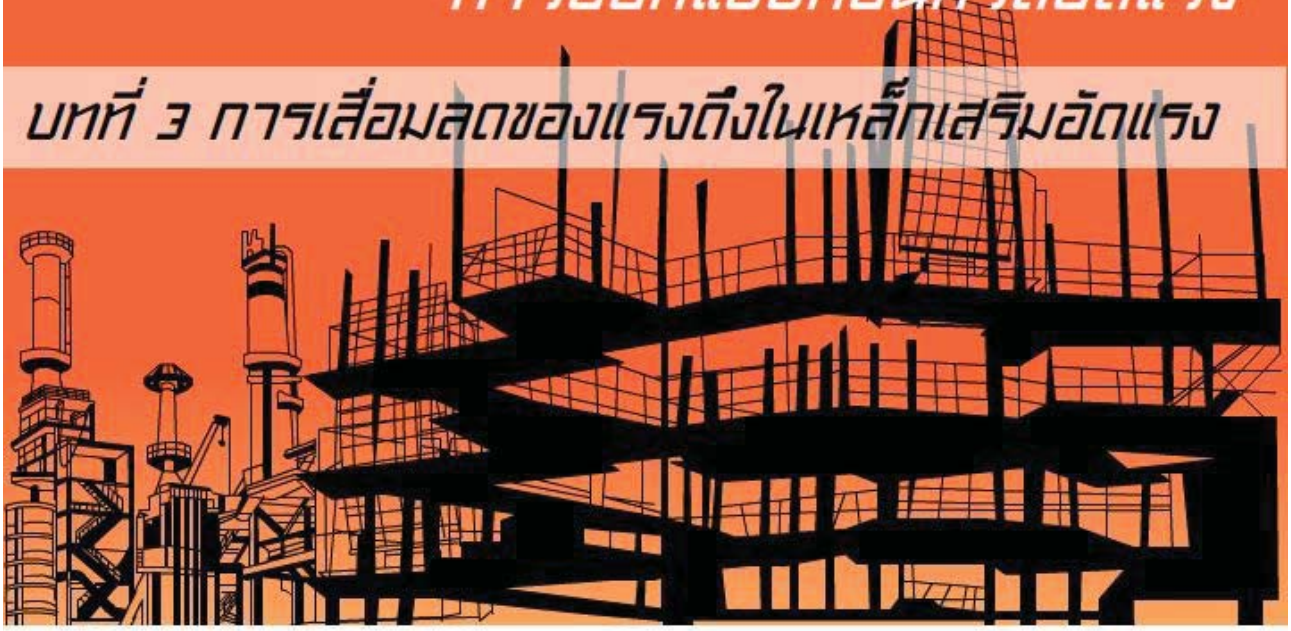
CEN 432

การออกแบบคอนกรีตอัดแรง

บทที่ 3 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง



มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ในการอัดแรงจะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มีทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด หลังจากการถ่ายแรง (immediate) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตาม

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

ก) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีที่ทันใดหลังจากการถ่ายแรง

การสูญเสียแรงดึงทันทีทันใดนี้ มีสาเหตุจากหลายประการแต่มักพิจารณาในการออกแบบได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืนที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าใกล้สมอยึด นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง อาจจะมีสาเหตุอื่นๆ เช่น การหดตัวของไม้และชิ้นส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรง แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากการถ่ายแรง

ผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะ ดึงด้วยคอนเครื่องดึงไฮดรอลิค P_j กับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากการถ่ายแรง P_i

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด $= P_j - P_i$

ข) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลามีสาเหตุหลักๆ มาจากการหดตัวของคอนกรีตการหดตัวของคอนกรีตจะสูญเสียความชื้น การคืบและการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น การสูญเสียแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยที่อัตราสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา $= P_i - P_e$

3.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss)

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดในขั้นตอนการดึงเหล็กคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลังความฝืดระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับท่อเหล็กที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรงจะทำให้แรงดึงเหล็กค่อยๆ ลดลงตามระยะทางออกไปจากเหล็กเสริมที่ทำการดึงค่าการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดขึ้นอยู่กับมุมรวมของความโค้งระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมที่ทำการดึง ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดของท่อที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรงการสูญเสียแรงดึง เนื่องจากความฝืดจะพิจารณาในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลังเท่านั้น ส่วนในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนขณะที่ดึงจะไม่ใช้ท่อร้อย และไม่มีความฝืดเกิดขึ้นขณะดึงจึงไม่ต้องนำมาพิจารณา

3.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัด (friction loss)

ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2534ได้กำหนดสมการสำหรับการคำนวณ

$$P_x = P_j e^{-(kx+\mu\alpha)}$$

โดยที่ P_x คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่ระยะ x จากสมอยึด, กก.

P_j คือ แรงดึงที่ปลายที่ทำการดึงลวด, กก.

e คือ ค่าคงที่เท่ากับ 2.71828

k คือ สัมประสิทธิ์ของความคด (wobble coefficient), ม.$^{-1}$

μ คือ สัมประสิทธิ์ของความฝืด (friction coefficient), เรเดียน$^{-1}$

x คือ ระยะตามแนวราบที่วัดจากปลายเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำการดึงถึงตำแหน่งที่พิจารณา, ม.

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

3.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัด (friction loss)

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ μ และ k สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงและท่อร้อยชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง	ชนิดของท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรง	μ (ต่อเรเดียน)	k (ต่อเมตร)
ลวดอัดแรงหรือลวดเกลียวอัดแรง	ท่อโลหะมันวาว (bright metal sheathing)	0.20–0.30	0.003–0.0066
	ท่อโลหะเคลือบสังกะสี (galvanized metal sheathing)	0.15–0.25	0.002–0.0049
	หุ้มเคลือบด้วยจารบีหรือแอสฟัลต์ (greased or asphalt coated and wrapped)	0.10–0.20	0.0015–0.004
	ท่อโลหะแข็งเคลือบสังกะสี (galvanized rigid)	0.25	0.0007
เหล็กเส้นอัดแรง	ท่อโลหะมันวาว (bright metal sheathing)	0.20	0.0010
	ท่อโลหะเคลือบสังกะสี (galvanized metal sheathing)	0.15	0.0007

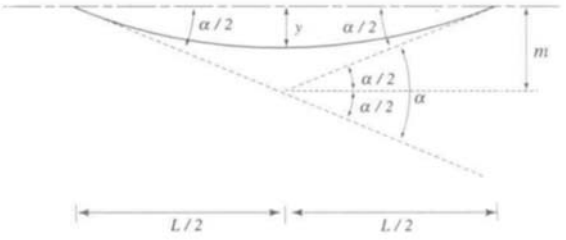
การคำนวณหาค่ามุมที่เปลี่ยนไป

ในกรณีที่แนวเหล็กเสริมอัดแรงมีลักษณะเป็นแนวพาราโบล่า การคำนวณหาค่ามุมที่เปลี่ยนไป α อาจคำนวณได้จาก α (เรเดียน) $= \frac{8y}{L}$ ซึ่งพิสูจน์ได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 3.2)

สำหรับโค้งพาราโบล่า $y = \frac{m}{2}$

(กรณี α เล็ก ๆ) $\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2} = \frac{m}{L/2} = \frac{2y}{L/2}$

ดังนั้น $\alpha = \frac{8y}{L}$



รูปที่ 3.2 การคำนวณหาค่ามุมที่เปลี่ยนไป α สำหรับโค้งพาราโบล่า

ก) กรณีคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ก่อนเทคอนกรีตและเมื่อทำการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู้คอนกรีต คอนกรีตจะเกิดการหดตัวเนื่องจากแรงอัดตามทฤษฎีอีลาสติกถ้าพิจารณาคอนกรีตอัดแรงจะมีแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางหน้าตัดคอนกรีตซึ่งกรณีนี้ไม่มีผลต่อของโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้องมีผลต่อแรงตามแนวแกน

กรณีคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ดังนั้น ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต ES หาได้จาก

$$ES = \Delta\sigma_s = E_s\Delta\varepsilon_s = \frac{E_s P_o}{E_c A_c} = n\frac{P_o}{A_c} \qquad (3.3)$$

การที่ 3.3 อาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไป ดังนี้

$$ES = n f_{cir} = \frac{E_s}{E_{ci}} f_{cir} \qquad (3.4)$$

โดยที่ f_{cir} คือ หน่วยแรงที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง
(ในกรณีของแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดคอนกรีต $f_{cir} = \frac{P_o}{A_c}$)

E_s *คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง*

E_{ci} *คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง หาได้จาก* $E_{ci} = 15,200\sqrt{f'_{ci}}$

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

กรณีคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ในกรณีที่มีผลของโมเม้นต์เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งมาจากโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ (Pe) และโมเม้นต์เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (M_G) การคำนวณหาค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตสามารถใช้สมการที่ 3.4 เพียงแต่ค่า f_{cir} ต้องคำนวณจากสมการที่ 3.6

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในอนาคต

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \qquad (3.5)$$

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง (y=e) คือ

$$f_{cir} = \frac{P_o}{A} + \frac{P_o e^2}{I} - \frac{M_G e}{I} \qquad (3.6)$$

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

3.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

ข) กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กออกทีหลัง

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลังต่างจากคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน ถ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงเพียง 1 เส้นในคอนกรีตอันแรงชนิดดึงเหล็กออกทีหลัง การหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นขณะที่ทำการอัดแรง เนื่องจากแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่วัดจากเครื่องอัดแรงไฮดรอลิคเป็นค่าหลังจากการหดตัวของคอนกรีตได้เกิดขึ้นแล้ว

$$ES = 0.5 \frac{E_s}{E_{ci}} f_{cir}$$

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

3.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง

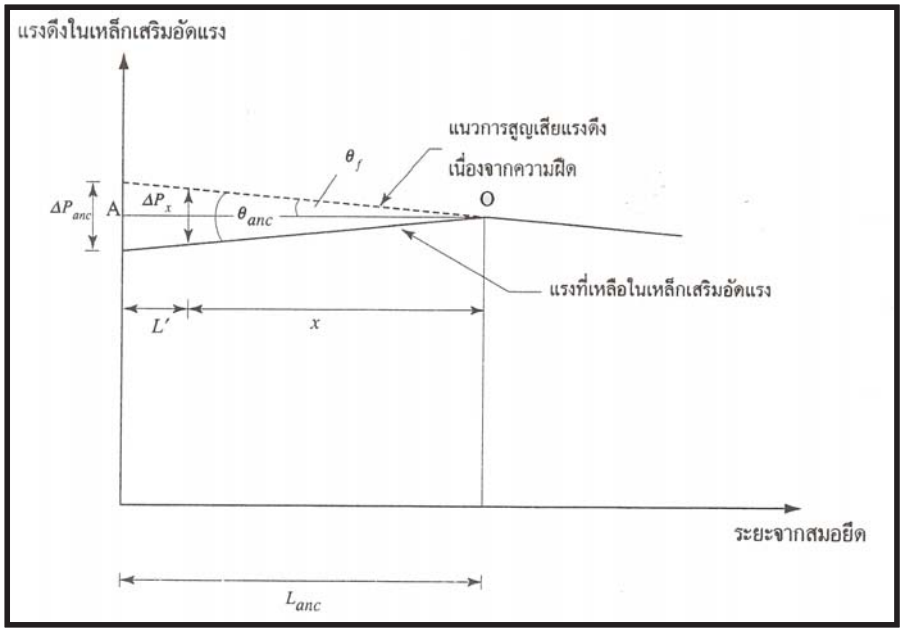
$$ES = 0.5 \frac{E_s}{E_{ci}} f_{cir} \qquad (3.7)$$

โดยที่ $f_{cir} = \frac{P}{A} + \frac{Pe^2}{I} - \frac{M_G e}{I}$ (P เป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิคมีค่าเท่ากับ P_j) จะเห็นว่า f_{cir} ในสมการที่ 3.7 นี้ต่างจาก f_{cir} ในสมการที่ 3.4 ของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน f_{cir} ในสมการที่ 3.4 ใช้ค่า P_o ในการคำนวณ โดย P_o ใช้ค่าประมาณเท่ากับ $0.9 P_j$

3.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss)

ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กออกทีหลัง การถ่ายแรงจากเครื่องดึงไฮดรอลิกจะกระทำผ่านสมอยึด ซึ่งอยู่ที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง ที่สมอยึดมีการขยับตัวเพื่อเข้าที่ขณะที่ทำการถ่ายแรงจากเครื่องดึงสู่สมอยึด การขยับตัวของสมอยึดนี้ทำให้เกิดการสูญดึงในเหล็กเสริมอัดแรงด้วย เพราะเหล็กเสริมอัดแรงจะขยับตัวตาม การขยับตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสมอยึด การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดเมื่อลักษณะคล้ายกับการสูญเสียแรงดึงจากเนื่องจากความฝืดเพียงทิศทางตรงกันข้าม

3.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss)



การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของอีลาสติกของคอนกรีต

$$\Delta_a = \int_o^{L_{anc}} \Delta\varepsilon_x dx = \int_o^{L_{anc}} \frac{\Delta P_x}{A_s E_s} dx$$

$$\Delta_a = \int_o^{L_{anc}} \frac{\theta_{anc}\, x}{A_s E_s} d_x = \frac{\theta_{anc} L_{anc}^2}{2A_s E_s}$$

ดังนั้น $$L_{anc} = \sqrt{\frac{2A_s E_s \Delta_a}{\theta_{anc}}}$$

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง

θ_{anc} คือ ค่าความลาดชันที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดและมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของค่าความลาดชันของแนวการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด $\left(\theta_{anc} = 2\theta_f\right)$

3.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss)

แรงดึงที่สูญเสียเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดที่ปลายคาน ΔP_{anc} สามารถหาได้จาก

$$\Delta P_{anc} = \theta_{anc} L_{anc} \qquad (3.10)$$

และค่าแรงดึงที่สูญเสียเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ หรือระยะที่ห่างจากสมอยึด L' ใด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 มีค่าเท่ากับ

$$\Delta P_x = \theta_{anc} x = \theta_{anc}(L_{anc} - L') \qquad (3.11)$$

3.4 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss)

การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้มีสาเหตุจากการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีต มาตรฐานสำหรับคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอให้ใช้ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัว เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ดังนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน $SH = 1200 - 11\,RH$ (3.12)

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง $SH = 0.80(1200 - 11\,RH)$ (3.13)

SH คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

RH คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี (หน่วยเป็นร้อยละ)

ตารางการสูญเสียหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี (ร้อยละ)	ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสีย (กก./ซม.²)	
	คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน	คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง
0–25	1,060	850
26–75	700	560
76–100	350	280

3.5 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (Creep loss)

การคืบที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับเวลาและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตการคืบจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 สำหรับการคำนวณค่าหน่วยแรงดึงในหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

แรงที่สูญเสียเนื่องจากการคืบของคอนกรีต ทั้งในคอนกรีตอันแรงชนิดดึงเหล็กออกก่อนและชนิดดึงเหล็กออกทีหลัง

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต

$$CR = 12f_{cir} - 7f_{cds}$$

CR คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

f_{cir} คือ หน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงทันทีหลังจากทำการถ่ายแรง, กก./ซม.^{2}

f_{cds} คือ หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากน้ำหนักคงที่ทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักคงที่ซึ่งมีอยู่แล้วในขณะอัดแรง, กก./ซม.^{2}

3.6 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss)

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงในกรณีนี้ เกิดเนื่องจากการคลายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมอัดแรง ขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่ม เวลาที่ผ่านไปหลังจาการดึงเหล็กเสริมอัดแรงและชนิดเหล็กเสริมอัดแรง ในการคำนวณออกแบบสามารถใช้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ก) ลวดเกลียวอัดแรง เกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410 - 0.4ES - 0.2(SH + CR)$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.4ES - 0.2(SH + CR)$$

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง

ก) ลวดเกลียวอัดแรง เกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH + CR)$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH + CR)$$

ค) เหล็กเส้นอัดแรง

$$RE = 210$$

ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง	ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง, กก./ซม.^{2}	
	$f_c' = 300$ กก./ซม.^{2}	$f_c' = 350$ กก./ซม.^{2}
สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน		
- ลวดเกลียวอัดแรง	-	3,160
สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง		
- ลวดอัดแรง, ลวดเกลียวอัดแรง	2,270	2,320
- เหล็กเส้นอัดแรง	1,570	1,620