تقوية الكمرات الخرسانية المسلحة باستخدام صفائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية

مباركة محمود الورفلي و عادل محمد الويفاتي[1]

مركز بحوث الطاقات المتجددة وتحلية المياه

قسم الهندسة المدنية كلية الهندسة جامعة الفاتح[1]

ABSTRACT

Strengthening of reinforced concrete (R.C.) structures is often necessary due to a local defect in one or several of its members. Strengthening methods themselves have seen noticeable improvements over the years. Among the most important of these methods is, undoubtedly, the Fiber Reinforced Polymer technology.

This paper introduces the Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) as an established technology for strengthening R.C. beams. The first part of the paper deals with explaining the CFRP technology as a part of the wider technology of composite materials.

An experimental testing program was undertaken. R.C. beams were cast using different reinforcement ratios. The scheme of strengthening with CFRP was also varied, including some beams with no CFRP strengthening, i.e., reference beams.

The advantages of this strengthening method in improving the carrying capacity and controlling cracking and deflection is discussed.

الملخص

إن حاجة المنشآت الخرسانية إلى الدعم والتقوية تعتبر ضرورية في كثير من الحالات التي يتعرض فيها المنشأ لتلفٍ جزئي بأحد أعضاءه أو قصور كلي في وظيفته خلال عمره الإفتراضي. ومهما اختلفت الأسباب فالنتيجة هي ضرورة القيام بالدعم والتقوية لتحسين أو زيادة السعة التحميلية للمنشأ أو العضو. وقد استخدمت العديد من الطرق على مر السنين، والتي كان لزاما التفكير في تطويرها والبحث عن وسائل وأساليب أكثر فعالية وضمانا. فظهرت خلال النصف الأخير من القرن الماضي تقنية بديلة للتقوية تمتاز عن سابقاتها، وهي تقنية التدعيم والتقوية باستخدام البوليميرات المسلحة بالألياف، والتي استخدمت لتقوية عدة جسور ومبانٍ حول العالم. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التصرف الإنشائي لأحد أهم التقنيات المستحدثة، وهي صفائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية، عند استخدامها في تقوية الكمرات الخرسانية المسلحة.

تتناول هذه الورقة دراسة معملية لتأثير استخدام صفائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية في منطقة الشد، ومدى تأثيرها في الحد من التشقق والترخيم، وذلك بمدلولية الحمل الأقصى للانهيار، ومقدار الترخيم عند الحمل الخدمي، وقيمة الانفعال في كل حالة. حيث تم تنفيذ عدد من الكمرات الخرسانية المسلحة تختلف فيها نسبة الماء إلى الأسمنت مع التغيير في نسبة التسليح للمقطع. وقد دُرس مستوى الإجهاد في الكمرة قبل التطبيق كمتغير في اختبار الكمرات، بالمقارنة مع كمرات خرسانية مسلحة مرجعية وأخرى مدعمة بصفائح الألياف الكربونية. وأظهرت النتائج تحسناً في السعة التحميلية للكمرات المدعمة مقارنة بالكمرات المرجعية، مما يشجع البحث للاستفادة من هذه التقنية في التطبيقات المختلفة.

الكلمات الدالة: الألياف الكربونية، البوليمرات، الخرسانة المسلحة، تقوية، صيانة منشآت.

المقدمة

إن عملية الصيانة (Maintenance) وإعادة التأهيل (Retrofitting) والتقوية للعناصر الإنشائية (Strengthening) تتطلب أولا معرفة أسباب التصدعات والتشققات وفحصها جيداً لتحديد أسلوب وطريقة ومواد المعالجة. ومما لاشك فيه أن تعدد أساليب التقوية والمعالجة حسب نوع التشققات والتصدعات الحادثة في المنشأ، أو في العنصر ذاته تعتمد على عدة عوامل، لعل أهمها وظيفة المنشأ أو العنصر وكذلك البيئة الموجود بها شاملة الأحمال المسلطة.

ومن جهة أخرى، يمكن أن يكون التدعيم والتقوية ضروريان في أحد الأحوال التالية [1]:

أ- الخطأ في التصميم أو التنفيذ للعنصر الإنشائي.

ب- الاستعمال الخاطئ للمنشأ كتعرضه لأحمال تزيد عن الأحمال التصميمية، أو تركيب معدات ثقيلة أو ذات اهتزازات. أو تغيير وظيفة المنشأ، أو التعديل في نظامه الإنشائي، كإزالة حائط أو عمود.

ج- تلف بالخرسانة الأصلية أو حديد التسليح مما يؤدي إلى انخفاض السعة التحميلية.

د- إعادة تأهيل المباني التاريخية.

وقد بدأت فكرة استعمال المواد المستحدثة في تقوية وصيانة المنشآت المدنية، و تحديداً البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية ((Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) منذ الثمانينيات من القرن الماضي، من خلال عدة تطبيقات في عدد من دول العالم. وتبعاً لذلك جاء تطور حقل المواصفات والمعايير الخاص بهذا النظام خلال السنوات العشر الماضية، وتم إصدار عدد منها في الولايات المتحدة واليابان وكندا وأوروبا [1].

البوليميرات المسلحة بالألياف

التعريف بالبوليميرات المسلحة بالألياف

أ- الألياف (Fibers)

يرجع استخدام الإنسان للألياف إلى زمن بعيد، حيث تعّرف وبحث وطور استخدامها في مختلف مجالات الحياة، ونتج عن ذلك حصيلة كبيرة من الخبرات ساهمت في تطويرها والرفع من كفاءتها الوظيفية. وتُعّرف الألياف بأنها شعيرات دقيقة وطويلة، مرنة أو متماسكة، طبيعية أو صناعية، تستخدم بعدة أشكال وفي عدة مجالات. ويمكن أن تَصنف على أساس معامل المرونة إلى ألياف ذات معامل مرونة عالي ومقاومة عالية مثل الألياف الحديدية، الكربونية والزجاجية، و ذات معامل مرونة منخفض واستطالة عالية مثل الألياف البلاستيكية كألياف البولي بروبلين والبولي إيثيلين [1-2].

ب- المواد البوليميرية (Polymer)

وهي تتكون من جزيئين بولي وتعني متعدد و مير وتعني جزء ، أي متعدد الأجزاء. وتسمى المادة الأولية التي تصنع منها اللدائن (البوليميرات) بالمونومر، ويتكون المونومر (Monomer) في معظم الحالات من مادة عضوية هيدروكاربونية تمثل فيها ذرات الكربون العمود الفقري، ويُحول المونومر إلى لدائن (بولمر) بواسطة عملية البلمرة (Polymerization) [2]. فالبلاستيك (Polymers) هو مواد متبلمرة ذات وزن جزيئي مرتفع، وبعض الملدنات والمواد المالئة، وهي تنساب بالحرارة دون أن يتغير تركيبها فيسهل صياغتها وتشكيلها.

ج- المواد المركبة المستحدثة

المادة المركبة بوجه عام هي ناتج ترابط مادتين أو أكثر مختلفة في تركيبها المجهري، بحيث تحتفظ كل مادة بهيئتها وشكلها دون حدوث أي تفاعل أو تداخل بينهما. وتعتبر المواد المركبة المستحدثة (Advanced) Composite Material) من أحدث المواد التي ظهرت مغايرة للمواد التقليدية (الخرسانة المسلحة) بغية تحسين و تغيير بعض خواصها وإدخال خواص جديدة مثل زيادة الصلادة (Stiffness) والقوة (Strength) ومقاومة الصدم (Impact) إلى جانب الديمومة (Durability) وغيرها من الخواص. وهذه المواد مصنوعة من الألياف من راتنجات البوليمر وتعرف بالبوليمرات المسلحة بالألياف (Fiber Reinforced Polymers) [1].

فنظام البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) يشمل كل الألياف والراتنجات المستخدمة لتحضير أو إنتاج صفائح المواد الخليط، فمن الناحية الوظيفية فإن الألياف هي الجزء الذي

يعطي لهذه المادة المركبة خواصها الميكانيكية بينما تتركز وظيفة البوليمير على تحسين هذه الخواص. ويتم تصنيع البوليميرات المسلحة بالألياف من عدد من المصادر مثل الألياف الكربونية (Carbon Fiber) الألياف الزجاجية (Glass Fiber) وألياف البولي أميد (Aramid Fiber).

خلفية تاريخية

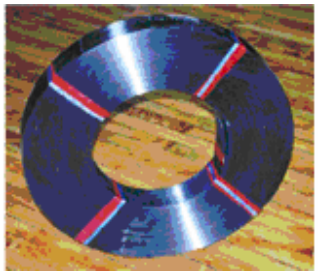
بدأ استخدام هذه التقنيات في نهايات النصف الأخير من القرن الماضي، واستعملت لتقوية عدة جسور حول العالم ، حيث استعمل لذلك الربط الخارجي المسبق الإجهاد بواسطة صفائح الحديد في مناطق الشد، ولكن نظراً لتلفها بالتآكل وصعوبة تنفيذها في الأماكن الصعبة، وكذلك زيادة زمن تطبيقها، اتجهت الأبحاث إلى البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)، وتجدر الإشارة إلى أن التطبيق الفعلي كان في الثمانينيات من القرن الماضي في الولايات المتحدة الأمريكية من خلال الاكتشافات والأبحاث للمركز الوطني للبحوث العلمية (NSF) ومصلحة الطرق الفيدرالية (FHWA) حيث نفذت عدة مشاريع بحثية وتطبيقات حقلية. وتبعاً لذلك نمى وتطور حقل المواصفات والمعايير الخاصة بتقنية البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية، فظهرت عدة لجان في الولايات المتحدة الأمريكية واليابان وأوروبا وكندا [1،3].

ماهية وتصنيع البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية

المادة الأساسية لهذا المنتج هي ألياف صناعية تركيبية من أصل غير عضوي، وتُصنف ضمن الألياف ذات معامل المرونة العالي والمقاومة العالية، وتعتبر متميزة في استخدامها في مجالات الإنشاء، ولها خواص مميزة مع الخرسانة فهي تنتج مركبات قوية تزيد من صلابة ومقاومة الخرسانة، وكذلك تعزز الخواص الديناميكية لها.

وتُصنع البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية بكربنة المواد العضوية فتتكون المركبات الكربونية التي تحتوي على ذرات الكربون المتراصة على طول الألياف الأصلية، فهي ذات بنية ليفية ممتازة تشبه بنية المادة الأم، وتتجمع الألياف الدقيقة على هيئة خيوط رفيعة تصل أعدادها من 3000 إلى 12000 خيط ذات سمك رفيع، وعلى الرغم من صغر حجمها وقلة وزنها إلا أنها ذات قوة عالية لتحمل الشد، ويتم معالجة أسطح الألياف المنتجة حتى تعطي قوة ربط أفضل، كما يتم إنتاجها كلفافات مستمرة حيث تصنع بتنظيم الألياف في صف واحد أو يتم نسج هذه الخيوط والشعيرات في أكثر من اتجاه [1-2].

إن الاهتمام المتزايد بهذه المادة من مواد التدعيم والتقوية، ساهم في عمليات تحسين تصنيعها. وتوجد عدة أشكال لها. فهي متوفرة جاهزة بعدة أشكال على شكل صفائح (Plates) توضع فوق أو تحت أو بجوانب العنصر، أو على هيئة شرائح (Sheets) يمكن أن تلف حول العنصر بسهولة وتأخذ الشكل النهائي له، كما هو مبين بالشكل 1.



أ- ألواح Plates

ب-أغشية Fabrics

ج- قضبان Bars

الشكل 1: الأشكال المختلفة للبوليميرات المسلحة بالألياف

خواص البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية

إن الإقبال المتزايد على استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف خاصة المتعلق منها بتقوية وتدعيم العناصر الإنشائية، أو إنتاج منشآت جديدة، إضافة إلى عوامل الأداء العالي إذا ما

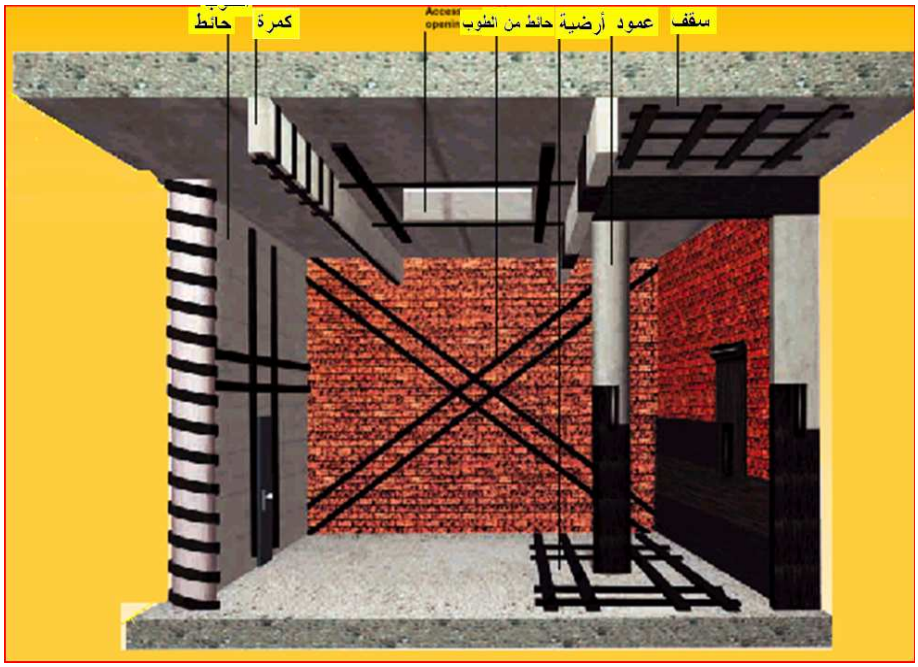
قورنت بالمواد التقليدية مثل المعادن (حديد التسليح)، كان نتيجة للجهود الجبارة المبذولة في مجال الأبحاث العلمية لغرض تطوير خواص هذه المواد، فهي متوفرة للاستخدام على كافة ومختلف العناصر الإنشائية من كمرات وأعمدة إلى بلاطات وأرضيات، ومع أغلب المواد كالخرسانة والطوب والحديد والخشب، كما هو مبين بالشكل 2. وتتمتع البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية (CFRP) بعدة خواص وخصائص منها [2]:

أ- غير قابلة للصدأ أو التآكل، وهي خفيفة الوزن وقليلة السمك.

ب- استطالتها عالية تحت تأثير الأحمال المستمرة.

ج- وقت تنفيذها قليل، و تنتج بعدة أشكال، ولا تحتاج إلى معدات خاصة.

د- المحافظة على الشكل الخارجي للعناصر من خلال نظم الحماية.



الشكل 2: مخطط نموذجي لتقوية العناصر الإنشائية المختلفة [4]

الدراسة المعملية

اشتملت الدراسة المعملية على تنفيذ عدد من الكمرات الخرسانية المسلحة بنسب الماء إلى الأسمنت 0.4، 0.55 , 0.7 مع التغيير في نسبة التسليح للمقطع، وكذلك تغير مساحة وطول الصفائح. وفيما يلي عرض لتفاصيل البرنامج المعملي.

مواد الخلطة الخرسانية

تتكون الخلطة الخرسانية من الأسمنت، والركام بنوعيه (خشن وناعم)، والماء، واستخدمت هذه المكونات في ظروف ثابتة لكل الخلطات الخرسانية، وتم عمل الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية للتأكد من مطابقتها للمواصفات ذات العلاقة.

المواد المستعملة في التطبيق

استخدمت صفائح البوليميرات المسلحة بألياف الكربون المستخدمة من إنتاج شركة Sika [4] وهي من النوع ذو معامل المرونة المنخفض CarbodurS512 ، وتتميز بالخواص الموضحة في الجدول 1. كما تم استخدام المادة اللاصقة Carbodur31 والتي تتميز بالخواص الموضحة فـــي الجدول 2.

الجدول 1 : خواص صفائح البوليميرات المسلحة بألياف الكربون Carbodur S512

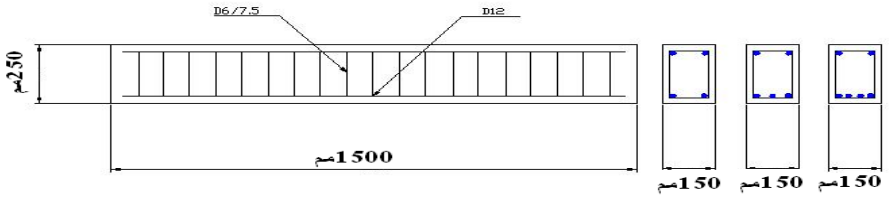
الخاصية	الوصف
العرض	50 مم
السمك	1.2 مم
معامل المرونة	165000 (ن/مم^2)
قوة الشد	2800 (ن/مم^2)
متوسط قوة الشد عند الانهيار	3050 (ن/مم^2)
الانفعال عند الانهيار	أكبر من 1.7%

الجدول 2: يبين الخواص الميكانيكية لمادة الربط المستخدمة Carbodur31

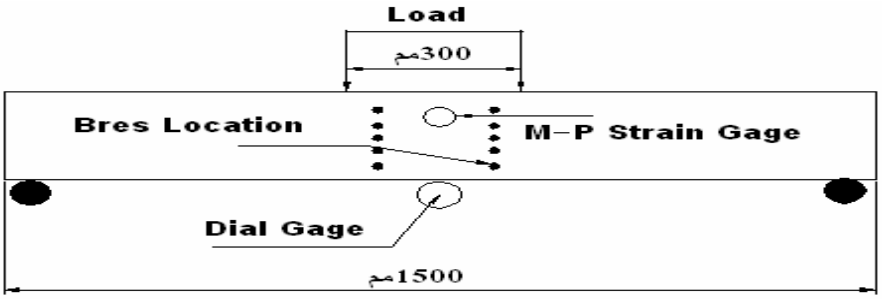
الخاصية	الوصف (ن/مم^2)
مقاومة الضغط	70 - 60
مقاومة الشد	20 - 15
مقاومة الربط مع الحديد	أكبر من 15
قوة الربط مع الخرسانة	أكبر من 3.5
معامل المرونة	أكبر من 4300

الاختبارات المعملية

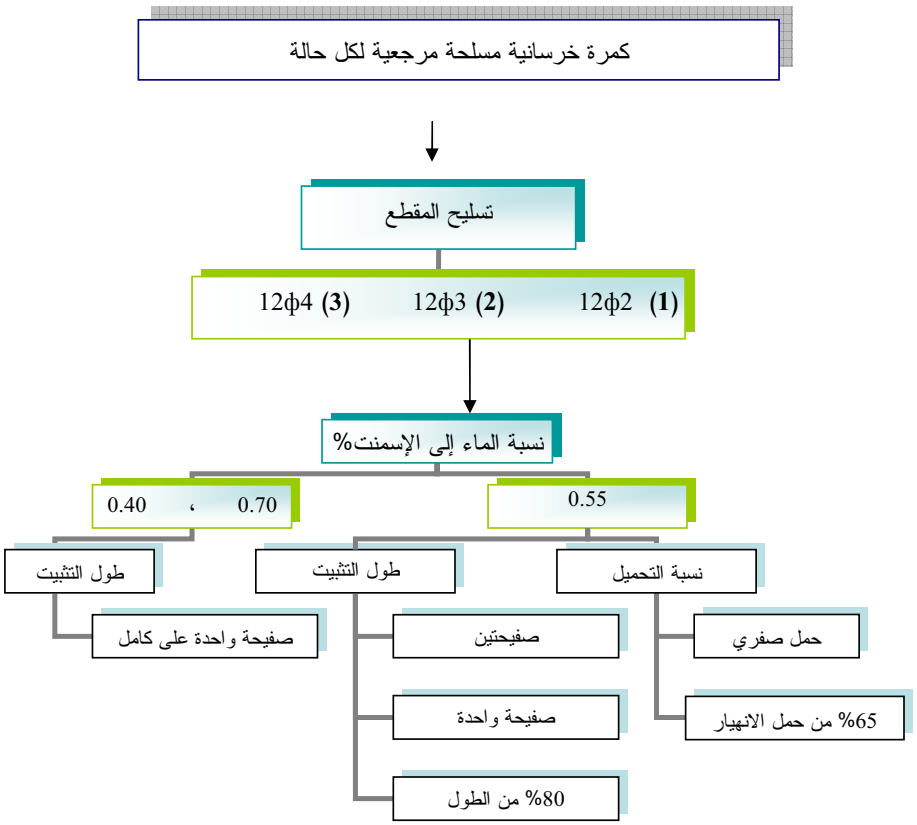
تم إجراء عدد من الاختبارات على الخرسانة للتعرف على سلوك كمرات الدراسة، وتمثلت الاختبارات على الخرسانة الطازجة في اختبار الهبوط، وكذلك اختبار مقاومة الضغط والانحناء على الخرسانة المتصلدة، حيث أعدت عينات الدراسة وتفاصيل التسليح الموضحة في الشكل 3. وطريقة تحميل الكمرات مبينة بالشكل 4. وأما تفاصيل البرنامج المعملي فيمكن الرجوع إلى الشكل 5، حيث الرموز موضحة بالجدول 3.



الشكل 3: تفاصيل التسليح



الشكل 4: طريقة تحميل الكمرات المسلحة والأجهزة المستخدمة



الشكل 5: المخطط الانسيابي لتفاصيل البرنامج المعملي

الجدول 3: ملخص برنامج الاختبارات

الرقم	رمز النموذج (*)	متغير الاختبار	نسبة الماء إلى الإسمنت	حمل التقوية	طول التثبت
1	$(B55/2)^{R}$	–	0.55	كمرة مرجعية	–
2	$(B55/2)^{R/F}$	صفيحة واحدة	0.55	65%من حمل الانهيار	على طول البحر
3	$(B55/2)^{F}$	صفيحة واحدة	0.55	%0	على طول البحر
4	$(B55/2)^{2F}$	صفحتين	0.55	%0	على طول البحر
5	$(B55/2)^{F'}$	صفيحة واحدة	0.55	%0	متر واحد
6	$(B55/3)^{R}$	–	0.55	كمرة مرجعية	–
7	$(B55/3)^{R/F}$	صفيحة واحدة	0.55	65%من حمل الانهيار	على طول البحر
8	$(B55/3)^{F}$	صفيحة واحدة	0.55	%0	على طول البحر
9	$(B55/3)^{2F}$	صفحتين	0.55	%0	على طول البحر
10	$(B55/3)^{F'}$	صفيحة واحدة	0.55	%0	متر واحد

11	$(B55/4)^{R}$	–	0.55	كمرة مرجعية	–
12	$(B55/4)^{R/F}$	صفيحة واحدة	0.55	65%من حمل الانهيار	على طول البحر
13	$(B55/4)^{F}$	صفيحة واحدة	0.55	%0	على طول البحر
14	$(B55/4)^{2F}$	صفحتين	0.55	%0	على طول البحر
15	$(B55/4)^{F'}$	صفيحة واحدة	0.55	%0	متر واحد
16	$(B40/2)^{R}$	–	0.40	كمرة مرجعية	–
17	$(B40/2)^{F}$	صفيحة واحدة	0.40	%0	على طول البحر
18	$(B40/3)^{R}$	–	0.40	كمرة مرجعية	–
19	$(B40/3)^{F}$	صفيحة واحدة	0.40	%0	على طول البحر
20	$(B40/4)^{R}$	–	0.40	كمرة مرجعية	–
21	$(B40/4)^{F}$	صفيحة واحدة	0.40	%0	على طول البحر
22	$(B70/2)^{R}$	–	0.70	كمرة مرجعية	–
23	$(B70/2)^{F}$	صفيحة واحدة	0.70	%0	على طول البحر
24	$(B70/3)^{R}$	–	0.70	كمرة مرجعية	–
25	$(B70/3)^{F}$	صفيحة واحدة	0.70	%0	على طول البحر
26	$(B70/4)^{R}$	–	0.70	كمرة مرجعية	–
27	$(B70/4)^{F}$	صفيحة واحدة	0.70	%0	على طول البحر

(*)

B55 نسبة الماء إلى الإسمنت = ĭĕ

B40 نسبة الماء إلى الإسمنت =ĭĕŏĭ

B70 نسبة الماء إلى الإسمنت =ĭĕ ĭ

ı عدد قضبان التسليح في الشد

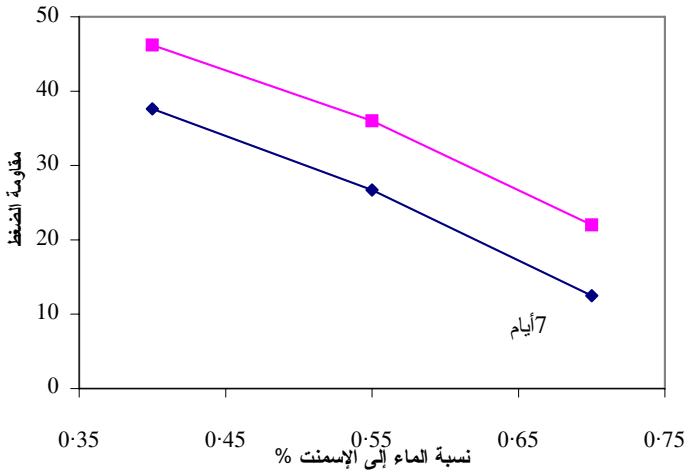
Ŏ عدد قضبان التسليح في الشد

ŏ عدد قضبان التسليح في الشد

عرض ومناقشة النتائج

مقاومة الضغط

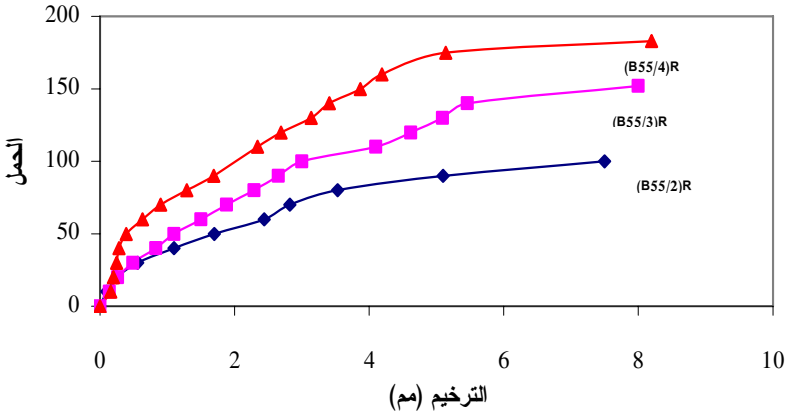
يوضح الشكل 6 العلاقة بين مقاومة الضغط بالكيلو نيوتن والزمن بالأيام لنسب الماء إلى الأسمنت المختلفة عند (28 و 7 يوم)، حيث 'fc =0.8fcu، ونلاحظ أن مقاومة الخرسانة تنخفض بارتفاع نسبة الماء إلى الأسمنت.



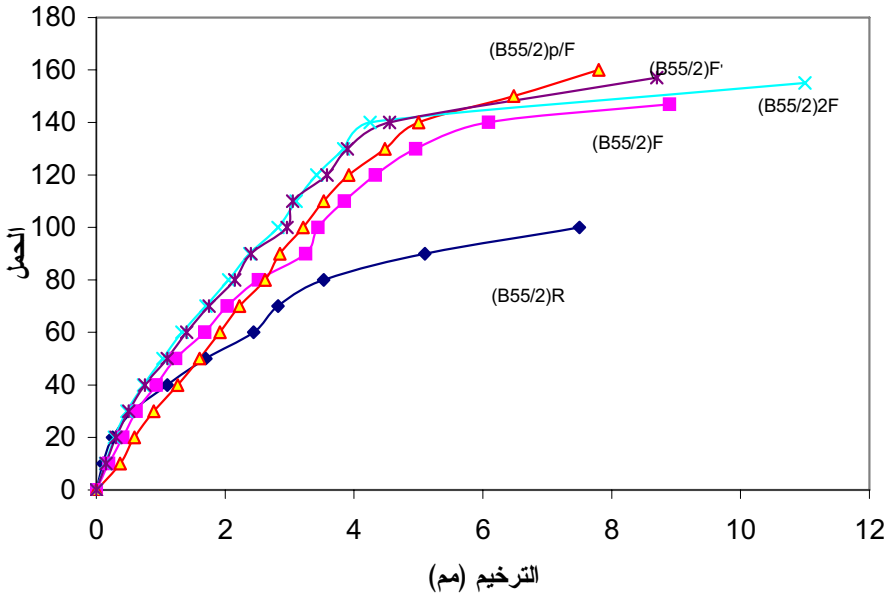
الشكل 6: العلاقة بين مقاومة الضغط (ك.ن) والزمن بالأيام لنسب الماء إلى الأسمنت المختلفة

مقاومة الانحناء للكمرات الخرسانية المسلحة

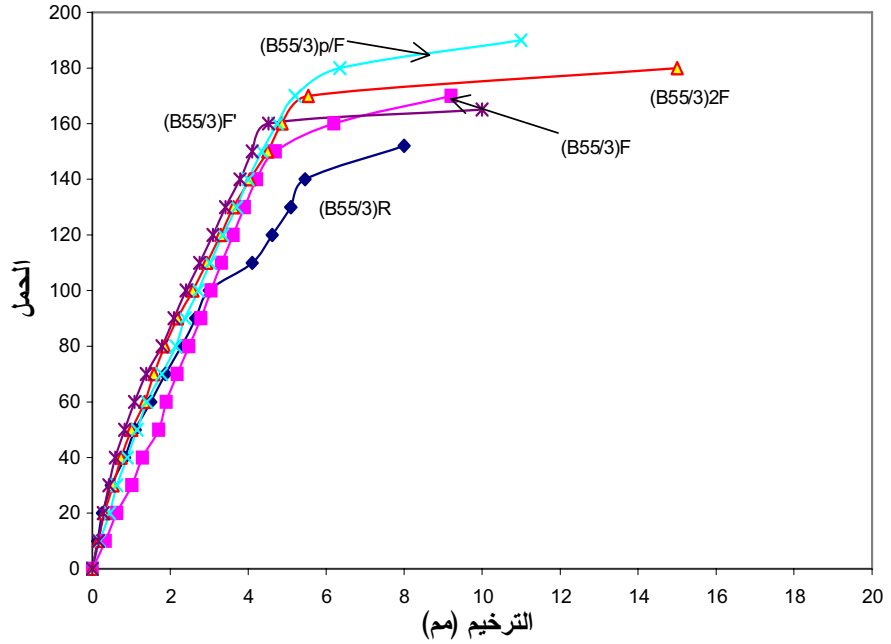
الأشكال (7-10) نماذج من النتائج المتحصل عليها. وتصف العلاقة بين الحمل بالكيلو نيوتن و الترخيم بالملي متر للكمرات الخرسانية المسلحة لنفس نسبة الماء إلى الأسمنت، وتسليح المقطع 3،2،1 على التوالي، حيث أن نسب تسليح المقطع معّرفة بالشكل 3، والشكلين 12 و 11 يوضحان نمط الانهيار للكمرات الخرسانية المسلحة.



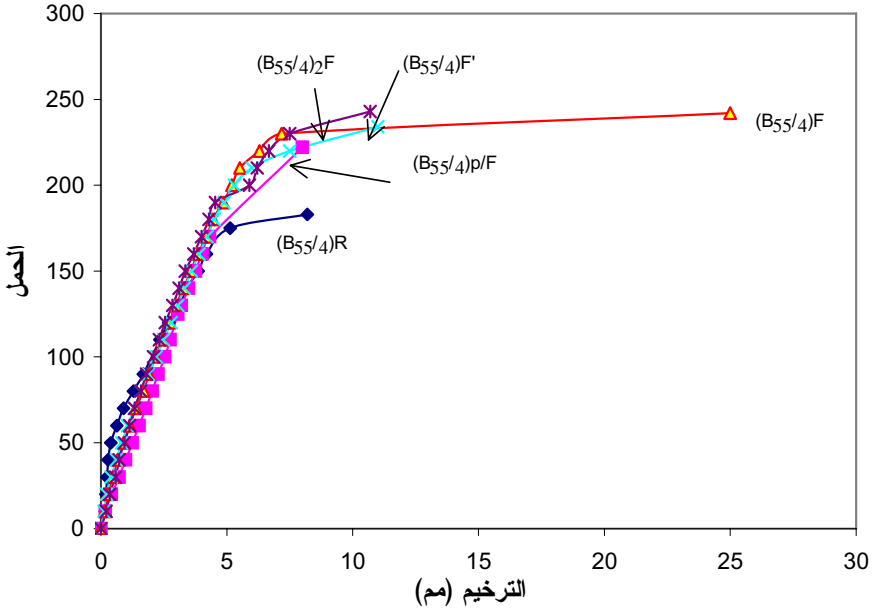
الشكل 7: العلاقة بين الترخيم والحمل (ك.ن) للكمرات المرجعية لنسبة الماء إلى الأسمنت 0.55 ونسب تسليح المقطع المختلفة



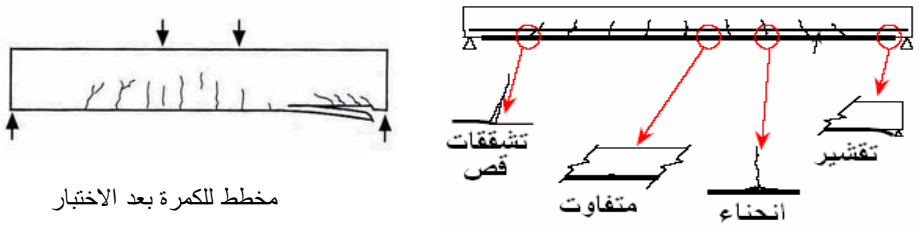
الشكل 8: العلاقة بين الترخيم والحمل (ك.ن) لنسبة الماء إلى الأسمنت 0.55 لتسليح المقطع 1



الشكل 9: العلاقة بين الترخيم والحمل(ك.ن) لنسبة الماء إلى الأسمنت 0.55 لتسليح المقطع 2



لتسليح المقطع 0.553الشكل 10: العلاقة بين الترخيم والحمل (ك.ن) لنسبة الماء إلى الأسمنت



مخطط للكمرة بعد الاختبار

أنماط الانهيار المختلفة لكمرة

الشكل 11: مخطط للعينات بعد الاختبار

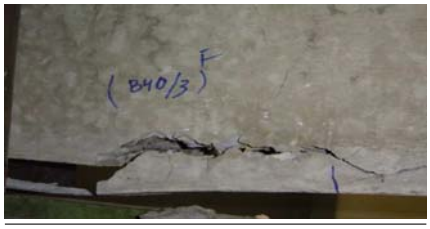
تأثير صفائح الألياف الكربونية على الحمل الأقصى للانهيار

من خلال الاختبار بدأ ظهور التشققات الرأسية الناتجة من تأثير عزوم الانحناء تم تبعتها تشققات مائلة ناتجة من تأثير الانحناء والقص معاً، وبدأت في الزيادة في العدد على طول الكمرة مما تسبب في انهيارها. وتزداد قيمة الحمل الأقصى للانهيار في الكمرات الخرسانية المسلحة بزيادة نسبة التسليح لكل نسبة من نسب الماء إلى الأسمنت المستخدم. وبالمقابل تقل قيمته كلما زادت نسبة الماء إلى الأسمنت، ويمكن تفسير ذلك من خلال تأثره بالعاملين وهما أولا نسبة الماء إلى الأسمنت بزيادتها تزداد الفراغات داخل الخرسانة وهي التي تزيد من سرعة ظهور

التشققات وبالتالي تقل قيمة الحمل الذي يؤدي إلى الانهيار، وثانيا نسبة تسليح المقطع حيث تزداد قيمته بزيادة نسبة التسليح.

(B55/2)p/f

(B55/3)f'



(B40/3)f

الضرر على الألياف

الشكل 12: بعض صور العينات بعد الاختبار

ويمكن القول بأن الكمرات المدعمة بالصفائح ظهر التأثير الإيجابي لها من خلال زيادة مقدار الحمل الأقصى للانهيار، ففي الكمرات المدعمة مسبقا بالصفائح زاد الترخيم بشكل محدود مقارنة بالكمرة المرجعية. وبالتالي فهناك زيادة في جسوءة الكمرة. وتمت مقارنة الأحمال التي حدث عندها الانهيار للكمرات المدعمة مع الكمرة المرجعية، والجدول 4 يبين نسبة التحسين لعينات W/C=0.55 لتسليح المقطع 1.

الجدول 4: الحمل الأقصى للانهيار لعينات W/C=0.55

الوصف	رمز النموذج	نسبة التحسين للنظام % (*)
مرجعية	$(B55/2)^{R}$	–
مصلحة	$(B55/2)^{P/F}$	60
مدعمة بكامل الطول	$(B55/2)^{F}$	47
مدعمة بزيادة مساحة	$(B55/2)^{2F}$	55
مدعمة بطول جزئي	$(B55/2)^{F`}$	57

(*) نسبة التحسين= [(الحمل العملي لانهيار الكمرة المدعمة– الحمل العملي لانهيار الكمرة المرجعية)/ الحمل العملي لانهيار الكمرة المرجعية*100]

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات

بناء على النتائج المتحّصل عليها في هذه الدراسة، تم التوصل إلى:

أ- أظهرت النتائج المعملية تحسناً واضحا في السعة التحميلية للكمرات المصلحة والمدعمة بصفائح البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية مقارنة بالكمرات المرجعية، وهذا ما يتفق مع أغلب الدراسات السابقة.

ب- تراوحت نسبة الزيادة في الحمل الأقصى للانهيار بين (10-60%) بالنسبة للكمرات المصلحة والمدعمة بصفائح البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية مقارنة بالكمرات المرجعية.

ج- ظهرت كفاءة التقوية بصفائح البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية بشكل واضح في الكمرات المصلحة (السابقة التحميل)، وبالتالي فهي تعتبر جيدة في أعمال الصيانة.

د- نمط الانهيار لأغلب العينات كان بانسلاخ صفائح البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية من السطح السفلي للخرسانة وحدوث الشد والقص مع تمزق في غطاء الخرسانة، والذي يمكن تفاديه باستعمال نهايات تثبيت مناسبة، أو استعمال الصفائح المتعامدة على شكل حرف U كما تنص بعض المراجع. وبالتالي فالتأثير ضعيف لزيادة مساحة الصفائح على الحمل الأقصى للانهيار، ويمكن تفسير ذلك بأن الصفائح لا تعتمد على المساحة بقدر ما تعتمد على مكان التطبيق.

هـ- لم تؤثر زيادة نسبة حديد التسليح العادي على كفاءة التقوية بشكل واضح.

و- تقارب سلوك الانفعال لعمق العينة من سلوك الترخيم عند منتصف عمقها.

التوصيات

بناءً على الاستنتاجات المتوصل إليها وللحاجة إلى الوصول للمواضيع التي لازالت غير واضحة وتحتاج إلى دلائل إضافية لإثبات صحة أدائها، يمكن التوصية بما يلي:

أ. إجراء دراسات عملية على مقاسات أكبر (كمرات مستمرة أم مدعمة)، ولعناصر خرسانية أخرى.

ب. دراسة تأثير السلوك الديناميكي لتطبيق الألياف. ودراسة ترخيم الكمرات المقواة مع الزمن، وكذلك عمل اختبارات الكلال (Fatigue).

ج. دراسة خصائص مواد الربط لاختيار أفضل مادة وبتطبيق مناسب.

د. دراسة تأثير العوامل البيئية المختلفة من حرارة ورطوبة على تصرف العناصر المقواة (Durability)، مع دراسة طرق الحماية المختلفة.

هـ. نظراً لأهمية الموضوع في حل مشاكل إنشائية للعديد من المنشآت القائمة فينصح بعمل اختبارات على صفائح وشرائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية، ومحاولة العمل على تصنيعها محلياً.

شكر وتقدير

نتقدم بالشكر والتقدير للعاملين بمعمل مواد البناء والخرسانة، ومعمل خواص المواد بقسم الهندسة المدنية جامعة الفاتح، على تعاونهم ومساعدتهم في إتمام متطلبات البرنامج المعملي لهذه الدراسة.

المراجع

1- American Concrete Institute, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, Reported by ACI Committee 440, 2002.

2- American Concrete Institute, "State of the art report on Fiber Reinforced Concrete", ACI 544-892

3-American Concrete Institute, "Measurement of Properties Fiber Reinforced Concrete ", ACI 544-93.

4-The Sika Carbodur System, ’’Strengthening of Structures with CFRP Laminates’’, Technical Report, 1998.

5-Tang, Benjamin. “The History of FRP Composites,” Presentation, Federal Highway Administration,1997.

6- Meier U., Carbon Fiber - Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering, Structural Engineering International, No. 1, 1992.

7-The Concrete Society, "Design guidance for Strengthening Concrete Structures using fiber composite materials", Technical Report no. 55-2003.

8-The Second International Workshop Structural Composites for Infrastructure Applications, Cairo, Egypt 2003.

9- م.مباركة محمود الورفلي. " تقوية الكمرات الخرسانية باستخدام صفائح البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية" مشروع للحصول على درجة الإجازة العالية الماجستير، جامعة الفاتح، كلية الهندسة 2004- 2005 ف.