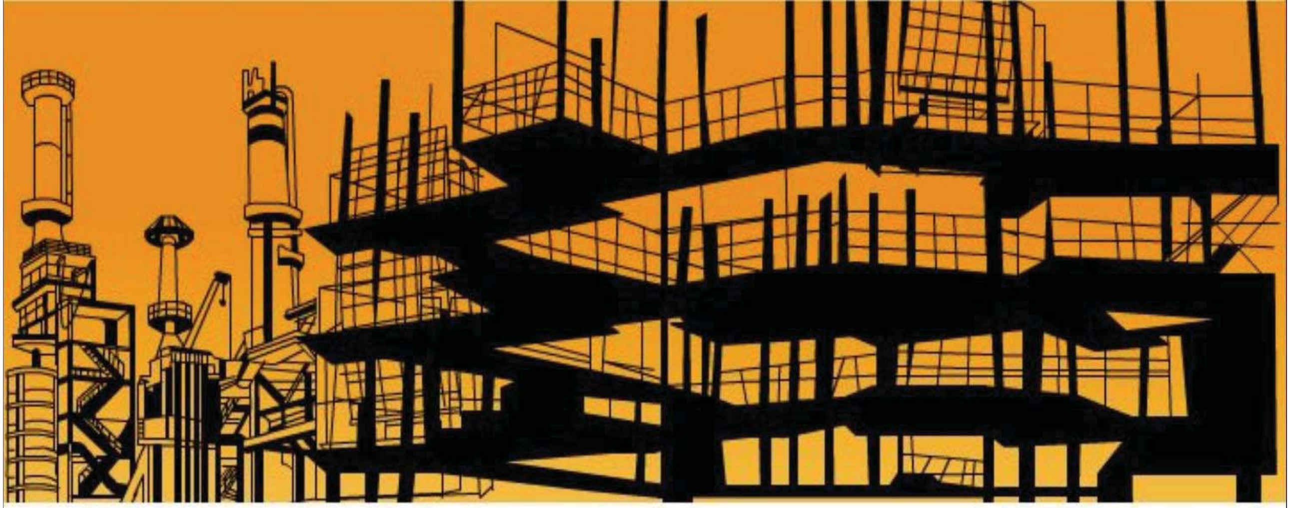
CEN 432

การออกแบบคอนกรีตอัดแรง

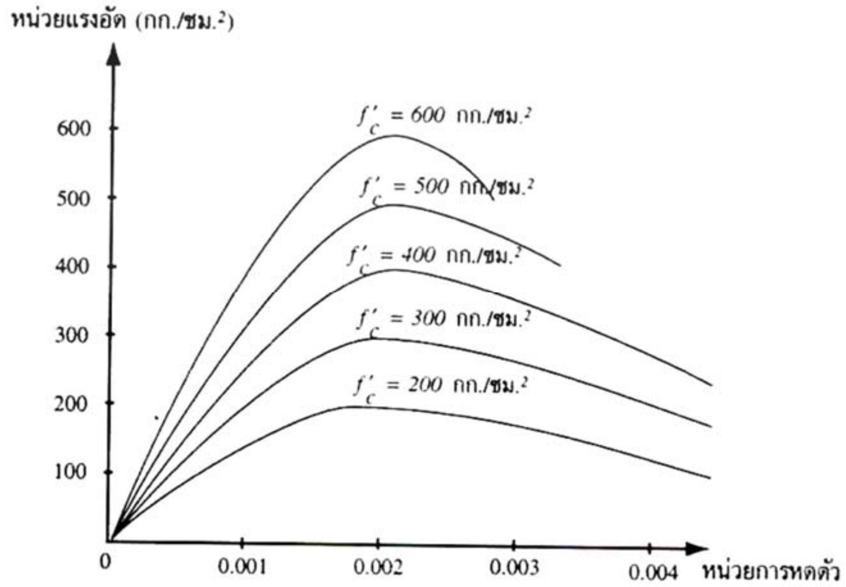
บทที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับคอนกรีตอัดแรง



คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ต้องการกำลังอัดประลัยที่สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป กำลังอัดประลัยที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงในปัจจุบันจะใช้ตั้งแต่ 3000-500 กก/ซม.^{2} เหตุผลแรกที่ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูงก็คือการใช้คอนกรีตกำลังประลัยสูงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ได้กล่าวมาในบทที่ 1 และอีกเหตุผลหนึ่งคอนกรีตจะต้องต้านทานหน่วยแรงอัดหรือหน่วยยึดเหนี่ยวที่สูงมาก นอกจากนี้คอนกรีตที่มีกำลังรงอัดประลัยสูง จะมีกำลังในการรับแรงดึง แรงเฉือนและแรงยึดเหนียวสูงด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่มีกำลังต่างๆ



ในมาตรฐานของ ACI-209(1978)

มีสูตรคำนวณที่ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่เวลาใดๆ (t) ถ้ารู้กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วันโดย

$$f'_c(t) = \frac{t}{\alpha + \beta t} f'_c(28)$$

$f'_c(t)$	คือ	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ t วัน
$f'_c(28)$	คือ	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน
α, β	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์และวิธีการบ่ม

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

สำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (ชนิดที่ 1)

บ่มความชื้นธรรมดา	$\alpha = 4.0$	$\beta = 0.85$
บ่มด้วยไอน้ำ	$\alpha = 1.0$	$\beta = 0.95$

สำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดให้กำลังสูงเร็วในช่วงแรก (ชนิดที่สาม)

บ่มความชื้นธรรมดา	$\alpha = 2.3$	$\beta = 0.92$
บ่มด้วยไอน้ำ	$\alpha = 0.7$	$\beta = 0.98$

มาตรฐานของ ACI 38-89

ในมาตรฐานของ ACI 318–89 ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของการแตกหักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังแสดงไว้ในสมการ 2.2 และ 2.3 ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตได้

โมดูลัสของการแตกหัก $f_r = 7.5\sqrt{f'_c}$ (หน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว²) (2.2)

หรือ $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$ (หน่วยเป็น กก./ซม.²) (2.3)

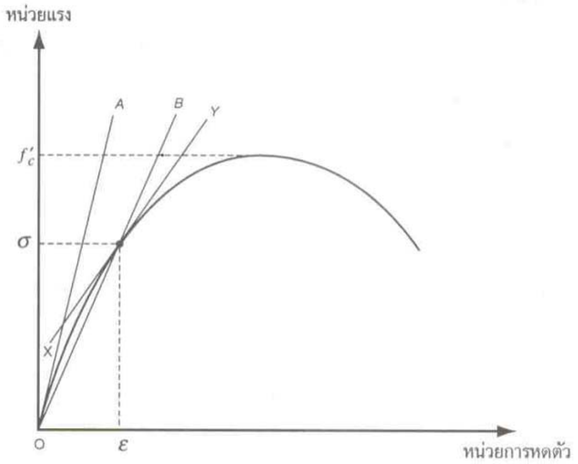
มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวถึงสตีฟเนส (stiffness) ของวัสดุใดๆวัสดุที่มีสตีฟเนสจะมีความสามรถในการต้านทานการโก่งได้ดี ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหาจากความลาดเอียง (slope) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวแสดงในเนื่องจากเส้นกราฟของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงการคำนวณหาค่าโมดูลัสของคอนกรีตจึงมีวิธการหาที่แตกต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้เป็นหลัก

โมดูลัสยืดหยุ่นชนิดต่างๆของคอนกรีต

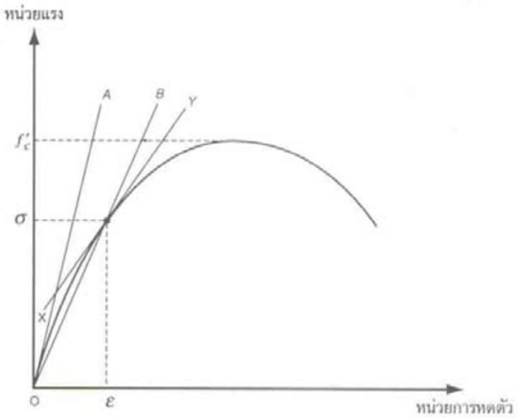
1. โมดูลัสที่จุดเริ่มต้น (initial modulus) หาได้จากความลาดเอียงของเส้นตรงที่สัมผัสกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัว ณ จุดเริ่มต้น



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

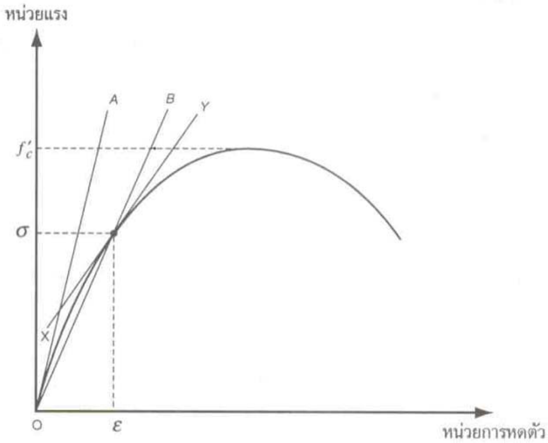
ซีแคนท์โมดูลัส

2. ซีแคนท์โมดูลัส (secant modulus) หาจากความลาดเอียงของเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด บนกราฟระหว่างหน่วย ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว



โมดูลัสสัมผัส

3. โมดูลัสสัมผัส (tangent modulus) หาได้จากความลาดเอียงของเส้นตรงที่สัมผัสจุดใดๆ บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัว



ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ใช้ในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตอัดแรง นิยมใช้ซีแคนท์โมดูลัส ในมาตรฐานของ ACI แนะนำให้ใช้ค่าซีแคนท์โมดูลัสที่ 45 เปอร์เซ็นต์ ของหน่วยแรงสูงสุดเป็นค่าสำหรับโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในการออกแบบทั่วไป ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับกำลังประลัยของคอนกรีต และมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท. ปี 2534 ได้กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่มีน้ำหนักระหว่าง 1.45 ถึง 2.48 ตัน/ม.³ ไว้ดังนี้

$$E_c = 4,270\, w^{1.5} \sqrt{f'_c} \qquad (2.4)$$

โดยที่ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, กก./ซม.²

w คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต, ตัน/ม.³

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน, กก./ซม.²

สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาทั่วไปสามารถใช้ $w = 2.323$ ตัน/ม.³ ดังนั้นสมการที่ 2.4 จึงสามารถเขียนใหม่เป็น

$$E_c = 15,200 \sqrt{f'_c} \qquad (2.5)$$

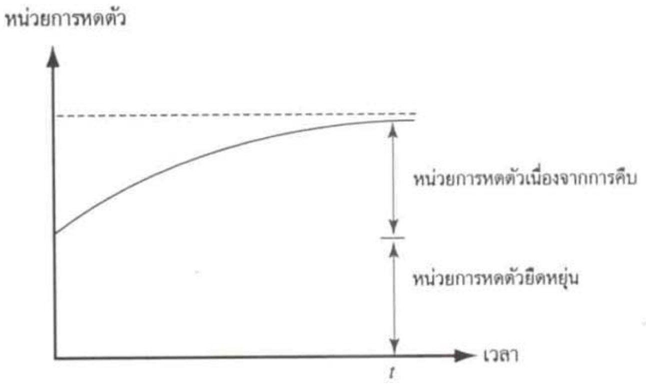
2.1.3 หน่วยการยืดตัวด้านข้าง (lateral strain)

เมื่อวัตถุได้รับแรงกระทำตามแนวแกน นอกจากเกิดหน่วยยืดหดตัวตามแนวแกนแล้วการยืดหดตัวด้านข้างก็เกิดขึ้นด้วย อัตราส่วนระหว่างการยืดหดตัวด้านข้างต่อหน่วยการยืดหดตัวตามแนวแกน เรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตมีค่าอยู่ช่วง 0.15-0.20 ซึ่งอาจใช้ค่า 0.17 เป็นค่าสำหรับอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตทั่วไป

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

2.1.4 การคืบ (creep)

การคืบเกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อคอนกรีตนั้นรับน้ำหนักบรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน หน่วยการหดตัวจะเพิ่มภายใต้น้ำหนักบรรทุก หน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบนี้เป็นค่าที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมนอกเหนือจากหน่วยการหดตัวเนืองจากแรงกระทำตามทฤษฎีอีลาสติก อัตราเพิ่มของหน่วยการหดตัวจะมากในช่วงเวลาเริ่มต้นและอัตราการเพิ่มค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น



การคำนวณหน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบ

$$c_c = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_i}$$

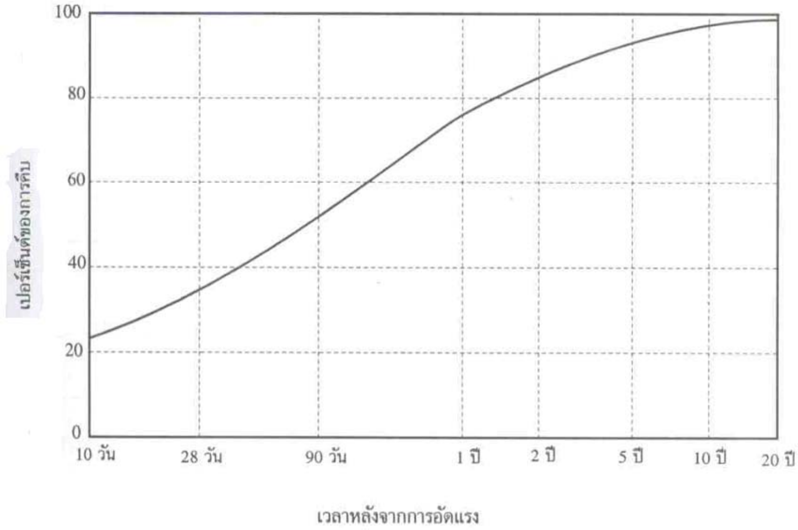
ε_t คือ หน่วยการหดตัวรวม มีค่าเท่ากับผลรวมของหน่วยการหดตัวยืดหยุ่นกับหน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบที่เวลานาน ๆ

ε_i คือ หน่วยการหดตัวยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นทันทีที่ให้แรงกระทำ

c_c คือ สัมประสิทธิ์การคืบ มีค่าค่อนข้างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการทดสอบและสภาพแวดล้อมขณะทดสอบ อาจใช้ค่า $c_c = 3$ ในการออกแบบสำหรับงานคอนกรีตอัดแรง ซึ่งค่อนข้างปลอดภัยได้

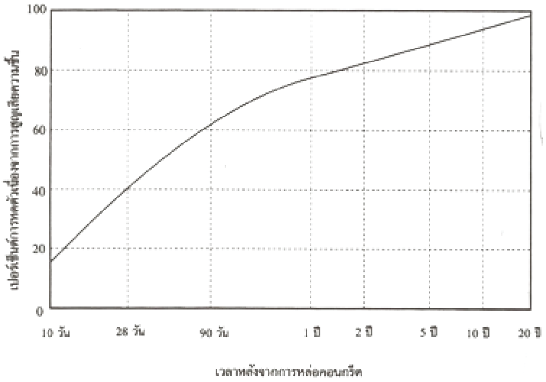
มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคืบกับเวลาหลังการอัดแรงให้แก่คอนกรีต



2.1.5 การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage)

หลังจากการหล่อคอนกรีต คอนกรีตจะมีการหดตัวโดยธรรมชาติการหดตัวในคอนกรีตนี้เป็นการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตการหดตัวขึ้นอยู่กับเวลาและสภาพความชื้นในอากาศแต่ไม่ขึ้นกับแรงกระทำต่อคอนกรีต การหดตัวอาจเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลยถ้าคอนกรีตนั้นเก็บไว้ในน้ำ หรืออยู่ภายใต้ความชื้นที่สูงมากอัตราการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตจะเกิดเร็วในช่วงแรกและอัตราการหดตัวค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป



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

2.2 เหล็กเสริมอัดแรง (prestressing steel)

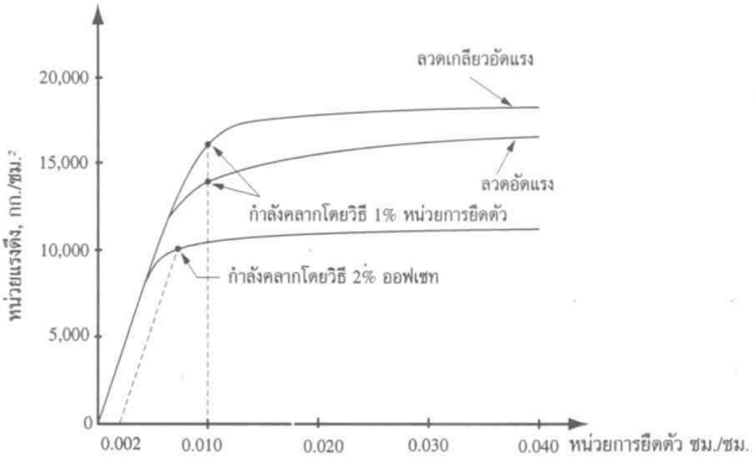
เหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตแรงต้องเป็นเหล็กที่มีกำลังสูง เนื่องจากการหดตัวจากการคืบและการหดตัวจาการสูญเสียความชื้น จะทำให้เหล็กเสริมอักแรงสูญเสียแรงอัดไป เหล็กเสริมแรงอัดที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด ลวดอัดแรง ลวดเกลียวอัดแรง และเหล็กเส้นอัดแรง ขนาดและรูปร่างของเหล็กเสริมอัดแรงชนิดต่างๆ

ขนาดและรูปร่างของเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้ทั่วไป

ชนิด	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง		รูปร่าง
	มม.	นิ้ว	
ลวดอัดแรงชนิดเรียบ (Plain round wire)	2.0~9.0	0.08~0.36	D
ลวดอัดแรงชนิดมีร่อง (Indented wire)	5.0~7.0	0.200~0.276	D
ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น (Seven-wire strand)	6.2~15.2	0.250~0.600	D
ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 19 เส้น (Nineteen-wire strand)	17.8~21.8	0.700~0.860	D
เหล็กเส้นอัดแรงชนิดกลม (Round bar)	9.2~32.0	0.362~1.260	D
เหล็กเส้นอัดแรงชนิดข้ออ้อย (Threaded bar)	23.0~32.0	0.906~1.260	D

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

การหาค่ากำลังประลัย (ultimate strength)



2.2.1 ลวดอัดแรง (prestressing)

ลวดอัดแรงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A421 ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติขั้นต่ำของลวดได้แก่ กำลังดึงประลัย กำลังคลาก และค่าการยืดตัวขณะขาด ในการออกแบบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรงอาจใช้ค่าคงที่เท่ากับ 2.04×10^6 กก/ซม.^{2} ลวดอัดแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ

1. ชนิดปลายยึดเป็นปม (type BA)

2. ชนิดปลายยึดเป็นลิ่ม (type WA)

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

คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.^{2}(นิ้ว^2)	กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ซม.^{2}(ปอนด์/นิ้ว^2)		กำลังคลากอย่างน้อยที่สุด (ที่ 1% หน่วยการยืดตัว) กก./ซม.^{2}(ปอนด์/นิ้ว^2)	
		ชนิดปลายยึดเป็นปม	ชนิดปลายยึดเป็นลิ่ม	ชนิดปลายยึดเป็นปม	ชนิดปลายยึดเป็นลิ่ม
4.88 (0.192)	18.70 (0.029)	-	17,580 (250,000)	-	14,060 (200,000)
4.98 (0.196)	19.48 (0.030)	16,870 (240,000)	17,580 (250,000)	13,500 (192,000)	14,060 (200,000)
6.35 (0.250)	31.67 (0.049)	16,870 (240,000)	16,870 (240,000)	13,500 (192,000)	13,500 (192,000)
7.01 (0.276)	38.59 (0.060)	-	16,520 (235,000)	-	13,220 (188,000)

คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.^{2}(นิ้ว^2)	กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ซม.^{2}(ปอนด์/นิ้ว^2)	กำลังคลากอย่างน้อยที่สุด (ที่ 1% หน่วยการยืดตัว) กก./ซม.^{2}(ปอนด์/นิ้ว^2)
4 (0.157)	12.57 (0.019)	17,500 (248,900)	15,000 (213,300)
5 (0.197)	19.64 (0.030)	17,500 (248,900)	15,000 (213,300)
7 (0.276)	38.48 (0.060)	16,000 (227,600)	13,500 (192,000)
9 (0.354)	63.62 (0.098)	14,500 (206,200)	12,500 (177,800)

2.2.2 ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand)

ลวดเกลียวอัดแรงผลิตโดยการนำลวดหลายๆเส้น มาพันเป็นเกลียว เช่นลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น และลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 19 เส้น การใช้ลวดเกลียวขนาดเล็กมาทำเป็นลวดอัดแรงทำให้การทำงานสะดวกมากขึ้น เพราะการดัดงอทำได้ดีกว่าลวดเส้นใหญ่ที่มีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากันและการควบคุมคุณภาพได้ดีกว่าด้วย

2.2.2 ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐานASTM A 416

เกรด	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.²(นิ้ว²)	แรงดึงที่จุดประลัย กก. (ปอนด์)	แรงดึงที่จุดคลาก(ที่ 1% หน่วยการยืดตัว) กก. (ปอนด์)
250	6.35 (1/4)	23.22 (0.036)	4,080 (9,000)	3,680 (8,100)
	7.94 (5/16)	37.42 (0.058)	6,580 (14,500)	5,930 (13,050)
	9.53 (3/8)	51.61 (0.080)	9,070 (20,000)	8,170 (18,000)
	11.11 (7/16)	69.68 (0.108)	12,240 (27,000)	11,020 (24,300)
	12.70 (1/2)	92.90 (0.144)	16,320 (36,000)	14,690 (32,400)
	15.24 (0.6)	139.35 (0.216)	24,490 (54,000)	22,050 (48,600)
270	9.53 (3/8)	54.84 (0.085)	10,430 (23,000)	9,390 (20,700)
	11.11 (7/16)	74.19 (0.115)	14,060 (31,000)	12,660 (27,900)
	12.70 (1/2)	98.71 (0.153)	18,730 (41,300)	16,850 (37,170)
	15.24 (0.6)	140.00 (0.217)	26,580 (58,600)	23,930 (52,740)

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

2.2.2 ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้นและมีการคลายแรงดึงต่ำ ตามมาตรฐาน มอก. 420-2534

เกรด	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม.^{2}(นิ้ว^2)	แรงดึงที่จุดประลัย กก. (ปอนด์)	แรงดึงที่จุดคลาก (ที่ 1% หน่วยการยืดตัว) กก. (ปอนด์)
1725	9.53 (3/8)	51.61 (0.080)	9,070 (20,000)	8,163 (17,999)
	12.70 (1/2)	92.90 (0.144)	16,320 (36,000)	14,688 (32,387)
	15.24 (0.6)	139.35 (0.216)	24,490 (54,000)	22,041 (48,600)
1860	9.53 (3/8)	54.84 (0.085)	10,430 (23,000)	9,387 (20,698)
	12.70 (1/2)	98.71 (0.153)	18,730 (41,300)	16,857 (37,170)
	15.24 (0.6)	140.00 (0.217)	26,580 (58,600)	23,922 (52,748)

2.2.3 เหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar)

เหล็กเส้นอัดแรง ผลิตขึ้นจากโลหะผสม ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ASTM A722 เหล็กเส้นอันแรงมีอยู่ 2 ชนิด เหล็กเส้นอัดแรงชนิดกลม (round bar) และเหล็กเส้นอัดแรงชนิดข้ออ้อย (threaded bar)ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้งานในการคำนวณออกแบบให้ใช้ค่าเท่ากับ 1.73x106 กก/ซม.2

2.3 เหล็กเสริมไม่อัดแรง (non-prestressed reinforcement)

ในคอนกรีตอัดแรงบางครั้งมีการเสริมเหล็กชนิดไม่อัดแรงซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน (mild steel) เหล็กเส้นไม่อัดแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ เหล็กกลม และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) เกรดของเหล็กซึ่งเป็นตัวบอกกำลังคลากของเหล็กมี SR24 SD30 SD40 และ SD50 โมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบให้ใช้เท่ากับ 2.40x106 กก./ซม.2

2.3 เหล็กเสริมไม่อัดแรง (non-prestressed reinforcement)

ชนิดของเหล็กเสริม	เกรด	กำลังคลาก กก./ซม.^{2}	กำลังดึงประลัย กก./ซม.^{2}
เหล็กกลม	SR 24 (มีขนาด ϕ 6, 9, 12, 19, 25 มม.)	2,400	3,900
เหล็กข้ออ้อย	SD 30 (มีขนาด ϕ 12, 16, 20, 25, 28 มม.)	3,000	4,900
	SD 40 (มีขนาด ϕ 12, 16, 20, 25, 28, 36 มม.)	4,000	5,700
	SD 50 (มีเฉพาะขนาด ϕ 32 มม.)	5,000	6,300

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