

PhD position at RRO lab – Bron Campus, France

Offre de thèse de doctorat, laboratoire RRO, Campus de Bron

Optimisation of seismic design for soil-nailed walls

Optimisation du dimensionnement au séisme des murs en sol cloué

Funding: MEGA Doctoral School (audition on 17 or 18 June 2024)

Supervision: Anne-Sophie Colas (HDR, Université Gustave Eiffel, [RRO Laboratory](#)), Sandra Escoffier et Thierry Dubreucq (Université Gustave Eiffel, [CG Laboratory](#)), Jean de Sauvage (Université Gustave Eiffel, RRO Laboratory, jean.de-sauvage@univ-eiffel.fr)

The experimental campaign will take place in CG laboratory, based in Nantes, and the PhD student will have to spend a significant time in Nantes (min 1 year).

Candidate profile: MSc Degree in Civil Engineering, Geotechnical Engineering

Application: Open until end of March 2024. The application file must include cover letter, CV, grade transcripts for the past five years of study (including MSc) and two letters of recommendation.

Financement : Ecole Doctorale MEGA (audition les 17 et 18 juin 2024)

Encadrement : Anne-Sophie Colas (HDR, Université Gustave Eiffel, [Laboratoire RRO](#)), Sandra Escoffier et Thierry Dubreucq (Université Gustave Eiffel, [Laboratoire CG](#)), Jean de Sauvage (Université Gustave Eiffel, Laboratoire RRO, jean.de-sauvage@univ-eiffel.fr)

La campagne expérimentale aura lieu dans le laboratoire CG, basé à Nantes et le doctorant sera amené à passer un temps significatif à Nantes (min 1 an).

Profil recherché : Master en génie civil – géotechnique.

Candidature : Ouverte jusque fin mars 2024. Le dossier de candidature devra comporter une lettre de motivation, un CV, un relevé des notes des 5 dernières années d'études, incluant le master et deux lettres de recommandation.

Résumé en français :

Les murs cloués sont des ouvrages de soutènement réalisés par excavations successives et stabilisés par de longues inclusions métalliques scellées dans le sol, appelées clous. Ces

derniers limitent les mouvements de la masse de sol grâce au frottement induit par tout déplacement relatif entre le clou et le sol (Schlosser et al., 1993).

Le retour d'expérience montre que ces ouvrages sont souvent surdimensionnés (Bui et al., 2020), notamment en raison de leur justification au regard des sollicitations sismiques (Cotton et Luark, 2020). Ainsi, une étude détaillée réalisée à Loma Prieta suite au séisme du 17 octobre 1989 a montré que les neuf murs en sol cloué inspectés ont fait preuve d'une grande stabilité (Vucetic et al., 1998). Non seulement, ils n'ont pas atteint la rupture mais les essais d'arrachement ont démontré une importante résistance résiduelle des inclusions. En complément, des essais réalisés en centrifugeuse (Vucetic et al., 1998) sont venus ensuite confirmer les observations du terrain.

Le caractère conservateur du dimensionnement des murs cloués peut en partie s'expliquer par la pratique courante consistant à considérer la sollicitation sismique comme une accélération horizontale constante dans le temps et uniforme sur le massif. En effet, à la différence des murs poids classiques, les ouvrages en sol cloué sont caractérisés par leur grande souplesse et leur nature composite (sol et inclusions). Ne pas en tenir compte mène à une distribution des accélérations sismiques, et donc des forces inertielles, erronée et surestimée (Yazdandoust, 2017).

Pourtant, si le surdimensionnement assure la résistance des ouvrages au séisme, il empêche également toute dissipation d'énergie sismique qui est alors transmise à la superstructure. Des résultats de modélisation numérique vont dans ce sens, indiquant que l'augmentation de la longueur des clous augmente la stabilité des ouvrages au séisme mais également le facteur d'amplification en tête (Tavakoli et al., 2019). De manière générale, outre les surcoûts générés, le surdimensionnement des ouvrages géotechniques peut être à l'origine de sinistres sur leur environnement proche. A contrario, un ouvrage moins résistant peut subir un déplacement irréversible, dissipant ainsi une part importante de l'énergie sismique (Luong, 1999) et permettant à la superstructure de rester dans le domaine élastique ; l'ouvrage joue alors le rôle de « fusible géotechnique » (Gazetas, 2015).

L'amélioration de la résilience des territoires face au risque sismique impose donc un changement de paradigme dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques, intégrant non seulement la résistance de l'ouvrage mais également la sécurité des structures qu'il supporte.

Dans ce contexte, l'objectif scientifique de la thèse présentée ici est de proposer une méthode de dimensionnement au séisme des murs cloués plus optimale. Afin d'atteindre cet objectif, il est proposé de mener une étude du comportement au séisme des murs cloués alliant, modélisation en centrifugeuse, méthode aux éléments finis et calcul à la rupture.

La modélisation d'ouvrages géotechniques à échelle réduite en centrifugeuse permet de les placer dans un champ de macro-gravité et donc de générer sur ces modèles les mêmes états de contraintes que sur les ouvrages prototypes (à échelle 1) correspondants. L'Université Gustave Eiffel dispose d'une centrifugeuse équipée d'un simulateur de séismes 1D embarqué. Le protocole expérimental et l'instrumentation viseront à permettre de mesurer les efforts dans les clous ainsi que la répartition des accélérations dans le massif de sol cloué et les déformations de la surface du massif. Ces données permettront de caractériser l'effet de

fusible géotechnique associé aux murs en sol cloué et de calibrer les modèles numériques réalisés dans la thèse.

La modélisation dynamique aux éléments finis des ouvrages géotechniques est aujourd'hui largement développée. Le principal verrou réside dans le choix des lois de comportements utilisées. Dans le cas du clouage des sols, les résultats des modélisations sont fortement dépendants de la prise en compte de la non-linéarité du comportement d'interface entre sol et clou (Gazetas et al., 2004). La détermination expérimentale de cette loi non-linéaire fait l'objet d'une thèse en cours au laboratoire RRO. L'enjeu pour le doctorant sera d'intégrer cette non-linéarité dans un modèle aux éléments finis.

Le calcul à la rupture s'appuyant sur l'équilibre statique de la structure, il a été principalement utilisé pour étudier des problèmes statiques ou pseudo-statiques. Une première approche dynamique a été développée pour l'analyse de la capacité portante d'une fondation par Pecker et Salençon (1991). Elle vise à trouver un majorant à l'accélération critique, traitée comme une force volumique. Pour aller plus loin, Dormieux et al. (1992) ont proposé d'intégrer les déplacements dus à la sollicitation sismique en passant d'un modèle de calcul à la rupture à un modèle élastoplastique. La thèse visera à aller plus loin dans cette approche dynamique du calcul à la rupture et à l'appliquer au cas des murs cloués. Il sera pour ce faire nécessaire de préciser le critère de résistance dynamique à prendre en compte dans le sol et les clous et de construire des mécanismes de rupture pertinents dans la structure.

Le travail s'articulera en 3 périodes :

- Une période initiale de 6 à 8 mois dédiée à l'étude bibliographique et au prédimensionnement des essais expérimentaux à l'aide d'un modèle aux éléments finis.
- Une période d'au minimum un an, se déroulant à Nantes et dédiée à la conception, la réalisation et l'analyse des essais en centrifugeuse, en vue d'alimenter les modèles numériques.
- La période finale, consacrée à la mise en place des modèles numériques, à leur validation au regard des essais expérimentaux et à leur analyse.

Le travail de thèse donnera lieu à une valorisation académique sous la forme de publications dans des revues internationales et de communications dans des congrès nationaux et internationaux. Une synthèse des observations faites alimentera également les méthodes d'ingénierie utilisées aujourd'hui dans la justification sismique des murs de soutènement en sol renforcé. Le-a candidat-e devra présenter de solides bases en mécanique des sols ou mécanique des milieux continus, un attrait pour la programmation numérique et l'expérimentation, ainsi que de bonnes qualités relationnelles et un goût du travail en équipe, compte tenu des nombreuses interactions envisagées.

Summary (english) :

Soil-nailed walls are retaining walls realised through successive excavations and stabilized by long metal inclusions sealed in the ground and called nails. The latter limit the movements of

the soil mass thanks to the friction induced by any relative movement between the nail and the soil (Schlosser et al., 1993).

Experimental feedbacks suggest that soil-nailed walls are often overdesigned (Bui et al., 2020) and specifically with regard to seismic loading (Cotton and Luark, 2020). The Loma Prieta earthquake of October 17, 1989 was the subject of a detailed post-seismic study. In particular, nine soil-nailed walls were inspected and demonstrated great resistance (Vucetic et al., 1998). Not only did they not break, but the pull-out tests demonstrated great resistance of the inclusions. Tests carried out in a centrifuge (Vucetic et al., 1998) following these observations confirmed the good earthquake resistance of such structures.

The conservative design of soil-nailed walls can partly be explained by the current practice considering a horizontal acceleration constant over time and uniform over the mass. Indeed, soil-nailed structures, unlike conventional gravity walls, are characterized by great flexibility and a composite nature (soil and inclusions). Not taking this into account leads to an erroneous and overestimated distribution of seismic accelerations, and therefore inertial forces (Yazdandoust, 2017).

However, if overdesign ensures the resistance of the structures to earthquakes, it also prevents any dissipation of seismic energy which is then transmitted to the superstructure. Numerical modeling results point in this direction, indicating that increasing the length of the nails increases the earthquake stability of structures but also increases the head amplification factor (Tavakoli et al., 2019). Generally speaking, in addition to the additional costs generated, the overdesign of geotechnical structures can be the cause of disasters in their immediate environment. Conversely, a less resistant structure can undergo irreversible displacement, thus dissipating a significant part of the seismic energy (Luong, 1999) and allowing the superstructure to remain in the elastic domain; the structure then plays the role of a “geotechnical fuse” (Gazetas, 2015).

In order to improve the resilience of territories in the face of seismic risk, it is necessary to rethink the design of geotechnical structures beyond the simple criterion of robustness in order to take into account the safety of the structures they support.

In this context, the scientific objective of the thesis presented here is to propose a more optimal earthquake design method for soil-nailed walls. In order to achieve this objective, it is proposed to carry out a study of the seismic behavior of soil-nailed walls combining centrifuge modelling, yield design and finite element method.

Modelling geotechnical structures on a reduced scale in a centrifuge makes it possible to place them in a macro-gravity field and therefore to generate on these models the same states of stress as on the corresponding prototype structures (at scale 1). Gustave Eiffel University has a centrifuge equipped with an on-board 1D earthquake simulator. The experimental protocol and instrumentation must make it possible to measure the forces in the nails as well as the distribution of accelerations in the soil mass. These data will make it possible to characterize the geotechnical fuse effect associated with soil-nailed walls and to calibrate the digital models produced in the thesis.

Dynamic finite element modelling of geotechnical structures is now widely developed. The main obstacle lies in the choice of the constitutive laws used. In the case of soil nailing, the modelling results are strongly dependent on taking into account the non-linearity of the interface behaviour between soil and nail (Gazetas et al., 2004). The experimental determination of this non-linear law is the subject of a PhD thesis in progress at the RRO laboratory. The challenge for the doctoral student will be to integrate this non-linearity into a finite element model.

Yield design theory is based on the static equilibrium of the structure, it has thus mainly been used to study static or pseudo-static problems. A first dynamic approach was developed for the analysis of the bearing capacity of a foundation by Pecker and Salençon (1991). It aims to find an upper bound to the critical acceleration, treated as a volume force. To go further, Dormieux et al. (1992) proposed integrating the displacements due to seismic stress by moving from a yield design model to an elastoplastic model. The thesis will aim to go further in this dynamic approach in the framework of yield design and to apply it to the case of soil-nailed walls. To do this, it will be necessary to specify the dynamic strength criterion to be considered in the soil and the nails and to construct relevant failure mechanisms in the structure.

The work will be divided into 3 periods:

- An initial period of 6 to 8 months dedicated to the literature review and the pre-design of experimental tests using a finite element model.
- A period of at least one year, taking place in Nantes and dedicated to carrying out and analysing centrifuge tests, with a view to feeding the numerical models.
- The final period, devoted to the implementation of numerical models, their validation with regard to experimental tests and their analysis.

The thesis work will give rise to academic recognition in the form of publications in international journals and communications in national and international conferences. A synthesis of the observations made will also feed into the engineering methods used today in the seismic justification of reinforced soil retaining walls. The applicant must have solid knowledge in soil mechanics or continuum mechanics, an attraction to numerical modelling and experimentation, as well as good interpersonal skills and a taste for teamwork, given the numerous interactions envisaged.

Références bibliographiques / Littérature references :

Bui, T. T., Bost, M., Limam, A., Rajot, J. P., & Robit, P. (2020). Modular precast concrete facing for soil-nailed retaining walls: laboratory study and in situ validation. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1),1.

Cotton, D. M., & Luark, R. D. (2010). Recent advances in the top-down construction of a 26.4 meter deep soil nail retention system-Bellevue technology tower. *Earth Retention Conference* 3. 2010.

- Dormieux, L., Pecker, A., Salençon, J. (1992). Application of the yield design theory to the seismic analysis of slopes, *Proceedings of the French-Italian Conference on Slope Stability in Seismic Areas*, Bordighera (Italie).
- Gazetas, G., Psarropoulos, P. N., Anastasopoulos, I., & Gerolymos, N. (2004). Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(7), 537-550
- Gazetas, G. (2015). 4th Ishihara lecture: Soil–foundation–structure systems beyond conventional seismic failure thresholds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 68, 23-39.
- Luong, M.P. (1999). Geotechnical Fuse Using a Soil Fibre Composite. *Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Séoul, 15-20 Août 1999.
- Pecker, A., Salençon, J. (1991), Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on clay soils, *Proceedings of the International Workshop on Seismology and Earthquake Engineering*, Mexico (Mexique), p. 287-304.
- Schlosser, F., Unterreiner, P., & Plumelle, C. (1993). Validation des méthodes de calcul de clouage par les expérimentations du Projet National Clouterre. *Revue française de géotechnique*, (64), 11-20.
- Tavakoli, H., Kutanaei, S.S., Hosseini, S.H. (2019). Assessment of seismic amplification factor of excavation with support system. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 18(3):555-66
- Vucetic, M., Tufenkjian, M. R., Felio, G. Y., Barar, P., & Chapman, K. R. (1998). Analysis of soil-nailed excavations stability during the 1989 Loma Prieta earthquake. *US Geol. Survey prof. paper*, D27-D45
- Yazdandoust, M. (2017) Experimental study on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test. *Soil Dynam. Earthq. Eng.* 98, 101-119.