دراسة تجريبية لسلوكية عينات الألمنيوم المقواة خارجياً باستخدام ألياف الكربون تحت تأثير عزوم أللي

م. د ميسر محمد جمعة
قسم الهندسة المدنية
كلية الهندسة/جامعة تكريت

م.م سليمان عناد مناور
قسم الهندسة الميكانيكية
كلية الهندسة/جامعة تكريت

م.م صباح مهدي صالح
قسم الهندسة الميكانيكية
كلية الهندسة/جامعة تكريت

المـــوجز

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة تأثير تقوية عينات الألمنيوم خارجياً على الخواص الميكانيكية ، باستخدام ألياف الكربون النظامية (٠-٩٠) وبنسبة كسر حجمي (0.8%) ثابتة لجميع أنواع التقوية مع راتنج الايبوكسي نوع Sikadur-300 كمادة رابطة ، ودراسة التغيرات الحاصلة على مقاومة عزم اللي وإجهاد القص للألمنيوم النقي، ،حيث تضمنت الدراسة عينات من الألمنيوم ذات المقطع العرضي الدائري و تم استخدام ثلاثة أنواع من التقوية وهي التقوية الدائرية، والتقوية الحلزونية والتقوية الطولية ومن ثم فحص النماذج المصنعة مختبرياً على جهاز فحص الالتواء نوع(SMI MKII TORSION TESTING MACHINE) .حيث أظهرت النتائج تحسن واضح في مقاومة عزم اللي بالنسبة للعينات المقواة دائرياً وبنسبة اقل من تلك العينات المقواة حلزونياً أما بالنسبة للعينات المقواة طوليا" فلم تظهر النتائج أي زيادة في مقاومة الالتواء أو زاويته.

الكلمات الدالة: ألياف الكربون المسلحة بالبوليمرات، قابلية تحمل عزم أللي، زاوية الدوران، خصائص الألمنيوم، خصائص ألمواد ألمعدنية، ميكانيكية المواد الصلبة، نسبة الكسر ألحجمي.

EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF ALUMINUN SPECIMENS (UNDER TORSION) STRENGTHENED EXTERNALLY BY CFRP MATERIALS

ABSTRACT

The aim of this research is studying the effect of the fibers orientation on the reinforced aluminum specimens. The fibers are made of uniform carboin (0-90) of a volumetric fraction equal to 0.8%. This is for all the reinforcement fiber orientations, using Sikadur -300 resin as connection stuff. Three fiber orientations reinforcements have been used. These orientations are: circular, longitudinal and helical. Then twisting test has been carried out for all the specimens. The test proved that the circular reinforcement improves twisting property, and the helical orientation gives less improvement, while the longitudinal one gives no improvement in the twisting property.

KEYWORDS: CFRP, Aluminum Properties, Torque-Carrying Capacity, Minerals Properties, Mechanics of solids, angle of twist, volume fraction.

المقدمة

إن تقوية الألمنيوم وسبائكه قد وصلت مراحل متقدمة وذلك للاستخدامات الواسعة لمعدن الألمنيوم في التطبيقات الحديثة كونه من المعادن ذات المواصفات الخاصة(من حيث طريقة الاستخلاص وقابلية التحمل للظروف البيئية والمرونة العالية في الاستخدام وغيرها) ، وان أكثر البحوث والدراسات التي تهتم بالتحري عن الخواص الميكانيكية لهذا المعدن، في هذا المجال تتحدث عن تقوية الألمنيوم داخلياً وذلك بإضافة أنواع خاصة من الألياف أو بإضافة مساحيق وحبيبات لمعادن أخرى مع الألمنيوم مثل كاربيد السيلكون نوع (الفا−Sic)[1] أو حبيبات الزجاج[2] والتي من شانها تحسين بعض الخواص الميكانيكية، كما إن هذا النوع من التقوية يحتاج إلى تقنيات حديثة وباهظة الثمن بسبب الظروف الصعبة التي ترافق عمليات الصب والسباكة وما يرافقها من مشاكل ومعوقات مثل تشكل الفجوات داخل هياكل المصبوبات.أما الدراسات والبحوث التي تطرقت إلى التقوية الخارجية للألمنيوم أو الهياكل الخارجية فهي قليلة نسبيا إذا ما قورنت بالدراسات التطبيقية في تخصصات الهندسة الإنشائية والتي تناولت تقوية العناصر الإنشائية المختلفة خارجيا" مثل الدعامات الكونكريتية والأعمدة باستخدام ألياف الكربون أو ألياف الزجاج المسلحة بالبوليمرات مع راتنج الايبوكسي كمادة رابطة.

ومن أهم الدراسات وأحدثها في مجال تقوية الحديد خارجياً مع ألياف الكربون هو ما قام به الباحثان **(I.Taerwe and I.Vasseur)** عام ٢٠٠٩ [3] حيث استخدما عمود من الفولاذ وتقويته بألياف الكربون طولياً حيث اثبتا تحسناً كبيراً في الخواص الميكانيكية والإنشائية للعمود من ناحية تحمل عزم الانحناء والاجهادات المتولدة عن الانحناء، ذلك لأن الاتجاه الطولي لشرائح ألياف الكربون تمثل الاتجاه الرئيسي لتأثير تسليح العمود لمقاومة عزوم الانثناء الناتجة من الأحمال وبالتالي مقاومة الانبعاج (Buckling) الذي قد يحصل بسبب القوى المحورية المتولدة من الأحمال المركزية حسب نظرية أويلر (Euler Theory).

وكذلك قام الباحثان **(M. Kaminski and T. Trapko)** عام 2006 [4] بدراسة سلوكية الأعمدة الخرسانية المسلحة ولنماذج متعددة بعد تقويتها بعدة حالات باستخدام ألياف الكربون المسلحة بالبوليمرات ، وأعطت النتائج تحسن واضح في مقاومة الانثناء،ودراسة العلاقة بين نسبة التسليح الخارجي وقابلية تحمل العنصر للأحمال والانفعال الحادث وعلاقته بنوع التسليح.

الفوائد الأساسية من استخدام ألياف الكربون Advantages of CFRP

يمكن تلخيص أهم فوائد استخدام هذه المادة شائعة الاستخدام في معظم التطبيقات الهندسية وخاصة في مجال التقويات الإنشائية لروافد الجسور والعناصر الإنشائية المختلفة وغيرها إضافة لاتساع تطبيقاتها في مجالات هندسة الميكانيك والمعادن بالنقاط التالية[7]:

١. الديمومة في أنظمة التقوية من خلال مقاومة التآكل والتأثيرات القاعدية.

٢. توفرها بكافة الأطوال وإمكانية نقلها بصورة رولات حسب أسلوب الإنتاج.

٣. مقاومتها العالية لاجهادات الشد لتصل لأكثر من 2400 MPa وامتلاكها لمعامل مرونة عالي يصل لأكثر من 165000 MPa.

٤. مادة خفيفة الوزن (Light weight material) .

٥.لاتحتاج لأسلوب معقد في التثبيت وتعمل على تحسين خصائص مقاومة المنشآت للحرائق.

٦.لاتحتاج لكلف صيانة عالية.

أن لأستخدام ألياف الكربون في المنشآت الخرسانية تأثير كبير جدا" على مقاومة الانثناء والقص من خلال زيادة خصائص الخرسانة المطيلية ductility enhancement of concrete structures .حيث تستخدم في تقويات العتبات والجسور والسقوف والأعمدة وإعادة تأهيل المنشآت، اختيرت هذه المادة في التقنية الجديدة للتقوية بسبب مقاومة شدها الخارجية العالية وصلادتها مقارنة مع مثيلاتها من المواد المركبة المستخدمة لهذا الغرض ، و**الشكل رقم ٦** يبين المقارنة بين خصائص الانفعال والإجهاد لألياف الكربون وحديد التسليح الاعتيادي[8].

ألجانب ألعملي

ألجهاز ألمستخدم

تم استخدام جهاز فحص الالتواء ذو الرمز **(** SMI MKII TORSION TESTING MACHINE) لفحص واختبار العينات المصنعة مختبرياً،حيث ان هذا الجهاز يستخدم لقياس عزم الالتواء لقيم تصل الى ٤٠N.m ولأقطار عينات تتراوح بين 6 mm الى 22mm وبطول عينة كحد اقصى هو 700 mm وكما وضح في **الشكل رقم ١** .

ألمواد ألمستخدمة

أ- تم استخدام قضيب صلد من الألمنيوم النقي دائري المقطع بقطر ٢٢ ملم وبطول ٢١٠ ملم وبتحليل كيمياوي كما مبين في **الجدول رقم ١** وأجريت عليه عمليات التشغيل الميكانيكي لتحضير عينات بأبعاد قياسية وحسب مواصفات الجهاز المستخدم في عملية الفحص، كما مبين في **الشكل رقم ١** والذي يحدد طول العينة المطلوب فحصها وأسلوب تركيبها في الجهاز، كما في **الشكل رقم ٢**.

ب- تم استخدام مادة الايبوكسي نوع Sikadur300 كمادة رابطة بين ألياف الكربون والعينات المصنعة من الألمنيوم[5]، ويبين **الجدول رقم ٢**، الخواص العامة لمادة الايبوكسي المستخدمة كمادة رابطة بين ألياف الكربون والمعدن المستخدم (الألمنيوم).

ج- أستخدام ألياف الكـــربون النظامية (٩٠-٠) نوع Sika-wrap-300c والمبينة مواصفاتها في **الجدول رقم ٣**[6] والمنتجة من قبل شركة سيكا التركية حيث تم الحصول على مواصفات المادة من مرجع المواصفات الخاص لهذه الشركة.

تحضير ألعينات

بعد إجراء عملية التشغيل الميكانيكي على عينات معدن الألمنيوم المستخدم لتحضير عينات بالمواصفات وألابعاد المشار اليها وبدرجة خشونة N8 وكما موضح في الأشكال المذكورة لاحقا"، فقد تم مزج مادة الايبوكسي مع المصلد الخاص بها وتقطيع ألياف الكربون حسب نوع التقوية بطول (٩٠mm) ملم وعرض (4mm) ملم حيث تمت تقوية العينات بثلاث طرق مختلفة لدراسة التحليل الامثل في الاستخدام وتقليل زاوية الالتواء الى اقل حد ممكن وزيادة قابلية التحمل وصولا" الى حد الفشل، ومن خلال تطبيق المعادلة التالية لصيغة عزم الدوران بالامكان احتساب المعاملات المؤثرة وأهمها زاوية دوران العينة تحت تاثير عزم الالتواء وكما يلي :

$$\theta = TL / GJ$$

حيث أن:

θ – زاوية الدوران(زاوية نصف قطرية) –(rad) Angle of twist .

T – عزم الالتواء (نت. م) ,(N.m) -Torque.

L – طول العينة (ملم) .(mm) – Specimen length

G– معامل صلادة المقطع (الجساءة)، نت/ ملم^{٢}) ,(MPa) - Modulus of rigidity.

J – عزم القصور الذاتي القطري (للمقطع الدائري)، ملم^{٤} (mm4) – Torsional constan t.

تضمنت الدراسة المقترحات ألثلاثة التالية لأنواع التقوية اعتمادا" على السلوكية النظرية لعزوم أللي أو الدوران وعلاقتها باجهادات القص وكما يلي:

أ– التقوية الدائرية (Circular (or ties) CFRP Strengthened Model): تم تقطيع ألياف الكربون على شكل حلقات دائرية ولصقها على العينات باتجاه عقارب الساعة (باتجاه عزم اللي) وبسمك (٠.١٦٦) ملم وعرض (٤) ملم لكل حلقة وبواقع أربع حلقات، لتكون المسافة بين كل حلقة والتي تليها (٢١) ملم وكما مبين في **الشكل رقم ٣**.

ب– التقوية الحلزونية (Spiral (or Helical) CFRP strengthened Model): تم قطع شريحة من ألياف الكربون بنفس السمك و العرض المستخدم في النمط الأول للتقوية، ولصقها على العينة بنفس اتجاه عزم اللي وبزاوية ٤٥ درجة وكما هو مبين في **الشكل رقم 4**، لتكوين النوع الثاني من أنماط التقوية المقترحة Spiral Strengthened by CFRP.

ج– التقوية الطولية (Longitudinal Strengthened Model By CFRP strips):حيث تم تقطيع ثلاث شرائح من ألياف الكربون بسمك (0.166) ملم أيضا وبعرض اقل (٣ ملم) للحفاظ على ثبات نسبة الكسر ألحجمي (V_f , Volume Fraction) للكربون فايبر ولكافة أنواع التقوية، وتم لصقها بالمادة الرابطة على العينات باتجاه المحور الطولي للعينة وكما هو مبين في **الشكل ٥**.

النتائج والمناقشة

ولغرض الحصول على نتائج قابلة للدراسة والتحليل والمقارنة فقد تم تحضير ثلاث عينات من كل نوع من أنواع التقوية المقترحة لعينات الألمنيوم، وتركت تلك العينات لمدة ٢٤ ساعة لضمان اكتساب المادة أللاصقة الحد الأقصى من قوة الالتصاق قبل ألفحص.

بعد فحص العينات على جهاز فحص الالتواء تبين مايلي:

١- أظهرت النتائج إن العينات ذات التقوية الدائرية تمتلك مقاومة لي عالية (حيث تظهر قيم عزوم اللي لكل فحص على الشاشة الرقمية لجهاز الفحص والموضحة في **الشكل رقم ١**) عند مقارنتها مع العينات الأخرى (ذات التقوية الحلزونية والتقوية الطولية) وجد أن هذه العينات وصلت حد الفشل بعدد دورات (٢٠٠) دورة (وحيث أن الدورة الواحدة في جهاز الفحص المستخدم تعادل ٦ درجات) مع عزم التواء أقصى بقيمة (٣٣.٨ نيوتن.متر) وتم اجراء هذه الحسابات باستخدام معادلة عزم أللي:

$$T = \frac{GJ}{L} \times \theta$$

في حين أن العينات المقواة بألياف الكربون الحلزونية وصلت حد الفشل بعدد دورات يصل إلى (٩٠) دورة وبعزم التواء أقصى (٣٣.٢ نيوتن.متر) ، وأظهرت العينات ذات التقوية الطولية تقارب النتائج مع عينات الألمنيوم الخالية من التقوية حيث وصلت حد الفشل (ذات التقوية الطولية) بعدد دورات (٦٥) دورة وبعزم أقصى قيمته (٣٠.٤ نيوتن.متر) ، بينما كانت نتائج العينات التي بدون تقوية هي ، بعدد دورات قدره (٨٠) دورة لحد الفشل ، وبعزم لي يصل لقيمة عظمى مقدارها (٣١.٦ نيوتن . متر) ، وكما مبين في **الشكل رقم 8 والشكل رقم ٩.**

أن الفرق الواضح الذي يظهر في مقاومة عزم الدوران لعينات ألالمنيوم المفحوصة يشير بدقة إلى تأثير التقوية المستخدمة ونمط تركيب شرائح ألألياف ومدى استجابة العينة لتأثيرات اجهادات القص وأحمال ألالتواء المسلطة وبالتالي زيادة قابلية تحمل العينة من خلال زيادة عدد الدورات حسب قراءة الجهاز أو زيادة مايعرف بزاوية الدوران(Angle of Twist).

٢- أن لنوع الفشل الحاصل على مستوى العينة الواحدة في كل مجموعة من مجاميع العينات الثلاث ، شكل محدد يعتمد على قابلية تحمل العينة وتأثير وجود التقوية الخارجية بالألياف بأنواعها الثلاث وعلاقتها مع عينة المقارنة (غير المقواة) ، وهو مايدعى بالفشل ألدوراني اللدنPlastic Torsional Failure حيث يحصل بشكل تدريجي يعتمد على مواصفات المادة وتركيبها الفيزيائي والهندسي وخصائصها الميكانيكية ، وكما مبين في **الشكل رقم 7.**

٣- بعد مقارنة النتائج أعلاه تبين بان التقوية الدائرية Circular Strengthened هي أفضل أنواع التقوية من ناحية تحمل عدد دورات اكبر(٢٠٠ دورة) مع عزوم لي أقوى نسبياً (٣٣.٨ نيوتن.متر) بالمقارنة مع بقية أنواع التقوية، حيث نلاحظ إن الفرق في عدد الدورات يصل إلى (١١٠ دورة) وبحدود (٠.٦ نيوتن.متر) في عزم أللي عن نماذج العينات المقواة حلزونيا" ، وبحدود(١٣٥ دورة) و(٣.٤ نيوتن.متر) عن نماذج التقوية

الطولية. أن السبب في ذلك يعود الى ان العينات المقواة دائريا بالياف الكربون كانت لها سلوكية لمقاومة اجهادات القص فقط ، بينما كانت سلوكية العينات المقواة حلزونيا هي اقل والسبب في ذلك هو وجود مركبات إجهاد أخرى (انحناء ولي) مع إجهاد القص.

٤- إن التقوية الطولية لم تساعد على زيادة مقاومة اللي في العينات المصنعة بل على العكس ساهمت في تقليل معامل الصلادة (الجساءة G) العينات مقارنة مع عينات المقارنة المفحوصة ، الأمر الذي انعكس على عدد الدورات التي من ألممكن تحملها لحين الوصول لحد الفشل وكذلك علـــى عزم أللي الناتج . وكما مبين في **الشكل رقم 10**.

٥- من خلال ملاحظة المنحنيات في الأشكال المرفقة، تشير بوضوح الى تفاصيل الحمل المسلط وتغاير عدد الدورات بشكل تدريجي وحدود الفشل الناتج.

ألمـــصادر

[1]Mohammed S. waheed and Sadeer M. majeed , " The mechanical properties of Al matrix composites ", journals of engineer and technology , vol.15, No.27,2009.

[2]Thikraa M. Ali , " Study the mechanical properties of Al-glass composite " , journals of engineer and technology, vol.14, No.27 , 2009.

[3]L. Taerwe , L. Vasseur and S. Matthys ," External strengthening of continuous beams with SFRP" , 2009.

[4]M. Kaminski and T. Trapko , " Experimental Behavior of Reinforced Concrete Column Models Strengthened by CFRP Materials" , Journal of Civil Engineering and Management", Vol. XII , No. 2 ,2006, p.109-115.

[5]Sikadur-330, " 2-part epoxy impregnation resin" , Edition 2006.

[6]Sika-Wrap-300C , " Woven carbon fiber fabric for structural strengthening" , Edition 2006.

[7]William D. and Callister Jr." Materials Science and Engineering An introduction" , John wiley & Sons Inc., 2007.

[8]Schanerch D., Standford, K. and Lanier, B., "Use of High Modulus Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) for Strengthening Steel Structures", Department of Civil Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University, U.S.A., 2001.

جدول رقم (١) يبين التحليل الكيمياوي لعينات الألمنيوم المستخدمة في البحث

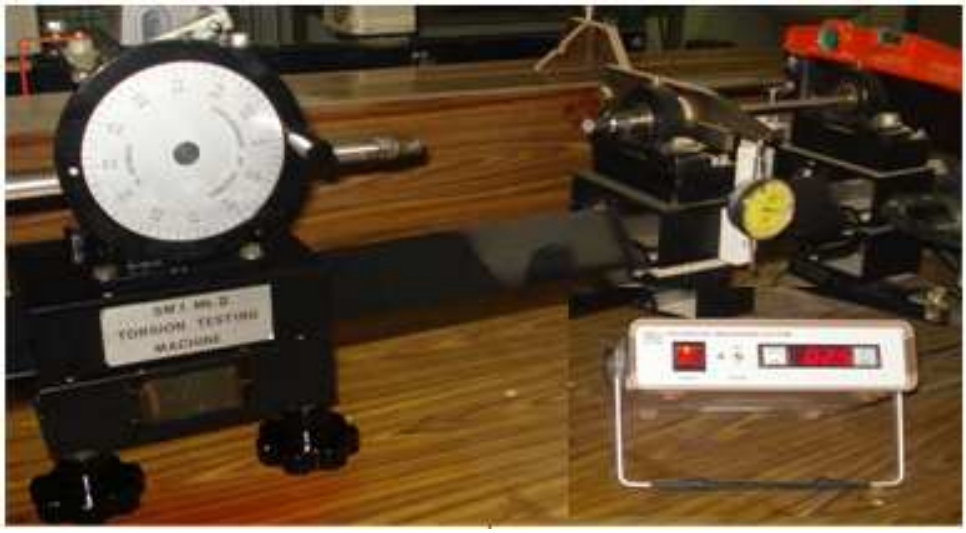
Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0.09	0.193	0.007	0.006	0.009	0.004	0.002	0.006	0.004	99.66

جدول رقم ٢ يبين المواصفات الميكانيكية للايبوكسي نوع Sikadur-300 [5]

Property	Units	Q
Density	kg/l^3	١.٣
Tensile strength	Mpa	٣٠
E-modulus	Gpa	٣٨٠٠

جدول ٣ يبين المواصفات الميكانيكية لالياف الكربون نوع Sika warp-300C [6]

Property	Units	Q
Fiber Density	g/cm^3	١.٣
Tensile strength	Mpa	٣٩٠٠



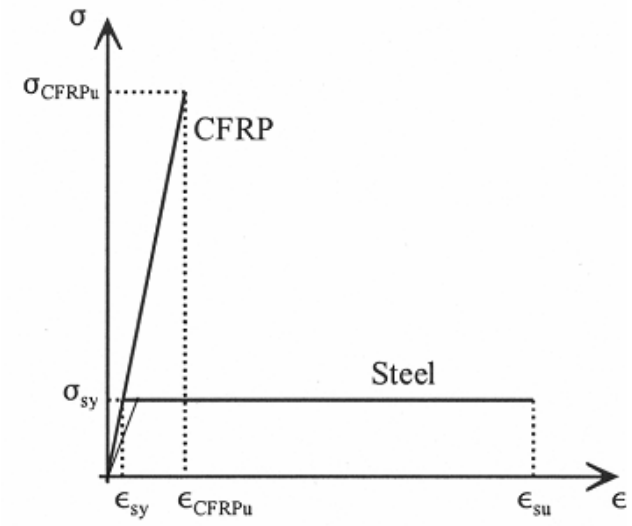
شكل رقم ١ يبين جهاز تسليط عزم ألالتواء وقياس زاوية الدوران

شكل رقم ٢ يبين أحد طرفي تثبيت العينة في جهاز تسليط عزم ألالتواء

شكل رقم ٣ عينة ألألمنيوم المقواة بشريحة ألياف الكربون حلقيا"

شكل رقم ٤ عينة ألألمنيوم المقواة بشريحة ألياف الكربون حلزونيا"

شكل رقم ٥ عينة ألألمنيوم المقواة بشرائح ألياف الكربون طوليا"



شكل رقم 6 يمثل المقارنة في علاقة (ألإجهاد–ألانفعال) لألياف الكربون وحديد التسليح الاعتيادي [8]

شكل رقم ٧ يوضح الفشل لعينات ألألمنيوم المقواة بشرائح ألياف الكربون مع عينة المقارنة

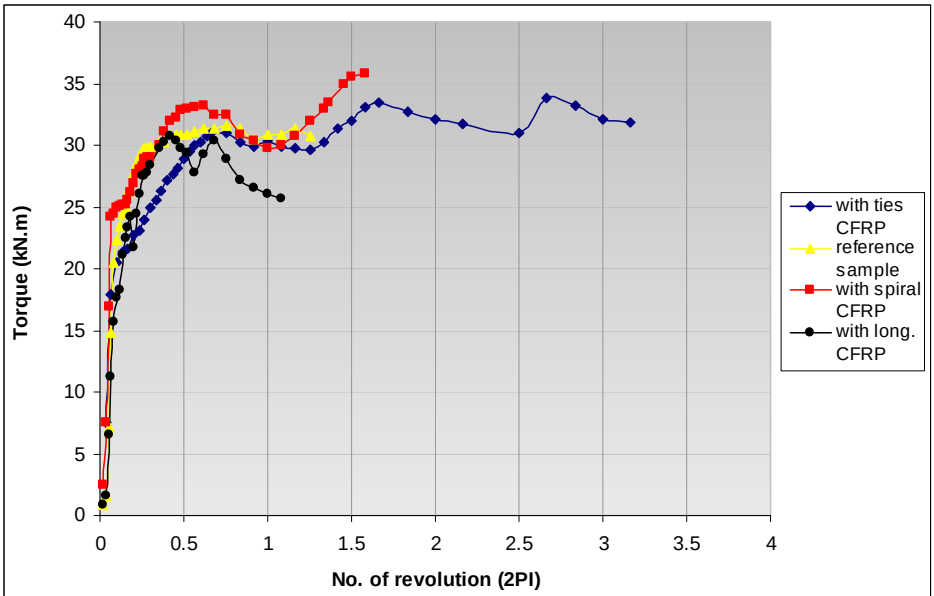


Fig.(8):Torque-No.of revolution relation for regular sample with compare between reference and spiral and ties CFRP

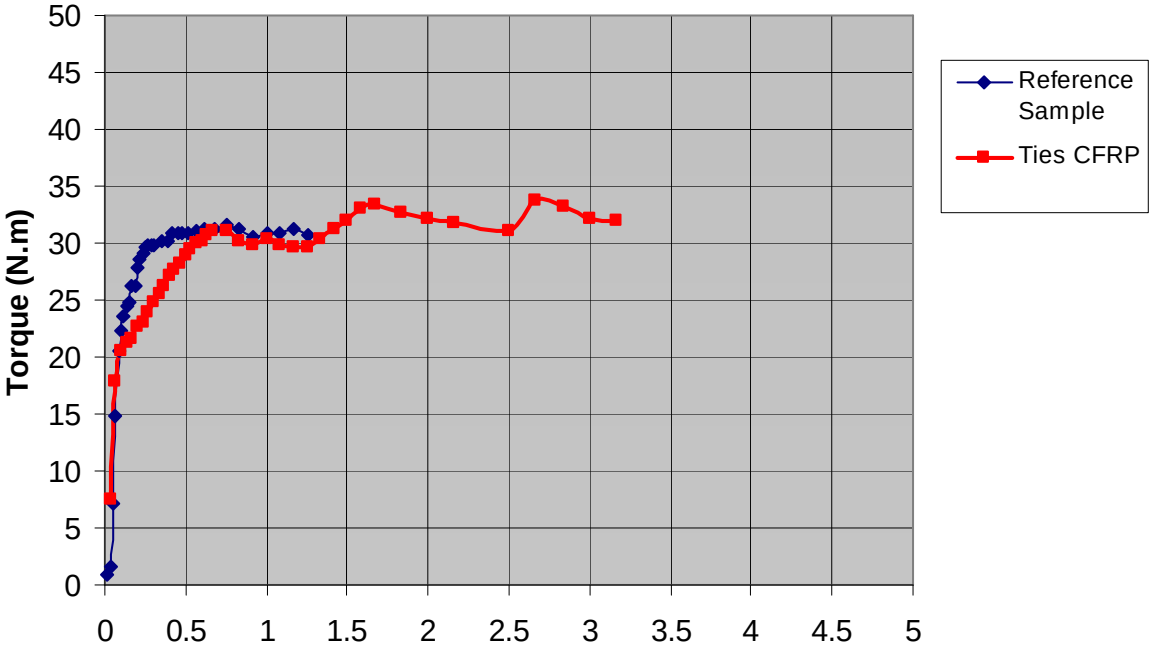


Fig.(9):Torque-No. of revolution relation between reference and ties CFRP

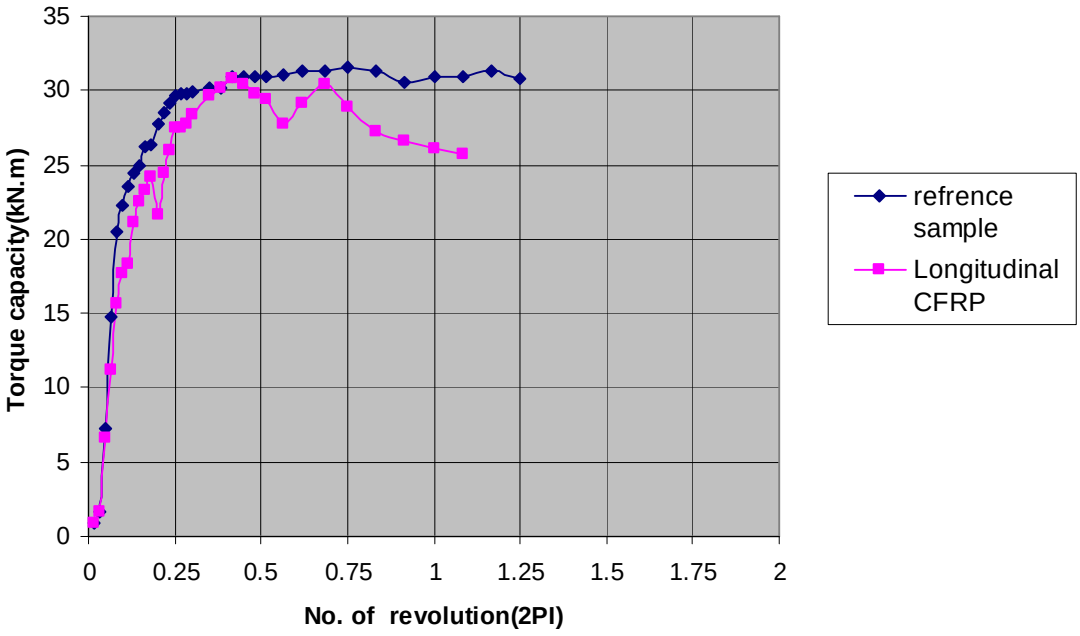


Fig.(10): Torque-angle of twist relation for longitudinal strips