

دراسة مرجعية لدراسة فعالية الإيبوكسي في علاج الشقوق الخرسانية

أ.د. نوري محمد البasha¹
م. بثينة المجدوب^{2*}

قسم الهندسة المدنية ، كلية الهندسة ، صبراته ، ليبيا

buthainaalmahdi842@gmail.com*للمراسلة

Received: 30-09-2025; Revised: 10-10-2025; Accepted: 31-10-2025; Published: 25-11-2025

الملخص

الشقوق هي المشكلة الأكثر شيوعاً خاصة في المناطق الحارة (الجنوب الليبي) و تؤثر على م坦ة المبني وتقلل العمر الافتراضي له وتنقسم الشقوق الى نوعين هما الشقوق الهيكلية و الشقوق الغير هيكلية وثبتت الدراسات ان الشقوق الغير هيكلية الاكثر انتشاراً و هذه الشقوق لا تشكل أي تهديد لسلامة الهيكل الخرساني اذا تم معالجتها بالصورة الصحيحة وهي عادة شقوق شعرية ناتجة في المقام الأول عن عملية التجفيف الطبيعية للخرسانة أو تغيرات درجة الحرارة وهذا الأمر طبيعي خصوصاً في المناطق المعرضة لدرجات الحرارة العالية وبالتالي تحدث تشغقات الانكماش وتكون هذه الشقوق سبباً لدخول المواد الضارة مثل الكلوريدات والكربونات والرطوبة وتؤدي الى صدأ حديد التسليح وبالتالي تؤدي الى اضعاف مقاومة الضغط والتي تعتبر من اهم المعايير التي تعبّر عن م坦ة الخرسانة .

تهدف هذه الدراسة المرجعية الى دراسة فعالية الإيبوكسي في علاج الشقوق وتحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة، الإيبوكسي من احد اهم طرق الاصلاح للشقوق انتشاراً و له مميزات عديدة منها مقاومة الرطوبة و مقاومة درجات الحرارة وسد الشقوق الثابتة و يمنع تسرب الماء عبر الشق . وخلصت الدراسة الى ان الإيبوكسي من اهم المواد للإصلاح حيث يعمل على تحسين مقاومة الضغط والشد والانحناء .

الكلمات المفتاحية: الإيبوكسي، مقاومة الضغط، عرض الشق، مقاومة الانحناء، مقاومة الشد.

Abstract

Cracks are the most common problem, especially in hot regions (southern Libya). They affect the durability of the building and reduce its lifespan. Cracks are divided into two types: structural cracks and non-structural cracks. Studies have shown that non-structural cracks are the most prevalent. These cracks do not pose any threat to the integrity of the concrete structure if properly treated. They are usually hairline cracks resulting primarily from the natural drying process of concrete or temperature changes. This is normal, especially in areas exposed to high temperatures. Consequently, shrinkage cracks occur. These cracks

allow harmful substances such as chlorides, sulphates, and moisture to enter, leading to rusting of the reinforcing steel, thereby weakening the compressive strength, which is one of the most important criteria for determining concrete durability. This reference study aims to investigate the effectiveness of epoxy in treating cracks and improving the mechanical properties of concrete. Epoxy is one of the most common crack repair methods and has numerous advantages, including resistance to moisture and temperature, sealing fixed cracks, and preventing water from seeping through the crack. The study concluded that epoxy is one of the most important materials for repair, as it improves resistance to pressure, tension, and bending.

Keywords: Epoxy, compressive strength, crack width, bending strength, tensile strength.

1- المقدمة

تعد الشقوق الخرسانية من المشاكل الشائعة التي تواجه المنشآت الخرسانية ، حيث يمكن ان تؤثر على متنانة وأداء الهيكل الانشائي بمرور الوقت ، تتعدد اسباب ظهور الشقوق في الخرسانة ومنها الانكمash ، التحميل الزائد ، العوامل البيئية ، ودورات التجمد والذوبان ، لذلك فان البحث عن طرق فعالة لإصلاح هذه الشقوق يعد امرا ضروريا للحفاظ على استدامة المنشآت وضمان سلامتها .

يعتبر الإيبوكسي من المواد المستخدمة على نطاق واسع في اصلاح الشقوق الخرسانية نظرا لخصائصه الفيزيائية والكيميائية الممتازة مثل الالتصاق القوي والمقاومة العالية للمواد الكيميائية وقدرته على استعادة قوة الخرسانة المتضررة ، تعتمد فعالية الإيبوكسي في الاصلاح على عدة عوامل منها طبيعة الشقوق ، طريقة التطبيق ، ونوع الإيبوكسي المستخدم .

تهدف هذه الدراسة المرجعية الى استعراض الابحاث السابقة حول استخدام الإيبوكسي في معالجة الشقوق الخرسانية مع التركيز على مدى فعاليته مقارنة بمواد الاصلاح الاخرى وتحليل العوامل التي تؤثر على ادائه ، والاعتبارات التي يجب مراعاتها لضمان تحقيق افضل النتائج في عمليات الاصلاح . تكمن اهمية استخدام الإيبوكسي في معالجة الشقوق الخرسانية في المناطق المعرضة لدرجات الحرارة العالية لضمان سلامة واستدامة الهياكل الخرسانية نتيجة تعرضها للظروف البيئية القاسية حيث تكون هذه الشقوق مسارا للمواد الضارة مثل الكربونات والرطوبة وتسرب المياه مما يؤدي هذا الى صدأ حديد التسليح وبالتالي انهيار المبني .

تم استخدام تقنية حقن الإيبوكسي بنجاح لسد الشقوق في الهياكل الخرسانية نظراً لعدم وجود خرسانة جديدة فإن هذا الإصلاح هو الأقل تكلفة والأكثر تدخلاً ، حيث يعتمد اختيار الإيبوكسي حسب نوع

المنشأ مثلاً الخزانات المائية لها نوع خاص وكذلك المنشآت المعرضة لدرجات حرارة عالية تختلف عن المنشآت في المناطق الباردة. في هذا البحث تم استخدام انواع مختلفة من الايبوكسي من حيث الزوجة والخصائص الميكانيكية لإصلاح الشقوق الخرسانية.

يجب اتخاذ التدابير المناسبة بما في ذلك اختيار المواد الجيدة وتفاصيل التصميم وممارسات البناء السليمة لمنع حدوث التشققات أو على الأقل تقليل حدوثها ، وعندما تحدث من المهم تحديد ما إذا كانت الشقوق ستؤثر سلباً على متانة الهيكل وقدرته على تحمل الأحمال وقابليته للخدمة ويتم تحديد الأنواع المختلفة من الشقوق بشكل أساسى من خلال السبب الرئيسي أو الآلية المرتبطة بوظيفتها وتنشأ الشقوق الهيكلية بسبب الأحمال المطبقة، في حين أن الشقوق غير الهيكلية هي في الأساس نتيجة لخصائص الخرسانة والمواد المكونة لها وممارسات التصميم وحيث تسبب ظروف الخدمة في تدهور المنشأ الخرساني.

الشقوق الغير الهيكلية تنتج في الغالب عن ضغوط داخلية في مواد البناء ولا تؤثر هذه الشقوق بشكل عام على سلامة المبني الهيكلية بشكل مباشر و مع تقدم عمر الخرسانة يمكن أن تصبح الشقوق مسارات للتسربات للمواد الضارة مما يسمح للرطوبة والأكسجين والكلوريد والمواد الكيميائية والغازات العدوانية الأخرى بالتفغل في الخرسانة ، و يمكن أن يؤدي هذا التسلل للمواد الضارة إلى تدهور كبير في الهيكل بمرور الوقت، إن الشقوق في الهيكل غالباً ما تكون علامة تحذيرية على وجود خطأ ما وهي تعمل كمؤشر مبكر على أن سلامة المبني قد تكون معرضة للخطر. إن اكتشاف الشقوق ومعالجتها في مرحلة مبكرة يسمح للمهندسين وأصحاب المباني بتنفيذ إجراءات تصحيحية، ومنع المزيد من التدهور وضمان سلامة وطول عمر الهيكل.

لإدارة الشقوق بشكل فعال وتجنب الفشل الهيكلي المحتمل، فإن عمليات التفتيش المنتظمة والصيانة الدورية والالتزام بمعايير البناء المناسبة ضرورية وبناءً على عرضها يتم تصنيف الشقوق إلى ثلاثة فئات هي الشقوق الرقيقة (أقل من 1 مم في العرض)، والشقوق المتوسطة (1 مم إلى 2 مم في العرض)، والشقوق العريضة (أكبر من 2 مم في العرض).

وفقاً للكود الامريكي (ACI 224) لا يُعتبر التشقق خطيراً ولا يؤثر بشكل كبير على الحفاظ على حديد التسليح أو طول عمر المبني إذا كان عرض سطح الشق لا يتجاوز 0.3 مم في الأعضاء كما موضح في الجدول (1).

اظهرت الابحاث والدراسات السابقة ان استخدام الايبوكسي في اصلاح الشقوق الخرسانية يعد من اكثر الطرق فعالية لتعزيز المتانة وسلامة المنشآت ، حيث يستخدم الايبوكسي لملء الشقوق واعادة الترابط بين

الاجزاء المتشقة مما يساهم في تحسين القوة الهيكيلية للخرسانة ومنع تسرب المياه ، اجريت العديد من الابحاث لتحسين مقاومة الضغط باستخدام الايبوكسي ونستعرض اهم الدراسات باختصار في هذا الجزء [1-24].

جدول (1) عرض الشقوق المسموح به وفقاً لمعيار [1] ACI 224

Exposure condition	Tolerable crack Width , mm
Dry air or protective membrane	0.41
Humidity, moist air, soil	0.3
Deicing chemicals	0.18
Seawater and seawater spray;	0.15
wetting and drying Water-retaining structures	0.10

Presentation title

31

Frasson et.al, 2020) [25[

قام الباحثون بدراسة معالجة الشقوق بواسطة الايبوكسي والاسمنت الجيوبوليمر حيث تم إحداث الشقوق في العينات كما موضحة في الشكل(1) باستخدام صفائح فولاذية بسمك 2مم.

في العينة (LC) وُضعت الألواح في مركز الوجوه المتوازية وفي العينة (TC) ثُبّتت الألواح في الثلث الأوسط من نفس الوجه. واستندت المنهجية إلى العمل الذي طوره عيسى ودبس حيث قام المؤلفون بإحداث شقوق في العينات باستخدام ألواح فولاذية.



شكل (1) تمثيل للعينات والشقوق الاصطناعية والعينات المرجعية[25]

بعد خلط الخرسانة تم تشكيل العينات وتجفيفها بالهواء لمدة 24 ساعة وإخراجها من القالب وعرضها للتجفيف بالغمر لمدة تصل إلى 21 يوماً في هذا العمر تم تطبيق مواد الإصلاح (الجيوبوليمر والإيبوكسي) تم استخدام لاصق إيبوكسي، وهو لاصق هيكلي ثانوي المكونات يُنصح به لسد الشقوق،

وهو منتج يتميز بقوه التصاق عاليه، ولزوجة منخفضة، ومقاومة كيميائية وميكانيكية عاليه، يتكون الإصلاح من عملية تجفيف وتنظيف وملء الشقوق بالجاذبية، حتى فاصلت المواد وتم إزالة الفائض وبعد أربع وعشرين ساعه من تطبيق الإصلاح تم إخضاع العينات للتجفيف بالغمر حتى بلغ عمر الخرسانه 28 يوماً وتم إجراء اختبار مقاومة الضغط. الشكل (2) يوضح العينات بعد ملء الشقوق.



الشكل (2) العينات بعد ملء الشقوق [25].

واهم ما توصلت اليه هذه الدراسة ان قيمة مقاومة الضغط لمجموعة العينات المرجعية (M) المتوسطة تبلغ 37 ميجا باسكال ، وأظهرت مجموعة العينات المتشقة التي لا تحتوي على حشو انخفاضاً في مقاومة الضغط بنحو 12% و 13% مقارنة بالمجموعة (M).

أظهر التحليل الإحصائي للعينات بعد إصلاح الشقوق باستخدام أسمنت الجيوبوليمر والإيبوكسي أن هذه المواد كانت فعالة في تحسين الخصائص الميكانيكية للعينات و لم تكن هناك فروق كبيرة بين الإيبوكسي وأسمنت الجيوبوليمر الا ان يمكن استخدام أسمنت الجيوبوليمر في المناطق المعرضة للدرجات الحرارة العالية لعلاج الشقوق ويعتبر حل بديل عن الإيبوكسي وذلك لأن الإيبوكسي يتصلب سريعا في درجات الحرارة العالية.

(Griffin et.al,2017) [26]

قاموا بدراسة تجريبية للخرسانة المتشقة و التحقيق في أداء بعض عينات الخرسانة المرمرة بالإيبوكسي من حيث قدرتها على الانحناء وذلك عن طريق مقارنة حمل فشل الكمرات الخرسانية غير التالفة تحت

حمل الانحناء مع حمل فشل الكمرات الخرسانية المرمرة، تم مقارنة ثلاثة أنواع من منتجات راتجات الإيبوكسي الشائعة في هذه الدراسة.

تم إجراء اختبار الانحناء بناءً على طريقة الاختبار القياسية وفقاً لـ 16-ASTM C78 / C78M تم النظر في ستة كمرات خرسانية مرجعية وغير مسلحة في هذه الدراسة، تم تحمل العوارض تحت حمل رأسى حتى تشقق الكمرة أو تتكسر في منطقة الشد، ثم تم إصلاحها وإعادة اختبارها تحت حمل الانحناء لتحديد فعالية الإيبوكسي لاستعادة الكمرة المتشقة / المكسورة ، تم مقارنة أقصى أحمال الفشل قبل وبعد الإصلاح.

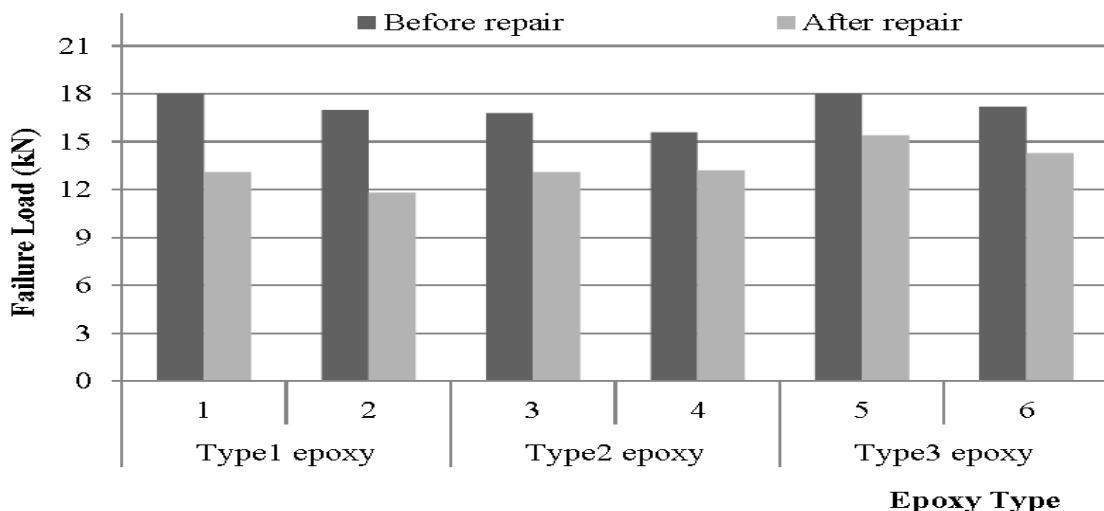
تم إنشاء كمرات خرسانية ببعد 505 مم طولاً 105 مم ارتفاعاً ، وكان عرض العوارض 100 مم في الأسفل و 105 مم في الأعلى ، وتم إنشاء الكمرات الخرسانية بنفس تصميم الخليط وتصليب في الماء لمدة 28 يوماً قبل نقلها إلى مختبر الاختبار وبعد التصلب تم فحص الحالة العامة للعوارض للتأكد من عدم وجود فراغات وعيوب مرئية في الخرسانة. تم اختيار ثلاثة أنواع من منتجات الإيبوكسي ذات خصائص مختلفة للتجارب فإن الإيبوكسي من النوع 1 يتمتع بأعلى لزوجة و من ناحية أخرى يتمتع الإيبوكسي من النوع 3 بلزوجة منخفضة ومعامل مرونة منخفض، ولكنه يتمتع بقوة ضغط وشد عالية، يتمتع الإيبوكسي من النوع 2 بنفس قوة الشد والضغط مثل النوع 1 ، حيث تم استخدام طريقتين لتطبيق الإيبوكسي بما في ذلك "الحشو بالجاذبية" و"طريقة الحقن" وفقاً للمواصفات الفنية للإيبوكسي كما موضح في الشكل (3).



الشكل (3) كسر نموذجي لعوارض الاختبار تحت الحمل الرأسى [26]

أظهرت النتائج أن أداء العوارض التي تم إصلاحها يختلف اعتماداً على نوع الإيبوكسي وطرق التطبيق، إذا تم استخدام راتج الإيبوكسي المناسب وتطبيقه بشكل صحيح يمكن تحسين مقاومة الانحناء واستمرارية عوارض الخرسانة بشكل كامل وكما وجد أن لزوجة الإيبوكسي تؤثر بشكل على عملية الإصلاح.

عبارة أخرى، على الرغم من أن مادة الإيبوكسي قد تتمتع بمقاومة شد أكبر من الخرسانة، ولكنها لا تستطيع استعادة القدرة الكاملة للخرسانة المتشقة إذا لم يتم تحقيق الترابط الكامل أو الاختراق بسبب اللزوجة العالية أو التطبيق غير السليم، والشكل (4) يوضح نتائج الاختبار قبل وبعد المعالجة بالإيبوكسي.



الشكل (4). نتائج اختبار الانحناء (أقصى أحمال الفشل) للعارض المختبرة [26]

(Krishnamoorthy and Arif , 2013) [27]

في هذه الدراسة تم دراسة تأثير نسبة الماء إلى الاسمنت w/c على المادة المعالجة الإيبوكسي من النوع سيكادور 31 SBA 31 (08Sikadur 31 SBA S) بنسبة مختلفة 0.45 و 0.5 و 0.6 . حيث كان عدد العينات 5 مكعبات لكل نسبة w/c لإظهار تأثير مقاومة الضغط قبل وبعد تطبيق الإيبوكسي على الشقوق.

تم معالجة كل هذه العينات في ماء المعالجة لمدة تصل إلى 28 يوماً ، بعد عملية المعالجة تم اختبار جميع المكعبات باستخدام آلة اختبار مقاومة الضغط لإنشاء الشقوق وب مجرد رؤية الشقوق، سيتم الضغط على زر الإيقاف على الفور قبل الوصول إلى المكعبات الفاشلة. تظهر الشقوق الموجودة على المكعب. تم ترك مكعب واحد فقط للاختبار حتى فشل. تم تسجيل مقاومة الضغط لكل مكعب. سيتم تكرار هذه الخطوات لنسبة الماء والإسمنت الأخرى. بعد ذلك، تم استخدام الإيبوكسي أو 08Sikadur 31SBA 31SBA S لحقن الشقوق التي حدثت من قبل بالإيبوكسي بالداخل و سيتم ترك هذه المكعبات لمدة يوم واحد حتى تجف. وفي اليوم التالي تم اختبار تلك المكعبات مرة أخرى لمعرفة مقاومة تحملها بعد تطبيق الإيبوكسي وتم تكرار هذه الخطوات لنسب ماء واسمنت أخرى وتم تسجيل البيانات كما موضحة بالجدول (2).

واهم ما توصل اليه الباحثان ان فعالية الإيبوكسي تتأثر ب نسبة الماء الى الاسمنت (W/C) عندما كانت نسبة الماء الى الاسمنت (W/C) تساوي 0.45 انخفضت مقاومة الضغط بنسبة 14.22% بينما انخفضت مقاومة الضغط بنسبة 17.08% عندما كانت نسبة الماء الى الاسمنت (W/C) تساوي 0.50 ، وكانت نسبة التخفيض 20.42% لمقاومة الضغط عندما كانت نسبة الماء الى الاسمنت تساوي 0.60 كما موضحة في الجدول (2) . ويرجع هذا الانخفاض بسبب تباعد اكبر بين حبيبات الركام داخل الخرسانة نتيجة لزيادة محتوى الماء الخلط مما يؤثر على مقاومة الضغط بعكس الخرسانة ذات محتوى ماء اقل فيكون الركام قريب جدا من بعضه فيعطي مقاومة ضغط عالية.

جدول (2) نتائج مقاومة الضغط لنسبة W/C المختلفة قبل المعالجة وبعد المعالجة بالإيبوكسي [27]

W/C	Compressive strength without crack (MPa)	Compressive strength Crack repair with epoxy (MPa)	Reduction strength %
0.45	46.19	39.55	14.22
0.5	35.53	32.05	17.08
0.6	30.42	24.19	20.42

Camille and Debs ,2007)) [28]

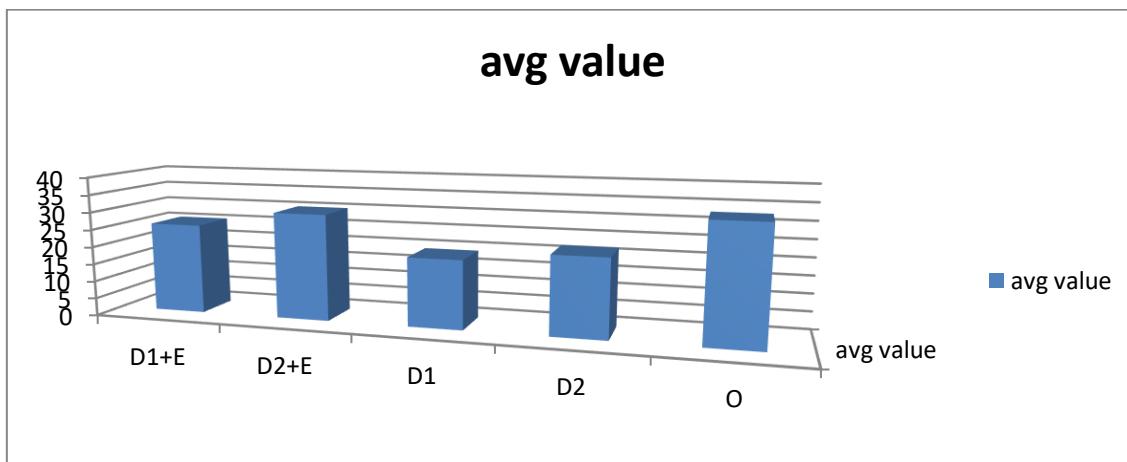
في هذه الدراسة تم استخدام الإيبوكسي من النوع (52-Sikadur) منخفض اللزوجة لمعالجة الشقوق الصناعية لمكعبات الخرسانية (150*150*150) مم بواسطة المليء بالجاذبية وفقاً لـ ACI 2-RAP، تم استخدام ثلاثة أنواع من المكعبات أثناء التجربة المعملية.

النوع الأول هو مكعب عادي (O) بأبعاد التالية: 150 × 150 × 150 مم، أما بالنسبة لمكعب الثاني (1D) فقد تم تركيب شق صناعي فيه باستخدام لوحين من الفولاذ، وكلاهما له الأبعاد التالية: ارتفاع 150 مم ، وعرض 35مم ، وسمك 2 مم ، والمكعب الثالث والأخير (2D) به أيضاً شق صناعي مصنوع من لوحين فولاذيين بالأبعاد التالية: ارتفاع 70 مم ، عرض 50 مم ، سمك 2 مم، بالإضافة إلى ذلك تمثل المكعبات (D1 + E) والمكعبات بها شقوق والمعالجة بالإيبوكسي (1D) و(2D) تمثل المكعبات بها شقوق .

وخلصت هذه الدراسة بالنتائج أن الشق يقلل من مقاومة الضغط حيث تم الحصول على انخفاض في مقاومة الضغط بنسبة 40.93% ، و تشقق الخرسانة عملية عشوائية شديدة التغير وتتأثر بالعديد من العوامل ، و كلما زاد طول الشق زادت تركيزات الإجهاد الناتجة عنه وبسبب وجود شق في الهيكل فإن مقاومة الضغط الهيكل ستتلاشى تدريجياً مع زيادة حجم الشق ونتيجة لذلك، سيكون الهيكل عرضة للفشل عندما تصبح مقاومته منخفضة جداً بحيث يحدث كسر تحت التحميل الطبيعي حيث يعمل الإيبوكسي عند تطبيقه بشكل صحيح، تحسين مقاومة الضغط عن طريق تقليل الانخفاض إلى 8.23%. و الجدول (3) والشكل (5) يوضح نتائج الاختبار للمكعبات الخرسانية المرجعية والمتشققة والمعالجة بالإيبوكسي.

جدول (3) نتائج مقاومة الضغط قبل المعالجة وبعد المعالجة بالإيبوكسي [28]

Cube	Type	Days	F_c' (MPa)	Reduction %
1,2,3	O	28	33	/
4,5,6	D ₁	28	19.47	40.94
7,8,9	D ₂	28	22.2	32.703
10,11,12	D _{1+E}	35	25.67	22.103
13,14,15	D _{2+E}	35	30.27	8.23



شكل (5) متوسط قيم مقاومة الضغط قبل وبعد الحقن بالإيبوكسي [28]

مناقشة الدراسات السابقة :

ان حدوث الشقوق في الخرسانة وخصوصا في المناطق المعرضة لدرجات الحرارة العالية نسبيا امر طبيعي ويرجع ذلك لحدوث شقوق الانكمash بسبب فقدان ماء الخلط لطبقة العلوية للخرسانة المعرضة لدرجات الحرارة وتكون شقوق عشوائية وبغض النظر عن سببها (مثل الانكمash، أو درجة الحرارة، أو الأحمال)، تُعد الشقوق مصدر قلق فهي تُتيح طرقاً مباشرة لدخول الماء والعوامل العدوانية إلى داخل الخرسانة و كذلك تُعد الشقوق دائمًا مصدر قلق من منظور المتنانة [1-11].

[12-24] اكدوا ان عمليات معالجة وترميم الشقوق الخرسانية يعتمد بشكل اساسي على سبب حدوث الشق سواء كان شقوق هيكيلية او شقوق الغير هيكيلية حيث اغلب الشقوق تحدث نتيجة التنفيذ الغير صحيح اثناء العمل او نتيجة لعدم جودة المواد المستخدمة في الخرسانة متمثلة في نوع الاسمنت والركام والرمل والماء الخلط .

أظهرت العديد من الدراسات فعالية استخدام الإيبوكسي كوسيلة لترميم الشقوق الخرسانية، إذ يمتاز بخصائص ميكانيكية وكيميائية تجعله مناسباً لمعالجة التشققات [20] [33]. ومع ذلك فإن أداء الإيبوكسي يتأثر بدرجة كبيرة بالظروف البيئية المحيطة، لا سيما في المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة. فقد بينت دراسة [29] أن الخصائص الفيزيائية للإيبوكسي، مثل الزوجة وزمن التصلب، تتغير بشكل واضح عند التعرض لدرجات حرارة مرتفعة، مما قد يؤثر سلباً على فعاليته في الإصلاح. وتدعى هذه النتائج ما توصل إليه [32] من أن قوة الالتصاق بين الإيبوكسي والسطح الخرسانية تتحفظ في البيئات الحارة والرطبة، مما يعزز الحاجة لتطوير أنواع محسنة من الإيبوكسي مقاومة للحرارة ، في المقابل قدمت دراسات تطبيقية مثل دراسة [30] أدلة ميدانية على نجاح استخدام الإيبوكسي في مناخ الخليج العربي شريطة الالتزام بإجراءات التطبيق المناسبة مثل تجنب أوقات الذروة الحرارية كذلك وجد [31] أن دمج الإيبوكسي مع إضافات حرارية يمكن أن يحسن من أداء المادة في البيئات الحارة [25-33].

الخلاصة

في ختام هذه الدراسة، اتضح أن استخدام الإيبوكسي كوسيلة لإصلاح الشقوق الخرسانية يمثل خياراً فعّالاً ومناسباً للظروف المناخية القاسية التي تميز المناطق الحارة في الجنوب الليبي. أظهرت نتائج التحليل والتجارب أن مركبات الإيبوكسي، وبخاصة الأنواع منخفضة الزوجة، قادرة على التغلغل بعمق داخل الشقوق، مما يعزز من الترابط الداخلي للخرسانة المتشقة ويحسن من خصائصها الميكانيكية . كما بينت الدراسة أن الأداء الحراري للإيبوكسي يظل مستقرًا نسبيًا رغم الارتفاعات الكبيرة في درجات الحرارة التي تتجاوز أحياناً 45 درجة مئوية، وهو ما

يجعله مناسباً للاستخدام في مشاريع الصيانة والإصلاح في بيئات الجنوب الليبي إضافة إلى ذلك، أظهر الإيبوكسي مقاومة جيدة للتقلصات الحرارية والتغيرات البيئية، مما يسهم في إطالة عمر الخدمة للمنشآت الخرسانية وبناءً على هذه النتائج، توصي الدراسة باعتماد أنظمة إصلاح قائمة على الإيبوكسي في مشاريع البنية التحتية في الجنوب الليبي، مع ضرورة مراعاة ظروف التطبيق المحلي من حيث درجة الحرارة والرطوبة وسرعة المعالجة، لضمان الكفاءة المثلث لعمليات الإصلاح ومزايا البحث المستمر لتطوير المواد الداخلة في صناعة الإيبوكسي لتصل كفاءته في استعادة مقاومة الضغط بالكامل وبالتالي الإيبوكسي هو الخيار الأمثل لعلاج الشقوق الخرسانية.

المراجع

- [1] ACI Committee E706. Structural crack repair by epoxy injection (ACI RAP Bulletin 1) Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2003. 5pp.
- [2] ACI, C. (1993). Cause, evaluation, and repair of cracks in concrete structures. America: American Concrete Institute.
- [3] SIKA. Sika data book 2002, Sika Near East, S.A.L., Beirut, Lebanon; 2002. 319pp.
- [4] Nosseni, G., & Harichandran, R. S. (2010). Improve repair of concrete structures using Polymer concrete patch and FRP overlay. Materials in Civil Engineering , 314–323.
- [5] Wiktor, H.M. Jonkers , Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete ,pp 763–770(2011)..
- [6] wismograho.A.s , ch.firdharini ,hardianti,sembrinig,development of mortar for repair of cracked concrete with injection method ,journal of technology material physics ,vol.4,No.1,2022/46–53.
- [7]R.R Krishnamoorthy ,sh.n.arif,concrete cracks repair using epoxy resin , The International Conference on Innovation Challenges in Multidisciplinary Research and Practice,22 march 2018.

- [8]Rahman , M, and akhtarul islam ,M.2022 application of epoxy resins in bulding materials : progress and prospects . polymer bulletin , 79 (3) ,p1949–1975 .
- [9] Field Guide to Concrete Repair Application Procedures, Structural Crack Repair by Epoxy Injection Reported by ACI Committee E706, ACI RAP Bulletin 1 (Reapproved 2009).
- [10]] Mand Kamal Askar, Yaman Alkamki, Razaq Ferhadi and Hisham Khalid Majeed, Cracks in Concrete Structures cusses and Treatments: A review . pp 148–165, 2023.
- [11]Abdelrahman, A., & El-Attar, A. (2005). Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 19(8), 595–600.
- [12][Karayannis, C. G., Chalioris, C. E., & Kakaletsis, D. J. (2019). Use of epoxy resin for repairing RC beams under cyclic loading. *Engineering Structures*, 179, 155–169.
- [13]Choi, H., Lee, S., & Kim, J. (2021). Performance Evaluation of Concrete Structures Using Crack Repair Methods. *Sustainability*, 13(6), 3217.
- [14]Siddique, R., Mehta, A., & Singh, M. (2021). Performance of Epoxy–Injection and Microorganism–Based Crack Repair Methods in Concrete Structures. *Buildings*, 13(11), 2697.
- [15]Sam, A. R. M., Lim, N. H. A. S., & Rahman, M. A. (2017). Self–healing of concrete by using epoxy resin as a healing agent. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(6), 1–5.
- [16]Doshi, S., Shah, N., Patel, H.(2018). Methodology for Prevention and Repair of Cracks in Building. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 7(7), 1–5.

- [17]Yang, K. H., & Ashour, A. F. (2008). Influence of epoxy injection on the structural behavior of cracked reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 22(3), 123–134.
- [18]Abdel-Jaber, H., & Nehdi, M. L. (2020). Crack detection and repair in concrete using automated and intelligent systems: A review. *Automation in Construction*, 110, 103041.
- [19]Kong, F. K., & Evans, R. H. (1995). Reinforced and Prestressed Concrete book. Third edition .
- [20]Zhao, J., Wang, R., & Sun, Y. (2019). Performance of different crack repair materials and techniques for concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019044.
- [21]Nguyen, T. N., Castel, A., & Khan, M. S. H. (2016). Durability of cracked reinforced concrete beams repaired by epoxy injection and cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 112, 237–245.
- [22]Bae, S., & Bayrak, O. (2008). Behavior of reinforced concrete beams repaired with epoxy. *ACI Structural Journal*, 105(4), 441–448.
- [23]Tayyab, M., & Qureshi, L. A. (2020). Comparative study of different crack repair techniques in concrete. *Civil Engineering Journal*, 6(7), 1305–1315.
- [24]Rahman, M. A., & Islam, M. S. (2018). Investigation on crack repairing performance of different epoxy resins. *Journal of Civil Engineering Research*, 8(2), 49–55.
- [25]Frasson.B. J , Pelisser.F , Silva .B.V , Concrete crack repair analysis with metakaolin-based geopolymers cement , Vol.13, p. 298 – 313 ,2020 .
- [26] Griffin, S., Askarinejad, H., & Farrant, B. (2017). Evaluation of Epoxy Injection Method for Concrete Crack Repair. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 6(3), 177–181.

- [27] Renga Rao Krishnamoorthy, Sharifah Nadhrah Syed Tajul Arif , Concrete Cracks Repair Using Epoxy Resin . 2013.
- [28] Camille A.Issa, Pauls Debs (2005) Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete, Construction and Building Materials 21 (2007) 157–163.
- [29]Al-Mahaidi, R., Kalfat, R., & Asadollahi, A. (2015). Effect of elevated temperatures on the bond between CFRP and concrete using different epoxy adhesives. *Composite Structures*, 133, 1055–1064.
- [30]Al-Sulaimani, G. J., Kaleemullah, M., & Basunbul, I. A. (2000). Repair of cracked concrete by epoxy injection in hot regions. *ACI Materials Journal*, 97(2), 172–180.
- [31]Habib, M. A., Ahmed, S. F., & Khan, M. I. (2021). Thermal performance enhancement of epoxy-based repair materials for desert climate conditions. *Construction and Building Materials*, 290, 123264.
- [32]Nguyen, T., Bui, H., & Tran, D. (2019). Durability of epoxy repair systems under tropical climate conditions. *Journal of Building Engineering*, 22, 23–30.
- [33]Smith, J., Lee, K., & Thomas, A. (2016). Structural crack repair using epoxy resin injection techniques: An evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*.