بسم الله الرحمن الرحيم

تشقق الخرسانة الناتج عن تآكل حديد التسليح

تأليف

Yuxi Zhao

Weiliang Jin

ترجمة

د. فهد عبدالله الرشودي

أستاذ مشارك – قسم الهندسة المدنية – كلية الهندسة

جامعة الملك سعود

دار جامعة الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS

ص.ب ٦٨٩٥٣ - الرياض ١١٥٣٧ المملكة العربية السعودية

ح دار جامعة الملك سعود للنشر، ١٤٤٤هـ (٢٠٢٣م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

تشاو، يوكسي

تشقق الخرسانة الناتج عن تآكل حديد التسليح/ يوسكي تشاو؛ ويليلنج جين؛ فهد بن عبدالله الرشودي - الرياض، ١٤٤٤هـ.

٢٣٦ ص؛ ١٧سم × ٢٤ سم

ردمك: ٣-٩٥-٥١٠-٦٠٣-٩٧٨

١- الخرسانة ٢- الخرسانة المسلحة أ. جين، ويليلنج (مؤلف مشارك) ب. الرشودي، فهد بن عبدالله (مترجم) ج. العنوان

ديوي ٦٩٣,٥ ١٤٤٤/٨٤٦٩

رقم الإيداع: ١٤٤٤/٨٤٦٩

ردمك: ٣-٩٥-٥١٠-٦٠٣-٩٧٨

هذه ترجمة عربية محكمة صادرة عن مركز الترجمة بالجامعة لكتاب:

Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking

By: Yuxi Zhao & Weiliang Jin.

© Published by Elsevier Inc, 2016.

وافق المجلس العلمي على نشر هذا الكتاب في اجتماعه السادس للعام الدراسي ١٤٤٣هـ، المعقود بتاريخ ٤/١٣ /١٤٤٤هـ، الموافق ٢٠٢٢/١١/٧م. ليكون مرجعاً علمياً في مجاله.

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يسمح بإعادة نشر أي جزء من الكتاب بأي شكل ،وبأي وسيلة سواء كانت إلكترونية ،أو آلية بما في ذلك التصوير والتسجيل، أو الإدخال في أي نظام حفظ معلومات ،أو استعادتها بدون الحصول على موافقة كتابية من دار جامعة الملك سعود للنشر.

دار جامعة الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS

مقدمة المترجم

يغطي هذا الكتاب النقص الموجود في المراجع لموضوع عملية تحليل تشققات الخرسانة الناتج من تآكل الحديد. لذلك يساعد هذا الكتاب المهندسين والباحثين في مجال الخرسانة المسلحة والمتانة لتحسين الجودة وإطالة العمر الافتراضي للخرسانة وذلك نتيجة لمعرفة تحديد الآلية التي تسبب التدهور للخرسانة بسبب التآكل، أيضا حساب العمر الافتراضي للخرسانة المسلحة بطريقة أكثر دقة، وكذلك التخفيف من الشقوق والتساقط الناتج عن الصدأ، ومن ثم تحديد وتجنب الممارسات التي تؤدي إلى تشققات مبكرة نتيجة الصدأ.

يشتمل هذا الكتاب على عدة موضوعات من أهمها: مراجعة عددٍ من النماذج المختصة بوصف آلية التشقق للخرسانة بسبب التآكل، كذلك دراسة منتجات تآكل الحديد والعوامل الخاصة بها مثل: معامل المرونة والتمدد، ونتائج استخدام المسح المجهري لدراسة السمك الحرج لطبقة الصدأ عند السطح الداخلي والخارجي للخرسانة، وكذلك توزيع الصدأ خلال هذا السطح. ومن أبرز نتائج هذا الكتاب تقديم نموذج جديد لحساب الوقت من بداية التآكل إلى أن يبدأ سطح الخرسانة بالتشقق.

- ترجمة مثل هذه الكتب المتخصصة في المجالات الهندسية والعلمية تعد إضافة للمحتوى العربي الضعيف في المجال الهندسي بما يساعد في فهم أعمق عند المهندسين ورفع للوعي عند المهتمين بهذه الموضوعات وهو ما ينتج عنه تحسين لجودة المنتجات وإطالة عمرها الافتراضي.

● وأدعو الله سبحانه وتعالى أن يكون هذا الكتاب إضافة لزملائي المهندسين والمهتمين بموضوع تشققات الخرسانة الناتجة عن تآكل الحديد.

والله ولي التوفيق.

المترجم

مدخل

يتسم العمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية غير المسلحة بأنه طويل جداً، إذ يثبت كثير من المنشآت التاريخية من العصر الروماني هذه الحقيقة وبشكل مقنع، مثل البانثيون في روما الذي تم بناؤه من أنواع الخرسانة عالية القوة والخرسانة العادية، وقبة من الخرسانة خفيفة الوزن جدا، أو الجسور الرومانية في جميع أنحاء أوروبا عبر آلاف السنين تحت تأثير التعرض لعوامل الطبيعة، والحروب والزلازل، دون حماية أو صيانة ومع ذلك ظلت هذه المنشآت باقية.

عند استخدام حديد التسليح داخل الخرسانة، فإن الحديد يكون محميًا ابتداء بطبقة خاملة على السطح بسبب ارتفاع الأس الهيدروجيني للمحلول المحيط (الخرسانة)، ومع ذلك فإن هذه الطبقة لا تكون مستقرة، مع تقدم عمر الخرسانة. الخرسانة مادة مسامية؛ ففي بداية تشكل الخرسانة تمتلئ المسامات جزئياً بالماء وتكون هناك حالة توازن مع وجود رطوبة نسبية عالية، ولكن أسطح المنشآت الخرسانية المسلحة تتعرض عادةً إلى أجواء ذات رطوبة قليلة. وكنتيجة لذلك، تبدأ عملية جفاف طويلة الأمد للخرسانة بمجرد إزالة الشدات (القوالب). ونتيجة لذلك فإن المسامات تتفرغ من الماء جزئياً ومن ثم تنتقل الغازات المخففة الموجودة في الهواء المحيط، مثل ثاني أكسيد الكربون، ببطء إلى داخل المسام، وتتفاعل مع مكونات الأسمنت. بالبداية ونتيجة لهذا التفاعل تتشكل طبقة رقيقة من منتجات التحلل الكربوني بالإماهة بالقرب من سطح الخرسانة ومع ازدياد سمك هذه الطبقة المكربنة حتى تصل إلى كامل الغطاء الخرساني فإن قيمة الأس الهيدروجيني للمحلول الملامس لحديد التسليح تنخفض؛ فيتم تدمير الطبقة الحامية، ومن ثم يبدأ تآكل الحديد.

إذا تعرض سطح الخرسانة، بشكل مؤقت، لمحلول الكلوريد المائي، مثل ماء البحر، أو ماء يحتوي على ملح مذاب، فعندها يمكن أن تتغلغل أيونات الكلوريد في مسام الخرسانة.

لحسن الحظ، يتم ترشيح أيونات الكلوريد من محلول الملح، وتتركز بالقرب من السطح، ومع ذلك قد يخترق الماء النظيف المسام الداخلية عن طريق الخاصية الشعرية. في وقت لاحق، تدخل أيونات الكلوريد المذاب إلى العمق حتى في الفراغات الصغيرة جدا، عن طريق الانتشار البطيء أو عندما يصل تركيز الكلوريد بالقرب من حديد التسليح إلى قيمة حرجة فقد يؤدي ذلك إلى تدمير الطبقة الحامية، ومن ثم يبدأ تآكل الحديد.

حتى الآن لم يبلغ تصميم المتانة (durability) مستوى التطور الذي بلغه التصميم الإنشائي . وفيما يتعلق بالمتانة، فإننا نتناول مراحل مختلفة، منها على سبيل المثال، نشوء التآكل، تكون الشقوق؛ ومن ثم التساقط. بعد نشأة التآكل يكون معدل التآكل منخفضًا إلى حد ما، ولكن بعد تكون الشقوق الأولية، فالتآكل يتسارع بشكل كبير. يصف مؤلفو هذا الكتاب تشكل نواتج التآكل والضغط الناتج من هذه النواتج، بسبب زيادة كميتها مع مرور الوقت بالعمليات الأساسية التي قد تمثل مؤشرات واضحة على انتهاء العمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية المسلحة.

يناقش الكتاب آليات تآكل الحديد في الخرسانة باختصار. فالفصول التالية تصف بالتفصيل تشكُّل نواتج التآكل عند السطح الداخلي الفاصل بين حديد التسليح والخرسانة. خصوصاً الامتلاء التدريجي للفراغات داخل الخرسانة والامتلاء التدرجي للشقوق بنواتج التآكل. وأخيرًا، يتم عرض نموذج يصف تشقق الخرسانة بسبب تشكل نواتج التآكل. وهذه الطريقة والنتائج التي حصل عليها مؤلفو هذا الكتاب ستكون مفيدة للغاية للتنبؤ بالعمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية المسلحة بواقعية أكثر.

يصف هذا الكتاب ولأول مرة بطريقة أكثر تفصيلا العمليات المعقدة التي يمكن ملاحظتها خلال المرحلة الحرجة لتقدم عمر الخرسانة من بدء التآكل إلى تكون الشقوق في الغطاء الخرساني، ومن ثم -أخيرًا- عملية تساقط الخرسانة القريبة من السطح. سيسهم الفهم الجيد لهذه العمليات المعقدة في تطوير نموذج ذي موثوقية أكثر بإمكانه التنبؤ بالعمر الافتراضي للخرسانة، وكذلك تطوير طرق أكثر فعالية للتدخل الوقائي. لذلك فإنه يمكن

إطالة العمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية المسلحة بشكل منهجي وكذلك تخفيض تكلفة الإصلاح بشكل كبير. وهذا يمثل أهمية كبيرة للدول التي يتم فيها بناء بنية تحتية كبيرة وشاملة، مثل الصين. إذ لا يوجد دولة تنتج كميات كبيرة من الخرسانة مثلها.

إذا لم يصبح البناء الحديث أكثر استدامة، وإذا لم يتم زيادة العمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية المسلحة، فإن النمو سيكون بطيئاً، بسبب التكاليف الكبيرة لإصلاح وصيانة البنية التحتية الحالية. ولذلك فإن هذا الكتاب ربما يسهم في إيجاد حلول واقعية ومستدامة لهذه المشكلة في جميع أنحاء العالم.

هذا الكتاب يستحق التوزيع على نطاق واسع، ونأمل أن يطلع عليه الباحثون والممارسون ويدرسون محتوياته بعمق أكثر، لأنه من خلال هذا الكتاب يمكن تحسين الوضع الحقيقي المتعلق بالمتانة والعمر الافتراضي في البناء في جميع أنحاء العالم بشكل كبير .

فولكر هـ. ويتمان (Folker H. Wittmann)

تمهيد

منذ منتصف سبعينيات القرن العشرين ظهر عدد من المشكلات المتعلقة بالمتانة (durability)، الأمر الذي حفز الباحثين لإيجاد العوامل الرئيسية التي تؤثر في متانة المنشآت الخرسانية. يعد تآكل حديد التسليح أحد الأسباب الرئيسية لتدهور المنشآت الخرسانية المسلحة، إذ إن تآكل الحديد في الخرسانة سيؤدي إلى نقص في مساحة مقطع قضبان الحديد، وضعف بالترابط بين حديد التسليح والخرسانة، وكذلك ظهور شقوق موازية لقضبان حديد التسليح الطولية. وقد أشارت الدراسات الميدانية إلى أن التشقق وتساقط القطع الخرسانية هما أكثر ما يهم مالكي العقارات، إذ إن الانهيار الإنشائي للمنشآت الخرسانية المسلحة الناتج عن تآكل حديد التسليح أمر نادر الحدوث. وعادة ما يظهر بوضوح تشقق على الغطاء الخرساني، وبقع تشير إلى الصدأ ، وسقوط قطع خرسانية قبل أن يكون المنشأ الخرساني المسلح معرضا للخطر. لذلك فإن هذه التشققات للغطاء الخرساني الناتجة عن تآكل حديد التسليح مهمة ويتم تعريفها عادةً على أنها الحدود الوظيفية التصميمية (serviceability limit state).

منذ عام ١٩٩٨، والمؤلفان يركزان على هذا المجال البحثي وبحثا بعناية في أصل وآلية وتطور الشقوق الناتجة عن تآكل الحديد في الخرسانة. بالنظر إلى أهمية هذا الموضوع يلخص المؤلفان نتائج البحوث ذات الصلة ويشاركانها مع الباحثين والمهندسين الآخرين المهتمين بهذا المجال. يركز هذا الكتاب على عملية تشقق الخرسانة الناتجة عن تآكل الحديد. بعد تقديم تمهيد عن الموضوع ومراجعة البحوث والدراسات السابقة في فصل "المقدمة" ينتقل الكتاب لمناقشة آليات تآكل الحديد في الخرسانة في فصل "تآكل الحديد في الخرسانة". أما في فصل "معاملات التمدد ومعامل المرونة لنواتج تآكل الحديد" فقد تم شرح مكونات،

ومعامل التمدد، ومعامل المرونة (elastic modulus) لتآكل الحديد، مع مراعاة أهمية خصائص تآكل حديد التسليح في نماذج تشقق الخرسانة. من خلال هذه العوامل المتغيرة لتآكل الحديد، يتم تطبيق تحليل مقدار التضرر (Damage Analysis) وذلك لتحليل عملية تشقق الخرسانة الناتجة عن تآكل الحديد في فصل (تحليل الأضرار ونماذج التشقق للعناصر الخرسانية المسلحة بقضبان حديدية تآكلت). وسيتم دراسة السماكة الحرجة لطبقة الصدأ لحظة تشقق الغطاء الخرساني في فصل "قشور (Mill Scale), طبقة التآكل عند تشقق سطح الخرسانة". أما في فصل "توزيع الصدأ داخل الشقوق الناتجة عن التآكل "فإن المؤلفين يبحثان توزيع الصدأ في الشقوق الناتجة عن التآكل، ويجدان أن تلك الشقوق لا تمتلئ بالصدأ إلا عندما يبدأ سطح الخرسانة بالتشقق.

تقدم دالة جاوس (Gaussian Function) وصفا للتوزيع المكاني غير المنتظم لنواتج التآكل في فصل "التوزيع غير المنتظم لطبقة الصدأ حول قضبان الحديد في الخرسانة". الشقوق في الغطاء الخرساني_ التي يسببها التآكل_ تم دراستها في فصل "شكل الشقوق في الغطاء الخرساني الناتجة عن التآكل" وتم اقتراح نموذج خطي لوصف التغير في عرض الشقوق على طول الغطاء الخرساني. في الفصل الذي يليه شرح توزيع الصدأ على السطح الداخلي بين حديد التسليح والخرسانة "تطور نواتج التآكل في السطح الداخلي بين الحديد والخرسانة"؛ وفي الوقت نفسه نواتج التآكل تتغلغل إلى الفراغات داخل الخرسانة. وأخيرًا، في فصل بعنوان "نمط لتشقق الخرسانة الناتج عن تآكل الحديد" يتم اقتراح نموذج محسن لتشقق الخرسانة الناتج عن التآكل والذي يأخذ في الاعتبار تراكم طبقة التآكل وفي الوقت نفسه ملء نواتج التآكل للفراغات في الخرسانة. أيضاً تم مناقشة الوقت المستغرق من بدء تكون التآكل إلى تشقق سطح الخرسانة. وكذلك تم مناقشة الحاجة إلى مزيد من البحوث بشأن نمط التشقق الناتج عن التآكل.

يأمل المؤلفان أن يكون هذا الكتاب مفيدًا للباحثين المهتمين بمتانة الخرسانة والمنشآت الخرسانية، ولمهندسي صناعة العمارة الذين يهتمون بآليات التدهور ودورة حياة المنشآت الخرسانية المسلحة، ولطلاب الدراسات العليا الذين تدرس موضوعات بحوثهم التدهور الناتج عن التآكل للمنشآت الخرسانية المسلحة.

شكروتقدير

شكر للمؤسسة الوطنية للعلوم في الصين (NSFC) للدعم المالي المستمر من خلال المنح ٥٠٥٣٨٠٧٠ و٥٠٩٢٠١٠٥٨٠٦ و٥٠٨٠٨١٥٧ و٥١٢٧٨٤٦٠ وبدون هذا الدعم المالي لم يكن من الممكن القيام بجميع التجارب المعملية وتطوير الأنماط التحليلية والتوسع البحثي في هذا المجال.

يقدم المؤلفون لهذا الكتاب خالص الامتنان لطلاب الدراسات العليا الذين ساهموا في هذا البحث بموهبتهم و ذكائهم و عملهم الجاد وهم هاينق رين (Haiyang Ren) وجيانق يو (Jiang Yu) وبينجيان هو (Bingyan Hu) وهونق داي (Hong Dai) وينقياو او (Yingyao Wu)وهونجي دينق (Hongjie Ding) وجينفنق دونق (Jianfeng Dong)وشاون زهانق (Xiaowen Zhang).شكر خاص إلى هانجي دينج (Hangjie Ding) وجينفنق دونق (Jianfeng Dong)وشاون زهانق (Xiaowen Zhang) الذين ساعدوا أيضًا في تحرير المحتويات وتحسين التنسيق وتعديل بعض الأشكال في هذا الكتاب.

كما نقدر التعليقات والتشجيع من د. فولكر ويتمان التي ساهمت في تحسين جودة الكتاب وتفضلت بكتابة التمهيد. وشكرا جزيلا لمراجعي هذا الكتاب لما قدموا من اقتراحات مفيدة عززت جودة الكتاب إلى حد كبير. أيضا الشكر الجزيل للناشر والمحرر فانجي أو (Fanjie Wu)اللذين أجابا بصبر عن جميع أسئلتنا وساعدانا بأكبر قدر ممكن.

نعتذر عن تسمية هذا العدد القليل مع أن الذين ساعدونا كثيرون وكنا سعداء بالعمل معهم. خالص الشكر لهم جميعًا لمشاركة معرفتهم معنا وتشجيعنا على المضي قدمًا في هذا المجـــــال.

المحتويات

مقدمة المترجم ..... هـ
مدخل ..... ز
تمهيد ..... ك
شكر وتقدير ..... م
قائمة الأشكال ..... ث
قائمة الجداول ..... ج ج
الفصل الأول: مقدمة ١
(١,١) تهيئة ١
(١,٢) الأنماط المعملية(Empirical Models) ٣
(١,٢,١) تآكل الحديد الحرج عند تشقق السطح ٣
(١,٢,٢) عرض التشقق على سطح الخرسانة ٦
(١,٢,٣) مناقشة الأنماط المعملية ٩
(١,٣) النماذج التحليلية ١١
(١,٣,١) النموذج ثلاثي المراحل للتشقق الناتج عن التآكل ١١
(١,٣,٢) مرحلة امتلاء نواتج التآكل ١٢
(١,٣,٣) إجهاد وتشقق الغطاء الخرساني ١٤
(١,٣,٤) امتلاء الصدأ للشقوق الناتجة عن التآكل ١٨
(١,٤) محتويات هذا الكتاب ١٩
المراجع ٢١

الفصل الثاني: تآكل حديد التسليح في الخرسانة ٢٧
(٢,١) مقدمة ٢٧
(٢,٢) آليات تآكل حديد التسليح في الخرسانة ٢٨
(٢,٢,١) عملية التآكل ٢٨
(٢,٢,٢) معدل التآكل ٢٩
(٢,٢,٣) تكون الطبقة العازلة(passivation) ٣١
(٢,٣) تآكل حديد التسليح الناتج عن الكربنة أو هجوم الكلوريد ٣١
(٢,٣,١) التآكل الناتج عن الكربنة ٣٣
(٢,٣,٢) التآكل الناتج عن الكلوريد ٣٣
(٢,٤) نواتج التآكل ٣٥
(٢,٥) تضرر الخرسانة الناتج عن تآكل حديد التسليح ٣٩
(٢,٦) الخلاصة ٤٠
المراجع ٤١
الفصل الثالث: معاملات التمدد ومعامل نو اتج تآكل حديد التسليح ٤٣
(٣,١) مقدمة ٤٤
(٣,٢) معامل التوسع لنواتج تآكل الحديد ٤٦
(٣,٢,١) البرنامج المعملي ٤٦
(٣,٢,٢) النتائج المختبرة ٤٦
(٣,٢,٣) التحليل الوزني الحراري ٥٠
(٣,٢,٤) تكوين عينات الصدأ ٥٣
(٣,٢,٥) معامل التمدد لعينات الصدأ ٥٧
(٣,٣) معامل نواتج تآكل الحديد في الخرسانة ٦٢
(٣,٣,١) البرنامج المعملي ٦٢
(٣,٣,٢) منحنى الإجهاد- الاستطالة (stress-strain curve) للتحميل وإزالة التحميل ٦٤
(٣,٣,٣) اختبار بيانات الضغط الدوري المنخفض ٦٥

(٣,٣,٤) معامل الصدأ ٦٦
(٣,٤) الخلاصة ٦٩
المراجع ٦٩
الفصل الرابع: تحليل الأضرار ونموذج تشقق منشآت الخرسانة المسلحة مع تآكل حديد التسليح ٧٣
(٤,١) المقدمة ٧٤
(٤,٢) نموذج تشقق الخرسانة الأساسي بسبب تآكل الحديد ٧٤
(٤,٣) مرحلة عدم التشقق في عملية تشقق الخرسانة نتيجة تآكل الحديد ٧٦
(٤,٤) مرحلة التشقق الجزئي في عملية تشقق الخرسانة نتيجة التآكل ٨٠
(٤,٤,١) الجزء السليم ٨١
(٤,٤,٢) الجزء المتشقق ٨١
(٤,٥) الضغط التمددي الناتج عن التآكل ٨٩
(٤,٥,١) العلاقة بين الضغط التمددي وتآكل حديد التسليح ٩٠
(٤,٥,٢) اختلاف الضغط التمددي ٩٠
(٤,٥,٣) تأثير سمك الغطاء الخرساني ٩٢
(٤,٥,٤) تأثير قطر قضبان الحديد ٩٣
(٤,٥,٥) تأثير جودة الخرسانة ٩٤
(٤,٦) نقاش حول الخسارة في نصف قطر قضبان حديد التسليح ٩٦
(٤,٦,١) تغير خسارة حديد التسليح مع طول الشق ٩٦
(٤,٦,٢) تأثير سمك الغطاء الخرساني ٩٧
(٤,٦,٣) تأثير قطر قضبان الحديد ٩٧
(٤,٦,٤) تأثير معامل تمدد الصدأ ٩٨
(٤,٦,٥) تأثير جودة الخرسانة ٩٩
(٤,٧) الخلاصة ٩٩
المراجع ١٠٠

الفصل الخامس: القشوروطبقة التآكل عند تشقق سطح الخرسانة ١٠٣
(٥,١) مقدمة ١٠٤
(٥,٢) البرنامج المعملي ١٠٤
(٥,٢,١) عينات الخرسانة المسلحة ١٠٤
(٥,٢,٢) تآكل الحديد المسرّع ١٠٥
(٥,٢,٣) إعداد العينة ١٠٦
(٥,٢,٤) الملاحظة والقياس ١٠٩
(٥,٣) توزيعات الصدأ في عينة التشقق ١١٠
(٥,٤) القشور ١١٢
(٥,٥) سمك طبقة التآكل السطحية عند التشقق السطحي لغطاء الخرسانة ١١٥
(٥,٥,١) عند تشقق السطح الخارجي ١١٥
(٥,٥,٢) عند تشقق السطح الداخلي ١١٧
الخلاصة ١١٩
المراجع ١٢٠
الفصل السادس: توزيع التآكل في عملية تشقق الخرسانة الناتج عن التآكل ١٢١
(٦,١) المقدمة ١٢٢
(٦,٢) البرنامج المعملي ١٢٢
(٦,٢,١) عينة الخرسانة المسلحة ١٢٢
(٦,٢,٢) المعالجة وتاريخ التعرض ١٢٣
(٦,٢,٣) إعداد العينة ١٢٤
(٦,٢,٤) الملاحظة والقياسات ١٢٥
(٦,٣) توزيعات الصدأ على سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة ١٢٦
(٦,٤) توزيع عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل ١٢٩
(٦,٥) توزيع الصدأ في الشقوق الناتجة عن التآكل ١٣١
(٦,٥,١) توزيع الصدأ في الشقوق بواسطة المجهر الرقمي ١٣١

(٦,٥,٢) امتلاء الصدأ في الشقوق بواسطة SEM ١٣٥
(٦,٥,٣) مناقشة لامتلاء الصدأ للشقوق التي يسببها ١٣٨
(٦,٦) تطور الصدأ في شقوق الخرسانة ١٣٩
(٦,٧)الخلاصة ١٤٠
المراجع ١٤١
الفصل السابع: التوزيع غير المنتظم لطبقة الصدأ حول قضبان الحديد في الخرسانة ١٤٣
(٧,١) مقدمة ١٤٣
(٧,٢) تآكل حديد التسليح والتآكل المسبب للشقوق ١٤٥
(٧,٣) نموذج جاوس لوصف طبقة الصدأ الموزعة بشكل غير منتظم ١٤٦
(٧,٤) مقارنة نموذج جاوس المقترح مع نماذج أخرى ١٥٠
(٧,٥) المعاملات في نموذج جاوس ١٥٢
(٧,٥,١) :$\lambda 3$ معامل الانتظام لتوزيع طبقة الصدأ ١٥٢
(٧,٥,٢) :$\lambda 1$ المعامل غير المنتظم لطبقة الصدأ ١٥٤
(٧,٥,٣) :$\lambda 2$ معامل الانتشار لطبقة الصدأ ١٥٧
(٧,٥,٤) العلاقات بين المعاملات قبل تشقق سطح الخرسانة ١٥٩
(٧,٦) الخلاصة ١٦٢
المراجع ١٦٢
الفصل الثامن: شكل الشق في الغطاء الخرساني المتشقق نتيجة التآكل ١٦٧
(٨,١) مقدمة ١٦٨
(٨,٢) البرنامج المعملي ١٦٩
(٨,٢,١) عينات الخرسانة المسلحة ١٦٩
(٨,٢,٢) تاريخ التآكل المسرّع ١٧٠
(٨,٢,٣) تحضير العينة ١٧١
(٨,٢,٤) الملاحظة والقياسات ١٧٢

(٨,٣) شكل الشق ١٧٤
(٨,٣,١) نموذج عرض الشق ١٧٤
(٨,٣,٢) :a1 معامل التباين في عرض الشق ١٧٤
(٨,٣,٣) :a2 معامل عرض الشق على سطح قضبان الحديد ١٧٩
(٨,٤) عرض الشق وسمك طبقة التآكل ١٧٩
(٨,٤,١) العلاقة بين عرض الشق Wi وسماكة طبقة التآكل ١٧٩
(٨,٤,٢) :Wc عرض الشق الحرج عند تشقق السطح الخارجي للخرسانة ١٨٠
(٨,٤,٣) :Ws عرض الشق على سطح الغطاء الخرساني ١٨١
(٨,٥) العلاقة بين سمك طبقة التآكل وتغير معامل عرض الشقa1 ..... ١٨٢
(٨,٦) شكل الشق في أنواع مختلفة من الخرسانة ١٨٤
(٨,٧) الخلاصة ١٨٦
المراجع ١٨٦
الفصل التاسع: تطورعجينة الأسمنت المعبأة بنو اتج التآكل عند سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة ١٨٩
(٩,١)مقدمة ١٨٩
(٩,٢) تأثير التشققات في سمك عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل ١٩٠
(٩,٣) العلاقة بين سمك عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل (T) و سماكة طبقة التآكل باستثناء تأثير الشقوق الداخلية ١٩٢
(٩,٤) العلاقة بين سمك عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل (T) و سماكة طبقة التآكل بما في ذلك التشققات الداخلية ١٩٨
(٩,٥) الخلاصة ٢٠٣
المراجع ٢٠٣
الفصل العاشر: نموذج تشقق الخرسانة الناتج عن تآكل حديد التسليح ٢٠٧
(١٠,١) مقدمة ٢٠٨
(١٠,٢) نموذج تشقق السطح الخرساني الناتج عن التآكل باعتبار نواتج التآكل ٢٠٩

(١٠,٢,١) وصف عملية التشقق ٢٠٩
(١٠,٢,٢) نموذج- T ٢١٠
(١٠,٢,٣) النسبة الاسمية بين حجم رواسب التآكل وحجم حديد التسليح الأساسي.. ٢١٢
(١٠,٣) الوقت من بدء التآكل إلى تشقق سطح الخرسانة ٢١٤
(١٠,٣,١) قانون فاراداي ٢١٤
(١٠,٣,٢) معدل التآكل ٢١٦
(١٠,٤) مناقشة حالة التآكل غير المنتظم ٢١٨
(١٠,٥) مناقشة تأثير التحميل في نموذج التشقق ٢٢٠
(١٠,٥,١) القوة التي يساهم بها التشابك الميكانيكي ٢٢٠
(١٠,٥,٢) تقاطع الشقوق والتآكل الموضعي ٢٢١
(١٠,٦) الخلاصة ٢٢٢
المراجع ٢٢٢
الرموز **٢٢٥**
ثبت المصطلحات **٢٢٣**
كشاف الموضوعات **٢٣٧**

قائمة الأشكال

شكل (١,١) مقارنة النتائج المتوقعة لتآكل حديد التسليح عند تشقق سطح الخرسانة للأنماط التجريبية والنتائج المعملية ٩

شكل (١,٢) مقارنة اتساع عرض الشق السطحي في الخرسانة بين النتائج المتوقعة باستخدام النموذج والنتائج المعملية ١٠

شكل (١,٣) عملية التشقق ثلاثية المراحل الناتجة عن التآكل. (أ) بدأ التآكل. (ب) المرحلة ١: ملء. (ج) المرحلة ٢: الإجهاد. (د) المرحلة ٣: تشقق ١١

شكل (١,٤) تظهر صور BSE تراكم نواتج التآكل في السطح الداخلي الفاصل بين حديد التسليح والخرسانة(S)حديد التسليح(؛)طبقة التآكل))عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل P ((عجينة أسمنت غير متأثرة) ؛) A فراغات هوائية)).[23] ١٣

شكل (١,٥) نمط تشقق الخرسانة الناتج عن التآكل (أ) نمط الأسطوانة سميكة الجدران. (ب) نمط الأسطوانة مزدوجة الطبقة سميكة الجدران ١٧

شكل (٢,١) تفاعلات الأنود والكاثود. ٢٩

شكل (٢,٢) مرحلتا البدء والانتشار لتآكل حديد التسليح في الخرسانة[4] ٣٢

شكل (٢,٣) هجوم نقري في قضبان حديد التسليح ٣٥

شكل (٢,٤) تحول أكاسيد الحديد. ٣٨

شكل (٢,٥) مراحل الضرر الناتج عن التآكل. (أ) حديد التسليح المعزول. (ب) بدء التآكل والنمو. (ج) مزيد من التآكل وانتشار التآكل. (د)انفصال الطبقات والتساقط. ٣٩

شكل (٣,١) أنماط XRD لثماني عينات صدأ مختلفة ٤٩

شكل (٣,٢) منحنيات TG لجميع عينات الصدأ. ٥١
شكل (٣,٣) منحنيات DTA لجميع عينات الصدأ. ٥٢
شكل (٣,٤) أنماط XRD من العينة الأصلية المسخنة ١. ..... ٥٥
شكل (٣,٥) أنماط XRD المحسنة لعينات الصدأ الثمانية. ٥٦
شكل (٣,٦) الميناء الخرساني ونواتج التآكل (أ) الميناء الخرساني في يوكوسوكا (ب) قضبان الحديد الصدئ في الحزام (ج) نواتج التآكل المقشرة من قضبان الحديد الصدئ (د) عينات الصدأ الرقيقة ٦٣
شكل (٣,٧) منحنى الإجهاد والاستطالة للتحميل وإزالة التحميل النموذجي. ٦٥
شكل (٤,١) تشوهات طبقة الصدأ والخرسانة المحيطة تحت ضغط توسعي (أ) غير متشققة (ب) تشقق جزئي ٧٦
شكل (٤,٢) أقسام من الجزء المتشقق. ٨٤
شكل (٤,٣) الضغط التمددي بالنسبة لتآكل حديد التسليح ٨٩
شكل (٤,٤) تباين الضغط التمددي بعد بدء التشقق في الغطاء الخرساني (أ) الضغط التمددي مقابل طول الشق (ب) الضغط التمددي في الخرسانة المتشققة. ٩١
شكل (٤,٥) تأثير سمك الغطاء الخرساني على الضغط التمددي. ٩٢
شكل (٤,٦) القيمة القصوى للضغط الممتد مقابل سماكة الغطاء الخرساني. ٩٢
شكل (٤,٧) الضغط التمددي الطبيعي كدالة لطول الشق الطبيعي ٩٣
شكل (٤,٨) تأثير قطر قضبان الحديد في الضغط التمددي. ٩٤
شكل (٤,٩) تأثير قوة الشد في الضغط التمددي. ٩٥
شكل (٤,١٠) الخسارة نصف القطرية لقضبان الحديد كدالة مع طول الشق. ٩٦
شكل (٤,١١) تأثير سمك غطاء الخرسانة في خسارة الحديد أثناء تشقق السطح ٩٧
شكل (٤,١٢) تأثير سمك غطاء الخرسانة في خسارة الحديد أثناء تشقق السطح ٩٨
شكل (٤,١٣) تأثير معامل تمدد الصدأ في خسارة الحديد أثناء تشقق السطح ٩٨
شكل (٤,١٤) تأثير قوة الضغط في خسارة الحديد أثناء تشقق السطح ٩٩
شكل (٥,١) تفاصيل مخطط العينات الخرسانية (الأبعاد ملم). ١٠٥

شكل (٥,٢) صب الأجزاء المتشققة من العينات بمواد الإيبوكسي اللاصقة منخفضة اللزوجة ١٠٧
شكل (٥,٣) مخططات العينات وموقع الشرائح ١٠٨
شكل (٥,٤) عينة (شريحة ١-١) للملاحظة بواسطة المجهر الرقمي. ١٠٨
شكل (٥,٥) عينة مقصوصة من شريحة ٢-٢ للملاحظة بواسطة.SEM ١٠٨
شكل (٥,٦) توزيعات الصدأ في منطقة التلامس بين حديد التسليح والخرسانة وفي الشقوق التي يسببها التآكل (عجينة نواتج التآكل المالئة طبقة التآكل) ١١١
شكل (٥,٧) تحليل EDS عبر الشق الناتج عن التآكل (a) . الشق الناتج عن التآكل وخط تحليلي عبر الشق (b) .توزيع Fe عبر التشقق الناتج عن التآكل الذي تم تحليله بواسطة EDS على طول الخط التحليلي. ١١١
شكل (٥,٨) تحليل EDS عبر سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة. (أ) صورة BSEعند سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانةMS) ، القشور (وخط تحليلي عبر الواجهة. (ب) توزيع Fe و O عبر منطقة التلامس بين حديد التسليح والخرسانة تم تحليلها بواسطة EDS على طول الخط التحليلي ١١٣
شكل (٥,٩) توزيع القشور على السطح الفاصل بين حديد التسليح والخرسانة. ١١٤
شكل (٥,١٠) نمط التشقق شريحة ١-١. ..... ١١٥
شكل (٥,١١) نمط التشقق شريحة ١-٢. ..... ١١٧
شكل (٥,١٢) أنماط الشقوق على المقطع العرضي للشرائح التي تم قياسها. أطول طول شق نصف قطري وكذلك سمك طبقة التآكل قد تم ذكرها أسفل كل شريحة..... ١١٨
شكل (٥,١٣) العلاقة بين سمك طبقة التآكل وطول الشق. ١١٩
شكل (٦,١) رسم تخطيطي لعينة الخرسانة المسلحة (الأبعاد بال مم). ١٢٣
شكل (٦,٢) الرسومات التخطيطية للعينة المقطوعة (a) .العينة (b) .الألواح المقطوعة والشرائح ١٢٣
شكل (٦,٣) إعداد العينة ل (a).SEM شريحة (b) .9-L عينة للفحص بواسطة.SEM ١٢٥

شكل (٦,٤) قياس سمك طبقة الصدأ المتراكمة على سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة (a) .مجال الرؤية: ٥٠ * ٥٢ مم (b) .مجال الرؤية: ٣,٧٤ * ٣,٦٨ مم. (ب) مجال الرؤية: ٣,٧٤*٣,٦٨ ملم. ١٢٦
شكل (٦,٥) توزيعات الصدأ على سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة في العينة (a) .R-5 صورة BSE عند سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة -) عجينة الأسمنت المعبأة بنواتجMS - ، طبقة القشور - - طبقة التآكل (وخط تحليلي عبر سطح التلامس (b) .توزيعات Fe و O عبر سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة تم تحليلها بواسطة EDS على طول الخط التحليلي. ١٢٧
شكل (٦,٦) رسم تخطيطي لعملية انتقال الأيونات والتفاعل خلال عملية تآكل الحديد بوجود أيونات الكلوريد في الخرسانة. ١٢٨
شكل (٦,٧) متوسط سمك عجينة نواتج التآكل المالئة لمختلف سمك طبقات التآكل. ١٣٠
شكل (٦,٨) توزيع الصدأ في شريحة (a) .R-6 شريحة (b) .R-6 المنطقة ١ (c) .المنطقة ٢ (d) .المنطقة ٣ (e) .المنطقة ٤. ..... ١٣٢
شكل (٦,٩) التشقق على سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة في شريحة-M (6897) 14ميكرومترًا * ٦١٥٥ ميكرومترًا ١٣٤
شكل (٦,١٠) شريحة L-4 مع قضبان حديد متآكل بشكل كبير ١٣٤
شكل (٦,١١a) توزيع الصدأ في شق يخترق الغطاء الخرساني في العينة(a) .L-9 صورة BSE للشق الناتج عن التآكل والخط التحليلي عبر الشق (b) .توزيع Fe عبر الشق الذي تم تحليله بواسطة EDS على طول الخط التحليلي. ١٣٦
شكل (٦,١٢a) حالة العينة R-7 مع وجود شقوق داخلية فقط ١٣٦
شكل (٦,١١ b) نواتج التآكل تخترق الخرسانة المجاورة للشقوق ١٣٧
شكل (٦,١٢ b) توزيع الصدأ في شق داخلي في العينة) .R-7 أ (صورة BSE للشق الناتج عن التآكل والخط التحليلي عبر الشق. (ب) توزيع Fe عبر الشق الذي تم تحليله بواسطة EDS على طول الخط التحليلي. ١٣٧

شكل (٦,١٣) رسم تخطيطي لانتشار الشقوق وتطور الصدأ (a) . قبل تشقق السطح .
(b)تشقق السطح (c) .بعد تشقق السطح. ١٣٩
شكل (٧,١) يختلف تآكل حديد التسليح مع المسافة لمقدمة العينة.R ١٤٥
شكل (٧,٢) الشقوق النموذجية وطبقة الصدأ في شرائح من عينة.R ١٤٥
شكل (٧,٣) السمك الذي تم قياسه لطبقة الصدأ حول محيط حديد التسليح.....١٤٧
شكل (٧,٤) نظام الإحداثيات القطبية المحدد للحديد الموجود في الزوايا والحديد
الوسطي ١٤٨
شكل (٧,٥) نظام الإحداثيات القطبية لبيانات قياسات وملاءمة طبقة الصدأ. ١٤٩
شكل (٧,٦) تحليل الانحدار للنماذج المقترحة للبيانات التي تم اختبارها. ١٥٣
شكل (٧,٧) R2 لأربعة نماذج ١٥٤
شكل (٧,٨) المعنى الفيزيائي لـ .λ3 (أ) التآكل الجزئي .(λ3=0) (ب) تآكل كامل المقطع
العرضي.(λ3= Tr,min) ١٥٤
شكل (٧,٩) جزءان من طبقة الصدأ عند انتشار تآكل الحديد على محيط قضبان
حديد التسليح بالكامل ١٥٦
شكل (٧,١٠) تزايد نمو منطقة القيم العظمى (ذروة) للتآكل مع زيادة.λ1 .....١٥٧
شكل (٧,١١) منطقة الذروة للتآكل الجزئي ١٥٨
شكل (٧,١٢) العلاقة بين λ1 و.ρ ١٥٨
شكل (٧,١٣) انتشار غير منتظم للتآكل على نطاق واسع مع زيادة.λ2 .....١٥٩
شكل (٨,١) تفاصيل تخطيط العينات (الأبعاد مم). ١٦٨
شكل (٨,٢) دورات ترطيب وتجفيف بالاشتراك مع تيار مستمر ١٧٠
شكل (٨,٣) رسم تخطيطي لإعداد العينات لمراقبتها بالمجهر الرقمي (a) .تم صب الأجزاء
المتشققة من العينات بالإيبوكسي (b) .عينة أعدت لمراقبتها بالمجهر الرقمي.....١٧١
شكل (٨,٤) قياس وحساب عرض الشق Wi في دائرة نصف قطرها .Ri (أ) قياس عرض
الشق. (ب) عرض الشق الكلي.Wi ١٧٢

شكل (٨,٥) البيانات التي تم قياسها وخط الملاءمة الخاص بعرض الشق (a) .شريحة R000-1-8، تمثل سيناريو التشقق الداخلي (b) .شريحةR000-2-8 ، تمثل الشقوق التي اخترقت الغطاء الخرساني. ١٧٥
شكل (٨,٦) نموذج تخطيطي لشكل الشق. ١٧٦
شكل (٨,٧) العلاقة بين المعامل a1 وسمك طبقة التآكل ١٧٨
شكل (٨,٨) العلاقة بين المعامل a2 وسمك طبقة التآكل ١٧٨
شكل (٨,٩) العلاقة بين عرض الشق على سطح الخرسانة Ws وسمك طبقة التآكل ١٨٢
شكل (٨,١٠) رسم تخطيطي لانتشار التشقق الناتج عن التآكل. ١٨٣
شكل (٩,١) تأثير الشقوق على تطور. (c-a) التشقق الداخلي (e,d) .التشقق الخارجي. ، عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل،؛ طبقة التآكل; T, سمك ، ؛؛سمك. ١٩١
شكل (٩,٢) رسم تخطيطي للمناطق التي تم قياسها عند سطح التلامس بين حديد التسليح والخرسانة ١٩٣
شكل (٩,٣) سماكة عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل مقابل سمك طبقة التآكل باستثناء مناطق الشقوق الداخلية للعينة (a) .R000 البيانات التي تم قياسها (b) . جزء من خريطة البيانات بعد التجميع في نطاق ٢٠ ميكرومترًا للعينة.R067 ..... ١٩٣
شكل (٩,٤) العلاقة بين T و باستثناء مناطق الشقوق الداخلية .R033 (b) .R000 (a) . .(c) R067. (d 100. ..... ١٩٥
شكل (٩,٥) نماذج —T لأربع عينات من الخرسانة المسلحة باستثناء تأثير الشقوق الداخلية ١٩٦
شكل (٩,٦) أثر جودة الخرسانة المسلحة علىT ١٩٦
شكل (٩,٧) سمك عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل بمقابل سمك طبقة التآكل والتي تشمل مناطق التشقق الداخلي لعينات R000 (ا) جميع البيانات التي تم قياسها (ب) صوره مكبرة ١٩٨
شكل (٩,٨) البيانات المختبرة لجميع العينات ومتوسط قيمة البيانات المختبرة. ٢٠٢

شكل (٩,٩) نماذج - T لأربعة أنواع من الخرسانة (بما في ذلك تأثير الشقوق الداخلية).، عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل ؛T ، سمك ؛، سمك طبقة التآكل المعبأة لعجينة ؛ : TCP سمك CP ؛:TCL سمك طبقة التآكل. ٢٠٢

شكل (١٠,١) نموذج التشقق الخرساني الناتج عن التآكل، مع مراعاة عجينة الأسمنت المعبأة بنواتج التآكل (a) .ضعف الطبقة الحامية للحديد (b) .يظهر شق ناتج عن التآكل ويتشكل وفي وقت واحد (c) .يزداد و T تدريجياً حتى يصل الشق إلى السطح الخارجي الخرساني. ٢٠٩

شكل (١٠,٢) العلاقة بين TCP و.TCL ٢١٠

شكل (١٠,٣) التحويل من سمك(T) إلى سمك.(pore.) ٢١١

شكل (١٠,٤) توزيع غير منظم لطبقة التآكل ولسمك (a) طبقة تآكل غير منتظمة (b) سمك ٢١٩

شكل (١٠,٥) التقاطع الميكانيكي بين بروز حديد التسليح ومفاتيح الخرسانة ٢٢١

قائمة الجداول

جدول (١,١) دراسة معمليه لعجينة الأسمنت المُعبأة بنواتج التآكل ١٣
جدول (١,٢) نموذج التشقق الناتج عن التآكل ١٥
جدول (١,٣) امتلاء الصدأ للشقوق الناتجة عن التآكل..... ١٨
جدول (٢,١) أنواع مختلفة من أكاسيد الحديد[6] ٣٦
جدول (٢,٢) خصائص مختارة من أكاسيد الحديد[6] ٣٨
جدول (٣,١) تفاصيل عينات التآكل..... ٤٧
جدول (٣,٢) محتوى الفئتين: منتجات لثماني عينات(m) ٥٧
جدول (٣,٣) معامل التمدد للأكسيد الهيدروكسيدد الرئيسي والأكاسيد ٥٨
جدول (٣,٤) معاملات التمدد لجميع عينات الصدأ..... ٥٩
جدول (٣,٥) درجات التعرض المتعلقة بالظروف البيئية..... ٥٩
جدول (٣,٦) التصنيفات البيئية لكل عينات الصدأ..... ٦٠
جدول (٣,٧) معاملات تمدد الصدأ بالنسبة للبيئات المختلفة..... ٦٢
جدول (٣,٨) البيانات المختبرة من اختبار الضغط الدوري المنخفض..... ٦٦
جدول (٤,١) المعاملات الميكانيكية المحسوبة لأنواع الخرسانة الأربعة..... ٩٥
جدول (٥,١) نسب الخلط لعينات الخرسانة (كجم / م ٣)..... ١٠٥
جدول (٦,١) تكوين مزيج من عينات الخرسانة (كجم / م)..... ١٢٣
جدول (٦,٢) بيانات لكل مجموعة في "الشكل ٦,٧" ١٣٠
جدول (٧,١) قيم λ1 و λ2و λ3و λ4التي تم الحصول عليها من ملاءمة البيانات
المعملية..... ١٤٨

جدول (٧,٢) وصف سيناريوهين للتآكل غير المنتظم ١٤٨
جدول (٧,٣) قيمة انحدار المعاملات في النموذج ١٥١
جدول (٨,١) تركيبات خلط عينات الخرسانة ١٦٨
جدول (٨,٢) نتائج القياس وقيم الانحدار للمعاملات ١٧٦
جدول (٨,٣) نتائج الانحدار الخطي لـ a1 مقارنة بـTCL ١٧٨
جدول (٨,٤) نتائج الانحدار الخطي (linear regression) للمعامل a2 مقارنةً بـTCL ١٧٩
جدول (٨,٥) نتائج تعويض المعادلات لكل من Wi والسمك الحرج للشقWc ١٧٩
جدول (٨,٦) نتائج الانحدار الخطي (regression line) لـ Ws مقارنةً بـTCL ١٨٢
جدول (٨,٧) مقارنة بين أشكال التشقق بين NAC وRAC ١٨٥
جدول (٩,١) قيم (kT) و (Tcp(max بالميكرون ١٩٥
جدول (٩,٢) متوسط T و لكل عينة ومتوسط قيم T ومتوسط انحرافها لكل نوع من أنواع الخرسانة (ميكرومتر) ٢٠٠
جدول (٩,٣) قيم kT مع مراعاة تأثير التشققات الداخلية ٢٠٢