บทที่ 4

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์

4.1 ผลของเหล็กเสริมทางขวางที่มีผลต่อการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน

4.1.1 ระยะห่างเหล็กเสริมทางขวาง

จากสมการพื้นฐานของ Euler[37] เกี่ยวกับการโก่งเดาะที่ใช้วิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤติที่เสาจะรับได้โดยทฤษฎีของ Tangent Modulus ซึ่งเสนอโดย F.R. Shanley ใช้สำหรับการโก่งเดาะทั้งในช่วงอีลาสติกและช่วงอินอีลาสติก เขียนเป็นสมการคือ

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(kL/r)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4.1)$$

เมื่อ f_{cr} = หน่วยแรงวิกฤติของเสา

Et = แทนเจนท์โมดูลัส (Tangent Modulus) ของเสา

k = ตัวคูณค่าความยาวประสิทธิผล (Effective Length Factor) ของเสา (รูปที่ 4.4)

r = รัศมีไจเรชั่น (Radius of Gyration) ของเสา

L = ความยาวของเสา

สมการนี้ Bresler & Gilbert[9] ได้นำมาประยุกต์เพื่อหาแนวทางในการออกแบบระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยว โดยสมมติว่าเมื่อใกล้การวิบัติของเสาคอนกรีตที่หุ้มจะล่อน (Spall) ออกเหลือส่วนรับน้ำหนักเฉพาะแกนใน (Core) ส่วนเหล็กเสริมยืนจะรับน้ำหนักมากขึ้นและอาจจะถึงกำลังคลากได้ การโก่งของเหล็กเสริมยืนระหว่างเหล็กปลอกอาจเกิดขึ้นได้และหน่วยแรงวิกฤติของเหล็กเสริมยืนนี้จะอยู่ในรูปตัวแปรของขนาดและกำลังของเหล็กเสริมยืน จากระยะห่างของเหล็กปลอกและจากลักษณะการโก่งเดาะ (Mode of Buckling) รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นลักษณะการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน ซึ่งในการที่จะให้เหล็กเสริมยืนมีประสิทธิผลสูงสุดนั้นจะต้องจัดเหล็กปลอกไม่ให้ห่างเกินไปและเพียงพอที่จะทำให้หน่วยแรงวิกฤติ

ใน เหล็ก เสริมยืนถึงจุดคลากไม่ว่าจะมีคอนกรีตหุ้มอยู่หรือไม่ก็ตาม

ในการวิเคราะห์นี้เขาได้ตั้งสมมติฐาน 3 ประการคือ

ก. หน่วยแรงวิกฤติใน เหล็กเสริมยืน (f_{cr}) คำนวณได้จากสมการของ Euler (สมการ 4.1) โดยให้ s เป็นสัญญลักษณ์ของระยะห่าง เหล็กปลอกแทนค่า L ที่เป็นความยาว เสาและค่า r เป็นค่ารัศมีไจเรชั่นของ เหล็ก เสริมยืน

ข. เพื่อให้ เหล็ก เสริมยืนมีประสิทธิผลมากที่สุดค่าของหน่วยแรงวิกฤติใน เหล็กควรจะเท่ากับกำลังคลากของ เหล็ก เสริมยืน (f_y)

ค. การ เคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เหล็ก เสริมยืนที่ตำแหน่ง เหล็กปลอกยึดนั้นถือว่ามีค่าน้อยมากไม่จำ เป็นต้องนำมาพิจารณาในการวิ เคราะห์

จากสมมติฐานในข้อ ก และ ข สมการที่ 4.1 จะ เขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{ks}{r} = \left(\frac{\pi^2 E_t}{f_y}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4.2)$$

และถ้าแทนค่า r ด้วย D/4 ดังนั้นค่า s จะคำนวณได้จาก

$$s = \frac{D\pi}{4k}\left(\frac{E_t}{f_y}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4.3)$$

ทั้งนี้ เมื่อ S = ระยะห่างของ เหล็กปลอก

D = ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของ เหล็ก เสริมยืน

f_y = กำลังคลาก (Yield Stress) ของ เหล็ก เสริมยืน

4.1.2 <u>ขนาดของ เหล็ก เสริมทางขวาง</u>

Bresler & Gilbert[9] ได้ทำการวิ เคราะห์หาขนาด เล็กสุดของ เหล็กปลอก เมื่อ เสริมแล้วจะป้องกันไม่ให้ เหล็ก เสริมยืนมีการโก่ง เดาะก่อนกำหนดอัน เนื่องมาจากสติฟ เนสของ เหล็กปลอกไม่เพียงพอ ถ้าจะพิจารณา เชิงทฤษฎีจากรูปที่ 4.2 ซึ่ง เป็นส่วน

ของเหล็กเสริมมีความยาว 2ℓ มีการยึดแน่นที่ปลายทั้งสองข้างและมีการยึดทางด้านข้างจากเหล็กปลอกด้วยสปริง k ที่บริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริมยืนโดยถือว่าคอนกรีตที่หุ้มล้อมออกแล้ว เหลือเฉพาะแกนคอนกรีตเป็นที่รองรับต่อเนื่องตลอดความยาวกันการโก่งเดาะเข้าข้างในของเหล็กเสริมยืน จากแบบจำลองอันนี้สามารถหาค่าคงที่ของสปริงเพื่อป้องกันการโก่งเดาะเนื่องจากการเคลื่อนตัวด้านข้างที่กึ่งกลางได้ โดยอาศัยการแก้ปัญหาทางพลังงานโดยวิธีของ Ritz (Ritz Method) การแก้สมการกระทำโดยการสมมติลักษณะของการโก่งเดาะของเหล็กออกเป็นสองลักษณะ ตามที่แสดงในรูปและถือว่าการเคลื่อนตัวที่กึ่งกลางได้มาจาก 2 รูปรวมกัน

$$y = y_1 + y_2 = \frac{a_1}{2}\left(1-\cos\frac{\pi x}{\ell}\right) + \frac{a_2}{2}\left(1-\cos\frac{2\pi x}{\ell}\right) \quad \ldots.(4.4)$$

เมื่อ y = ลักษณะการโก่งตัวของเหล็กเสริมยืนที่เกิดการโก่งเดาะ (Deflected Shape of the Buckled Bar)

y_1, y_2 = ลักษณะการโก่งเดาะสมมติในรูปฟังก์ชันทางตรีโกณ (Trigonometric Function) จากรูป 4.2

a_1, a_2 = ขนาดสูงสุดของลักษณะการโก่งเดาะ (Maximum Amplitude of Buckling Mode)

x = ระยะทางตามแกน x

หลังจากใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยอาศัยวิธีของ Ritz จะได้ค่า P และ k คือ

$$P = \frac{4\pi^2 EI}{\ell^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4.5)$$

$$k = \frac{3\pi^2 EI}{4\ell^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4.6)$$

โดยที่ P = น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกน

k = ค่าคงที่สปริงของเหล็กปลอก

E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมยืน

I = ค่าโมเมนต์อินเนอร์เชีย (Moment of Inertia) ของเหล็กเสริมยืน

ลักษณะของเหล็กปลอกตามที่แสดงในรูป 4.5 จะมีผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมยืนด้วยแรงดึงที่ยึดไว้ สมมติว่าเหล็กปลอกอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic Rod) ซึ่งสติฟเนส (Stiffness) คือ

$$K = A'E'/b' \qquad \text{...........(4.7)}$$

โดยที่ K = สติฟเนสของเหล็กปลอก

A' = หน้าตัดประสิทธิผลของเหล็กปลอก

E' = โมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของเหล็กปลอก

b' = ความยาวประสิทธิผลของเหล็กปลอก

ดังนั้น A' สามารถคำนวณได้จาก

$$A' = \frac{3\pi^4 Eb'I}{4E'\ell^3} \qquad \text{..........(4.8)}$$

แต่เนื่องจากมีการจัดเหล็กปลอกในเสาหลายลักษณะซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ในการจัดว่า

$$\frac{A'}{b'} = m\left(\frac{A_t}{b}\right) \qquad \text{..........(4.9)}$$

เมื่อ A_t = เนื้อที่หน้าตัดจริงของเหล็กปลอก

m = ค่าคงที่ของเหล็กปลอกแบบต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.5

b = ขนาดของแกนคอนกรีต

แทนค่าจากสมการที่ 4.9 ลงในสมการ 4.8 โดยให้ $I = \frac{\pi D^4}{64}$ และสมมติให้ $E = E'$

จะได้

$$d/D = \frac{D}{\ell}\left(\frac{4.56b}{m\ell}\right)^{1/2} \qquad \text{..........(4.10)}$$

เมื่อ d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอก

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมยืน

ℓ = ระยะห่างของเหล็กปลอก

ตัวอย่างการหาขนาดของเหล็กเสริมทางขวาง ดังรูปที่ 4.5 ก. กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกและขนาดแกนมีค่า 15 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริมยืน เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.10 จะได้

$$d = 0.142D \qquad \text{..............(4.11)}$$

ซึ่งสมการ 4.11 ควรจะเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยที่สุดของเหล็กปลอกที่จะกันไม่ให้เหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งเดาะก่อนจากสติฟเนสเหล็กปลอกไม่พอ จะเห็นได้ว่าถ้าหากว่าเหล็กเสริมยืนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. มีระยะห่างเหล็กปลอกประมาณ 16 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมยืนแล้ว เหล็กปลอกขนาด 4 มม. ก็มีความเพียงพอที่จะกันไม่ให้เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนก่อนกำหนด

ในงานวิจัยนี้จะนำผลการพิสูจน์ทฤษฎีนี้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการทดลอง, Khan[24] พยายามพิสูจน์ให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบเหล็กเสริมทางขวางที่เสนอโดย Bresler & Gilbert โดยอิงสมการที่ 4.3 เป็นพื้นฐานนั้นใช้ได้หรือไม่ เขาได้สร้างตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างและพบว่าเหล็กเสริมธรรมดาอาจใช้ค่าโมดูลัสของ Young แทนได้และแทนเจนท์โมดูลัสเหมาะสำหรับเหล็กเสริมกำลังสูง (High-Strength Steel)

สมการที่ 4.3 อาจจะเปลี่ยนเป็น

$$s = \frac{\pi D}{4k}\left(\frac{E}{f_y}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \text{...........(4.12)}$$

จากสมการที่ 4.12 เขาได้สร้าง แบบจำลอง (Model) สองชุดเพื่อตรวจสอบแนวทางออกแบบตามสมการนี้ ชุดแรกมีเหล็กเสริมยืน 4 เส้นไม่มีคอนกรีตหุ้มมีแกนภายในเป็นไม้และคอนกรีตกำหนดระยะการยึดด้านข้างตามที่คำนวณได้จากสมการ 4.12 จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.6 ก. จะเห็นว่าเหล็กเสริมยืนจะถึงจุดคลากถ้าค่า L/r ต่ำกว่า 115 การทดสอบอีกชุดนั้น ทดสอบเหล็กเสริมเส้นเดียว ผลการทดสอบอยู่ในรูปที่ 4.6 ข จะพบว่าเหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งเดาะเมื่อ L/r น้อยกว่า 115 เหมือนชุดแรก กราฟเส้นล่างสุดที่เห็นในรูป 4.6 ก และ 4.6 ข นั้นเป็นค่าคำนวณตามทฤษฎีในกรณีที่เหล็กเสริมยืนมีการโก่งเริ่มต้นมาก่อน (Initial Curvature) มีค่าสมมติเท่ากับ $\frac{\ell}{250}$ ทั้งนี้โดยใช้สมการของ Perry-Robertson's[24] จะเห็นว่าผลการทดสอบให้ค่าหน่วยแรงวิกฤติเฉลี่ยประมาณ

80 % ของกำลังคลากจากการคำนวณส่วนค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ระหว่าง 100-67:7 % ของกำลังคลากจากการคำนวณ แต่ก็สรุปว่าแนวทางการออกแบบของ Bresler & Gilbert ตามสมการที่ 4.3 และ 4.12 นั้นยังคงเป็นจริงได้ถ้าหากว่าความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะต้องหนาเพียงพอที่จะป้องกันการโก่งเดาะในเหล็กเสริมก่อนกำหนด ทั้งนี้ได้กำหนดว่า ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะต้องไม่น้อยกว่า

$$t = \frac{1.115\ f_y . D^2}{sf'_c} \qquad \text{............(4.13)}$$

โดยที่ t = ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ซม.

f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริมยืน, กก/ซม ^{2}

D = ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมยืน, ซม.

s = ระยะห่างของเหล็กปลอก

f'_c = กำลังประลัยของคอนกรีตซึ่งมีกำลังไม่เกิน 350 กก/ซม ^{2}

4.2 ผลของเหล็กเสริมทางขวางที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.2.1 กำลังของเสาในแนวแกน

ตามปกติน้ำหนักบรรทุกของเสาจะแบ่งรับโดยคอนกรีตและเหล็กเสริมยืนเป็นหลัก เหล็กเสริมทางขวางจะเป็นกลไกทางอ้อมที่ส่งเสริมให้เสาคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงขึ้นและมีความเหนียวทางโครงสร้างเพิ่มขึ้น โดยที่เหล็กปลอกจะป้องกันการโก่งเดาะในเหล็กเสริมยืน และทำให้เกิดการโอบในแกนคอนกรีตที่อยู่ในเหล็กปลอก การวิเคราะห์อาจแยกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

ก. กำลังในคอนกรีต

กำลังของเสาส่วนที่รับด้วยคอนกรีตอาจแยกออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่อยู่ภายในเหล็กปลอกและนอกเหล็กปลอกซึ่งคอนกรีตทั้งสองส่วนนี้จะช่วยกันรับน้ำหนักบรรทุกส่วนใหญ่ของเสาในช่วงอีลาสติกหน่วยแรงทั้งสองส่วนมีหน่วยแรงอัดภายในเท่ากันหรือเขียนในรูปสมการได้รวมกัน

$$P_c = A_c f_c \qquad \text{...............(4.14)}$$

เมื่อ P_c = น้ำหนักบรรทุกที่รับโดยคอนกรีต

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

f_c = หน่วยแรงในคอนกรีต

เมื่อน้ำหนักบรรทุกของเสามากขึ้นหน่วยแรงของคอนกรีตเริ่มเข้าสู่ช่วงพลาสติก หน่วยแรงของคอนกรีตในเหล็กปลอกและนอกเหล็กปลอกจะเริ่มแตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะว่าคอนกรีตภายในเหล็กปลอกจะได้รับอิทธิพลจากการโอบของเหล็กปลอกทำให้หน่วยแรงสูงขึ้น ในการวิเคราะห์หากำลังประลัยในช่วงพลาสติกของคอนกรีต Khan[24] ได้เสนอแนะสมการที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่คอนกรีตภายในและภายนอกเหล็กปลอกเดี่ยวสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังไม่เกิน 350 กก/ซม^2 ว่า

$$P_{cu} = \left(Q_1 - Q_2 \frac{A_{cc}}{A_c}\right) f'_c A_c \qquad \text{...........(4.15)}$$

เมื่อ P_{cu} = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาที่รับโดยคอนกรีต

Q_1 = ตัวคูณลดกำลังของเสาที่ไม่มีคอนกรีตนอกเหล็กปลอกมีค่า 0.898

Q_2 = ตัวคูณลดกำลังของเสาที่มีคอนกรีตนอกเหล็กปลอกมีค่า 0.031

A_{cc} = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตนอกเหล็กปลอก

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตทั้งหมด

f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอก

แต่ในการคำนวณกำลังประลัย ACI[1] ได้รวมค่าตัวคูณลดกำลังทั้งสองตัวนี้เข้าด้วยกันเป็นตัวคูณเดียวกัน ซึ่งจากการทดสอบของ MacMillan[18] พบว่าค่าตัวคูณดังกล่าวมีค่าเป็น 0.85 ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$P_{cu} = 0.85\, f'_c\, A_c \qquad \text{..........(4.16)}$$

ข. กำลังในเหล็กเสริมยืน

ในทำนองเดียวกันกำลังของเหล็กเสริมยืน สามารถแบ่งได้สองช่วง คือในช่วงอีลาสติกและช่วงพลาสติก กล่าวคือ ในช่วงอีลาสติกหน่วยแรงในเหล็กเสริมยืนจะมี

ความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรงของโมดูลัสยืดหยุ่นและความเครียด เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$f_s = \varepsilon_s E_s \qquad \text{..............(4.17)}$$

เมื่อ f_s = หน่วยแรงในเหล็กเสริมยืน

ε_s = ความเครียดในเหล็กเสริมยืน

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมยืน

ดังนั้นกำลังส่วนที่รับโดยเหล็กเสริมยืนในช่วงอีลาสติกจะหาได้จากผลคูณของพื้นที่หน้าตัดเหล็กกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นคือ

$$P_s = A_s f_s \qquad \text{..............(4.18)}$$

เมื่อ P_s = กำลังในเหล็กเสริมยืน

A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมยืน

ในช่วงพลาสติก ซึ่งนับตั้งแต่เหล็กเสริมยืนรับกำลังถึงจุดคลากแล้ว หน่วยแรงในเหล็กเสริมยืนจะเพิ่มน้อยมากเมื่อเทียบกับความเครียด การหาหน่วยแรงที่แท้จริงของเหล็กเสริมยืนในช่วงพลาสติกนี้จะต้องอาศัยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมยืนแต่ละอันไป ซึ่งโดยทั่วไปจะถือว่าหน่วยแรงหลังจากจุดคลากแล้วจะมีกำลังเท่ากับกำลังคลากโดยตลอด ดังนั้นกำลังส่วนที่เหล็กเสริมยืนแบกรับในช่วงนี้จะเขียนได้ดังนี้

$$P_{su} = A_s f_y \qquad \text{............(4.19)}$$

เมื่อ P_{su} = กำลังประลัยในเหล็กเสริมยืน

f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริมยืน

อย่างไรก็ดีในการวิเคราะห์กำลังในเหล็กเสริมยืนทั้งในช่วงอีลาสติกและในช่วงพลาสติกจะต้องมั่นใจว่ามีการเสริมเหล็กปลอกพอเพียงที่ไม่ทำให้การโก่งเดาะก่อนกำหนดเป็นการวิบัติเฉพาะแห่ง (local failure)

ค. <u>กำลังจากการโอบของเหล็กเสริมทางขวาง</u>

ตามความเป็นจริงเหล็กเสริมทางขวางไม่ได้เป็นส่วนที่รับน้ำหนักโดยตรงเหมือนคอนกรีตและเหล็กเสริมยืน แต่เหล็กตามขวางนี้จะช่วยโอบแกนคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้น ในทางปฏิบัติเหล็กเสริมทางขวางอาจเป็นเหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียวก็ได้ ซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมการโอบที่ต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่หน่วยความเครียดตามแนวแกนมีค่าน้อยนั้นเหล็กปลอกแทบจะไม่รับแรงเลย และการโอบของคอนกรีตมีเพียงเล็กน้อย (Unconfined Concrete) แต่เมื่อหน่วยความเครียดตามแนวแกนเพิ่มมากขึ้นถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งหน่วยความเครียดทางขวางมีค่าสูงอันเนื่องมาจากสัดส่วนปัวซองส์ (Poisson's Ratio)[9] และหลังจากการแตกร้าวภายในของคอนกรีตส่วนที่หุ้มแกนในจะเริ่มปริออกส่งผลทำให้เหล็กปลอกเกิดปฏิกริยาตอบสนองทำให้เกิดการโอบคอนกรีต (Confined Concrete) ในแกนภายในสูงขึ้น ด้วยการโอบคอนกรีตอันนี้จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตในแนวแกนสูงมากขึ้น

Richart, Brandtzaeg & Brown[27] ทำการทดสอบตัวอย่างโดยใช้วิธีทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Compression Test) โดยใช้ของเหลวเป็นแรงอัดด้านข้าง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นกว่าเดิมมีค่าประมาณ 4.1 เท่าของหน่วยแรงอัดทางด้านข้างซึ่งเขียนในรูปสมการได้

$$f''_c = f'_c + 4.1 f_\ell \qquad \text{.............(4.20)}$$

เมื่อ f''_c = หน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีการโอบด้านข้าง (Confinement)

f'_c = หน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก

f_ℓ = หน่วยแรงอัดด้านข้าง

ความสัมพันธ์อันนี้เขาได้พบในการทดสอบภายหลัง[23] ว่าสามารถประยุกต์ใช้กับกรณีของเสาที่เสริมเหล็กปลอกเกลียวเป็นตัวโอบด้านข้าง

Ti-Haung[38] เป็นอีกผู้หนึ่งที่ได้ทดสอบตัวอย่างคล้ายกับของ Richart, Brandtzaeg & Brown และพบว่า กำลังอัดประลัยมีค่าสูงขึ้นประมาณ 4 เท่าของกำลังอัด

ด้านข้าง และได้นำมาประยุกต์เข้ากับผลที่เกิดจากการโอบของเหล็กปลอกเกลียวในเสาทั้งนี้ได้สมมติว่า หลังจากที่คอนกรีตที่หุ้มเหล็กแตกล่อนออก แกนคอนกรีตจะป่องตัวออกข้างภายใต้หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่มีค่าสูง เหล็กปลอกเกลียวจะรับแรงดึงทางด้านข้างโอบแกนคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ซึ่งแรงทางด้านข้างและแรงตามแนวแกนเมื่อรวมเข้าด้วยกันจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับลักษณะของแรงอัดสามทิศทางดังได้กล่าวแล้ว

และถ้าให้ D_c = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนคอนกรีต

A_{st} = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กปลอกเกลียว

s = ระยะห่างเหล็กปลอก

f_ℓ = หน่วยแรงด้านข้างของคอนกรีต (รูปที่ 4.3)

Δf_c = ขนาดของการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตเนื่องจากหน่วยแรงด้านข้างของคอนกรีต

p_s = สัดส่วนปริมาตรเหล็กปลอกเกลียวต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต

จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$p_s = \frac{A_{st}\pi D_c}{A_c . s} = \frac{4A_{st}}{sD_c} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(4.21)$$

$$f_\ell = \frac{2A_{st}f_{st}}{s.D_c} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(4.22)$$

หรือ
$$f_\ell = \frac{1}{2}p_s f_{st} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(4.23)$$

ถ้าสมมติให้ แรงอัดด้านข้างจะสูงสุดเมื่อเหล็กปลอกถึงกำลังคลาก, ดังนั้น

$$f_\ell = \frac{1}{2}p_s f_{\ell y} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(4.24)$$

และนำค่าที่เขาได้มาคูณจะเป็นหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีต

$$\Delta f_c = 4f_\ell$$

หรือ
$$\Delta f_c = 2p_s f_{\ell y} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(4.25)$$

Bertoro & Vallenas & Povov[7] ได้ทำการทดสอบเสาที่เสริมเหล็กปลอกเดี่ยวพบความสัมพันธ์คล้ายกับสมการของ Ti -Haung แต่ได้ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเสารับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดว่า

$$\Delta f_c = 0.90\ p_s f_{\ell y} \qquad \text{.............(4.26)}$$

Khan[24] ได้เสนอผลการโอบของเหล็กเสริมทางขวางโดยนำความเห็นของ Bresler & Gilbert[9] ในเรื่องของคอนกรีตที่ขยายตัวออกทางด้านข้างตามคุณสมบัติของปัวซองส์ (Poisson's Ratio Effect) ทำให้เหล็กปลอกยืดออก แรงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกกำหนดให้เท่ากับแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างคอนกรีตและเหล็กปลอกเดี่ยว หาค่าของหน่วยแรงของคอนกรีตภายในเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้น เขียนได้เป็น

$$\Delta f_c \leq \frac{\P d f'_c}{5s} \qquad \text{.............(4.27)}$$

เมื่อ Δf_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีตภายในเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้น

d = ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอก

f'_c = หน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก

s = ระยะห่างของเหล็กปลอก

C = แกนคอนกรีตวัดจากผิวนอกของวงรอบเหล็กปลอก