

Tests d'arrachement dynamiques pour caractériser le comportement sismique des murs en sol cloué.

Dynamic pull-out tests to characterize the seismic behavior of soil-nailed walls

Ghida HAWWA¹, Jean DE SAUVAGE¹, Patrick JOFFRIN¹, Yannick FARGIER¹, Jean-Pierre RAJOT¹.

¹ Univ Gustave Eiffel, Univ Lyon, GERS-RRO, F-69675 Lyon, France

RÉSUMÉ – Les murs cloués en sol, efficaces et faciles à mettre en œuvre, sont prisés pour le renforcement des sols, offrant une performance remarquable contre les mouvements forts du sol. Leur stabilité dépend de l'interaction et du frottement à l'interface sol-inclusion. Cet article étudie cette interface via des essais de traction dynamique avec un dispositif innovant. Les données obtenues auront pour objectif d'affiner les modèles de comportement frictionnel sol-clou.

ABSTRACT – Soil nailed walls are popular for soil reinforcement due to efficiency and ease of implementation, excelling against strong ground motions. Their stability depends on interaction and friction at the soil-inclusion interface. This paper investigates local interface behavior using dynamic pull-out tests with a newly designed device, analyzing data to refine models of soil-nail frictional behavior.

1. Introduction

Les techniques de soutènement en sol renforcé telles que les parois clouées, ont été introduites en France en 1972-1973 pour soutenir un quai de gare à Versailles. Elles se sont depuis largement répandues en raison de leur capacité à améliorer la stabilité et la résistance du sol (Schlosser and Unterreiner, 1991). Ces parois de soutènement présentent plusieurs avantages, tels que la légèreté de l'équipement, l'adaptabilité aux différentes conditions du site, et leur efficacité en termes de temps et de coût. Le principe de base des murs cloués repose sur l'interaction entre l'inclusion (clou) et le sol environnant. La résistance offerte par les clous résulte de la tension axiale qui s'y développe en raison de la déformation de la masse de sol qui les entoure (Schlosser and Unterreiner, 1991).

De plus, ces structures ont démontré leur résistance lors de puissants séismes, tels que le tremblement de terre de Loma Prieta en 1989. Durant cet événement, huit murs cloués ont été inspectés, et malgré leur proximité avec l'épicentre du séisme, ces murs n'ont présenté aucun signe de détérioration ou de déformation, contrairement à d'autres structures qui ont subi d'importants dégâts (Vucetic et al., 1998).

Différentes méthodes ont été employées pour étudier le comportement dynamique des murs en sol cloué. Cela inclut la modélisation en centrifugeuse (Tufenkjian and Vucetic, 2000), des tests sur table vibrante à 1g tels que ceux de (Yazdandoust, 2017), (Tabucanon et al., 1995), (Xu et al., 2020) ainsi que des modèles numériques (Chavan et al., 2017), (Moniuddin et al., 2016) et (Koseki et al., 2006). Cependant, ces études se concentrent principalement sur l'évaluation de la stabilité globale de l'ensemble de la structure et ne tiennent pas compte des déformations localisées à l'interface sol-clou.

D'autre part, les essais d'arrachement statiques se sont révélés efficaces pour étudier l'interaction et la résistance au cisaillement entre le clou et le sol environnant, ainsi que la résistance au cisaillement de leur interface. Ces essais ont exploré différents paramètres, tels que la longueur, le diamètre, la rigidité, et la rugosité de l'interface du clou (Tei and Milligan, 1998). Un millier d'essais d'arrachage sur le terrain ont été collectées sur des sites à Hong Kong par (Cheung and Shum, 2012) dans l'approche de l'estimation de la résistance à l'arrachement des clous de sol. Les données ont été collectées pendant deux ans (2004

à 2006), en étudiant différents types de matériaux, la pression des terrains en surface et l'influence de la saturation. Les résultats montrent que les résistances à l'arrachement sur le terrain sont généralement plusieurs fois supérieures à celles estimées à l'aide de la méthode de la contrainte effective, et que la marge de sécurité diminue progressivement lorsque la pression des terrains en surface augmente. L'influence de la variation du degré de saturation entre les conditions sèches et saturées n'a pas montré d'influence prépondérante sur la résistance à l'arrachement

L'influence de la pression d'injection et de la saturation du sol a également été étudiée au moyen d'essais d'arrachement en laboratoire (Su, 2006) ainsi que la cohésion, l'angle de frottement, la teneur en eau, et la dégradation des particules (Shahraki Ghadimi et al., 2017).

Des essais cycliques de cisaillement en boîte ont mis en lumière la dégradation du frottement dans l'interface sol-pieu sous l'effet de charges cycliques (Poulos, 1989); (Tabucanon et al., 1995). Des facteurs tels que le nombre de cycles, l'amplitude des déplacements, la rugosité, et la rigidité de l'interface ont été pris en compte dans ces études, révélant une réduction des contraintes de cisaillement après un nombre spécifique de cycles.

De plus, Zhou et al. (2020) ont examiné l'influence de la forme des particules dans les essais cycliques de cisaillement, démontrant que la rupture des particules près de l'interface et la densification du sol contribuaient à augmenter la surface de contact entre les particules dans la zone d'interface entraînant ainsi une augmentation progressive de l'angle de frottement de l'interface.

Pour étudier plus précisément la résistance dynamique de l'interface, des essais d'arrachement rapide ont été réalisés par Tan et al. (2008) à l'aide d'un marteau à impulsion. Les essais ont été réalisés pour différentes rugosités et différents diamètres des clous. Ces essais ont montré que la réponse à l'arrachement avant le pic était plus rigide et atteignait des valeurs d'arrachement plus élevées avec des diamètres de clous plus importants, en particulier pour les clous à texture rugueuse (Tan et al., 2008). La vitesse de chargement n'a pas eu d'effet dans le cas des clous lisses. Toutefois, il convient de noter que la résistance dynamique à l'interface, en particulier pour les clous à texture rugueuse, reste insuffisamment comprise.

Pour combler cette lacune, le laboratoire GERS-RRO a développé un dispositif innovant d'arrachement dynamique et associé à une mesure par fibre optique pour suivre l'évolution de la déformation du clou. Ce dispositif vise à fournir des données expérimentales essentielles sur les caractéristiques de l'interface sol-clou lors d'une charge dynamique, contribuant ainsi à une meilleure compréhension du comportement des murs en sol cloué.

2. Appareillage d'arrachement dynamique

2.1. Description Générale

Le dispositif conçu par le laboratoire RRO permet d'appliquer des forces de traction dynamiques et contrôlées sur des éléments de renforcement tels que des clous. Le dispositif consiste en un vérin connecté à un circuit hydraulique, comme le montre la figure 1, qui est contrôlé par un automate programmable. Ce dispositif d'essai d'arrachement peut appliquer une force de tension dynamique à une fréquence spécifiée allant de 0,1 à 5 Hz, ce qui correspond aux fréquences typiquement associées à des séismes de magnitude modérée. Le dispositif est conçu pour permettre des essais à la fois en laboratoire et sur le terrain. À cette fin, la structure se compose d'éléments pesant chacun moins de 30 kilogrammes.

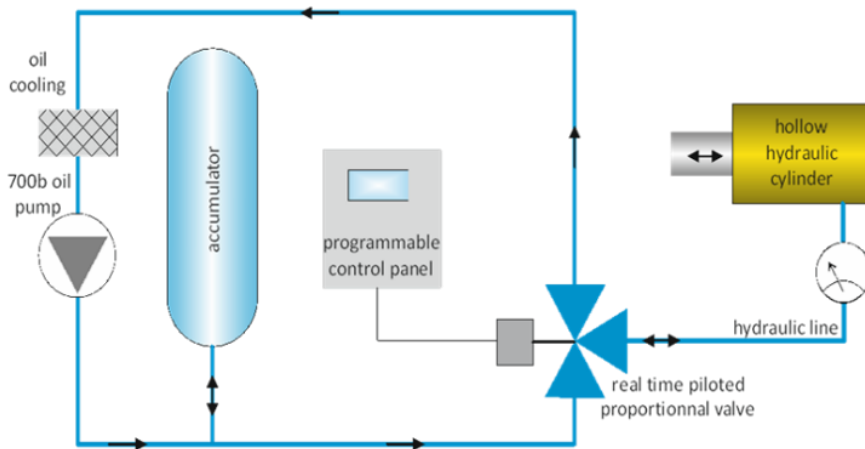


Figure 1. Circuit hydraulique constituant le dispositif d'extraction dynamique.

2.2. Composants du dispositif

Le dispositif est constitué de 5 éléments, comme le montre la figure 2 : une pompe hydraulique d'une pression maximale de 700 MPa, un accumulateur hydraulique avec un régulateur de pression et un manomètre, une électrovanne contrôlée à haute pression, un automate programmable, et enfin, un vérin hydraulique de 600 kN fixé au clou pour imposer la charge.



Figure 2. Composants du dispositif d'extraction dynamique : (1) pompe hydraulique, (2) accumulateur hydraulique, (3) électrovanne contrôlée, (4) automate programmable.

2.3. Mode de Fonctionnement

Le système peut fonctionner en mode manuel et en mode automatique. En mode automatique, les utilisateurs peuvent programmer des cycles de test à l'aide de l'automatique programmable. Dans les essais traditionnels d'arrachement par charge incrémentale peuvent être réalisés (configuration par paliers de charge statique). Alternativement, la charge statique peut être augmentée de manière linéaire au cours du temps (configuration en rampe). Le principe de base régissant le fonctionnement de ce dispositif est de permettre l'application simultanée d'une impulsion dynamique de fréquence spécifique et d'une force de traction prédéterminée (rampe ou paliers).

L'impulsion dynamique générée pendant le chargement est définie par deux paramètres :

- Période de l'impulsion, comprise entre 100 ms et 5000 ms, correspondant à une fréquence de 0,1 à 5 Hz.
- Amplitude de l'impulsion de tension, allant de 1 % à 50 % de la charge de traction statique.

Ces impulsions sont superposées au programme de chargement statique en cours. Elles sont centrées et leur intensité oscille de +/- l'amplitude spécifiée pour la durée d'impulsion spécifiée.

3. Essais expérimentaux

3.1. Dispositif expérimental

Plusieurs tests ont été réalisés pour valider la capacité du dispositif et sa capacité à effectuer des impulsions de traction, ainsi que pour garantir des mesures appropriées fournies par les capteurs de surveillance.

3.1.1. Préparation de la barre d'acier

Dans ce but, une barre SAS 500/550 de 32 mm de diamètre et de 3 mètres de longueur est rainurée sur ses deux méplats. Dans les rainures, une fibre optique est collée sur la longueur de la barre (figure 3). Cette barre est ensuite insérée dans un tube métallique de 150 mm de diamètre et de 2 mètres de long. Le clou en acier est centré dans le tube, de manière à ce que les fibres optiques soient positionnées l'une sur le dessus et l'autre en dessous (figure 3(a)). Une des extrémités de la barre est solidement fixée à l'aide d'une plaque de support et d'un écrou, et collée avec du silicone pour éviter les fuites de sable, tandis que l'autre est laissée libre pour positionner le vérin à son extrémité.

La barre en acier est équipée le long de 2,3 m de sa longueur de deux fibres optiques qui mesurent les déformations simultanément sur toute la longueur de la barre. Les mesures sont enregistrées à une fréquence d'acquisition de 125 Hz et une discrétisation spatiale de 2,6 mm entre les jauges. La tête du clou est équipée d'un capteur de charge qui permet la mesure directe de la force de traction appliquée, à pour comparaison avec la force générée par la machine dynamique. Un capteur de déplacement permet également de mesurer le déplacement en tête de clou (figure 5).

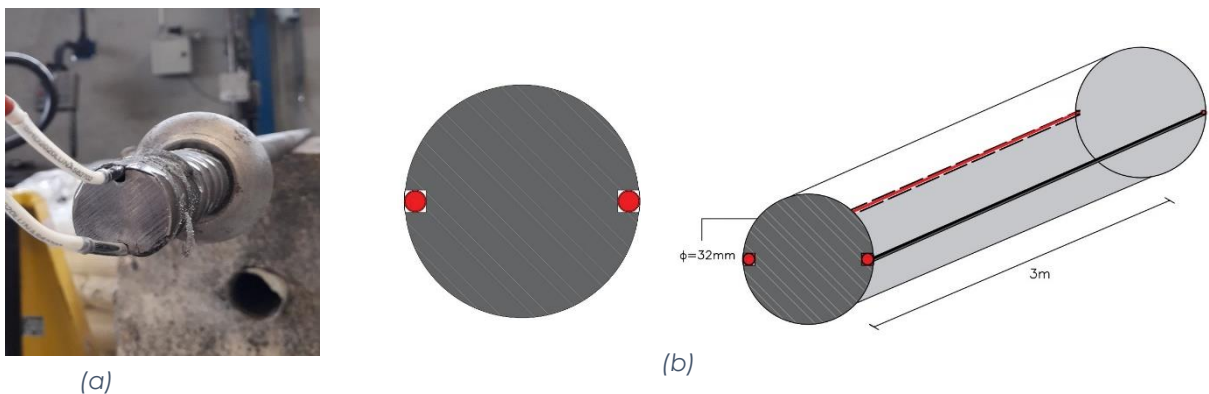


Figure 3. (a) Les connecteurs à l'extrémité de chaque fibre optique (b) Illustration de la barre en acier avec une double fibre optique.

3.1.2. Mise en place du sable

Le sable d'Huston HN31, dont les propriétés sont répertoriées dans la table 1, est utilisé dans les tests suivants. Le tube métallique avec le clou en acier est levé en position verticale à l'aide de poulies attachées au plafond. Le sable d'une masse de 53 kg est ensuite installé à différentes étapes, à chaque fois vibré à l'aide d'une aiguille vibrante pour assurer une compaction adéquate de la masse requise. La densité obtenue est alors de 94,8% de la densité maximale du sol sec. L'extrémité supérieure est ensuite scellée avec de la mousse, puis une plaque métallique est soudée. Le tube est ensuite positionné horizontalement, le vérin étant fixé à sa tête comme indiqué dans la figure 4.

Table 1. Propriétés du sable d'Hostun HN31[1]

Property	Value	Unit
Maximum void ratio (e_{max})	1.01	-
Minimum void ratio (e_{min})	0.555	-
Maximum Density (ρ_{max})	1620	Kg/m ³
Minimum Density ρ_{min}	1318	Kg/m ³
Specific gravity of solid (G_s)	2.65	-
d ₅₀ size	480	Microns

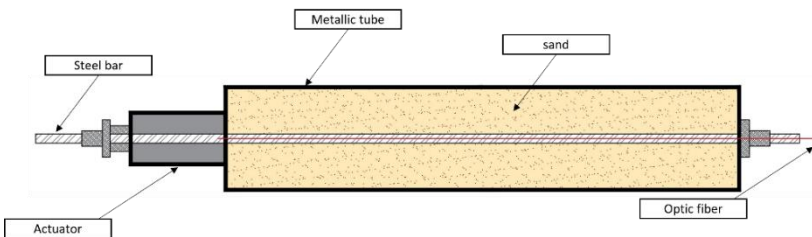
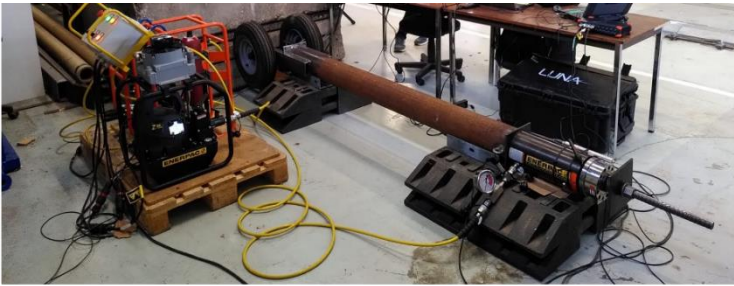


Figure 4. Illustration de la vue de dessus pour les connexions

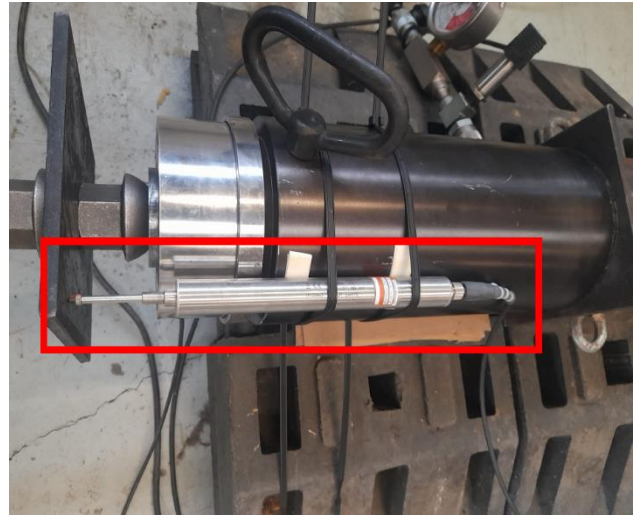


Figure 5. Capteurs connectés à la tête du clou (le capteur de déplacement est marqué en rouge).

3.2. Procédure d'essai

Afin d'étudier les performances de l'interface sol-clou, des charges statiques et dynamiques ont été appliquées. Les essais statiques ont été conçus dans deux configurations différentes, en utilisant un processus de chargement par paliers réalisé en quatre étapes à des pressions spécifiées de 10-100-140-213 bars, et un autre chargement en pente jusqu'à 213 bars. L'utilisation de la charge dynamique nécessite cependant la définition des propriétés de l'impulsion dynamique à imposer ainsi que celle de la tension statique. Un processus de chargement incrémental identique à celui utilisé dans les essais statiques a également été utilisé. L'impulsion appliquée a été définie à 5 % de l'amplitude de la charge, avec une variation de la fréquence choisie entre 1 et 5 Hz. Chaque incrément de charge a été maintenu pendant une période de 30 secondes/étape, la première étape étant toujours statique (aucune impulsion appliquée).

4. Résultats et discussion

Les déformations mesurées au cours de la procédure de chargement en fonction du temps et de la position sur le clou sont présentées dans la figure 6 et 7. Les bandes horizontales marquent les impulsions dynamiques, indiquant que la charge est transmise uniformément à travers le clou à chaque charge, et où les lignes verticales en pointillés marquent la tête du clou, la position du vérin, le milieu du tube et l'écrou à l'extrémité.

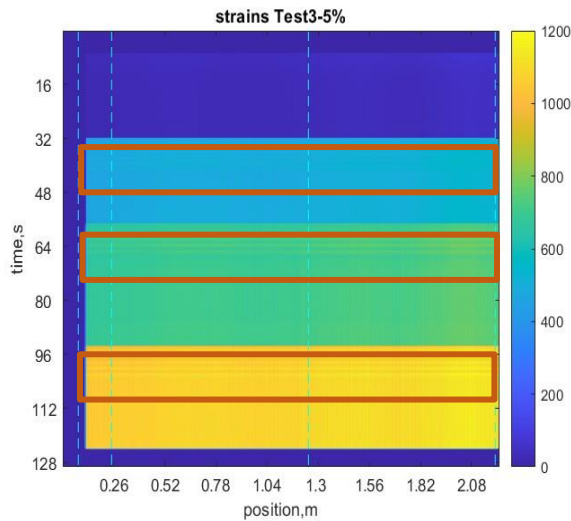


Figure 5. Mesures des déformations par fibre optique pendant la procédure de chargement

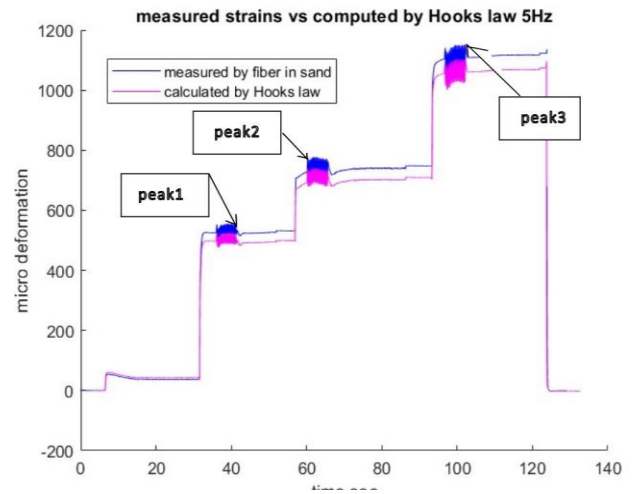


Figure 4. Déformations mesurées vs déformations calculées dans l'essai à 3Hz

Dans la figure 7, nous pouvons voir que les valeurs des déformations mesurées par la fibre optique, et celles calculées par la loi de Hook où seule la tension est prise en compte sont cohérentes, avec celles mesurées par la fibre optique qui sont inférieures (en raison de la friction subie). Pour chaque test, la déformation moyenne clou (moyenne en chaque point des déformations mesurées par les deux fibres) est calculée et présentée dans la figure 8.

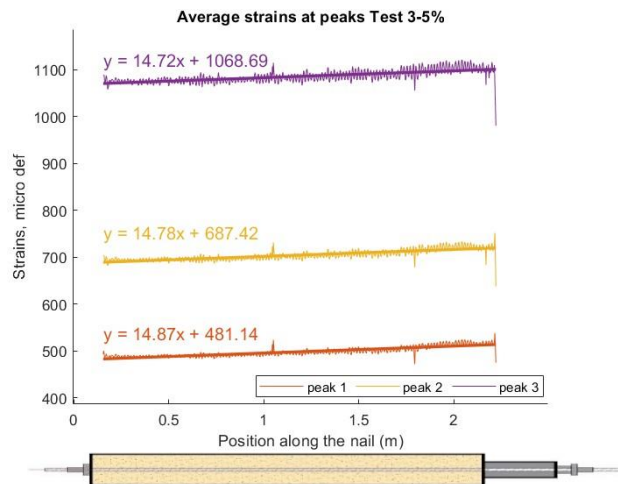


Figure 6. Contrainte moyenne entre les fibres optiques supérieures et inférieures pour le test 3-5% en fonction de la position le long du clou la charge maximale de chaque palier

On peut constater que les valeurs des déformations augmentent le long de la position du clou, commençant par son extrémité fixe et augmentant linéairement à mesure que la position progresse vers la tête du clou où la charge de traction est appliquée. Cette augmentation des valeurs de déformation pendant le test de traction indique que l'interface entre le sol et le clou fait l'expérience de frottement.

5. Conclusions

Un nouveau dispositif d'impulsion conçu pour étudier le comportement dynamique des clous a été développé et présenté dans ce document. La performance de ce dispositif a été examinée à travers une série de tests, avec l'aide de mesures obtenues par fibre optique. L'utilisation de la fibre optique a permis d'accéder aux déformations sur l'ensemble du clou, ce qui est essentiel pour comprendre le comportement de l'interface.

Les tests ont permis d'évaluer la capacité du nouveau dispositif dynamique, ainsi que la validité des mesures de la fibre optique en présence d'impulsions dynamiques. Une cohérence entre les mesures des capteurs (capteur de chargement et fibre optique) a été obtenue, ainsi qu'une transmission uniforme de la charge à travers le clou. Dans les conditions d'essai définies, les déformations mesurées nous permettent de calculer le frottement à l'interface.

Des tests supplémentaires dans des conditions plus proches des essais sur le terrain réel, où la barre en acier est enduite de coulis de ciment, sont en cours pour mieux comprendre les résultats actuellement obtenus et seront présentés ultérieurement.

6. Remerciements

Les auteurs adressent leurs sincères remerciements à l'équipe technique responsable de la conception et de la production de l'appareil, ainsi qu'à leur expertise lors de la réalisation des tests.

7. Références bibliographiques

- Chavan, D., Mondal, G., Prashant, A., 2017. Seismic analysis of nailed soil slope considering interface effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 100, 480–491. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.06.024>
- Cheung, W.M., Shum, K.W., 2012. Review of the Approach for Estimation of Pullout Resistance of Soil Nails. 2012.
- Koseki, J., Bathurst, R., Guler, E., Kuwano, J., Maugeri, M., 2006. Seismic stability of reinforced soil walls.
- Moniuddin, Md.K., Manjularani, P., Govindaraju, L., 2016. Seismic analysis of soil nail performance in deep excavation. *Geo-Engineering* 7, 16. <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0030-y>
- Poulos, H., 1989. Cyclic Axial Loading Analysis of Piles in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Schlosser, F., Unterreiner, P., 1991. Soil Nailing in France: Research and Practice.
- Shahraki Ghadimi, A., Ghanbari, A., Sabermahani, M., Yazdani, M., 2017. Effect of soil type on nail pull-out resistance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 170, 81–88. <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00038>
- Su, L., 2006. Laboratory pull-out testing study on soil nails in compacted completely decomposed granite fill.
- Tabucanon, J., Airey, D., Poulos, H., 1995. Pile Skin Friction in Sands from Constant Normal Stiffness Tests. *Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J* 18. <https://doi.org/10.1520/GTJ11004J>
- Tan, S.A., Ooi, P.H., Park, T.S., Cheang, W.L., Professor, A., 2008. Rapid Pullout Test of Soil Nail.
- Tei, K., Milligan, G.W.E., 1998. The Pull-Out Resistance of Model Soil Nails. *地盤工学会論文報告集* 38, 179–190. https://doi.org/10.3208/sandf.38.2_179
- Tufenkjian, M.R., Vucetic, M., 2000. Dynamic Failure Mechanism of Soil-Nailed Excavation Models in Centrifuge. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 126, 227–235. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:3\(227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:3(227))
- Vucetic, M., Tufenkjian, M.R., Felio, G.Y., 1998. The Loma Prieta, California, earthquake of October 17, 1989--earth structures and engineering characterization of ground motion, Earth structures and engineering characterization of ground motion. U.S. G.P.O., Washington.
- Xu, P., Hatami, K., Jiang, G., 2020. Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests. *Geotextiles and Geomembranes* 48, 82–97. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103507>

- Yazdandoust, M., 2017. Experimental study on seismic response of soil-nailed walls with permanent facing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 98, 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.04.009>
- Zhou, W., Guo, Z., Wang, L., Li, J., Rui, S., 2020. Sand-steel interface behaviour under large-displacement and cyclic shear. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 138, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106352>