

หลักสูตร การออกแบบโครงสร้างอาคารสูง

ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลีสมบูรณ์

COLUMN ANALYSIS AND DESIGN I - II

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์

ร่วมกับ

ฝ่ายการศึกษาต่อเนื่อง จุฬาลงกรณ์

การออกแบบเสาคอนกรีต

ในอาคารสูง

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

1. บทนำ
2. การคิดแรงที่ถ่ายลงเสา
3. การออกแบบเสาสั้น
4. การออกแบบเสาชลุด
5. บทสรุป

การออกแบบเสาคอนกรีตในอาคารสูง

ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ่มสุวรรณ

1. บทนำ

การออกแบบเสาคอนกรีตในอาคารสูงจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการออกแบบเสาคอนกรีตของโครงสร้างใด ๆ หากแต่เสาในอาคารสูงจะมีแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ทั้งแรงอัด แรงดัด และแรงเฉือนที่สูงกว่าเสาในอาคารทั่ว ๆ ไปมาก นอกจากนี้เสาในอาคารสูงอาจจะต้องพิจารณาดังความขรุขระและลักษณะคดงอประกอบด้วย อีกทั้งยังจะต้องพิจารณาดังพฤติกรรมใน 3 มิติ หรือแรงใน 2 แกน ดังนั้นการออกแบบเสาในอาคารสูง จึงอาจจะต้องเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้น ใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังสูง ทั้งนี้เพื่อลดขนาดหน้าตัดให้มีพื้นที่ใช้สอยได้มากขึ้น ในบางกรณีหากมีขีดจำกัดเกี่ยวกับขนาดของเสามากจึงอาจจะต้องออกแบบเป็นเสาคอนกรีตเชิงประกอบโดยใช้เหล็กรูปพรรณหรือเหล็กแผ่นใช้ประกอบร่วมกับเหล็กเสริมธรรมดาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการรับแรงต่าง ๆ ได้มากขึ้น หากแต่จะเพิ่มความยุ่งยากทั้งในการออกแบบและการก่อสร้างมากขึ้นตามลำดับ

บทความนี้เน้นวิธีการคำนวณแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเสา ทั้งที่เป็นแรงในแนวตั้งจากผลของแรงดึงดูดของโลก และแรงอันเกิดจากแรงลมและแผ่นดินไหว ซึ่งจะต้องนำมารวมกัน และร่วมพิจารณาในการออกแบบ การคำนวณออกแบบจะเป็นไปตาม ACI-318-89 โดยใช้พฤติกรรมร่วมแรงอัดและแรงดัด สำหรับเสาที่มีความขรุขระสูงจะพิจารณาการคำนวณออกแบบแนวใหม่ด้วยวิธีการขยายแรงดัด (Moment Magnification Method) เพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการคดงอของเสาได้ละเอียดขึ้น

อย่างไรก็ตามการออกแบบเสาในอาคารสูงถือเป็นส่วนสำคัญมากที่สุดจุดหนึ่ง วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สภาวะต่างๆ ของแรงได้อย่างถ่องแท้ เพราะจะมีผลต่อพฤติกรรมร่วมอย่างมาก ในบางกรณีแรงต่าง ๆ จะเข้าช่วยการส่งเสริมกัน (Favorable) แต่ในบางครั้งจะขัดกัน (Non-favorable) โดยที่การออกแบบจะต้องให้ครอบคลุมทั้งสองกรณี นอกจากนี้ยังจะต้องพิจารณาดังผลกระทบอันอาจเกิดตามมา (Secondary Effects) และจะต้องออกแบบให้ครอบคลุมได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ เพื่อประกันความมั่นคงแข็งแรง และคงทนต่อการใช้สอยตลอดอายุการใช้งาน

2. การคิดแรงที่ถ่ายลงเสา

การวิเคราะห์โครงสร้างทั้งจากแรงในแนวตั้งอันเกิดจากน้ำหนักของอาคาร และแรงในทางราบอันเกิดจากแรงลมหรือแรงจากแผ่นดินไหว เมื่อจะนำผลการวิเคราะห์ทั้งสองส่วนมารวมกันตามวิธีการออกแบบกำลังประลัยจะต้องพิจารณาตัวคุณตามความสำคัญและส่งผลต่อความเชื่อถือทางโครงสร้างนั้น ๆ อย่างไรก็ตามการคิดน้ำหนักที่ถ่ายลงเสาโดยเฉพาะอันเกิดจากน้ำหนักจรยังสามารถลดได้ตามชั้นต่าง ๆ และตามขนาดของพื้นที่ใช้สอย อีกหนึ่งยังมีความจำเป็นในการพิจารณาตรวจสอบเฉพาะจุดเพื่อให้เกิดความมั่นใจในพฤติกรรมอย่างละเอียด

2.1 ส่วนลดน้ำหนักจร

Uniform Building Code ในอเมริกากำหนดการลดน้ำหนักสำหรับน้ำหนักจรได้ 2 กรณี คือ เมื่อมีพื้นที่ใช้สอยกว้าง พิจารณาตัวลดจาก

$$R_1 = \begin{matrix} 0.08 A_s \\ (0.85 A_s) \end{matrix} \quad \text{for} \quad A_s \geq \begin{matrix} 150 \text{ ft}^2 \\ (14 \text{ m}^2) \end{matrix} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{100 D+L}{4.33L} \quad (2)$$

$$R_3 = 60\% \quad (3)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่ใช้สอยห้องเดียวที่ล้อมรอบด้วยผนัง

D คือน้ำหนักบรรทุกคงที่

และ L คือน้ำหนักบรรทุกจร

สำหรับอาคารสูงกว่า 2 ชั้นจะพิจารณาลดน้ำหนักจรที่ถ่ายลงเสาได้ตามจำนวนชั้นคือ

ชั้นตาดฟ้าและหลังคา 15

ชั้นที่ 1 จากตาดฟ้า 20

ชั้นที่ 2 จากตาดฟ้า 25

ชั้นที่ 4 จากตาดฟ้า 30

ชั้นที่ 5 จากตาดฟ้า 35

ชั้นที่ 6 จากตาดฟ้า	40
ชั้นที่ 7 จากตาดฟ้า	45
ชั้นที่ 8 และถัดไป	50

ในประเทศไทยอาจจะต้องพิจารณาจากพระราชบัญญัติควบคุมอาคารปี 2522 ในกฎกระทรวงฉบับที่ 6 มิได้ระบุถึงการ ลดน้ำหนักจากพื้นที่ใช้สอยที่กว้างใหญ่ในทางราบ แต่ได้กำหนดให้ลดน้ำหนักจรได้ตามชั้นต่าง ๆ ของอาคารได้ดังนี้คือ

ชั้นที่	ส่วนลดของน้ำหนักจร (%)
ชั้นหลังคา หรือตาดฟ้า	0
ชั้นที่ 1 จากหลังคาหรือตาดฟ้า	0
ชั้นที่ 2 จากหลังคาหรือตาดฟ้า	0
ชั้นที่ 3 จากหลังคาหรือตาดฟ้า	10
ชั้นที่ 4 จากหลังคาหรือตาดฟ้า	20
ชั้นที่ 5 จากหลังคาหรือตาดฟ้า	30
ชั้นที่ 6 จากหลังคาหรือตาดฟ้า	40
ชั้นที่ 7 จากหลังคาหรือตาดฟ้า และชั้นต่อลงไป	50

ดังนั้นในการคำนวณออกแบบเสาจะสามารถพิจารณาลดลงตามส่วนที่กำหนดในมาตรฐาน หรือพระราชบัญญัติควบคุมอาคารได้ หากแต่จะต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมและใช้วิศวกรรมสำนึกในการเลือกใช้ที่เหมาะสม ในหลักการของส่วนลดน้ำหนักจรที่คิดลงเสานั้น ได้พิจารณาตามความเป็นไปได้ของการใช้พื้นที่ตามชั้นต่าง ๆ ดังที่ได้ออกแบบพื้นและคาน แต่ทั้งนี้จะต้องอยู่ในดุลยพินิจของวิศวกรเป็นสำคัญ

2.2 การคิดแรงตัดลงเสา

หากการวิเคราะห์โครงสร้างได้พิจารณาใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์เฟรมไปแล้ว โดยทั่วไปจะพบว่าแรงในเสาแต่ละต้นจะได้รับการคำนวณไว้แล้ว อันจะประกอบด้วย แรงอัดหรือแรงดึงในแนวแกน แรงดัดและแรงเฉือน ทั้งจากสภาวะน้ำหนักบรรทุกและแรงลม หรืออื่น ๆ จะสามารถนำไปรวมเข้าด้วยกัน

ตามตัวคุณ... และใช้ออกแบบได้เลย ข้อควรจะต้องพิจารณาในการออกแบบจะต้องตรวจสอบว่า
 ได้ครอบคลุม... มากหรือแรงในทุกกรณีตามสภาวะการใช้งานแล้วหรือยัง อีกทั้งยังจะต้องพิจารณาถึงผล
 ในระยะยาว เช่น จากผลการหดตัว ผลจากการบิดหดตัวจากอุณหภูมิ และผลจากการทรุดตัวของฐานราก
 เป็นต้น ... ไปการวิเคราะห์ด้วยมือยังมีความจำเป็นในการตรวจสอบและออกแบบเฉพาะจุดเพิ่มเติมไป
 จากการ *Linearized* หรือ *Normalized* โครงสร้างตามทีวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Computer แต่ในสภาพ
 พฤติกรรม... ต้องปรับแต่งตามสมมติฐานที่เหมาะสมอีกด้วย การคิดแรงตัดลงเสาอาจเลือกใช้วิธีการของ
Two-Cycle Moment Distribution โดยพิจารณาจาก *Maximum Unbalanced* ที่หัวเสา ดังแสดงในรูปที่
 1 หรือหากจะ... หรือรวดเร็วในการคำนวณมากขึ้น ACI-Code ยังกำหนดให้วิเคราะห์จากโครงสร้างดัง
 แสดงในรูปที่ ... เสาเป็นเสาด้านนอก และเสาด้านใน ตามลำดับ

ACI 318-89 ได้ระบุให้คิดแรงตัดลงเสาจากการกระจายแรงตัดจากพื้นหรือคานที่ปลายบนและ
 ล่างของเสา... ตาม *Stiffness* และการยึดรั้งที่ปลายทั้งสองของเสา

อย่างไรก็ตามใน ACI-318 ปี 71 และ 77 ได้ระบุให้คิดแรงตัดขั้นต่ำที่ถ่ายลงเสาโดยพิจารณาถึง
Imperfection ในการก่อสร้างและสภาวะการกระทำของแรงนอกเหนือการควบคุม กำหนดจาก

เสาภายใน	คิดการหนีศูนย์	0.10t	แรงตัด	(0.01t)Pu
เสาภายนอก	คิดการหนีศูนย์	0.05t	แรงตัด	(0.05)Pu

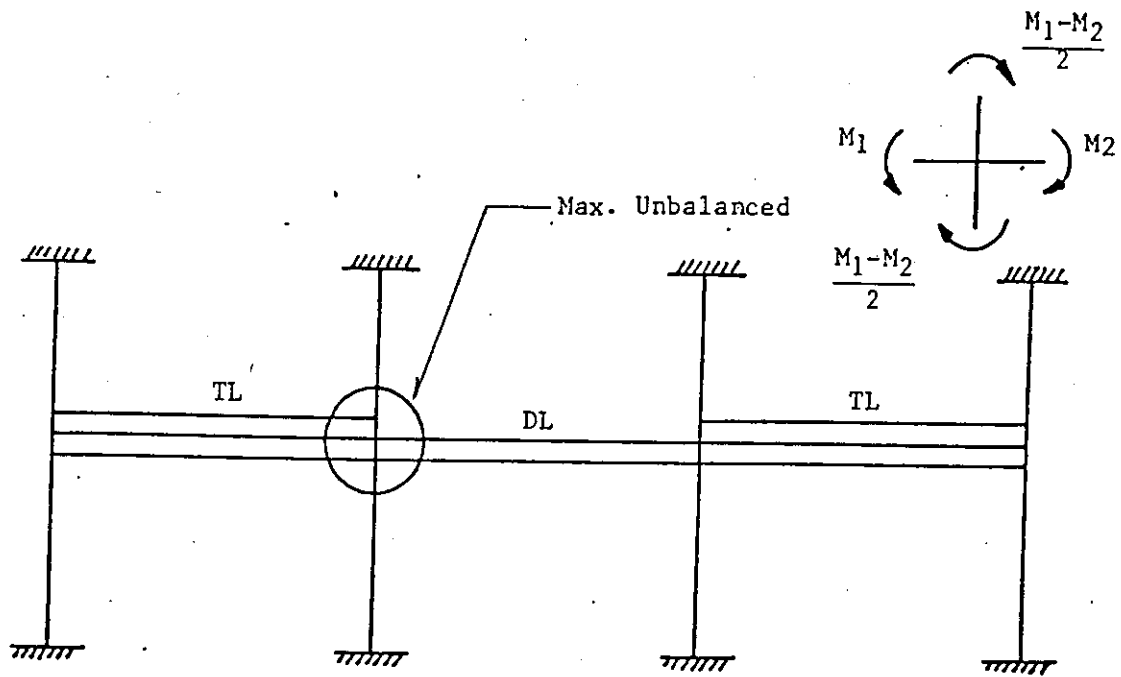
เมื่อ... เป็นความหนาของเสาด้านที่พิจารณา แต่ใน ACI-318-89 ได้กำหนดให้ระยะหนีศูนย์ต่ำ
 สุดได้คือ:-

$$e_{min} = 0.6 + 0.03h \text{ in} \tag{3}$$

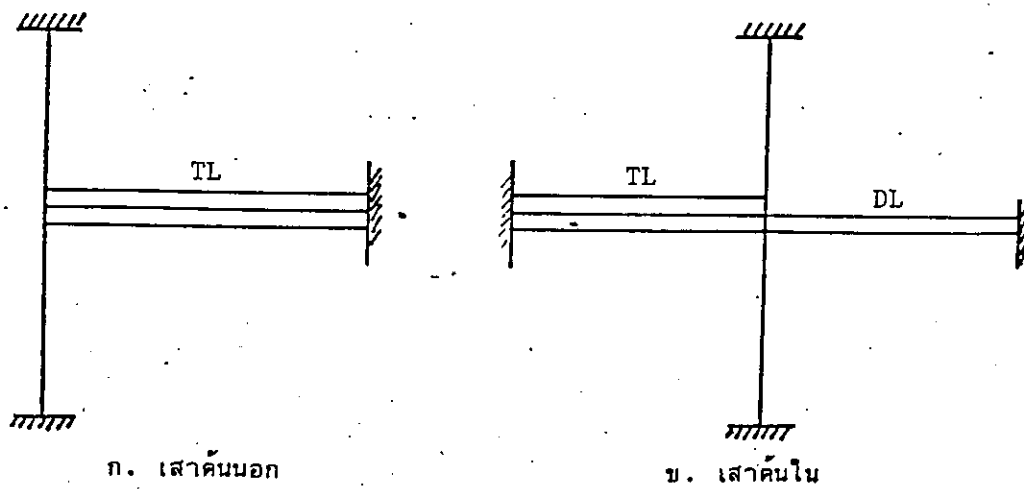
$$(1.5 + 0.03h) \text{ cm.}$$

เมื่อ... เป็นความหนาของเสาในแกนที่พิจารณา ระยะหนีศูนย์ต่ำสุดได้แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ
 จาก *Tolerance* 1.5 cm. และจาก *Imperfection* อีก 0.03h ดังนั้นค่าแรงตัดต่ำสุดที่ต้องพิจารณาก็
 ค่าเป็น กก-ซม

$$M_{min} = (1.5 + 0.03h) Pu \tag{4}$$



รูปที่ 1 การจัดโครงสร้างให้เกิดแรงค้ดสูงสุดในเสา



รูปที่ 2 การจัดโครงสร้างให้เกิดแรงค้ดสูงสุดอย่างง่าย

อนึ่ง ยังมีข้อคิดจาก Eurocode 2 ซึ่งจะประกาศใช้ในปี 1993 การคำนวณการเบี่ยงศูนย์ของเสา
ได้ให้พิจารณาจาก 3 ส่วนคือ

$$c_u = e_0 + e_1 + e_2 \quad (5)$$

โดยที่ e_0 = เป็นค่าที่เกิดจากการวิเคราะห์โครงสร้างตามสัดส่วนของแรงคัตและแรงอัด M&P

e_1 = เป็นค่าการหนีศูนย์จาก Imperfection ในการก่อสร้างกำหนดไว้

$e_1 = 1/(1.100)$ เมื่อ l เป็นความยาวของเสา

e_2 = เป็นค่าการอ่อนตัวเพิ่มเติมจากผลของ Secondary effect

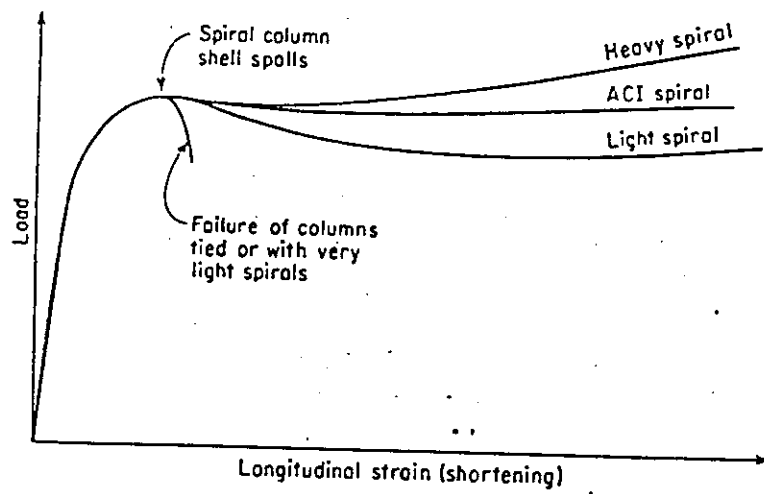
ดังนั้นในการออกแบบเสาในอาคารสูง ค่าแรงต่ำสุดจึงควรพิจารณาทั้งจากวิธีการวิเคราะห์
โครงสร้างและจากวิธีการก่อสร้างควบคู่กับการควบคุมงาน ให้สอดคล้องตามพิภคที่กำหนด

3. การออกแบบเสาลิ้น

เสาลิ้นจะมีพฤติกรรมเฉพาะในส่วนของกำลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะประกอบด้วยแรงอัดในแนว
แกนเพียงอย่างเดียว หรืออาจจะเป็นพฤติกรรมร่วมของแรงอัดในแนวแกนควบคู่กับแรงคัต พฤติกรรมของ
เสาลิ้นอาจจะต้องพิจารณาทั้งผลในระยะสั้นว่าด้วยกำลังและผลระยะยาวอันเกิดจากการคืบตัว การหดตัว
หรือความล้า ประกอบด้วยเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของเสาลิ้นได้ดี และเป็นแนวเพื่อการออกแบบ
แบบให้สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานที่แท้จริง จึงอาจแยกพิจารณาคือ

3.1 การรับแรงอัดในแนวแกน

การรับแรงอัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียวของเสาลิ้น ตามที่แสดงในรูปที่ 3 เป็นความสัมพันธ์
ระหว่างแรงอัดกับการหดตัวในแนวแกน อาจแยกออกได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงอีลาสติกที่ให้ความสัมพันธ์
ระหว่างแรงและการหดตัวเป็นเส้นตรง ในขณะที่ช่วงหลังมีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง เสาปลอกเดี่ยว
และปลอกเกลียวจะมีพฤติกรรมช่วงหลังอีลาสติกต่างกัน จากผลของการโอบรัดของเหล็กปลอกให้เกิดความ
เหนียวทางโครงสร้าง ซึ่งจะต้องใช้พิจารณาร่วมในการออกแบบด้วยเสมอ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแรง ในแนวแกนกับการหดตัวของ เสาลิ้น

ช่วงอีลาสติก การรับแรงของเสาอาจแยกออกเป็น 2 ส่วน ของคอนกรีตและของเหล็กเสริม ตามทฤษฎีของ Strain compatibility ภายใต้การหดตัวหรือความเครียดที่เท่ากัน เหล็กเสริมจะรับน้ำหนัก เป็น n เท่าของคอนกรีต โดยที่ $n = E_s/E_c$ หรืออาจเขียนเป็นสูตรคำนวณกำลังของเสาจาก

$$P = f_c A_c + f_s A_{st} \quad (6)$$

เมื่อ P = เป็นแรงอัดในแนวแกน
 f_c = เป็นหน่วยแรงอัดในคอนกรีต
 f_s = เป็นหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริม
 A_c = เป็นพื้นที่หน้าตัดส่วนที่เป็นคอนกรีต
 และ A_{st} = เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

อนึ่ง หากจะเขียนในรูปของกำลังของคอนกรีตอาจทำได้โดยแทนค่า A_c ด้วย $(A_g - A_{st})$ โดยที่ A_g เป็นพื้นที่หน้าตัดรวมของเสา และ $f_s = n f_c$ ภายใต้ความเครียดที่เท่ากัน ดังนั้น สมการที่ (6) จึงเขียนได้เป็น

$$P = f_c (A_g - A_{st}) + n f_c A_{st} \\ f_c' [A_g + (n-1)A_{st}] \quad (7)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ 6 และ 7 ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของเหล็กปลอกเลย อีกทั้งหากจะพิจารณาถึงผลของการคืบตัว และการหดตัวของคอนกรีตในระยะยาวด้วยจะทำให้ค่ากำลังของเสาตกลงประมาณ 0-15% แต่เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและการหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงจึงให้พฤติกรรมความสัมพันธ์ในช่วงนี้เป็นเส้นตรง

ช่วงหลังอีลาสติก การรับแรงของเสาจะมีพฤติกรรมที่ยุ่งยากมากขึ้น กล่าวคือ จากผลของสัดส่วนพัชอง (Poisson ratio) ทำให้คอนกรีตบวมป่องออกทางราบทำให้การโอบรัดของเหล็กปลอกเริ่มมีผล ดังนั้นกำลังของเสาจึงอาจแยกออกได้ 3 ส่วน คือ กำลังอัดจากคอนกรีต กำลังอัดจากเหล็กเสริมยืน และกำลังอัดเสริมของคอนกรีตในส่วนโอบรัดจากเหล็กปลอก ACI-305 ได้สรุปกำลังประลัยโดยพิจารณาจากผลกำลังของเสาจากทุกส่วนคือ

$$P_u = (0.85f_c' + 8.2 \frac{A_{sp}f_y}{ds}) + A_{st}f_y \quad (8)$$

โดยที่

- P_u เป็นกำลังประลัยของเสา
- f_c' เป็นกำลังอัดของคอนกรีต
- A_{sp} เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกเกลียว
- ds เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอกเกลียว
- S เป็นระยะห่างของเหล็กปลอกเกลียว
- A_{st} เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมยืน
- f_y เป็นกำลังคลากของเหล็กเสริม ทั้งเหล็กยืนและเหล็กปลอก

จากสมการที่ 8 โดยทั่วไปจะแสดงถึงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) ทั้งนี้ เพราะความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และการหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตเริ่มไร้เส้นตรง กำลังอาจจะ สูงกว่ากำลังที่จุดคลาก หากปริมาณเหล็กปลอกมากพอที่ทำให้กำลังของคอนกรีตจากการโอบรัดของเหล็ก ปลอกสูงขึ้นไปกว่ากำลังเฉลี่ยทั้งหน้าตัด นอกจากนี้ปริมาณเหล็กปลอกยังจะส่งผลให้เกิดความเหนียวทาง โครงสร้างมากขึ้นด้วย จากผลการทดสอบพบว่าเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาให้ผลต่อกำลังและความเหนียวทาง โครงสร้างน้อยกว่าเหล็กปลอกเกลียว

ACI-318-89 ได้กำหนดค่ากำลังประลัยในการรับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว

$$P_o = 0.85f_c' (A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad (9)$$

แต่จะต้องมีเหล็กปลอกตามกำหนดด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าผลของเหล็กปลอกไม่ได้กำหนดให้คิดกำลัง เพิ่มเติมจากกำลังของคอนกรีตและเหล็กเสริมยืน หากแต่จะช่วยเพิ่มให้เกิดความเหนียวทางโครงสร้างมากขึ้น เท่านั้น ดังนั้นค่า ϕ factor ของเสาแต่ละชนิดจึงแตกต่างกัน กล่าวคือ หากเป็นเสาเหล็กปลอกเกลียวให้คิด $\phi = 0.75$

$$P_u = 0.75P_o \quad (10)$$

และเสาเหล็กปลอกเดี่ยวให้คิด $\phi = 0.70$

$$P_u = 0.70P_o \quad (11)$$

3.2 แรงอัดร่วมในแนวแกนกับแรงดัด

ย่อมเป็นที่เข้าใจโดยทั่วไปว่าสภาพจริงแล้วเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียวคงเป็นไปได้ยาก ทั้งนี้เพราะย่อมมีแรงดัดเข้ามามีส่วนร่วมด้วยเสมอ อันเกิดจาก Imperfection ของชิ้นส่วนโครงสร้างหรือเกิดจากพฤติกรรมทางโครงสร้าง การยึดรั้ง และการต่อเนื่อง เป็นต้น เสาที่รับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียวถือว่าเป็นกำลังอัดในแนวแกนได้สูงสุด แต่เมื่อมีแรงดัดร่วมก็หมายถึงกำลังอัดในแนวแกนจะลดลงตามลำดับ และเมื่อแรงดัดมีมากจนถึงจุดหนึ่งที่เสาไม่อาจรับแรงอัดได้อีกต่อไป องค์อาคารจะมีพฤติกรรมเชิงแรงดัด แทนพฤติกรรมแรงอัดของเสา

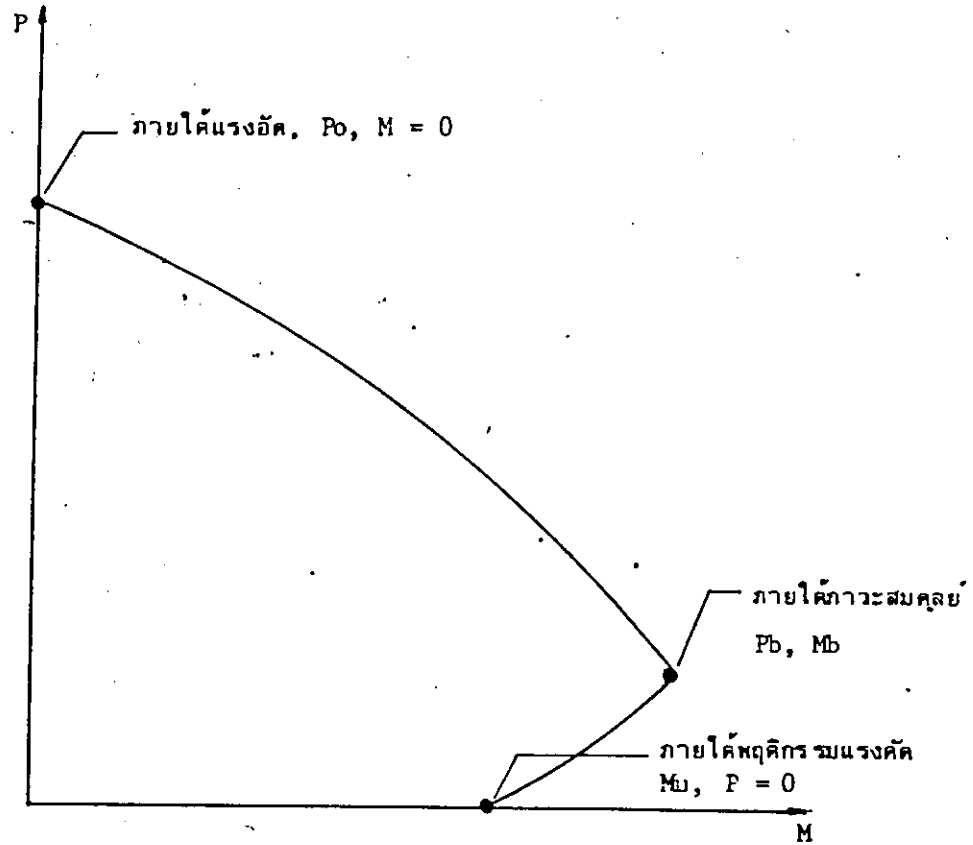
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดในเสา ดังที่แสดงในรูปที่ 4 อาจแยกพิจารณากำลังใน 3 สภาวะ คือ เมื่อมีแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว เมื่อแรงอัดและแรงดัดในภาวะสมดุลย์ และเมื่อแรงดัดควบคุมพฤติกรรม ในแต่ละสภาวะอาจแยกวิเคราะห์ได้ดังนี้

ภายใต้แรงอัดในแนวแกน การวิเคราะห์กำลังอาจทำได้จากรูปที่ 5 ภายใต้หน้าตัด $A_g = b_b$ เหล็กเสริมแนวยืน $= A_{st}$ ภายใต้การวิบัติที่ก้ำกึ่งประลัย ค่าความเครียดบนหน้าตัด $= 0.003$ ทั้งเหล็กเสริมและคอนกรีตจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้น $f_s \geq f_y$; $f_c = f_c'$ จึงอาจคำนวณแรงในแนวแกนได้ตามที่แสดงในสมการที่ (9) คือ

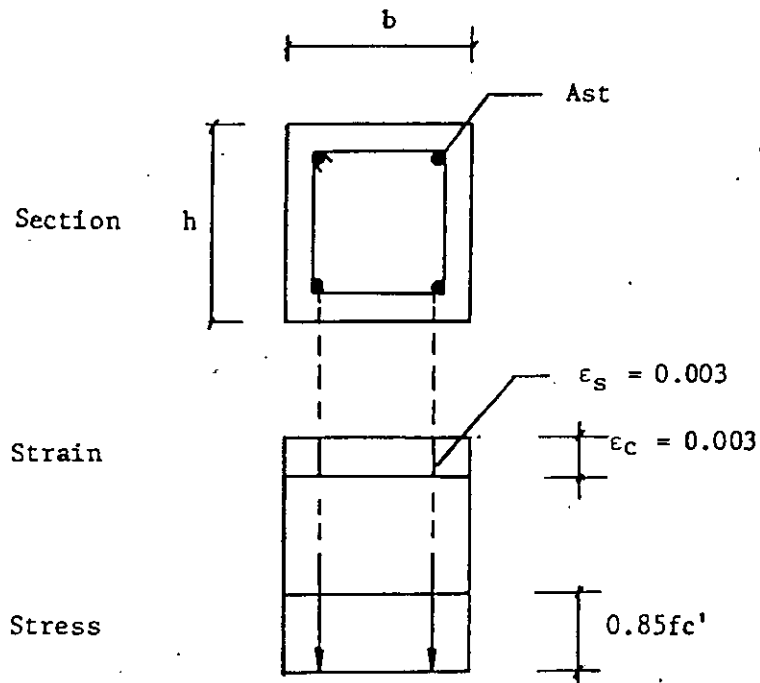
$$P_o = 0.85f_c' (A_g - A_{st}) + A_{st}f_y$$

ในสภาวะนี้ $M = 0$ ทั้งนี้เพราะค่าความเครียด (Strain) บนหน้าตัดคงที่เท่ากันตลอด

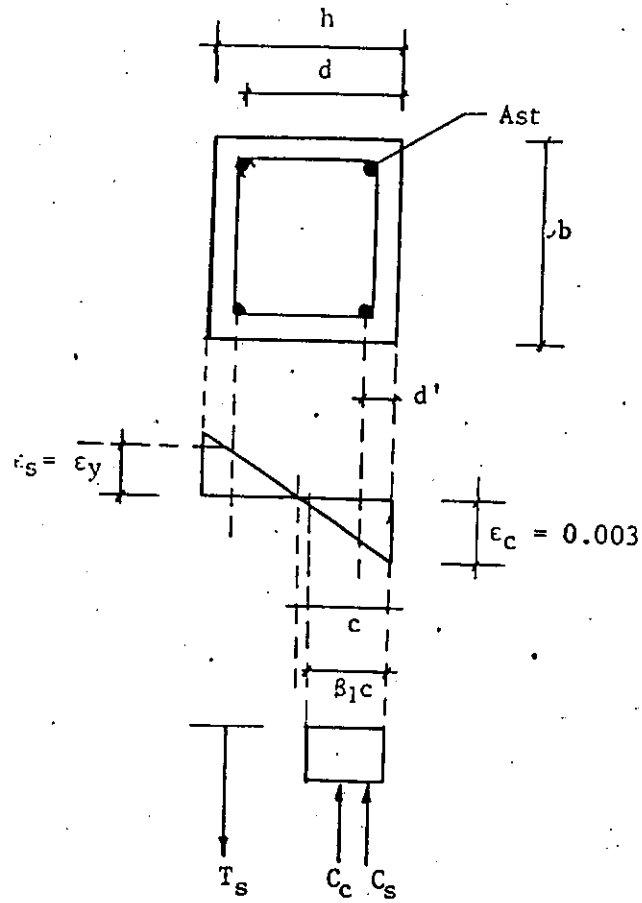
ภายใต้ภาวะสมดุลย์ การวิเคราะห์ที่ภาวะสมดุลย์ เมื่อมีแรงอัดและแรงดัดที่ทำให้ผิวด้านที่รับแรงอัดคอนกรีตจะหดตัวจนถึงวิบัติ ขณะที่ผิวด้านที่รับแรงดึงยึดตัวจนถึงจุดคลากของเหล็กเสริมพอดี ตามที่แสดงในรูปที่ 6 ความเครียดของคอนกรีตด้านที่รับแรงอัดจะมีค่า 0.003 ในขณะที่ความเครียดที่เหล็กเสริมด้านที่รับแรงดึงจะมีค่าเท่ากับความเครียดที่จุดคลากคือ ϵ_y จากรูปแสดงความเครียดจะเห็นได้ว่าหน้าตัดบางส่วนรับแรงอัดและหน้าตัดบางส่วนรับแรงดึง แรงต่าง ๆ อาจคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้



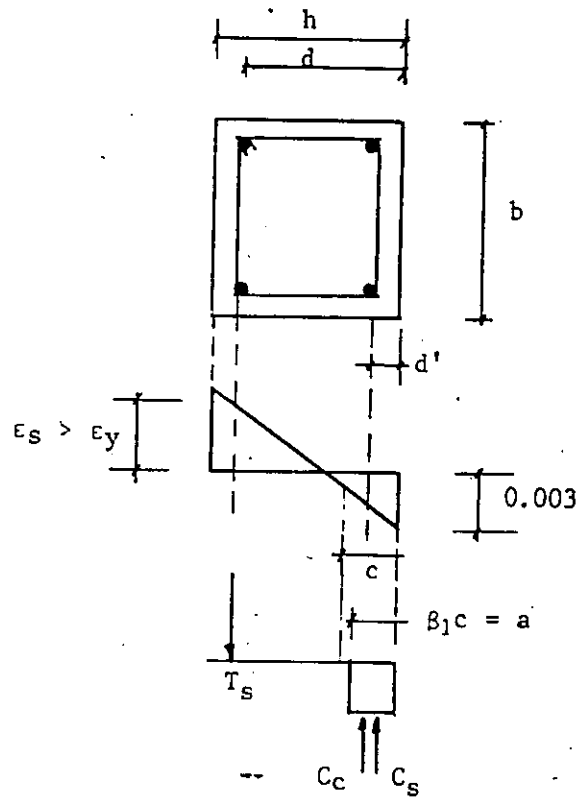
รูปที่ 4 กำลังของเสาภายใต้แรงอัดร่วมกับแรงดัด



รูปที่ 5 กำลังของเสาภายใต้แรงอัด



รูปที่ 6 สภาวะสมดุลของแรงอัดร่วมกับแรงดึง



รูปที่ 7 สภาวะของเสถียรภายใต้แรงอัดล้วน

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0.85f_c' \cdot b \cdot \beta_1 c \\
 &= 0.85f_c' \cdot b \cdot \left(\frac{0.003}{0.003 + \epsilon_y} \right) \cdot \beta_1 d
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= A_s' \cdot f_y \\
 &= \frac{A_s' \cdot f_y}{2}
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= A_s \cdot f_y \\
 &= \frac{A_s \cdot f_y}{2}
 \end{aligned} \tag{14}$$

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจพฤติกรรมจึงสมมติว่าเหล็กดันทับรับแรงดึงเท่ากับเหล็กดันทับรับแรงอัด และให้ความเครียดของเหล็กเสริมดันทับรับแรงอัดถึงจุดคลากด้วย ดังนั้นแรงอัดในแนวแกน และแรงดัดบนหน้าตัดภายใต้ภาวะสมดุลย์อาจคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 P_b &= C_c + C_s - T_s \\
 &= 0.85f_c' \cdot b \cdot d \cdot \beta_1 \left(\frac{0.003}{0.003 + \epsilon_y} \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 M_b &= 0.85f_c' \cdot b \cdot d^2 \cdot \beta_1 \left(\frac{0.003}{0.003 + y} \right) \left[1 - \beta_1 \left(\frac{0.003}{0.003 + y} \right) \right] \\
 &\quad + \frac{A_s' \cdot f_y (d - d')}{2}
 \end{aligned} \tag{16}$$

ภายใต้แรงดัดเพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 6 หากเพิ่มแรงดัดเพิ่มไปเรื่อย ๆ เหล็กเสริมรับแรงดึงจะยึดตัวสูงขึ้น ๆ ในขณะที่จุดสะเทินค่อย ๆ เคลื่อนเข้าสู่ดันทับรับแรงดัด เอื้ออำนวยให้พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตและเหล็กเสริมน้อยลงตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่แรงอัดรวมของเสาเป็นศูนย์จะเหลือเพียงแรงอัดและแรงดึงที่สมดุลย์กันพอดี ในกรณีนี้พฤติกรรมจะถูกบังคับด้วยแรงดัดทั้งหมด กล่าวคือ

$$C_c = 0.85f_c' \cdot b \cdot a \tag{17}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_s' \tag{18}$$

และ $T_s = A_s \cdot f_y \tag{19}$

$$\begin{aligned} \text{ภายใต้ภาวะสมดุล } Ts &= Cc + Cs \text{ ดังนั้น} \\ P &= Cc + Cs - Ts = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{และ } M = Cc(d-a/2) + Cs(d-d') \quad (21)$$

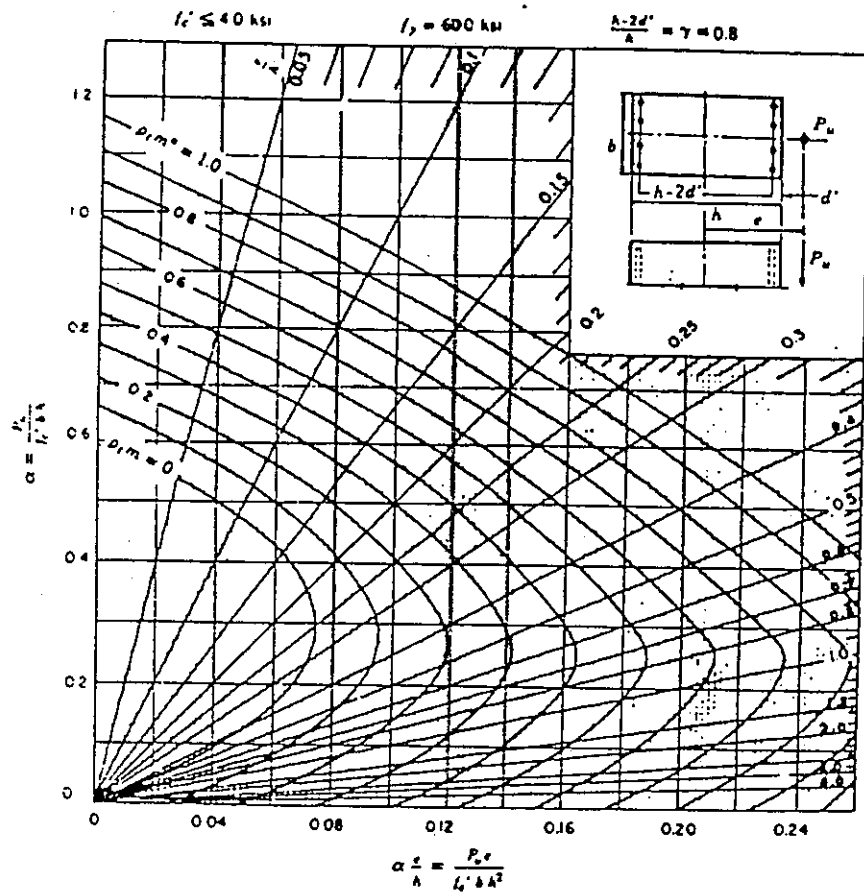
ในสมการที่ 17-21 สมมุติให้เหล็กเสริมด้านรับแรงอัด A_s' และเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง, A_s เมื่อรวมกันแล้วมีค่าเท่ากับ A_{st} จากผิวรับแรงอัดถึงแกนสะเทินของหน้าตัดมีค่า c และ $a = \epsilon_{1c}$ ดังที่เคยกล่าวมาแล้ว เป็นลำดับ และ f_s' จะน้อยกว่า f_y

กราฟเพื่อการออกแบบ การออกแบบเสาสั้นอาจใช้วิธีการวิเคราะห์หน้าตัดโดยตรงจากแรงที่กระทำต่อเสา โดยกำหนดขนาดแล้วคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมได้ แต่เพื่อให้การออกแบบเป็นไปได้ง่ายขึ้น จึงอาจพิจารณาตัดแปลง Interaction curve จากรูปที่ 4 ให้ง่ายและสะดวกต่อการออกแบบมากขึ้น ด้วยการทำให้ค่ากำลังไร้หน่วย (Dimensionless) กล่าวคือ ในแกนยื่น P_u ซึ่งเป็นค่าแรงอัดนำเอาค่าตัวแปรหลักมาหารให้ไร้หน่วย กลายเป็น P_u/bh^2f_c' และในแกนนอน M_u เป็นค่าแรงดัด ทำให้ไร้หน่วยด้วยการหารตัวแปร คือ M_u/bh^2f_c' ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีข้อควรสังเกตุอยู่หลายประเด็นที่ควรทำความเข้าใจก่อนที่จะนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบ กล่าวคือ

1) แม้กราฟที่แสดงจะเป็นแบบไร้หน่วย แต่ขีดจำกัดของวัสดุยังคงมีผลต่อการคำนวณ เช่น กำลังคลากของเหล็กเสริม f_y จะมีผลต่อความเครียดที่จุดคลาก ϵ_y เพราะค่าโมดูลัสของเหล็กเสริม E_s จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 2.0×10^6 กก/ซม² และกำลังของคอนกรีต f_c' ก็มีผลต่อลักษณะการกระจายแรงด้วยค่า s_1 ดังนั้นกราฟที่ใช้จะต้องให้สอดคล้องกับ f_y และ f_c' ตามที่ระบุ

2) ตำแหน่งของเหล็กเสริมจะมีผลต่อศูนย์กลางของแรงทั้งในการรับแรงอัดและการรับแรงดึง ดังนั้นสัดส่วน γ จะต้องพิจารณาจากศูนย์กลางเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงศูนย์กลางเหล็กเสริมรับแรงอัด เทียบกับความหนาของเสาซึ่งหากการเรียงเหล็กเกินกว่า 1 แถว หรือหลายแนวเรียง จึงพิจารณาจากระยะหุ้มคอนกรีตเพียงอย่างเดียวไม่ได้

3) ตัวแปรในแนวรัศมีจากแกนแรงอัด ไปจนถึงแกนแรงดัดจะขึ้นไปถึง อัตราการหนีศูนย์กลางของแรงกราฟที่แสดงจะไร้หน่วยจึงอยู่ในค่าของ e/h คือ $e = (M_u/P_u)$ และ $h =$ ความหนาของเสาค้นที่พิจารณา, e ดังนั้น $e/h = (M_u/P_u)/h$ --



รูปที่ 8 ตัวอย่าง Interaction Curve เพื่อการออกแบบเสา

4) ตัวแปรในแนวตั้งฉากกับแกนแรงอัดหรือแกนแรงดัด ซึ่งตัวแปรของปริมาณเหล็กเสริมแสดงแบบไร้หน่วยในรูปของ ρ_t^m เมื่อ ρ_t เป็นปริมาณเหล็กเสริมยื่น $\rho_t = A_{st}/b \cdot h$ และ m เป็นตัวคงที่แสดงสัดส่วนกำลัง $m = f_y/0.85 f_c'$ โดยทั่วไปปริมาณเหล็กเสริมถูกกำหนดในมาตรฐานไม่ต่ำกว่าร้อยละ 1 และไม่เกินร้อยละ 8 ของหน้าตัด

5) กราฟที่ใช้ในการออกแบบบางครั้งได้พิจารณาค่าตัวคูณ ϕ ไว้แล้ว แต่ควรตรวจสอบก่อนการใช้ โดยพิจารณาจากแกนแรงอัด หากค่า ϕ ยังไม่คิด ค่า $P_u/bh \cdot f_c'$ เมื่อ $\rho_t^m = 0$ กำลังจะเกิดจากคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ดังนั้นค่า $P_u/bh \cdot f_c'$ ควรจะมีค่า $= 0.85$ แต่หากคิดค่า ϕ ไว้แล้ว $P_u/bh \cdot f_c'$ ควรจะเหลือเพียง $0.85 \times 0.70 = 0.595$ ดังนั้น หากเป็นไปได้ในกรณีแรก แรงที่ใช้ในการออกแบบควรเป็น P_n และ M_u แต่หากค่า ϕ ร่วมพิจารณาแล้ว ตามกรณีหลังการออกแบบจึงใช้ P_u และ M_u แทน

ขั้นตอนการออกแบบ เพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างถูกต้องและสอดคล้องกับข้อมูลเบื้องต้นที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ จึงสามารถกำหนดขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1) การวิเคราะห์โครงสร้างจะต้องรู้ค่า M_u และ P_u ทั้งนี้โดยพิจารณาค่าตัวคูณกำลังไปแล้ว ทั้งจากแรงในแนวตั้งอันเกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร และจากแรงในทางราบอันเกิดจากแรงลม, แรงแผ่นดินไหว หรือจากแรงอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้าง

2) กำหนดขนาดของเสาโดยประมาณ จากแบบทางสถาปัตย์หรือจากการกำหนดมิติเบื้องต้นคร่าว ๆ จากแรงอัด $A_g = P_u/0.85f_c'$ ร่วมกับการวินิจฉัยข้อมูลทางวิศวกรรมประกอบ แล้วจึงเลือกขนาดที่พอเหมาะสำหรับโครงสร้างเสา

3) จากขนาดของเสาและการเสริมเหล็กสามารถประเมินศูนย์กลางของเหล็กเสริมจากการจัดเหล็กคำนวณหา γ ; $\gamma = (b-2d')/b$ โดยที่ d' เป็นระยะจากผิวคอนกรีตถึงศูนย์กลางของเหล็กดัดรับแรงอัดหรือแรงดึง จึงเลือกใช้กราฟเพื่อการออกแบบที่สอดคล้องทั้ง γ , f_c' และ f_y ด้วย

4) ตรวจสอบค่าการเยื้องศูนย์กลางที่สุดจาก $e = M_u/P_u$ เปรียบเทียบกับ $e_{\min} = 1.5 + 0.06h$ หากค่าน้อยกว่าค่าหลัง แรงดัดที่ใช้ในการออกแบบจะเป็น $M_u = e_{\min} P_u$

5) จากค่า α ในแนวแกนแรงอัด คำนวณจาก P_u/bh_c และจากค่า $\alpha e/h$ คำนวณจากแรง
ดัด $M_u/bh^2 f_c$ ลากเส้นในแนวตั้งฉากกับแกนหารจุดที่ตัดกัน

6) อ่านค่า e/h ที่จุดตัด เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบกับค่าใน (4) ซึ่งจะต้องสอดคล้องกัน
และจะต้องมีค่าเกินกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดในมาตรฐานออกแบบ

7) จากจุดตัดใน (5) อ่านค่า ρ_m จากกราฟ เมื่อ m มีค่าเท่ากับ $f_y/0.85f_c$ ดังนั้นปริมาณ
เหล็กเสริม $A_{st} = \rho_m . bh$ หาจำนวนเหล็กเสริมและพิจารณาการจัดเรียงให้เหมาะสม และหาศูนย์กลางของ
เหล็กเสริมเพื่อตรวจสอบ γ ด้วย

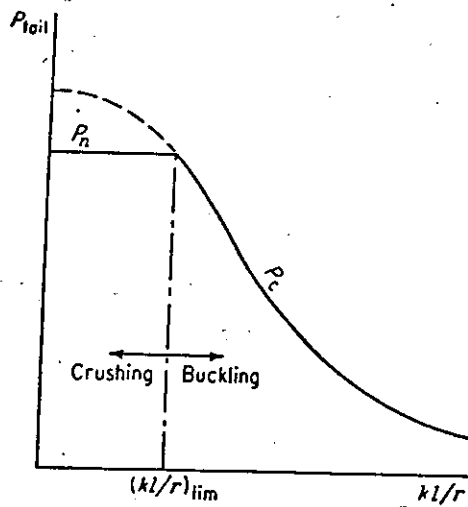
8) หาปริมาณเหล็กปลอกในเสาจากค่าแรงเฉือน และหรือตามการจัดเรียงเหล็กเสาปลอกเกลียว
จะต้องคำนวณให้ได้ปริมาณ $\rho_s \geq 0.45 \frac{A_g - 1}{A_c} \frac{f_c}{f_y}$ เป็นสัดส่วนของปริมาตรของเหล็กปลอก 1 รอบต่อ
ปริมาตรคอนกรีตที่โอบรัดด้วยปลอก 1 รอบ แต่หากเป็นเสาปลอกเดี่ยวจะพิจารณาจากการจัดเหล็กเป็นเกณฑ์

4. การออกแบบเสาขลุค

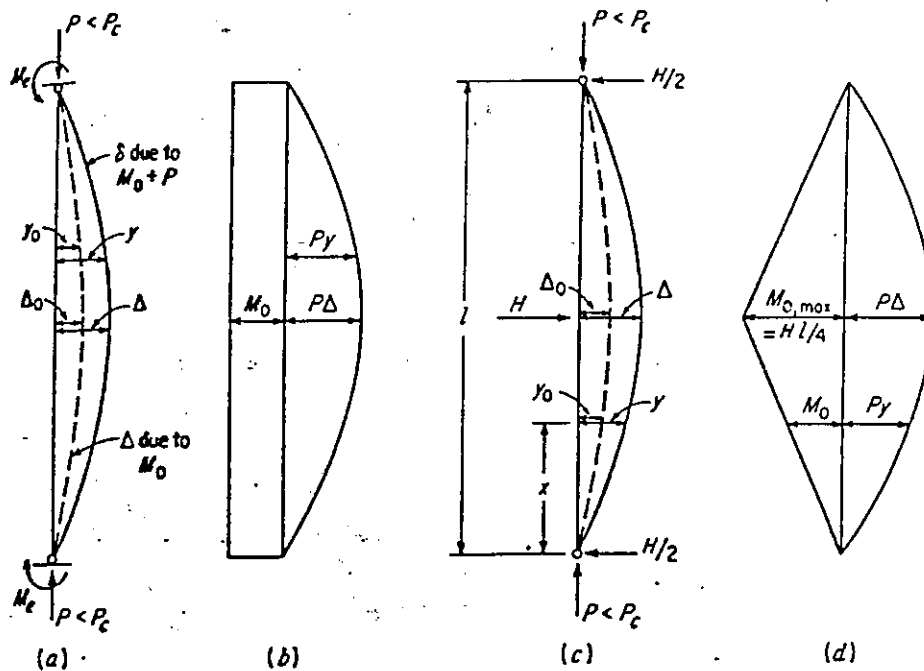
เสาเมื่อมีความยาวมากขึ้นโดยที่ขนาดไม่ได้เพิ่มจะส่งผลเกี่ยวกับความขลุคทางพฤติกรรมกรรับแรง
ตามที่แสดงในรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาเพียงเฉพาะแรงอัดในแนวแกนเมื่อมีความขลุคเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลัง
การรับแรงในแนวแกนลดลงอย่างมาก พฤติกรรมของเสาที่กำลังถูกควบคุมด้วยขนาดและกำลัง
ของคอนกรีตและปริมาณเหล็กเสริม กลายเป็นเสายาวที่กำลังถูกควบคุมด้วยพฤติกรรมการดุ้ง (Buckling
behavior) ซึ่งมีขนาดของเสา ความยาวและการยึดรั้งที่หัวท้ายเป็นส่วนควบคุม และเมื่อร่วมพิจารณาถึงแรง
อัดยิ่งทำให้ผลต่อพฤติกรรมกรรับแรงเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 10 เมื่อมีความขลุค แรงดัด
จะทำให้การอ่อนตัวเยื้องศูนย์กลางในเสาเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ค่าแรงดัดเพิ่มขึ้น จากผลคูณของแรงในแนวแกน
และการเยื้องศูนย์กลาง อนึ่งหากปลายทั้งสองข้างของเสาเกิดการเซจะทำให้พฤติกรรมของเสาขลุควิกฤติเพิ่มมา
ขึ้น

4.1 ความยาวประสิทธิผลของเสา

ความยาวของเสาโดยทั่วไปจะถือช่วงที่ไม่มีการยึดรั้งเป็นความยาวของเสา (Unsupported



รูปที่ ๑ ผลของความชลุดค่อกำลังของเสา



รูปที่ 10 แรงค้ำเพิ่มจากการชลุด

length, l_u) อาจพิจารณาแยกกันตามระบบโครงสร้าง เช่น ระบบพื้นไร้คาน (Flat plate) ระบบพื้นห้องเรียบ (Flat Slab) และระบบพื้น-คาน (Post-tensional) ซึ่งอาจหาค่า l_u ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 11

ผลของการยึดรั้งที่ปลายทั้งสองจะส่งผลให้ความยาวประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจพิจารณาผลกระทบอย่างง่ายจากเฟรมหรือเสาที่ไม่มีารเซ ดังแสดงในรูปที่ 12 เมื่อปลายทั้งสองเป็นจุดหมุนความยาวประสิทธิภาพ, (l) จะเท่ากับความยาวไร้จุดยึดรั้ง (l_u) หรือค่า $k = 1.0$ หรือเมื่อปลายหนึ่งเป็นจุดหมุน ในขณะที่ปลายหนึ่งยึดแน่น จะให้ค่าความยาวประสิทธิภาพเพียง 0.70 ของความยาวไร้จุดยึดรั้ง แต่ถ้าปลายทั้งสองยึดแน่นทั้งคู่จะทำให้ค่าความยาวประสิทธิภาพเหลือเพียง 0.50 ของความยาวไร้จุดยึดรั้ง ดังนั้นจึงอาจกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิภาพของเสาเทียบกับความยาวไร้จุดยึดรั้งได้จาก

$$l = k \cdot l_u \quad (22)$$

เมื่อ

- l เป็นความยาวประสิทธิภาพของเสา
- l_u เป็นความยาวไร้จุดยึดรั้ง
- k เป็นตัวคูณจากสภาพของการยึดรั้งที่ปลาย

หากเสาเซได้ดังที่แสดงในรูปที่ 13 ความยาวประสิทธิภาพจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพด้วย กล่าวคือหากปลายทั้งสองข้างยึดแน่น เมื่อมีการเซ ค่า k จะมีค่า 1.0 หรือเมื่อปลายหนึ่งยึดแน่น แต่ปลายหนึ่งเป็นจุดหมุน ค่า k จะมีค่า 1.5 ในขณะที่ปลายทั้งสองข้างเป็นจุดหมุนเสาจะไม่เสถียรเมื่อมีการเซ ค่า k จะเป็น ∞

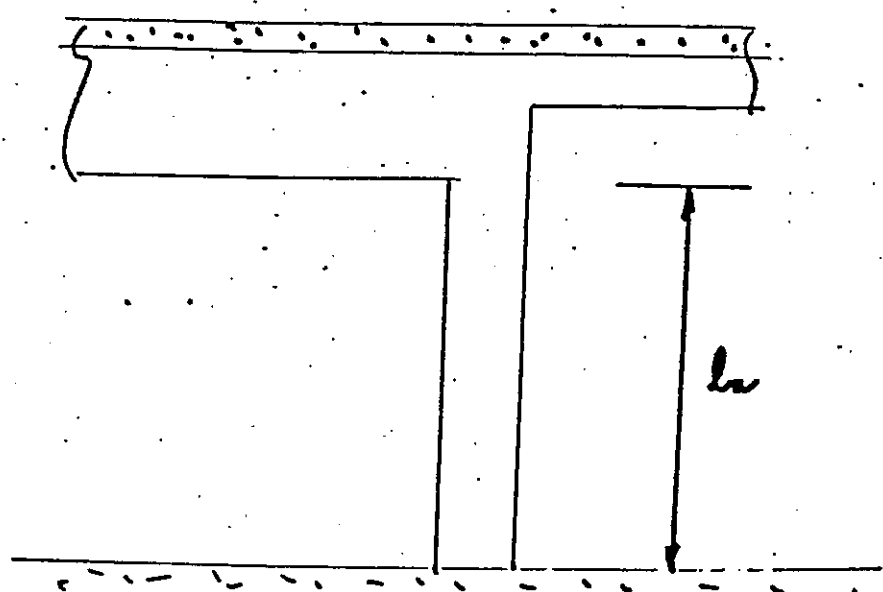
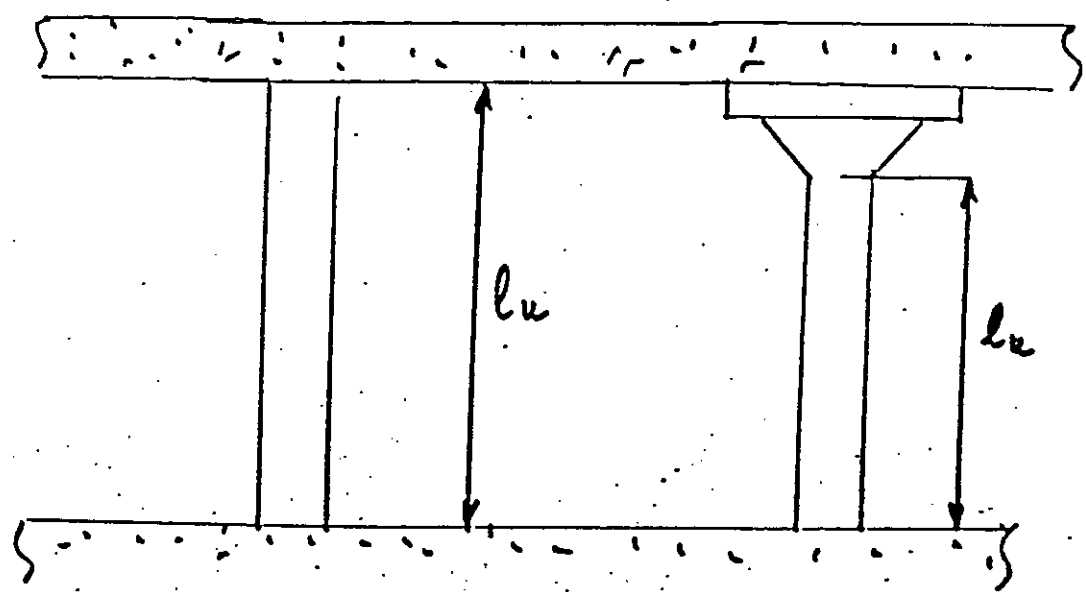
กล่าวโดยสรุปในกรณีของเสาที่ยึดรั้งไม่ให้มีการเซ ค่า k จะมีค่าจาก 0.5-1.0 แต่หากยอมให้เซได้ ค่า k จะมีค่าจาก 1.0 ถึง ∞

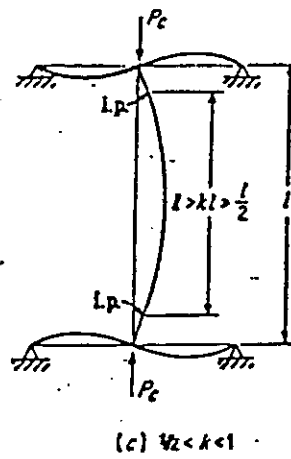
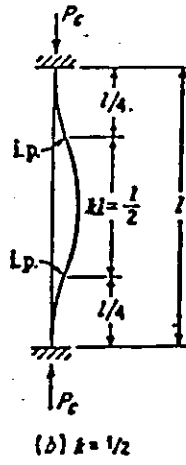
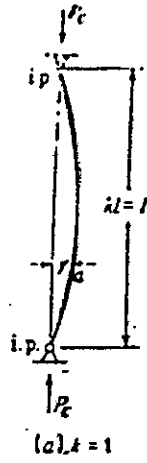
ในโครงเฟรมทั่วไปการยึดรั้งที่ปลายทั้งสองข้างของเสาจะขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของคานที่ยึดรั้งดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งอาจจำลองโครงสร้างเสาได้เสมือนมีสปริงยึดรั้งที่ปลายดังแสดงในรูปที่ 15 ค่าสปริงที่ปลายทั้งสองอาจคำนวณได้จาก

$$\psi_A = \frac{\sum (EI_c/l_c)}{\sum (EI_b/l_b)} \quad (23)$$

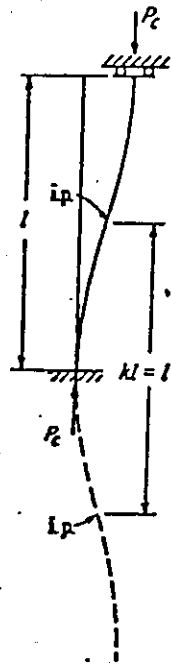
EFFECTIVE LENGTH

Un-supported length:

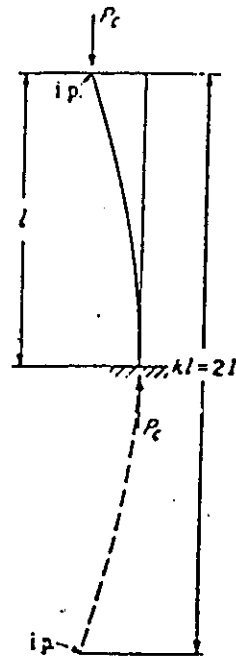




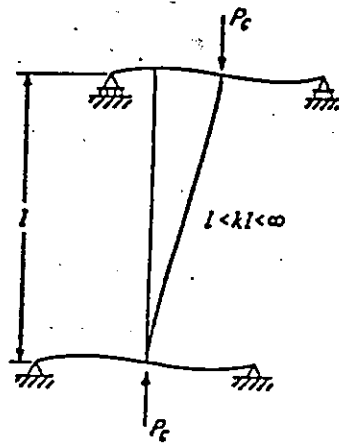
รูปที่ 12 ความยาวประสิทธิผลของเสาที่ไม่เซ.



(c) $k=1$

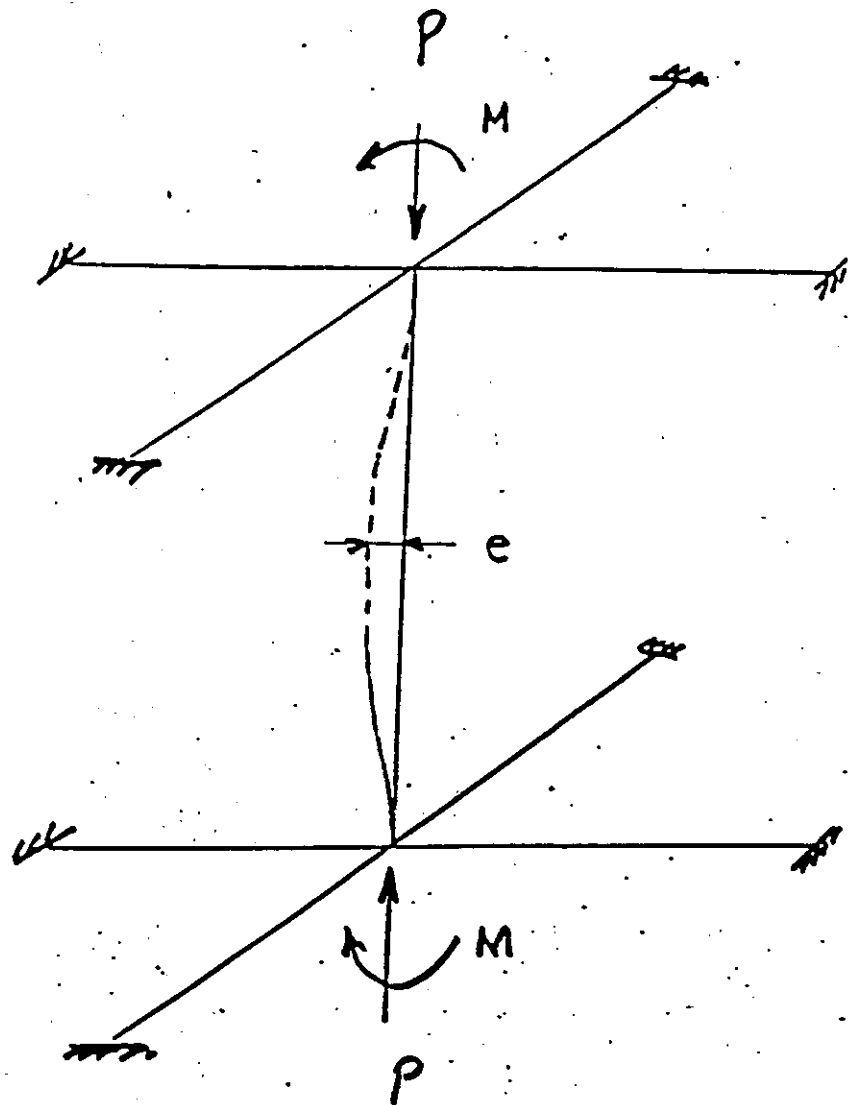


(d) $k=2$



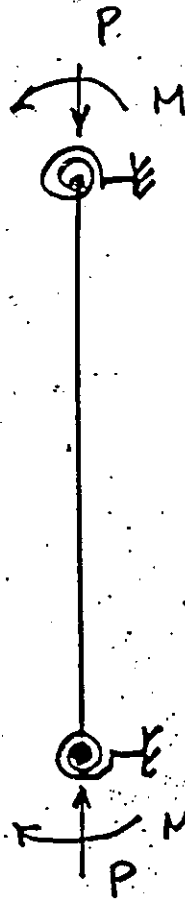
(f) $1 < k < \infty$

รูปที่ 13 ความยาวประสิทธิผลของเสา เมื่อ เซ



ADDITION $M = P \cdot e$

รูปที่ 14 การบิดงอของเสาที่ปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ 15 การจำลองแบบทางโครงสร้างเสาเพื่อหาค่าความยาวประสิทธิผล

$$\psi_B = \frac{\sum (EI_c/l_c)}{\sum (EI_b/l_b)} \quad (24)$$

โดยที่ค่า EI_c เป็นค่าสติฟเนสในเสา และ EI_b เป็นค่าสติฟเนสในคาน ทั้งนี้ให้คิดเฉพาะในแนวระนาบที่พิจารณา และเพื่อให้การหาค่า k ได้ง่ายขึ้นโดยใช้กราฟในรูปที่ 16 แยกเป็น 2 กรณีของเมื่อมียึดรั้งกับเซ (Braced Frame) และเมื่อมีการเซ (Sway Frame)

4.2 ผลของสัดส่วนความขลุค

สัดส่วนความขลุคของเสาอาจพิจารณาจากค่าความยาวประสิทธิผลของเสา ต่อรัศมีไจเรชั่น ซึ่งจะใช้เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมความขลุคของเสา สัดส่วนความขลุคอาจหาจาก

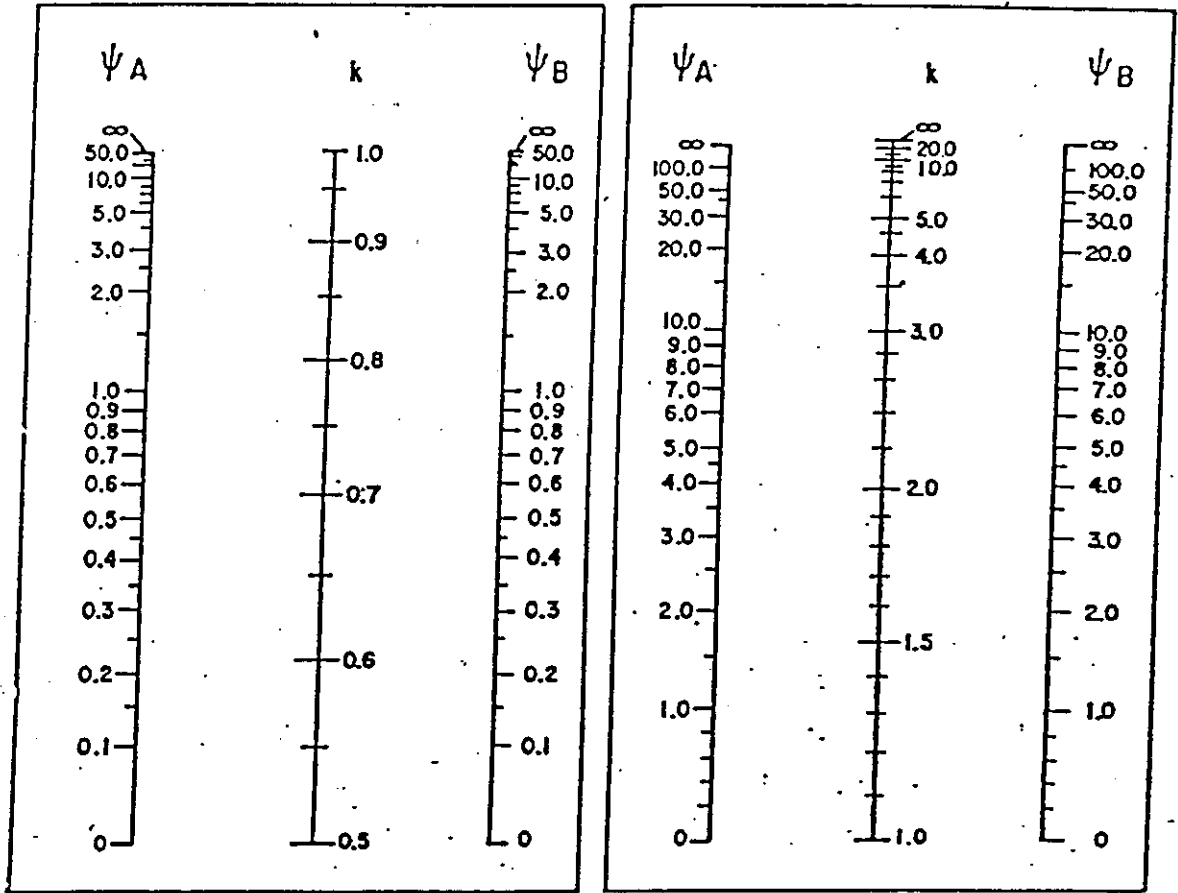
$$\text{Slenderness Ratio} = k \cdot l_u \quad (25)$$

เมื่อ k เป็นตัวคูณสำหรับความยาวประสิทธิผล
 l_u เป็นความยาวของเสาที่ไร้จุดยึด
 r เป็นรัศมีไจเรชั่นของหน้าตัด

โดยทั่วไป $I = Ar^2$ สำหรับหน้าตัดที่มีวัสดุเนื้อเดียวเช่น เหล็กหรือไม้ เป็นต้น แต่ในโครงสร้างเสาคอนกรีตมีทั้งเหล็กและคอนกรีต จึงอาจพิจารณาค่า r โดยประมาณจาก

$$\begin{aligned} r &= 0.3h && \text{เสาเหลี่ยม} \\ &= 0.25D && \text{เสากลม} \end{aligned} \quad (26)$$

ผลของความขลุคดังที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 9 อันมีผลต่อแรงอัดและในรูปที่ 10 อันมีผลต่อแรงดัด กล่าวโดยภาพรวมความขลุคจะมีผลต่อการดัดให้เสาอ่อนตัวออกจากศูนย์เสา ระยะหนีศูนย์จะส่งผลต่อเนื้อให้เพิ่มแรงดัดเป็นทวีภาค ดังแสดงในรูปที่ 17 สำหรับเฟรมที่มีการยึดรั้งกับเซ และรูปที่ 18 สำหรับเฟรมที่ปล่อยให้มีการเซ เป็นตัวชี้บ่งถึงแรงดัดที่เพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดและการอ่อนตัว (โค้งเดี่ยวหรือโค้งคู่) อันนำไปสู่การคำนวณออกแบบด้วยวิธีขยายแรงดัดในหัวข้อต่อไป



(a)

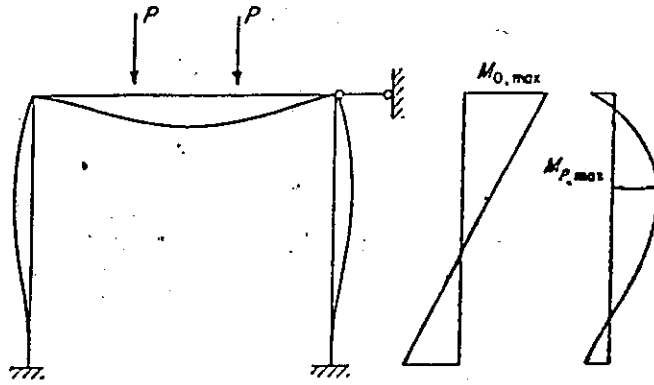
Braced Frames

(b)

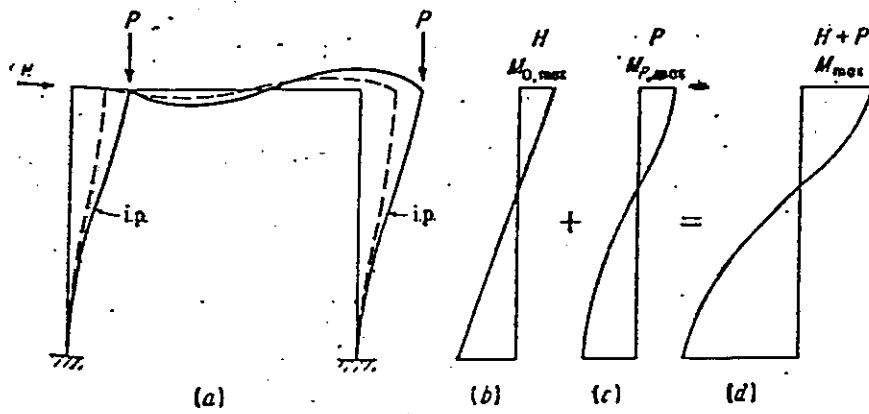
Unbraced Frames

ψ = Ratio of $\sum(EI/L_c)$ of compression members to $\sum(EI/L)$ of flexural members in a plane at one end of a compression member

k = Effective length factor



รูปที่ 17 ผลของการขูดของเฟรมที่มีการเซ



รูปที่ 18 ผลของการขูดของเฟรมที่มีการยึดครั้งกันเซ

แต่เพื่อเป็นการจำแนกเสาสั้นกับเสายาว ACI ได้กำหนดสัดส่วนความขรุขระที่พิกัดต่างกันตามลักษณะของเฟรม กล่าวคือหากสัดส่วนความขรุขระต่ำกว่าค่าในสมการต่อไปนี้จะถือเป็นเสาสั้น

ก. เฟรมที่ไม่มีการเซ

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 34-12 M1b/M2b \quad (27)$$

ข. เฟรมที่ให้เซได้

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 22 \quad (28)$$

อนึ่ง หากพบว่า

$$\frac{k \cdot l_u}{r} > 100 \quad (29)$$

ถือว่ามีความขรุขระมากเกินไป ควรจะได้รับการวิเคราะห์ด้วยวิธีพิเศษเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมทางโครงสร้างที่แท้จริง และต้องวิเคราะห์เชิงเสถียรภาพประกอบด้วย อย่างไรก็ตาม M_1 และ M_2 ทั้งนี้ Subscript "b" เป็นเครื่องหมายบ่งในกรณีของเฟรมที่ป้องกันการเซ หาก Subscript "s" หมายถึงแรงคดของเฟรมที่มีการเซได้

หากค่าความขรุขระเกินกว่าที่กำหนดไว้ในสมการ (27) หรือ (28) จะต้องพิจารณาออกแบบเป็นเสาขรุขระตามวิธีการในหัวข้อ 4.3

4.3 การออกแบบเสาด้วยวิธีการขยายแรงคด (Moment Magnification Method)

เสาขรุขระจะมีพฤติกรรมที่ส่งผลกระทบต่อแรงคดมากกว่าแรงอัด ดังนั้นวิธีการออกแบบด้วยการปรับค่ากำลังอัดในแนวแกนตามที่เคยใช้กันมาจึงไม่สอดคล้องพฤติกรรมจริง วิธีการเดิมเรียกว่าวิธีการของ Modified-R Method ยังผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากสภาพการรับแรงอย่างมาก โดยเฉพาะโครงสร้างเสาในโครงเฟรม

ผลกระทบจากความชลุดจะทำให้เกิดจากการตัดในเสาให้แน่นตัวมากขึ้น และเมื่อการแน่นตัวนี้คุณเข้ากับแรงอัดในแนวแกนทำให้เกิดแรงคัตเพิ่มขึ้นอีกอย่างมาก ในหลักการออกแบบด้วยวิธีการขยายแรงคัต ก็คือการหาแรงคัตที่แท้จริงนั่นเอง แต่ในการคำนวณหาการแน่นตัวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นเรื่องที่ค่อนข้างจะยาก เพราะลักษณะหน้าตัดของเสาไม่เท่ากันตลอดความยาว เนื่องจากผลการแตกร้าวภายใน บางส่วนเป็น Cracked section และบางส่วนเป็น Un-cracked section การยึดรั้งที่ปลายเสาทั้งสองข้างยังมีอิทธิพลต่อการแน่นตัวด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำต่อโครงสร้างในลักษณะต่าง ๆ ด้วย และจะส่งผลที่ต่างกันต่อการแน่นตัว ดังนั้นวิธีการขยายแรงคัตก็คือวิธีการคำนวณการแน่นตัวกลาง ๆ อาจเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์คือ

$$M_1 = \delta M_s \quad (30)$$

M_1 = เป็นแรงคัตของเสายาว

M_s = เป็นแรงคัตของเสาจากกรวิเคราะห้แรง

δ = เป็นตัวขยายแรงคัต

ตัวขยาย δ จะต้องมีค่าเกิน 1.0 เสมอหากมีผลกระทบจากความชลุด ดังนั้น ACI-318-89 ได้พิจารณาแยกแรงคัตจาก Gravity load ที่ไม่ทำให้โครงสร้างเซ, M_{1b} และ M_{2b} ออกจากแรงคัต จากแรงลมหรือแรงทางราบที่ทำให้โครงสร้างเซออกไป คือ M_{1s} และ M_{2s} และเขียนสมการเสียใหม่คือ

$$M_c = \delta_b M_{2b} + \delta_s M_{2s} \quad (31)$$

โดยที่

- M_{2b} เป็นแรงคัตปลายที่มีค่าสูงกว่า จากแรงที่ไม่มีการเซ
- M_{2s} เป็นแรงคัตปลายที่มีค่าสูงกว่า จากแรงที่ทำให้เซได้
- M_{1b} เป็นแรงคัตปลายที่มีค่าต่ำกว่า จากแรงที่ไม่ทำให้เซ
- M_{1s} เป็นแรงคัตปลายที่มีค่าสูงกว่า จากแรงที่ทำให้เซได้
- M_c เป็นแรงคัตรวมที่ใช้ในการออกแบบ
- δ_b เป็นตัวขยายแรงคัตจากผลของแรงคัตแบบไม่เซ
- δ_s เป็นตัวขยายแรงคัตจากผลของแรงคัตแบบเซได้

ตัวขยายตามหลักการหรือทฤษฎี อาจใช้สมการที่ (32)

$$S = \frac{C_m}{1 - P_u/\phi P_c} \geq 1.0 \quad (32)$$

- โดยที่
- S เป็นตัวขยายแรงดัด
 - P_u เป็นแรงที่แนวแกนที่กระทำต่อเสา
 - P_c เป็นกำลังของเสาเชิงทฤษฎีของ Euler
 - C_m เป็นตัวคูณจากผลของการดัด

เพื่อให้สอดคล้องกับ ACI-318-89 หากแยกพิจารณาตัวขยายแรงดัด คือ δ_b เป็นผลจากการดัดเมื่อเฟรมไม้เซ จากผลของแรงในแนวตั้งจากศูนย์ถ่วงของโลก ผลกระทบจะเกิดเพียงที่เสาด้านหนึ่งต้นใดที่พิจารณา

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - P_u/\phi P_c} \quad (33)$$

แต่ δ เป็นผลการดัดที่สะสมทั้งชั้น กล่าวคือการเซจะเกิดเท่ากันทุกต้นในชั้นนั้น การคิดตัวขยายแรงดัดจึงต้องพิจารณาจากแรงรวมทั้งหมดในชั้นนั้น ๆ

$$\delta_s = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi P_c}} \quad (34)$$

ตัวขยายแรงดัด δ ทั้งในสองกรณีจะมีผลจากการอ่อนตัว และแรงที่กระทำในแนวแกน ซึ่ง C_m จะส่งผลโดยตรงจากการดัดจากแรงดัดที่หัวท้ายของเสาทั้งสองปลาย

ก. เมื่อไม่มีการเซ

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \leq 0.4 \quad (35)$$

ข. เมื่อเสาเซได้

$$C_m = 1.0 \quad (36)$$

M_{1b} และ M_{2b} ในกรณีตามสมการที่ (35) นี้ โดยทั่วไปจะถือ M_{2b} มีค่าเป็นบวก (+) เสมอ และ M_{1b} จะมีค่าเป็นบวก (+) หากทำให้เกิดการคดโค้งเดียว แต่หาก M_{1b} ทำให้เกิดการดัดสองโค้งให้คิดเป็นลบ (-) ทั้งนี้เพราะการดัดสองโค้งจะลดการแอ่นตัวลง

ผลต่อตัวขยาย, δ จากแรงที่กระทำในแนวแกนคือสัดส่วนของ P_u/P_c เมื่อ P_u เป็นแรงจากน้ำหนักบรรทุก และ P_c เป็นกำลังของเสาจากขนาดและกำลังวัสดุ ; ความขลุ่ย และ Stiffness ของหน้าตัดจะมีผลโดยตรงต่อกำลังคือ

$$P_c = \frac{EI}{(k.l_u)^2} \quad (37)$$

ความขลุ่ย ($k.l_u$) เป็นผลของความขลุ่ยตั้งที่ก่แล้วตอนต้น ส่วน EI เป็นผลจากคุณสมบัติหน้าตัด ซึ่งในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กยากที่จะหาค่าได้ถูกต้องตามสภาพจริงทุกสภาวะ ACI ได้กำหนดค่าอย่างละเอียดไว้คือ

$$EI = \frac{E_c I_g / 5 + E_s I_{sc}}{1 + d} \quad (38)$$

โดยที่

EI เป็นค่า Stiffness ของเสา

E_c เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

E_s เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

I_b เป็นค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียร์ของหน้าตัดรวม

I_{sc} เป็นค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียร์ของเหล็กเสริมรอบหน้าตัดเสา

และ

d เป็นสัดส่วนของแรงอัดในแนวแกนจากน้ำหนักคงที่ต่อแรงอัดในแนวแกนจากน้ำหนักรวม (คูณค่าตัวคูณกำลังแล้ว)

แต่ความยุ่งยากในสมการที่ 37 เนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมยังไม่ทราบแน่ชัด ดังนั้นการออกแบบเชิงอนุรักษ์อาจเลือกใช้

$$EI = \frac{E_c I_g / 2.5}{1 + d} \quad (39)$$

ซึ่งจะให้ค่าใกล้เคียงกับสมการที่ 37 หากปริมาณเหล็กเสริมประมาณ 1-2% แต่หากใช้เหล็กเสริมเกินกว่านั้น อาจให้ค่าเชิงอนุรักษ์มากกว่า

4.4 ขั้นตอนการออกแบบเสาขลุค

ด้วยหลักการออกแบบเสาขลุคจะเพิ่มขั้นตอนจากออกแบบเสาสั้นเพียงการขยายแรงดัดให้สอดคล้องกับพฤติกรรม แล้วจะสามารถคำนวณออกแบบตามวิธีการของเสาสั้นได้ทุกขั้นตอน หรืออาจจะสรุปได้ตามขั้นตอนดังนี้

1) ตรวจสอบความขลุคของเส้าว่ายู่ในทึกัดเสาสั้นหรือไม่ ตามสมการที่ 27 สำหรับเสาที่ไม่มี การเซ และตามสำการที่ 28 เมื่อเสาเซได้

2) เมื่อพบว่าเป็นเสายาว จะต้องขยายค่าแรงดัดให้เพิ่มมากขึ้น โดยแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแรงดัดที่ไม่ทำให้เกิดการเซ, M_{2u} จากแรงศูนย์ถ่วงของโลก (Gravity load และส่วนของแรงดัดที่มีการเซ, M_{2s} จากแรงทางราบ เช่น แรงลมหรือแผ่นดินไหว

3) จากการวิเคราะห์โครงสร้างจะต้องรู้ค่า, M_{2u} , M_{2s} , และ M_{2c} , ส่วนแรงอัดจะต้องแยกเป็นส่วนจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกรวม (P_u^D , P_u^T)

4) คำนวณหาค่ากำลังตามสูตรของ Euler สมการที่ 37 ของเสาแต่ละต้น; (P_c) และเมื่อรวม ทั้งขึ้น (ΣP_c) ทั้งนี้จะต้องเลือกคำนวณ EI ตามความละเอียดที่เหมาะสม

5) คำนวณหาตัวขยาย δ_b สำหรับส่วนแรงดัดของเสาที่ไม่เซ และ δ_s สำหรับส่วนแรงดัดของ เสาที่เซได้แล้วหาแรงดัดรวม

$$M_c = \delta_b M_{2u} + \delta_s M_{2s}$$

6) จากค่า M_c ที่ได้จาก (5) ซึ่งเป็นค่าแรงดัดที่ขยายเรียบร้อยแล้ว กับค่าแรงอัดที่ได้จาก (3) ใช้ออกแบบเสาในทำนองเดียวกับเสาสั้นทุกขั้นตอน