

การออกแบบควบคุมความเค้นเพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวในพื้น Post tension

ประโยชน์ของพื้น Post tension ข้อหนึ่งคือการควบคุมการเกิดรอยร้าวที่ผิวเนื่องจากแรงดัดที่จะเกิดขึ้นในแผ่นพื้น โดยมาตรฐาน วสท. 1009-34 ซึ่งมีเนื้อหาสอดคล้องกับ ACI318 (American Concrete Institute) ได้กำหนดความเค้นดึงและความเค้นอัดที่เกิดขึ้นที่ผิวดังนี้

วสท.1009 ข้อ3.2.1 (ACI 18.4.1) ความเค้นที่ผิวคอนกรีตหลังจากถ่ายแรงทันที

- ผิวที่เกิดความเค้นอัดต้องมีค่าไม่เกิน $0.60 f_{c'i}$ ksc
- ผิวที่เกิดความเค้นดึงต้องมีค่าไม่เกิน $0.795 \sqrt{f_{c'i}}$ ksc

$f_{c'i}$ คือกำลังอัดของคอนกรีต ณ เวลาที่ทำการอัดแรง

วสท.1009 ข้อ3.2.2 (ACI 18.4.2) ความเค้นที่ผิวคอนกรีตที่น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน

- ผิวที่เกิดความเค้นอัดต้องมีค่าไม่เกิน $0.45 f_c'$ ksc
- ผิวที่เกิดความเค้นดึงต้องมีค่าไม่เกิน $1.59 \sqrt{f_c'}$ ksc

f_c' คือกำลังอัดของคอนกรีตที่ขณะใช้งาน

ข้อกำหนดนี้ได้มีการปรับปรุงใน ACI318 ปี 2002 โดยการควบคุมความเค้นดึงที่ผิวคอนกรีต ขณะใช้งาน มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีรายละเอียดดังนี้

ชั้นส่วนคอนกรีตอัดแรงรับแรงดัดแบ่งออกเป็น 3 Class

1. Class U (Uncracked) เป็นชั้นส่วนที่ไม่เกิดรอยร้าวที่ผิว ค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นไม่เกิน $1.99 \sqrt{f_c'}$
2. Class T (Transition) ช่วงเปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดรอยร้าวและไม่เกิดรอยร้าว ค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นมากกว่า $1.99 \sqrt{f_c'}$ แต่ไม่เกิน $3.18 \sqrt{f_c'}$
3. Class C (Cracked) เป็นชั้นส่วนที่เกิดรอยร้าวที่ผิว ค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นมากกว่า $3.18 \sqrt{f_c'}$

การควบคุมความเค้นดึงและความเค้นอัดที่ผิวคอนกรีตหลังจากถ่ายแรงทันที ยังคงใช้เหมือนข้อ 18.4.1 ใน ACI ปีก่อนหน้า และการควบคุมความเค้นอัดที่ผิวคอนกรีตที่น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ก็ยังคงใช้เหมือนข้อ 18.4.2 ใน ACI ปีก่อนหน้า

ข้อแตกต่างในการตรวจสอบที่สภาวะใช้งานของแต่ละ class

- ในด้านการคำนวณเค้น Class U และ Class T สามารถใช้หน้าตัดที่ไม่เกิดรอยร้าวในการหาค่าความเค้นได้ ส่วน Class C ต้องคำนวณค่าความเค้นจากหน้าตัดที่เกิดรอยร้าว
- การคำนวณระยะโยกในระยยาว Class U ใช้ I_{gross} ส่วน Class T และ Class U ใช้ $I_{effective}$

- สำหรับ Class C จะต้องควบคุมระยะห่างของลวดอัดแรงและเหล็กเสริมเพื่อควบคุมรอยร้าวที่เกิดขึ้น ตามที่กำหนดใน ACI 18.4.4.1
- ใน Class C ต้องคำนวณค่า Δf_{ps} โดยที่ Δf_{ps} คือผลต่างระหว่างความเค้นในลวดอัดแรงขณะใช้งานโดยคิดจากหน้าตัดที่มีรอยร้าว กับแรงดึงประสิทธิภาพ f_{se} ค่า Δf_{ps} จะต้องไม่เกิน 2500ksc ถ้า Δf_{ps} มีค่าไม่เกิน 1400 ksc จะไม่จำเป็นต้องควบคุมระยะห่างของลวดอัดแรงและเหล็กเสริมใน Class C ตามที่กำหนดใน ACI 18.4.4.1

โดยในมาตรฐาน ACI ได้สรุปเป็นตารางดังนี้

	Prestressed			Nonprestressed
	Class U	Class T	Class C	
Assumed behavior	Uncracked	Transition between uncracked and cracked	Cracked	Cracked
Section properties for stress calculation at service loads	Gross section 18.3.4	Gross section 18.3.4	Cracked section 18.3.4	No requirement
Allowable stress at transfer	18.4.1	18.4.1	18.4.1	No requirement
Allowable compressive stress based on uncracked section properties	18.4.2	18.4.2	No requirement	No requirement
Tensile stress at service loads 18.3.3	$\leq 7.5\sqrt{f'_c}$	$7.5\sqrt{f'_c} < f_t \leq 12\sqrt{f'_c}$	No requirement	No requirement
Deflection calculation basis	9.5.4.1 Gross section	9.5.4.2 Cracked section, bilinear	9.5.4.2 Cracked section, bilinear	9.5.2, 9.5.3 Effective moment of inertia
Crack control	No requirement	No requirement	10.6.4 Modified by 18.4.4.1	10.6.4
Computation of Δf_{ps} or f_s for crack control	—	—	Cracked section analysis	$M/(A_s \times \text{lever arm})$, or $0.6f_y$
Side skin reinforcement	No requirement	No requirement	10.6.7	10.6.7

แต่ทั้งนี้ในมาตรฐาน ACI318-2002 และปีต่อๆ มา ได้กำหนดไว้ว่า ระบบพื้นสองทางคอนกรีตอัดแรง จะต้องออกแบบให้เป็น Class U

สำหรับมาตรฐาน ACI318-2014 มีการจัดเรียงบทใหม่ โดยแยกการออกแบบองค์อาคารต่างๆ เป็นบท เพื่อต้องการรวบรวมการออกแบบและการให้รายละเอียดของแต่ละองค์อาคารไว้ในบทเดียวกัน อาจทำให้เกิดความไม่คุ้นเคยแก่ผู้ที่คุ้นกับ ACI318 ปี 2011 ลงมา แต่ก็ควรทำความเข้าใจ เพื่อการติดตามการพัฒนาของมาตรฐาน ACI318 ในอนาคต โดยในหัวข้อเรื่องความเค้นที่ยอมให้ในชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงรับแรงดัดจะอยู่ในหัวข้อที่ 24.5 ซึ่งโดยเนื้อหาไม่ได้เปลี่ยนแปลงจาก ACI318-2011 แต่จะมีการสรุปเป็นตารางทำให้ดูง่ายขึ้น

ลองพิจารณามาตรฐานหรือเอกสารเกี่ยวกับการออกแบบพื้น Post tension ของต่างประเทศ เพื่อดูว่ามีการควบคุมความเค้นเพื่อป้องกันการแตกร้าวมีลักษณะการควบคุมอย่างไร

Technical Report No.43 Post-tensioned concrete floors design handbook

เป็น Handbook ที่มีคณะทำงานเป็นบริษัทออกแบบโครงสร้างในต่างประเทศ

MEMBERS OF THE WORKING PARTY

Robin Whittle	Arup (Chairman)
Paul Bottomley	Freyssinet Ltd
John Clarke	The Concrete Society (Secretary)
Huw Jones	Strongforce Engineering, O'Rourke Group
Tony Jones	Arup
Peter Matthew	Matthew Consultants
Jim Paterson	Robert Benaim Associate
Andy Truby	Gifford Consulting

CORRESPONDING MEMBERS

Gil Brock	Prestressed Concrete Design Consultants Pty Ltd
Gordon Clark	Gifford Consulting

โดยมีการควบคุมความเค้นในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าวในหัวข้อที่ 5.8.1 Serviceability Limit state: stresses after all losses และ 5.8.2 Serviceability Limit state: stresses at transfer ดังนี้

สำหรับช่วงใช้งาน

ถ้าวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า (Equivalent Frame Method)

Table 4: Allowable average stresses in flat slabs for full panel width.

Location	In Compression	In Tension	
		With bonded reinforcement ²	Without bonded reinforcement
Support	$0.3f_{ck}^1$	$0.9f_{ctm}$	$0.3f_{ctm}$
Span	$0.4f_{ck}^1$		

Note: Bonded reinforcement may be either bonded tendons or un-tensioned reinforcement.

¹ If ductility check is carried out this limit may be exceeded

² The spacing of bars or tendons should be $\leq 500\text{mm}$, otherwise the stress for 'without bonded reinforcement' should be used.

ถ้าวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

Table 5: Allowable stresses in flat slabs using 'design strip' approach.

Location	In Compression	In Tension	
		With bonded reinforcement ²	Without bonded reinforcement
Support	$0.4f_{ck}^1$	$1.2f_{ctm}$	$0.4f_{ctm}$
Span			

¹ If ductility check is carried out this limit may be exceeded

² The spacing of bars or tendons should be $\leq 500\text{mm}$, otherwise the stress for 'without bonded reinforcement' should be used.

โดยที่ f_{ck} คือ Characteristic compressive cylinder strength of concrete at 28 days
 f_{ctm} คือ Mean value of axial tensile strength of concrete

Strength classes for concrete															Analytical relation / Explanation
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	2.8
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	$f_{ctm} = 0.30 \times f_{ck}^{0.666} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ck,0.05}$ (MPa)	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5	$f_{ck,0.05} = 0.7 \times f_{ck}$ 5% fractile
$f_{ck,0.95}$ (MPa)	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3	5.5	5.7	6.0	6.3	6.6	$f_{ck,0.95} = 1.3 \times f_{ck}$ 95% fractile

สำหรับช่วงถ่ายแรง

การควบคุมความเค้นในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว จะใช้เหมือนตารางที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปลี่ยนค่า f_{ck} เป็นค่า f_{ci}

โดยที่ f_{ci} คือ Concrete strength at transfer

- British Standard BS8110

มาตรฐานการออกแบบ BS8110 มีการควบคุมความเค้นในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4 สำหรับพื้น ซึ่งได้กำหนดให้ใช้เหมือนคาน ที่ระบุในหัวข้อที่ 4.3.4 Serviceability limit state for beam และ 4.3.5 Stress limitation at transfer for beams ดังนี้

สำหรับช่วงใช้งาน

ความเค้นอัดที่ผิวต้องมีค่าไม่เกิน $0.33f_{cu}$ ที่กลาง span และ $0.40f_{cu}$ บริเวณที่รองรับ

ความเค้นดึงที่ผิวแบ่งเป็น Class ดังนี้

Class 1 ไม่เกิดความเค้นดึงที่ผิว

Class 2 เกิดความเค้นดึงที่ผิว แต่ไม่เกิน $0.36\sqrt{f_{cu}}$ รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

Table 4.1 Design flexural tensile stresses for class 2 members: serviceability limit state: cracking				
Type of prestressed member	Design stress for concrete grade			
	30 N/mm ²	40 N/mm ²	50 N/mm ²	60 N/mm ²
Pre-tensioned	—	2.9	3.2	3.5
Post-tensioned	2.1	2.3	2.6	2.8

Class 3 เกิดความเค้นดึงที่ผิว ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวกว้างไม่เกิน 0.10mm ในบริเวณที่สิ่งแฉดล้อมรอบแรง และไม่
เกิน 0.20mm ในทุกๆ องค์อาคาร ค่าความเค้นดึงเป็นไปตาม Table 4.2 และปรับแก้โดยคูณด้วย Table 4.3

Table 4.2 Design hypothetical flexural tensile stresses for class 3 members

Group	Limiting Crack width mm	Design stress for concrete grade		
		30 N/mm ²	40 N/mm ²	50 and over N/mm ²
a) Pre-tensioned tendons	0.1	-	4.1	4.8
	0.2	-	5.0	5.8
b) Grouted post-tensioned tendons	0.1	3.2	4.1	4.8
	0.2	3.8	5.0	5.8
c) Pre-tensioned tendons distributed in the tensile zone and positioned close to the tension faces of the concrete	0.1	-	5.3	6.3
	0.2	-	6.3	7.3

Table 4.3 Depth factors for design tensile stresses for class 3 members

Depth of member mm	Factor
200 and under	1.1
400	1.0
600	0.9
800	0.8
1000 and over	0.7

NOTE: Intermediate values are found by interpolation.

โดยที่ f_{cu} คือ Characteristic compressive cube strength of concrete

สำหรับช่วงถ่ายแรง

ความเค้นอัดที่ผิวต้องมีค่าไม่เกิน $0.50f_{ci}$

ความเค้นดึงที่ผิวแบ่งเป็น Class ดังนี้

Class 1 เกิดความเค้นดึงที่ผิวไม่เกิน 1.0 N/mm^2

Class 2 เกิดความเค้นดึงที่ผิวไม่เกิน $0.36\sqrt{f_{ci}}$ ต้องมีเหล็กเสริมเพิ่มบริเวณผิวที่เกิดความเค้นดึง, N/mm^2

Class 3 ถ้าเกิดความเค้นดึงที่ผิวเกิน $0.36\sqrt{f_{ci}}$ ต้องคำนวณออกแบบโดยคิดเป็นหน้าตัดที่มีรอยร้าว, N/mm^2

จะเห็นว่าแต่ละมาตรฐานที่ยกมาเป็นตัวอย่าง มีลักษณะการควบคุมความเค้นดึงที่ต่างวิธีกัน และมีค่าการควบคุมความเค้นอัดเป็นสมการที่แปรผันกับ f_{ci}' แตกต่างจากที่มาตรฐาน ACI กำหนดไม่มากนัก ซึ่งอาจจะเกิดจากหลักคิดในการออกแบบและผลงานวิจัยที่ต่างกัน

สำหรับ Post-tensioning manual ซึ่งเป็นคู่มือเกี่ยวกับงาน Post tension ของ Post-Tensioning Institute หรือสถาบัน PTI ก็มีเนื้อหาที่เป็นมาตรฐานในการออกแบบระบุไว้เช่นกัน โดยมาตรฐานในการออกแบบส่วนใหญ่จะอ้างอิงตาม ACI318-2002 การกำหนดความเค้นเพื่อควบคุมการแตกร้าวก็จะเหมือนกับกล่าวถึงในช่วงแรกของ

บทความ นอกจากนี้ ขั้นตอนการก่อสร้างพื้น Post tension ก็มีส่วนสำคัญที่ช่วยควบคุมให้งานพื้น Post tension มีคุณภาพ โดยในคู่มือนี้ มีการแนะนำขั้นตอนการทำงาน รายละเอียดมาตรฐาน และระบุการตรวจสอบมาตรฐานในการ

ทำงานไว้ด้วย รวมทั้งสถาบัน PTI ยังมีการให้ความรู้ในงานคอนกรีตอัดแรง ให้ข่าวสาร การอบรม และจัดทำเอกสารเผยแพร่ความรู้มาเป็นระยะเวลา 40 ปี โดยสามารถติดตามได้ที่ <http://www.post-tensioning.org/> ทั้งนี้เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ในงาน Post tension บริษัท SNP Post tension จำกัด ได้เป็นสมาชิกของสถาบัน PTI เพื่อนำความรู้มาพัฒนาองค์กรและพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างพื้น Post tension ให้ก้าวหน้าต่อไป



MEMBER
POST-TENSIONING
INSTITUTE®

เอกสารอ้างอิง

1. ACI Committee 318; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary"
2. ACI Committee 318; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary"
3. ACI Committee 318; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary"
4. ACI Committee 318; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary"
5. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ; สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย EIT1009-2534
6. Structural use of concrete Part 1. Code of practice for design and construction, BS8110:Part 1 1997
7. Technical Report No.43 Post-tensioned concrete floors design handbook 2nd edition, Report of a concrete society working party
8. Post-tensioning manual 6th edition; Post-tensioning institute