الاستجابة اللامرنة للهياكل الخرسانية المسلحة جزئياً بقضبان ألياف البوليمر الكاربونية المعرضة إلى حمل الانفجار

د. سفيان يونس كشمولة
مدرس / قسم الهندسة المدنية / جامعة الموصل

غفران عبد المجيد غربي المشهداني
قسم الهندسة المدنية/ جامعة الموصل

الخلاصة

لقد أصبح استخدام قضبان ألياف البوليمر(FRP rebars) في العقود الأخيرة في مقدمة تقنيات التسليح الداخلي للمقاطع الإنشائية الخرسانية، بدلاً عن قضبان الحديد الاعتيادية، وذلك لما تمتاز به هذه الألياف من خفة وزن، وسهولة حمل وقوة شد عالية، فضلاً عن امتلاكها مقاومة عالية ضد التآكل والصَّدأ. يستعرض هذا البحث الاستجابة غير المرنة لهيكلاً خرسانياً مسلحاً جزئياً بقضبان ألياف البوليمر الكاربونية CFRP مكون من أربعة طوابق، تم تحليل هذا الهيكل تحت التأثير الحقيقي لحمل الانفجاريات وباستخدام الخرسانة ذات المقاومة العالية. تم استخدام عنصر العتبة – العمود ذي البعدين في تمثيل عناصر الهيكل الخرساني المسلح. وتم تطوير برنامج بلغة فورتران-77 لغرض التحليل. كما تم استخدام أنموذج اللدونة المتجمعة المعتمد على فكرة المفاصل اللدنة التي تعكس السلوك غيرالمرن للعنصر، حيث أن كل عنصر عتبة – عمود ذو البعدين يتمثل بالعنصر المرن مع الافتراض أنَّ الفعل غيرالمرن متجمع في نهايتي العنصر على شكل مفصل لدن. تم تحديد مخطط تداخل القوى المحورية مع العزوم، وعُدّ هذا المخطط سطحاً للخضوع، الذي يمثل حدود القوى القصوى للعنصر الهيكلي. فقد تم استخدام أسلوب التكامل المباشر(خطوة-بخطوة) للتحليل الديناميكي، معتمداً على طريقة نيومارك المتنبئة-المصححة لحل معادلات الحركة. واستناداً على النتائج التي تم الحصول عليها، يمكن ملاحظة أنَّ لقضبان CFRP قابلية جيدة على زيادة مقاومة الانثناء للمقاطع الخرسانية المسلحة بها، والتي أسهمت في زيادة مقاومتها، متانتها ومطيليتها وبالتالي نقصان في عدد المفاصل اللدنة المتكوّنة في الأعضاء الإنشائية للهيكل الخرساني، وكذلك التأخير في زمن تكوّنها.

Inelastic Response of Reinforced Concrete Frames Partially Reinforced with (CFRP) Rebar Subjected to Blast load

Dr. Sofyan Younis Kashmola **Ghofran Abd-Almageed Gharbi**
Civil Engineering Department
Mosul University

Abstract

The use of FRP rebars has become in the last decades at the head technologies of internal reinforcement of concrete sections instead of normal steel bars for their lightweight, portability and have a high tensile strength in addition to their resistance to rust and corrosion. This paper presents the inelastic response of 4-story reinforced concrete frame partially reinforced with Carbon FRP rebars. This frame was analyzed under actual blast load using high strength concrete. Two-dimensional Beam-Column Element has been used in representing the frame members. A computer program has been developed (in Fortran-77) for analysis purposes. Lump plasticity model has also been used, which depends on the concept of plastic hinges that reflect the inelastic behavior of the element, assuming that inelastic action is lumped at both ends of the element as plastic hinges. An interaction diagram between axial forces and moments is determined; this diagram is considered as a Yield Surface which represents the limits of the ultimate strength of the element. A direct Systematic integration technique has been used depending on Newmark's Predictor-Corrector method to solve the equation of motion. Based on the results obtained, it can be seen that CFRP rebars have the ability to increase the flexural resistance of reinforced concrete sections, which contributed to the increase in their strengths and their ductility; consequently, they reduce the number of plastic hinges formed in the frame, as well as delay in the time of their formation.

Keywords: inelastic response, concrete frames, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rebar, high strength concrete

أستلم: 7 - 4 – 2011 **قبل: 13 – 11- 2011**

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

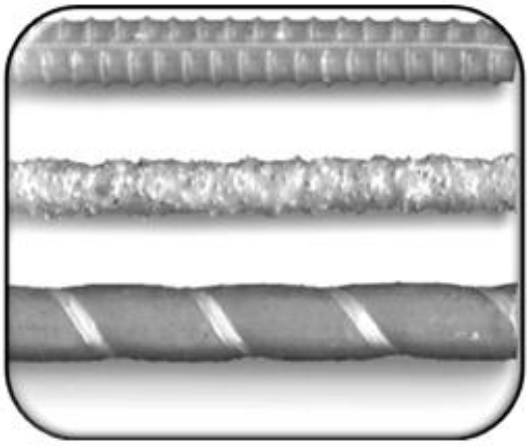
ثبت الرموز

الرمز	التعريف
A_f	مساحة قضبان ألياف البوليمر الكلية
A_{fj}	مساحة قضبان ألياف البوليمر للطبقة j
A_s	مساحة قضبان حديد التسليح الكلية
A_{si}	مساحة قضبان حديد التسليح للطبقة i
a_i	الثوابت الحدودية التي تعرف معادلة منحني التداخل بين القوى المحورية والعزم
b	عرض المقطع الخرساني المسلح لعنصر الهيكل
d	عمق المقطع الخرساني المسلح لعنصر الهيكل
f	دالة الخضوع
F	متجه القوة الخارجية المسلطة
f'_c	مقاومة الانضغاط القصوى المحورية للخرسانة
f_f	إجهاد الشد لقضبان ألياف البوليمر
f_{fu}	إجهاد الشد الأقصى لقضبان ألياف البوليمر
f_y	إجهاد الخضوع لحديد التسليح
kd	عمق محور التعادل للمقطع الخرساني المسلح
K_e	مصفوفة الصلابة المرنة للعنصر الهيكلي حسب المحاور المحلية
K_{ep}	مصفوفة الصلابة المرنة-اللدنة لعنصر الهيكل
K_p	مصفوفة الصلابة اللدنة المحلية لعنصر الهيكل
M	مصفوفة الكتلة للمنشأ
n	عدد طبقات قضبان التسليح في المقطع العرضي المسلح
p_u	القوة المحورية غيرالبعدية القصوى المسلطة التي يتحملها المقطع الخرساني المسلح مع وجود العزم
p_o	قوة الانضغاط المحورية غيرالبعدية التي يتحملها المقطع الخرساني المسلح في غياب العزم
p_t	قوة الشد المحورية غيرالبعدية التي يتحملها المقطع الخرساني المسلح في غياب العزم
p_{ub}	القوة المحورية غيرالبعدية المتوازنة
P_x, P_y, M_Z	القوى العقدية في العنصر الهيكلي بالاتجاهات (z,y,x)
u, v, θ	درجة الحرية بالاتجاهات الأفقية والعمودية ودوران اللي على التوالي
$u, \dot{u}, \ddot{u}$	متجه الإزاحة و السرعة و التعجيل على التوالي
ε_t	انفعال الليف عند الحافة العليا
ε_b	انفعال الليف عند الحافة السفلية
ε_c	انفعال الخرسانة
ε_0	الانفعال المقابل لمقاومة الانضغاط القصوى للخرسانة
ε_y	انفعال الخضوع لحديد التسليح
σ_c, σ_s	الإجهاد في الخرسانة وطبقة قضبان حديد التسليح في المقطع الخرساني المسلح
ϕ	التقوس غيرالبعدي للمقطع الخرساني المسلح
χ	تقوس المقطع الخرساني المسلح
ρ_t	نسبة مساحة قضبان حديد التسليح للطبقة العليا
ρ_b	نسبة مساحة قضبان حديد التسليح للطبقة السفلية
ρ_f	نسبة مساحة قضبان ألياف البوليمر الكلية
ρ_{fj}	نسبة مساحة قضبان ألياف البوليمر للطبقة j في المقطع الخرساني المسلح
ρ_{si}	نسبة مساحة قضبان حديد التسليح للطبقة i في المقطع الخرساني المسلح
$\rho_{r.c}$	كثافة الخرسانة المسلحة

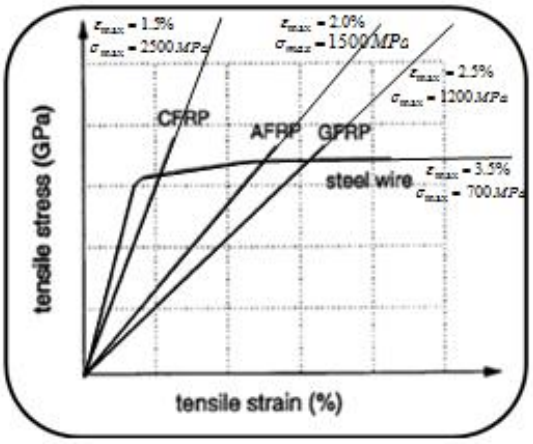
المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

المقدمة:

تعاني قضبان حديد التسليح في المقاطع الخرسانية بمرور الزمن من مشكلة التآكل والصدأ، مما يعجل في تدهور المنشأ وفقدان حقه في الأداء والخدمة، وبالتالي يؤدي إلى تكاليف صيانة هائلة، لذلك وضعت عدة طرائق لمعالجة هذه المشكلة، منها استعمال حديد تسليح مضاد للصَّدأ، أو طلاءه بمادة الايبوكسي قبل الاستعمال، أو منع تآكل الحديد باستعمال مواد مضافة في الخرسانة، ولكن هذه الأساليب المعروضة محدودة النجاح، فقد تم التوجه إلى استخدام المواد المركبة، والمعروفة باسم ألياف البوليمرFRP [1]، إنّ أكثر أنواع ألياف البوليمر شيوعاً من ناحية الاستخدام هي الألياف الزجاجية (GFRP)، وألياف الارميد (AFRP)، وألياف الكاربون (CFRP) والشكل (1) يوضح بعض الأنواع المستخدمة من قضبان ألياف البوليمر. يمكن ملاحظة المقارنة بين الأنواع الثلاثة مع سلك حديدي في الشكل (2) [2]. في عام (2005) أجرى الباحث (Choo) [3] دراسة نظرية للمقارنة بين تصرف الأعمدة الخرسانية القصيرة المستطيلة الشكل والمسلحة بقضبانFRP مع تلك المسلحة بحديد التسليح، وبنسب تسليح مختلفة لهذه القضبان فقد تم رسم مخطط التداخل بين القوة المحورية والعزم وأظهرت النتائج التحليلية أنَّ سلوك قضبانFRP يبقى خطياً مرناً، وأنَّ استخدام قضبانFRP أدى إلى زيادة مقاومة الانحناء مقارنةً مع استخدام حديد التسليح، كما أجرى الباحث (Rafi) مع مجموعة من الباحثين عام (2006)[4] دراسة لسلوك العتبات الخرسانية المسلحة بقضبانCFRP، وإجراء مقارنة مع العتبات الخرسانية المسلحة بحديد التسليح الاعتيادي، باستخدام مساحة تسليح متماثلة لكل من قضبان الحديد وقضبان CFRP وأشارت النتائج إلى أن الأود في العتبات الخرسانية المسلحة بقضبانCFRP أكثر من الأود في العتبات المسلحة بالحديد، كما لوحظ اختفاء التشققات تقريباً في العتبات الخرسانية المسلحة بقضبان CFRP عند زوال الحمل، وذلك بسبب السلوك المرن لقضبانCFRP، في حين لم يلحظ أي تغيير في عرض التشققات للعتبات المسلحة بحديد التسليح. ومن هذا المنطلق يهدف البحث الحالي إلى دراسة الاستجابة الديناميكية للمنشأت الخرسانية الهيكلية المستوية ذات الطوابق المتعددة المسلحة جزئياً بقضبان CFRP باستخدام الخرسانة ذات المقاومة العالية.



الشكل (1): يوضح أنواع من قضبان ألياف البوليمر



الشكل(2): مقارنة عامة من خلال التصرف بين أنواع ألياف البوليمر الأكثر شيوعاً مع سلك حديدي [2]

الأُنموذج الرياضي

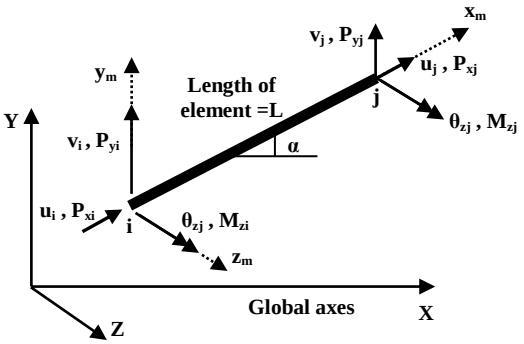
إن الأُنموذج الرياضي لأي منشأ هيكلي والمعرض لأي نوع من الأحمال يجب أن يكون مبسطاً، وله القابلية على تمثيل التصرف الحقيقي للمنشأ. وفي هذه الدراسة تم تمثيل الهيكل الإنشائي بكونه هيكلاً خرسانياً مسلحاً ذا بعدين، إذ يتمثل عضو الهيكل بعنصر عتبة – عمود (Beam-Column Element) ذي بعدين يتكون من عقدتين، كل عقدة تمتلك ثلاث مركبات للقوى هي (القوة المحورية Axial Force، وقوة القصShear Force والعزم Moment) وثلاث درجات من حرية الحركة هي (إزاحة باتجاه المحور الطولي للعنصر(u)، وأخرى عمودية على محور العنصر (v)، والثالثة هي زاوية الدوران (θ_z) حول المحور العمودي على المستوي الذي يقع فيه العنصر الهيكلي). وكما هو موضح في الشكل (3).

الأُنموذج التحليلي لعضو الهيكل الخرساني المسلح

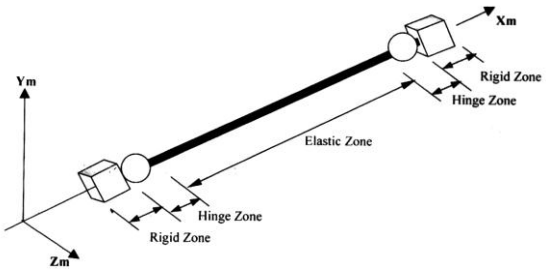
الأُنموذج التحليلي المعتمد في هذه الدراسة لتمثيل التصرف غيرالخطي لعضو الهيكل يتضمن أُنموذج اللدونة المتجمعة (Lumped Plasticity Model)، إذ يتكون من ثلاثة أجزاء (Three Different Zones)، وكما هو موضح في الشكل (4) [5-6]يمثل الجزء الأول المنطقة الصلبة (Rigid Block Zone)، ويكون موقعها في نهايتي العضو وهي منطقة تداخل العتبة مع العمود وتعدّ مقاربة للصفر من حيث طولها في هذه البحث، أما الجزء الثاني فإنّه يمثل المفاصل

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

اللدنة (Plastic Hinge Zone) في النهايتين، وهي تعكس السلوك غير المرن للعضو، أما الجزء الثالث الذي يمثل الجزء المتبقي والواقع بين المفاصل اللدنة، والذي افترض أن طوله يساوي طول العضو الهيكلي فإنّ سلوكه يبقى مرناً (خطياً).



الشكل (3): الإزاحات والقوى في نهايتي عنصر العتبة – العمود ذي البعدين



الشكل (4): الأنموذج التحليلي لعضو الهيكل الخرساني المسلح

سطح الخضوع لعضو الهيكل الخرساني المسلح ذي البعدين

تم اعتبار منحني التداخل بين القوى المحورية والعزوم القصوى في هذه الدراسة سطحاً للخضوع (Yield Surface). وإن عملية وصف منحني التداخل للقوة المحورية والعزم تحتاج إلى معرفة علاقة الإجهاد- الانفعال للخرسانة ولحديد التسليح ولقضبان ألياف البوليمر وأبعاد المقطع، فضلاً عن كمية حديد التسليح وكمية قضبان ألياف البوليمر.

1- علاقة الإجهاد – الانفعال للخرسانة ولقضبان حديد التسليح ولقضبان ألياف البوليمرالكاربونية:

تم اعتماد العلاقة التي اقترحها (Collins and Porasz) [7] لتمثيل علاقة الإجهاد– الانفعال للخرسانة العالية المقاومة الشكل (5) التي يمكن التعبير عنها بالصيغة الآتية:

$$\sigma_c = f'_c \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \times \frac{n}{n-1+(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o})^{nk}} \qquad (1)$$

Where

$$\varepsilon_o = \frac{n}{n-1} \bullet \frac{f'_c}{E_c} \quad , \quad n = 0.8 + \frac{f'_c}{17}$$

$k = 1$ for the descending branch

$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62}$ for the ascending branch

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad for \ 21\ MPa < f'_c < 83\ MPa \qquad (2)$$

واعتماد علاقة المرونة – اللدونة التامة أو علاقة المرونة – اللدونة مع تصلب الانفعال لتمثيل علاقة الإجهاد– الانفعال لحديد التسليح وكما موضح في الشكل (6) والتي يتم التعبير عنها بالصيغة الاتية:

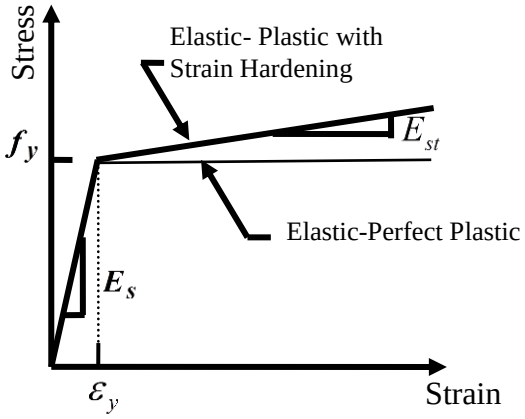
$$\begin{cases} \sigma_s = E_s . \varepsilon_s & \sigma_s \le f_y \\ \sigma_s = f_y + E_{st} . (\varepsilon_s - \varepsilon_y) & \sigma_s > f_y \end{cases} \qquad (3)$$

تم استخدام قضبان ألياف البوليمر الكاربونية في الدراسة الحالية، وذلك لامتلاكها مقاومة عالية للشد أعلى من ألياف البوليمر الزجاجية والأرميد، كما أظهرت الدراسات أن السلوك الأنموذجي لقضبان FRP سلوك خطي إلى حين

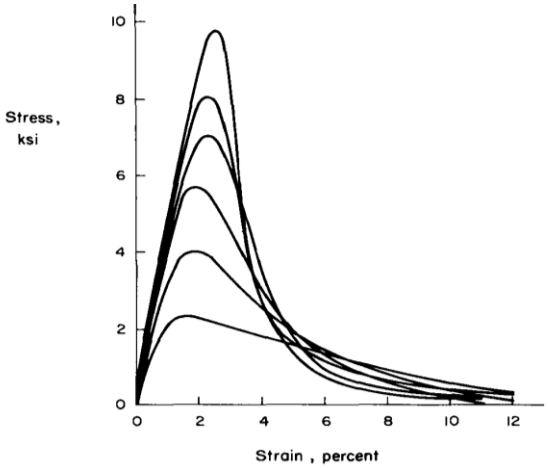
المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

الوصول إلى الذروة (الانفعال الأقصى) دون حدوث الخضوع كالذي يحصل في الحديد وكما هو موضح في الشكل (7) (ACI440R-07) [8]. إذ يمكن التعبير عن الإجهادفي قضبانCFRP بالصيغة الآتية:

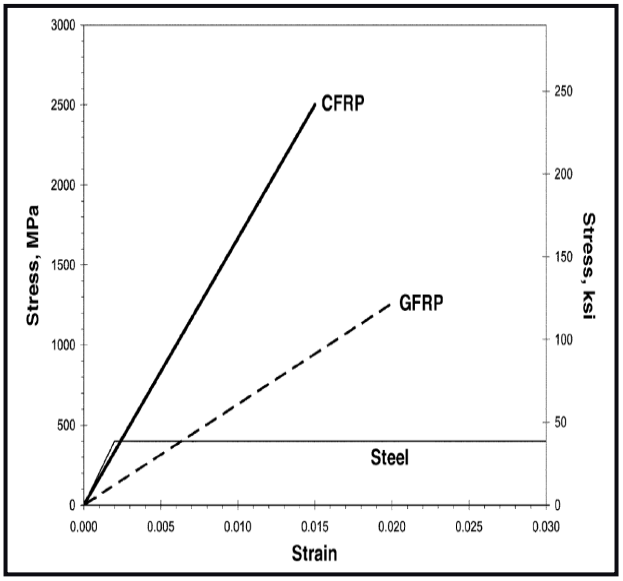
$$\sigma_f = E_f . \varepsilon_f \qquad (4)$$



الشكل (6): علاقة الإجهاد – الانفعال لقضبان حديد التسليح



الشكل (5): منحني الإجهاد – الانفعال للخرسانة ذات المقاومة العالية [5]



الشكل (7): علاقة الإجهاد – الانفعال لقضبان ألياف البوليمرCFRPP [8]

2- العلاقات الأساسية:

إن الهيكل الإنشائي في هذه الدراسة يتكون من الأعضاء الإنشائية الرئيسة (الجسور والأعمدة), وهذه الأعضاء تكون عادةً ذات مقطع خرساني مسلح مستطيل الشكل ومنتظم على طوله معرض لقوة محورية مركزة (P) وعزم (M)، وقد افترض أن الانفعال عند الحافة العليا للمقطع في حالة الانضغاط والسفلية في حالة الشد أو اقل انضغاطاً من الحافة العليا ويرمز لهما بـ($\varepsilon_b , \varepsilon_t$) على التوالي، ويمثل (n) عدد طبقات قضبان التسليح الكلية، التي تحسب من الطبقة العليا في منطقة الانضغاط، والشكل (8) يوضح احتمالية توزيع الانفعال والإجهاد على فرض أن جزءاً من المقطع أو كله تحت حالة الانضغاط، إذ إنَّ الانفعال الموجب يمثل الضغط، أما السالب فيمثل الشد ويمكن حساب التقوس (χ) في مقطع الخرسانة المسلح من العلاقة الآتية:

www.manaraa.com

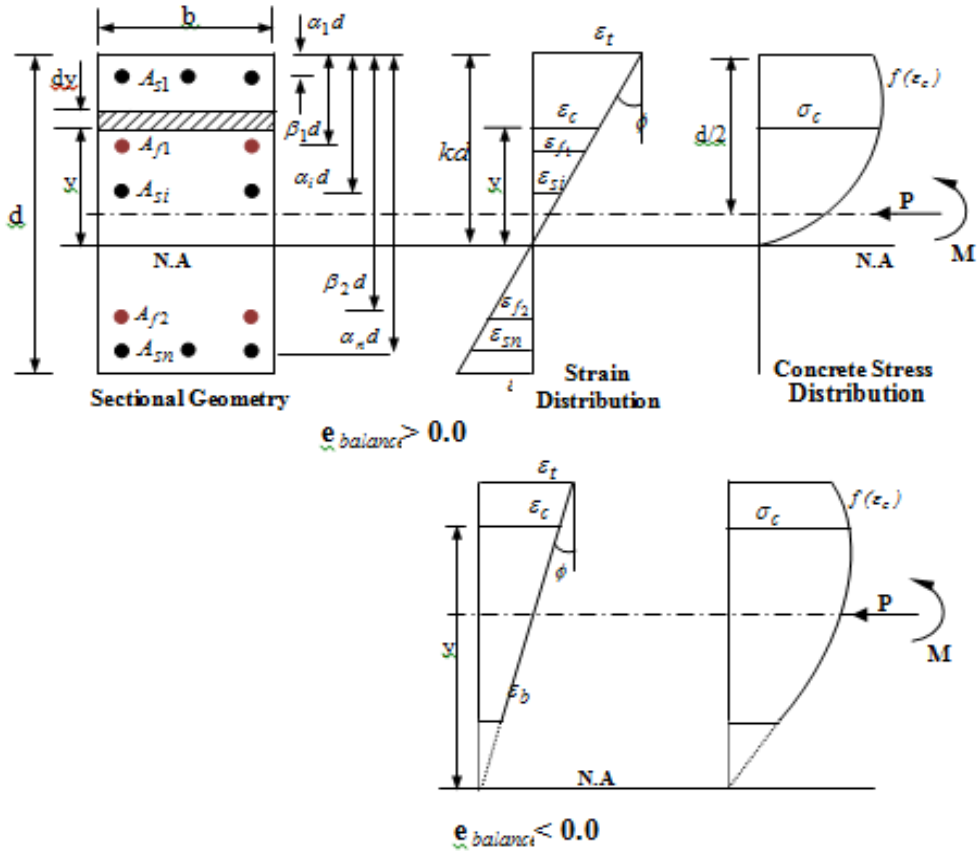
$$\chi = \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_b}{d} = \frac{\varepsilon_t}{kd} = \frac{\varepsilon_{si}}{(k-\alpha_i).d} = \frac{\varepsilon_c}{y} = \frac{\varepsilon_{fj}}{(k-\beta_j).d} \qquad (5)$$

عندئذ يمكن كتابة معادلات التوازن للقوة المحورية والعزم (حول محور التعادل) بشكل صيغة غير بعدية (Non-dimensional form) كما يأتي :

$$p = \frac{1}{\phi}\int_{\varepsilon_c} \frac{\sigma_c}{f'_c} d\,\varepsilon_c + \sum_{i=1}^{n} \rho_{si} \frac{\sigma_{si}}{f'_c} + \sum_{j=1}^{2} \rho_{fj} \frac{f_{fj}}{f'_c} \qquad (6\text{-a})$$

$$m = \frac{1}{\phi^2}\int_{\varepsilon_c} \frac{\sigma_c}{f'_c} \varepsilon_c\, d\,\varepsilon_c + \frac{1}{\phi}\sum_{i=1}^{n} \rho_{si} \frac{\sigma_{si}}{f'_c} \varepsilon_{si} + \frac{1}{\phi}\sum_{j=1}^{2} \rho_{fj} \frac{f_{fj}}{f'_c} \varepsilon_{fj} - P\left(\frac{\varepsilon_t}{\phi} - 0.5\right) \qquad (6\text{-b})$$

كما أن إضافة الحدود التي تمثل تأثير التسليح بقضبانCFRP في معادلات التوازن اعتماداً على إشارة الانفعال لها (ε_{fj})، فإذا كانت الإشارة سالبة (شداً) فيتم إضافة هذه الحدود وتؤخذ قوة الشد لهذه القضبان. أما إذا كانت الإشارة موجبة (ضغطاً) فلا تضاف، وذلك لإهمال قوة انضغاطها.



الشكل (8): الشكل الهندسي لمقطع الهيكل الخرساني المسلح مع توزيع الإجهاد والانفعال

2- منحني التداخل للقوة المحورية والعزم:

ان طريقة حساب منحني التداخل لأي مقطع خرساني يتم عن طريق الخطوات الاتية:

1-حساب قوة الانضغاط المحورية القصوى (p_o) وقوة الشد المحورية (p_t) للمقطع في غياب العزم

www.manaraa.com

2-حساب القوة المحورية المتوازنة (p_{ub}) (Balanced Axial Load)، وهي القوة المحورية التي تحصل عندما تصل قيمة الانفعال في الليف العلوي للخرسانة إلى قيمة الانفعال الأقصى في حالة الانضغاط (ε_u) مع حصول خضوع في طبقة قضبان التسليح السفلية.

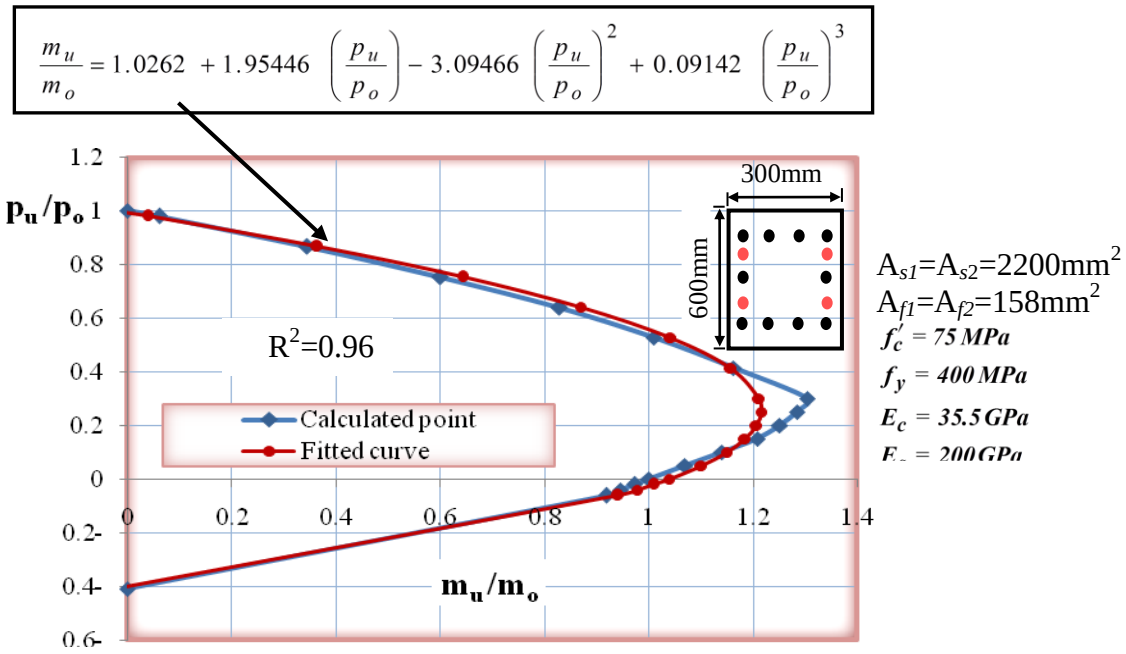
3- حساب سعة العزم الأقصى (m_o) للمقطع في غياب القوة المحورية.

4- للحصول على مجموعة من النقاط (m_u, p_u)، في منطقة الفشل الانضغاطي (Compression Failure Region) التي تكون بين (p_o, p_{ub}), تم اختيار قيم لـ (ϕ) اقل من قيمة (ϕ_b) ضمن حدود ($0.85p_o, p_{ub}$).

5- وفي منطقة الفشل بالشد (Tension Failure Region) تم اختيار قيم لـ (ϕ) اكبر من قيمة (ϕ_b) بمقدار معلوم للحصول على مجموعة من النقاط، علما بأنَّ قيمة (ϕ) القصوى التي استخدمت في الدراسة الحالية كانت ($\phi_{max} = \varepsilon_t / \alpha_1$)، و($\alpha_1$) تمثل المسافة غير البعدية بين طبقة قضبان التسليح العليا وحافة المقطع العليا. وبعد الحصول على مجموعة من نقاط تداخل القوى المحورية مع العزوم(m_u,p_u) من الفقرات السابقة تم صياغة دالة مستمرة ومتعددة الحدود، ومن الدرجة الثالثة (Third Degree Polynomial) باستخدام طريقة المربعات الأقل (Least Squares Method) [9] للحصول على منحني التوافق، وهذه الدالة يمكن كتابتها بالصيغة غير البعدية الآتية:

$$\frac{m_u}{m_o} = a_1 + a_2\left(\frac{p_u}{p_o}\right) + a_3\left(\frac{p_u}{p_o}\right)^2 + a_4\left(\frac{p_u}{p_o}\right)^3 \qquad (7)$$

الشكل (9) يبين أنموذجاً للنقاط المحسوبة (m_u ,p_u) مقارنةً مع منحني التوافق (Fitted Curve) للمقطع العرضي الموضحة تفاصيله أدناه، ويلحظ من الشكل التوافق الجيد بين النقاط الحقيقية المحسوبة ومنحني التوافق.



الشكل (9): يوضح منحنى التداخل الحقيقي والمتوافق للقوة المحورية والعزم

إن خضوع أي مقطع خرساني مسلح يتم تحديده اعتماداً على العزم اللابعدي (m) الناتج عن التحليل الديناميكي (معادلة 6-a) والعزم الأقصى اللابعدي والمحدد من سطح الخضوع عند قوة محورية معينة ناتجة أيضاً عن التحليل الديناميكي (معادلة 6-b), وبذلك تكون دالة الخضوع كما يلي:

$$f = \left|\frac{m}{m_u}\right| \qquad (8)$$

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

التحليل المرن-غيرالمرن

تم استخدام مصفوفة الكتلة المتناسقة،(MarioPaz) [10]، أما مصفوفة الإخماد الرئيسة للمنشأ تم حسابها على نحو تناسبي (Proportional) من مصفوفة الكتلة و الجساءة الابتدائية الرئيسة للمنشأ، وهذا ما يعرف بفرضية إخماد (Rayleigh)،(Hinton&Owen)[11]،(Clough)[12]، كما تم تخفيض صلادة الانحناء (EI) بمقدار50% حال تكوّن المفصل اللدن في العضو الإنشائي (Anderson and Townsend) [13]، (Singh) وآخرون [14]. وبالاعتماد على توازن القوى يتم الحصول على معادلة الحركة لنظام المرونة – اللدونة وكما موضح في المعادلة الآتية(Wilson) [15]:

$$M.\ddot{u}+K.\dot{u}+C.u=F \qquad (9)$$

وباستخدام أسلوب التكامل المباشر(خطوة - بخطوة) معتمدا على طريقة نيومارك المتنبئة – المصححة الموضحة تفاصيلها مع البرنامج الخاص بهذه الطريقة (بلغة فورتران -77) في المصدر [11] لحل معادلة الحركة في أعلاه, يتم الحصول على الإزاحات التزايدية لكل عقد الهيكل، ومنها حساب القوى العقدية لكل عنصر اعتماداً على طريقة الجساءة، وعلى افتراض أنَّ سلوك عناصر الهيكل خطي مرن. ومن مركبات القوى العقدية لكل عقدة من عقد العنصر الهيكلي يتم تحديد مستوى القوى وموقعها كنقطة بالنسبة لسطح الخضوع لغرض التحقق من حالة العنصر عند تلك العقدة وفي هذه المرحلة يتم اختبار ثلاث حالات مختلفة وعلى النحو الآتي:

فإذا كانت قيمة الدالة (f <1.0) فإنها تشير إلى الحالة المرنة وتستخدم مصفوفة الجساءة المرنة، في حين الحالة (f >1.0) غير المقبولة تحصل عندما تتجاوز القوة المسلطة حدود مرونة المقطع عندها تمثل هذه الحالة مرحلة الانتقال من الحالة المرنة إلى الحالة غير المرنة (اللدونة) وتبدأ عملية التشوه اللدن وتكوين المفاصل اللدنة، أما الحالة الثالثة فتحصل عندما يكون هناك مفصل لدن من الخطوة السابقة وفي هذه الحالة يتم اختبار موقع النقطة (التي تمثل القوة العقدية) نسبة إلى سطح الخضوع وكما يأتي:

I. إذا كانت القوى العقدية التي حصل بها المفصل اللدن تحقق الحالة (f =1.0) (أي أنّ النقطة تتحرك على سطح الخضوع)، فيتم حساب مصفوفة الجساءة المرنة–اللدنة بدلاً من مصفوفة الجساءة المرنة والتي يمكن اشتقاقها اعتماداً على قاعدة الجريان (التي تنص على أنَّ التشّوه اللدن يتغير على نحو خطي نسبة إلى القوى أو الإجهادات المصاحبة للتشوه) والاستفادة من الحالة التعامدية (أي ان سطح الخضوع للمواد المرنة– اللدنة ثابت لايتغير أي أن القوى العقدية المتزايدة والمصاحبة للتشوه اللدن في المقطع العرضي يجب أن تكون مماساً لسطح الخضوع) حيث أن:

$$[K_{ep}]=[K_e]+[K_p] \qquad (10)$$

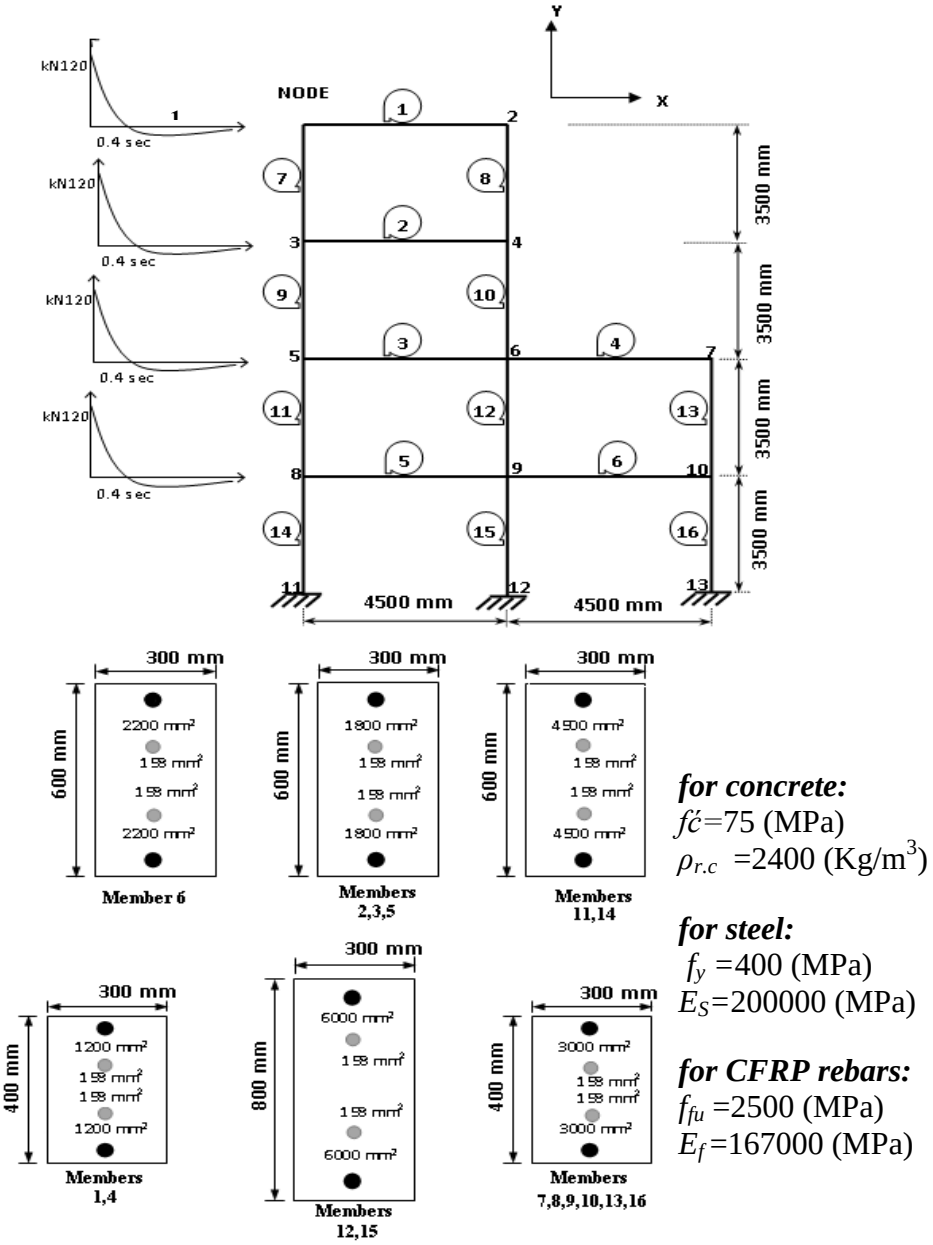
II. في حالة كون (f >1.0) عند المفصل اللدن، فإن النقطة تكون قد اجتازت سطح الخضوع ويجب إعادة النقطة إلى سطح الخضوع.

III. في حالة كون (f <1.0) عند المفصل اللدن، وهذه الحالة تمثل حالة رفع الحمل (Unloading)، عندها تصبح تلك العقدة (المفصل اللدن السابق) ذات سلوك خطي (مرن).

استجابة الهيكل الخرساني المسلح لحمل الانفجار

تم تحليل هيكلاً خرسانياً مسلحاً جزئياً بقضبان ألياف البوليمر مكوناً من أربعة طوابق تحت تأثير حمل الانفجار الحقيقي البالغ (120kN) وبمدة زمنية قدرها (0.4sec) [16]، تؤثر الأحمال الانفجارية بشكل أفقي في العقد (1,3,5,8)، واستخدمت خطوة زمنية مقدارها(0.0005sec) لغرض التكامل العددي لمعادلات الحركة، كما عد معامل الإخماد (5%). تم التسليح باستخدام قضيبين من قضبان CFRP وبقطر (10mm) أي بمساحة ($158mm^2$) في كل طبقة (في منطقتي الشد والضغط) فضلاً عن وجود قضبان الحديد وباستخدام الخرسانة العالية المقاومة. يوضح الشكل (10) الشكل الهندسي وخصائص المقاطع للهيكل الخرساني المسلح.

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

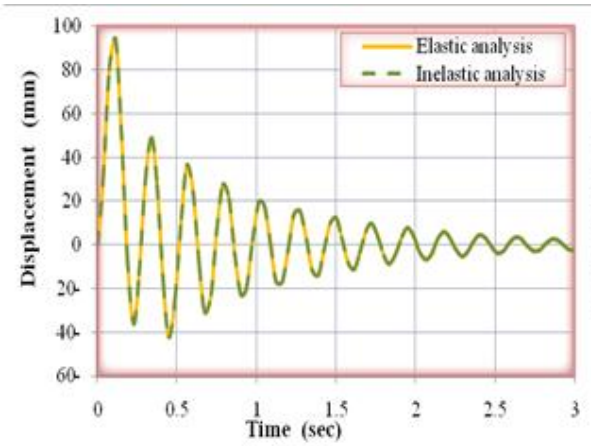


الشكل (10):الهندسي وخصائص المقاطع للهيكل الخرساني المسلح

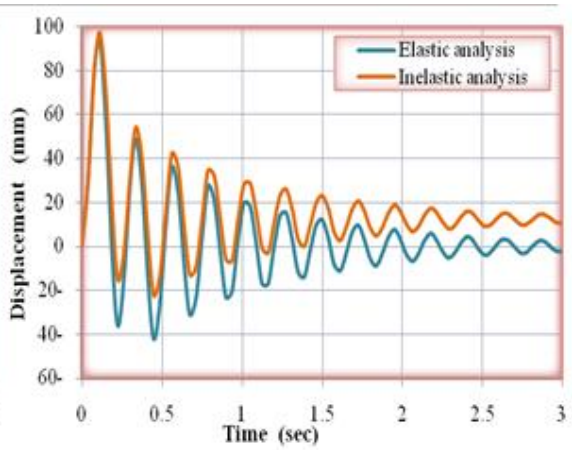
موقع قضبانCFRP = (الغطاء الخرساني) 40mm + (قطرالأطواق) 10mm + (قطر قضبان حديد التسليح)20mm + (المسافة العمودية الصافية بين القضبان حسب مدونة ACI318-08) 25mm + (نصف قطر قضبانCFRP) 5mm = 100mm .

كانت الاستجابة الديناميكية للهيكل الخرساني المسلح جزئيا بقضبان ألياف البوليمر الكاربونية للأحمال الانفجارية كما موضحة في الأشكال (11,12,13) من خلال الإزاحة بالعقدة 1 الواقعة في أعلى الهيكل الخرساني من الجهة اليمنى وتغايرها مع الوقت.

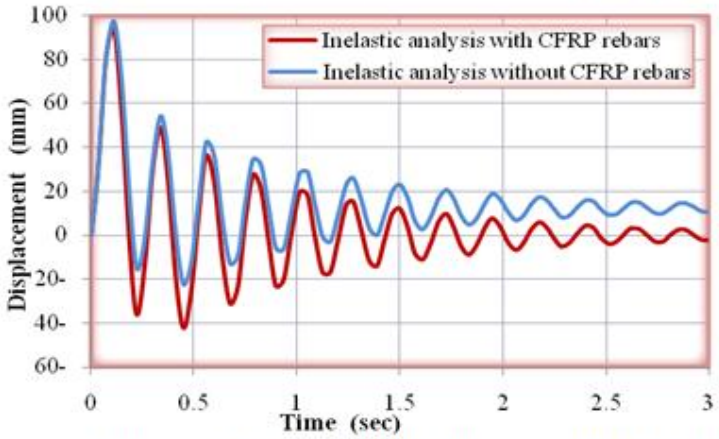
المنارة للاستشارات
www.manaraa.com



الشكل (12): تغاير الإزاحة الأفقية مع الزمن للعقدة (1) عند التسليح بقضبان CFRP

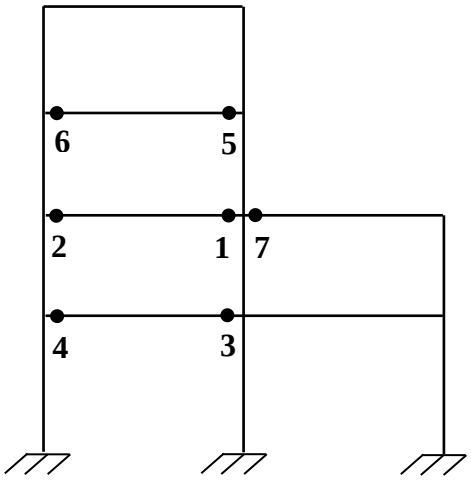


الشكل (11): تغاير الإزاحة الأفقية مع الزمن للعقدة (1) عند عدم التسليح بقضبان CFRP



الشكل (13): المقارنة بين الإزاحة الأفقية غير المرنة مع الزمن للعقدة (1) عند التسليح بقضبانCFRP وعدم التسليح

من الأشكال أعلاه يمكن ملاحظة حصول تطابق تام بين التحليل المرن عند التسليح وعدم التسليح بقضبانCFRP مع حصول تطابق للتحليل المرن وغير المرن عند استخدام قضبانCFRP في التسليح أي ان سلوك المنشأ أصبح مرنا تاما بوجود هذه القضبان وذلك بسبب امتلاكها مقاومة شد عالية مما أدى إلى زيادة مقاومة المقاطع الخرسانية المسلحة بها، كما يلاحظ حصول نقصان في قيم الازاحة العظمى المرنة وغير المرنة مع نقصان في قيم الإزاحة المتبقية في نهاية التحليل غير المرن عند التسليح بهذه القضبان مقارنة عند عدم التسليح بها. والشكل(14) يوضح مواقع تكوّن المفاصل اللدنة. أما الجدول رقم (1) فيوضح عددها وزمن تكونها حيث يلاحظ حصول كل المفاصل اللدنة في نهايات العتبات، وتنغلق بعد انعكاس الاهتزاز في حين لم يتكون أي مفصل لدن عند استخدام قضبان CFRP في التسليح، أي أن سلوك المنشأ يبقى مرناً.



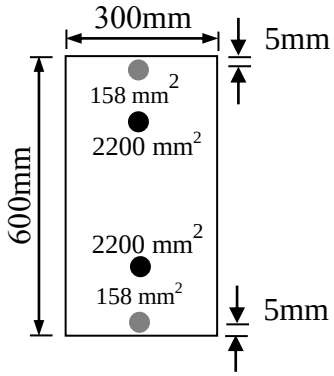
الشكل (14): مواقع تكّون المفاصل اللدنة بدون التسليح بقضبان CFRP

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

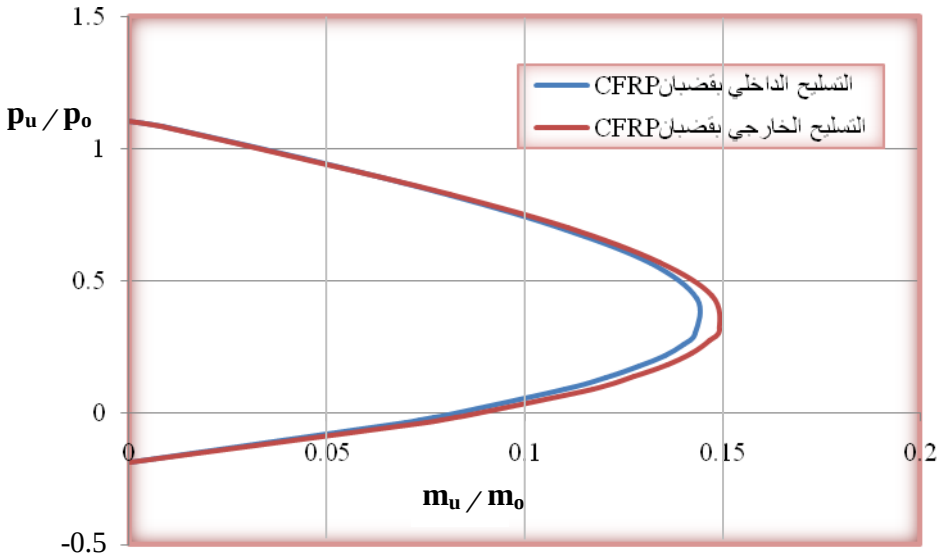
ولدراسة تأثير موقع قضبانCFRP تم إعادة تحليل الهيكل الخرساني المسلح باستخدام التسليح الجزئي بقضبان CFRP(4#10) على بعد (5mm) من الحافة العليا والسفلى للمقاطع الخرسانية وكما هو موضح في الشكل (15) حيث تم رسم منحني التداخل للقوة المحورية والعزم والشكل (16) يوضح المقارنة بين منحني التداخل المتوافق عند التسليح الخارجي والداخلي بقضبانCFRP.

الجدول (1): التكوين التتابعي للمفاصل اللدنة

عدد المفاصل اللدنة المتكونة	زمن تكوين المفاصل اللدنة (sec)	
	عند عدم التسليح بقضبان CFRP	عند التسليح بقضبان CFRP
1	0.068	-
2	0.071	-
3	0.0755	-
4	0.0785	-
5	0.0805	-
6	0.0805	-
7	0.104	-



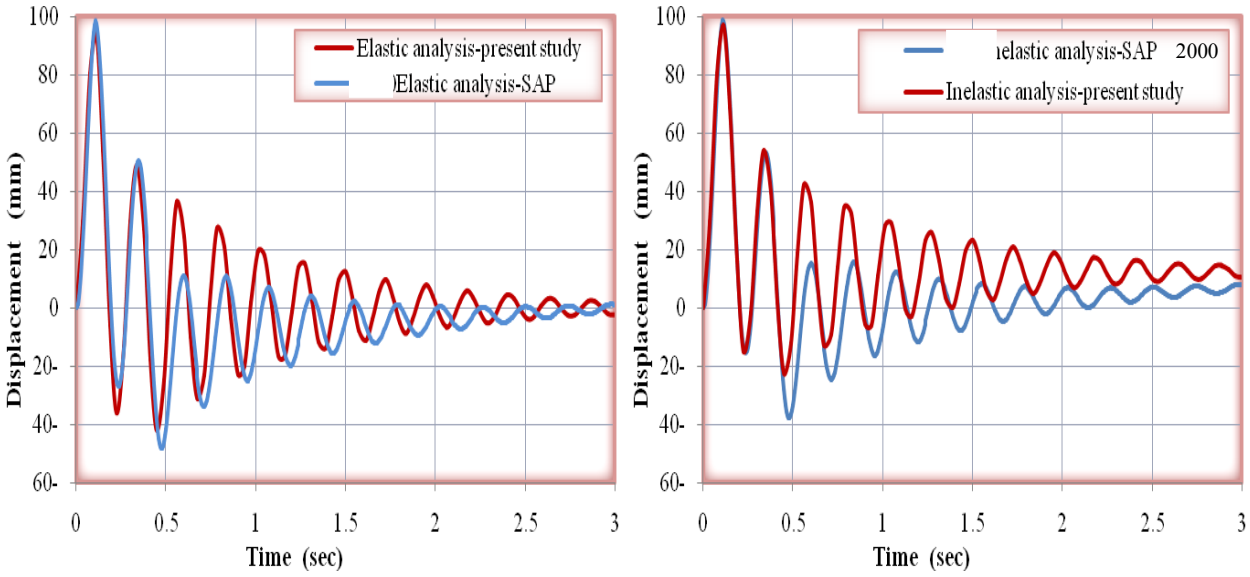
الشكل (15): يوضح تفاصيل المقطع الخرساني المسلح للهيكل (Frame-1) عند التسليح الخارجي بقضبانCFRP



الشكل (16): يوضح المقارنة بين منحني التداخل المتوافق عند التسليح الخارجي والداخلي بقضبانCFRP

تم إجراء تحليل ديناميكي مرنا وغير مرن باستخدام برنامج (SAP2000) باستخدام الخرسانة العالية المقاومة عند عدم التسليح بقضبانCFRP ومقارنة النتائج مع نتائج هذا البحث عند الحالة نفسها من عدم التسليح بقضبان البوليمر الكاربونية وكما موضح في الشكل (17) حيث يلحظ التوافق الجيد بين النتائج وخاصة في فترة التحميل الانفجاري (0.4 sec) مع حصول تطابق في قيم الإزاحة المرنة وغير المرنة العظمى وكذلك الإزاحات اللدنة المتبقية في نهاية التحليل المرن.

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com



الشكل (17): يوضح المقارنة بين الازاحة الافقية المرنة وغير المرنة للعقدة (1) باستخدام برنامج (SAP2000)

الاستنتاجات

من خلال تحليل النتائج التي تم الحصول عليها يمكن وصف الخصائص الآتية:

* أدى التسليح الجزئي بقضبان ألياف البوليمر للهياكل الخرسانية المستوية إلى زيادة مقاومة الانثناء للمقاطع الخرسانية المسلحة ضد أحمال الانفجار وهذا واضح من خلال عدم تكوّن أي مفصل لدن عند التسليح الجزئي بألياف البوليمر لأعضاء الهيكل الإنشائي.
* أدى التسليح بقضبان ألياف البوليمر دوراً مهماً وملحوظاً في اختفاء المفاصل اللدنة المتكوّنة في الأعضاء الإنشائية وذلك أنَّها أدَتْ إلى زيادة في مقاومة ومتانة المقاطع الخرسانية المسلحة بها وخاصة أثناء فترة الاهتزاز الحر.
* الإزاحة غيرالمرنة عند التسليح بقضبان CFRP هي أقل من الإزاحة غيرالمرنة عند عدم التسليح بها بمقدار 12% وذلك بسبب المرونة العالية التي تمتاز بها هذه القضبان مما جعل سلوك المنشأ اقرب إلى سلوكه المرن.
* الإزاحة غير المرنة باتجاه الحمل الأفقي المسلط أثناء الاهتزاز أكثر من الإزاحة المرنة بمقدار 6%، في حين الإزاحة السالبة غير المرنة التي تحدث نتيجة انعكاس اتجاه الاهتزاز هي أقل من الإزاحة المرنة بمقدار 25%، بسبب حصول التشوه اللدن بالاتجاه الموجب (أي باتجاه الحمل الانفجاري المسلط) مما يعيق عودة الإزاحة إلى القيم نفسها. هذا بالنسبة لاستجابة الهيكل في حالة عدم التسليح بقضبان البوليمر بينما يكون هناك تطابق 100% بالإزاحة غير المرنة مع الإزاحة غير المرنة في حالة التسليح بقضبان البوليمر.

المصادر

[1] Grace, N.F., Soliman, A.K., Abdel-Sayed, G., and Saleh, K.R., "Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams", Journal of Composites for Construction, Vol. 2, No. 4, November, 1998,pp. 186-194.

[2] Lee, J. M., and Burgoyne, C. J., "Experimental Study of Influence of Bond on Flexural Behavior of Concrete Beams Pretensioned with Aramid Fiber Reinforced Plastics", ACI Structural Journal, Vol.96, No.3, May-June, 1999, pp.377-386.

[3] Choo, C. C. , "Investigation of Rectangular Concrete Columns Reinforced or Prestressed with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars or Tendons", Doctoral Thesis, University of Kentucky, Lexington, March, 2005, pp.139.

[4] Rafi, M. M., Nadjai, A. , Ali, F., and Talamona , D. ," Aspects of Beha-viour of CFRP Reinforced Concrete Beams in Bending", Science Direct Journal of Construction and Building Materials, 2006, pp.1-9.

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

[5] Powel ,G. H. , Chen, P.F., "3D Beam - Column Element with Generalized Plastic Hinges", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 112, No. 7, 1986 , pp. 627-641.
[6] Al-Haddad, M. S., and Wight, J. K., "Relocating Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resistant Design of R/C Buildings", ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 2, 1988,pp. 123-133.
[7] Collins, M. P., and Porasz , A. ,"Shear Design for High-Strength Concrete",Comité Euro-International du Béton, Bulletind' Information ,No.193,1989, pp.77-83.
[8] ACI440R-07,"Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", American Concrete Institute, 2007, pp.1-100.
[9] Kuo, S.S., "Computer Applications of Numerical Methods", Addison-Wesley Publishing Company, New-Hampshire, 1972 , pp.252-275.
[10] Mario Paz, "Structural Dynamics Theory and Computation", CBS Publ-ishers and Distributors in Arrangement with Van Nostrand Reinhold Company Inc., New Delhi, 1987.
[11] Owen, D. R. J., and Hinton, E., "Finite Element in Plasticity: Theory and Practice", Pineridge Press Limited, Swansea, U.K, 1980.
[12] Clough, R. W., and Penzien, J. , "Dynamics of Structures",3rd Edition, University of California, Berkeley, Computers and Structures, Inc., USA, 2003, pp.234-245.
[13] Anderson, J.C., and Townsend, W. H., "Models for R/C Frames with Degrading Stiffness", Journal of The Structural Division, ASCE, Vol.103, No. ST12,1977, pp.2361-2376.
[14] Singh, H. , Paul, D. K., and Sastry, V. V., "Inelastic Dynamic Response of R/C Infilled Frames", Computers and Structures, Vol.69, 1998, pp.685-693.
[15] Wilson, E. L. ,"Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures", A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2002.
[16] Thanoon , W. A. , "Inelastic Dynamic Analysis of Concrete Frames under Non-Nuclear Blast Loading", Ph.D. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India, 1993, pp.242

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com