

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้กับกำลังที่ลดลง

# ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

## Accepted Tolerances with Decreasing Strength of Reinforced Concrete Columns

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยการตัดสินใจของวิศวกรผู้ควบคุมงานในสนาม โดยรวบรวมข้อมูลมาตรฐานของค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ วิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังของเสาคอนกรีตทางกายภาพทั้งหมด รวมถึงทางทฤษฎีว่าด้วยการล้าและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น โดยใช้งานวิจัยของ N.J.Gardner และ J.W.Zhao เป็นหลักในการช่วยคำนวณ หลังจากนั้นใช้โปรแกรม SafeRCcol เพื่อคำนวณออกแบบเสาโดยทฤษฎีกำลังประลัยแล้วนำมาเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพื่อประกอบการตัดสินใจในการควบคุมงาน

### ABSTRACT

The research aims to assist field engineers' decisions. The standard values of the accepted tolerances were collected. Factors resulting in decreasing strength in reinforced concrete columns and physical characteristics of those columns were studied and analyzed. In addition, the theory of creep and shrinkage of concrete resulting from humidity loss, developed by N.J. Gardner and J.W. Zhao, was applied for the calculation in this research. After that, the loading capacity of a column was calculated on the

basis of the ultimate design theory by using SafeRCcol program. This loading capacity, then, was compared with that calculated by considering the mentioned reasons. Lastly, safety factor ratios were calculated to support the field engineers' decisions.

### 1. บทนำ

ในการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสามารถในการรับน้ำหนัก ย่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กเสริม ไม้แบบ ขนาดรูปทรง และเทคนิคการก่อสร้าง แต่ในการทำงานก่อสร้างจริงความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาจะลดลงเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากอิทธิพลต่างๆ อาทิ การล้าและการหดตัวของคอนกรีต อีกปัจจัยหนึ่งที่มีมองเห็นได้ เช่น หดสอยกำลังอัดคอนกรีตต่ำกว่าการออกแบบแต่อยู่ในเกณฑ์หรือเสาทนศูนย์ขณะหล่อ ขนาดเหล็กไม่ได้ตามการออกแบบ ทำให้ผู้ควบคุมงานไม่มั่นใจว่าเสาจะยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

### 2. ปัจจัยที่ทำให้กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง

ปัจจัยต่างๆ ที่เป็นสาเหตุทำให้ค่าที่ได้จากการออกแบบแตกต่างจากค่าที่ได้จากการก่อสร้างจริงมีดังนี้

## 2.1 ความคลาดเคลื่อนของวัสดุประกอบ

### 2.1.1 คอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อมีผลเฉลี่ยกำลังอัดทดสอบสามครั้งติดต่อกันเท่ากับหรือมากกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่กำหนด (กำลังทดสอบแต่ละครั้งอาจจะต่ำกว่ากำลังอัดประลัยที่กำหนดได้ไม่เกินกว่า 35 กก./ตร.ซม.)

### 2.1.2 แบบหล่อ

มาตรฐานความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้ของแบบหล่อเสา (4)

- (1) ความคลาดเคลื่อนจากสายแนวตั้งในแต่ละชั้น ยอมรับไม่เกิน 10 มม.
- (2) ความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัดเสาน้อยกว่ากำหนดไม่เกิน 5 มม. และมากกว่ากำหนดไม่เกิน 10 มม.

### 2.1.3 เหล็กเสริมในคอนกรีต

เหล็กข้ออ้อย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2) ได้กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของเหล็กข้ออ้อย ในตารางที่ 1 และ 2

### 2.1.4 คอนกรีตเสริมเหล็ก

(1) ความคลาดเคลื่อนในแนวตั้ง

- (ก) ทุก 10 ฟุต (3.1 ม.) ยอมรับให้ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.25 นิ้ว (0.6 ซม.)
- (ข) สำหรับความสูงของโครงสร้างทั้งหมด คลาดเคลื่อนได้ไม่เกินหนึ่งนิ้ว

(2) ขนาดหน้าตัดเสา

- (ก) หน้าตัด 12 นิ้ว ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3/8 นิ้ว (0.93 ซม.)
- (ข) ขนาดหน้าตัดกว้างกว่า 12 นิ้ว ความคลาดเคลื่อนได้ 1/2 นิ้ว และ -3/8 นิ้ว

## 2.2 กำลังที่ลดลงของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการล้าและการหดตัว

### 2.2.1 การล้าของคอนกรีต

การล้าเกิดจากการคงค้างน้ำหนักบรรทุกไว้เป็นระยะเวลานาน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการล้าของ Branson (6) และของ N.J.Gardner และ J.W Zhao (7) พบว่าของ N.J.Gardner และ J.W Zhao มีตัวแปร

ตารางที่ 1 ชื่อขนาด ขนาดระบุ รวมต่อเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมวลต่อเมตรของเหล็กข้ออ้อย (มาตรฐานอุตสาหกรรม 2536)

ชื่อขนาด	ขนาดระบุ		มวลระบุ ต่อเส้น	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนร้อยละ	
	เส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุ (มม.)	พื้นที่หน้าตัดระบุ (มม. <sup>2</sup> )		ต่อเส้น	เฉลี่ย 5 เส้น
DB10	10	78.54	0.616	±6	±5
DB12	12	113.10	0.888	±6	±5
DB16	16	201.06	1.578	±6	±5
DB20	20	314.16	2.466	±5	±4
DB25	25	490.87	3.853	±5	±4
DB28	28	615.75	4.834	±5	±4
DB32	32	804.25	6.313	±4	±3.5
DB36	36	1017.88	7.990	±4	±3.5
DB40	40	1256.64	9.865	±4	±3.5

ตารางที่ 2 ความต้านทานแรงดึง ความต้านแรงดึงที่จุดคราก และความยืดของเหล็กข้ออ้อย (มาตรฐานอุตสาหกรรม 2536)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล (กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร)	ความต้านแรงดึงที่จุดคราก เมกะพาสคัล (กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร)	ความยืดร้อยละ
SD30	480(49)	295(30)	17
SD40	560(57)	390(40)	15
SD50	620(63)	490(50)	13



ที่เป็นจริงมากกว่า โดยเสนอสมการหาค่าสัมประสิทธิ์การลำ  
ดังสมการที่ (1)

$$C_1 = \left[ \frac{7.27 + \ln(t-t_0)}{17.18} \left[ 1.57 + 2.98 \frac{f_c'}{f_c} \left( \frac{254.83}{f_c'} \right)^{1/3} \right] \left( (1-H)^2 \left( \frac{t-t_0}{1-10\alpha_0 \left( \frac{t-t_0}{S} \right)^{1/3}} \right) \right) \right] \quad (1)$$

จากสมการ (1) สามารถอธิบายสมการได้ ดังนี้  
พจน์ (a) เป็นความสัมพันธ์ของเวลากับน้ำหนักบรรทุก  
พจน์ (b) เป็นความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต  
พจน์ (c) เป็นความสัมพันธ์ของความชื้นและพื้นที่ผิวสัมผัส  
อากาศและปริมาตร

โดยที่

$C_1$  = สัมประสิทธิ์การลำของคอนกรีต ณ เวลาใดๆ หลังรับ  
น้ำหนักบรรทุก

$t$  = อายุคอนกรีตหลังเทลงแบบ

$t_0$  = เวลาที่คอนกรีตได้รับน้ำหนักบรรทุก

$f_c'$  = ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน  
กก./ซม.<sup>2</sup>

$f_{c1}'$  = ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อเริ่มต้น  
รับน้ำหนักบรรทุก กก./ซม.<sup>2</sup>

$h$  = ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในรอบ 30 ปี  
มีค่าเท่ากับ 77% (ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา  
เมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2541)

$V$  = ปริมาตรคอนกรีต

$S$  = พื้นที่ผิวสัมผัสอากาศ

เนื่องจากคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัด ตามอายุที่  
เพิ่มขึ้น และกำลังตามอายุ ดังสมการ

$$f_{c1}' = \frac{t}{a + bt} f_c' \quad (2)$$

โดยที่  $f_{c1}'$  = ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เวลาใดๆ  
กก./ซม.<sup>2</sup>

สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

$a = 4.06$        $b = 0.85$

สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3

$a = 2.36$        $b = 0.92$

เมื่อแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก และใช้  
ทฤษฎีความคล่องจอง (Compatible) ในความเค้น  
และความเครียดจะได้ค่าหน่วยความเค้นในเหล็กเสริม  
เมื่อมีผลการคืบของคอนกรีต

$$f_s = n(1 + C_1) f_c \quad (3)$$

และแรงที่สามารถรับได้

$$P = f_{sc} \{ A_c + A_s n(1 + C_1) \} \quad (4)$$

หรือจัดรูปให้อยู่ในหน่วยแรงในเหล็ก

$$P = f_{sc} \left\{ \frac{A_c}{n(1 + C_1)} + A_s \right\} \quad (5)$$

โดยที่  $P$  = น้ำหนักที่กระทำ (กก.)

$f_{sc}$  = หน่วยแรงที่เกิดในคอนกรีต (กก./ซม.<sup>2</sup>)

$f_{sc}$  = หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็ก (กก./ซม.<sup>2</sup>)

## 2.2.2 การสูญเสียความชื้นในคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ต้องมีแรงภายนอก  
กระทำ ทำให้คอนกรีตถ่ายแรงสู่เหล็กเช่นเดียวกับการลำ  
งานวิจัยนี้ใช้ค่าการหดตัวของคอนกรีตของ N.J. Gardner  
และ J.W.Zhao (7)

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{shu} \beta(h) \beta(t)$$

โดยที่  $\epsilon_{sh}$  = การหดตัวของคอนกรีตอย่างอิสระเมื่อไม่มี  
เหล็กเสริม

$\epsilon_{shu}$  = การหดตัวสูงสุดของคอนกรีต

$\beta(t)$  = ความสัมพันธ์ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่คอนกรีต  
ได้รับการบ่ม ปริมาตร และพื้นที่ผิวสัมผัส

$\beta(h)$  = ความสัมพันธ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์  
จากการสมดุลของแรงสามารถหาหน่วยแรงใน  
คอนกรีต

$$f_{cs} = \frac{\epsilon_{sh} E_s}{n(1 + C_1) + \frac{A_c}{A_s}} \quad (6)$$

## 2.3 ความไม่เที่ยงตรงในการก่อสร้าง

เช่น การหล่อคอนกรีตหนีสุนัข เสาสั้นหนีสุนัข  
เป็นผลให้เสาเสียวางไป เพื่อหากำลังที่ลดลงของคอนกรีต  
เสริมเหล็ก จากหลักการสมดุลของแรง

$$f_{ce} \max \text{ or } \min = \frac{P}{A_s} \pm \frac{M_e}{I_s} \quad (7)$$

โดยที่  $M$  = ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหนีสุนัข  
ของเสา (กก.-ม.)

$e$  = ระยะหนีสุนัขที่เกิดขึ้น (ซม.)

$c$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผิว (ซม.)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ระยะเวลาที่พิจารณา	5 ปี	51 ปี
กำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรการออกแบบ	412,622	412,622
กำลังรับน้ำหนักเมื่อไม่คิดการสูญเสียกำลังวัสดุ	615,038	521,374
การสูญเสียกำลังจากน้ำหนักคงค้าง	62,736	70,825
การสูญเสียกำลังจากการสูญเสียความชื้น	29,947	37,244
การสูญเสียกำลังจากเสาหินศูนย์	16,205	16,205
น้ำหนักสุทธิที่เสาคอนกรีตรับได้	506,150	447,100

$f_{ce}$  = หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดแปลง  
(กก./ชม.<sup>2</sup>)

$l_i$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียแปลง (ชม.<sup>4</sup>)

$A_i$  = พื้นที่หน้าตัดแปลง (ชม.<sup>2</sup>)

### 3. ตัวอย่างการวิเคราะห์ โดยการทำงาน ของโปรแกรม SafeRCol

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SafeRCool เป็นโปรแกรม Windows ที่สร้างจาก Delphi 2 ข้อมูลเสาที่ใช้ในการคำนวณขนาด 50 x 50 ซม. สูง 2.75 ม. กำลังอัดประลัยคอนกรีต 280 กก./ชม.<sup>2</sup> เหล็กชั้น 12-DB 20 กำลังครากเหล็ก 4000 กก./ชม.<sup>2</sup>

ข้อมูลจากการก่อสร้างจริง ขนาด 49.8 x 49.6 ซม. กำลังอัดประลัยเฉลี่ย 280.33 กก./ชม.<sup>2</sup> กำลังดึงเหล็กคราก 4004 กก./ชม.<sup>2</sup> น้ำหนักเหล็กคลาดเคลื่อน -1.77% ระยะหนีสุนัข 0.50 ซม. ดังแสดงในตารางที่ 3

### 4. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยเมื่อนำตัวแปรจากการก่อสร้างจริงบรรจุลงไปโปรแกรมช่วยในการคำนวณค่าแรงที่เสารับได้ โดยใช้ความคล่องของของค่าการหดตัวของเหล็กและคอนกรีต เป็นประการสำคัญหลักในการพิจารณา ปรากฏว่าหากความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้างมีไม่มากนักและน้ำหนักบรรทุกมีค่าไม่มาก ค่าที่ได้ออกมาจะมีความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุก แต่หากความผิดพลาดมากโดยเฉพาะการหนีสุนัขในเสาขนาดเล็ก จะมีผลกับการรับกำลังของเสา ลดลง และสำหรับเสาขนาดใหญ่ จะมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีกำลังประลัยมากเมื่อมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์

ค่ากำลังคอนกรีต กำลังเหล็ก และจ่านวนเปอร์เซ็นต์เหล็ก มีผลกับการรับกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับเวลาการใช้งาน

### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2527. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กเส้นกลม มอก. 20-2527. กรุงเทพฯ. 14 น.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2526. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กข้ออ้อย มอก. 24-2536. กรุงเทพฯ. 13 น.
- [3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2534 มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ว.ส.ท. กรุงเทพฯ. 91 น.
- [4] American Concrete Institute (1989). Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI 318-89). Detroit.
- [5] Mc Gregor, J.G. (1976) Safety and Limite states Design for Reinforced Concrete. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.3. No. pp.484-513.
- [6] Branson, D.E. (1977). Deformation of Concrete Structure, McGraw-Hill. New York, 15p.
- [7] Gardner, N.J. and Zhao, J.W. (1993), Creep and Shrinkage Revisited, ACI Materials Journal, Vol.90, No.3, pp.236-245

