العوامل الأساسية المؤثرة في تحليل السلوك اللاخطي لعناصر الخرسانة المسلّحة[1]

المهندس خالد المعاز[2] **الدكتور المهندس ساطع بدوي[3]**

الدكتور المهندس جورج راكيوتانو[4]

الملخص

يعنى هذا البحث بتحليل سلوك الجيزان الخرسانية المسلّحة بنسبة تسليح عادية توافق شروط و مواصفات كودات التصميم الشائعة، وذلك لحالتين متمايزتين مهمتين في التصميم ومعايير انهيار العناصر الإنشائية وهما مسألة الانعطاف Bending Problem ومسألة القصShear Problem، حيث تم إلقاء الضوء على السلوك اللاخطي Nonlinear Behavior في عناصر الخرسانة المسلّحة، وذلك في المراحل المتقدمة من عملها في مقاومة الحمولات المطبقة.

في هذا البحث تم إظهار أهم العوامل التي تؤثر في نتائج التحليل اللاخطي في نمذجة سلوك هاتين الحالتين بشكل منفصل، فقد أنجزت الدراسة للنماذج وفق معايير مختلفة تتضمن تأثير درجة كثافة شبكة العناصر المحدودة (F.E.Grid Refinement)، بالإضافة إلى مقدار خطوة التحميل (Load Step Size) في مراحل التحليل اللاخطي التكراري (Nonlinear Analysis Iterations) في البرنامج، و كذلك تأثير مقاومة الشد في الخرسانة (concrete Tensile Strength).

[1] أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندس خالد المعاز بإشراف الدكتور ساطع بدوي ومشاركة الدكتور جورج راكيوتانو.

[2] طالب ماجستير– قسم هندسة النقل والمواصلات– كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

[3] أستاذ– قسم هندسة النقل والمواصلات– كلية الهندسة المدنية–جامعة دمشق.

[4] مدير مشروع– قسم هندسة الجسور– إدارة الطرق الوطنية السويدية– السويد.

ركّز البحث على مقدرة نموذج التشققات الموزعة في التنبؤ بمنحنى التشوه حمولة (Load-Deflection Diagram) للعنصر الإنشائي بالإضافة إلى نموذج التشققات الملاحظة والحمولة الأعظمية أو حمولة الانهيار النهائية فيه(The Ultimate Failure Load)، وقد بنيت المقارنات و ميكانيكيات الاستدلال على النماذج الرياضية مع تغيير للعوامل المؤثرة في السلوك اللاخطي السابقة الذكر وفقاً للبرنامج، ومدى محاكاتها و تقاربها لعينات واقعية تم اختبارها في المخبر، و مثلت العينات الحالتين المطروحتين للبحث فسلسلة الجيزان المجربة الأولى تمثل حالة الانعطاف و سلسلة الجيزان المجربة الثانية تمثل حالة الجيزان العميقة و المعبرة عن حالة القص.

مقدمة و استعراض مرجعي: Introduction and Background

تعدُّ مادة الخرسانة المسلّحة مادة إنشائية مهمة ورئيسة ذات تطبيقات عديدة ومتنوعة في مجال الهندسة المدنية .يتغير سلوك هذه المادة الإنشائية المختلطة المؤلفة للعناصر الإنشائية الحاملة عند مقاومة الحمولات المؤثرة، فهي تسلك سلوك المادة المرنة الخطية (المتناحية) ذات الخواص المتماثلة في كل الجهات (Isotropic) وذلك ضمن مجال من الحمولة المؤثرة صغير نسبياً حيث تتغير فيه الإجهادات الداخلية على اختلاف أنواعها بمجالات أقل من حدود معينة، كما تسلك هذه المادة سلوكاً لا خطياً ضمن المجال المتبقي من عمر العنصر الإنشائي حتى لحظة التكوّن للميكانيكية الكاملة للانهيار فيه، وفي الأحوال العامة لنماذج من العناصر الإنشائية الخرسانية المسلّحة بتسليح عادي يكون مجال السلوك الفعلي اللاخطي أكبر من مجال السلوك الخطي، وعلى الرغم من ذلك لم يتم حتى الآن تبني هذا السلوك في النواحي التصميمية والعملية [2].

إن الحد الذي يتغير فيه سلوك عناصر الخرسانة المسلّحة لا يعتمد فقط على قيمة الحمولة المؤثرة فيما لو تم تثبيت كامل المعايير التصميمية الأخرى، فقد أثبت (Z.Bazaṇt) و(Cedoliṇ) تأثير حجم المنشأ المدروس (Size Effect) على اختلاف هوامش الأمان المقدمّة في معادلات التصميم المدونة في الكودات والتي لم تؤخذ بالحسبان حتى الآن في التصميم [2، 3].

عندما يحتاج المهندس المصمم إلى معرفة السلوك اللاخطي في منشآت الخرسانة المسلّحة فهناك خياران: الخيار الأول يكون بالاعتماد على الاختبارات في المخابر(Lab. tests) و الخيار الثاني هو التمثيل والنمذجة بمعونة الحاسب في المكتب (Structural Modeling) وعلى الرغم من كون الخيار الأول يعطي نتائج واقعية وفعلية إلا أن تطبيق هذا الخيار محصور ضمن حالات خاصة للأبعاد والأحجام

والأشكال، فضلاً عن نماذج تحميل محدودة وظروف استناد مثالية، ولكن عندما تتعقد الجملة الإنشائية الواجب تمثيلها فإنَّ ذلك ينعكس على صعوبة النمذجة في ظروف المخبر ضمن التكلفة المقبولة. أضف إلى ذلك مشكلة الانحراف والتباعد عن الدقة بسب تغير مقياس العينة أو حجم المنشأ. أما في الخيار الثاني فلا توجد حدود أو قيود للتطبيقات وإنما تعتمِد الوثوقية (Reliability) في التمثيل والنتائج بشكل كبير على تطبيق القوانين اللاخطية لبنية المواد وعلى صحة بناء نموذج العناصر المحدودة المدروس ومقدرة البرنامج المستخدم [8].

إن السلوك اللاخطي في منشآت الخرسانة المسلّحة ناتج بشكل رئيسي عن ظهور التشققات في الخرسانة والخضوع في فولاذ التسليح فضلاً عن حالات انهيار التماسك بين الفولاذ والخرسانة (Bond-Slip) [5,8]. وكما هو معروف إن سلوك الخرسانة المسلّحة يتأثر بشكل كبير بالحرارة ونسبة التشوه والزحف والتقلص، لذلك لا بد من الإشارة إلى أن هذا البحث يبين سلوك الخرسانة المسلّحة في الظروف الطبيعية من حيث درجات الحرارة ومع ظروف التحميل القصيرة الأمد [8].

إن تحليل سلوك الخرسانة المسلّحة وفق نظرية العناصر المحدودة يدخل ضمن تقنيتين

1 - نموذج التشققات المنفصلة أو المجزأة (Discrete Crack Model).

2 - نموذج التشققات المبعثرة أو الموزعة (Smeared Crack Model).

في الأولى تتمُّ نمذجة عناصر الخرسانة بشكل منفصل عن عناصر الفولاذ مع تضمين لعناصر ربط غير خطية تعبر عن التماسك بين فولاذ التسليح والخرسانة المحيطة بالقضبان، وفي هذه الطريقة تتمُّ نمذجة شق وحيد من مجموعة شقوق بشكل

مفرد Discrete باستخدام نقاط وعقد منفصلة للعناصر المحدودة، وهنا يتم إجبار الشق بإتباع مسار محدد له مسبقاً، وتتم عادة النمذجة في هذه الطريقة بتغيير شبكة العناصر المحدودة بشكل تكراري لتوافق الانتشار والتقدم والامتداد للشقوق. أما الثانية فيتم فيها تمثيل التسليح ضمن العناصر المحدودة بتعريف خصائص مادة التسليح ضمنها (Smeared Fashion)، و يشمل التعريف نسبة حجم التسليح إلى نسبة حجم العنصر بالإضافة إلى زوايا توجيه مادة التسليح وفقاً لإحداثيات العنصر المحلية (Local Coordinate Axis) [1 ، 3 ، 8].

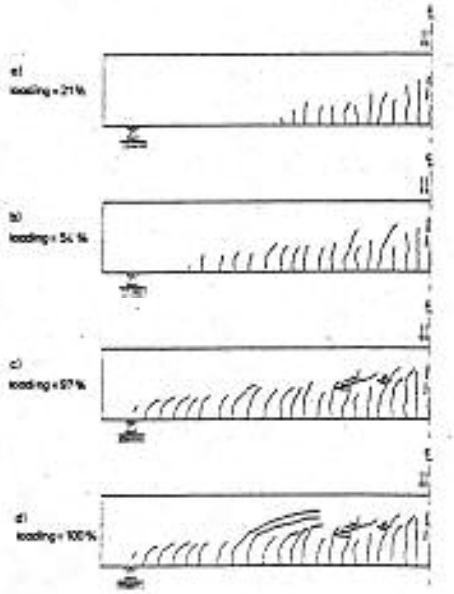
يتم التمثيل لعناصر الخرسانة المسلحة في البرامج ذات المقدرات العالية مثل ANSYS, BAQUS, DIANA بواسطة عناصر خرسانية تملك خصائص التشقق (Cracking) عند الشد، والتحطم أو التهشم (Crushing) عند الضغط مع المقدرة على نمذجة ثلاث مواد إضافية تعبَر عن قضبان التسليح وذلك وفق زوايا مختلفة منسوبة إلى إحداثيات العناصر المحلية [1].

في هذه الطريقة ينتشر تأثير الشق على عرض العنصر المحدود الموافق، وتعدُّ المادة من وجهة نظر تحليلية، مستمرة متصلة (Continuum) وكأنها تحوي عدداً غير محدود من التشققات على شكل حزمة موزعة، وعند حدوث تشقق فإن عمل المادة أصبح قائم التناحي (Orthotropic Materiał) حيث تصبح الاتجاهات الرئيسية على طول اتجاه التشققات، وهنا يتم تغيير ثوابت المادة ومعاملاتها بشكل متعاقب في البرنامج.

1- التجارب المخبرية: (Experimental Tests)

1-1- حالة الجائز الأول:

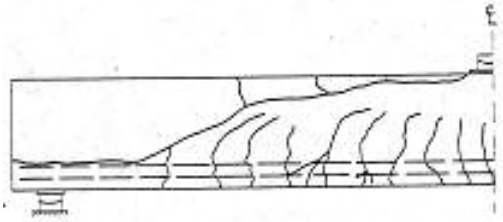
وهي حالة الجائز المسلح بشكل نموذجي بتسليح طولي مقاوم للانعطاف، يبدأ الانهيار عند بدء خضوع فولاذ التسليح حيث يطرأ نقصان في الصلابة و انكسار في منحنى التشوه–حمولة الشكل (7)، و يتقدم الانهيار مع زيادة تشوهات تسليح الشد مصطحباً معه تشققات واضحة في الخرسانة و تشوهات ضخمة.



الشكل (1) تطور التشققات في تجربة الجائز الأول

يظهر الشكل (1) تطور الانهيار في الجائز حيث تظهر التشققات بدايةً في منتصف الجائز على هيئة تشققات انعطاف عند زهاء 9% من الحمولة المسببة للانهيار الشكل (a)، و مع زيادة شدة الحمولة المؤثرة تتطور التشققات باتجاه المسند مع انحناء و

ميلان بسيطين لهذه التشققات بسبب تراكب الحالة الإجهادية قص– انعطاف في المنطقة الشكل (b)، و يوضح الشكل(c) نموذج التشققات قبل الانهيار. وأخيراً تظهر تشققات قطرية تتوجه متسارعةً نحو نقطة تطبيق الحمولة الشكل (d) .

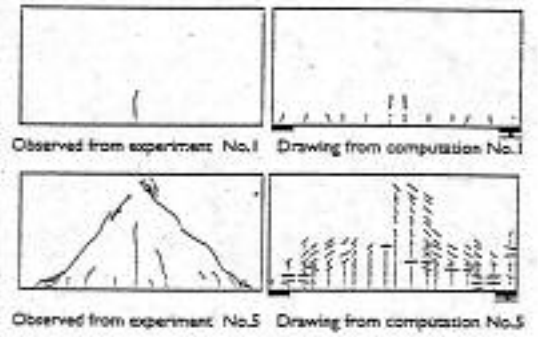


الشكل (2) التشققات النهائية في الجائز عند الانهيار

تفقد الخرسانة عند الانهيار المقاومة تماماً على القص و يظهر عندها شق على مسار القضبان في منطقة التماسك الشكل (2)، و يمكن القول: إنَّ الشقوق على مسار القضبان تظهر نتيجة لانهيار الجائز وليست سبباً له. [7].

1-2- حالة الجائز الثاني

يوضح الشكل (3) انهيار جائز خرساني مسلح تسليحاً عادياً و مسنوداً استناداً بسيطاً مثالياً، مواصفات الجائز المجرب هي أن الجائز يحوي تسليحاً ممدوداً طولياً كافياً لمقاومة عزوم الانعطاف المتولدة من نموذج التحميل الموضح و لكنه غير مسلح تجاه القوى القاصة.



الشكل (3) انهيار الجائز الثاني

يظهر نموذج الانهيار أنه انهيار ناتج عن إجهادات الشد الرئيسية، و يبدأ الانهيار على شكل تشققات قطرية تتولد عند مستوي المحور السليم في جسد المقطع وذلك بعد تجاوز قيمة الإجهادات الرئيسية في المنطقة مقاومة الشد في الخرسانة، ثم يتمدد الشق حتى يندمج و يلتقي مع الشقوق الشعرية المحيطة في قضبان التسليح في المنطقة بين المسند و الشق القطري و الناتجة عن انهيار التماسك بين الفولاذ الممدود و خرسانة المحيط، و تبدي وضعية الجائز في هذه الحالة استقراراً يتطلب زيادة الحمولة المؤثرة، و بعد ذلك يتطور الشق بالترافق مع انزلاق القضبان الطولية و مع زيادة ملحوظة بالسهوم و التشوهات ثم ينهار الجائز بشكل تام عند وصول الشق إلى منطقة تركز الإجهادات في منطقة الضغط، و ذلك عند مكان تطبيق الحمولة المركزة، أي أن الضعف الذي حصل بالجسد اصطحب معه تهشماً في منطقة الضغط. [6].

2- النمذجة الإنشائية : (Structural Modeling)

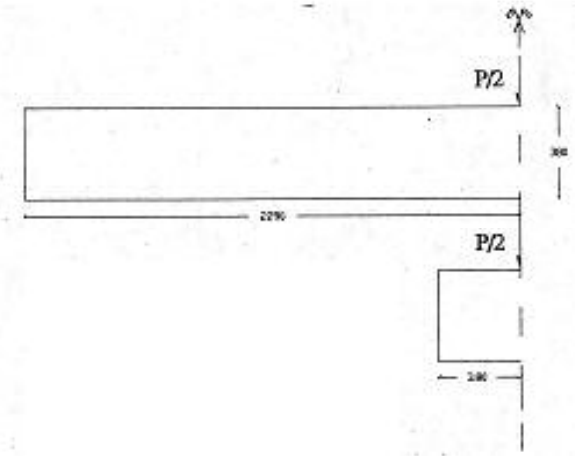
إن القصور في التفكير الإنساني هو عدم إدراك سلوك المتغيرات المعقَدة والمحيطة به والتقاطها في عملية واحدة، وإن الطريقة المناسبة للتعامل مع هذه المنظومات هو تجزئة هذه الأنظمة المعقَدة وتقسيمها إلى مكونات وأجزاء معروفة السلوك إذْ من هذه العناصر الجزئية تتمُّ إعادة بناء النموذج أو الجملة ذات السلوك المعقد لدراسة سلوكها المجهول .

إن فلسفة التفكير هذه قادت إلى تطبيقات واسعة ومتنوعة لنظرية العناصر المحدودة (F.E.M) لتشمل جميع الأصعدة الهندسية والفيزيائية، والنمذجة وفق هذه النظرية في المسألة المطروحة تحتاج إلى تحديد الشكل الهندسي للعنصر المدروس (Geometry) فضلاً عن تحديد خواص المادة وثوابتها (Constitutive Models).

2-1 . نمذجة الشكل الهندسي : Geometrical Modeling

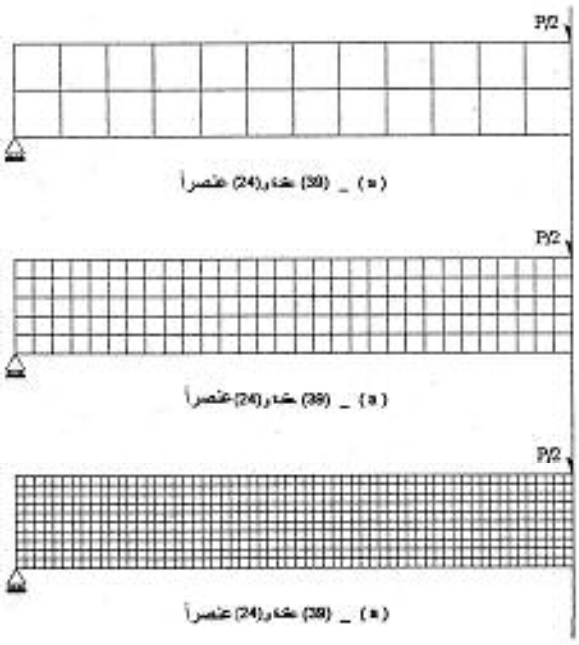
لكي يتم التعبير بشكل واضح عن حالات الدراسة المطروحة في هذا البحث فقد تمت النمذجة للجائزين الأول الذي فيه نسبة الارتفاع إلى المجاز 1/12 كتمثيل للحالة الأولى

وهي حالة الانعطاف، والثاني هو الجائز الذي فيه نسبة الارتفاع إلى المجاز 1/2 و يعبر هذا النموذج عن حالة القص. والشكل (4) يوضح النماذج المعتمدة في الدراسة.
وقد تمت نمذجة نصف العنصر الإنشائي بسب التناظر التام للمنشأ من حيث التصنيف.و حتى تتم دراسة تأثير كثافة الشبكة في نتائج التحليل لذلك فقد قسّم النموذج الأول إلى ثلاث شبكات.



الشكل (4) أبعاد الجيزان المعتمدة في النمذجة

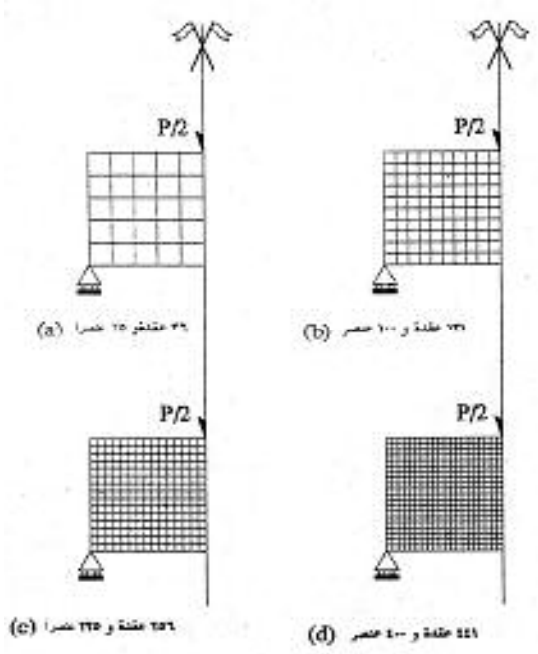
الشكل (5). الأولى Mesh1 تحتوي عنصرين محدودين في الارتفاع الثانية Mesh2 تحتوي خمسة عناصر مع الارتفاع و الثالثة Mesh3 تحتوي عشرة عناصر مع الارتفاع. أما في النموذج الثاني بحكم أنه حساس تجاه الكثافة لشبكة العناصر المحدودة بسب التغير الكبير للإجهادات مع الارتفاع، فقد تم تقسيم النموذج إلى خمسة عناصر بالارتفاع في الشبكة الأولى. (Mesh1 أما الشبكة الثانية Mesh2) فكانت بعشرة عناصر مع الارتفاع والشبكة الثالثة(Mesh3) خمسة عشر عنصراً مع الارتفاع والشبكة الرابعة Mesh4 كانت بعشرين عنصراً مع الارتفاع الشكل (6).
وفي كل النماذج المدروسة تمت نمذجة الخرسانة باستخدام عناصر محدودة مستوية رباعية الأضلاع2D Quadrilateral Finite Elements.



الشكل (5) تقسيمات شبكة العناصر المحدودة للجائز الأول

2-1 . نمذجة بنية المادة : (Constitutive Model)

إحدى أهم تقنيات النمذجة المتقَدمة لسلوك الخرسانة المسلّحة هي نمذجة التشققات الموزعة Smeared Crack Models، وفي هذه الطريقة يتم نمذجة المادة كونها غير متناحية و مرنة مع تخفيض للعوامل في الاتجاه الناظمي على مستوي الشق، و بمعنى آخر تتمُّ تمثيل التشققات بتعديل خصائص المادة لتعبر عن انقطاع بالاجهادات وليس تجزيئاً للمادة [3,8].



الشكل (3)– تقسيمات شبكة العناصر المحدودة للجائز الثاني

وفي المسألة المستوية المطروحة بين أيدينا تكتب علاقات بنية المادة على الشكل الآتي:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & o \\ \upsilon & 1 & o \\ o & o & \dfrac{(1-\upsilon)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \qquad (1)$$

حيث: $d\sigma_X$ هي خطوة إجهادية (إجهادات تفاضلية) موافقة للخطوة الانفعالية التشوهية. $d\varepsilon_x$ ، $d\sigma_y$ هي خطوة إجهادية (إجهادات تفاضلية) موافقة للخطوة

الانفعالية التشوهية. $d\varepsilon_y$ ، $d\tau_{xy}$ هي خطوه إجهادية (إجهادات تفاضلية) موافقة للخطوة الانفعالية التشوهية. $d\gamma_{xy}$.

إن المعيار الأساسي للانهيار الذي تم تبنيه في هذه الدراسة هو مقدار شدة الإجهادات الرئيسية (Principal Stresses)، وأن تشكل الشق القطري (Diagonal Crack) هو عندما تزداد الإجهادات الشادة الرئيسة في الخرسانة عن متانة الشد القصوى، ويكون اتجاه الشق عندئذ بالاتجاه المتعامد مع اتجاه الشد الرئيسي أو بمعنى آخر موازياً لإجهادات الضغط الرئيسة.

تتمُّ نمذجة تشكل الشق في معادلات بنية المادة بتخفيض معامل المرونة للخرسانة إلى الصفر على طول مسار الإجهادات، وتكون عندئذ المعادلات وفق الاتجاهات الرئيسية الجديدة.

$$\begin{aligned} d\sigma_1 &= 0 \\ d\sigma_2 &= E.d\varepsilon_2 \\ d\tau_{12} &= \beta.G.d\gamma_{12} \end{aligned} \qquad (2)$$

ويعبر عن هذه المعادلات بشكل مصفوفي من الشكل:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} o & o & o \\ o & E & o \\ o & o & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \qquad (3)$$

حيث: المؤشران 1,2 هما المحوران الرئيسيان:

العامل $o \langle \beta \langle 1$ كنسبة دون واحدات يعبر عن قدرة الخرسانة المتشققة على نقل إجهادات القص بين جانبي الشق من خلال تشابك الحصويات(Aggregate Interlock)، وقد أعطي في الحالات الدراسية هذه قيمة ثابتة (0,4) [4].

أما إذا تطورت الإجهادات الرئيسة σ_2 أكثر من متانة الشد للخرسانة فسوف يتكون شق ثانٍ عمودي على الأول وتصبح العلاقات حينئذ من الشكل المصفوفي:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} o & o & o \\ o & o & o \\ o & o & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \qquad (4)$$

يوضح الجدول أدناه قيم ثوابت ومواصفات المواد كمتحولات دخل في البرنامج:

المادة	الثابت	الرمز	القيمة
الفولاذ	معامل يونغ	Es	200×10^3 MPa
	إجهاد الخضوع	Fy	414 MPa
الخرسانة	معامل يونغ	Ec	24,8.10 MPa
	إجهادات الشد المسببة للتشقق	Ef	2,76 MPa
	معامل بواسون	ν	0,2
	معامل نقل القص على طول الشق	β	0,4

3-التحليل اللاخطي : (Nonlinear Analysis)

إن السلوك اللاخطي للعناصر لا يمكن تمثيله مباشرة بمجموعة المعادلات الخطية وإنما يجب إدخال تقريب وتصحيح متكرر، وإحدى أهم طرائق التحليل اللاخطي هو التحميل التدريجي والتوازن التكراري Increment Loading and Equilibrium (Iteration) [1]، حيث يتم في هذه الطريقة تجزئة الحمولة ضمن مجموعات متسلسلة وبخطوات متعددة رئيسة، وقد تم اعتماد خيار التجزئة وفق طريقة نيوتن – رافسون المعدلة (Modified Newton-Raphson) وتمكّن هذه الطريقة من تجزئة الخطوات الرئيسة أيضاً إلى خطوات فرعية ضمنها أيضاً، وذلك لتلافي تراكم الخطأ في تطبيق خطوة الحمولة، ومن ثَمَّ تصبح النتائج الأخيرة أقرب للتوازن وبناء عليه توجه نتائج

التحليل نحو الدقة الأكبر، والجدير بالذكر أن البرنامج يقوم بتحديث مصفوفة القساوة للعناصر المحدودة في نهاية كل خطوة تحميل ليعكس بذلك التغيرات اللاخطية في القساوة الإنشائية (Structural Stiffness) وذلك قبل المضي في تطبيق الخطوة التالية، هذه التغيرات في القساوة الإنشائية والتي أسبابها الأساسية هي وجود التشققات في العنصر والخضوع في فولاذ التسليح [4 ،8 ، 1].

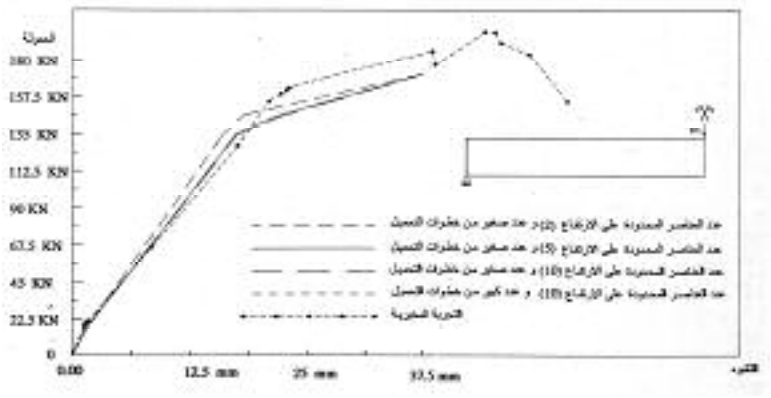
4- تحديد تأثير العوامل في التحليل و السلوك اللاخطي:

Specify the Influence of the Factors on the Nonlinear Behavior :

4-1 . دراسة تأثير كثافة شبكة العناصر المحدودة : F.E.Mesh Refinement

أصبح من البديهي في معايير نمذجة المنشآت أن زيادة كثافة شبكة العناصر المحدودة يقود إلى نتائج أدق وأقرب نحو الصحة، و ذلك عندما يتم اعتماد خصائص المادة وهي في الحالة الخطية. و في هذا البحث تتم دراسة تأثير كثافة شبكة العناصر المحدودة و ذلك ضمن اعتبارات التحليل اللاخطي.

4-1-1. الحالة الأولى: يوضح الشكل (7) منحنيات الحمولة – تشوه و كل منحنى من هذه المنحنيات يتبع إلى نموذج الجائز الأول ولكن باختلاف كثافة الشبكة، وقد تم تطبيق حمولات بتدرجات واسعة (عدد قليل من الخطوات) على كل النماذج ما عدا النموذج ذا الشبكة الكثيفة، حيث كان تطبيق الخطوات على هذه الشبكة بشكلين بتدرجات واسعة و بتدرجات صغيرة.

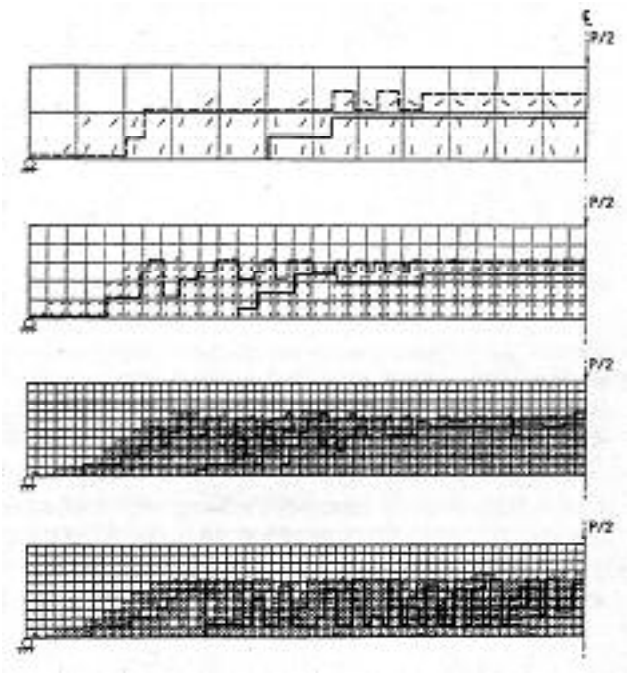


الشكل (7) منحنى التشوه – حمولة للجائز الأول

من مراقبة التغير في المنحنيات نستخلص عدم وجود تأثير لكثافة الشبكة في مجال قيم الحمولات ذات القيم المنخفضة والتي هي أدنى من القيم التي تقود إلى بداية ظهور شقوق الانعطاف، وبعد وصول قيم الحمولة إلى هذه العتبة فإنَّ المنحنى يبدي انكساراً كدليل على انخفاض الصلابة بشكل تدريجي ثابت، وفي قيمه أخرى للحمولة (العتبة الثانية) نلاحظ انخفاض تناقص حاد للصلابة وهي الحالة التي يبدأ فيها فولاذ التسليح المقاوم للانعطاف بمرحله الخضوع [4، 5].

إن زيادة كثافة الشبكة يجعل المسافات بين المنحنيات تقل و يؤكد التقارب مع النتائج المخبرية.

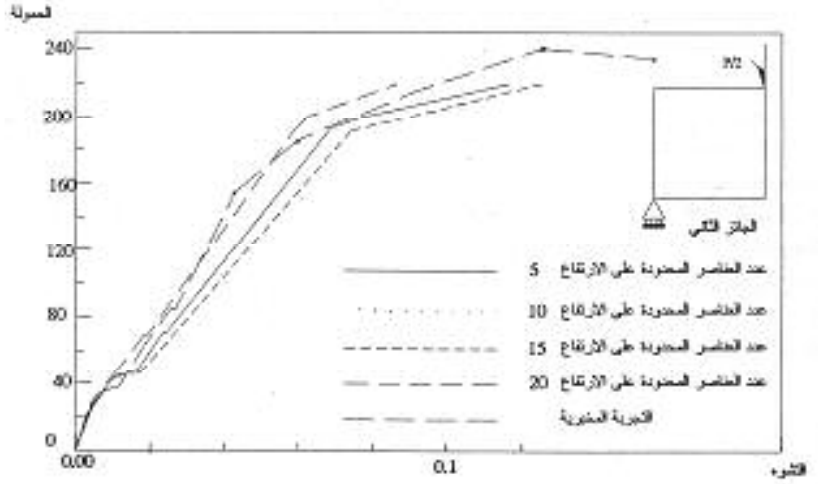
في الأشكال (8) نجد أن الشبكة قليلة الكثافة (Coarse Mesh) ليس بمقدورها تمثيل إجهادات القص أو حتى اتجاه التشققات في حين في الشبكة الكثيفة نجد أن اتجاه التشققات واضح في المنطقة المحصورة بين محور المسند وضعف ارتفاع الجائز حتى يلاحظ وجود تشققات الدهس عند الاستناد في نماذج الشبكات الكثيفة [4، 5].



الشكل (8) نموذج التشققات في الجائز الأول

من تحليل السلوك الإنشائي للنماذج المذكورة يلاحظ أنَّه في مستوى كافٍ من الكثافة لشبكة العناصر المحدودة، فإن تطبيق خطوات ذات مقدار صغير للحمولة يجعل بمقدور المنطقة المتشققة من العنصر أن ترسل بعض الإجهادات إلى المناطق المجاورة خلال مرحلة تحليل تكراري جديدة والموافقة لخطوة تحميل إضافية في البرنامج، ومن الممكن أن لا يتم تشقق بعض المناطق المجاورة لعناصر متشققة في حالة استخدام الشبكة الكثيفة، يطلق على هذه الظاهرة اسم مركزية توضّع التشققات (Crack Localization) بينما استخدام شبكات قليلة الكثافة أو تطبيق درجات ومراحل ضخمة للحمولات يجعل بعض المناطق في الجائز، تتشقق سريعاً، وذلك يحول دون إدراك مساعدة المناطق الأخرى في الشبكة خلال مرحلة التحليل وتطبيق الحمولة الآتية [3، 8].

2-1-3 . الحالة الثانية: إن التدرج الكبير للإجهادات على طول ارتفاع الجائز يدفع إلى ضرورة زيادة كثافة الشبكة الممثلة للجائز الثاني المعبر عن الحالة الثانية، و من مراقبة السلوك الإنشائي للنموذج نجد في البداية أن سلوك الجائز الثاني شبيه بسلوك الجائز الأول، إذ تظهر تشققات للانعطاف واضحة في منتصف المجاز، ولكن بعد كمية معينة من التشققات يلاحظ وجود مجال أفقي في المنحنى التشوه– حمولة.

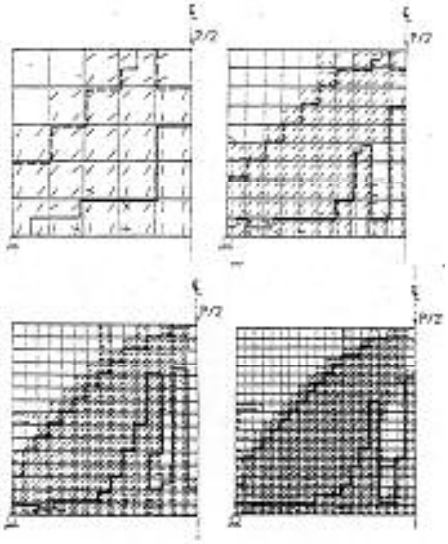


الشكل (9) تأثير عدد خطوات التحميل وكثافة الشبكة في منحنى التشوه– حمولة للجائز الثاني

كتعبير عن تحول سلوك الجائز من الانعطاف إلى سلوك قوس مربوط بشداد (Tied Arch) بالترافق مع زيادة سريعة في السهم الموافق الشكل(9). وبعد حدوث هذا الفعل القوسي في الجائز يبقى المنحنى سهم– حمولة خطية تقريباً حتى يبدأ فولاذ التسليح بالدخول في مرحلة الخضوع، ومن الملاحظ أن التشقق نتيجة إجهادات الشد الرئيسي في هذا العنصر الإنشائي حدث عند نسبة صغيرة من الحمولة اللازمة لإخضاع فولاذ التسليح، وبمعنى آخر إن العنصر الإنشائي يقدم متانة إضافية متبقية Residual Strength معتبرة بعد حدوث تشققات القص. والتفسير الهندسي لهذه الحالة أن هذه

المتانة الإضافية تعبر عن القدرة المتبقية في العنصر المتشقق لمقاومة الضغط الموازي للشق [4، 7].

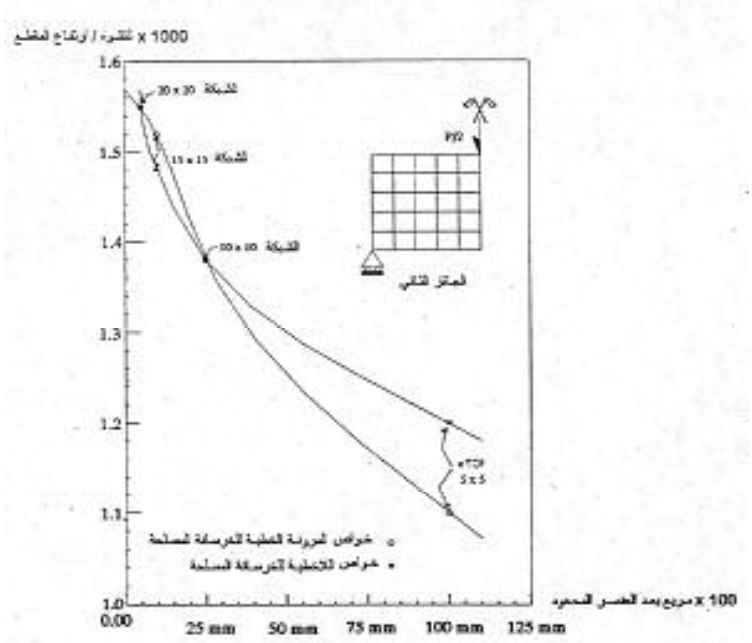
يلاحظ من تحليل المخططات في الشكل (10) أن الشبكة الكثيفة ذات قدرة واضحة على تمثيل مركزية توضع التشققات في النموذج.



الشكل (10) نموذج التشققات في الجائز الثاني.

أظهر الباحثان (Dodds , Darwin) من خلال الشكل (11) أن العلاقة بين قيمة السهم في منتصف مجاز الجائز الثاني مع تغير أبعاد العنصر المحدود وذلك في المراحل الأولى من سلوك الجائز (قبل عتبة خضوع فولاذ التسليح) تتأثر بنموذج التحليل المعتمد في البرنامج إن كان تحليلاً خطياً أو تحليلاً لا خطياً [4، 7].

ويظهر الشكل أن نتائج التحليل اللاخطي الذي يحاكي السلوك الفعلي في الخرسانة متقارب فعلاً مع الدقة كلما صغر مقدار العنصر المحدود في الشبكة أكثر منه في التحليل الخطي.



الشكل (11) مقارنة حساسية درجة كثافة الشبكة في التحليل اللاخطي و التحليل الخطي

2-3 . دراسة تأثير مقدار خطوة التحميل (The Size of Load Steps):

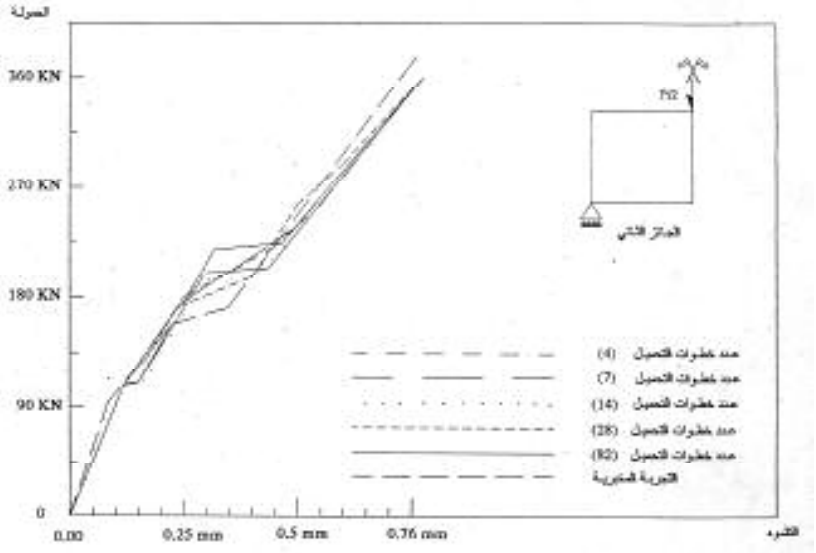
3-2-1 . الحالة الأولى :نجد بالعودة إلى المخطط (7) أن الجائز الأول غير حساس تجاه مقدار خطوة التحميل و ذلك على اختلاف كثافة شبكة العناصر المحدودة التي تم تقسيم الجائز وفقها.

3-2-2.الحالة الثانية: يلاحظ عند تحليل سلوك في الحالة الثانية وفقاً لمخطط الحمولة – التشوه وذلك في حالات متعددة من التحليل اللاخطي، اختلاف هذه الحالات عن بعضها هو بمقدار خطوات التحميل أو عدد الخطوات فهي تتدرج من أربع خطوات و سبع خطوات و أربع عشرة خطوة فضلاً عن ثمانٍ وعشرين خطوة، وأخيراً اثنان وثمانون خطوة تحميل متساوية. ويتم تطبيق هذه الخطوات المتساوية حتى بلوغ القيمة القصوى للانهيار وذلك لشبكة معينة من العناصر المحدودة التي تحوي خمسة عشر

عنصراً في الارتفاع.بمقارنة هذه المنحنيات وفق الشكل (12) يتبين أن استجابة الجائز وسلوكه حتى بلوغ القيمة القصوى للانكسار تضم أربع مناطق متمايزة:

– المنطقة (1) تعبر عن حالة المرونة الخطية حيث تكون إجهادات الشد في الخرسانة أقل من متانة الشد القصوى ولا يوجد تشكل لأية شقوق في العنصر المدروس.

– المنطقة (2) تعبر عن تشكل لتشققات الانعطاف مع زيادة السهم.



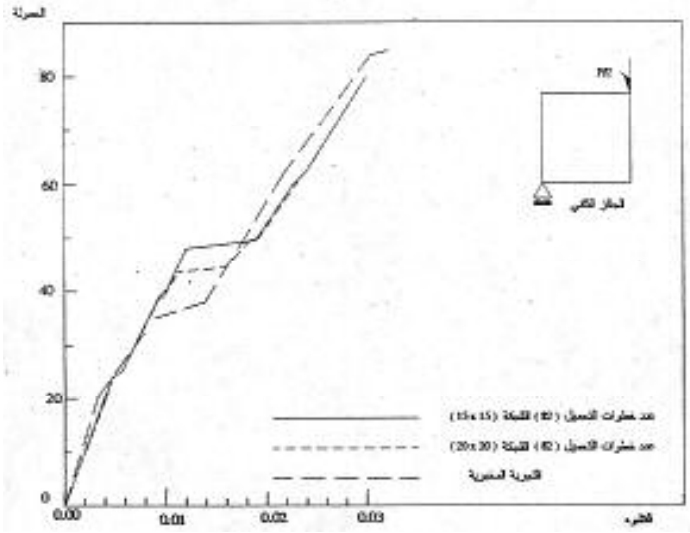
الشكل (12) تأثير عدد خطوات التحميل في منحنى التشوه– الحمولة للجائز الثاني

– المنطقة (3) تعبر عن المنطقة الانتقالية المهمة في سلوك العنصر الخرساني حيث يتغير فيها سلوك الجائز، المألوف الموافق لفرضية برنولي إلى سلوك قوس مضغوط مع شداد رابط (الفعل القوسي) وتظهر هذه المنطقة في المخطط على شكل قفزة معتبرة في التشوهات.

–المنطقة (4) تنشأ في هذه المنطقة تشققات قص صغيره إضافية بعد وصول الجائز إلى سلوك القوس ذي الشداد (الفعل القوسي) وكما هو موضح في الشكل (12) إن التحليل وفق أربع خطوات للتحميل غير كاف لإبراز الاستجابة الانتقالية في السلوك،

والجدير بالذكر أن جميع حالات الدراسة مع تغيير مقدار خطوات التحميل تملك التغيرات نفسها في الصلابة الموضحة على المخطط تقريباً ما عدا المنطقة التي يحدث فيها تغير في السلوك إذ يبدو تذبذب واضح في القيم المسببة لتحول السلوك.

يعبر الشكل (13) عن سلوك الجائز الثاني وباستخدام شبكتين من العناصر المحددة الأولى تملك خمسة عشر عنصراً مع الارتفاع والثانية تملك عشرين عنصراً مع الارتفاع، وتم تطبيق الحمولة في هذه الحالة بعدد خطوات التحميل ومقدارها نفسه والبالغة اثنتان وثمانون خطوة، وقد بيَن المخطط أن المنحنيين متماثلين تمامًا ما عدا الحالة الانتقالية في السلوك التي تحدث في هاتين الشبكتين عند مستويات مختلفة من قيم الحمولة، ويوضح المخطط أن تكثيف الشبكة المدروسة للعناصر يخفض مقدار الحمولة اللازمة لإحداث الفعل القوسي في حين تتطابق قيم المنحنى لكل حالات كثافة الشبكة بعد بلوغ هذا الفعل القوسي.



الشكل (13) تأثير عدد خطوات التحميل و كثافة الشبكة في منحنى التشوه – حمولة للجائز الثاني

إن استخدام عدد كبير من درجات التحميل المتكررة وفق البرنامج أظهر بشكل واضح الانتقال السريع في السلوك للجائز المدروس، حيث يتم تطور التشققات القطرية بشكل

سريع بين خطوتين متقاربتين ونلاحظ من مجموعة الأشكال السابقة أن منحنى القساوة "الصلابة" ينحدر بعد تشكل هذا الفعل القوسي في الجائز المدروس ولكن بقيم تعدُّ طفيفة كتعبير عن الدخول في مرحلة اللاخطية في سلوك المادة.

ومن الملاحظ أن ميل المنحنى حمولة– تشوه مقارب جداً للصفر خلال المرحلة الانتقالية وهذا يشير إلى أن المنشأ بحالة ووضعية غير مستقرة، أما بعد بلوغ عتبة هذا السلوك الجديد فإن مستوى التشقق يزداد سريعا حتى يحدث استقرار في اتخاذ وضعية السلوك الجديد وهو سلوك القوس المربوط .

أخيراً يمكن القول: أن سلوك العنصر الخرساني اللاخطي قبل مرحلة التحول وبعدها لا يتعلق بالحمولة التي تقف عند عتبة التحول [8].

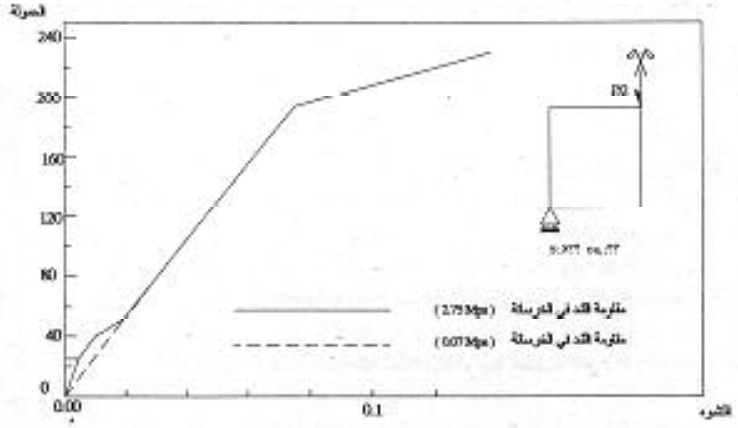
3-3. دراسة تأثير مقاومة الشد في الخرسانة : Concrete Tensile Strength

من المعروف نظرياً أن إجهادات الشد الرئيسية التي تظهر في الجيزان الخرسانية المسلّحة هي السبب المباشر في تكوين تشققات القص الأمر الذي قد يقود إلى نقصان معتبر في قساوة هذه الجيزان، ولذلك يمكن الحكم مباشرة أن تأثير مقاومة الشد في خرسانة الجائز الثاني أكبر منها في حالة الجائز الأول.

حيث يوضح الشكل المرفق (14) سلوك الجائز الثاني وفق منحنى التشوه– حمولة والذي تم الحصول عليه باستخدام قيمتين لمقاومة الشد في الخرسانة الأولى ($f_t = 2{,}76$ MPa) والثانية ($f_t = 0{,}07$MPa) وذلك لشبكة ذات 15 عنصراً على الارتفاع.

وقد تبين لدى تحليل النتائج أن منحنى التشوه– حمولة من أجل قيمتين لمقاومة الشد هو نفسه تماماً وذلك بعد إتمام مرحلة التشقق، ومن خلال تحليل هذين المنحنيين نتأكد من أن متانة الخرسانة على الشد تتحكم فقط بقيمة الحمولة التي يحدث عندها بدء التشقق، أما من حيث نموذج التشققات فهو نفسه تماماً في الحالتين لذلك فإن حساسية

العنصر المدروس تجاه بدء التشققات تتأثر بمتانة الشد في الخرسانة، أما الاستجابة الكلية في السلوك فلا تتأثر وذلك في العناصر الخرسانية المسلّحة بشكل جيد.



الشكل (14) تأثير مقاومة الشد في الخرسانة في منحنى التشوه حمولة للجائز الثاني

4 . النتائج و الخلاصة : Conclusion

يلقي هذا البحث الضوء على تأيثر كثافة الشبكة ومقدار خطوة التحميل المطبَّقة في أثناء التحليل اللاخطي، بالإضافة إلى قيمة مقاومة الشد في الخرسانة وذلك في السلوك اللاخطي لنماذج من العناصر المحددة. إن السلوك اللاخطي في الخرسانة ينشأ بسبب التشقق في الخرسانة والخضوع في فولاذ التسليح وقد دلت النتائج على اشتراطات و تدابير مهمة عند نمذجة عناصر الخرسانة المسلحة بشكل دقيق وهي :

1- إن منحنى التشوه– حمولة لجيزان الخرسانة المسلّحة المعتبرة في هذه الدراسة أبدت تقارباً نحو السلوك الفعلي مع زيادة كثافة الشبكة.
2- إن تأثير مقدار خطوة التحميل في كل حالة تحليل ضمن شدة معينة وما دونها لا يغير المقاومة المحسوبة أو الصلابة الإنشائية وذلك للجائز الثانيِ، وفيِ حالة معينة لكثافة الشبكة فإن مقدار خطوة التحميل تؤثر في مقدار الحمولة التي يتحول فيها سلوك المنشأ من جائز إلى قوس مربوط، وفيِ الوقت نفسه التحليل وفق خطوات قليلة أو تدرجات كبيرة للحمولة فإن التحليل لا يظهر عندئذ هذا التحول.
3- مقاومة الشد في الخرسانة لها تأثير طفيف جداً في سلوك المنحنى تشوه – حمولة للمنشأ المدروس، حيث مقاومة الشد تتحكم بقيمة الحمولة اللازمة للبدء بالتشقق

والحمولة التي يصبح فيها العنصر في حالة متشققة مستقرة (Stable Crack Configuration).

4- نموذج التشققات عند النمذجة باستخدام الشبكات الكثيفة يظهر العناصر المحدودة التي لم تتشقق بجانب العناصر التي تشققت، وهذه الظاهرة تسمى مركزية توضع التشققات (Crack Localization)، والتحليل وفق نماذج الشبكات قليلة الكثافة ليس بمقدورها إظهار مركزية توضع التشققات أضف إلى ذلك أن استخدام خطوات تحميل كبيرة يحول دون حدوث مركزية توضع التشققات أيضاً.

5- أظهرت المقارنة بين النماذج المحلّلة لحالتي الانعطاف والقص أن نموذج الجائز الأول الذي يعبر عن حالة الانعطاف غير حساس تجاه العوامل المدروسة بالدرجة نفسها في نموذج الجائز الثاني الذي يعبر عن حالة القص.

6- هذه الدراسة وفق نموذج العناصر المحددة الممثل للتشققات بشكل موزع مناسبة من أجل تحليل سلوك العناصر الخرسانية المسلّحة بشكل جيد. أما العناصر الخرسانية غير المسلّحة أو المسلّحة بشكل ضعيف فإنها تحتاج إلى استخدام نظرية الانهيار(ميكانيك التشقق)(Fracture Mechanics) في التحليل. ويفيد البحث باختيار طريقة النمذجة و نوع التحليل الإنشائي المناسبين في التنبؤ بالسلوك الفعلي قبل الانهيار لجيزان الخرسانة المسلحة، و يبرز بذلك هوامش الأمان الكبيرة المقدمة في كودات التصميم و التقييم الإنشائي للحالة الراهنة للمنشآت القائمة.

7- إن وجود عدم تقارب بين التجربة و التحليل المعتمد في بعض مناطق المنحنيات يعود إلى عدم تمثيل و نمذجة خاصيتين للخرسانة المسلحة في البرنامج، هاتان الخاصيتان متماثلتان بصلابة القص لقضبان التسليح الطولي الممدود (Dowel Action) عند الانهيار، أضف إلى ذلك صلابة الشد المتبقية في الشقوق (Tension Stiffness) .

Bibliography

1) ANSYS " Structural Analysis Guide**,** ANSYS , Inc. Canonsburg,PA,2004.
2) American Concrete Institute 446.1 R-91 " Fracture Mechanics of Concrete : Concept, Models and Determination of Materials Properties" ACI, 2003, MI.
3) American Concrete Institute 446.3 R-97 " Finite Element Analysis of Fracture in Concrete Structures State – of – The - Art" ACI, 2003, MI.
4) Doods.H , Darwin David, Leibengood Linda " Stress Controlled Smeared Cracking in R.C .Beams " Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Vol.110 No.9 Sep. 1984.
5) Grootenboer . H, leijten . S, Blaauwendraad . J " Concrete Mechanics Part C, Numerical Models for Reinforced Concrete Structures in Plane Stress" HERON, Delft University of Technology, 1981 Netherlands.
6) K.Maekawa,A,Pimanmas.H.Okamura. " Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete " Spon Press Taylor & Francis Group, 2003 Japan.
7) L. Jendele, J. Eervenka, V. Saouma and R. Pukl " On the choice between discrete or smeared approach in practical structural FE analyses of concrete structures " University of Colorado, Cervenka Consulting.com
8) Isenberg . Jeremy, " Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures" American Society of Civil Engineers, 1993
9) Ottosen . Niels "2D Finite Element Analysis of Massive R.C. Structures" Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Vol.108 No.ST8 Aug 1982.

المصطلحات : Glossary

1- الصلابة (القساوة): Stiffness

ممانعة المادة تجاه الخضوع لتغيرات الشكل الناجمة عن تطبيق حمولات أو تغير في الحمولات وتعتمد على خصائص المادة أو الشكل الهندسي، وهي بشكل مبسط القوة اللازمة لإحداث واحدة الانتقالات و هي من وجهة نظر تطبيقية المقدار الذي يربط القوة مع الانتقال أو نسبة القوة المطبقة على المنشأ أو العنصر و الانتقالات الناجمة عنها. وواحدتها هي واحدة قوة مقسومة على واحدة طول.

2- فرضية الإنشاء المستمر: Continuum Mechanics

الافتراض في سلوك العناصر الإنشائية الذي يفترض أن كل أشكال الاستجابة يمكن تمثيلها باستخدام توابع مستمرة.

3- التشقق : Crack, Fracture

نموذج للتلف ضمن الجسم الصلب وهو السطح الذي لا يمكن لمسارات إجهادات أو انفعالات الشد أن تنتقل عبره.

4- نموذج التشققات الموزعة : Smeared Crack Model, Band Crack Model

طريقة لنمذجة الشقوق بواسطة نظرية العناصر المحدودة فيما يتم تعديل خصائص المادة في نموذج الإنشاء المستمر لتمثيل السلوك نفسه عند حدوث شق ضمن العنصر المحدود .

5- التشوه : Deformation

حركة نسبية للذرات ضمن العنصر ناجمة عن مؤثرات مختلفة مثل الحمولات .

6- تأثير حجم الإنشاء: Size Effect

ظاهرة تم اكتشافها من قبل (Bazant 1983) وهي ظاهرة نقصان المقاومة الظاهرية مع زيادة حجم الإنشاء.

7– مركزية توضع التشققات : Crack Localization

ظاهرة تم اكتشافها من قبل (Bazant 1976) وهي نزعة الشقوق الدقيقة أن تتجمع لتشكيل سطوح تصبح فيما بعد شقوق.

8–التحميل التدريجي والتوازن التكراري: Increment Loading and Equilibrium Iterations

إحدى طرائق التحليل اللا خطي هي تجزئة الحمولة ضمن أقسام متسلسلة نسميها خطوة تحميل(Load Step) وفي نهاية كل خطوة يعدل البرنامج مصفوفة القساوة ليعكس بذلك لتغيرات اللا خطية في القساوة الإنشائية قبل المضي في تطبيق الخطوة الآتية.

9- السلوك اللاخطي : Nonlinear Behavior

الكثير من المعالم الهندسية تعرض سلوكاً لا خطي وممكن أن تكون اللا خطية هندسة أو لا خطية في المادة.

10- اللا خطية الهندسية : Geometrical Nonlinear

هي الحالة التي يعاني فيها العنصر الإنشائي من تشوهات مفرطة ضخمة عند تطبيق الحمولة الأمر الذي يخلق قوى وعزوماً إضافية بسبب مقدار التشوه المعتبر بالنسبة لأبعاد العنصر.

11- اللا خطية في المادة : Material Nonlinear

الحالة التي تسلك المادة فيها سلوكاً لا خطي هي عندما تصبح العلاقة بين التشوه النسبي " الانفعال" مع الإجهاد المطبق غير خطية.

12- ظاهرة الفعل القوسي : Tied Arch Phenomena

مرحلة من سلوك الجيزان الخرسانية المسلحة عند مقاومة القوى القاصة يصبح فيها الجائز متشققاً وتكون الإجهادات عندئذ ضمنه مسارات واضحة للضغط وللشد مماثلة للقوس المربوط بشداد.

13- المادة المتناحية: Isotropic Material

هي المادة التي تملك خواص متماثلة في كل الاتجاهات.

14- المادة قائمة التناحي (ثلاثية التناحي): Orthotropic Material

هي المادة التي تملك خواص غير متماثلة في كل الاتجاهات.

15- تكثيف الشبكة: Mesh Refinement

مصطلح يطلق على زيادة عدد العناصر المحدودة في الشبكة الممثلة للعنصر المدروس حاسوبياً.

16-الإنشاء أو المنشأ : Structure

الجسم الذي يمكنه مقاومة الأحمال المطبقة بفضل وزنه أو شكله الهندسي

17- صلابة الشد (Tension Stiffness):

قدرة الخرسانة المحيطة بالشقوق على نقل إجهادات الشد

18- ميكانيك التشقق (Fracture Mechanics): مجموعة من الأفكار مترابطة تصف التحول في السلوك من الاستمرارية في المادة إلى الانقطاعات.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق2004/12/27.