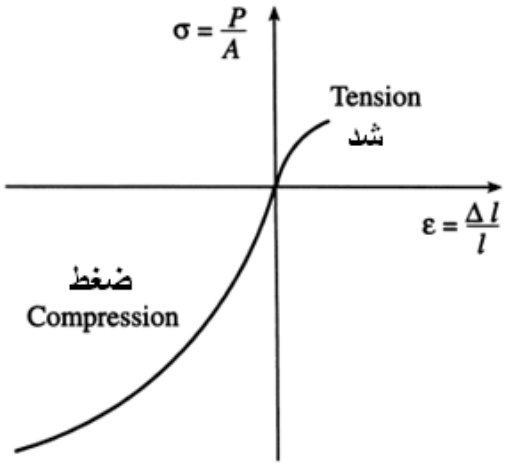
4- العناصر البيتونية المسلحة الخاضعة للشد البسيط

(حالة حد التشقق المعيب)

4-1- مقدمة – اختبار البيتون على الشد

إن مقاومة المواد الهشة على الشد ضعيفة جداً بالمقارنة مع مقاومتها على الضغط، كما يبينه الشكل (4-1)، ويمكن أن تتراوح النسبة بين هاتين المقاومتين، من 10 إلى 13، من أجل البيتون المستعمل بكثرة في المنشآت. وترتبط هذه النسبة بشكل ما مع المقاومة على الضغط، حيث من الممكن تحسين مقاومة البيتون على الضغط، ومن الصعب زيادة مقاومته على الشد بنفس المعدل.



الشكل (4-1): "سلوك المواد الهشة" على الشد والضغط - المخطط إجهاد – تشوه

وتحدد المقاومة المميزة للبيتون على الشد، بإحدى الطرائق التالية:

- اختبار الشد المباشر (البسيط):

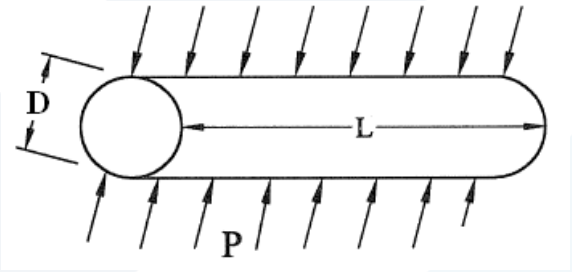
تستخدم عينات أسطوانية تعادل نحافتها $\frac{H}{D}=1.7$ ، حيث تمثل H ارتفاع الأسطوانة و D قطرها، بعمر 28 يوماً ، ويتم لصق رأسين معدنيين في طرفي العينة، الرأس يحوي قضيب شد متمركز ومتمفصل مع آلة الشد. وقبل لصق الرأسين بمادة لصق فعالة (الايبوكسي)، نعمل على تخشين وحز طرفي العينة ذات السطحين المستويين المتعامدين جيداً مع المولد، وذلك بهدف عزل منطقة البيتون غير المتجانسة. وتحدد مقاومة البيتون للشد البسيط كما يلي:

$$f_{ct}=\sigma_{ct}=\frac{P}{A}$$

حيث: P يمثل قوة الشد الأعظمية، و A المقطع العرضي للعينة.

- اختبار الشد بالفلق:

تستخدم عينات اسطوانية نظامية تعادل نحافتها $\frac{L=H}{D}=2$ ، حيث يوصي الكود السوري بعينات قطرها $D=15cm$ ، وطولها $L=D=30cm$ ، بعمر 28 يوماً. ويتم اختبارها بتعريضها للانفلاق (التجربة البرازيلية)، بواسطة حملي ضغط متساويين، يعملان على رأسين متقابلين، على طولي مولدين متقابلين للأسطوانة، كما هو مبين في الشكل (4-2).



الشكل (4-2): اختبار الشد في البيتون بفلق الأسطوانة

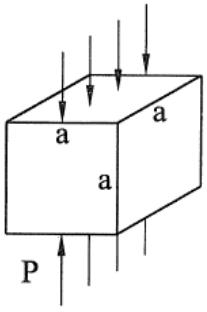
وتحسب مقاومة البيتون للشد بالانفلاق من العلاقة التالية:

$$f_{sp}=\frac{2P}{\pi DL}$$

وتكون مقاومة البيتون للشد البسيط مساوية إلى 0.85 من مقاومة الانفلاق، بمعنى:

$$f_{ct}=\frac{0.55P}{DL}$$

ويمكن إجراء الاختبار على عينات مكعبيه $(a\times a*a)$ ، بعمر 28 يوماً ، كما هو مبين في الشكل (4-3).



الشكل (4-3): اختبار الشد في البيتون بفلق المكعب

وتحسب مقاومة البيتون للشد بالانفلاق من العلاقة:

$$f_{sp}=\frac{2P}{\pi a^2}$$

وتكون مقاومة البيتون للشد البسيط، في هذه الحالة، مساوية أيضاً إلى 0.85 من مقاومة الانفلاق، أي:

$$f_{ct} = \frac{0.55P}{a^2}$$

- اختبار الشد بالانعطاف البسيط:

يجرى الاختبار على عينات موشورية نظامية وفق الأبعاد التالية: $(a \times a \times L = 10 \times 10 \times 55cm)$ أو $(a \times a \times L = 15 \times 15 \times 70cm)$ ، بعمر 28 يوماً، بحيث تحمل العينة بحملين متساويين ومتماثلين، يبعد كل منهما $15cm$ أو $20cm$ عن محور المسند، كما هو مبين في الشكل (4-4).

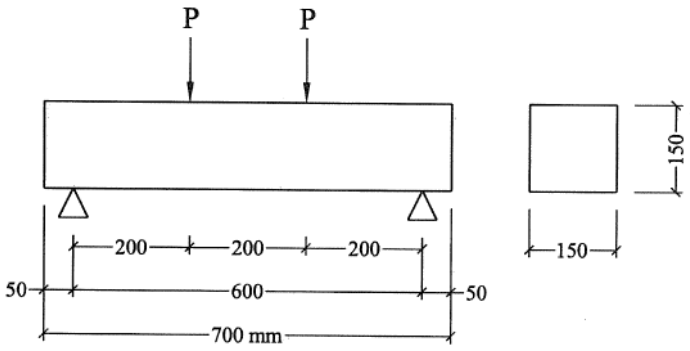
وتكون مقاومة البيتون للشد بالانعطاف، لحالة مقطع مربع:

$$f_{cb} = \frac{6M}{a^3}$$

حيث M يمثل عزم الانعطاف اللازم لكسر العينة الموشورية بمقطع مربع $(a \times a)$.

وتؤخذ مقاومة البيتون للشد البسيط (60%) من مقاومة الشد بالانعطاف، أي:

$$f_{ct} = \frac{3.6M}{a^3}$$

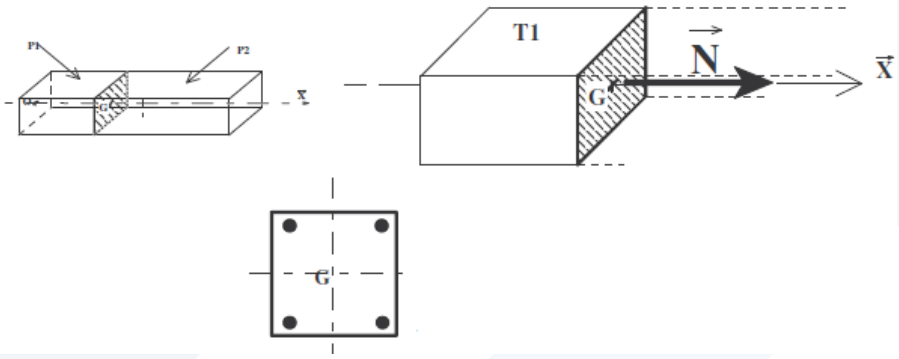


الشكل (4-4): اختبار الشد في البيتون بالانعطاف

4-2- الشد البسيط

أ- مقدمة:

نقول عن عنصر أنه خاضع للشد البسيط عندما تكون قوة الشد الخارجية موازية لمولد المقطع، ومارة من مركز ثقله (تطابق بين مركز ثقل سطح مقطع البيتون ومركز ثقل قضبان التسليح)، كما هو مبين في الشكل (4-5)، ويسمى هذا العنصر "الشداد".

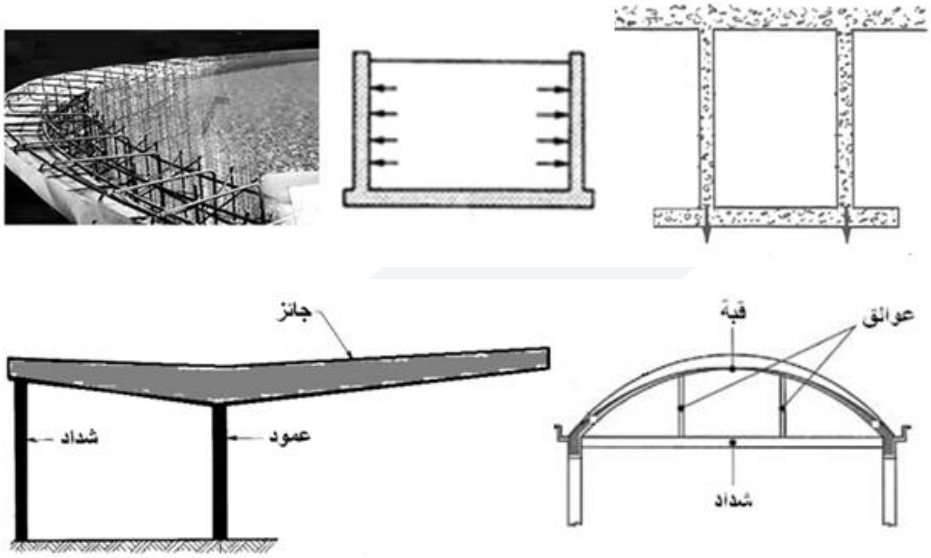


الشكل (4-5): الشد البسيط

إذن الشدادت هي عناصر إنشائية معرضة لشد بسيط وتتواجد في المنشآت على الشكل التالي: شدادت الأغطية القبية والإطارات والأنابيب وجدران الخزانات الدائرية، عوالق الجسور القوسية ذات البلاطات المعلقة وعناصر الجوائز الشبكية الخاضعة للشد البسيط عند إهمال وزنها الذاتي، كما هو مبين في الشكل(4-6). في الواقع إن هذه العناصر توضح جيدا ظاهرة التشقق في البيتون المسلح.

ونبين فيما يلي بعض النتائج العملية لنظرية التشققات:

- كل قطعة بيتونية مشدودة تتشقق.
- تتشكل الشقوق وتتباعد عن بعضها البعض وفق مسافات محددة، وكلما زادت التباعدات كانت الشقوق عريضة أكثر.
- تتناسب سعة الشقوق والتباعد بينها طردا مع قطر القضبان، وعكسا مع النسبة المئوية للتشققات التي تعرف بحاصل قسمة مقطع التسليح الطولي على مقطع البيتون المشدود.
- ترتبط سعة الشقوق مباشرة مع إجهاد فولاذ التسليح.



الشكل (4-6): عناصر إنشائية خاضعة لشد بسيط

ب- حساب الشداد:

إن عملية الحساب بحد ذاتها بسيطة جدا، حيث تتم موازنة القوى الخارجية بواسطة فولاذ التسليح فقط على اعتبار أن البيتون يتشقق وفق المقاطع القائمة، ويحدد مقطع فولاذ التسليح الطولي اعتمادا على المفهومين الأساسيين التاليين:

- الأمان الميكانيكي وتحقيق شرط عدم الهشاشية بحيث يسلح المقطع بنسبة أصغرية.
- شروط التشقق والحد من التشققات التي تعتمد على إجهاد التشغيل للفولاذ وسعة التشققات.

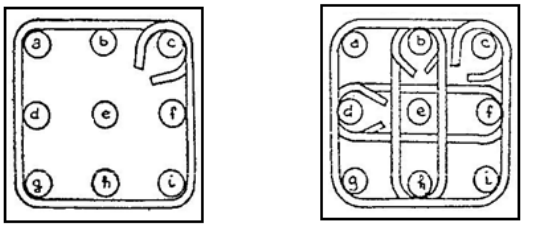
وفيما يخص البيتون، يجب أن يكون المقطع كافيا بحيث لا يسبب ظهور تشققات كبيرة تؤدي بدورها إلى صدأ فولاذ التسليح وبصورة خاصة إذا كانت المنشأة معرضة لتقلبات الطقس. في الواقع، تحدد قيمة المقطع العرضي للشداد استناداً لشرط الحد من سعة التشقق.

ت- ترتيبات عملية خاصة بتكوين الشدادات:

تسلح الشدادات بصورة مماثلة للعناصر المضغوطة، ويعني هذا أنها تحتوي على تسليح طولي وعرضي، مغلف بالبيتون بصورة جيدة.

لا يلعب التسليح العرضي أي دور في مقاومة الشداد، لذلك يتم وضع قضبان (إطارات – أساور- أتاري – شناكل) بهدف تشكيل قفص تسليح بأقطار صغيرة. نظرا لكون قضبان التسليح الطولية مشدودة وبالتالي لا يخشى من خطر التحنيب، ولا داعي للتمسك بشرط الحد الأعظمي لتباعد التسليح العرضاني وبشرط تثبيت القضبان الطولية الواقعة خارج زوايا الإطارات. ويكتفي بتباعد مساو لأصغر بعد في مقطع الشد.

تخص الترتيبات السابقة الشدادات غير الحاوية على مناطق وصل للقضبان الطولية، ولكن في حال الشدادات الطويلة فإنه ليس بالإمكان استخدام قضبان فولاذية بطول واحد وبالتالي اللجوء إلى وصل القضبان بالتلاحم ومن هنا يجب تخييط القضبان الطولانية في منطقة الوصل حتى لا تتشكل تشققات ناجمة عن عملية التلاحم ذاتها، وتتم الخياطة بوضع دبابيس أو شناكل إضافية للإطارات البسيطة التي تجمع القضبان في المناطق المستمرة، كما هو مبين في الشكل (4-7).



الشكل (4-7): مقطع عرضي لشداد من البيتون المسلح

4-3- مقاومة البيتون للشد – الاجهادات المسموحة للمواد وفق الكود السوري

نبين فيما يلي قيم هذه الخواص بدلالة المقاومة المميزة للبيتون على الضغط، المفيدة عند دراسة حالة الحد من التشقق المعيب:

- مقاومة البيتون للشد البسيط: $f_{ct} = 0.45\sqrt{f'_c}\ (MPa)$
- مقاومة البيتون للشد بالانعطاف: $f_{cb} = 0.74\sqrt{f'_c}\ (MPa)$
- الإجهاد المسموح للبيتون على الشد البسيط (حمولات استثمارية)، مع وجود تقلص:

$$\bar{f}_{ct} = 0.40\sqrt{f'_c}\ (MPa)$$

- الإجهاد المسموح للبيتون على الشد البسيط (حمولات استثمارية)، بإهمال التقلص:

$$\bar{f}_{ct} = 0.75\times 0.40\sqrt{f'_c} = 0.30\sqrt{f'_c}\ (MPa)$$

- الإجهاد المسموح للبيتون على الشد بالانعطاف (حمولات استثمارية)، مع وجود تقلص:

$$\bar{f}_{cb} = 0.57\sqrt{f'_c}\ (MPa)$$

- الإجهاد المسموح للبيتون على الشد بالانعطاف (حمولات استثمارية)، بإهمال التقلص:

$$\bar{f}_{cb} = 0.75\times 0.57\sqrt{f'_c} = 0.43\sqrt{f'_c}\ (MPa)$$

- الإجهاد المسموح لفولاذ التسليح على الشد (حمولات استثمارية):

$$\bar{\sigma}_s = 0.55\ f_y\ (MPa)$$

4-4- حالة حد التشقق المعيب وفق الكود السوري

كما ذكرنا سابقاً، تحدث في عناصر البيتون المسلح المعرضة لإجهادات شد، شقوق تحت تأثير حمولات الاستثمار، وحتى لا يكون لهذه الشقوق آثار ضارة على قدرة تحمل البيتون أو على فولاذ التسليح (صدأ) ، لا يجوز أن تزيد سعتها عن حد معين يسمى حد التشقق. ويتوقف هذا الحد على نوع المنشأة والغرض من إنشائها، ومدى تأثرها من الجو المحيط به.

أ- تقسيم المنشآت البيتونية حسب حد التشقق:

تقسم المنشآت حسب حد التشقق المسموح، إلى ثلاثة أنواع:

1. **النوع الأول:** يتمثل بالمنشآت التي لا يسمح بحصول تشققات فيها (تشققات غير مسموحة)، وهي مجموعة الإنشاءات المعرضة لعوامل ضارة شديدة التأثير على البيتون، كحالة خزانات المياه، العناصر القريبة من البحر، وتلك المنشآت الواقعة في وسط ضار جداً (بيئة هجومية فتاكة). وفي هذا النوع من المنشآت لا يجوز أن تزيد سعة الشقوق على $(a \le 0.1mm)$.
2. **النوع الثاني:** يشمل الإنشاءات الموجود في العراء، مثل الجسور والإنشاءات العادية والعناصر الخارجية، التي يمكن أن تتأثر بعوامل الرطوبة، أو العناصر الإنشائية للمصانع الموجودة في جو رطب أو فيه كميات كبيرة من الأبخرة، وكذلك الصوامع أو المشابهة لها، ولا يجوز في هذا النوع أن تزيد سعة الشقوق على $(a \le 0.2mm)$.
3. **النوع الثالث:** يشمل العناصر المحمية من الإنشاءات العادية، والتي لا تؤثر فيها سعة الشقوق المحددة على السلامة الإنشائية، ولا يجوز في هذا النوع أن تزيد سعة الشقوق على $(a \le 0.3mm)$.

في الواقع، إن التقسيم المذكور أعلاه يلزمنا اعتماد فلسفة تصميم خاصة بكل نوع، لذلك سنعمل على اعتماد المنهج التالي عند التصميم:

- ✓ التشققات غير مسموحة: تجرى الدراسة وتصميم المقاطع على أساس:
  - حالة الحد من سعة التشقق: $(a \le 0.1mm)$.
  - حالة الاجهادات المسموحة.
- ✓ التشققات مسموحة: وهنا يجب التمييز بين تشققات ضارة قليلاً $(a \le 0.2mm)$، وتشققات غير ضارة $(a \le 0.3mm)$. وفي الحالتين يتم التصميم على أساس:
  - حالة الحد من سعة التشقق: $(a \le 0.2mm \; or \; a \le 0.3mm)$.
  - الحالة الحدية القصوى.

ب- وسائل تلافي الوصول إلى حد التشقق:

لتلافي تشققات متسعة في العناصر الإنشائية، يتوجب اتخاذ الإجراءات التالية:

1) استعمال بيتون كثيف ما أمكن، بحيث يتحقق خلطة بيتونية بتدرج حبي مستمر وبقوام جيد.

2) تحقيق اشتراطات الكود من حيث تأمين السماكة الكافية لطبقة تغطية فولاذ التسليح.

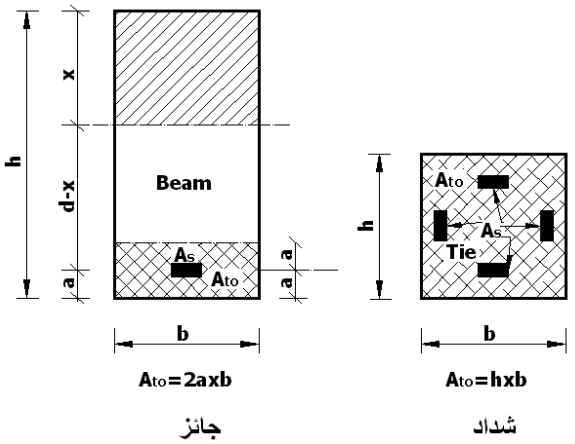
3) تأمين أطوال التثبيت اللازمة لقضبان التسليح، وفق منصوص الكود السوري.

4) التحقق من شرط قطر قضبان التسليح ϕ، وفق ما يلي:

$$\phi \le \max\begin{cases}\phi_1 = \psi_s\left[\dfrac{800}{f_y}\right]^2 \\ \phi_2 = \psi_s\left[\dfrac{75000}{f_y}\dfrac{\mu_t}{1+10\mu_t}\right]\end{cases}$$

حيث: $\phi_1 \,\&\, \phi_2\ (mm)$: الأقطار. $f_y\ (MPa)$: المقاومة المميزة لفولاذ التسليح.

$\mu_t = \dfrac{A_s}{A_{to}}$: النسبة بين تسليح الشد A_s، ومقطع بيتون التغطية A_{to} الذي يحيط بالتسليح، (تطابق بين مركز ثقل التسليح ومقطع البيتون، الشكل (4-8)).



الشكل (4-8): مقطع بيتون التغطية لتسليح الشد في حالة شداد وحالة جائز معرض لانعطاف

وتحدد قيمة العامل ψ_s، حسب حد التشقق ونوع التسليح، من الجدول (4-1).

	تسليح أملس مستدير	تسليح محلزن (ذو نتوءات)	حد التشقق المسموح
ψ_s	1.0	1.8	0.1mm
	2.0	3.6	0.2mm
	3.0	5.4	0.3mm

الجدول (4-1)

5) عند عدم تحقيق شرط القطر ϕ ، يتحتم الحد من سعة التشققات بتقليل الاجهادات في فولاذ التسليح، وحساب هذه السعة باستخدام العلاقات التالية وفقاً لطبيعة الحمولات المطبقة.

- حمولات استاتيكية دون اهتزازات:

$$a_{i\max} = \left[0.15C + \frac{0.016\phi}{\mu_t}\right]\left[10\sigma_s - \frac{10}{\mu_t}\right]\times 10^{-5} \le \lim it\ of\ a_i$$

- حمولات تسبب اهتزازات:

$$a_{i\max} = \left[0.15C + \frac{0.016\phi}{\mu_t}\right][\sigma_s]\times 10^{-4} \le \lim it\ of\ a_i$$

حيث:

$\phi\,(mm)$: قطر قضيب التسليح.

$C\,(mm)$: سماكة التغطية البيتونية لقضيب التسليح.

$a_{i\max}\,(mm)$: أكبر سعة للشقوق.

$\sigma_s\,(MPa)$: أقصى إجهاد شد في فولاذ التسليح، تحت حمولات الاستثمار للمقطع المتشقق (حالة حد الاستثمار)، وتضرب بالعامل 1.6 في حال استعمال تسليح أملس.

5-4- حالة خاصة - تصميم الشدادات

- حالة التشققات مسموحة $(a \le 0.2mm\ or\ a \le 0.3mm)$:

1- الفولاذ يتحمل قوة الشد بمفرده:

$$N_u = \Omega A_s\ f_y = 0.9A_s\ f_y$$
$$N_u = 1.4N_g + 1.7N_p$$

2- أما البيتون، تحدد الأبعاد استناداً لشرط السعة، وعادة نأخذ من العلاقة التالية:

$$A_c \ge \frac{N_{(g+p)}}{f_{ct}}$$

- حالة التشققات غير مسموحة $(a \le 0.1mm)$:

تلخص فرضيات الحساب على النحو التالي:

- المقطع متجانس، ويعمل ضمن مجال المرونة.
- التسليح يقاوم قوة الشد لوحده.
- اعتماد قيمة لعامل التعادل مقدارها: $n = \frac{E_s}{E_{ct}} \approx 10$

- كتابة معادلة توازن القوى في المقطع:

1- حالة عدم وجود تقلص (إهماله):

$$N_{(g+p)} = \bar{f}_{ct}\left(A_c + n A_s\right)$$

$$A_s = \frac{N_{(g+p)}}{\bar{\sigma}_s}$$

2- حالة وجود تقلص:

$$N_{(g+p)} + \Delta N = \bar{f}_{ct}\left(A_c + n A_s\right)$$

$$\Delta N = A_s \varepsilon_{sh} E_s$$

$$A_c = \frac{N_{(g+p)} + \Delta N}{\bar{f}_{ct}} - n A_s$$

وتؤخذ قيمة تشوهات التقلص ε_{sh} وفقاً للوسط المحيط، كما يلي:

- وسط رطب جداً: $\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta L}{L} = 2\times10^{-4}$
- وسط جاف جداً: $\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta L}{L} = 5\times10^{-4}$