



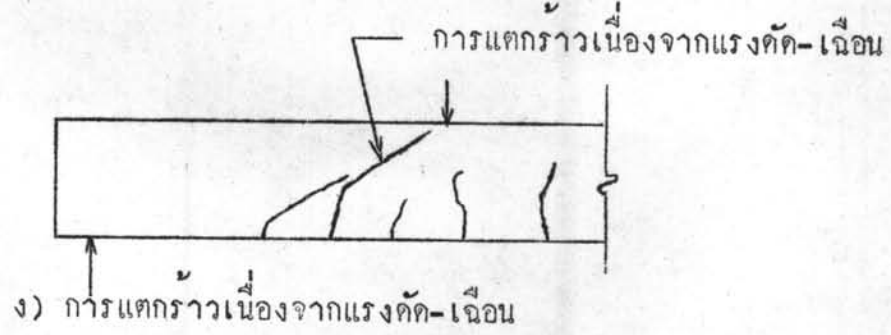
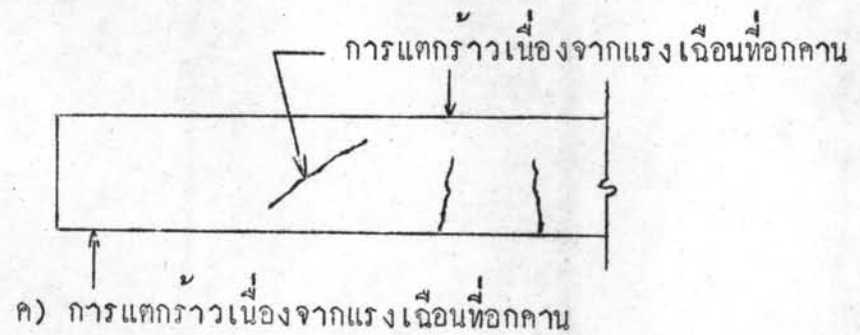
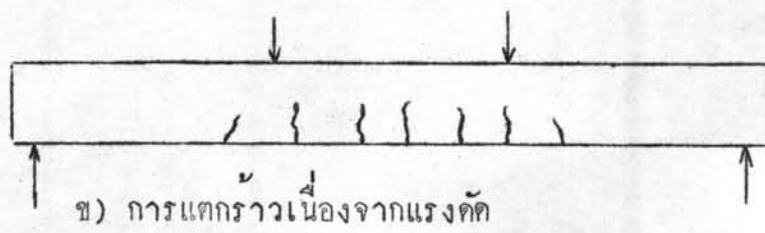
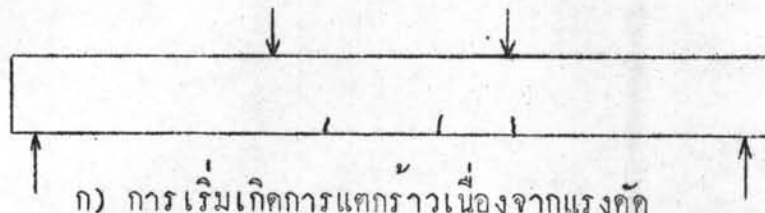
พฤติกรรมการรับแรงเฉือนโดยเนื้อคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรง

2.1 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน

ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำมีอยู่ 2 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ

2.1.1 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงคัต-เฉือน (Flexural - Shear cracking) เมื่อคานถูกน้ำหนักบรรทุกกระทำการแตกร้าวครั้งแรก จะเป็นการแตกร้าวเนื่องจากแรงคัต (Flexural cracking) เป็นแนวเล็ก ๆ เกือบตั้งฉากกับแกนแนวนอนของคาน (ตามรูปที่ 2.1 (ก)) บริเวณใต้คานซึ่งมีหน่วยแรงคัตเนื่องจากโมเมนต์คัตสูงสุด และการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกกระทำจะทำให้การแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตเพิ่มขึ้น โดยอาจจะทำให้การแตกร้าวแนวเค็มสูงขึ้นหรือเกิดการแตกร้าวลักษณะเดียวกันไกล ๆ กับแนวเค็มจนกระทั่งถึงน้ำหนักบรรทุกกระทำหนึ่งจะเกิดการแตกร้าวแบบขั้นที่เห็นใต้ปลายของรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตเอียงทำมุมกับแนวนอนเป็นแนวทแยงมุม (ตามรูปที่ 2.1 (ง)) บริเวณที่เกิดจะอยู่ระหว่างฐานรองรับและจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ การแตกร้าวเนื่องจากแรงคัต-เฉือนนี้เกิดขึ้นจากหน่วยแรงคัตทแยงในทิศทางตั้งฉากกับรอยแตกร้าวมากกว่ากำลังรับแรงคัต (Tensile Strength) ของคอนกรีต

2.1.2 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนที่อกคาน (Web - Shear cracking) ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในคานที่มีการอัดแรงสูง และมีอกคานบาง ซึ่งเป็นผลมาจากหน่วยแรงคัตหลักสูงสุดในอกคานไกลแกนสะเทินของคาน บริเวณไกล ๆ ฐานรองรับมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงคัตของคอนกรีต ลักษณะการแตกร้าวจะเป็นแนวเอียงเส้นทแยง



รูปที่ 2.1 ลักษณะการแตกร้าวชนิดต่าง ๆ ของคานคอนกรีตอัดแรง

มุมในอกคาน (ตามรูปที่ 2.1 (ค)) ในกรณีแกนสะเทินอยู่ในปีกคาน การแตกร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างปีกคานและอกคานใกล้ฐานรองรับ

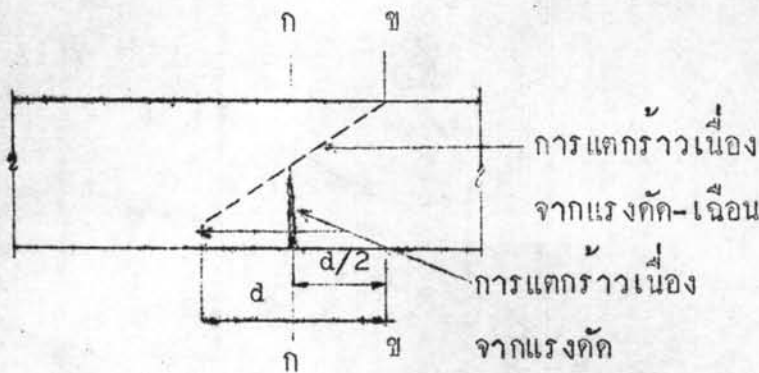
2.2 ความต้านทานแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีต

สูตรสำหรับหาความต้านทานแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรงอย่างละเอียด แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน คือแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงค้ำ-เฉือนและแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงเฉือนที่อกคาน ค่าที่ต่ำกว่าเป็นค่าทำนายความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน

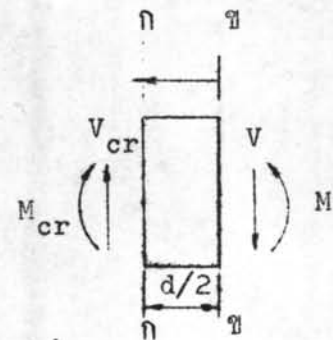
2.2.1 แรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงค้ำ-เฉือน เป็นแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตตรงแนวแตกร้าวทแยงเนื่องจากน้ำหนักทั้งหมดเมื่อรอยแตกตั้งกล้าเกิดขึ้นจากแรงเฉือนและโมเมนต์ค้ำร่วมกัน

ก. สูตรตามมาตรฐาน ACI 318-71 ⁽¹²⁾ เพื่อที่จะวิเคราะห์หาความสามารถรับแรงเฉือนของคานค้ำกล้าวรอยแตกร้าวทแยงตามรูปที่ 2.2 ถูกฉายลงบนแกนแนวนอนของคานซึ่งสัมพันธ์ยาวเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของคาน (a) พิจารณารูปตัด ข. - ข. รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำในระยะ a (ในทิศทางของการลดโมเมนต์) จะนำไปสู่รอยแตกร้าวทแยงที่ซึ่งวิกฤติที่รูปหน้าตัด ข. - ข. หน่วยแรงค้ำหลักตามรอยที่จะเกิดการแตกทแยงจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยการแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำภายในระยะ a และจะก่อให้เกิดการแตกทแยงเกิดขึ้นใกล้ ๆ กับแกนสะเทินของคาน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำที่เกิดในระยะ a จากรูปหน้าตัด ข. - ข. จะเป็นสัญญาณที่ชี้ให้เห็นการเริ่มเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำ-เฉือน

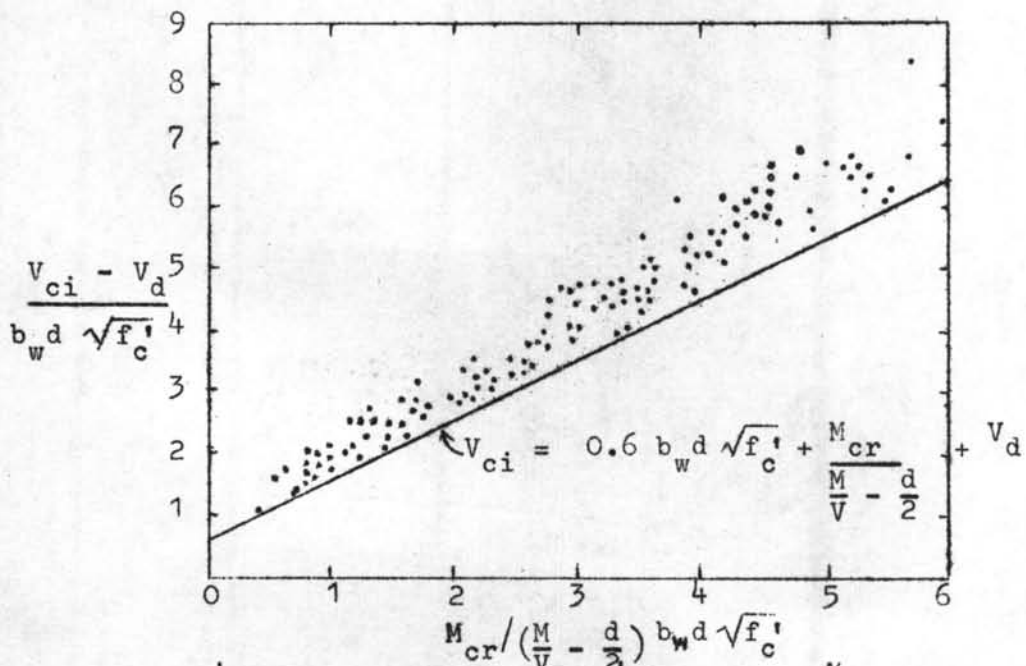
รูปที่ 2.3 แสดงชิ้นส่วนของคานที่อยู่ระหว่างหน้าตัด ก. - ก. และ ข. - ข. ของรูปที่ 2.2 โดย M และ V เป็นโมเมนต์และแรงเฉือนที่รูปหน้าตัด ข. - ข. และ M_{cr} และ V_{cr} เป็นโมเมนต์และแรงเฉือนที่รูปหน้าตัด ก. - ก. เนื่องจากการเปลี่ยนโมเมนต์จากรูปหน้าตัดหนึ่งไปยังอีกรูปหน้าตัดหนึ่ง มีค่าเท่ากับพื้นที่ของ Shear diagram ระหว่างรูปหน้าตัดทั้งสองนั้นเราจะได้อ



รูปที่ 2.2 การเกิดการแตกร้าว เนื่องมาจากแรงค้ำ-เฉือน



รูปที่ 2.3 รูปตัดแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือน-โมเมนต์



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงค้ำ-เฉือน กับอัตราส่วนของโมเมนต์เนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงค้ำต่อช่วงแรงเฉือน

$$M - M_{cr} = \left(\frac{V + V_{cr}}{2} \right) \frac{d}{2} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

ในคานาคอนกรีตอัดแรงค่าความแตกต่างระหว่าง V และ V_{cr} ในระยะ $\frac{d}{2}$ มีค่าน้อย สมมติให้ $V_{cr} = V$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} M - M_{cr} &= V \left(\frac{d}{2} \right) \\ \text{หรือ} \quad M_{cr} &= M - V \left(\frac{d}{2} \right) \\ &= V \left(\frac{M}{V} - \frac{d}{2} \right) \quad \dots\dots\dots(2.2) \end{aligned}$$

ฉะนั้น แรงเฉือนของรูปหน้าตัดที่พิจารณาจะเป็น

$$V = \frac{M_{cr}}{\frac{M}{V} - \frac{d}{2}} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

M_{cr} เป็นโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (Superimposed Load) กระทำเมื่อเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำ หน่วยเป็นปอนด์-นิ้ว ซึ่งคำนวณจาก

$$M_{cr} = \frac{I}{y_t} \left(6 \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d \right) \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

โดยคิดว่าโมดูลัสแตกหักของคอนกรีต $= 6 \sqrt{f'_c}$, f_{pe} เป็นแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากการอัดแรงและ f_d เป็นหน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ทั้งหมดมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ดังนั้น แรงเฉือนรวม V_{cr} เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่เมื่อเกิดการแตกร้าววิกฤตเนื่องจากแรงค้ำจะเป็น

$$V_{cr} = \frac{M_{cr}}{\frac{M}{V} - \frac{d}{2}} + V_d$$

ค่าแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (V_d) ได้ถูกพิจารณาแยกออกมาเนื่องจากเหตุผล 2 ประการคือ

1. น้ำหนักบรรทุกคงที่ ปกติจะเป็นน้ำหนักแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกจรจะเป็นอย่างไรก็ได้
2. ในกรณีของคานเชิงประกอบ น้ำหนักบรรทุกคงที่ จะกระทำกับคานอัดแรงก่อนที่จะเป็นคานเชิงประกอบ แต่น้ำหนักบรรทุกจรจะกระทำกับคานเชิงประกอบทั้งหมด

เมื่อนำผลการทดลองมาแสดงตามรูปที่ 2.4 โดยการลงพิกัดจุดให้ $\frac{V_{ci} - V_d}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ เป็นแกนตั้งและให้ $\frac{M_{cr}}{(\frac{M}{V} - \frac{d}{2}) b_w d \sqrt{f'_c}}$ เป็นแกนนอน จากการลากเส้นตรงผ่านจุดต่ำสุด

ต่าง ๆ ให้ความลาดเอียงเท่ากับ 1 จะทำให้ได้แรงเฉือนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของรูปหน้าตัด และกำลังของคอนกรีตเป็น $0.6 b_w d \sqrt{f'_c}$ เมื่อค่า $\frac{M_{cr}}{(\frac{M}{V} - \frac{d}{2}) b_w d \sqrt{f'_c}}$ มีค่าเป็นศูนย์

ฉะนั้น แรงเฉือนรวมที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแบบแรงค้ำ-เฉือนจะเป็น

$$V_{ci} = 0.6 b_w d \sqrt{f'_c} + \frac{M_{cr}}{\frac{M}{V} - \frac{d}{2}} + V_d \dots\dots\dots(2.6)$$

ซึ่งเป็นสมการที่ (26-12) ตามมาตรฐาน ACI 318-63

ได้มีการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสูตรตามมาตรฐาน ACI เสียใหม่ในปี ค.ศ. 1971, 1973 และ 1974 เพื่อให้ให้การคำนวณง่ายขึ้นโดยตัดเทอม $\frac{d}{2}$ ออกและให้ใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$V_{ci} = 0.6 \sqrt{f'_c} + \frac{V_i M_{cr}/M_{max}}{b_w d} \dots\dots\dots(2.7)$$

ซึ่งปรากฏในสมการ (11-11) ตามมาตรฐาน ACI 318-71 (และแก้ไข

เปลี่ยนแปลงในปี ค.ศ. 1973 และ 1974)

$$\text{หรือ } V_{ci} = 0.6 b_w d \sqrt{f'_c} + \frac{V_i M_{cr}}{M_{max}} + V_d \dots\dots\dots(2.8)$$

โดยที่ M_{max} เป็นโมเมนต์ค้ำสูงสุดที่รูปหน้าตัดที่พิจารณาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ออกแบบกระทำภายนอก หน่วยเป็นปอนด์-นิ้ว และ V_i เป็นแรงเฉือนที่รูปหน้าตัดที่พิจารณา เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกออกแบบกระทำภายนอกเกิดขึ้นพร้อมกับ M_{max} หน่วยเป็นปอนด์, V_d เป็นแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ หน่วยเป็นปอนด์, f'_c เป็นกำลังประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว, b_w เป็นความหนาของอกคาน หน่วยเป็นนิ้ว และ d เป็นความลึกประสิทธิภาพของคาน หน่วยเป็นนิ้ว

ในกรณีที่คานไม่ใช่คานเชิงประกอบ และมีน้ำหนักแผ่นฆ่าเสมอกระทำ ถ้าให้ M_u และ V_u เป็นโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบที่รูปหน้าตัดของคานที่พิจารณา

$$\frac{V_i}{M_{max}} = \frac{V_u}{M_u}$$

ดังนั้น $V_{ci} = 0.6 b_w d \sqrt{f'_c} + \frac{V_u M_{cr}}{M_u} \dots\dots\dots(2.9)$

โดยที่ $M_{cr} = \frac{I}{y_t} (6 \sqrt{f'_c} + f_{pe}) \dots\dots\dots(2.10)$

ข. สูตรที่เสนอ วิธีวิเคราะห์หาสูตรที่เสนอมีวิธีการคล้ายกับสูตรตามมาตรฐาน ACI ฯลฯ แตกต่างกันแต่เพียงได้นำน้ำหนักบรรทุกที่เข้าไปรวมกับน้ำหนักบรรทุกกระทำภายนอกเป็นน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

พิจารณารูปที่ 2.2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดกระทำกับคาน M_t และ V_t เป็นโมเมนต์และแรงเฉือนรูปหน้าตัด ข.-ข., M_{crp} และ V_{crp} เป็นโมเมนต์และแรงเฉือนรูปหน้าตัด ก.-ก. เมื่อเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำ

จากความสัมพันธ์ว่าอัตราการเปลี่ยนโมเมนต์จากรูปหน้าตัดหนึ่งไปยังอีกรูปหน้าตัดหนึ่ง มีค่าเท่ากับแรงเฉือน ดังนั้น

$$M_t - M_{crp} = \frac{V_t + V_{crp}}{2} \left(\frac{d}{2} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

เช่นเดียวกับที่ได้อธิบายมาแล้วโดยการสมมติให้ $V_{crp} = V_t$ จะได้

$$V_t = \frac{M_{crp}}{\frac{M_t}{V_t} - \frac{d}{2}} \dots\dots\dots(2.12)$$

โดยที่ $M_{crp} = \frac{I}{y_t} (6 \sqrt{f'_c} + f_{pe}) \dots\dots\dots(2.13)$

เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์และแรงเฉือนรูปหน้าตัดที่พิจารณาจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากในทางปฏิบัติ สมมติว่า

$$\frac{M_t}{V_t} = \frac{M_u}{V_u}$$

โดยที่ M_u และ V_u เป็นโมเมนต์ หน่วยเป็นปอนด์-นิ้ว และแรงเฉือน หน่วยเป็นปอนด์ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบรูปหน้าตัดของคานที่พิจารณา

006050

และ $V_t = V_{crp}$
แทนค่าในสมการ (2.12) จะได้

$$V_{crp} = \frac{M_{crp}}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{d}{2}} \dots\dots\dots(2.14)$$

เช่นเดียวกับที่ได้พิจารณามาแล้วในข้อ ก. แรงเฉือนที่เป็นสาเหตุของการแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำ-เฉือนจะมีค่าเท่ากับแรงเฉือนที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำที่ระยะ $\frac{d}{2}$ ที่พิจารณารวมกับแรงเฉือนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของรูปหน้าตัดและกำลังของคอนกรีต แรงเฉือนที่ถูกเพิ่มเข้าไปนี้มีค่าเท่ากับ $0.6 b_w d \sqrt{f'_c}$

ฉะนั้น แรงเฉือน V_{cip} ตามสูตรที่เสนอใหม่ซึ่งเกิดเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงค้ำ-เฉือน จะเป็น

$$V_{cip} = 0.6 b_w d \sqrt{f'_c} + \frac{V_u M_{crp}}{M_u} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\text{หรือ } V_{cip} = 0.6 \sqrt{f'_c} + \frac{V_u M_{crp}}{b_w d M_u} \dots\dots\dots(2.16)$$

โดยที่ได้ตัดเทอม $d/2$ ออกเช่นเดียวกับมาตรฐาน ACI

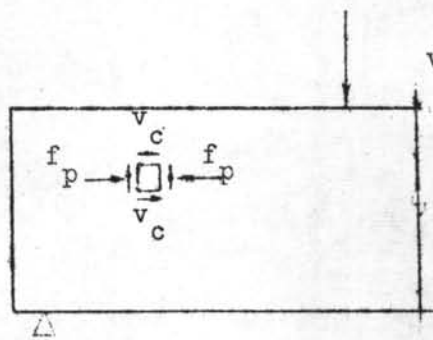
2.2.2 แรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงเฉือนที่อกคาน (12) เป็น

แรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตขณะเกิดการแตกร้าวทแยงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดเมื่อรอยแตกร้าวตั้งกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงค้ำหลักในอกคานถึงค่าหน่วยแรงค้ำของคอนกรีต

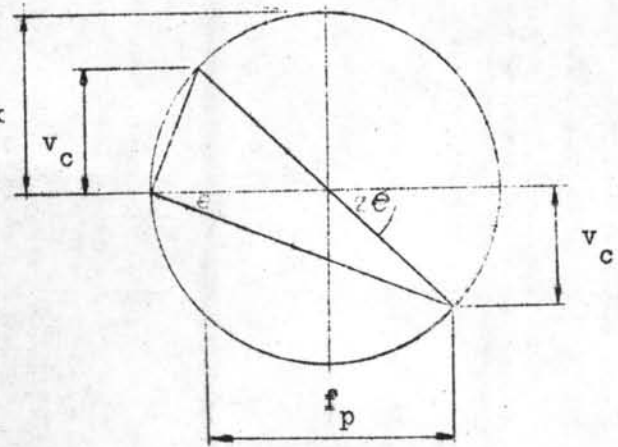
เมื่อพิจารณาว่าเนื้อคานเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและเป็นวัสดุ Elastic หน่วยแรงค้ำหลักสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของ Elasticity

ให้ v_{cw} เป็นหน่วยแรงเฉือนของคานขณะที่เกิดการแตกร้าวทแยงในอกคาน (ดูรูปที่ 2.5) จาก Mohr diagram (รูปที่ 2.6) แรงค้ำทแยงในอกคาน ณ ตำแหน่งใด ๆ หาได้จาก

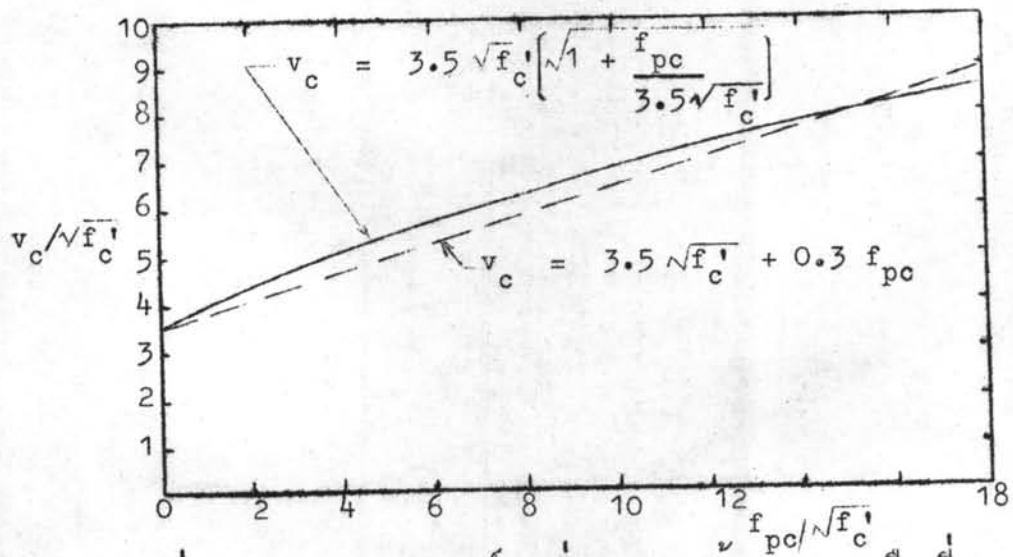
$$f_t = \sqrt{v_c + \left(\frac{f_p}{2}\right)^2} - \frac{f_p}{2} \dots\dots\dots(2.17)$$



รูปที่ 2.5 แสดงชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของ
รูปหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง
แรงเฉือนและโมเมนต์



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแตกร้าวแบบแรงเฉือนที่อกคานและ
หน่วยแรงอัดที่แกนสะเทินของคานคอนกรีตอัดแรง

โดยที่ f_c เป็นกำลังดึงของคอนกรีต, v_c เป็นหน่วยแรงเฉือน และ f_p เป็นหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากการอัดแรง ϕ ตำแหน่งที่คำนวณ v_c

จากการทดลองหน่วยแรงดึงหลักสูงสุดปกติเกิดขึ้นใกล้ ๆ กับแกนสะเทินของรูปหน้าตัดและมีค่า $4 \sqrt{f_c}$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเกิดการแตกร้าว แต่เนื่องจาก v_{cw} เป็นค่า nominal shear stress ซึ่งอาจแตกต่างจากค่าหน่วยแรงเฉือน (shear stress) ดังนั้น เพื่อให้ปลอดภัย จึงให้ใช้ $f_t = 3.5 \sqrt{f_c}$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในสมการข้างต้นซึ่งจะสามารถหาค่า v_c ได้ดังนี้

$$v_c = 3.5 \sqrt{f_c} \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{3.5 \sqrt{f_c}}} \dots \dots \dots (2.18)$$

โดยที่ f_{pc} เป็นหน่วยแรงอัดในคอนกรีตตรงศูนย์กลางของหน้าตัดรับแรงกระทำ หรือที่จุดตัดของอกคานและปีกคานเมื่อศูนย์กลางอยู่ในปีกคาน หน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รูปที่ 2.7 แสดงกราฟของสมการ (2.18) ด้วยเส้นหนาจะเห็นว่ากราฟดังกล่าวเกือบเป็นเส้นตรงในช่วง $f_{pc} / \sqrt{f_c}$ ที่มักพบในทางปฏิบัติ ดังนั้น (มาตรฐาน ACI) จึงอนุญาตให้ใช้เส้นประซึ่งให้โดยสมการ

$$v_{cw} = 3.5 \sqrt{f_c} + 0.3 f_{pc} \dots \dots \dots (2.19)$$

ในการหาค่าแรงเฉือนแทนที่ใช้สมการ (2.18)

ในกรณีที่เหล็กเสริมอัดแรงวางทำมุมกับแกนแนวนอนของคาน แรงอัดซึ่งถูกแตกอยู่ในแนวตั้ง (v_p) จะช่วยรับแรงเฉือนได้อีกส่วนหนึ่ง ดังนั้น หน่วยแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตล้วน ๆ จะเป็น

$$v_{cw} = \frac{V_{cw} - V_p}{b_w d} \dots \dots \dots (2.20)$$

โดยที่ v_{cw} เป็นแรงเฉือนเนื่องจากเกิดการแตกร้าวแบบแรงเฉือนที่อกคาน หน่วยเป็นปอนด์

แทนค่า v_{cw} ลงในสมการ (2.19) จะได้

$$V_{cw} = b_w d (3.5 \sqrt{f_c} + 0.3 f_{pc}) + V_p \dots \dots \dots (2.21)$$

ซึ่งปรากฏในสมการที่ (26 - 13) ตามมาตรฐาน ACI 318-63

หรือ
$$v_{cw} = 3.5 \sqrt{f'_c} + 0.3 f_{pc} + \frac{V_p}{b_w d} \dots\dots\dots(2.22)$$

ซึ่งปรากฏในสมการที่ (11 - 12) ตามมาตรฐาน ACI 318 - 71