
L'effet de la température sur le comportement thermomécanique de l'interface sol-structure

Soheib Maghsoodi¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, (UMR 7563), 54505 Vandœuvre-lès-Nancy (soheib.maghsoodi@univ-lorraine.fr)

RÉSUMÉ. Le comportement mécanique de l'interface sol-structure est d'une grande importance en raison du rôle de l'interface dans la résistance due au frottement et la capacité portante des structures. Dans les structures thermoactives, du fait de la variation de la température, le comportement de l'interface devient plus complexe. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des variations de température sur le comportement mécanique de l'interface sol-structure. Des essais en conditions de charge normale constante (CNL) et de rigidité normale constante (CNS) ont été réalisées dans une boîte de cisaillement direct à différentes températures (5°, 22° et 60° C) sur des éprouvettes sol-sol et sol-structure. Le sable de Fontainebleau et le kaolin ont été utilisés comme matériaux de référence pour les sols sableux et argileux. Les résultats ont montré que les variations thermiques appliquées ont un effet négligeable sur la résistance au cisaillement d'interface sable-structure dans les conditions CNL. Par conséquent, le comportement du sable peut être considéré comme étant indépendant de la température. Dans l'argile étudiée, l'augmentation de la température augmente la résistance au cisaillement en raison de la contractance thermique pendant le chauffage, ce qui augmente la cohésion du sol. L'augmentation de température a eu moins d'impact sur la résistance au cisaillement dans le cas de l'interface argile-structure que dans les échantillons d'argile. L'adhésion de l'interface argile-structure est inférieure à la cohésion des échantillons d'argile.

ABSTRACT. The mechanical behaviour of the soil-structure interface plays a major role in the shear characteristics and bearing capacity of foundations. In thermo-active structures, due to non-isothermal conditions, the interface behaviour becomes more complex. The objective of this study is to investigate the effects of temperature variations on the mechanical behaviour of soil-structure interface. Constant normal load (CNL) tests were performed on sand-structure and clay-structure interfaces in a direct shear device at temperatures of 22 and 60 °C. Fontainebleau sand and kaolin clay were used. The results showed that the applied thermal variations have a negligible effect on the shear strength of the sand-structure interface under CNL condition, but the clay-structure interface shear strength increases slightly with temperature increase.

MOTS-CLÉS: Shear strength, Constant normal load (CNL), Soil-structure interface, Temperature, Thermo-active structures.

KEY WORDS: Shear strength, Constant normal load (CNL), Soil-structure interface, Temperature, Thermo-active structures.

1. Introduction

Les géostructures énergétiques consistent à établir un échange thermique direct avec le sol grâce à des systèmes intégrés dans les fondations ou les structures géotechniques. L'incorporation des échangeurs de chaleur aux géostructures provoque une variation cyclique de la température du sol adjacent. Des questions se posent sur l'impact de ces variations thermiques sur les paramètres géotechniques des sols en général, et en particulier des sols sensibles argileux.

Dans les géostructures énergétiques, la couche mince de sol adjacente aux éléments structurels constitue une interface sol-structure soumise aux charges mécaniques et aux changements de température. Différentes études ont été réalisées pour déterminer les paramètres mécaniques de l'interface sol-structure dans des conditions isothermes (par exemple, [BOU 86]). L'un des facteurs les plus importants qui affectent le comportement mécanique de l'interface sol-structure est la rugosité de la surface ([KIS 87], [POR 03]). La rugosité normalisée (R_n), rapportée par [KIS 87], a été définie en mesurant R_{max} (distance verticale entre le sommet le plus élevé et la vallée la plus basse) sur une longueur de profilé L égale à la taille moyenne de grain D_{50} , puis normalisée par D_{50} .

Pour les effets thermiques, quelques études rares ont considéré l'impact de la température sur le comportement mécanique de l'interface sol-structure. [YAV 16] ont effectué des essais de cisaillement de l'interface sol-structure sur des échantillons de sable et d'argile à 5, 20 et 40° C. Ils ont montré que lors du cisaillement, le sable et l'argile manifestent un comportement durcissant, tandis que l'interface entre le béton et l'argile a un comportement ramollissant. Ils ont également conclu que l'effet de la température (5 à 40° C) sur la résistance au cisaillement du sable, de l'argile et de l'interface argile-béton était négligeable. [DID 15] ont réalisé des essais de cisaillement direct à différentes températures (22, 60° C) sur des interfaces sable-béton et argile-béton et montré que le comportement de l'interface sable-béton n'est pas directement affecté par les changements de température, mais la résistance au cisaillement de l'interface argile-béton, augmente avec l'augmentation de la température.

Ainsi, les effets de la variation de température sur l'angle de frottement et l'adhésion de l'interface sol-structure sont encore mal connus. Dans cette étude, un dispositif de cisaillement direct à température contrôlée a été utilisé pour effectuer des essais sur les interfaces sable de Fontainebleau-surface rugueuse et un kaolin-surface rugueuse. L'objectif principal de l'étude est de mieux appréhender l'effet de la température sur la résistance au cisaillement de l'interface (adhésion et angle de frottement) des structures thermoactives en géotechnique.

2. Programme expérimental et propriétés des matériaux

2.1. Dispositif de cisaillement

Une boîte de Casagrande est utilisée pour réaliser les essais de cisaillement. La figure 1 présente le dispositif de cisaillement direct à température contrôlée. La boîte de cisaillement (60 x 60 x 35 mm) a été placée dans un conteneur rempli d'eau pour atteindre des conditions saturées (figure 1). Le système de chauffage consiste en un appareil de chauffage contrôlant la température du fluide circulant dans la partie inférieure du conteneur.

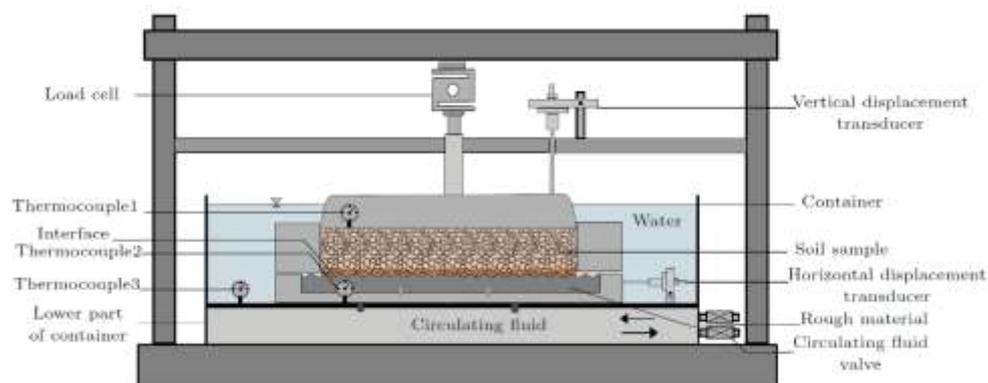


Figure 1. Dispositif de cisaillement direct à température contrôlée.

Par conséquent, la température de l'eau dans le conteneur atteint la même température que celle du fluide en circulation. Trois thermocouples, un dans la moitié inférieure de la boîte de cisaillement, un autre dans la moitié

supérieure de la boîte et le dernier dans le conteneur, contrôlent la température appliquée. Dans ce dispositif de cisaillement direct, la contrainte normale σ_n (kPa), la vitesse de cisaillement (mm/min), la température du fluide T ($^{\circ}\text{C}$) et la rigidité K (kPa/mm) ont été appliquées. Le déplacement normal U (mm), la contrainte de cisaillement τ (kPa) et la température de l'échantillon T ($^{\circ}\text{C}$) ont été mesurés. L'explication détaillée du dispositif est décrite dans ([MAG 19]).

2.2. Propriétés du matériau

Le sable de Fontainebleau utilisée pour cette étude a un D_{50} de 0,23 mm et les valeurs de γ_{dmax} et γ_{dmin} de 17,2 et 14,2 kN/m^3 . Le kaolin étudié a une ω_L de 57% et un ω_p de 33% ont été utilisés dans cette étude. Pour effectuer des essais de cisaillement direct de l'interface sol-structure, une plaque en acier inoxydable (80 x 60 x 10 mm) présentant la rugosité souhaitée a été conçue et utilisée comme structure. Cette plaque d'acier a été préférée à un interface en béton, pour éviter l'abrasion de la surface due à la répétition des tests. La rugosité de la plaque d'acier a été mesurée avec un profilomètre à laser la rugosité normalisée était de 0,32, ce qui a été considéré comme une interface rugueuse ([MAG 19]).

2.3. Protocole expérimental

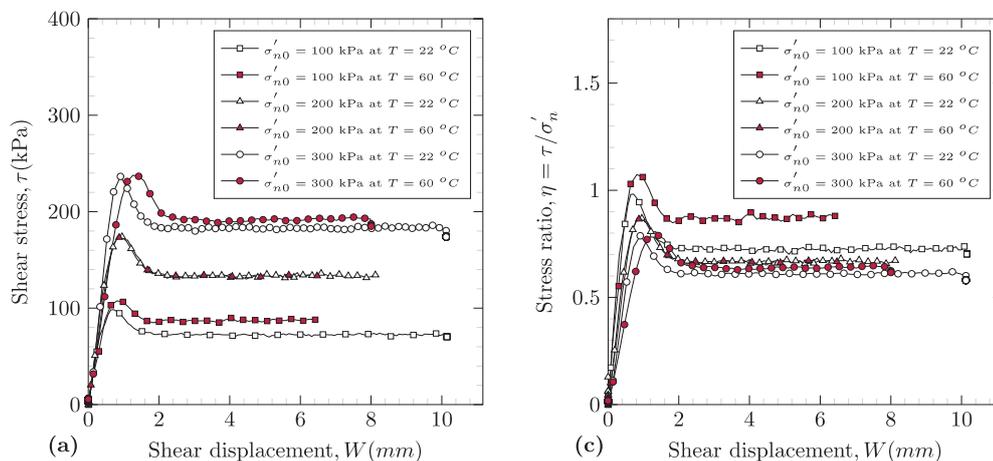
Pour effectuer les essais de cisaillement de l'interface sable-structure à différentes températures, le sable ayant une densité cible de 1,67 Mg/m^3 a été compacté directement dans la boîte de cisaillement. Cette densité correspond à 90% de la densité relative et l'éprouvette peut être considérée comme un sable dense. Pour les essais à charge normale constante (CNL), d'abord l'effort normal a été appliquée, puis la température a été imposée. La phase de cisaillement a commencé une fois que l'équilibre de température a été atteint avec une vitesse de 0,1 mm/min.

Pour effectuer les essais de cisaillement argile-argile et argile-structure, on a préparé l'argile à état saturé avec une teneur en eau de 63%, ce qui était légèrement supérieur à sa limite de liquidité ($LL = 57\%$). Cette argile ensuite a été placée dans la boîte. Pour effectuer les essais de CNL à 22 $^{\circ}\text{C}$, la contrainte normale a été appliquée lentement et progressivement au cours de la phase de consolidation. Deux valeurs de contraintes normales effectives initiales ($\sigma'_{n0} = 100, 300$ kPa) ont été choisies pour le programme argile-argile et argile-structure. La phase initiale de chauffage ou de refroidissement a débuté à la température ambiante (22 $^{\circ}\text{C}$). Après la phase de consolidation, un chauffage (jusqu'à 60 $^{\circ}\text{C}$) ou un refroidissement (jusqu'à 5 $^{\circ}\text{C}$) a été appliqué aux éprouvette à une vitesse de 5 $^{\circ}\text{C}/\text{heure}$. Après ces phases de chauffage ou de refroidissement, le cisaillement a été effectué à une vitesse de déplacement de 0,006 mm/min.

3. Résultats et discussion

3.1. L'interface sable-structure

La figure 2a montre les résultats des essais d'interface sable-structure avec différentes contraintes normales initiales ($\sigma'_{n0} = 100, 200, 300$ kPa) à 22 et 60 $^{\circ}\text{C}$. Les valeurs maximales et résiduelles de la contrainte de cisaillement à différentes températures sont presque identiques. L'effet de la température sur le comportement volumétrique, à 22 et 60 $^{\circ}\text{C}$, les variations volumétriques ont suivi la même tendance (Fig. 2b). Les courbes de rapport de contrainte (τ/σ'_n) pour différentes températures ont varié entre 0,8-1 (Fig. 2c). Le plan de Mohr-Coulomb des essais de sable-structure dans les conditions CNL est présenté à la Fig. 2d. L'angle de frottement maximal de l'interface sable-structure est de 40,4 $^{\circ}$ et l'angle de frottement résiduel est de 32,7 $^{\circ}$.



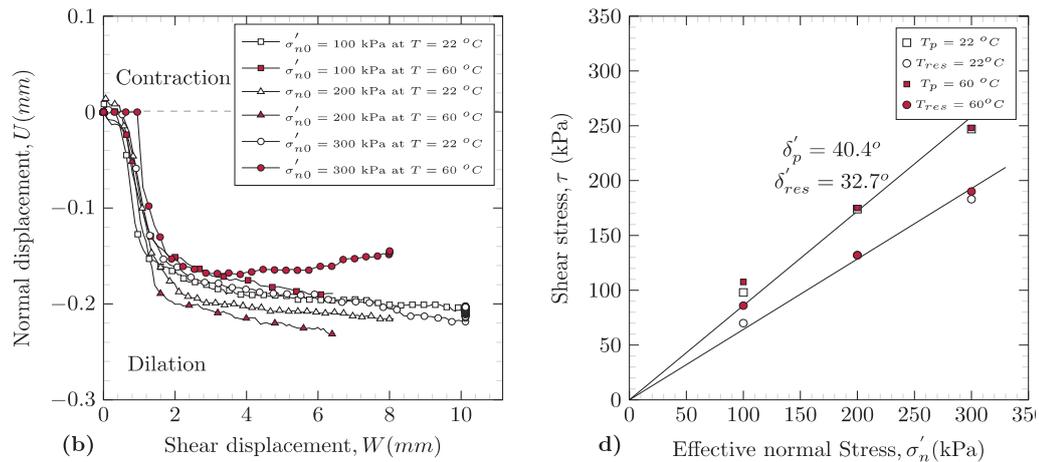
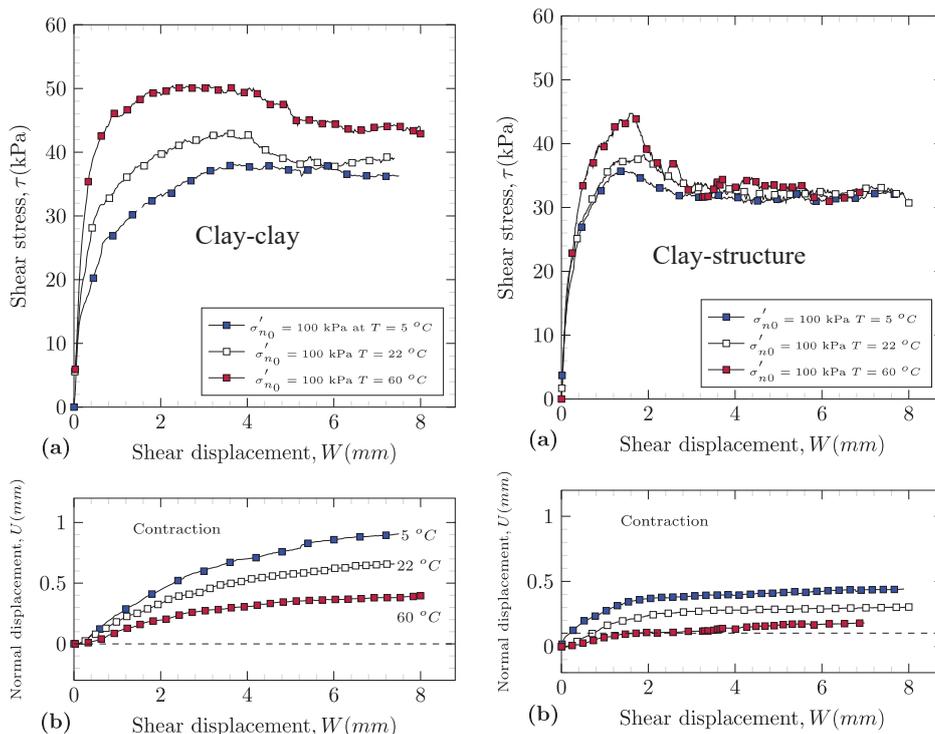


Figure 2. Résultats des essais de CNL pour l'interface sable-structure à 22 et 60 °C.

3.2. Argile-argile et l'interface argile-structure

Des essais du cisaillement pour argile-argile et l'interface argile-structure ont été effectués à 5, 22 et 60 °C pour $\sigma'_{n0} = 100$ et 300 kPa. La figure 3 présente les résultats des essais de CNL sur les éprouvettes argile-argile et argile-structure pour $\sigma'_{n0} = 100$ kPa. La figure 3a montre la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour l'essai d'argile-argile pour $\sigma'_{n0} = 100$ kPa. La contrainte de cisaillement augmente avec la température, jusqu'aux valeurs maximales, puis diminue jusqu'à l'état critique. Dans le comportement volumétrique, les éprouvettes exposées à des températures plus élevées ont montré moins de contractance pendant le cisaillement (Fig. 3b).

La figure 3c montre la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal des éprouvettes argile-structure pour $\sigma'_{n0} = 100$ kPa. La résistance au cisaillement au pic est légèrement plus élevée à 60 °C qu'à 5 et 22 °C ($\Delta\tau = 8$ kPa), mais à l'état critique, toutes les courbes à des températures différentes se superposent. La figure 3d présente les comportements volumétriques de l'interface argile-structure pour $\sigma'_{n0} = 100$. Pour $\sigma'_{n0} = 100$ kPa (figure 3d), la contractance est de 0,4 mm à 5 °C, alors que pour les essais à 22 et 60 °C elle est



respectivement de 0,28 mm et de 0,12 mm.

Figure 3. Résultats des essais de CNL pour argile-argile et l'interface argile-structure à 5, 22 et 60 °C. (a) (b) argile-argile (c) (d) l'interface argile-structure

Les figures 4a et 4b montrent le plan de Mohr-Coulomb pour les essais CNL argile-argile et interface argile-structure à différentes températures. L'angle de frottement interne d'argile-argile, obtenus à différentes températures, augmente légèrement avec l'augmentation de la température (14,4° à 15,3°), ce qui peut être considéré comme négligeable, mais la différence principale est l'augmentation de la cohésion de 11 à 17 kPa, puis 23 kPa pour les essais à 5, 22 et 60 °C, ce qui pourrait être dû au durcissement thermique pendant la phase de chauffage.

Pour les essais argile-structure, l'angle de frottement au pic pour toutes les températures étudiées est de 14 °. L'adhésion est la principale différence entre les enveloppes de Mohr-Coulomb. L'augmentation de la température a augmenté l'adhésion au pic (cohésion entre le sol et la structure) de 12,5 kPa à 18 kPa alors que l'adhésion résiduelle est restée constante (16,5 kPa).

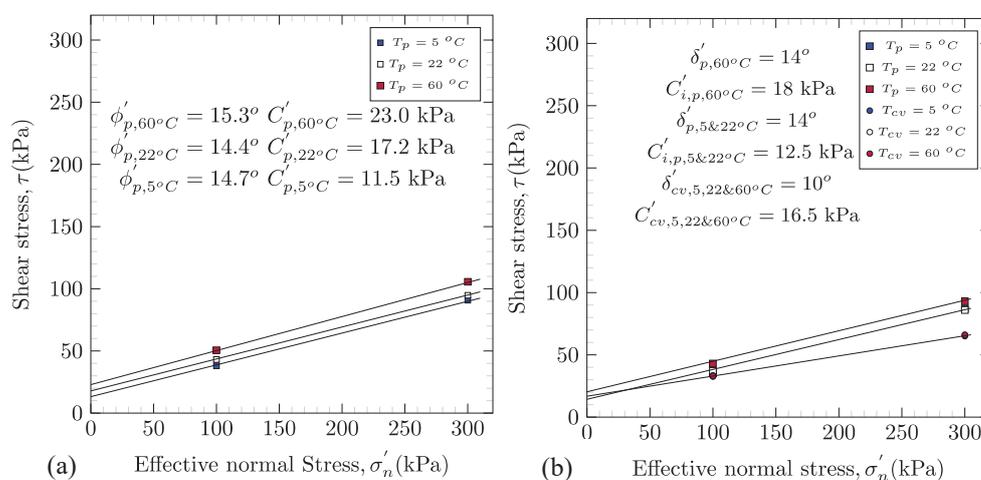


Figure 4. Plan de Mohr-Coulomb pour les essais d'argile-argile et interface argile-structure à 5, 22 et 60 °C.

4. Conclusions

Des essais à charge normale constante (CNL) ont été effectués sur l'interface sable-structure et argile-structure à différentes températures (22 à 60 °C). Les résultats CNL de l'interface sable-structure ont montré que la température avait un effet négligeable sur les propriétés mécaniques du sable de Fontainebleau. L'effet de la température sur l'angle de frottement au pic et résiduel de l'interface sable-structure est négligeable. Les courbes de cisaillement similaires, le comportement volumétrique et le plan de Mohr-Coulomb à différentes températures pour le sable confirment également que l'effet de la température sur la résistance au cisaillement du sable est négligeable.

Pour les essais d'argile, le chauffage dans des conditions drainées entraînait une contractance des échantillons et, par conséquent, la résistance au cisaillement augmentait en raison du durcissement thermique. Dans l'argile de kaolin, la température n'a pas d'incidence sur l'angle de frottement et l'effet principal est l'augmentation de la cohésion ou de l'adhésion.

La cohésion au pic des échantillons d'argile augmente de 17 à 23 kPa, tandis que l'adhésion au pic de l'interface argile-structure augmente de 12 à 18 kPa avec une augmentation de la température de 22 à 60 °C. Par conséquent, en raison de la valeur plus élevée de la cohésion par rapport à l'adhésion, on peut en conclure que l'augmentation de la résistance au cisaillement pour argile-argile est supérieure à celle des essais d'interface argile-structures. Pour le kaolin, le chauffage de l'interface a tendance à augmenter légèrement la résistance au cisaillement de l'interface. Par conséquent, en termes de sécurité des structures des géostructures énergétiques, l'augmentation de la température dans l'argile de kaolin normalement consolidée peut-être considérée comme un aspect positif.

5. Reference

- [BOU 86] BOULON M., FORAY P., « Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand », *Conference On Numerical Methods in Offshore Piling*, pp. 127-147, (1986).
- [DID 15] DI DONNA A., FERRARI A., LALOU L., « Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures », *Canadian Geotechnical Journal*, vol 53(4), pp. 659-672, (2015).
- [KIS 87] KISHIDA H., UESUGI M., « Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus », *Géotechnique*, vol 37(1), pp. 45-52, (1987).
- [MAG 19] MAGHSOODI S., CUISINIER O., MASROURI F., « Thermal effects on the mechanical behaviour of the soil-structure interface », *Canadian Geotechnical Journal*, (2019). [doi:10.1139/cgj-2018-0583](https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0583).
- [POR 03] PORCINO D., FIORAVANTE V., GHIONNA V. N., PEDRONI S., « Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests », *Geotechnical Testing Journal*, vol 26(3), pp. 289-301, (2003).
- [YAV 16] YAVARI, N., TANG, A.M., PEREIRA, J.-M. AND HASSEN, G.: « Effect of temperature on shear strength of soils and the soil-structure interface », *Canadian Geotechnical Journal*, vol 53(7), pp. 1186-1194, (2016).

1. Boulon, M. and Foray, P.: Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. Conference On Numerical Methods In Offshore Piling, Nantes, France, pp. 127-147.(1986).
2. Di Donna, A., Ferrari, A. and Laloui, L.: Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures. Canadian Geotechnical Journal 53(4), 659-672 (2015).
3. Kishida, H. and Uesugi, M.: Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. Géotechnique 37(1), 45-52 (1987).
4. Maghsoodi, S., Cuisinier, O. and Masrouri, F.: Thermal effects on the mechanical behaviour of the soil-structure interface. Canadian Geotechnical Journal. ja (2019). [doi:10.1139/cgj-2018-0583](https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0583).
5. Porcino, D., Fioravante, V., Ghionna, V. N. and Pedroni, S.: Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests. Geotechnical Testing Journal 26(3), 289-301 (2003).
6. Yavari, N., Tang, A.M., Pereira, J.-M. and Hassen, G.: Effect of temperature on shear strength of soils and the soil-structure interface. Canadian Geotechnical Journal. 53(7), 1186-1194 (2016).