



หลักสูตร การออกแบบโครงสร้างอาคารสูง

ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

Column Analysis and Design I

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์

ร่วมกับ

ฝ่ายการศึกษาต่อเนื่อง จุฬาลงกรณ์

## Ultimate Strength Design

### การออกแบบด้วยวิธีการกำลังประลัย

โดย

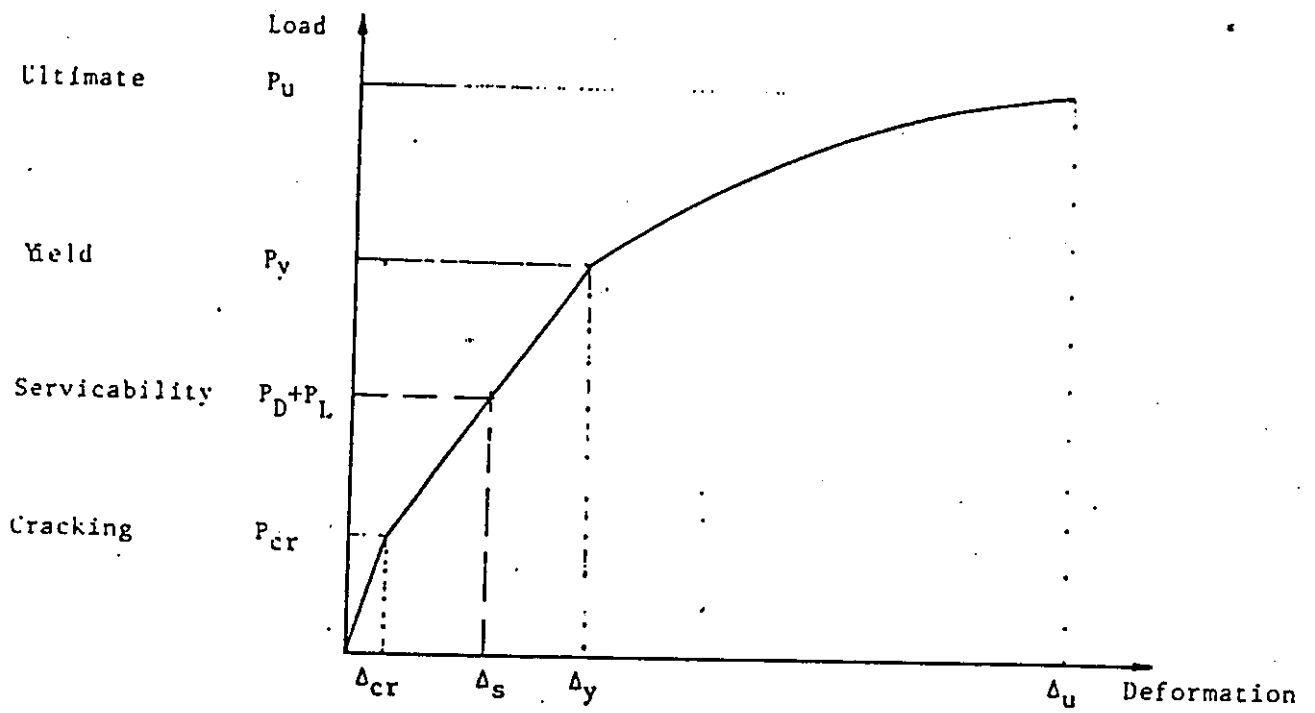
ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ติมสุวรรณ

#### 1. บทนำ

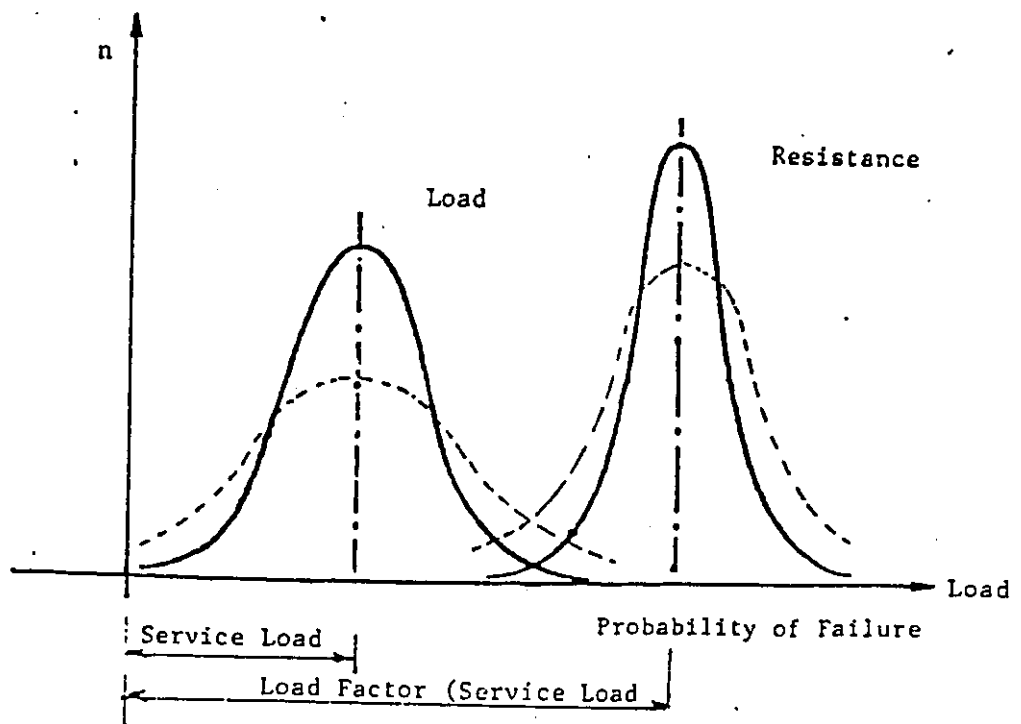
การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนมากจะเลือกใช้วิธีการกำลังใช้งาน (Working Stress Design, WSD) กันมานานพอควร ทั้งนี้เพราะมาตรฐานการออกแบบ (Code of Practices) และกฎกระทรวงที่ออกตาม พ.ร.บ. ควบคุมอาคารของเรายังพัฒนาไม่ทันกับเทคโนโลยีที่เจริญรุดหน้าไปอย่างไม่หยุดยั้ง อย่างไรก็ตามในการบรรยายพิเศษนี้จะใช้วิธีการกำลังประลัย (Ultimate Strength Design, WSD) เพื่อให้สอดคล้องกับการพัฒนาในทุก ๆ ด้านที่เกี่ยวข้อง ทั้งในส่วนของพฤติกรรมทางโครงสร้าง สมบัติฐานการออกแบบ มาตรฐานการก่อสร้าง และระบบควบคุมงาน เป็นต้น

พฤติกรรมทางโครงสร้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังที่แสดงในรูปที่ 1 จะชี้ให้เห็นถึงสภาพภาพขององค์อาคารจากเริ่มแรกจนถึงขั้นแตกหัก ถึงกำลังคลากและจนถึงกำลังประลัย ในสภาวะการใช้งานสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะอยู่ระหว่างช่วงที่มีรอยร้าวภายในแต่จะต่ำกว่าจุดคลาก ซึ่งจะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและการอ่อนตัวในสภาวะการใช้งานจะเป็นเส้นตรง ซึ่งมีพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic) กล่าวคือเมื่อกดน้ำหนักก็อ่อนตัวลง แต่เมื่อยกน้ำหนักออกก็จะตั้งกลับเข้าอยู่ในตำแหน่งเดิม การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการกำลังใช้งานจะครอบคลุมพฤติกรรมของโครงสร้างเพียงช่วงแคบๆ และที่น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ แต่ในสภาพประลัยจะเห็นว่าพฤติกรรมของโครงสร้างจะต้องผ่านสภาวะการใช้งานไปแล้วจนถึงจุดคลาก แล้วเริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (In-elastic) ปรากฏขึ้น ซึ่งในช่วงนี้จะเห็นโครงสร้างรับน้ำหนักได้เพิ่มเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การอ่อนตัวสูงขึ้นจนถึงขั้นวิบัติ การออกแบบด้วยวิธีการกำลังประลัยจะครอบคลุมพฤติกรรมที่กว้างขึ้น ครอบคลุมสภาพต่าง ๆ ทุกขั้นตอนจนถึงขั้นวิบัติ และเห็นความเหนียวทางโครงสร้างได้โดยชัดเจน

อย่างไรก็ดีในการออกแบบหากจะให้ครอบคลุมทัศนที่กว้างขึ้นไปอีก อาจจะต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมเชิงสถิติในกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเข้ามาประกอบด้วย คือ คำนึงถึงโอกาสที่จะเกิด (Probabilistic of



รูปที่ 1 พฤติกรรมของ โครงสร้างและสภาวะการรับแรง



รูปที่ 2 ปรัชญาการออกแบบและความคุมงาน โครงสร้าง

Occurance) ทั้งที่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก หรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และโอกาสที่จะเกิดขึ้นกับแรงต่อต้านภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างอันนั้น ซึ่งจะรวมไปถึงคุณภาพวัสดุ มาตรฐานการก่อสร้าง และมาตรฐานการควบคุมงาน ซึ่งจะครอบคลุมขั้นตอนของการออกแบบ การก่อสร้าง และการใช้งาน การออกแบบในลักษณะนี้จะต้องกำหนดขีดจำกัดในสภาพการณ์เชิงพฤติกรรมตามสภาวะการใช้งาน (Serviceability Limit State) และในสภาวะกำลังประลัย (Ultimate Limit State) ซึ่งเรียกวิธีการแบบนี้ว่า การออกแบบในภาวะสุดท้าย (Limit State Design) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในยุโรป และหลายประเทศทั่วโลก

การออกแบบด้วยวิธีการกำลังประลัยแม้จะไม่ครอบคลุมโดยตรงต่อพฤติกรรมทางโครงสร้างเชิงสถิติ อย่างเช่นวิธีการในภาวะสุดท้าย แต่ก็ได้แยกออกเป็น 2 สภาวะเช่นกันคือ ในสภาวะของการใช้งานจะถูกกำหนดไว้ในข้อกำหนดทั่วไป (General Requirement) อันประกอบด้วยพิกัด หรือมาตรฐานขั้นต่ำ ส่วนในสภาวะกำลังประลัยจะใช้เป็นเกณฑ์การคำนวณออกแบบ (Dimensioning) หาขนาดของโครงสร้างและปริมาณเหล็กเสริม ในขั้นตอนการออกแบบ ในการออกแบบนั้นแม้จะได้ขนาดและปริมาณเหล็กเสริมแล้ว แต่ในขั้นตอนการทำรายละเอียดเหล็กเสริมยังจะต้องตรวจสอบพิกัดและเกณฑ์กำหนดที่ถูกบังคับเพื่อให้สภาวะการใช้งานเป็นไปได้ด้วยดีทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

บทความนี้สรุปเนื้อหาเกี่ยวกับการจำลองโครงสร้าง การออกแบบ และการทำรายละเอียดก่อสร้างขององค์อาคาร รับแรงดัด แรงอัด แรงเฉือน แรงบิด และพฤติกรรมร่วม ระหว่างแรงต่าง ๆ ในชิ้นส่วนโครงสร้าง การทำรายละเอียดก่อสร้างจะกล่าวย่อเฉพาะพิกัดต่ำสุด สูงสุด และมาตรฐานขั้นต่ำเท่านั้น

## 2. ปรัชญาการออกแบบ

ตามปรัชญาการออกแบบทางโครงสร้าง คือจะต้องให้โครงสร้างมีความมั่นคงแข็งแรง และเกิดความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน กราฟที่แสดงในรูปที่ 2 เป็นโอกาสการเกิดของแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง (Load) และโอกาสการเกิดของแรงต้านทานภายในหรือกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้าง (Resistance) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างจะสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกหรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสมอ จึงจะทำให้โครงสร้างยืนหยัดอยู่ได้และมีความมั่นคงแข็งแรง หากโอกาสที่กราฟทั้งสองเกิดซ้อนกันตามที่แสดงด้วยแรงในรูป 2 แสดงถึงว่าน้ำหนักสูงกว่ากำลังต่อต้าน อันจะเป็นสาเหตุของการวิบัติที่จะเกิดขึ้นต่อโครงสร้าง ปรัชญาการออกแบบจึงจำเป็นจะต้องออกแบบให้กำลังสูงกว่าแรงที่เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวคูณน้ำหนัก (Load Factor) ในการออกแบบให้ระดับกำลังต่อต้านสูงกว่าการใช้งาน ยิ่งค่าตัวคูณน้ำหนักยิ่งสูงก็จะยิ่งขยายกำลังของ

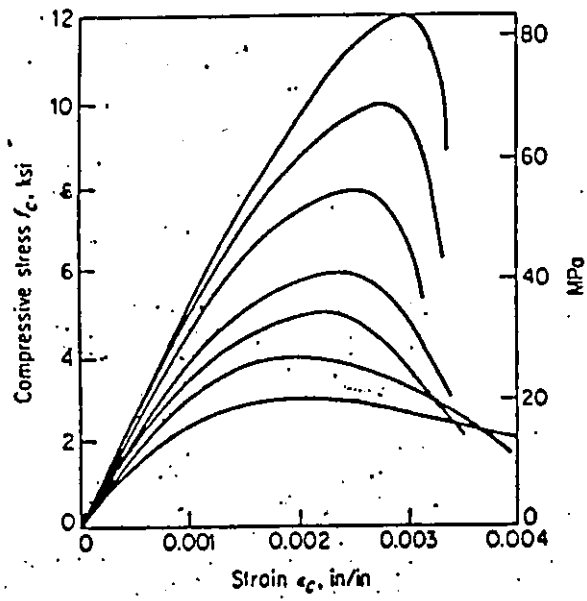
โครงสร้างให้สูงตามลำดับ โอกาสที่กราฟซ้อนกันก็จะมีน้อยลง อีกวิธีหนึ่งในการจะหลีกเลี่ยงการวิบัติของโครงสร้างก็ด้วยการควบคุมห้หน้าทับรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง และหรือควบคุมให้กำลังต่อต้านภายในของโครงสร้าง ให้ดีเยี่ยมมีความแปรปรวนน้อย ดังกราฟรูปประในรูป กราฟจะสูงขึ้นมากขึ้นและพื้นที่ใต้กราฟก็จะลด โอกาสการซ้ำซ้อนลง ถือเป็นารลดโอกาสการวิบัติได้เช่นกัน ตามใน ACI Code เสมือนการควบคุม  $\phi$  factor หรือใน CEB-Code เรียกว่า partial factor safety,  $\gamma$  ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างปึง นอกจากจะป้องกันกรวิบัติแล้วยังจะมีผลต่อความเชื่อถือทางโครงสร้าง ให้ความมั่นคงแข็งแรง ให้ความคงทนการรต่อการใช้งาน และยังจะนำไปสู่การประหยัดอีกด้วย

วัสดุก่อสร้างของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม นอกจากนี้ยังอาจมีส่วนที่อ่านจะต้องพิจารณาเพิ่มเติม คือ แบบหล่อคอนกรีต และขั้นตอนการก่อสร้าง คอนกรีตรับแรงอัดจะมีพฤติกรรมเป็นรูปโค้ง ช่วงแรกอาจจะใกล้เคียงเส้นตรงอยู่ประมาณ 45% ของกำลังประลัย หลังจากนั้นจะเริ่มโค้งมากขึ้นเป็นลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและค่าความเครียดของคอนกรีตอาจใช้เป็นรูปพาราโบลา โดยมีค่ากำลังสูงสุด  $f_c'$  ที่การยืดตัวสูงสุด  $\epsilon_u$  ประมาณ 0.003 กำลังประลัยค่า  $f_c$  จะมีค่าสูงสุดที่ค่าความเครียดประมาณ 0.002 และที่ความเครียดสูงสุด  $\epsilon_u = 0.003$  ค่ากำลังจะลดลงต่ำกว่ากำลังประลัย หรือ  $f_c'$  สมการความสัมพันธ์อาจเขียนได้ คือ

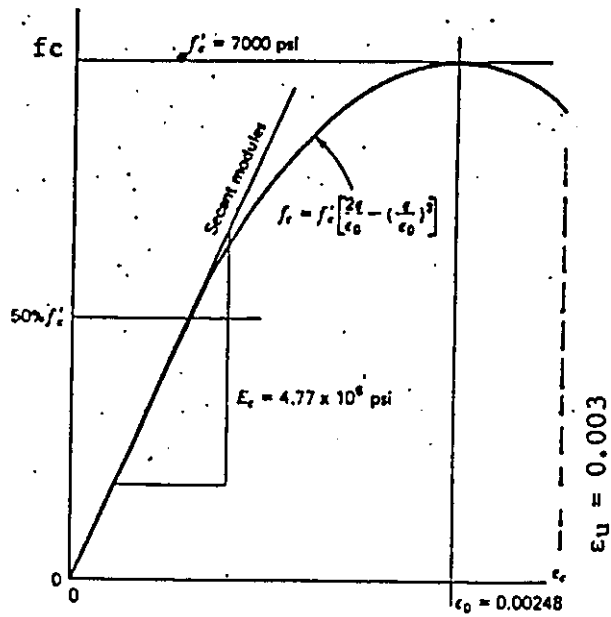
$$f_c = f_c' \left[ \frac{2\epsilon}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

- เมื่อ
- $f_c$  = เป็นกำลังของคอนกรีตที่จุดใด ๆ
  - $f_c'$  = เป็นกำลังของคอนกรีตที่ 28 วัน (ทรงกระบอก)
  - $\epsilon$  = ค่าความเครียดที่พิจารณา
  - $\epsilon_0$  = ค่าความเครียดที่กำลังสูงสุด  $\sim 0.002$

กราฟความสัมพันธ์ของเหล็กเสริมอาจแยกออกเป็น 2 ตอนของเส้นตรง (Bi-linear) ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ประลัยมีค่า  $f_{su}$ , และหน่วยแรงที่จุดคาน  $f_y$ , ค่าความเครียดที่จุดคาน  $\epsilon_y$  และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น  $E_s$  หาได้จาก  $f_y/\epsilon_y$  ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ  $2 \times 10^6$  กก/ซม<sup>2</sup> ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะควบคุมกำลังที่จุดคาน  $f_y$  กำลังประลัย  $f_{su}$  และการยืดตัวสูงสุด เหล็กเสริมข้ออ้อยตาม ม.อ.ก. มีกำลังคานที่ 3,000, 4,000 และ 5,000 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับ SD30, SD40 และ SD50 ตามลำดับ การยืดตัวถูกกำหนดว่าจะต้องไม่น้อยกว่า 14% ใน ACI ได้กำหนดกำลังของเหล็กเสริมหลังจุดคาน



a) กราฟกำลังของคอนกรีต



b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์กำลังอัดกับความเครียดของคอนกรีต

$\epsilon_y$  ไว้เพียง  $f_y$  เท่านั้น โดยไม่คิดผลของ strain hardening

ตัวคูณน้ำหนัก (Load Factor) ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. หรือ ACI กำหนดเหมือนกัน หากมีเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรกำหนดให้ใช้

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (1) \text{ ACI-9.2}$$

เมื่อ

$$U = \text{น้ำหนักคำนวณด้วยวิธีกำลังประลัย}$$

$$D = \text{น้ำหนักบรรทุกคงที่}$$

$$L = \text{น้ำหนักบรรทุกจร}$$

หากมีแรงลมประจักษ์จะใช้

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) \quad (2) \text{ ACI-9.3}$$

หรือ  $U = 0.9D + 1.3W \quad (3) \text{ ACI-9.2}$

โดยที่

$$W = \text{น้ำหนักบรรทุกจากแรงลม}$$

อนึ่งหากพิจารณาถึงแรงจากแผ่นดินไหว อาจแทนค่าแรงแผ่นดินไหว,  $E$  โดยกำหนดว่า  $W = 1.1E$  แล้วใช้แทนค่าในสมการที่ 9.3 หรือ 9.2 ตามลำดับ อนึ่งค่าใน 9.2 และ 9.3 ให้ถือค่าที่สูงกว่าในการคำนวณออกแบบโครงสร้าง

ในการออกแบบบางครั้งอาจต้องพิจารณาถึงแรงดันดิน แรงดันน้ำ และผลจากการทรุดตัวที่ต่างกัน มาร่วมในการคำนวณด้วย ซึ่งจะต้องเลือกใช้สูตร

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H \quad (4) \text{ ACI-9.4}$$

$$U = 0.75(1.4D + 1.4T + 1.7L) \quad (5) \text{ ACI-9.5}$$

แต่ต้องไม่น้อยกว่า

$$U = 1.4(D + T) \quad (6) \text{ ACI-9.6}$$

ทั้งนี้เมื่อ

$$H = \text{แรงดันดิน หรือแรงดันน้ำ}$$

$$T = \text{แรงจากการทรุดตัวต่างกันของโครงสร้าง}$$

ในการออกแบบด้วยวิธีกำลังประลัยยังจะต้องพิจารณาจากตัวคูณกำลัง (Strength Reduction Factor,  $\phi$ ) ซึ่งจะพิจารณาจากลักษณะของแรงและพฤติกรรมทางโครงสร้าง ACI ได้กำหนดไว้ดังนี้คือ

แรงดัด	0.90
แรงดัดร่วมกับแรงดึง	0.90
แรงดึงอย่างเดียว	0.90
แรงอัดหรือแรงอัดร่วมกับแรงดัด (เหล็กปลอกเกลียว)	0.75
(เหล็กปลอกเดี่ยว)	0.70
แรงเฉือนและแรงบิด	0.85
แรงกด (Bearing)	0.70
แรงดัดของคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก	0.65

ในการออกแบบโดยวิธีกำลังประลัยอาจจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับกำลังประลัย (Ultimate Strength) และกำลังเชิงทฤษฎี (Nominal Strength) กล่าวคือ น้ำหนักบรรทุกจากแรงภายนอกที่คูณด้วยตัวคูณกำลังแล้วอาจเรียกว่า แรงประลัย (U) ที่ใช้ในการออกแบบ เช่นค่าแรงดัดใช้  $M_u$ , แรงเฉือนใช้  $V_u$ , แรงบิด  $T_u$ , หรือแรงอัด  $P_u$  เป็นต้น แต่แรงต่อต้านภายในคำนวณเชิงทฤษฎี สำหรับแรงดัด แรงเฉือน แรงบิด และแรงอัด อาจเรียกว่า  $M_n$ ,  $V_n$ ,  $T_n$  และ  $P_n$  เป็นต้น ดังนั้นความสัมพันธ์ส่วนนี้จะต้องใช้ตัวคูณกำลังเป็นตัวประกอบคือ

$$\begin{aligned}
 M_u &= \phi M_n & (7) \\
 V_u &= \phi V_n \\
 T_u &= \phi T_n \\
 P_u &= \phi P_n
 \end{aligned}$$

ทั้งนี้เพื่อให้เป็นไปตามส่วนค่าความปลอดภัยอันเกี่ยวกับกำลังของวัสดุ และความคลาดเคลื่อนของขนาดและมิติต่าง ๆ อันเกิดจากการก่อสร้าง

ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและตัวคูณกำลังตามที่ระบุใน ACI หรือในมาตรฐานการออกแบบนี้ จะต้องควบคุมให้ได้ทั้งน้ำหนักบรรทุก กำลังของวัสดุ และความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนโครงสร้าง กล่าวคือ



น้ำหนักบรรทุกจะต้องเป็นไปตามสภาพจริงและคิดครบทุกอย่าง ส่วนกำลังของเหล็กเสริมจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน ม.อ.ก. ทั้งกำลังคานากำลังประลัย และการบิดตัว และกำลังของคอนกรีตจะอยู่ภายใต้ความเชื่อถือได้เกินกว่า 90% ของเกณฑ์การยอมรับคือจะยอมให้ค่าที่ตกได้ไม่เกิน 10% จากผลการทดสอบจะต้องได้ค่าเกินกว่า

$$f_c \geq f_c' - 1.34S \quad (8)$$

โดยที่

- $f_c$  = ค่าการทดสอบที่ได้
- $f_c'$  = ค่ากำลังคอนกรีตที่ระบุในการออกแบบ
- $S$  = เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง

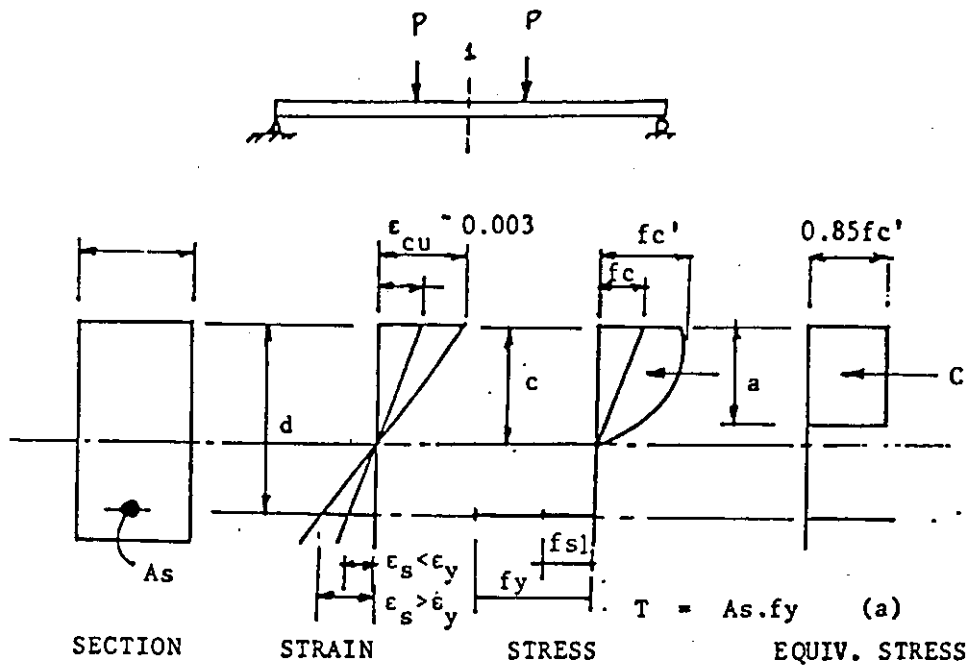
เนื่องในการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตอาจพิจารณาให้กำลังสูงกว่าค่าที่ใช้ออกแบบตามเกณฑ์ และระดับฝีมือในการทำงานโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประกอบได้ เช่น กำลังคอนกรีตอาจออกแบบส่วนผสมที่  $f_{cr} = f_c' + 1.34S$  เป็นต้น ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้างในส่วนที่เกี่ยวกับขนาดและมิติของชิ้นส่วนโครงสร้าง คือ ความลึกของหน้าตัด, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และตำแหน่งการตัดหรือหยุดเหล็ก เป็นต้น อาจจะต้องควบคุมให้เป็นไปตามกำหนดในตารางที่ 1

### 3. แรงคัต (Flexure)

พฤติกรรมรับแรงคัตของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่ทราบโดยหลักการว่ากำหนดให้คอนกรีตรับแรงอัด และเหล็กเสริมรับแรงดึง มีเพียงบางกรณีเท่านั้นที่ยอมให้เหล็กเสริมช่วยรับแรงอัดได้ด้วย แต่ยังคงต้องมีข้อกำหนดเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง ในการจำลองพฤติกรรมองค์อาคารรับแรงคัต จะแยกออกเป็น 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 5 คือส่วนที่รับแรงอัดเหนือแกนสะเทิน ซึ่งคอนกรีตจะเป็นส่วนที่รับไปทั้งหมด และในส่วนที่รับแรงดึงใต้แกนสะเทินซึ่งเหล็กเสริมจะเป็นส่วนแบกรับไป คอนกรีตอาจมีส่วนช่วยอยู่บ้างเพียงเล็กน้อย แต่อาจจะไม่คิดเพราะมีค่าน้อยมาก และสนับสนุนแรงคัตภายในได้น้อยนิดเดียว

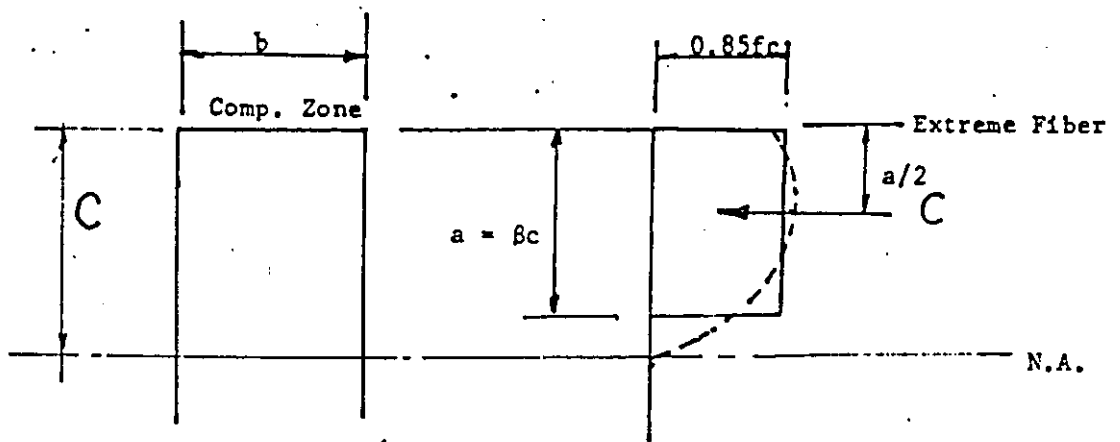
การรับแรงอัดในคอนกรีตจะแปรตามค่าความเครียดแรงคัต ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกสุดของหน้าตัด และจะมีค่าเป็นศูนย์ที่แนวแกนสะเทิน ซึ่งตามพฤติกรรมจริงของคอนกรีตอาจเริ่มต้นช่วงอีลาสติกที่เป็นเส้นตรง จนถึงประมาณ 45% ของกำลังสูงสุดของคอนกรีต แต่เพื่อความเครียดเพิ่มขึ้น กราฟจะเริ่มเป็นเส้นโค้งรูปพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 6 อย่างไรก็ตามเพื่อให้การคำนวณเป็นไปอย่างง่าย Hognestead ได้เสนอแนะ





1. Elastic
2. Ultimate

รูปที่ 5 ความเครียดและการกระจายแรงภายในภายใต้แรงคด



$$C = \int_0^C f_c(\epsilon_0, f_c') \cdot dby \quad (a)$$

หรือ  $C = 0.85f_c' \cdot a \cdot b \quad (b)$

รูปที่ 6 หน่วยแรงเสมือนของคอนกรีตรับแรงอัด

ใน ACI ให้การกระจายแรงเสมือน (Equivalent Stress Block) โดยกำหนดหน่วยแรงกระจายบนหน้าตัดอย่างสม่ำเสมอด้วยค่าความดัน  $0.85 f_c'$  ตลอดความกว้างของหน้าตัด,  $b$ , และความลึก,  $a$  โดยที่ค่า  $a = \beta c$  เมื่อ  $c$  เป็นระยะจากแกนสะเหินจนถึงผิวนอกสุดที่รับแรงอัด และ  $\beta$  เป็นค่าคงที่ตามกำลังของคอนกรีต  $f_c'$  โดยกำหนดให้  $\beta = 0.85$  เมื่อ  $f_c'$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $280 \text{ kg/cm}^2$  และให้ลดลง  $0.05$  ทุกค่าที่เพิ่มขึ้น  $70 \text{ กก./ซม}^2$  ของ  $f_c'$

การรับแรงดึงในเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเครียด ณ ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม โดยมีพฤติกรรมเป็นไปตามค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในกราฟรูปที่ 4 แต่เพื่อให้ง่ายในการคำนวณอาจพิจารณาเป็น Bi-linear ตามที่กล่าวแล้วคือ ในช่วงอีลาสติกจะเพิ่มแรงตามสัดส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่น,  $E_s$  จนถึงจุดคดฉาก  $f_y$  และหลังจากนั้นแม้ความเครียดจะเพิ่มขึ้นแต่ค่ากำลังจะยังคงเท่ากับ  $f_y$  ไปจนถึงขั้นวิบัติ

จากรูปที่ 7 สามารถคำนวณแรงภายในของชิ้นส่วนรับแรงคดได้จาก

$$C = 0.85f_c' \cdot a \cdot b = 0.85f_c' \cdot \beta c \cdot b \quad (9)$$

$$T = A_s \cdot f_y \quad (10)$$

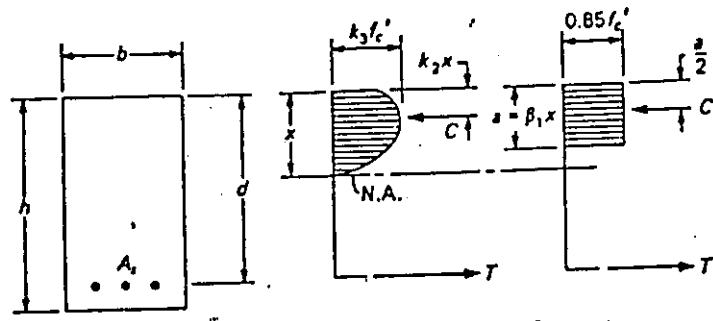
ในภาวะสมดุลของแรง (Equilibrium)  $C$  และ  $T$  ต้องมีค่าเท่ากัน หากจะกำหนดให้กำลังของวัสดุคงที่จะพบว่าตัวแปรหลักขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริม และการปรับระยะแกนสะเหินให้เกิดภาวะสมดุลของแรงและภายใต้ภาวะสมดุลของแรงนี้จะสามารถคำนวณหาแรงคดภายในได้จาก

$$M = \begin{cases} C (d-a/2) \\ T \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{หรือ } M = A_s \cdot f_y (d-a/2) \quad (12)$$

$$\text{หรือ } M = 0.85f_c' \cdot b \cdot a (d-a/2) \quad (13)$$

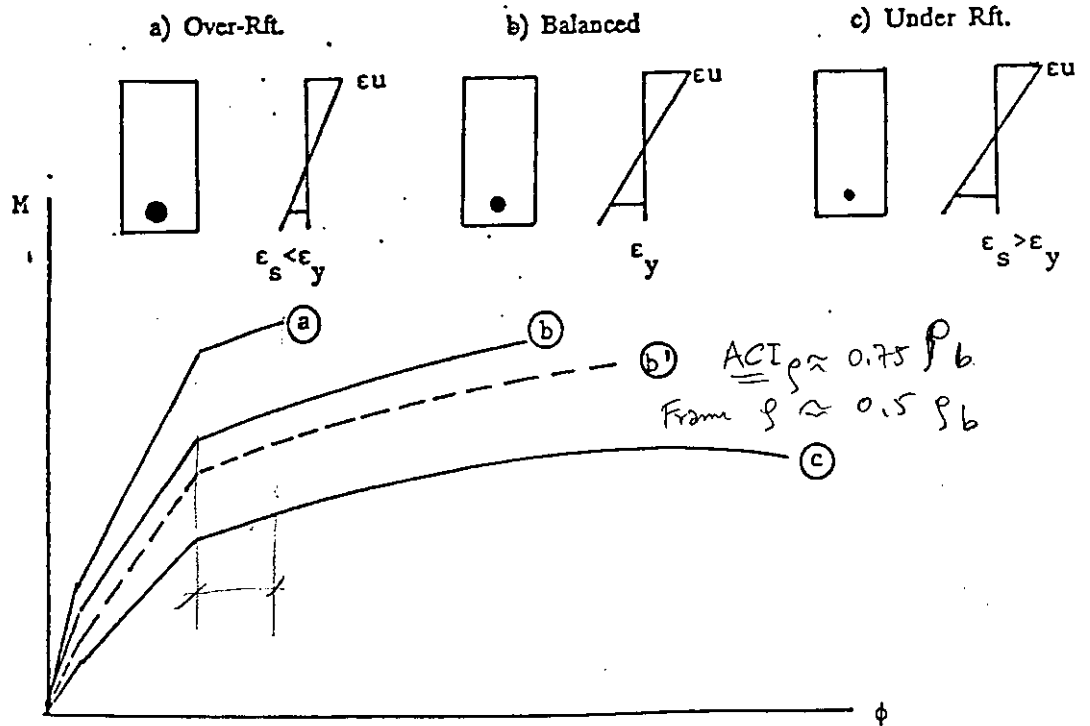
อย่างไรก็ตามปริมาณเหล็กเสริมมีความสำคัญสูงสุดในการควบคุมพฤติกรรมทางโครงสร้างโดยเฉพาะความเหนียวทางโครงสร้าง รูปที่ 8 เป็นภาพแสดงถึงคานหน้าตัดเดียวกันแต่ปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน หากเหล็กเสริมมาก (a) คานอาจรับแรงคดได้สูงกว่า แต่จะทำให้แอนตัวได้น้อยและวิบัติก่อนภาวะความเครียดทั้งผิวล่างไปได้ไม่สุด เกิดการวิบัติในคอนกรีตที่ผิวบนก่อนและทำให้เกิดความเหนียวทางโครงสร้างน้อย การพังทะลายเกิดขึ้นกระทันหัน ไม่มีสัญญาณเตือน แต่หากเสริมเหล็กน้อย (c) คานอาจรับแรงคดได้น้อยลง แต่จะเกิด



$d$  = effective depth; distance from compression face of concrete to centroid of tension steel

(a) Beam (b) Actual stress distribution (c) Whitney rectangular stress block

รูปที่ 7 แรงภายในของหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงดัด



รูปที่ 8 สถานะภาพการวิบัติและปริมาณเหล็กเสริม

การแอ่นตัวสูง การวิบัติจะเกิดตามภาวะที่ความเครียดในเหล็กเกินกว่าจุดคลากและสามารถขยายตัวได้เต็มอัตราของกำลังวัสดุ และให้ความเหนียวทางโครงสร้างมากและในที่สุดการวิบัติจะเกิดขึ้นที่เหล็กเสริม จึงทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเหนียวและความยืดหยุ่นเช่นเดียวกับโครงสร้างเหล็ก หากจะควบคุมให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงคัตเกิดการวิบัติพร้อม ๆ กันด้วยแรงอัดในคอนกรีตและด้วยแรงดึงในเหล็กเสริมที่กำลังคลากพอดี ปริมาณเหล็กเสริม ( $\rho_b$ ) จะต้องจัดให้พอเหมาะเท่ากับกำลังของคอนกรีตซึ่งในภาพจริงอาจทำได้ยาก แต่ในเชิงทฤษฎีจะสามารถหาได้ซึ่งเรียกว่าดุลยภาพ (Balanced Condition) ในรูปที่ 9 แสดงกำลังภายในภายใต้ดุลยภาพสามารถคำนวณหาปริมาณเหล็ก ได้คือ

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c' \beta \left( \frac{6000}{6000 + f_y} \right)}{f_y}$$

ทั้งนี้เมื่อ

- $\rho_b$  = ปริมาณเหล็กเสริมที่ดุลยภาพ
- $f_y$  = กำลังคลากของเหล็กเสริม
- $f_c'$  = กำลังของคอนกรีตที่ระบุ
- $\beta$  = ตัวคูณตามกำลังคอนกรีต

$$\rho = \frac{0.18 f_c'}{(12) f_y}$$

Winter & Ferguson  
Eqs. for  
balanced condition

Imp. to use  
 $\rho = 0.5 \rho_b$

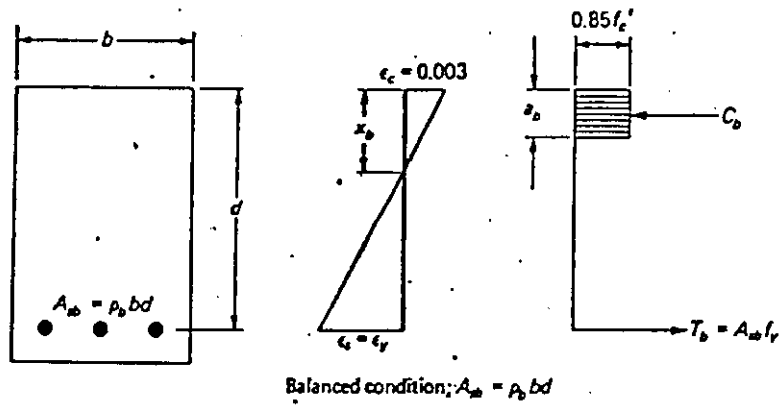
โดยปรัชญาของการออกแบบจะถูกกำหนดว่าจะต้องทำให้โครงสร้างมีความเหนียวทางโครงสร้างพอเพียงให้รับแรงที่แปลกปลอมเช่นแรงลมหรือแผ่นดินไหวให้ได้ ACI กำหนดให้ปริมาณเหล็กเสริมมีได้ไม่เกิน 75% ของปริมาณดุลยภาพ ( $0.75 \rho_b$ ) ในโครงสร้างทั่วไป แต่หากเป็นโครงสร้างที่มีการต่อเนื่องและให้เกิดความเหนียวพอเพียงให้เกิด Plastic hinge ได้ จะถูกกำหนดไว้เพียง 50% ของปริมาณดุลยภาพ ( $0.50 \rho_b$ ) ดังนั้นพฤติกรรมการรับแรงคัต ตามแสดงในรูปที่ 8 จะเป็นเส้นประ ( $b'$ )

ดังนั้นในการออกแบบสำหรับองค์อาคารรับแรงคัต จะมีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าปริมาณดุลยภาพเสมอ เพื่อให้การวิบัติเกิดขึ้นที่เหล็กเสริมมีความเหนียวทางโครงสร้างได้พอเพียงและเทียบเท่าโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ในการออกแบบจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงคัตกับปริมาณเหล็กเสริม

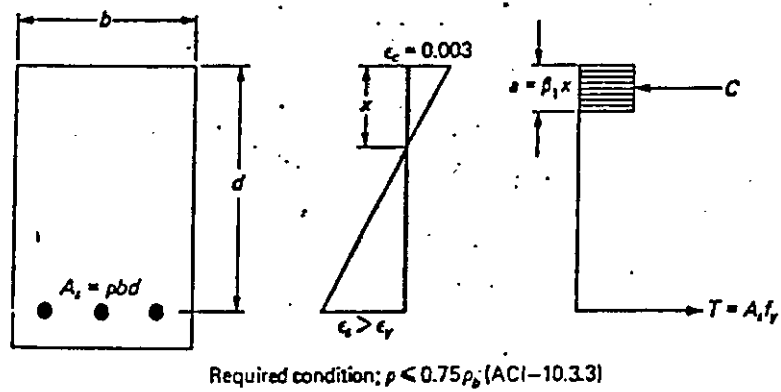
$$M_u = \phi M_n = \phi \rho f_y d b^2 \left( 1 - 0.59 \frac{\rho f_y}{f_c'} \right) \quad (15)$$

และหากกำหนดให้  $M_u = R_u d b^2$  (16)

ดังนั้น  $R_u = \phi \rho f_y \left( 1 - 0.59 \frac{\rho f_y}{f_c'} \right)$  (17)



รูปที่ 9 แรงและความเครียดของคานภายใต้ดุลยภาพ



รูปที่ 10 แรงและความเครียดของคานภายใต้การเสริมเหล็กน้อยกว่าดุลยภาพ

ในการออกแบบรับแรงดัดอาจทำได้โดยใช้กราฟที่แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งได้คำนวณไว้สำหรับกำลังคอนกรีต 150, 200, 250, 300 และ 350 ตามลำดับ อีกทั้งพิจารณากำลังเหล็กเสริม SD-30, SD-40 และ SD-50 ตามลำดับ การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงดัดที่ต้องการเหล็กเสริมรับแรงอัดด้วย โดยมีเหล็กเสริม 2 มิว (Double reinforcement) ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นว่าแรงดัดอาจแยกออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดแรกเกิดจากเหล็กเสริมรับแรงดัดกับคอนกรีตรับแรงอัด และอีกชุดหนึ่งเกิดจากเหล็กเสริมรับแรงดัด กับเหล็กเสริมรับแรงอัด หากเหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคลากทั้งคู่จะพบว่า

$$M_u = \phi M_n = \phi [A_s f_y (d-a/2) + A_s' f_y (d-d')] \quad (18)$$

แต่ในการออกแบบอาจไม่สามารถยืนยันได้ว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคลากเสมอไป จึงอาจจะต้องตรวจสอบได้จากตำแหน่งแกนสะเทินที่ทำให้เกิดการสมดุลของแรงได้จากสมการ

$$\rho - \rho' \left(1 - \frac{0.85 f_c'}{f_y}\right) \geq 0.85 \beta_1 \left(\frac{f_c' d'}{f_y d}\right) \left(\frac{6000}{6000 - f_y}\right) \quad (19)$$

entered fu (เหล็กเสริม)  
yield (comp.)

และหากพบว่าเหล็กบนไม่ถึงจุดคลากก็จะต้องหาตำแหน่งของแกนสะเทิน แล้วหาหน่วยแรงที่เหล็กเสริมรับแรงอัด

$$f_s = \epsilon_u E_s \frac{c-d'}{c} \quad (20)$$

และกำลังดัดทั้งหมดจะหาได้จาก

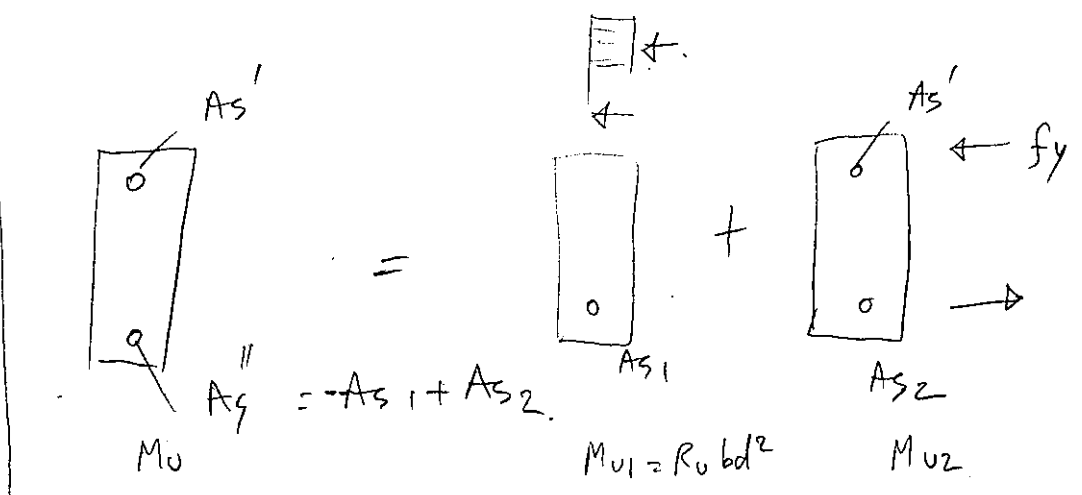
หรือ  $M_{u2} \sim M_{u1}$  *robinhi 6s2w strain condition*

$$M_n = A_s f_y (d-a/2) + A_s' f_s (d-d') \quad (21)$$

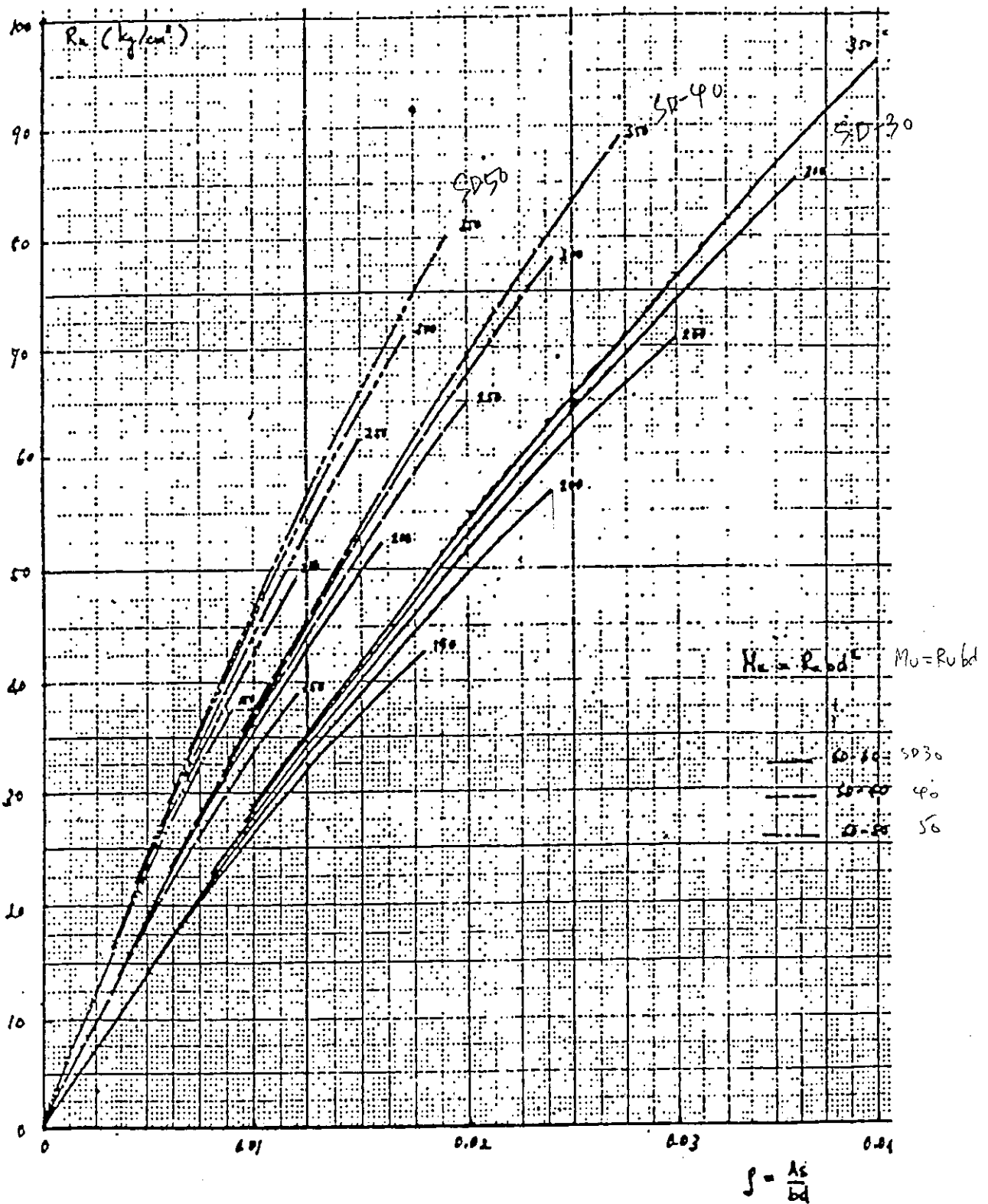
$$M_{u2} = M_u - M_{u1}$$

$$A_s' = \frac{M_u - M_{u1}}{\phi (d-d') f_y}$$

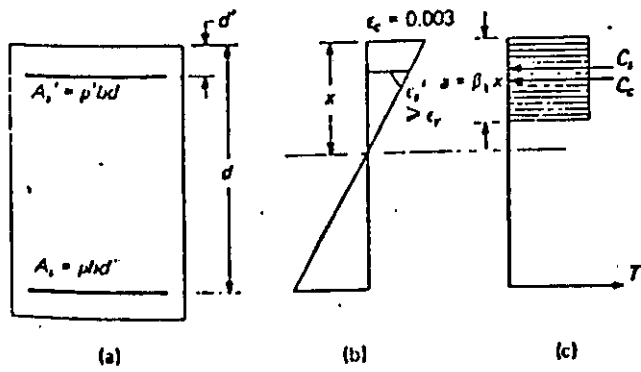
$$\phi \leq 0.75 \phi_b$$







รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัด ( $M_u$ ) และปริมาณเหล็กเสริม ( $\rho$ )



รูปที่ 12 แรงภายในของหน้าตัดรับแรงดัดที่เสริมเหล็กทั้งสองผิวน

ข้อสงสัย

1. 1.0015v comp. or 2 inch buckle

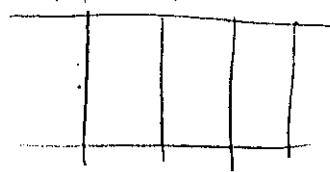
in the 1st stir. (s) < 48 phi stir } buckle

< 16 phi main

< d/2

<  $\frac{A_v f_y}{3.5 b}$  } phi

3.5 b



#### 4. แรงเฉือน

พฤติกรรมขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในการรับแรงเฉือน จะเป็นพฤติกรรมร่วมของแรงเฉือนกับแรงอื่น ๆ หลาย ๆ อย่างควบคู่กัน เช่น แรงอัด แรงดัด หรือแรงบิด เป็นต้น แต่ผลของการวิบัติและรอยแตกร้าวจะปรากฏในรูปของหน่วยแรงดึงเส้นพิกัด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นลักษณะของคานที่ประกอบด้วยวัสดุเพียงอย่างเดียว การกระจายแรงเฉือนในหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะหาได้จากสมการ

$$v = VQ \quad (22)$$

เมื่อ

$$v = \text{หน่วยแรงเฉือน}$$

$$Q = \text{โมเมนต์ของหน้าตัด}$$

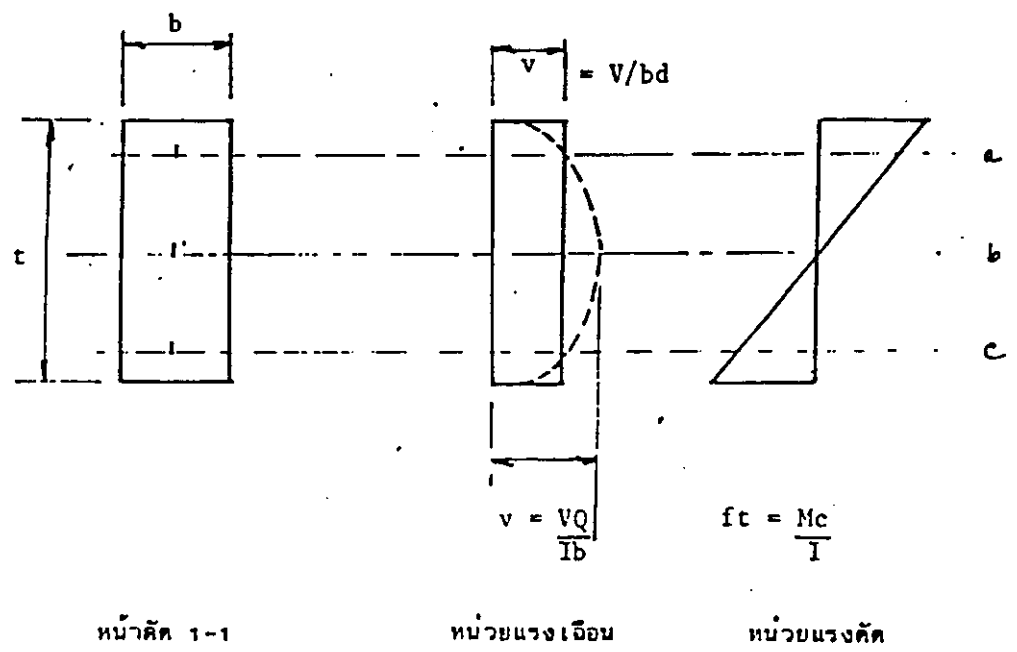
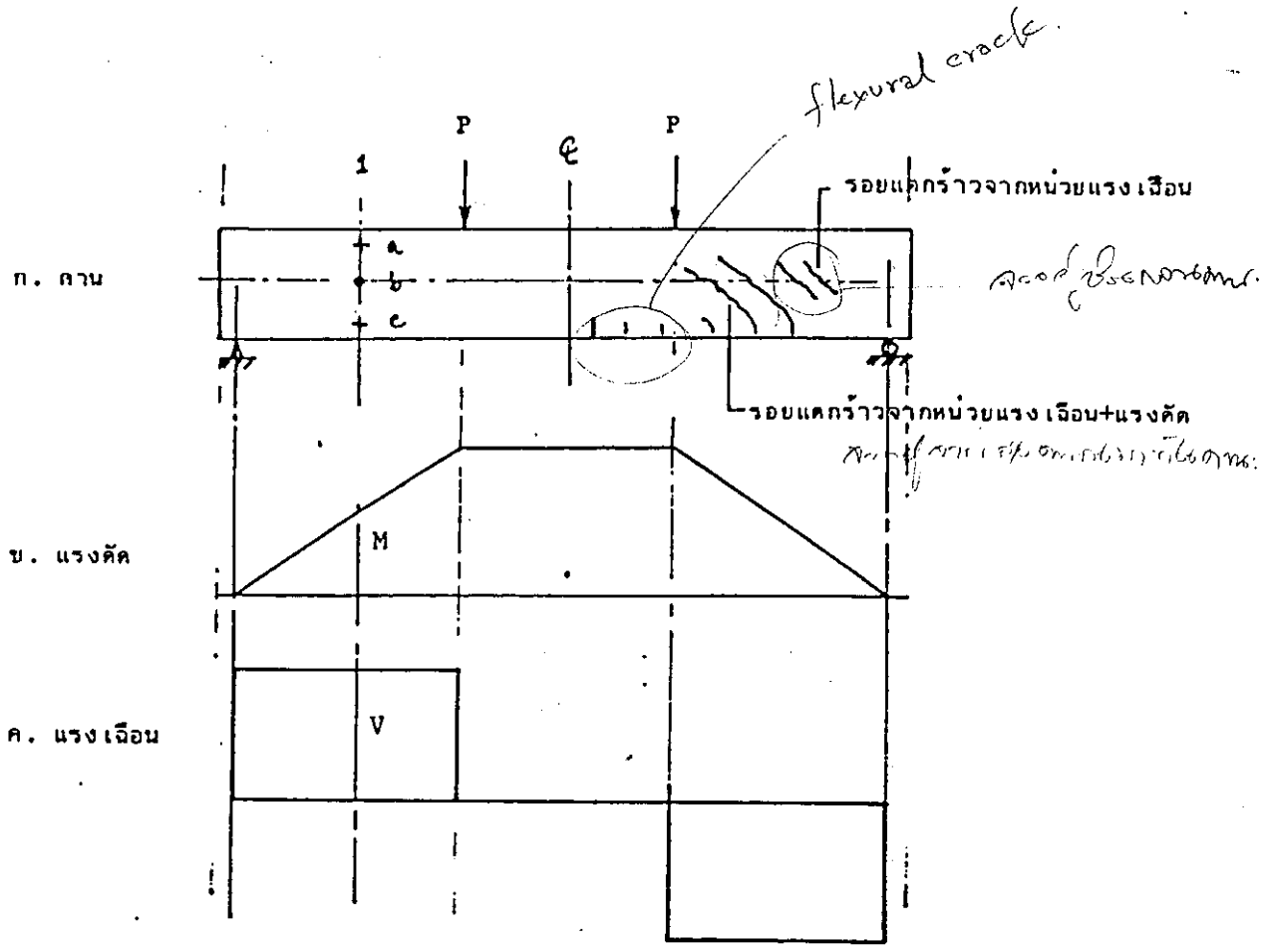
$$I = \text{โมเมนต์ของอินเนอร์เชียร์}$$

$$b = \text{ความกว้างของคาน}$$

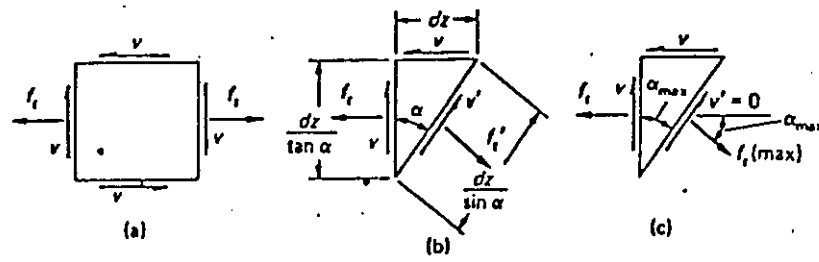
แต่ในขณะเดียวกันแรงดัดก็ทำให้เกิดหน่วยแรงในแนวตั้งฉากกับระนาบของหน้าตัดหาได้จาก  $f_t = Mc/I$  เมื่อ  $f_t$  เป็นหน่วยแรงจากแรงดัด,  $M$  เป็นแรงดัด,  $C$  เป็นระยะจากแกนสะเหินถึงจุดที่พิจารณาและ  $I$  เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของหน้าตัด ซึ่งเมื่อมีพฤติกรรมร่วมกันจะสามารถหาหน่วยแรงหลักที่หน้าตัดได้ดังรูปที่ 14 หรือสมการ

$$f_t(\max) = \frac{1}{2} f_t + \sqrt{\left(\frac{1}{2} f_t\right)^2 + v^2} \quad (23)$$

ซึ่ง  $f_t(\max)$  จะเป็นหน่วยแรงดึงหลักจะเกิดขึ้นในแนวที่แรงเฉือนหลักเป็นศูนย์ทำมุม  $\alpha$  กับแนวตั้งฉากกับระนาบที่พิจารณา หน่วยแรงดึงหลักหรือหน่วยแรงดึงทะแยงนี้จะเป็นส่วนสำคัญทำให้เกิดการแตกร้าวหาหน่วยแรงเกินพิกัดที่คอนกรีตรับแรงดึงได้ ลักษณะการแตกร้าวได้แสดงในรูปที่ 13 อันประกอบด้วยรอยแตกร้าวจากแรงเฉือนโดยตรง และรอยแตกร้าวจากผลรวมระหว่างแรงเฉือนกับแรงดัด แต่หากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนแตกต่างออกไปบ้างจากผลกระทบของหลาย ๆ ส่วนร่วมกัน ซึ่งอาจแยกจำลองเชิงพฤติกรรมได้จาก รูปที่ 15 อันประกอบด้วย  $V_{cz}$ , แรงเฉือนในเนื้อคอนกรีต (Concrete shear)  $V_a$ , แรงล็อกภายในที่ผิวหินทรายในคอนกรีต (Aggregate Interlock) และ  $V_d$ , แรงยึดรั้งจากเหล็กเสริมตามยาว (Dowel action) อย่างไรก็ตามหากจะศึกษาพฤติกรรมอย่างละเอียดจากตัวแปรทุก ๆ ตัว อาจจะเป็นการยากที่จะให้เห็นผลได้อย่างชัดเจนจากทุกตัวแปรและนำมาบรรจุอยู่ในสูตรคำนวณออกแบบ ดังนั้น

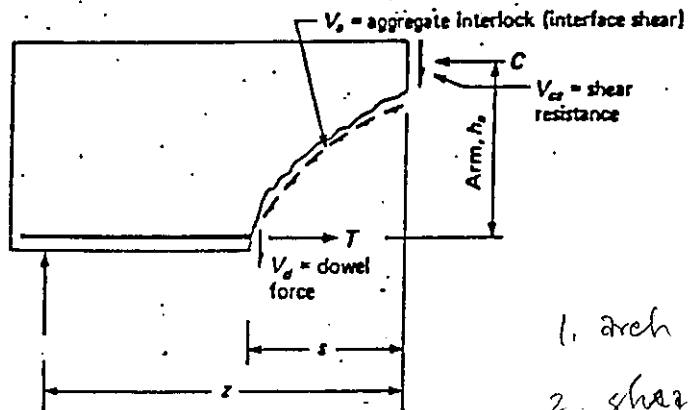


รูปที่ 13 การกระจายหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงคดในคานสี่เหลี่ยม



$$f_t(\max) = \frac{1}{2}f_t + \left(\frac{1}{2}f_t\right)^2 + v^2$$

รูปที่ 14 แรงดึงสูงสุดเกิดจากผลรวมร่วมของแรงค้ำและแรงเฉือน



1. arch action
2. shear interlock
3. shear action

รูปที่ 15 การกระจายแรงต่อต้านแรงเฉือน

ในการคำนวณออกแบบอาจพิจารณาแยกออกเป็นเพียง 2 ส่วนเท่านั้น คือส่วนที่คอนกรีตรับและส่วนที่เหล็กปลอกรับ โดยที่ให้กลุ่มที่คอนกรีตรับรวมทั้ง 3 พหุคูณรวมของ  $V_c$ ,  $V_a$  และ  $V_d$  เข้าด้วยกันแล้วส่วนที่เหลือคือ  $V_s$  เป็นส่วนที่จะต้องออกแบบให้เหล็กเสริมรับไป ซึ่งอาจจะเป็นเหล็กปลอก, เหล็กคอกม้า หรือเหล็กพิเศษเพื่อรับแรงเฉือนโดยตรง จากรูปที่ 16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับปริมาณเหล็กเสริมซึ่งได้จากการรวบรวมผลทดสอบจำนวนมาก แนวโน้มชี้ชัดว่าชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสามารถต้านแรงเฉือนได้ดีที่สุดเกินกว่า

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \quad (24)$$

แต่หากมีเหล็กเสริมรับแรงดัดอยู่ผลของแรงดัดจะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงไป และสามารถรับแรงเฉือนได้สูงขึ้นตามปริมาณเหล็กเสริมตามยาว และผลจากระยะแรงเฉือน (Shear Span;  $V_d/M$ )

แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงเฉือนในคอนกรีตจะรับได้สูงสุดที่

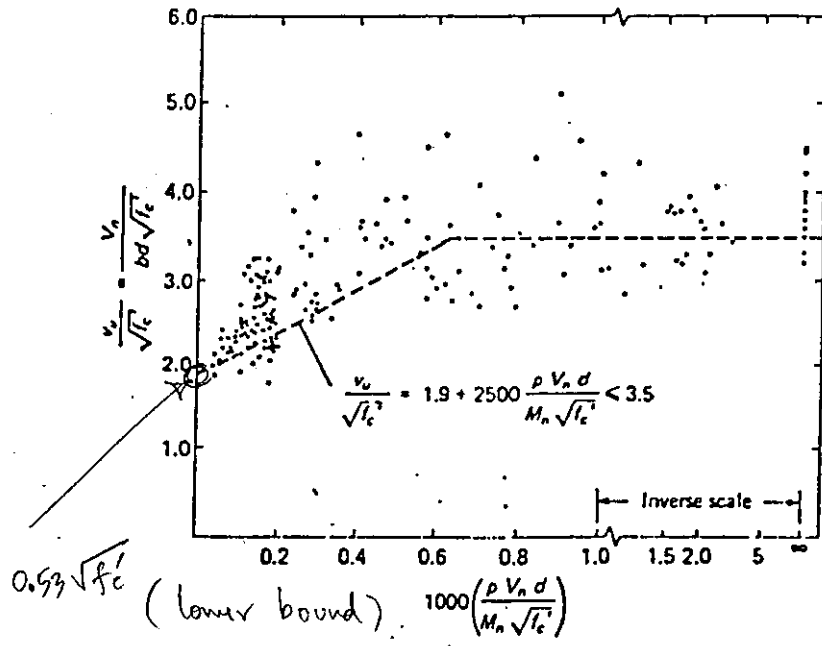
$$V_c = 0.93 \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \quad (25)$$

แต่ในระหว่างช่วงของปริมาณเหล็กเสริมตามยาวของคานระหว่าง .....ถึง..... จะสามารถต่อต้านแรงเฉือนได้คงสมการ

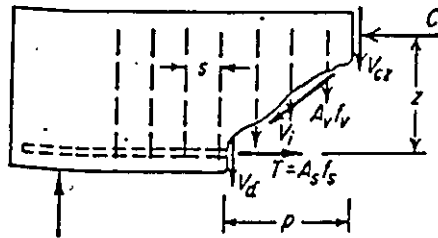
$$V_c = 0.50 \sqrt{f_c'} + 176 \rho \frac{V_u d}{M_u} \quad (26)$$

โดยที่  $\rho$  เป็นปริมาณเหล็กเสริมตามยาวของคาน  $V_u d / M_u$  เป็นผลของการกระจายน้ำหนักบรรทุกแสดงในรูปของระยะแรงเฉือน Shear Span โดยที่  $V_u$  คือ แรงเฉือนที่จุดพิจารณา  $d$  ความลึกของหน้าตัดที่ และ  $M_u$  เป็นแรงดัดที่จุดเดียวกัน กล่าวโดยรวมจะส่งผลโดยตรงจากขนาดของหน่วยแรงและแตกกว้างภายใน

ในกรณีที่มีแรงอัดหรือแรงดัดในแนวแกนจะทำให้การต่อต้านแรงเฉือนในคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือหากเป็นแรงดัดให้ถือ  $V_c = 0$  แต่หากเป็นแรงอัดจะทำให้คอนกรีตรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นเป็น



รูปที่ 16 แรงเฉือนภายในของคาน



รูปที่ 17 ระยะเวลาเหล็กปลอกคานทฤษฎีโครงถัก (Truss Analogy)

$$V_c = 0.53 \left( 1 + \frac{Nu}{140Ag} \right) \sqrt{f_c' \cdot bd} \quad (27)$$

แต่ต้องไม่เกิน

$$V_c \leq 0.93 \sqrt{f_c' \cdot bd} \sqrt{1 + \frac{Nu}{35Ag}} \quad (28)$$

เมื่อ  $Ag$  เป็นหน้าตัดรับแรงอัดและ  $Nu$  คือแรงอัดรวมบนหน้าตัด

หากหน้าตัดขององค์อาคารรับแรงเฉือนได้ไม่พอเพียงจึงต้องออกแบบให้เหล็กเสริมช่วยรับแทน ซึ่งอาจใช้เหล็กปลอก เหล็กคอกมา หรือเหล็กพิเศษรับแรงเฉือน ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมออกแบบให้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนส่วนเกินที่คอนกรีตรับ โดยใช้ทฤษฎีของโครงถัก (Truss Analogy) ซึ่งสามารถวิเคราะห์แรงภายในได้จากรูปที่ 17 เมื่อแรงเฉือนตัดผ่านเหล็กปลอกตามแนวคาน  $n$  เส้น ดังนั้นแรงเฉือนที่ต่อต้านจะมีค่า

$$V_s = n \cdot A_v \cdot f_v \quad (29)$$

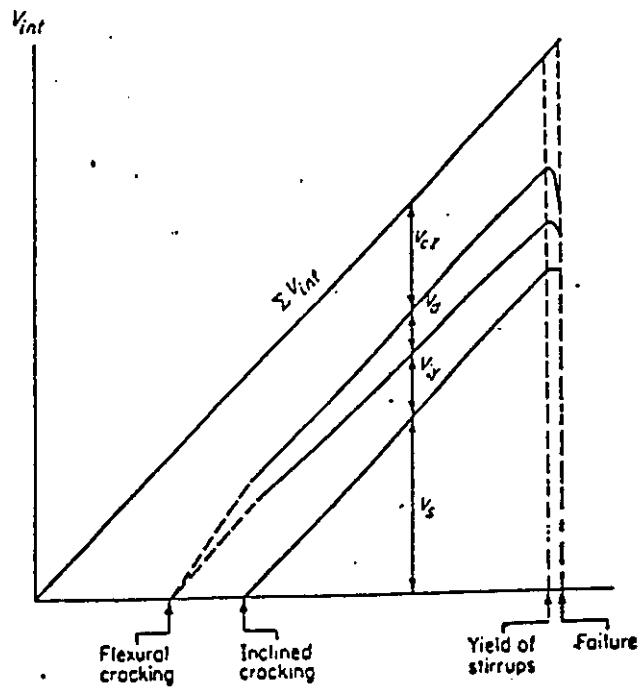
เมื่อ  $V_s$  เป็นแรงเฉือนที่เหล็กปลอกรับ,  $A_v$  เป็นพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกที่แรงเฉือนตัดผ่าน และ  $f_v$  เป็นกำลังของเหล็กเสริม (แรงดึง) ดังนั้นหากรอยแตกกว้างเป็นระยะห่าง  $P$  ตามแนวราบ และ  $S$  เป็นระยะห่างของเหล็กปลอก ดังนั้นจำนวนเหล็กปลอก  $n = P/S$  สำหรับคานทั่วไปถือว่ารอยร้าวจะห้ามมุม  $45^\circ$  ดังนั้น  $P = d$  หรือ  $n = d/S$  อีกทั้งการออกแบบในวิธีกำลังประลัยจะพิจารณากำลังของเหล็กเสริมที่  $f_y$  ดังนั้น สมการการออกแบบระยะห่างเหล็กเสริมได้จาก

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{S} \quad (30)$$

ACI ได้กำหนดวิธีการออกแบบไว้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่คอนกรีตรับอันประกอบด้วย  $V_c$ ,  $V_a$ , และ  $V_d$  รวมเรียกเป็น  $V_c$  และส่วนที่เหลือจะออกแบบให้เหล็กเสริมรับ,  $V_s$  สมการการออกแบบอาจเขียนได้คือ

$$V_u = \phi V_n \quad (31)$$





รูปที่ 18. ลักษณะการรับแรงเฉือน

$V_u$  ← from factor load

$$V_n = \frac{V_u}{\phi}$$

$V_c = \dots$  Eq. 25, 26.

$$V_s = V_n - V_c$$

$$s = \frac{A_v f_s d}{V_s}$$

และสัดส่วนการรับแรงเฉือนอาจแสดงตามรูปที่ 18 ส่วนที่คอนกรีตและเหล็กเสริมรับไป หรือแสดงในรูปสมการได้ คือ

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi \frac{A_v f_y d}{S} \quad (32)$$

ทั้งนี้ให้คิดค่า  $V_c$  ตามสมการที่ 24, 25 และ 26 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ACI ยังควบคุมค่าแรงเฉือนส่วนที่เหล็กเสริมรับไม่ได้เกิน หรือ  $2.1 f_c' b d$

ทั้งนี้เหล็กปลอกจะต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่าที่กำหนดด้วยระยะห่าง

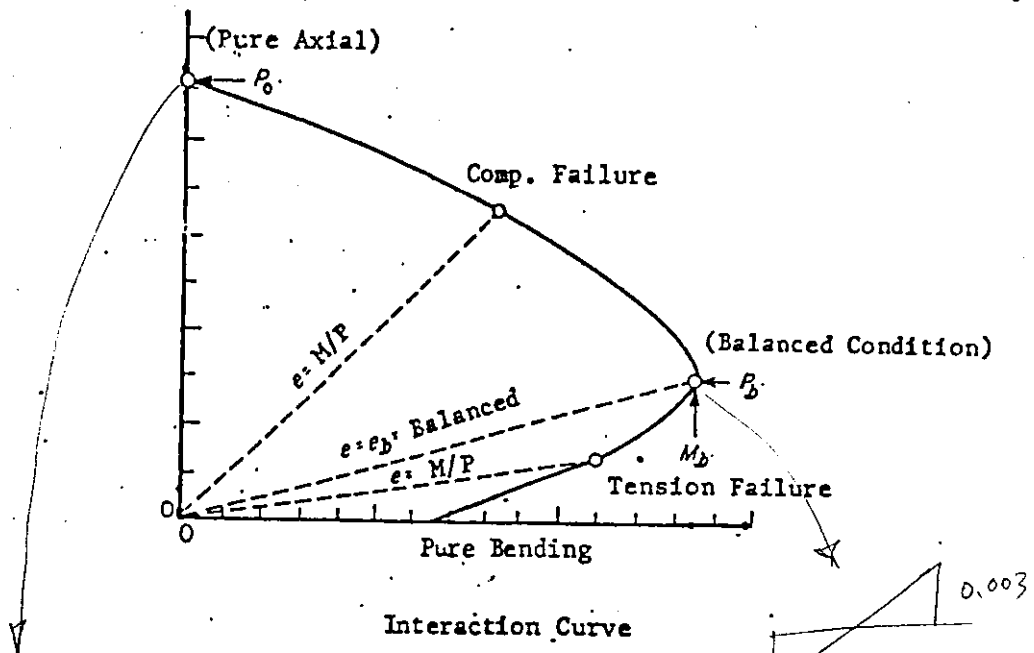
$$S_{max} = \frac{A_v f_y}{3.5b} \quad (33)$$

$$S_{max} = d/2 \quad (34)$$

และ  $S_{max} = 30 \text{ ซม}$  (35)

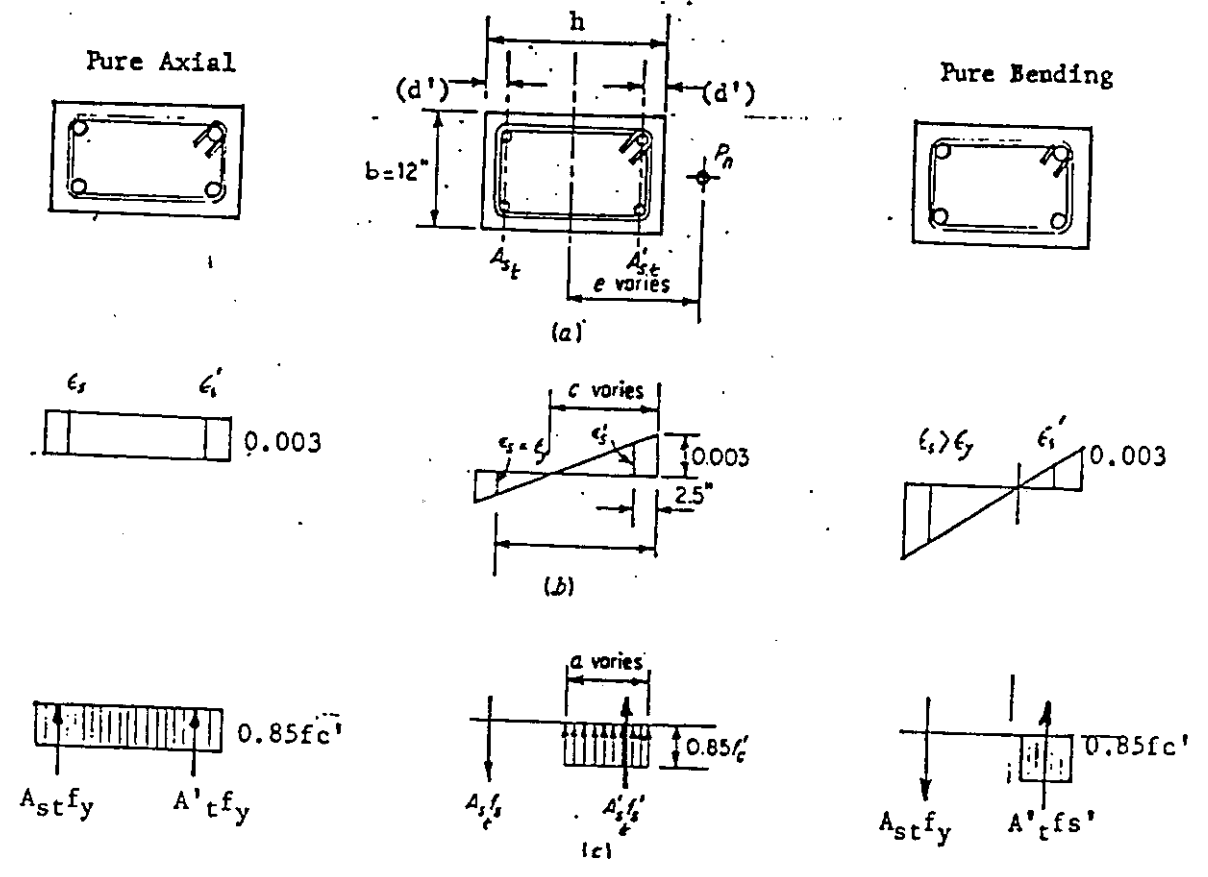
## 5. แรงอัด

ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมการรับแรงอัดเพียงอย่างเดียวหาได้ยาก เพราะจะต้องมีแรงอย่างอื่น เช่น แรงคดและแรงเฉือนร่วมอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดจึงนิยมใช้กราฟร่วมแรงคด (Interaction Curves) โดยมีพฤติกรรมหลักที่จะต้องพิจารณาอยู่ 3 สภาวะที่สำคัญ คือเมื่อมีกำลังอัดล้วน (Pure Axial) เมื่อมีกำลังอัดที่สมดุลภาพ (Balanced Condition) และเมื่อมีกำลังคดล้วน (Pure Bending) ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 19 เป็นตัวอย่างของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $b \times h$  เสริมเหล็ก 4 เส้นที่มุม กำลังคอนกรีต  $f_c'$  และกำลังเหล็กเสริม  $f_y$  ในภาพได้แสดงให้เห็นหน้าตัดการกระจายความเครียดและการกระจายแรงภายใน ซึ่งจะมีลักษณะเช่นเดียวกับหน้าตัดคานภายใต้แรงคดดังกล่าวแล้ว ใน (2) กล่าวคือความเครียดคอนกรีตภายใต้แรงอัดตาม ACI ถูกกำหนดที่ 0.003 และความเครียดในเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ  $e_s$  ด้านที่รับแรงคด และ  $e_s$  ด้านที่รับแรงอัด ดังนั้นภายใต้แรงคดล้วน ๆ ค่าความเครียดกระจายเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดในเชิงวิเคราะห์อาจคำนวณกำลังในแนวแกนได้จากสมการ

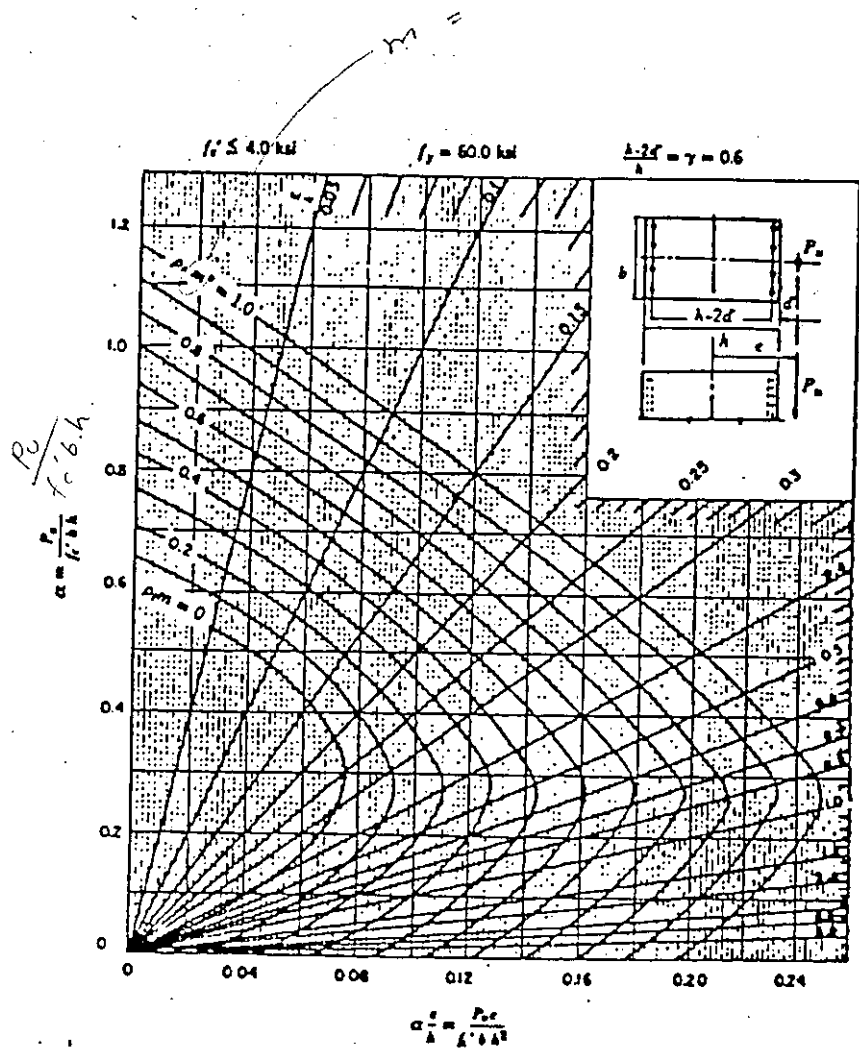


$$P_0 = 0.85 f_c' + (A_g - A_s) f_y$$

Balanced Condition



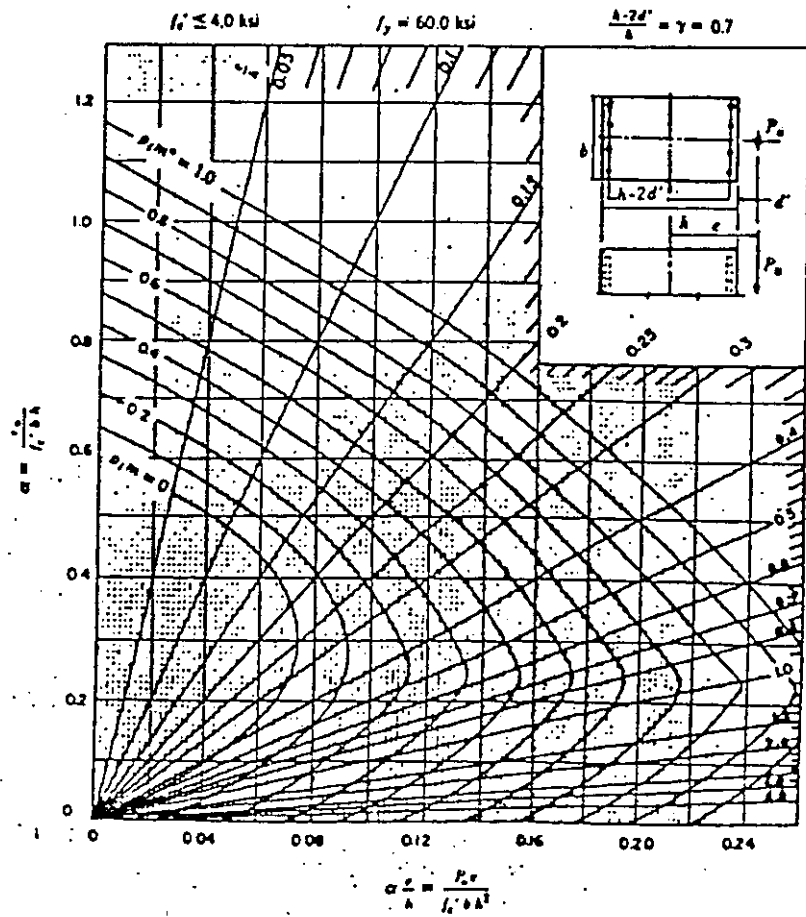
รูปที่ 19 การวิเคราะห์หน้าตัดคองค้ำคาร์รับแรงอัด



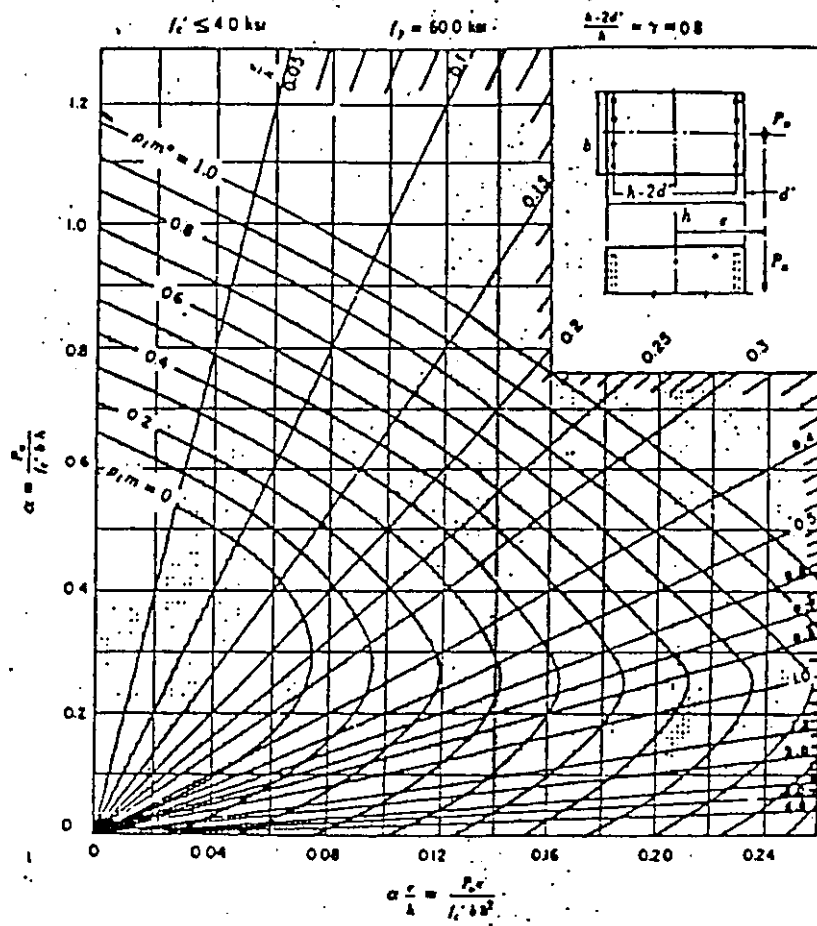
of CB. 100% 100%

รูปที่ 20 พฤติกรรมร่วมแรงอัดกับแรงดัด เมื่อ  $\gamma = 0.6$

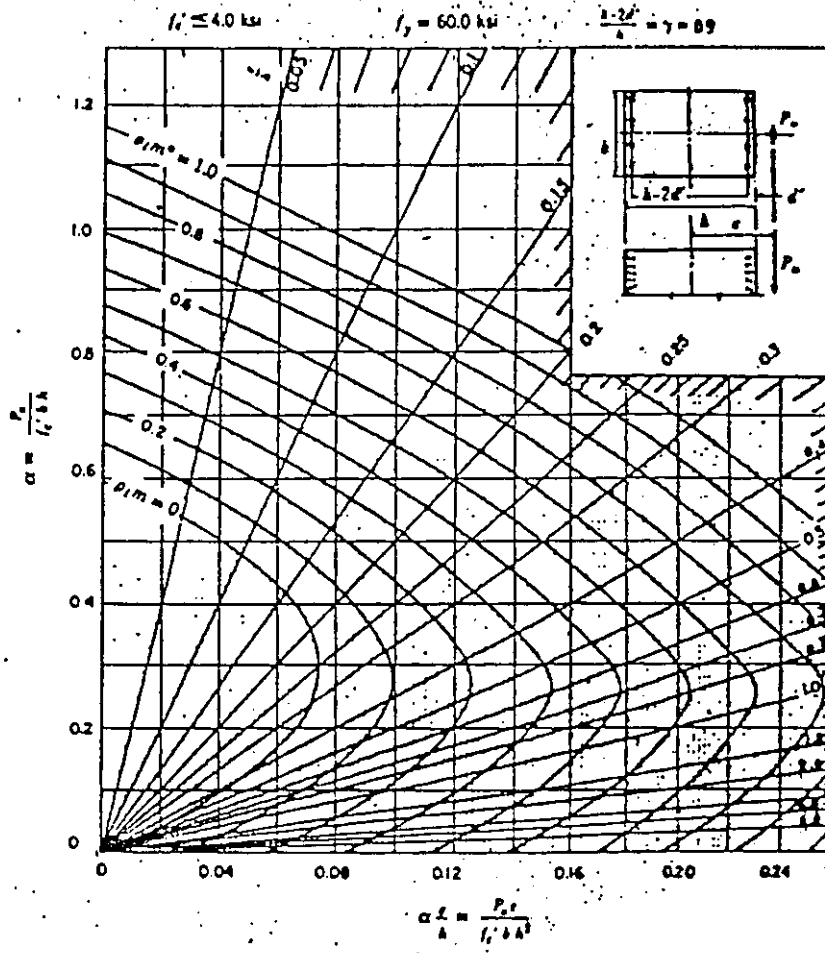
(dimensionless)



รูปที่ 21 พฤติกรรมร่วมแรงอัดกับแรงค้ด เมื่อ  $\gamma = 0.7$



รูปที่ 22 พฤติกรรมร่วมแรงอัดกับแรงดัด เมื่อ  $\gamma = 0.8$



รูปที่ 23 พฤติกรรมร่วมแรงอัดกับแรงค้ำ เมื่อ  $\gamma = 0.9$

$$P_o = 0.85f'_c A_c + A_s f_y \quad (36)$$

$$= 0.85f'_c (A_g - A_s) + A_s f_y \quad (37)$$

และที่ดูสภาพเหล็กเสริมต้านรับแรงดึงจะถึงจุดคลากในขณะที่ยังคงกรัดหัดตัวถือความเครียดประลัย คือ  $= 0.003$  ซึ่งจะพบว่าแกนสะเหินจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $cb$  เพื่อให้เกิดการสมดุลของแรง

$$cb = \frac{6000d}{f_y + 6000} \quad (38)$$

$$P_b = 0.85f'_c \beta_1 cb \cdot b + A_s (f_y - 0.85f'_c) - A_s f_y \quad (39)$$

$$M_b = P_b \cdot cb = C_c \frac{(d-a)}{2} + C_s (d-d') \quad (40)$$

ส่วนที่กำลังตัดล้นจะสามารถวิเคราะห์ได้ตามวิธีการของแรงคัตที่มีเหล็กเสริมทั้งสองผิว

การออกแบบจะทำได้ง่ายหากหากมีกราฟพฤติกรรมร่วมของแรงคัตและแรงยึด ดังแสดงในรูปที่ 20-23 พิจารณาจาก สัดส่วนของระยะระหว่างศูนย์กลางของเหล็กเสริมทั้งสองผิว  $(d-d')$  กับความลึกรวมของหน้าคัต  $(b)$   $\gamma = 0.6, 0.7, 0.8$  และ  $0.9$  ตามลำดับ กราฟที่แสดงจะเป็นแบบไร้มิติ แกน  $X$  เป็นกำลังอัดแนวแกน ส่วนแกน  $Y$  เป็นกำลังคัต โดยมีตัวแปรอันประกอบด้วยปริมาณเหล็กเสริม  $\rho_c^m$  คือ ผลคูณของสัดส่วนเหล็กเสริม ยืน  $\rho_c = A_s / bh$  และ  $m = 0.85f'_c / f_y$  และตัวแปรจากค่าการหนีศูนย์  $e$  แสดงในรูปของ  $e/b$  โดยพิจารณา ระยะหนีศูนย์เทียบสัดส่วนความหนาของโครงสร้างในแนวที่พิจารณา

วิธีการออกแบบจะแสดงตัวอย่างในโอกาสต่อไป แต่ขอควรพิจารณาในการออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัดจะต้องให้ครอบคลุมถึงรายละเอียดปลีกย่อยคือ

1. ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดจะถูกกำหนดไว้ไม่เกิน 8% แต่หากมีการหาบค้ำจะลดเหลือเพียง 4% เท่านั้น
2. การคัตแรงคัตลงเสาจะต้องให้ได้ค่าสูงสุดโดยพิจารณาจาก Stiffness ของเสาและคานตามขนาดหน้าคัต ความยาว และการยึดรั้งกับส่วนที่ต่อเนื่องกัน
3. การหนีศูนย์ต่ำสุดหากไม่ได้หีสัจน์เป็นอย่างอื่นจะต้องใช้ค่าการหนีศูนย์ต่ำสุดที่ 0.10e เมื่อ  $e$  เป็นความหนาด้านที่พิจารณา



4. ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำจะต้องไม่น้อยกว่า 1% ยกเว้นในกรณีที่มีค่าหน่วยแรงน้อยมาก ๆ จึงอาจพิจารณาลดเหลือ 0.5% ได้

5. การเสริมเหล็กปลอกไม่ว่าปลอกเกลียวหรือปลอกเตี้ยจะต้องมีขนาดและจำนวนพอเพียงที่จะป้องกัน การตุง (Buckle) ของเหล็กเสริมขึ้นได้ ACI กำหนดว่าจะต้องมีระยะเหล็กปลอกไม่เกิน 48 เท่าของขนาดเหล็กปลอก หรือ 16 เท่าของขนาดเหล็กขึ้น

6. เหล็กเสริมขึ้นทุกเส้นจะต้องมีมุมของเหล็กปลอกยึดรั้งไม่ให้เกิดการตุงเฉพาะจุด ยกเว้นในกรณีที่มีเหล็กเสริมถี่มาก หากระยะห่างระหว่างเส้นไม่เกิน 15 ซม. อาจพิจารณาให้มีมุมเหล็กเสริมเส้นเว้นเส้นได้

7. เหล็กเสริมในเสาจะต้องมีอย่างน้อย 4 เส้นและขนาดจะต้องไม่ต่ำกว่า 12 มม. เพื่อการควบคุมให้เหล็กเสริมอยู่ในตำแหน่งที่ตามแบบจะไม่บิดงอหรือเสียรูปร่างจากการเทคอนกรีต

## 6. แรงบิด

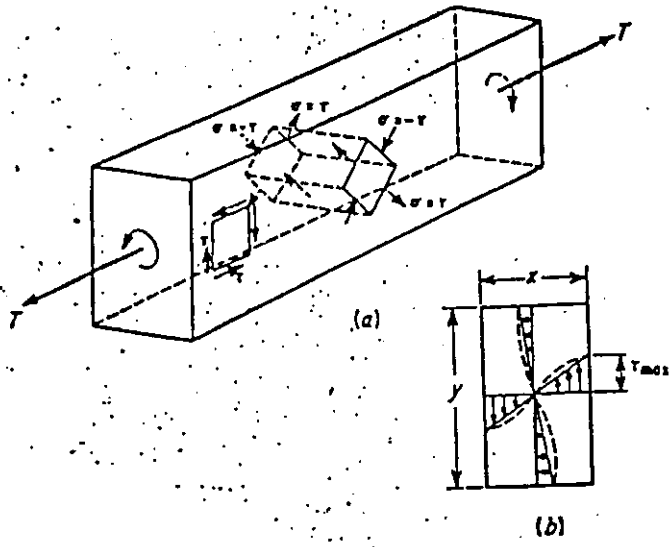
การบิดขององค์อาคารจะทำให้เกิดหน่วยแรงที่มีทุกระนาบของชิ้นส่วน โดยที่ขนาดของหน่วยแรงจะแปรตามระยะห่างจากแกนการบิดสำหรับองค์อาคารเนื้อเดียว เช่นคอนกรีตล้วนหรือเหล็กรูปพรรณ อาจจะสามารถได้จาก

$$T_u = T_c + T_s \begin{cases} \text{short} \\ \text{longitudinal} \end{cases}$$

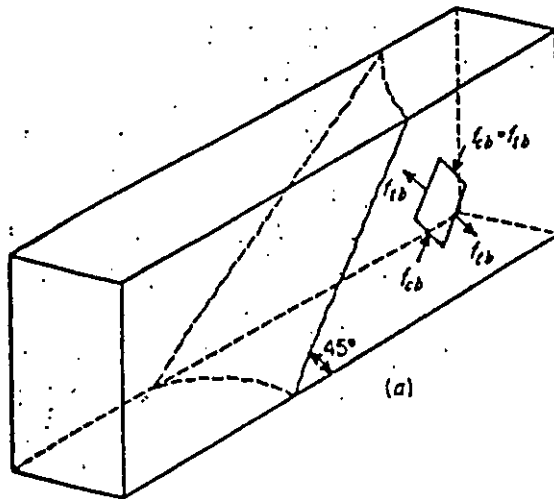
$$\tau_{max} = \frac{T}{\alpha x^2 y} \quad (41)$$

เมื่อ  $\alpha$  เป็นค่า shape factor,  $x$  เป็นมิติด้านแคบ และ  $y$  เป็นมิติด้านยาว การกระจายของแรงจะเป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 24 อนึ่งเมื่อแรงบิดนี้ร่วมกับแรงเฉือนและแรงดัดจะสามารถคำนวณหาแนวแรงหลัก (Principal Stress) ในระนาบต่าง ๆ ได้ ณ แต่ละจุดอาจหาหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวได้และหากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเกินพิกัดที่คอนกรีตจะรับได้จะทำให้เกิดรอยแตกกว้างตามแนวของหน่วยแรงดึงสูงสุดนั้น อนึ่งลักษณะการแตกร้าวจะปรากฏดังแสดงในรูปที่ 25 กล่าวคือจะทำมุมประมาณ 45° กับแกนของแรงบิดในทุกระนาบ รอยแตกร้าวจะมีลักษณะคล้ายเป็นเกลียวตามผิวคานคอนกรีต

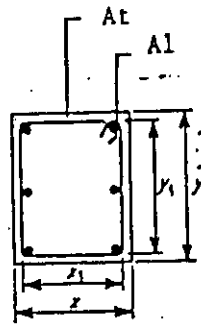
แบบจำลองการรับแรงจะแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ ในเนื้อคอนกรีต ในเหล็กปลอก และในเหล็กเสริมตามยาว แต่การออกแบบตาม ACI ได้ กำหนดให้คอนกรีตแบกรับไปส่วนหนึ่ง และให้เหล็กปลอก (ปลายบิด) แบกรับไปอีกส่วนหนึ่ง เหล็กเสริมตามยาวให้ถือเป็นส่วนเสริมให้เหล็กปลอกทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นสมการเพื่อการออกแบบอาจเขียนได้คือ



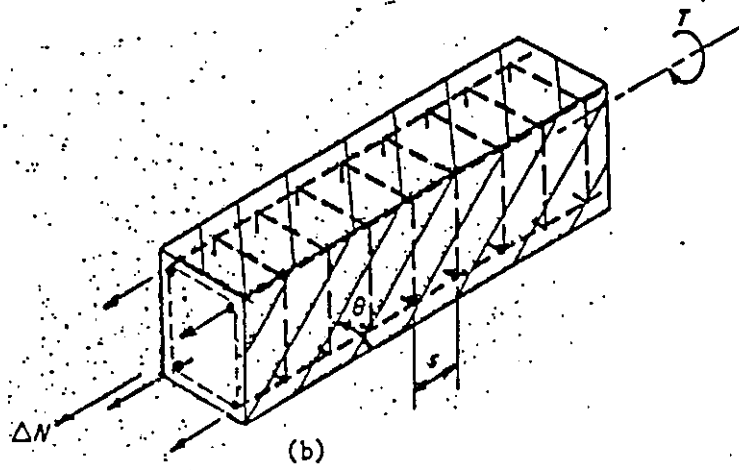
รูปที่ 24 การกระจายของหน่วยแรงบิด



รูปที่ 25 ลักษณะการแตกตัวของคานรับแรงบิด



(a)



(b)

รูปที่ 26 อธิบายการกระจายการออกแรงแบบให้เหล็กเสริมรับแรงบิด

$$T_u \leq \phi T_n \leq \phi (T_c + T_s) \quad (42)$$

เมื่อ

$T_u$  = กำลังบิดประลัย

$T_n$  = กำลังบิดเชิงทฤษฎี

$T_c$  = กำลังบิดในเนื้อคอนกรีต

$T_s$  = กำลังบิดต่อต้านด้วยเหล็กเสริม

กำลังที่หน้าตัดคอนกรีตจะรับได้ตาม ACI ถูกกำหนดจากผลการทดสอบซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต  $f_c'$  ขนาดความกว้าง  $X$  และขนาดความลึก  $Y$  อีกทั้งยังมีผลจากพฤติกรรมร่วมระหว่างแรงเฉือนและแรงบิดด้วย แต่หากแรงบิดมีค่าน้อยกว่าค่าในสมการที่ 43 อาจไม่จำเป็นต้องออกแบบเพื่อแรงบิด

$$T_u \leq \phi 0.13 \sqrt{f_c'} \Sigma x^2 y \quad (43)$$

ถ้าหากค่าแรงบิดเกินกว่าค่า  $T_u$  ในสมการที่ 43 จำเป็นจะต้องออกแบบให้ต้านแรงบิดได้ ซึ่งส่วนที่คอนกรีตแบกรับได้ในรูปพฤติกรรมร่วมกับแรงเฉือนคือ

$$T_c = \frac{0.21 \sqrt{f_c'} x^2 y}{\sqrt{1 + \frac{(0.4v_u)^2}{\alpha T_u}}} \quad (44)$$

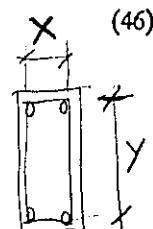
โดยที่  $\alpha$  = เป็นตัวคูณร่วมจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและแรงบิด โดยคำนวณได้จาก

$$\alpha = \frac{bd}{\Sigma x^2 y} \quad (45)$$

หากค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นสูงกว่าที่คอนกรีตจะรับได้จะต้องให้เหล็กปลอก (ปลายบิด) รับแรงบิดส่วนที่เหลือ ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่ 46 โดยอิงปรัชญาจากรูปที่ 26 มุมของการแตกร้าวจากแรงบิดทำมุม  $45^\circ$  dy กับแกนแรงบิด

$$A_s \cdot \alpha_t \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot f_y$$

$$T_s = \frac{A_s \alpha_t x_1 y_1 f_y}{s}$$



เมื่อ

$A_t$  = ขนาดหน้าตัดเหล็กปลอกต่อเส้น

$S$  = ระยะห่างของเหล็กปลอก

$\alpha$  = Shape factor เป็นสัดส่วนของมิติหน้าตัด

=  $0.66 + 0.33(y_1/x_1) \leq 1.50$

$x_1$  = ระยะแคบของเหล็กปลอก

$y_1$  = ระยะยาวของเหล็กปลอก

อนึ่ง การที่จะให้เหล็กปลอกรับแรงได้เต็มที่ เหล็กเสริมตามยาวกระจายโดยรอบหน้าตัดจะต้องมีปริมาณรวมพอเพียงที่ยึดเหล็กปลอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ACI ได้กำหนดไว้ที่

$$A_t = \frac{2A_t(xy)}{S} \quad (47)$$

โดยที่

$A_t$  = ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวในเหล็กปลอกทั้งหมด

$A_t$  = ขนาดเหล็กปลอกแบบปลายปัด

ทั้งนี้ปริมาณเหล็กปลอกเมื่อรวมเหล็กรับแรงเฉือนและรับแรงบิดแล้ว จะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดใน

Code คือ

$$A + 2A_t \geq \frac{3.5 bw S}{f_y} \quad (48)$$

โดยที่

$A$  = ขนาดหน้าตัดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

$A_t$  = ขนาดหน้าตัดของเหล็กปลอกรับแรงบิด

$bw$  = ความกว้างของหน้าตัดคาน

$S$  = ระยะห่างของเหล็กปลอก

$f_y$  = กำลังคลากของเหล็กปลอก

การออกแบบให้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนนั้นนอกจากจะกำหนดปริมาณเหล็กเสริมตามยาวและปริมาณเหล็กปลอกแล้ว ACI ยังกำหนดอีกว่าปริมาณแรงบิดที่แบกรับด้วยเหล็กปลอกจะต้องไม่เกิน 4 เท่าของกำลังที่หน้าตัดคอนกรีตจะรับได้ คือ

$$T_s \leq 4T_c$$

(49)

อีกทั้งในการทำรายละเอียดเหล็กเสริมของทั้ง 2 ส่วน คือทั้งเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาว จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดคือ

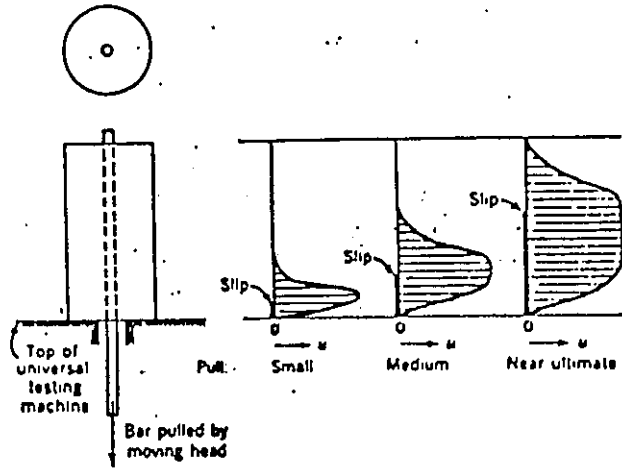
- 1) ระยะห่างของเหล็กปลอก (ปลายเปิด) จะต้องไม่เกินกว่า  $(x_1 + y_1)/4$  หรือจะต้องไม่เกินกว่า 30 ซม
- 2) เหล็กเสริมตามยาวคานจะต้องมีขนาดเกินกว่า 9 มม และจัดไว้ที่มุมของหน้าตัด ซึ่งอย่างน้อยจะต้องมี 4 เส้นเพื่อยึดเหล็กปลอกได้ อีกทั้งเหล็กตามยาวจะต้องมีระยะห่างไม่เกิน 30 ซม

## 7. แรงยึดเหนี่ยว ระยะผิว และการยึดรั้ง

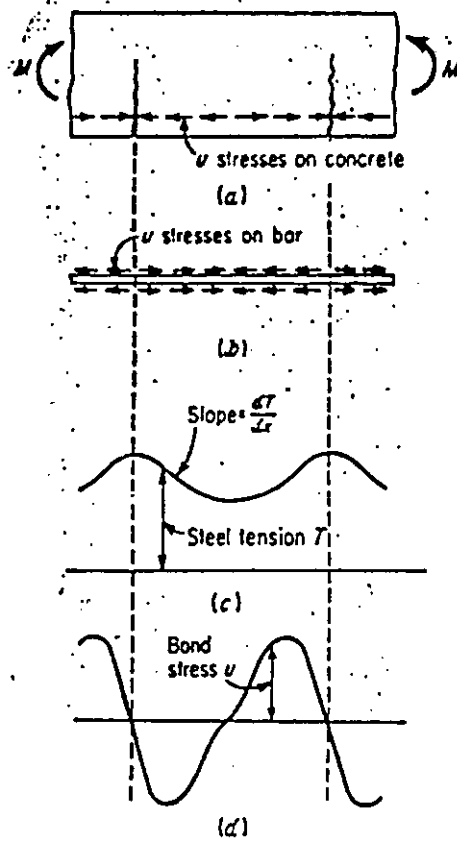
แรงยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ตามที่เคยใช้คำนวณออกแบบในวิธีการแบบกำลังใช้งาน (WSD) ได้รับการทดสอบและวิเคราะห์ พิสูจน์ได้ว่าพฤติกรรมที่แท้จริงไม่ได้เป็นไปตามที่ใช้กันอยู่ในมาตรฐานออกแบบตั้งนั้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1971 เป็นต้นมา ACI จึงได้ปรับแนวปรัชญาการออกแบบเสียใหม่ ด้วยการศึกษาผลกระทบยึดรั้งจากพฤติกรรมจริงตามที่แสดงในรูปที่ 27 คือแรงจะกระจายเฉพาะผิวที่เกิดการขยับตัวได้เท่านั้น และออกแรงดึงเพิ่มมากขึ้นการกระจายจะเพิ่มลึกไปเรื่อย ๆ จนถึงวิบัติ หรือ เกิดการรูด ในทำนองเดียวกันสำหรับกรณีของคานคอนกรีตเมื่อเกิดการแตกร้าว การกระจายแรงยึดรั้งจะเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือกำลังยึดรั้งในคอนกรีตจะถูกทำลายให้เป็นศูนย์ที่รอยแตกร้าวและค่อย ๆ กระจายเข้าสู่ส่วนที่ยังไม่มีรอยแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 28 และยังคงผลให้หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมไม่เท่ากันตลอดความยาวที่จุดแตกร้าวจะรับแรงสูงกว่าจุดที่ยังมีการยึดเกาะที่ดีกับคอนกรีต หากจะพิจารณาให้ลึกซึ้งซึ่งมีวาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตจะพบว่าแรงดึงจะทำให้ข้อยึดยึดคอนกรีตให้แตกร้าวได้ ดังแสดงในรูปที่ 29 และรูปที่ 30 ทั้งในแนวแกนและทางขวางของหน้าตัด ตามลำดับ ซึ่งขนาดเหล็กเสริม กำลังของคอนกรีต กำลังของเหล็กเสริมเอง ระยะห่างของเหล็กเสริมตามยาว ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็ก และปริมาณเหล็กปลอกย่อมส่งต่อกำลังการยึดเหนี่ยวทั้งสิ้น

ACI ได้กำหนดการยึดรั้งด้วยระยะฝังในเนื้อคอนกรีตที่สามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดคานง,  $f_y$  ภายใต้ระยะยึดรั้งมาตรฐาน ( $l_d$ ) อาจพิจารณาคำนวณแยกตามลักษณะของการรับแรง คือ

### ก. เมื่อรับแรงดึง



รูปที่ 27 การกระจายแรงยึดรั้งจากการดึง เหล็ก เส้นจากคอนกรีต



รูปที่ 28 การกระจายแรงยึดรั้งระหว่างคอนกรีตและ เหล็ก เสริมในคาน

เหล็ก < 35 มม.  $l_{db} = 0.0594 A_b f_y / \sqrt{f_c}$  (50)

แต่ต้องไม่น้อยกว่า  $= 0.0057 d_b f_y$  (51)

ลวดตะขั่วข้ออ้อย  $l_{db} = 0.113 d_b f_y / \sqrt{f_c}$  (52)

3315806

- ทั้งนี้เมื่อ
- $l_{db}$  = ระยะยึดรั้งมาตรฐาน
  - $A_b$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
  - $d_b$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม
  - $f_y$  = กำลังของเหล็กเสริมที่จุดคาน
  - $f_c$  = กำลังของคอนกรีตแบบรูปทรงแท่ง

ข. เมื่อรับแรงอัด

$$l_{db} = 0.0755 d_b f_y / f_c \quad (53)$$

แต่ต้องไม่น้อยเกิน  $0.0043 d_b f_y$  (54)

ในการคำนวณหาระยะยึดรั้งที่แท้จริง (Development length) จะต้องปรับค่าจากรยะยึดรั้งมาตรฐาน (Basic development length) ตามที่คำนวณในสมการที่ 50-54 แล้วใช้ตัวคูณตามการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2 อันประกอบด้วยกำลังของเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างเส้นการเรียง ปริมาณเหล็กเสริม และการโอบรัดด้วยเหล็กปลอก เป็นต้น

ในกรณีที่มีการงอเหล็กลัดเข้ากับชิ้นส่วนอาคารตามมาตรฐานการงอที่แสดงในรูปที่ 31 จะสามารถพัฒนาการยึดรั้งเพิ่มขึ้นอีก ในกรณีเหล็กเสริมรับแรงดึงอาจคำนวณได้จากสมการ

$$l_{db} = \frac{320 d_b}{\sqrt{f_c}} \quad (55)$$

อนึ่ง ค่าระยะการยึดรั้งนี้เป็นผลของข้อมาตรฐานนี้จะต้องปรับแต่งค่าตามตำแหน่งและการใช้งานเช่นเดียวกับระยะยึดรั้งมาตรฐานตอนต้นตามตารางที่ 2 เมื่อรวมกับค่ายึดรั้งหรือระยะฝังตามปกติจะต้องพอเพียงตามที่ จะจัดให้การทำการยึดเหล็กเสริม



ตารางที่ 2 การรับแก้ระยะยึดรั้ง (Development Length)

สภาวะการณ์	รับแรงดึง	รับแรงอัด	รับแรงดึง + ขอบมาตรฐาน
เหล็กเสริมผิวบน	1.4	-	-
เหล็กกำลังเกิน 4,200 กก/ซม <sup>2</sup>	(2-4,200/fy)	-	fy/4,200
ระยะวางตีกว่า 7.5 ซม และ มีคอนกรีตหุ้มเกินกว่า 5 ซม	0.8	-	0.70
เสริมเหล็กเกินค่าจากการคำนวณ	As(reg)/As(pro)	As(reg)/As(pro)	As(reg)/As(pro)
มีเหล็กปลอกโอบระยะห่างไม่เกิน 10 ซม	0.75	-	0.80
ระยะฝังต่ำสุด	30 ซม	-	30 ซม

การตรวจสอบและการหาระยะยึดรั้งตามที่กล่าวมานำไปประยุกต์ใช้กับการเขียนรายละเอียดเหล็กเสริม ในส่วนของระยะล๊าง (Anchorage) เช่น ล๊างเหล็กจากพื้นเข้าคาน จากคานเข้าเสา หรือจากเสาเข้าฐานราก เป็นต้น ตามรูปที่แสดงในรูปที่ 32 โดยที่ความยาวตามระยะฝังรวมกับระยะงอจะต้องมากพอที่จะพัฒนากำลังในเหล็กเสริมได้  $f_y$  ณ จุดวิกฤติที่พิจารณา การหยุดเหล็ก (Bar Cut-off, Bar Termination) บริเวณที่รับแรงดัดสูงสุดตั้งเช่นที่หัวเสาหรือกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ 33 โดยที่จุดหยุดเหล็กจะต้องมีระยะฝังพอเพียงที่รับแรงดัดได้เป็นระยะ  $l_d$  และสำหรับชุดถัดไปจะต้องคิดที่ระยะกะเก็บเข้ามาอีกเท่ากับความลึกของคานหรือ  $12$  เท่าของขนาดเหล็กเสริมโดยคิดระยะฝัง  $l_d$  เช่นกัน และในการประยุกต์เกี่ยวกับระยะยึดรั้งอีกอย่างคือการหาต่อเหล็กซึ่งกำหนดไว้ในกรณีรับแรงดึงและเหล็กเสริมที่ใช้ไม่เกิน  $2$  เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ

จำนวนเหล็กทาบ  $50, 75 \%$  ระยะทาบ  $1.3l_d$

จำนวนเหล็กทาบ  $100\%$  ระยะทาบ  $1.7l_d$

แต่ต้องไม่น้อยกว่า  $30$  ซม

ในกรณีของเหล็กรับแรงอัดกำหนดให้มีระยะทาบ  $1.0l_d$  แต่จะต้องไม่น้อยกว่า  $0.007 f_y d_b$  หรือ  $30$  ซม แต่หากกำลังของคอนกรีตต่ำกว่า  $210$  กก/ซม<sup>2</sup> จะต้องเพิ่มระยะทาบอีก  $33\%$

หากมีเหล็กเสริมแน่นมาก การทำรายละเอียดเหล็กเสริมอาจจะใช้วิธีผูกมัดเข้าด้วยกันเป็นกลุ่ม มัดละ  $2$  เส้น,  $3$  เส้น หรือ  $4$  เส้น แต่การหาต่อจะต้องเพิ่มความยาวมากขึ้น คือ

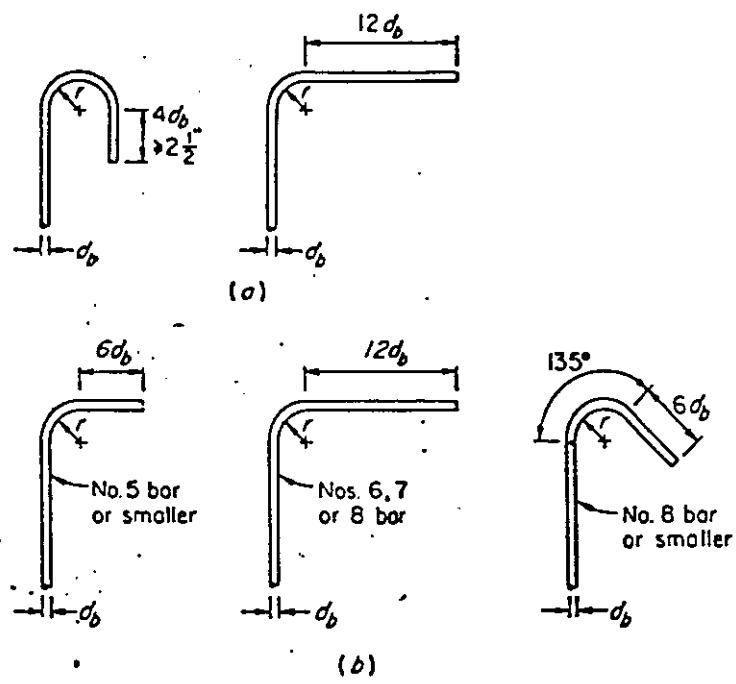
มัด  $2-3$  เส้น ระยะทาบเพิ่มขึ้น  $20\%$

มัด  $4$  เส้น ระยะทาบเพิ่มขึ้น  $33\%$

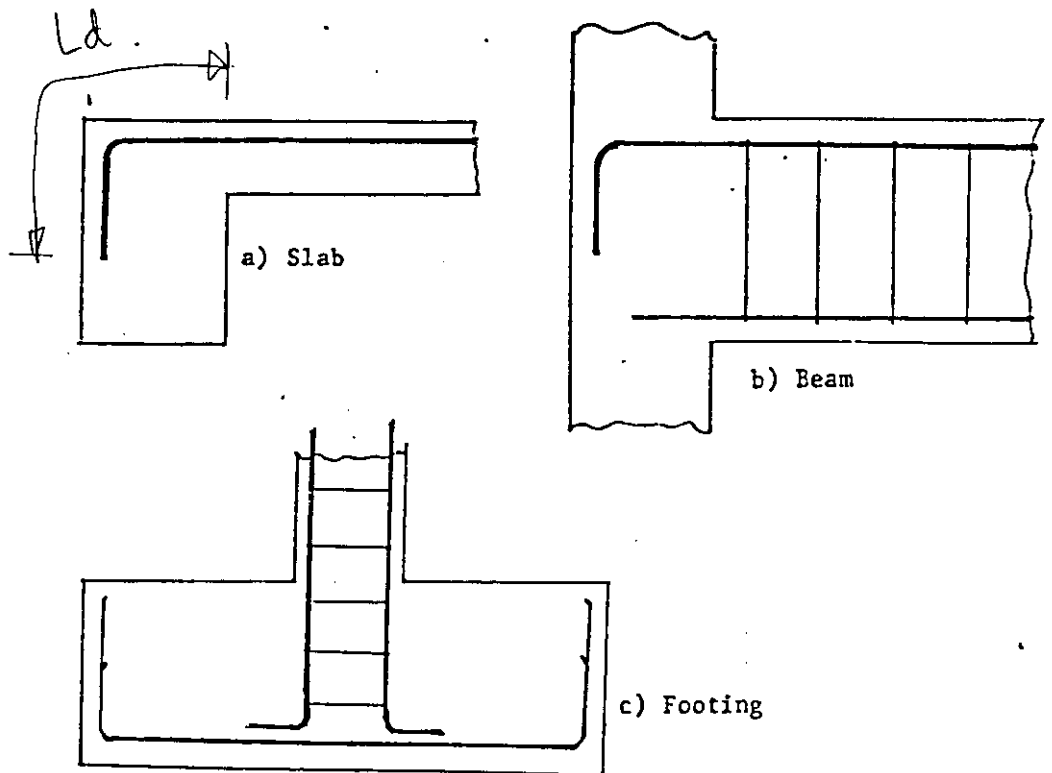
ส่วนรายละเอียดเพิ่มเติมอาจพิจารณาได้จากได้จาก ACI-Code ตามที่ใช้เป็นเอกสารอ้างอิงบทความนี้

## 8. บทสรุป

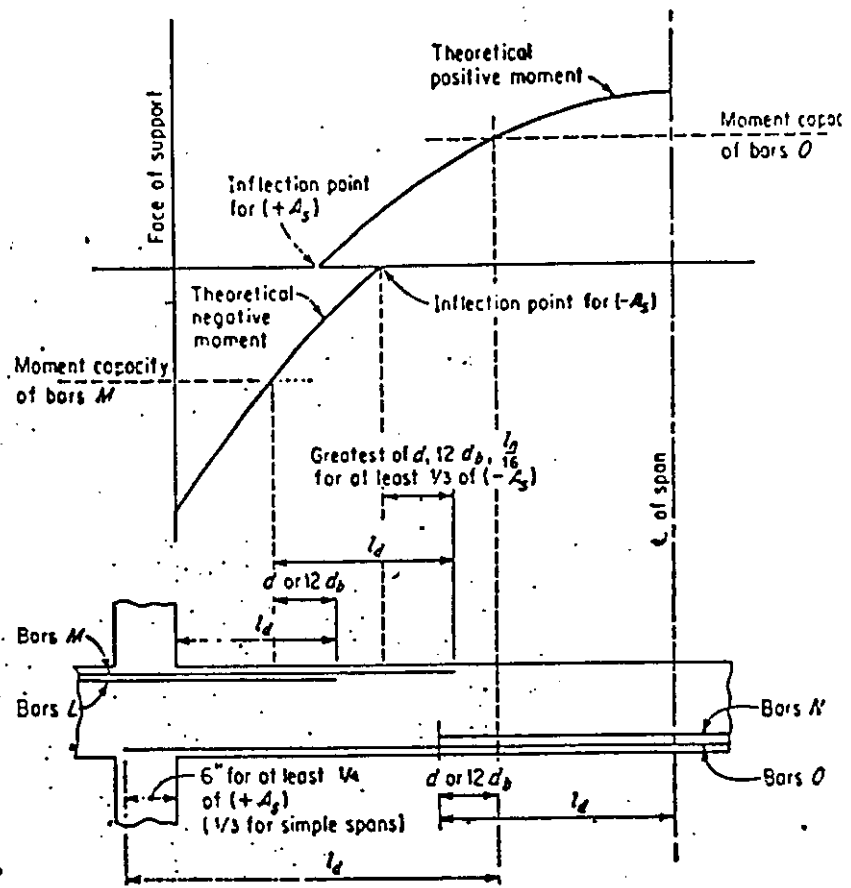
วิธีการออกแบบด้วยกำลังประลัยได้พิจารณาถึงพฤติกรรมทั่วไปช่วงอีลาสติกในภาวะการใช้งานจนถึงขั้นวิบัติและประลัยในช่วงของพลาสติกทำให้เข้าใจถึงความเหนียวทางโครงสร้าง และตระหนักถึงความปลอดภัยและความเชื่อถือทางโครงสร้างได้มากขึ้น



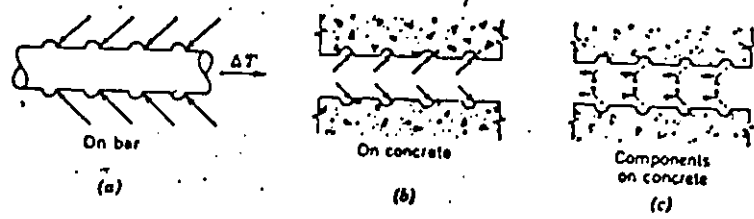
รูปที่ 31 ลักษณะและขนาดของของข้อมาตรฐาน



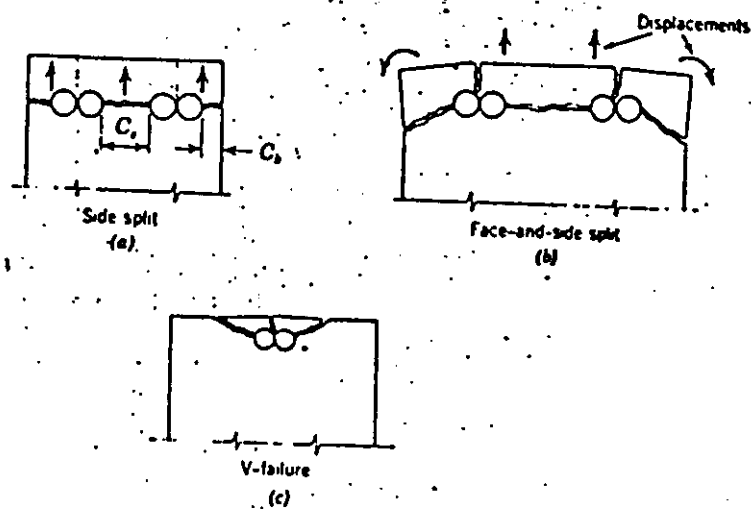
รูปที่ 32 การโค้งเหล็กที่รอยต่อองค์อาคาร



รูปที่ ๓๓ การหาค่าเหล็กสำหรับเหล็กหัวเสาและกลางช่วง



รูปที่ 29 การกระจายแรงความแนวเหล็กเส้นที่ข้อมือ



รูปที่ 30 แรงดึงในเหล็กเสริมคานยาวมีผลต่อแรงดึงในคอนกรีต  
ทางขวางของหน้าคค ทำให้เกิดการแตกแยกได้

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการนี้จะสามารถพิจารณาพฤติกรรมร่วมที่เกิดขึ้น  
ในองค์อาคารต่าง ๆ ได้ชัดเจนและละเอียดยิ่งขึ้นเช่นส่วนของแรงค้ำกับแรงเฉือน แรงอัดกับแรงดัด และแรง  
บิดกับแรงเฉือน เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการพิจารณาในระยะเริ่มต้นในวิธีการใหม่สามารถทำให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้ในการออกแบบ  
ได้มากขึ้น อีกทั้งจะสามารถจัดเหล็กฝัง ข้ออ การทาบข้อ และการหยุดเหล็กในตำแหน่งและความยาวที่  
ให้ความมั่นคงแข็งแรงได้ครบถ้วนอย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นกานนั้งให้วิศวกรมีความภูมิใจในความมั่นคงแข็งแรง  
ของโครงสร้าง ให้การใช้สอยได้อย่างดี และสามารถประหยัดการใช้วัสดุได้อย่างมากมาย

## 9. เอกสารอ้างอิง

1. ACI-318-89 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary", ACI, Detroit, 1989.
2. Ferguson, P.M., Breen, J. and Jirsa, J., "Reinforced Concrete Fundamentals", 5<sup>th</sup> Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1988.
3. Nilson, H. A., Winter, G., "Design of Concrete Structures", McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.
4. CEB-FIP-MC90 - "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures", Committee Euro-International for Concrete, Lausanne, 1990.