หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์แผ่นพื้น

4.1 พฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นที่มีความหนาของแผ่นเหล็กพับเป็นตัวแปร

ในงานวิจัยนี้ จะวิเคราะห์พฤติกรรมของแผ่นพื้นในด้านลักษณะการแตกร้าวและวิบัติ ลักษณะการแอ่นตัว หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับมุมเปลี่ยน และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับเปอร์เซนต์เหล็กเสริม

4.1.1 ลักษณะการแตกร้าว และการวิบัติของแผ่นพื้น (Crack Pattern and Mode of Failure)

ในการทดสอบแผ่นพื้น เมื่อผิวล่างของคอนกรีตส่วนที่รับแรงดึงเกิดการแตกร้าวจะมีเสียงเบา ๆ เกิดขึ้นเป็นระยะ ๆ ตลอดการทดสอบ เสียงเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการแยกตัวระหว่างผิวแผ่นเหล็กพับที่สัมผัสกับคอนกรีตที่แตกเนื่องจากรับแรงดึงบริเวณใต้แนวแกนสะเทินของหน้าตัด เสียงนี้จะได้ยินครั้งแรกเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าประมาณ 20-30 % ของน้ำหนักบรรทุกวิบัติ ลักษณะการแตกร้าวจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากที่บริเวณกลางช่วงของแผ่นพื้น และจะสังเกตเห็นได้เฉพาะที่อยู่เหนือแผ่นเหล็กพับเท่านั้น แต่เป็นที่น่าเชื่อถือได้ว่ารอยแตกร้าวเหล่านี้จะเกิดติดต่อกันจนถึงผิวล่างของคอนกรีต รอยแตกร้าวเริ่มแรกนอกจากจะสังเกตได้จากเสียงแล้ว ยังอาจพิจารณาได้จากการเปลี่ยนความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถึง 3.8 ทำให้ทราบว่า น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวเริ่มแรกมีค่าอยู่ระหว่าง 450 ถึง 600 กก. ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์อยู่ไม่เกิน 12 % ส่วนลักษณะการแตกร้าวของแผ่นพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4

ลักษณะการวิบัติของแผ่นพื้นทุกแผ่นจะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในเหล็ก ซึ่งเกิดจากแผ่นเหล็กพับถึงจุดคลากก่อนที่คอนกรีตจะแตกด้วยกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และแผ่นพื้นส่วนใหญ่จะไม่เกิดการวิบัติอันเนื่องมาจากคอนกรีตแตกด้วยกำลังอัด ยกเว้นแผ่นพื้น S_{18} คอนกรีตจะแตกร่อน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 และตลอดการทดสอบจะไม่พบการฉีกขาดของแผ่นเหล็กพับเลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นพื้นชนิดนี้มีความเหนียวสูง

4.1.2 ลักษณะการแอ่นตัวของแผ่นพื้น (Deflected Curve)

ระยะโก่งของแผ่นพื้นแต่ละจุดสามารถหาค่าได้ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของระยะโก่งที่อ่านได้จากเกจจำนวน 2 ตัว ที่ติดไว้กับด้านบนของแผ่นพื้น โดยที่แต่ละจุดได้ปรับค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการทรุดตัวของจุดรองรับ และจากรูปที่ 4.7ถึง 4.10จะแสดงลักษณะการแอ่นตัวตลอดความยาวช่วงของแผ่นพื้นที่น้ำหนักบรรทุก 25, 50 และ 80 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัย เมื่อเปรียบเทียบการแอ่นตัวของแผ่นพื้นจะเข้าลักษณะของ "Half Sine Wave" ซึ่งเขียนในรูปของสมการจะได้ดังนี้

$$y = \delta_m \sin\left(\frac{\pi X}{L}\right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.1)$$

โดยที่ y = ระยะโก่งที่ตำแหน่งใด ๆ

δ_m = ระยะโก่งที่จุดกึ่งกลางความยาวช่วงของแผ่นพื้น

x = ระยะจากจุดกึ่งกลางความยาวช่วงถึงตำแหน่งที่จะหาระยะโก่ง

L = ความยาวช่วงของแผ่นพื้น

จะสังเกตได้ว่า การโก่งงอของแผ่นพื้นที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าน้อยกว่า 50 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัย จะให้ความสอดคล้องกับสมการที่ 4.1 ได้ดีกว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากกว่านั้น และน้ำหนักบรรทุกใช้งานหรือน้ำหนักบรรทุกที่ระยะโก่งงอมีค่าประมาณ L/360 จะมีค่าประมาณ 25-30 % ของน้ำหนักบรรทุกวิบัติ

4.1.3 หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต

เนื่องจากแผ่นพื้นที่ทดสอบทั้งหมดเกิดการวิบัติจากแรงดึงในเหล็กเป็นเกณฑ์ ทำให้คอนกรีตที่ผิวบนไม่ค่อยจะมีการแตกร่อนเหมือนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดในคอนกรีต จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า ระยะโก่งของแผ่นพื้นจะเป็นสัดส่วนกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้น และที่ระยะโก่งหนึ่ง ๆ หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้นที่มีเปอร์เซนต์เหล็กเสริมต่างกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เช่น ขณะที่แผ่นพื้นโก่งงอจนมีค่าประมาณ L/360 หรือ 11 มม. จะวัดค่าหน่วยการหดตัวของคอนกรีตได้ 0.0003 และหน่วยการหดตัวของคอนกรีตมีค่า 0.003 แผ่นพื้นนี้จะมีระยะโก่งงอประมาณ 180 มม.

4.1.4 การวิเคราะห์หาแรงภายในจากหน่วยความเครียดที่ได้จากการทดสอบแผ่นพื้น

ในการวิเคราะห์หาแรงภายในจากหน่วยความเครียด จะใช้สมมติฐานเหมือนกับที่ใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดัดทั่ว ๆ ไป กล่าวคือ หน้าตัดของแผ่นพื้นยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังรับแรงดัด ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยความเครียดกับหน่วยแรงของทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม สามารถคำนวณหาค่าได้ นอกจากนี้ ยังถือว่า การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับแผ่นเหล็กพับเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จากสมมติฐานดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งแนวแกนสะเทินของหน้าตัดได้ดังนี้

$$c = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}\right)h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.2)$$

โดยที่ c = ระยะจากผิวบนสุดของแผ่นพื้นถึงแนวแกนสะเทิน

ε_c = หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวบนสุดของแผ่นพื้น

ε_s = หน่วยการยืดตัวของแผ่นเหล็กที่ผิวล่างสุดของแผ่นพื้น

h = ความหนาของแผ่นพื้น

1). แร่งดึงรวมในเหล็ก

แผ่นเหล็กที่พับด้วยวิธีพับเย็นจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลแตกต่างออกไปจากแผ่นเหล็กทั่ว ๆ ไป ทั้งนี้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลในเหล็กที่อยู่บริเวณมุมของแผ่นเหล็กพับนั้น และจากผลการวิจัยของ Kenneth W. Karren, J.[23] ที่ Cornell University ได้พบว่า กำลังในการรับแรงดึงของเหล็กพับเย็นที่มุม สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการ ต่อไปนี้ คือ

$$F_{yc} = \frac{B_c F_y}{(\frac{R}{t})^m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.3)$$

และกำลังคลากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับ สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$F_{ya} = CF_{yc} + (1 - C)\, F_y \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.4)$$

โดยที่ F_{yc} = กำลังคลากที่มุมของแผ่นเหล็กพับ

F_{ya} = กำลังคลากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับ

$$B_c = (3.69 \frac{F_u}{F_y}) - 0.819 (\frac{F_u}{F_y})^2 - 1.79$$

R = รัศมีภายในของส่วนโค้งที่มุมของแผ่นเหล็กพับ

t = ความหนาของแผ่นเหล็กพับ

$$m = (0.192 \frac{F_u}{F_y}) - 0.068$$

C = อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของมุมต่อพื้นที่ทั้งหมดของแผ่นเหล็กพับ

F_u = กำลังดึงประลัยของเหล็กแผ่น

F_y = กำลังคลากของเหล็กแผ่น

จะเห็นได้ว่า การคำนวณหากำลังคลากที่มุม และกำลังคลากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับที่แสดงไว้ในภาคผนวก (ข) จะให้กำลังคลากที่มุม และกำลังคลากเฉลี่ยสูงกว่าเหล็กแผ่นดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งกำลังคลากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับจะมีค่าสูงกว่าเหล็กแผ่นอยู่ประมาณ 1 ถึง 5 % ในการวิเคราะห์หาแรงดึงรวมของแผ่นพื้นก็ยังคงถือว่า หน่วยการยืดตัวของแผ่นเหล็กพับยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงดึงของแผ่นเหล็กพับนั้น จนกระทั่งหน่วยแรงดึงมีค่าเท่ากับกำลังคลากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับ และให้ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็กพับเท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กแผ่น และถึงแม้ว่า แผ่นเหล็กพับเหล่านี้จะได้รับความร้อนในขณะที่เชื่อมแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเข้ากับแผ่นเหล็กพับ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติในการรับแรงดึงของแผ่นเหล็กพับลดลง แต่ในการวิเคราะห์นี้ ยังคงสมมติให้หน่วยแรงดึงสูงสุดของแผ่นเหล็กพับมีค่าเท่ากับกำลังคลากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับนั้น ดังนั้น หน่วยแรงดึงของแผ่นเหล็กพับสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$f_s = \varepsilon_s E_s \qquad (f_s \leq f_{ya}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.5)$$

โดยที่ f_s = หน่วยแรงดึงของแผ่นเหล็กพับ

ε_s = หน่วยการยืดตัวของแผ่นเหล็กพับ

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็ก

= 2.06×10^6 กก/ตร.ซม. สำหรับงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในแผ่นพื้น สามารถแบ่งการคำนวณออกเป็น

- ในกรณีที่แนวแกนสะเทินอยู่ใต้ปีกของแผ่นพื้น ($c > h'$) จากรูปที่ 4.12 สามารถคำนวณหาแรงดึงรวม และตำแหน่งที่แรงนั้นกระทำจากหน่วยความเครียดที่วัดได้โดยอาศัยสมการดังต่อไปนี้

$$T_t = \{\frac{1}{2} \times f_s \times (h - c) \times 2t\} + \{f_s \times b' \times t\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.6)$$

$$m_t = \frac{1}{T_t} \left[\{\frac{f_s \times (h - c) \times 2t}{2}\}\{\frac{(2h + c)}{3}\} + (f_s \times b' \times t)h\right] \quad \ldots\ldots \quad (4.7)$$

- ในกรณีที่แนวแกนสะเทินอยู่เหนือปีกของแผ่นพื้น ($c < h'$) จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงรวมและตำแหน่งที่แรงนั้นกระทำจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$T_t = \{f''_s \times (h-h') \times 2t\} + \{\frac{(f_s - f''_s) \times (h-h') \times 2t}{2}\} + \{(f_s + f''_s) \times b' \times t\} \quad (4.8)$$

$$m_t = \frac{1}{T_t}\left[\{\frac{T_1 \times (h + h')}{2}\} + \{\frac{T_2 \times (2h+h')}{3}\} + (T_3 \times h) + (T_4 \times h')\right] \ldots\ldots\ldots \quad (4.9)$$

โดยที่ T_t = แรงดึงรวมของแผ่นพื้น

m_t = ระยะจากแนวแรงดึงรวมถึงผิวบนของแผ่นพื้น

f_s = หน่วยแรงดึงของแผ่นเหล็กพับที่ผิวล่างสุดของแผ่นพื้น

f''_s = หน่วยแรงดึงของแผ่นเหล็กพับที่ผิวบนสุดของแผ่นเหล็กพับ

h = ความสูงของแผ่นพื้น

h' = ความสูงของคอนกรีตเหนือแผ่นเหล็กพับ

b' = ความกว้างที่ผิวล่างของแต่ละลอนของแผ่นเหล็กพับ

c = ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวบนสุดของแผ่นพื้น

t = ความหนาของแผ่นเหล็กพับ

ในการคำนวณหาแรงดึงรวมและตำแหน่งที่แรงนั้นกระทำทั้งในกรณีของแนวแกนสะเทินอยู่เหนือและใต้ปีกของแผ่นพื้น จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของแรงดึงรวมที่จุดวิบัติอยู่ห่างจากผิวบนสุดของแผ่นพื้นประมาณ 9.3 ซม. หรืออาจกล่าวได้ว่าตำแหน่งของแรงดึงรวมผ่านจุดศูนย์ถ่วงของแผ่นเหล็กพับ ส่วนตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ข) และจะนำค่าแรงดึงรวมมาเปรียบเทียบกับค่าแรงอัดรวมที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2). แรงอัดรวมในคอนกรีต

ในการหาค่าแรงอัดรวมที่เกิดขึ้นภายในแผ่นพื้นจากหน่วยความเครียดที่ได้จากการทดสอบ จะใช้ทฤษฎีอีลาสติกและทฤษฎีประลัยลองวิเคราะห์ แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับแรงดึงรวมที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ก. ทฤษฎีอีลาสติก

ในการวิเคราะห์หาค่าแรงอัดรวมโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกนั้น นอกจากจะใช้สมมติฐานที่เกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดทั่ว ๆ ไป ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีสมมติฐานที่สำคัญอีก คือ หน่วยการหดตัวของคอนกรีตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดของคอนกรีตเสมอ และการวิเคราะห์หาค่าแรงอัดรวมของแผ่นพื้นสามารถแบ่งออกได้ คือ

- ในกรณีที่แนวแกนสะเทินอยู่ใต้ปีกของแผ่นพื้น (c > h') จากรูปที่ 4.14 ค่าแรงอัดรวมและตำแหน่งของแรงที่กระทำต่อหน้าตัดของแผ่นพื้น สามารถหาได้ดังนี้

$$C_{t1} = (f''_c \times h' \times b) + \{\frac{(f_c - f''_c) \times h' \times b}{2}\} + \{\frac{f''_c \times (c - h') \times b''}{2}\} + \{\frac{2f''_s \times (c - h') \times t}{2}\} + (f''_s \times b' \times t) \quad \ldots\ldots (4.10)$$

$$m_{t1} = \frac{1}{C_{t1}}\left[(\frac{C_1 h'}{2}) + (\frac{C_2 h'}{3}) + \{\frac{(C_3 + C_4)(2h' + c)}{3}\} + (C_5 \times h')\right] \quad \ldots\ldots (4.11)$$

- ในกรณีที่แนวแกนสะเทินอยู่เหนือปีกของแผ่นพื้น (c < h') จากรูปที่ 4.15 ค่าแรงอัดรวมและตำแหน่งของแรงอัดรวมนั้น สามารถหาได้ดังนี้

$$C_{t1} = \frac{f_c \times b \times c}{2} \quad \ldots\ldots (4.12)$$

$$m_{t1} = \frac{c}{3} \quad \ldots\ldots (4.13)$$

โดยที่ C_{t1} = แรงอัดรวมของแผ่นพื้นที่วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก

m_{t1} = ระยะจากแรงอัดรวมถึงผิวบนของแผ่นพื้น เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก

f_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้น

f''_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นเหล็กพับ

h' = ความสูงของคอนกรีตเหนือแผ่นเหล็กพับ

b = ความกว้างของแต่ละลอนในแผ่นพื้น

b' = ความกว้างที่ผิวล่างสุดของแต่ละลอนในแผ่นเหล็กพับ

b'' = ความกว้างที่ผิวบนสุดของแต่ละลอนของแผ่นเหล็กพับ

c = ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวบนสุดของแผ่นพื้น

t = ความหนาของแผ่นเหล็กพับ

ข. ทฤษฎีประลัย

ในการวิเคราะห์หาแรงอัดรวมของแผ่นพื้นโดยใช้ทฤษฎีประลัยนั้น ตาม ACI[2] จะกำหนดให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตเป็นรูปเสมือนสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Equivalent Rectangular Stress Block) มีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.85\ f'_c$ และการวิเคราะห์หาค่าแรงอัดรวมที่เกิดขึ้นภายในแผ่นพื้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ

- ในกรณีที่แนวแกนสะเทินอยู่ใต้ปีกของแผ่นพื้น ($c > h'$) จากรูปที่ 4.16 ค่าแรงอัดรวมและตำแหน่งที่แรงนั้นกระทำต่อหน้าตัด สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$C_{t2} = (0.85\ f_c ab) + \left\{\frac{2f''_s \times (c - h') \times t}{2}\right\} + (f''_s \times b' \times t) \quad ..(4.14)$$

$$m_{t2} = \frac{1}{C_{t2}}\left[\left\{(0.85\ f_c ab)\left(\frac{a}{2}\right)\right\} + \left\{\frac{C_2 \times (2h' + c)}{3}\right\} + (C_3 \times h')\right] \quad .. (4.15)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ในกรณีที่แนวแกนสะเทินอยู่เหนือปีกของแผ่นพื้น ($c < h'$) จากรูปที่ 4.17 ค่าแรงอัดรวมและตำแหน่งของแรงอัดรวม สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$C_{t2} = 0.85\, f_c ab \qquad \text{..........................} \quad (4.16)$$

$$m_{t2} = \frac{a}{2} \qquad \text{..........................} \quad (4.17)$$

โดยที่ C_{t2} = แรงอัดรวมของแผ่นพื้นที่วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีประลัย

m_{t2} = ระยะจากแรงอัดรวมถึงผิวบนสุดของแผ่นพื้นเมื่อวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีประลัย

f_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้น

f''_s = หน่วยแรงดึงของแผ่นเหล็กพับที่ผิวบนสุดของแผ่นเหล็กพับ

h' = ความสูงของคอนกรีตเหนือแผ่นเหล็กพับ

b' = ความกว้างที่ผิวล่างสุดของแต่ละลอนในแผ่นเหล็กพับ

b = ความกว้างของแต่ละลอนในแผ่นพื้น

t = ความหนาของแผ่นเหล็กพับ

a = $\beta_1 c$

β_1 = 0.85 สำหรับทุก ๆ ค่าของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้น

c = ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวบนสุดของแผ่นพื้น

จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.21 จะแสดงค่าแรงดึงและแรงอัดรวมที่เกิดขึ้นภายในแผ่นพื้น โดยใช้วิธีคำนวณต่าง ๆ กัน ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อเทียบกับกำลังอัดในคอนกรีต จากรูปดังกล่าวจะชี้ให้เห็นว่า แรงดึงรวมจะมีค่าใกล้เคียงกับแรงอัดรวมที่วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกเมื่อกำลังอัดที่ผิวบนของแผ่นพื้นมีค่าน้อยกว่า 45 % ของกำลังอัดรูปทรงกระบอก และจะให้ค่าใกล้เคียงกับแรงอัดรวมที่วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีประลัย เมื่อกำลังอัดที่ผิวบนของแผ่นพื้นมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกำลังอัดรูปทรงกระบอก และจากรูปที่ 4.22 จะชี้ให้เห็นว่า ณ จุดวิบัติแรงดัด

ต่อต้านที่วิเคราะห์ โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกและทฤษฎีประลัย จะให้ค่าแตกต่างจากแรงดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกอยู่ประมาณ 30 ถึง 45 % และ15 ถึง 20 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การวิเคราะห์หาแรงดัดด้วยวิธีดังกล่าวยุ่งยากและซับซ้อน ตลอดจนมีค่าความคลาดเคลื่อนมาก ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาแรงดัดอย่างง่าย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.1.5 การวิเคราะห์แรงดัดตาม ACI-318-77[1]

ในการวิเคราะห์หาแรงดัดจะกระทำอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและมุมเปลี่ยนซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นจุดต่าง ๆ ดังนี้

1). จุดแตกร้าวเริ่มแรก ขณะที่แผ่นพื้นเริ่มรับน้ำหนักบรรทุก คอนกรีตส่วนบนจะรับแรงอัด แต่คอนกรีตส่วนล่างจะรับแรงดึง หน่วยแรงสูงสุดตาม ACI จะกำหนดให้มีค่าประมาณ 10 % ของกำลังอัดรูปทรงกระบอก แต่จากการทดสอบหากำลังดึงแยกตัวของคอนกรีต พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 24 ถึง 34 กก/ตร.ซม. ซึ่งเปรียบเทียบแล้วจะให้ค่าสอดคล้องกับหน่วยแรงดึงสูงสุดตาม ACI ดังนั้น ขณะที่แผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุก คอนกรีตส่วนล่างก็จะแตกออก เมื่อหน่วยแรงของคอนกรีตส่วนล่างมีค่าเท่ากับหน่วยแรงดึงแยกตัวของคอนกรีต ค่าแรงดัดและมุมเปลี่ยนที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \qquad \text{.................................. (4.18)}$$

$$\phi_{cr} = \frac{f_r}{E_c y_t} \qquad \text{.................................. (4.19)}$$

โดยที่ M_{cr} = แรงดัดที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก

ϕ_{cr} = มุมเปลี่ยนที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก

f_r = หน่วยแรงดึงแยกตัวของคอนกรีต

I_g = โมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงทั้งหมด

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

y_t = ระยะจากแนวแกนสะเทินของหน้าตัดทั้งหมดถึงผิวล่างสุดของแผ่นพื้น

2). จุดคลาก เมื่อแผ่นพื้นเกิดการแตกร้าวเริ่มต้นแล้ว คอนกรีตก็จะถ่ายแรงดึงทั้งหมดให้เหล็กเสริมรับไป ดังนั้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมก็จะเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเหล็กเสริมถึงจุกคลาก ขณะที่เหล็กเสริมถึงจุดคลาก ถ้าหน่วยแรงอัดที่ผิวบนของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 70 % ของกำลังอัดของคอนกรีต หรืออาจจะกล่าวได้ว่า หน่วยแรงอัดในคอนกรีตยังอยู่ในช่วงอีลาสติก เนื่องจากแนวแกนสะเทินของแผ่นพื้นตัวอย่างอยู่เหนือปีกของแผ่นพื้น ดังนั้น จากรูปที่ 4.23 ทำให้สามารถหาตำแหน่งของแนวแกนสะเทิน ดังแสดงในสมการที่ 4.20 และ 4.21 ส่วนค่าแรงดัดและมุมเปลี่ยนที่จุดคลาก สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

$$k = \{2\rho n + (\rho n)^2\}^{\frac{1}{2}} - \rho n \quad \text{.......................... (4.20)}$$

$$jd = d - \frac{kd}{3} \quad \text{.......................... (4.21)}$$

$$M_y = A_s f_{ya} jd \quad \text{.......................... (4.22)}$$

$$\phi_y = \frac{f_{ya}}{E_s d(1 - k)} \quad \text{.......................... (4.23)}$$

โดยที่ ρ = เปอร์เซนต์ของเหล็กเสริม

$n = \frac{E_s}{E_c}$

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กแผ่น

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

M_y = แรงดัดที่จุดคลาก

ϕ_y = มุมเปลี่ยนที่จุดคลาก

A_s = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กพับ

f_{ya} = หน่วยแรงดึงเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับ

d = ระยะห่างของแนวแรงดึงรวมถึงผิวบนสุดของแผ่นพื้น

jd = ระยะแขนของแรงดัด

ผลการวิเคราะห์กำลังในการรับแรงดัดที่จุดคลากของแผ่นพื้น พบว่า ผลการวิเคราะห์ให้ค่าต่ำกว่าผลทดสอบอยู่ประมาณ 10-40 % ดังแสดงในรูปที่ 4.24 - 4.27

3). จุดวิบัติ เมื่อแผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุกจนถึงจุดคลากแล้ว น้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะโก่งที่เพิ่มขึ้น เมื่อหน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่ามากกว่า 0.7 f'_c แล้ว หน่วยแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแนวแกนสะเทิน ตาม ACI ถือว่า เมื่อหน่วยการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.003 แล้วคอนกรีตก็จะแตกด้วยกำลังอัด หน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่จุดวิบัติจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบล่าซึ่งสามารถแทนด้วยรูปเสมือนสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีหน่วยแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 0.85 f'_c ดังนั้น แรงดัดและมุมเปลี่ยนที่จุดวิบัติสามารถหาค่าได้ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.23 อนึ่ง เนื่องจากหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมจะไม่เพิ่มขึ้นหลังจากถึงจุดคลากแล้วและจากการสมดุลย์ของแรงดึงและแรงอัดจะได้

$$a = \frac{A_s f_{ya}}{0.85\, f'_c\, b} \quad \text{..........................} \quad (4.24)$$

$$a = \beta_1 c \quad \text{..........................} \quad (4.25)$$

$$M_u = 0.85\, f'_c\, ab\, (d - \frac{a}{2}) \quad \text{..........................} \quad (4.26)$$

$$\text{ระยะแขน} = d - \frac{a}{2} \quad \text{..........................} \quad (4.27)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad \text{..........................} \quad (4.28)$$

โดยที่ M_u = แรงดัดที่จุดวิบัติ

ϕ_u = มุมเปลี่ยนที่จุดวิบัติ

b = ความกว้างของแผ่นพื้น

c = ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวบนสุดของแผ่นพื้น

f_{ya} = หน่วยแรงดึงเฉลี่ยของแผ่นเหล็กพับ

f'_c = หน่วยแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีต

ε_c = หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.003

d = ระยะจากผิวบนสุดของแผ่นพื้นถึงจุดศูนย์ถ่วงของแผ่นเหล็กพับ

β_1 = 0.85 สำหรับค่า f'_c ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 280 กก/ตร.ซม. และจะลดลงในอัตรา 0.05 สำหรับค่ากำลังอัดในคอนกรีตที่สูงกว่า 280 กก/ตร.ซม. อยู่ทุก ๆ 70 กก/ตร.ซม.

ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับมุมเปลี่ยนตาม ACI นั้น จะกำหนดให้ตำแหน่งของแรงดึงรวมกระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดเหล็กพับ หรือคิดเป็นระยะเท่ากับ 9.75 ซม. จากผิวบนสุดของแผ่นพื้น ซึ่งตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ข) ส่วนผลการวิเคราะห์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.24 ถึง 4.27 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงดัดที่จุดต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ตาม ACI จะให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบอยู่ประมาณ 10 - 15 %

การศึกษาว่าด้วยความเหนียวของโครงสร้าง (Ductility) ในแผ่นพื้น ซึ่งเป็นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นหลังจากที่เหล็กเสริมในแผ่นพื้นถึงจุดคลากแล้ว ซึ่งสามารถหาค่าได้จากอัตราส่วนของมุมเปลี่ยนของแผ่นพื้นที่จุดคลากกับมุมเปลี่ยนที่จุดวิบัติ โดยจะถือว่า แผ่นพื้นถึงจุดวิบัติเมื่อค่าหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริม ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นที่มีเปอร์เซ็นต์เหล็กสูงจะให้ค่าความเหนียวน้อยกว่าแผ่นพื้นที่มีเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมต่ำ และจากรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่า แผ่นพื้นชนิดนี้มีความเหนียวสูงมากกว่า 17 ซึ่งนับว่ามีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดัดทั่ว ๆ ไป

4.2 พฤติกรรมของแผ่นพื้นที่มีระยะของแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเป็นตัวแปร

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลที่เกิดจากการใช้ระยะห่างของแผ่นเหล็กยึดเชิงกลในช่วงที่รับแรงเฉือนเป็นตัวแปร โดยศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวกับลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ ความสามารถในการรับแรงดัดและการป้องกันการวิบัติแบบ "Shear Bond" นอกจากนี้ยังได้ศึกษาพฤติกรรมที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเฉพาะในช่วงที่รับแรงเฉือนเทียบกับแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลตลอดความยาวช่วงของแผ่นพื้นนั้น

4.2.1 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของแผ่นพื้น

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการแตกร้าวของแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเฉพาะในช่วงที่รับแรงเฉือนกับแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลตลอดความยาวช่วง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.29 ถึง 4.30 จะเห็นได้ว่า แผ่นพื้นทั้งสองมีลักษณะการแตกร้าวคล้ายคลึงกันมาก กล่าวคือ การแตกร้าวจะเกิดมากบริเวณที่รับแรงดัดมากที่สุด จำนวนรอยแตกร้าวในแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลตลอดจะมีมากกว่าในแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเฉพาะในช่วงที่รับแรงเฉือนเล็กน้อย จากลักษณะการแตกร้าวดังกล่าว พอจะสรุปได้ว่า แผ่นเหล็กยึดเชิงกลที่ใส่ในช่วงกลางนี้ไม่ได้เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีตกับแผ่นเหล็กพับเลย ส่วนลักษณะการวิบัติของแผ่นพื้นทั้งสองก็เป็นการวิบัติจากแรงดึงในเหล็ก โดยที่คอนกรีตไม่เกิดการแตกร่อน

สำหรับแผ่นพื้นที่ไม่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลก็จะเกิดการวิบัติแบบ "Shear Bond" ซึ่งเกิดจากผิวคอนกรีตและแผ่นเหล็กพับแยกตัวออกจากกัน จากลักษณะการแตกร้าวของแผ่นพื้นที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.31 พบว่า แผ่นพื้นนี้เกิดการแตกร้าวน้อยมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ทั้งนี้เพราะแผ่นเหล็กพับกับคอนกรีตแยกตัวออกจากกันจนกระทั่งแผ่นพื้นขาดคุณสมบัติเชิงประกอบ (Composite Action) ก่อนที่จะเกิดการวิบัติแบบ "Shear Bond" ส่วนแผ่นพื้นอื่น ๆ ที่เหลือก็เกิดการวิบัติ เนื่องจากแผ่นเหล็กพับยึดตัวเกินพิกัด

และลักษณะการแตกร้าวก็จะเกิดขึ้นในรูปแบบเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.32 ถึง 4.33

4.2.2 การรับแรงตัด

แผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลตลอดความยาวช่วงสามารถรับแรงตัดได้ใกล้เคียงกับแผ่นพื้นที่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเฉพาะในช่วงที่รับแรงเฉือน กล่าวคือ แผ่นพื้นทั้งสองมีค่าแรงตัดประลัยแตกต่างกันประมาณ 4 % จากรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มแผ่นเหล็กยึดเชิงกลในบริเวณที่ไม่เกิดแรงเฉือนจะมีผลต่อการรับแรงตัดของแผ่นพื้นเพียงเล็กน้อย

สำหรับแผ่นพื้นที่มีระยะห่างของแผ่นเหล็กยึดเชิงกลอยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 ซม. แรงตัดประลัยของแผ่นพื้นเหล่านี้จะมีค่าต่างกันประมาณ 12 % ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.35 ส่วนแผ่นพื้นที่ไม่มีแผ่นเหล็กยึดเชิงกลอยู่เลย จะสามารถรับแรงตัดได้เพียงหนึ่งในสามของแผ่นพื้นที่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในเหล็ก

4.2.3 วิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงเฉือนทางแนวราบของแผ่นเหล็กยึดเชิงกล

เนื่องด้วยแผ่นเหล็กยึดเชิงกลที่ใช้ในการทดสอบของแผ่นพื้นชุดที่มีระยะห่างของแผ่นเหล็กยึดเชิงกลเป็นตัวแปร สามารถป้องกันการวิบัติอันเนื่องมาจากการแยกตัวและการเลื่อนตัวระหว่างผิวคอนกรีตกับแผ่นเหล็กพับได้อย่างสมบูรณ์ จนกระทั่งแผ่นพื้นเหล่านี้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในเหล็ก แรงเฉือนทางแนวราบที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็กยึดเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ คือ

$$\tau_H = \frac{VQ}{Ib} \qquad \text{.......................... (4.29)}$$

$$F_L = \int \tau_H dA \qquad \text{.......................... (4.30)}$$

โดยที่ τ_H = หน่วยแรงเฉือนทางแนวราบ

F_L = แรงเฉือนรวมทางแนวราบ

V = แรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ

Q = โมเมนต์ของพื้นที่หน้าตัด ณ จุดที่พิจารณา

I = โมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัด

b = ความกว้างของหน้าตัด ณ จุดที่พิจารณา

ส่วนแรงเฉือนทางแนวราบที่คาดว่าแผ่นพื้นเหล่านี้สามารถรับได้ จะประกอบด้วยกำลังในการรับแรงตัดของแผ่นเหล็กยึดเชิงกล แรงเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีตกับแผ่นเหล็กพับและแรงต้านทานระหว่างเดือยเหล็กยึดเชิงกลกับคอนกรีต กำลังในการรับแรงตัดของแผ่นเหล็กยึดเชิงกล สามารถคำนวณได้โดยถือว่า ปลายทั้งสองข้างที่เป็นรอยเชื่อมเป็นแบบยึดแน่น (fixed) แผ่นเหล็กยึดเชิงกลนี้สามารถรับแรงได้ 40 กก/แผ่น ส่วนค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีตกับแผ่นเหล็กพับสามารถหาค่าได้จากการทดสอบแผ่นพื้น S_o ซึ่งไม่ใส่แผ่นเหล็กยึดเชิงกลเลยและสามารถรับแรงเฉือนต่อความยาวช่วงที่รับแรงเฉือนได้ 240 กก/ม. สำหรับค่าแรงแบกของเดือยเหล็กยึดเชิงกลกับคอนกรีต จะคิดกำลังแบกของคอนกรีตตาม ACI - 318 - 77 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 f'_c และพื้นที่คอนกรีตจะกดทับสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาและความสูงของแผ่นเหล็กยึดเชิงกล ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงแบกของเดือยเหล็กยึดเชิงกลกับคอนกรีตมีค่า 360 กก/แผ่น ค่าแรงต่อต้านต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ผลรวมของแรงต่อต้านเหล่านี้จะมีค่ามากกว่าแรงเฉือนทางแนวราบที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็กยึดเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งเป็นผลทำให้แผ่นพื้นไม่เกิดการวิบัติแบบ "Shear Bond" และจากตารางดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่า สำหรับแผ่นพื้นที่มีเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมเท่ากับ 1.211 % จะใช้แผ่นเหล็กยึดเชิงกลเพียง 3 แผ่นต่อความยาวช่วงที่รับแรงเฉือนก็สามารถป้องกันการวิบัติแบบ "Shear Bond" ได้

4.3 หลักการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กพับรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ทราบว่า การวิเคราะห์หาค่าแรงดัดที่จุดวิบัติตาม ACI-318-77 จะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบและจากผลการวิจัยดังกล่าวทำให้พอสรุปหลักการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมด้วยแผ่นเหล็กพับรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ได้ดังนี้

1. หาน้ำหนักบรรทุกตาม ACI-318-77

2. หาค่าแรงดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกโดยถือว่าแผ่นพื้นนั้นเป็นแผ่นพื้นทางเดียว

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8}$$

3. หาเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมได้จากรูปที่ 4.36 ถ้าค่าแรงดัดประลัยอยู่ระหว่าง 2,000-4,000 กก.-ม. หรือคำนวณหาได้ตาม ACI-318-77 ดังสมการ

$$M_u = \phi \rho f_y b d^2 (1 - 0.59\rho \frac{f_y}{f'_c})$$

4. ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริม ρ

$$\rho \nless 0.75\,\rho_b$$

โดยที่ ρ_b = เปอร์เซ็นต์เหล็กเสริม ณ สภาวะสมดุลย์

5. คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

6. หาค่าระยะห่างของแผ่นเหล็กยึดเชิงกลที่ใช้เสริมเพื่อป้องกันการวิบัติแบบ Shear-Bond ได้จากรูปที่ 4.37

7. คำนวณหาตำแหน่งและขนาดของค้ำยันที่ใช้ในการก่อสร้างเพื่อไม่ให้แผ่นพื้นโก่งงอเกิน $\frac{L}{200}$ ในขณะทำการก่อสร้าง