

Study of the Seismic Behavior of Tunnels in the Closed Excavation Phase

Dr. Iyad Sleiteen*

(Received 20 / 12 / 2023. Accepted 25 / 6 / 2024)

□ ABSTRACT □

This paper presents a 3D numerical analysis of the influence of the excavation process on the soil-tunnel interaction under seismic loading. This issue requires a non linear analysis since the excavation procedure induces a perturbation in the stress distribution adjacent to the tunnel lining. Numerical analyses are conducted for both shallow and deep tunnel embedded in soft soils and under different seismic amplitudes. Results show that for shallow tunnel the excavation process has a significant influence on the overall seismic response of the soil-tunnel system.

Keywords: Tunnel, excavation, non linear, earthquake, three-dimensional.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Assistant Professor, Faculty of Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.
iyadsleiteen@gmail.com

دراسة السلوك الزلزالي للأنفاق في طور الحفر بالطريقة المغلقة

د. إياد سليطين*

(تاريخ الإيداع 20 / 12 / 2023. قُبِلَ للنشر في 25 / 6 / 2024)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث دراسة عددية ثلاثية الأبعاد للسلوك الزلزالي للأنفاق في مرحلة البناء. هذه الدراسة تتطلب تحليل غير خطي حيث ان عمليات الحفر تسبب تغير في الحالة الإجهادية في الوسط المجاور للنفق. تمت الدراسة على برنامج Flac 3D وتم وضع نموذج عددي ثلاثي الأبعاد يتضمن حالي الأنفاق السطحية والعميقة المنفذة في الترب الرخوة تحت تأثير أحمال ديناميكية. أظهرت النتائج ان عمليات الحفر لها تأثير مهم على الاستجابة الزلزالية لنظام نفق. تربة.

الكلمات المفتاحية: نفق، حفر، غير خطي، زلزال، ثلاثي الأبعاد.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* مدرس، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. iyadsleiteen@gmail.com

مقدمة:

المنشآت التحت أرضية تتعرض عادة لنسبة ضعيفة من الأضرار تحت تأثير الأحمال الديناميكية مقارنة بالمنشآت السطحية (Hashash et al, 2001). ولهذا السبب، فإن التأثير الديناميكي على هذا النوع من المنشآت يتم اهماله عادة. ولكن، يوجد عدد من الأمثلة التي تظهر أضرار مهمة تعرضت لها المنشآت التحت أرضية خلال الزلازل الحديثة. على سبيل المثال: انهيار محطة المترو في Daikai في اليابان في عام 1995 خلال زلزال Hyogoken-Nambu وانهيار نفق Bolu في تركيا في عام 1999 خلال زلزال Kocealu بالإضافة الى الأضرار بالأنتفاق المنفذة على طريق سريع في تايوان في العام 1999 (Hashash et al, 2001; Kham et al, 2001; Giannamou et al, 2005). هذه الأضرار تظهر أننا بحاجة لدراسة معمقة أكثر للتأثير الزلزالي خلال التصميم النهائي للمنشآت التحت أرضية.

تم وضع العديد من الدراسات لأنتفاق منفذة بالطريقة المغلقة من أجل حساب القوى الداخلية في قشرة النفق الدائرية والنتيجة عن الأحمال الزلزالية. معظم هذه الدراسات تمت بالطريقة شبه الستاتيكية (تقريب ديناميكي إلى حالة ستاتيكية) ضمن موديلات ثنائية الأبعاد. هذه الحلول كانت محدودة ضمن السلوك الخطي المرن، صالحة فقط لحالة الأنتفاق العميقة وتعتمد على تقريبات مبسطة دون الأخذ بالاعتبار للتأثير المتبادل بين التربة والنفق على الاستجابة العامة للنفق تحت التأثير الزلزالي (John and Zahra, 1987; Wang, 1993; Penzien and Wu, 1998).

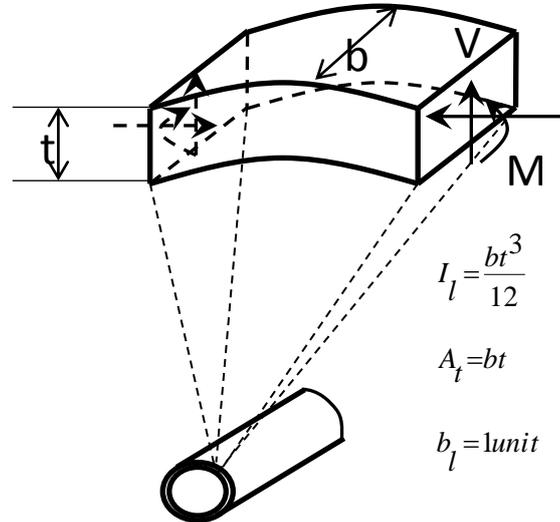
من المعلوم أن التربة تخضع لسلوك غير خطي حتى تحت تأثير التشوهات المنخفضة. في حالة الأحمال الديناميكية الشديدة، الاستجابة الزلزالية للنفق يمكن أن تتأثر بشكل كبير بسلوك التربة الغير الخطي. من جهة أخرى، خواص التربة القريبة من النفق يمكن أن تتعرض لاضطرابات مهمة نتيجة العمليات الميكانيكية للحفر. إن خواص المنطقة المتأثرة تتغير تبعاً للشروط الجيولوجية وطريقة الحفر المتعمدة. إن هذا الاضطراب الناتج في التربة يمكن أن يؤثر بشكل كبير على السلوك العام للوسط التحت أرضي. (Kwon et al, 2009; Martino and Chandler, 2004; Sato et al, 2000; Gomes, 2013).

هذه المقالة تقدم نموذج عددي ثلاثي الأبعاد بطريقة الفروقات المحدودة من أجل تقييم تأثير السلوك الغير الخطي للاستجابة الزلزالية لنتفق منفذ في تربة رخوة. بشكل خاص، دراسة تأثير عمليات الحفر على الاستجابة الزلزالية للنتفق. تم نمذجة عمليات حفر النفق بالطريقة الدرعية وفق طريقة convergence confinement. تأثير عمليات الحفر على الوسط المحيط تمت بتراكم عمليات الحفر خطوة بخطوة لجهة الحفر. تمت دراسة تأثير عمليات الحفر على الاستجابة الزلزالية من خلال مقارنة حالتين للنتفق: الأولى نتفق منفذ مسبقاً ودون الأخذ بالاعتبار لعمليات الحفر (TIP: Tunnel In Place) والحالة الثانية نتفق مع نمذجة كاملة لعمليات الحفر (TIM: Tunnel Installation Model).

2. نمذجة عديدة لنتفق سطحي تحت تأثير الأحمال الزلزالية:

تتعرض الأنتفاق خلال الزلازل لثلاثة أنواع من التشوهات (Owen and Scholl, 1981): إنضغاط وشد محوري، إنحناء طولاني وتشوهات بيضوية في مقطع النفق الدائري. هذا العمل يركز على الشكل الأخير من التشوهات المتعلقة بنشوء المقطع العرضي لقشرة النفق والنتيجة عن الأمواج الزلزالية القاصة المتقدمة بشكل متعامد مع محور النفق. حاول عدد من الباحثين تقديم موديلات تحليلية للقوى المحورية والعزوم الانعطاف المتشكلة في قشرة النفق والنتيجة عن التشوهات البيضوية في قشرة النفق (الشكل 1). معظم هذه الحلول تقترح شروط إنزلاق تام في السطح الفاصل بين قشرة النفق والوسط المحيط، بينما الحالة الحقيقية هي بين الإنزلاق التام والتماسك التام. شروط التماسك التام في السطح

الفاصل تؤدي الى تقدير أقل من الواقع للقوى المحورية الأعظمية الناجمة عن الاحمال الزلزالية، ولذلك نجد اهتمام الباحثين اكثر باعتبار السطح الفاصل في حالة إنزلاق تام (Höeg, 1986; Schwartz and Einstein, 1980; Hashash et al, 2005).

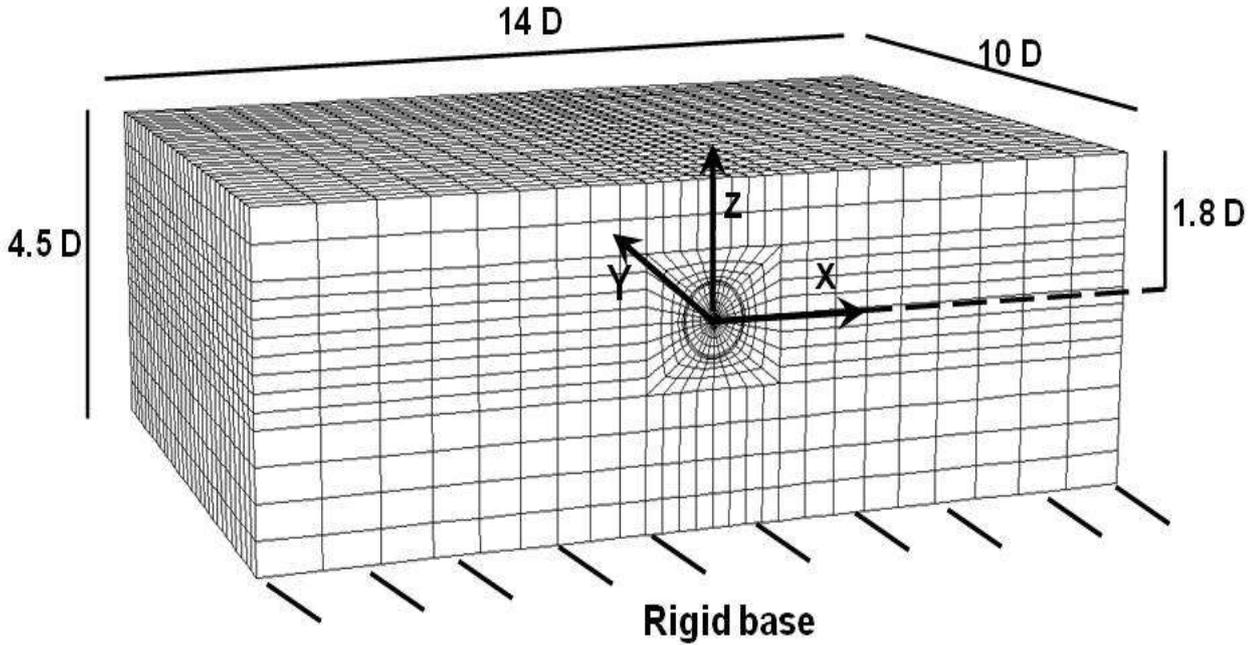


الشكل 1. القوى الداخلية في قشرة النفق الناتجة عن الحمولة الزلزالية (Power et al, 1996)

بعد عرض موجز للموديل العددي، تم عرض ومقارنة الحملات الستاتيكية لثلاث حالات: موبل خطي وموديلين غير خطيين لحالتي نفق منفذ مسبقاً دون الاخذ بالإعتبار لعمليات الحفر ونفق مع نمذجة كاملة لعمليات الحفر. ثم تم مقارنة نتائج التحليل الديناميكي الخطي المرن مع الطرق التحليلية، وفي النهاية تم دراسة تأثير عمليات الحفر عن طريق مقارنة الموديلين الغير خطيين للنفقين مع وبدون الاخذ بالاعتبار لعمليات الحفر.

2.1 . الموديل العددي:

الدراسة تشمل نفق دائري منفذ في تربة رخوة مستندة على طبقة صخرية. النفق له قطر حفر هو $D = 9m$ وقشرة بسماكة $t = 40 cm$. محوره يقع على عمق $H = 16 m$ ($1.8 D$) من سطح الأرض (الشكل 2). أبعاد الموديل هي ($x = 126 m, y = 90 m, z = 40 m$) على التتابع ($14D, 10D, 4.5D$) تم اختيارها لإزالة أي تأثير لأطراف الموديل على النتائج. الموديل العددي ثلاثي الأبعاد وفق طريقة الفروقات المحدودة يتضمن 18600 عنصر ذو ثمانية عقد. من أجل التحليل الغير خطي، تم اعتماد قانون مور كولومب لسلوك التربة من اجل حالتي النفق (مع وبدون تأثير عمليات الحفر).



الشكل 2. نموذج عددي ثلاثي الأبعاد.

الجدول (1) يلخص خصائص التربة وقشرة النفق. التربة عبارة عن تربة رملية سلتية متجانسة خصائصها هي: زاوية الاحتكاك الداخلي $\varphi = 35^\circ$ ، التماسك $C = 7 \text{ kPa}$ ، زاوية التوسع هي $\psi = 5^\circ$ ، معامل يونغ $E = 30 \text{ MPa}$ ومعامل بواسون $\nu = 0.3$. سلوك قشرة النفق تم اعتباره خطي مرن مع معامل يونغ $E = 35000 \text{ MPa}$ ومعامل بواسون $\nu = 0.25$.

جدول 1: خواص التربة وقشرة النفق.

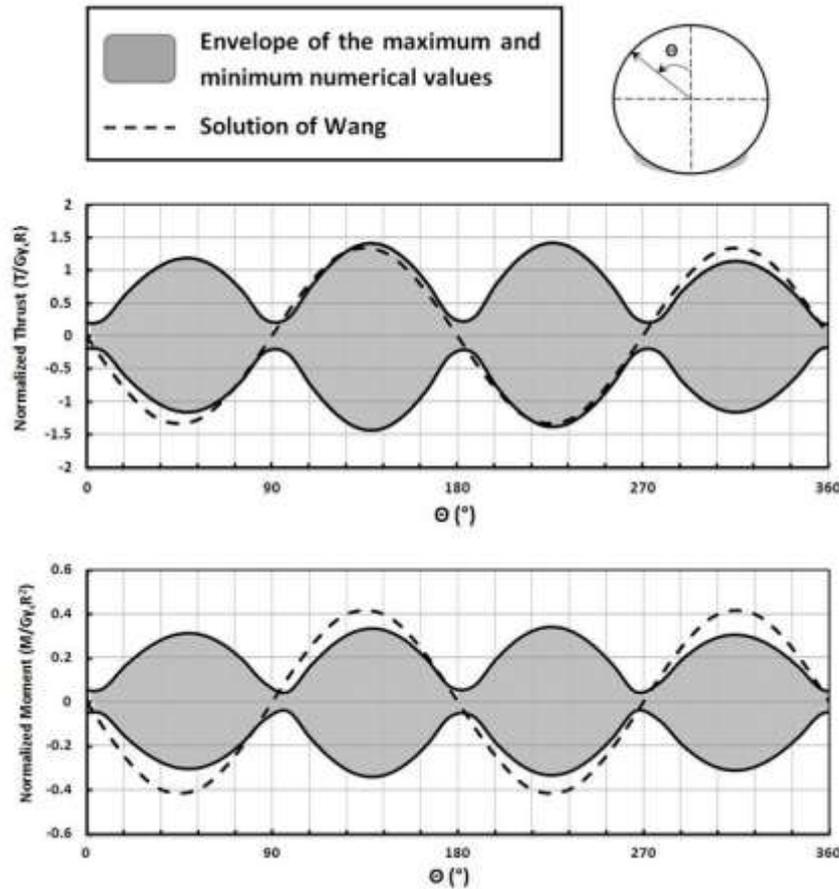
Material	E(MPa)	ν	$\gamma \text{ (KN/m}^3\text{)}$	$\varphi \text{ (}^\circ\text{)}$	$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	C (KPa)
Soil	30	0.3	20	35	5	7
Lining	35000	0.25				

تم تطبيق الحمولة الزلزالية على القاعدة الصلبة لكتلة التربة كتسارع جيبي هارموني يتضمن 6 دروات $\ddot{u}_g(t) = a_g \sin(2\pi f t)$. حيث أن $a_g = 0.1g$ في الاتجاه العمودي على محور النفق مع تردد $f_{load} = 0.6 \text{ Hz}$ قريب من التردد الطبيعي للتربة. $f_1 = 0.474 \text{ Hz}$.

2.2 . الموديل المرن:

في التحليل المرن، تم اعتماد تخامد Rayleigh بقيمة 5%. الشكل (3) يظهر توزيع القوى الداخلية الناتجة عن الحمل الديناميكي في قشرة النفق. مغلف القوى النازمية N وعزم الانعطاف M تم عرضهم تبعا للزاوية θ (تم تعريفها ضمن الشكل (3)). نتائج التحليل العددي تمت مقارنتها مع نتائج الموديل التحليلي المقترح من قبل (Wang, 1993) والتي تعتمد الطريقة شبه الستاتيكية في الحل. النتائج تظهر تقارب جيد بين الحل بطريقة الفروقات المحدودة وموديل Wang من أجل تماسك كامل على السطح الفاصل بين التربة والنفق. تبعا للنتائج، القوى النازمية الاعظمية في قشرة النفق

هي $N_{max} = 649 \text{ KN}$ والتي تقع عند $\theta = \pm 135^\circ$ ، أيضا عزم الانعطاف الأعظمي $M_{max} = 705 \text{ KN.m}$. هذه النتائج تتطابق أيضا مع نتائج (Shahrour et al.2010).



الشكل 3. توزيع القوى الداخلية في قشرة النفق والنتيجة عن الحمولة الزلزالية . تحليل مرن.

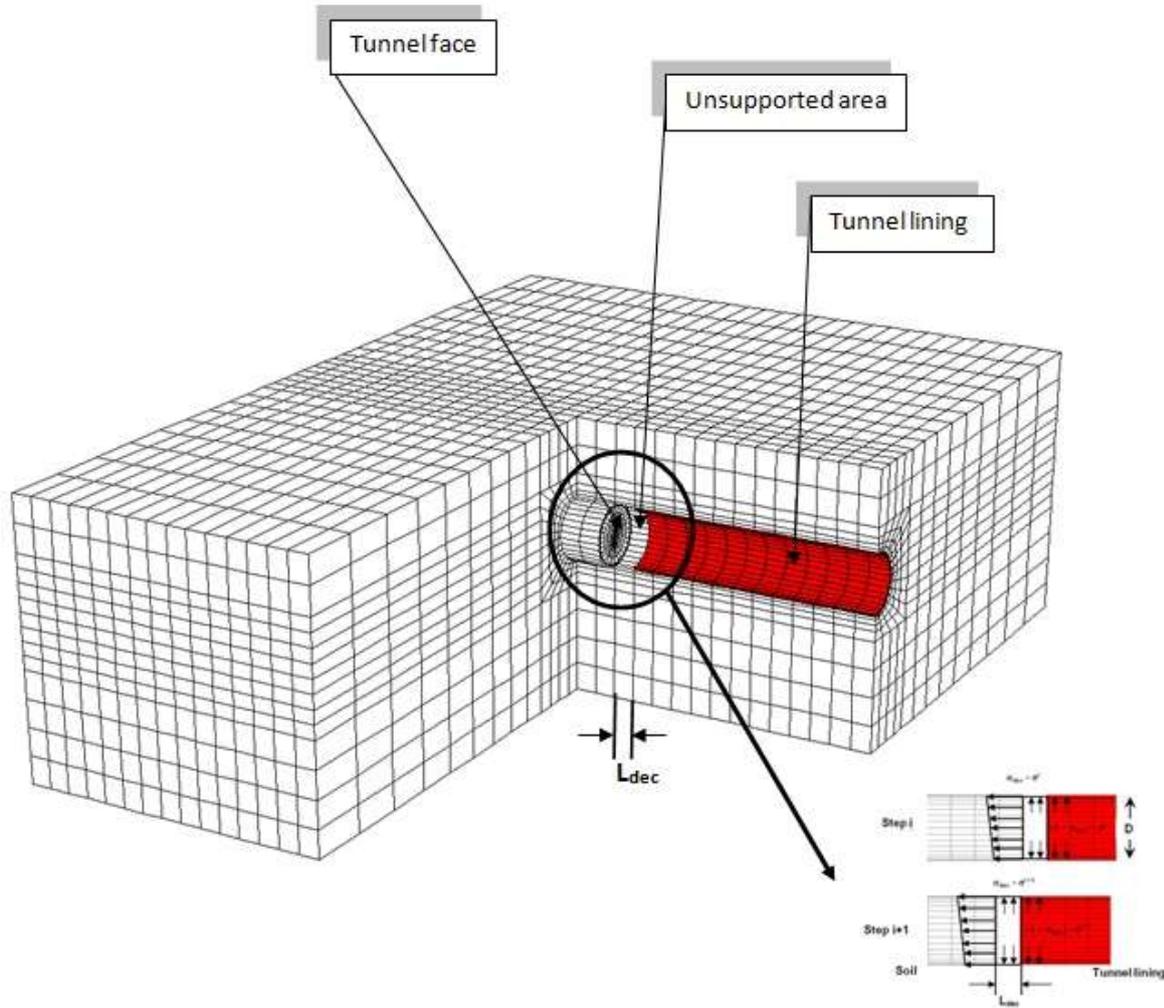
2. 3 . التحليل الغير الخطي . تأثير عمليات الحفر :

من أجل دراسة تأثير عمليات الحفر على الاستجابة الزلزالية للنفق، تم اجراء تحليل غير خطي من أجل حالتين للنفق: نفق TIP منفذ مسبقا ومن دون الأخذ بالاعتبار لعمليات الحفر ونفق TIM مع نمذجة لعمليات الحفر وتأثيرها على الحالة الإجهادية الأولية في التربة المحيطة بقشرة النفق.

2 . 3 . 1 . عملية الحفر :

تمت نمذجة عملية حفر نفق منفذ بالطريقة الدرعية مع ضغط على جبهة الحفر، بالاعتماد على نظرية convergence–confinement وفق (Panet and Guenot, 1982). هذه الطريقة تستخدم نموذج حفر التربة خطوة بخطوة. انطلاقا من الحالة الإجهادية الأولية في التربة، تم تطبيق تتابع عملية الحفر وفق الطريقة المقترحة من قبل (Mroueh and Shahrour (2008). انتقالات التربة محكومة وفق المعامل $(0 < \alpha_{dec} < 1)$ والمنطقة التي لم يتم تركيب قشرة النفق فيها بعد بطول L_{dec} (الشكل 4).

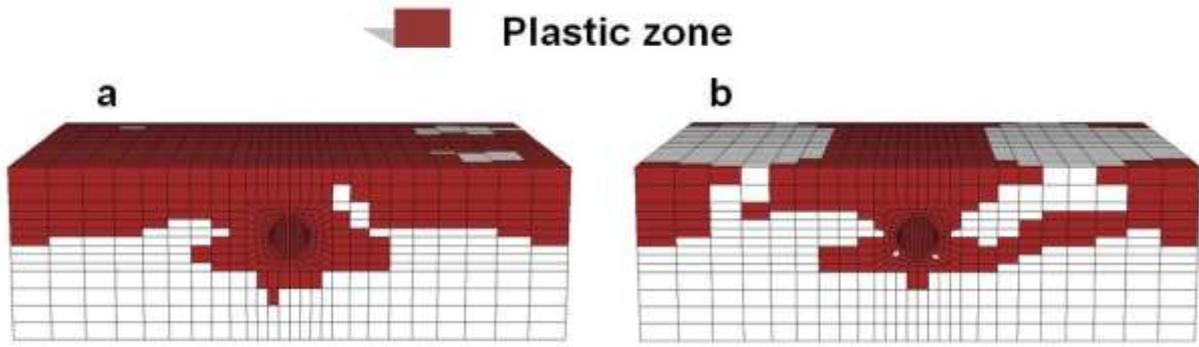
هذه البارامترات تمكن المستخدم من الأخذ بالاعتبار للفراغ المتشكل حول النفق بالإضافة لعمليات الحقن. في هذه الدراسة، عمليات الحفر تتألف من 30 خطوة، تمثل حفر 30 مقطع من التربة بطول $L_{dec} = D/3 = 3 \text{ m}$ لكل خطوة مع معامل $\alpha_{dec} = 0.5$.



الشكل 4. موديل مع نمذجة الحفر وفق طريقة convergence-confinement حسب (Mroueh and Shahrour, 2008)

النتائج والمناقشة:

الحمولة الديناميكية والشروط الطرفية هي نفسها المستخدمة في الموديل المرن الخطي غير أن التخامد تم تخفيضه الى 2%. الشكل (5) يظهر انتشار اللدونة في التربة بعد نهاية تطبيق الحمولة الديناميكية لكل من حالتي النفق TIP و TIM. يمكن ملاحظة أن عمليات الحفر تؤدي الى تضخم اللدونة في كتلة التربة والتي يمكن تفسيرها بتخلخل التربة بعد عمليات الحفر.

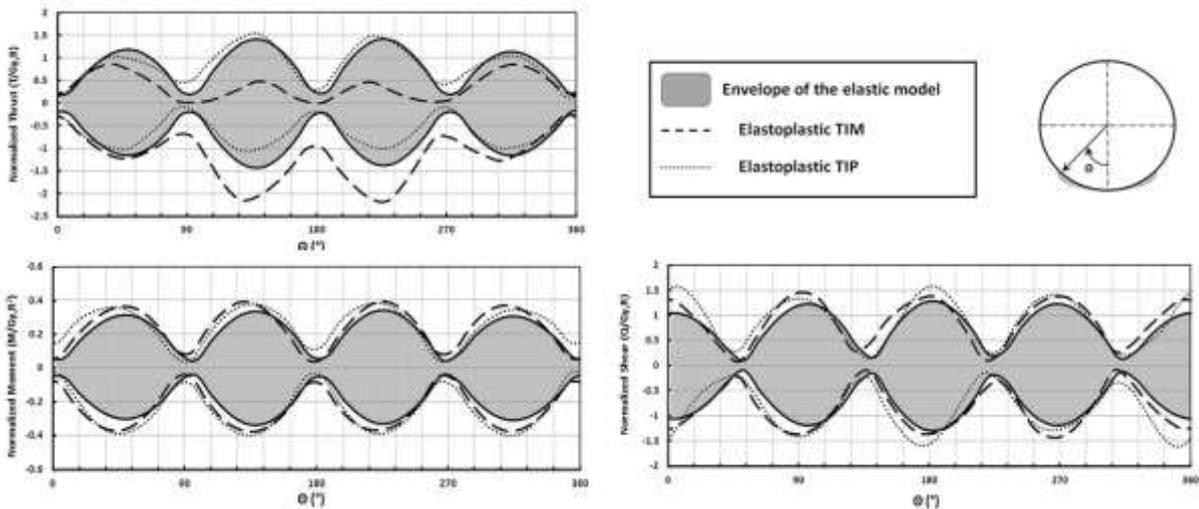


الشكل 5. توزيع اللدونة بعد نهاية التحميل الزلزالي: (a) موديل TIM ، (b) موديل TIP.

مغلف القوى الداخلية (القوى الناظمية وعزم الانعطاف) الأعظمية والأصغرية في قشرة النفق خلال التحميل الزلزالي تم عرضها في الشكل (6) والجدول (2). النتائج تتضمن حالتى النفق TIP وTIM بالإضافة للحالة المرنة. القوى الداخلية تمت عرضها وفق الصيغة

$$T^* = \frac{T}{G\gamma_c R}, \quad M^* = \frac{M}{G\gamma_c R^2} \quad \text{and} \quad Q^* = \frac{Q}{G\gamma_c R}$$

حيث G معامل القص للتربة، γ_c تشوه التربة في حالة الوسط الحر و R نصف قطر النفق.



الشكل 6. مقارنة بين القوى الداخلية الناتجة عن التحميل الزلزالي من أجل الموديل الخطي المرن وموديلي TIP وTIM الغير خطيين.

إن تضخم اللدونة في كتلة التربة الناتج عن عمليات الحفر يؤدي إلى تغير في توزيع القوى الداخلية في قشرة النفق. النتائج تظهر أن عمليات الحفر لها تأثير كمي ونوعي على القوى الناظمية. عندما $90^\circ < \theta < 270^\circ$ ، يمكن ملاحظة انخفاض في قوى الضغط الأعظمية لحالة النفق TIM (-30%) مقارنة بالموديل المرن. هذا الانخفاض في الضغط يترافق مع زيادة واضحة في قوى الشد (+80%). هذا التغير نلاحظه بشكل أقل في حالة النفق TIP عند مقارنته مع الموديل المرن حيث أن الزيادة في قوى الضغط هي بحدود (+13%) والنقصان في قوى الشد بحدود (-28%).

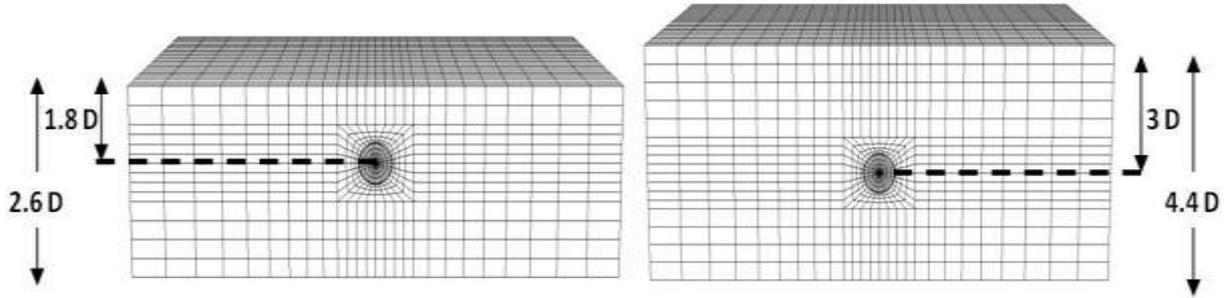
من ناحية أخرى، عزم الانعطاف الاعظمي الناتج عن التحليل اللاخطي لا يتأثر باضطرابات التربة الناتجة عن عمليات الحفر حيث أن قيمته متقاربة من اجل الحالتين TIP و TIM وهو أكبر ب % 30 بالمقارنة مع التحليل الخطي المرن.

Model	Thrust (KN)		Bending moment (KN.m)	Shear Force (KN)
	Compression	Tension		
Elastic	647	647	705	584
TIM	466	1160	911	693
TIP	560	826	929	869

الجدول 2: القوى الداخلية الاعظمية المتشكلة في قشرة النفق والناتجة عن التحليل الديناميكي.

4.2 . تأثير عمق محور النفق:

من أجل دراسة تأثير عمليات الحفر تبعا لعمق النفق، تم اجراء دراسة عديدة من أجل قيمتين لعمق محور النفق $H = 1.8D$ و $H = 3D$ (الشكل 7). هذين القيمتين تمثلان حالتي نفق سطحي ونفق عميق. بما أن ارتفاع التربة مختلف في الموديلين، تم تطبيق حمولة ديناميكية بتردد موافق للتردد الطبيعي الثالث للتربة ($F = 1.422 \text{ Hz}$) من أجل $H = 1.8D$ و ($F = 1.095 \text{ Hz}$) من أجل $H = 3D$ ومدة تطبيق الحمولة الديناميكية هي 5 دورات.



الشكل 7. موديلين للنفق حسب عمق محور النفق $H=1.8 D$ و $H=3 D$.

بالنسبة للنفق السطحي، النتائج (الشكل a8) تؤكد ما حصلنا عليه سابقا. يمكن ملاحظة تأثير مهم لعمليات الحفر على القوى الناظمة. هذا التأثير يكون أقل بالنسبة للقوى القاصة وعزم الانعطاف. من ناحية أخرى، بالنسبة للنفق العميق، يمكن ملاحظة من الشكل (b8) أن الاختلاف بين الحالتين TIP و TIM ليس مهما. بالتالي فإن عمليات الحفر لا تؤثر على القوى الداخلية الناتجة عن الحمولة الزلزالية في حالة الأنفاق العميقة.

References:

- Giannakou, A., Nomikos, P., Anastasopoulos, I., Sofianos, A., Gazetas, G., Yiouta-Mitra, P., 2005. Seismic behaviour of tunnels 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-Erdem&Solam* (Eds). Taylor & Francis Group., London, ISBN 04 1537 452 9.
- Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I-C., 2001. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 16, 247-293.
- Hashash, Y.M.A., Park, D., Yao, J.I-C., 2005. Ovaling deformation of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 20, 435-441.
- Höeg, K., 1986. Stresses against underground structural cylinders. *Soil Mechanics and Foundations Division*. 94(4), 833-858.
- John St, C.M., Zahra, T.F., 1987. A seismic design of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2(2), 165-197.
- Kham, M., Semblat, J-F., Kurose, A., Xiao, H.H., Dangla, P., 2001. Analyse de l'interaction onde sismique/cavité souterraine: Approches analytique et numérique. 15eme Congrès Français de Mécanique. Nancy, Laboratoire Central des Pont et Chaussées.
- Kwon, S., Lee, C.S., Cho, S.J., Jeon, S.W., Cho, W.J., 2009. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 24, 1-13.
- Luco J. E., De Barros F. C. P., 1994. Dynamic Displacements and Stresses in the Vicinity of a Cylindrical Cavity Embedded in a Half-space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(3), 321-340.
- Martino, J.B., Chandler, N.A., 2004. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41(8), 1413-1426.
- Merritt, J.L., Monsees, J.J., Hendron, A.J., 1985. Seismic design of underground structures. *Proceedings of the 1985 rapid Excavation Tunneling Conference*. 1, 104-131.
- Mroueh, H., Shahrour, I., 2008. A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 23, 38-45.
- Owen, G.N., Scholl, R.E., 1981. Earthquake engineering of large underground structures. Report No. FHWA/RD-80/195, Federal Highway Administration and National Science Foundation.
- Panet, M., Guenot, A., 1982. Analysis of convergence behind the face of a tunnel. *Proceeding of the International Conference Tunnelling 82, Birghton*, 187-204.
- Penzien, J., Wu, C., 1998. Stresses in linings of bored tunnels. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. 27, 283-300.
- Power, M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J., 1996. Vol III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels. Report Draft. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo., New York.
- Sato, T., Kikushi, T., Sugihara, K., 2000. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan. *Engineering Geology*. 84, 105-116.
- Schwartz, C.W., Einstein, H.H., 1980. Improvement design of tunnel supports. Volume 1: simplified analysis for ground-structure interaction in tunneling. Report No. UMTA-MA-06-0100-80-4, Urban Mass Transportation Administration (UMTA).

Shahrour, I., Khoshnoudian, F., Sadek, M., Mroueh, H., 2010. Elastoplastic analysis of the seismic response of tunnels in soft soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 25, 478-472.

Wang, J.N., 1993. *Seismic design of tunnels: a state of the art approach*, Monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc., New York.