

سلوك النفق الدائري المقطع تحت تأثير الأحمال الزلزالية- دراسة عددية

الدكتور مصطفى بطيخة*

الدكتور ابراهيم حمود**

نجيب نعمان***

(تاريخ الإيداع 21 / 4 / 2013. قُبِلَ للنشر في 1 / 9 / 2013)

▽ ملخص ▽

تؤدي الشدات الزلزالية إلى أضرار جسيمة في بطانات الأنفاق , ترتبط بعوامل مختلفة كنوع التربة المحيطة بالنفق وشدة الزلزال ومواصفات مادة النفق. تم في هذا البحث دراسة تأثير نوع التحليل المعتمد, وسماكة النفق دائري المقطع على القوى الناشئة في النفق تحت تأثير الأحمال الزلزالية. تمت الدراسة باستخدام النمذجة العددية و طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Analysis), حيث تم استخدام تحليل لاخطي يأخذ بالاعتبار لاخطية المادة (Materially Non-linear Analysis, MNA) لكل من مادة التربة وبطانته النفق. بينت هذه الدراسة أن القوى الناشئة في النفق تتأثر بنوع التحليل, حيث إن اعتماد لاخطية المادة لكل من مادة النفق والتربة وأخذ الانزلاق بين التربة والنفق بعين الاعتبار تؤدي إلى إجهادات وقوى داخلية أقل وبالتالي تصميم أكثر اقتصادية, إضافة إلى ذلك فإن البحث الحالي بين سيطرة عزم الانعطاف على عمل مقطع النفق, وأن العزم المطبق يزداد بشكل كبير في حال كل من السماكات الكبيرة لبطانة النفق والشدات الزلزالية ذات التسارع الأعظمي الأكبر.

الكلمات المفتاحية: الأنفاق من الخرسانة المسلحة- تحليل لاخطي- أحمال زلزالية.

* مدرس - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الجيوتكنية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - سورية.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - سورية.

The Behavior of Circular Tunnel under Seismic Loading-Numerical Approach

Dr. Mustafa Batikha*
Dr. Ibrahim Hammoud**
Nagib Noman***

(Received 21 / 4 / 2013. Accepted 1 / 9 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

Seismic loading causes serious damages in tunnels. These damages depend on many factors such as soil type, seismic intensity and the properties of the tunnel material. In this research, the effects of the analysis type and the thickness of the circular tunnel were studied under seismic loads. Finite Element Analysis was used to demonstrate the behavior of the tunnel using Materially Non-Linear Analysis (MNA) for both the soil and the tunnel. This study shows that using inelastic analysis for materials with full slip condition between the ground and tunnel provides lower stress resultants and economic design. Moreover, the research shows that bending stress controls the tunnel section rather than the axial stress. This bending behavior is clearly increased with both big thickness and large seismic magnitude.

Keywords: RC Tunnels – Non Linear Analysis – Seismic loads.

*Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

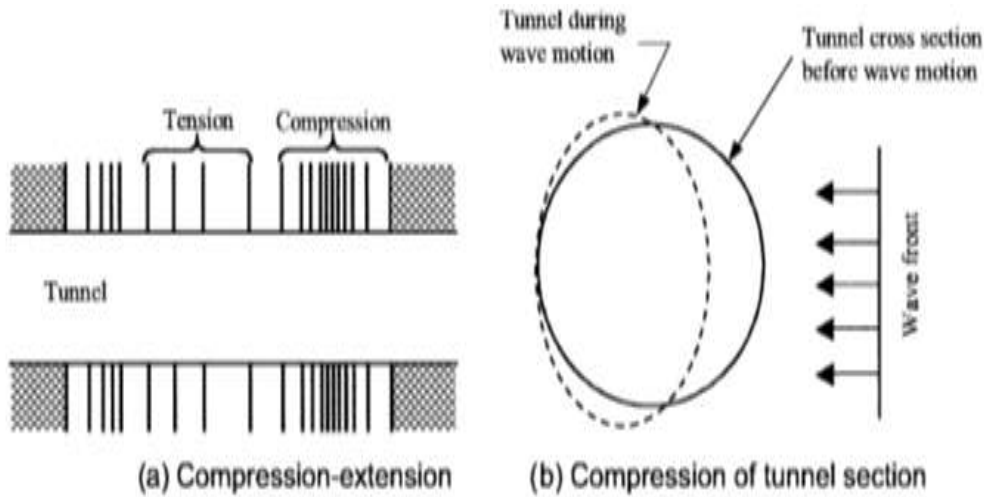
**Associate Professor in Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

***Postgraduate Student. Student, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

مقدمة :

تلعب الأنفاق دوراً حيوياً في تطوير المدن، حيث تستخدم لأغراض عدة كالنقل والمواصلات والسيطرة على التدفق المروري، أو نقل المياه سواء لمشاريع الري الكبيره او لنقل المياه المالحة. يأخذ المقطع العرضي للنفق أشكالاً عدة كالشكل الدائري، المستطيل، شبه المنحرف أو نعل الفرس، وقد استخدمت مواد عدة لبناء بطانة النفق كالخشب والفولاذ والحجر والخرسانة المسلحة المنفذة بالمكان أو مسبق الصنع. تتعرض الأنفاق لأحمال عدة، وتعتبر الأحمال الزلزالية من أهم هذه الأحمال ولاسيما في المناطق النشطة زلزالياً حيث يمكن أن تؤدي إلى أضرار جسيمة في بطانة النفق نتيجة الإثارة الزلزالية. تؤدي الإثارة الزلزالية إلى ثلاثة أنواع رئيسية من التشوهات والتي تعبر عن الاستجابة الديناميكية للمنشآت التحتية (الأنفاق) بسبب الهزة الزلزالية [1]:

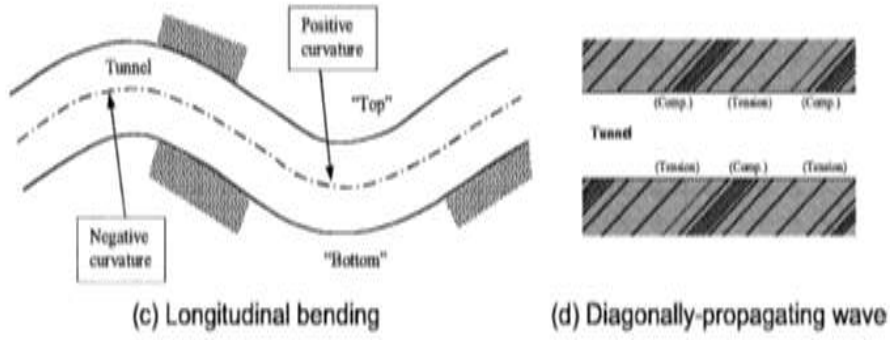
- التشوهات المحورية (Axial deformations): تحدث عندما تنتشر الموجات الزلزالية بشكل مواز لمحور النفق، وبالتالي فإن اجهادات القص تنتقل بين الأرض والمنشأ وتسبب قوى ضغط وشد متناوبة (الشكل 1).



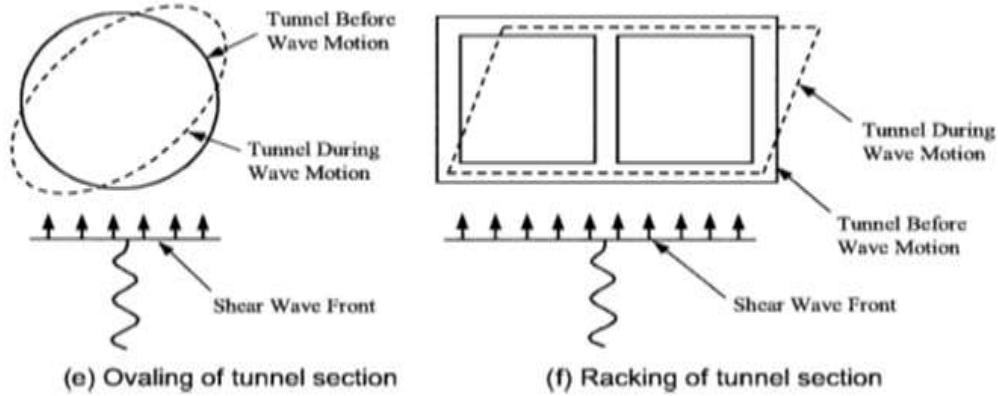
الشكل (1): التشوهات المحورية للأنفاق بسبب الموجات الزلزالية [1]

- تشوهات التقوس (Curvature deformations): تحدث عندما تنتشر الموجات الزلزالية بشكل غير مباشر (مائل) (الشكل 2).

- تشوهات أوفالينج/ راننج (Ovaling/Racking deformations): هذه التشوهات ناتجة بسبب موجات القص المنتشرة عمودياً أو في وضع تقريبي عمودي إلى محور النفق (الشكل 3)، حيث تحدث تشوهات راننج في الأنفاق ذات المقطع العرضي المستطيل بينما تحدث تشوهات أوفالينج في الأنفاق ذات المقاطع العرضية الدائرية والتي هي محور الدراسة في هذا البحث.



الشكل (2): تشوهات التقوس للأنفاق بسبب الموجات الزلزالية [1]



الشكل (3): تشوهات أفالينج وراكنج للأنفاق بسبب الموجات الزلزالية [1]

درس العديد من الباحثين الأنفاق تحت تأثير الزلازل بالطرق التحليلية والعددية، حيث قام الباحث Wang(1993) [2] باستنتاج معادلات رياضية لحساب كل من القوة المحورية الأعظمية (T_{max}) وعزم الانعطاف الأعظمي (M_{max}) في بطانة النفق أثناء التحميل الزلزالي واستخدم شرط الانزلاق الكلي (full-slip) بين النفق والترية، وفق مايلي:

$$T_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1 + \nu_m)} r \gamma_{max} \quad (1)$$

$$M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1 + \nu_m)} r^2 \gamma_{max} \quad (2)$$

$$\gamma_{max} = \frac{V_p}{V_s} \quad (3)$$

حيث (γ_{max}) تشوه القص الأعظمي للمجال الحر الناتج من الحركة الزلزالية و(V_p) السرعة الأرضية الأعظمية و(V_s) سرعه موجه القص ، و K_1 معامل استجابة البطانة ويعبر عنه بالمعادله التالية :

$$K_1 = \frac{12(1 - \nu_m)}{2F + 5 - 6\nu_m} \quad (4)$$

حيث F معامل الانحناء (Flexural ratio) للنفق ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$F = \frac{E_m(1 - \nu^2)r^3}{6EI(1 + \nu_m)} \quad (5)$$

حيث E: معامل المرونة (Modulus of Elasticity) لبطانة النفق و r نصف قطر النفق و t سماكة بطانة النفق، ν_m معامل بواسون (Poisson's ratio) للوسط المحيط و ν معامل بواسون لبطانة النفق و I عزم العطالة (Moment of inertia) لبطانة النفق (لكل وحدة عرض)، E_m معامل المرونة للوسط المحيط.

قام الباحثون (Sedarat et al. (2009) [3] بدراسة نفق دائري محاط بطبقة ترية واستعمال التحليل المرن - الخطي لكل من مادتي النفق والترية واستخدم طريقتين للربط بين النفق والترية وهما فرض الانزلاق الكلي (full-slip) و عدم وجود انزلاق (no-slip)، حيث إن اختيار الحالة الأكثر واقعية (الانزلاق الكلي) - من حيث إن الإجهاد المماسي المتشكل عند سطح تماس النفق مع التربة كبير مقارنة مع إجهاد القص الحدي للتربة، الأمر الذي يؤدي إلى انفصال التربة قد أعطى إجهادات مماسية وقوى أقل عن تلك التي أعطتها الحالة الثانية (التماسك التام)، الأمر الذي يدل على ضرورة أخذ الانزلاق بعين الاعتبار للاقتراب من الحالة الحقيقية عند التصميم والحصول على تصميم اقتصادي.

قام الباحثون (Shahrour et al. (2010) [4] بدراسة نفق محاط بطبقة ترية واستعمال التحليل الخطي - المرن لمادة النفق والتحليل المرن - اللدن (Elasto-plastic) لطبقة التربة، حيث تبين أن استخدام الحالة الحقيقية للتربة بإدخال المرحلة اللاخطية أعطت عزمًا أقل عند كل مقطع من محيط النفق.

كما درس الباحثان (Asheghabadi and Matinmanesh(2011) [5] تأثير نوع التربة على التسارع الأعظمي عند بطانة النفق حيث بين البحث أن وجود تربة رملية كثيفة (Dense sand) أعطى تسارعاً عند بطانة النفق أكبر بكثير عما هو الحال في وجود تربة رملية مفككة (Loose sand).

2- الخواص الديناميكية للتربة:

تعطى زاوية الاحتكاك الداخلية الديناميكية ($\phi_{dynamic}$) للتربة من العلاقة التالية [6]:

$$\phi_{dynamic} \approx \phi_{static} - 2^0 \quad (6)$$

حيث ϕ_{static} زاوية الاحتكاك الداخلية في الحالة الستاتيكية.

كما يمكن إيجاد معامل بواسون للتربة المحيطة بالنفق من العلاقة (7) [6]:

$$\nu = \frac{k_o}{1 + k_o} \quad (7)$$

حيث k_o : معامل ضغط التربة في وضع الراحة وبحسب من المعادلة التالية:

$$K_o = 1 - \sin \phi \quad (8)$$

يمكن إيجاد سرعة موجة القص (Shear wave velocity, V_s) للتربة من العلاقة التالية [7]:

$$\rho = 0.44 V_s^{0.25} \quad (9)$$

حيث $(\rho = \gamma_{\text{soil}}/g)$: كثافة كتلة للتربة (Mass density)، g : تسارع الجاذبية الأرضية و γ_{soil} : الوزن الحجمي للتربة ويمكن إيجاده من الشكل (4) اعتماداً على زاوية الاحتكاك الداخلية لأنواع عدة من الرمل حيث يعطى النوع (SW) للرمل ذي التدرج الجيد [8].

يعطى معامل القص الديناميكي ومعامل المرونة وفق العلاقات التالية [7,9]:

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (10)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (11)$$

يتم حساب الدور الأساسي (Fundamental period, T) والتردد الطبيعي (Natural frequency, ω)

لطبقة التربة من العلاقات (12) و (13) [10, 11]:

$$T = \frac{4H}{V_s} = \frac{1}{f} \quad (12)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (13)$$

حيث H سمك طبقة التربة المحيطة بالنفق و f التواتر الأساسي للتربة.

يتم حساب التخماد وفق طريقة رايلي (Rayleigh) حيث إن التخماد الكلي يعطى تركيب خطي لمصفوفة

الكتلة (M) ومصفوفة القساوة (K) [12,13,14]:

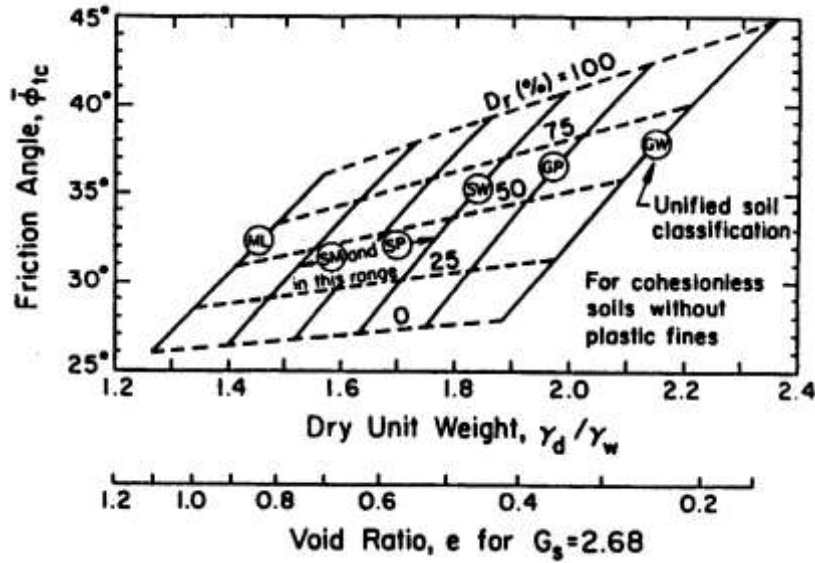
$$C = \alpha [M] + \beta [K] \quad (14)$$

حيث α و β تعطى بالعلاقات التالية:

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega} \quad (15)$$

$$\alpha = f(2\zeta - f \times \beta) \quad (16)$$

حيث ζ معامل التخماد (Damping ratio).



الشكل (4): الوزن الحجمي الجاف للتربة الرملية كتابع لزاوية الاحتكاك [6,8].

أهمية البحث وأهدافه:

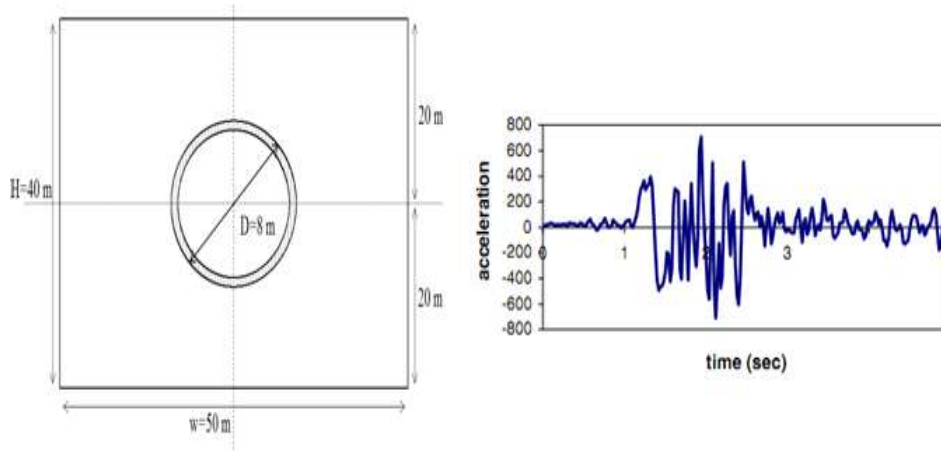
يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير تغيير سماكة بطانة النفق (Thickness of tunnel lining) على عزوم الانعطاف المطبقة عليها، حيث إن الأبحاث السابقة لم تتناول بشكل كاف هذا التأثير. كما يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير نوع التحليل المعتمد بأخذ تأثير لاختيية كل من مادة بطانة النفق والترية المحيطة بها على القوى الناشئة في النفق، بالإضافة إلى أخذ عدم الترابط التام بين الترية والنفق وهي أمور لم يتم تناولها في العديد من الدراسات السابقة.

4- مواد وطرائق البحث:

اعتمدت في هذا البحث الطريقة التحليلية باستخدام طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method)، حيث تمت المقارنة مع النتائج العددية التي تمّ التوصل إليها في أبحاث سابقة. تمّ التحليل باستخدام برنامج (ABAQUS -Ver 6.9) [14] واستخدم تحليل لا خطّي يأخذ بعين الاعتبار لاختيية المادة لكل من بطانه النفق وطبقة الترية.

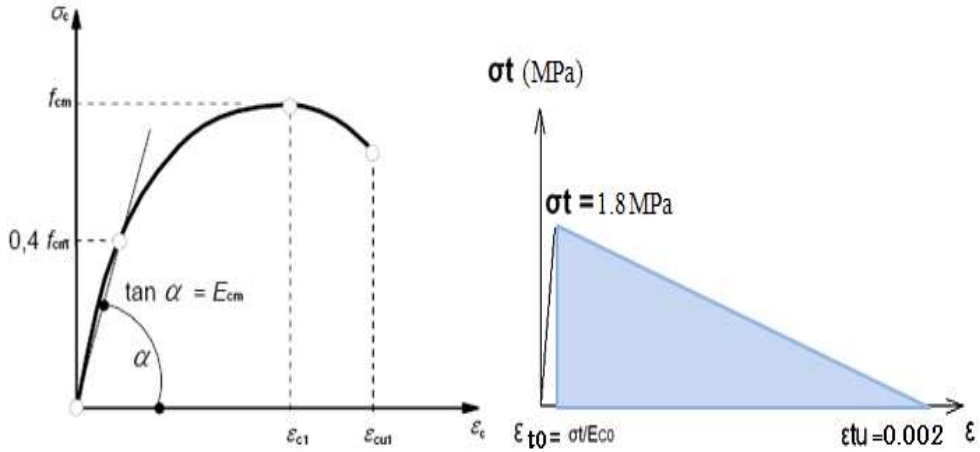
5- التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة:

باستخدام البرنامج (ABAQUS -Ver 6.9) تمت نمذجة البطانة والترية والمدرسة سابقاً في دراسة الباحثين (2005) Pakbaz and Yareevand [15] حيث قطر النفق (D=8m) وسماكة البطانة (t=25cm). تم أخذ نموذج للتربة بعرض w=50m وارتفاع h=40m حيث النفق متوضع في منتصف الارتفاع (الشكل 5) وبالتالي فإن النسبة بين عرض الترية إلى قطر النفق (W/D=6.25) وهي قيمة متوافقة مع نتائج أبحاث سابقة قامت بدراسة تأثير تغيير عرض النموذج ومقارنة النتائج [16]، وبالتالي لا داع لأخذ عرض أكبر للحصول على اقتصادية في زمن الحل. تم استعمال العنصر (CPE4R) في نمذجة البطانة الخرسانية والترية المحيطة بالنفق، وهو عبارة عن عنصر بأربع عقد من نوع Plane strain حيث التشوهات في المستوي، وكل عقدة لها درجتا حرية (انتقالان فقط)، وهذا العنصر ذو عدد مخفض لنقاط غاوس (Gauss Points). تم استخدام العنصر T2D2 لنمذجة تسليح البطانة وهو عنصر شبكي من عقدتين وكل عقدة تحتوي على درجتا حرية. تم أخذ شروط الاستناد وثيقة تامة لجميع العقد عند قاعدة الترية، أما الحدود الجانبية فقد تم تثبيتها بمسند متدرج مقيد بالاتجاه الشاقولي وحر في الاتجاه الافقي. تم عند قاعدة النموذج تطبيق هزة زلزالية هو السجل الزمني لهزة (Naghan Fars) الموضح في الشكل (5) [15].



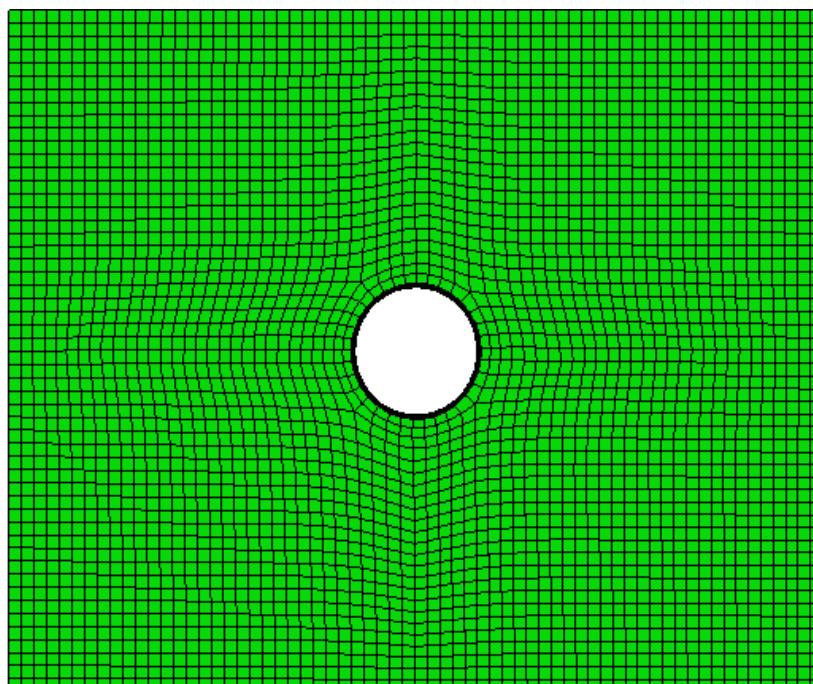
الشكل (5): أبعاد النفق والهزة الزلزالية المطبقة [15]

استُخدمت البطانة الخرسانية بمعامل مرونة $E=26\text{GPa}$ (Elastic Modulus) ومعامل بواسون $\nu=0.2$ (Poisson's ratio). وتم استخدام التحليل اللاخطي باعتماد لاخطية المادة، حيث يبين الشكل (6) مخطط الإجهاد- التشوه النسبي (Stress-Strain) لتصرف البطانة الخرسانية (البيتون) على الضغط باستخدام النموذج Concrete Damaged Plasticity (CDP) model [17]، وقد تم استخدام المنحني الذي يعطيه الكود الأوربي لسلوك الخرسانة [18]، حيث يبين أن السلوك المرن (Elastic behavior) ينتهي عند القيمة $0.4f_{cm}$ ، حيث f_{cm} هي المقاومة المتوسطة الاسطوانية على الضغط (18MPa) ويبدأ معه السلوك اللامرن (Inelastic behavior) حتى انهيار البيتون عند تشوه نسبي (Failure stain) مقداره (0.0035). كما يبين الشكل (6) تصرف البيتون على الشد حيث تم اعتبار مقاومة الشد الأعظمية (1.8MPa) وبعدها تتخضع مقاومة البيتون على الشد حتى خروجه عن العمل عند تشوه نسبي مقداره (0.002). تمت نمذجه فولاذ التسليح بفرض السلوك المرن- اللدن المثالي (Elastic-Perfectly plastic) و بإجهاد سيلان $f_y=400\text{MPa}$ (Yield stress) وتم استخدام نسبة تسليح (0.0025). تمت نمذجه التربة باستخدام معيار الانهيار لمور-كولومب حيث معامل المرونه $E=645\text{MPa}$ ومعامل بواسون $\nu=0.28$ وكثافته التربة ($\gamma=19.2\text{ kN/m}^3$) ومقاومة التماسك ($C=1000\text{KPa}$) وزاوية الاحتكاك الداخلي ($\phi=40^\circ$) وزاوية الانتفاخ ($\psi=5$) ونسبة التخماد الحرج ($\zeta=10\%$) للتربة ولبطانته النفق ($\zeta=5\%$)، وبالتالي فإن تخامد كتله ($\alpha=0.3811$) وفق العلاقة (16) و تخامد القساوة ($\beta=0.0140$) وفق العلاقة (15). تمت نمذجة سطح الاتصال (Interface) بين النفق وطبقة التربة باستخدام نظرية كولومب للاحتكاك (Coulomb theory friction) حيث معامل الاحتكاك يعبر عنه بالمعادلة ($\mu=\delta\tan\phi\approx 0.6\tan\phi$) [5]، وحيث إن زاوية الاحتكاك الاستاتيكية للتربة ($\phi=40^\circ$) فإن معامل الاحتكاك $\mu=0.5$ في حالة الربط full-Slip.



الشكل (6): مخططات التشوه-النسبي الإجهاد لحالتي الشد والضغط في البيتون [18]

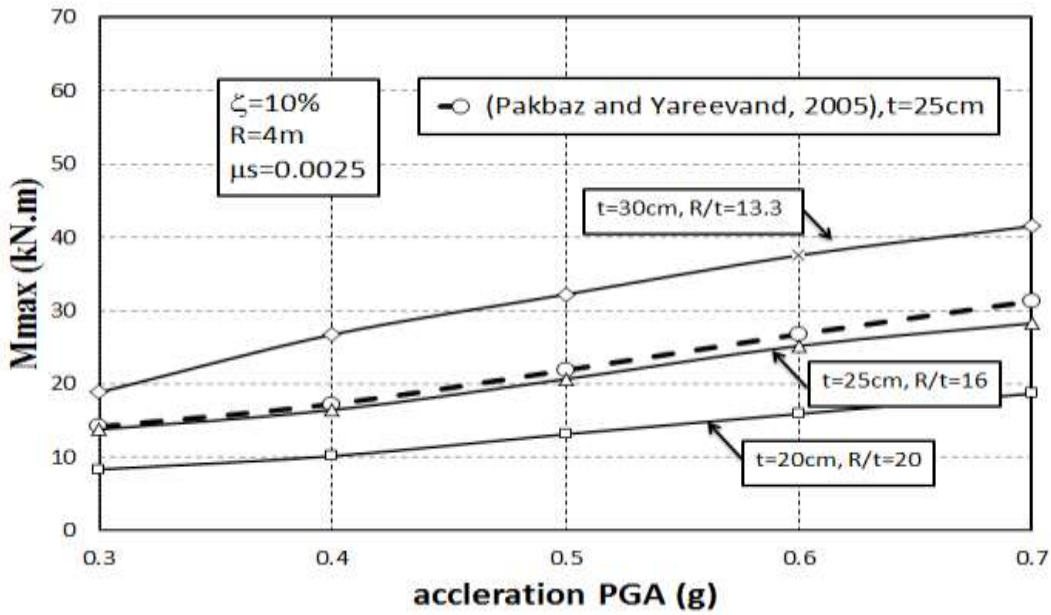
تمت دراسة دقة تقارب الشبكة المستخدمة (Mesh Convergence)، وذلك للوصول للتقسيم الاقتصادي من حيث زمن التحليل ودقة النتائج معاً. الشكل (7) يبين النموذج المعتمد باستخدام برنامج ABAQUS-ver6.9.



الشكل (7): النموذج المعتمد في الدراسة الحالية باستخدام ABAQUS-ver6.9.

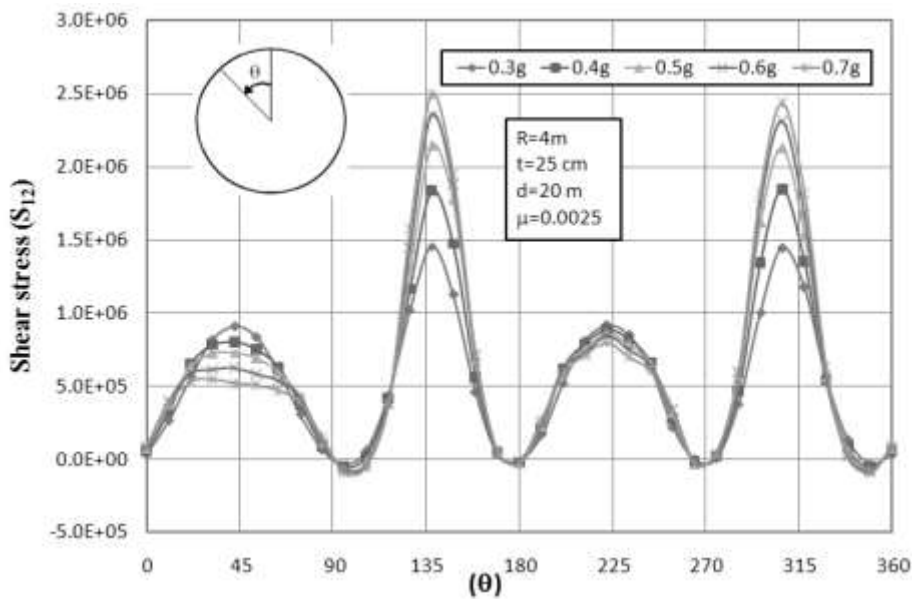
النتائج والمناقشة:

يبين الشكل (8) العلاقة بين التسارع الأعظمي للهزة الزلزالية (المحور الأفقي) وعزم الانعطاف الأعظمي الناشئ في بطانة النفق (المحور الشاقولي) للدراسة الحالية مقارنة مع دراسته التي قام بها Pakbaz and Yareevand (2005) [15] للسماكة $t=25$ cm، حيث يمكن ملاحظة اقتراب النتائج ما بين الدراستين الأمر الذي يدل على صحة النموذج. تم تغيير سماكة بطانة النفق $t=20$ cm و $t=30$ cm على نفس المخطط حيث يمكن ملاحظة ارتفاع قيمة العزم بزيادة السماكة كما أن الفرق بين سماكة وأخرى كان ثابتاً إلى حد ما من حيث القيم. كما يبين الشكل (9) تغير الإجهاد المماسي (S12) بتغير الزاوية على محيط النفق (θ) ولتسارعات مختلفة، حيث تظهر إجهادات مماسية أعظمية عند الزوايا (138° و 307°)، بينما ينعدم الإجهاد المماسي في نقاط عدة. يمكن تفسير ذلك بشكل التشوه الحاصل في بطانة النفق (الشكل 10) والمشابه لتشوه أفالينج (الشكل 3)، حيث أن الإجهاد المماسي كان أعظماً في نقاط الضغط الأعظمي للنفق على التربة نتيجة التشوه بينما انعدم الإجهاد في مكان المجال الحر أو فقدان الاتصال بين النفق والتربة. كما يبين الشكل (9) أن الإجهاد المماسي يتناسب والتسارع الأعظمي للهزة الزلزالية حيث يزداد بازدياد قيمة التسارع.



الشكل (8): علاقة التسارع الاعظمي (PGA) - عزم الانعطاف الاعظمي (M_{max}) للنموذج المدروس

تمت المقارنة بين أخذ مادة التربة في الحالة المرنة (Elastic) و الحالة اللامرنة (Inelastic)، حيث يبين الشكل (11) التشوهات النسبية المحورية (Axial strain, ϵ_{11}) الناشئة في النفق عند نقاط الاتصال بين النفق وطبقة التربة على محيط النفق مقارنة مع التشوه النسبي عند إجهاد الشد الأعظمي للبيتون أو بداية التشقق (ϵ_{t0} ، الشكل 6)، حيث إن التشوه النسبي المحوري الأعظمي على الشد في الحالة المرنة تجاوز التشوه النسبي المحوري الأعظمي على الشد في الحالة اللامرنة وبنسبة كبيرة (168%)، الأمر الذي يبين أن التحليل اللامرن يعطي قيماً أقل من التحليل المرن وهو ما يؤثر على اقتصادية التصميم وهذه النتيجة تؤكدتها دراسته التي قام بها (Shahrour et al. (2010)). [4]

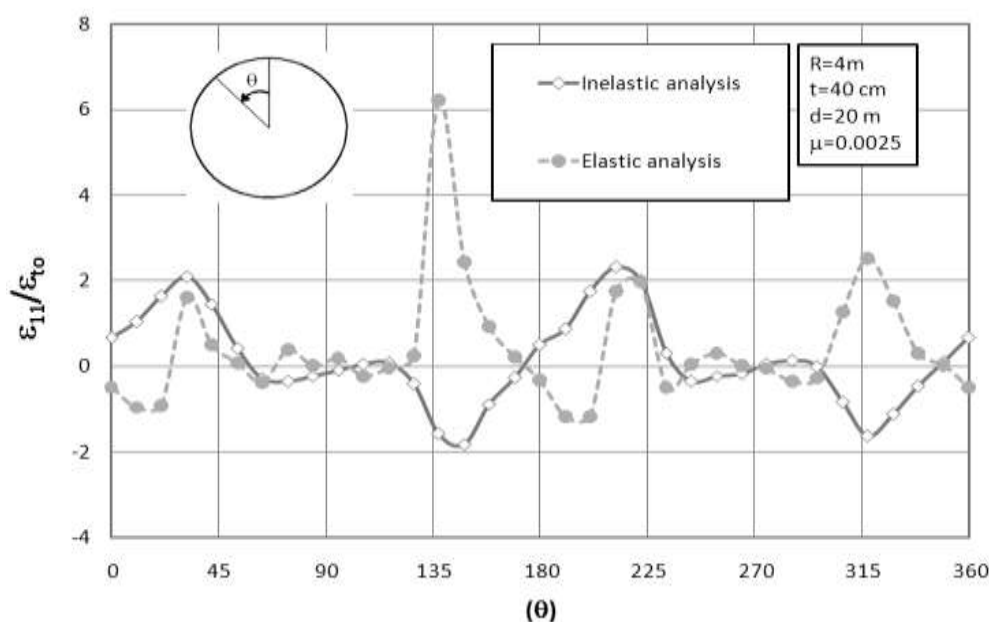


الشكل (9): تغير الإجهاد المماسي على محيط النفق (الدراسة الحالية)



الشكل (10): الشكل المتشوّه للنفق المدروس (الدراسة الحالية)

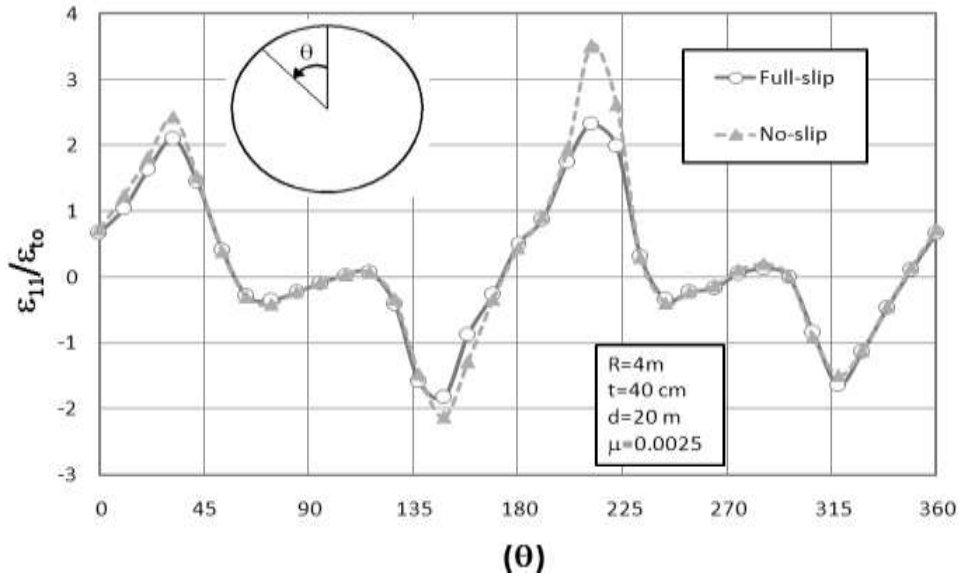
من جهة أخرى، تمت المقارنة بين أخذ الترابط بين مادة بطانة النفق والترية المحيطة به في الحالتين: حالة الربط التام No-Slip وحالة عدم الترابط التام Full-Slip (الشكل 12). في حالة الربط التام No-Slip تم الحصول على قيم أعلى من حالة عدم الترابط التام Full-Slip بنسبة (50%)، وهذه النتيجة تؤكد ما دارسه التي قام بها الباحثون (2009) Sedarat et al. [3].



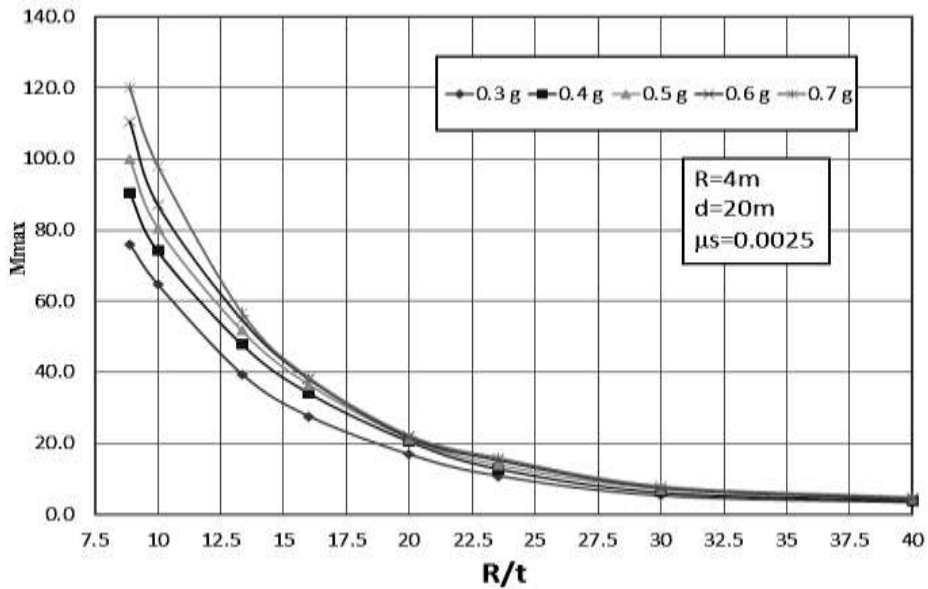
الشكل (11): التشوهات النسبية المحورية في بطانة النفق عند نقاط الاتصال مع التربة لحالتي التحليل المرن واللامرن للتربة

تمت دراسة أثر تغيير سماكة النفق ($R=4\text{ m}$) على عزوم الانعطاف الأعظمية (Maximum Moment) (الشكل 13) في بطانة النفق ولتسارعات مختلفة، مع إيجاد قيمه القوة المحورية (T) المرافقة كما هي موضحة بالشكل

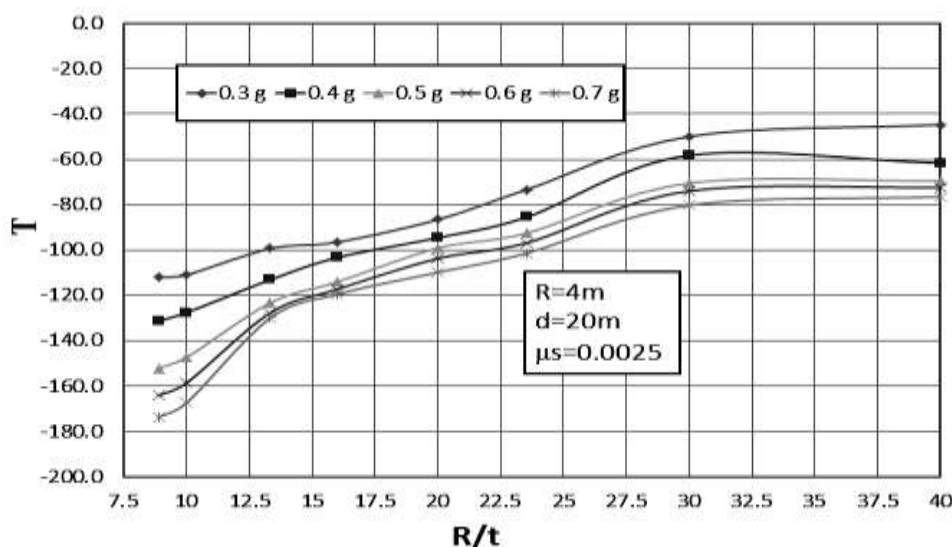
(14). يبين الشكل (13) أن قيمة العزم الأعظمي تزداد بازدياد السماكة، كما يظهر تأثير التسارع الأعظمي عند السماكات الكبيرة حيث يزداد العزم بازدياد التسارع الأعظمي، بينما يظهر تأثير التسارع الأعظمي ضئيلاً في حال السماكات الدنيا ولاسيما لقيم أكبر من $(R/t=30)$. كما أن الشكل (14) يبين أن القوة المرافقة للعزم الأعظمي قوة ضاغطة تزداد بازدياد التسارع الأعظمي والسماكة.



الشكل (12): التشوهات النسبية المحورية في بطانة النفق عند نقاط الاتصال مع التربة لحالتي أخذ الانزلاق وفرض التماسك التام بين التربة والنفق

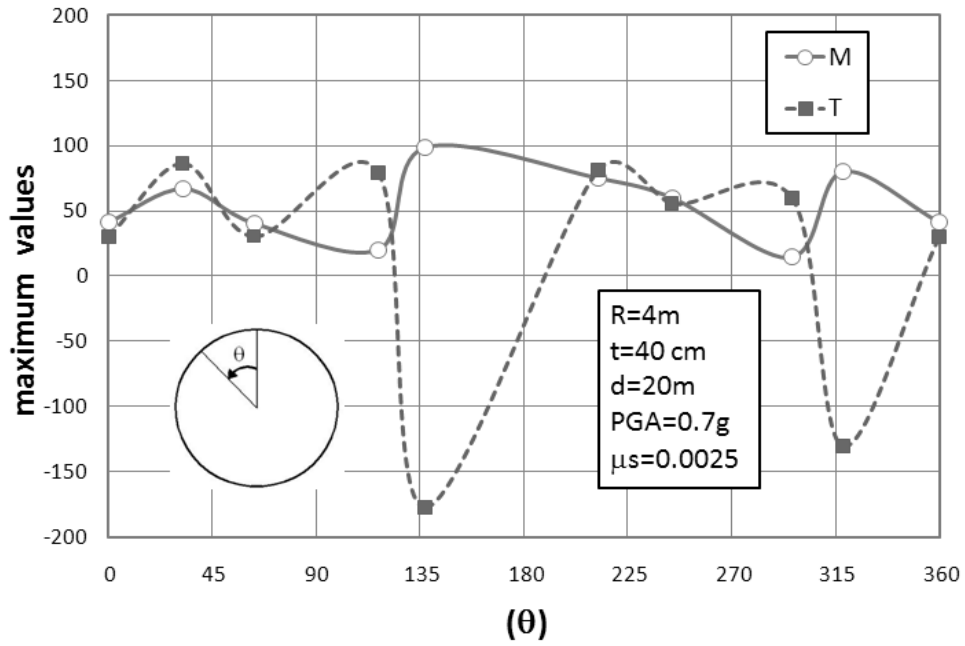


الشكل (13): أثر تغيير النسبة (R/t) على عزوم الانعطاف الاعظمية في النفق

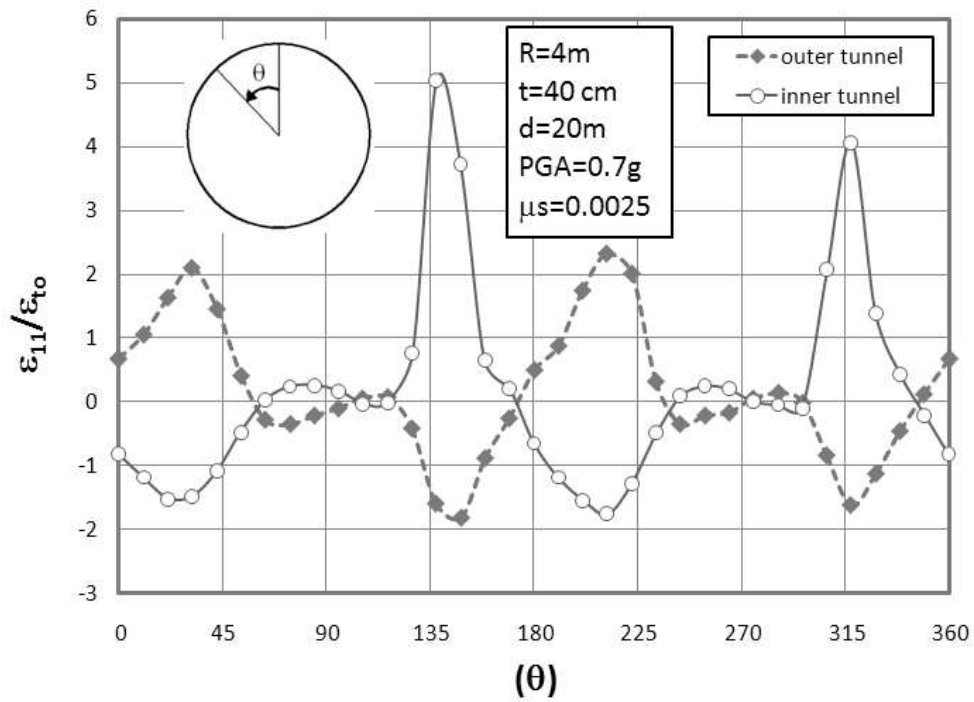


الشكل (14): أثر تغيير النسبة (R/t) على القوة المحورية المرافقة لعزم الانعطاف الأعظمي

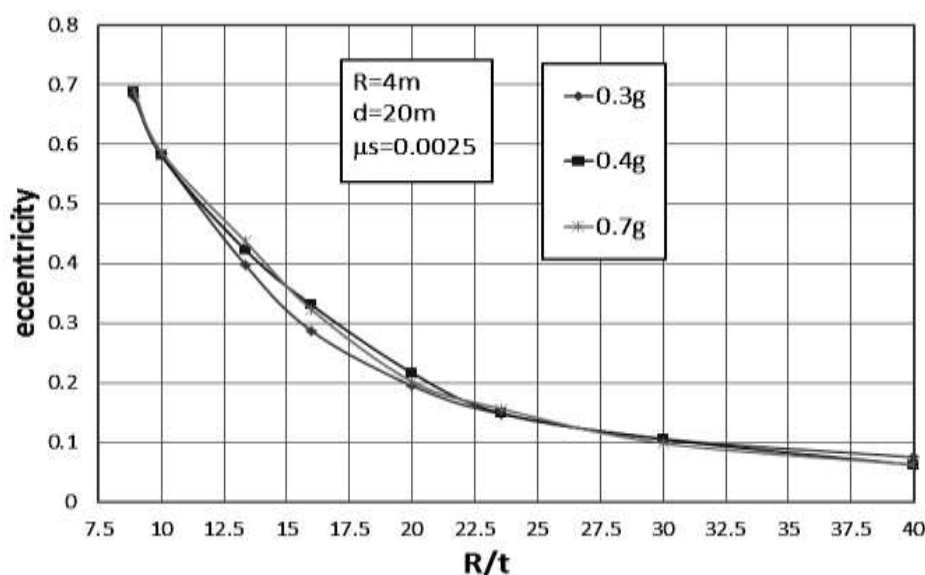
يبين الشكل (15) العزم (M) والقوة المحورية (T) على محيط النفق لحالة السماكة (40cm) والتسارع الأعظمي (0.7g) حيث أن العزم الأعظمي (98kN.m) عند الزاوية (137°) مترافق مع قوة ضغط أعظمية مقدارها (-177kN)، بينما تنشأ قوة الشد الأعظمية (81kN) عند الزاوية (212°) مترافقة مع عزم إنعطاف مقداره (75kN.m). يوضح الشكل (16) التشوهات النسبية المحورية (ϵ_{11}) على الوجه الداخلي (Inner tunnel) والخارجي (Outer tunnel) للنفق منسوبةً للتشوه النسبي للبيتون (ϵ_{t0}) عند بدء التشقق، حيث يظهر أن التشوه النسبي الأعظمي الشاد عند الزاوية (137°) وهي نفس الزاوية التي ينشأ عندها العزم الأعظمي في النفق والمترافق مع قوة ضغط، بينما ينخفض التشوه النسبي عند قوة الشد الأعظمية عند الزاوية (212°)، الأمر الذي يدل على سيطرة عزم الانعطاف على عمل المقطع. إن الشكل (17) يؤكد ماتم ذكره سابقاً والذي يبين لامركزية القوة (eccentricity) ولتسارعات مختلفة وفقاً لتغير R/t، حيث يظهر بوضوح أن القوة المحورية يتم تطبيقها خارج المقطع دلالة على سيطرة العزم.



الشكل (15): العزم الاعظمي والقوه المحورية المرافقه على محيط النفق



الشكل (16): التشوه النسبي المحوري على محيط النفق



الشكل (17): أثر تغيير النسبة (R/t) على اللامركزية.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة نفق محاط بطبقة تربة على الأحمال الزلزالية من خلال نمذجة عددية باستخدام برنامج ABAQUS - Ver 6.9 والذي يعتمد طريقة العناصر المحدودة، وتحليل لاخطي يأخذ بالاعتبار لاخطية المادة لكل من مادة النفق والتربة بغية دراسة تأثير تغيير سماكات البطانة الخرسانية على عزوم الانعطاف الأعظمية وبالتالي تصميم الانفاق.

بينت هذه الدراسة أن القوى الناشئة في النفق تتأثر ونوع التحليل حيث إن اعتماد لاخطية المادة و أخذ الانزلاق بين التربة والنفق بعين الاعتبار تؤدي إلى إجهادات وقوى داخلية أقل وبالتالي تصميم أكثر اقتصادية، إضافة إلى ذلك فإن البحث الحالي بين سيطرة عزم الانعطاف على عمل مقطع النفق، وأن العزم المطبق يزداد بشكل كبير في حال السماكات الكبيرة والشدات الزلزالية ذات التسارع الأعظمي الأكبر.

توضيح:

تم إجراء هذا البحث في جامعة دمشق كلية الهندسة المدنية كأحد المتطلبات لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة الإنشائية، في الفترة ما بين شهر تشرين الثاني 2008 لغاية آذار 2013.

المراجع :

1. WANG, W. L, WANG, T. T., SU, J. J., Lin, C. H., C R. and Huang T. H. (2001). *Tunneling in Taiwan - Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake*, Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 16, 133-150.
2. Wang, J. N. (1993). *Seismic design of tunnels - A simple state-of-the-art design approach*, Monograph 7. Parsons Brinkerhoff One Penn Plaza, New York.

3. Sedarat H., Kozak A., Hashash Y.M.A., Shamsabadi A. and Krimotat A., (2009). *Contact interface in seismic analysis of circular tunnels*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.24, 482–490.
4. Shahrour I., Khoshnoudian F., Sadek M. and Mroueh H., (2010). *Elastoplastic analysis of the seismic response of tunnels in soft soils*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.25, 478–482.
5. Asheghabadi M. and Matinmanesh H., (2011). *Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils with Consideration of Soil-Tunnel Interaction*, Procedia Engineering, 14, 3162–3169.
6. Khairy, A. T. (2007). *Dynamics response of tunnels under seismic loads*. Ph.D. Thesis dissertation, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt.
7. Keceli, A., (2012). *Soil Parameters which can be determined with Seismic Velocities*. Tmmob Jeofizik Mahendisleri Odasi, Jeofizik, 16, 17-29.
8. Stein Sture, (2004). *Mohr-Coulomb Model*, short course on computational Geotechnics +Dynamics, Boulder, Colorado, January 5-8.
9. Eurocode 8, (2003). *Design of structures for earthquake resistance -Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*.
10. Giannakou A., Nomikos P., Anastasopoulos I., Sofianos A., Gazetas G. and Yiouta p., (2005). *Seismic behavior of tunnels in soft soil: parametric numerical study and investigation on the causes of failure of the Bolu tunnel (Düzce, Turkey, 1999)*, underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, London.
11. Aversa, S., Maiorano, R.M.S and Tamagnini, C.(2008). *Influence of damping and soil model on the computed seismic response of flexible retaining structures*, Naples, Italy,8.
12. Berrabah, Amina Tahar, Armouti, Nazzal , Belharizi, Mohamed and Bekkouche , Abdelmalek, (2012). *Dynamic Soil Structure Interaction Study*, Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 6, No. 2,13.
13. Hashash, Youssef M.A and Park, Duhee,(2002). *Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume22, pp.611-624.
14. ABAQUS, Version 6.9-4. *ABAQUS/Standard User's Manual*. ABAQUS Inc., USA, 2009.
15. Pakbaz Mohammad C. and Yareevand Akbar, (2005). *2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 20, 411-417.
16. Hatzigeorgiou George D., Beskos Dimitri E., (2010). *Soil–structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, 851–861.
17. KMIECIK P. and KAMIŃSKI M., (2011). *Modeling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. XI, No. 3, 623-636.
18. BS EN 1992-1, (2004). *Eurocode2, Design of Concrete Structures*, Part 1-1: General rules and rules for buildings.