

การศึกษาทางพารามิเตอร์เพื่อหาค่าหน่วยแรงที่จุดครากสูงสุดที่เหมาะสม สำหรับเหล็กเส้นที่ใช้เสริมในคอนกรีต

A Parametric Study for Determining an Appropriate Maximum Yield Stress of Rebars in Concrete

ฉัตร สุจินดา (Chatr Suchinda)¹

¹อาจารย์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม และ chatr.su@spu.ac.th

บทคัดย่อ : ในปัจจุบันการผลิตเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตด้วยวิธี *Temper Core* สามารถเพิ่มหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเส้นที่ผลิตให้มีค่าสูงโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตมากนัก ซึ่งผู้ผลิตหลายรายเลือกที่จะผลิตเหล็กเส้นดังกล่าวให้มีหน่วยแรงดึงที่จุดครากให้สูงกว่าค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานมาก อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กเสริมที่มีความสามารถในการรับแรงดึงเกินกว่าค่าที่ใช้คำนวณออกแบบมากเกินไป อาจทำให้เกิดผลเสียต่อชิ้นส่วนโครงสร้างโดยเฉพาะเหล็กเสริมที่รับโมเมนต์ดัด สาเหตุเนื่องมาจากการที่เหล็กเส้นดังกล่าว อาจทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเปลี่ยนพฤติกรรมการพังจากแบบแบบเหนียว (ตามที่ได้ออกแบบไว้) มาเป็นแบบเปราะแทน บทความนี้ได้นำเสนอถึงการศึกษาทางพารามิเตอร์เพื่อหาค่าหน่วยแรงที่จุดครากสูงสุด ที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพฤติกรรมของการพังของชิ้นส่วนโครงสร้าง จากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แนะนำหน่วยแรงดึงที่จุดครากสูงสุดจะต้องไม่เกิน 13% ของค่ากำลังที่ระบุในชั้นคุณภาพนั้น ๆ

ABSTRACT : Nowadays, the use of Temper core technique in the rebar production could increase the yield stresses without significantly increase the production cost. Therefore, many plants choose to produce the rebars that have much greater yield stresses than those specified by the standard. However, using of the rebars with much greater yield stresses than the values used in the design calculations could impose some drawback to the structural members especially when these bars were used as the reinforcement for flexural resistance because these could change the failure mode of the structural members from ductile (as intended in the design process) to brittle. This article presents a parametric study to determine the maximum yield stress of the rebars which could not alter the failure mode of the structural members. From this study, it is recommended that the maximum yield stresses shall not exceed 13% of the specified values.

KEYWORDS : MAXIMUM YEILD STRESSES, OVERLY HIGH YEILD STRESS REBARS, PARAMETRIC STUDY, REBAR STANDARDS, REINFORCED CONCRETE DESIGN CODE IMPROVEMENTS

1. ความนำ

มาตรฐาน มอก. 20-2543 [1] (สำหรับเหล็กเส้นกลม) ได้มีการกำหนดหน่วยแรงดึงที่จุดคราก จะต้องไม่ต่ำกว่า 2,400 kg/cm² ส่วน มาตรฐาน มอก. 24-2548 [2] (สำหรับเหล็กเส้นข้ออ้อย) ได้กำหนดหน่วยแรงดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเส้นไว้สามชั้นคุณภาพคือ ชั้นคุณภาพ SD30 จะต้องไม่ต่ำกว่า 3,000 kg/cm² ชั้นคุณภาพ SD40 จะต้องไม่ต่ำกว่า 4,000 kg/cm² และชั้นคุณภาพ SD50 จะต้องไม่ต่ำกว่า 5,000 kg/cm² แต่มาตรฐาน มอก. ทั้งสองนี้ ไม่มีการกำหนดค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงที่จุดครากแต่อย่างใด

จากการศึกษาเก็บตัวอย่างเหล็กเส้นจากสถานที่ก่อสร้างจริง [3] แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์ความแปรผันของตัวอย่างเหล็กเส้นจากสถานที่ก่อสร้างจริง [3]

ขนาดและชั้นคุณภาพ	จำนวนตัวอย่าง	อัตราส่วนหน่วยแรงดึงที่จุดครากต่อค่าที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน	
		ค่าเฉลี่ย	สัมประสิทธิ์ความแปรผัน
RB6 SR24	53	1.68	0.187
RB9 SR24	84	1.51	0.257
DB12 SD30	66	1.62	0.179
DB16 SD30	62	1.82	0.194

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงดึงที่จุดครากมีค่าเกินกว่าค่าที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน มอก. ดังกล่าว สูงถึงร้อยละ 51 ถึง 82 ซึ่งหากนำเหล็กเส้นเหล่านี้มาใช้เสริมองค์อาคารคอนกรีต ในขณะที่ผู้ออกแบบได้คำนวณปริมาณของเหล็กเสริม A_s จากค่าของหน่วยแรงดึงที่จุดครากตามที่มาตรฐานระบุ ก็อาจจะทำให้พฤติกรรมการรับแรงขององค์อาคารเปลี่ยนแปลงไปอย่างสิ้นเชิง เช่นในกรณีองค์อาคารที่รับโมเมนต์ดัด เนื่องจากองค์อาคารประเภทนี้ได้ถูกออกแบบให้คอนกรีตรับแรงอัด ในขณะที่ใช้เหล็กเสริมรับแรงดึง ดังนั้นลักษณะการพังจึงขึ้นอยู่กับว่าวัสดุใดพังก่อน (คอนกรีตหรือเหล็ก) ดังนั้น ตัวแปรที่จะมาเป็นตัวกำหนดว่าในองค์อาคารจะ

มีการพังเกิดขึ้นในคอนกรีตหรือเหล็ก ก็คือความสามารถในการรับแรงในส่วนของเหล็กเสริมนั่นเอง

เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น หากหน้าตัดสำหรับรับโมเมนต์ดัด มีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม (Reinforcement Ratio) ρ ต่ำกว่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมสมดุล ρ_b ก็จะมีผลทำให้เกิดการพังเนื่องจากแรงดึง (พังที่เหล็กเสริม) และเนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่เหนียว (Ductile) จึงทำให้หน้าตัดนั้นจะมีลักษณะเป็นการพังแบบเหนียวตามไปด้วย (ซึ่งเป็นลักษณะที่พึงประสงค์) แต่ถ้าหน้าตัดใดมีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม (Reinforcement Ratio) ρ สูงกว่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมสมดุล ρ_b ก็จะมีผลทำให้เกิดการพังเนื่องจากแรงอัด (พังที่คอนกรีต) และเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่เปราะ (Brittle) จึงทำให้หน้าตัดนั้นจะมีลักษณะเป็นการพังแบบเปราะตามไปด้วย (ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์)

เพื่อเป็นการควบคุมความเหนียวของหน้าตัดที่รับโมเมนต์ดัด มาตรฐานออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศสหรัฐอเมริกา ACI318-99 [4] จึงได้กำหนดให้ผู้หน้าตัดที่รับโมเมนต์ดัดต้องมีอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ ไม่เกินร้อยละ 75 ของอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมสมดุล ρ_b

จะเห็นได้ว่าความเหนียวของหน้าตัดที่รับโมเมนต์ดัด จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงดึงของเหล็กเสริมในหน้าตัดนั้น ดังนั้นหากมีการใช้เหล็กเสริมที่มีหน่วยแรงดึงที่จุดครากสูงกว่าค่าที่คาดไว้ จะทำให้ความเหนียวของหน้าตัดลดลง ซึ่งหากหน่วยแรงดึงที่จุดครากสูงไปมาก ก็อาจจะทำให้ความเหนียวของหน้าตัดต่ำกว่าระดับที่ยอมรับได้

บทความนี้ได้นำเสนอถึงการศึกษาคสอบเทียบ (Calibrate) ความเหนียวของหน้าตัดที่เกิดขึ้นจากการออกแบบกำหนดโดยข้อกำหนดในมาตรฐาน ACI318-99 [4] และข้อมูลทางสถิติของการกระจายหน่วยแรงดึงที่จุดครากและพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้นที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อเป็นการกำหนดค่าดัชนีความเหนียว (Ductility Index) เป้าหมาย จากนั้นจึงจะนำค่าเป้าหมายดังกล่าวมาเป็นตัวสอบเทียบเพื่อหาหน่วยแรงดึงที่จุดครากสูงสุด เมื่อกำหนดให้การกระจายของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้นเป็นไปตามข้อกำหนดของ มอก. 20-2543 [1]

และ 24-2548 [2] เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานต่อไปในอนาคต

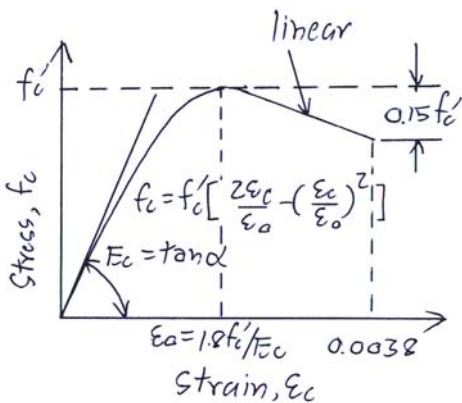
2. การทำนายความเหนียวของหน้าตัด

ความเหนียวของหน้าตัดถูกกำหนดโดยดัชนีความเหนียว (Ductility Index) ประลัยซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียไปในขณะที่หน้าตัดมีการคดในช่วงอีลาสติก (Elastic Energy) ต่อพลังงานทั้งหมดที่สูญเสียไปจนถึงจุดพัง (Total Energy at Failure) [5] ดังสมการ 1

$$Ductility Index = \frac{Total Energy @ Failure}{Elastic Energy} \quad (1)$$

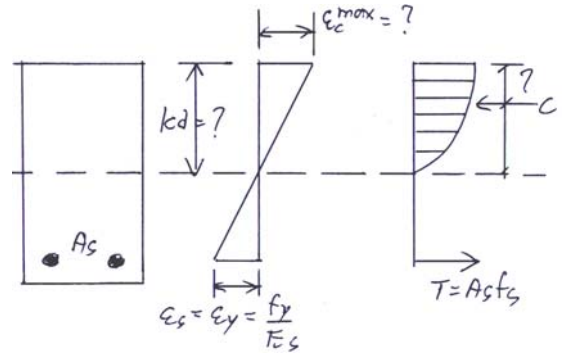
ซึ่งการทำนายค่าพลังงานดังกล่าวอาจทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์คดกับความโค้งหรือที่นิยมเรียกว่า $M - \phi$ Curve [6] จุดสำคัญที่กำหนดเส้นกราฟดังกล่าวมีอยู่ด้วยกันสองจุดคือ จุดที่เหล็กเสริมถึงจุดคราก และจุดประลัย

การคำนวณหาโมเมนต์คด และความโค้งที่จุดคราก ผู้แต่งเลือกใช้วิธี Modified Hognestad [7] ซึ่งมีการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress f_c และ Strain ϵ_c ของคอนกรีตสมมุติตามวิธี Modified Hognestad [7]

เมื่อใช้สมการสมดุลของหน้าตัดจากแผนผังของแรงในภาพที่ 2 จะได้ค่าของโมเมนต์คด และความโค้งที่จุดครากดังแสดงไว้ในสมการที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2 แผนผังของแรงภายในของหน้าตัดที่รับโมเมนต์คดตามวิธี Modified Hognestad [7]

$$M_y = A_s f_y (d - kd + \bar{y}) \quad (2)$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_c^{max}}{kd} \quad (3)$$

หาค่า kd ได้โดยการแก้สมการที่ 4

$$A_s f_y = b f'_c k d \left[\left(\frac{\epsilon_c^{max}}{\epsilon_0} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_c^{max}}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } \epsilon_c^{max} = \epsilon_y \frac{kd}{d - kd}$$

$$\text{และ } \bar{y} = \frac{\frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_c^{max}}{\epsilon_0} \right) (kd)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{\epsilon_c^{max}}{\epsilon_0} \right)^2 (kd)^2}{\left(\frac{\epsilon_c^{max}}{\epsilon_0} \right) (kd) - \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_c^{max}}{\epsilon_0} \right)^2 (kd)}$$

ส่วนการคำนวณหาโมเมนต์คด และความโค้งที่จุดประลัยนั้นผู้แต่งเลือกใช้วิธี Whitney Rectangular Stress Block [8] แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในสมการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลังตามสมการที่ 5 และ 6

$$M_{ult} = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c \beta_1 b}$$

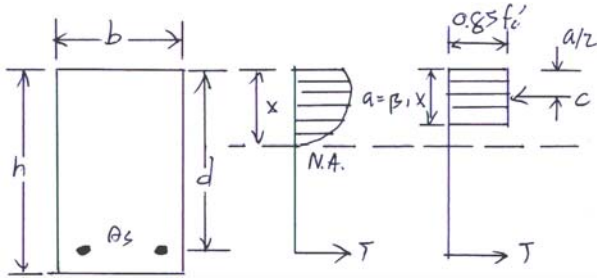
$$\text{และ } \beta_1 = 0.85 \text{ เมื่อ } f'_c \leq 280 \text{ ksc}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) \geq 0.65 \text{ เมื่อ}$$

$$f'_c > 280 \text{ ksc}$$

$$\phi_{ult} = \frac{\epsilon_{cu}}{x} \quad (6)$$

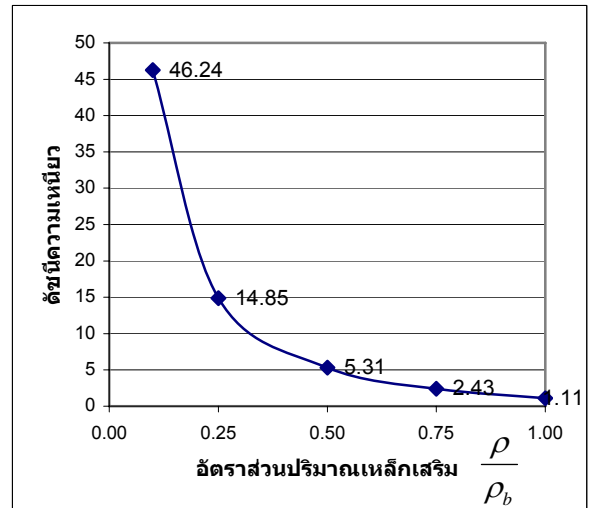
$$\text{เมื่อ } x = \frac{a}{\beta_1} \text{ และ } \epsilon_{cu} = 0.003$$



$$Ductility Index = \frac{abe + bcde}{abe} \quad (1)$$

เมื่อ abe และ $bcde$ คือพื้นที่สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในภาพที่ 3 (ตัวอย่างเฉพาะสำหรับกรณี $\rho = 0.10\rho_b$)

เมื่อนำค่าของดัชนีความเหนียวสำหรับค่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ ต่างๆ กันมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเหนียว กับอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ ของหน้าตัดที่รับโมเมนต์คดมีความกว้าง 40 cm และมีความลึกประสิทธิภาพ 70 cm $f'_c = 240$ ksc $f_y = 3000$ ksc

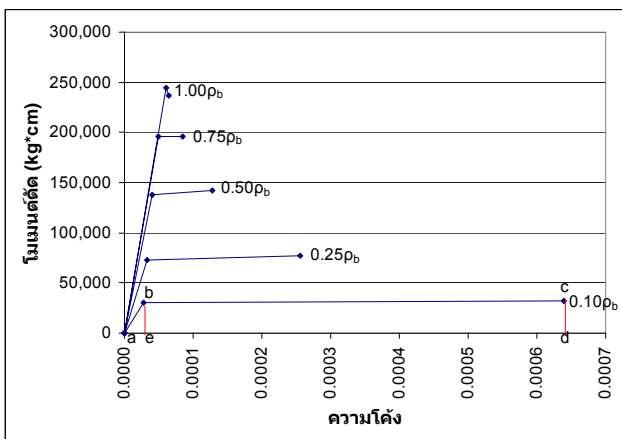
จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ น้อยหน้าตัดมีดัชนีความเหนียวสูง แต่ถ้าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ มากขึ้น หน้าตัดมีดัชนีความเหนียวต่ำลงเรื่อยๆ

จากนั้นได้มีการทดลองเปลี่ยนขนาดของหน้าตัด ให้มีความกว้าง 20 cm และมีความลึกประสิทธิภาพ 55 cm ผลที่ได้คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเหนียว กับอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมไม่แตกต่างจากหน้าตัดขนาดเดิมแต่อย่างใด แสดงว่าขนาดของหน้าตัดไม่มีผลต่อดัชนีความเหนียว แต่เมื่อทดลองเปลี่ยนค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต f'_c จาก 240 ksc ไปเป็น 350 ksc โดยที่ให้ค่า f_y คงเดิมที่ 3000 ksc จะได้ค่าดัชนีความเหนียวที่อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม $\rho = 0.75\rho_b$ เพิ่มขึ้น 7.9% และเมื่อทดลองเปลี่ยนหน่วยแรงดึงที่จุดคราก

ภาพที่ 3 แผนผังของแรงภายในของหน้าตัดที่รับโมเมนต์คดตามวิธี Whitney Rectangular Stress Block [8]

3. การศึกษาทางพารามิเตอร์

จากที่ผู้แต่งได้ทดลองสมมุติค่าความกว้างของหน้าตัด $b = 40$ cm ความลึกประสิทธิภาพ $d = 70$ cm ค่ากำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีต $f'_c = 240$ ksc และค่าหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ ksc และทดลองแปรเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ ให้อยู่ระหว่าง $0.10\rho_b$ ไปจนถึง $1.00\rho_b$ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์คดกับความโค้งหรือ $M - \phi$ Curve ดังแสดงในภาพที่ 4



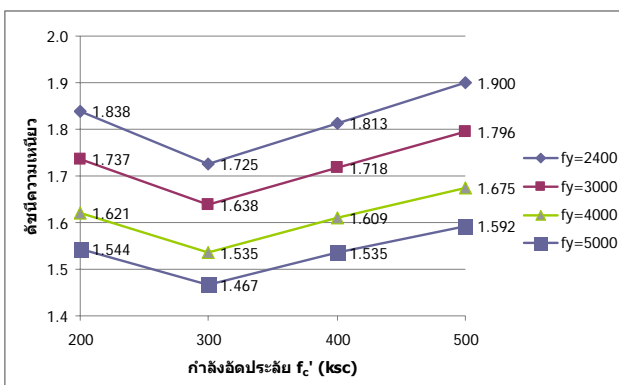
ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์คดกับความโค้งหรือ $M - \phi$ Curve ที่อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมต่างๆกัน

กราฟในภาพที่ 4 นี้ จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ มีค่าน้อย ความโค้งที่จุดครากและจุดประลัยจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้อย่างเด่นชัด แต่เมื่อเพิ่มค่า ρ ให้มากขึ้น ความแตกต่างนี้จะลดลง การคำนวณค่าดัชนีของความเหนียวตามสมการที่ 1 จะได้

ของเหล็กเสริมไปเป็น $f_y = 4000$ ksc (ค่า f'_c คงเดิมที่ 240 ksc) ค่าดัชนีความเหนียวที่อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม $\rho = 0.75\rho_b$ ลดลง 7.9% แสดงว่าทั้งค่ากำลังอัดประลัย f'_c และหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม f_y มีผลต่อความเหนียวของหน้าตัด

เพื่อสอบเทียบ (Calibrate) ค่าดัชนีความเหนียวเมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมที่ $0.75\rho_b$ จากข้อมูลของประเทศสหรัฐอเมริกา ผู้แต่งได้ใช้แบบจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) เพื่อสุ่มการกระจายของหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเส้นโดยใช้ข้อมูลการกระจายจากกลุ่มตัวอย่างของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้ค่าเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation) ของอัตราส่วนหน่วยแรงดึงที่จุดครากต่อค่าที่ระบุไว้ตามมาตรฐานเป็น 1.145 และ 0.05 ตามลำดับ [9] (เป็นค่าที่แนะนำให้ใช้สำหรับการสอบเทียบ) ส่วนค่าเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation) ของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้นต่อค่าที่ระบุไว้ ตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาเป็น 1.0 และ 0.015 ตามลำดับ [9]

จากการสอบเทียบดังกล่าว สำหรับกรณีหน่วยแรงดึงจุดคราก $f_y = 2400, 3000, 4000, 5000$ ksc และ $f'_c = 200, 300, 400, 500$ ksc จะได้ดัชนีความเหนียวเป้าหมาย (Target Ductility Index) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อดัชนีความเหนียวที่เกิดขึ้นจากการสุ่มจะไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด (1-Tail Normal Distribution) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟดัชนีความเหนียวเป้าหมายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่า f_y และ f'_c ต่าง ๆ กัน

จากการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อที่จะหาค่าหน่วยแรงดึงที่จุดครากสูงสุด $f_{y,max}$ ที่ควรกำหนด (ใช้ที่ความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน และเป็น 2-Tail Normal Distribution เนื่องจากตามมาตรฐาน มอก. ได้กำหนดค่าต่ำสุด $f_{y,min}$ ก็คือค่า f_y ที่ระบุนั่นเอง) ที่ทำให้ค่าดัชนีความเหนียวที่เกิดจากการสุ่มมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าดัชนีความเหนียวเป้าหมายได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 (สมมุติให้อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้นต่อค่าที่ระบุมีค่าเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์ความแปรผันเป็น 1.0 และ 0.036 (คำนวณจากข้อกำหนด 4.2 ใน มอก. 20-2543 [1] และ 24-2548 [2] คือ $\pm 6\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 2-Tail Normal Distribution)

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าสำหรับแต่ละค่า f_y ที่ศึกษาจะได้ $f_{y,max}$ สูงสุดที่ยอมให้หรือ $f_{y,max}$ สำหรับกรณี $f'_c = 300, 400, 500$ ksc เท่ากันหมด แต่ค่า $f_{y,max}$ สำหรับกรณี $f'_c = 200$ ksc จะสูงกว่าสำหรับ f'_c ค่าอื่นๆ อยู่ 10 ถึง 20 ksc ดังนั้นเนื่องจากการกำหนดค่าสูงสุด ผู้แต่งจึงเลือกใช้ $f_{y,max}$ ค่าเดียวสำหรับ f_y แต่ละค่าจากกรณี $f'_c = 300, 400, 500$ ksc เป็นตัวแทนของทุกค่า f'_c ซึ่งค่า $f_{y,max}$ ตัวแทนนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

4. สรุปและขอเสนอแนะ

จากการศึกษาทางพารามิเตอร์เพื่อกำหนดค่า f_y สูงสุดที่ยอมให้ โดยการทำแบบจำลองมอนติคาร์โลเพื่อหาดัชนีความเหนียวของหน้าตัดที่รับโมเมนต์คด เมื่อกำหนดอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับค่าสูงสุดที่กำหนดใน ACI318-99 และใช้ข้อมูลการกระจายทางสถิติของหน่วยแรงดึงที่จุดคราก และพื้นที่หน้าตัดของประเทศสหรัฐอเมริกา มาเป็นตัวกำหนดดัชนีความเหนียวเป้าหมาย จากนั้นได้ทดลองกำหนดค่า f_y สูงสุดที่ยอมให้ และใช้ค่าการกระจายของหน่วยแรงดึงที่จุดครากและพื้นที่หน้าตัดซึ่งตีความจากข้อกำหนดในมาตรฐาน มอก. 20-2543 และ 24-2548 จากหลักฐานข้อมูลและการวิเคราะห์นี้ ผู้แต่งขอเสนอแนะให้ใช้ f_y สูงสุดที่ยอมให้คือ 2710, 3390, 4520, 5650 ksc สำหรับค่า f_y ที่ระบุ 2400, 3000,

4000, 5000 ksc หรือประมาณ 13% ของค่าที่ระบุ ซึ่งค่าดังกล่าวควรนำไปเพิ่มไว้ในมาตรฐาน มอก. 20 และ 24 ฉบับถัดไป

ตารางที่ 2 ค่า f_y สูงสุดที่ยอมให้หรือ $f_{y,max}$ สำหรับกรณี f_y และ f'_c ต่าง ๆ กัน รวมทั้งการเปรียบเทียบดัชนีความเหนียวเป้าหมาย และดัชนีความเหนียวเมื่อกำหนด $f_{y,max}$

$f_y = f_{y,min}$ (ksc)	f'_c (ksc)	$f_{y,max}$ (ksc)	ดัชนีความ เหนียว เป้าหมาย	ดัชนีความ เหนียวเมื่อ กำหนด $f_{y,max}$
2400	200	2720	1.838	1.839
	300	2710	1.725	1.731
	400	2710	1.813	1.814
	500	2710	1.900	1.900
3000	200	3400	1.742	1.742
	300	3390	1.635	1.635
	400	3390	1.715	1.715
	500	3390	1.791	1.791
4000	200	4540	1.621	1.617
	300	4520	1.535	1.532
	400	4520	1.609	1.606
	500	4520	1.675	1.670
5000	200	5660	1.544	1.549
	300	5650	1.467	1.464
	400	5650	1.535	1.531
	500	5650	1.592	1.587

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2543. มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 20-2543 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กเส้นกลม. กทม: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

ตารางที่ 3 f_y สูงสุดที่ยอมให้หรือ $f_{y,max}$ ที่แนะนำโดยผู้แต่งสำหรับค่า f_y ที่ระบุหรือ $f_{y,min}$ ต่างๆ กัน

f_y ที่ระบุ หรือ $f_{y,min}$	f_y สูงสุดที่ยอมให้ (ค่าที่แนะนำ) หรือ $f_{y,max}$	ร้อยละของ f_y สูงสุดที่ยอมให้ที่ เกินไปจาก f_y ที่ ระบุ
2400	2710	12.9
3000	3390	13.0
4000	4520	13.0
5000	5650	13.0

- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2548. มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24-2548 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย. กทม: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [3] นัตร สุจินดา, 2547. รายงานวิจัยของมหาวิทยาลัยศรีปทุม “ผลกระทบของเหล็กเสริมไม้ได้มาตรฐานที่มีต่อพฤติกรรมและกำลังขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดัด”. กทม: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [4] ACI Committee 318, 1999. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-99) and Commentary (ACI318R-99). Farmington Hill, Michigan: American Concrete Institute.
- [5] Jo, B., Tae, G. and Kwon B., 2004. Ductility Evaluation of Prestressed Concrete Beams with CFRP Tendons. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 23(8), 843-859.
- [6] MacGregor, J. G., 1992. Reinforced Concrete – Mechanics and Design, 2nd ed. Englewood Cliffs: New Jersey: Prentice-Hall.
- [7] Hognestad, E., Hansen, N. M., and Mc Henry, D., 1955. Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design. ACI Journal, Proceedings, 52(4), 455-479.
- [8] Whitney, C. S., 1937 Design of Reinforced Concrete Members Under Flexure Or Combined Flexure And Direct Compression. ACI Journal Proceedings, 33(4), 483-498.
- [9] Nowak, A. S. and Szerszen, M. M., 2003. Calibration of Design Code for Building (ACI318): Part 1 – Statistical Models for Resistance. ACI Structural Journal, 100(3), 377-382.