المحاضرة الحادية والعشرون

مرونة الخرسانة والتغيرات الحجمية

المرونة Elasticity

- ان الخرسانة مادة غير متجانسة تتالف من اطوار مختلفة كما تم ذكره سابقا وهي مادة غير مرنة (تبدي انفعالا بسيطا قبل حدوث الفشل) على عكس الكثير من المواد الاخرى كالبلاستيك مثلا.
- يتم حساب معامل المرونة Modulus of Elasticity (E) للمادة ومنها الخرسانة من خلال قسمة الاجهاد على الانفعال.
- معامل المرونة E = الاجهادσ/ الانفعال ϵ ويقاس بوحدة الكيكا باسكال GPa.
- معامل المرونة يعتمد بصورة رئيسة على معدل مقاومة الانضغاط للخرسانة وتتراوح قيمته بين (25-36 GPa) للخرسانة التي مقاومة انضغاطها تتراوح بين (20-60 MPa) وكما في الجدول التالي:

مقاومة الانضغاط لمكعبات (N/mm2)	معامل المرونة (MN/mm2)
20	25
25	26
30	28
40	30
50	34
60	36

علاقة معامل المرونة مع مقاومة انضغاط الخرسانة

- هناك عدة علاقات تجريبية تربط بين مقاومة الانضغاط ومعامل المرونة للخرسانة وحسب ACI 318-02 ومنها:

$$\mathbf{E_c = 4700\sqrt{F_c}}$$

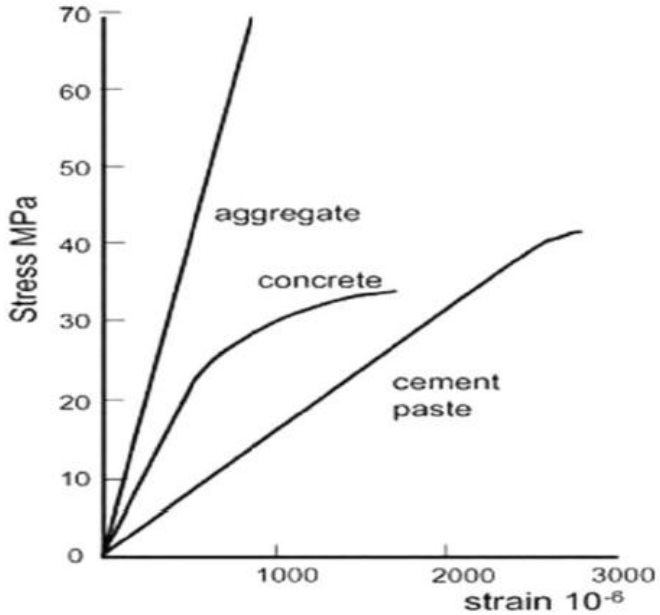
$$\mathbf{Ec = 43\ w^{1.5}\ \sqrt{F_c} \times 10^{-6}}$$

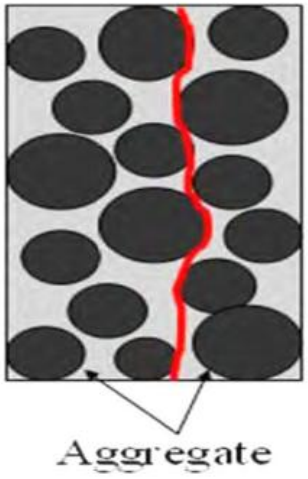
E_c: Moduluds of Elasticity of Concrete (GPa),

F_c: Compressive strength at 28 days (MPa) – (for cylinder specimen)

w: Concrete unit weight (1500-2500 kg/m^3)

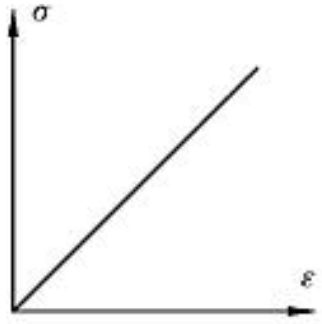
- اذا اعتبرنا ان كل من عجينة الاسمنت والركام مادتين متجانستين فان منحني الاجهاد –الانفعال (Stress – Strain curve) يكون بشكل خط مستقيم لهما اما للخرسانة فيكون بشكل منحني كما في الشكل... لماذا؟





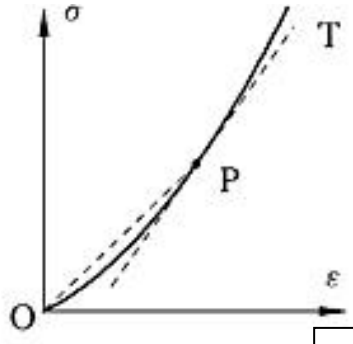
علاقة الاجهاد – الانفعال للركام ، عجينة الاسمنت والخرسانة

- الاشكال التالية توضح اشكال علاقة الاجهاد- الانفعال الحاصل في المواد المختلفة :



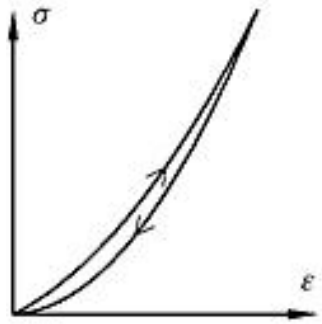
a)

Linear - Elastic stress starin curve



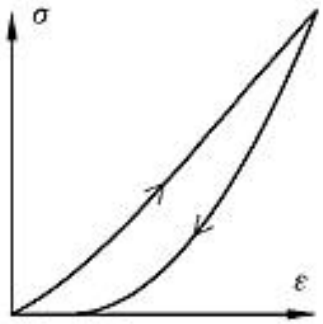
b)

Linear -Nonelastic stress starin curve



c)

Nonlinear – Elastic stress starin curve



d)

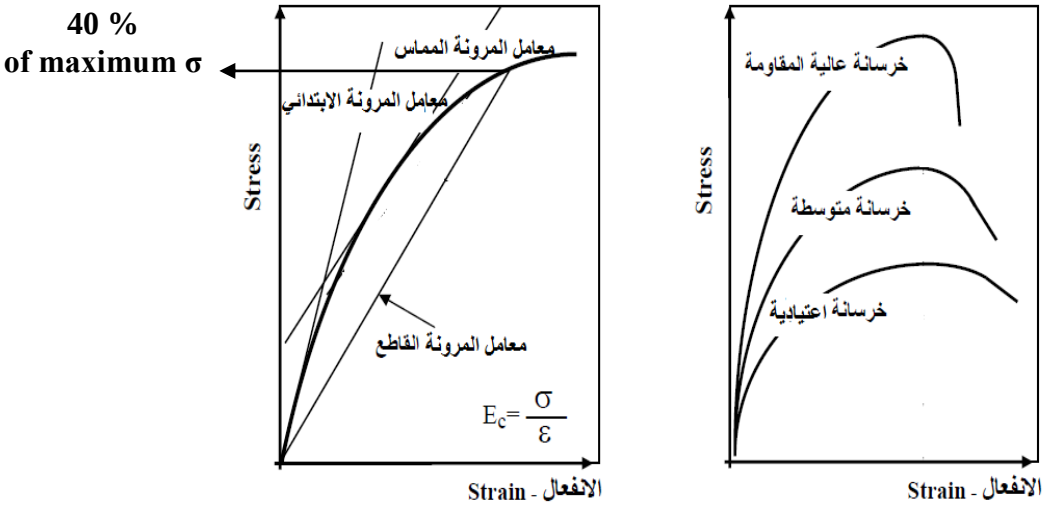
Nonlinear - Nonelastic stress starin curve

- **(العلاقة خطية - مرنة a)**: الحديد في الطور المرن مثال للحالة الاولى ،
- **(العلاقة خطية – غير مرنة b)**: الزجاج مثال للحالة الثانية ،
- **(العلاقة غير خطية - مرنة c)**: البلاستيك مثال للحالة الثالثة
- **(العلاقة غير خطية – غير مرنة d)**: الخرسانة مثال للحالة الرابعة ... شكل منحني الاجهاد النفعال للخرسانة هو من النوع (d) .... لماذا؟

- بنسبة مقدارها 30% من الاجهاد الاقصى للخرسانة تبقى الشقوق المتولدة في المنطقة البينية مستقرة لذلك فان منحني الاجهاد – الانفعال يبقى بشكل خطي في هذه المرحلة.
- مابين 30-50 % من الاجهاد الاقصى تبدا الشقوق في هذه المنطقة بالتوسع طولا، سمكا وعددا فيصبح منحني الاجهاد – الانفعال غير خطي في هذه المرحلة.
- مابين 50-60 % من الاجهاد الاقصى تبدا التشققات بالتطور في عجينة الاسمنت ايضا وفوق 75 % من الاجهاد الاقصى تكون شقوق المنطقة البينية غير مستقرة تماما وتشتبك مع التشققات في عجينة الاسمنت مما يسبب شروع وبداية عملية الفشل. ويتجه منحي الاجهاد – الانفعال في هذه المرحلة نحو الافقية.

انواع معامل المرونة في الخرسانة: Types of Modulus Elasticity

- يوجد هناك نوعين من معامل المرونة للخرسانة :
- معامل المرونة الستاتيكي Static Modulus of Elacticity
- معامل المرونة الديناميكي Dynamic Modulus of Elacticity.
- انواع معامل المرونة الستاتيكي هي :
- معامل المرونة الابتدائي Initial modulus of elasticity ويبدا من نقطة الاصل ويمس الجزء المستقيم من منحني الاجهاد – الانفعال.
- معامل المرونة المماس Tangent modulus of elasticity ويمس نقطتين على منحني الاجهاد – الانفعال.
- معامل المرونة القاطع Secant modulus of elasticity ويبدا من نقطة الاصل ويقطع منحني الاجهاد الانفعال.
- الشكل التالي يوضح شكل منحني الاجهاد- الانفعال لانواع مختلفة من الخرسانة وكذلك انواع معامل المرونة الستاتيكي.



معامل المرونة لانواع مختلفة من الخرسانة وانواع معامل المرونة الستاتيكي

- عادة يستخدم معامل المرونة القاطع حيث ياخذ نسبة من الاجهاد الكلي (مقاومة الانضغاط) مقداره 40 % لغرض تحديد نقطة التقاطع.
- يمكن حساب معامل المرونة الديناميكي من خلال تسليط اهتزازات بترددات معينة خلال نموذج خرساني (عتبة او موشور عادة) وحسابه حسب المعادلة التالية: $\mathbf{Ed=4\rho n^2 L^2 \times 10^{-12}}$ .... حيث:

E_d = dynamic modulus of elasticity, GPa., n = Fundamental longitudinal frequency, Hz, ρ =Density, kg/m^3, L = length of specimens, mm

- كذلك يمكن حسابه من فحص الموجات فوق الصوتية وحسب المعادله التالية:

$$E = \frac{V_P{}^2 \rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

E: Dynamic modulus of elasticity, ρ: Mass density, v: Possion ratio, V_p: Pulse Velosity

- من العلاقات التي تربط النوعين من معامل المرونة حسب دليل الممارسة للاعمال الخرسانية البريطاني $\mathbf{E_c=1.25E_d - 19}$ وهي علاقة تجريبية ايضا.

- نسبة بوسون: Possion's ratio وهي النسبة بين التشوه (الانفعال) العرضي الى الانفعال الطولي وتكون بين (20-22%) للخرسانة. ونسبة بواسون لها أهميتها فى التحليل الإنشائى للبلاطات المسطحة والأنفاق ولكنها لا تؤخذ فى الإعتبار فى التصميمات العادية للخرسانة.

$v = \epsilon h / \epsilon v$

v: Possion's ratio

ϵh : horizontal strain

ϵv : vertical strain

قياس معامل المرونة للخرسانة Test of concrete modulus of elasticity

من الممكن قياس معامل المرونة للخرسانة في حالات تحميل مختلفة ومنها احمال الشد كالانثناء الا انه يقاس عادة بحساب الانفعال الناتج من تسليط احمال الانضغاط لعينة خرسانية اسطوانية بابعاد 300 mm× 150. يتم تثبيت الاسطانة الخرسانية داخل خلية الفحص و هي عبارة عن حلقة حديدية تحتوي على متحسس(dial gauge) لقراءة الانفعال الحاصل بحيث يمس راس هذا المتحسس سطح الاسطوانة الخارجي وكذلك من الممكن ربط متحسس اخر بالاتجاه الطولي لغرض حساب نسبة بوزون . يتم تسليط الاجهاد بنسبة تحميل معينة حسب المواصفة المستخدمة ومن ثم قراءة الانفعال الحاصل نتيجة التحميل ولفترات مختلفة. تسجل قيم الاجهاد والانفعال ويتم رسم منحني الاجهاد – الانفعال للخرسانة لتحديد معامل المرونة لها من خلال حساب ميل المستقيم القاطع كما تم شرحه سابقا. مع تطور متحسسات قراءة الانفعال يمكن استخدام متحسسات حديثة تربط مع حاسوب لغرض نقل معلومات الانفعال الحاصل وكذلك الاجهاد المسلط وتسجيل قيمهما ورسم منحني الاجهاد – الانفعال بواسطة برنامج يزود به حاسوب السيطرة.

خلية الفحص مع متحسسات قياس الانفعال لفحص معامل المرونة

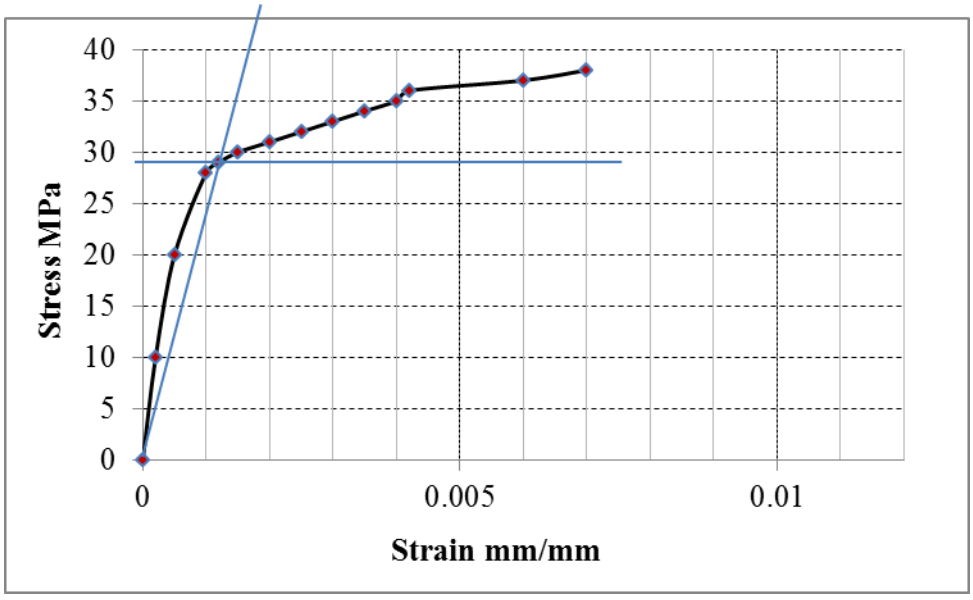
- يتاثر معامل المرونة بمعظم العوامل التي تؤثر على مقاومة انضغاط الخرسانة ولكنه يتاثر بصورة مباشرة وكبيرة بمعاير المرونة للركام المستخدم وكذلك كثافة الخرسانة.
- يعتبر معامل المرونة معيارا لتحديد جساءة الخرسانة (stifness) على الرغم من ان هذه الخاصية تعبر عن قدرة الخرسانة على مقاومة التشوهات الحاصلة نتيجة للاجهادات الخارجية.
- حاول التمييز بين جساءة الخرسانة، مطيلية الخرسانة، صلابة الخرسانة (stiffness, ductility and toughness of concrete)

مثال: للمعلومات المعطاة في الجدول ادناه، احسب معامل المرونة للخرسانة المفحوصة اذا علمت ان مقاومة انضغاط الخرسانة القصوى هي 70 MPa.

Stress MPa	0	10	20	28	29	30	31	31
Strain mm/mm	0	0.0002	0.0005	0.001	0.0012	0.0015	0.002	0.004
Stress MPa	32	33	34	35	36	37	38	---
Strain mm/mm	0.0025	0.003	0.0035	0.004	0.0042	0.006	0.007	---

الحل :

1- نرسم منحني الاجهاد الانفعال كما في الشكل ادناه:



2- نحدد نقطة التقاطة مع المنحني باخذ 40 % من الاجهاد الاقصى = 70× 0.4 = 28 MPa

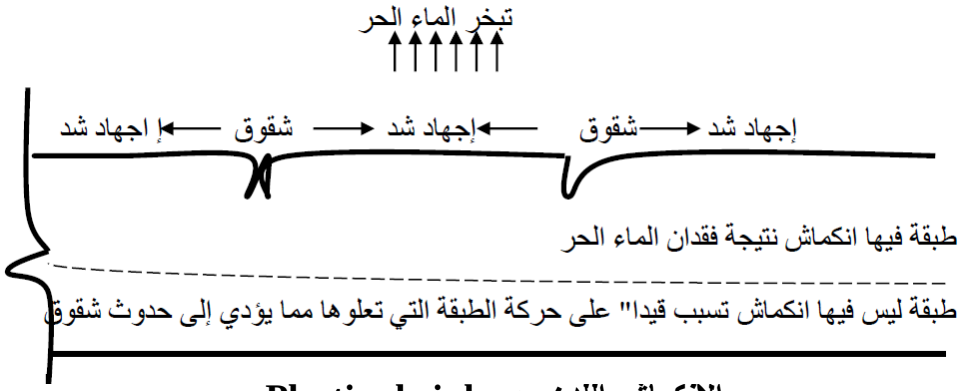
3- نرسم خط من نقطة الاصل الى نقطة التقاطع عبى المنحني.

4- نستخرج الميل حيث يمثل معامل المرونة = 29/0.0012 = 24.2 GPa

ملاحظة: في المثال اعلاه لابدد من الاشارة الى ان القيم في الجدول هي قيم مفروضة وليست حقيقية. الغرض لتعلم كيفية حساب معامل المرونة لذلك لانجد تناسبا بين مقاومة الانضغاط ومعامل المرونة المحسوب حسب العلاقات المعطاة في بداية المحاضرة.

الانكماش والانتفاخ Shrinkage and Swelling

- يطلق على الزيادة الحجمية للخرسانة نتيجة الغمر المستمر بالماء بالانتفاخ ويعتبر الانتفاخ تشوه غير قابل للاستعادة ويحدث نتيجة لتعرض الخرسانة الى الماء لفترة طويلة من الزمن. اما الانكماش فهو النقصان الحاصل في حجم الكتلة الخرسانية نتيجة لتبخر الماء. ويمكن ان تستعيد الخرسانة جزء من الانكماش بعد زوال التاثير الخارجي (جزء منه قابل للاستعادة). ويسبب الانكماش ضرر على الخرسانة في الحالتين الطرية والمتصلبة اذ يؤدي الى توليد اجهادات شد تسبب تشقق الخرسانة.
- لتقليل خطورة الانكماش يجب اتخاذ الاجراءات التالية: المعالجة الصحيحة والمبكرة للخرسانة ، عمل مفاصل التمدد والتسليح ضد الانكماش
- للانكماش انواع وهي :
  - الانكماش اللدن Plastic Shrinkage ،
  - الانكماش الذاتي Autogenous Shrinkage،
  - انكماش الجفافDrying shrinkage،
  - الانكماش المتباين Differential Shrinkage
  - انكماش تفاعل الكربنة Carbonation Shrinkage.
- يحدث النوع الاول بعد الساعات الاولى من صب الخرسانة بسبب تبخر الماء الحر من سطحها بسرعة اعلى من معدل النضح الحاصل خاصة البلاطات والأعضاء الخرسانية ذات المساحه السطحية الكبيرة المعرضة للجو الحار. الشكل التالي يوضح الية حدوث تشققات انكماش الجفاف بسبب التقييد الحاصل من الطبقات السفلى :



الانكماش اللدن Plastic shrinkage

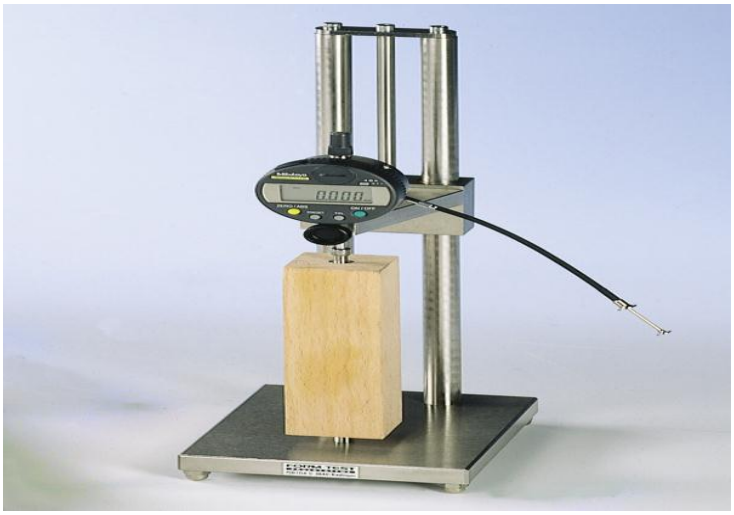
- يمكن معالجة هذه النوع من التشققات بمنع تبخر الماء من سطح الخرسانة بتغطيتها بالبولي اثيلين (النايلون) في الاجواء الحارة وكذلك تقليل الفترة اللدنة باستخدام المضافات الخرسانية عند الحاجة الضرورية لذلك.
- اما الانكماش الذاتي فيحدث نتيجة لنفاذ الماء الموجود في المسامات بسبب عدم الاستمرار بالمعالجة وتوفيرالماء من الخارج. ويمكن تقليله بالمعالجة المستمرة للخرسانة بعد التصلب.
- انكماش الجفاف يحدث نتيجة لتبخر الماء الموجود في المسامات بسبب ارتفاع درجات الحرارة. تزداد خطورة انكماش الجفاف اذا استمر الارتفاع بدرجة الحرارة الى درجات حرارية غلية حيث ان تبخر الماء المتحد كيميائيا مع مركبات الاماهة يسبب نقصانا في حجم الكتلة الخرسانية و ان أي تقييد للخرسانة من جهة ما سيسبب تشققات تدعى تشققات انكماش الجفاف. يوخذ انكماش الجفاف بنظر الاعتبار عند تعرض الخرسانة الى درجات الحرارة العالية.
- يحدث الانكماش المتباين في الكتل الكونكريتية الضخمة نتيجة للتدرج الحراري الحاصل بين سطح الخرسانة ومركزها. يودي هذا الانكماش الى تشققات خطرة كلما كان المقطع الخرساني اكبر ويمكن التقليل منه بتقليل محتوى الاسمنت في الخلطة او استخدام الاسمنت منخفض الحرارة واستخدام المضافات الخرسانية من نوع المبطئات.
- انكماش الكربنة يحدث نتيجة لتفاعل غاز ثنائي اوكسيد الكاربون مع الماء الموجود في المسامات ليكون حامض الكاربونيك والذ بدوره يتفاعل مع نواتج الاماهة وخاصة هيدروكسيد الكالسيوم. ان النقصان في الماء نتيجة لهذا التفاعل يسبب انكماشا يسمى انكماش الكربنة. ويمكن تقليله باستخدام خرسانة قليلة النفاذية. ان تفاعل الكربنة بطبيعته يعادل الطبيعة القلوية للخرسانة ($pH \geq 13$) ويساهم في خفض الرقم الهيدروجيني pH الى ما دون 9 وهذا سيؤدي الى عدم استقرارية طبقة اوكسيد الحديد على سطح حديد التسليح مما يؤدي الى صدأ وتاكل حديد التسليح عند توفر الرطوبة والاوكسجين وهما العاملان الرئيسيان لحدوث صدأ الحديد. لذلك فان تفاعل الكربنة هو احد العوامل المساعدة في تسريع او شروع تاكل حديد التسليح.

العوامل المؤثرة على الانكماش Factors affecting shrinkage

- مكونات الخليط الخرساني : زيادة الماء او الاسمنت يؤديان الى زيادة الانكماش اما زيادة كمية الركام فتؤدي الى تقليل الانكماش... لماذا؟
- معالجة الخرسانة : كلما كانت المعالجة جيدة فان احتمالية حدوث الانكماش سوف تقل.
- حجم وشكل المقطع الخرساني كلما كبرت المساحة السطحية للخرسانة او حجم الكتلة الخرسانية فان احتمالية حدوث الانكماش تزداد.
- درجة الحرارة : علاقتها طردية مع الانكماش.
- التسليح ودرجة تقييد العضو الانشائي : وجود التسليح يقلل من الانكماش بسبب التقييد الداخلي اما التقييد الخارجي للخرسانة فيتسبب بزيادة التشققات اذا حدث الانكماش.

قياس الانكماش Shrinkage test

يقاس الانكماش بصورة مبسطة عادة بقياس التغير الحاصل في طول نموذج خرساني معين نتيجة للتعرض الى دورات من التجفيف (بفرن درجة حرارته حوالى ٥٠ درجة مئوية) والتبريد لحين عدم حصول اي تغييرفي طول النموذج. يسجل طول النموذج الاصلي (L1) والطول بعد التعرض الى التجفيف والتبريد (L2) كما في الشكل ومن ثم يحسب الانكماش من خلال معرفة التغيير بالطول على الطول الاصلي للنموذج او كنسبة مئوية. وهذا الفحص لايعبر عن الانكماش الحقيقي الحاصل في الخرسانة لان اغلب الاعضاء الخرسانية تكون مقيدة بشكل ما وغير حرة النهايتين كما يجري في الفحص وكذلك فان الانكماش يحدث باتجاهات مختلفة وليس باتجاه واحد فقط.



شكل يوضح فحص الانكماش باتجاه واحد

- بعد تعرفك على انواع الانكماش بصورة سريعة والعوامل المؤثرة عليه. هل يمكنك التفكير في اجراءات اخرى غير التي تم ذكرها لتقليل التشقق بسبب انواع لانكماش المختلفة؟