j)$ คือโมเมนต์ดัดรอบจุด i,j ทางด้านขวา, ซ้าย บนและล่างตามลำดับ ส่วน K_c , K_b คือค่าสติฟเนสเสาและคาน และ $\theta(i,j)$ คือ ค่ามุมหมุนที่จุด (i, j)

ในสภาวะสมดุลย์รอบจุด i,j

$$M_r(i,j) + M_l(i,j) + M_t(i,j) + M_b(i,j) = 0$$

$$\theta(i,j) = -\frac{\left[\begin{array}{l} 2K_b(i,j-1)\theta(i,j-1) \\ + \; K_c(i+1,j)\{2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\} \\ + \; K_c(i,j)\{2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\} \end{array}\right]}{4\{K_b(i,j-1) + K_c(i+1,j) + K_c(i,j)\}}$$

(2.6)

ข.) ปลายข้างหนึ่งยึดติดกับโครงข้อแข็ง อีกข้างหนึ่งหมุนได้

พิจารณาที่คานเชื่อม รูป 2.15

$$M_r(i,j) = K_b(i,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i,j+1) - 6\alpha(i+1)\}$$

(2.7)

$$M_l(i,j+1) = K_b(i,j)\{4\theta(i,j+1) + 2\theta(i,j) - 6\alpha(i)\}$$

เนื่องจากเป็นจุดหมุน $M_l(i,j) = 0$

$$\theta(i,j+1) = -0.25\{2\theta(i,j) + 6\alpha(i)\} \qquad (2.8)$$

เมื่อ

$$\alpha(i) = \frac{\Delta_v(i)}{L(NC)}$$

$$= \frac{\theta_s(i,L) \times l_z}{L(NC)}$$

$\alpha(i)$ = ค่าการโก่งตัวในแนวดิ่งที่จุดติดกับผนังต้านแรงเฉือน

$\theta_s(i,L)$ = ค่ามุมหมุนของผนังต้านแรงเฉือนซ้าย

l_z = ระยะจากแกนสะเทินของผนังต้านแรงเฉือนถึงจุดต่อของคานเชื่อม

$$M_r(i,j) = K_b(i,j)\{3\theta(i,j) + 3\alpha(i)\}$$

$$M_l(i,j) = K_b(i,j-1)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i,j)\}$$

$$M_t(i,j) = K_c(i+1,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\}$$

$$M_b(i,j) = K_c(i,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\}$$

(2.9)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในสภาวะสมดุลย์รอบจุด i,j

$$M_r(i,j) + M_l(i,j) + M_t(i,j) + M_b(i,j) = 0$$

$$\theta(i,j) = -\frac{\left[\begin{array}{l} K_b(i,j)3\alpha(i) \\ +\ 2K_b(i,j-1)\theta(i,j-1) \\ +\ K_c(i+1,j)\{2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\} \\ +\ K_c(i,j)\{2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\} \end{array}\right]}{4\{0.75\,K_b(i,j) + K_b(i,j-1) + K_c(i+1,j) + K_c(i,j)\}} \qquad (2.10)$$

2.5.3.2 ค่ามุมหมุนที่ตำแหน่งเสาไม่ติดกับคานเชื่อม

ขั้นตอนนี้จะดำเนินการหลังจากที่ได้ค่าการหมุนของจุดต่อของเสาต้นในที่ติดกับคานเชื่อม พิจารณารูป 2.16 ใช้สมการมุมและการโก่งกับสมการสมดุลย์รอบจุดต่อ (i, j) ใด ๆ ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$M_r(i,j) = K_b(i,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i,j+1)\}$$

$$M_l(i,j) = K_b(i,j-1)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i,j-1)\}$$

$$M_t(i,j) = K_c(i+1,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\}$$

$$M_b(i,j) = K_c(i,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\}$$

(2.11)

016362

เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลย์ของโมเมนต์รอบจุด i, j ดังนั้น ผลรวมของโมเมนต์จะต้องเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$M_r(i,j) + M_l(i,j) + M_t(i,j) + M_b(i,j) = 0$$

$$\theta(i,j) = - \frac{\begin{bmatrix} 2K_b(i,j)\theta(i,j+1) \\ + \; 2K_b(i,j-1)\theta(i,j-1) \\ + \; K_c(i+1,j)\{2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\} \\ + \; K_c(i,j)\{2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\} \end{bmatrix}}{4\{K_b(i,j) + K_b(i,j-1) + K_c(i+1,j) + K_c(i,j)\}}$$

(2.12)

กรณีมุมหมุนที่จุดต่อที่เสาต้นนอกสุด เนื่องจากว่าค่า $K_b(i,j-1)$ ไม่มี เพราะไม่มีคานที่ต่อออกไปอีก ดังนั้นสมการหาค่ามุมหมุนของจุดต่อที่อยู่บนเสาต้นนอกสุดจะลดรูปเหลือดังนี้

$$\theta(i,j) = - \frac{\begin{bmatrix} 2K_b(i,j)\theta(i,j+1) \\ + \; K_c(i+1,j)\{2\theta(i+1,j) - 6\phi(i+1)\} \\ + \; K_c(i,j)\{2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\} \end{bmatrix}}{4\{K_b(i,j) + K_c(i+1,j) + K_c(i,j)\}}$$

(2.13)

ในกรณีที่ฐานของเสาแต่ละต้นยอมให้เกิดการหมุนได้บางส่วน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าสติฟเนสของการหมุนที่ฐานนั้น ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\theta(0,j)K_s(j) = K_c(1,j)\{4\theta(0,j) + 2\theta(1,j) - 6\phi(1)\}$$

$$\theta(0,j) = \frac{K_c(1,j)\{6\phi(1) - 2\theta(1,j)\}}{4K_c(1,j) + K_s(j)} \qquad (2.14)$$

เมื่อ $K_s(j)$ = ค่าสติฟเนสของการหมุนที่ฐานของเสาต้นที่ j

2.5.4 <u>การวิเคราะห์หาค่าการหมุนที่จุดต่อต่าง ๆ บนผนังต้านแรงเฉือนคู่ที่สอดคล้องกับการโก่งตัวของผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว</u>

เช่นเดียวกันกับโครงข้อแข็ง การวิเคราะห์นี้เพื่อหาค่ามุมหมุนที่จุดต่อบนผนังต้านแรงเฉือนคู่ โดยอาศัยสมการมุมและการโก่งที่คิดผลเนื่องจากแรงเฉือนและผลจากช่วงปลายยึดแน่น (Rigid End zone) พิจารณารูป 2.17

2.5.4.1 ค่ามุมหมุนที่ผนังด้านขวา

จากรูป 2.17 ใช้สมการมุมและการโก่งประกอบกับสมการสมดุลย์รอบจุด i,R (โดยที่ จุด i,R คือจุดที่อยู่ที่ผนังต้านแรงเฉือนด้านขวามือของผนังต้านแรงเฉือนคู่ ชั้นที่ i)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$M_r(i,R) = 0$$

$$M_l(i,R) = K_b(i,L)\{D\theta_s(i,R) + C\theta_s(i,L)\}$$

$$M_t(i,R) = K_w(i+1,R)\{X(i+1,R)\theta_s(i,R) + Y(i+1,R)\theta_s(i+1,R) - Z(i+1,R)\phi(i+1)\}$$

$$M_b(i,R) \;=\; K_w(i,R)\{X(i,R)\theta_s(i,R) + Y(i,R)\theta_s(i-1,R) - Z(i,R)\phi(i)\}$$

(2.15)

โดยที่ X(i,R) , Y(i,R) = ค่าสัมประสิทธิ์ที่คิดผลเนื่องจากแรงเฉือน

C , D = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับช่วงปลายยึดแน่น

(ดูภาคผนวก ค.)

ใช้สมการสมดุลย์รอบจุดต่อ i,R

$$\theta_s(i,R) \;=\; -\,\frac{\left[\begin{array}{l} CK_b(i,L)\theta_s(i,L) \\ +\;\; K_w(i+1,R)\{Y(i+1,R)\theta_s(i+1,R) - Z(i+1,R)\phi_s(i+1)\} \\ +\;\; K_w(i,R)\{Y(i,R)\theta_s(i-1,R) - Z(i,R)\phi(i)\} \end{array}\right]}{DK_b(i,L) + X(i+1,R)K_w(i+1,R) + X(i,R)K_w(i,R)\}}$$

(2.16)

2.5.4.2 ค่ามุมหมุนที่ผนังด้านซ้าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เช่นเดียวกันกับผนังด้านขวา พิจารณาจากรูป 2.17 ประกอบกับ สมการสมดุลย์รอบจุด i,L (โดยที่ จุด i,L คือจุดที่อยู่ที่ผนังต้านแรงเฉือนซ้ายของผนังต้านแรงเฉือนคู่ชั้นที่ i)

$$M_r(i,L) \;=\; K_b(i,L)\{A\theta_s(i,L) + B\theta_s(i,R)\}$$

$$M_l(i,L) \;=\; 0$$

$$M_t(i,L) = K_w(i+1,L)\{ X(i+1,L)\theta_s(i,L) + Y(i+1,L)\theta_s(i+1,L) - Z(i+1,L)\phi(i+1)\}$$

$$M_b(i,L) = K_w(i,L)\{X(i,L)\theta_s(i,L) + Y(i,L)\theta_s(i-1,L) - Z(i,L)\phi(i)\}$$

(2.17)

โดยที่ $X(i,L)$, $Y(i,L)$ = ค่าสัมประสิทธิ์ที่คิดผลเนื่องจากแรงเฉือน

A , B = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับช่วงปลายยึดแน่น

(ดูภาคผนวก ค.)

ใช้สมการสมดุลย์รอบจุดต่อ (i,L)

$$\theta_s(i,L) = - \frac{\begin{bmatrix} BK_b(i,L)\theta_s(i,R) \\ + K_w(i+1,L)\{Y(i+1,L)\theta_s(i+1,L) - Z(i+1,L)\phi(i+1)\} \\ + K_w(i,L)\{Y(i,L)\theta_s(i-1,L) - Z(i,L)\phi(i)\} \end{bmatrix}}{AK_b(i,L) + X(i+1,L)K_w(i+1,L) + X(i,L)K_w(i,L)\}}$$

(2.18)

ในกรณีที่ฐานยอมให้หมุนได้

$$\theta_s(0,j)K_{ws}(j) = K_w(1,j)\{X(1,j)\theta_s(0,j) + Y(1,j)\theta_s(1,j) - Z(1,j)\phi(1)\}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\theta_s(0,j) = \frac{K_w(1,j)\{Z(1,j)\phi(1) - Y(1,j)2\theta_s(1,j)\}}{X(1,j)K_c(1,j) + K_{ws}(j)} \qquad (2.19)$$

เมื่อ $K_{ws}(j)$ = ค่าสติฟเนสของการหมุนที่ฐานของผนังที่ j (j เท่ากับ L,R)

2.5.5 การหาค่าแรงกระทำในคานเชื่อม

จากขั้นตอนที่แล้วเมื่อทราบค่าการโก่งตัวในแนวราบ และมุมหมุนที่จุดต่อต่าง ๆ และสามารถหาแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้ โดยแรกจะสามารถหาค่าโมเมนต์ดัดที่ในชิ้นส่วนต่าง ๆ ทั้งในโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนคู่ โดยใช้สมการมุมและการโก่งซึ่งอยู่ในเทอมของค่าการโก่งตัวและมุมหมุน ต่อจากนั้นสามารถหาแรงเฉือนในชิ้นส่วนเสาและผนังได้ เมื่อใช้เงื่อนไขมการสมดุลย์ระหว่างแรงเฉือนในเสาและผนังต้านแรงเฉือนก็สามารถหาค่าแรงที่กระทำในคานเชื่อมได้

พิจารณารูป 2.18 ในโครงข้อแข็งอาศัยสมการมุมและการโก่งที่ตำแหน่งเสาต้นที่ i จะได้ว่า

$$M_b(i,j) = K_c(i,j)\{4\theta(i,j) + 2\theta(i-1,j) - 6\phi(i)\} \qquad (2.20)$$

$$M_t(i-1,j) = K_c(i,j)\{4\theta(i-1,j) + 2\theta(i,j) - 6\phi(i)\} \qquad (2.21)$$

แรงเฉือนในเสา i,j

$$v(i,j) = \frac{M_b(i,j) + M_t(i-1,j)}{H(i)}$$

$$= \frac{K_c(i,j)\{6\theta(i-1,j) + 6\theta(i,j) - 12\phi(i)\}}{H(i)} \qquad (2.22)$$

เมื่อ v(i,j) คือค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสา i,j

ดังผลรวมของแรงเฉือนทั้งหมดในโครงข้อแข็งที่เกิดขึ้นที่ i คือ

$$V(i) = \sum_{j=1}^{NC} v(i,j) \qquad (2.23)$$

โดย V(i) = ผลรวมของแรงเฉือนในชั้นที่ i

NC = จำนวนเสาในโครงข้อแข็ง

ส่วนในผนังต้านแรงเฉือนคู่ เช่นเดียวกัน

$$M_b(i,j) = K_w(i,j)\{X(i,j)\theta_s(i,j) + Y(i,j)\theta_s(i-1,j) - Z(i,j)\phi(i)\} \qquad (2.24)$$

$$M_t(i-1,j) = K_w(i,j)\{X(i,j)\theta_s(i-1,j) + Y(i,j)\theta_s(i,j) - Z(i,j)\phi(i)\} \qquad (2.25)$$

แรงเฉือนในผนังต้านแรงเฉือน i,j

$$v_c(i,j) = \frac{M_b(i,j) + M_t(i-1,j)}{H(i)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= \frac{\left[\begin{array}{l} K_w(i,j)[\{X(i,j) + Y(i,j)\}\{\theta_s(i-1,j) \\ + \theta_s(i,j)\} - 2Z(i,j)\phi(i)\} \end{array}\right]}{H(i)} \qquad (2.26)$$

เมื่อ $v_c(i,j)$ = ค่าแรงเฉือนที่ผนังต้านแรงเฉือน i,j

ผลรวมของแรงเฉือนทั้งหมดในผนังต้านแรงเฉือนคู่

$$V_c(i) = v_c(i,L) + v_c(i,R) \qquad (2.27)$$

โดย $V_c(i)$ = ผลรวมของแรงเฉือนในชั้นที่ i

$v_c(i,L)$ = แรงเฉือนที่ผนังซ้ายชั้นที่ i

$v_c(i,R)$ = แรงเฉือนที่ผนังขวาชั้นที่ i

เมื่อทราบผลของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นต่าง ๆ ทั้งในโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนคู่ สามารถหาแรงในแนวแกนคานเชื่อมที่กระทำต่อผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวได้ โดยอาศัยสมการสมดุลย์ 2 ครั้งคือ ครั้งแรกที่คานเชื่อมระหว่างโครงข้อแข็งกับผนังต้านแรงเฉือนคู่ ครั้งที่ 2 ที่คานเชื่อมผนังต้านแรงเฉือนคู่และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว รูป 2.19

ที่คานเชื่อมระหว่างโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนคู่

$$IP'(i) = P(i) + V(i) - V(i+1) \qquad (2.28)$$

เมื่อ $IP'(i)$ = แรงกระทำในคานเชื่อมระหว่างโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนคู่

$P(i)$ = แรงภายนอกที่กระทำที่ชั้น i

ที่คานเชื่อมระหว่างผนังต้านแรงเฉือนคู่และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว

$$IP(i) = IP'(i) + V_c(i) - V_c(i+1) \quad (2.29)$$

เมื่อ $IP(i)$ = แรงกระทำในคานเชื่อมระหว่างผนังต้านแรงเฉือนคู่กับผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว

2.5.7 <u>การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและค่าการหมุนของผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว</u>

ในการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและการหมุนที่ชั้นต่าง ๆจะทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ตำแหน่งเดียวกันของรอบที่ผ่านมา สำหรับในรอบแรกจะเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวและการหมุนที่เป็นศูนย์ และเมื่อทำซ้ำไปเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบ ก็จะเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากรอบที่แล้ว ถ้าเปรียบเทียบแล้วยังมีค่าความแตกต่างมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ (Tolerance) ก็จะทำซ้ำอีก จนกระทั่งค่าความแตกต่างน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ ก็จะหยุดการทำซ้ำ ดังนั้นค่าการโก่งตัวและมุมหมุนที่ได้จะเป็นค่าที่สอดคล้องกับแรงภายนอกที่กระทำและนำไปหาแรงภายในต่อไป

2.6 <u>ขั้นตอนในการวิเคราะห์</u>

จากหัวข้อที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงพฤติกรรม สมการที่ใช้ตลอดจนเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทำซ้ำ สรุปได้เป็นขั้นตอนดังนี้

ก.) ให้แรงกระทำด้านข้างทั้งหมดกระทำที่ผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว และหาค่าการโก่งตัวและมุมหมุนที่ชั้นต่าง ๆ ตามหัวข้อ 2.5.2

ข.) ให้โครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนคู่เกิดการโก่งตัวเท่ากับค่าการโก่งตัวในแนวราบตามข้อ ก.) จากนั้นใช้สมการมุมและการโก่งร่วมกับสมการสมดุลย์รอบจุดต่อตาม

สภาพของชิ้นส่วนตามหัวข้อ 2.5.3 และ 2.5.4 หาค่ามุมหมุนที่สอดคล้องกับการโก่งตัวดังกล่าว โดยการทำซ้ำภายในโครงข้อแข็ง และภายในผนังต้านแรงเฉือนคู่เอง

ค.) จากค่าการโก่งตัวในข้อ ก.) และมุมหมุนในข้อ ข.) หาค่าแรงเฉือนภายในเสาของข้อแข็งและที่ผนังต้านแรงเฉือนคู่ โดยใช้สมการมุมและการโก่ง

ง.) ใช้สมการสมดุลย์ระหว่างแรงภายนอกและแรงเฉือนในเสาของโครงข้อแข็ง หาค่าแรงการะทำในคานเชื่อมที่เชื่อมระหว่างโครงข้อแข็งและผนังต้านแรงเฉือนคู่ และใช้สมการสมดุลย์ระหว่างแรงกระทำในคานเชื่อม และแรงเฉือนในผนังของผนังต้านแรงเฉือนคู่ หาค่าแรงกระทำในคานเชื่อมที่เชื่อมระหว่างผนังต้านแรงเฉือนคู่และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว ซึ่งจะเป็นแรงที่กระทำต่อผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวจึงแปรเปลี่ยนไป และเริ่มขั้นตอน ก.) เป็นการเริ่มทำซ้ำ

2.7 แผนภูมิขั้นตอนการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วิธีการทำซ้ำโดยการใช้สมการมุมและการโก่งในงานวิจัยนี้ จะพบว่าสมการที่ใช้ส่วนมากจะเป็นสมการที่ยาวและมีตัวแปรเป็นจำนวนมาก ประกอบกับการทำเป็นการทำซ้ำ ซึ่งเป็นการยากและยุ่งยากในการทำด้วยมือ จึงได้มีการนำไมโครคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณและประมวลผล เพื่อความรวดเร็วและสะดวกขึ้น แผนภูมิขั้นตอนการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย