หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในการคำนวณความต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรงนั้น มาตรฐาน ACI 318-71 และแก้ไขเปลี่ยนแปลงในปี ค.ศ. 1973 และ 1974 ให้ใช้ค่าต่ำสุดของค่าแรงเฉือนที่รอยแตกทแยงเนื่องจากน้ำหนักทั้งหมด เมื่อรอยแตกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์คัดรวมกัน(V_{ci}) หรือแรงเฉือนที่รอยแตกทแยงเนื่องจากน้ำหนักทั้งหมด เมื่อรอยแตกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงหลัก(Principal Tensile Stress) ในอกคานมีค่าเกินหน่วยแรงดึงที่คอนกรีตรับได้(V_{cw}) สูตรที่ใช้คำนวณหาแรงเฉือนที่รอยแตกทแยงเนื่องจากน้ำหนักทั้งหมด เมื่อรอยแตกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์คัดรวมกัน(V_{ci}) นั้น เป็นผลรวมของแรงเฉือนเนื่องจากคุณสมบัติของหน้าตัดและกำลังของคอนกรีต ($0.6\, b_w d \sqrt{f'_c}$) แรงเฉือนที่เกิดจากการแตกร้าววิกฤตเนื่องจากแรงคัด$\left(\frac{V_i M_{cr}}{M_{max}}\right)$ และแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่(V_d) สูตรที่กล่าวนี้ยุ่งยากไม่สะดวกในการนำไปใช้ในงานออกแบบ นอกจากนี้ในกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานเชิงประกอบ (Composite beam) ที่มีน้ำหนักบรรทุกลงที่มาก ๆ กระทำกับคานอัดแรงก่อนที่จะเป็นคานเชิงประกอบ สูตรอาจให้ค่า V_{ci} ของคานเชิงประกอบ(Composite Beam) น้อยกว่าค่า V_{ci} ของคานอัดแรงที่ยังไม่ได้เป็นคานเชิงประกอบ

1.2 ผลงานที่ได้ทำมาแล้ว

การรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง ได้เริ่มทำการวิจัยอย่างจริงจังเมื่อปี ค.ศ. 1959 Sozen, Zowyer และ Siess [23] ได้เสนอผลการทดลองคานคอนกรีต

อัดแรงแบบคานช่างเดียวรรมดาไม่เสริมเหล็กต้านแรงเฉือน จำนวน 99 คาน มีขนาดหน้าตัดภายนอกกว้างประมาณ 6 นิ้ว สูงประมาณ 12 นิ้ว เกือบทั้งหมดมีช่วงคาน 9 ฟุต มี 4 คานที่มีช่วงคาน 7 ฟุต หน้าตัดรูปตัวเหลี่ยมผืนผ้า 43 คาน รูป I ความหนาของอกคาน 3 นิ้ว 33 คาน และความหนาของอกคาน 1.75 นิ้ว 23 คาน คอนกรีตกำลังประลัยตั้งแต่ 1750 ถึง 8560 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราส่วนเหล็กเสริมอัดแรงแปรค่าตั้งแต่ 0.0010 ถึง 0.0096 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมแรงสูงตั้งแต่ 0. ถึง 140,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลของคานแปรค่าระหว่าง 2.4 ถึง 5.4 คาน ทุกคานถูกน้ำหนักบรรทุกกระทำจนกระทั่งวิบัติ

จากผลการทดลองคาน 88 คานเกิด inclined-tension cracking (การแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือน) เขาได้เสนอผลของการวิเคราะห์ (โดยวิธี curve fitting) หาน้ำหนักบรรทุกที่เกิด Inclined Tension Cracking ดังสูตรต่อไปนี้คือ

$$\frac{M_c}{f_t b d^2 \sqrt{b'/b}} = 1 + \frac{F_{se}}{A_c f_t}$$

โดยที่ M_c เป็นโมเมนต์ที่ Inclined Tension Cracking หน่วยเป็นปอนด์-นิ้ว f_t เป็นกำลังดึงของคอนกรีตที่สมมุติขึ้น หน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว, b เป็นความกว้างของปีกคานด้านบน หน่วยเป็นนิ้ว, b' เป็นความหนาของอกคาน หน่วยเป็นนิ้ว, d เป็นความลึกประสิทธิผล หน่วยเป็นนิ้ว, F_{se} เป็นแรงดึงประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรง หน่วยเป็นปอนด์, A_c เป็นเนื้อที่ของหน้าตัดคาน หน่วยเป็นตารางนิ้ว

ผลของการเปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ยระหว่างการทดลองกับการทำนาย Inclined Cracking load สำหรับคานทั้งหมดเป็น 1.00 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.074

ปี ค.ศ. 1962 Sozen, M.A., และ Hawkins, N.M. [22] ได้วิจารณ์รายงานเรื่องแรงเฉือนและแรงดึงทแยง (Shear and Diagonal Tension) ซึ่งเสนอโดยคณะกรรมการร่วม ACI-ASCE 326 [9] เขาได้เสนอผลของการทดลองคาน

คอนกรีตอัดแรงจำนวน 190 คาน ซึ่งทำการทดลองที่มหาวิทยาลัย Illinois ทั้งประเภทที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือนและมีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน และทั้งประเภทที่ไม่มีการอัดแรงจนกระทั่งถึงประเภทที่มีการอัดแรงสูง เมื่อนำข้อมูลที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนของคานช่วงเดียวธรรมดามาลงพิกัดจุด โดยให้ $V_{ci}/b_w d\sqrt{f_c'}$ เป็นแกนตั้ง และ $M_{cr}/\left[(M/V_d) - 0.5\right] b_w d^2 \sqrt{f_c'}$ เป็นแกนนอน แล้วพบว่าจุดต่าง ๆ เหล่านั้นไม่กระจัดกระจายจากเส้นตรง ซึ่งเขาเสนอให้ใช้คำนวณค่าแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน ดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{ci}}{b_w d\sqrt{f_c'}} = 0.6 + \frac{M_{cr}}{\left(\frac{M}{V} - 0.5\right) b_w d^2 \sqrt{f_c'}}$$

โดยที่ M_{cr} เป็นโมเมนต์แตกร้าวเนื่องจากแรงดัด หน่วยเป็นปอนด์-นิ้ว (คำนวณโดยสมมติโมดูลัสแตกร้าว เท่ากับ $6\sqrt{f_c'}$, f_c' หน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว b_w เป็นความกว้างของอกคาน หน่วยเป็นนิ้วและ d เป็นความลึกประสิทธิผล หน่วยเป็นนิ้ว)

ปี ค.ศ. 1963 American Concrete Institute (5) ได้เสนอมาตรฐานซึ่งกำหนดสูตรการรับแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตตรงแนวแตกหแยงให้เป็นค่าต่ำสุดของค่าแรงเฉือนที่รอยแตกหแยง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดเมื่อรอยแตกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดรวมกัน (V_{ci}) หรือแรงเฉือนที่รอยแตกหแยงเนื่องจากน้ำหนักทั้งหมดเมื่อรอยแตกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงหลักในอกคานมากเกินควร (V_{cw}) สำหรับในคานปกติค่า V_{ci} คำนวณได้จากสมการ

$$V_{ci} = 0.6\, b_w d\sqrt{f_c'} + \frac{M_{cr}}{\frac{M}{V} - \frac{d}{2}} + V_d$$

แต่ต้องไม่น้อยกว่า $1.7\, b_w d\sqrt{f_c'}$

โดยที่ $M_{cr} = \frac{I}{y_t}(6\sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d)$

ค่า $\frac{M}{V}$ จะต้องเป็นผลมาจากการแผ่น้ำหนักซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดนั้น

และในปีเดียวกัน Evans และ Schumacher [13] ได้เสนอผลการวิเคราะห์การทดลองคานคอนกรีตอัดแรง จำนวน 40 คาน ที่เกิดการแตกร้าวทแยง โดยใช้วิธี curve fitting ได้ว่าการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง (ทั้งแรงเฉือนเนื่องจากแรงดัด-เฉือน และแรงเฉือนเนื่องจากแรงเฉือนที่อกคาน)

$$V_c = (0.72 + 10.0 \frac{f_h}{f_t'}) (\frac{44}{a/d} + 16) \frac{f_t}{480} bd (\frac{b_w}{b})$$

โดยที่ f_h = หน่วยแรงอัดประสิทธิผลของคานคอนกรีตที่ศูนย์กลางของรูปหน้าตัดของคอนกรีต หน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว, f_t = กำลังดึงแตกร้าวของคอนกรีตได้จากการทดลองคานที่ไม่มีเหล็กเสริม หน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว, b = ความกว้างของคาน หน่วยเป็นนิ้ว, b_w = ความหนาของอกคาน หน่วยเป็นนิ้ว

ปี ค.ศ. 1967 Olesen, Sozen และ Siess [20] ได้เสนอผลการทดลองคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานช่วงเดียวธรรมดา จำนวน 129 คาน โดยมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน มีรูปหน้าตัดภายนอกของคานกว้างประมาณ 6 นิ้ว สูงประมาณ 12 นิ้ว ทั้งหมดมีช่วงคาน 9 ฟุต หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 5 คาน รูป I ความหนาของอกคาน 3 นิ้วและ 1.75 นิ้ว จำนวน 114 คาน ที่เหลือ 10 คานเป็นคานเชิงประกอบรูป I อกคาน 1.75 นิ้ว มีแผ่นพื้นคอนกรีตข้างบนขนาดสูง 2 นิ้ว กว้าง 24 นิ้ว มีเหล็กเสริมอัดแรงแปรค่าตั้งแต่ 0.0467 ถึง 0.713 เปอร์เซนต์ วางอยู่ในแนวเส้นตรงจำนวน 110 คาน และที่เหลือนอกจากนั้นทำมุมกับแนวนอนตรงตำแหน่งที่จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมแรงดึงสูงมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 127,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คอนกรีตมีกำลังประลัยตั้งแต่ 2,500 ถึง 7,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เหล็กเสริมต้านแรงเฉือนมีทั้งวางในแนวดิ่งและแนวเอียง และมีทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 0.67 เปอร์เซนต์ เทียบกับปีกคานด้านบนระยะเรียงตั้งแต่ $1\frac{7}{8}$ นิ้ว ถึง $10\frac{1}{2}$ นิ้ว คานเกือบทั้งหมดถูกทดลองภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเป็นจุด (1 จุดหรือ 2 จุด) อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลของคานแปรค่าตั้งแต่ 2.3 ถึง 5.4 คาน 7 คานถูกทดลองภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบล้อเลื่อน

เขาได้เสนอสรุปผลการวิเคราะห์ผลของการทดลองกำหนดสูตรการรับแรงเฉือนเนื่องจากลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือน ดังนี้

$$V_{cf} = \frac{M_{cr} + V_d}{\frac{M}{V} - \frac{d}{2}} + b_w d \sqrt{f_c'}$$

โดยที่ V_{cf} เป็นแรงเฉือนรวมของหน้าตัดนั้น ขณะที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือน หน่วยเป็นปอนด์, M_{cr} เป็นโมเมนต์แตกร้าวที่ต้านทานน้ำหนักบรรทุกจรที่หน้าตัดที่พิจารณา หน่วยเป็นปอนด์-ฟุต, $\frac{M}{V}$ เป็นอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์กับแรงเฉือนของน้ำหนักจรที่หน้าตัดที่พิจารณา หนวยเป็นฟุต, d = ความลึกประสิทธิผล หน่วยเป็นฟุต, V_d = แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่หน้าตัดนั้น หน่วยเป็นปอนด์

ค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการทดลองต่อค่า V_{cf} ที่ได้จากสูตรข้างต้นของคาน 87 คานที่เกิดการแตกร้าว ลักษณะดังกล่าวนี้เป็น 1.10 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.087

ปี ค.ศ. 1971 American Concrete Instutute [6] ได้เสนอมาตรฐาน (ซึ่งแก้ไขเปลี่ยนแปลงในปี ค.ศ. 1973 และ 1974) กำหนดสูตรการรับแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตเสียใหม่ สำหรับการคำนวณอย่างละเอียดให้ใช้ค่าหน่วยแรงเฉือนที่น้อยที่สุดของ v_{ci} หรือ v_{cw} ดังนี้

$$v_{ci} = 0.6 \sqrt{f_c'} + \frac{V_d + V_i M_{cr}/M_{max}}{b_w d}$$

แต่จะต้องไม่น้อยกว่า $1.7 \sqrt{f_c'}$

โดยที่ $M_{cr} = \frac{I}{y_t} (6 \sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d)$

ปี ค.ศ. 1977 คณะกรรมการรวม ACI-ASCE 426 [10] ได้เสนอสูตรการรับแรงเฉือน V_{ci} ที่ปรับปรุงใหม่เพื่อสามารถใช้คำนวณหาแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่ไม่มี

แรงอัดด้วยดังนี้

$$V_{ci} = v_b b_w d + V_d + \frac{V_i M_o}{M_{max}}$$

โดยที่ $M_o = \frac{I}{y_t}(f_{pe} - f_d)$

$$v_b = (0.8 + 120\, p_w)\, f_c'$$

และ v_b จะต้องไม่มากกว่า $2.3\sqrt{f_c'}$ และไม่น้อยกว่า $\sqrt{f_c'}$

$$p_w = A_s + A_{ps}/b_w d$$

ค่าของ M_{max} และ V_i จะคำนวณจากน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายที่เป็นสาเหตุของการเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดที่รูปหน้าตัดนั้น

1.3 <u>วัตถุประสงค์ของการวิจัย</u>

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์คือ

1.3.1 ปรับปรุงสูตรการรับแรงเฉือน v_{ci} ของคานคอนกรีตอัดแรงตามที่ปรากฏในมาตรฐาน ACI 318-71 (และแก้ไขเพิ่มเติมในปี ค.ศ. 1973 และ 1974) โดยไม่นำน้ำหนักบรรทุกคงที่มารวมด้วย ให้ง่ายและสะดวกที่จะนำไปใช้ในงานออกแบบ

1.3.2 วิเคราะห์เชิงสถิติของสูตรการรับแรงเฉือนตามข้อ 1.3.1 โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่มีผู้วิจัยไว้แล้ว

1.3.3 ศึกษาว่าสูตร ACI 318-71 ฯลฯ จะทำนายค่า V_{ci} ได้ถูกต้องเพียงไรเมื่อน้ำหนักบรรทุกคงที่ภายนอกกระทำกับคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานเชิงประกอบ

1.4 <u>ขอบข่ายของการวิจัย</u>

1.4.1 การวิจัยนี้มุ่งจะปรับปรุงเฉพาะสูตรการรับแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน V_{ci} ของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 318-71

(และแก้ไขเพิ่มเติมในปี ค.ศ. 1973 และ 1974) เท่านั้น ไม่พิจารณาแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวที่อกคาน (V_{cw})

1.4.2 คานคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการวิจัยจะเป็นคานช่วงเดียวธรรมดา มีรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูป I และคานเชิงประกอบไม่รวมถึงคานต่อเนื่อง คานยื่น และคานอย่างอื่น มีน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด (1 จุดหรือ 2 จุด) และเหล็กเสริมอัดแรงอยู่ในแนวเส้นตรงเท่านั้น

1.4.3 ในการทดลองจะทำเฉพาะคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานเชิงประกอบ (ซึ่งยังไม่มีข้อมูลที่อื่นที่จะนำมาใช้ในการวิจัยได้) โดยการเปลี่ยนขนาดของปีกคาน เปอร์เซ็นต์ของการอัดแรงในคอนกรีตและกำลังของคอนกรีต

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

1.5.1 เนื่องจากวิธีการคำนวณการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI 318-71 ฯลฯ ยุ่งยากและยืดยาว มีปัญหา ในกรณีนำน้ำหนักบรรทุกลงที่ซึ่งไม่เป็นองค์ประกอบของหน้าตัด (ในกรณีน้ำหนักบรรทุกลงที่ภายนอกมากระทำ) มาคำนวณการรับแรงเฉือน ดังนั้น การปรับปรุงสูตรการรับแรงเฉือนโดยไม่นำน้ำหนักบรรทุกลงที่มารวมด้วยจะทำให้ลดความยุ่งยากในการคำนวณลงได้ สะดวกที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติสำหรับงานออกแบบ

1.5.2 ทำให้สามารถทราบว่าสูตรการรับแรงเฉือน V_{ci} โดย ACI และสูตรที่ปรับปรุงสามารถทำนายค่าแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนได้ถูกต้องใกล้เคียงอย่างไร โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนเพียงไร

1.5.3 ทำให้ทราบถึงขอบข่ายการใช้สูตรการรับทรงเฉือน V_{ci} และสูตรที่ปรับปรุงในกรณีน้ำหนักบรรทุกลงที่มาก ๆ ภายนอกกระทำกับคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานเชิงประกอบ

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.6.1 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน และแบบแรงเฉือนที่อกคาน

1.6.2 นำผลการทดลองที่ได้ตีพิมพ์ไว้แล้วทั้งประเภทที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือนและมีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน มาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

1.6.3 ออกแบบและสร้างคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานเชิงประกอบ ทำการทดลองการรับน้ำหนักบรรทุกของคานและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบกับสูตรเดิมและสูตรที่ปรับปรุงใหม่

1.6.4 ศึกษาสูตรของ ACI ว่าจะทำนายค่า V_{ci} ได้ดีอย่างไรในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกคงที่ภายนอกกระทำกับคานคอนกรีตอัดแรงแบบคานเชิงประกอบ

1.6.5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ