บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1สมการควบคุมของแผ่นพื้นภายใต้การดัด(Governing differential equation for plates in bending)[1]

พิจารณาชิ้นส่วนเล็กๆของแผ่นพื้นขนาด dx,dyและhตามรูปที่ 1 ถ้ากำหนดให้dxและ dyมีค่าเป็นหนึ่ง แรงภายใน M_x M_y M_{xy} V_xและV_y ของชิ้นส่วนเล็กๆเป็นแรงที่ได้จากผลรวมของความเค้นที่สอดคล้องกันดังนี้

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_{xz} dz, M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_{yz} dz \qquad (2.1)$$

$$M_{yx} = -M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz \qquad (2.2)$$

$$V_x = \int_{+\frac{h}{2}}^{-\frac{h}{2}} \tau_{xz} dz, V_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{yz} dz \qquad (2.3)$$

2.1.1.1การสมดุลย์(Equilibrium)

จากการสมดุลย์ของแรงในแนวดิ่งและผลรวมของโมเมนต์รอบขอบ d_x และ d_y เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + q = 0 \qquad (2.4)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} - V_x = 0 \qquad (2.5)$$

$$-\frac{\partial M_y}{\partial y}+\frac{\partial M_{xy}}{\partial x}+V_y=0 \qquad \textbf{(2.6)}$$

ซึ่ง q เป็นแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นต่อหน่วยพื้นที่ จากการรวมสามสมการข้างบนเข้าด้วยกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2}-2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2}=-q \qquad \textbf{(2.7)}$$

2.1.1.2การเสียรูป(Deformation)

จากรูปที่ 2 การเสียรูป uและvในทิศทางแกน xและyที่จุดใดๆระยะ zจากผิวกลางของแผ่นพื้น ซึ่งแสดงในเทอมของความชันเนื่องจากการเสียรูปของผิวกลาง จะได้ว่า

$$u=-z\frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{และ} \quad v=-z\frac{\partial w}{\partial y} \qquad \textbf{(2.8)}$$

ซึ่ง w เป็นการแอ่นตัวในทิศทางของแกน z การอนุพันธ์บางส่วนหมายถึงความชันของผิวการแอ่นตัวซึ่งเท่ากันกับการหมุนของเส้นตั้งฉากกับผิวกลาง ความเครียดที่เกิดขึ้นซึ่งพิจารณาถึงความสอดคล้อง(Compatibility)และแสดงในรูปของการแอ่นตัว ดังนั้น

$$\varepsilon_x=-z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2},\varepsilon_y=-z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad \text{และ} \quad \gamma_{xy}=-2z\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y} \qquad \textbf{(2.9)}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางตามกฎของฮุค (Hook's law) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงในรูปของการแอ่นตัวของผิวกลางได้ ดังนั้น

$$\sigma_x=-\frac{Ez}{(1-\upsilon^2)}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\upsilon\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \qquad \textbf{(2.10)}$$

$$\sigma_y=-\frac{Ez}{(1-\upsilon^2)}\left(\upsilon\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right) \qquad \textbf{(2.11)}$$

$$\tau_{xy} = -\frac{Ez}{(1-\upsilon^2)}(1-\upsilon)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad \textbf{(2.12)}$$

แทนค่าสมการที่ 2.10-2.12 ลงในสมการ 2.1-2.3 จะได้ว่า

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x}\right) \quad \textbf{(2.13)}$$

$$M_y = -D\left(\upsilon\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \quad \textbf{(2.14)}$$

$$M_{xy} = D(1-\upsilon)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad \textbf{(2.15)}$$

ซึ่ง $D = \frac{Eh^3}{12(1-\upsilon^2)}$ ซึ่งแสดงความแกร่งต่อการดัดของแผ่นพื้นหนึ่งแถบในความกว้างหนึ่งหน่วย จากสมการ 2.5,2.6และสมการ2.13,2.14และ2.15 จะได้แรงเฉือนในเทอมของการแอ่นตัว

$$V_x = -D\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2}\right) \quad \textbf{(2.16)}$$

$$V_y = -D\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y}\right) \quad \textbf{(2.17)}$$

2.1.1.3สมการของลากรางค์(Lagrange's Eqaution)

จากการแทนสมการ2.13,2.14และ2.15ลงในสมการ2.7 ก็จะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับ 4 ซึ่งจะเป็นสมการควบคุมการแอ่นตัวของแผ่นพื้นในช่วงยืดหยุ่น ดังนั้น

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad \textbf{(2.18)}$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการวิเคราะห์แผ่นพื้นเนื่องจากการดัด การแอ่นตัวของแผ่นพื้นสามารถหาค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.18 ซึ่งต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ขอบของแผ่นพื้น แรงภายในต่างๆสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่2.13-2.17

2.1.2การถ่ายแรงเฉือนในแผ่นพื้นช่วงภายใน[2]

โดยการใช้ Cartesian coordinate กำหนดแกน x และ y วางในระนาบกลางของแผ่นพื้นดังรูปที่ 3 และพิจารณาการหมุนแกนใดๆของแกนอ้างอิง n และ t ก็จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบของแรงเฉือนในแนวขวางได้ดังนี้

$$V_n = V_x \cos\varphi + V_y \sin\varphi \qquad \textbf{(2.19)}$$

$$V_t = -V_x \sin\varphi + V_y \cos\varphi \qquad \textbf{(2.20)}$$

ผลรวมของกำลังสองของสมการ 2.19และ2.20จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า φ และมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$V_n^2 + V_t^2 = V_x^2 + V_y^2 = V_o^2 \qquad \textbf{(2.21)}$$

สมการที่2.19และ2.20อาจจะแสดงได้โดยใช้ Thales circle ตามรูปที่ 3.ง ที่จุดใดๆในระนาบของแผ่นพื้น ทิศทางของแรงเฉือนหลัก(Principle shear forces)เมื่อเทียบกับแกน x แสดงได้โดย

$$\varphi_o = \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \qquad \textbf{(2.22)}$$

ซึ่งแรงเฉือนในทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงเฉือนหลักจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อทราบค่า V_x และ V_yจากการวิเคราะห์ ค่า V_oก็จะสามารถคำนวณได้ และแสดงเส้นของแรงเฉือนหลักที่เท่ากันและทิศทางการไหลของแรงเฉือน(Shear flow trajectory)บนแผ่นพื้นได้

2.1.3แผ่นพื้นที่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน

2.1.3.1กลไกการวิบัติเนื่องจากการเฉือนทะลุ[3]

การทดสอบการเฉือนทะลุมากมายได้ทำบนพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการทดสอบต่างๆโดยเฉพาะรายละเอียดการแตกร้าวจะใกล้เคียงกัน ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านมาจะจำลองแผ่นพื้นโดยกำหนดให้ขอบของตัวอย่างทดสอบเป็นแนวของจุดดัดกลับรอบๆหัวเสา รอยร้าวที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกด เริ่มแรกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการดัดรอบหัวเสา เมื่อแรงกดมากขึ้นรอยร้าวในทิศทางรัศมีเนื่องจากการดัดก็จะเริ่มเกิดขึ้นและขยายยาวเข้าหาขอบของตัวอย่าง กลุ่มของรอยร้าวในแนวเส้นรอบวงรอบหัวเสาจะเกิดขึ้นที่ประมาณ 60%-80% ของแรงกดประลัยควบคู่ไปกับการเกิดรอยร้าวในแนวทแยงภายในหน้าตัดของแผ่นพื้น ขณะเดียวกันการถ่ายแรงเฉือนจะถูกถ่ายผ่านพฤติกรรมแบบเดือย(Dowel action) พฤติกรรมการเกาะเกี่ยวกันระหว่างมวลรวม(Aggregate interlock action) และบริเวณหัวเสาที่เกิดแรงอัดสามทิศทาง(Triaxial stress state)

2.1.3.2ทฤษฎีการเฉือนทะลุ

ที่ผ่านมานั้นก็ได้พยายามที่จะพัฒนาทฤษฎีที่สามารถให้รูปแบบจำลองของการวิบัติด้วยการเฉือนทะลุที่สมเหตุผล แบบจำลองที่เด่นมากที่สุดเสนอโดยKinnunenและ Nylander[3],[4] ที่ได้จากการสังเกตุการทดสอบตัวอย่างแผ่นพื้นวงกลมและมีเสาหน้ารูปตัดวงกลมอยู่ตรงกลาง แบบจำลองนี้ถือว่าส่วนของแผ่นพื้นที่อยู่รอบนอกรอยร้าวในแนวทแยงจะมีการเคลื่อนที่หมุนแบบวัตถุแข็งเกร็ง(Rigid body) แรงระหว่างยอดเหลมของรอยร้าวในแนวทแยงกับเสาจะต้านทานด้วยแรงอัดของเปลือกบางรูปกรวยรอบหัวเสา โดยที่เปลือกบางรูปกรวยนี้จะเกิดหน่วยแรงสามแกน(Triaxail stress)ที่สูงมาก การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดในทิศทางสัมผัสของผิวหน้ารับแรงอัดใต้จุดศูนย์กลางของการหมุนมีค่าเข้าใกล้ค่าที่กำหนด(Limiting value) ซึ่งด้วยเหตุนี้แรงกดประลัยนั้นจะถูกควบคุมด้วยคุณสมบัติต้านทานต่อแรงดัดของแผ่นพื้นด้วย

P.E.Regan[5]ได้อธิบายว่าในแผ่นพื้นไร้คานนั้นกำลังต้านทานการเฉือนทะลุของคอนกรีตภายหลังจากที่เกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงแล้ว จะประกอบไปด้วยแรงต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตบริเวณรับแรงอัดและแรงต้านทานแบบเดือย(Dowel action)ของเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด ซึ่งพฤติกรรมแบบเดือย(Dowel action)จะมีผลมากต่อกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นพื้นซึ่งแตกต่างจากคานทั่วไป สมการที่ใช้คำนวณกำลังลังแรงเฉือนประลัยจะคล้ายในกรณีของคาน โดยผลการทดสอบเส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตจะอยู่ที่ตำแหน่ง 1.75d จากหน้าเสา

Peter Marti[2] ได้กำหนดโมเดลของแผ่นพื้นเรียกว่า Sanwish Model ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นบน(Top cover),แก่นกลาง(Core)และแผ่นล่าง(Bottom cover) ซึ่งจะสมมติว่าแผ่นบน

และแผ่นล่างจะรับโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในหน้าตัดและรับแรงในแนวแกน(Membrane force) ส่วนแก่นกลางจะเป็นตัวรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัด ถ้าหากหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดมีค่าไม่เกิน $0.53\sqrt{f_c'}$ ก็สมมติว่าไม่มีรอยแตกร้าวในแนวทแยงเกิดขึ้นแต่ถ้าหน่วยแรงเฉือนเกินค่าดังกล่าวก็จะเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงเกิดขึ้นก็จะต้องพิจารณาการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน ในบริเวณใกล้กับน้ำหนักกระทำเป็นจุดหรือจุดรองรับ สนามของหน่วยแรงรูปพัด(Fan-Shaped Stress Feild) สามารถนำมาประยุกต์กับส่วนที่เป็นแกนของพื้นได้และการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนก็สอดคล้องกับการออกแบบโดย Staggering concept ของคานได้

2.1.3.4เกณฑ์การวิบัติ(Criterion of failure)

ได้มีการพยายามอธิบายกลไกการถ่ายแรงเฉือนเพิ่มเติมจากที่เสนอโดย Kinnunen และ Nylander โดยเฉพาะการกำหนดเกณฑ์การวิบัติของบริเวณรับแรงอัดรอบหัวเสาที่แตกต่างกัน Ibrahim A.E.Shehataและ P.E.Regan[6] ก็ได้ปรับปรุงแบบจำลองของKinnunenและNylander หลายประการ และอธิบายพฤติกรรมของแผ่นพื้นภายหลังการแตกร้าว เกณฑ์การวิบัติจะขึ้นอยู่กับความเครียดของคอนกรีตและหน่วยแรงดึงของคอนกรีตที่บริเวณหัวเสา การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดบริเวณหัวเสาในทิศทางรัศมีหรือในทิศทางสัมผัสเท่ากับ 0.0035 หรือจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงดึงของคอนกรีตในบริเวณดังกล่าวมากกว่าแรงดึงประลัยของคอนกรีตกำหนดให้เท่ากับ $0.10fc'$

ซึ่งจะแตกต่างจากที่กำหนดโดยKinnunenและNylanderให้หน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าคงที่เท่ากับ$2.35fc'$ซึ่งค่าดังกล่าวพิจารณาจากพฤติกรรมของหน่วยแรงอัดสามแกน(Triaxial state of stress)ของคอนกรีต

Carl E Broms[7] ก็ได้จำลองกลไกการถ่ายแรงเฉือนคล้ายกับที่เสนอโดยKinnunenและ Nylander เช่นเดียวกัน แต่เกณฑ์การวิบัติจะกำหนดให้เกิดขึ้นเมื่อความเครียดในทิศทางสัมผัสเกินค่าที่ยอมให้เท่ากับ0.0008 หรือการวิบัติเกิดขึ้นเนื่องจากการพังเนื่องจากแรงอัดของคอนกรีตในทิศทางรัศมีมีค่าเท่ากับ $1.10fc'$ ซึ่งถือว่าคอนกรีตอยู่ภายใต้สถานะแรงอัดสองแกน(Biaxial state of stress)

2.1.3.5เกณฑ์การวิบัติของคอนกรีต(Fuilure criteria for concrete)

จากหัวข้อที่ผ่านมาการวิบัติเนื่องจากการเฉือนทะลุจะขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงในหลายทิศทาง อาทิเช่นหน่วยแรงในสามแกน(Triaxial state stress)และหน่วยแรงใน

สองแกน(Biaxial state stress) ซึ่งพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงดังกล่าวพอจะอธิบายพอสังเขปดังนี้

2.1.3.5.1หน่วยแรงอัดในสองทิศทาง(Biaxial state stress)

กำลังและรูปแบบการวิบัติของคอนกรีต[8]ที่รับแรงในสองทิศทางขึ้นอยู่กับผลของการรวมกันของหน่วยแรง $\sigma 1$ และ $\sigma 2$ จากรูปที่ 4 แสดงหน่วยในสองทิศทางที่ทำให้เกิดการวิบัติของคอนกรีต ที่จุด C จะเห็นว่ากำลังของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงอัดในสองทิศทางที่เท่ากัน จะมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดในแกนเดียวของคอนกรีตประมาณ 107%ของค่าf_c'

2.1.3.5.2หน่วยแรงอัดในสามทิศทาง(Triaxial state stress)

ภายใต้หน่วยแรงอัดในสามทิศทางรูปแบบการวิบัติ[8]อาจจะเกิดขึ้นจากการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงในทิศที่ขนานกับหน่วยแรงอัด หรือเกิดความเครียดแรงดึงสูงสุดในทิศทางตั้งฉากหรือเกิดการวิบัติในรูปแบบของการเฉือน

กำลังและความเหนียวของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงอัดในสามทิศทางจะมากกว่าในกรณีของแรงอัดในทิศทางเดียว จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดตามยาวและหน่วยแรงในแนวแกนของตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรับหน่วยแรงด้านข้างคงที่ $\sigma 2=\sigma 3$ และโดยมีหน่วยแรง $\sigma 1$ กระทำจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ

กำลังของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงหลายทิศทาง สามารถแสดงโดยใช้ Mohr rupture envelope ซึ่งวงกลมของโมหร์ในรูปที่ 6 จะสอดคล้องกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นตามรูปที่5และเส้นสัมผัสด้านนอกจะแสดง Mohr rupture envelope

2.1.4 แผ่นพื้นที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแผ่นพื้น ASCE-ACI Committee 426 [4]ได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ เหล็กเสริมรูปพรรณ และเหล็กคอม้าหรือเหล็กปลอก ซึ่งในประเภทหลังนั้นข้อมูลค่อนข้างมีจำกัดและถือว่าไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรเมื่อใช้ในแผ่นพื้นที่มีความหนาน้อยกว่า 25 ซม. เมื่อใช้ในแผ่นพื้นที่มีความหนามากกว่า 25 ซม.จะกำหนดให้มีประสิทธิภาพเพียงแค่ 50% เท่านั้น

2.1.4.1เหล็กคอม้าและเหล็กปลอก

ในการพิจารณาใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนชนิดเหล็กปลอกและเหล็กคอม้า[4]นั้นจะมีต้องพิจารณารายละเอียดหลายประการด้วยกันอาทิเช่น 1.)การตรวจสอบกำลังแรงเฉือนที่หน้าตัดใดๆ รอบหัวเสาที่เกินหน่วยแรงเฉือนประลัยของคอนกรีต 2.)การทำรายละเอียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเพื่อให้มีการยึดเหนี่ยวที่ดีซึ่งในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนชนิดนี้ค่อนข้างทำได้ยากในแผ่นพื้นที่บาง 3.) การจัดหาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเพื่อรับแรงเฉือนภายหลังการเกิดรอยร้าวใน

แนวทแยง ซึ่งจะประมาณ 50%ของกำลังแรงเฉือนของแผ่นพื้นที่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน 4.) การทำรายละเอียดเพื่อให้แผ่นพื้นมีความเหนียวที่เพียงพอเมื่อเกิดสภาวะน้ำหนักบรรทุกเกินปกติ โดยกำหนดให้เพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนออกไปจากที่ได้ตามการคำนวณอีกเป็นระยะ 2h และประการสุดท้าย 5.)จะต้องทำรายละเอียดที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานให้น้อยที่สุด

Neil M. Hawkins[9] กำหนดว่าเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะรับแรงเฉือนภายหลังที่เกิดรอยร้าวในแนวทแยง รอยร้าวในแนวทแยงจะเริ่มเกิดขึ้นที่แรงกดประมาณ50%ของแรงกดประลัยของแผ่นพื้นที่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน กำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่รอยร้าวในแนวทแยงทำมุม45°ตัดผ่านกำหนดให้เท่ากับหน่วยแรงที่จุดคลาก การวิบัติอาจจะเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ เกิดการวิบัติที่ระยะ d/2จากเหล็กปลอกตัวสุดท้ายหรือข้องอนอกสุดของเหล็กคอม้าซึ่งคำนวณตามสมการที่ 2.23 หรือเกิดการวิบัติเนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนถึงจุดคลากซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ 2.24

$$V = 16d^2\left(\frac{c'}{d}+1\right)\sqrt{f_c'} \qquad \textbf{(2.23)}$$

$$V = \frac{V_c}{2}+V_s \geq V_c \qquad \textbf{(2.24)}$$

ซึ่งค่า c' เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางหรือระยะระหว่างเหล็กปลอกตัวนอกสุดหรือข้องอของเหล็กคอม้า และค่า V_c เป็นกำลังแรงเฉือนของแผ่นพื้นที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

2.1.7.2หมุดรับแรงเฉือน[10]

หมุดรับแรงเฉือนจะมีหลักการคล้ายกับเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั่วไป โดยที่หัวของหมุดรับแรงเฉือนจะทำหน้ายึดลำตัวหมุด ซึ่งเป็นชิ้นส่วนรับแรงดึงในแนวดิ่งระหว่างผิวบนของแผ่นพื้นที่อยู่ภายใต้แรงดึงและผิวล่างของแผ่นพื้นที่อยู่ภายใต้แรงอัด โดยทั่วไปแผ่นเหล็กล่างของหมุดรับแรงเฉือนจะวางอยู่ใต้เหล็กเสริมล่างก็จะเกิดแรงอัดในทิศรัศมีขึ้น ก็จะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนชนิดนี้

ถ้าวางแผ่นเหล็กล่างของหมุดรับแรงเฉือนเกยบนหัวเสาเล็กน้อย ก็จะช่วยเพิ่มกำลังแรงกดที่หน้าเสาและช่วยให้เกิดการหมุนที่เพียงพอเมื่อเริ่มเกิดจุดหมุนพลาสติค(Plastic hinge) ดูรูปที่ 7 การถ่ายแรงเฉือนผ่านหมุดรับแรงเฉือนนั้น น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนแผ่นพื้นจะกดลงบนแถบ

ล่างของหมุดรับแรงเฉือน และก็จะถูกหิ้วโดยหัวหมุดที่ยึดอยู่ด้านบนของแผ่นพื้น ดูรูปที่ 7 ซึ่งพฤติกรรมการถ่ายแรงเข้าสู่เสาจะคล้ายคานสั้น(Corbel)

นอกจากนี้ถ้าระยะระหว่างหมุดตัวนอกสุดกับหัวเสามีค่ามากกว่า d แนวการถ่ายแรงอัดจากหัวหมุดจะไม่ถ่ายเข้าสู่เสาโดยตรง แต่จะถ่ายผ่านฐานของตัวหมุดที่อยู่ชิดกัน ซึ่งก็จะเป็นการเพิ่มแรงในตัวหมุดจากเดิม

2.1.8แผ่นพื้นที่มีช่องเปิด

ACI-ASCE Commitee426[4] ได้สรุปว่าสำหรับแผ่นพื้นที่มีช่องเปิดนั้นกำลังรับแรงเฉือนจะต้องปรับแก้โดยการลดความยาวของเส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิกฤต และการเยื้องศูนย์ของแรงเฉือนบนหน้าตัดวิกฤตเนื่องจากช่องเปิด

Neil M. Hawkins M.E.Criswell และ Roll[11]ก็กำหนดสมการสำหรับการคำนวณเมื่อแผ่นพื้นมีช่องเปิดโดย

$$\frac{V}{bd\sqrt{f_c'}} = 4\left(1+2\frac{d}{c}-\frac{e}{c}\right) \qquad \textbf{(2.25)}$$

นอกจากนี้ Neil M.Hawkins และCorley[12]ก็ใช้แนวคิดเสมือนคาน (Beam analogy) กำหนดสมการโดย

V=4 (เส้นรอบรูปของการไหลของแรงเฉือนที่ตั้งฉากกับเสา)$d\sqrt{f_c'}$ **(2.26)**

ซึ่ง bเป็นเส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิกฤต และ e เป็นระยะเยื้องศูนย์ซึ่งกำหนดตามรูปที่ 8 เช่นเดียวกัน

2.2งานวิจัยที่ผ่านมา

ในแผ่นพื้นที่เสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหมุดรับแรงเฉือนเท่านั้นซึ่งมีดังต่อไปนี้

A.Ghali,M.A.Sargions และ A.Huizer[13] ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่างโดยใช้เหล็กเส้นกลมมีแผ่นยึด (Anchore) ที่ปลายทั้งสองด้านเป็นเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ซึ่งจะมีทั้งอัดแรงและไม่อัดแรงในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนโดยไม่ให้มีแรงยึดเกาะ(Unbound) จุดรองรับมี 2 ด้านและโดยรอบ จากผลการทดสอบในกรณีที่น้ำหนักกระทำตรงกลางพื้นเมื่อแผ่นพื้นมีจุดรองรับ2ด้านผลของการอัดแรงจะมีน้อยมากและพื้นจะมีพฤติกรรมคล้ายกับคานกว้าง (Wide Beam) และเมื่อพื้นมีจุด

รองรับทั้ง4ด้านผลของการอัดแรงจะเพิ่มแรงเฉือนประลัยถึง1.67-1.92เท่าค่าหน่วยแรงเฉือนประลัย มีค่าอยู่ระหว่าง $1.908\sqrt{f_c'}$ - $2.173\sqrt{f_c'}$

P.H.Langohr,A.GhaliและW.H.Dilger[14] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างพื้นภายในขนาดเท่าของจริง (Full Scale) ขนาด1.80×1.80ม.หนา0.152ม.โดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ได้จากการตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอเป็นชิ้นเล็กๆ โดยเน้นศึกษาถึงผลของการจัดวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือนรอบหัวเสาและคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนรูปตัวไอ จากผลการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ความเหนียว ของแผ่นพื้น

F.Seible,A.GhaliและW.H.Dilger[15] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างพื้นภายในขนาดเท่าของจริง (Full Scale) ขนาด 1.80×1.80 ม.หนา 0.15 ม.มีน้ำหนักกระทำตรงกลาง ที่ขอบของพื้นเป็นจุดรองรับอย่างง่าย โดยใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่างชนิดกัน ประกอบด้วยชิ้นส่วนตัวไอ หมุดรับแรงเฉือนที่ใช้ในงานโครงสร้างเชิงประกอบ และตระแกรงลวด (Welded Wire Fabrice)ดัดขึ้นรูปการทดสอบเพื่อที่จะศึกษาผลของเหล็กรับแรงเฉือนแต่ละชนิดนั้นจะมีผลต่อกำลังแรงเฉือนของความเหนียวของแผ่นพื้นและคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแต่ละชนิด ผลการทดสอบพบว่าเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งสามชนิดจะเพิ่มความเหนียวและกำลังแรงเฉือนของแผ่นพื้น เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ได้จากชิ้นส่วนรูปตัวไอและหมุดรับแรงเฉือนจะมีการยึดเหนี่ยวที่เพียงพอ

A.Frank Van Der Voet,W.H.DilgerและA.Ghali[16] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างพื้นภายในขนาดเท่าของจริง (Full Scale) ขนาด 1.90×1.90 ม.หนา 0.15 ม.มีน้ำหนักบรรทุกกระทำตรงกลางที่ขอบของพื้นเป็นจุดรองรับอย่างง่าย โดยแต่ละชิ้นส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนใช้เหล็กกลมมีแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจตุรัสเชื่อมยึดที่ปลายทั้งสองด้าน การทดสอบจะศึกษาถึงผลของการจัดวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือนรอบหัวเสา ปริมาณของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ใช้และรายละเอียดของตัวเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมากๆ จะเกิดหน้าตัดวิกฤติ เป็นระยะ d/2 จากแถวนอกสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ค่ากำลังแรงเฉือนประลัยของคอนกรีตเมื่อไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะลดลงเมื่อหน้าตัดวิกฤติอยู่ห่างหน้าเสามากขึ้น การจัดวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไม่มีผลต่อกำลังประลัยของตัวอย่างทดสอบ

W.H.DilgerและA.Ghali[17]ได้สรุปรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่ผ่านมาเสนอสมการใช้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนได้กำหนดค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยที่รับโดยคอนกรีตเมื่อปราศจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของระยะระหว่างหน้าเสาถึงหน้าตัดวิกฤตกับความลึกประสิทธิผลของแผ่นพื้น และอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Abdel-Slam Mokta,A. Ghali และ W.H. Dilger[18] ได้ทำการทดสอบพื้นภายในตัวอย่างขนาด 1.90×1.90 ม.หนา 0.15 ม.โดยใช้หมุดรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเสริมรับแรงเฉือน การทดสอบจะศึกษาถึงผลของชนิดของคอนกรีตที่ใช้ ระยะหุ้มผิวของคอนกรีต(Covering) และจำนวนเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะแตกต่างกันว่าจะมีผลอย่างไรต่อกำลังรับแรงเฉือนและความเหนียว ของจุดต่อพื้นเสา จากผลการทดสอบพบว่าหมุดรับแรงเฉือนจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน และความเหนียว ของจุดต่อพื้นเสา หน่วยแรงสูงสุดจะเกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนแถวแรกจากหน้าเสา ระยะหุ้มผิวของคอนกรีต (Covering) มากขึ้นจะลดกำลังของจุดต่อพื้นเสาลงเล็กน้อย

Abel A.,Elgabry และ A.Ghali[19] ได้เสนอการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนโดยใช้หมุดรับแรงเฉือนในแผ่นพื้นไร้คานทั้งพื้นช่วงใน,ช่วงริมและช่วงมุม โดยกำหนดรายระเอียดของตัวหมุด การจัดวางรอบหัวเสา กำหนดค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยของคอนกรีตทั้งในกรณีที่หน้าตัดวิกฤติอยู่ในและนอกบริเวณของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนซึ่งอยู่ในรูปของค่า f_c' α และβ_c รวมถึงข้อแนะนำเมื่อใช้ในคอนกรีตมวลเบา (Low-Density Concrete) ,ช่องเปิดในแผ่นพื้น (Opening) และในพื้นคอนกรีตอัดแรง

นอกจากนี้ ACI Committee reports[20] ก็ได้เสนอการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนโดยใช้หมุดรับแรงเฉือนตามวิธีของ ACI 318-89 กำหนดรายละเอียดของหมุด,การจัดวางและได้เสนอค่าหน่วยแรงหน่วยแรงที่ยอมให้ที่สูงกว่าACI318-89ตามผลการวิจัยที่ผ่านมา