บทที่ 2

วัสดุ และ กำลังของวัสดุ

2.1 คุณสมบัติของคอนกรีต

2.1.1 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีต เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการบ่งบอกคุณสมบัติของคอนกรีต โดยทั่วไปการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจะทดสอบคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยจะมีการทดสอบแตกต่างกันตามมาตราฐานของแต่ละประเทศ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะได้แก่ การทดสอบแท่งลูกบาศก์ และ การทดสอบรูปทรงกระบอก การทดสอบแท่งลูกบาศก์ทั่วไปจะใช้ขนาด 6 นิ้ว (150 มม.) นิยมใช้ในประเทศ สหราชอาณาจักร เยอรมัน และในกลุ่มทวีปยุโรป ส่วนการทดสอบตัวอย่างรูปทรงกระบอกทั่วไปจะใช้ขนาด 6x12 นิ้ว (150 มม. x 300 มม.) นิยมใช้ในประเทศ สหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส แคนาดา ออสเตรเลีย และ นิวซีแลนด์ ส่วนประเทศในแถบสแกนดิเนเวีย จะใช้การทดสอบทั้ง 2 แบบ ซึ่งคงจะเป็นการยากที่จะบอกว่าการทดสอบแบบใดจะให้ผลที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม RILEM (An International Organization of Testing Laboratories) ก็ได้แนะนำว่า ในงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้การทดสอบรูปทรงกระบอกมากกว่าการทดสอบแท่งลูกบาศก์ ซึ่งเชื่อว่า รูปทรงกระบอกจะให้ผลการทดสอบที่สม่ำเสมอสำหรับตัวอย่างทดสอบที่เหมือนกัน เนื่องจาก ผลของการยึดรั้งที่หัวท้ายและผลของมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตจะมีผลน้อยมากต่อการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ อีกทั้งการกระจายหน่วยแรงในระนาบราบของตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะสม่ำเสมอมากกว่าตัวอย่างแท่งลูกบาศก์ [34]

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ ในมาตรฐาน ISO 3893[35] กำหนดอัตราส่วน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงกระบอกต่อของตัวอย่างแท่งลูกบาศก์ ที่ 0.80 เมื่อกำลังของคอนกรีตมีค่าไม่เกิน 200 กก./ซม.^{2} และจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีต และมีค่า 0.91 เมื่อคอนกรีตมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 500 กก./ซม.^{2} ตามที่แสดงในตารางที่ 2.1 ส่วนใน CEB- MC90[3] ใช้อัตราส่วน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกต่อของตัวอย่างรูปลูกบาศก์ มีค่า 0.80 เมื่อกำลังของคอนกรีตมีค่าไม่เกิน 500 กก./ซม.^{2} และจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีต และมีค่า 0.89 เมื่อคอนกรีตมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 800 กก./ซม.^{2} ตามที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก กับ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ตามมาตรฐาน ISO3893[35]

กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอก f_{ck} (กก/ซม^2)	กำลังรับแรงอัดรูปแท่งลูกบาศก์ f_{cu} (กก/ซม^2)	อัตราส่วน f_{ck}/f_{cu}
200	250	0.80
250	300	0.83
300	350	0.86
350	400	0.88
400	450	0.89
450	500	0.90
500	550	0.91

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก กับ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ตาม CEB-MC90[3]

กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอก f_{ck} (กก/ซม^2)	กำลังรับแรงอัดรูปแท่งลูกบาศก์ f_{cu} (กก/ซม^2)	อัตราส่วน f_{ck}/f_{cu}
200	250	0.80
300	370	0.80
400	500	0.80
500	600	0.83
600	700	0.86
700	800	0.88
800	900	0.89

โดยจากข้อสังเกตที่เห็นได้จากตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ข้างต้นพบว่าในส่วนของ CEB-MC90 [3] จะให้ค่าที่ค่อนข้างคงที่และมีความแตกต่างกันแบบเพิ่มขึ้นทีละเล็กน้อย อีกทั้งยังให้ค่าอัตราส่วนเปรียบเทียบในช่วงที่กว้างกว่า ในขณะที่ ในมาตรฐาน ISO 3893[35] กำหนดอัตราส่วนมีความแตกต่างกันแบบเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วและให้ค่าเปรียบเทียบในช่วงที่แคบกว่า ดังนั้นหากจะพิจารณาเลือกใช้ค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก กับ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ที่เสนอโดย CEB-MC90 [3] ก็จะให้เหตุผลที่ดีกว่า

<u>กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต</u>

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปจะมีการกระจายข้อมูลแบบปกติ [ดูรายละเอียดเรื่องการกระจายของข้อมูลใน หัวข้อที่ 3.1] โดยในมาตรฐาน ISO 3893[35] ได้กำหนดค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการของคอนกรีตที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$f_{cm}=f_{ck}+1.64\sigma \qquad (2.1)$$

เมื่อ f_{cm} คือกำลังอัดเฉลี่ย

f_{ck} คือกำลังอัดประลัย

σ คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

<u>2.1.2 กำลังดึงของคอนกรีต</u>

กำลังดึงของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของคอนกรีต ซึ่งจะสามารถกำหนดค่ากำลังดึงของคอนกรีตได้จากวิธีการทดสอบ โดยการทดสอบเพื่อหากำลังดึงในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่

1. การดึงโดยตรง (Direct Tension)
2. การทดสอบแรงดึงแยกตัว (The Splitting Test)
3. การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคานคอนกรีตล้วน (The Beam Test) ซึ่งค่าที่ทดสอบได้จะเรียกว่า โมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture)

โดยทั่วไปการทดสอบแบบการดึงโดยตรง จะทำได้ยากและจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนสูง ส่วนการทดสอบแบบการทดสอบแรงดึงแยกตัว จะทำได้ง่ายที่สุดและให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือมากที่สุด ซึ่งโดยทั่วไป ค่ากำลังดึงของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบการทดสอบแรงดึงแยกตัว จะมีค่าประมาณ 65-75 % ของ โมดูลัสของการแตกร้าว ซึ่ง Raphael J.M. [37] จะให้ค่ากำลังดึงของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบ การทดสอบแรงดึงแยกตัว จะมีค่าเท่ากับ 3/4 ของ โมดูลัสของการแตกร้าว

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแยกตัวกับกำลังอัดของคอนกรีต สามารถเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$f_{ct}=k(f_{ck})^{n} \tag{2.2}$$

และความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต สามารถเขียนในรูปสมการทั่วไป ได้ดังนี้

$$f_{r}=k(f_{ck})^{n} \tag{2.3}$$

โดยที่ f_{ct} = กำลังดึงแยกตัวของคอนกรีต (กก./ซม^2)

f_r = โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต (กก./ซม^2)

f_{ck} = กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม^2)

n มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.75[34]

Mirza et al.[38] ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ จาก ข้อมูลผลการทดสอบ กำลังอัดและกำลังดึงแบบ Splitting Tensile Strengths 798 ตัวอย่างซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลจาก รายงานการวิจัยระดับปริญญาเอก ของมหาวิทยาลัย Alberta Calgary และ Texas เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของคอนกรีต เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

$$f_{ct}=1.69(f_{ck})^{0.5} \tag{2.4}$$

$$f_{ct}=4.45(f_{ck})^{0.333} \tag{2.5}$$

และวิเคราะห์ผลทางสถิติ จาก ข้อมูลผลการทดสอบ กำลังอัดและโมดูลัสแตกร้าว จำนวน 588 ตัวอย่าง เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

$$f_{r}=2.20(f_{ck})^{0.50} \tag{2.6}$$

$$f_{r}=5.62(f_{ck})^{0.333} \tag{2.7}$$

ACI 318-95[1] กำหนดสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของคอนกรีต ดังนี้

$$f_{ct}=1.77(f'_{c})^{0.50} \tag{2.8}$$

และกำหนด ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต ไว้ดังนี้

$$f_r=1.98(f_c')^{0.50} \tag{2.9}$$

CEB/FIP MC90[3] กำหนดสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของคอนกรีต ดังนี้

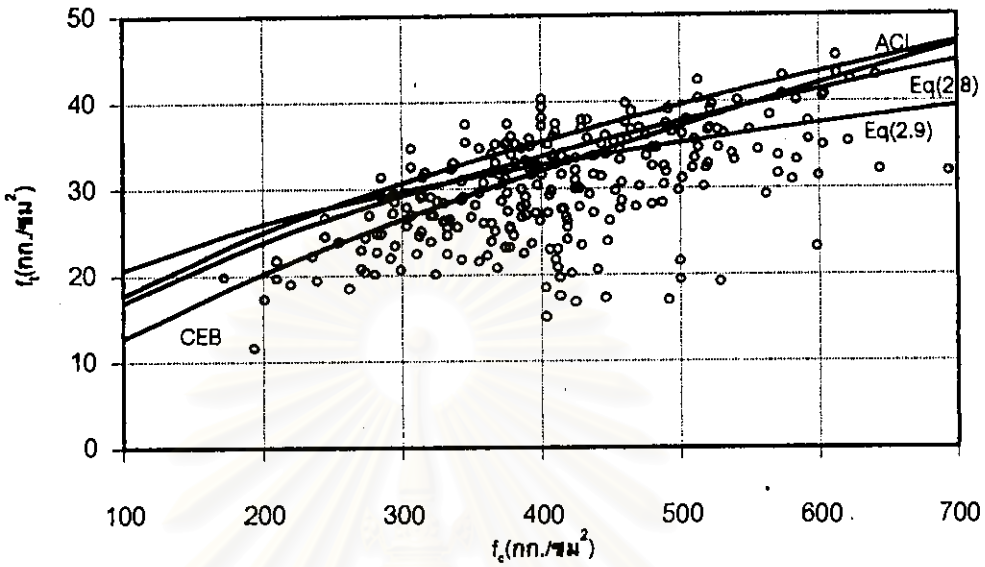
$$f_{ct}=0.59(f_{ck})^{0.667} \tag{2.10}$$

และ ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต ไว้ดังนี้

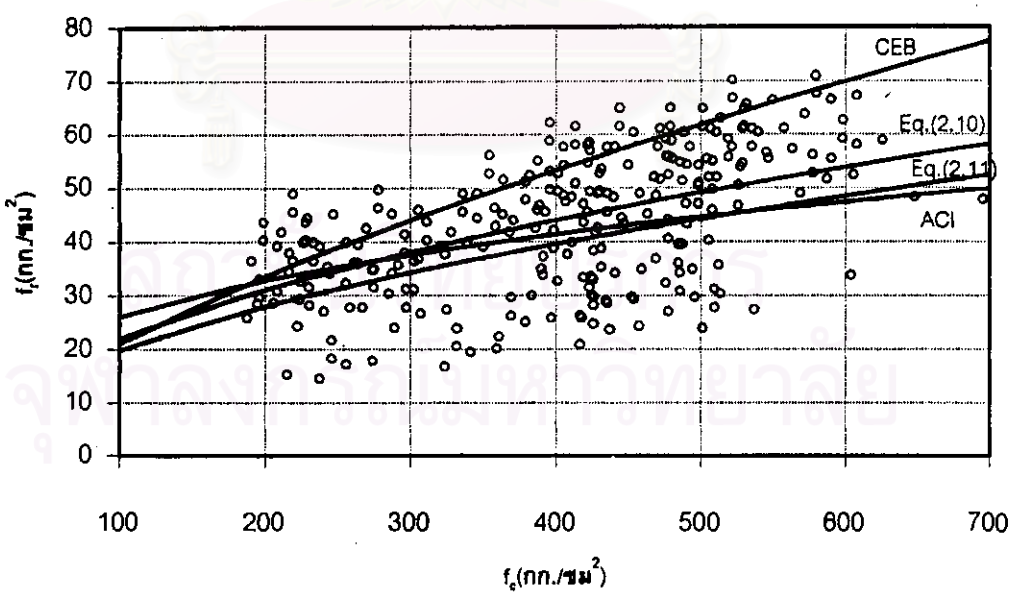
$$f_r=0.98(f_{ck})^{0.667} \tag{2.11}$$

จากการเปรียบเทียบค่ากำลังดึงของคอนกรีต กับผลการทดลอบ[38] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพบว่า ข้อเสนอของ Mirza et al.[38] จะให้ค่าที่ต่ำที่สุด อีกทั้งรูปแบบของความสัมพันธ์ก็อยู่ในรูปสมการของรากที่สองซึ่งสามารถคำนวณง่ายกว่าสมการในรูปแบบของสมการยกกำลังแบบอื่น ในขณะที่การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต กับผลการทดลอบ[38] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าโมดูลัสแตกร้าวตาม ACI 318-95[1] จะให้ค่าที่ต่ำที่สุดและของความสัมพันธ์ก็อยู่ในรูปสมการของรากที่สอง อย่างไรก็ดีค่ากำลังดึงของคอนกรีตตามข้อเสนอของ ACI 318-95[1] มีค่ามากกว่าข้อเสนอของ Mirza et al.[38] เพียงแค่ 4 เปอร์เซนต์เท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณเพื่อให้สอดคล้องกัน ในการศึกษานี้จึงพิจารณาเลือกใช้ทั้งค่ากำลังดึงของคอนกรีตและค่าโมดูลัสแตกร้าวตามข้อเสนอของ ACI 318-95[1]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต

2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของคอนกรีต

ผลจากการทดสอบจากรายงานวิจัยต่างๆพบว่า พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดในแนวแกนพบว่าจะมีรูปร่างเป็นเส้นโค้ง โดยที่คอนกรีตกำลังสูงจะมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่เป็นเชิงเส้นมากกว่า และเริ่มเบี่ยงเบนจากการเป็นเส้นตรงที่หน่วยแรงสูงกว่าคอนกรีตกำลังต่ำ และคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดมากกว่าคอนกรีตกำลังต่ำ อีกทั้งคอนกรีตกำลังสูงจะมีความชันของส่วนที่ลาดขึ้นของเส้นโค้งมากกว่าคอนกรีตกำลังต่ำ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น Collins Mitchell และ MacGregor [11] ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต ให้เห็นความชันที่แตกต่างตามกำลังของคอนกรีต และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุด โดยแนะนำให้ใช้สมการของ Thorenfeldt, Tomaszewicz และ Jensen โดยเพิ่มตัวคูณ k ในสมการของ Propovics [12]

$$f_c = f_{ck}\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\frac{n}{n-1+\left(\varepsilon_c/\varepsilon_o\right)^{nk}} \tag{2.12}$$

โดยที่

$$k=1 \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon_c/\varepsilon_0 \le 1 \tag{2.13}$$

และ

$$k=0.67+\frac{f_{ck}}{630} \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon_c/\varepsilon_0 \ge 1 \tag{2.14}$$

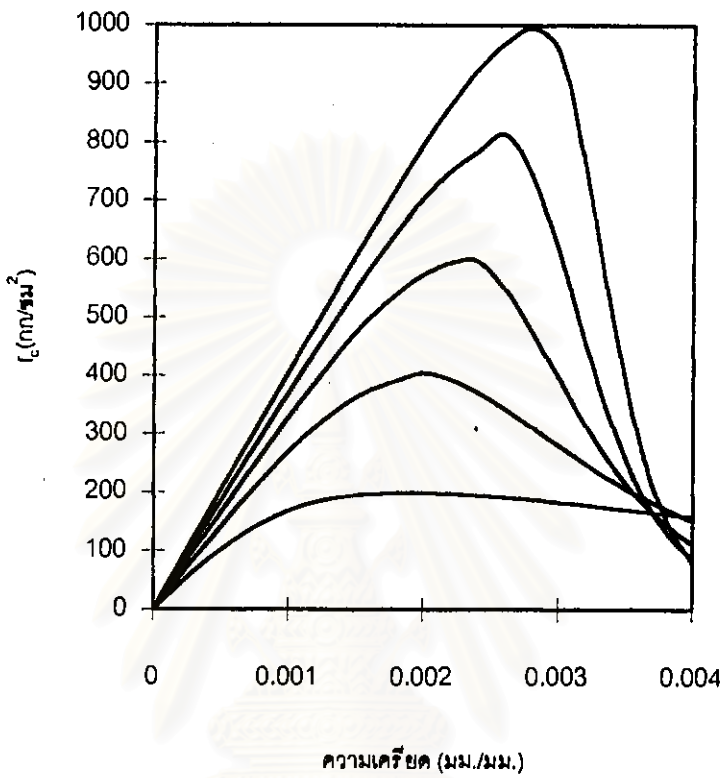
$$n=0.80+\frac{f_{ck}}{175} \tag{2.15}$$

สำหรับคอนกรีตที่ความหนาแน่นปกติค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดจะหาได้จาก

$$\varepsilon_0=\frac{f_{ck}}{E_c}\frac{n}{n-1} \tag{2.16}$$

โดยที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_c แนะนำให้ใช้สมการที่เสนอโดย Carrasquillo et al [39] คือ

$$E_c=10600\sqrt{f_{ck}}+70000 \tag{2.17}$$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่กำลังอัดต่างๆ

2.1.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจาก ความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่เป็นเส้นตรงสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1.โมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น (Initial Tangent Modulus) คำนวณจาก ความลาดเอียงของเส้นสัมผัสระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่จุดเริ่มต้น

2. โมดูลัสเซคแคนท์ (Secant Modulus) คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้น กับจุดใดๆบนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่ต้องการ

3. โมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่จุดใดๆ

ACI 318-95 [1] กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากค่า Secant Modulus โดยหาค่าจากความชันของเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุด บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่ 45 % ของหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งให้ค่าเท่ากับ

$$E_c = 15100\left(f_c'\right)^{0.5} \tag{2.18}$$

CEB-MC90 [2] กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากค่า Tangent Modulus of Elasticity ของคอนกรีตเท่ากับ

$$E_c = 47000\left(f_{ck} + 80\right)^{1/3} \tag{2.19}$$

Mirza et al.[36] กำหนดค่า Initial Tangent Modulus of Elasticity ของคอนกรีตเท่ากับ

$$E_c = 24914\left(f_{ck}\right)^{1/2} \tag{2.20}$$

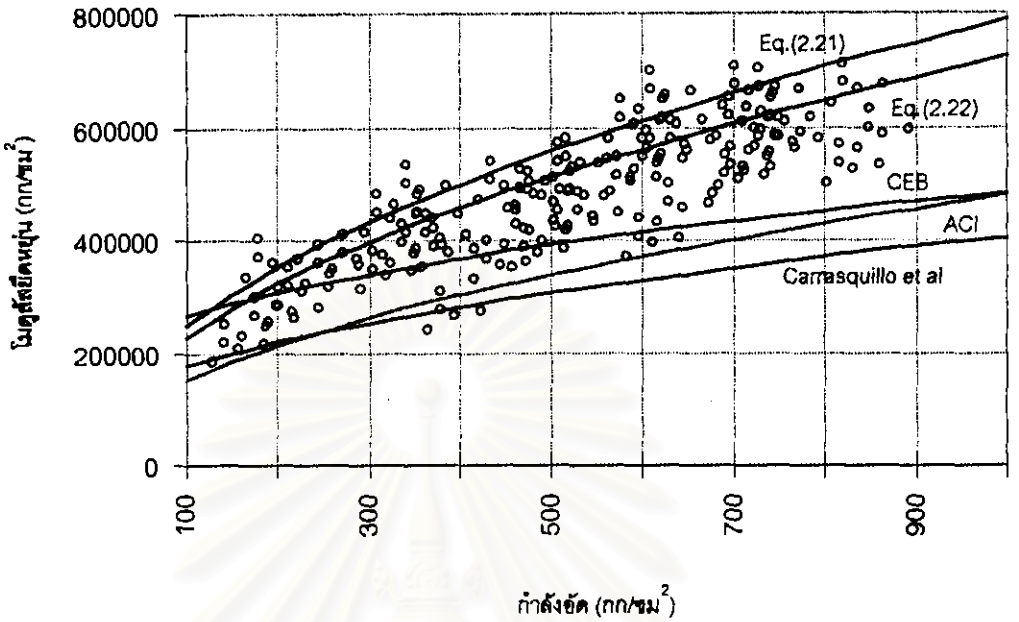
และกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากค่า Secant Modulus เท่ากับ

$$E_c = 22852\left(f_{ck}\right)^{1/2} \tag{2.21}$$

เสรี [13] กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่เสนอโดย Carrasquillo et al.[39] ที่กำลังของคอนกรีตระหว่าง 210 กก./ซม^2 ถึง 840 กก./ซม^2 เท่ากับ

$$E_c = 10600\left(f_{ck}\right)^{1/2} + 70000 \tag{2.22}$$

จากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับผลการทดลอบ[38] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะพบว่า ข้อเสนอของ Carrasquillo et al. [39] จะให้ค่าที่ต่ำที่สุด อีกทั้งยังสามารถใช้ครอบคลุมถึงช่วงคอนกรีตกำลังสูงได้อีกด้วย รูปแบบของความสัมพันธ์ก็อยู่ในรูปสมการของรากที่สอง ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่าย ดังนั้นในการศึกษานี้จะเลือกใช้สมการที่ (2.22) สำหรับคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีต

2.1.5 อัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio)

อัตราส่วนปัวส์ซอง หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเครียดด้านข้างกับความเครียดในแนวแกน ซึ่งในคอนกรีตโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 0.15-0.22[34]

สำหรับคอนกรีตกำลังสูง Carrasquillo et al[39] ได้รายงานจากผลการทดสอบค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของคอนกรีตโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.20 หากไม่คำนึงถึงกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบของ สุพรรณ[40] และ Radian Samman Wafa[41] ที่ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปัวส์ซอง เท่ากับ 0.19 และ ACI Committee 363[42] แนะนำโดยอาศัยข้อมูลที่มีอยู่ว่าค่าอัตราส่วนปัวส์ซองในช่วงยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงดูเหมือนจะเทียบได้กับค่าของคอนกรีตกำลังปกติ

2.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต

2.2.1 กำลังครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม

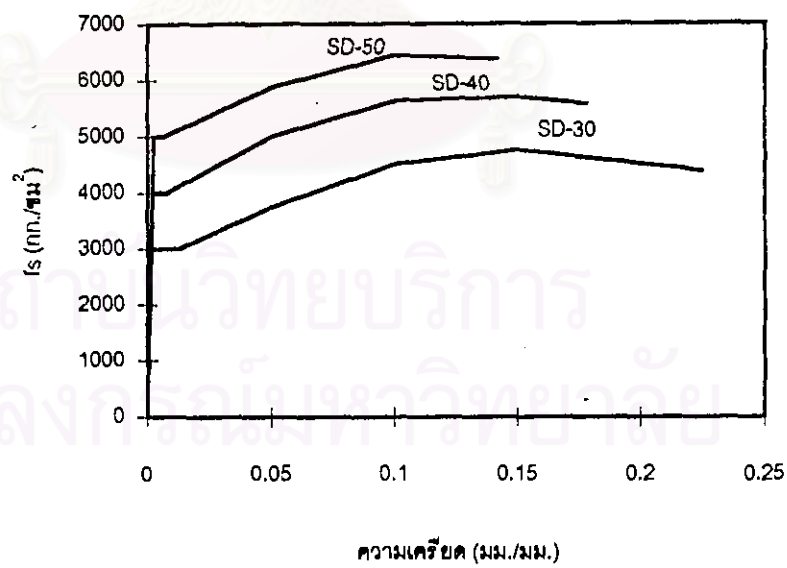
กำลังครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม เป็นตัวแบ่งแยกชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมคอนกรีต โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2527 และ มอก. 24-2527 ได้กำหนดกำลังครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมตามชั้นคุณภาพ ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าค่าที่แสดงในตารางที่2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมคอนกรีต

ชนิดของเหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	กำลังคราก (กก./ซม.2)	กำลังดึงประลัย (กก./ซม.2)
เหล็กกลมเรียบ	SR-24	2400	3900
เหล็กข้ออ้อย	SD-24	2400	3900
	SD-30	3000	4900
	SD-40	4000	5700
	SD-50	5000	6300

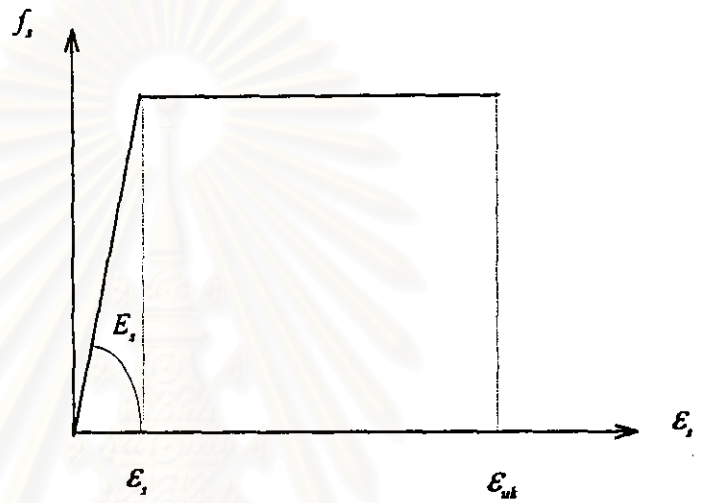
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมสามารถแสดงได้ในรูป โดยที่ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ของเหล็กเสริม (E_s) มีค่าเท่ากับ 2.04 x10^6 กก./ซม.^{2} และ อัตราส่วนปัวส์ซองมีค่าเท่ากับ 0.3



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม

CEB-MC90 [3] ได้แนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปแบบที่ง่ายขึ้นในลักษณะเส้นตรงสองเส้น (Bi-linear) ดังแสดงในรูปด้านล่าง โดยกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 2×10^6 กก./ซม.^{2} และกำหนดให้ค่าความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมอยู่ที่ 0.01 มม./มม.



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมลักษณะเส้นตรงสองเส้น (Bi-linear) [3]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย