

การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงประกอบขนาด 2 มิติ ตามเวลาการก่อสร้าง

3.1 ความนำ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีสตีฟเนสโดยตรง (Direct stiffness) เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงประกอบระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมที่รับน้ำหนักบรรทุกกระทำคงค้างตามขั้นตอนการก่อสร้าง วิธีการสตีฟเนสโดยตรงนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมอย่างยิ่งที่นำมาใช้กับคอมพิวเตอร์ สตีฟเนสของโครงสร้างรวมสามารถสังเคราะห์จากค่าสตีฟเนสของคอนกรีต และเหล็กเสริมรวมกันได้อย่างสะดวก โดยที่อายุของโครงสร้าง, การคืบ และการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นของคอนกรีตจะมีผลโดยตรงกับคุณสมบัติของคอนกรีตระยะยาวแต่สิ่งเหล่านี้ไม่มีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กเสริม สำหรับขั้นตอนการก่อสร้างนั้นจะพิจารณาโดยแบ่งเวลาการก่อสร้างเป็นช่วง ๆ ตามขั้นตอนการก่อสร้างจริง น้ำหนักที่กระทำเริ่มแรกจะถูกคงค้างและสะสมไปจนถึงขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งจากพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้างอยู่ตลอดเวลาจะเกิดการคืบในโครงสร้างทุกขั้นตอนรวมถึงความเครียดหดตัวอิสระของคอนกรีต ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเพิ่มมากขึ้น และเกิดการกระจายของแรงภายในขึ้นด้วย

สำหรับในงานวิจัยนี้จะแบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงประกอบของคอนกรีตและเหล็กเสริมออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้การรับน้ำหนักกระทำทันทีทันใด (Instantaneous elastic analysis)
2. การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ผลเชิงเวลา (Time dependent analysis)

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้การรับน้ำหนักกระทำทันทีทันใด

ในการวิเคราะห์ปัญหาโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งอาจเป็นเหล็กรูปพรรณประกอบเป็นหน้าตัดเชิงประกอบ (Composite section) จะพิจารณาชิ้นส่วนคอนกรีตเป็นชิ้นส่วนคาน (Beam element) โดยมีชิ้นส่วนเหล็กเสริมเชื่อมต่อไปในชิ้นส่วนคานคอนกรีต และเปลี่ยนตำแหน่งไปกับชิ้นส่วนคานคอนกรีตโดยมีการยึดเหนี่ยวกันอย่างสมบูรณ์ รูปที่ (3.1) แสดงชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในระนาบ x-z ซึ่งหน้าตัดมีลักษณะความสมมาตรในระนาบตั้ง และแกน x เป็นแกนละเทิน A_c และ I_c เป็นเนื้อที่หน้าตัดคอนกรีตและโมเมนต์ความเฉื่อยตามลำดับ ส่วนเหล็กเสริมจะพิจารณาว่าประกอบด้วยเหล็กเสริมเล็ก ๆ A_{s_i} เสริมที่ระยะ z_i จากแกนละเทิน ซึ่ง A_{s_i} อาจเป็นส่วนเล็ก ๆ (Differential element) ของเหล็กรูปพรรณ หรือเหล็กเส้นใด ๆ ก็ได้

สตีฟเนสของชิ้นส่วนจะประกอบไปด้วยสตีฟเนส 2 ส่วน คือ สตีฟเนสของคอนกรีต และสตีฟเนสของเหล็กเสริม (รวมถึงเหล็กรูปพรรณถ้ามี) ค่าสตีฟเนสของเหล็กเสริมจะแสดงอยู่ในพจน์ดีกรีของควมอิสระ (Degree-of-freedom) เหมือนกับค่าสตีฟเนสของคอนกรีต

จากข้อสมมุติฐานทางคิเนแมติกส์ของคานรับแรงดัดที่ว่า ภายใต้ผลของแรงดัด และแรงเฉือนเส้นตรงใด ๆ ซึ่งเดิมตั้งฉากกับแกนละเทินของคานก่อนการเปลี่ยนรูปร่างจะคงเป็นเส้นตรง และตั้งฉากกับแกนละเทินภายหลังจากการรับผลการกระทำจากภายนอก สามารถเขียนสมการคิเนแมติกส์ของเหล็กเสริมได้คือ

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{dw(x)}{dx} \quad (3.1)$$

โดยที่ $u(x, z)$ = เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของจุด (x, z) ใด ๆ
 $u_0(x)$ = เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของจุดบนแกนละเทิน (Neutral axis) ของหน้าตัดคานกรีดที่ระยะ x
 $w(x)$ = เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งฉากกับแนวแกน (Transverse displacement) ของจุดบนแกนละเทินของหน้าตัดคานกรีดที่ระยะ x
 z = ระยะใด ๆ ที่วัดในแนวตั้งฉากจากแนวแกนละเทินถึงตำแหน่งที่พิจารณา
 $\frac{dw(x)}{dx}$ = เป็นมุมหมุนไปของหน้าตัดที่ระยะ x

จากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) การเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นในแนวแกนละเทินที่จุดใด ๆ สามารถแสดงให้อยู่ในพจน์ของการเปลี่ยนตำแหน่งของซิว (Node) (ดูรูปที่ (3.1)) ได้ดังสมการ

$$u_0(x) = \{\beta\} \{u\} \quad (3.2)$$

$$w(x) = \{\psi\} \{w\} \quad (3.3)$$

เมื่อ $\{u\} = \{u_1, u_2\}^T$
 $\{w\} = \{w_1, w_2, \theta_1, \theta_2\}^T$
 u_1, u_2 = ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกนที่ซิวทั้งสอง
 w_1, w_2 = ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวที่ตั้งฉากกับแนวแกนที่ซิวทั้งสอง
 θ_1, θ_2 = มุมหมุนของการเปลี่ยนตำแหน่งจากแนวแกนที่ซิวทั้งสอง

ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) $\{\beta\}$ และ $\{\psi\}$ จะให้อยู่ในรูปของโพลีโนเมียลเชิงเส้น (Linear polynomial) และโพลีโนเมียลอันดับสาม (Cubic polynomial) ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนตำแหน่งกับความเครียดจะเขียนพจน์ความเครียดในแนวแกนที่จุด (x, z) (ซึ่งอาจเป็นจุดในคานกรีดหรือเหล็กเสริมก็ได้) ใด ๆ ได้ดังนี้

$$\epsilon_{xx}(x, z) = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{du_0(x)}{dx} - z \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (3.4)$$

หรือ
$$\varepsilon_{xx}(x,z) = \{\beta'\} \{u\} - z \{\psi''\} \{w\} \quad (3.5)$$

ในเมื่อ $\varepsilon_{xx}(x,z)$ = เป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงตามแนวแกน x

โดยการใช้หลักการของงานสมมติ (Principle of virtual work) สามารถหาพลังงานความเครียดสมมติภายในคอนกรีต δU_c ภายใต้ระยะเปลี่ยนตำแหน่งสมมติ ได้ดังนี้

$$\delta U_c = \left\{ \{\delta u\}^T \quad \{\delta w\}^T \right\} \begin{bmatrix} [k]_{uu}^c & [k]_{uw}^c \\ [k]_{wu}^c & [k]_{ww}^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{w\} \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

เมื่อ $\{\delta u\}$ และ $\{\delta w\}$ เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่งสมมติใด ๆ ที่เล็กมาก (Infinitesimal virtual displacement) จากตำแหน่งสมดุล (Equilibrium configuration) โดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งจริงและไม่มีผลต่อสภาวะสมดุลที่แท้จริงของโครงสร้าง สติฟเนสเมตริกส์ $[k]_{uu}^c$, $[k]_{uw}^c$, $[k]_{wu}^c$ และ $[k]_{ww}^c$ ของชิ้นส่วนคอนกรีตเป็นสติฟเนสเมตริกส์ของชิ้นส่วนรับแรงดัด (Flexural element) ซึ่งเป็นสติฟเนสเมตริกส์พื้นฐานที่แสดงไว้ในตำราไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป (เช่น Cook 1989) และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$[k]^c = \frac{E_c(t_0)}{L^3} \begin{bmatrix} A_c L^2 & -A_c L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -A_c L^2 & A_c L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12I_c & -12I_c & -6I_c L & -6I_c L \\ 0 & 0 & -12I_c & 12I_c & 6I_c L & 6I_c L \\ 0 & 0 & -6I_c L & 6I_c L & 4I_c L^2 & 2I_c L^2 \\ 0 & 0 & -6I_c L & 6I_c L & 2I_c L^2 & 4I_c L^2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

สำหรับเหล็กเสริม "i" (ดูรูปที่ (3.1)) ภายใต้การเปลี่ยนตำแหน่งสมมติดังกล่าวจะเกิดพลังงานความเครียดภายในสมมติในเหล็กเสริมใช้สัญลักษณ์ δU_s ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} \delta U_s &= \int_V \sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} dv \\ &= \sum_i \int E_s \varepsilon_{xx}^i \delta \varepsilon_{xx}^i dv \end{aligned} \quad (3.8)$$

โดยที่ $\sigma_{xx}, \varepsilon_{xx}$ = หน่วยแรงและความเครียดในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริงตามแนวแกน x ตามลำดับ
 $\delta \varepsilon_{xx}$ = ค่าความเครียดสมมติในแนวแกน x
 E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.8) จากนั้นอินทิเกรตตลอดทั้งชิ้นส่วนจะได้พลังงานความเครียดสมมติภายใน แสดงได้ตามสมการ

$$\delta U_s = \left\{ \{\delta u\}^T \quad \{\delta w\}^T \right\} \begin{bmatrix} [k]_{uu}^s & [k]_{uw}^s \\ [k]_{wu}^s & [k]_{ww}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{w\} \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยที่สตีเฟนเมตริกซ์ของเหล็กเสริมแสดงได้ดังสมการ

$$[k]_{uu}^s = \sum_i \iint E_s \{\beta'\}^T \{\beta'\} dA_s dx \quad (3.10 ก)$$

$$[k]_{uw}^s = -\sum_i \iint E_s z^i \{\beta'\}^T \{\psi''\} dA_s dx \quad (3.10 ข)$$

$$[k]_{wu}^s = -\sum_i \iint E_s z^i \{\psi''\}^T \{\beta'\} dA_s dx \quad (3.10 ค)$$

$$[k]_{ww}^s = \sum_i \iint E_s z^{i^2} \{\psi''\}^T \{\psi''\} dA_s dx \quad (3.10 ง)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3.10 ก) ถึง (3.10 ง) ตลอดความยาว และพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมแล้ว สามารถเขียนสตีเฟนเมตริกซ์ของเหล็กเสริมได้ดังนี้

$$[k]^s = \frac{E_s}{L^3} \begin{bmatrix} \sum_i A_{si} L^2 & -\sum_i A_{si} L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sum_i A_{si} L^2 & \sum_i A_{si} L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \sum_i I_{si} & -12 \sum_i I_{si} & -6 \sum_i I_{si} L & -6 \sum_i I_{si} L \\ 0 & 0 & -12 \sum_i I_{si} & 12 \sum_i I_{si} & 6 \sum_i I_{si} L & 6 \sum_i I_{si} L \\ 0 & 0 & -6 \sum_i I_{si} L & 6 \sum_i I_{si} L & 4 \sum_i I_{si} L^2 & 2 \sum_i I_{si} L^2 \\ 0 & 0 & -6 \sum_i I_{si} L & 6 \sum_i I_{si} L & 2 \sum_i I_{si} L^2 & 4 \sum_i I_{si} L^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่ A_{si} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมใด ๆ หรือส่วนเล็ก ๆ ของเหล็กรูปพรรณ
 I_{si} = โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเสริมใด ๆ หรือส่วนเล็ก ๆ ของเหล็กรูปพรรณ

จากหลักการงานสมมติสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสถานะสมดุลภายใต้แรงกระทำที่กำหนดแล้ว การเปลี่ยนตำแหน่งสมมติของโครงสร้างจากสถานะสมดุล จะทำให้เกิดงานสมมติภายนอก δW เท่ากับพลังงานความเครียดสมมติ (งานสมมติภายใน) นั่นคือ

$$\delta W = \delta U \quad (3.12)$$

หรือ

$$\left\{ \left\{ \delta u \right\}^T \left\{ \delta w \right\}^T \right\} \left\{ \begin{matrix} \{S\}_u \\ \{S\}_w \end{matrix} \right\} = \left\{ \left\{ \delta u \right\}^T \left\{ \delta w \right\}^T \right\} \left(\left[\begin{matrix} [k]_{uu}^c & [k]_{uw}^c \\ [k]_{wu}^c & [k]_{ww}^c \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} [k]_{uu}^s & [k]_{uw}^s \\ [k]_{wu}^s & [k]_{ww}^s \end{matrix} \right] \right) \left\{ \begin{matrix} \{u\} \\ \{w\} \end{matrix} \right\} \quad (3.13)$$

เมื่อรวมสถิติในสมมาตรย่อยของเหล็กเสริมและคอนกรีตทั้งระบบเข้าด้วยกันโดยตรง สามารถแสดงผลรวมของสถิติในคอนกรีตเสริมเหล็กในระบบโกลบอลได้ดังสมการ

$$[K]_{t_0} = \sum_{n=1}^{NM} ([K]^c + [K]^s)_{t_0}^n \quad (3.14)$$

- เมื่อ $[K]_{t_0}$ = สถิติในสมมาตรรวมของทั้งระบบที่เวลา t_0
 $[K]_{t_0}^c, [K]_{t_0}^s$ = สถิติในสมมาตรย่อยของคอนกรีต และเหล็ก ตามลำดับ แต่ละชิ้นส่วนในระบบโกลบอลโคออร์ดิเนตที่เวลา t_0
 $[a]^T [k]_{t_0}^c [a]$ และ $[a]^T [k]_{t_0}^s [a]$ ตามลำดับ
 $[a]$ = เมทริกซ์แปลงของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement transformation matrix)
 $[k]_{t_0}^c, [k]_{t_0}^s$ = สถิติในสมมาตรย่อยของคอนกรีตและเหล็กเสริมตามลำดับในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local coordinate system) ที่เวลา t_0 ของชิ้นส่วนเชิงประกอบ
 n = ตำแหน่งขององค์อาคารที่พิจารณา
 NM = จำนวนองค์อาคาร (Member) ของโครงสร้างที่พิจารณาที่เวลา t_0

และระบบสมการความสมดุลภายใต้แรงกระทำจะเขียนได้เป็น

$$[K]_{t_0} \{u\}_{t_0} = \{P\}_{t_0} - \{P_0\}_{t_0} \quad (3.15)$$

- โดยที่ $\{u\}_{t_0}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งของข้อ ณ เวลา t_0
 $\{P\}_{t_0}$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำที่ข้อจากแรงภายนอก ณ เวลา t_0
 $\{P_0\}_{t_0}$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำยึดรั้งที่ข้อเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระจายกระทำบนชิ้นส่วน ณ เวลา t_0

แรงภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนสามารถคำนวณได้จาก

$$\{S\}_{t_0} = \{S_0\}_{t_0} + [k]_{t_0} [a] \{u\}_{t_0} \quad (3.16)$$

- ในเมื่อ $\{S\}_{t_0}$ = เวกเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วนเนื่องจากแรงกระทำ ณ เวลา t_0
 $\{S_0\}_{t_0}$ = เวกเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วนที่สภาวะยึดแน่น ณ เวลา t_0

- $[k]_{t_0}$ = สติพเนลเมตริกส์ย่อยของชิ้นส่วนเชิงประกอบที่รวมทั้งคอนกรีต และเหล็กเสริมในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local coordinate) ณ เวลา t_0
- $[a]$ = เมตริกส์แปลงของการเปลี่ยนตำแหน่ง
- $\{u\}_{t_0}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนที่พิจารณา ณ เวลา t_0

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ผลเชิงเวลา

การวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงที่สถานะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามขั้นตอนการก่อสร้างคือ การคืบและการหดตัวที่สูญเสียความชื้นนั้นจะใช้หลักการเบื้องต้นเหมือนกับการวิเคราะห์อีลาสติคของโครงสร้างทั่วไป โดยคำตอบที่ได้จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขพื้นฐานต่อไปนี้คือ

1. สภาวะสมดุลย์ (Equilibrium conditions)
2. กฎแห่งวัสดุ (Constitutive laws)
3. เงื่อนไขของการต่อเนื่อง หรือความสอดคล้อง (Continuity หรือ Compatibility conditions)

3.3.1 แนวความคิดที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการหดตัวที่แตกต่างกันของเสา

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในแนวความคิดที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลาอย่างเป็นขั้นตอน จะใช้ตัวอย่างง่าย ๆ ประกอบการอธิบาย คือ โครงสร้างพอร์ทัล (Portal frame) 1 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ (3.2) พิจารณาโครงสร้างรับน้ำหนักคงที่กระทำคงค้างในแนวตั้งที่จุดต่อ ณ เวลา t_0 เมื่อโครงสร้างรับน้ำหนักกระทำทันทีจะทำให้เกิดแรงภายในชิ้นส่วน และการเปลี่ยนแปลงของจุดต่อเริ่มแรก ซึ่งคำนวณได้จากการวิเคราะห์ในช่วงอีลาสติคที่หน้าตัดใด ๆ ของชิ้นส่วนจะเกิดความเครียดตามแนวแกน $\epsilon_c(t_0)$ และค่าความโค้ง $\psi(t_0)$ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ (3.3) หลังจากนั้นเมื่อปล่อยให้น้ำหนักคงค้างต่อไปอีกถึงเวลา t จะเป็นช่วงที่วิเคราะห์ผลเชิงเวลา โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ในขั้นตอนแรกจะจินตนาการให้ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างเกิดการเสียรูปเปลี่ยนตำแหน่งจากผลของการคืบ และการหดตัวได้อย่างอิสระ นั่นคือการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนต่าง ๆ จะถูกคลายออก (ดูรูปที่ (3.2 ข)) ในการนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่าง ๆ จากเวลา t_0 ถึงเวลา t (ดูรูปที่ (3.3)) ทำให้จุดต่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไป การเปลี่ยนรูปนี้ทำให้เกิดการสูญเสียความต่อเนื่อง (Continuity) ระหว่างชิ้นส่วนที่ต่อกัน ดังนั้นเพื่อรักษาสภาพความต่อเนื่องของจุดต่อไว้จึงต้องใส่แรงกระทำยึดรั้งให้จุดต่อที่เปลี่ยนแปลงไปกลับคืนสู่สภาพเดิมซึ่งเป็นขั้นตอนที่สอง (ดูรูปที่ (3.2 ค)) แต่ในโครงสร้างจริงไม่มีแรงภายนอกยึดรั้งจุดต่อดังกล่าว ดังนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจึงต้องคลายแรงดังกล่าวนั้นออกโดยใส่ให้แรงยึดรั้งนั้นกระทำกลับเข้าไปใหม่ในขนาดเท่าเดิมแต่มีทิศทางสวนทางกับแรงยึดรั้งในขั้นตอนที่สอง (ดูรูปที่ (3.2 ง)) จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ผลของแรงยึดรั้งเชิงเวลาเพื่อหาแรงภายในชิ้นส่วน และการเปลี่ยนแปลง (Displacement) ของจุดต่อเชิงเวลา (ดูรูปที่ (3.2 จ)) ผลลัพธ์สุดท้ายได้จากการรวมผลของแรงภายใน และการเปลี่ยนตำแหน่งทั้งหมดในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t (ดูรูปที่ (3.2 ฉ)) จากแนวความคิดทั้งหมดนี้สามารถจะแสดงรายละเอียดของการคำนวณในแต่ละขั้นตอนได้ในหัวข้อถัดไป

3.3.2 ความเครียดและการเปลี่ยนตำแหน่งไปตามเวลาในสภาพอิสระ

การคำนวณค่าความเครียดตามแนวแกนและค่าความโค้งที่หน้าตัดใด ๆ จากช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t เนื่องจากผลของความเครียดคืบภายใต้หน่วยแรงกระทำที่เวลา t_0 และความเครียดหดตัวที่ t ใด ๆ สามารถหาได้ดังสมการ

$$\Delta \varepsilon(t, t_0) = \phi(t, t_0) \varepsilon_e(t_0) + \varepsilon_{sh}(t, t_{sh}) \quad (3.17)$$

$$\Delta \psi(t, t_0) = \phi(t, t_0) \psi(t_0) \quad (3.18)$$

- เมื่อ $\Delta \varepsilon(t, t_0)$ = การเปลี่ยนแปลงความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต
- $\Delta \psi(t, t_0)$ = การเปลี่ยนแปลงค่าความโค้งของหน้าตัดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต
- $\varepsilon_{sh}(t, t_{sh})$ = ความเครียดหดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_{sh} ถึงเวลา t ภายใต้ผลการหดตัวของคอนกรีต
- $\varepsilon_e(t_0)$ = ความเครียดอีลาสติคที่เกิดขึ้นทันทีทันใดที่เวลา t_0
- $\psi(t_0)$ = ค่าความโค้งของหน้าตัดที่เวลา t_0
- $\phi(t, t_0)$ = สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่เวลา t เนื่องจากน้ำหนักกระทำเริ่มแรกเวลา t_0

การเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อต่อของโครงสร้างคือ เกิดการยืดหดตามแนวแกน (Axial elongation) และมุมหมุน (Rotation) ที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้าง ซึ่งสามารถหาได้โดยหลักการของงานสมมุติ ดังสมการ

$$\Delta \theta_1(t, t_0) = \int_0^L \Delta \psi(t, t_0) m_1 dx \quad (3.19)$$

$$\Delta \theta_2(t, t_0) = \int_0^L \Delta \psi(t, t_0) m_2 dx \quad (3.20)$$

$$\Delta L(t, t_0) = \int_0^L \Delta \varepsilon(t, t_0) n_1 dx \quad (3.21)$$

- เมื่อ $\Delta \theta_1(t, t_0)$ = มุมหมุนที่ข้อต่อแรกของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t
- $\Delta \theta_2(t, t_0)$ = มุมหมุนที่ข้อต่อปลายของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t
- $\Delta L(t, t_0)$ = ระยะการยืด (หรือหดตัวซึ่งจะเป็นเครื่องหมายลบ) ตามแนวแกนของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

- m_1, m_2 = โมเมนต์ดัดภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัด 1 หน่วยกระทำที่ข้อต่อแรก และข้อต่อปลายของชิ้นส่วนตามลำดับ
 n_1 = แรงกระทำในแนวแกนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรง 1 หน่วยกระทำที่ข้อต่อปลายทั้งสองด้าน
 L = ความยาวของชิ้นส่วน

การอินทิเกรตสมการที่ (3.19) ถึง (3.21) โดยตรงนั้นจะมีความยุ่งยากมากในการคำนวณ ดังนั้นจึงใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงเลข (Numerical integration) ที่เหมาะสมแทน สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีของซิมป์สัน (Simpson's Rule) เนื่องจากวิธีการนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องเมื่อสมการที่อินทิเกรตเป็นโพลีโนเมียลอันดับสามหรือต่ำกว่า

3.3.3 แรงยึดรั้งสมมติ (Virtual restraining forces)

การปล่อยให้ชิ้นส่วนเกิดการเปลี่ยนรูปได้อย่างอิสระตั้งแต่เวลา t_0 ถึงเวลา t ทำให้เสียความต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจินตนาการว่ามีแรงยึดรั้งจุดต่อนี้ได้ตั้งแต่เวลา t_0 จนถึงเวลา t เพื่อไม่ให้สูญเสียความต่อยอดดังกล่าว ในการนี้จะต้องใส่แรงยึดรั้ง $\{F\}_{(t,t_0)}$ กระทำที่จุดต่อของชิ้นส่วนดังนี้

$$\{F\}_{(t,t_0)} = \{N_1 \quad N_2 \quad V_1 \quad V_2 \quad M_1 \quad M_2\}_{(t,t_0)}^T \quad (3.22)$$

โดยที่แรงชั่วของชิ้นส่วนหาได้จากสมการ

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{Bmatrix}_{(t,t_0)} = -\frac{\bar{E}_c(t,t_0) I_c}{L} \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{Bmatrix}_{(t,t_0)} \quad (3.23)$$

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{Bmatrix}_{(t,t_0)} = -\frac{(M_1 + M_2)_{t_0}}{L} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{Bmatrix}_{(t,t_0)} = -\frac{\bar{E}_c(t,t_0) A_c \Delta L(t,t_0)}{L} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

เมื่อ $N_{1,2}(t, t_0)$ = แรงตามแนวแกนที่ใช้ยึดรั้งปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$V_{1,2}(t, t_0)$ = แรงเฉือนที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$M_{1,2}(t, t_0)$ = โมเมนต์ที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

I_c = โมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีต

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

L = ความยาวของชิ้นส่วน

ส่วนแรงยึดรั้งที่ข้อต่อจะได้มาจากการรวมผลของแรงยึดรั้งที่ข้อต่อในแต่ละชั้นส่วน คือ $\{F\}_{(t,t_0)}$ จากเวลา t_0 ถึงเวลา t ที่มาต่อกันที่จุดต่อของโครงสร้างซึ่งจะได้เป็น $\{P'\}_{(t,t_0)} = \sum_{n=1}^{NM} \{F\}_{(t,t_0)}$ ดังนั้นถ้าพิจารณาแรงยึดรั้งสมมติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1} ภายใต้หน้าหนักกระทำเริ่มแรกที่เวลา t_0 จะได้

$$\{\Delta P'\}_{t_{j+1},t_j} = \{P'\}_{t_{j+1},t_0} - \{P'\}_{t_j,t_0} \quad (3.26)$$

3.3.4 การคลายการยึดรั้งออก

เนื่องจากโครงสร้างจริงไม่มีแรงยึดรั้งภายนอกกระทำจึงต้องใส่แรงยึดรั้งกระทำกลับเข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามในขนาดที่เท่ากับแรงยึดรั้งสมมติในหัวข้อที่แล้ว

3.3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลา

การวิเคราะห์ผลของการคลายการยึดรั้งกระทำโดยการพิจารณาสถานะสมมูลยที่เวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1} โดยเทียบกับเวลา t_0 ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

สำหรับเวลา t ใด ๆ สถิติเนตของชั้นส่วนโครงสร้างทั้งคอนกรีต และเหล็กเสริม สามารถสังเคราะห์ได้ตามวิธีสถิติเนตโดยตรงเหมือนในช่วงอีลาสติค เพียงแต่ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $E_c(t_0)$ เป็นค่าโมดูลัสเทียบเท่าปรับแก้อายุ $\bar{E}_c(t, t_0)$ แทน ดังนั้นสถิติเนตรวมของโครงสร้างเชิงเวลาในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t คือ

$$[K']_{t,t_0} = \sum_{n=1}^{NM} \left([K']^c + [K']^s \right)_{t,t_0}^n \quad (3.27)$$

โดยที่ $[K']_{t,t_0}$ = สถิติเนตเมตริกส์ปรับแก้อายุรวมของทั้งระบบที่เวลา t_0 ถึงเวลา t

$[K']^c_{t,t_0}, [K']^s_{t,t_0}$ = สถิติเนตเมตริกส์ย่อยของคอนกรีตที่พิจารณาผลของโมดูลัสปรับแก้อายุ และเหล็กเสริม ตามลำดับ แต่ละชั้นส่วนในระบบโกลบอลโคออร์ดิเนต ที่เวลา t_0 ถึงเวลา t

$$[K']^c_{t,t_0} = [a]^T [k']^c_{t,t_0} [a]$$

$$[K']^s_{t,t_0} = [a]^T [k']^s [a]$$

$$[k']^c_{t,t_0} = \frac{\bar{E}_c(t, t_0)}{E_c(t_0)} [k]_{t_0}^c$$

= สถิติเนตเมตริกส์ย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวปรับแก้อายุของคอนกรีตที่เวลา t_0 ถึงเวลา t

ดังนั้นระบบสมการความสมดุลของโครงสร้างเชิงเวลาในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t_j และช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t_{j+1} แสดงได้ตามสมการ

$$[K']_{j,0} \{u'\}_{j,0} = -\{P'\}_{j,0} \quad (3.28)$$

$$[K']_{j+1,0} \{u'\}_{j+1,0} = -\{P'\}_{j+1,0} \quad (3.29)$$

เมื่อ $[K']_{j,0}, [K']_{j+1,0} =$ สติฟเนสเมตริกส์ปรับแก้อายุรวมของทั้งระบบที่เวลา t_0 ถึงเวลา t_j และ t_{j+1}

$\{u'\}_{j,0}, \{u'\}_{j+1,0} =$ เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อต่อจากเวลา t_0 ถึงเวลา t_j และ t_{j+1}

อันเป็นผลมาจากการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต

$\{P'\}_{j,0}, \{P'\}_{j+1,0} =$ เวกเตอร์แรงยึดรั้งรวมทั้งข้อของจุดยึดปลายที่เกิดขึ้นจากผลของแรงกระทำคง
ค้างจากเวลา t_0 ถึงเวลา t_j และ t_{j+1} ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัว
ของคอนกรีต

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา t_j ถึง t_{j+1} จะได้จากผลต่างของสมการ (3.29) - (3.28)

ดังนั้น

$$[K']_{j+1,0} \{u'\}_{j+1,0} - [K']_{j,0} \{u'\}_{j,0} = -(\{P'\}_{j+1,0} - \{P'\}_{j,0})$$

$$\text{ให้ } \{\Delta P\}_{j+1,j} = \{P'\}_{j+1,0} - \{P'\}_{j,0} \quad (3.30 \text{ ก})$$

$$\text{และ } \{\Delta u\}_{j+1,j} = \{u'\}_{j+1,0} - \{u'\}_{j,0} \quad (3.30 \text{ ข})$$

ดังนั้น

$$[K']_{j+1,0} \{\{u'\}_{j,0} + \{\Delta u\}_{j+1,j}\} - [K']_{j,0} \{u'\}_{j,0} = -\{\Delta P\}_{j+1,j}$$

$$\{[K']_{j+1,0} - [K']_{j,0}\} \{u'\}_{j,0} + [K']_{j+1,0} \{\Delta u\}_{j+1,j} = -\{\Delta P\}_{j+1,j}$$

$$[K']_{j+1,0} \{\Delta u\}_{j+1,j} = -\{\Delta P\}_{j+1,j} - \{[K']_{j+1,0} - [K']_{j,0}\} \{u'\}_{j,0} \quad (3.31 \text{ ก})$$

สมการ (3.31 ก) เป็นสมการที่ถูกต้อง และสามารถใช้ได้กับโครงสร้างที่แปรเปลี่ยนตามเวลาภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำใด ๆ อย่างไรก็ตามการคำนวณตามวิธีการละเอียดดังที่กล่าวมาสำหรับโครงสร้างที่มี
จำนวนชั้น และน้ำหนักบรรทุกตามขั้นตอนการก่อสร้างมากมาย อย่างเช่น อาคารไบนัยก 2 จะมีความสลับ
ซับซ้อนมากไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการคำนวณจะใช้วิธี
ประมาณโดยใช้ค่าของสติฟเนสเมตริกส์รวมที่เวลาเฉลี่ย $[K']_{j,0}$ แทนค่าใน $[K']_{j+1,0}$ และ $[K']_{j,0}$ ผลก็คือ
ทำให้สมการที่ (3.31 ก) ลดรูปเป็นสมการอย่างง่าย ๆ ดังนี้

$$[K']_{j,0} \{\Delta u\}_{j+1,j} = -\{\Delta P\}_{j+1,j} \quad (3.31 \text{ ข})$$

โดยที่ $\bar{E}_c(t_j, t_0) =$ โมดูลัสปรับแก้อายุของคอนกรีตจากเวลา t_0 ถึงเวลา t_j

$$= \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi \phi(t_j, t_0)}$$

$$\chi \phi(t_j, t_0) = \left(\frac{\chi(t_{j+1}, t_0) + \chi(t_j, t_0)}{2} \right) \left(\frac{\phi(t_{j+1}, t_0) + \phi(t_j, t_0)}{2} \right)$$

$\{\Delta u\}_{j+1,j} =$ เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อจากเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1} อันเกิดจากการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต

$\{\Delta P\}_{j+1,j} =$ เวกเตอร์แรงยึดรั้งรวมทั้งข้อของจุดยึดปลายที่เกิดขึ้นจากผลของแรงกระทำคงค้างจากเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1} ภายใต้อผลของการคืบและการหดตัวของคอนกรีต

จากผลการลดรูปสมการให้ดูง่ายขึ้น ทำให้สามารถลดขั้นตอนการพิจารณาค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปจากผลเชิงเวลา และการหาค่าแรงยึดรั้งที่ข้อของชิ้นส่วนจากเวลา t_j ถึง t_{j+1} โดยใช้ค่าโมดูลัสปรับแก้อายุเฉลี่ยแทน คือ $\bar{E}_c(t_j, t_0)$ เพราะฉะนั้นในขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลาสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้ ความเครียดที่เปลี่ยนแปลงอย่างอิสระในช่วงเวลา t_j ถึง t_{j+1}

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon(t_{j+1}, t_j) &= \varepsilon(t_{j+1}, t_0) - \varepsilon(t_j, t_0) \\ &= \{\phi(t_{j+1}, t_0) - \phi(t_j, t_0)\} \varepsilon_e(t_0) + \{\varepsilon_{sh}(t_{j+1}, t_{sh}) - \varepsilon_{sh}(t_j, t_{sh})\} \end{aligned}$$

ให้ค่า $\Delta \phi(t_{j+1}, t_j) = \phi(t_{j+1}, t_0) - \phi(t_j, t_0)$

และ $\Delta \varepsilon_{sh}(t_{j+1}, t_j) = \varepsilon_{sh}(t_{j+1}, t_{sh}) - \varepsilon_{sh}(t_j, t_{sh})$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.17) จะได้

$$\Delta \varepsilon(t_{j+1}, t_j) = \Delta \phi(t_{j+1}, t_j) \varepsilon_e(t_0) + \Delta \varepsilon_{sh}(t_{j+1}, t_j) \quad (3.32)$$

ในลักษณะเดียวกันจากสมการที่ (3.18) จะได้

$$\Delta \psi(t_{j+1}, t_j) = \Delta \phi(t_{j+1}, t_j) \psi(t_0) \quad (3.33)$$

การเปลี่ยนตำแหน่งที่ขั้วจากสมการที่ (3.19) ถึง (3.21) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปใหม่คือ

$$\Delta \theta_1(t_{j+1}, t_j) = \int_0^L \Delta \psi(t_{j+1}, t_j) m_1 dx \quad (3.34)$$

$$\Delta \theta_2(t_{j+1}, t_j) = \int_0^L \Delta \psi(t_{j+1}, t_j) m_2 dx \quad (3.35)$$

$$\Delta L(t_{j+1}, t_j) = \int_0^L \Delta \varepsilon(t_{j+1}, t_j) n_1 dx \quad (3.36)$$

แรงยึดรั้งสมมติที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในช่วงเวลา

$$\{F\}_{(t_{j+1}, t_j)} = \{\Delta N_1 \Delta N_2 \Delta V_1 \Delta V_2 \Delta M_1 \Delta M_2\}_{(t_{j+1}, t_j)}^T \quad (3.37)$$

โดยที่แรงขั้วของชิ้นส่วนหาได้จากสมการ

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_1 \\ \Delta M_2 \end{Bmatrix}_{(t_{j+1}, t_j)} = -\frac{\bar{E}_c(t_j, t_0) I_c}{L} \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{Bmatrix}_{(t_{j+1}, t_j)} \quad (3.38)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{Bmatrix}_{(t_{j+1}, t_j)} = -\frac{(\Delta M_1 + \Delta M_2)_{t_{j+1}, t_j}}{L} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{Bmatrix}_{(t_{j+1}, t_j)} = -\frac{\bar{E}_c(t_j, t_0) A_c \Delta L(t_{j+1}, t_j)}{L} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

ผลรวมของแรงยึดรั้งที่จุดต่อในโครงสร้างจะได้จากการรวมผลของแรงยึดรั้งที่จุดต่อในแต่ละชิ้นส่วนที่ มาต่อกันในช่วงเวลาพิจารณาจากเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1} คือ

$$\{\Delta P\}_{j+1, j} = \sum_{n=1}^{NM} \{F\}_{(j+1, j)} \quad (3.41)$$

แรงภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนสามารถคำนวณได้จาก

$$\{\Delta S\}_{j+1, j} = \{F\}_{j+1, j} + [K']_{j, 0} [a] \{\Delta u\}_{j+1, j} \quad (3.42)$$

โดยที่ $\{\Delta S\}_{j+1, j}$ = เวกเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วนเนื่องจากแรงกระทำค้างค้ำ ในช่วงเวลา t_j ถึง เวลา t_{j+1}

$$\begin{aligned}
 [K']_{j,0} &= \text{สติเฟเนลเมตริกส์รวมของชิ้นส่วนเชิงประกอบคอนกรีต และเหล็กเสริมจากเวลา} \\
 &\quad t_0 \text{ ถึงเวลา } t_j \\
 \{\Delta u\}_{j+1,j} &= \text{เวกเตอร์ระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนพิจารณาในช่วง} \\
 &\quad \text{เวลา } t_j \text{ ถึงเวลา } t_{j+1}
 \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแรงกระทำเริ่มแรกที่เวลา t_j จากนั้นแรงนี้จะคงค้างต่อไปจนถึงเวลา t_{j+1} ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีตที่ได้ จะได้ว่าผลรวมของแรงภายในแต่ละชิ้นส่วนที่เกิดขึ้นรวมถึงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ตามขั้นตอนการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังสมการ

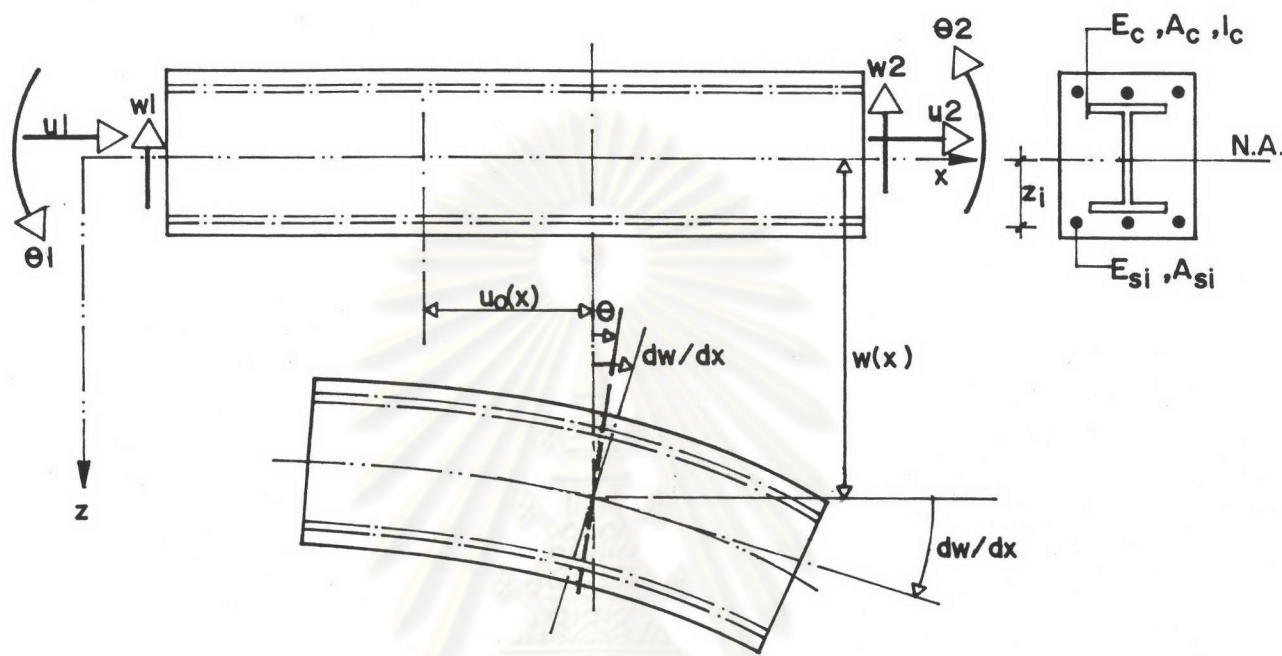
$$\{u\}_{j+1,j} = \{u\}_j + \{\Delta u\}_{j+1,j} \quad (3.43)$$

$$\{S\}_{j+1,j} = \{S\}_j + \{\Delta S\}_{j+1,j} \quad (3.44)$$

โดยที่

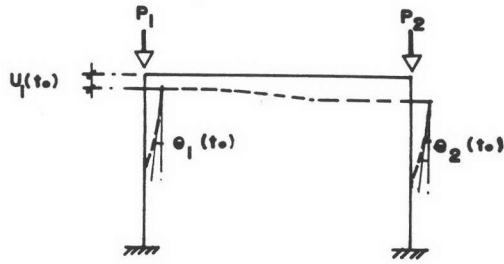
$$\begin{aligned}
 \{u\}_{j+1,j} &= \text{เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโคออร์ดิเนต ณ เวลา } t_j \text{ ถึงเวลา } t_{j+1} \\
 \{S\}_{j+1,j} &= \text{เวกเตอร์ของแรงภายในชิ้นส่วน ณ เวลา } t_j \text{ ถึงเวลา } t_{j+1}
 \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

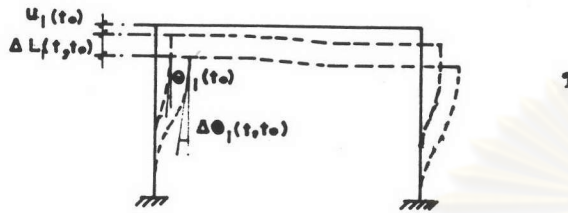


รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนเชิงประกอบคอนกรีต และเหล็กเสริม

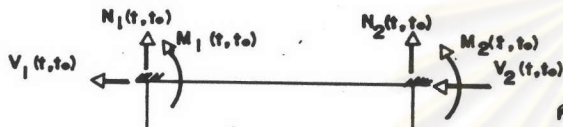
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



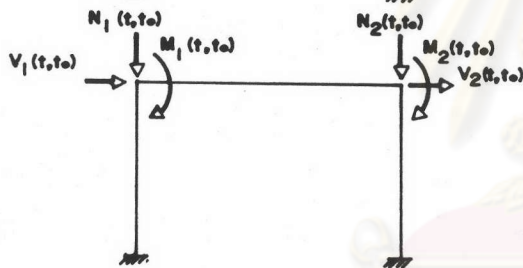
ก. การวิเคราะห์โครงสร้างช่วงรับน้ำหนักกระทำทันทีที่เวลา t_0



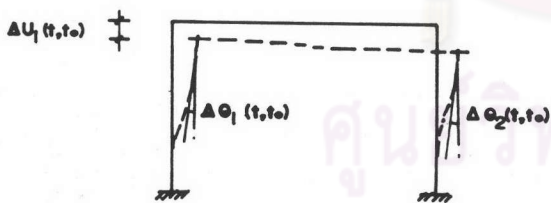
ข. ความเครียดและการเปลี่ยนตำแหน่งไปตามเวลาในภาพอิสระ



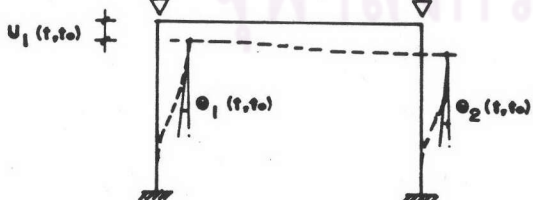
ค. แรงยึดรั้งสมมติ



ง. การใส่แรงกระทำโครงสร้างหลังจากคลายการยึดรั้ง

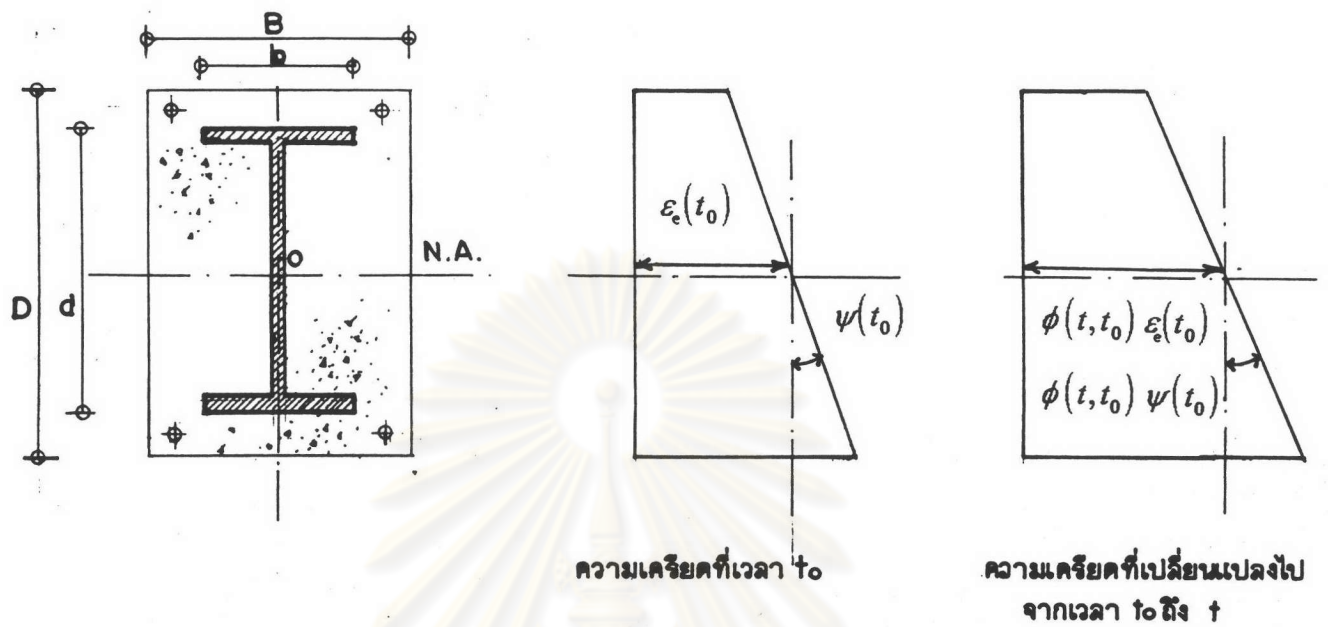


จ. การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลาจาก t_0 ถึง t



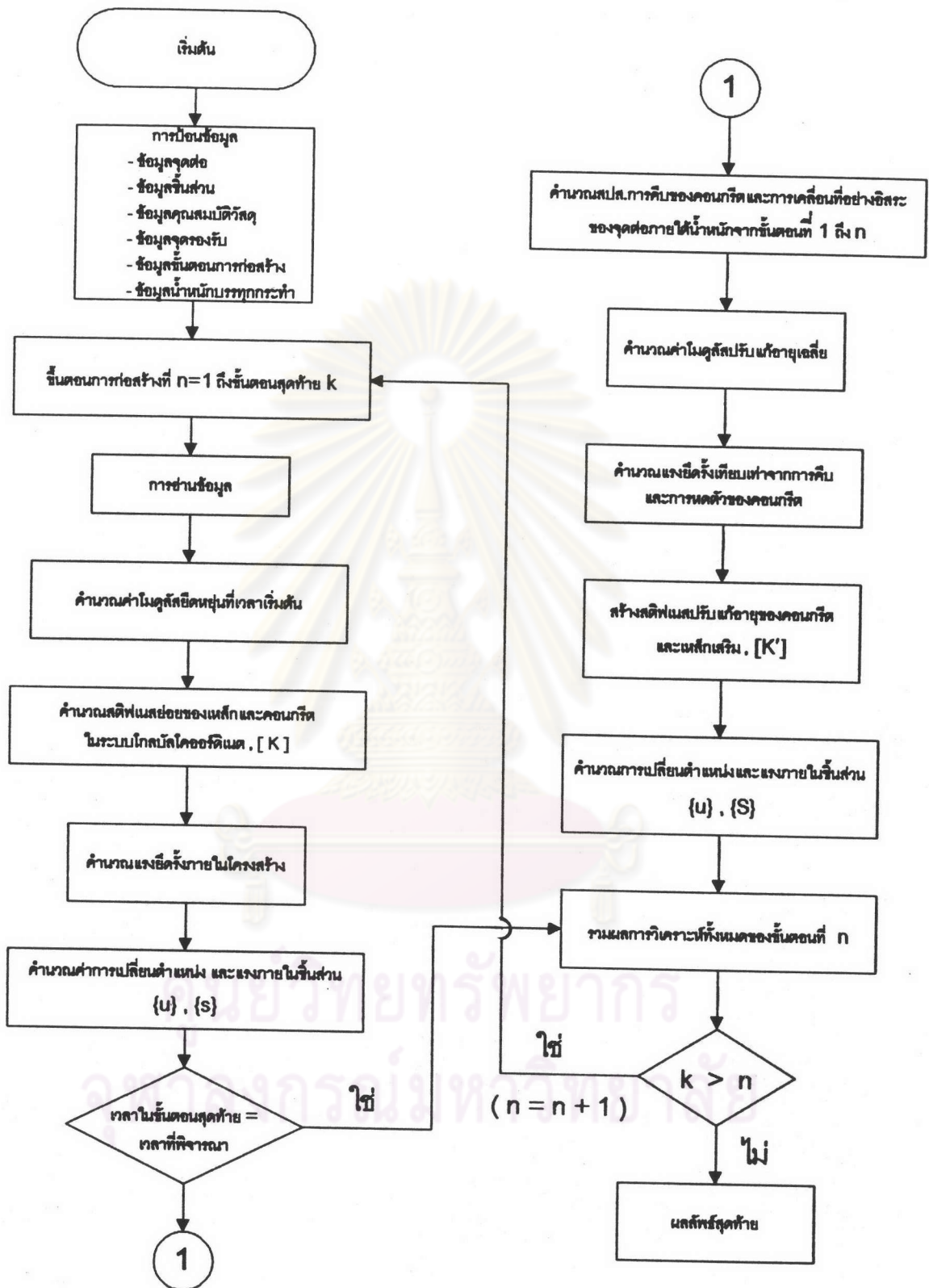
ฉ. รวมผลการวิเคราะห์โครงสร้างช่วงอิสระติดกับช่วงเชิงเวลา

รูปที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างตามเวลา



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ผลของการคืบ และการหาตัวหนาตัดคอนกรีตเชิงประกอบที่ไม่แตกร้าว
(Uncracked section)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การวิเคราะห์โครงสร้างรับน้ำหนักกระทำทันทีทันใด
Instantaneous Elastic Analysis

การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลา
Time Dependent Analysis

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลาตามขั้นตอนการก่อสร้าง