

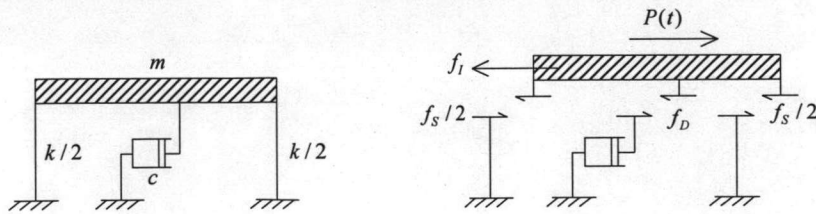
บทที่ 2

การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ปกติการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกทั่วไปหรือแรงลม เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงยืดหยุ่น และในการออกแบบจะไม่ยอมให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างเหล่านั้น แต่สำหรับการออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวจะยอมให้มีความเสียหายเกิดขึ้นได้บ้างแต่โครงสร้างต้องไม่พังทลาย ดังนั้นจำเป็นต้องวิเคราะห์โครงสร้างทั้งในช่วงที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวทั้งในช่วงที่โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจะกล่าวถึงโครงสร้างที่มีดัชนีของความอิสระเท่ากับ 1 นอกจากนี้ยังพูดถึงหลักการในการวิเคราะห์ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โครงสร้างโดยหลักการทางพลศาสตร์ (Dynamic analysis) จะมีแรงภายใน 3 แรงได้แก่ แรงเฉื่อย (Inertia force, $f_I = m\ddot{u}$), แรงสติฟเนส (Stiffness force, f_S) และแรงหน่วง (Damping force, $f_D = c\dot{u}$) แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่โครงสร้างมีมวล m , สติฟเนส k และค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วง c



(ก) โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว

(ข) สมดุลของแรง

รูปที่ 2.1 โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวและสมดุลของแรง

จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการสมดุลของแรงได้เป็น

$$f_I + f_D + f_S = p(t) \quad (2.1)$$

โดยที่

$p(t)$ เป็นแรงภายนอกที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา

สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Linear elastic) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงสติฟเนสกับการเปลี่ยนตำแหน่งจะเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) เขียนได้ว่า

$$f_S = ku \quad (2.2)$$

แต่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงสติฟเนสกับการเปลี่ยนตำแหน่งจะไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่จะขึ้นกับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่งเขียนได้ว่า

$$f_S = f_S(u, \dot{u}) \quad (2.3)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) ได้เป็น

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S = p(t) \quad (2.4)$$

โดยที่

\ddot{u} , \dot{u} และ u เป็นความเร่ง, ความเร็ว และการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้าง ตามลำดับ

$f_S = ku$ สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น

$f_S = f_S(u, \dot{u})$ สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น

2.1.1 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น

จากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก ได้เป็น

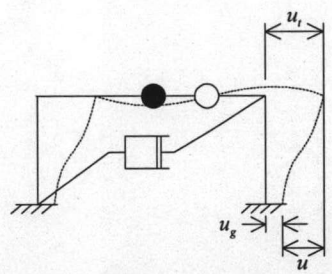
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.5)$$

เนื่องจากแผ่นดินไหวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้าง ถ้าให้ u_r เป็นการเคลื่อนที่ทั้งหมด (สัมบูรณ์) ของโครงสร้าง, u_g เป็นการเคลื่อนที่ของพื้นดิน และ u เป็นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของโครงสร้างกับพื้นดิน แสดงในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้เป็น

$$u_r(t) = u(t) + u_g(t) \quad (2.6)$$

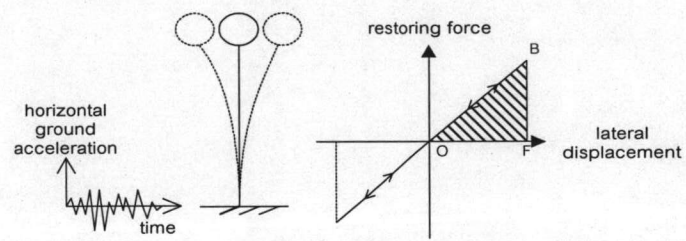
จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาข้างต้น ภายใต้แรงแผ่นดินไหวเมื่อแรงภายนอกมีค่าเท่ากับศูนย์ และ $f_I = m\ddot{u}_i$ จะได้ว่า

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \tag{2.7}$$

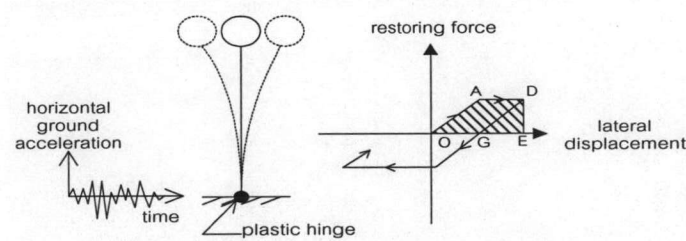


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดกับการเคลื่อนที่ของพื้นดินและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น สำหรับระบบที่มีดัชนีของความอิสระเท่ากับ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ก)



(ก) โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น



(ข) โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น

รูปที่ 2.3 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นและในช่วงไม่ยืดหยุ่น

2.1.2 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น

จากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น ได้เป็น

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = p(t) \quad (2.8)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ภายใต้แรงแผ่นดินไหว สามารถเขียนได้เป็น

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.9)$$

พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่น สำหรับระบบที่มีดักริของความอิสระเท่ากับ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ข)

สำหรับโครงสร้างภายใต้แรงแบบเป็นวัฏจักร พบว่าโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนตำแหน่งรอบจุดสมดุลคงที่จุดหนึ่งแต่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น โครงสร้างจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งรอบจุดสมดุลที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้น ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างถาวร

พิจารณารูปที่ 2.3 เมื่อโครงสร้างเคลื่อนที่อย่างอิสระและไม่มี ความหน่วง ($c = 0$) มีความเร็วเมื่อผ่านตำแหน่งสมดุลเท่ากับ $\dot{u}_{max} = v_{max}$ กำหนดให้รอยต่อของโครงสร้างรูปที่ 2.3(ก) มีความสามารถต้านทานที่รอยต่อเท่ากับ V_{1u} สำหรับโครงสร้างรูปที่ 2.3(ข) มีความต้านทานที่รอยต่อน้อยกว่าโครงสร้างแรกมีโดยค่า V_{2u}

ให้โครงสร้างในรูปที่ 2.3(ก) มีการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดเท่ากับ u_{01} จากกฎทรงพลังงานจะได้ว่าพลังงานศักย์ของโครงสร้างซึ่งอยู่ในรูปพลังงานความเครียด (Strain energy) ที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของโครงสร้างเมื่อผ่านตำแหน่งสมดุล ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}ku_{01}^2 \quad (2.10)$$

$$u_{01} = \sqrt{\frac{m}{k}} v_{max} \quad (2.11)$$

สำหรับโครงสร้างในรูปที่ 2.3(ข) เนื่องจากความสามารถในการต้านทานของโครงสร้างมีน้อย ทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ขึ้นที่ฐาน แรงต้านทานที่เกิดขึ้นมีค่า V_{2u} และการเปลี่ยนตำแหน่งมีค่า u_{02} พลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟ OADE ของรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของโครงสร้าง ดังแสดง

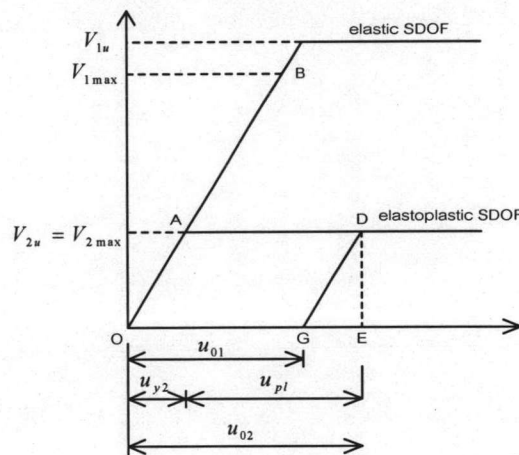
$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}V_{2u}u_{y2} + V_{2u}u_{pl} \quad (2.12)$$

ได้ว่า

$$u_{pl} = \frac{1}{2V_{2u}}(mv_{max}^2 - V_{2u}u_{y2}) \quad (2.13)$$

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโครงสร้างมีค่า

$$u_{02} = u_{y2} + u_{pl} \quad (2.14)$$



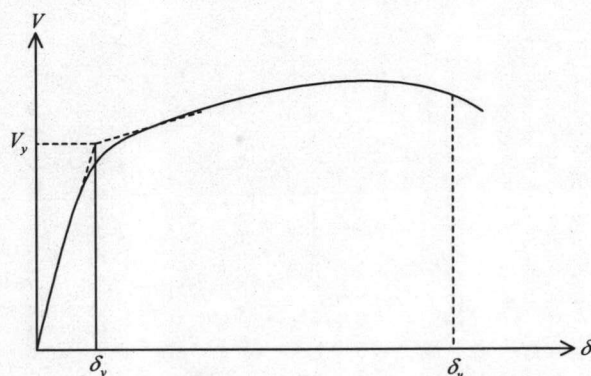
รูปที่ 2.4 แรงและการเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

โครงสร้างในรูปที่ 2.3(ก) เป็นโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น พลังงานศักย์ของโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด แต่สำหรับโครงสร้างในรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น พลังงานศักย์ที่เปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟ GDE ดังรูปที่ 2.4 ส่วนพื้นที่ใต้กราฟ OADG จะเป็นพลังงานที่ถูกสลายไปโดยการครากที่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วน (Dissipate energy) โดยอาจเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นเช่น พลังงานความร้อน

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างเกิดจากความต้านทานของโครงสร้างทั้งในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น และความสามารถของโครงสร้างในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกที่เรียกว่าความเหนียว (Ductility)

ความเหนียว (Ductility) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างที่ตำแหน่งวิบัติ (Ultimate deformation, δ_u) กับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ตำแหน่งคราก (Yield deformation, δ_y) ดังแสดงดังรูปที่ 2.5

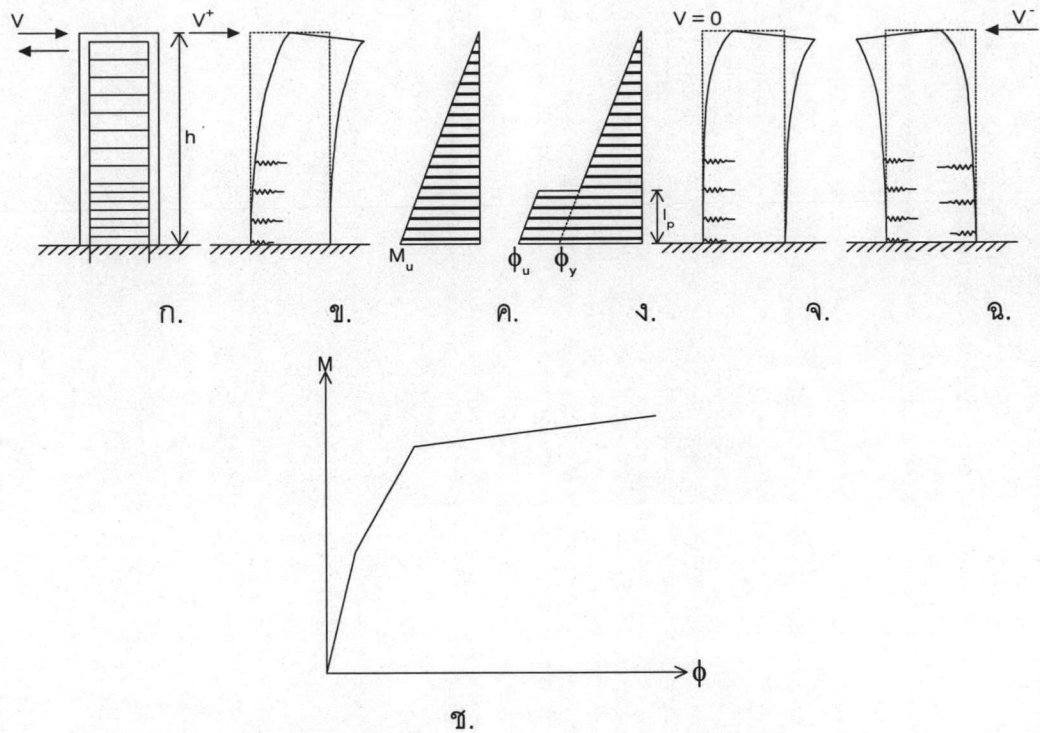
พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่นภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรแสดงดังรูปที่ 2.6



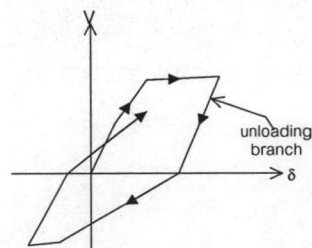
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่ง

ในการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของโครงสร้างภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือการคำนวณเชิงตัวเลข โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีพฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่นซึ่งความสามารถในการรับแรงของหน้าตัดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 2.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดเพื่อความสะดวกจึงสมมติให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันต่างกัน 3 เส้น จุดที่เปลี่ยนความชันคือจุดที่คุณสมบัติของหน้าตัดเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่จุดที่คอนกรีตเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดึง, จุดที่เหล็กเสริมคราก และ จุดที่ชิ้นส่วนเกิดการวิบัติ ภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรความสามารถในการรับแรงของหน้าตัดจะลดลงเมื่อรอบที่กระทำต่อโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาของ Park และคณะ (1985) ได้เสนอแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร เรียกว่า Three parameter park model โดยมีความคิดว่าความสามารถต้านทานแรงภายนอกของหน้าตัดมีค่าลดลงโดยมีตัวแปรสำคัญ ได้แก่ การลดลง

ของสติฟเนส (Stiffness degradation parameter), การลดลงของกำลัง (Strength deterioration parameter) และการลดลงเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม และการเปิด-ปิดของรอยแตกของคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของแรงกระทำ (Slip or crack closing parameter)



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัด

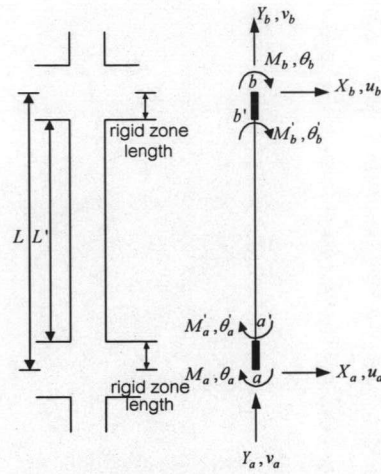
2.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC2D

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Park และคณะ (1987) สำหรับ IDARC2D (A computer program for the inelastic damage analysis of buildings) ที่ใช้ถูกพัฒนาโดย Valles และคณะ (1996) โปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีสมมุติฐานที่ว่าพื้นของอาคารเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid floor diaphragms) จึงมีดีกรีของความอิสระต่อชั้น (Degree of freedom per floor) เท่ากับ 1 และสามารถจำลองโครงสร้างให้เป็นโครงข้อแข็ง 2 มิติ (Plane frame) สำหรับโปรแกรมนี้ไม่คิดผลจากการบิด (Torsion) ของโครงสร้าง

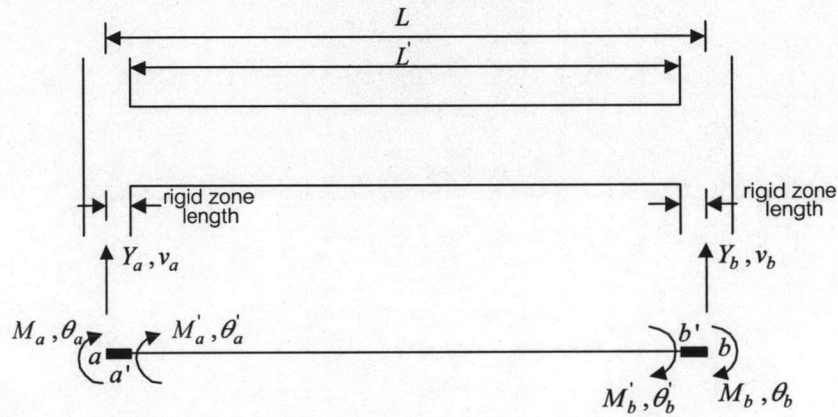
2.2.1 การสร้างสมการรูปเมตริกซ์ของสติฟเนส

ชั้นส่วนของอาคารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ชั้นส่วนเสา คาน และผนัง ซึ่งโปรแกรม IDARC ได้จำลองชั้นส่วนดังกล่าว โดยดีกรีของความอิสระของแต่ละชั้นส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.8ก, และ 2.8ข สำหรับชั้นส่วนเสา และคานตามลำดับ โดยที่เสามีดีกรีของความอิสระต่อชั้นส่วนต่อด้านเท่ากับ 3 ได้แก่ การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการเฉือน, การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากแรงตามแนวแกน และการหมุนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการดัด โดยคิดว่าการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชั้นส่วนเป็นอิสระจากการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนและการหมุนของชั้นส่วน และจำลองให้เป็นชั้นส่วนสปริงยืดหยุ่น (Linear spring element) สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนและการหมุนของชั้นส่วนให้มีความสัมพันธ์กันและจำลองให้เป็นชั้นส่วนแบบอินอีลาสติกด้วยแบบจำลองต่างๆ

สำหรับคานมีดีกรีของความอิสระต่อชั้นส่วนต่อด้านเท่ากับ 2 คือคิดเฉพาะการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการเฉือน และการหมุนของชั้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการดัดเท่านั้น การสร้างสมการรูปเมตริกซ์ของสติฟเนส สำหรับการดัดและการเฉือนแสดงได้ดังนี้



(ก) ดีกรีความอิสระสำหรับเสา



(ข) ดีกรีของความอิสระสำหรับคาน

รูปที่ 2.8 ดีกรีความอิสระสำหรับชิ้นส่วนเสา และคาน

มุมหมุนและโมเมนต์ ที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้าง แสดงในรูปเมตริกซ์ได้

เป็น

$$\begin{Bmatrix} M'_a \\ M'_b \end{Bmatrix} = [K'] \begin{Bmatrix} \theta'_a \\ \theta'_b \end{Bmatrix} \tag{2.15}$$

โดยที่

M'_a และ M'_b เป็นโมเมนต์ที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้าง

θ'_a และ θ'_b เป็นมุมหมุนที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้าง

$[K']$ เป็นเมตริกซ์ของสติฟเนสของชิ้นส่วนโครงสร้างคิดที่ผิวหน้าของชิ้นส่วน ซึ่งรวมผลของการเฉือนและการดัดโดยใช้แบบจำลองของการกระจายพลาสติก ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

ค่าของเมตริกซ์ของสติฟเนส, $[K']$ มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์แบบอินอีลาสติก โดยค่าของสติฟเนสจะแปรเปลี่ยนตามแบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model) , แบบจำลองฮีสเทเรติก (Hysteretic model) และแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัด ซึ่งสำหรับชิ้นส่วนโครงคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบเส้นตรงสามเส้น (Tri-linear model)

เมื่อคิดผลของส่วนแข็งเกร็ง (Rigid zone) ของคานและเสาแสดงได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} M_a \\ M_b \end{Bmatrix} = [K_s] \begin{Bmatrix} \theta_a \\ \theta_b \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

โดยที่

$[K_s]$ เป็นรูปเมตริกซ์ของสติฟเนสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมหมุนและโมเมนต์ที่ตำแหน่งปลายของชิ้นส่วน

$$[K_s] = [\tilde{L}] [K'] [\tilde{L}]^T \quad (2.17)$$

$$[\tilde{L}] = \frac{1}{1 - \lambda_a - \lambda_b} \begin{bmatrix} 1 & -\lambda_b & \lambda_a \\ \lambda_b & 1 & -\lambda_a \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

M_a และ M_b เป็นโมเมนต์ที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้าง

θ_a และ θ_b เป็นมุมหมุนที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้าง

λ_a และ λ_b เป็นอัตราส่วนของส่วนแข็งเกร็ง (Rigid zone) ต่อความยาวชิ้นส่วนทั้งหมด

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและแรงเฉือนกับการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นส่วนแสดงได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} X_a \\ M_a \\ X_b \\ M_b \end{Bmatrix} = [K_e] \begin{Bmatrix} u_a \\ \theta_a \\ u_b \\ \theta_b \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

โดยที่

$[K_e]$ เป็นรูปเมตริกซ์ stiffness ของชิ้นส่วนแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่ง และแรงที่จุดต่อของส่วน

$$[K_e] = [R_e] [K_s] [R_e]^T \quad (2.20)$$

X_a และ u_a เป็นแรงเฉือนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย a

X_b และ u_b เป็นแรงเฉือนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย b

สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วนสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} Y_a \\ Y_b \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_a \\ v_b \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

โดยที่

Y_a และ v_a เป็นแรงตามแนวแกนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย a

Y_b และ v_b เป็นแรงตามแนวแกนและการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนของชิ้นส่วนที่ปลาย b

$\frac{EA}{L}$ เป็น stiffness ตามแนวแกนของชิ้นส่วน

2.2.2 แบบจำลองการกระจายพฤติกรรมแบบพลาสติกขององค์อาคาร

(Spread plasticity model)

เมื่อชิ้นส่วนขององค์อาคารเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบอินอีลาสติก รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ณ จุดต่อ จะเริ่มเกิดมากขึ้นและแพร่เข้าสู่ภายในของชิ้นส่วน อันเนื่องมาจากการกระจายของความเค้นแสดงดังรูปที่ 2.9 ทำให้หน้าตัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับระดับของความเป็นอินอีลาสติก แสดงดังรูป 2.10 ซึ่งแสดงแบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model)

โมเมนต์และมุมหมุนที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนมีความสัมพันธ์กัน แสดงได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \theta'_a \\ \theta'_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} \\ f_{ba} & f_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M'_a \\ M'_b \end{Bmatrix} \tag{2.22}$$

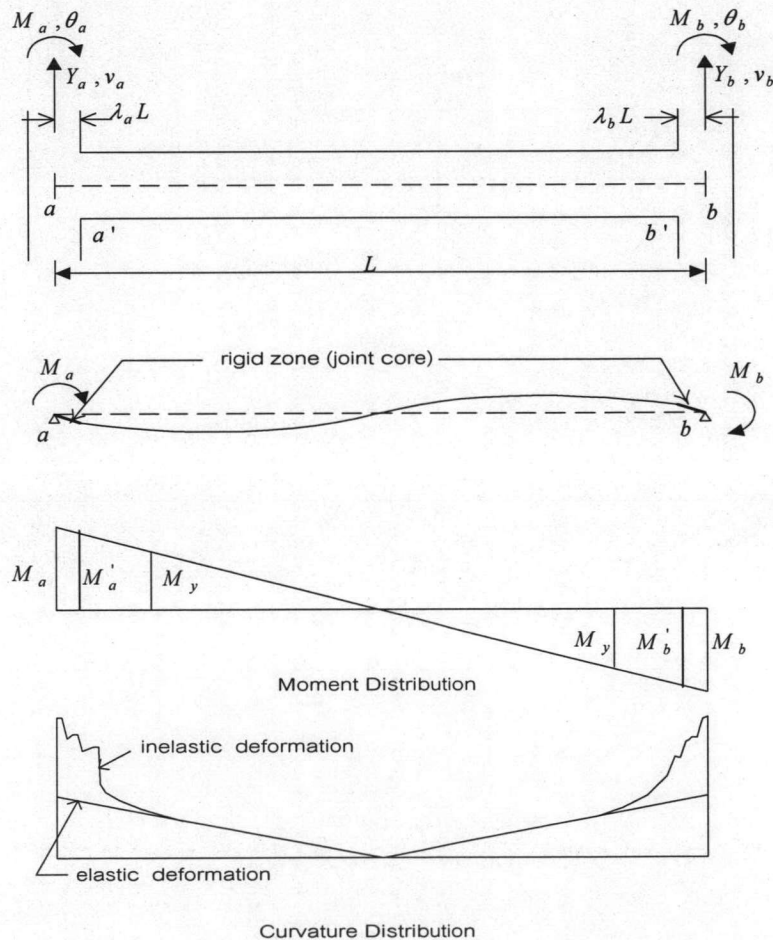
โดยที่

f_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์เฟลกซิบิลิตีที่ผิวหน้าของชิ้นส่วน มีค่า

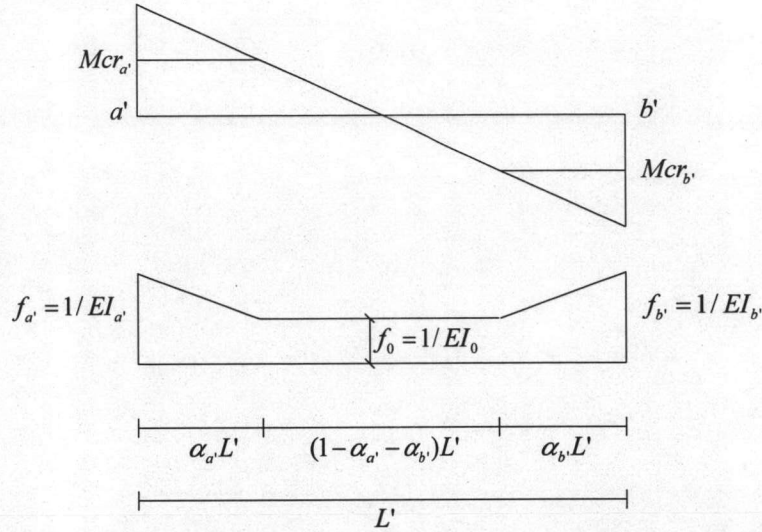
$$f_{ij} = \int_0^L \frac{m_i(x)m_j(x)}{EI(x)} dx + \int_0^L \frac{v_i(x)v_j(x)}{GA_z} dx \tag{2.23}$$

$m_i(x)$ และ $m_j(x)$ เป็นการกระจายของโมเมนต์เนื่องจากโมเมนต์หนึ่งหน่วยกระทำที่ผิวหน้า i และ j

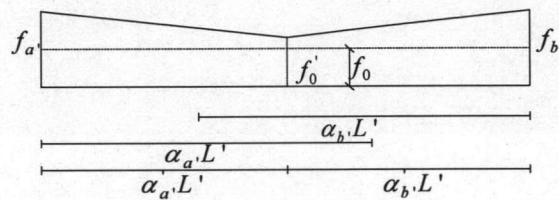
$v_i(x)$ และ $v_j(x)$ เป็นการกระจายของแรงเฉือนเนื่องจากโมเมนต์หนึ่งหน่วยกระทำที่ผิวหน้า i และ j



รูปที่ 2.9 การกระจายความโค้งของชิ้นส่วน (Curvature distribution)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model)



รูปที่ 2.11 ความยาวระยะคราก (Yield penetration length) สำหรับชิ้นส่วนที่มีพฤติกรรมเป็นอินอีลาสติกตลอดชิ้นส่วน

เมื่อคิดว่าโครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอินอีลาสติกและการกระจายเฟล็กชิบิลิตีของชิ้นส่วนเป็นดังรูปที่ 2.7 สามารถเขียนสัมประสิทธิ์เฟล็กชิบิลิตีได้เป็น

$$f_{a'a'} = \frac{L'}{12} \left[\frac{4}{EI_0} + \left[\frac{1}{EI_{a'}} - \frac{1}{EI_0} \right] (6\alpha_{a'} - 4\alpha_{a'}^2 + \alpha_{a'}^3) + \left[\frac{1}{EI_{b'}} - \frac{1}{EI_0} \right] \alpha_{b'}^3 \right] + \frac{1}{GA_z L'} \quad (2.24)$$

$$f_{a'b'} = \frac{L'}{12} \left[\frac{-2}{EI_0} - \left[\frac{1}{EI_{a'}} - \frac{1}{EI_0} \right] (2\alpha_{a'}^2 - \alpha_{a'}^3) - \left[\frac{1}{EI_{b'}} - \frac{1}{EI_0} \right] (2\alpha_{b'}^2 - \alpha_{b'}^3) \right] + \frac{1}{GA_z L'} \quad (2.25)$$

$$f_{b'a'} = f_{a'b'} \quad (2.26)$$

$$f_{b'b'} = \frac{L'}{12} \left[\frac{4}{EI_0} + \left[\frac{1}{EI_{b'}} - \frac{1}{EI_0} \right] (6\alpha_{b'} - 4\alpha_{b'}^2 + \alpha_{b'}^3) + \left[\frac{1}{EI_{a'}} - \frac{1}{EI_0} \right] \alpha_{a'}^3 \right] + \frac{1}{GA_z L'} \quad (2.27)$$

โดยที่

EI_0 เป็นสติฟเนสของการหมุนแบบอีลาสติก (Elastic rotational stiffness)

$EI_{a'}$ เป็นสติฟเนสสัมผัสของการหมุน (Tangent rotational stiffness) ที่ผิวหน้า a'

$EI_{b'}$ เป็นสติฟเนสสัมผัสของการหมุน (Tangent rotational stiffness) ที่ผิวหน้า b'

GA_z เป็นสติฟเนสของการเฉือน (Shear stiffness)

L' เป็นความยาวของชิ้นส่วนวัดจากผิวหน้าถึงผิวหน้า

$\alpha_{a'}$ และ $\alpha_{b'}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความยาวของระยะการครากของชิ้นส่วน

(Yield penetration coefficients)

สำหรับ IDARC2D นี้ได้มีการปรับปรุงสัมประสิทธิ์เพลกซีบิลิตีเพื่อป้องกันการคำนวณมีความผิดพลาดเมื่อการตัดและการเฉือนเข้าใกล้เงื่อนไขการวิบัติ ดังนี้

$$f_{a'a'} = \frac{L'}{12 EI_0 EI_{a'} EI_{b'}} f'_{a'a'} + \frac{1}{GA_z L'} \quad (2.28)$$

$$f_{a'b'} = f_{b'a'} = \frac{L'}{12 EI_0 EI_{a'} EI_{b'}} f'_{a'b'} + \frac{1}{GA_z L'} \quad (2.29)$$

$$f_{b'b'} = \frac{L'}{12 EI_0 EI_{a'} EI_{b'}} f'_{b'b'} + \frac{1}{GA_z L'} \quad (2.30)$$

โดยที่

$$f'_{a'a'} = 4 EI_{a'} EI_{b'} + (EI_0 - EI_{a'}) EI_{b'} (6\alpha_{a'} - 4\alpha_{a'}^2 + \alpha_{a'}^3) + (EI_0 - EI_{b'}) EI_{a'} \alpha_{b'}^3 \quad (2.31)$$

$$f'_{a'b'} = -2 EI_{a'} EI_{b'} - (EI_0 - EI_{a'}) EI_{b'} (2\alpha_{a'}^2 - \alpha_{a'}^3) - (EI_0 - EI_{b'}) EI_{a'} (2\alpha_{b'}^2 - \alpha_{b'}^3) \quad (2.32)$$

$$f'_{b'b'} = 4 EI_{a'} EI_{b'} + (EI_0 - EI_{a'}) EI_{b'} \alpha_{a'}^3 + (EI_0 - EI_{b'}) EI_{a'} (6\alpha_{b'} - 4\alpha_{b'}^2 + \alpha_{b'}^3) \quad (2.33)$$

จากเมตริกซ์เพลกซีบิลิตีที่กล่าวมานี้ สามารถหาเมตริกซ์สติฟเนสในสมการที่

2.15 ได้ดังนี้

$$[K'] = \begin{bmatrix} k_{a'a'} & k_{a'b'} \\ k_{b'a'} & k_{b'b'} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

โดยที่

$$k_{a'a'} = \frac{12EI_0EI_aEI_{b'}}{D_{et}L'}(f'_{b'b'}GA_ZL'^2 + 12EI_0EI_aEI_{b'}) \quad (2.35)$$

$$k_{a'b'} = k_{b'a'} = \frac{-12EI_0EI_aEI_{b'}}{D_{et}L'}(f'_{a'a'}GA_ZL'^2 + 12EI_0EI_aEI_{b'}) \quad (2.36)$$

$$k_{b'b'} = \frac{12EI_0EI_aEI_{b'}}{D_{et}L'}(f'_{a'a'}GA_ZL'^2 + 12EI_0EI_aEI_{b'}) \quad (2.37)$$

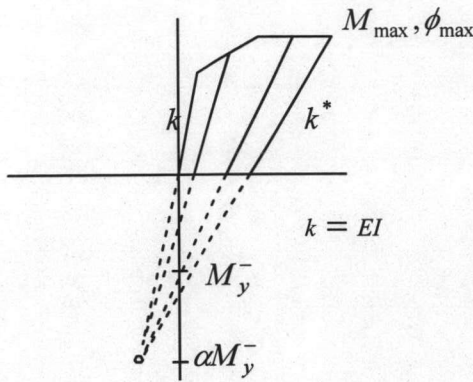
$$D_{et} = GA_ZL'^2(f'_{a'a'}f'_{b'b'} - f'^2_{a'b'}) + 12EI_0EI_aEI_{b'}(f'_{a'a'} + f'_{b'b'} - 2f'_{a'b'}) \quad (2.38)$$

2.2.3 แบบจำลองการเกิดการคราก (Yield penetration model)

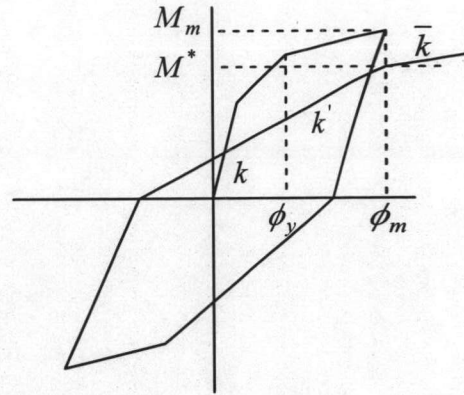
แบบจำลองการเกิดการคราก (Yield penetration model) เป็นแบบจำลองที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความยาวของระยะการครากของชิ้นส่วนโครงสร้าง (Yield penetration coefficients, α_a และ α_b) และค่าสติฟเนสของการดัด (Flexural stiffness, EI_0) ที่ตำแหน่งกลางชิ้นส่วน ซึ่งเป็นค่าที่ต้องนำไปใช้ในแบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model) ที่กล่าวมาข้างต้น ค่าของ α_a และ α_b เป็นค่าอัตราส่วนของความยาวของส่วนที่มีค่าโมเมนต์มากกว่าค่าโมเมนต์แตกร้าว (Cracking moment) กับความยาวของชิ้นส่วนจากผิวหน้า a' ถึงผิวหน้า b' ตามลำดับ โดยค่า α_a และ α_b ที่คำนวณได้ใหม่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ในครั้งก่อน

2.2.4 แบบจำลองฮีสเทอเรติก (Hysteretic model)

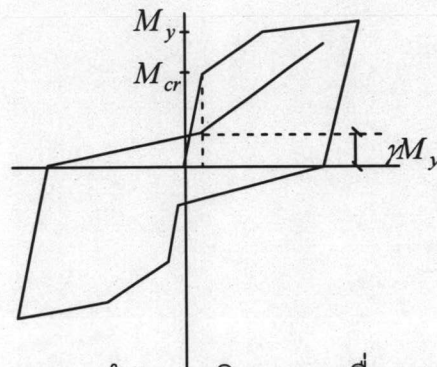
เมื่อชิ้นส่วนมีการรับแรงแบบวัฏจักรจนกระทั่งเกิดความเสียหายขึ้น ความสามารถในการรับแรงของชิ้นส่วนจะเปลี่ยนไป โดยสติฟเนสและกำลังของหน้าตัดมีค่าลดลง โปรแกรม IDARC จำลองพฤติกรรมดังกล่าว โดยใช้แบบจำลองของ Park ซึ่งใช้พารามิเตอร์ 3 ตัว (Three parameter park model) ในการควบคุม พฤติกรรมดังกล่าวประกอบไปด้วย



(ก) แบบจำลองการลดลงของสติฟเนส



(ข) แบบจำลองการเสื่อมลดของกำลัง



(ค) แบบจำลองพฤติกรรมการณ์เลื่อนหลุด

รูปที่ 2.12 แบบจำลองฮิสเทอริติกแบบ 3 ตัวแปรของ Park

1. การลดของสติฟเนส (Stiffness degradation) การจำลองพฤติกรรมดังกล่าว กำหนดให้จุดปลายของช่วงไม่มีแรงกระทำ (Unloading branch) ของชิ้นส่วนรวมที่จุดเดียวกัน ดังรูปที่ 2.12(ก) สติฟเนสที่ขณะเวลานั้น มีค่าเป็น

$$k^* = \frac{(M_{\max} - \alpha M_y)}{(\phi_{\max} - \alpha M_y / k)} \tag{2.39}$$

โดยที่

- M_{\max} และ ϕ_{\max} เป็นโมเมนต์และความโค้งที่จุดเริ่มต้นของช่วงไม่มีแรงกระทำ ตามลำดับ
- α เป็นตัวแปรที่ควบคุมการลดของสติฟเนส (Stiffness degrading parameter)
- M_y เป็นโมเมนต์ที่จุดคราก
- k เป็นค่าความแข็งเกร็งเริ่มต้น (Initial flexural rigidity, EI) ของหน้าตัด

2. การเสื่อมลดของกำลัง (Strength deterioration) การเสื่อมลดของกำลังในหนึ่งรอบของการเกิดพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น สามารถเขียนได้ในรูปของความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับความเหนียว (Ductility) และการสลายพลังงาน (Dissipated hysteretic energy) ดังสมการ 2.40

$$M^* = M_m \left(1 - \beta_E \frac{\int dE}{M_y \phi_u} - \beta_d \mu_\phi \right) \quad (2.40)$$

โดยที่

M^* เป็นกำลังที่เสื่อมลดเนื่องจากกำลังสูงสุดของรอบก่อน M_m ที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างค่าเดียวกัน

β_E และ β_d เป็นตัวแปรควบคุมการลดของกำลังในทอมการสลายพลังงานต่อรอบ, E_T และความเหนียวในทอมของความโค้ง (Curvature ductility, μ_ϕ) ตามลำดับ

หลังจากที่หน้าตัดเกิดการเสื่อมลดของกำลังแล้ว ค่าสติเฟนสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังสมการ 2.41

$$\bar{k} = k' \frac{\eta}{\mu} \leq k' \quad (2.41)$$

โดยที่

k' และ \bar{k} เป็นสติเฟนสก่อนและหลังจากที่มีกำลังเท่ากับ M^*

η เป็นตัวแปรควบคุมการลดลงของสติเฟนส โปรแกรม IDARC ใช้ค่าเท่ากับ 4

μ เป็นความเหนียวในทอมความโค้ง (Curvature ductility)

3. พฤติกรรมการเลื่อนหลุด (Slip and pinching behavior) ซึ่งเกิดจากการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริมหรือการเปิดและปิดของรอยร้าวของหน้าตัด ทำให้พฤติกรรมการรับแรงเปลี่ยนไป โดยมีแนวทางเดินของแรงไปที่ค่าโมเมนต์ดังสมการ 2.42

$$M^* = \gamma M_y \quad (2.42)$$

โดยที่ γ เป็นตัวแปรควบคุมการเกิดการเลื่อนหลุด

2.2.5 วิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรม IDARC2D สามารถวิเคราะห์ได้ 4 วิธีด้วยกัน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบอินอีลาสติก ได้แก่

1. การวิเคราะห์แบบสถิตย์ (Static analysis)
2. การวิเคราะห์แบบแรงดันด้านข้าง (Pushover analysis)
3. การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic analysis)
4. การวิเคราะห์แบบกระทำซ้ำกลับไปมา (Quasi-static analysis)

ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

1.การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตย์ (Static analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้เป็น

$$[K_r] \{ \Delta u \} = \{ \Delta F \} \quad (2.43)$$

โดยที่

- $[K_r]$ คือ เมตริกซ์ของสติฟเนสสัมพัทธ์ของโครงสร้าง
 $\{ \Delta u \}$ คือ เวกเตอร์ของระยะการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้น
 $\{ \Delta F \}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่เพิ่มขึ้น

2.การวิเคราะห์แรงดันด้านข้างแบบสถิตย์จนโครงสร้างพัง (Pushover analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองและกำลังความต้านทานสูงสุดของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างหรือภายใต้การเคลื่อนที่ทางด้านข้าง โดยการคำนวณอาจรวมผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หรือไม่ได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้เป็น

$$[K_r] \{ \Delta u \} = \{ \Delta F \} - \{ \Delta P_v \} - \{ \Delta P_{FR} \} - \{ \Delta P_{HY} \} - \{ \Delta P_{IW} \} + c_{corr} \{ \Delta F_{err} \} \quad (2.44)$$

โดยที่

- $\{ \Delta P_v \}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่เพิ่มขึ้นในตัวยึดความหนืด (viscous damper)
 $\{ \Delta P_{FR} \}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่เพิ่มขึ้นในตัวยึดแรงเสียดทาน (friction damper)
 $\{ \Delta P_{HY} \}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่เพิ่มขึ้นในตัวยึดฮิสเทอริติก (hysteretic damper)
 $\{ \Delta P_{IW} \}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่เพิ่มขึ้นในผนังระหว่างช่วงเสา (Infill panels)

c_{corr} คือ สัมประสิทธิ์การปรับแก้

$\{\Delta F_{err}\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงไม่สมดุล (Unbalance forces) ในโครงสร้าง

3.การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นแรงที่สามารถกระทำทั้งทางแนวดิ่งและแนวราบหรืออาจจะทำแนวใดแนวหนึ่งก็ได้ โดยการคำนวณอาจรวมผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หรือไม่ก็ได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้เป็น

$$[M]\{\Delta \ddot{u}\} + [C]\{\Delta \dot{u}\} + [K_r]\{\Delta u\} = -[M](\{L_h\}\Delta \ddot{u}_{gh} + \{L_v\}\Delta \ddot{u}_{gv}) - \{\Delta P_V\} - \{\Delta P_{FR}\} - \{\Delta P_{HY}\} - \{\Delta P_{IW}\} + c_{corr}\{\Delta F_{err}\} \quad (2.45)$$

โดยที่

$[M]$ คือ เมตริกซ์ของมวลของโครงสร้าง

$[C]$ คือ เมตริกซ์ของความหน่วงของโครงสร้าง

$[K_r]$ คือ เมตริกซ์ของสติเฟนส์สัมผัสของโครงสร้าง

$\{L_h\}$ คือ เวกเตอร์ที่ใช้ในการแยกส่วนประกอบความเร่งพื้นดินเป็นความเร่งแนวราบ

$\{L_v\}$ คือ เวกเตอร์ที่ใช้ในการแยกส่วนประกอบความเร่งพื้นดินเป็นความเร่งแนวดิ่ง

การแก้ปัญหาของโปรแกรม IDARC นี้ใช้วิธี นิวมาร์ค-เบต้า (Newmark – Beta) พัฒนาโดยนิวมาร์ค (Newmark 1959) ซึ่งสมมติให้การเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นแบบเส้นตรงจะได้

$$\{\Delta \dot{u}\}_{t+\Delta t} = \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\Delta t\{\ddot{u}\}_t - \frac{\gamma}{\beta}\{\dot{u}\}_t + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\{\Delta u\}_{t+\Delta t} \quad (2.46ก)$$

$$\{\Delta \ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\gamma\Delta t}\{\Delta \dot{u}\}_{t+\Delta t} - \frac{1}{\gamma}\{\ddot{u}\}_t \quad (2.46ข)$$

ค่า β และ γ เป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีค่า 0.25 และ 0.5 ตามลำดับ แทนสมการที่ 2.46 ไปในสมการที่ 2.45 จัดรูปใหม่ ได้เป็น

$$[K_D]\{\Delta u\}_{t+\Delta t} = \{\Delta F_D\} \quad (2.47)$$

$$[K_D] = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K_t] \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta F_D \} = & -[M] \left(\{ L_h \} \Delta \ddot{x}_{gh} + \{ L_v \} \Delta \ddot{x}_{gv} \right) - \{ \Delta P_V \} - \{ \Delta P_{FR} \} - \{ \Delta P_{HY} \} - \{ \Delta P_{IW} \} \\ & + c_{corr} \{ \Delta F_{err} \} + \left[\frac{1}{2\beta} [M] + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t [C] \right] \{ \ddot{u} \}_t + \left[\frac{1}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta} [C] \right] \{ \dot{u} \}_t \end{aligned} \quad (2.49)$$

โดยที่

$[K_D]$ คือ ไดนามิกส์สติฟเนสเทียบเท่า

$\{ \Delta u \}$ คือ เวกเตอร์ของระยะการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้น

$\{ \Delta F_D \}$ คือ เวกเตอร์ของแรงไดนามิกส์เทียบเท่าที่กระทำที่เพิ่มขึ้น

คำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นจากสมการที่ 2.47 แล้วแทนค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นลงไปในสมการที่ 2.46ก และ 2.46ข จะได้ค่าความเร็วและความเร่งที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

4. การวิเคราะห์แบบ Quasi-static (Quasi-static analysis) เป็นการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างหรือภายใต้การเคลื่อนที่ด้านข้างที่มีทิศทางสลับทิศ โดยการคำนวณอาจรวมผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) หรือไม่ได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณใช้สมการการคำนวณเดียวกับการวิเคราะห์แบบ Pushover

2.2.6 ดัชนีความเสียหาย (Damage index)

ดัชนีความเสียหายเป็นค่าที่สามารถบอกความเสียหายขององค์อาคาร รวมทั้งความเสียหายของชั้นและความเสียหายของโครงสร้างทั้งหมด Park และคณะ (1984) ได้พัฒนาขึ้นและนำมาใช้ในโปรแกรม IDARC

ดัชนีความเสียหายที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วยความเสียหาย 2 ส่วนรวมกันแบบเชิงเส้น ได้แก่ ความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอินอีลาสติก และความเสียหายสะสมที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบเป็นวัฏจักรของโครงสร้าง แสดงได้ดังสมการ

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u P_y} \int dE_n \quad (2.50)$$

โดยที่

- δ_m เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุดที่เกิดขึ้น
 δ_u เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ตำแหน่งวิบัติ
 P_y เป็นกำลังครากของชิ้นส่วน
 $\int dE_h$ เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในชิ้นส่วน
 β เป็นค่าคงที่ของแบบจำลองมีความสัมพันธ์กับการลดลงของกำลัง

ค่าดัชนีความเสียหายใช้ใน IDARC2D นี้ถูกปรับปรุงโดย Kunnath และคณะ (1992) ดังสมการ

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_h \quad (2.51)$$

โดยที่

- θ_m เป็นมุมหมุนที่เกิดขึ้นมากที่สุดของชิ้นส่วน
 θ_r เป็นมุมหมุนที่กลับคืนได้ขณะไม่มีน้ำหนักกระทำ (Unloading)
 θ_u เป็นมุมหมุนที่ตำแหน่งวิบัติของชิ้นส่วน
 M_y เป็นโมเมนต์ครากของหน้าตัด
 E_h เป็นพลังงานที่ถูกสลายไปที่หน้าตัด

ค่าดัชนีความเสียหายสามารถคำนวณได้ 3 ระดับได้แก่

1. ความเสียหายระดับชิ้นส่วนของอาคาร ได้แก่ เสา, คาน และกำแพงรับแรงเฉือน
2. ความเสียหายระดับชั้น ได้แก่ ความเสียหายขององค์ประกอบทั้งหมดของชั้นทางด้านแนวตั้ง (เสาและกำแพงรับแรงเฉือน) และความเสียหายขององค์ประกอบทั้งหมดของชั้นทางด้านแนวราบ (คานและพื้น) และความเสียหายทั้งหมดของชั้น
3. ความเสียหายทั้งหมดของโครงสร้าง

สำหรับความเสียหายระดับชั้นและระดับของโครงสร้าง คำนวณโดยวิธีการถ่วงน้ำหนักโดยใช้พลังงานที่ถูกสลายไป (Dissipated energy) แสดงได้ดังสมการ

$$DI_{story} = \sum (\lambda_i)_{component} (DI_i)_{component} \quad (2.52)$$

$$DI_{overall} = \sum (\lambda_i)_{story} (DI_i)_{story} \quad (2.53)$$

โดยที่

$$(\lambda_i)_{component} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{component} \quad (2.54)$$

$$(\lambda_i)_{story} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{story} \quad (2.55)$$

แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาค้างครั้งนี้พบว่าค่าดัชนีความเสียหายซึ่งได้จากโปรแกรม IDARC บางครั้งไม่สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงได้พิจารณาค่าดัชนีความเสียหายซึ่งอยู่ในรูปของความโค้งที่ผิวหน้าของชิ้นส่วน ดังสมการที่ 2.56

$$DI = \frac{\phi_m - \phi_y}{\phi_u - \phi_y} + \frac{\beta}{M_y \phi_u} E_h \quad (2.56)$$

โดยที่

ϕ_m เป็นความโค้งที่เกิดขึ้นมากที่สุดของหน้าตัด

ϕ_u เป็นความโค้งวิกฤติของหน้าตัด

ϕ_y เป็นความโค้งครากของหน้าตัด

โดยค่าดัชนีความเสียหายดังกล่าว Stone และ Taylor (1993) ได้ทำการทดสอบกับชิ้นส่วนเสาจำนวน 82 ตัวอย่าง และสรุปค่าดัชนีความเสียหายซึ่งสอดคล้องกับระดับความเสียหายไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ดัชนีความเสียหายต่างๆ (Stone and Taylor, 1993)

ดัชนีความเสียหาย, DI	ระดับความเสียหาย
0.00 < DI < 0.11	ไม่มีความเสียหายหรือมีรอยร้าวเล็กน้อยเฉพาะที่
0.11 < DI < 0.40	ซ่อมแซมได้ (มีการกระเทาะแต่ยังคงมีสติฟเนสอยู่)
0.40 < DI < 0.77	ไม่สามารถซ่อมแซมได้ (ยังคงอยู่ได้แต่อาจเกิดวิบัติได้ทันที)
DI > 0.77	พังทลาย