

الباب العاشر

الإنكماش و الزحف

Shrinkage & Creep

١٠-١ الإنكماش Shrinkage

تعريف

الانكماش هو خاصية من خواص الخرسانة التي تتصلد في الهواء. ولايسبب الإنكماش مشاكل إلا إذا كان هناك قيلاً على الحركة حيث يسبب إجهادات شد داخل الخرسانة مما يؤدي إلى تشققها ويمكن التقليل من الآثار الضارة للإنكماش عن طريق:

- أ - المعالجة الصحيحة والمبكرة للخرسانة Effective Curing
- ب- عمل وصلات حركة Movement Joints
- ج- وضع أسياخ تسليح لمقاومة الإنكماش Shrinkage Reinforcements

أسباب حدوث الانكماش

يحدث الانكماش في الخرسانة نتيجة:

- أ- هبوط الأجزاء الصلبة في الخلطة وفقد الماء الحر من الخرسانة الطازجة مما يسبب ما يعرف بإسم الإنكماش اللدن.
- ب- الإتحاد الكيميائي بين الأسمنت والماء يؤدي إلى حدوث الإنكماش الذاتي.
- ج - جفاف الخرسانة نتيجة فقد الماء يسبب حدوث إنكماش الجفاف.

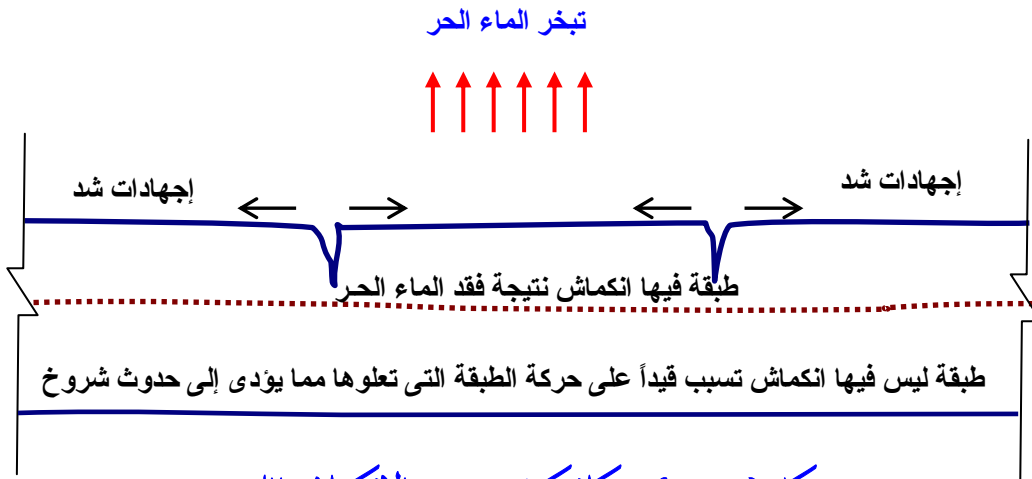
أنواع الانكماش

يوجد ثلاثة أنواع من الإنكماش هي:

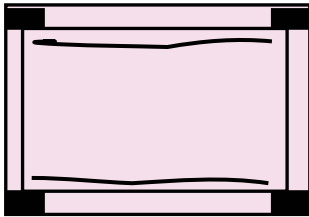
- أ- الانكماش اللدن Plastic Shrinkage
- ب- الإنكماش الذاتي Autogenous Shrinkage
- ج- الإنكماش بالجفاف Drying Shrinkage

أولاً: الإنكماش اللدن Plastic Shrinkage

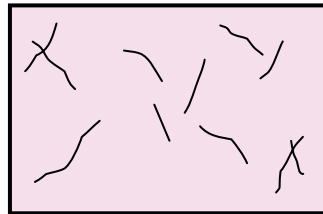
يحدث الانكماش اللدن قبل تصدّد الخرسانة خلال بضعة ساعات من صب الخرسانة وسببه هو فقد الماء الحر من الخلطة وهبوط الأجزاء الصلبة (الركام) إلى أسفل مما يؤدي إلى صعود الماء إلى أعلى وتبخره. فعندما يكون معدل تبخر الماء من سطح الخرسانة أسرع من معدل الإدماء (نزوح الماء إلى سطح الخرسانة) يحدث الإنكماش اللدن (شكل ١٠-١). ولذلك فإن الإنكماش اللدن يُلاحظ أكثر في البلاطات والأعضاء ذات المساحة السطحية الكبيرة المعرضة للجو الحار أو الرياح. ويؤدي هذا النوع من الإنكماش إلى حدوث شروخ سطحية بالخرسانة. ويمكن منع شروخ الإنكماش اللدن بتقليل الفاقد من الماء السطحي عن طريق المعالجة المبكرة والفعالة. وتشرخ الخرسانة اللدنة عادة يأخذ إحدى صور ثلاث كما في شكل (١٠-٢).



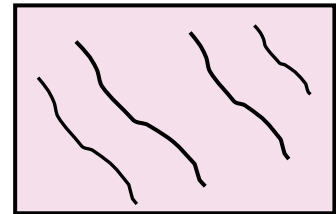
شكل (١٠-١) ميكانيكية حدوث الانكماش اللدن.



شروخ تتبع شكل توزيع حديد لتسليح أو التغير في عمق القطاع الخرساني.



شروخ موزعة توزيعاً غير منتظم ولا تصل إلى الحروف الحرة للبلاطة.



شروخ قطرية مائلة بالنسبة لحروف البلاطة وتكون المسافة بين هذه الشروخ من ٢٠ إلى ٢٠٠ سم.

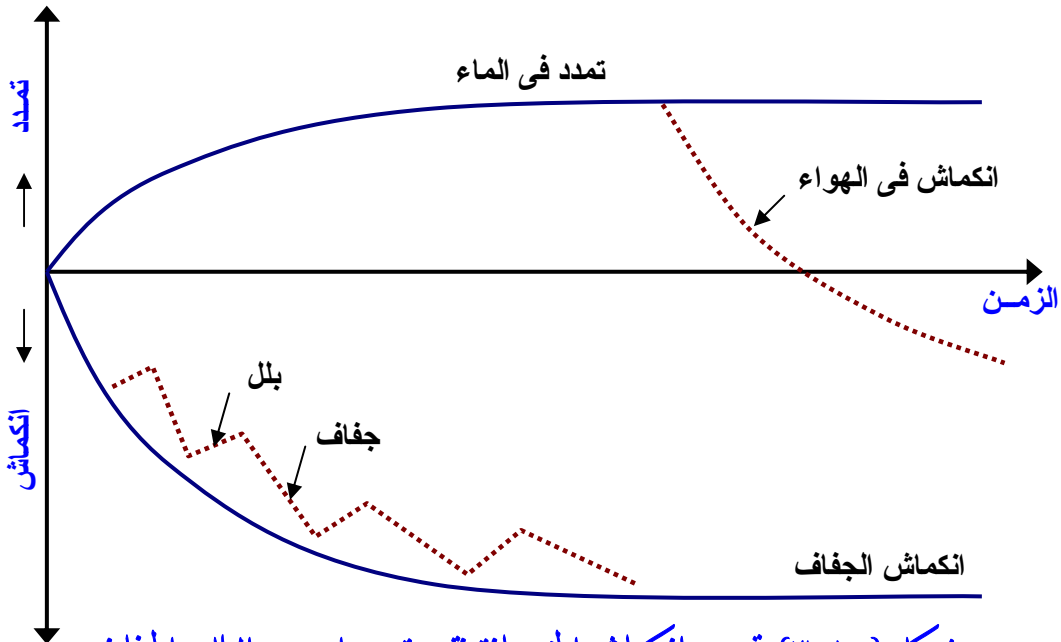
شكل (١٠-٢) أشكال الإنكماش اللدن.

ثانياً: الإنكماش الذاتي Autogenous Shrinkage

عندما تبدأ عملية الإماهة Hydration بين الأسمنت والماء يحدث نقص في حجم المونة لأن المونة المتصلدة حجمها أقل من مجموع حجمي الماء والأسمنت في الخلطة مما يؤدي إلى إنكماش الخرسانة الداخلية وهو ما يعرف بالإنكماش الذاتي لأنه يحدث ذاتياً نتيجة الإتحاد الكيميائي بين الأسمنت والماء. أما إذا تمت معالجة الخرسانة تحت الماء فإن الماء الداخل في التفاعل يتم إستعاضته من الماء الخارجى وتمتص العجينة الأسمنتية ماءً زائداً مما يؤدي إلى زيادة طفيفة في حجم الخرسانة وليس إنكماشاً كما في شكل (١٠-٣). أما الخرسانة التي تعالج في الهواء أو تترك بدون معالجة فلا يتم إستعاضة الماء الداخل في التفاعل ولكن على العكس يُسحب الماء من العجينة المتصلدة ويحدث إنكماشاً إضافياً هو إنكماش الجفاف. والإنكماش الذاتي يتأثر بعدة عوامل منها : التركيب الكيميائي للأسمنت - كمية الماء في الخلطة ودرجة الحرارة وقد تصل قيمة الإنكماش الذاتي إلى 100×10^{-6} (٠,١ مم لكل متر) ويحدث ٧٥ % منه في الشهور الثلاثة الأولى من عمر الخرسانة.

ثالثاً: إنكماش الجفاف Drying Shrinkage

عندما تتعرض الخرسانة المتصلدة - المعالجة في الماء - للجفاف فإنها تفقد أولاً الماء الموجود في الفجوات والشقوق الشعرية الداخلية ولا تبدأ في الإنكماش إلا إذا إستمر الجفاف بحيث تفقد الماء الموجود بالعجينة المتصلدة ذاتها وهو ما يعرف بالإنكماش نتيجة الجفاف وقد تصل قيمة هذا الإنكماش إلى 1500×10^{-6} ومن أهم وظائف الركام في الخلطة تقليل إنكماش مونة الأسمنت. والإنكماش بالجفاف يبدأ بمعدلات عالية ويستمر لمدة طويلة ولكن بمعدل يتناقص باستمرار. ويمكن إفتراض أن نصف الإنكماش الكلى نتيجة الجفاف يحدث في السنة الأولى.



شكل (١٠-٣) تمدد وإنكماش الخرسانة نتيجة دورات من البلل والجفاف.

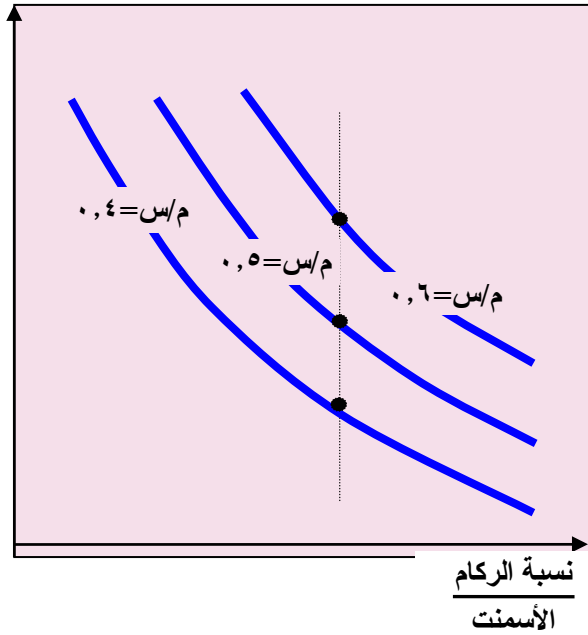
العوامل التي تؤثر على إنكماش الجفاف

١- مكونات الخلطة

بصفة عامة فإن الإنكماش يتناسب طردياً مع كمية الماء بالخلطة ويتناسب عكسياً مع كمية الركام بها كما بشكل (٤-١٠).
 الماء: يحدث الإنكماش نتيجة فقد الماء إلى الجو المحيط. فكلما كان هناك ماء أكثر متاح للتبخر كلما زادت إمكانية الإنكماش أثناء الجفاف.
 الأسمنت: أهمية الأسمنت بالنسبة للإنكماش ترجع فقط إلى أن كميته ونعومته تؤثر على كمية الماء في الخلطة.
 الركام: كلما زادت كمية الركام كلما زاد تأثير الركام على تقليل الإنكماش لمونة الأسمنت. كذلك فإن استعمال الركام ذي مساحة سطحية أقل ما يمكن يساعد على تقليل محتوى الماء في الخلطة وبالتالي يعمل على تقليل الإنكماش.

٢- معالجة الخرسانة

تعمل معالجة الخرسانة على تقليل الفاقد الحرارى وبالتالي تقليل فروق الحرارة في الأعضاء الضخمة كما أنها في نفس الوقت تقلل الفاقد من ماء الخرسانة وبالتالي تبطئ من معدل الإنكماش في فترة المعالجة مما يقلل من احتمالات التشقق.



شكل (٤-١٠) تأثير الماء والركام على الإنكماش.

٣- حجم وشكل العضو الخرساني

حيث أن الجفاف (فقد الرطوبة) يكون من سطح العينة فإن ذلك يعني أنه كلما زادت المساحة السطحية لكل وحدة كتلة كلما زاد معدل إنكماش العضو. فالعضو الضخم السميك يستطيع الاحتفاظ بكمية من الماء أكبر من تلك التي تستطيع بلاطة رقيقة الاحتفاظ بها. وبالتالي يكون تأثير الإنكماش كبيراً وخطيراً في حالة البلاطات وخاصة الرقيقة منها. ويمكن التعبير عن حجم العضو الخرساني ومساحته السطحية بما يسمى بالبعد الإعتباري للقطاع B الذي يقدر كما يلي:

$$B = 2Ac / Pc$$

حيث:

B = البعد الإعتباري للقطاع - مم

Ac = مساحة المقطع الخرساني - مم^٢.

Pc = محيط المقطع الخرساني المعرض للجفاف - مم

جدول (١٠-١) يوضح بعض القيم الإسترشادية لإنفعال إنكماش الجفاف وذلك في حدود درجة رطوبة نسبية بين ٤٠ و ٨٥%.

جدول (١٠-١) قيم إسترشادية لإنفعال إنكماش الجفاف (مليمتراً/ متر).

جو رطب (الرطوبة حوالي ٧٥%)			جو جاف (الرطوبة حوالي ٥٥%)			حالة الجو
البعد الإعتباري للقطاع B - مم			البعد الإعتباري للقطاع B - مم			العمر المعتبر عنده الإنكماش
B ≤ 200	600 > B > 200	B ≥ 600	B ≤ 200	600 > B > 200	B ≥ 600	
,	,	,	,	,	,	٣ - ٧ أيام
,	,	,	,	,	,	٧ - ٦٠ يوم
,	,	,	,	,	,	أكثر من ٦٠ يوم

٤- درجة الحرارة والرطوبة

كلما قلت نسبة الرطوبة كلما زاد معدل وكمية الفاقد من الماء إلى سطح الخرسانة مما يؤدي إلى زيادة الإنكماش ونفس التأثير يحدث عند زيادة درجة حرارة الجو.

٥- التسليح

تتكسب الخرسانة المسلحة بدرجة أقل من إنكماش الخرسانة العادية نظراً لأن صلب التسليح يسبب قيلاً على الحركة. وعلى ذلك فوظيفة أسياخ الإنكماش ليست فقط مقاومة إجهادات الشد الناتجة من الإنكماش وإنما تقليل الإنكماش نفسه كذلك.

اختبار التغير الحجمي للخرسانة بالجفاف والرطوبة Drying Shrinkage & Moisture Movement Tests

يجرى هذا الاختبار لتعيين قيمة التغير في طول العينة الخرسانية نتيجة تعرضها للزيادة في الحجم بتأثير الرطوبة أو للنقص في الحجم بتأثير الإنكماش بالجفاف.

عينات الإختبار: تستخدم عينات منشورية بطول يتراوح من ١٥ إلى ٣٠ سم ومقطع مستعرض حوالى ٥×٥ سم أو ٧,٥×٧,٥ سم ويثبت في منتصف المقطع عند كل من النهايتين على محور العينة كرة من الصلب لإمكان إجراء عملية قياس الطول بدقة بين سطحي الكرتين.

أولاً: إختبار الإنكماش بالجفاف Drying Shrinkage

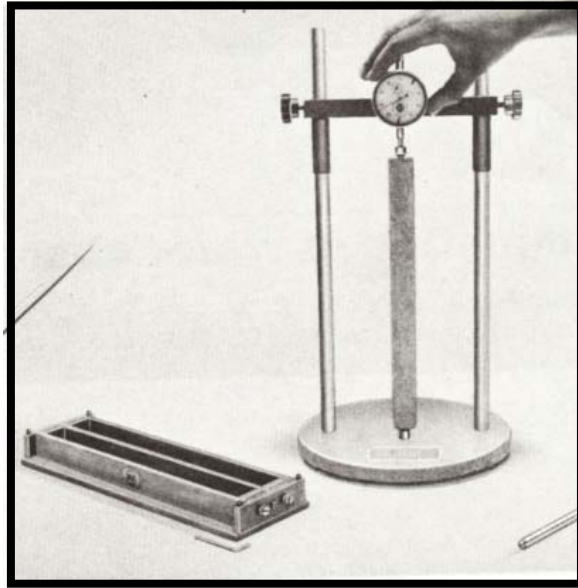
- طريقة إجراء هذا الإختبار هي أنه بعد رفع العينة من الماء (سواء كانت تعالج في الماء بعد صبها أو كانت موضوعة في الماء للتشبع بعد قطعها من الخرسانة ناضجة التصلد) يقاس طولها مباشرة بين الكرتين الصلب المثبتتين في نهايتي العينة وذلك بتركيب العينة في الجهاز المبين بشكل (١٠-٥) حيث يبين الميكرومتر أو مقياس التشكل قيمة التغير في الطول المقاس عن طريق طول قياس معلوم لقضيب انفار Invar rod له طول مساو تقريبا لطول العينة وتكون دقة القياس لغاية ٠,٠٠٢٥ مم ثم يعين ذلك الطول الأولي الرطب للعينة L_1 .
- تجفف العينة في فرن درجة حرارته حوالى ٥٠ درجة مئوية وتكرر دورات التجفيف والتبريد وقياس الطول حتى تحصل على طول ثابت لا يتغير وتسجل القراءة النهائية L_2 .
- يحسب انكماش الجفاف الأولي أو إنكماش الجفاف كنسبة مئوية كما يلي:

$$\text{Shrinkage \%} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

ثانياً: إختبار التمدد بالرطوبة Moisture Movement

تجفف العينة الخرسانية بنفس طريقة إختبار الإنكماش السابق ذكرها ويعين طولها الجاف الثابت وليكن L_3 . تغمر العينة في ماء درجة حرارته من ١٥ - ٢٠ م بشرط أن يكون أحد الأوجه الكبيرة للعينة ظاهر تماما فوق سطح الماء. تترك العينة مغمورة لمدة ٤ أيام وبعدها ترفع من الماء ويقاس الطول النهائى الرطب للعينة وليكن L_4 يحسب قيمة التحرك بالرطوبة كنسبة مئوية كما يلي:

$$\text{Moisture Movement \%} = \frac{L_4 - L_3}{L_3} \times 100$$



شكل (١٠-٥) جهاز قياس التمدد والإنكماش.

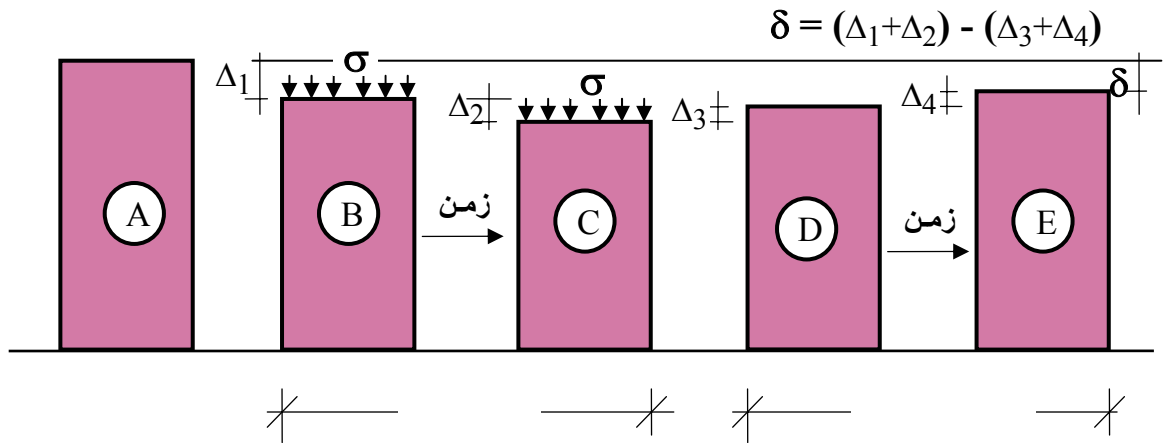
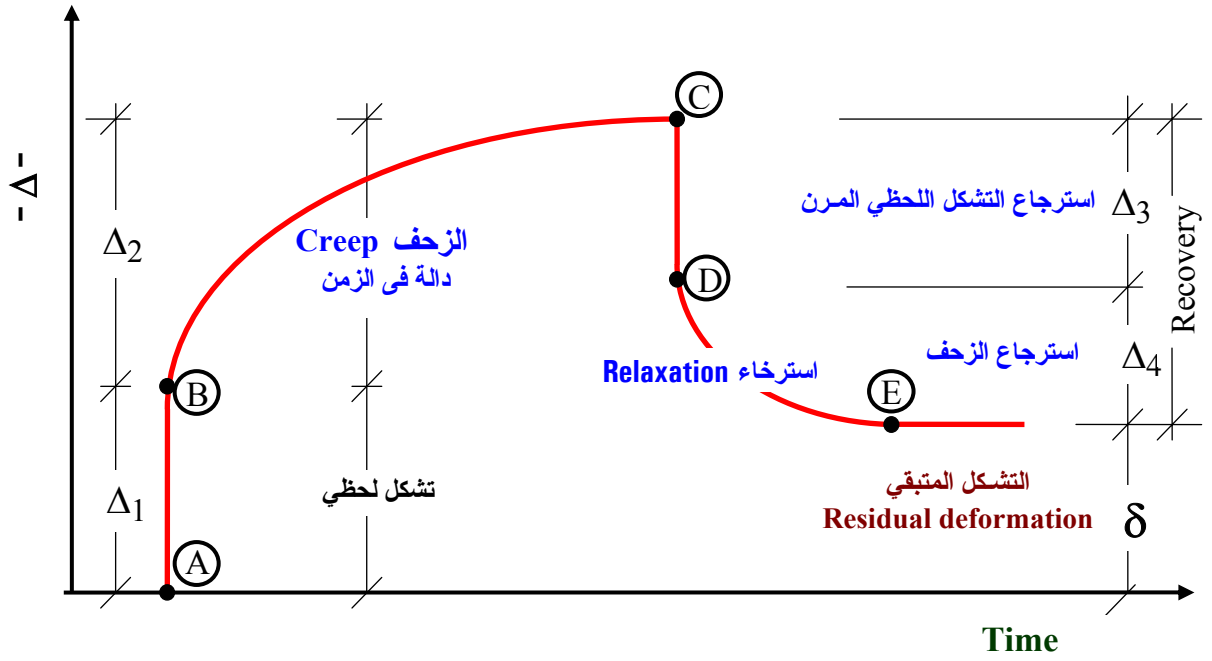
١٠-٢ الزحف Creep

تعريف الزحف

هو الإنفعال غير المرن الذي يحدث مع مرور الزمن تحت تأثير إجهاد ثابت. أى أن الزحف يعتمد على الزمن *Time-dependent* وقد تصل قيمته إلى عدة أضعاف قيمة الإنفعالات اللحظية التي تحدث نتيجة أحمال التشغيل. الشكل (١٠-٦) يبين ميكانيكية حدوث الزحف.

□ وقيمة الإنفعال الناتج من الزحف للخرسانة تتراوح من 5×10^{-6} إلى 20×10^{-6} وذلك لكل ١ كج/سم^٢ إجهاد. ويمكن أخذ قيمة متوسطة للزحف الكلى للخرسانة على أساس ٠,٠١ مم لكل متر لكل واحد كج/سم^٢ إجهاد. وبالتالي فإن إجهاداً للضغط مقداره ٣٠٠ كج/سم^٢ يسبب زحفاً مقداره ٠,٠٠٣ (أى أن عضواً طوله ١ متر إذا تعرض لإجهاد ثابت مقداره ٣٠٠ كج/سم^٢ فإنه يحدث له تشكّل مقداره ٣ مم نتيجة الزحف). ومن العوامل التي تؤثر على قيمة الزحف نوع الأسمنت المستخدم ومقاومة الخرسانة ونسبة الماء إلى الأسمنت فى الخلطة وكذلك الوقت الذى تم فيه أول تحميل للخرسانة وخواص المقطع الخرساني وقيمة الرطوبة النسبية للجو المحيط بالمنشأ. وبصفة عامة فإن قيمة الزحف تقل كلما زادت مقاومة الخرسانة ، وقد وجد أن قيمة الزحف لخرسانة ذات مقاومة للضغط ٢٠٠ كج/سم^٢ يقدر بحوالى 18×10^{-6} لكل ١ كج/سم^٢ إجهاد ، فى حين كانت قيمة الزحف المناظرة لخرسانة ذات مقاومة ٦٠٠ كج/سم^٢ هى 5×10^{-6} فقط.

□ يستمر الزحف مع الوقت فى الأعضاء المعرضة لأحمال ثابتة لسنوات عديدة ولكن معدل زيادة إنفعالات الزحف يقل حتى يصبح ضئيلاً يمكن إهماله. وبالتقريب فإننا يمكننا أن نقول أن ربع قيمة الزحف الكلية تحدث فى أول شهر وأن نصف قيمة الزحف الكلية تحدث فى أول سنة. وأن قيمة الزحف بعد حوالى سبعة سنوات يزيد عن قيمة الزحف بعد عام بحوالى ٣٠% فقط. وتجدر الإشارة أن قيمة الزحف النهائى فى الشد تساوى تقريباً القيمة فى الضغط إلا أن معدل حدوث الزحف فى الشد يكون أسرع نسبياً من معدل حدوثه فى الضغط.



شكل (٦-١٠) ميكانيكية حدوث الزحف.

حساب قيمة الزحف

يمكن حساب القيمة الكلية للإفعال الناتج عن أقصى زحف والإفعال اللحظي المرن من المعادلة الآتية:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 (1 + \varphi) = f_0 (1 + \varphi) / E_c$$

حيث:

$$\begin{aligned} f_0 / E_c &= \varepsilon_0 \\ t &= \varepsilon_t \\ \cdot &= \varphi \\ \cdot &= \varphi \varepsilon_0 \\ \cdot &= f_0 \\ \cdot &= E_c \end{aligned}$$

وتؤخذ قيم معامل الزحف φ الإسترشادية من جدول (١٠-٢) وذلك بمعلومية الرطوبة النسبية للجو والبعد الإعتباري للقطاع والعمر عند بدء التحميل.

جدول (١٠-٢) قيم إسترشادية لمعامل الزحف φ .

جو رطب (الرطوبة حوالى ٧٥%)			جو جاف (الرطوبة حوالى ٥٥%)			حالة الجو
البعد الإعتباري للقطاع B - مم			البعد الإعتباري للقطاع B - مم			العمر المعتبر عنده التحميل
B ≤ 200	600 > B > 200	B ≥ 600	B ≤ 200	600 > B > 200	B ≥ 600	
,	,	,	,	,	,	٣ - ٧ أيام
,	,	,	,	,	,	٧ - ٦٠ يوم
,	,	,	,	,	,	أكثر من ٦٠ يوم

تأثير الزحف

لظاهرة الزحف فى الخرسانة تأثيرات ضارة وتأثيرات أخرى نافعة نوجزها فيما يلى:

التأثير الضار:

- ١- يزيد من قيمة الترخيم (Deflection) فى بعض الحالات.
- ٢- يعمل على توسيع الشروخ التى تنشأ من عوامل أخرى.
- ٣- زيادة الإنفعالات نتيجة الزحف قد يؤدى إلى تشريح الخرسانة.

ولكن بصفة عامة فإنه لا توجد حالات إنهيار نتيجة الزحف بمفرده ولكنه عامل مساعد على تصدع الخرسانة فى بعض الحالات.

التأثير النافع:

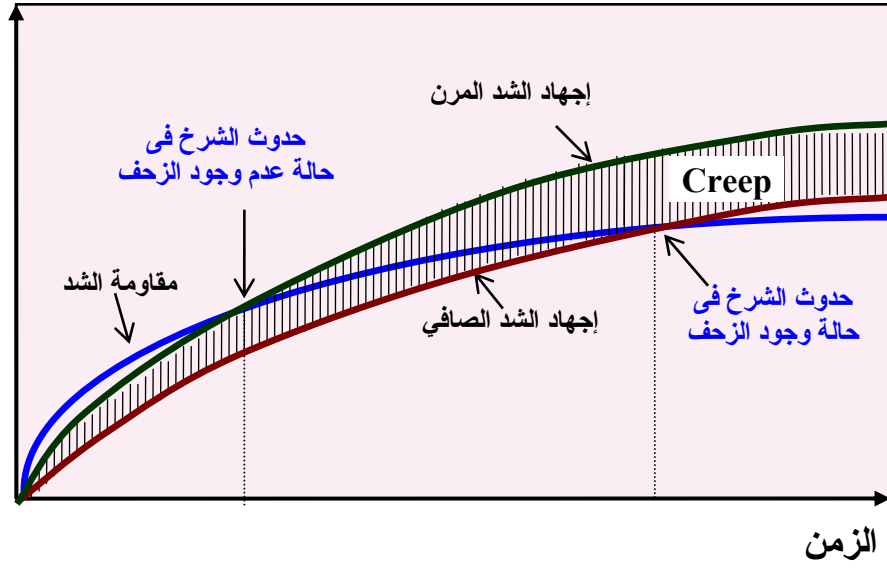
يؤدى الزحف إلى تقليل الإجهادات التى يسببها إنفعال شد ثابت مع الوقت (مثل الإنكماش) وبالتالي يتولد عندنا إجهاد شد صافى هو الفرق بين الإجهاد الأسمى وتأثير الزحف. وهذه الظاهرة تعرف بالإسترخاء Relaxation. ومما هو معروف أن الشروخ لا تتكون إلا إذا زاد إجهاد الشد الصافى عن مقاومة الخرسانة للشد ، كما هو موضح بشكل (١٠-٧).

تدريب:

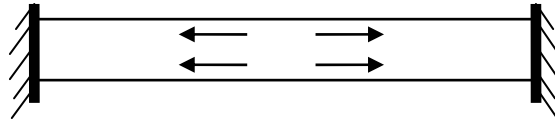
□ خذ أستاذك بطول معين ثم شد الأستك بين دبوسين وأتركه لمدة يوم أو يومين ولاحظ التغيرات التى تحدث له.

□ أنفخ بالونة وأتركها عدة أيام منفوخة ثم لاحظ التغيرات التى حدثت على سطحها. هل سطحها مازال مشدوداً بنفس القوة مثل وقت أن نفختها؟! وهل تتوقع أن هناك قيمة من الإنفعالات حدثت لها حتى بعد أن تفرغ منها الهواء؟! هل هذا هو التشكل المتبقى Residual deformation!؟

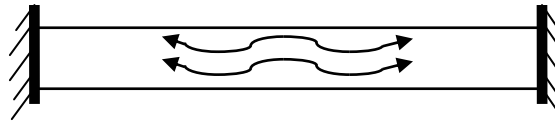
□ هل هذه المواد صافية المرونة Pure elastic أو أنها مرنة- لدنة Elasto-plastic!؟



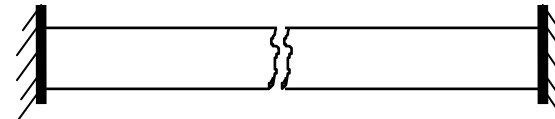
إجهادات شد تتولد نتيجة
الانكماش مع وجود قيد على الحركة.



إجهادات الشد تقل نتيجة
وجود زحف مع الانكماش.



حدوث الشروخ نتيجة زيادة إجهاد الشد
الصافي عن مقاومة الشد للخرسانة.



شكل (٧-١٠) التأثير النافع للزحف.