البيتون مسبق الإجهاد (Prestressed Concrete)

المواد – الأغماد - أجهزة الإرساء وقطع وصل

أولاً - الفولاذ

1- الفولاذ العاديّ:

تطبّق كامل اشتراطات الكود الأساس.

2- الفولاذ مسبق الإجهاد:

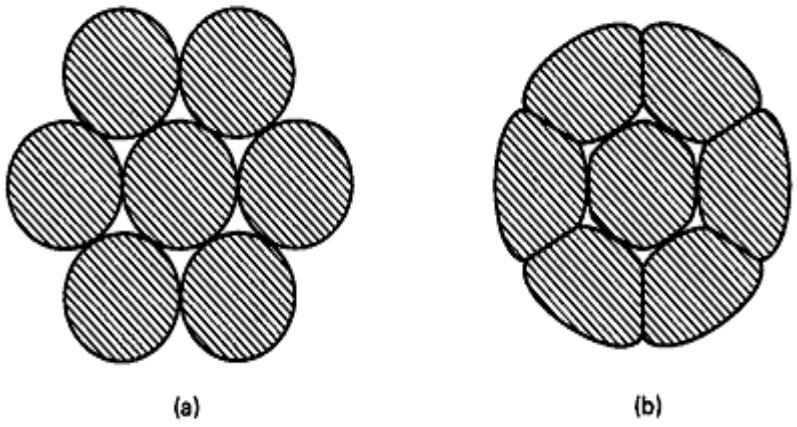
2-1- أشكال فولاذ التسليح المستعمل في البيتون مسبق الإجهاد:

أ - القضبان الملساء الخاصّة بمسبق الإجهاد Plain Prestressing bars.

ب- القضبان ذات النتوءات المستمرّة بشكل حلزونيّ أو المتقطّعة الخاصّة بمسبق الإجهاد Deformed Prestressing bars.

ج- أسلاك مفردة ملساء خاصّة بمسبق الإجهاد Prestressing wires.

د- جدائل مؤلّفة، غالباً، من سبعة أسلاك ملساء خاصّة بمسبق الإجهاد، من الشكلين القياسيّ والمدموج. Seven-wire strands.



جدائل مسبق الإجهاد القياسيّة والمضغوطة.

(a) مقطع جديلة قياسيّة. (b) مقطع جديلة مضغوطة.

2-2- ويمكن أن تكون من أحد أنواع الفولاذ الآتية:

- فولاذ عالي المقاومة، ذو سطح أملس من الدرجة Grade (1725) أو الدرجة (1860)، يستعمل في الفولاذ المعرّف في الفقرات السابقة أ و/ج/ و/د/.

- فولاذ عالي المقاومة، ذو سطح ذي نتوءات من الدرجة (1725) أو الدرجة (1860)، يستعمل في الفولاذ المعرّف في الفقرة السابقة /ب/.

2-3- تتوافر في الأسواق العالميّة أشكال وأنواع أخرى من الفولاذ الخاصّ بمسبق الإجهاد.

يبيّن الجدول الآتي الأنواع والأقطار الأكثر استعمالاً، والمعتمدة من الجمعيّة الأمريكيّة لاختبارات الموادّ ASTM

معلومات عن حديد تسليح مسبق الإجهاد

القضبان القياسية Standard Bars

الكتلة الاسميّة كغ/م	المساحة الاسميّة مم^2	القطر الاسميّ مم	رقم القضيب*
0.560	71	9.5	10
0.994	129	12.7	13
1.552	199	15.9	16
2.235	284	19.1	19
3.042	387	22.2	22
3.973	510	25.4	25
5.060	645	28.7	29
6.404	819	32.3	32
7.907	1006	35.8	36
11.38	1452	43	43
20.24	2581	57.3	57

* رقم القضيب يرمز الى أقرب رقم بالميلي متر للقطر الاسميّ للقضيب

الأوتار القياسيّة Standard Tendons

الكتلة الاسميّة كغ/م	المساحة الاسميّة مم^2	القطر الاسميّ مم	النوع*
0.182	23.2	6.4	جديلة بسبعة أسلاك مقاومة 1725 MPa
0.294	37.4	7.9	
0.405	51.6	9.5	

0.548	69.7	11.1	
0.730	92.9	12.7	
1.094	139.4	15.2	
0.432	54.8	9.53	جديلة بسبعة أسلاك مقاومة MPa 1860
0.582	74.2	11.1	
0.775	98.7	12.7	
1.102	140.0	15.24	
0.146	18.7	4.88	اسلاك مسبق الإجهاد
0.149	19.5	4.98	
0.253	31.7	6.35	
0.298	38.6	7.01	
3.04	387	22	قضبان مسبق الإجهاد (ملساء)
3.97	503	25	
5.03	639	29	
6.21	794	32	
7.52	955	35	
1.46	181	15	قضبان مسبق الإجهاد (محلزنة)
2.22	271	20	
4.48	548	26	
6.54	806	32	
8.28	1019	36	

* رقم القضيب يرمز الى أقرب رقم بالميلي متر للقطر الاسميّ للقضيب

الأوتار القياسيّة Standard Tendons

المساحة مم^2/ متر بحسب التباعد بين الاسلاك												
التباعد بين الأسلاك من المحور إلى المحور بالـ مم												
300	250	200	150	100	75	50	كغ/ م	مم	محلزنة	ملساء	MW & MD	الاسميّة
970	1160	1450	1900	2900	3900	5800	2.27	19.22	MD290	MW290	أبعاد نموذجي الأسلاك	الكتلة
670	800	1000	1300	2000	2700	4000	1.57	15.95	MD200	MW200		القطر الاسميّ

MW130	MD130	12.9	1.0204	2600	1700	1300	870	650	520	430
MW120	MD120	12.4	0.9419	2400	1600	1200	800	600	480	400
MW100	MD100	11.3	0.7849	2000	1300	1000	670	500	400	330
MW90	MD90	10.7	0.7064	1800	1200	900	600	450	360	300
MW80	MD80	10.1	0.6279	1600	1100	800	530	400	320	270
MW70	MD70	9.4	0.5494	1400	930	700	470	350	280	230
MW65	MD65	9.1	0.5102	1300	870	650	430	325	260	220
MW60	MD60	8.7	0.4709	1200	800	600	400	300	240	200
MW55	MD55	8.4	0.4317	1100	730	550	370	275	220	180
MW50	MD50	8.0	0.3925	1000	670	500	330	250	200	170
MW45	MD45	7.6	0.3532	900	600	450	300	225	180	150
MW40	MD40	7.1	0.3140	800	530	400	270	200	160	130
MW35	MD35	6.7	0.2747	700	470	350	230	175	140	120
MW30	MD30	6.2	0.2355	600	400	300	200	150	120	100
MW25	MD25	5.6	0.1962	500	330	250	170	125	100	83
MW20		5.0	0.1570	400	270	200	130	100	80	67
MW15		4.4	0.1177	300	200	150	100	75	60	50
MW10		3.6	0.0785	200	13	100	70	50	40	33
MW 5		2.5	0.0392	100	67	50	33	25	20	17

3- مواصفات فولاذ التسليح الخاصّ بمسبق الإجهاد:

- يجب أن يحقّق الفولاذ مسبق الإجهاد المواصفات القياسيّة السوريّة، أو مواصفات الجمعيّة الأمريكيّة للمواد، واختباراتها ASTM بحسب نوع الفولاذ المستعمل:
  - أسلاك عاديّة ASTM A421M
  - أسلاك قليلة الارتخاء ASTM A421M مع ملحقه المتمّم "Low Relaxation Wire"
  - جدائل ASTM A416M
  - قضبان عالية المقاومة ASTM A722M

- يمكن استعمال أنواع تسليح مسبق الإجهاد، التي تخضع إلى مواصفات مختلفة عن المواصفات أعلاه؛ بشرط أن تحقّق مواصفاتها للاشتراطات الدنيا الواردة في المواصفات أعلاه، وعلى ألّا تحتوي على خصائص، تجعله في مرتبة أقلّ وثوقيّة؛ ممّا ورد في المواصفات الأمريكيّة المشار إليها أعلاه.
- معامل المرونة للفولاذ مسبق الإجهاد E_p يحدّد من قبل مصنّع الفولاذ.

4- الأقطار المستعملة:

4-1 - تُستعمل الأقطار الواردة في الجدول السابق مقدّرة بالميلّيمتر، للأنواع والأشكال الأكثر شيوعاً.

4-2 - عند استعمال قضبان ذات نتوءات، يُؤخذ القطر الاسميّ للدائرة ذات القطر الأصغر، من دون حسبان للنتوءات، وتحسب مساحة المقطع من الجدول السابق أو من المصنّع.

5- الخواصّ الميكانيكيّة لفولاذ التسليح:

تُحدّد الخواصّ الميكانيكيّة لفولاذ التسليح بالعناصر الآتية:

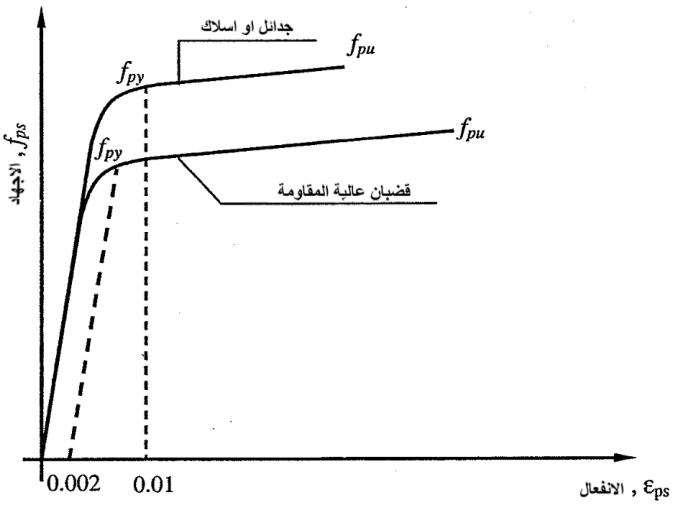
- إجهاد الخضوع f_u، أو إجهاد الضمان (إجهاد الخضوع الاصطلاحيّ)، الذي يترك (0.2%) من الانفعالات الدائمة.

- مقاومة الشدّ القصوى (f_{SU}).

- النسبة المئويّة للاستطالة عند الانقطاع. تستنتج قيمة النسبة المئويّة الدنيا للاستطالة عند الانقطاع، من اختبار عيّنة، طولها قبل الاختبار، يساوي خمسة أمثال قطرها.

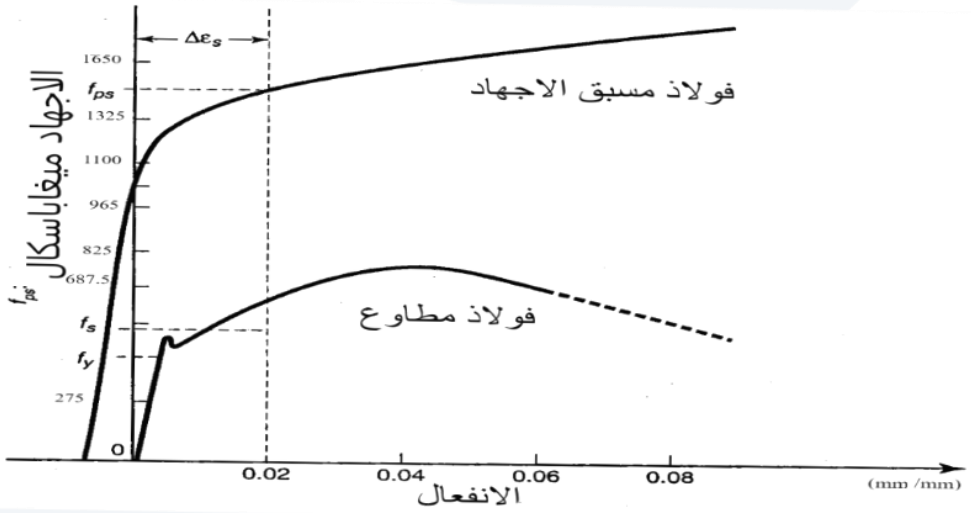
6- **الرسم البيانيّ للفولاذ:**

يُؤخذ الرسم البيانيّ للفولاذ الناتج عن الاختبارات. وفي حال عدم وجود اختبارات، يؤخذ وفقاً للمواصفات المعمول بها، أو يُؤخذ الرسم البيانيّ التالي.



المنحني الافتراضيّ للإجهاد والانفعال للفولاذ مسبق الإجهاد

ويظهر الشكل التالي مقارنة بين خواصّ الفولاذ العاديّ، والفولاذ مسبق الإجهاد.



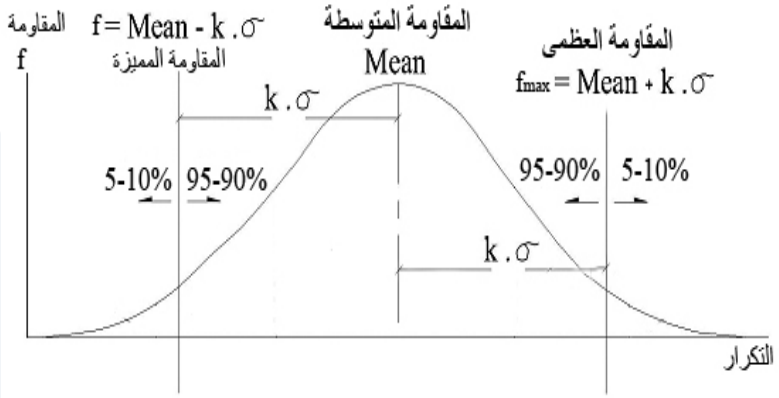
المنحني الافتراضيّ للإجهاد والانفعال للفولاذ مسبق الإجهاد؛ بالمقارنة مع الفولاذ العاديّ

7- المقاومة المميّزة للفولاذ (إجهاد الخضوع المميّز):

- في الفولاذ الطريّ عاديّ المقاومة أو عالي المقاومة، الذي تظهر فيه خاصّة الخضوع، يكون فيه إجهاد الخضوع هو الإجهاد المطابق لمرحلة الخضوع. ويُرمز لهذا الإجهاد بالرمز f_y.
- في الفولاذ المعالج على البارد، وفي بعض الأنواع الأخرى من الفولاذ العالي المقاومة، الذي لا تظهر فيه عتبة الخضوع، يكون إجهاد الخضوع (الاصطلاحيّ) هو الإجهاد الذي يترك انفعالاً متبقّياً؛ مقداره (0.2%). ويُرمز لهذا الإجهاد بـ $(f_{0.2}) = (f_y)$، ويسمّى أحياناً إجهاد الضمان (proof stress).
- إنّ إجهاد الخضوع f_y، هو المقاومة الميكانيكيّة المميّزة للفولاذ في الشدّ، التي يُبنى التصميم على أساسها. ويجب أن يكون حدّه الأدنى مكفولاً من البائع أو المنتج؛ وإلّا وجب تحديده على أساس تجارب مخبريّة معترف بها، واعتماداً على علم الإحصاء؛ بحيث لا تزيد نسبة عدد العيّنات، التي يقلّ إجهاد خضوعها (الحقيقيّ أو الاصطلاحي)، عن إجهاد الخضوع المميّز، (أو الاصطلاحيّ المميّز)، على (5%) من عدد العيّنات المدروسة.
- يبيّن الشكل التالي منحني جاوس للتوزّع الطبيعيّ (بشكل الجرس)، ومبيّنة عليه مواقع المقاومة المميّزة للفولاذ، والمقاومة المتوسّطة لمجموعة العيّنات، وكذلك المقاومة العظمى المسموحة (المناظرة للمقاومة المميّزة؛ أي تلك التي لا تزيد نسبة عدد العيّنات، التي يزيد إجهاد خضوعها على هذه المقاومة العظمى، بأكثر من (5%) من عدد العيّنات المدروسة).

إنّ عدم قبول زيادة النسبة للمقاومات فوق المقاومة العظمى المسموحة بأكثر من (5%) من عدد المقاومات المدروسة، هو من أجل التحقّق من صلاحيّة فولاذ التسليح لمقاومة الزلازل؛ بحيث يسمح بالتشوّهات اللدنة اللازمة، وإعادة توزيع القوى والعزوم الناتجة في المنشأة، وعدم حصول الانهيار الهشّ للعناصر البيتونية المسلّحة.

- يجب ألّا تقلّ المقاومة عند الانقطاع لأيّة عيّنة مختبرة، عن (1.25) مرّة من إجهاد خضوعها (أو إجهاد خضوعها الاصطلاحيّ).



منحني جاوس للتوزّع الطبيعيّ مبيّنة عليه المقاومات المميّزة والمتوسّطة والعظمى

النسبة (5%) لفولاذ التسليح، والنسبة (10%) للبيتون.

8- حماية فولاذ التسليح

1- يجب أن تكون قضبان التسليح (بجميع أنواعها) نظيفة من الأوساخ والشحوم أو الزيوت، وخالية من الصدأ، وقابلة للثني، ومحقّقة لاشتراطات هذا الملحق؛ وخاصّة من حيث الخواص الميكانيكيّة والكيميائيّة.

2- لا يسمح باستعمال اللحام بأنواعه؛ لوصل قضبان أو أسلاك أو جدائل فولاذ مسبق الإجهاد، ويتم استعمال قطع وصل خاصّة حسب توصيات مصنّع فولاذ مسبق الإجهاد.

3- يجب تفادي حدوث حريق بالقرب من التسليح مسبق الإجهاد؛ سواء عند التخزين أو التصنيع؛ لتفادي ارتفاع حرارة فولاذ التسليح؛ ممّا يفقده الكثير من مقاومته. كذلك يجب التأكّد من عدم وصول الشرر المتطاير من عمليّات اللحام إلى التسليح؛ وذلك للضرر البالغ، الذي يسبّبه الشرر ذو الحرارة العالية جدّاً، والمركّزة في نقاط صغيرة. كذلك، يجب تفادي استعمال قضبان التسليح كممرّ لتيّار التأريض، لأيّ سبب كان، بما فيه تأريض المنشأة، أو التأريض المؤقّت لعمليّة اللحام بالقوس الكهربائيّ.

ثانياً - البيتون

- ✓ يُطبّق كامل اشتراطات الكود الأساس.
- ✓ من المفضّل استعمال البيتون العاديّ، وفي بعض الحالات، البيتون الخفيف، ويجب تجنّب استعمال البيتون المهوّا Air-entrained Concrete، ما لم يثبت وجود مواصفة محلّيّة أو عالميّة، تسمح بصراحة باستعمالها.
- ✓ معامل المرونة للبيتون E_c يمكن حسابه بالعلاقة: $E_c = w_c^{1.5} * 0.043 * \sqrt{f'c}$ (MPa)

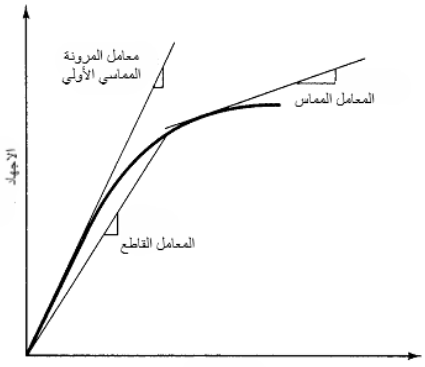
حيث: w_c الوزن الحجميّ للبيتون، ويتراوح بين (2440) و(2560) كغ/م^3.

يمكن أخذ قيمة وسطيّة لمعامل مرونة البيتون $E_c = 4700 * \sqrt{f'_c}$ (MPa) عند استعمال البيتون العاديّ الأكثر استعمالاً ذات الوزن الحجميّ (2300) كغ/م^3.

نظراً لحساسيّة معامل مرونة البيتون من تغيّر قيم معامل مرونة الحصويّات، الذي ينتج عنه تفاوت كبير؛ لذلك، تجب معرفة القيمة الفعليّة لمعامل المرونة؛ بتطبيق إجراءات الاختبارات الواردة في المواصفة ASTM C469M.

إنّ منحني الإجهاد الانفعال المبيّن في الشكل التالي ذو شكل منحنٍ، منذ المراحل الأولى لتطبيق الحمولة؛ لذلك فإنّ معامل المرونة Young's Modulus of Elasticity يمكن أخذه كمماسّ للمنحني من مبدئه. يعرف الميل الأساسي للمماس بمعامل المرونة المماس، ومن الممكن أخذ معامل مرونة مماس في أيّ نقطة من المنحني.

إنّ ميل الخط المستقيم، الذي يصل المبدأ إلى نقطة إجهاد محدّدة (تقريباً $0.4\ f'_c$)، يحدّد معامل المرونة القاطع للبيتون Secant. هذه القيمة المسمّاة في الحسابات بمعامل المرونة، وتحقق الافتراض القائل بأنّ الانفعال، الذي يحدث خلال التحميل، يمكن عدّه مرناً؛ (حيث يعود إلى شكله الأساسيّ بعد إزالة الحمل)، وينظر إلى أيّ انفعال لاحق بسبب التحميل؛ كونه زحفاً.



منحني الإجهاد الانفعال - معامل البيتون المماسّ والقاطع

✓ **شروط خاصّة بالبيتون المستعمل في مسبق الإجهاد:**

أ- يجب ألّا تقلّ المقاومة المميّزة الاسطوانيّة للبيتون f'_c عن (17.5) ميغا باسكال.

ب- ينصح باستعمال بيتون بمقاومات متوسّطة، حتّى C45؛ تخفيفاً للضياعات المختلفة الناشئة عن قوى مسبق الإجهاد، ويبقى الكود الأساس قابلاً للتطبيق.

ت- يمكن أن يتمّ استعمال بيتون ذات درجة جودة أعلى من C45، مع الأخذ بالحسبان ضرورة الاعتماد على كودات خاصّة بالبيتون عالية المقاومة؛ لأنّ مجال تطبيق الكود الأساس، هو حتى C45.

يوصّف البيتون بأنّه عالي المقاومة في الكود ACI 318 عندما تتجاوز مقاومة البيتون للضغط القيمة 42 MPa .

من أجل المقاومات بين 42 MPa و 84 MPa ، تعطى قيمة معامل مرونة البيتون بالعلاقة:

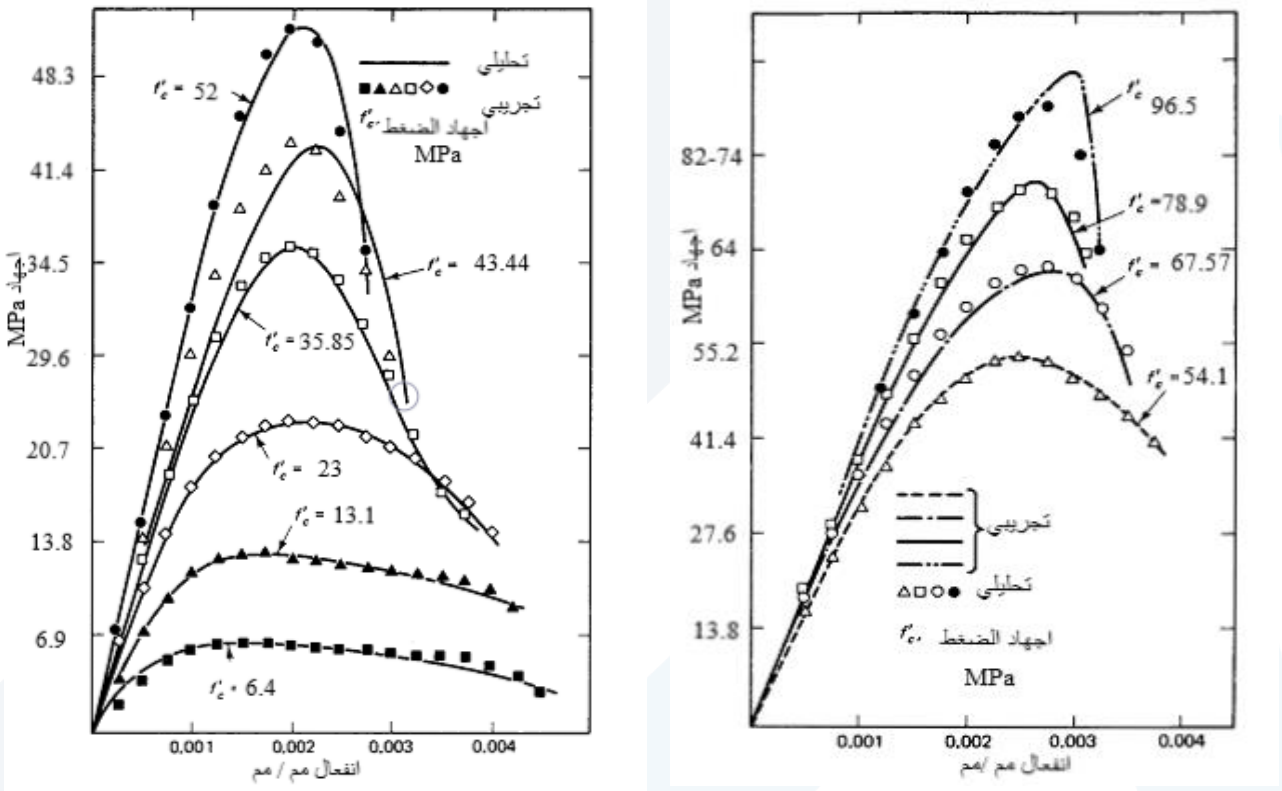
$$E_c(MPa) = \left[3320\sqrt{f'_c} + 6900\right]\left(\frac{w_c}{2330}\right)^{1.5}$$

حيث تقدر f'_c (MPa) و w_c (kg/m^3).

يمكن الآن الوصول إلى مقاومات بيتون، تصل إلى 138 MPa بسهولة؛ باستعمال حصويّات بالأبعاد 10mm ، وبتعويض جزء من كمّيّة الاسمنت بالإسمنت البوزولاني؛ مثل رماد السيليكا، يمكن الحصول على مثل هذه المقاومات في الحقل بشروط مشدّدة، لمراقبة النوعيّة والضمان.

من أجل الحصول على مقاومات بين 138-206 MPa يجب إضافة مكوّنات أخرى للخلطة؛ مثل ألياف الحديد أو الكربون، وفي جميع هذه الحالات، يجب تصميم الخلطة بدفعات تجريبيّة عدّة (خمسة أو أكثر)، مع تعديل المكوّنات من أجل سهولة التعامل المرغوبة الخاصّة بموقع الاستعمال.

يبيّن الشكل التالي مخطّطات الإجهاد – الانفعال لمقاومات مختلفة للبيتون.



منحنيات الإجهاد-الإنفعال لمقاومات مختلفة للبيتون

ث- مقاومة الضغط ومعامل المرونة البدائيّة عند نقل إجهاد الشدّ

بما أنّ عمليّة سبق الإجهاد، تطبّق، في أغلب الأوقات، قبل وصول البيتون إلى مقاومته بالعمر (28) يوماً: فمن المهمّ تحديد مقاومة ضغط البيتون البدائي f'_{ci} عند مرحلة نقل قوّة سبق الإجهاد، ومعامل مرونته E_c في المراحل المختلفة لتحميل العنصر. إنّ العلاقة العامّة لحساب مقاومة الضغط كتابع للزمن، هي:

$$f'_{ci} = \frac{t}{\alpha + \beta t} f'_c$$

حيث: f'_c هي مقاومة الضغط للعمر (28) يوماً

t العمر باليوم

α عامل يتعلّق بفئة الإسمنت وشروط العناية (السقاية والترطيب)

β عامل يتعلّق بنفس معايير α

من أجل العناية بالمياه، والإسمنت من الفئة I α=4.00 $\beta = 0.85$

من أجل العناية بالمياه، والإسمنت من الفئة III α=2.30 $\beta = 0.92$

من أجل العناية بالبخار، والإسمنت من الفئة I α=1.00 $\beta = 0.95$

من أجل العناية بالبخار، والإسمنت من الفئة III α=0.70 $\beta = 0.98$

معامل مرونة البيتون الفعّال E'_c هو:

$$E'_c = \frac{stress}{elasic\ strain + creep\ strain}$$

الإسمنت:

آ- تطبّق كامل الاشتراطات الواردة في الكود الأساس؛ شريطة ألّا تحتوي مركّبات أيّ من المكوّنات الأساسيّة للإسمنت، على مركّبات الكلور؛ لحساسيّة الفولاذ عالي المقاومة من هذه المركّبات.

ب- من المفضّل استعمال الإسمنت العاديّ أو الإسمنت المقاوم للكبريتات، ومن المفضّل تجنّب استعمال أنواع أخرى من الإسمنت؛ كالإسمنت المضاف إليه خَبَث الأفران Fly-ash أو البوزولان Pozzolana أو هباب السيليكا Silica Fume أو الإسمنت سريع التصلّب، أو الإسمنت الأبيض، أو أيّة أنواع أخرى، ما لم يثبت وجود مواصفة محلّيّة أو عالميّة، تسمح صراحة باستعمال هذه الأنواع من الإسمنت في عناصر مسبق الإجهاد؛ وخاصّة العناصر المعرّضة للشدّ اللاحق، وعندئذ، يجب لحظ ما يلزم لتعديل علاقات التصميم الواردة في هذا الملحق بحسب المواد المضافة.

ت- يجب التأكيد على عدم استعمال الإسمنت العالي الألومين، الذي لا يُسمح باستعماله في البيتون مسبقة الإجهاد.

الحصويّات وماء الخلط:

أ – إضافة إلى ما ورد في الكود الأساس فيجب خلوّ الحصويّات من مركّبات الكلور.

ب- إضافة إلى ما ورد في الكود الأساس فيجب التأكيد على ضرورة أن يكون الماء خالياً من الكلور؛ وخاصّة الكلور الحرّ المستعمل في تعقيم المياه.

الإضافات (الخلائط):

أ- يسمح باستعمال الإضافات المتعارَف على استعمالها في البيتون، من أجل تحسين ظروف التشغيل أو رفع المقاومة، إذا تحقّق الشرطان الأساسيّان:

- الأوّل والاهمّ: خلوّ هذه الإضافات من مركّبات الكلور؛ لأنّ لها تأثيراً مخرّباً على الفولاذ مسبق الإجهاد.
- والثاني: وجود مواصفة محلّيّة أو عالميّة، تسمح باستعمال هذه الإضافة إلى بيتون المنشآت مسبقة الإجهاد.

ب- عند استعمال نوعين أو أكثر من الإضافات، يجب أن تتمّ دراسة التأثير الناتج عن استعمال أكثر من مادّة مضافة في الوقت ذاته، وأخذ موافقة مصنّع الإضافات على ذلك.

ت- تطبّق جميع اشتراطات الكود الأساس المتعلقة بالإضافات.

مقاومة البيتون للحريق:

يُعتمَدُ كامل ما ورد في الكود الأساس المتعلّق بمقاومة الحريق، ويفضّل أن تتمّ الاستعانة بالكودات العالميّة المتعلّقة بمقاومة الحريق؛ وخاصّة للعناصر البيتونية مسبقة الإجهاد؛ نظراً إلى سرعة تأثّرها بالحرارة.

التماسك مع فولاذ التسليح:

إنّ تماسك الفولاذ سابق الشدّ مع البيتون، هو من المتطلّبات الأساسيّة في أعمال البيتون سابقة الإجهاد؛ لأنّه الأسلوب الرئيس لنقل قوى مسبق الإجهاد إلى البيتون.

تزيد مقاومة التماسك مع ما يأتي:

- وجود نتوءات مستقيمة، أو دائريّة، أو حلزونيّة، على القضبان.
- جودة البيتون وكثافتها؛ باستعمال خرسانات غنيّة بالإسمنت، قليلة المياه، حسنة التشغيل.
- الخشونة الضروريّة في القضبان الملساء.

ويُمنع منعاً باتّاً استعمال قضبان التسليح، إذا كان على سطحها دهان أو طلاء أو زيوت أو بيتومين، أو أيّ مادّة أخرى، تقلّل من التماسك بين التسليح والبيتون.

أمّا تماسك الفولاذ لاحق الشدّ مع البيتون، فيتمّ بطريقتين:

- الأولى: عند استعمال الأوتار الملتصقة، يتمّ حقن مونة خاصّة في الأغماد ذات البروزات الحلزونيّة؛ ممّا تساعد على التماسك مع البيتون، ونقل القوى الناشئة عن شدّ فولاذ التسليح. تزيد مقاومة التماسك بزيادة نتوء البروزات، وبزيادة كثافة مادّة الحقن ومقاومتها.
- الثانية: عند استعمال الأوتار غير الملتصقة، يكون أثر التماسك بين التسليح والبيتون مهملاً؛ حيث يتمّ نقل كامل قوى الشدّ تقريباً، عند نهايات العنصر End Zone.

ثالثاً- الأغماد

الهدف من استعمال الأغماد Ducts تأمين فراغ لمرور فولاذ التسليح لاحق الشدّ، عبر المسار المطلوب ضمن المقطع البيتوني، الذي سيصبّ قبل نقل قوّة الشدّ؛ كما أنّ الأغماد، تؤمّن حماية التسليح من التآكل نتيجة الصدأ.

الأغماد على نوعين: أغماد للشدّ اللاحق للأوتار الملتصقة؛ وأغماد للشدّ اللاحق للأوتار غير الملتصقة.

1- أغماد الشدّ اللاحق للأوتار الملتصقة

أغماد الشدّ اللاحق للأوتار الملتصقة، غالباً ما تكون من الصاج المزيبق، ولها نتوءات حلزونيّة، ويحدّد سمك الغمد بحسب قطره وعدد الجدائل، التي ستوضع داخله.

يجب أن تكون الأغماد قادرة على أن تحافظ على مادّة الحقن من دون تسرّب، وألّا تتفاعل مع أيّ من البيتون، أو مادّة الحقن، أو تسليح مسبق الإجهاد، أو المواد المانعة للتآكل المطليّ بها التسليح.

- الأغماد، التي ستحقن بالمونة، وتحتوي على سلك واحد، أو جديلة واحدة، أو قضيب واحد، يجب أن يكون قطرها أكبر بـ (6) مم من قطر التسليح المفرد.
- الأغماد، التي ستحقن بالمونة، وتحتوي على مجموعة من الأسلاك، أو الجدائل، أو القضبان؛ يجب أن يكون قطرها، على الأقلّ، مساوياً لضعف قطر المجموعة.
- يجب التأكّد من خلوّ الأغماد من بقع مائيّة، إذا كانت عمليّة الحقن، ستنفّذ في درجة حرارة خارجيّة أقلّ من درجة تجمّد الماء؛ لتفادي تجمّد المياه المتبقّية في الأغماد، الذي يتسبّب في تشقّق البيتون عند تجمّده.
- إذا كانت عمليّة الحقن، ستتأخّر عن عمليّة الشدّ اللاحق؛ فيجب استعمال تسليح مطليّ بمادّة مانعة للتآكل.

2- أغماد الشدّ اللاحق للأوتار غير الملتصقة

- يجب تغليف الأوتار غير الملتصقة بنوعين من الأغماد؛ الأوّل: أغماد مغلّفة وملتصقة بالأوتار (sheathing)، بعد أن تطلى الأوتار قبل وضعها بهذه الأغماد، بشكل كامل، بمواد مانعة للتآكل؛ الثاني: الأغماد العاديّة (ducts)، التي تحدّد مسار الوتر، ويجب أن تحقن هذه الأغماد بمادّة سائلة مناسبة، تمنع التآكل.
- الأغماد يجب أن تكون مانعة لتسرّب المياه، وأن تكون مستمرّة على كامل طول الوتر؛ أفضل أنواع الأغماد الملتصقة بالأوتار، هي المصنوعة من البولي ايثيلين عالية الكثافة المسحوبة من دون لحام (المبثوقة Extruded) مباشرة حول الأوتار.
- في الأوساط الضارّة المساعدة على التآكل، يجب أن تكون الأغماد مانعة للتسرّب، عند اتّصالها مع أجهزة الإرساء وقطع الوصل الداخليّة للأوتار.
- الأوتار غير الملتصقة ذات الجديلة المفردة، يجب حمايتها بما يتلاءم مع المواصفة الأمريكيّة:

Tendons ACI 423.7 Corrosion and Repair of Unbonded Single Strand

رابعاً- مادّة الحقن للأوتار الملتصقة

- تتألّف مادّة الحقن من إسمنت بورتلاندي وماء، وقد يضاف إليهما رمل ناعم و/أو إضافات كيميائيّة. وعمليّة الحقن عمليّة دقيقة، وحرجة بالنسبة إلى العناصر لاحقة الشدّ الملتصقة؛ وعلى مادّة الحقن أن تؤمّن التلاصق بين التسليح لاحق الشدّ والغمد، وتؤمّن حماية التسليح من التآكل.
- يجب أن تكون جميع المركّبات الداخلة في مادّة الحقن، خالية من مركّبات الكلور والفلور والكبريت والنيترات.
- يجب أن يحقّق الإسمنت البورتلندي المستعمل، الاشتراطات الواردة أعلاه.
- يجب أن يحقّق الماء المستعمل في خلطة المونة الاشتراطات الواردة أعلاه؛ إضافة إلى شرط خلوّه من أيونات الكلور.
- يجب أن يكون الرمل ناعماً، "إذا سمح باستعماله"، ويحقّق اشتراطات المواصفة ASTM C144، مع السماح بتعديل التدرّج الحبّيّ المقترح في المواصفة المذكورة؛ كي يؤمّن تشغيلاً مقبولاً في أثناء عمليّة الحقن. ويفضل ألّا يستعمل الرمل في خلطة المونة، عندما تكون أقطار الأغماد صغيرة، أو في الأغماد كثيفة التسليح.
- يجب أن تكون الإضافات المطلوبة للمونة؛ لتسهيل عمليّة الحقن، والتحكّم بزمن الأخذ، معتمَدة من جهة علميّة معتمَدة، ولا تسبّب أيّة أضرار على الإسمنت والبيتون والتسليح.
- يمنع وجود كلورات الكالسيوم، قطعيّاً، في أيّ من مركبات الإضافات المطلوبة.
- إذا ما استدعت الحاجة إلى استعمال بودرة الألمنيوم؛ للمساعدة في انتفاخ المونة؛ كي تملأ الفراغات بين التسليح والغمد، فيجب أن تكون قادرة على إحداث انتفاخ بالمقدار (5 -10%).
- اختيار خواصّ مادّة الحقن:

أ- يجب أن تحقّق مواد مونة الحقن المحقِّقة لاشتراطات هذا البند، مقاومةً مكعّبيّةً؛ باستعمال مكعّب أبعاده (50) مم، بالعمر (7) أيّام، مقدارها (17) MPa؛ وبالعمر (28) يوماً، مقدارها 28 MPa.

ب- تعطى الأهمّيّة الأكبر عند اختيار خواصّ مادّة الحقن، لتوفير الخواصّ التشغيليّة للمونة، ويليها تأمين المقاومة المطلوبة.

- تبنى نسب خلط مواد الحقن؛ باعتماد أحد المبدأين:

أ- من نتائج تجارب على مونة الحقن الطازجة والمتصلّبة، قبل البدء بعمليّة الحقن.

ب- من نتائج مشاريع سابقة، تستعمل مواد الحقن والأغماد والتجهيزات المستعملة، ذاتها، في الحقن، وبشروط عمل متماثلة.

- يجب استعمال نوع الإسمنت والرمل والإضافات المستعملة، ذاتها، في التجارب أو المشاريع المماثلة.

- يجب أن تكون نسبة الماء في الخلطة، أقلّ ما يمكن؛ ممّا يسمح بإجراء عمليّة الحقن بسهولة، وبكلّ الأحوال، يجب ألّا تزيد النسبة الوزنيّة ماء/إسمنت عن (45%).
- يجب عدم إضافة الماء إلى خلطة المونة بعد تصنيعها؛ نتيجة للجفاف النسبيّ الحاصل فيها؛ بسبب التأخّر في عمليّة الحقن.
- خلط المونة وضخّها:
  - ✓ يتمّ خلط المونة وضخّها في آلة خلط وضخّ خاصّة، تؤمّن استمرار الخلط الميكانيكيّ والتحريك؛ للحصول على خليط متجانس القوام، ومزوّدة بمناخل تعبر من خلالها المونة، بالأبعاد المناسبة؛ للوصول إلى مضخّة الحقن؛ لتنفيذ عمليّة حقن كلّ غمد بعمليّة ضخّ مستمرة واحدة.
  - ✓ تجب ملاحظة درجات الحرارة المحيطيّة عند عمليّة الحقن؛ حيث يجب ألّا تقلّ عن (2) درجة مئويّة؛ كي لا يتجمّد الماء في المونة، قبل إنجاز عمليّة تفاعل الإسمنت، وألّا تتجاوز درجة الحرارة (32) درجة مئويّة؛ لتفادي الأخذ السريع للمونة، الذي قد يسبّب عدم وصول المونة إلى كامل الغمد؛ خاصّة في الأغماد الطويلة.
  - ✓ يجب ألّا تقلّ درجة الحرارة المحيطيّة عن (2) درجة مئويّة، في أيّ وقت، طالما لم تصل المقاومة المكعّبيّة للمونة إلى MPa (5)؛ باستعمال مكعّب أبعاده (50) مم.

خامساً- أجهزة الإرساء وقطع وصل التسليح لاحق الشدّ ونواقل القصّ

- يجب أن تؤمّن أجهزة الإرساء وقطع الوصل، في نظامي التسليح الملتصق وغير الملتصق، ما لا يقلّ عن (95%) من كامل قوّة الشدّ المطبّقة f_{pu} عند تجربتها وقياسها بوضعيّة عدم الالتصاق.
- يجب أن توضع أجهزة الإرساء وقطع الوصل في الأوتار الملتصقة، في أماكن، تؤمّن (100%) من قوّة الشدّ الكلّيّة، عند المقاطع الحرجة، بعد لصق الأوتار.
- يجب أن تتمّ الموافقة على مواقع قطع الوصل، من قبل جهة مرخّصة ومعتمدة. ويجب وضع هذه الأجهزة ضمن علب، لها طول مناسب، يسمح بحركة هذه الأجهزة في أثناء عمليّة الشدّ.
- في النظام غير الملتصق، يجب أخذ الاحتياطات المناسبة الناتجة عن أثر الحمولات المتكرّرة على تعب أجهزة الإرساء وقطع الوصل.
- تجب حماية أجهزة الإرساء وقطع الوصل وملحقات النهايات، من تأثير التآكل، بصورة دائمة.
- نواقل القصّ ذات المسامير برأس Shear Studs:

- يجب أن تحقّق نواقل القصّ المفردة أو المجمّعة، المواصفة ASTM A1044M وتختلف خواصّ النواقل المستعملة في البيتون مسبقة الإجهاد، عن تلك المستعملة في البيتون العاديّ؛ وخاصّة من حيث أبعاد رأس الناقل؛ حيث يجب أن تكون مساحته أكبر بعشر مرّات من مساحة الجذع؛ يجب ألّا يقلّ إجهاد الخضوع للفولاذ المستعمل عن MPa (350).