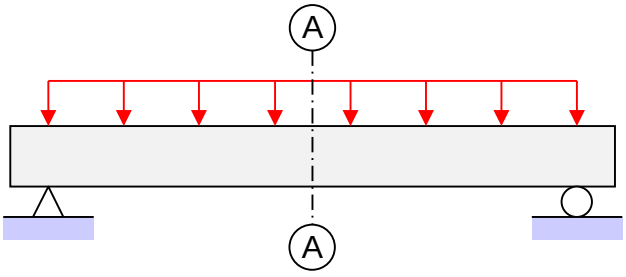
# 1

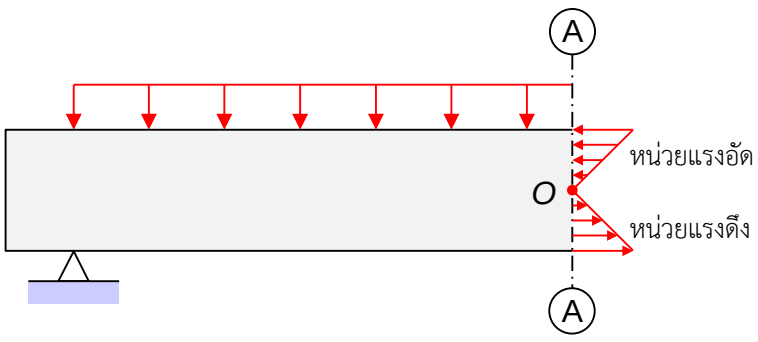
# คอนกรีตเสริมเหล็ก

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุก่อสร้างมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในทุกประเทศ เหล็กเส้นและส่วนประกอบคอนกรีต (หิน,ทราย,น้ำ และ ปูน) เป็นวัสดุที่มีใช้ได้อย่างเพียงพอ การออกแบบโครงสร้างประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือ (1) พิจารณาแรงต่างๆที่มากระทำต่อโครงสร้างโดยใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสม และ (2) ออกแบบองค์อาคารทั้งหมดโดยคำนึงถึงเสถียรภาพ ความปลอดภัย ความสามารถในการใช้งาน และความประหยัดของโครงสร้าง

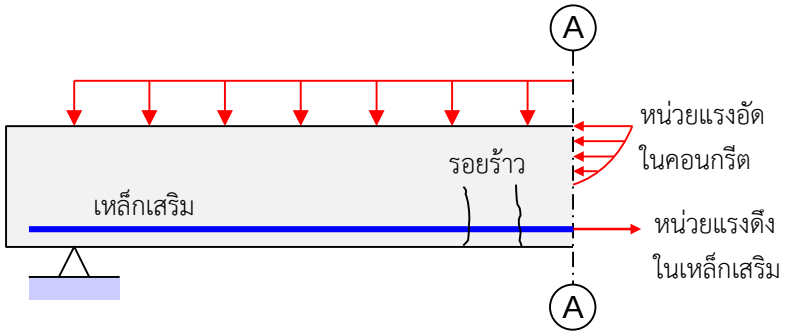
กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังคือ *คอนกรีตรับแรงอัดและเหล็กเสริมรับแรงดึง* ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมีความแข็งแรงในการรับแรงอัดได้ดี แต่มีความอ่อนแอในการรับแรงดึง ดังนั้นเมื่อรับน้ำหนักจะเกิดการแตกร้าว จากการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงดึงเกินกว่าที่คอนกรีตจะรับได้ ในคานคอนกรีตที่แสดงในรูป 1.1(ข) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจะถูกต้านทานโดยคู่ควบแรงอัด-แรงดึงในคอนกรีต คานดังกล่าวจะวิบัติอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดรอยร้าวครั้งแรก




(ก) คานคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุก




(ข) หน่วยแรงในคานคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุก




(ค) หน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก

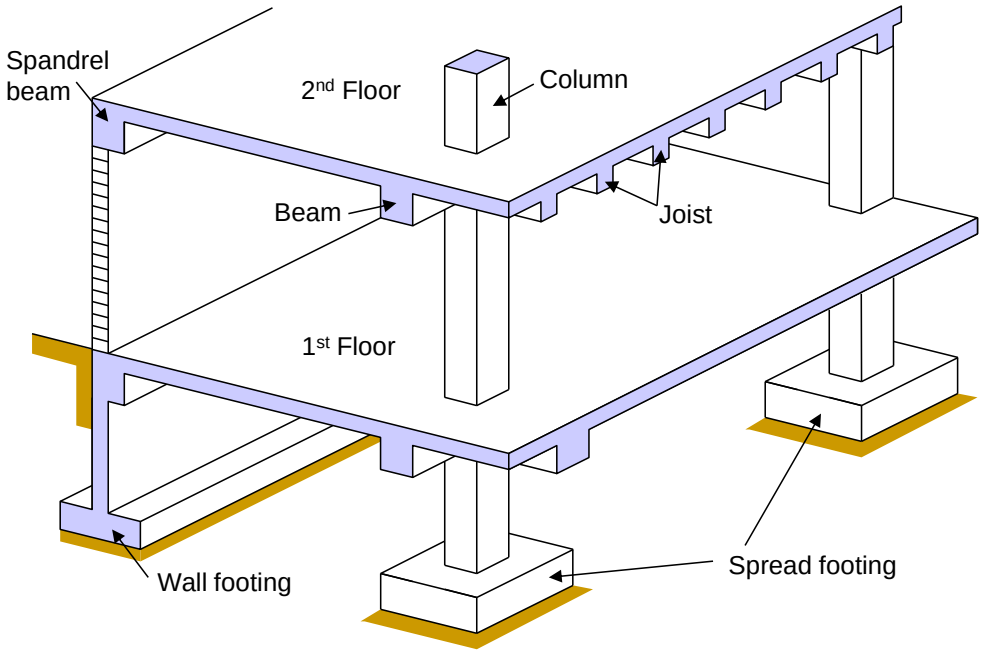
**รูปที่ 1.1** คานคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(รูปที่ 1.1ค) เหล็กเส้นจะถูกเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อรับแรงดึงทำหน้าที่แทนคอนกรีตหลังเกิดการแตกร้าว เพื่อทำหน้าที่เป็นแรงคู่ควบร่วมกับแรงอัดในคอนกรีตในการต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก

เหล็กและคอนกรีตทำงานร่วมกันอย่างดีเนื่องมาจากเหตุผลหลายประการคือ (1) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตมีเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเลื่อนไถลของเหล็กเสริม (2) ส่วนผสมคอนกรีตที่พอเหมาะจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านมาทำให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมและ (3) อัตราการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้กันของเหล็กและคอนกรีตทำให้เกิดแรงน้อยมากระหว่างคอนกรีตและเหล็กภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

## องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วย “องค์อาคาร” หลายส่วนทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำต่อโครงสร้าง

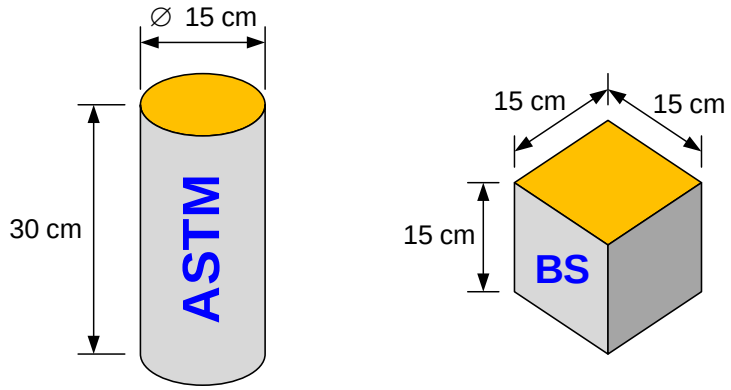



**รูปที่ 1.2** องค์ประกอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชั้นที่สองของอาคารในรูปที่ 1.2 เป็นพื้นคอนกรีตระบบตงประกอบด้วยคานซอยขนานกันเพื่อรองรับพื้นด้านบน โดยมีคานหลักรองรับแรงปฏิกิริยาจากคานซอยเพื่อถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่เสา ชั้นแรกของอาคารในรูปที่ 1.2 เป็นระบบพื้นคานซึ่งมีพื้นพาดอยู่ระหว่างคานซึ่งรองรับโดยเสาที่ปลายคาน น้ำหนักบรรทุกในเสาสะสมลงมายังฐานรากซึ่งทำหน้าที่กระจายน้ำหนักบรรทุกลงสู่พื้นดิน

## กำลังอัดคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตเป็นข้อมูลสำคัญที่จะต้องมีระบุไว้ในแบบก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปจะระบุไว้ในข้อกำหนดในแบบหน้าแรกซึ่งเป็นค่าที่ผู้ออกแบบใช้ในการคำนวณออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก กำลังอัดคอนกรีตจะใช้สัญลักษณ์ $f_c'$ คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ก้อนตัวอย่างทดสอบที่ใช้มีสองแบบคือ แท่งทรงกระบอก (Cylinder) และก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cube)




**รูปที่ 1.3** ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทดสอบแรงอัดแบบทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

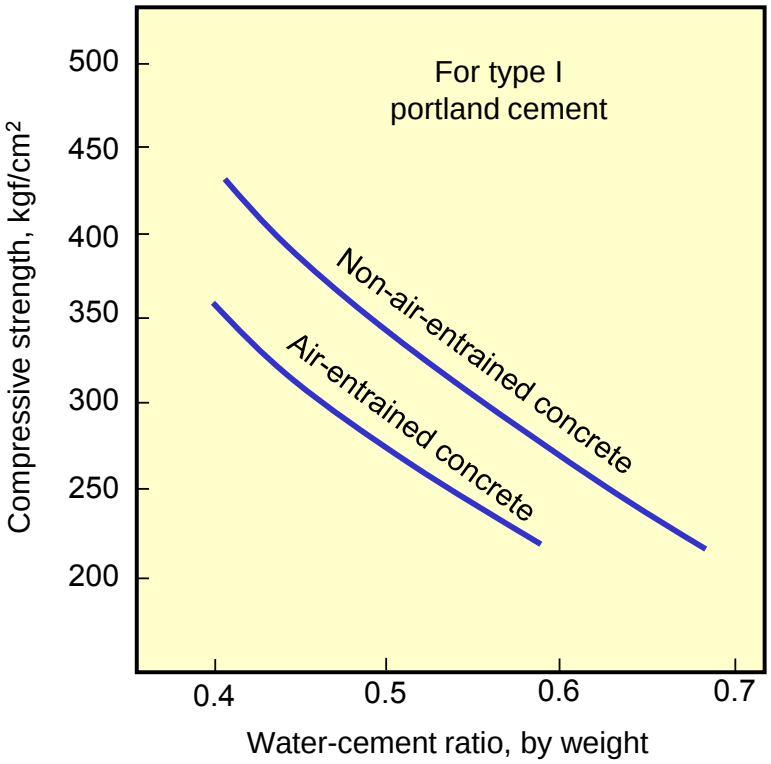
ก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดด้านละ 15 ซม. ตามมาตรฐาน BS 1881 มักใช้ในประเทศแถบเอเชีย, รัสเซีย และยุโรป ในขณะที่แท่งทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ยาว 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C192 จะใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย โดยเฉลี่ยแล้วกำลังของทรงกระบอก ∅15×30 ซ.ม. จะประมาณ 85% ของลูกบาศก์ 15×15×15 ซ.ม.

กำลังคอนกรีตนั้นขึ้นกับหลายปัจจัยตั้งแต่คุณภาพของวัสดุที่นำมาผสมได้แก่ ซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่มอื่นๆ สัดส่วนและวิธีการผสม การลำเลียงขนส่ง การเทลงแบบ จนถึงการบ่มคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อกำลังคอนกรีต ปริมาณน้ำที่จำเป็นสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับซีเมนต์คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 (โดยน้ำหนัก) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.35 หรือสูงกว่าจะช่วยให้คอนกรีตมีความข้นเหลวเพียงพอที่จะ

เทลงแบบได้โดยไม่ต้องใช้สารผสมเพิ่ม แต่ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังคอนกรีตตกลงดังแสดงในรูปที่ 1.4

การใช้เครื่องผสมคอนกรีตและเวลาในการผสมที่เหมาะสมจะให้ผลดีต่อกำลังคอนกรีต หลังเทคอนกรีตแล้วใช้เครื่องสั่นหรือหัวจี้จะทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นหรือช่องว่างน้อยลง อัตราส่วนช่องว่างถ้ามีมากถึง 5% อาจทำให้กำลังคอนกรีตลดลงถึง 30%



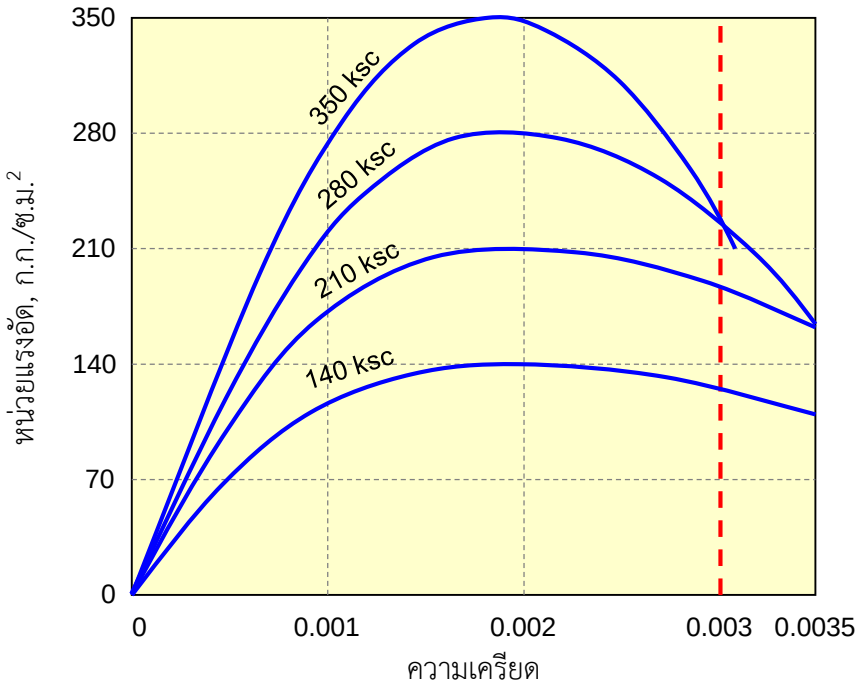

**รูปที่ 1.4** ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัดและกำลังดึงคอนกรีต

สภาพการบ่มก็ส่งผลกระทบสำคัญต่อกำลังเช่นกัน ทั้งความชื้นและอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อไฮเดรชั่นของซีเมนต์ กำลังคอนกรีตจะพัฒนาขึ้นตามอายุของการบ่ม โดยกำลังที่ใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณออกแบบคือกำลังที่อายุ 28 วัน

**ตารางที่ 1.1** อัตรากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุการบ่ม

| อายุ | 7 วัน | 14 วัน | 28 วัน | 3 เดือน | 6 เดือน | 1 ปี | 2 ปี | 5 ปี |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตรากำลัง | 0.67 | 0.86 | 1.0 | 1.17 | 1.23 | 1.27 | 1.31 | 1.35 |

เมื่อนำทรงกระบอกที่อายุ 28 วันมาทดสอบกำลังอัดแล้วบันทึกค่าหน่วยแรงอัดและความเครียด(Stress-strain curve) จะได้ดังรูปที่ 1.5 โดยในช่วงต้นจะค่อนข้างตรงเป็นแบบอิลาสติก หน่วยแรงอัดจะขึ้นถึงค่า $f_c'$ คือค่าหน่วยแรงอัดที่มากที่สุดที่ความเครียดประมาณ 0.002 แล้วตกลงจนแตกหักที่ความเครียดประลัย (Ultimate strain, $\varepsilon_{cu}$) ประมาณ 0.003 คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้นจะมีความยืดหยุ่นน้อยลงคือความเครียดประลัยมีค่าน้อยลง




**รูปที่ 1.5** ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดในคอนกรีต

สำหรับประเทศไทย เนื่องจากวิธีการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กยึดตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาคือ ACI-318 ดังนั้นกำลังอัด $f_c'$ ที่ใช้จึงควรเป็นแบบทรงกระบอกซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าแบบลูกบาศก์ที่บริษัทผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จระบุ ตามมาตรฐานคอนกรีตผสมเสร็จ มอก. 213-2552 ได้กำหนดชั้นคุณภาพของคอนกรีตไว้ดังนี้

**ตารางที่ 1.1** ชั้นคุณภาพของคอนกรีต

| ชั้นคุณภาพ | กำลังต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน (MPa) ไม่น้อยกว่า | |
|---|---|---|
| | แท่งทรงกระบอก<br>∅ ขนาด 150mm × 300mm | แท่งทรงลูกบาศก์<br>ขนาด 150mm × 150mm |
| C17/21 | 17.0 | 21.0 |
| C19.5/24 | 19.5 | 24.0 |
| C23/28 | 23.0 | 28.0 |
| C25/30 | 25.0 | 30.0 |
| C27/32 | 27.0 | 32.0 |
| C30/35 | 30.0 | 35.0 |
| C33/38 | 33.0 | 38.0 |

**ตารางที่ 1.2** ชั้นคุณภาพของคอนกรีตตามท้องตลาดในหน่วยเมตริก

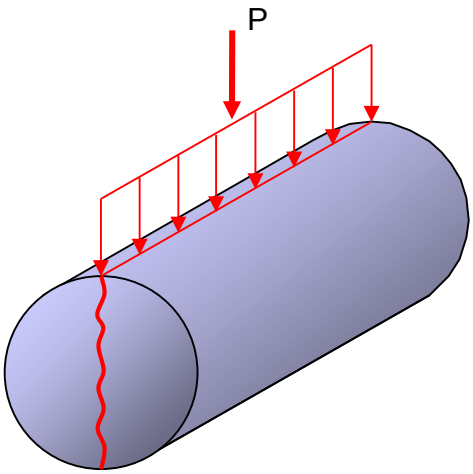
| ชั้นคุณภาพ | กำลังต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน (กก./ตรซม., ksc) | |
|---|---|---|
| | แท่งทรงกระบอก ∅ ขนาด 150mm × 300mm | แท่งทรงลูกบาศก์ ขนาด 150mm × 150mm |
| 210CU | 180 | 210 |
| 240CU | 210 | 240 |
| 280CU | 240 | 280 |
| 300CU | 250 | 300 |
| 320CU | 280 | 320 |

## กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตในการรับแรงดึงมีผลอย่างมากต่อการแตกร้าวในโครงสร้าง กำลังรับแรงดึงโดยปกติจะได้จากการทดสอบ Splitting tensile strength ของทรงกระบอก ∅15×30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C496 โดยวางชิ้นทดสอบลงด้านข้างในเครื่องทดสอบดังในรูปที่ 1.6 ใช้แท่งเหล็กหนารองเพื่อให้แรงกด P กดแผ่กระจายเท่าๆกัน ตลอดความยาวของทรงกระบอก ทรงกระบอกจะแตกออกเป็นสองส่วนเมื่อถึงกำลังรับแรงดึง หน่วยแรงดึงจะมีค่าเท่ากับ

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi DL} \qquad (1.1)$$

เมื่อ P คือน้ำหนักบรรทุกสูงสุด D คือเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก และ L คือความยาวทรงกระบอก




**รูปที่ 1.6** การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบ Splitting tensile strength

กำลังรับแรงดึงเป็นคุณสมบัติที่แปรเปลี่ยนได้ง่ายกว่ากำลังรับแรงอัดและมีค่าประมาณ 10 ถึง 15% ของกำลังรับแรงอัด และพบว่า Splitting tensile strength ของทรงกระบอก $f_{ct}$ เป็นสัดส่วนกับ $\sqrt{f'_c}$ โดยมาตรฐาน ACI ได้ใช้ $f_{ct} = 1.76\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.$^2$ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา และ $f_{ct} = 1.51\sqrt{f'_c}$ สำหรับ Sand-light weight และ $f_{ct} = 1.33\sqrt{f'_c}$ สำหรับ All-light weight คอนกรีต

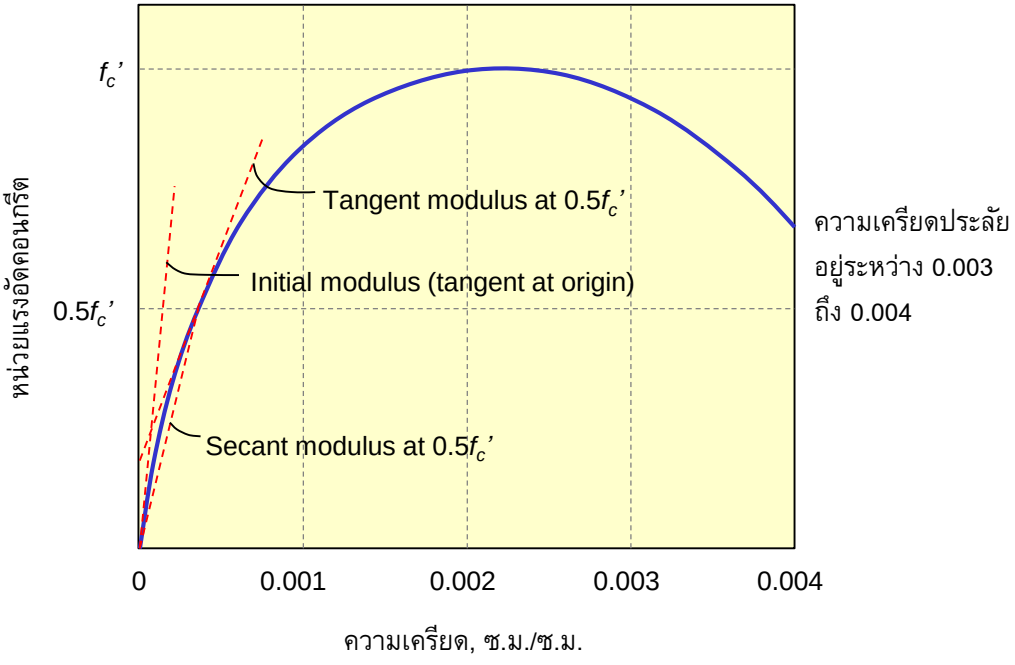
กำลังรับแรงดึงอีกประเภทหนึ่งจะหาจากการดัดคานเรียกว่า โมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture) ตามมาตรฐานของ ASTM C78 จะใช้ในการพิจารณาการแตกร้าวและการแอ่นตัวของคาน โมดูลัสของการแตกหัก $f_r$ คำนวณได้จากสูตรการดัด $f = Mc/I$ จะให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าการทดสอบ Splitting tensile เนื่องจากหน่วยแรงอัดกระจายตัวไม่เป็นเส้นตรงขณะเกิดการวิบัติ ACI กำหนดให้ใช้ค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} \ (\text{kg/cm}^2) \qquad (1.2)$$

จะเห็นว่าทั้งการทดสอบ Splitting tensile strength และโมดูลัสแตกหักไม่ได้วัดกำลังรับแรงดึงโดยตรงเนื่องจากมีความยุ่งยากในการวัดและไม่มีความเชื่อมโยงกับการแตกร้าวจากหน่วยแรงดึงที่มักเกิดขึ้นเช่น การแตกร้าวจากการดัดในคาน การแตกร้าวในแนวทแยงจากแรงเฉือนและแรงบิด และการแตกตัวจากแรงกระทำระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตโดยรอบ

## โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

โมดูลัสความยืดหยุ่นเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตหาได้จากการทดสอบการอัดทรงกระบอกคอนกรีต




**รูปที่ 1.7** ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและการยืดหดของคอนกรีตภายใต้แรงอัด

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น $E_c$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงต่อความเครียดในช่วงอิลาสติก

$$E_c = \frac{\text{unit stress}}{\text{unit strain}} \qquad (1.3)$$

โมดูลัสความยืดหยุ่นจะใช้วัดสติฟเนสหรือความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปทรง รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและการยืดหดสำหรับคอนกรีตภายใต้แรงอัดซึ่งแสดงถึงโมดูลัสเริ่มต้น (Initial modulus) โมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus) และซีแคนท์โมดูลัส (Secant modulus) โดยปกติซีแคนท์โมดูลัสจะประมาณ 25% ถึง 50% ของกำลังรับแรงอัดประลัย ในปัจจุบัน ACI แนะนำให้ใช้โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ

$$E_c = 4{,}270\, w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \qquad (1.4)$$

สำหรับค่าของ $w_c$ ระหว่าง 1.45 และ 2.48 ตัน/ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติหน่วยน้ำหนัก 2.32 ตัน/ลบ.ม. ACI แนะนำให้ใช้

$$E_c = 15{,}100\sqrt{f'_c} \qquad (1.5)$$

## อัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio)

อัตราส่วนปัวส์ซอง $\mu$ เป็นอัตราส่วนความเครียดทางขวางต่อความเครียดทางยาวภายใต้หน่วยแรงตามแนวแกนภายในช่วงอิลาสติก อัตราส่วนนี้จะอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.20 สำหรับทั้งคอนกรีตน้ำหนักปกติและคอนกรีตมวลเบา อัตราส่วนปัวส์ซองใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นพื้นไร้คาน, อุโมงค์, ถังน้ำ, เขื่อนโค้ง และโครงสร้างอินดีเทอร์มิเนต สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก อัตราส่วนปัวส์ซองจะเท่ากับ 0.25 สำหรับคอนกรีตอาจใช้ค่าเฉลี่ยคือ 0.18

## โมดูลัสการเฉือน (Shear Modulus)

โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตต่อการรับแรงเฉือนจะอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นรับแรงอัด ตามทฤษฎีความยืดหยุ่นโมดูลัสการเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu)} \qquad (1.6)$$

เมื่อ $\mu$ = อัตราส่วนปัวส์ซองของคอนกรีต ถ้าใช้ $\mu$ = 1/6 จะได้ $G_c = 0.43E_c = 6{,}493\sqrt{f'_c}$

## อัตราส่วนโมดูล่าร์ (Modular Ratio)

อัตราส่วนโมดูล่าร์ n เป็นอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต $n = E_s/E_c$ ค่า $E_s = 2.04\times10^6$ ก.ก./ซ.ม.$^2$ ส่วน $E_c = 15{,}100\sqrt{f'_c}$ ดังนั้นค่า n จะเท่ากับ

$$n = \frac{2.04\times10^{6}}{15{,}100\sqrt{f'_c}} = \frac{135}{\sqrt{f'_c}} \qquad (1.7)$$

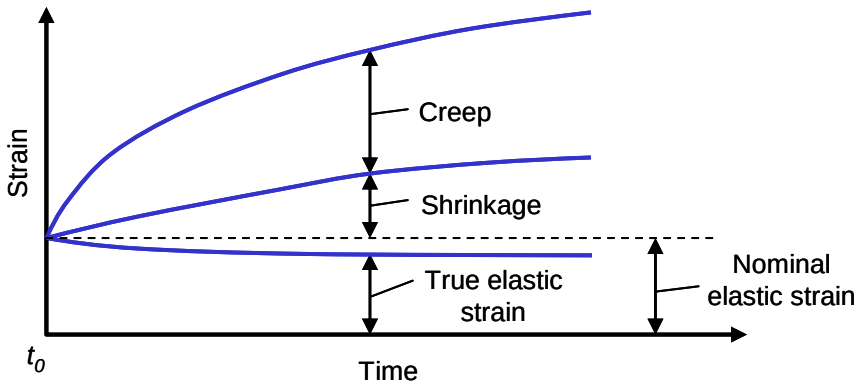
อัตราส่วนโมดูล่าร์จะใช้ในการออกแบบวิธีหน่วยแรงใช้งาน และการคำนวณระยะแอ่นตัวของคาน

## ความคืบและการหดตัวของคอนกรีต (Creep and Shrinkage)

ความคืบและการหดตัวเป็นการเปลี่ยนรูปร่างที่ขึ้นกับเวลาซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตได้ จึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณา ปกติแล้วคอนกรีตมีพฤติกรรมอิลาสติกภายใต้น้ำหนักกระทำระยะสั้นเท่านั้น และจะมีการเปลี่ยนรูปร่างเพิ่มเติมเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุอิลาสติก การโก่งแอ่นหลังจากได้รับน้ำหนักเป็นระยะเวลานานนั้นเป็นเรื่องยากที่จะคาดคะเน แต่การควบคุมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรองรับการใช้งานในช่วงอายุของโครงสร้าง

### ความคืบ (Creep)

ความคืบเป็นคุณสมบัติของคอนกรีต(และวัสดุอื่น) ในการเปลี่ยนรูปร่างไปตามเวลาภายใต้น้ำหนักคงค้างที่หน่วยแรงในช่วงอิลาสติก (เช่นต่ำกว่า $0.5f'_c$ ) การเปลี่ยนรูปร่างแบบอินอิลาสติกนี้จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลงในช่วงเวลาที่รับน้ำหนักโดยขนาดทั้งหมดอาจจะเป็นหลายเท่าของการโก่งแอ่นอิลาสติกในช่วงเวลาสั้น บ่อยครั้งที่ความคืบเกิดขึ้นร่วมกับการหดตัว เนื่องจากทั้งคู่เกิดขึ้นพร้อมกันและบ่อยครั้งที่ให้ผลสุดท้ายเหมือนกัน นั่นคือการเพิ่มของการโก่งแอ่นตามเวลา ดังจะได้สังเกตจากรูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างการเปลี่ยนรูปร่างกับเวลา ความเครียดจริงลดลงเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่น $E_c$ เป็นฟังก์ชั่นของกำลังคอนกรีต $f'_c$ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามเวลา



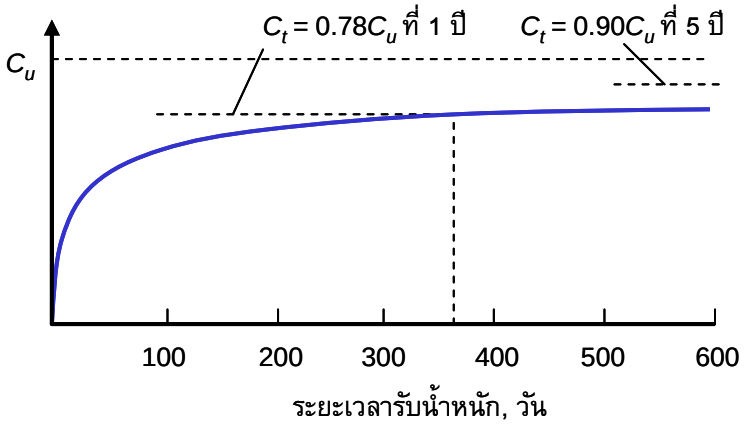

**รูปที่ 1.8** การเปลี่ยนแปลงของหน่วยการยืดหด $t_0$ เป็นเวลาที่น้ำหนักเริ่มกระทำ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของความความคืบคือ (1) ส่วนผสมเช่นองค์ประกอบและความละเอียดของผงซีเมนต์ สารผสมเพิ่ม ขนาด ขนาดคละและปริมาณแร่ธาตุของมวลรวม (2) อัตราส่วนเช่นปริมาณน้ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (3) อุณหภูมิและความชื้นในการบ่ม (4) ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างใช้งาน (5) อายุที่รับน้ำหนัก (6) ช่วงเวลารับน้ำหนัก (7) ขนาดของหน่วยแรง (8) อัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรของชิ้นส่วน และ (9) การยุบตัว (slump)

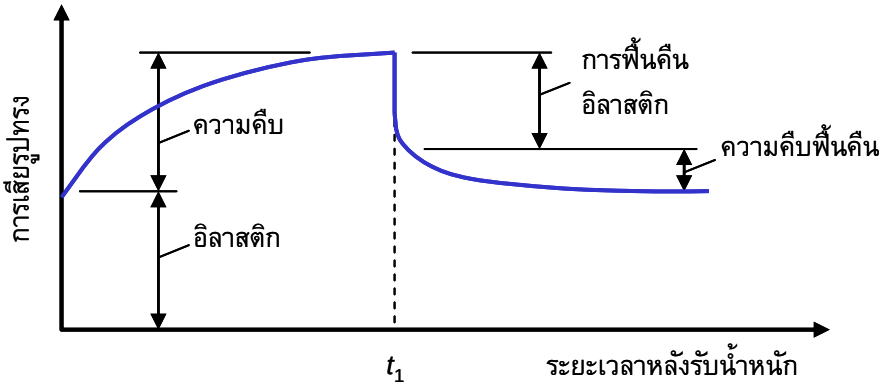
การพยากรณ์ความคืบอย่างแม่นยำเป็นเรื่องซับซ้อนเพราะมีหลายตัวแปรร่วมด้วย อย่างไรก็ตามกระบวนการพยากรณ์โดย Branson ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความคืบมาตรฐาน (การยุบตัว 4” หรือน้อยกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ 40% บ่มด้วยความชื้นและอายุรับน้ำหนัก 7 วัน)

$$C_t = \frac{\text{creep strain}}{\text{initial elastic strain}} = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} C_u \qquad (1.8)$$

ดังแสดงในรูป 1.9 เมื่อ t คือระยะเวลารับน้ำหนัก(วัน) และ $C_u$ คือสัมประสิทธิ์ความคืบประลัย (Branson แนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยของ 2.35 สำหรับสภาวะมาตรฐาน แต่ช่วงที่แสดงจะอยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 4.15) แฟกเตอร์ปรับแก้จะใช้สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ อายุรับน้ำหนัก ความบางสุดของส่วนโครงสร้าง การยุบตัว เปอร์เซ็นต์ความละเอียด และปริมาณอากาศ สำหรับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน แฟกเตอร์ที่สำคัญ คือ ความชื้น และอายุรับน้ำหนัก ผลของการเอาน้ำหนักออก จะเห็นได้ในรูปที่ 1.8 เมื่อเวลา $t_1$ น้ำหนักถูกเอาออก จะมีการฟื้นคืนแบบอีลาสติกทันที และการฟื้นคืนของความคืบในระยะยาวแต่ยังมีการเปลี่ยนรูปร่างคงเหลืออยู่




**รูปที่ 1.9** สัมประสิทธิ์ความคืบมาตรฐาน




**รูปที่ 1.10** ความคืบและการฟื้นคืน

**การหดตัว(Shrinkage):**

การหดตัวถูกนิยามอย่างกว้างๆว่าเป็นการเปลี่ยนปริมาตรที่ไม่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก คอนกรีตที่บ่มอยู่ในน้ำตลอดเวลาอาจจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปจะคำนึงถึงการลดลงของปริมาตร พบว่าปัจจัยเดียวกันที่มีผลต่อการหดตัวและความคืบคือการสูญเสียความชื้น

วิธีการพยากรณ์โดยทั่วไปของ Branson สำหรับ (การยุบตัว 4” หรือมากกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ 40% และความหนาน้อยสุด 15 ซม. หรือน้อยกว่า หลังจาก 7 วันของการบ่มด้วยความชื้น)

$$\varepsilon_{sh} = \left(\frac{t}{35+t}\right) \varepsilon_{sh\ n} \qquad (1.9)$$

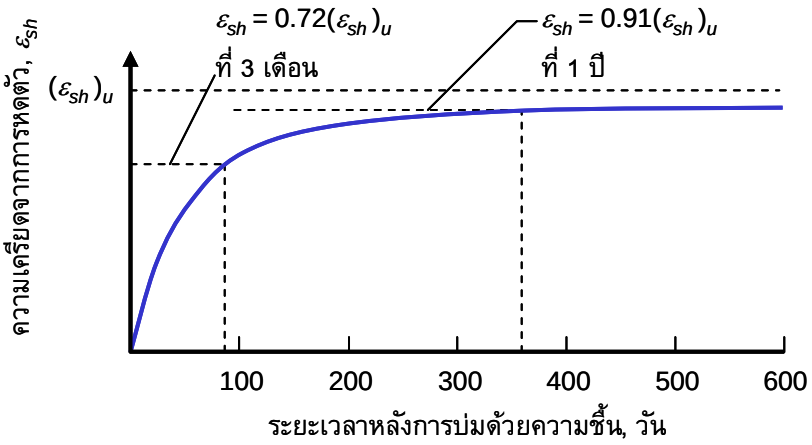
ดังแสดงในรูปที่ 1.11 เมื่อ t คือเวลา (วัน) หลังจากการบ่มด้วยความชื้น และ $(\varepsilon_{sh})_n$ เป็นความเครียดจากการหดตัว (Branson แนะนำให้ใช้ $800\times10^{-6}$ สำหรับสภาวะเฉลี่ยแต่ค่าจริงจะเริ่มจาก $415\times10^{-6}$ ถึงมากกว่า $1{,}000\times10^{-6}$)

ค่าปรับแก้จะขึ้นกับความชื้น H ดังนี้:

ค่าปรับแก้ = 1.40 - 0.01H สำหรับ $40\% \le H \le 80\%$

ค่าปรับแก้ = 3.00 - 0.03H สำหรับ $80\% \le H \le 100\%$

การหดตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อถูกยึดรั้งโดยการเสริมเหล็กทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างเพิ่มจากความคืบ สำหรับการใช้งานอย่างถูกต้องจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพยากรณ์หรือชดเชยการหดตัวในโครงสร้าง




**รูปที่ 1.11** การหดตัวหลังจากการบ่มด้วยความชื้น

## คอนกรีตกำลังสูง

คอนกรีตกำลังสูงโดยนิยามของ ACI จะรวมถึงคอนกรีตที่มีกำลังอัดแบบทรงกระบอกเกิน 420 ก.ก./ซม.$^2$ ซึ่งการกำหนดส่วนผสมจะวิกฤติกว่าของคอนกรีตปกติ ขั้นตอนส่วนใหญ่จะเหมือนกันยกเว้นการปรับปรุงโดยใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อให้สอดคล้องกับการปรับปริมาณซีเมนต์ และวัสดุมวลรวมที่ใช้มักมีขนาดเล็กกว่า

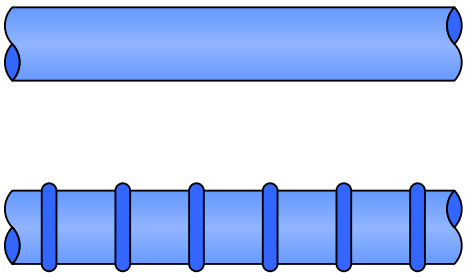
สารผสมเพิ่มแบบปรับปรุงกำลังที่ใช้มีหลายชนิดได้แก่ สารลดน้ำ (Superplasticizers) สารโพลิเมอร์ และแร่ปอซโซลานิคเช่น เถ้าลอย (Fly ash) กากเตาถลุงโลหะ (Blast-furnace slag) และผงซิลิก้า อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังสูงมาก วัสดุซึ่งแยกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ W/(C + P) จากส่วนของวัสดุมวลรวมอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่น้อยมาก จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในการถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม วิธีการที่ ACI ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะใช้ได้ดีสำหรับกำลังถึง 850 กก./ซม.$^2$ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจะต้องให้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการทั้งในขณะเหลวและแข็งตัว ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการคือ

$$f'_{cr} = \frac{f'_c + 280}{0.90} \qquad (1.10)$$

ในการผสมคอนกรีตกำลังสูงนั้น จำเป็นต้องให้ความสนใจในการเลือกและควบคุมส่วนผสมเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและมีกำลังมากที่สุด ดังนั้นการเลือกชนิดของซีเมนต์ สารผสมเพิ่ม ขั้นตอนการผสม คุณภาพและขนาดของวัสดุมวลรวมจึงมีความสำคัญมาก

## เหล็กเสริมคอนกรีต

เหล็กเส้น (Rebar) เสริมคอนกรีตในบริเวณที่รับแรงดึงหรือต้านทานการแตกร้าวในคอนกรีต แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (Round Bar, RB) และ เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar, DB)




**รูปที่ 1.12** เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

**เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (Round Bar, RB)** ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2543 กำหนดไว้เพียงชั้นคุณภาพเดียว โดยใช้สัญลักษณ์ SR 24 มีคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงคือ

- ความต้านแรงดึง (สูงสุด) $F_u$ ต้องไม่น้อยกว่า 385 MPa (3,900 ksc)
- ความต้านแรงดึงที่จุดคราก $F_y$ ต้องไม่น้อยกว่า 235 MPa (2,400 ksc)
- ความยืด ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 21

**ตารางที่ 1.3** ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นกลม

| ชื่อขนาด | ขนาดระบุ | | มวลระบุ กิโลกรัมต่อเมตร |
|---|---|---|---|
| | เส้นผ่าศูนย์กลาง มิลลิเมตร | พื้นที่ภาคตัดขวาง ตารางมิลลิเมตร | |
| RB 6 | 6 | 28.3 | 0.222 |
| RB 9 | 9 | 50.3 | 0.395 |

**เหล็กเส้นข้ออ้อย** (Deformed Bar, DB) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 27-2548 กำหนดไว้ 3 ชั้นคุณภาพคือ SD 30, SD 40 และ SD 50

**ตารางที่ 1.4** คุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย

| ชั้นคุณภาพ | ความต้านแรงดึง MPa (ksc) | ความต้านแรงดึงที่จุดคราก MPa (ksc) | ความยืด % |
|---|---|---|---|
| SD 30 | 480 (4,900) | 295 (3,000) | 17 |
| SD 40 | 560 (5,700) | 390 (4,000) | 15 |
| SD 50 | 620 (6,300) | 490 (5,000) | 13 |

**ตารางที่ 1.5** ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นข้ออ้อย

| ชื่อขนาด | ขนาดระบุ | | มวลระบุ กิโลกรัมต่อเมตร |
|---|---|---|---|
| | เส้นผ่าศูนย์กลาง มิลลิเมตร | พื้นที่ภาคตัดขวาง ตารางมิลลิเมตร | |
| DB 10 | 10 | 78.5 | 0.616 |
| DB 12 | 12 | 113.1 | 0.888 |
| DB 16 | 16 | 201.1 | 1.578 |
| DB 20 | 20 | 314.2 | 2.466 |
| DB 22 | 22 | 380.1 | 2.984 |
| DB 25 | 25 | 490.9 | 3.853 |
| DB 28 | 28 | 615.8 | 4.834 |
| DB 32 | 32 | 804.2 | 6.313 |
| DB 36 | 36 | 1,017.9 | 7.990 |
| DB 40 | 40 | 1,256.6 | 9.865 |

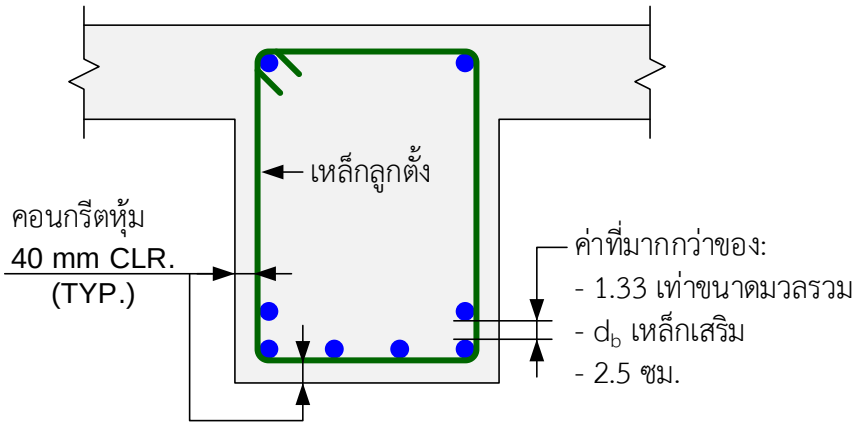
**ขนาดเหล็กเส้นตามมาตรฐานอเมริกัน (U.S. Imperial sizes)** จะแสดงเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นจำนวนเท่าของ 1/8 นิ้ว (หุน) เช่น #8 = 8/8 = 1 นิ้ว (8 หุน) และ พื้นที่ = (ขนาดเส้น/9)$^2$ เช่น พื้นที่ของเหล็ก #8 = (8/9)$^2$ = 0.79 นิ้ว$^2$ สูตรนี้ใช้ได้กับเหล็กขนาดไม่เกิน #8 เหล็กเบอร์สูงกว่าจะมีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณตามสูตร 1/8 นิ้ว

**ตารางที่ 1.6** ขนาดเหล็กเส้นตามมาตรฐานอเมริกัน

| Imperial Bar Size | "Soft" Metric Size | Weight | | Diameter | | Area | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (lb/ft) | (kg/m) | (in) | (mm) | (in$^2$) | (mm$^2$) |
| #3 | #10 | 0.376 | 0.561 | 3/8 | 9.525 | 0.11 | 71 |
| #4 | #13 | 0.668 | 0.996 | 4/8 | 12.7 | 0.20 | 129 |
| #5 | #16 | 1.043 | 1.556 | 5/8 | 15.875 | 0.31 | 200 |
| #6 | #19 | 1.502 | 2.24 | 6/8 | 19.05 | 0.44 | 284 |
| #7 | #22 | 2.044 | 3.049 | 7/8 | 22.225 | 0.60 | 387 |
| #8 | #25 | 2.670 | 3.982 | 8/8 | 25.4 | 0.79 | 509 |
| #9 | #29 | 3.400 | 5.071 | 1.128 | 28.65 | 1.00 | 645 |
| #10 | #32 | 4.303 | 6.418 | 1.270 | 32.26 | 1.27 | 819 |
| #11 | #36 | 5.313 | 7.924 | 1.410 | 35.81 | 1.56 | 1006 |

## ระยะหุ้มคอนกรีตและระยะห่างเหล็กเสริม

ระยะหุ้มคอนกรีตหรือระยะช่องว่างระหว่างผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต, เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในเหล็กเสริม, เพื่อป้องกันการเสียกำลังของเหล็กระหว่างเกิดไฟไหม้ และบางครั้งเราเพิ่มระยะหุ้มด้านบนของพื้นคอนกรีตในลานจอดรถและโรงงาน เพื่อชดเชยการสึกหรอจากการเสียดสี ACI กำหนดระยะหุ้มคอนกรีตดังในตารางที่ 1.7




**รูปที่ 1.13** ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริม

สำหรับระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมนั้น ACI กำหนดให้ระยะช่องว่างน้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริมเท่ากับค่าที่มากกว่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริม $d_b$, 2.5 ซม. และ 1.33 เท่าของขนาดมวลรวมโตสุด ดังแสดงในรูปที่ 1.13 โดยเหล็กนอนในคานทั้งหมดจะถูกห่อหุ้มโดยเหล็กปลอก

**ตารางที่ 1.7** ระยะหุ้มคอนกรีตน้อยที่สุด

| | ระยะหุ้มน้อยที่สุด (ซม.) |
|---|---|
| คอนกรีตหล่ออยู่บนหรือในพื้นดินถาวร | 7.5 |
| คอนกรีตหล่อบนพื้นดินหรือสภาพอากาศภายนอก : | |
| เหล็กเสริม DB20 และใหญ่กว่า | 5 |
| เหล็กเสริม DB16 และน้อยกว่า | 4 |
| คอนกรีตไม่สัมผัสพื้นดินหรือสภาพอากาศภายนอก : | |
| พื้น, ผนัง, คานย่อย | 2 |
| คาน, เสา | 4 |

## ตะแกรงลวดเหล็ก Wire Mesh

ลวดเหล็กดึงเย็นเสริมคอนกรีต (Cold Drawn Steel Wire) เป็นลวดเหล็กที่ทำขึ้นโดยการรีดเย็นเหล็กลวด ซึ่งได้จากการรีดร้อนเหล็กแท่ง ตามมาตรฐาน มอก. 747-2531 มีคุณสมบัติในการดึงตามตารางที่ 1.8

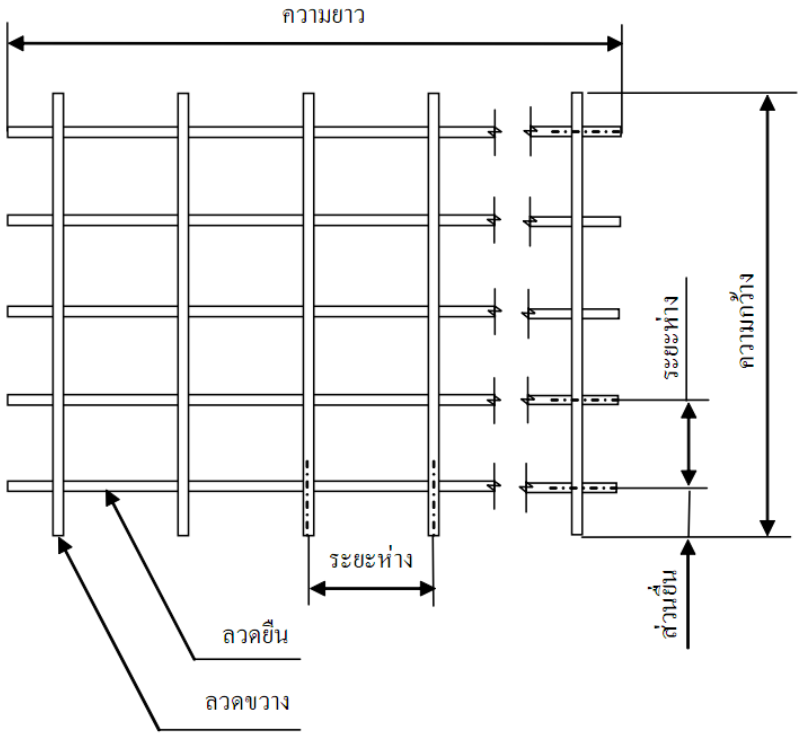
**ตารางที่ 1.8** สมบัติการดึงของลวดเหล็กดึงเย็น

| ความต้านทานแรงดึงต่ำสุด MPa (ก.ก./ซม.$^2$) | ความเค้นพิสูจน์ต่ำสุด MPa (ก.ก./ซม.$^2$) | การลดทอนพื้นที่ต่ำสุด ร้อยละ |
|---|---|---|
| 550 (5,600) | 485 (4,950) | 30 |

หมายเหตุ : 1. หาค่าความเค้นพิสูจน์ที่ความยืด ร้อยละ 0.5
2. ถ้าความต้านทานแรงดึงของลวดเกิน 690 MPa การลดทอนพื้นที่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 25

ตะแกรงเหล็กกล้าเชื่อมติดเสริมคอนกรีต (Wire Mesh) หมายถึง ตะแกรงลักษณะเป็นผืนหรือม้วน ทำขึ้นโดยนำลวดเหล็กดึงเย็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 4 ถึง 16 ม.ม. มาเชื่อมแบบความ

ต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance Welding) ติดกันเป็นตะแกรง โดยที่ตาตะแกรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้

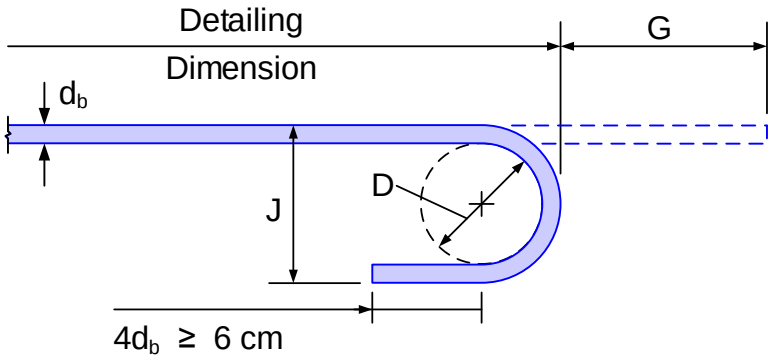



**รูปที่ 1.14** ตาตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

## ของอมาตรฐาน Standard Hook

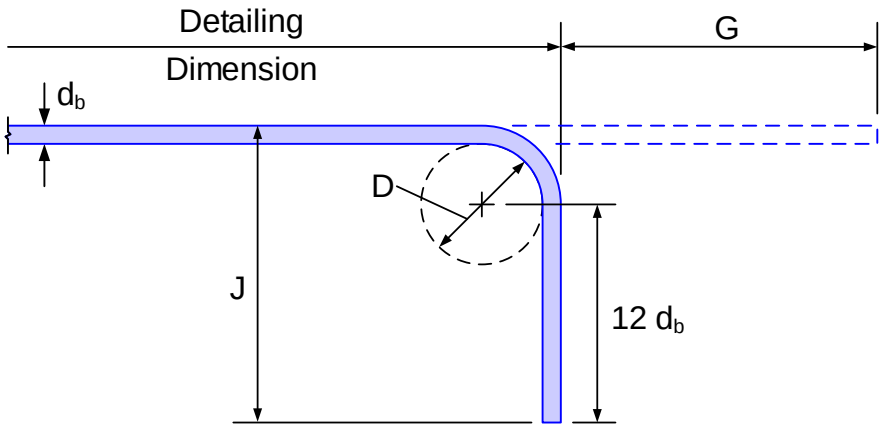
การงอขอที่ปลายเหล็กเสริมคอนกรีตทำเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตเมื่อมีความยาวฝังยึดของเหล็กเสริมตามแนวเส้นตรงไม่เพียงพอ ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง ของ ว.ส.ท. 1008-38 หัวข้อ 3401 กำหนดการงอขอมาตรฐานดังนี้

**งอขอ (180° Hook)** ส่วนที่ตัดเป็นครึ่งวงกลมและมีส่วนปลายยื่นต่อออกไปอีกอย่างน้อย 4 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเส้นนั้น แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 6 ซม.




**รูปที่ 1.15** การงอขอมาตรฐาน 180°

**งอฉาก (90° Hook)** ส่วนที่ตัดเป็นมุมฉากและมีส่วนปลายยื่นต่อออกไปอีกอย่างน้อย 12 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเส้นนั้น




**รูปที่ 1.16** การงอฉากมาตรฐาน 90°

**เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดของการดัด (D)** เส้นผ่าศูนย์กลางของวงโค้งที่ดัดของเหล็กเส้นวัดที่ด้านใน ต้องไม่น้อยกว่าค่าในตารางที่ 1.9 ทั้งนี้ยกเว้นเหล็กลูกตั้งและเหล็กปลอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 6 มม. ถึง 16 มม. ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของวงโค้งที่ดัดไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กนั้น

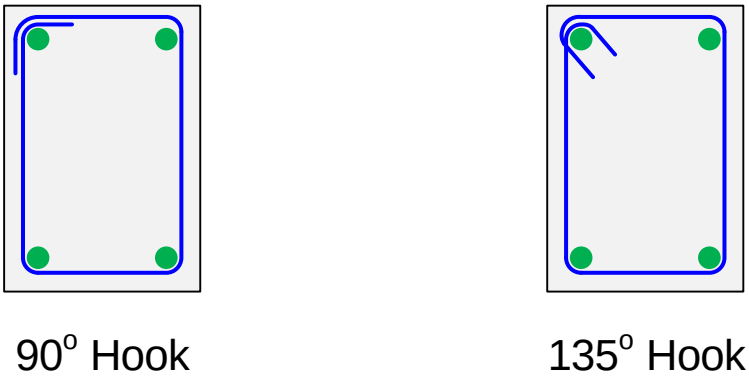
**ตารางที่ 1.9** ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของวงโค้งที่ดัด

| ขนาดของเหล็กเส้น ($d_b$) | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุด (D) |
|---|---|
| 6 มม. ถึง 25 มม. | 6 $d_b$ |
| 28 มม. ถึง 36 มม. | 8 $d_b$ |
| 44 มม. ถึง 57 มม. | 10 $d_b$ |

**ตารางที่ 1.10** ขนาดในการดัดงอขอแนะนำสำหรับเหล็กเส้นขนาดต่างๆ

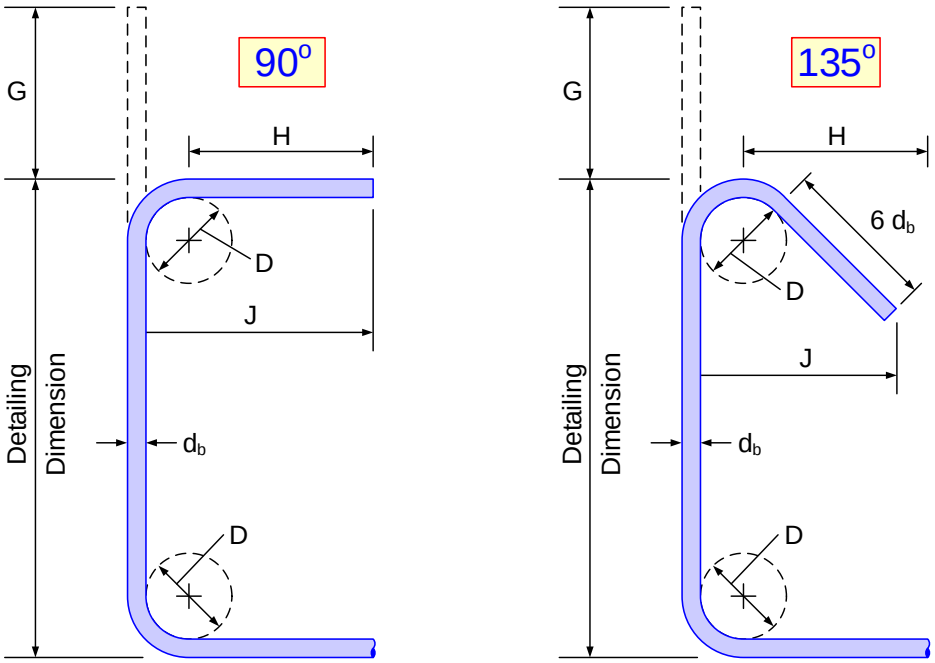
| ขนาดของเหล็กเส้น | D (ซม.) | ของอ 180° | | ของอ 90° | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | G (ซม.) | J (ซม.) | G (ซม.) | J (ซม.) |
| RB9 | 5.5 | 11 | 7.3 | 12 | 15 |
| DB10 | 6.0 | 12 | 8.0 | 12 | 16 |
| DB12 | 7.5 | 13 | 9.9 | 16 | 20 |
| DB16 | 10.0 | 16 | 13.2 | 21 | 26 |
| DB20 | 12.0 | 19 | 16.0 | 26 | 32 |
| DB25 | 15.0 | 24 | 20.0 | 32 | 40 |
| DB28 | 22.5 | 33 | 28.1 | 38 | 48 |
| DB32 | 25.5 | 37 | 31.9 | 43 | 55 |

**เหล็กลูกตั้ง และ เหล็กปลอกเดี่ยว** ดัดรัดรอบเหล็กนอนในคาน โดยมีการดัดเป็นมุมฉากหรือมุม 135 องศา และปล่อยปลายดังในรูปที่ 1.17




**รูปที่ 1.17** การงอขอส่วนปลายยื่นของเหล็กปลอก

- **ส่วนที่ดัดเป็นมุมฉาก สำหรับเหล็ก ∅ 6 มม. ถึง 16 มม.** ต้องมีส่วนปลายยื่นต่อออกไปอีกอย่างน้อย 6 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
- **ส่วนที่ดัดเป็นมุมฉาก สำหรับเหล็ก ∅ 20 มม. ถึง 25 มม.** ต้องมีส่วนปลายยื่นต่อออกไปอีกอย่างน้อย 12 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
- **ส่วนที่ดัดเป็นมุม 135°** ต้องมีส่วนปลายยื่นต่อออกไปอีกอย่างน้อย 6 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง




**รูปที่ 1.18** ระยะส่วนปลายยื่นน้อยที่สุดของเหล็กปลอก

**ตารางที่ 1.11** ขนาดในการดัดงอขอแนะนำสำหรับเหล็กปลอกขนาดต่างๆ

| ขนาดของเหล็กเส้น | D (ซม.) | ของอ 90° | | ของอ 135° | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | G (ซม.) | J (ซม.) | G (ซม.) | J (ซม.) |
| RB6 | 2.5 | 4 | 6 | 5 | 4.5 |
| RB9 | 3.5 | 6 | 8 | 7 | 6.5 |
| DB10 | 4.0 | 7 | 9 | 8 | 7.5 |
| DB12 | 5.0 | 8 | 11 | 10 | 9.0 |
| DB16 | 6.5 | 10 | 15 | 13 | 12.0 |
| DB20 | 12.0 | 26 | 32 | 18 | 17.0 |
| DB25 | 15.0 | 32 | 40 | 23 | 21.0 |