

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและความคิด

#### ความนำ

การศึกษาเพื่อพัฒนาการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังอย่างเหมาะสมในการวิจัยนี้มีวิธีการดังนี้ ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นในการออกแบบพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลัง และนำผลลัพธ์ที่ได้มาศึกษาหาความสัมพันธ์ของแรงประสิทธิผลจากลวดอัดแรงที่เพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงว่ามีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในพื้นที่ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงประสิทธิผลกับราคาของโครงสร้างที่วิเคราะห์ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าแรงประสิทธิผลที่ทำให้ราคาต่ำสุด ซึ่งเป็นจุดการคำนวณและออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลัง

#### ทฤษฎีเบื้องต้น

#### น้ำหนักบรรทุก

ในการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังจะพิจารณาสถานะที่เกิดขึ้น 3 สถานะเป็นสำคัญ ได้แก่

สถานะถ่ายแรง พิจารณาถึง น้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักสมดุลงเนื่องจากลวดอัดแรง

สถานะใช้งาน พิจารณาถึง น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร และน้ำหนักสมดุลงเนื่องจากลวดอัดแรง

สถานะประลัย พิจารณาถึง น้ำหนักบรรทุกคงที่คูณด้วยค่าคงที่เพิ่มส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจรคูณด้วยค่าคงที่เพิ่มส่วนของน้ำหนักบรรทุกจร และน้ำหนักสมดุลงเนื่องจากลวดอัดแรง

#### คุณสมบัติของวัสดุ

ก. คอนกรีต คำนวณหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต มีค่าดังนี้

- สภาวะถ่ายแรง หน่วยแรงในคอนกรีตก่อนการเสื่อมลดของแรงดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต การคืบของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของลวดอัดแรง ต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

$$\text{หน่วยแรงอัดที่ผิวนอกสุด} \quad 0.60 f_{ci}$$

$$\text{หน่วยแรงดึงที่ผิวนอกสุด} \quad 0.80 \sqrt{f_{ci}'}$$

เมื่อ  $f_{ci}'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรงในคอนกรีต ( กก./ตร.ซม.)

- สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หน่วยแรงในคอนกรีตหลังการเสื่อมสูญทั้งหมดของแรงดึง ต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

$$\text{หน่วยแรงอัดที่ผิวนอกสุด} \quad 0.45 f_c'$$

$$\text{หน่วยแรงดึงที่ผิวนอกสุด} \quad 1.6 \sqrt{f_c'}$$

เมื่อ  $f_c'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่ออายุ 28 วัน ( กก./ตร.ซม.)

ข. ลวดอัดแรง ลวดที่มักใช้กันคือ ลวดอัดแรงตีเกลียวเกรด 270 และ มาตรฐาน ACI กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ของลวดอัดแรง ดังนี้คือ

$$\text{หน่วยแรงที่ขณะดึงทันทีไม่เกิน} \quad 0.94 f_{py} \quad \text{แต่ไม่มากกว่าค่า} \quad 0.80 f_{pu}$$

$$\text{หน่วยแรงทันทีที่ถ่ายแรงไปให้คอนกรีต} \quad 0.70 f_{pu}$$

เมื่อ  $f_{pu}$  = กำลังดึงประลัยของลวดอัดแรง

$f_{py}$  = กำลังดึงคดลากของลวดอัดแรง

### หน่วยแรงดัดอิลาสติก ( Elastic Flexural Stresses )

การตรวจสอบหน่วยแรงสภาวะใช้งานที่หน้าตัดวิกฤต มีสูตรคำนวณหาได้ดังนี้

$$f = f_d + f_i + f_b + f_a \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

โดยที่  $f$  = หน่วยแรงทั้งหมด

$f_a$  = หน่วยแรงเนื่องจากแรงอัดเฉลี่ย

$f_b$  = หน่วยแรงเนื่องจากสมดุคน้ำหนักบรรทุก

$f_d$  = หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$f_i$  = หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

## เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวปริมาณน้อยที่สุด ( Minimum Bonded Reinforcement )

เพื่อให้แผ่นพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยวมีกำลังประลัยดีขึ้นคือมีความเหนียวพอ มาตรฐาน ACI กำหนดปริมาณของเหล็กเสริมธรรมดาไว้ดังนี้

- สำหรับบริเวณที่เกิดโมเมนต์บวก ถ้าหน่วยแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกสภาวะใช้งาน มีค่าไม่เกิน  $0.53\sqrt{f_c'}$  ควรใส่เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวไม่น้อยกว่า 0.001 ของหน้าตัดของคอนกรีตที่บริเวณผิวด้านรับแรงดึง แต่ถ้าหน่วยแรงดึงในคอนกรีตเกิน  $0.53\sqrt{f_c'}$  จะต้องให้มีเหล็กเสริมยึดเหนี่ยวอย่างน้อยที่สุดดังนี้

$$A_s = \frac{N_c}{0.5f_y} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ  $f_y$  = กำลังคลากของเหล็ก

$N_c$  = แรงดึงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของคอนกรีตบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึง ทั้งนี้ให้คำนวณจากหน้าตัดไม่แตกร้า

- สำหรับบริเวณที่เกิดโมเมนต์ลบ จะต้องให้มีเหล็กเสริมยึดเหนี่ยวไม่น้อยกว่า  $A_s$  ดังนี้

$$A_s \geq 0.00075hl \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ  $h$  = ความหนาของพื้นคอนกรีต

$l$  = ความยาวของช่วงเสานในทิศทางเดียวกับทิศทางโครงสร้างที่พิจารณา

## กำลังรับแรงดัดประลัยของคอนกรีต ( Ultimate Flexural Strength )

มาตรฐาน ACI ได้ให้สูตรกำลังโมเมนต์ระบุ ( Nominal Moment Strength ) สำหรับชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังนี้คือ

$$M_n = A_{ps}f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{โดยที่ } a = \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y}{0.85f_c' b}$$

เมื่อ  $a$  = ความลึกของบล็อกหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า

$A_{ps}$  = พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงในกลุ่มแรงดึง

$d$  = ระยะจากผิวนอกซึ่งรับแรงอัดจนถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง

$d_p$  = ระยะจากผิวรับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางของลวดอัดแรง

- $f_{ps}$  = หน่วยแรงดึงระบุในลวดอัดแรง (Nominal Strength)
- $b$  = ความกว้างของผิวหน้ารับแรงอัดเนื่องจากแรงดัด

มาตรฐาน ACI ให้ค่าหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรง ( $f_{ps}$ ) มีค่าดังนี้

ก. สำหรับพื้นระบบมีแรงยึดเหนี่ยว (Bonded Prestressing Tendons)

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

โดยที่  $\omega = \rho f_y / f'_c$  ;  $\omega' = \rho' f_y / f'_c$

เมื่อ  $\gamma_p$  = ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังนี้  
 0.40 เมื่อ  $f_{py} / f_{pu}$  มีค่าไม่น้อยกว่า 0.85  
 0.28 เมื่อ  $f_{py} / f_{pu}$  มีค่าไม่น้อยกว่า 0.90

$\beta_1 = 0.85$  สำหรับ  $f'_c \leq 280$  กก./ตร.ซม.  
 $= 0.85 - 0.05 ( f'_c - 280 ) / 70$  สำหรับ  $f'_c > 280$  กก./ตร.ซม.

$\rho$  = อัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด ( $= A_s / bd$ )

$\rho'$  = อัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัด ( $= A_s' / bd$ )

$\rho_p$  = อัตราส่วนลวดอัดแรงต่อพื้นที่หน้าตัด ( $= A_{ps} / bd_p$ )

ข. สำหรับพื้นระบบไร้แรงยึดเหนี่ยว (Unbonded Prestressing Tendons) อัตราส่วนช่วงระหว่างเสาดต่อความหนาพื้นน้อยกว่า 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{100 \rho_p} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ค. สำหรับพื้นระบบไร้แรงยึดเหนี่ยว (Unbonded Prestressing Tendons) อัตราส่วนช่วงระหว่างเสาดต่อความหนาพื้นมากกว่า 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{300 \rho_p} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เพื่อป้องกันมิให้เกิดการวิบัติเนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงดึง สำหรับในส่วนที่มีเหล็กเสริม น้อย มาตรฐาน ACI กำหนดให้มีการตรวจสอบกำลังดัดประลัยของคอนกรีตต้องมีค่าน้อย เทากับ 1.2 เท่าของโมเมนต์ดัดแตกร้า

$$f_{cr} = 2.0 \sqrt{f'_c} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

### กำลังรับแรงเฉือนประลัยของคอนกรีต

การตรวจสอบแรงเฉือนที่สภาวะประลัย มาตรฐาน ACI ซึ่งได้ให้สูตรไว้ดังนี้ คือ

$$v_u = v_d + v_t$$

$$v_u = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_u}{J/C} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

โดยที่  $\gamma_v = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c_1 + d}{c_2 + d}}}$

เมื่อ  $v_u$  = หน่วยแรงเฉือนประลัยรวม

$v_d$  = หน่วยแรงเฉือนประลัยแบบทะเล

$v_t$  = หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดัด

$V_u$  = แรงเฉือนประลัยที่หน้าตัดวิกฤต

$A_c$  = พื้นที่รับแรงเฉือน

$M_u$  = โมเมนต์สุทธิที่ถ่ายลงสู่เสาเนื่องจากความไม่สมดุล

$J/C$  = ค่าคงที่สำหรับแรงเฉือน ( Shear Constant )

ค่า  $J/C$  สามารถแยกคิดตามกรณีดังแสดงในรูปที่ 2.1

ก. เสาภายใน ( Interior Column )

$$J/C = (d(c_1 + d)/3)(c_1 + 3c_2 + 4d)$$

ข. เสาขอบในแนวตั้งฉากขอบ ( Edge Column )

$$J/C = (d(2c_1 + d)/12)(2c_1 + 4c_2 + 5d)$$

ค. เสาขอบในแนวขนานขอบ ( Edge Column )

$$J/C = (d(c_1 + d)/6)(c_1 + 6c_2 + 4d)$$

ง. เสามุม ( Corner Column )

$$J/C = (d(c_1 + d)/6)(c_1 + c_2 + 2d)$$

ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตที่เสาของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงหาได้จาก

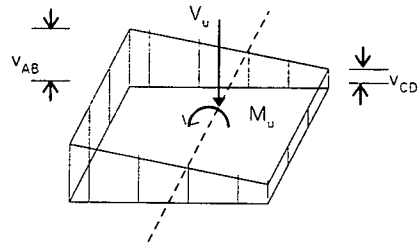
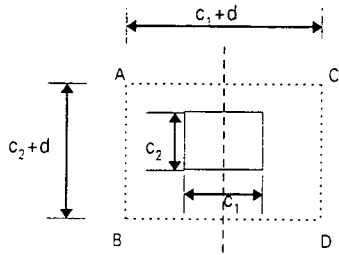
$$v_c = \phi \left( 0.93 \sqrt{f'_c} + 0.3 f_{pc} + \frac{V_p}{b_o d} \right) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

เมื่อ  $b_o$  = เส้นรอบรูปของหน้าตัดรับแรงเฉือนที่ระยะ  $d/2$  จากผิวหน้าเสา

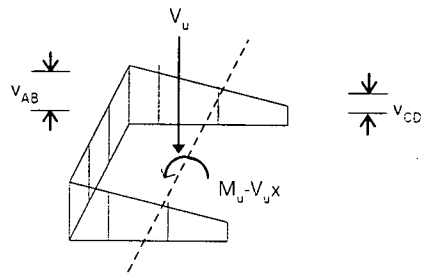
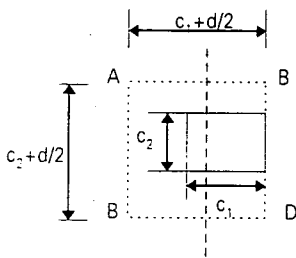
$f_{pc}$  = หน่วยแรงอัดในคอนกรีตหลังจากหักค่าการสูญเสียแรงอัด

$V_p$  = แรงประสิทธิผลจากลวดอัดแรงที่หน้าตัดวิกฤต

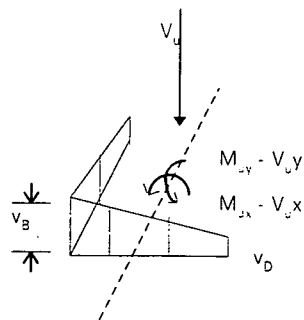
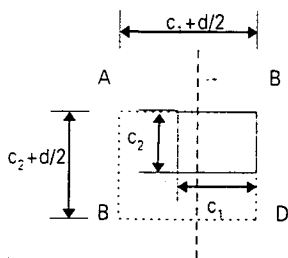
$\phi$  = ตัวคูณลดค่าของกำลังเฉือนมีค่าเท่ากับ 0.85



ก.กรณีเสายภายใน



ข,ค.กรณีเสาด้านขอบ



ง.กรณีเสาด้านมุม

รูปที่ 2.1 หน้าตัดวิฤกตและค่าหน่วยแรงเฉือนที่เสา

**ค่าการแอ่นตัวของคอนกรีต ( Deflection )**

ค่าการแอ่นตัวที่ช่วงเวลาสั้นๆ ( Short Term ) เป็นค่าการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และแรงจากลวดอัดแรง ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจากวิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง ( Direct Stiffness Method )

ค่าการแอ่นตัวที่ช่วงเวลายาวนาน ( Long Term ) เป็นค่าการแอ่นตัวที่เกิดจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งหาได้จากสูตรดังนี้

$$\delta_{CR} = (\delta_{DL} + \delta_{PT}) 0.85(1 + cr) \dots\dots\dots (2.11)$$

- โดยที่
- $\delta_{DL}$  = ค่าการแอ่นตัวของพื้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
  - $\delta_{PT}$  = ค่าการแอ่นตัวของพื้นเนื่องจากลวดอัดแรง
  - $cr$  = ค่าคงที่ของการคืบ

**ค่าการสูญเสียแรงอัดในพื้นที่คอนกรีตไร้คานอัดแรง (Loss in Prestress)**

ค่าการสูญเสียแรงอัดในพื้นที่คอนกรีตอัดแรงภายหลัง แบ่งออกเป็น 2 อย่างคือ การสูญเสียแรงอัดเริ่มแรกซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการดึงลวดและตัดลวด และการสูญเสียแรงอัดตามกาลเวลา โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา

**ก. การสูญเสียแรงอัดเริ่มแรก( Immediate Stress Losses) ได้แก่**

- ค่าสูญเสียแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทาน (Loss Due to Friction Loss) เป็นแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงกับวัสดุห่อหุ้ม สามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$T_o = T_x e^{(kx + \mu x)} \dots\dots\dots (2.12)$$

โดยที่  $T_o$  และ  $T_x$  เป็นแรงดึงในลวดอัดแรงที่สมอยึด ( Anchorage ) และที่ระยะ  $x$  จากสมอยึด ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน  $\mu$  , สัมประสิทธิ์รีวอบเบิล  $k$  อาจใช้ค่าดังแสดงในตารางที่ 2.1

- ค่าการสูญเสียแรงอัดเนื่องจากการเข้าที่ของลิ่มสมอยึด (Loss Due to Anchorage Take-up ) ค่าของการขยับเข้าที่ของลิ่มสมอยึดระหว่างการถ่ายแรงจากเครื่องดึงลวดเข้าสู่สมอยึด ในการคำนวณออกแบบกำหนดค่าที่สอดคล้องกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้

โดยทั่วไปการเคลื่อนของการเข้าที่ของลิ่มสมอยึดอยู่ในค่า 6 มิลลิเมตร การสูญเสียแรงอัดเนื่องจากการเข้าที่ของลิ่มสมอยึดได้ดังนี้

$$\delta P = \frac{2xa}{L} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

- โดยที่
- $x = \sqrt{\frac{\nabla A_{ps} E_{ps} L}{a}}$
  - $a =$  ค่าการสูญเสียแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทาน
  - $\nabla =$  ค่าการเข้าที่ของลิ่มสมอยึด
  - $A_{ps} =$  พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรง
  - $E_{ps} =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง



ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลวดอัดแรง

ชนิดของลวดอัดแรง (Type of Tendon)	สัมประสิทธิ์วอเบิล k ( ต่อเมตร )	สัมประสิทธิ์ความผิด $\mu$
สำหรับวัสดุหุ้มลวดอัดแรงชนิดมีแรงยึดเหนี่ยว ( Grouted Tendons in Metal Sheathing )		
ลวดกำลังสูง ( Wire Tendons )	0.0033 - 0.0049	0.15 - 0.25
ท่อนเหล็กกำลังสูง ( High-Strength Bars )	0.0063 - 0.0020	0.08 - 0.30
ลวดตีเกลียวเจ็ดเส้น ( Seven-Wire Strand )	0.0016 - 0.0066	0.15 - 0.25
สำหรับวัสดุหุ้มลวดอัดแรงชนิดไร้แรงยึดเหนี่ยว ( Unbonded Tendons Pregreased )		
ลวดกำลังสูง ( Wire Tendons )	0.0010 - 0.0066	0.05 - 0.15
ลวดตีเกลียวเจ็ดเส้น ( Seven-Wire Strand )	0.0010 - 0.0066	0.05 - 0.15

## ข. การสูญเสียแรงอัดตามกาลเวลา (Long Term Stress Losses )

- ค่าการสูญเสียแรงอัดเนื่องจากการหดตัวแบบอีลาสติกของคอนกรีต ( Loss Due to Elastic Shortening - ES ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

สำหรับพื้นระบบลวดอัดแรงแบบไร้แรงยึดเหนี่ยว

$$ES = 0.50 E_s / E_{ci} f_{cpi} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

สำหรับพื้นระบบลวดอัดแรงแบบมีแรงยึดเหนี่ยว

$$ES = 0.50 E_s / E_{ci} f_{cir} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

โดยที่  $f_{cir} = f_{cpi} - f_g$

$f_{cpi}$  = หน่วยแรงในคอนกรีตที่จุดศูนย์กลางของลวดอัดแรงเนื่องจากการอัดแรง

$f_g$  = หน่วยแรงในคอนกรีตที่จุดศูนย์กลางของลวดอัดแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างภายหลังการอัดแรง

$f_{cpa}$  = หน่วยแรงอัดเฉลี่ยในคอนกรีตหลังจากการอัดแรง

- ค่าการสูญเสียแรงอัดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต ( Loss Due to Creep of Concrete -CR ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

สำหรับพื้นระบบลวดอัดแรงแบบโรแรงยึดเหนี่ยว

$$CR = 1.6 E_s/E_c f_{cpa} \dots\dots\dots (2.16)$$

สำหรับพื้นระบบลวดอัดแรงแบบแรงยึดเหนี่ยว

$$CR = 1.6 E_s/E_c ( f_{cir} - f_{cds} ) \dots\dots\dots (2.17)$$

โดยที่  $f_{cir} = f_{cpi} - f_g$

$f_{cds}$  = หน่วยแรงในคอนกรีตที่จุดศูนย์กลางของลวดอัดแรงเนื่องจากน้ำหนักคงที่เพิ่ม (Superimposed Load )หลังจากการอัดแรง

- ค่าการสูญเสียแรงอัดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต( Loss Due to Shrinkage of Concrete -SH ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SH = ( 8.2 \cdot 10^{-6} ) K_{sh} E_s ( 1 - 0.0024 ( V/S ) ) ( 100 - RH ) \dots\dots\dots (2.18)$$

โดยที่  $K_{sh}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของคอนกรีต

$RH$  = ค่าความชื้นสัมพัทธ์

$V/S$  = อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว

- ค่าการสูญเสียแรงอัดเนื่องจากการคลายแรงดึง (Loss Due to Steel Relaxation - RE ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$RE = [ K_{re} - J ( SH + CR + ES ) ] C \dots\dots\dots (2.19)$$

เมื่อ  $K_{re}$  = ค่าคงที่ของการคลายแรงดึงของลวดอัดแรง

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของคอนกรีต  $K_{sh}$

ระยะเวลาจากการบ่มขึ้นถึงเวลาอัดแรง(วัน)	$K_{sh}$
1	0.92
3	0.85
5	0.80
7	0.77
10	0.73
20	0.64
30	0.58
60 วันขึ้นไป	0.45

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของหน่วยแรงการคลายแรงดึงของลวดอัดแรง  $K_{re}$  และ  $J$

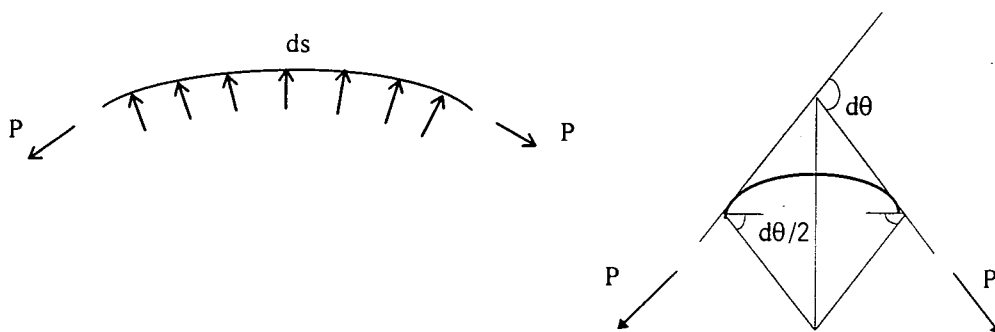
คุณภาพของลวดอัดแรง	ชนิดของลวดอัดแรง	$K_{re}$ (กก./ตร.ซม)	$J$
Stress Relieved (ผ่อนคลายหน่วยแรง)	ลวดตีเกลียวเกรด270K	1,399.0	0.15
	ลวดตีเกลียวเกรด250K	1,295.5	0.14
	ลวดกำลังสูงเกรด240K	1,231.6	0.13
	ลวดกำลังสูงเกรด235K	1,231.6	0.13
Low Relaxation (การคลายแรงดึงต่ำ)	ลวดตีเกลียวเกรด270K	350.0	0.040
	ลวดตีเกลียวเกรด250K	323.6	0.037
	ลวดกำลังสูงเกรด240K	307.4	0.035
	ลวดกำลังสูงเกรด235K	307.4	0.035

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่หน่วยแรงการหย่อนตัว (C)

$f_{pi}/f_{pu}$	ลวดอัดแรงหรือลวดตีเกลียวชนิด ผอนคลายหน่วยแรง	ลวดอัดแรงหรือลวดตีเกลียวชนิด การคลายแรงดึงต่ำ
0.80	.....	1.28
0.79	.....	1.22
0.78	.....	1.11
0.77	.....	1.16
0.76	.....	1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

สมดุลน้ำหนักบรรทุก (Load Balancing)

การอัดแรงให้สมดุลกับน้ำหนักบรรทุกจะเป็นการลดแรงภายในต่างๆ และจะเป็นการควบคุมให้หน่วยแรงต่างๆอยู่ในพิสัยที่ได้โดยง่าย พิจารณาชิ้นส่วนของลวดอัดแรงซึ่งเป็นเส้นโค้งยาว  $ds$  มีแรงดึง  $P$  กระทำที่ปลายทั้งสองข้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากสี่เหลี่ยมด้านขนานของแรง



รูปที่ 2.2 แสดงอีลิเมนต์ของลวดอัดแรง

$$dQ = 2P \sin \frac{d\theta}{2} \approx 2P \frac{d\theta}{2} = Pd\theta$$

ดังนั้นแรงดันสม่ำเสมอต้านข้าง  $w$  เท่ากับ

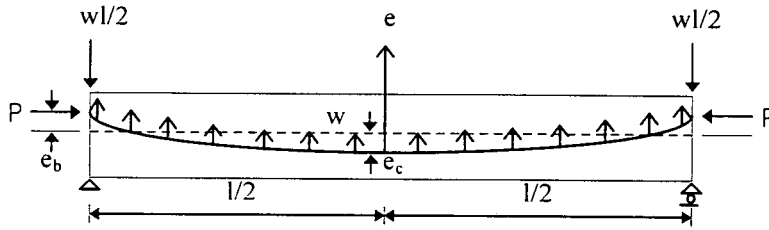
$$w = \frac{dQ}{ds} = \frac{Pd\theta}{ds} = \frac{P}{R}$$

เนื่องจากแนวโค้งของลวดอัดแรงเป็นเส้นซึ่งมีความชันน้อย จะได้

$$\frac{1}{R} \approx \frac{d^2y}{dx^2}$$

ดังนั้น  $w = \frac{Pd^2y}{dx^2}$

การวางลวดอัดแรงเป็นลักษณะพาราโบลา TY. LIN ได้ให้สูตรคำนวณสมมูลน้ำหนักบรรทุกได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 ลวดอัดแรงในรูปฟังก์ชันพาราโบลา

$$e(x) = \frac{(4e_b - e_c)x^2}{l^2} + e_c$$

จะได้  $\frac{de}{dx} = \frac{e_b - e_c}{2} (8x)$

และ  $\frac{d^2e}{dx^2} = \frac{8(e_b - e_c)}{l^2}$

สมมติน้ำหนักสมมูล ( $w_b$ ) เป็นน้ำหนักสม่ำเสมอ (Uniform Load) ตลอดช่วงพาด

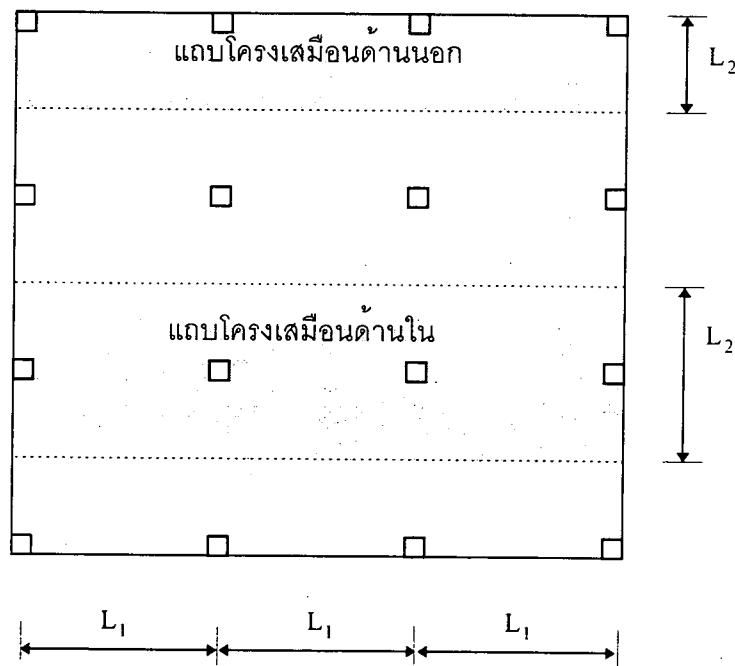
$$w_b = \frac{8P}{l^2} (e_b - e_c) \dots\dots\dots (2.20)$$

โดยที่ P = แรงดึงในเส้นลวดอัดแรง

l = ความยาวของช่วงเสาในทิศทางโครงสร้างที่พิจารณา

### ทฤษฎีโครงเสมือน (Equivalent Frame)

การวิเคราะห์หาค่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างนั้น พบว่าวิธีโครงเสมือน (Equivalent Frame) มีความเชื่อถือได้ โดยโครงสร้างจริง 3 มิติจะถูกแบ่งออกเป็นโครงข้อแข็ง 2 มิติ โดยพิจารณาแผ่นพื้นเป็นคานในโครงเสมือน ความกว้างของโครงช่วงในมีค่าเท่ากับระยะระหว่างกึ่งกลางของช่วงเสา ส่วนความกว้างของโครงข้อแข็งช่วงริมมีค่าเท่ากับระยะระหว่างกึ่งกลางของช่วงเสาสู่ขอบนอกของพื้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



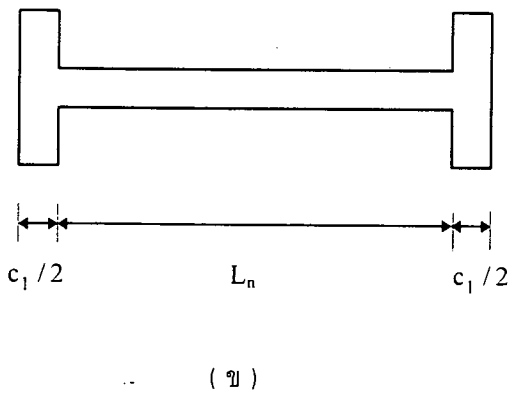
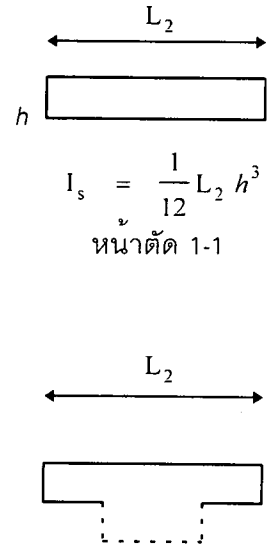
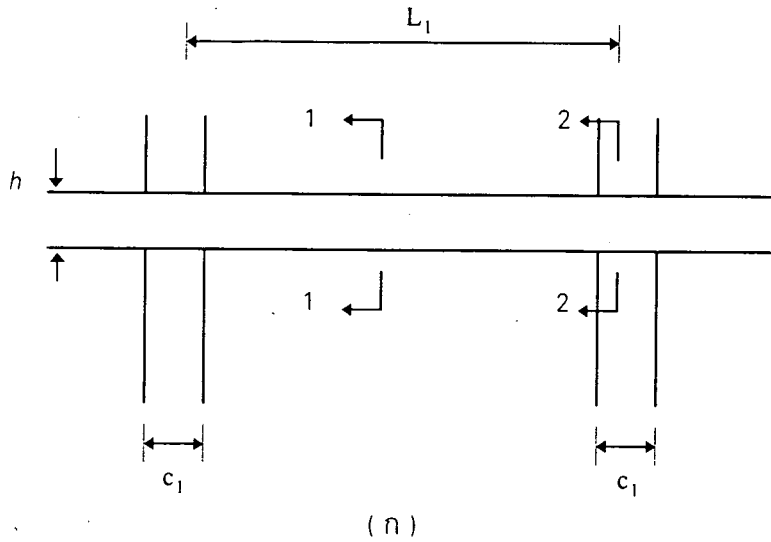
- $L_1$  = ความยาวของช่วงเสาในทิศทางเดียวกับโครงสร้างที่พิจารณา  
 $L_2$  = ความกว้างของแผ่นพื้นในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างที่พิจารณา

รูปที่ 2.4 แสดงแบบแถบเสมือนด้านในและด้านนอก

โดยมีขั้นตอนของการวิเคราะห์ของวิธีโครงเสมือนมีดังนี้



- การหาค่าสติเฟเนลของพื้น



- ( ก ) โครงสร้างแผ่นพื้นต่อกับเสา
- ( ข ) โครงสร้างเหมือนของแผ่นพื้น

รูปที่ 2.5 หน้าตัดพื้นที่ใช้คำนวณหาค่าสติเฟเนลพื้น

จากรูปที่ 2.5 ที่หน้าตัด 1-1 สามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย  $I_s$  ได้โดยตรง ดังนี้คือ

$$I_s = \frac{1}{12} L_2 h^3 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

โดยที่  $L_2$  = ความกว้างของพื้นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของโครงสร้างที่พิจารณา  
 $h$  = ความหนาของพื้นคอนกรีต

ส่วนที่หน้าตัด 2-2 นั้นพื้นบางส่วนอยู่รวมกับเสา ซึ่งในกรณีนี้ ACI Committee 318 ได้ประมาณค่าโมเมนต์ความเฉื่อย,  $I$  ไว้คือ

$$I = \frac{I_s}{\left(1 - \frac{c_2}{L_2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

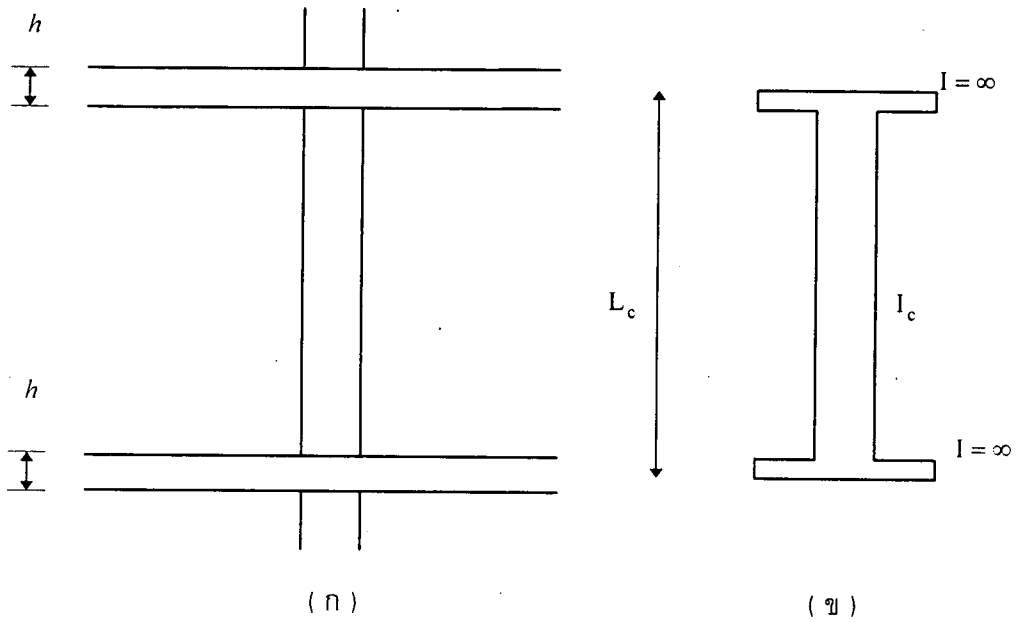
โดยที่  $c_2$  = ขนาดของเสาในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของโครงสร้างที่พิจารณา

- การหาสติเฟนสของเสา

จากรูปที่ 2.6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสา,  $I_c$  ในช่วงระหว่างพื้นแต่ละชั้นนั้น สามารถคำนวณได้โดยตรงจากหน้าตัดของเสาได้โดยตรง ดังนี้คือ

$$I_c = \frac{1}{12} c_2 c_1^3 \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

โดยที่  $c_1$  = ขนาดของเสาในทิศทางเดียวกับทิศทางของโครงสร้างที่พิจารณา  
 $c_2$  = ขนาดของเสาในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของโครงสร้างที่พิจารณา



- ( ก ) โครงสร้างเสาคู่กับแผ่นพื้น
- ( ข ) โครงเสมือนของเสา

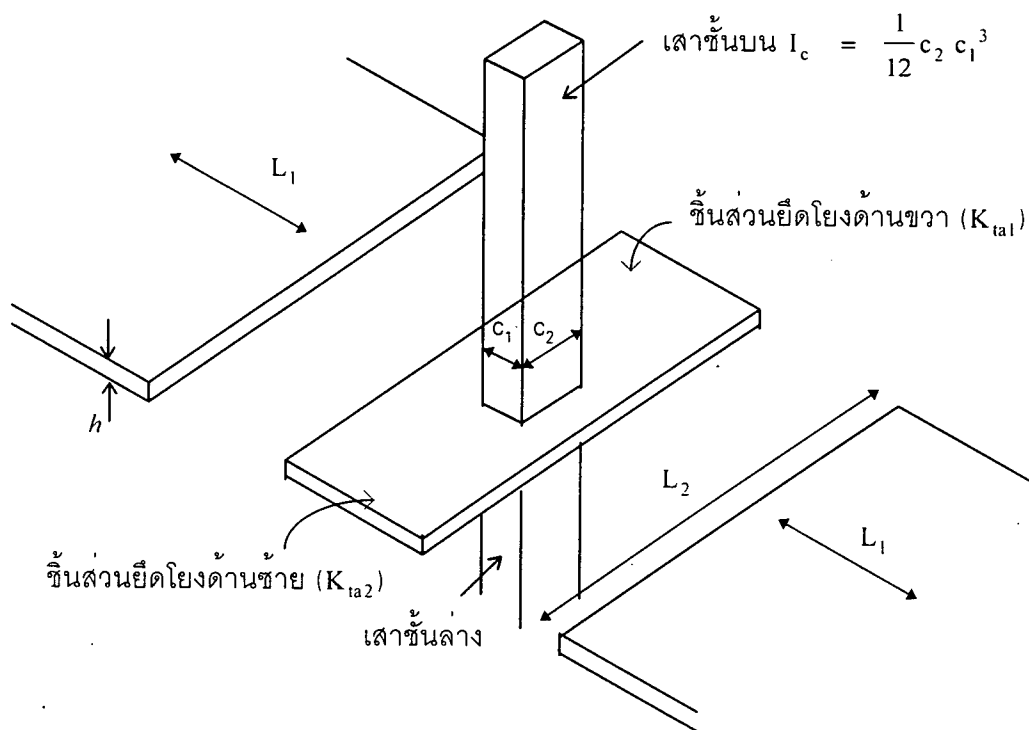
รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของหน้าตัดเสาที่ใช้คำนวณหาค่าสติเฟนส

ส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาในส่วนที่อยู่ในพื้น ถือว่ามีค่ามาก Cross และ Morgan ได้เสนอให้ใช้สติเฟนสของเสาดังนี้

$$K_c = \frac{E_c I_c}{(L_c - h)} \left( 1 + 3 \left( \frac{L_c}{L_c - h} \right)^2 \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

- โดยที่  $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสา
- $L_c$  = ความสูงระหว่างชั้น
- $h$  = ความหนาของพื้นคอนกรีต

- การหาสติเฟนสของเสาเสมือน



รูปที่ 2.7 แสดงการหาสติเฟนสของเสาเสมือน

สำหรับการหาสติเฟนสเสมือนของเสาที่รวมกันพื้น โดยอาศัยสติเฟนสของชั้นส่วนยึดโยง (Torsional Member) เพื่อให้ได้ค่าสติเฟนสที่ถูกต้อง โดยคำนวณจากสูตรดังนี้

$$\frac{1}{k_{ec}} = \frac{1}{\sum k_c} + \frac{1}{k_t} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

สามารถเขียนในรูปที่จะคำนวณหาค่าสติเฟนสของเสาเสมือนได้ดังนี้คือ

$$k_{ec} = \frac{\sum k_c}{1 + \frac{\sum k_c}{k_t}} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\text{โดยที่ } k_t = k_{ta1} + k_{ta2} = \frac{\Sigma 9E_c C}{L_2 \left(1 - \frac{c_2}{L_2}\right)^3}$$

$$\Sigma k_c = k_{cu} + k_{cl}$$

$$C = \Sigma \left(1 - 0.63 \frac{x}{y}\right) \frac{x^3 y}{3}$$

- เมื่อ
- $k_{ec}$  = สติฟเนสของเสาเสมือน (Equivalent Column Stiffness)
  - $k_c$  = สติฟเนสของเสา
  - $k_{cu}$  = สติฟเนสของเสาบน
  - $k_{cl}$  = สติฟเนสของเสากลาง
  - $k_t$  = สติฟเนสยึดโยงของชิ้นส่วน (Torsional Stiffness of Attached Member)
  - $k_{ta1}$  = สติฟเนสยึดโยงของชิ้นส่วนด้านขวา
  - $k_{ta2}$  = สติฟเนสยึดโยงของชิ้นส่วนด้านซ้าย
  - $x$  = ด้านสั้น (ความหนาของพื้น,  $h$ )
  - $y$  = ด้านยาว (ความลึกของเสา,  $c_1$ )

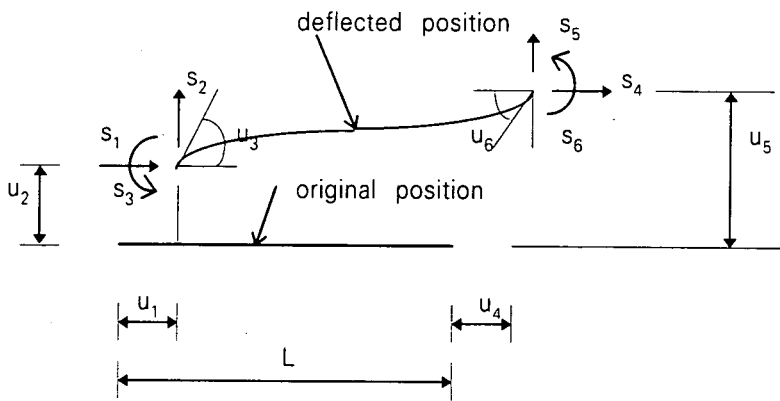
เราสามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาเสมือน  $I_{ec}$  จากค่าสติฟเนสของเสาเสมือนได้  
ดังนี้

$$I_{ec} = \frac{k_{ec} L_c}{4E_c} \dots\dots\dots (2.26)$$

หลังจากได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้น ที่หน้าตัด 1-1 และ 2-2 ในรูปที่ 2.5 ดังในสมการ (2.21) และ (2.22) รวมทั้งโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาเสมือน ดังในสมการ (2.26) แล้ว ก็จะสามารถนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไปวิเคราะห์โครงสร้างได้ โดยใช้วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method)

สติฟเนสขององค์อาคาร

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง ( Direct Stiffness Method ) ซึ่งเป็นวิธีการหาสติฟเนสของโครงสร้างทั้งระบบ โดยมีการเลือกระบบโคออร์ดิเนตที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนโครงข้อแข็งระนาบ ความยาวเท่ากับ  $L$  มีแรงกระทำที่ปลาย 6 แรง ได้แก่  $s_1$  ถึง  $s_6$  และค่าการเปลี่ยนตำแหน่งได้แก่  $u_1$  ถึง  $u_6$  ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 องค์อาคารภายใต้แรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่ง

ในวิธีนี้ค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง ( Nodal Displacements ) จะให้เป็นตัวไม่รู้ค่า ความสัมพันธ์ของเมตริกซ์สติฟเนสขององค์อาคาร ( Stiffness Coefficient Nodal Displacement ) และแรงกระทำ ( Applied Force ) สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ในสมการ สติฟเนสขององค์อาคารได้ดังนี้

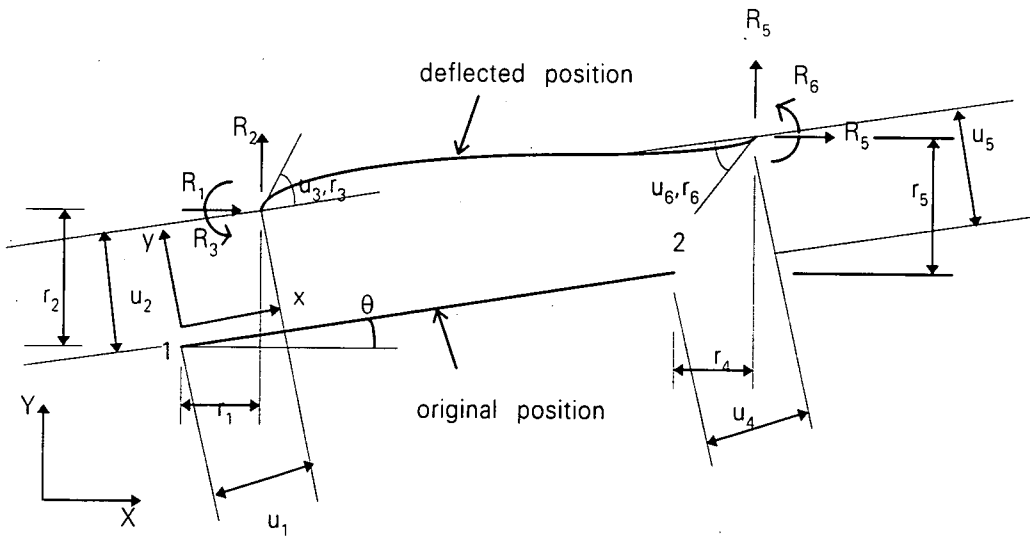
$$\{s\} = [k(u)]\{u\}$$

$$\begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2.27)$$

เมื่อ  $\{s\}$  = เวกเตอร์ของแรงกระทำในโคออร์ดิเนตประจำตัว  
 $\{u\}$  = เวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตประจำตัว

การรวมสติเฟนส

การใช้ระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว ( Local Coordinate System ) ของแต่ละชั้นส่วนขององค์อาคาร พบว่าถ้าชั้นส่วนทำมุมต่างกัน แรงที่ปลายชั้นส่วนแต่ละชั้นส่วนจะมีทิศทางไม่ไปทางทิศทางเดียวกัน จึงไม่สามารถทำการรวมเวกเตอร์ได้โดยตรง จำเป็นต้องมีการหมุนเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งและแรงกระทำแต่ละชั้นส่วน ต้องอยู่ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว ให้อยู่ในระบบโคออร์ดิเนตไกลบอล ( Global Coordinate System ) เสียก่อน การหมุนโคออร์ดิเนตกระทำได้โดยการพิจารณาองค์อาคาร  $i$  อยู่ในระนาบ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 องค์อาคารวางในระนาบโคออร์ดิเนตไกลบอล

จากรูปโคออร์ดิเนตไกลบอลเป็น XY และโคออร์ดิเนตประจำตัวเป็น xy ถ้าพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของจุด 1 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตไกลบอล กับโคออร์ดิเนตประจำตัวเป็น

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

เมื่อ  $u_i$  เป็นเวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตประจำตัว

- $r_i$  เป็นเวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตโกลบอล  
 $\theta$  เป็นมุมระหว่างแกนแนวราบในโคออร์ดิเนตประจำตัวกับแกนแนวราบในโคออร์ดิเนตโกลบอล

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตประจำตัวกับการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตโกลบอลได้เป็น

$$\{u\} = [a]\{r\} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

ส่วนสมการความสัมพันธ์ของแรงกระทำในโคออร์ดิเนตประจำตัวกับแรงกระทำในโคออร์ดิเนตโกลบอลเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\{R\} = [a]^T\{s\} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

- เมื่อ  $\{s\}$  เป็นเวกเตอร์ของแรงในโคออร์ดิเนตประจำตัว  
 $\{R\}$  เป็นเวกเตอร์ของแรงในโคออร์ดิเนตโกลบอล

ดังนั้นแทนค่าสมการ (2.27), (2.29) ลงในสมการ (2.30) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับการเปลี่ยนตำแหน่งในโคออร์ดิเนตโกลบอลขององค์อาคาร  $i$  ได้เป็น

$$\{R\} = [a]^T[k(u)][a]\{r\}$$

หรือ  $\{R\} = [K_g]^i\{r\} \quad \dots\dots\dots (2.31)$

เมื่อ  $[K_g]^i$  เป็นเมตริกซ์สติเฟเนสขององค์อาคาร  $i$  ในโคออร์ดิเนตโกลบอล

จากสมการ (2.31) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังนี้คือ



$$\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 k_a + s^2 k_{\nabla\nabla} & csk_a - csk_{\nabla\nabla} & -sk_{\nabla\theta} & -c^2 k_a - s^2 k_{\nabla\nabla} & -csk_a + csk_{\nabla\nabla} & -sk_{\theta\theta} \\ & s^2 k_a + c^2 k_{\nabla\nabla} & ck_{\nabla\theta} & -csk_a + csk_{\nabla\nabla} & -c^2 k_a - s^2 k_{\nabla\nabla} & ck_{\nabla\theta} \\ & & k_{\theta\theta} & sk_{\nabla\theta} & -ck_{\nabla\theta} & k_{\theta\theta} \\ & & & c^2 k_a + s^2 k_{\nabla\nabla} & csk_a - csk_{\nabla\nabla} & sk_{\nabla\theta} \\ & & & & s^2 k_a + c^2 k_{\nabla\nabla} & -ck_{\nabla\theta} \\ & & & & & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{Bmatrix}$$

โดยที่

$$k_a = \frac{EA}{L} \qquad k_{\theta\theta} = \frac{4EI}{L} \qquad c = \cos\theta$$

$$k_{\nabla\nabla} = \frac{12EI}{L^3} \qquad k_{\phi\theta} = \frac{2EI}{L} \qquad s = \sin\theta$$

$$k_{\nabla\theta} = \frac{6EI}{L^2}$$

ถ้าพิจารณาองค์อาคารทั้งหมด n ชั้นส่วนในโครงสร้างจะได้

$$\{R\} = \left( \sum_{i=1}^n [K_g]^i \right) \{r\}$$

ให้  $[K] = \left( \sum_{i=1}^n [K_g]^i \right)$

เมื่อ  $[K]$  เป็นเมตริกซ์สติเฟนสของโครงสร้าง

จะได้  $\{R\} = [K]\{r\}$  ..... (2.32)

เมตริกซ์  $[K]$  ในสมการ (2.32) จะเป็นซิงกูลาร์ ( Singular Matrix ) เนื่องจากมีการเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็ง ( Rigid Body Motion ) อยู่ จำเป็นต้องใส่เงื่อนไขขอบเขต ( Boundary Condition ) เพียงพอที่จะไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งจะได้เป็นเมตริกซ์นอนซิงกูลาร์ ( Non - Singular Matrix ) สามารถแก้สมการได้โดยการกำจัดแบบเกาส์ ( Gauss Elimination )

### การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม

การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังในงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีโครงเสมือน (Equivalent Frame) และการหาปริมาณแรงประสิทธิผลจากลวดอัดแรงด้วยวิธีสมดุลน้ำหนักบรรทุก (Load Balancing) และการหาราคาที่ต่ำสุดทางสมการคณิตศาสตร์ จนถึงจุดที่เหมาะสมในการออกแบบที่สุดทั้งในด้านกำลังตามมาตรฐาน ACI สำหรับการใส่สอยและราคาที่เหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์จะลดความยุ่งยากในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยตรง โดยการเริ่มจากค่าความหนาของพื้นคอนกรีตที่น้อยที่สุด ที่สามารถรับน้ำหนักการออกแบบได้อย่างปลอดภัย และพิจารณาถึงขอบเขตความน่าจะเป็นของแรงประสิทธิผลจากลวดอัดแรง จากแรงประสิทธิผลที่น้อยที่สุดที่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นของหน้าตัดไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ และแรงประสิทธิผลที่มากที่สุดที่ทำให้การเสริมเหล็กในหน้าตัดคอนกรีตน้อยที่สุด ซึ่งในจุดที่ถ้าเพิ่มแรงประสิทธิผลต่อไป ก็จะไม่ทำให้การเสริมเหล็กในหน้าตัดคอนกรีตลดน้อยลงไป และสร้างสมการจากค่าในขอบเขตความน่าจะเป็นช่วงที่ประหยัดที่สุดโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างราคาของโครงสร้างทั้งหมดกับแรงประสิทธิผลจากลวดอัดแรง เพื่อนำสมการที่ได้มาวิเคราะห์ประมาณค่าหาจุดที่ราคาต่ำสุดของเส้นสมการ ซึ่งก็จะเป็นจุดที่ราคาของโครงสร้างต่ำที่สุด

สมการที่เราใช้พิจารณาสมการของราคา คิดต่อความกว้าง และตลอดความยาวของโครงสร้าง มีตัวแปร ดังนี้ ราคาของความหนาของพื้นคอนกรีต ราคาของลวดอัดแรง ราคาของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม สมการเขียนได้ดังสมการที่ ( 2.33 )

$$C_t = C_c A h + C_s A_s I_s + \{ C_p I_e P + C_{anch} N_{anch} + C_{fix} N_{fix} + C_{bc} N_{bc} \} \dots\dots\dots (2.33)$$

( + C<sub>duct</sub> L<sub>duct</sub> + C<sub>gr</sub> L<sub>gr</sub>      ราคาเพิ่มเติมสำหรับพื้นระบบมีแรงยึดเหนี่ยว )

โดยที่  $C_t$  = ราคาทั้งหมดของพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังในทิศทางของ  
โครงสร้างที่พิจารณา ( บาท )

$C_c$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต ( บาท/ลบ.ม.)

$A$  = พื้นที่ทั้งหมดของคอนกรีต ( ตารางเมตร )

$h$  = ความหนาของพื้นคอนกรีต ( เมตร )

- $C_s$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อหน่วยปริมาตรของเหล็กเสริม ( บาท / ลบ.ม )  
 $A_s$  = พื้นที่ทั้งหมดของเหล็กเสริม ( ตารางเมตร )  
 $l_s$  = ความยาวทั้งหมดของเหล็กเสริม ( เมตร )  
 $C_p$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อหน่วยความยาวต่อหน่วยแรงประสิทธิภาพของ  
 ลวดอัดแรง ( บาท/เมตร/ตัน )  
 $l_t$  = ความยาวทั้งหมดของลวดอัดแรง ( เมตร )  
 $P$  = แรงประสิทธิภาพจากลวดอัดแรงที่ใช้อัดแรง ( ตัน )  
 $C_{anch}$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อชุดของลิ่มสมอตั้ง ( บาท / ชุด )  
 $N_{anch}$  = จำนวนลิ่มสมอตั้ง ( ชุด )  
 $C_{fix}$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อชุดของสมอยึดปลาย ( บาท / ชุด )  
 $N_{fix}$  = จำนวนสมอยึดปลาย ( ชุด )  
 $C_{bc}$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อชุดของขาตั้งลวดอัดแรง ( บาท / ชุด )  
 $N_{bc}$  = จำนวนขาตั้งลวดอัดแรง ( ชุด )  
 $C_{duct}$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อหน่วยความยาวของวัสดุห่อหุ้มลวดอัดแรง  
 ( บาท / เมตร )  
 $L_{duct}$  = ความยาวของวัสดุห่อหุ้มลวดอัดแรง ( เมตร )  
 $C_{gr}$  = ราคารวมค่าวัสดุและค่าแรงต่อหน่วยความยาวของวัสดุยึดเหนี่ยวลวดอัดแรง  
 ( บาท / เมตร )  
 $L_{gr}$  = ความยาวของวัสดุยึดเหนี่ยวลวดอัดแรง ( เมตร )

### การสร้างเส้นสมการเชื่อมข้อมูล

จากการศึกษาเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างราคาของโครงสร้างที่พิจารณากับแรง  
 ประสิทธิภาพจากลวดอัดแรง พบว่าแรงประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่บริเวณหัว  
 เส้าที่รับโมเมนต์ลบ ไม่เกิน  $1.6\sqrt{f_c'}$  และแรงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่บริเวณ  
 ช่วงกลางระหว่างเส้าที่รับโมเมนต์บวก มีค่าเท่ากับ  $0.53\sqrt{f_c'}$  ซึ่งในช่วงนี้เราสามารถเพิ่มข้อมูล  
 อีก 1 จุด ทำให้ข้อมูลในช่วงเส้นสมการนี้เป็น 3 จุด เราสามารถสร้างเส้นสมการโพลิโนเมียล  
 กำลังสองได้ และในช่วงแรงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่บริเวณช่วงกลาง  
 ระหว่างเส้าที่รับโมเมนต์บวก มีค่าเท่ากับ  $0.53\sqrt{f_c'}$  โดยการเพิ่มแรงประสิทธิภาพ จนถึงค่าแรง  
 ประสิทธิภาพที่มากที่สุดที่หน่วยแรงอัดเฉลี่ย 35 กก./ตร.ซม. หรือจุดที่เพิ่มแรงประสิทธิภาพต่อไปแล้วก็

ไม่ทำให้เหล็กเสริมในพื้นที่คอนกรีตไร้ความอัดแรงภายหลังลดลง ซึ่งในช่วงนี้เราสามารถเพิ่มข้อมูลอีก 3 จุด ทำให้ข้อมูลในช่วงเส้นโค้งนี้เป็น 5 จุด เราสามารถสร้างเส้นโค้งสมการโพลีโนเมียลกำลังสี่ได้ ทำให้ได้ค่าต่ำสุดใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริง

การสร้างฟังก์ชันเพื่อเชื่อมข้อมูลด้วยการใช้เส้นโค้งโพลีโนเมียลกำลังสี่ สามารถทำได้ จากข้อมูล 5 ข้อมูล ที่ถูกเชื่อมด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ 5 ฟังก์ชัน

ฟังก์ชันกำลังสี่ที่จะเป็นต้องหา ซึ่งเชื่อมต่อข้อมูลเหล่านี้ คือ

$$f(x_1) = ax_1^4 + bx_1^3 + cx_1^2 + dx_1 + e$$

$$f(x_2) = ax_2^4 + bx_2^3 + cx_2^2 + dx_2 + e$$

$$f(x_3) = ax_3^4 + bx_3^3 + cx_3^2 + dx_3 + e$$

$$f(x_4) = ax_4^4 + bx_4^3 + cx_4^2 + dx_4 + e$$

$$f(x_5) = ax_5^4 + bx_5^3 + cx_5^2 + dx_5 + e$$

หลังจากนั้นแก้สมการหาค่า  $a, b, c, d, e$  โดยวิธีการกำจัดแบบเกาส์ สามารถได้สมการฟังก์ชันเส้นโค้งโพลีโนเมียลกำลังสี่ ดังนี้

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ  $f(x)$  จะได้

$$f'(x) = 4ax^3 + 3bx^2 + 2cx + d$$

นำค่า  $f'(x) = 0$  หาค่ารากของสมการโดยระเบียบวิธีการวางตัวผิดที่ ( false-position method ) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สูง ที่เริ่มจากค่าเริ่มต้นในขอบเขตต้นและปลายเพียงสองค่า และนำไปสู่ผลลัพธ์ได้โดยรวดเร็ว