المؤتمر الهندسي السعودي السادس - جامعة الملك فهد للبترول والمعادن - الظهران - شوال ١٤٢٣ هـ
مجلد ٣ **٢٣**

تأثير الحرارة على شروخ الكمرات الخرسانية المحقونة بالراتنجات

عبد الرزاق الفلال[١]

١ : أستاذ مساعد، قسم تقنية التشييد، الكلية التقنية بأبها
ص.ب ٣٢٩٢ أبها. E-mail: abdekallel@yahoo.com

الملخص

منذ عقود، والمنطقة العربية وبخاصة المملكة العربية السعودية تشهد تشييدا للهياكل الخرسانية المسلحة، تحقيقا للنمو وارفاهية الإنسان. وبعد تنفيذ المباني واستغلالها لفترة, علينا القيام بصيانة وإصلاح لهذه المنشآت والحكم على بعضها بالهدم وإعادة البناء. وخلال عمليات الصيانة، استعملت عدة طرق ومواد لإعادة تأهيل هذه المنشآت دون أن تكون لدينا منهجية للعمل على تطويع وتكييف تقنيات الصيانة الحديثة حسب ظروفنا المناخية والحرارية للمنطقة العربية عامة والخليجية خاصة.

ومن أبرز هذه التقنيات، حقن الشروخ في الهياكل الخرسانية لمعالجة التصدعات الخامدة فيها. وقد أثبتت هذه التقنية جدواها في البلدان الباردة والمعتدلة [Mouton، ١٩٧٩] و [Concrete Society، 1995] بينما في البلدان الحارة كطقس المملكة، فلا بد من التأكد من الجدوى الفنية لها [Kallel، ١٩٨٦]. وللوصول إلى هذا الهدف، حاولنا القيام بعدة دراسات, بدءا من دراسة سلوكيات المواد الراتنجية، ومحاولة محاكاة سلوكياتها بنماذج عددية، إلى القيام بتجارب معملية على كمرات خرسانية مسلحة وغير مسلحة. وقد تبين من خلالها أن جدوى هذه الطريقة تبقى محدودة ومحفوفة ببعض المخاطر في الطقس الحار.

هذا البحث يحاول تقديم الدراسات الحرارية والميكانيكية لسلوكيات الراتنجات، يليها بعض النتائج المخبرية على كمرات خرسانية مشققة ومعالجة بطريقة الحقن. كما تتطرق الدراسة إلى نتائج مبنية على تحليل الهياكل لبيان العزم الإضافي الناتج عن تغير الحرارة وتأثيرها على توازن واستمرارية الهياكل المصلحة، وكذلك سيتم تدعيم هذه النتائج عن طريق دراسة الهياكل المعالجة باستعمال ميكانيكا الشروخ.

كلمات دالة : شروخ الهياكل الخرسانية، تقنية الحقن، راتنجات فصيلة إيبوكسي، السلوكيات الحرارية والميكانيكية، ميكانيكا الشروخ.

ABSTRACT

During decades, Arab countries and particularly the Kingdom of Saudi Arabia have witnessed an extensive reinforced concrete (RC) constructions, to promote industry and for a better human life. Unfortunately these RC structures are subject to certain defects and degradations. The maintenance and repairing of fractured concrete structures is possible by some techniques. The injection of resin in concrete cracks [Mouton, 1979] is one of the most common techniques used for the rehabilitation of these structures. Although this technique is efficient in cold climate [Concrete Society, 1995], it was shown from experimental studies that high temperature has negative effects on the behavior of resin as well on the stability of cracks [Kallel, 1986]. This paper presents a study of thermo-mechanical behavior of resin and some flexural results of concrete cracked beams repaired by resins injection. Then based on a beam theory, we try to evaluate the effect of expanded resin in the crack, followed by a fracture mechanics approach to support this result and demonstrate that temperature may reactive dead cracks and therefore affect the general stability of RC structure.

١. المقدمة

تطورت الحركة الإنشائية في العالم ووصلت إلى مستوي متقدم خلال العقود الأخيرة وشهدت البلدان العربية عامة والخليجية خاصة في هذه الفترة طفرة هائلة من التشييد والتعمير حدثت في غياب عدة قواعد وأسـس ومقومـات منها:

- غياب الأطر الهندسية الوطنية المتخصصة.
- عدم توفر المواصفات العملية المندمجة مع متطلبات المحيط.
- نقص في القواعد المعمارية المرتبطة بالحضارة والتاريخ.
- سوء استغلال المباني وقلة الصيانة.

ونتج عن هذا النقص وجود منشآت خرسانية بها عيوب تتطلب عمليات إصلاح ومعالجة باستعمال تقنيات مختلفة منها حقن المواد الراتنجية في التصدعات والشقوق.

وفي هذا الإطار يقدم هذا البحث الآثار السلبية لتقنية معالجة الهياكل الخرسانية بحقن الشقوق الخامدة في الطقـس الحار، ويبين أهمية هذا الحقن في استعادة هذه الهياكل لسلامتها ولتواصلها. كما يوضح مدى تأثير الحرارة علـى التوازن الميكانيكي لهذا الهيكل، مستعينين في ذلك بميكانيكا الشروخ لنبين مدى تأثير الحرارة على توازن الشقوق المحقونة، ونخلص بعد ذلك إلى تقييم العزم الإضافي المترتب عن تمدد الراتنجات داخل الشقوق.

٢. دراسة خصائص الراتنجات

من خلال الدراسة المعملية [Kallel، ١٩٨٩] و[Kallel، ٢٠٠٢]، التي أجريت على بعض الراتنجات المستعملة في حقن الشقوق تبين أن للحرارة وللزمن تأثيرات عميقة على الخواص الميكانيكية والفيزيائية لهذه الراتنجات.

وفي هذه الدراسة [Kallel، ١٩٨٩] فإن المادة التي ستستعمل في حقن الشروخ هي راتنج (resine) من نوع إيبوكسي (epoxy) هذه المادة تتكون من قاعدة من نوع (Diglycidylether of Bisphenol A, DGEBA) و مصلب من نوع "بولي أمينات" (polyamine).

يوضح الشكل رقم (١) تغير معامل (أو معاير) المرونة لهذه المادة الراتنجية مع ارتفاع الحرارة حيث تكون التغيرات القصوى للمنحنى بين +٣٥ دم إلى +٥٠ دم، وهي الحرارة المتواجدة في أغلب البلدان العربية عامة والخليجية خاصة.

أما بالنسبة لحرارة التحول البلوري لهذه المادة الراتنجية، فالتجارب [Kallel، ١٩٨٩]، شكل رقم (٢) أظهرت أن هذه التغيرات تكون في حدودها القصوى ما بين +٤٠ إلى +٥٠ دم.، وهذا يتفق مع ما وقع تبيانه بالنسبة لمعاير المرونة. وبالتالي كما هو معروف فان الراتنجات تغير من سلوكياتها من الحالة المرنة إلى الحالة (اللازجة-المرنة) عندما تمر عبر هذه الحرارة، أي عندما تنتقل من حرارة دنيا إلى حرارة أعلى من حرارة التحول البلوري.

كما أن نفس المراجع تبين أن معامل التمدد الحراري لهذه المادة الراتنجية غير خطي شكل رقم (٣)، وهذا يتوافق مع استنتاجات [Daoui، 1988].

من الشكل رقم (٣)، نستخلص أن قيمة معامل التمدد الحراري لنفس المادة الراتنجية المستعملة في هذه الدراسة بحدود (6.6×10^{-5} مم/مم/دم.) وهو ما يعادل ست مرات معامل التمدد الحراري للخرسانة.

٣. نتائج اختبارات الثني

في هذا الجزء من الدراسة (انظر [Kallel et al.، ١٩٨٦]، و [Kallel، ١٩٩٢])، قمنا بمتابعة تطور الشقوق المحقونة على عينات خرسانية، حيث تم فيها إحداث شق اصطناعي (الشكل رقم (٤)) عند عمر ٢٨ يوما، كما تم الاحتفاظ بمجموعة أخرى غير مشققة.

وقد تم توزيع هذه العينات إلى أربع مجموعات، حفظت كلها تحت درجة حرارة ثابتة ٢٠ دم. وذلك لمدة اسبوعين:

- المجموعة (١) غير مشققة.
- المجموعة (٢) محقونة.

- المجموعة (٣) محقونة : ثم أخضعت لدورات حرارية باردة متدرجة ، مدة كل دورة منها ٤٨ ساعة (من +٢٠ دم. إلى -١٥ دم. تحت الصفر).
- المجموعة (٤) محقونة : ثم أخضعت لدورات حرارية حارة متدرجة، مدة كل دورة منها ٤٨ ساعة (+٢٠ دم. إلى +٦٠ دم.).

بعد الدورات الحرارية، تم إخضاع كل هذه المجموعات لاختبار الثني. يبين الجدول رقم (١) أن الانهيار في عينات المجموعة (٢) يحدث خارج الشق المحقن بما يفيد أن عينات هذه المجموعة تتصرف كما لو كانت سليمة وغير محقونة مثل المجموعة (١).

فيما نستخلص من نفس الجدول أن بقية عينات المجموعة رقم (٤) والتي تعرضت لدورات حارة تشهد انهيارا داخل الشق أكثر من العينات التي تعرضت لدورات باردة مجموعة رقم (٣)، مما يبين فقدان خصوصية المقاومة للراتنجات داخل الشق تحت تأثير الدورات الحارة.

للتأكد من طبيعة الإضعاف المشار إليه في الشروخ المحقونة، تم الاعتماد على المشاهدة بالمجهر لشروخ تنطلق من رؤوس شقوق العينات الخرسانية المحقنة والتي تعرضت لدورات حارة كانت الشروخ فيها أوضح من الدورات الباردة. بينما غاب تواجد هذه الشروخ في العينات المحقونة والمحفوظة في حرارة ٢٠ د.م.

٤. تحديد عزم الانحناء الإضافي في الكمرات المحقونة

من خلال الشكل رقم (٥)، [Martin، 1989]، نستخلص المعادلة التالية رقم (١) والتي تحدد الإجهاد للراتنج داخل الشق يمكن استنتاج القوة الضاغطة على وجهي الشق بما يلي (انظر في ذلك [Kallel، ١٩٩٨]):

$$F = \sigma_r \times a \times b \qquad (1)$$

بحيث تحدث عزما إضافيا بالنسبة لصاب القطاع للكمرة بمقدار تقريبي :

$$M_r = \sigma \times ab \times \frac{d}{5} (2)$$

يمكن تقديرعمق الشق (a) بما يلي: $a = \beta\, d$ ، بحيث يكون العزم: قانون (٣)

$$M_r = 0.2\beta\sigma \times bd^2 (3)$$

و إذا اعتبرنا أنه في الحالات العادية يكون عزم التشغيل (M_W) يقارب نصف قيمة العزم الأقصى المقاوم لقطاع الخرسانة المسلحة كما في المواصفات البريطانية [Martin، 1989]:

$$M_w = 0.078 f_{cu} \times bd^2 (4)$$

فإذا عوضنا σ_r بقيمتها نصل إلى نسبة العزم الإضافي لعزم التشغيل في درجة حرارة ٣٥ دم. تزيد عن :

$$\frac{M_r}{M_w} = 0.10$$

في الأخير نصل إلى خلاصة مفادها أن تمدد المادة الراتنجية داخل شق الخرسانة تحدث انخفاض بحوالي ١٠ % من عزم الانحناء عند التشغيل لقطاع الكمرة الخرسانية المشققة والمصلحة. هذه القيمة تعتبر مرتفعة نسبيا، وبالتالي فإنه يتعين أخذ هذا الانخفاض بعين الاعتبار في عملية إعادة تقييم الإنشاءات الخرسانية والتي تم اصلاحها بتقنية الحقن [فلال، ١٩٩٤]، و[فلال، ١٩٩٥].

٥. استعمال ميكانيكا الشروخ لتحليل الاجهادات الإضافية

إلى جانب الاستنتاجات التي توصلنا إليها من خلال دراسة الكمرات المشققة والمحقنة وذلك حول التشوه المستمر وإعادة تفعيل الشروخ الخامدة والمحقنة بعد تعرضها لدورات حرارية. سنقوم في هذا الجزء بتقييم وتحليل الإجهادات الإضافية. فقد تمت دراسة سلوكيات الكمرات المحقنة مستعينين بميكانيكا الشروخ ، [Ben Amara، ١٩٩٦] وقد تم استشراف تأثير الراتنجات داخل الشق وذلك بافتراض أنها تقع على مستوى جهة واحدة Single edge انظر الشكل رقم (٦).

في حالة اعتبار وجهي الشق من الخرسانة ثابتا فإن قيمة الإجهاد تكون كما في المعادلة رقم (٥) التالية :

$$\sigma (T) = E_r (T) \alpha_r \Delta T \quad (5)$$

في حالة حقن شق خرساني بالراتنج فانه يتعين أخذ الفعل الإيجابي لتمدد الخرسانة بعين الاعتبار :

$$\sigma (T) = E_r (T) (\alpha_r - \alpha_c) \Delta T \quad (6)$$

في درجة حرارة ٣٥ دم. يبلغ الإجهاد قيمته القصوى باعتماد القيم التالية :

$T = 35^oC$ $E_r = 2200$ MPa ,

$\alpha_c = 1.1\ 10^{-5}$ mm/mm/^oC $\alpha_r = 6.6\ 10^{-5}$mm/mm/^oC ,

$\Delta T = 15^oC$.

في هذه الحالة يكون الإجهاد :

$$\sigma = 1.7 \text{ MPa}$$

يمكن استنتاج معامل شدة أو حدة الإجهـاد Stress Intensity Factor باسـتعمال بـداءة أو قاعـدة النضـد Principle of superposition (انظر في ذلك [Anderson، 1991]) والشكل رقم (٧):

في الحالة (١ ب) يكون معامل شدة الإجهاد = ٠

في الحالة (١ ج) يصبح معامل شدة الإجهاد :

$$K_I = 1.12\sigma\sqrt{\pi \times a} (7)$$

و إذا أخذنا في الاعتبار قيمة الإجهاد الأخيرة تصبح (٧) :

$$K_I = 0.84MPa\sqrt{m} (8)$$

كما يمكن استخلاص معامل مقاومة التشقق الحرج للخرسانة (K_{Ic}) (Fracture Toughness) بإجراء اختبار الثني الثلاثي، ومن خلال عملية حسابية معقدة للمعادلة K_{Ic} (المعادلة رقم ٥ من [Ben Amara، ١٩٩٦]).

و باعتماد القيم التالية b=100 mm , W=100 mm , a=63 mm and S=320 mm

نحصل على تحديد قيمة معامل شدة الإجهاد الحرج :

$$K_{Ic} = 0.72MPa\sqrt{m}$$

وبالتالي نصل إلى نتيجة مفادها أن معامل شدة الإجهاد الناتجة عن تمدد الراتنجات المحقونة أكبر مـن المعامـل الحرج للخرسانة

($K_I > K_{Ic}$) وهذا ما يؤكد إعادة تفعيل الشرخ الخامد في مستوى رأسه ([قـلال، ١٩٩٥] و [Ben Amara، ١٩٩٦]).

٦. الخاتمة

في آخر هذه الدراسة، ونظرا لأن تقنيات إصلاح المباني والهياكل الخرسانية قد تم تطويرها في البلدان المتقدمـة ذات الطقس البارد، بينما قمنا بتطبيقها حرفيا في بلداننا ذات الخصوصية الحرارية، وبناء على ما تم التوصل إليه من نتائج في هذا البحث نوصي بالتالي :

- إجراء بحوث للعمل على تكييف طرق إصلاح المباني، ودراسة سلولكياتها في أجوائنـا الحـارة وتطويعهـا لظروفنا البيئية.
- أن لا يتم استعمال المواد الراتنجية المنتجة في البلدان المتقدمة في تقنيات إصلاح الهياكل الخرسانية، إلا بعـد دراسة سلوكياتها وتقييم تأثيراتها الجانبية على هذه الهياكل تحت فعل الحرارة.

- إعداد مواصفات خاصة باستعمال المواد الراتنجية المستعملة في صيانة المباني للمناطق الحارة.
- العمل على صنع مواد راتنجية ذات حرارة تحول بلوري أعلى من الحرارة الجوية للمناطق الحارة وقد تم هذا فعلا من طرف اليابانيين [Horiuchi et al.، 1994]، ثم التأكد من صلاحية هذه المواد الجديدة وتطبيق النقاط السالفة عليها.

٧. الرموز والمصطلحات

T	: Temperature	الحرارة
E_r	: Modulus of Elasticity of resin	معاير المرونة للراتنج
α_r	: Coefficient of Thermal expansion of resin	معامل التمدد الحراري للراتنج
α_c	: Coefficient of Thermal expansion of concrete	معامل التمدد الحراري للخرسانة
ΔT	: Change in temperature	تغير الحرارة
σ	: Stress	الإجهاد
K_I	: First mode Stress Intensity Factor	معامل شدة الإجهاد
K_{Ic}	: Critical Stress Intensity Factor	معامل شدة الإجهاد الحرج
σ_r	: Stress du to resin expansion	إجهاد داخل الراتنج
I_r	: Moment of inertia of resin	عزم القصور الذاتي للراتنج
M_r	: Resin bending moment	عزم الانحناء للراتنج
M_w	: Working moment acting on the reinforced concrete section	عزم الانحناء عند التشغيل
h_r	: Reduced section depth	العمق المحول للقطاع
d	: Effective depth of the section	العمق الفعال للقطاع
f_{cu}	: Characteristic strength of concrete	لمقاومة المميزة للخرسانة في الضغط
a	: Notch depth	عمق الشق
b	: Section width	عرض القطاع
β	: Percentage of the effective crack depth for a normally reinforced section.	نسبة عمق الشق لقطاع خرساني مسلح
S	: Span between support	المسافة بين الركيزتين للكمرة

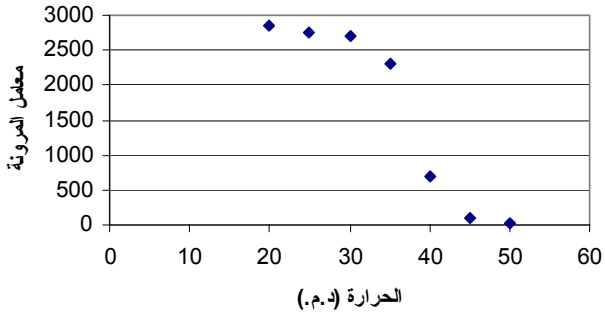
٨. المراجع

1. Anderson, T.L., 1991, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications. CRC Press.
2. Ben Amara K. and Kallel A., 1996 “A fracture mechanics approach to the thermal effect on epoxy-resin injected concrete cracks”, Les Annales Maghrebines de l'Ingenieur, Vol. 10, No 1, pp. 69-76, Tunisia.
3. Concrete Society, 1995, Polymers in Concrete, Construction Press.
4. Dhaoui W., 1988, “Relation structure-propriétés volumétriques des réticulats époxydes-amines”, Ph.D thesis, Ecole Normale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM), Paris, France.
5. Horiuchi S., Street A. C., Ougizawa T. and Kitano T., 1994, “Fracture toughness and morphology study of ternary blends of epoxy, poly(ether sulfone) and acrylonitrile-butadiene rubber”, Polymer Vol 35 Number 24.
6. Kallel A., 1989 “Contribution a l'étude du comportement thermique et mécanique d'une résine époxydique,” Ph.D. thesis, University Tunis II, Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tunis (E.N.I.T.), Tunis, Tunisia.
7. Kallel A., 1992 “Temperature effects on durability of cracked and repaired concrete structure”, Proceeding, The Seminar on “Building deterioration in the Arab word and methods of repair”, Riyadh, Saudi Arabia.
8. Kallel A., Paillere M. and Serrano J.J., 1986, “Modifications apportées par les variations de temperatures sur l'adhérence des résines epoxydiques injectées dans les fissures en béton,” Proceeding ISAP 86, International Seminar on “Polymers and concrete adhesion”, Organized by RILEM, September 16-19/1986, Aix-en-Provence, France, published by Chapman and Hill.
9. Kallel A. and Ben Amara K., 1998 “Resistance assessment of epoxy resin-injected cracks in reinforced concrete sections”, Les Annales Maghrebines de l'Ingenieur, Vol. 12, No 1, Tunisia.
10. Kallel A., 2002 “Thermo-mechanical behavior of an epoxy resin”, in progress.
11. Martin L.H., Croxton P.C.L. and Purkiss J.A., 1989, Concrete design to BS 8110, Edward Arnold.
12. Mouton Y., , 1979, “Réparation des structures en béton fissurées par injection de liants époxydiques”, Research report N 86, LCPC, Paris, France.

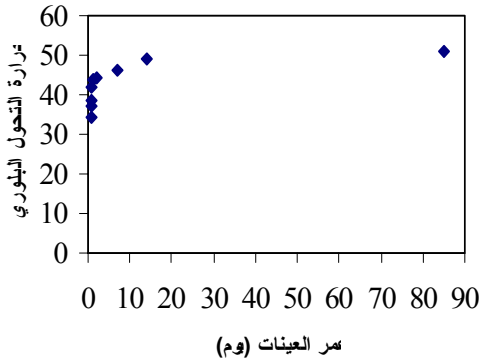
١٣. القلال ويبن عمارة، ١٩٩٤،"استعمال المواد الراتنجية كتقنية حديثة في المناطق الحارة : الإمكانيات المستقبلية وحدود الاستعمال" ملتقى "تطبيقات التقنيات الحديثة للمواد الجديدة"، جامعة قطر والمنظمة العربية للثقافة والعلوم، ٦ - ٩ نوفمبر تشرين الثاني ١٩٩٤، الدوحة، قطر.

١٤. القلال ويبن عمارة،، ١٩٩٥ " دراسة التأثيرات الإنشائية للمواد الراتنجية داخل الشروخ الخرسانية بفعل الحرارة"، "المؤتمر العربي السادس للهندسة الإنشائية"، ٢١ – ٢٤ أكتوبر تشرين الأول، جامعة دمشق، كلية الهندسة، دمشق سوريا.

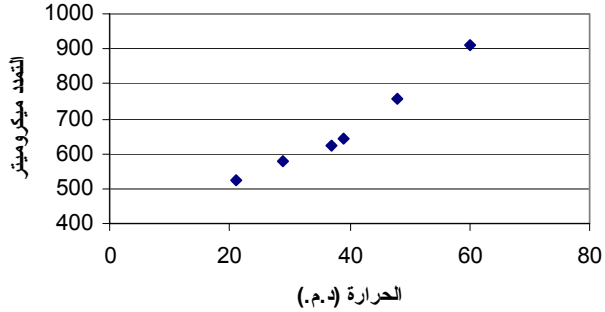
٩. الملاحق



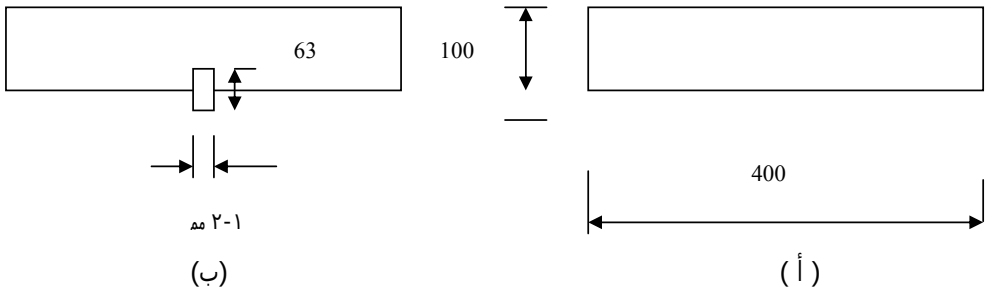
شكل (١) : تغير معامل المرونة (ن/مم٢) مع تغير الحرارة.



شكل (٢) : حرارة التحول البلوري (د.م.) حسب عمر العينات.



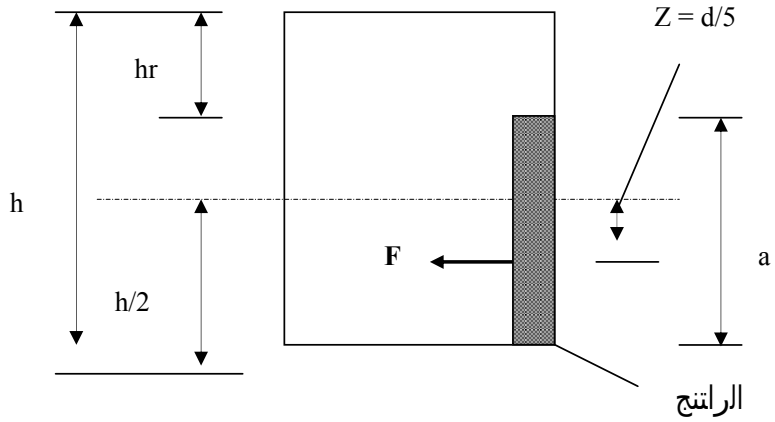
شكل (٣) : تغير معامل التمدد الحراري للراتنجات.



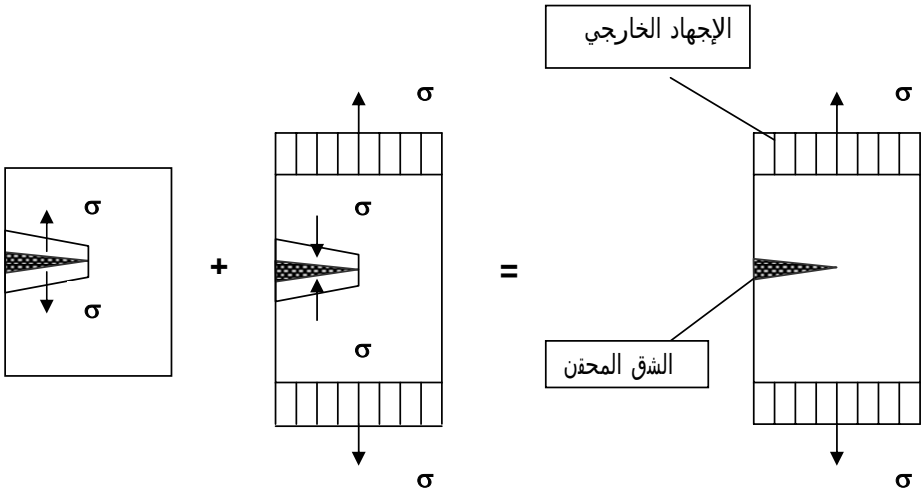
شكل (٤): الكمرة الخرسانية (مقاس ١٠٠/١٠٠/٤٠٠ مم)، (أ) غير مشققة، (ب) مشققة اصطناعيا.

جدول (١) : نتائج تجارب الثني على العينات السليمة والمحقونة.

المجموعة	نوع العينات	نسبة الإجهاد/الإجهاد المثالي في تجربة الإنحناء (%)	موضع الكسر بالعينة
رقم (١)	غير مشققة	١٠٠	-
رقم (٢)	مشققة ومحقونة	١٠٨	في أي مكان
رقم (٣)	محقونة (٢ دورات باردة)	١٠٠	١٠٠ % في الشق المحقن
رقم (٣)	محقونة (٨ دورات باردة)	٥٧	١٠٠ % في الشق المحقن
رقم (٤)	محقونة (٢ دورات حارة)	٧٢	١٠٠ % في الشق المحقن
رقم (٤)	محقونة (٦ دورات حارة)	٢٣	١٠٠ % في الشق المحقن



شكل رقم (٥): جزء لقطاع توضيحي من الكمرة يمر بوسط الشق المحقن.
مع ملاحظة أن عرض الشق يساوي عرض الكمرة = b



(ج) ١ (ب) ١ (أ) ١

شكل رقم (٦): قاعدة أو بداءة النضد للكمرة الخرسانية المشققة اصطناعيا والمحقنة بالراتنجات.