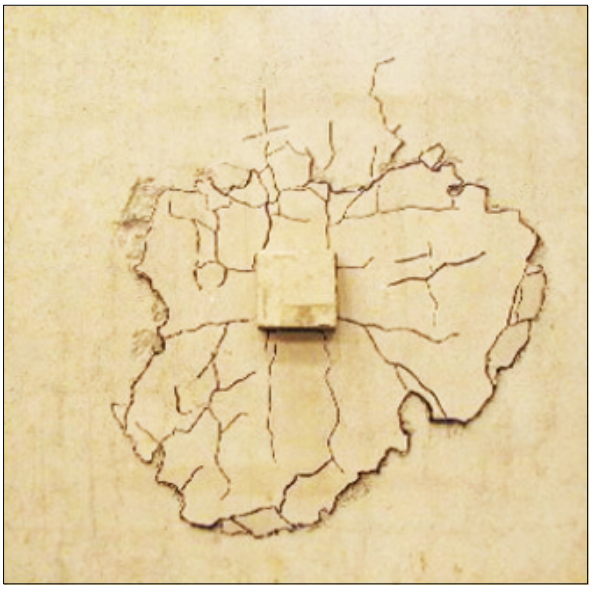
แรงเฉือนเจาะทะลุในพื้น Post Tension (ตอนที่ 1)

พื้น Post tension เป็นพื้นไร้คานคอนกรีตชนิดหนึ่ง ซึ่งอาศัยพื้นคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกแล้วถ่ายน้ำหนักลงเสาโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันการวิบัติในรูปแบบของแรงเฉือนเจาะทะลุ (Punching shear failure) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นตัวควบคุมความหนาของพื้น หรือกำหนดความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มหมวกหัวเสา (Column capital or Shear cap) หรือแป้นหัวเสา (Drop panel) การหาค่าแรงเฉือนเจาะทะลุที่เกิดขึ้นและกำลังการรับแรงเฉือนเจาะทะลุของพื้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณอย่างถูกต้อง รายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับแรงเฉือนเจาะทะลุในพื้น Post tension มีเนื้อหามาก ดังนั้นจึงขอแบ่งเนื้อหาออกเป็นตอนๆ โดยจะทยอยลงเนื้อหาเกี่ยวกับแรงเฉือนเจาะทะลุในพื้น Post tension อย่างต่อเนื่องจนครบ

รูปแบบการวิบัติโดยทั่วไปของแรงเฉือนเจาะทะลุ จะมีลักษณะเป็นรอยร้าวรอบๆ เสา ดังรูป



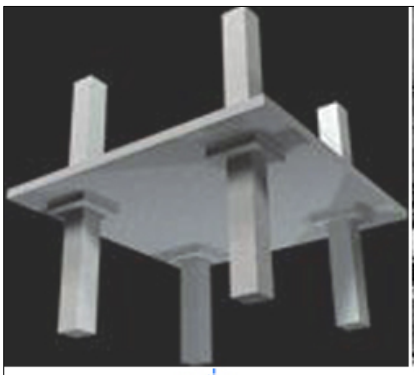
(Punching shear failure in a test specimen at University of Waterloo, Ontario)

โดยเมื่อเกิดการวิบัติ พื้นจะหลุดออกจากเสา โดยที่หัวเสาจะเหลือคอนกรีตเป็นกรวยที่หัวเสา

การวิบัติในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นโดยไม่มีการโก่งตัวเป็นสัญญาณเตือนเหมือนการวิบัติเนื่องจากแรงดัดดังนั้นการออกแบบรับแรงเฉือนเจาะทะลุจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบพื้นไร้คาน

โดยทั่วไปในการออกแบบพื้น Posttension จะกำหนดความหนาพื้นเริ่มต้นก่อนแล้วมาตรวจสอบแรงเฉือนเจาะทะลุว่าความหนาของพื้นที่กำหนดไว้สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้หรือไม่การหาแรงเฉือนเจาะทะลุที่เกิดขึ้นจริงจึงมีความสำคัญนอกจากเกิดจากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งแล้ว ผลจาก Unbalanced moment และ ผลจากแรงกระทำด้านข้างของอาคาร (แรงลม,แผ่นดินไหว เป็นต้น) ทำให้ค่าแรงเฉือนเจาะทะลุสูงขึ้นด้วย เนื้อหาในส่วนนี้จะมีวิธีการคำนวณอยู่หลายขั้นตอน “จึงขอนำเสนออยู่ในภาคผนวกต่อท้ายของบทความซึ่งอยู่ในไฟล์ที่ให้ Download”

ในกรณีที่ความหนาพื้นที่กำหนดไว้สามารถออกแบบลวดอัดแรงรับแรงดัดได้ แต่ไม่สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้ และการเพิ่มความหนาพื้นเฉพาะหัวเสาไม่ส่งผลอะไรกับงานสถาปัตยกรรมและงานระบบต่างๆ จะนิยมใช้ Column Capital ในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุ โดย Column capital ที่ใช้โดยทั่วไป จะมีรูปร่างดังนี้



รูปที่ 1

รูปที่ 2

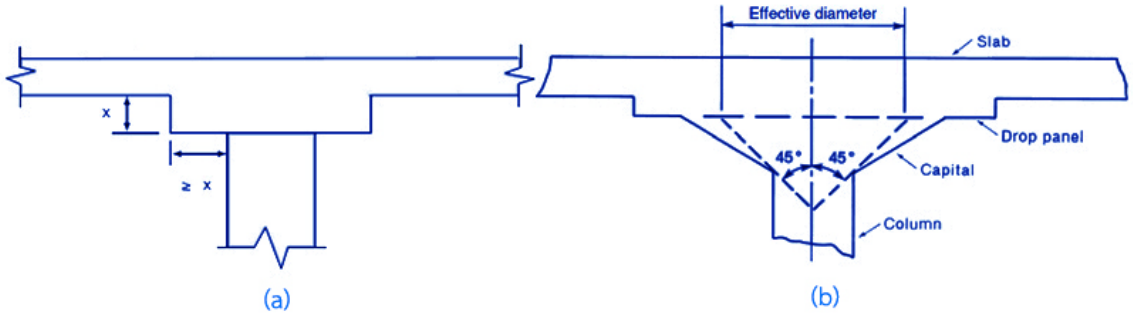
รูปที่ 3

จากรูปจะเห็นว่าสามารถทำรูปแบบของ Column capital ได้หลายรูปแบบทั้ง การเพิ่มความหนาเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมตรงๆ ดังรูปที่ 1 การทำเป็นกรวยกลม ดังรูปที่ 2 และ การทำเป็นกรวยรูปปิรามิดดังรูปที่ 3

ใน ACI318 มีข้อกำหนดลักษณะของ Column capital ไว้ในหัวข้อ 13.2.6 ดังนี้

> **13.2.6** — When used to increase the critical condition section for shear at a slab-column joint, a shear cap shall project below the slab and extend a minimum horizontal distance from the face of the column that is equal to the thickness of the projection below the slab soffit.

<u>โดยสามารถอธิบายเป็นรูปได้ดังรูปด้านล่าง</u>



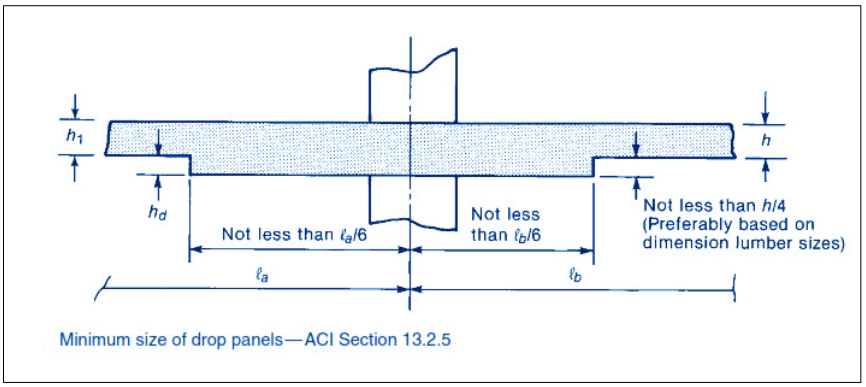
เมื่อต้องการเพิ่มเส้นรอบรูปรอบหน้าตัดวิกฤต, bo ที่ระยะ d/2 จากขอบเสา สามารถทำได้โดยเพิ่มความลึกเฉพาะบริเวณใกล้เสา โดยกำหนดให้มีระยะยื่นจากขอบเสาจะต้องมากกว่าระยะที่เพิ่มความหนาลงมา ดังรูป (a) หรือถ้าเพิ่มความหนาในลักษณะเป็นกรวย มุมจะต้องมากกว่า 45 องศา ตามรูป (b)

ส่วนในกรณีที่ความหนาของพื้นที่กำหนดมา ไม่สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุและโมเมนต์ลบได้ สามารถทำลักษณะเดียวกับ Column capital ได้ แต่ต้องขยายระยะยื่นให้มากขึ้น เรียกว่าแป้นหัวเสา (Drop panel) โดยมีลักษณะดังรูป

โดยระยะยื่นจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI318 ข้อที่ 13.2.5

> **13.2.5** — When used to reduce the amount of negative moment reinforcement over a column or minimum required slab thickness, a drop panel shall:
>
> (a) project below the slab at least one-quarter of the adjacent slab thickness; and
>
> (b) extend in each direction from the centerline of support a distance not less than one-sixth the span length measured from center-to-center of supports in that direction.

สามารถอธิบายเป็นรูปได้ ดังนี้

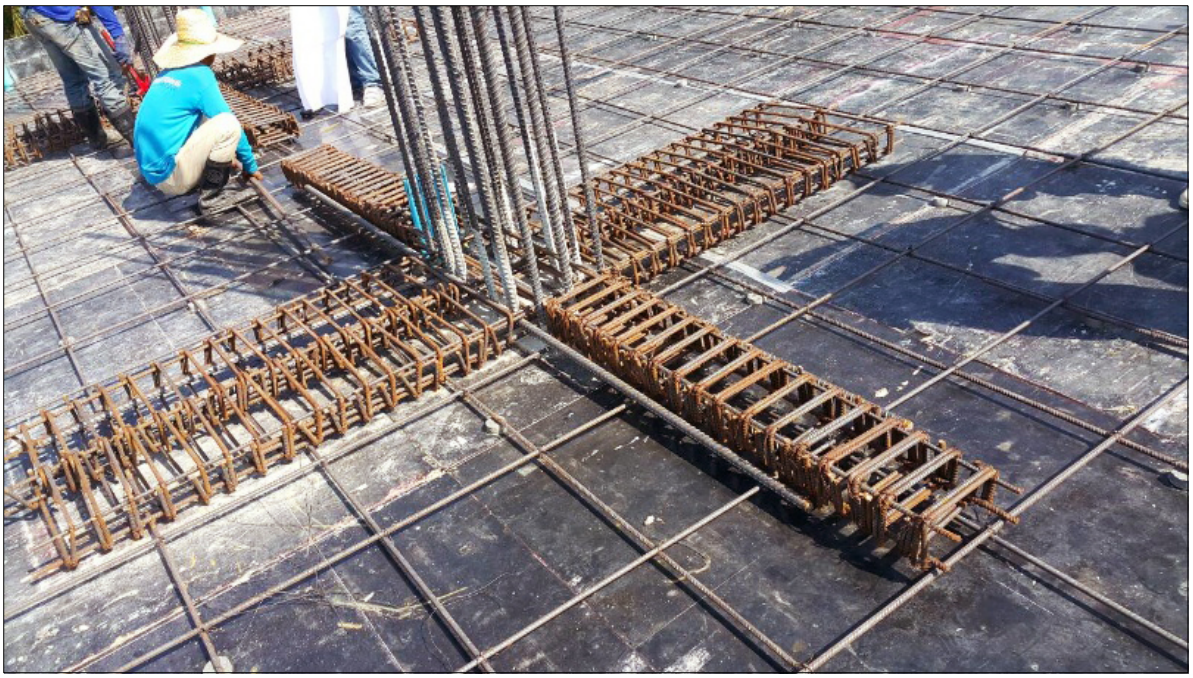


Minimum size of drop panels—ACI Section 13.2.5

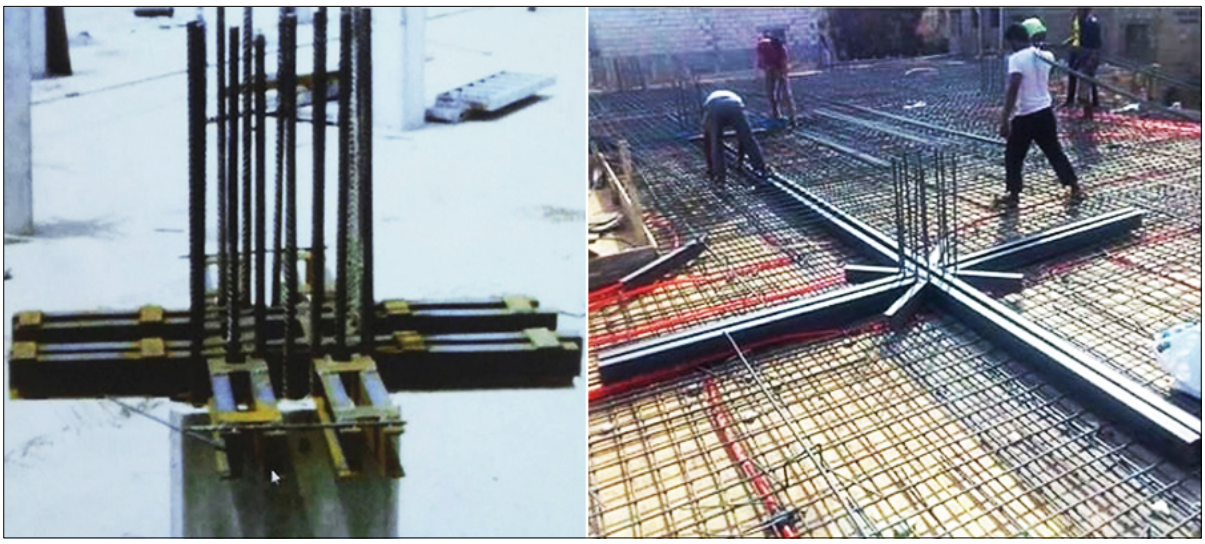
เมื่อต้องการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ลบบริเวณหัวเสาและกำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุ สามารถใช้ drop panel ในการเพิ่มกำลังได้ โดยกำหนดให้ความยาวในแต่ละด้านของ drop panel ต้องไม่น้อยกว่า 1/6 ของความยาวของช่วงเสาด้านนั้นๆ (L/6) และจะต้องเพิ่มความหนาขึ้นไม่น้อยกว่า 0.25 เท่าของความหนาพื้นเดิม

ในกรณีที่แรงเฉือนเจาะทะลุที่เกิดขึ้นความหนาพื้นที่กำหนดมาไม่สามารถรับได้ แต่เราไม่ต้องการให้มี Drop panel หรือ Column capital เรายังสามารถทำได้โดยการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุให้กับพื้นโดยการเสริมเหล็ก ซึ่งมีรูปแบบการเสริมเหล็กตามที่ ACI318 กำหนดอยู่ 3 วิธีดังนี้

1. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กเสริม (Shear reinforcement consisting of bars)



2. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กรูปพรรณ (Shear reinforcement consisting of steel I or C shaped sections, shearhead)

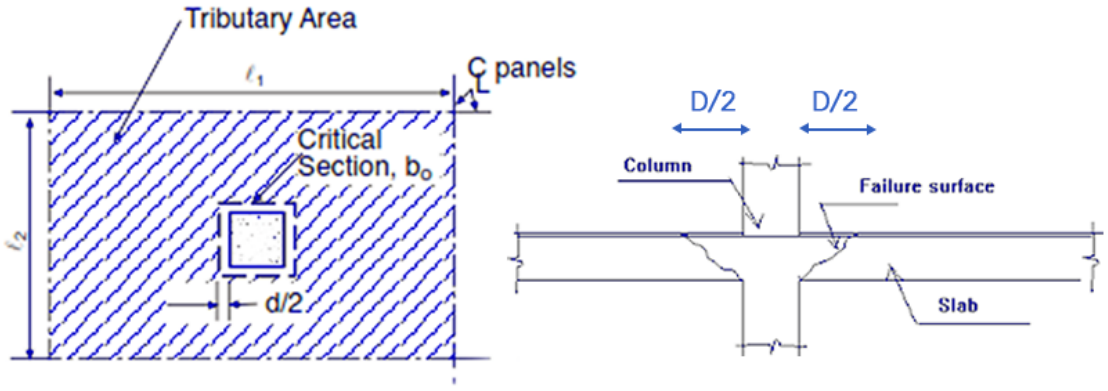


3. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กหัวหมุดเฉือน (Headed shear stud reinforcement, shear studs)

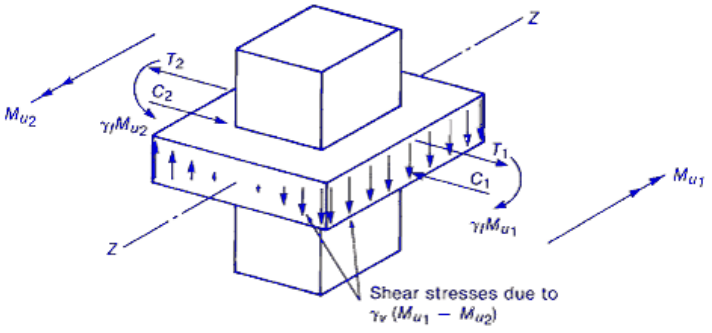
"โดยรายละเอียดการติดตั้งและการคำนวณออกแบบของทั้งสามกรณีจะกล่าวถึงในครั้งต่อไป"

ภาคผนวก

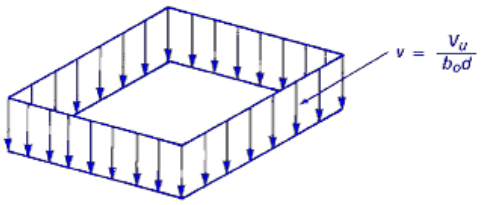
1. การคำนวณค่าแรงเฉือนเจาะทะลุในพื้น POST TENSION



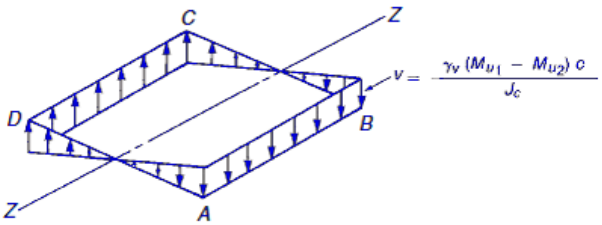
จากรูปค่าแรงเฉือนเจาะทะลุสามารถหาได้จากการกำหนดเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤติ, b_o โดยกำหนดให้เป็นระยะที่ขยายออกมาจากขอบเสาด้านละ d/2 เมื่อได้หน้าตัดวิกฤติแล้ว เราสามารถหาแรงเฉือนได้โดยคำนวณจากน้ำหนักบรรทุกที่อยู่ในพื้นที่ๆ แรเงาดังรูปด้านบน



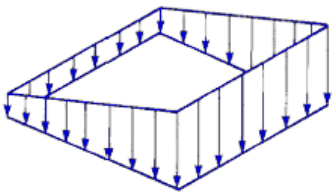
(a) Transfer of unbalanced moments to column.



(b) Shear stresses due to V_u.



(c) Shear due to unbalanced moment.



(d) Total shear stresses.

นอกจากนี้ในโครงสร้างที่เป็น Frame อาจจะเกิดโมเมนต์ไม่สมดุล (Unbalanced moment) ที่จุดต่อระหว่างพื้นกับเสาได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงค่า Punching shear ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ไม่สมดุลด้วย การคำนวณค่า shear stress มากที่สุดบนหน้าตัดวิกฤตรอบเสา โดยพิจารณาจุดต่อระหว่างเสาและพื้นที่มีแรงเฉือนและโมเมนต์เกิดขึ้น สามารถหาได้จากสมการนี้

$$v_u = \frac{Vu}{b_o d} \pm \frac{\gamma_v Mu\, c}{J}$$

โดยที่ **Mu** = ค่าโมเมนต์ที่ถ่ายลงมาที่จุดต่อ

J = ค่า Polar moment of inertia ประสิทธิผล สำหรับหน้าตัดวิกฤติ

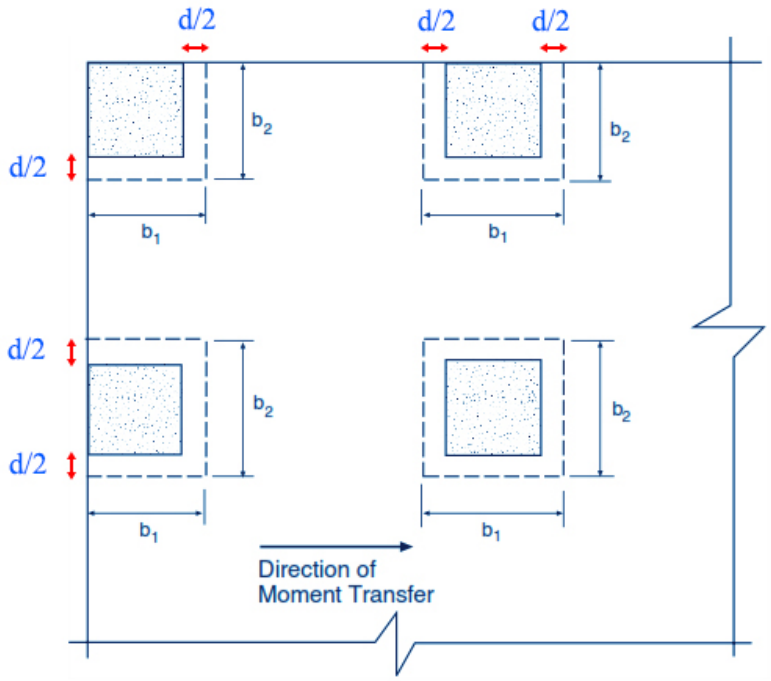
c = ระยะจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดวิกฤติถึงเส้นรอบรูปด้านที่ทำการวิเคราะห์

γ_v = สัดส่วนของโมเมนต์ไม่สมดุลที่ถ่ายด้วยแรงเฉือน = **1 - γ_f** **ACI 11-37**

γ_f = สัดส่วนของโมเมนต์ไม่สมดุลที่ถ่ายด้วยแรงดัด = $\dfrac{1}{1+\left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}}$ **ACI 13-1**

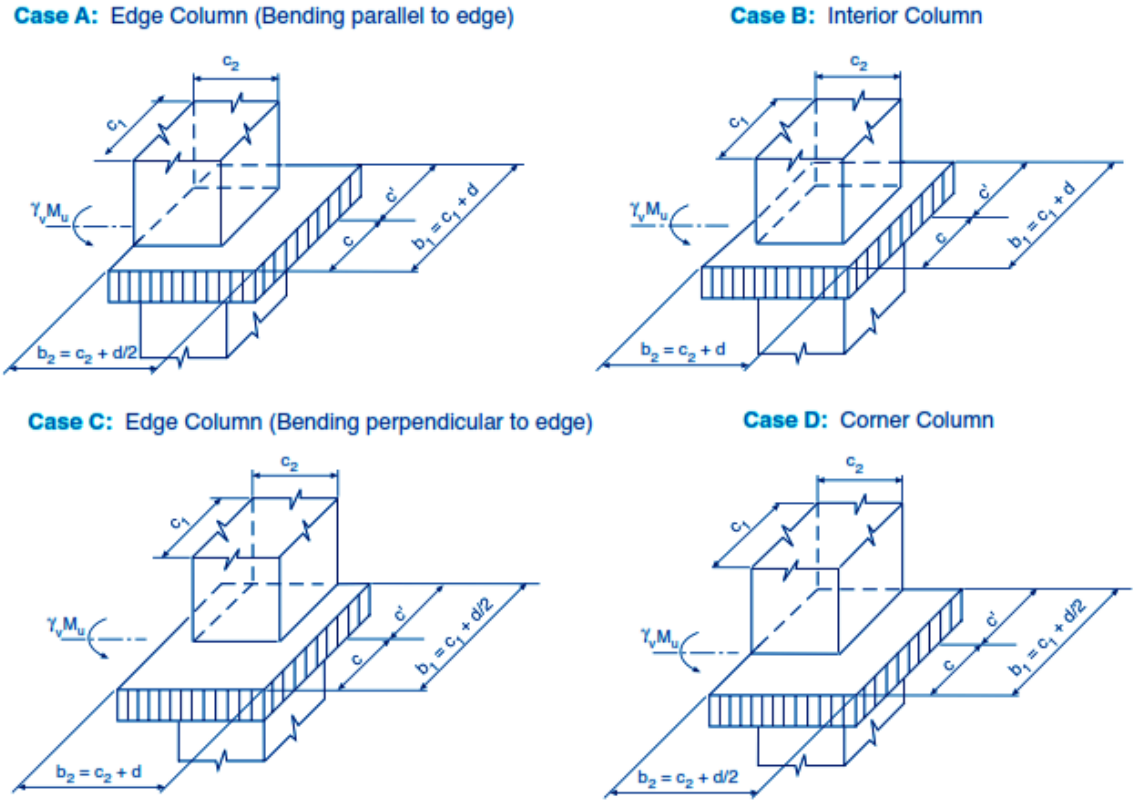
b_1 = ความกว้างของด้านของเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤติ ในแนวที่ทำการวิเคราะห์

b_2 = ความกว้างของด้านของเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤติ ในแนวตั้งฉากกับแนวที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.16 แสดงระยะ b_1 และ b_2

จากสมการด้านบน ค่า J/c สามารถคำนวณเป็นสูตรสำเร็จเพื่อช่วยในการคำนวณได้ดังรูปด้านล่างนี้



Case	Area of critical section, A_c	Modulus of critical section		c	c'
		J/c	J/c'		
A	$(b_1+2b_2)d$	$\frac{b_1d(b_1+6b_2)+d^3}{6}$	$\frac{b_1d(b_1+6b_2)+d^3}{6}$	$\frac{b_1}{2}$	$\frac{b_1}{2}$
B	$2(b_1+b_2)d$	$\frac{b_1d(b_1+3b_2)+d^3}{3}$	$\frac{b_1d(b_1+3b_2)+d^3}{3}$	$\frac{b_1}{2}$	$\frac{b_1}{2}$
C	$(2b_1+b_2)d$	$\frac{2b_1^2d(b_1+2b_2)+d^3(2b_1+b_2)}{6b_1}$	$\frac{2b_1^2d(b_1+2b_2)+d^3(2b_1+b_2)}{6(b_1+b_2)}$	$\frac{b_1^2}{2b_1+b_2}$	$\frac{b_1(b_1+b_2)}{2b_1+b_2}$
D	$(b_1+b_2)d$	$\frac{b_1^2d(b_1+4b_2)+d^3(b_1+b_2)}{6b_1}$	$\frac{b_1^2d(b_1+4b_2)+d^3(b_1+b_2)}{6(b_1+2b_2)}$	$\frac{b_1^2}{2(b_1+b_2)}$	$\frac{b_1(b_1+2b_2)}{2(b_1+b_2)}$

รูปที่ 3.17 ตารางแสดงค่า Ac, J/c และ J/c' สำหรับเสาสี่เหลี่ยม

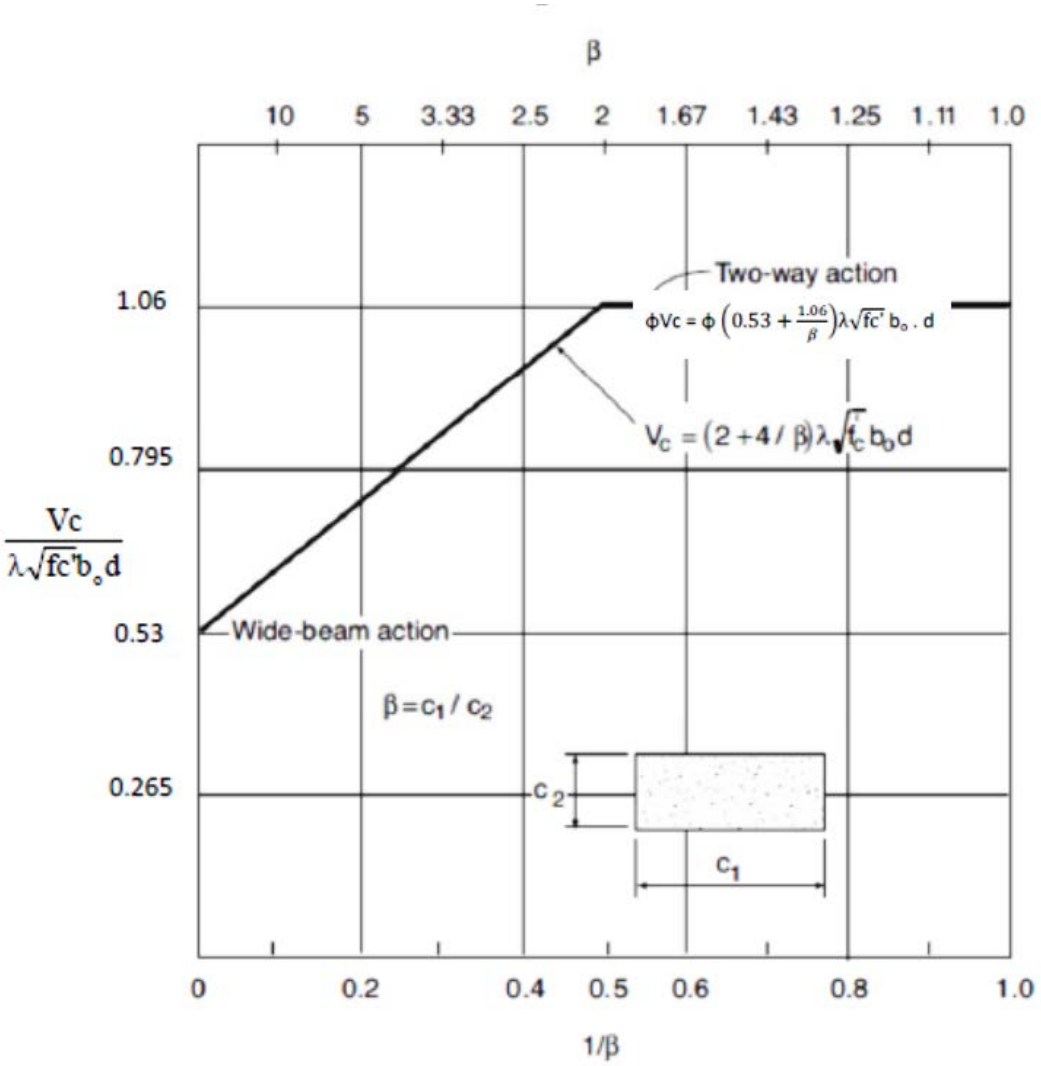
2. การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุของพื้น

ค่ากำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุของพื้น ACI ได้กำหนดไว้ดังนี้ $\varphi Vc = \varphi\ 1.06\sqrt{fc'}\ b_o\ .\ d$ แสดงไว้ในสุตรที่ ACI 11-33 แต่ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบอีกสองปัจจัยที่อาจทำให้กำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุมีค่าลดลงได้

2.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างด้านยาวและด้านสั้นของเสา, β จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุของเสามีค่าลดลง เมื่อ อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 2.0 ดังนั้นสมการกำลงรับแรงเฉือนของเสาเปลี่ยนเป็น

$$\phi Vc = \phi\left(0.53 + \frac{1.06}{\beta}\right)\lambda\sqrt{fc'}\ b_o\ .\ d \quad \textbf{ACI 11-31 (λ=1 for normal concrete)}$$

และสามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β กับสมการ $\dfrac{Vc}{\lambda\sqrt{fc'}b_o d}$ ได้ดังรูป

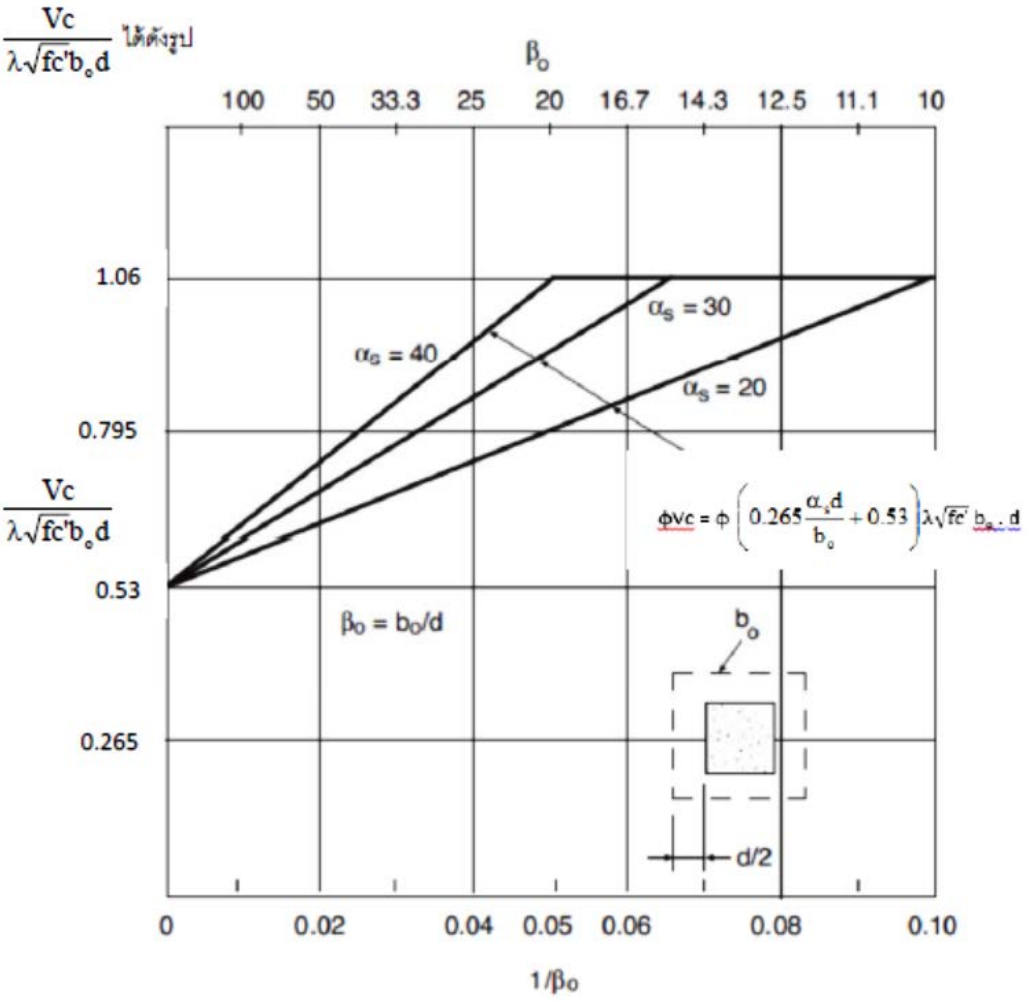


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β กับสมการ $\dfrac{Vc}{\lambda\sqrt{fc'}b_o d}$

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อค่า β มีค่าน้อยกว่า 2 หรือเสามีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาว ยาวกว่าด้านสั้นไม่เกินสองเท่า กำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุจะมีค่าไม่เกิน φ $1.06\sqrt{fc'}$ bo.d จนเมื่อเสาเป็นเสาจัตุรัสที่มีค่า β เท่ากับ 1. และเมื่อเสามีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามากขึ้นค่า β มากกว่า 2 ด้านยาวยาวกว่าด้านสั้นมากกว่าสองเท่า กำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุจะมีค่าลดลงตามสมการ จนมีค่ากำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุต่ำที่สุดไม่น้อยกว่า φ $0.53\sqrt{fc'}$ bo.d

2.2 ผลกระทบของค่าอัตราส่วนระหว่าง b_o/d ต่อกำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุ โดยพบว่าเมื่อค่า b_o/d มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุมีค่าลดลง สามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi V_c = \phi\left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 0.53\right)\lambda\sqrt{f_c'}\, b_o \cdot d \qquad \text{ACI 11-32 } (\lambda = 1 \text{ for normal concrete})$$



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β_o กับสมการ $\frac{Vc}{\lambda\sqrt{fc'}b_o d}$

จากกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ของ b_o/d กับค่ากำลังรับแรงเฉือน สำหรับเสาภายใน, เสาขอบ และเสามุม โดยกำหนดให้ เสาภายในมีค่า α_s เท่ากับ 40, เสาขอบมีค่า α_s เท่ากับ 30 และเสามุมมีค่า α_s เท่ากับ 20 เมื่อเสามีขนาดใหญ่มากขึ้นจะทำให้เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤติ, b_o มีค่ามากขึ้น และอัตราส่วน β_o มีค่ามาก แต่จะกลับส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุต่ำที่สุดไม่น้อยกว่า $\varphi\ 0.53\sqrt{fc'}\ bo.d$