

Résumé

L'essai de pénétration statique au cône (CPT) représente l'une des méthodes d'investigation in situ les plus largement utilisées en géotechnique. Il consiste à enfoncer dans le sol, à une vitesse normalisée, une pointe conique reliée à une succession de tiges. Au fur et à mesure que la pointe pénètre dans le sol, sont enregistrés en continue : (1) la résistance de pointe, (2) le frottement latéral qui fournit des informations sur le type de sol et sa stratigraphie et, dans le cas d'un essai piézocône (CPTu), (3) la pression interstitielle générée autour de la pointe, qui fournit des indications précieuses sur les conditions de drainage et la perméabilité du sol.

Parce que le sol situé directement sous la pointe est mobilisé dans un état de rupture, le CPT et le CPTu sont particulièrement adaptés à l'évaluation des caractéristiques de résistance des sols. Par conséquent, ils constituent des outils utiles pour la conception des ouvrages géotechniques vis-à-vis de leur État Limite Ultime (ELU). Néanmoins, l'une des limites de la méthodologie classique du CPT est qu'elle ne permet pas d'obtenir directement les paramètres de déformabilité ou de rigidité du sol, qui sont tout aussi essentiels pour évaluer les performances des structures en termes d'État Limite de Service (ELS), c'est-à-dire ceux régis par les déformations. Pour pallier cette limite, praticiens et chercheurs ont développé de nombreuses corrélations empiriques ou semi-empiriques reliant la résistance de pointe, et d'autres variables issues du CPT, aux paramètres de rigidité des sols.

Bien que largement utilisées en pratique, ces corrélations sont affectées par une dispersion significative des coefficients empiriques impliqués. En réponse à ces limites, Faugeras a proposé l'essai de chargement au cône, dans lequel on obtient directement une courbe charge-déplacement de la pointe du cône. La relation ainsi obtenue entre la pression appliquée et le déplacement induit permet de dériver une courbe de déformabilité du sol. Depuis son introduction, le CLT a été progressivement perfectionné, tant du point de vue des méthodes d'interprétation que des procédures de mise en œuvre.

En s'appuyant sur ces développements, la présente étude introduit une nouvelle méthode d'essai in situ appelée « essai de rechargement cyclique au pénétromètre » (CRPT). Elle consiste à appliquer, suivant un contrôle en force, des cycles de chargement-déchargement d'amplitude croissante à une pointe de pénétromètre mécanique. Grâce à un module de chargement spécifique développé par la société Equaterre, la pointe est actionnée de manière indépendante du corps du pénétromètre, lequel est maintenu fixe durant les cycles. Cet aspect confère à l'essai son originalité, car l'influence sur les mesures du frottement latéral du sol le long du corps du pénétromètre est ainsi éliminée.

La méthodologie de recherche combine deux approches complémentaires : des expérimentations physiques en chambre de calibration et des simulations basées sur modèle numérique discret. Le CRPT a également été mis en œuvre, pour une première fois, sur le terrain. Les résultats démontrent la capacité du test à : (1) identifier un domaine pseudo-élastique dans la réponse du sol (pertinent pour la conception de fondation en conditions de service), (2) déterminer directement un module de déformation pseudo-élastique du sol, et (3) évaluer la dégradation du module de déformation du sol en fonction du niveau de contrainte appliqué.

Mots-clés : Essai de pénétration statique (CPT), Essai de rechargement cyclique au pénétromètre (CRPT), Module de déformation, Essais in situ, Chambre de calibration, Méthode des éléments discrets.

Abstract

Classical Cone Penetration Test (CPT) represents one of the most widely used in-situ investigation methods in geotechnical engineering. It consists in pushing into the ground, at a standard velocity, a conical tip connected to a succession of rods. As the test progresses, a series of measurements are continuously recorded. They include : (1) the cone tip resistance, (2) the lateral sleeve friction which gives information on soil type and stratigraphy ; and, in the case of a piezocone penetration test (CPTu), (3) the pore water pressure generated around the cone, which offers valuable insight into drainage conditions and soil permeability.

Because the soil located directly underneath the penetrating cone is mobilized to a state of failure during the test, CPT and CPTu are particularly well-suited to the evaluation of soil strength characteristics. Consequently, they are useful tools for the design of geotechnical structures with respect to their Ultimate Limit State. Nevertheless, one of the limitations of the classical CPT methodology is that it does not yield, in a direct manner, the deformability or stiffness parameters of the ground, which are equally crucial when evaluating the performance of structures in terms of Serviceability Limit State conditions, i.e., those governed by deformations. To overcome this limitation, practitioners and researchers have developed numerous empirical and semi-empirical correlations that link cone resistance and other CPT-derived variables to soil stiffness parameters.

Although widely used in engineering practice, these correlations are affected by a significant scatter in the empirical coefficients involved. In response to these shortcomings, Faugeras proposed the Cone Loading Test (CLT), in which a load–displacement curve of the cone tip is directly obtained. The resulting relationship between applied pressure and induced displacement makes it possible to derive a soil deformability curve. Since its introduction, the CLT has been progressively refined, both in terms of interpretation methods and testing procedures.

Building on these developments, the present study introduces a new in-situ test method referred to as the Cyclic Reloading Penetration Test (CRPT). The testing procedure consists of subjecting the penetrometer tip to cyclic loading with progressively increasing amplitudes, conducted under force-controlled conditions. Thanks to a specific control device developed by the Equaterre company, the tip is movable independently of the penetrometer body, which is kept fixed during the cycles. This aspect bestows originality upon the test, as the soil/shaft friction influence on the measurements is eliminated.

The research methodology combines two complementary approaches : physical experiments in a calibration chamber and simulations using a discrete numerical model. Ultimately the CRPT has been tested in the field for the first time. The results demonstrate the test ability to (1) identify a pseudo-elastic domain in the soil response (of relevance for design in serviceability conditions), (2) directly determine a pseudo-elastic deformation modulus of the soil, (3) assess soil stiffness degradation with the applied stress level.

Keywords : Cone Penetration Test (CPT), Cyclic Reloading Penetrometer Test (CRPT), Deformation modulus, In situ testing, Calibration chamber, Discrete Element Method.