الإجهادات التابعة للزمن في مقاطع الجسور الخرسانية المسلحة والمسبقة الإجهاد ذات الأشكال العرضية العامة

الدكتور رأفت مصطفى إدلبي

قسم هندسة النقل والمواصلات

كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

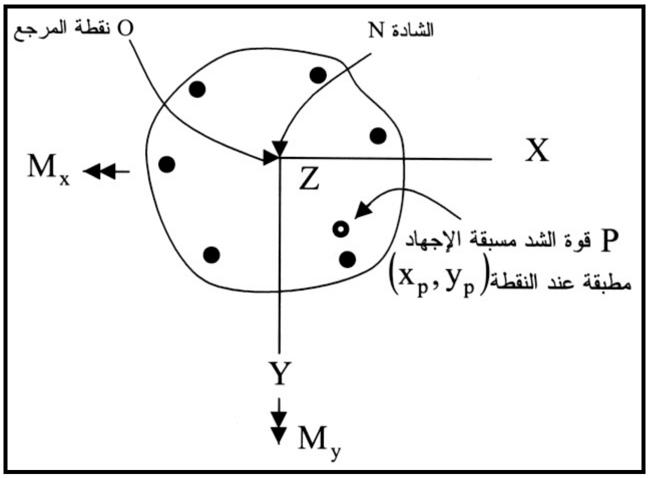
الملخص

طريقة دقيقة لتحديد الإجهادات والتشوهات في مقاطع الخرسانة المسلحة العادية أو المسبقة الإجهاد. الطريقة أعدت لتحديد التشوهات اللحظية والتشوهات مع الزمن الناتجة عن تأثير السيلان والتقلص وارتخاء الأسلاك لأي مقطع عرضي مهما كان شكله متناظراً أو غير متناظر، وذلك عندما تكون العزوم مطبقة حول محورين **X** و **Y**. البحث يتضمن مثالاً عددياً يبين كيفية تطبيق الطريقة تطبيقاً مباشراً.

1- مقدمة:

عند تحليل وتصميم منشآت الخرسانة المسبقة الإجهاد يجب أن يؤخذ بالحسبان التعيين الدقيق للإجهادات والتشوهات فالتشوهات التابعة للزمن هي تشوهات ناتجة عن تأثير السيلان والتقلص وارتخاء الأسلاك المسبقة الإجهاد. هذا البحث يوضح طريقة دقيقة لتعيين الإجهادات التابعة للزمن في مقاطع الخرسـانة المسبقة الإجهاد وهذه الطريقة قد طوّرت من قبل Dilger [4] ,Faver, Ghali [5] ولكن لمقـاطع عرضية متناظرة وتخضع فيها العزم والقوى إلى محور واحد وعمليات التحليل تمثل تغيرP مع الزمن من الفترة τ_0 إلى الفترة t مع تطبيق قوى M_x, N أما $M_y = 0$.

وهذا البحث هو تتمة للطرق السابقة ولكن لمقاطع عرضية ما مطبق عليها القـوةN فـي النقطـة O. وعزوم حول المحور x والمحور y هي M_y, M_x على التوالي انظر الشكل رقم (1).



شكل رقم 1. مقطع عرضي عام لعنصر خرساني مسلح. اصطلاح الإشارة الموجبة

إن القوى N, M_x, M_y طبقت عند الزمن τ_0 وهذه القيم تتضمن أيضاً مسـاهمة القـوة المسـبقة الإجهاد أيضاً وهي $-P$ ومن ثمّ $-P.y_P$, $-P.x_P$ على التوالي حيث $\underline{P}$ القيمة المطلقـة للقـوة المسبقة الإجهاد عند اللحظة τ_0 . أما x_P, y_P هي إحداثيات الأوتار المسبقة الإجهاد. فالمشكلة تعالج

أولاً توزع الإجهادات والتشوهات عند اللحظة τ_0 وبعد ذلك عند الزمن t بعد حدوث عملية السيلان والتقاص في الخرسانة مع ارتخاء الأسلاك.

هذا البحث يعالج تغير الإجهادات والتشوهات التابعة للزمن في المرحلة الخطية للحمولات الدائمة، أما حمولات الرياح والزلازل والحمولات الحية التي تسبب الانهيار فتستثنى. إن التحليل يسمح بمعالجة تغيرات التشوهات المحورية والزاوية قبل الحالة الحدية أي العلاقة بين الإجهادات والتشوهات وهي علاقة خطية $[\sigma - \varepsilon]$ وعلى فرض الخرسانة غير متشققة.

2- علاقة الإجهادات والتشوهات في الخرسانة:

العلاقة العامة للتشوهات في الخرسانة تعطى بالمعادلة التالية:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{E_C(\tau_0)}\left[1+\varphi(t,\tau_0)\right] + \frac{\Delta\sigma_C}{E_C(\tau_0)}\left[1+x(t,\tau_0)\cdot\varphi(t,\tau_0)\right] \qquad (1)$$

$E_C(\tau_0)$: معامل المرونة في الخرسانة عند اللحظة τ_0 .

$\varphi(t,\tau_0)$: عامل السيلان وهو يمثل نسبة التشوهات مع الزمن إلى التشوهات اللحظية.

$\Delta\sigma_C$: الزيادة في الإجهادات التي تطبق تدريجياً من اللحظة τ_0 مساوية للصفر إلى القيمة النهائية في اللحظة t .

$x(t,\tau_0)$: عامل تقادم الخرسانة Aging Coefficient الذي اقترح من قبل Trost [7] وطوره Bazant [1] بمعادلة رياضية.والذي يتغير بين 0.6 إلى 1 ويمكن استنتاج قيمته بواسطة مخططات [4], [5] أو بواسطة معادلة رياضية:

$$x(t,\tau_0) = \frac{1}{1 - {R(t,\tau_0)}/{E_c(t,\tau_0)}} - \frac{1}{\varphi(t,\tau_0)}$$

حيث التابع $R(t, \tau_0)$ هو تابع ارتخاء البيتون [2] .

أما معامل المرونة الفعال في العمر المحدد (Age-Adjusted Effective Modulus) فيعطى بالمعادلة التالية:

$$\overline{E_C}(t,\tau_0) = \frac{E_C(\tau_0)}{1+x(t,\tau_0)\cdot\varphi(t,\tau_0)} \qquad (2)$$

إن أكثر الطرق فعالية لتحليل التشوهات التابعة للزمن في المنشآت الخرسانية هي طريقـة AEMM (Age-Adjusted Effective Modulus Method)[1] . يكون عامل السيلان مختلفاً عند كل زيادة في الإجهادات عند تطبيق الإجهادات على الخرسانة تطبيقاً تدريجياً، ولأن عمر الخرسانة عنـد التحميل هو مختلف أيضاً فيصبح التنبؤ بتشوهات عامل السيلان أكثر صعوبة. هـذه الطريقـة تأخـذ بالحسبان تقادم الخرسانة، ويقصد بذلك أنه عندما يطبق الإجهاد تطبيقاً تدريجياً يخفض عامل السـيلان بعامل التعتيق $x(t,\tau_0).\phi(t,\tau_0)$.

نستخدم المقطع المكافئ باستخدام معاير المرونة. معاير المرونة في اللحظة τ_0 .

$$n_0 = \frac{E_S}{E_C(\tau_0)} \tag{3}$$

وأما معاير المرونة عند الزمن t .

$$\bar{n} = \frac{E_S \cdot [1 + x(t,\tau_0) \cdot \varphi(t,\tau_0)]}{E_C(\tau_0)} \tag{4}$$

E_S : معامل المرونة للفولاذ العادي أو المسبق الإجهاد.

$$n_{OS}, n_{OP} = \frac{E_{ns}, E_{ps}}{E_C(\tau_0)} \tag{5}$$

$$\overline{n_{OS}}, \overline{n_{OP}} = \frac{\{E_{ns}, E_{ps}\} \cdot [1 + x(t,\tau_0) \cdot \varphi(t,\tau_0)]}{E_C(\tau_0)} \tag{6}$$

3- المعادلات الأساسية المستخدمة في التحليل:

ننطلق من المعادلات الأساسية للإجهاد والتشوهات في المقاطع غير المتجانسة بـافتراض أن المقـاطع المستوية قبل التحميل تبقى مستوية بعد التحميل. ننطلق من المعادلة التالية للتشوهات حيث التشوه عند أي نقطة أو ليف ما، انظر الشكل رقم (1).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \psi_x \cdot y + \psi_y \cdot x \tag{7}$$

ε_0 : التشوه عند نقطة المرجع 0.

$\psi_x : \partial\varepsilon / \partial y$.

$\psi_y : \partial\varepsilon / \partial x$.

وهي تمثل الانحناء الزاوي في سطوح x_Z , y_Z . والعلاقة بين التشوهات الإجهادات هي خطية.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (8)$$

وبالتكامل على كامل السطح نجد:

$$\left.\begin{aligned} N &= \int \sigma \cdot \partial A \\ M_X &= \int \sigma \cdot y \cdot \partial A \\ M_y &= \int \sigma \cdot x \cdot \partial A \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

بالتعويض بالمعادلة (8) و(9) نجد ما يلي:

$$\begin{aligned} N &= E\left(A \cdot \varepsilon_0 + B_x \cdot \psi_x + B_y \cdot \psi_y\right) \\ M_x &= E\left(B_x \cdot \varepsilon_0 + I_x \cdot \psi_x + I_{xy} \cdot \psi_y\right) \\ M_y &= E\left(B_y \cdot \varepsilon_0 + I_{xy} \cdot \psi_x + I_y \cdot \psi_y\right) \end{aligned} \qquad (10)$$

حيث I, B تمثل العزم الأول والثاني للمساحة حول y, x وتعين من المعادلات التالية:

$$\begin{aligned} B_x &= \int y \cdot \partial A \quad , \quad I_x = \int y^2 \cdot \partial A \\ B_y &= \int x \cdot \partial A \quad , \quad I_y = \int x^2 \cdot \partial A \\ I_{xy} &= \int x \cdot y \cdot \partial A \end{aligned} \qquad (11)$$

المعادلات (10) يمكن أن تكتب على شكل مصفوفة.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = E \begin{bmatrix} A & B_x & B_y \\ B_x & I_x & I_{xy} \\ B_y & I_{xy} & I_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \psi_x \\ \psi_y \end{Bmatrix} \qquad (12)$$

هذه المعادلات تستخدم لتحديد الإجهادات الناتجة عن M_y, M_x, N عندما يكـون التشـوه والإجهاد معروفين. ومن المعادلة 12 يمكن إيجاد التشوه المحوري والانحنـاءات الزاويـة بالمعادلـة (13).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \psi_x \\ \psi_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} A & B_x & B_y \\ B_x & I_x & I_{xy} \\ B_y & I_{xy} & I_y \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} \tag{13}$$

عند ضرب المصفوفة بمعامل المرونة E يعطي ثلاثة عناصر إجهاديـة والتـي تحـدد نـوع الإجهادات.

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0, \quad \gamma_x = E \cdot \psi_x, \quad \gamma_y = E \cdot \psi_y \tag{14}$$

الإجهادات عند أي نقطة.

$$\sigma = \sigma_0 + \gamma_x \cdot y + \gamma_y \cdot x \tag{15}$$

حيث: $\gamma_x = \frac{\partial \sigma}{\partial y}, \ \gamma_y = \frac{\partial \sigma}{\partial x}$

يحدد المحور الطبيعي المحايد بواسطة y, x على التوالي.

$$a = -\frac{\sigma_0}{\gamma_y}, \ b = -\frac{\sigma_0}{\gamma_x} \tag{16}$$

المعادلة (12) تصبح على الشكل التالي:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_x & B_y \\ B_x & I_x & I_{xy} \\ B_y & I_{xy} & I_y \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_0 \\ \gamma_x \\ \gamma_y \end{Bmatrix} \tag{17}$$

نستخدم خواص المقطع السيلاني المكافئ لإيجاد المساحة I, B, A ويمكن صياغة برنـامج خـاص لإيجاد خواص المقطع مهما كان شكله.

4- خطوات التحليل:

تمثل خطوات التحليل بأربع مراحل لتحليل الإجهادات والتشوهات عند اللحظة τ_0 بعد تطبيق N, M_x, M_y وحتى الزمن t.

- **الخطوة الأولى:** تطبق القوى N, M_x, M_y على المقطع المكافئ لـ A_C بالإضافة $[n_{PS} \cdot A_{PS} + n_{OS} \cdot A_{ns}]$.

المقطع المكافئ يتضمن الفولاذ العادي والمسبق الإجهاد مع المقطع الخرساني. إن A_{PS} يجب أن تؤخذ بالحسبان عندما نستخدم فولاذاً مسبق الإجهاد قبل الصب ولكن عندما نستعمل فولاذاً بعد الصب في المرحلة الأولى فإن A_{PS} يجب أن تلغى.

نطبق المعادلة (13) لتحديد $\psi_y(\tau_0),\ \psi_x(\tau_0),\ \varepsilon_0(\tau_0)$ هي التشوهات اللحظية وعندما تضرب بمعامل مرونة تعطي $\gamma_y(\tau_0),\ \gamma_x(\tau_0),\ \sigma_0(\tau_0)$، وهي الإجهادات اللحظية في الخرسانة. تضرب المعادلات (14) و(15) بمعاير المرونة $n_{OS}(\tau_0)$ فتعطي الإجهادات في الفولاذ العادي.

وعندما نستخدم فولاذاً مسبق الإجهاد قبل الصب، تنتقل الإجهادات في الفولاذ حالياً إلى القضبان بضرب تشوهات الخرسانة بمعامل المرونة $\varepsilon(\tau_0) \cdot E_{PS}$ بالإضافة إلى الشد الأولي. وعندما نستخدم فولاذاً مسبق الإجهاد بعد الصب فالإجهاد في الفولاذ المسبق الإجهاد عند τ_0 يساوي إلى الشد الأولي.

- **الخطوة الثانية:** نحدد التشوهات الحرة التي تحدث عند الزمن τ_0 لحظة تطبيق الحمولة إلى الزمن t فالتغيير في التشوهات عند النقطة O يساوي إلى $[\varphi(t,\tau_0) \cdot \varepsilon_0(\tau_0) + \varepsilon_{cs}]$. أما التغير الزاوي فيساوي إلى $[\varphi(t,\tau_0) \cdot \psi_x(t,\tau_0)]$ و$[\varphi(t,\tau_0) \cdot \psi_y(t,\tau_0)]$ حيث ε_{cs} تشوهات التقلص الحرة في الخرسانة من الزمن τ_0 إلى الزمن t، وبافتراض أن قيمة تشوهات التقلص لها قيمة ثابتة على كامل المقطع العرضي.

- **الخطوة الثالثة:** نحسب الإجهادات التي تحدث تدريجياً في الخرسانة من الزمن τ_0 إلى الزمن t والتي تعيق حدوث التشوهات الحرة المقررة في الخطوة الثانية. الإجهادات المعيقة عند أي نقطة في المقطع يساوي إلى، انظر المعادلات [1 إلى 7].

$$\Delta\sigma_{restrained} = -\overline{E_C}\left[\varepsilon_{CS} + \varphi(t,\tau_0)\cdot\left\{\varepsilon_0(\tau_0) + \psi_x(\tau_0)\cdot y + \psi_y(\tau_0)\cdot x\right\}\right] \quad (18)$$

ونقول بمعنى آخر: إن التشوهات في الخرسانة تحدث بشكل حر لولا وجود الفولاذ، ولكن وجود الفولاذ يعيق هذه التشوهات ونسميها بالتشوهات المعيقة وتطرحها من التشوهات الحرة للحصول على النتيجة النهائية.

- **الخطوة الرابعة:** نحدد بالمعادلة (12) القوى عند النقطة O بالإضافة إلى العزمين وذلك من قيمة $\Delta\sigma_{restrained}$. إن التغيرات في تشوهات الخرسانة الناتجة عن ارتخاء الأسلاك الفولاذية هـي تشوهات مقيدة أيضاً والقوة تساوي إلى $A_{PS}\cdot\overline{\Delta\sigma_{Pr}}$ حيث $\overline{\Delta\sigma_{Pr}}$ القيمة المخفضة لارتخاء الأسلاك من الفترة τ_0 إلى الفترة t. والسبب أن السيلان والتقلص يخفف من ارتخاء أسـلاك الفولاذ أيضاً والقيمة المخفضة لارتخاء الفولاذ يساوي إلى الارتخاء الذاتي مضـروباً بمعامـل تخفيض يساوي تقريباً 0.8، ومن أجل قيمة دقيقة أكثر يمكن أن تحدد بالمرجع [3] [4].

تطبق القوى المقيدة عند النقطة O بالإضافة إلى العـزوم حـول محـاور y, x وجمعهـا تعطـي $\{\Delta N, \Delta M_x, \Delta M_y\}_{restrained}$ نطبق هذه القوى بالاتجاه المعاكس على المقطع المركـب المكـافئ والمساوي إلى مساحة الخرسانة بالإضافة إلـى $\left[\overline{n_{OS}}\cdot A_{ns} + \overline{n_{OP}}\cdot A_{PS}\right]$. نحسـب التشـوهات المطلوبة والإجهادات من المعادلات (13) و(14).

يساوي توزع التشوهات في الخرسانة عند الزمن t إلى مجموع التشوهات المقررة في الخطوة الأولى والرابعة. أما الإجهادات المطلوبة هي مجموع الإجهادات عند الزمن τ_0 المحسوبة في الخطوة الأولى والإجهادات مع الزمن المحسوبة في الخطوة الثانية والرابعة.

يمكن أن تستخدم خطوات التحليل نفسها من أجل المقاطع الخرسانية المسلحة العاديـة وذلـك بجعـل A_{PS} مساوياً للصفر، والعمليات السابقة نفسها يمكن أن تطبق على جوائز مركبة مصنوعة من أكثـر من نوع واحد من الخرسانة أو جوائز مركبة معدنية + خرسانة.

5- مثال عددي:

الشكل (2) يمثل مقطعاً عرضياً من الخرسانة لركيزه جسر هذه الركيزة مسبقة الإجهاد حيث الفـولاذ العادي نوع A-IIIN [6] موزع بانتظام على محيط المقطع العرضي. $A_{ns} = 0.02\ Ag$ حيـث Ag هي مساحة مقطع الخرسانة. اثنا عشر قضيباً مسبق الإجهاد غير ملحوم مع الخرسـانة مطبقـة

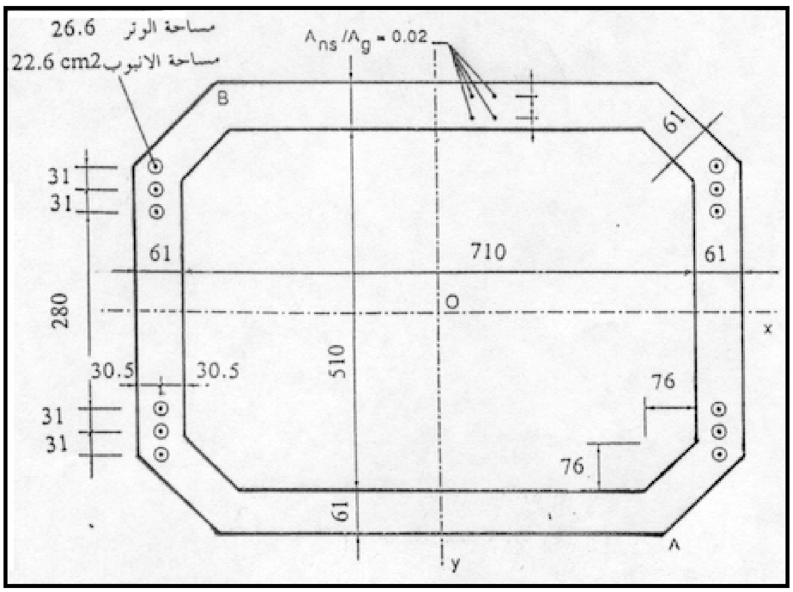
على المقطع [6]، كل قضيب يساوي $3470\,KN$ عند الزمن τ_0 . بالإضافة إلى قـوى ضـاغطة تساوي إلى$120MN$- مطبقة على النقطة O. مع عزم يساوي إلى:

$$M_y = 203\,MN.m, M_x = 203\,MN.m$$

نحدد الإجهادات عند الزمن τ_0 وعند الزمن t أي بعد حدوث عملية السـيلان والـتقلص وارتخـاء الأسلاك القيم المعطاة:

$$E_C(\tau_0) = 3415\,Gpa,\ \varphi(t,\tau_0) = 2.1,\ \varepsilon_{cs}(t,\tau_0) = -300\times10^{-6}$$

$$\Delta\overline{\sigma_{pr}} = -83\,Mpa,\ x = 0.8[5],\ E_{ns} = 200\,Gpa,\ E_{PS} = 190\,Gpa$$



الشكل رقم 2. مقطع عرضي خرساني مسبق الإجهاد لركيزة جسروسطية.الأبعاد بالسنتيمتر

عامل السيلان وتشوهات التقلص مع عامل المرونة يؤخذ من [3] . أما زمن تطبيق الحمولة فهو يوم $\tau_0 = 28$.

خواص المقطع المكافئ عند الزمن τ_0

$$n_{OS} = \frac{E_{ns}}{E_C(\tau_0)} = \frac{200.000}{34.5 \times 10^3} = 5.8$$

المقطع المكافئ مؤلف من المقطع الخرساني مطروحاً منه فراغات المسبق الإجهـاد بالإضـافة إلـى التسليح العادي $0.02\ Ag(\overline{n_{OS}} - 1)$ ويعطي الخواص التالية:

$$A = 16.3m^2,\ I_x = 89.97m^4,\ I_y = 137.8m^4$$

عامل المرونة الفعال في العمر المحدد للخرسانة يساوي إلى [المعادلة رقم (2)].

$$\overline{E_C}(t, \tau_0) = \frac{34.5}{1 + 0.8 \times 2.1} = 12.87\ Gpa$$

معاير المرونة مع الزمن للفولاذ العادي عند الزمن t :

$$\overline{n_{OS}} = \frac{200}{12.87} = 15.54$$

معاير المرونة مع الزمن للفولاذ المسبق الإجهاد عند الزمن t :

$$\overline{n_{OP}} = \frac{190}{12.87} = 14.74$$

حساب المقطع المكافئ السيلاني المتحول المؤلـف مـن مسـاحة الخرسـانة Ag بالإضـافة إلـى $0.02\ Ag(\overline{n_{OS}} - 1)$ بالإضافة $(\overline{n_{Op}} - 1)A_{PS}$ هذا يعطي الخواص التالية:

$$\overline{A} = 19.81m^2,\ \overline{I_x} = 107.9m^4,\ \overline{I_y} = 171.6m^4,\ B_x = B_y = 0$$

وبتنفيذ الخطوات الأربع نجد ما يلي:

- **الخطوة الأولى:**

$$N = -12 \times 10^4 - 12 \times 3470 = 161640\ KN$$
$$M_x = 203\ MN.m$$
$$M_y = 203\ MN.m$$

التشوهات الأولية تحدد من المعادلة رقم (13):

$$\varepsilon_0(\tau_0)=\frac{N}{E_C(\tau_0)\cdot A}=-\frac{161640\times10^3}{34.5\times10^3\times16.3\times10^6}=-287.4\times10^{-6}$$

$$\psi_x(\tau_0)=\frac{203\times10^6\times10^3}{34.5\times10^3\times89.971\times10^{12}}=0.0655\times10^{-6}$$

$$\psi_y(\tau_0)=\frac{203\times10^6\times10^3}{34.5\times10^3\times137.8\times10^{12}}=0.0427\times10^{-6}$$

وبالتعويض بالمعادلات (14) و(15) نجد ما يلي:

$$\sigma(\tau_0)=\left[-9.9153+2.259\times10^{-3}\,y+1.476\times10^{-3}\,x\right]$$

من أجل إيجاد أبعاد المحاور y, x من المعادلة (16) نحصل ما يلي:

$$\left[a(\tau_0)=6.726\text{m},\ b(\tau_0)=4.392\text{m}\right]$$

الإجهادات العظمى والصغرى هي $-21.4\,\text{Mpa}, 1.69\,\text{Mpa}$ على التوالي عند النقطة A والنقطة B انظر الشكل (4).

الإجهادات عند الزمن τ_0 في الفولاذ العادي يساوي إلى:

$$n_{OS}(\tau_0)\cdot\sigma(\tau_0)=5.86.\sigma(\tau_O)$$

وهذا يعطي:

$$\sigma_{ns}(\tau_0)=\left[-57.5157+13.085\times10^{-3}\,y+8.543\times10^{-3}\,x\right]$$

أما الإجهادات في الفولاذ المسبق الإجهاد في الزمن نفسه فيساوي إلى الشد الأولي:

$$\sigma_{PS}(\tau_0)=\frac{3470\times10^3}{26.612\times10^2}=1305\ \text{Mpa}$$

- **الخطوة الثانية:**

نحدد تغير التشوهات عند النقطة O الناتجة عن التشوهات الحرة للسيلان والتقلص.

تغير التشوه المحوري الحر:

$$2.1\left[-287.4\times10^{-6}\right]-300\times10^{-6}=-905\times10^{-6}$$

تغير التشوه الزاوي الحر:

$$2.1\left[0.0655\times10^{-6}\right]=0.13755\times10^{-6}$$

$$2.1\left[0.04279\times10^{-6}\right]=0.0896\times10^{-6}$$

- **الخطوة الثالثة:** الإجهادات المقيدة:

$$\Delta\sigma_{restrained}=-12.87[-905+0.13755y+0.0896]10^{-6}$$
$$=\left[11.647-1.8\times10^{-3}y-1.2\times10^{-3}x\right]\text{Mpa}$$

- **الخطوة الرابعة:**

خواص المقطع العرضي المكافئ السيلاني في الزمن t ومتضمناً أيضاً المسبق الإجهاد المحقون.

$$A_C=14.6m^2,\ I_{CX}=80.71m^4,\ I_{CY}=124.7m^4$$

من قيم $\Delta\sigma_{restrained}$ نجد ما يلي:

(ΔN)سيلان + تقلص $=14.6\times11.647\times10^{6}=170.9\,\text{MN}$

(ΔM_x)سيلان + تقلص $=80.71\times10^{12}\left[-1.8\times10^{-3}\right]=-14.3\,\text{MN.m}$

(ΔM_y)سيلان + تقلص $=124.7\times10^{12}\left[-1.2\times10^{-3}\right]=-144.2\,\text{MN.m}$

(ΔN)ارتخاء $=12(26.4)\cdot(-83)=-2638\text{KN}$

بتطبيق القوى المقيدة في الاتجاه المعاكس على المقطع المكافئ السيلاني عند الزمن t. نحصل علـى الزيادة في الإجهادات من المعادلات (13) و(14) نجد:

$$\Delta\sigma_0=\frac{1}{19.81\times10^{6}}\left[-170.9\times10^{6}+2638\times10^{3}\right]=-8.5\,\text{Mpa}$$

$$\Delta\gamma_x=\frac{1}{107.9\times10^{12}}\left[143\times10^{6}\times10^{3}\right]=1.32\times10^{-3}\ \text{Mpa/mm}$$

$$\Delta\gamma_y=\frac{1}{171.6\times10^{12}}\left[144.2\times10^{6}\times10^{3}\right]=0.84\times10^{-3}\ \text{Mpa/mm}$$

الإجهادات في الخرسانة عند الزمن t هي مجموع الإجهادات المحسـوبة فـي الخطـوات 1،2،3،4 نحصل على ما يلي انظر الشكل (4-b).

$$\sigma(t) = -9.9153 + 11.647 - 8.5$$
$$+ (2.259 - 1.8 + 1.3) \times 10^{-3}\, y$$
$$+ (1.476 - 1.2 - 0.8) \times 10^{-3}\, x$$
$$\sigma(t) = -6.7683 + 1.759 \times 10^{-3}\, y + 1.076 \times 10^{-3}\, x$$

لإيجاد المحور الطبيعي عند الزمن t لمحاور X و Y من المعادلة نجد:

$$a(t) = 5.839\,m \quad , \quad b(t) = 3.733\,m$$

أما التشوه المحوري والزاوي عند الزمن t فهي مجموع القيم المحسوبة في الخطوة الأولى والخطـوة الرابعة. من المركبات الإجهادية $\{\Delta\sigma_0, \Delta\gamma_x, \Delta\gamma_y\}$ بتقسيمها على $\overline{E_C}$ نجد ما يلي:

$$\varepsilon_0(t) = -287.4 \times 10^{-6} - 8.5 \big/ 12.87 \times 10^{+3} = -948 \times 10^{-6}$$
$$\psi_x(t) = 0.0655 \times 10^{-6} + 1.32 \times 10^{-3} \big/ 12.87 \times 10^{+3} = 0.167 \times 10^{-6}\ mm^{-1}$$
$$\psi_y(t) = 0.04279 \times 10^{-6} + 0.84 \times 10^{-3} \big/ 12.87 \times 10^{+3} = 0.105 \times 10^{-6}\ mm^{-1}$$

الإجهادات في الفولاذ العادي في الـزمن t هـي مجمـوع $\sigma_{ns}(\tau_0)$ و $\overline{n_{OS}}$ مضـروباً بتغيـر الإجهادات في الخرسانة من الخطوة الرابعة.

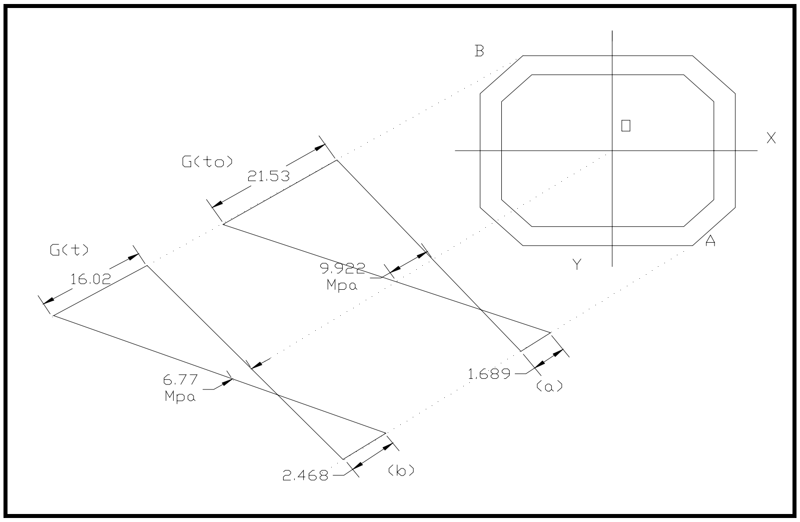
$$\sigma_{ns}(t) = -57.5157 + 13.085 \times 10^{-3}\, y + 8.543 \times 10^{-3}\, x +$$
$$+ 15.54 \left[-8.5 + 1.3 \times 10^{-3}\, y + 0.8 \times 10^{-3}\, x \right]$$

أو

$$\sigma_{ns}(t) = -189.6 + 33.287 \times 10^{-3}\, y + 20.975 \times 10^{-3}\, x \qquad Mp_a$$

الإجهاد في الفولاذ المسبق الإجهاد عند الزمن t يساوي إلى مجموع الشـد الأولـي بالإضـافة إلـى تخفيض ارتخاء الأسلاك مع $\overline{n_{PS}}$ مضروباً بتغيير الإجهادات في الخرسانة المحسوبة فـي الخطـوة الرابعة.

$$\sigma_{PS}(t) = 1305.46 - 83 + 14.74 \left[-8.498 + 1.32 \times 10^{-3}\, y + 0.8 \times 10^{-3}\, x \right]$$
$$\sigma_{PS}(t) = 1097.2 + 19.456 \times 10^{-3}\, y + 12.38 \times 10^{-3}\, x \qquad Mpa$$



شكل رقم 3. الإجهادات في الخرسانة من الزمن τ_O إلى الزمن t

6 - نتائج وتوصيات:

- الإجهادات في الخرسانة عند الزمن t في النقاط A و B انظـر الشـكل رقـم b – 3 هـي: (2.469 Mpa , -16.02 Mpa) على التوالي، فالإجهادات الضاغطة في الليـف الحـدي انخفضت من Mpa 21.538- عند الزمن τ_O إلى Mpa 16.02- عند الزمن t أي 25% وهذا ناتج عن التقلص والسيلان وارتخاء الأسلاك.
- يجب أن يؤخذ بالحسبان وجود التسليح العادي في المقطع المكافئ من أجل تحديد الإجهادات مع الزمن في الخرسانة مع أسلاك التسليح المسبق الإجهاد.
- تعد الطريقة المستخدمة أكثر الطرق دقة إذ تعتمد على طريقة AEMM وعلى طريقة المقطـع المكافئ السيلاني، أي حل معادلة التشوهات تؤدي إلى معادلة جبرية المعادلة رقم 1 فـي حـين الطرق الكلاسيكية الأخرى كطريقة معدل السيلان Rate of Creep حيـث حلـول معادلـة التشوهات تؤدي إلى معادلة تفاضلية وطريقة معامل المرونة العادي وهذه الطرق تعطـي قيمـاً أكثر من المتوقع.

تعريف المصطلحات:

$A, B_X, B_Y, I_X, I_Y, I_{XY}$: مساحة المقطع المكافئ والعزم الأول الساكن المكافئ وعزم العطالة المكافئ حول المحور Y,X عند زمن تطبيق الحمولة.

$\overline{A}, \overline{B}_X, \overline{B}_Y, \overline{I}_X, \overline{I}_Y, \overline{I}_{XY}$: مساحة المقطع المكافئ السـيلاني، والعـزم الأول السـاكن المكافئ السيلاني، وعزم العطالة المكافئ السيلاني حول المحور X , Y عند الزمن t .

$E_C, \overline{E}_C$: عامل مرونة الخرسانة العادي عند الزمن τ_0 وعامل مرونة الخرسانة في العمـر المحدد t .

E_{ns}, E_{ps} : عامل مرونة الفولاذ العادي والمسبق الإجهاد على التوالي .

M_X, M_Y :العزم حول المحور X والعزم حول المحور Y .

N : القوة المحورية المطبقة.

α_{ns}, α_{ps} :معاير مرونة الفولاذ العادي والمسبق الإجهاد .

O : يشير إلى التشوه أو الإجهاد عند النقطة O .

t, τ_0 : الزمن الجاري والزمن الحظي عند تطبيق الحمولة على المنشأ.

ε : التشوه العادي المحوري.

ε_{CS} : تشوه التقلص في الخرسانة .

σ : الإجهادات العادية .

φ : عامل السيلان .

x: عامل تقادم الخرسانة .

$\Delta\overline{\sigma}_{pr}$: تخفيض الارتخاء الذاتي للأسلاك .

$\gamma_X = \frac{d\sigma}{dy}, \gamma_Y = \frac{d\sigma}{dx}$.

المراجع

1- Bazant Z. P: Prediction of concrete creep effects - using of age - adjusted effective modulus method. ACI Journal. April 1972.

2- Bazant Z.P and Kim . S.S : " Approximate relaxation function for concrete " . Journal of the structural division , procee , ASCE, V. 705, 2695-2705

3- CEB. Model code for concrete structures. Paris. 1978.

4- Digler WH: creep analysis of prestressed concrete using creep - transformed section properties. PCI Journal. 1982.

5- Ghali. A., Favre R.: Concrete structures stresses and deformation. 1986.

6- PN-91/S-10042 " Obiekty mostowe konstrukcje betenowe , zelbetowe i sprenzone projectowanie " Polish standard for bridge structures ".1992

7- Trost H: Avswirkungen des supepositionsprizip auf Krech und relaxationsprobleve bei beton und spanbeton. 1967

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 1999/8/3.