

البيتون مسبق الإجهاد (Prestressed Concrete)

تقييم الأفعال – الضياعات – تراكيب الأحمال - تطبيقات

1- تقييم الأفعال

تؤخذ قيم الأحمال الواجب استعمالها في تصميم عناصر مسبق الإجهاد، من الكود الأساس بكامل تفاصيلها وقيمها، مع إضافة قوى مسبق الإجهاد.

2- تقييم قوى مسبق الإجهاد

لتحديد الحمل الناتج من قوى مسبق الإجهاد PT تتم الاستعانة بمسار وتر الشدّ اللاحق (Tendon) لتقدير مركّبات القوة المطبّقة الأفقيّة والشاقوليّة، قبل حصول الضياعات وبعده.

3- الضياعات في إجهادات تسليح مسبق الإجهاد

☒ مقدّمة

تتعرّض قوة مسبق الإجهاد الأوّليّة المطبّقة على العنصر البيتوني، لنقصان تدريجيّ، خلال فترة، تقارب السنوات الخمس. لذلك؛ فمن المهمّ تحديد مستوى قوة مسبق الإجهاد، لكلّ مرحلة من مراحل التحميل؛ بدءاً من مرحلة نقل قوة مسبق الإجهاد إلى البيتون؛ مروراً بمراحل مسبق الإجهاد المختلفة؛ وصولاً إلى القوة الحدّيّة. ويكون ذلك بحسم الضياعات الحادثة من قيمة قوة مسبق الإجهاد من قوّة الشدّ الأوّليّة.

يمكن مبدئيّاً تبويب الضياعات في قوّة مسبق الإجهاد ضمن فئتين:

- **ضياع مرّن مباشر:** يحدث خلال التصنيع والبناء، ويتضمّن نقصان الطول المرّن للبيتون Δf_{pES} وضياعات الإرساء Δf_{pA} وضياعات الاحتكاك Δf_{pF} .
- **ضياعات تابعة للزمن:** مثل الزحف Δf_{pCR} والانكماش Δf_{pSH} وتلك الناتجة بسبب تأثيرات الحرارة وارتخاء الحديد Δf_{pR} وضياعات انعطاف العنصر Δf_{pB} التي يجب تحديدها جميعاً في حالة حدّ الإجهاد للحمولة الاستثنائيّة، لعنصر البيتون المسلح مسبقاً الإجهاد.

ملاحظة: يعامل ضياع تأثيرات الحرارة بشكل مماثل، تقريباً، لضياع نقصان الطول المرّن للبيتون.

إذا كانت القيم التقديرية للضياعات أقلّ من الواقع، فإنّ ذلك سيؤثّر بالنقصان على السهم العكسيّ، وعلى كفاية مساهمة تسليح مسبق الإجهاد في مقاومة العنصر للأحمال المطلوبة، وبالمقابل؛ فإنّ ضياعات مقدّرة بقيم أعلى من الواقع، ستؤدّي إلى قوى مسبق الإجهاد أكبر من اللازم، تزيد من السهم العكسيّ، وتزيد في نقصان طول العنصر البيتوني، وقد تسبّب تجاوزاً للحدود المسموحة للإجهادات الناتجة في العنصر.

إنّ التحديد الدقيق لقيمة هذه الضياعات؛ وخاصّة تلك التابعة للزمن، غير ممكن عمليّاً؛ لعلاقتها بعوامل عديدة مترابطة فيما بينها. تختلف العلاقات التجريبيّة لتقدير الضياعات، باختلاف الكودات أو التوصيات العالميّة المتخصّصة.

بالنتيجة؛ فإنّ تقديرًا اجماليًا للضياعات، يكون أكثر واقعية؛ وخاصة عند إجراء التصميم اليوميّ في الظروف العادية. يمكن تلخيص هذه الضياعات الإجمالية في الجدول المأخوذ من AASHTO والجدول المأخوذ من PTI، وهي تتضمّن نقصان الطول المرن، وارتخاء حديد التسليح، والزحف، والانكماش، ولا تشمل الاحتكاك، ويمكن تطبيقها في حالة ظروف التحميل النموذجية الروتينية؛ باستعمال بيتون عاديّ، مع مراقبة جيّدة في كامل مراحل البناء، وضمن الظروف البيئية الجيدة المحيطة. يجب إجراء تحليل مفصّل في حال عدم توافر هذه الشروط القياسية، أو كان المشروع مهمًا أو كبيراً.

الضياعات الإجمالية حسب AASHTO

أنواع فولاذ مسبق الإجهاد	الضياعات	
	مقاومة البيتون $f'_c = 27.5 \text{ N/mm}^2$	مقاومة البيتون $f'_c = 35 \text{ N/mm}^2$
جدائل الشدّ السابق	-----	310 N/mm ²
جدائل واسلاك الشدّ اللاحق(1)	221 N/mm ²	228 N/mm ²
القضبان	152 N/mm ²	159 N/mm ²
(1) الضياعات لا تشمل الاحتكاك		

قيم ضياعات مسبق الإجهاد التقريبية للشدّ اللاحق حسب PCI

أنواع فولاذ مسبق الإجهاد	الضياعات	
	البلاطات	الجوائز
جدائل محرّرة الجهد 1860 MPa واسلاك محرّرة الجهد 1656 MPa	207 N/mm ²	241 N/mm ²
القضبان	138 N/mm ²	172 N/mm ²
جدائل ذات استرخاء قليل 1860 MPa	103 N/mm ²	138 N/mm ²

يبين الجدول التالي ملخصاً لأسباب ضياعات مسبق الإجهاد ومراحل حدوثها؛ حيث z تعني مرحلة الشدّ، عند تحمل البيتون الأولي، و z تعني مرحلة الشدّ على الأوتار من عملية الشدّ. من هذا الجدول، يمكن حساب الضياعات الكليّ لمسبق إجهاد العناصر، من أجل الشدّ المسبق، والشدّ اللاحق؛ كما يلي:

نوع ضياعات مسبق الإجهاد للشدّ السابق وللشدّ اللاحق

نوع الضياع	الحادث	مراحل حدوث	الضياعات
------------	--------	------------	----------

نوع ضياعات مسبق الإجهاد	العناصر سابقة الشد	العناصر لاحقة الشد	الفترة الزمنية لحدوث الضياع	الضياع الكلي أو خلال عمر العنصر
تقلص البيتون المرن	عند نقل القوة	عند تتابع الشد	----	Δf_{pES}
ارتخاء الوتر	قبل نقل القوة وبعدها	بعد نقل القوة	$\Delta f_{pR}(t_i, t_j)$	Δf_{pR}
زحف البيتون	بعد نقل القوة	بعد نقل القوة	$\Delta f_{pCR}(t_i, t_j)$	Δf_{pCR}
انكماش البيتون	بعد نقل القوة	بعد نقل القوة	$\Delta f_{pSH}(t_i, t_j)$	Δf_{pSH}
الاحتكاك	----	عند الشد بالمكبس	----	Δf_{pF}
تمركز الوتر في المرسي	----	عند نقل القوة	----	Δf_{pA}
المجموع	عمر العنصر	خلال	$\Delta f_{pT}(t_i, t_j)$	Δf_{pT}

ملاحظة: في حال حصول ضياع في الإجهادات؛ نتيجة اتصال عنصر مسبق الإجهاد مع عناصر إنشائية ملاصقة، فيجب أخذ هذا الضياع في التصميم؛ هذه الضياعات غير مغطاة في هذا الملحق.

(i) الضياعات في العناصر مسبق الشد

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH}$$

$$\Delta f_{pR} = \Delta f_{pR}(t_0, t_{tr}) + \Delta f_{pR}(t_{tr}, t_s) \quad \text{حيث:}$$

t_0 الزمن وقت الشد

t_{tr} الزمن عند نقل القوة

t_s الزمن عند ثبات الضياع

يجب إجراء حسابات الضياع من ارتخاء فولاذ تسليح الشد السابق على مرحلتين؛ الأولى: من أجل فرق الزمن بين t_0 زمن شد التسليح و t_{tr} زمن انتقال القوة، وهو وقت تحرير التسليح من المساند المؤقتة؛ والثانية: من زمن انتقال القوة إلى البيتون t_{tr} إلى نهاية الفترة الزمنية t_s المعتبرة.

يعطى إجهاد الشد الاولي f_{pi} بدلالة إجهاد الشد f_{pj} محسوماً منه ضياع الارتخاء وتقلص البيتون المرن

$$f_{pi} = f_{pj} - \Delta f_{pR}(t_0, t_{tr}) - \Delta f_{pES}$$

(ii) الضياعات في العناصر لاحقة الشد

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH}$$

Δf_{pES} تطبق فقط عند شد الأوتار على مراحل بالتسلسل، وليس دفعة واحدة.

حيث f_{pi} إجهاد الشد الأولي، الذي يتعرض له عنصر البيتون

f_{pj} هو الإجهاد المطبق على الأوتار من عملية الشد بالمكبس Jacking Stress

مجموع الضياعات Δf_{pT}

في حالة الشدّ اللاحق، يبدأ حساب ضياع الإرتخاء بين الزمن عند نقل القوّة $t_1 = t_{tr}$ ونهاية الفترة الزمنية t_2 المعتبرة. وتكون قيمة الإجهاد الأوّلي؛ كما يلي:

$$f_{pi} = f_{pj} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF}$$

Elastic Shortening of Concrete ES

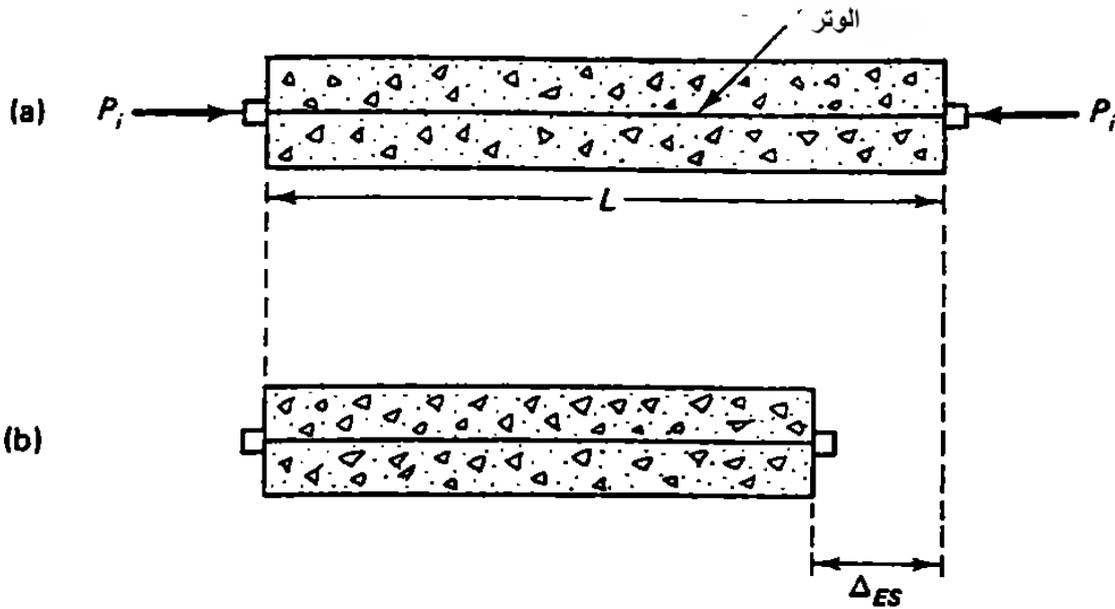
⊠ تقلص البيتون المرن ES

يقصر طول العنصر البيتوني عند تطبيق قوّة مسبق إجهاد عليه. وبما أنّ الأوتار مرتبطة مع البيتون المجاورة، فإنّها تفقد جزءاً من قوّة مسبق الإجهاد، التي تحملها.

Pretensioned elements

- العناصر السابقة الشدّ

من أجل العناصر سابقة الشدّ (سابقة الصنع)، فإنّ قوة الضغط، التي يتعرّض لها الجائز من الأوتار، ينتج عنها قصر في الطول؛ كما هو مبين في الشكل التالي.



(a) طول الجائز قبل تطبيق قوّة مسبق الإجهاد (b) طول الجائز بعد تطبيق قوّة مسبق الإجهاد

إنّ القصر في واحدة الطول في البيتون هو: $\epsilon_{ES} = \Delta ES/L$ ، ومنه:

$$\epsilon_{ES} = \frac{f_c}{E_c} = \frac{P_i}{A_c E_c}$$

وبما أنّ وتر مسبق الإجهاد، يتعرض لنفس القصر

$$\Delta f_{pES} = E_c \epsilon_{ES} = \frac{E_s P_i}{A_c E_c} = n f_{cs}$$

يكون الإجهاد في مركز ثقل الفولاذ في البيتون الناتج من الإجهاد المسبق الأوّلي:

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c}$$

إذا كان للوتر لامركزيّة، مقدارها e في وسط الجائز، نتج عنها العزم M_D من الوزن الذاتي، يكون الإجهاد، الذي يتعرض له البيتون في المقطع وسط الجائز، وعند مستوى فولاذ التسليح:

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{M_D e}{I_c}$$

حيث P_i تكون لها قيمة أدنى، بعد نقل قوّة مسبق الإجهاد. إنّ الانخفاض الصغير لقيمة P_i إلى P_j يحدث بسبب أنّ القوّة في الفولاذ مسبق الإجهاد، بعد نقلها مباشرة، تكون أقلّ من قوّة مسبق الإجهاد الأولى P_j للضياعات الموضّحة أدناه.

بسبب صعوبة تقدير القيمة المخفّضة لـ P_i بدقّة؛ وحيث أنّ الخبرة، بيّنت أنّ الانخفاض هو جزء بسيط، فإنّه يمكن استعمال القيمة الأولى لـ P_j قبل النقل؛ عوضاً عن P_i أو تخفيض قيمة P_j بما يقارب (10%) في حال الرغبة بذلك.

- العناصر اللاحقة الشدّ Post-Tensioned Elements

يتغيّر الضياع من نقصان الطول المرن في الجوائز اللاحقة الشدّ، من الصفر، في حال تمّ شدّ جميع الأوتار دفعة واحدة، إلى نصف القيمة المحسوبة، في حالة مسبق الشدّ، إذا تمّ الشدّ على مراحل متتالية؛ مثل شدّ وترين في كلّ مرّة. إذا كان n عدد الأوتار أو أزواج الأوتار المشدودة تبعاً، يكون:

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j$$

حيث z تدلّ على عدد مرّات عمليّات الشدّ. يلاحظ أنّ آخر وتر، يتمّ شدّه، لا يتعرّض لأيّة ضياعات؛ بسبب نقصان الطول المرن، بينما يتعرّض الوتر، الذي تمّ شدّه أولاً، لأكبر قيمة ضياع.

⊠ ارتخاء إجهاد الفولاذ R Steel Stress Relaxation (R)

تتعرّض الأوتار من النوع محرّر الجهد، لضياع مع الزمن في قوّة مسبق الإجهاد؛ بسبب الاستطالة الدائمة. إنّ قيمة الضياع في قوّة مسبق الإجهاد، تتعلّق، ليس، فقط، بمدة استمرارية قوّة مسبق الإجهاد، إنّما أيضاً بنسبة مسبق الإجهاد الأولى إلى حدّ خضوع تسليح مسبق الإجهاد f_{pi}/f_{py} . يسمّى هذا الضياع ارتخاء إجهاد الفولاذ.

يضع كود الـ ACI 318 حدوداً علياً لإجهاد أوتار مسبق الإجهاد؛ كما يأتي:

(a) الإجهادات الناتجة عن شدّ الأوتار، يجب ألاّ تتجاوز $f_{pj} = 0.94 f_{py}$ ، على ألاّ تزيد عن القيمة الأقلّ

من القيمتين الآتيتين؛ الأولى: محدّدة بالألّا تتجاوز $0.80 f_{pu}$ والثانية: القيمة العظمى، التي ينصح بها صانع الأوتار وأجهزة الإرساء.

(b) بعد نقل قوّة مسبق الإجهاد، مباشرة، يجب ألاّ تتجاوز $f_{pi} = 0.82 f_{py}$ ، على ألاّ تزيد عن $0.74 f_{pu}$

(c) في أوتار الشدّ اللاحق، عند أجهزة الإرساء وقطع الوصل، ومباشرةً، بعد نقل قوّة مسبق الإجهاد،

يجب ألاّ تزيد عن $f_{pi} = 0.70 f_{pu}$.

إنّ مجال قيم f_{py} معطاة حسب الآتي:

قضيان مسبق الإجهاد: $f_{py} = 0.80 f_{pu}$

الأوتار محرّرة الجهد: $f_{py} = 0.85 f_{pu}$

الأوتار القليلة الارتخاء: $f_{py} = 0.90 f_{pu}$

إذا كان f_{pR} هو الإجهاد المتبقي في الفولاذ، بعد حصول الارتخاء، فإن العلاقة الآتية، تحسب f_{pR} من أجل الفولاذ محرر الجهد Stress-Relieved :

$$\frac{f_{pR}}{f_{pi}} = 1 - \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$$

في هذه العلاقة: $\log t$ بالساعات واللوغاريتم ذو أسّ عشري، f_{pi}/f_{py} يجب أن تزيد عن 0.55 و $t = t_2 - t_1$.
يبين الشكل التالي مخطط للمعادلة السابقة.

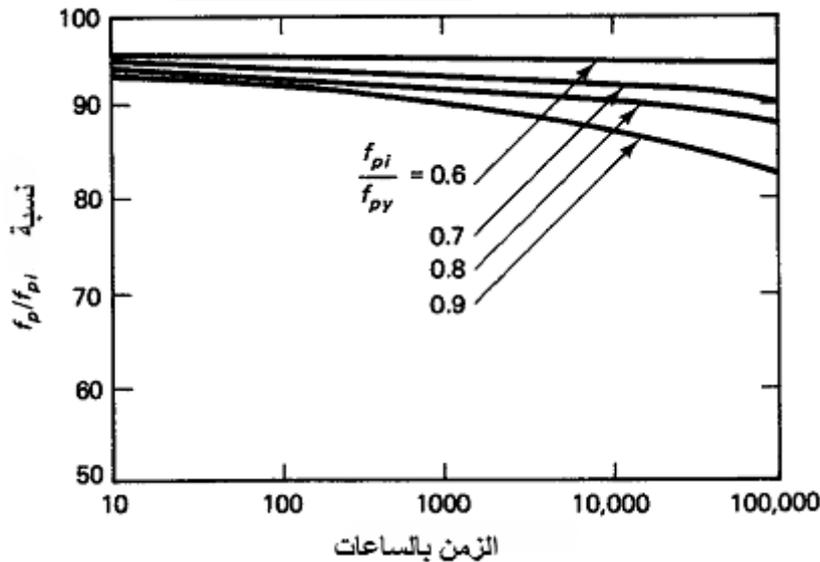
من أجل الفولاذ قليل الارتخاء، يقسم المقام في الحد اللوغاريتمي للعلاقة على العدد (45)؛ عوضاً عن (10).
يمكن إجراء تقريب للحد $\log t_2 - \log t_1$ ؛ بحيث تصبح
 $\log t = \log t_2 - \log t_1$ من دون فقدان للدقة.
في هذه الحالة، يصبح الضياع من الارتخاء

$$\Delta f_{pR} = f'_c \frac{\log t}{10} \left(\frac{f'_c}{f_{py}} - 0.55 \right)$$

حيث f_{pi} هو الإجهاد الأولي في الفولاذ، الذي يتعرض له العنصر البيتوني.
إذا كانت هناك ضرورة لحساب الضياع خطوة-خطوة، يمكن حساب تزايد الضياع في مرحلة معينة بالعلاقة:

$$\Delta f_{pR} = f'_c \frac{(\log t_2 - \log t_1)}{10} \left(\frac{f'_c}{f_{py}} - 0.55 \right)$$

حيث t_1 هو الزمن في بداية الفترة، و t_2 الزمن في نهاية الفترة، من بدء الشد، إلى لحظة حساب الضياع عندها.
من أجل الفولاذ قليل الارتخاء، يستبدل المقام (10) بالمقام (45).



علاقة الإجهاد-الارتخاء في الجدائل محررة الجهد مع الزمن

طريقة ACI - ASCE لحساب ضياع الارتخاء

ACI-ASCE Method of Accounting for Relaxation Loss

إنّ طريقة ACI – ASCE تستعمل المشاركات المختلفة لتقلّص البيتون المرن والزحف والانكماش؛ لتقييم ضياع ارتخاء إجهاد الفولاذ، وذلك باستعمال المعادلة الآتية:

$$\Delta f_{pR} = [K_{re} - J\Delta(f_{pES} + f_{pCR} + f_{pSH})] \times C$$

قيم K_{re} و J و C معطاة في الجدولين التاليين.

قيم K_{re} و J

نوع الوتر	K_{re}	J
جداول وأسلاك محرّرة الجهد المقاومة (1860) MPa	145	0.15
جداول وأسلاك محرّرة الجهد المقاومة (1725) MPa	134	0.14
أسلاك محرّرة الجهد المقاومة (1656) أو (1620) MPa	128	0.13
جداول قليلة الاسترخاء المقاومة (1860) MPa	36	0.04
أسلاك قليلة الاسترخاء المقاومة (1725) MPa	33.6	0.037
أسلاك قليلة الاسترخاء المقاومة (1656) أو (1620) MPa	31.9	0.035
قضبان محرّرة الجهد المقاومة (1000) أو (1100) MPa	43.5	0.05

قيم C

f_{pi}/f_{pu}	جداول أو أسلاك محرّرة الجهد	قضبان محرّرة الجهد أو جداول وأسلاك قليلة الاسترخاء
0.80	----	1.28
0.79	----	1.22
0.78	----	1.16
0.77	----	1.11
0.76	----	1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85

0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

☒ الضياع من الزحف CR Creep Loss (CR)

الزحف (السيلان) في البيتون، يحدث مع الزمن، بوجود الحمولة أو الإجهاد. يسمّى هذا السيلان الجانبيّ أو التشوّه؛ بسبب الإجهاد الطوليّ، بالزحف Creep.

يجب التأكيد على أنّ إجهادات الزحف، وضياع الإجهاد؛ نتيجة الزحف، تنتج فقط من الحمولات المطبّقة خلال تاريخ التحميل للعنصر الإنشائيّ.

إنّ التشوّه الناتج من هذا السلوك، هو تابع لقيمة الحمل المطبّق، والمدة الزمنية، ومواصفات البيتون؛ بما فيها نسب الخلط، وشروط العناية، وعمر العنصر، عند التحميل للمرّة الأولى، والشروط البيئية. وحيث أنّ علاقة الإجهاد-التشوّه؛ بسبب الزحف، هي خطيّة، بشكل أساسي، فإنّ من المفيد ربط تشوّه الزحف ϵ_{CR} بالتشوّه المرن ϵ_{EL} ؛ حيث يمكن تعريف معامل الزحف C_u كما يأتي:

$$C_u = \frac{\epsilon_{CR}}{\epsilon_{EL}}$$

ويعرّف معامل الزحف في أيّ زمن t بالأيّام:

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} C_u$$

تتراوح قيمة C_u بين (2) و (4) مع قيمة وسطية، تساوي 2.35 للزحف الحديّ. يمكن تحديد ضياع الزحف للعناصر مسبقاً للإجهاد للعناصر الملتصقة، كالآتي:

$$\Delta f_{pCR} = C_t \frac{E_{ps}}{E_c} f_{cs}$$

حيث f_{cs} الإجهاد في البيتون، عند منسوب مركز ثقل أوتار مسبق الإجهاد. هذا الضياع، بشكل عام، تابع لإجهاد البيتون في المقطع، الذي يجري تحليله. في العناصر اللاحقة الشدّ غير الملتصقة، يمكن عدّ الضياع منتظماً على طول المجاز؛ لذا، من أجل حساب الزحف في العناصر اللاحقة الشدّ، يمكن استعمال قيمة وسطية لإجهاد البيتون f_{cs} تقع بين نقاط الإرساء.

إنّ للعلاقات المعطاة من قبل لجنة ACI – ASCE لتقييم الضياع من الزحف، الشكل نفسه للعلاقة السابقة؛ أي:

$$\Delta f_{pCR} = K_{CR} \frac{E_{ps}}{E_c} (f_{cs}^- - f_{csd}^-)$$

$$\Delta f_{pCR} = nK_{CR} (f_{cs}^- - f_{csd}^-) \quad \text{أو}$$

حيث $K_{CR} = 2.0$ للعناصر السابقة الشدّ

$K_{CR} = 1.6$ للعناصر اللاحقة الشدّ (والاثنتان من أجل البيتون العاديّ [غير الخفيف])

f_{cs}^- هو الإجهاد في البيتون عند منسوب مركز ثقل الفولاذ، بعد نقل القوة مباشرة

f_{csd}^- هو الإجهاد في البيتون، عند منسوب مركز ثقل الفولاذ الناتج عن جميع الحمولات الميتة المتراكبة، بعد إنهاء عملية مسبق الإجهاد.

n نسبة Modular Ratio $\frac{E_{ps}}{E_c}$

يجب أن تخفض قيمة K_{CR} بالمقدار (20%) من أجل البيتون الخفيف.

☒ الضياع من الانكماش (SH) Shrinkage Loss (SH)

تتأثر قيمة الانكماش في البيتون؛ مثل الزحف، بعوامل عدّة، تتضمن نسب الخلطة، ونوع الحصىات، ونوع الإسمنت، ومدة العناية، والزمن بين نهاية العناية وتطبيق مسبق الإجهاد، والظروف المحيطة، وأبعاد العنصر وشكله. إن (80%) من الانكماش، يحصل في السنة الأولى من عمر المنشأ. إنّ القيمة الوسطى لتشوّه الانكماش الحدّي، لكلا البيتون الناضجة في الرطوبة أو البخار، معطى من قبل ACI 209 R-92 بالقيمة 780×10^{-6} . تتأثر هذه القيمة الوسطى بمدة العناية بالبخار البدائيّة والرطوبة النسبيّة السائدة وترطيب البيتون. ولأخذ جميع هذه التأثيرات بالحسبان، يجب ضرب قيمة التشوّه من الانكماش بعامل تصحيح γ_{SH} كما يأتي:

$$\varepsilon_{SH} = 780 \times 10^{-6} \gamma_{SH}$$

يخضع عامل التصحيح γ_{SH} لعوامل مختلفة، تتعلّق بالشروط البيئيّة؛ تشترط مؤسّسة البيتون مسبق الإجهاد PCI، من أجل الظروف القياسيّة، قيمة وسطى لتشوّه الانكماش الحدّي، تساوي $\varepsilon_{SH} = 820 \times 10^{-6}$ mm/mm. إذا كان ε_{SH} تشوّه الانكماش بعد تعديله، من أجل الرطوبة النسبيّة، حسب نسبة الحجم/السطح V/S فتعطي قيمة الضياع بسبب الانكماش في العنصر سابق الشدّ بالعلاقة:

$$\Delta f_{pSH} = \varepsilon_{SH} \times E_{ps}$$

يكون الضياع في مسبق الإجهاد بسبب الانكماش، في العناصر اللاحقة الشدّ، أقلّ؛ بسبب كون جزء من الانكماش، قد حصل، قبل البدء بعملية الإجهاد اللاحق.

إذا أخذت الرطوبة النسبية كنسبة مئوية، وتمّ حساب تأثير النسبة V/S فإنّ علاقة حساب الضياع في مسبق الإجهاد بسبب الانكماش، حسب PCI تصبح:

$$\Delta f_{pSH} = 8.2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0.06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

حيث RH هي الرطوبة النسبية
حيث $K_{SH} = 1.0$ للعناصر السابقة الشد.
يعطي الجدول التالي قيم K_{SH} للعناصر اللاحقة الشد.

قيم K_{SH} من أجل العناصر اللاحقة الشد

الزمن بين نهاية معالجة البيتون بالترطيب إلى حين نقل قوة الشد اللاحق بالأيام								
الأيام	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{sh}	0.92	0.85	0.80	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45

يمكن الحصول على قيمة الضياعات المعدلة، من أجل الشروط النظامية، كتابع للزمن t بالأيام:
(a) عناية بالرطوبة، بعد (7) أيام

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{35+t} (\varepsilon_{SH})_u$$

$$\Delta f_{pSH} = 820 \times 10^{-6} \left(\frac{t}{t+35} \right) E_{ps}$$

(b) عناية بالبخر، بعد (1) يوم إلى (3) أيام

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{55+t} (\varepsilon_{SH})_u$$

$$\Delta f_{pSH} = 730 \times 10^{-6} \left(\frac{t}{t+55} \right) E_{ps}$$

تجب ملاحظة أنّ فصل حساب الزحف عن حسابات الانكماش، إجراء هندسيّ مقبول؛ كما أنّه يحدث تباينات مهمة، لقيم الزحف والانكماش؛ بسبب التباينات في خواص المواد المشكّلة من المصادر المختلفة؛ لذا ينصح بالحصول على المعلومات من تجارب واقعية؛ وبخاصة للمنتجات المصنّعة ذات نسبة مجاز/عمق كبيرة، و/أو إذا كانت الحمولة الحية كبيرة بشكل غير عاديّ.

☒ الضياعات من الاحتكاك Losses Due To Friction

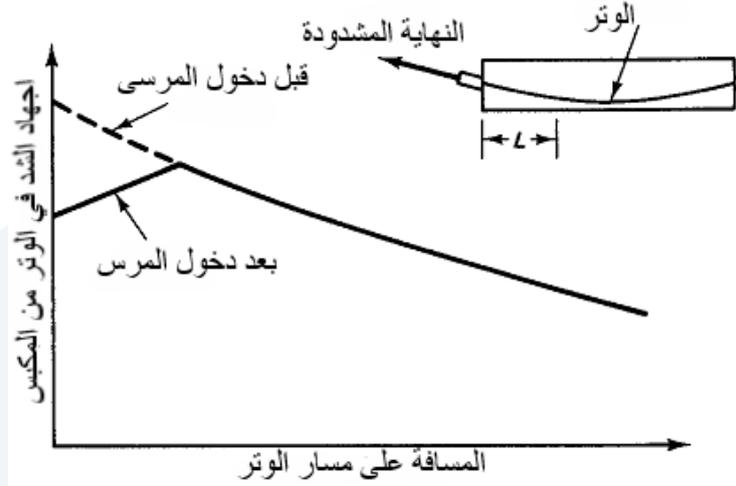
يحصل الضياع لمسبق الإجهاد في العناصر اللاحقة الشد؛ بسبب الاحتكاك بين الأوتار والأغمد المحيطة بها. قيمة هذا الضياع تابع لـ:

- (1) مسار الوتر، ويسمى تأثير الانحناء (التقعّر، التحدّب) Curvature Effect
 - (2) التغيير المحليّ للمسار، ويسمى تأثير التذبذب (التمايل) Wobble Effect
- يجب تعديل قيم عوامل الضياع، في أثناء تجهيز مخطّطات الورشة، في حال تعدّل نوع الأوتار و/أو مسار الأغمد عن المخطّطات التصميمية.
- تأثير الانحناء محدّد مسبقاً؛ أمّا تأثير التذبذب، فينتج عن مسار خاطئ عَرَضياً؛ حيث لا يمكن تثبيت الأغمد بشكل دقيق.

يجب ملاحظة أن فقدان الإجهاد بسبب الاحتكاك، يكون في النهاية البعيدة للجائز، في حال كون الشد من جهة واحدة؛ لذا يتغير الضياع من الاحتكاك بشكل خطّي، على طول مجاز الجائز، ويمكن توليد الضياع، من أجل أيّ موقع على طول المجاز، في حال كان ذلك ضرورياً.

- تأثير الانحناء Curvature Effect

عند شدّ الوتر بقوة، تساوي F_1 عند المكبس، سيواجه احتكاكاً مع الغمد المحيط؛ ممّا يؤدي إلى تغيير في إجهاد الوتر؛ بدءاً من موقع جهاز الشدّ، حتّى مسافة L على طول المجاز؛ كما هو مبين في الشكل التالي.



توزيع إجهاد قوة الاحتكاك في الوتر

إذا عزلنا طولاً صغيراً جداً للوتر في مخطّط الجسم الحرّ (الطلق)، وبفرض μ هي معامل الاحتكاك بين الوتر والغمدة، والنتيجة عن تأثير الانحناء، يكون لدينا:

$$dF_1 = -\mu F_1 d\alpha$$

$$\frac{dF_1}{F_1} = -\mu d\alpha$$

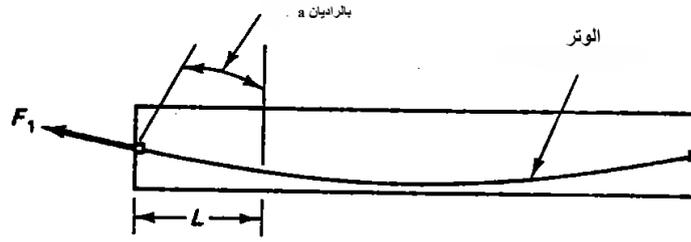
أو

بإجراء تكامل لطرفي المعادلة:

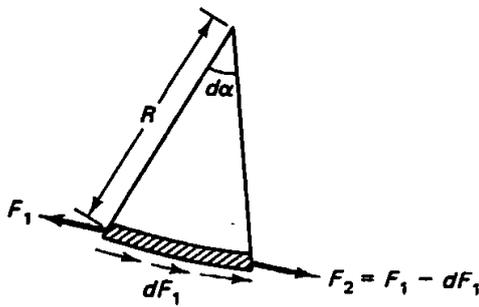
$$\log_e F_1 = -\mu\alpha$$

إذا كانت $\alpha = L/R$ يكون:

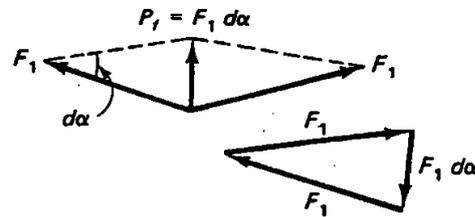
$$F_2 = F_1 e^{-\mu\left(\frac{L}{R}\right)}$$



(a)



(b)



(c)

الضياع بسبب الانحناء

(a) مسار الوتر. (b) القوى على مقطع صغير جداً؛ حيث F_1 هي قوة الشد في المكبس. (c) مضلع القوى

بفرض $F_1 = F_2$ على المقطع المعرف بـ b

wobble Effect

- تأثير الذبذبة

بافتراض أنّ K معامل الاحتكاك بين الوتر والبيتون المحيطة؛ بسبب تأثير الذبذبة أو الطول، يكون الضياع من الاحتكاك؛ بسبب عدم دقة تركيب الوتر، على مدى طوله، بغض النظر، إذا كان ذا مسار مستقيم أو قطعي. بالمبادئ نفسها، التي تمّ استنتاج المعادلة بها:

$$\log_e F_1 = -KL$$

$$F_2 = F_1 e^{-KL} \quad \text{أو}$$

وبإجراء تراكم لتأثير الانحناء، وتأثير التذبذب، ينتج:

$$F_2 = F_1 e^{-(\mu\alpha + KL)}$$

أو بتعبير الإجهادات

$$f_2 = f_1 e^{-(\mu\alpha + KL)}$$

عندما يكون الحدّ $(KL + \mu\alpha)$ أقلّ من (0.3)، يسمح بحساب P_{px} من العلاقة:

$$f_2 = f_1 (1 + KL + \mu\alpha)^{-1}$$

يعطى ضياع الإجهاد من الاحتكاك Δf_{pf} بالعلاقة

$$\Delta f_{pF} = f_1 - f_2 = f_1 (1 - e^{-(\mu\alpha + KL)})$$

بافتراض أن قوة مسبق الإجهاد، بين بداية الجزء المنحني ونهايته، صغيرة (15% ≈)، يمكن بذلك تبسيط المعادلة إلى الآتي:

$$\Delta f_{pF} = -f_1(\mu\alpha + KL)$$

حيث L بالمتر

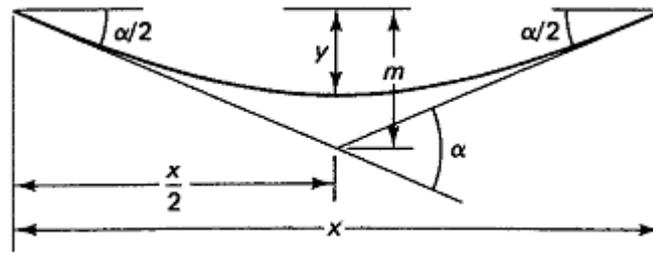
بما أن نسبة عمق الجائز إلى طول مجازه صغيرة، فإن الدقة في استعمال طول المسقط للوتر، تكون كافية في حساب α . وبافتراض أن انحناء الوتر هو جزء من قوس دائرة؛ فإن الزاوية المركزية α الحاصرة للجزء المنحني، هي ضعف الميل عند أي من نهايتي القطعة، وبالآتي:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{m}{x/2} = \frac{2m}{x}$$

$$y \cong \frac{1}{2}m \quad \text{and} \quad \frac{\alpha}{2} = \frac{4y}{x}$$

إذا

$$\alpha = \frac{8y}{x} \text{ radian} \quad \text{يكون:}$$



التقييم التقريبي للزاوية المركزية للوتر

يبين الجدول التالي القيم التصميمية لمعامل الاحتكاك من الانحناء μ ومعامل احتكاك التمايل Wobble أو الطولي K المعتمدة من قبل ACI 318.

معامل الاحتكاك من تأثير التمايل والانحناء Wobble and Curvature

نوعية الأوتار	نوع التسليح	عامل الذبذبة K	عامل الانحناء μ بالراديان
أوتار في أعمدة معدنية ملتصقة	أسلاك	0.0033-0.0049	0.15-0.25
أوتار في أعمدة معدنية ملتصقة	قضبان عالية المقاومة	0.0003-0.0020	0.08-0.30
أوتار في أعمدة معدنية ملتصقة	جديلة بسبعة أسلاك	0.0016-0.0066	0.15-0.25
أوتار غير ملتصقة مدهونة بالماستيك	أسلاك	0.0033-0.0066	0.05-0.15
أوتار غير ملتصقة مدهونة بالماستيك	جديلة بسبعة أسلاك	0.0033-0.0066	0.05-0.15
أوتار غير ملتصقة مدهونة بالشحم	أسلاك	0.0010-0.0066	0.05-0.15
أوتار غير ملتصقة مدهونة بالشحم	جديلة بسبعة أسلاك	0.0010-0.0066	0.05-0.15

ملاحظات حول العاملين K و μ

- الجدول السابق يعطي قيمةً توجيهيةً، تفيد في الدراسة المبدئية؛ لمعرفة ضياع الاحتكاك.
- نظراً للعدد الكبير من المواد المستعملة في أنظمة الشدّ اللاحق، فإنّ من المتعدّر حصر قيمة العامل K وعامل الاحتكاك المنحني μ_p .
- تحسب ضياعات الاحتكاك بطرائق تجريبية، يجريها مصنّع الأوتار والأغمد؛ لتحديد العامل K عامل الذبذبة wobble وعامل الاحتكاك المنحني μ_p
- يجب التحقّق من صحّة هذه العوامل في أثناء التنفيذ.
- عند استعمال غمد قاس، يمكن حساب العامل K مساوياً للصفر. وكذلك عند استعمال أوتار ذات أقطار كبيرة، مع غمد نصف قاس، فيمكن أيضاً حساب العامل K مساوياً للصفر.
- يجب أن توضع قيم العاملين K و μ_p المستعملين في التصميم على مخطّطات التصميم؛ إضافة إلى قيم الإجهادات المستعملة في التصميم.

☒ الضياع عند مخدّات جهاز الإرساء (A) Ancorage Seating loss (A)

يحدث الضياع عند مخدّات جهاز الإرساء، في الجوائز اللاحقة الشدّ، والنتاج من مساند الأسافين (اللقم) Wedges عند نقل قوّة الشدّ إلى جهاز الإرساء. ويمكن أن يحدث أيضاً في قوالب العناصر السابقة الشدّ؛ بسبب التعديل المتوقّع عند نقل قوّة مسبق الإجهاد إلى القالب. يمكن علاج هذا الضياع بسهولة، خلال عملية الشدّ بشدّ إضافي. تتراوح قيمة الضياع بسبب مخدّات جهاز الإرساء، بين (6 و 9.5) مم للأسافين المؤلفة من قطعتين. يعتمد مقدار الشدّ الإضافي اللازم على نظام الإرساء المستعمل؛ لأنّ لكلّ نظام متطلبات معايرة خاصّة به، ويتوقّع من الصانع تزويد المعطيات المتعلقة بالانزلاق المتوقع؛ بسبب معايرة جهاز الإرساء. إذا كان Δ_A مقدار الانزلاق و L طول الوتر و E_{ps} كعامل مرونة فولاذ مسبق الإجهاد، فسيكون الضياع بسبب انزلاق الإرساء:

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps}$$

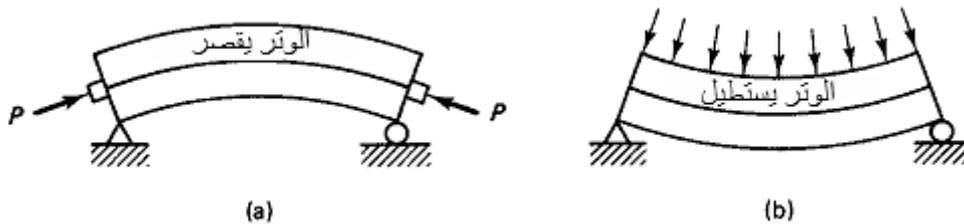
☒ تغيّر مسبق الإجهاد بسبب انعطاف العنصر (Δf_{pB})

Change of Prestress Due to Bending of a Member

عندما ينعطف الجائز بسبب مسبق الإجهاد أو الحمولة الخارجية، يصبح محدّباً أو مقعرّاً، حسب طبيعة الحمولة؛ كما هو مبين في الشكل التالي. إذا كان تشوّه الضغط الواحد في البيتون على طول منسوب الوتر هو ϵ_c ، يكون التغيّر المقابل لمسبق الإجهاد في الفولاذ:

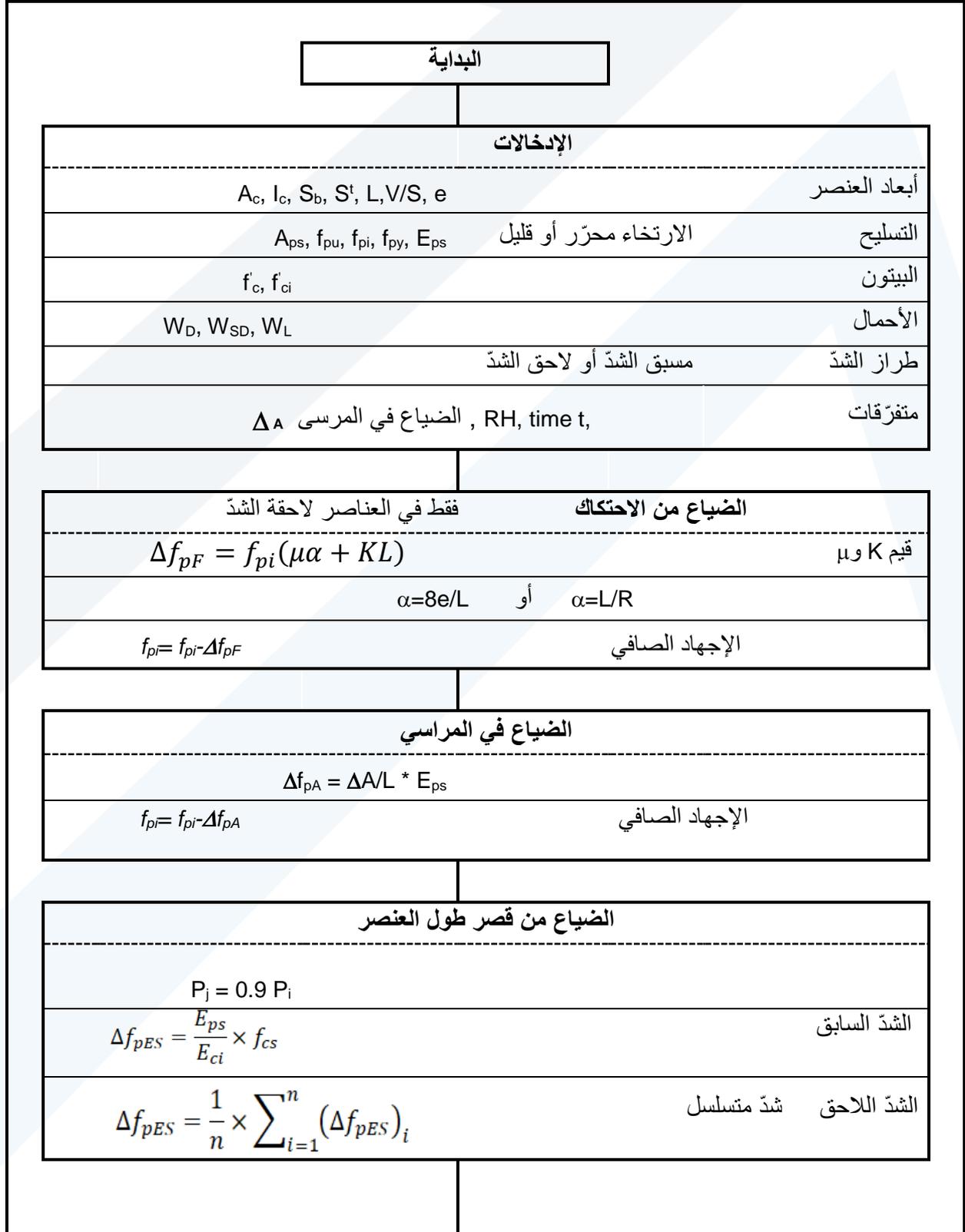
$$\Delta f_{pB} = \epsilon_c E_{ps}$$

حيث E_{ps} معامل مرونة الفولاذ. إنّ أيّ ضياع ناتج عن الانعطاف، لا يلزم الاهتمام به، إذا تمّ قياس إجهاد فولاذ مسبق الإجهاد، بعد حدوث انعطاف للجائز؛ كما هي الحالة الأكثر شيوعاً.



تغيّر الشكل الطولي للجائز. (a) بسبب مسبق الإجهاد. (b) بسبب التحميل.

يبين المخطط الصندوقي التالي خطوات تقييم ضياع الإجهاد التابعة للزمن بدون الضياع نتيجة الانعطاف.
المخطط الصندوقي لحساب ضياع الإجهاد



الضياع من الزحف	
$f_{csd}^- = \frac{M_{SD} \times e}{I_c}$	
$\Delta f_{pCR} = K_{CR} \frac{E_{ps}}{E_c} (f_{cs}^- - f_{csd}^-)$	
$K_{CR} = 2$	الشّدّ السابق للبيتون العاديّ
$K_{CR} = 0.8 \times 2 = 1.6$	الشّدّ السابق للبيتون الخفيف
$K_{CR} = 1.6$	الشّدّ اللاحق للبيتون العاديّ
$K_{CR} = 0.8 \times 1.6 = 1.28$	الشّدّ اللاحق للبيتون الخفيف

الضياع من الانكماش	
$\Delta f_{pSH} = 8.2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0.06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH)$	
$K_{SH} = 1$	الشّدّ السابق
K_{SH}	الشّدّ اللاحق
طريقة بديلة باستعمال عامل الزمن ونوع المعالجة	
$\Delta f_{pSH} = 800 \times 10^{-6} \left(\frac{t}{t + 35} \right) E_{ps}$	المعالجة بالرطوبة حتّى 7 أيام
$\Delta f_{pSH} = 730 \times 10^{-6} \left(\frac{t}{t + 55} \right) E_{ps}$	المعالجة بالبخر من 1 الى 3 أيام

الضياع من الارتخاء	
1- جداول محررة الجهد	
الشّد السابق	
$f_{pi} = f_{pj} - \Delta f_{pR}(t_0, t_{tr}) - \Delta f_{pES}$	
$f_{pj} - \Delta f_{pR}(t_0, t_{tr}) \cong 0.90 f_{pj}$	
$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$	
بالساعات t1 , t2	
الشّد اللاحق	
$f_{pi} = f_{pj} - \Delta f_{pF} - \Delta f_{pES}$	
$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$	
$t = t_2 - t_1$	
2- جداول قليلة الارتخاء	
يعدّل المخرج في العلاقات أعلاه من 10 الى 45 في العلاقات أعلاه	

مجموع الضياعات	
الشّد السابق	
$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH}$	
الشّد اللاحق	
$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH}$	
Δf_{pES} تستعمل فقط عند الشّد التسلسلي	

تحذفان من قيمة الإجهاد الكلي لشدّ المكبس f_{pj} Δf_{pES} و Δf_{pF}

حساب نسبة ضياع كل نوع
حساب نسبة الضياعات الكلية

النهاية

مخطّط خطوات تقييم ضياعات مسبق الإجهاد

4- تراكيب الأحمال

تراكيب أحمال التصميم هي التراكيب المختلفة لحالات التحميل، التي تلزم لتصميم عنصر إنشائي ما. يفترض الكود الأساس، أنّ العنصر الإنشائي، سيتعرض لكلّ أو بعض الأحمال الآتية: الأحمال الميتة D والأحمال الحية L ونمط تحميل الأحمال الحية PL والتلج S والرياح W والهزّات الأرضية E ، مع ملاحظة أنّ الرياح والهزّات الأرضية، لا تجتمعان، ويجب إدخال كلّ منهما على انفراد، مع بقيّة الأحمال في اتّجاهي المحورين الرئيسيين للمبنى، وفي الاتّجاهين المتعاكسين عند كلّ محور في التراكيب المطلوبة.

لتحديد الحمل الناتج من قوى الإجهاد اللاحق PT يمكن للمصمّم الاستعانة بمسار وتر الشدّ اللاحق (Tendon) لتقدير مركّبات القوّة المطبّقة الأفقيّة والشاقوليّة، قبل حصول الضياعات وبعده.

تؤخذ قيم الأحمال، عدا أحمال الإجهاد اللاحق الواجب إدراجها في تراكيب الأحمال، من الباب الخامس من الكود الأساس.

تؤخذ تراكيب الأحمال، عدا أحمال الإجهاد اللاحق، من الباب السادس من الكود الأساس.
تعرف تراكيب الأحمال الخاصّة بمراحل الشدّ اللاحق، في الفقرات الآتية:

☒ تراكيب الأحمال الاستثمارية الأولى Initial Service Load Combination

يُستعمل التركيب الآتي، للتحقق من المتطلّبات عند نقل قوى الشدّ اللاحق، التي يجب احتسابها في تراكيب أحمال المرحلة الأولى، التي هي القوّة الابتدائية للشدّ؛ أي قبل حسم الضياعات طويلة الأمد الناتجة عن الزحف Creep والانكماش Shrinkage. $1.0 D + 1.0 PT$.

☒ تراكيب الأحمال الاستثمارية Service Load Combination

يستعمل التركيبان الآتيان؛ للتحقق من المتطلّبات في حالة الاستثمار؛ بفرض أنّ كامل الضياعات طويلة الأمد، قد حدثت، وعليه؛ فإنّ القوّة PT المستعملة في هاتين العلاقتين، تساوي القوّة الابتدائية للشدّ؛ محسومة منها قيمة هذه الضياعات.

$1.0 D + 1.0 PT$

$1.0 D + 1.0 L + 1.0 PT$

☒ تراكيب الأحمال الاستثمارية طويلة الأمد Long-Term Service Load Combination

يستعمل التركيبان الآتيان؛ للتحقق من المتطلبات في حالة الاستثمار طويلة الأمد. يفترض أن الحمل الحي الدائم المستعمل Permanent Live Loads في هذه المرحلة، يعادل نصف الحمل الحي الكلي؛ كما يفترض أن كامل الضياعات طويلة الأمد، قد حدثت، وعليه؛ فإن القوة PT المستعملة في هاتين العلاقتين، تساوي القوة الابتدائية للشد؛ محسومة منها قيمة هذه الضياعات. $1.0 D + 1.0 PT$

$$1.0 D + 0.5 L + 1.0 PT$$

تراكيب الأحمال الحديدية التصميمية \boxtimes Strength Design Load Combination

تستعمل التراكيب الآتية؛ للتحقق من المتطلبات في الحالة الحديدية. تتطلب الحالة الحديدية لتصميم القص الناتج في الجوائز، والقص الناتج عن الثقب، استعمال كامل قوى الشد اللاحق PT (الأولية والثانوية معاً).

تتطلب الحالة الحديدية للتصميم على الانعطاف، فقط، القوى الستاتيكية الثانوية المطبقة (H) HYPERSTATIC. يتم الحصول على القوى H (الثانوية) بصورة مباشرة، من حسم العزوم الناتجة من قوى الشد اللاحق الأولية PT من مجمل العزوم عند التصميم على الانعطاف.

$$1.4 D + 1.0 PT$$

$$1.4 D + 1.6 L + 1.0 PT$$

$$1.2 D + 1.6 (0.75 PL) + 1.0 PT \text{ (الثانوية)}$$

$$0.9 D +/- 1.6 W + 1.0 PT$$

$$1.2 D +/- 1.0 L +/- 1.6 W + 1.0 PT$$

$$0.9 D +/- 1.0 E + 1.0 PT$$

$$1.2 D +/- 1.0 L +/- 1.0 E + 1.0 PT$$

$$1.2 D + 1.6 L + 0.5 S + 1.0 PT$$

$$1.2 D + 1.0 L + 1.6 S + 1.0 PT$$

$$1.2 D + 1.6 S +/- 0.8 W + 1.0 PT$$

$$1.2 D + 1.0 L + 0.5 S +/- 1.6 W + 1.0 PT$$

$$1.2 D + 1.0 L + 0.2 S + 1.0 E + 1.0 PT$$

مع ملاحظة استبدال PT ب H عند التصميم على الانعطاف فقط. على المصمم استعمال تراكيب مناسبة، في حال دراسة أحمال حية خاصة على السطح الأخير، إذا عوملت بصورة منفصلة، أو في حال استعمال أحمال أخرى غير موضحة أعلاه.

5- أمثلة على حساب الضياعات

المثال (1.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد، الناتج عن نقصان الطول المرن للبيتون سابقة الإجهاد

جائز مسبق الإجهاد مسبق الشد، ذو مجاز مقداره: (15) m؛ كما في الشكل (5-1)؛ لدينا من أجل هذا الجائز:

$$b = 0.40 \text{ m}$$

$$h = 0.75 \text{ m}$$

$$f'_c = 40 \text{ MPa}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

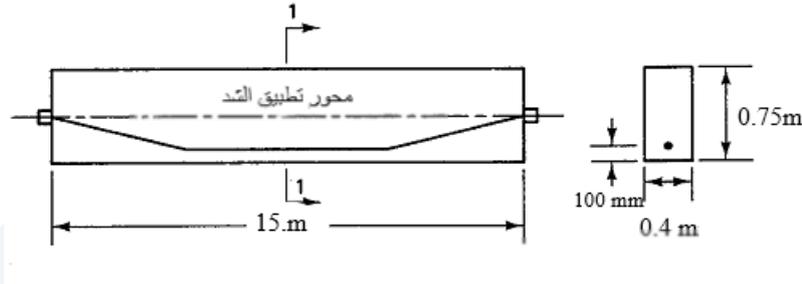
$$f'_{ci} = 31 \text{ MPa}$$

تسليح مسبق الإجهاد A_{ps} مؤلف من (10) جدائل سباعية الأسلاك بالقطر (12.7) مم

$$A_{ps} = 10 \times 9.87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 9.87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$E_{ps} = 186000 \text{ MPa}$$

يطلب حساب إجهاد الليف البيتوني، عند منسوب مركز ثقل فولاذ الجائز في لحظة نقل القوة، لمقطع وسط الجائز، وقيمة ضياع قوّة مسبق الإجهاد الناتج عن نقصان الطول المرن للبيتون. افترض أنّ إجهاد الشدّ على الوتر، قبل نقل القوّة، إلى البيتون، تساوي $75\%f_{pu}$.



الشكل (1-5)

الحل:

$$A_c = 0.40 \times 0.750 = 0.3 \text{ m}^2$$

$$w = .40 \times .750 \times 0.02400 = 0.0072 \text{ MN/m}$$

$$I_c = \frac{0.40 \times 0.750^3}{12} = 0.0140 \text{ m}^4$$

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{0.0140}{0.3} = 0.0467 \text{ m}^2$$

$$e_c = \frac{0.750}{2} - 0.1 = 0.275 \text{ m}$$

$$P_i = 0.75f_{pu}A_{ps} = 0.75 \times 1860 \times 9.87 \cdot 10^{-4} = 1.38 \text{ MN}$$

$$M_D = \frac{w l^2}{8} = \frac{0.0072 \times 15^2}{8} = 0.2 \text{ MN.m}$$

من المعادلة التالية، نحسب إجهاد الليف البيتوني، عند منسوب مركز ثقل فولاذ الجائز في لحظة نقل القوّة، مع افتراض أنّ $P_i \approx P_j$ ، هو:

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{M_D \times e}{I_c} \\ &= -\frac{1.38}{0.3} \left(1 + \frac{0.275^2}{0.0467}\right) + \frac{0.2 \times 0.275}{0.0140} \\ &= -12.05 + 3.93 = -8.12 \text{ MPa} \end{aligned}$$

نحسب عامل المرونة الأولي:

$$E_{ci} = 4700 \sqrt{f'_{ci}} = 4700 \sqrt{31} = 26168 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_s}{E_{ci}} = \frac{186000}{26168} = 7.11$$

ويحسب ضياع مسبق الإجهاد من نقصان الطول المرن:

$$\Delta f_{pES} = E_c \varepsilon_{ES} = \frac{E_s P_i}{A_c E_c} = n f_{cs}$$

$$\Delta f_{pES} = 7.11 \times 8.12 = 57.73 \text{ MPa}$$

المثال (2.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن نقصان الطول المرن للبيتون لاحق الإجهاد

حلّ المثال (1.5) في حال كون الجائز لاحق الشدّ، بشكل يكون:

- (a) يتمّ شدّ وترين في المرّة الواحدة
(b) يتمّ شدّ وتر واحد في المرّة الواحدة
(c) يتمّ شدّ جميع الأوتار دفعة واحدة

الحلّ:

يتغيّر الضياع من نقصان الطول المرن في الجوائز اللاحقة الشدّ، من الصفر، في حال تمّ شدّ جميع الأوتار دفعة واحدة، إلى نصف القيمة المحسوبة، في حالة مسبق الشدّ، إذا تمّ الشدّ على مراحل متتالية؛ مثل شدّ وترين في كلّ مرّة. إذا كان n عدد الأوتار أو أزواج الأوتار المشدودة تباعاً، يكون:

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j$$

حيث z تدلّ على عدد مرّات عمليّات الشدّ. يلاحظ أنّ آخر وتر، يتمّ شدّه، لا يتعرّض لأيّة ضياعات؛ بسبب نقصان الطول المرن، بينما يتعرّض الوتر، الذي تمّ شدّه أولاً، لأكبر قيمة ضياع.

(a) الواضح أنّ الوتر الأخير، لا يتعرّض لضياع ناتج عن نقصان الطول المرن.

لذلك يكون للأزواج الأربعة فقط ضياعات؛

حيث يكون للزوج الأوّل الضياع الأكبر بالقيمة 57.73 MPa

يحسب الضياع بسبب نقصان الطول المرن في الجائز اللاحق الشدّ، من المعادلة التالية:

$$\Delta f_{pE} = \frac{\frac{4}{4} + \frac{3}{4} + \frac{2}{4} + \frac{1}{4}}{5} \times 57.81 = \frac{10}{20} \times 57.73 = 28.865 \text{ MPa}$$

(b) يتمّ شدّ وتر واحد في المرّة الواحدة

$$\Delta f_{pE} = \frac{\frac{9}{9} + \frac{8}{9} + \frac{7}{9} + \dots + \frac{1}{9}}{10} \times 57.81 = \frac{45}{90} \times 57.73 = 28.865 \text{ MPa}$$

في كلا الحالتين، يكون ضياع مسبق الإجهاد في الجائز اللاحق الشدّ، هو نصف الضياع في الجائز السابق الشدّ.

(c) عند شدّ الأوتار دفعة واحدة لا يوجد ضياعات:

$$\Delta f_{pE} = 0.0 \text{ MPa}$$

المثال (3.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن الارتخاء

أوجد ضياع الارتخاء في مسبق الإجهاد، بعد مدة قدرها خمس سنوات في المثال (1.5)؛ بافتراض أن الضياع من عملية نقل قوة الشد، ومن نقصان الطول المرن، ومن الزحف والانكماش الطويل الأمد، خلال تلك الفترة هو (20%) من مسبق الإجهاد الأولي. افترض أيضاً أن حد الخضوع $f_{py}=1575 \text{ MPa}$ وبفرض أن إجهاد الشد على الوتر، قبل نقل القوة إلى البيتون، أي قبل حدوث الضياع من نقصان الطول المرن أي $\Delta f_{pES} = 0$ تساوي $75\% f_{pu}$ كما في المثال (1-5)

الحل:

لهذه المرحلة:

$$f_{pi} = f_{pj} - \Delta f_{pR}(t_0, t_{tr}) - \Delta f_{pES} = 0.75 f_{pu} = 0.75 \times 1860 = 1395 \text{ MPa}$$

الإجهاد لحساب ضياع الارتخاء بعد حدوث الضياعات من نقصان الطول المرن، ومن الزحف والانكماش الطويل الأمد والمقدرة ب 20%، هو:

$$f'_{pi} = (1 - 0.20) \times 1395 = 1116 \text{ MPa}$$

الفترة التي يحصل فيها ارتخاء الإجهاد، هي $43800 = 24 \times 365 \times 5$ ساعة

$$\Delta f_{pR} = f'_{pi} \frac{\log t}{10} \left(\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) = 1116 \times \frac{\log 43800}{10} \left(\frac{1116}{1575} - 0.55 \right) = 82.14 \text{ MPa}$$

المثال (4.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن زحف البيتون

احسب ضياع مسبق الإجهاد؛ بسبب الزحف، للمثال (1.5)؛ علماً أن مجموع الحمولات الميتة المترابطة، عدا الوزن الذاتي للجائز، هو $(0.0055) \text{ MN/m}$

الحل:

من أجل المقاومة الكاملة للبيتون:

$$E_c = 4700\sqrt{40} = 29725 \text{ kPa} = 29.725 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{186000}{29725} = 6.26$$

$$M_{SD} = \frac{0.0055 \times 15^2}{8} = 0.155 \text{ MN.m}$$

$$f_{csd}^- = \frac{M_{SD} \times e}{I_c} = \frac{0.155 \times 0.275}{0.0140} = 3.05 \text{ MPa}$$

$$f_{cs}^- = 8.12 \text{ MPa}$$

من المثال (1.5)

من أجل البيتون ذا الوزن العادي، $K_{CR} = 2.0$ (جائز سابق الشد)

$$\Delta f_{pCR} = n K_{CR} (f_{cs}^- - f_{csd}^-) = 6.26 \times 2(8.12 - 3.05) = 63.48 \text{ MPa}$$

المثال (5.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن الانكماش

احسب الضياع في مسبق الإجهاد؛ بسبب الانكماش في الأمثلة (1.5) و (2.5)، بعد (7) أيام عناية بالرطوبة؛ باستعمال طريقة K_{SH} الحدّية، والطريقة التابعة للزمن. افترض أنّ الرطوبة النسبيّة $RH = (70\%)$ والنسبة $V/S = (2.0)$.

الحلّ A

طريقة K_{SH}

$$K_{SH} = 1.0$$

(a) الجائز مسبق الشدّ،

$$\Delta f_{pSH} = 8.2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0.06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

$$\Delta f_{pSH} = 8.2 \times 10^{-6} \times 1 \times 186000 (1 - 0.06 \times 2)(100 - 70) = 40.3 \text{ MPa}$$

$$K_{SH} = 0.77 \text{ من الجدول،}$$

(b) الجائز لاحق الشدّ،

$$\Delta f_{pSH} = 0.77 \times 8.2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0.06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) = 0.77 \times 40.3 = 31 \text{ MPa}$$

الحلّ B

طريقة تابع الزمن (العناية بالرطوبة):

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{t}{35+t} (\varepsilon_{SH})_u$$

$$(\varepsilon_{SH})_t = \frac{7}{35+7} \times 820 \times 10^{-6} = 0.000137$$

$$\Delta f_{pSH} = \varepsilon_{SH,t} \times E_s = 0.000137 \times 186000 = 25.48 \text{ MPa}$$

المثال (6.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن الاحتكاك

افتراض أنّ مسار الأوتار في الجائز اللاحق الشدّ، للمثال (2.5)؛ كما هو مبين في الشكل (2-5)؛ إذا كان الوتر مؤلفاً من جدائل ذات (7) أسلاك موضوعة ضمن غمد معدنيّ مرّن.

احسب ضياع الإجهاد من الاحتكاك لأسلاك مسبق الإجهاد الناتج عن تأثير الانحناء، وتأثير التمايل

.Curvature and Wobble Effects

الحلّ:

$$P_i = 1.38 \text{ MN}$$

$$f_{pi} = \frac{P_i}{A_{ps}} = \frac{1.38}{9.87 \times 10^{-4}} = 1396.5 \text{ MPa}$$

من المعادلة التالية نحسب الزاوية المركزيّة α الحاصرة للجزء المنحني

$$\alpha = \frac{8y}{x} \text{ radian}$$

$$y=0.275$$

$$\alpha = \frac{8 \times 0.275}{15} = 0.147 \text{ radian}$$

نحسب ضياع مسبق الإجهاد بسبب الاحتكاك من المعادلة:

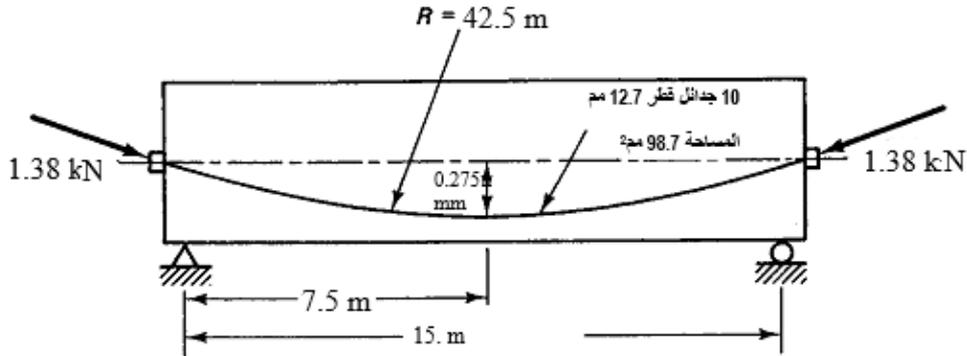
$$\Delta f_{pF} = f_{pi}(\mu\alpha + KL)$$

$$\mu = 0.20 \text{ و } K = 0.0066$$

من الجدول:

$$\Delta f_{pF} = 1396.5 \times (0.2 \times 0.147 + 0.0066 \times 15) = 179 \text{ MPa}$$

هذا الضياع من الاحتكاك، يساوي تقريباً (13%) من مسبق الإجهاد الأوّليّ.



الشكل (2-5)

المثال (7.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن جهاز الإرساء للبيتون للاحق الشدّ

احسب الضياع من مخدّات جهاز الإرساء في الجائز اللاحق الشدّ، في المثال (2.5)؛ إذا كان الانزلاق المقدّر هو

(6.35) مم (¼").

الحلّ:

$$E_{ps} = 186000$$

$$\Delta_A = 6.35 \text{ mm} = 0.00635 \text{ m}$$

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} = \frac{0.00635}{15} \times 186000 = 78.74 \text{ MPa}$$

المثال (8.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج عن مراحل عمر الببتون سابقة الإجهاد

جائز سابق الشد بسيط الاستناد، ذو مجاز قدره: (21.0) متراً من الببتون الخفيف، وتمت العناية بالبخر، ذو مقطع TT (Double T)؛ كما يظهر في الشكل (3-5)؛ مشدود بـ (12) جديلة بالقطر "½ (12 X φ 12.7mm) من فولاذ ذي مقاومة 1860 MPa (270-K) مخفف الإجهاد.

مسار الجداول زاوية Harped، اللامركزية في وسط الجائز (0.475) m، وفي الطرف (0.330) m احسب ضياع مسبق الإجهاد في المقطع الحرج في الجائز، من الحمولة الميئة والحمولات الميئة الإضافية. افترض أن المقطع الحرج، يقع على البعد 0.4 L من المجاز.

(a) المرحلة I عند نقل القوة

(b) المرحلة II بعد وضع التغطية الببتونية

(c) المرحلة III بعد سنتين من وضع التغطية الببتونية

افتراض أن طبقة التغطية مصبوبة بعد (30) يوماً.

افتراض أيضاً أن نقل القوة، يتم بعد (18) ساعة من شد الجداول (تطبيق قوة مسبق الإجهاد، جرى بعد (18) ساعة من العناية بالببتون).

المعطيات:

$$f'_c = 36 \text{ MPa} \text{ خرسانة خفيفة}$$

$$f'_{ci} = 24 \text{ MPa}$$

$$W = 1840 \text{ kg/m}^3 \text{ الوزن الحجمي للببتون الخفيف}$$

$$A_{ps} = 12 \times 9.87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 11.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

مساحة مسبق الإجهاد:

خواص المقطع غير المركب:

$$I_c = 0.025 \text{ m}^4 \quad , \quad A_c = 0.4 \text{ m}^2$$

$$c_b = 0.56 \text{ m}$$

$$c^t = 0.25 \text{ m}$$

$$S_b = 0.045 \text{ m}^3$$

$$S^t = 0.098 \text{ m}^3$$

$$WD = 7.2 \text{ kN/m} \text{ الحمل الميت دون طبقة التغطية}$$

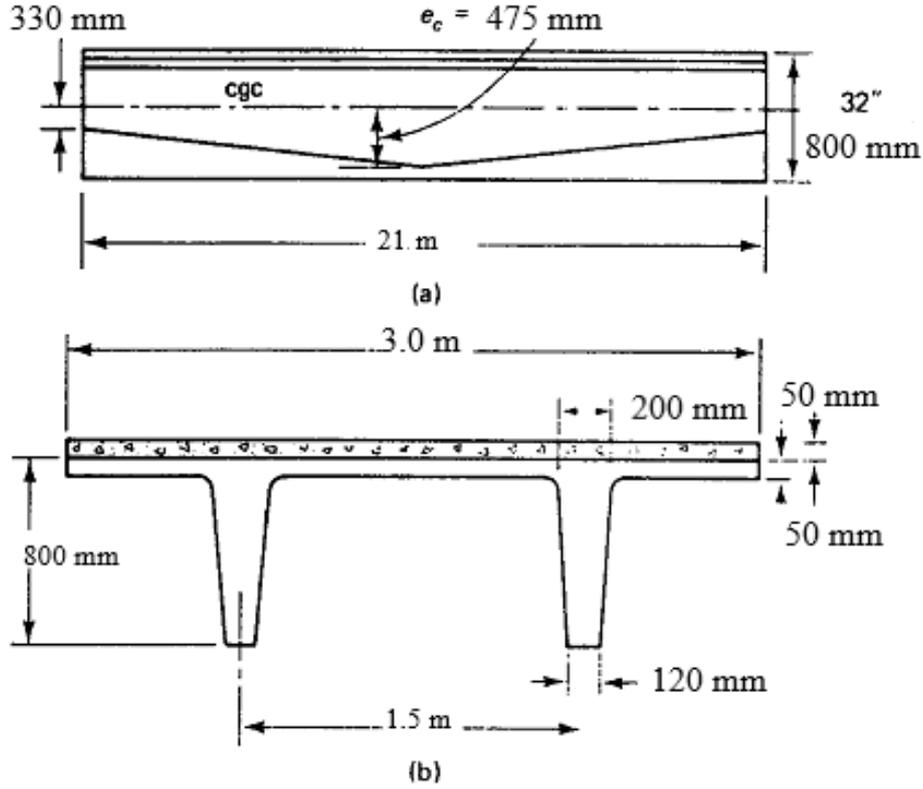
$$WSD = 3.65 \text{ kN/m} \text{ الحمل الميت لطبقة التغطية}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_{py} = 0.85 \times f_{pu} \cong 1580 \text{ MPa}$$

$$f_{pi} = 0.70 \times f_{pu} = 0.82 \times f_{py} = 0.82 \times 0.85 \times f_{pu} \cong 0.7 f_{pu} = 1300 \text{ MPa}$$

$$E_{ps} = 193000 \text{ MPa}$$



الشكل (3-5) جانز Double-T مسبق الإجهاد. (a) مقطع طولي. (b) مقطع عرضي

الحل:

$$f'_{ci} = 24 \text{ MPa}$$

$$E_{ci} = w^{1.5} \times (0.043 \times \sqrt{f'_{ci}}) = 1840^{1.5} (0.043 \sqrt{24}) \cong 16650 \text{ MPa}$$

$$E_c = w^{1.5} \times (0.043 \times \sqrt{f'_c}) = 1840^{1.5} (0.043 \sqrt{36}) \cong 20400 \text{ MPa}$$

المرحلة I: نقل الإجهاد

(a) قصر الطول المرن:

بعد المقطع الحرج عن المسند، هو:

اللامركزيّة عند المقطع الحرج

العزم من الحمولة الميّنة عند المقطع الحرج (على البعد 0.40 L من المسند)

$$0.4 \times 21.0 = 8.4 \text{ m}$$

$$e = 0.330 + 0.8 (0.475 - 0.330) = 0.446 \text{ mm}$$

$$M_D = W_D \frac{x}{2} (L - x) = 7.2 \times \left(\frac{8.4}{2}\right) (21.0 - 8.4) = 381 \text{ kN.m} = 0.381 \text{ MN.m}$$

بفرض أنّ الضياع من قصر الطول المرن، وارتخاء الفولاذ بحدود (10%)؛ أي بضياع قدره $\approx 130 \text{ MPa}$

فيكون إجهاد الفولاذ:

$$f_{pi} = 1300 - 130 = 1170 \text{ MPa}$$

$$P_i = A_{ps} f_{pi} = 0.001184 \times 1170 = 1.385 \text{ MN}$$

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{0.025}{0.4} = 0.0625 \text{ m}^2$$

$$f_{cs}^- = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{M_D \times e}{I_c}$$

$$f_{cs}^- = -\frac{1.385}{0.4} \left(1 + \frac{0.446^2}{0.0625}\right) + \frac{0.381 \times 0.446}{0.025}$$

$$f_{cs}^- = -14.483 + 6.797 = -7.686 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} = \frac{193000}{16650} = 11.59$$

$$\Delta f_{pES} = n f_{cs}^- = 11.59 \times 7.686 = 89.08 \text{ MPa}$$

في حال استعمال $f_{pi} = 1300 \text{ MPa}$

فيكون f_{pi} الصافي هو

$$1300 - 89.08 = 1211 \text{ MPa}$$

$$f_{cs}^- = -14.483 \times \frac{1211}{1170} + 6.797 = -8.19 \text{ MPa}$$

تصبح

$$\Delta f_{pES} = n f_{cs}^- = 11.59 \times 8.19 = 94.92 \text{ MPa}$$

الفرق بين الطريقة الدقيقة، التي أعطت ضياعاً مقداره (89.08) ميغاباسكال، مقابل الطريقة التقريبية بحسم قدره (10%) من قيمة الشد الابتدائي، التي أعطت ضياعاً مقداره (94.92) ميغاباسكال، والفرق هو (5.84) ميغاباسكال؛ أي بحدود (10%).

لذا؛ فإن افتراض ضياع مقداره (10%) في البداية؛ لتقدير قيمة $P_i \approx 0.90 P_j$ سيكون مناسباً.

(b) ارتخاء إجهاد الفولاذ:

حساب ارتخاء إجهاد الفولاذ في مرحلة نقل القوة:

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) = 1300 \left(\frac{\log 18}{10} \right) \left(\frac{1300}{1580} - 0.55 \right) = 44.75 \text{ MPa}$$

$$\Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} = 89.08 + 44.51 = 133.59 \text{ MPa} \cong 130 \text{ MPa}$$

النتيجة مقبولة

$$\Delta f_{pCR} = 0$$

(c) الضياع من الزحف:

$$\Delta f_{pSH} = 0$$

(d) الضياع من الانكماش:

يكون مجموع الضياع في المرحلة I:

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} = 89.08 + 44.51 + 0 + 0 = 133.59 \text{ MPa}$$

إجهاد الجديلة في نهاية المرحلة I : $f_{pi} = 1300 - 133 = 1167 \text{ MPa}$

$$P_i = 1167 \times 0.0000987 \times 12 = 1.382 \text{ MN}$$

القوة المتوافرة

المرحلة II: بعد النقل- إلى وضع التغطية البيتونية بعد (30) يوماً
(a) الضياع من الزحف:

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} = \frac{193000}{20400} = 9.46$$

$$f_{cs}^- = -14.483 + 6.797 = -7.686 \text{ MPa}$$

العزم من التغطية:

$$M_{SD} = W_{SD} \frac{x}{2} (L - x) = 3.65 \times \left(\frac{8.4}{2}\right) (21.0 - 8.4) = 193.2 \text{ kN.m}$$

$$= 0.1932 \text{ MN.m}$$

$$f_{csd}^- = \frac{M_{SD} e}{I_c} = \frac{0.1932 \times 0.446}{0.025} = 3.45 \text{ MPa}$$

تعدّ المدّة (30) يوماً قصيرة؛ نسبة إلى التأثيرات الطويلة الأمد، إنّما استعمال عامل الزحف K_{CR} يعدّ تقريباً مناسباً مسوّغاً في المرحلة II، من أجل اعتمادها في المرحلة III أيضاً؛ (انظر حساب الزحف في المرحلة III).
من أجل البيتون الخفيف، استعمل $K_{CR} = 2.0 \times 80\% = 1.6$.
يكون الضياع من الزحف؛ بسبب الزحف الطويل الأمد:

$$\Delta f_{pCR} = n K_{CR} (f_{cs}^- - f_{csd}^-) = 9.46 \times 1.6 \times (7.686 - 3.45) = 64.11 \text{ MPa}$$

(b) الضياع من الانكماش:

افتراض رطوبة نسبية (RH) = (70%)؛ يكون الضياع بسبب الانكماش الطويل الأمد:

$$\frac{V}{S} = 1.69$$

من الشكل الهندسي نستنتج

$$K_{SH} = 1.0$$

من أجل العناصر السابقة الشدّ

يكون:

$$\Delta f_{pSH} = 8.2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0.06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

$$\Delta f_{pSH} = 8.2 \times 10^{-6} \times 1 \times 186000 (1 - 0.06 \times 1.69) (100 - 70)$$

$$= 41.11 \text{ MPa}$$

(c) الضياع من ارتخاء الفولاذ بعد (30) يوماً:

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) = 1167 \left(\frac{\log 720 - \log 18}{10}\right) \left(\frac{1167}{1580} - 0.55\right)$$

$$= 35.26 \text{ MPa}$$

حيث $t_1 = (18)$ ساعة

$$t_2 = 30 \times 24 = 720 \text{ ساعة}$$

$$f_{ps} = 1167 \text{ MPa}$$

يكون مجموع الضياعات للمرحلة II:

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} = 64.11 + 41.11 + 35.26 = 140.5 \text{ MPa}$$

زيادة الإجهاد في الجداول؛ بسبب إضافة التغطية هو:

$$f_{SD} = n f_{csd} = 9.46 \times 3.45 = 32.64 \text{ MPa}$$

يكون إجهاد الجداول في نهاية المرحلة II:

$$f_{pe} = f_{ps} - \Delta f_{pT} + f_{SD} = 1167 - 140.5 + 32.64 \cong 1059 \text{ MPa}$$

المرحلة III: بعد مرور سنتين

نفترض أن قيم الزحف الطويل المدى والانكماش الطويل المدى، المقيمة في المرحلة II، لم تزد بشكل مؤثر؛ حيث تم استعمال قيم الزحف K_{CR} والانكماش K_{SH} الطويلة المدى في حسابات المرحلة II، الضياع من ارتخاء الفولاذ:

$$\Delta f_{pR} = f_{pe} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) = 1059 \left(\frac{\log 17520 - \log 720}{10} \right) \left(\frac{1059}{1580} - 0.55 \right)$$

$$= 17.65 \text{ MPa}$$

حيث $t_1 = 720$ ساعة

$$t_2 = 2 \times 365 \times 24 = 17520 \text{ ساعة}$$

فيكون إجهاد الجداول f_{pe} في نهاية المرحلة III، يساوي:

$$f_{pe} = 1059 - 17.65 = 1041 \text{ MPa}$$

ملخص الإجهادات

مستويات الإجهاد عند المراحل المختلفة	إجهاد الفولاذ MPa	النسبة المئوية
بعد الشد	1,300.00	100.00%
ضياع قصر طول العنصر	-89.08	-6.85%
ضياع الزحف	-64.11	-4.93%
ضياع الانكماش	-41.11	-3.16%
مجموع ضياعات الارتخاء في المراحل الثلاثة = 17.65+35.26+44.51	-97.42	-7.49%
زيادة الإجهاد نتيجة طبقة التغطية	32.64	2.51%
المجموع	1,040.92	80.07%

المثال (9.5) قيمة ضياع قوة مسبق الإجهاد الناتج في مراحل عمر لخرسانة لاحقة الإجهاد

حلّ المثال (8.5) بافتراض أنّ الجائز لاحق الشدّ، وضياع مخدّات جهاز الإرساء (6.35) مم (¼)، وتمّ شدّ جميع الجدائل دفعة واحدة داخل قناة مرنة.

افتراض أيضاً أنّ قوة الشدّ المستعملة قبل حصول الضياعات، من الاحتكاك ومخدّات جهاز الإرساء كانت:

$$f_{pi} = 1300 \text{ MPa}$$

في هذه الحالة ($f_{pj} = f_{pi}$)

الحلّ:

أ- الضياع عند جهاز الإرساء:

$$\Delta_A = 6.35 \text{ mm} = 0.00635 \text{ m} \quad L = 21.0 \text{ m}$$

$$\Delta f_{pa} = \frac{\Delta_A}{L} \times E_{ps} = \frac{0.00635}{21.0} \times 193000 = 58.36 \text{ MPa}$$

ب- نقصان الطول المرن:

بما أنّ إجراء الشدّ اللاحق تمّ دفعة واحدة، فإنّ نقصان الطول المرن، يحدث في أثناء الشدّ، وكنتيجة لا يوجد ضياع من نقصان الطول المرن.

ت- الضياع من الاحتكاك:

بافتراض أنّ مسار الوتر القطعيّ، يقارب شكل قوس من دائرة، فيكون:

$$\alpha = \frac{8y}{x} = \frac{8(0.475 - 0.330)}{21.0} = 0.055$$

من الجدول $K = 0.0033$ و $\mu = 0.25$.

$$f_{pi} = 1300 \text{ MPa}$$

يكون ضياع الإجهاد من مسبق الإجهاد:

$$\Delta f_{pi} = f_{pi}(\mu\alpha + KL) = 1300(0.25 \times 0.055 + 0.0033 \times 21.0) = 110 \text{ MPa}$$

الإجهاد الباقي في مسبق الإجهاد، بعد حصول جميع الضياعات الأولى الأنيّة:

$$f_{pi} = 1300 - 58.36 - 0 - 110 \cong 1132 \text{ MPa}$$

فتكون قوّة مسبق الإجهاد الصافية:

$$P_i = 1132 \times 12 \times 9.87 \times 10^{-5} = 1.34 \text{ MN}$$

مقارنة مع $P_i = 1382 \text{ MPa}$ في حالة الشدّ السابق للمثال (8.5).

المرحلة ا: الإجهاد عند نقل القوّة

(a) الضياع عند جهاز الإرساء:

الضياع: 58.36 MPa

الإجهاد الصافي: 1132 MPa

(b) الضياع من الارتخاء:

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) = 1132 \left(\frac{\log 18}{10} \right) \left(\frac{1132}{1580} - 0.55 \right) = 23.65 \text{ MPa}$$

$$\Delta f_{pCR} = 0 \quad \text{(c) الضياع من الزحف:}$$

$$\Delta f_{pSH} = 0 \quad \text{(d) الضياع من الانكماش:}$$

يكون الإجهاد في الوتر f_{pi} في نهاية المرحلة I :

$$1132 - 23.65 \cong 1108 \text{ MPa}$$

فتكون قوّة مسبق الإجهاد الصافية:

$$P_i = 1108 \times 12 \times 9.87 \times 10^{-5} = 1.31 \text{ MN}$$

المرحلة II: من النقل إلى وضع التغطية بعد (30) يوماً

(a) الضياع من الزحف:

$$f_{cs}^- = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_D e}{I_c}$$

$$f_{cs}^- = -\frac{1.31}{0.4} \left(1 + \frac{0.446^2}{0.0625} \right) + \frac{0.381 \times 0.446}{0.025} = 6.9 \text{ MPa}$$

ومنه الضياع من الزحف:

من أجل البيتون الخفيف، يتم تخفيض K_{CR} بالمقدار (20%) : $1.6 \times 0.80 = 1.28$

$$\Delta f_{pCR} = n K_{CR} (f_{cs}^- - f_{csd}^-) = 9.46 \times 1.28 \times (6.9 - 3.45) = 41.78 \text{ MP}$$

(b) الضياع من الانكماش:

من المثال (8.5)، من أجل $K_{SH} = 0.58$ للعمر (30) يوم

$$\Delta f_{pSH} = 41.11 \times 0.58 = 23.84 \text{ MPa}$$

هنا، تمّ الافتراض أنّ القسم الأكبر من الضياعات، حدثت خلال (30) يوماً.

(c) الضياع من الارتخاء بالعمر (30) يوماً:

$$f_{ps} = 1108 \text{ MPa}$$

يصبح ضياع الإجهاد من الارتخاء

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) = 1108 \left(\frac{\log 720 - \log 18}{10} \right) \left(\frac{1108}{1580} - 0.55 \right)$$

$$= 23.84 \text{ MPa}$$

الضياع الكليّ في المرحلة II

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} = 23.84 + 41.78 + 23.84 = 89.46 \text{ MPa}$$

من المثال (8.5)، زيادة الإجهاد في الجداول؛ بسبب إضافة التغطية، هو:

$$f_{SD} = 32.64 \text{ MPa}$$

فيكون إجهاد الجداول في نهاية المرحلة II هو:

$$f_{pe} = f_{ps} - \Delta f_{pT} + f_{SD} = 1108 - 89.46 + 32.64 = 1051 \text{ MPa}$$

المرحلة III: في نهاية عامين

ضياح الإجهاد من الارتخاء:

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) = 1051 \left(\frac{\log 17520 - \log 720}{10} \right) \left(\frac{1051}{1580} - 0.55 \right)$$

$$= 16.78 \text{ MPa}$$

باستعمال افتراضات الزحف والانكماش نفسها، للمرحلة III من المثال (8.5)، يكون إجهاد الجدران f_{pe} في نهاية المرحلة III، تقريباً:

$$f_{pe} = 1051 - 16.78 = 1034.22 \text{ MPa}$$

ملخص الإجهادات

مستويات الإجهاد عند المراحل المختلفة	إجهاد الفولاذ MPa	النسبة المئوية
بعد الشد	1,300.00	100.00%
ضياح قصر طول العنصر	0.00	0.00%
ضياح عند الارساء (دخول المخروط)	-58.36	-4.49%
ضياح الاحتكاك	-110.00	-8.46%
ضياح الزحف	-41.78	-3.21%
ضياح الانكماش	-23.84	-1.83%
مجموع ضياحات الارتخاء في المراحل الثلاثة=23.65+23.84+16.78	-64.27	-4.94%
زيادة الإجهاد نتيجة طبقة التغطية	32.64	2.51%
المجموع	1,034.39	79.57%