

Numerical study of the bearing capacity of a strip footing on two layered clay under inclined loading

Étude numérique de la capacité portante d'une fondation filante reposant sur deux couches d'argiles sous chargement incliné

Abla Femmam[✉], Abdelhak Mabrouki, Mekki Mellas

Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra, BP145 Biskra 07000, Algérie

Received 8 February 2017

Published online: 30 June 2018

Keywords

Layered clays

Strip footing

inclined loading

Bearing capacity

shear strengths

Abstract: The bearing capacity of a strip footing resting on a homogeneous and isotropic soil has been the subject of numerous theoretical and experimental studies. However, in practice the soil is never homogeneous. It is therefore important to introduce the effect of stratification on the bearing capacity. This paper aims to indicate the modifications that must be made to the bearing capacity of a rough strip footing resting on two layered clay subjected to inclined load. The finite-difference code Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) is used to estimate the bearing capacity factor N_c^* as well as the failure envelope and the inclination factors i_c , in the case of inclined loading. The study is carried out considering two layers clays of different shear strengths, where the thickness of the upper clay layer is comparable to the width of a rigid footing. The results obtained show clearly that the bearing capacity of a strip footing is generally depends on the strength ratio of the soil layers (c_{u1}/c_{u2}) and the relative thickness of the top layer (D/B).

© 2018 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: L'évaluation de la capacité portante d'une semelle filante reposant sur un sol homogène et isotrope a fait l'objet de très nombreuses études théoriques et expérimentales. Cependant, l'effet de la stratification sur la capacité portante est moins étudié. Le présent article indique les modifications qu'il faut apporter à la capacité portante d'une semelle filante rugueuse, reposant sur deux couches d'argiles sous chargement incliné. Le code FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) en différences finies explicites est utilisé pour déterminer le facteur de portance N_c^* , ainsi que les courbes enveloppes de rupture et les facteurs d'inclinaison i_c , dans le cas d'un chargement incliné. L'étude est effectuée en considérant deux couches d'argiles de résistances au cisaillement différentes, dans le cas où l'épaisseur de la couche supérieure d'argile est comparable à la largeur de la semelle rigide. Les résultats obtenus montrent clairement que la capacité portante dépend généralement du rapport de la cohésion de la couche supérieure à la cohésion de la couche inférieure (c_{u1}/c_{u2}) et du rapport de l'épaisseur de la couche supérieure à la largeur de la fondation (D/B).

Mots clés : couches d'argiles, semelle filante, chargement incliné, capacité portante, cohésion.

1. Introduction

L'estimation de la capacité portante des fondations superficielles est l'un des problèmes les plus importants en mécanique des sols. Les théories existantes supposent une semelle reposant sur un sol homogène de grande profondeur; cependant, il est possible de rencontrer une couche rigide à faible profondeur, ou un sol stratifié avec des couches de caractéristiques mécaniques différentes. Le cas d'une semelle posée sur un sol composé de deux couches, l'une de résistance faible et l'autre de résistance élevée, montre bien l'importance de ce type de problème.

Dans le cas d'un sol stratifié avec une couche supérieure d'épaisseur plus grande que la largeur de la fondation, la capacité portante est estimée en utilisant les caractéristiques de la couche supérieure. Par ailleurs, si l'épaisseur de la couche supérieure est comparable à la largeur de la fondation, la zone influencée par le chargement de la semelle peut être étendue jusqu'à la couche inférieure, dans ce cas il faut prendre en considération les caractéristiques des deux couches.

De nombreuses approches ont été appliquées pour étudier la capacité portante d'une semelle reposant sur un sol stratifié, telles que l'équilibre limite, l'analyse limite, les lignes de glissement et l'analyse élastoplastique par éléments finis ou différences finies (Smith et Griffiths. 1988, Edwards et al. 2005).

Button (1953) a étudié par la méthode d'équilibre limite la portance d'une semelle filante posée sur deux couches d'argile. Pour résoudre ce problème Terzaghi et Peck (1948) et Meyerhof (1974) ont proposé des solutions semi-empiriques. Michalowski et Shi (1995) ont présenté des bornes supérieures de la capacité portante des semelles filantes sous charge verticale reposant sur deux couches de sol par l'approche cinématique de l'analyse limite. La technique avancée de la borne supérieure et inférieure de l'analyse limite par éléments finis est appliqué par Shiao et al. (2003) pour étudier la capacité portante d'une semelle filante sur une couche de sable reposant sur un sol argileux. Huang et Qin (2009) ont également utilisé le bloc multi-rigide avec un mécanisme de rupture modifié basé sur la borne supérieure de l'analyse limite pour calculer la capacité portante des semelles

[✉] Corresponding author. E-mail address: femmamabla@yahoo.fr

filantes rigides sur un sol formé de deux couches de sol. L'analyse numérique de l'évolution élastoplastique en utilisant la méthode des éléments finis a été effectuée par Burd et Frydman (1997), pour examiner la portance d'une semelle filante sous chargement verticale, dans le cas d'une couche de sable reposant sur une couche argileuse, avec une épaisseur de couche de sable comparable à la largeur d'une fondation rigide.

La méthode de l'analyse limite par éléments finis avec ses deux approches, cinématique et statique, a été appliquée par Merifield et al. (1999) pour étudier la capacité portante d'une semelle filante sous charge verticale, reposant sur deux couches d'argile. Une étude paramétrique plus approfondie du problème a été présentée par Merifield et al. (2001) en utilisant le programme 6.0 de Smith et Griffiths (1988), basé sur un calcul en déplacement par éléments finis. Ibrahim (2014) a présenté une étude numérique et expérimentale pour analyser la capacité portante verticale d'une semelle circulaire posée sur une couche de sable surmontant une couche d'argile. Il est à noter que la plupart des études ont été consacrées à l'estimation de la capacité portante des semelles sous une charge verticale.

La portance des fondations superficielles sous charge combinée et reposant sur une couche homogène a fait l'objet de nombreuses études (Yahia-Cherif et al. 2017 ; Khitas et al. 2017 ; Taiebat et Carter 2000 ; Loukidis et al. 2008). De nombreux auteurs ont proposé un facteur correctif i_c pour tenir compte de l'effet de l'inclinaison de la charge appliquée sur une semelle posée sur une argile (Green; 1954; Meyerhof, 1963 ; Hansen, 1970 ; Vesić, 1975 ; Ouahab et al. 2017), le tableau 1 récapitule les expressions proposées pour déterminer le facteur de correction i_c .

Par ailleurs, le cas d'une semelle soumise à un chargement incliné sur des sols stratifiés est moins étudié dans la littérature. Meyerhof et Hanna (1978) ont étudié la capacité portante des semelles circulaires et filantes, reposant sur une couche de sol dense surmontant un dépôt de faible caractéristiques et le cas d'une couche lâche recouvrant un dépôt dense. L'approche adoptée a permis d'étudier la capacité portante des sols stratifiés sous chargement vertical et incliné. Les résultats des différents modes de rupture du sol ont été comparés à ceux obtenus par des essais sur un modèle réduit.

Tableau 1. Facteur de correction de l'inclinaison de la charge

Authors	i_c
Green (1954)	$0,5 + (1/N_c) \left[\cos^{-1}(H/Bc_u) + \sqrt{1 - (H/Bc_u)^2} \right]$
Meyerhof (1963)	$\left[1 - (\alpha^\circ / 90^\circ) \right]^2$
Hansen (1970)	$0.5 - 0.5 \sqrt{1 - (H/Bc_u)}$
Vesić (1975)	$1 - (2H/Bc_u N_c)$
Ouahab et al. (2017)	$i_c = \frac{130.23}{(\kappa + 6.37)\alpha + 130.23}$

Georgiadis et Michalopoulos (1985) ont développé une méthode numérique, appelée surfaces de glissement pour étudier la capacité portante d'une semelle filante, sous chargement incliné, posée sur un sol stratifié. L'approche cinématique de l'analyse limite a été utilisée par Youssef-Abdel Massih et al. (2005) pour étudier la capacité portante d'une semelle filante soumise à une charge inclinée et/ou excentrée, reposant sur un sol formé de deux couches de sable et argile. Zhan (2011) a utilisé la méthode des éléments finis pour examiner la capacité portante des semelles filantes, reposant sur deux couches d'argile, sous des charges combinées. L'analyse limites par éléments finis a été aussi adoptée par Rao et al. (2015) pour déterminer la capacité portante d'une semelle rigide sous chargement combiné, placée sur deux couches d'argile. Les résultats numériques sont présentés sous forme de courbes enveloppes de rupture dans le plan de chargement. Récemment, Ouahab et al. (2017) ont étudié l'évolution élastoplastique de la capacité portante d'une semelle filante sous charge inclinée, fondée sur une argile non homogène.

Cet article traite la capacité portante d'une semelle filante reposant sur deux couches d'argile, par des calculs numériques élastoplastique en utilisant le code FLAC (2005) en différences finies explicites. La semelle est supposée rigide et rugueuse, sous un chargement vertical et incliné. Les surfaces de rupture dans le plan des charges verticales et horizontales (V-H) sont présentées pour différentes inclinaisons de la force appliquée. Les résultats des calculs numériques sont comparés à ceux obtenus par d'autres formulations disponibles dans la littérature.

2. Présentation du cas étudié

Dans la présente étude, on s'intéresse à la détermination de la charge ultime du système représenté sur la Figure 1. Ainsi, on considère une semelle filante de largeur B reposant sur la surface d'un sol formé de deux couches d'argile de résistances différentes (c_{u1} et c_{u2}). La base de la semelle rigide est considérée rugueuse. La capacité portante q_u d'une semelle filante sur un sol purement cohérent, est déterminée en utilisant l'expression (1).

$$q_u = c_u N_c i_c \tag{1}$$

N_c = facteur de portance ; i_c = facteur d'inclinaison de la charge.

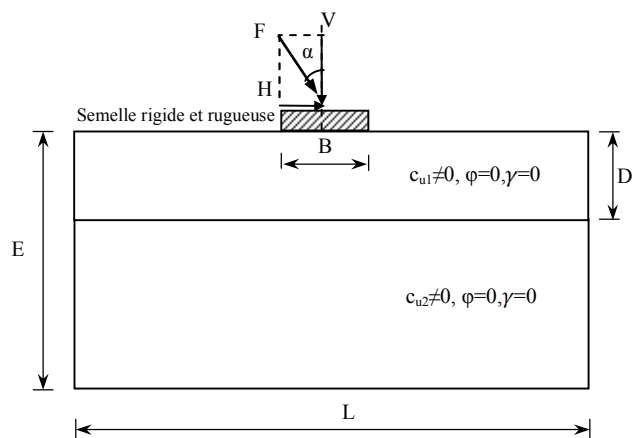


Fig. 1. Présentation du cas étudié.

Les charges limites de rupture peuvent être présentées sous forme de diagrammes d'interaction entre V et H. Les surfaces ultimes sont illustrées dans le plan des paramètres de chargement v et h avec :

$$v = \frac{V}{BC_{u1}} \quad (2)$$

$$= \frac{H}{BC_{u1}} \quad (3)$$

3. Simulation numérique

Le code FLAC (2005) en différences finies explicites est utilisé pour effectuer une étude paramétrique de l'influence de la stratification d'un sol argileux sur la portance d'une semelle sous charge inclinée. Le code numérique choisi permet de simuler le comportement des sols, roches ou autres matériaux qui se plastifient quand leur surface de charge est atteinte dans un espace bidimensionnel.

Le massif du sol est supposé non pesant et son comportement régi par une loi élastique-parfaitement plastique et le critère de Tresca a été adopté; ce modèle est caractérisé par un module volumique $K = 62,08 \times 10^4$ kPa et un module de cisaillement $G = 1,25 \times 10^4$ kPa ($E = 37,25$ MPa, $\nu = 0,49$). Il est intéressant de noter que la capacité portante n'est pas influencée par les valeurs du module d'élasticité E et du coefficient de Poisson ν ; cependant, les valeurs des paramètres élastiques (E, ν) influencent le tassement de la semelle (Edwards et al. 2005). La semelle en béton est considérée rigide, son comportement est régi par une loi élastique linéaire avec un module de Young $E=30$ GPa et un coefficient de Poisson $\nu = 0,2$.

Du fait de la symétrie du problème, dans le cas d'un chargement vertical, seul un demi du modèle peut être considéré. Par contre, dans le cas d'un chargement incliné, l'ensemble du domaine du sol est modélisé, en raison du chargement incliné. Afin de tester l'influence de la taille du modèle, le nombre d'éléments et la vitesse de chargement par déplacement sur la capacité portante, de nombreuses analyses numériques ont été effectuées avec une semelle filante de largeur $B = 2$ m. La figure 2 montre le maillage retenu pour l'étude numérique, dans le cas d'un chargement incliné. Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant les déplacements horizontaux et verticaux pour les limites et latérales et la limite inférieure. Un raffinement local du maillage a été effectué au voisinage de la semelle et sous sa base, à cause de la forte concentration des contraintes. Il est à noter que la taille du modèle est adoptée de façon à éviter toute source de perturbation dans la formation des mécanismes de rupture dans le sol.

Pour modéliser le contact entre le sol et la base de la semelle, des éléments d'interface sont utilisés. Le code FLAC (2005) fournit un modèle d'interface régi par le critère de Coulomb limitant la force de cisaillement qui agit au nœud d'interface. Ce modèle est caractérisé par une raideur normale $K_n = 2 \times 10^9$ Pa/m et une raideur de cisaillement $K_s = 2 \times 10^9$ Pa/m, on note que ces paramètres n'ont pas d'influence sur la charge de rupture.

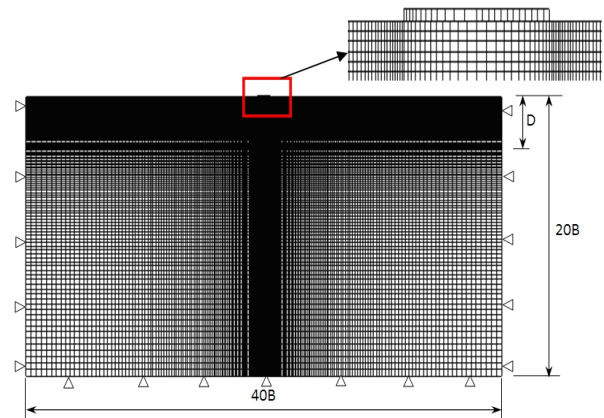


Fig. 2. Maillage et conditions aux limites pour l'analyse d'une semelle filante sous chargement incliné.

Pour modéliser une interface rugueuse, les mêmes valeurs de cohésion de la couche supérieure ont été affectées aux éléments d'interface. Les angles de frottement et de dilatance des éléments d'interface sont nuls. Pour modéliser une fondation parfaitement lisse, tous les paramètres sont considérés nuls. La technique de chargement « probe » est utilisée pour déterminer la capacité portante sous charges inclinées. Dans cette technique, une contrainte verticale q inférieure à la capacité portante verticale q_u est appliquée jusqu'à l'équilibre du système. Un déplacement horizontal est ensuite appliqué par incréments sur les nœuds de la semelle jusqu'à la rupture. Il est intéressant de noter que l'analyse par la technique « probe » ne permet pas de fixer un angle d'inclinaison préalable de la charge. Loukidis et al. (2008) donne plus de détails concernant les différentes techniques de chargement combiné des fondations superficielles.

4. Discussion des résultats

4.1. Semelle sous charge verticale

Pour la validation de l'approche adoptée, la capacité portante d'une semelle filante et lisse est étudiée, en considérant un chargement vertical d'une semelle posée sur deux couches d'argile. Le facteur de la capacité portante N_c^* , dans ce cas, est défini par :

$$N_c^* = q_u / c_{u1} \quad (4)$$

Les calculs élastoplastiques sont menés pour les différentes valeurs du rapport $D/B = 0,2$ et $1,5$ et le rapport c_{u1}/c_{u2} varie de $0,25$ à 5 . Les résultats de la présente étude numérique présentés sur la figure 3, sont comparés à ceux donnés par Merfield et al. (2001) en utilisant le théorème des bornes supérieures et inférieures de l'analyse limite et les calculs en déplacement par la méthode des éléments finis (programme 6.0 de Smith et Griffiths, 1988), en supposant une semelle rigide et lisse. Les résultats de la présente étude sont en excellent accord avec ceux du calcul en déplacement donnés par Merfield et al. (2001). Il est important de noter que les limites supérieures et inférieures proposées par Merfield et al. (2001) bornent les résultats des calculs élastoplastiques. Pour $D/B = 0,2$ et $c_{u1}/c_{u2} > 0,75$, la capacité portante décroît considérablement avec la diminution de la cohésion de la couche d'argile inférieure.

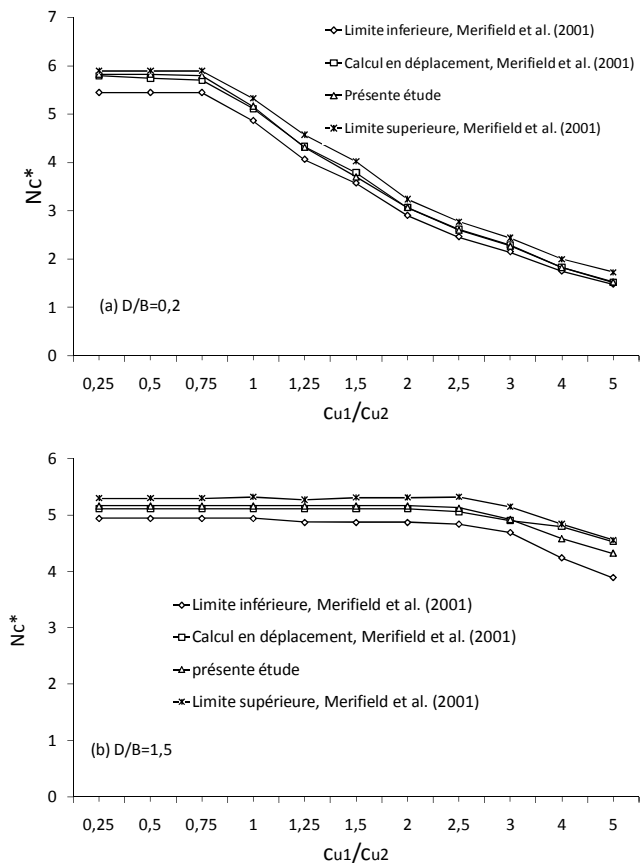


Fig.3. Comparaison des résultats

Ainsi, lorsque le rapport c_{u1}/c_{u2} augmente le mécanisme de rupture s'étend à la couche inférieure, dans ce cas la capacité portante dépend des caractéristiques des deux couches. Pour $D/B = 1,5$ et $c_{u1}/c_{u2} \leq 2$ le facteur de portance N_c^* est quasiment constant et égal à 5,16, dans ce cas la capacité portante ne dépend que des caractéristiques de la couche supérieure. Pour $c_{u1}/c_{u2} > 2$, on remarque une légère diminution de la valeur de N_c^* , dans ce cas la capacité portante dépend des caractéristiques des deux couches. La figure 4 montre la zone plastifiée au-dessous de la semelle pour les rapports $D/B=0,5$ et $c_{u1}/c_{u2}=0,25$ et 2.

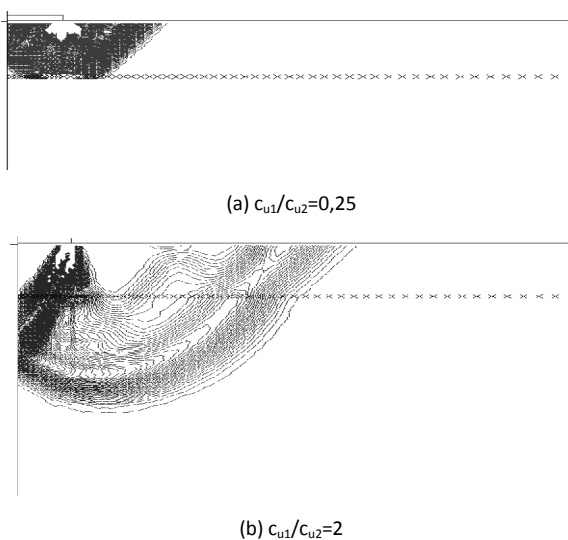


Fig. 4. Zones plastifiées dans le sol pour un rapport $D/B=0,5$.

Dans le cas d'une couche d'argile molle surmontant une couche résistante ($c_{u1}/c_{u2}=0,25$), les zones plastiques sont développées seulement dans la couche de faible résistance, tandis que dans le cas d'une couche d'argile résistante au-dessus d'une couche d'argile moins résistante ($c_{u1}/c_{u2} = 2$), on constate l'apparition des zones plastiques dans la couche inférieure ; aussi, le mécanisme de rupture est similaire à celui de Terzaghi (1943), avec un coin élastique juste sous le centre de la semelle.

4.2. Semelle sous charge inclinée

4.2.1. Courbes enveloppes de rupture

La technique de chargement « probe » a été appliquée pour déterminer les enveloppes de rupture dans le plan des paramètres de chargements normalisés ($h-v$). La méthode des courbes enveloppes permet de définir le domaine de stabilité qui se trouve à l'intérieur de la surface de rupture. Il est à noter que le concept des diagrammes d'interaction est utilisé généralement pour l'étude des fondations offshore sous chargement combiné.

La figure 5 montre la courbe enveloppe obtenue pour $D/B = 1$ et $c_{u1}/c_{u2} = 3$. Les résultats de la présente étude sont comparés à ceux donnés par Rao et al. (2015). Il est à noter que les deux courbes sont en excellent accord. Les résultats obtenus montrent que la charge limite de cisaillement (Bc_{u1}) est mobilisée lorsque $V/Bc_{u1} < 2,5$.

Les analyses numériques ont été effectuées pour trois valeurs du rapport D/B (0,25 ; 1 et 2) et le rapport c_{u1}/c_{u2} variant de 0,25 à 5. Les courbes enveloppes de rupture normalisées dans le plan ($h-v$) sont représentées sur la figure 6. Il est important de noter que la forme et la taille des courbes enveloppes de rupture dépendent d'une manière significative des valeurs de D/B et c_{u1}/c_{u2} . La présente étude confirme les résultats de Rao et al. (2015) qui montrent l'expansion de la taille des courbes enveloppes de rupture avec la diminution du rapport c_{u1}/c_{u2} . Cette expansion signifie que la capacité portante de la fondation augmente avec la diminution du rapport c_{u1}/c_{u2} . Dans le cas d'un rapport $D/B=0,25$ avec une semelle posée sur une couche d'argile plus résistante que la couche inférieure ($c_{u1}/c_{u2} \geq 1$), on constate une diminution de la capacité portante. Par contre, la présence d'une couche résistante au dessous d'une couche molle augmente la capacité portante. De plus, pour $D/B=2$, le rapport c_{u1}/c_{u2} n'affecte pas la capacité portante, et les enveloppes de rupture sont identiques à la solution exacte d'un sol homogène.

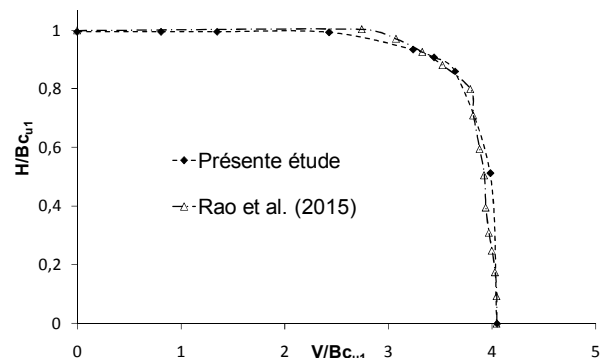


Fig. 5. Comparaison des enveloppes de rupture.

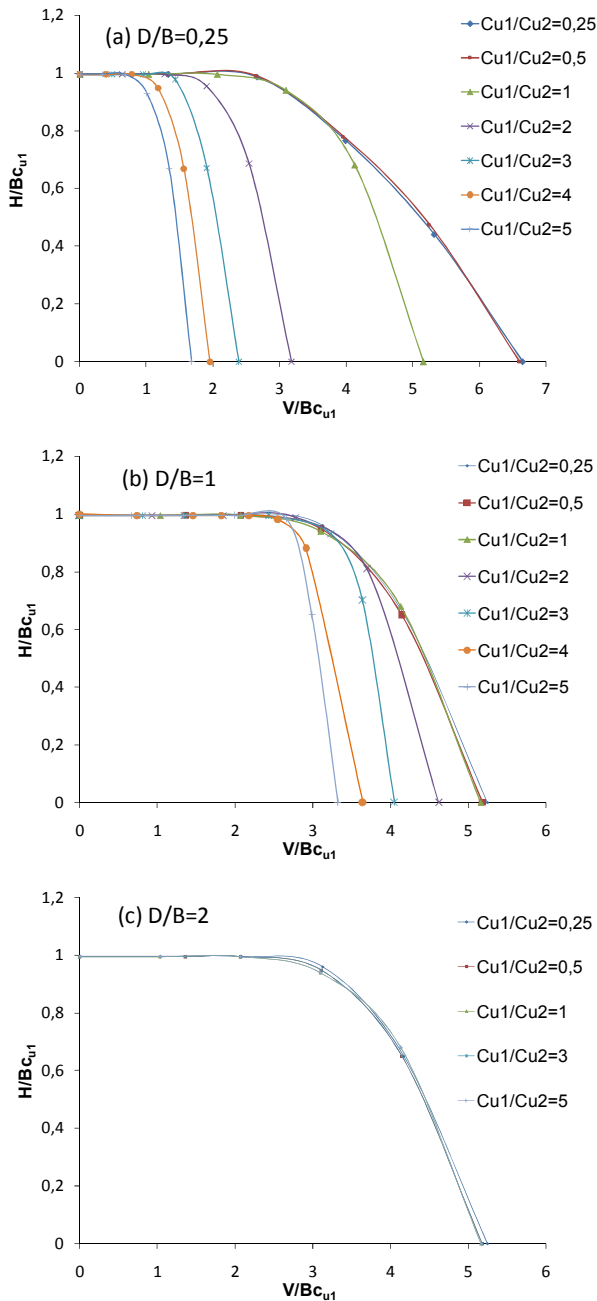


Fig. 6. Envelopes de rupture dans l'espace des paramètres normalisés

$$H/BC_{u1} - V/BC_{u1}$$

Ainsi, le rapport $D/B=2$ est considéré comme l'épaisseur relative critique $(D/B)_{crit}$. A partir de $D/B \geq 2$, les courbes enveloppes de rupture sont identiques et équivalentes à celle d'un sol homogène de mêmes caractéristiques que la couche supérieure.

4.2.2. Facteur d'inclinaison i_c

Le facteur d'inclinaison i_c est défini comme le rapport entre la charge limite verticale en considérant l'inclinaison ($V_{ult\alpha \neq 0}$) et la charge limite verticale calculée pour une inclinaison nulle ($V_{ult\alpha = 0}$). La Figure 7 présente la variation du facteur d'inclinaison i_c de la présente étude en fonction de l'inclinaison de charge, obtenue en utilisant la méthode « probe ». De plus, la figure 7 présente les résultats obtenus par les expressions proposées par Ouahab et al. (2017) et Meyerhof (1963).

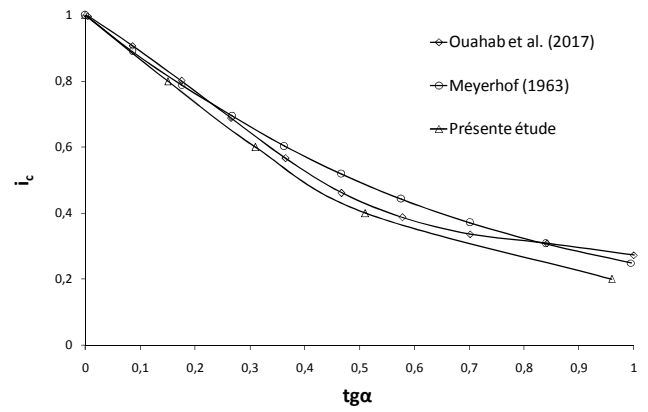


Fig.7. Comparaison du facteur d'inclinaison i_c pour un sol homogène.

Il est clair que le facteur d'inclinaison i_c décroît avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la charge, ce qui conduit à une diminution de la capacité portante de la fondation. Les résultats de la présente étude sont plus conservatifs, on peut noter dans le cas d'un angle d'inclinaison $\alpha < 35^\circ$, un bon accord avec ceux obtenus par l'expression de Ouahab et al. (2017). Les figures 8(a et b) montre la variation du facteur d'inclinaison i_c , en fonction de l'inclinaison de charge, pour le cas d'un rapport $D/B=0,25$ et 1, en considérant différents rapports de la résistance au cisaillement des deux couches d'argile ($Cu1/Cu2$).

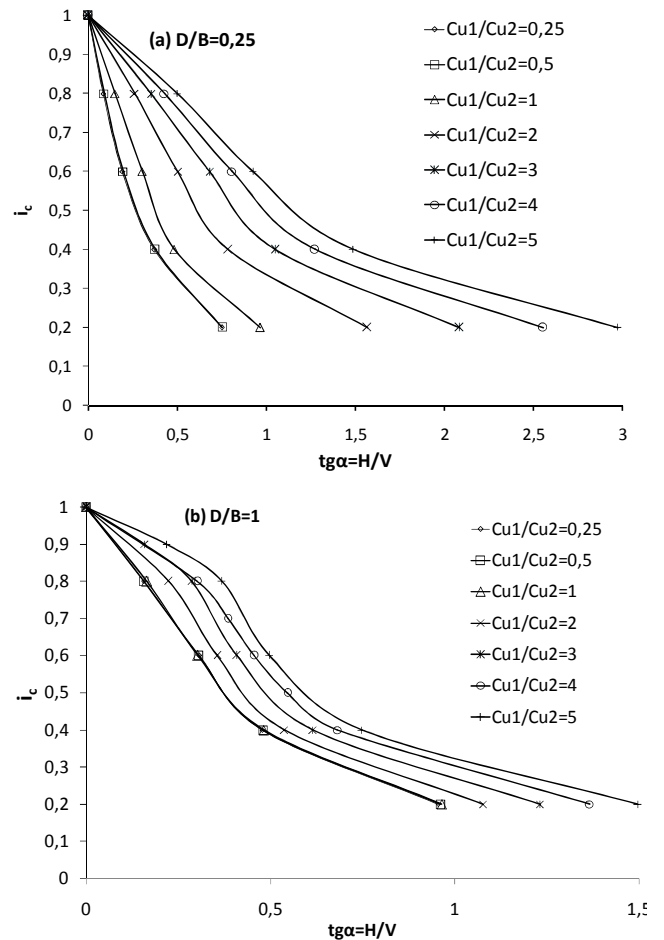


Fig.8. Facteur d'inclinaison i_c en fonction de $tg \alpha$.

Le facteur d'inclinaison i_c , présenté sur la figure 8(a), augmente avec l'accroissement du rapport c_{u1}/c_{u2} , c'est-à-dire qu'avec l'augmentation de la résistance de la première couche et pour le même angle d'inclinaison, on constate une capacité portante plus élevée. Pour $c_{u1}/c_{u2} < 0,5$ et $D/B=0,5$ on trouve également les mêmes valeurs de i_c , ce qui signifie que la rupture se produit seulement dans la couche supérieure de faible résistance. La comparaison des figures 8(a) et 8(b) confirme que l'influence du rapport c_{u1}/c_{u2} diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche supérieure.

4.2.3. Mécanismes de rupture

Les contours de déformation de cisaillement à la rupture, dans le cas d'une semelle filante sous chargement incliné, sont représentés sur la figure 9 dans le cas d'une couche supérieure de faible résistance au cisaillement, pour trois valeurs du rapport D/B (0,25 ; 0,5 et 1). Il est clair que le mécanisme de rupture n'est pas symétrique et il se développe seulement dans la couche de faible résistance. De plus, la figure 9 montre que l'étendue de la zone de cisaillement devient plus importante avec l'accroissement de l'épaisseur de la couche supérieure.

La figure 10 montre les contours de déformation de cisaillement à la rupture pour $D/B=0,25$ en considérant deux rapports de résistance entre les deux couches d'argile. Cette figure présente clairement un coin triangulaire élastique au-dessous de la base de la semelle. Il est à noter que le mécanisme de rupture est plus large dans le cas d'une couche supérieure de résistance plus importante que celle de la couche inférieure. Cependant, la difficulté de fixer un angle de l'inclinaison de la charge α préalable en utilisant le mode de chargement probe, ne permet pas de présenter des mécanismes de rupture obtenus pour la même valeur de α .

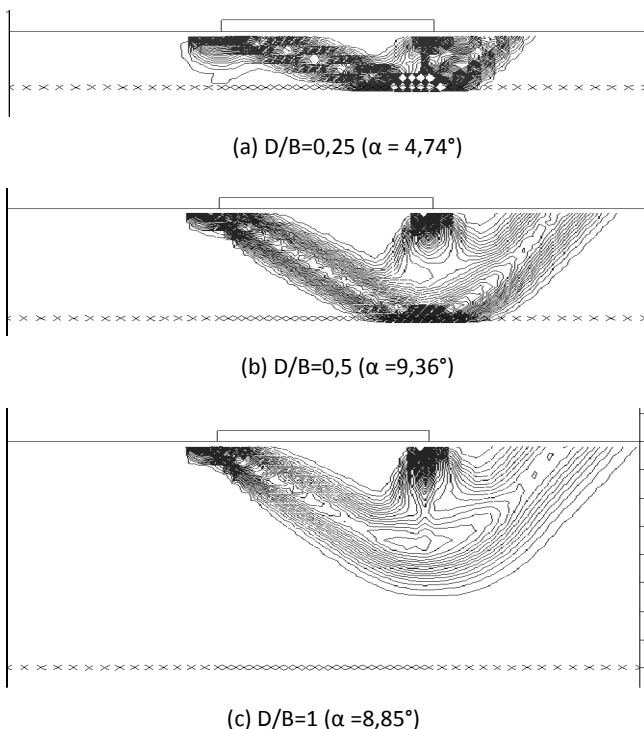


Fig.9. Distribution des déformations de cisaillement, pour $c_{u1}/c_{u2} = 0,25$

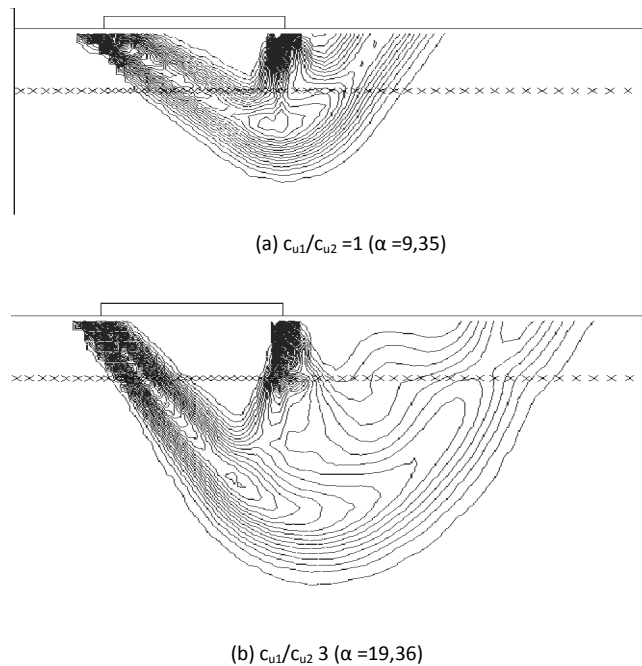


Fig.10. Distribution des déformations de cisaillement, pour $D/B = 0,25$.

5. Conclusion

La capacité portante d'une semelle filante soumise à une charge inclinée, et reposant sur deux couches d'argile a été évaluée en utilisant le code FLAC (2005) en différences finies. La semelle est supposée rigide avec une interface rugueuse.

L'approche élastoplastique adoptée dans la présente étude a été validée dans le cas d'un chargement vertical. Les résultats obtenus sont en excellent accord avec ceux donnés par Merefild et al. (2001), en utilisant un calcul en déplacement.

Les enveloppes de rupture obtenues montrent une amélioration de la capacité portante avec l'augmentation de la résistance de la couche inférieure. Les facteurs d'inclinaison dans le cas d'un sol homogène ont été comparés avec les expressions d'Ouahab et al. (2017) et Meyerhof (1963), cette comparaison montre que la solution proposée est conservative. L'accroissement de la résistance de la couche d'argile supérieure conduit à une augmentation du facteur d'inclinaison i_c .

La distribution des déformations de cisaillement sous la semelle dans une couche d'argile molle posée sur une argile plus résistante a montré une concentration du mécanisme de rupture dans la couche supérieure. Dans le cas contraire, le mécanisme de rupture apparaît dans les deux couches d'argile.

Références

Brinch Hansen, J. (1970) A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute bulletin. 28: 5-11.
 Burd, H. J., S. Frydman (1997) Bearing capacity of plane-strain footings on layered soils. Canadian Geotechnical Journal. 34(2): 241-253.
 Button, S.J (1953) The Bearing Capacity of Footings on a Two-layer Cohesive Subsoil. Proc. Of the 3rd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich : vol 1 : 332-335.

- FLAC (2005) Fast Lagrangian Analysis of Continua, version 5.0. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- Georgiadis, M., A.P. Michalopoulos (1985) Bearing capacity of gravity bases on layered soil. *Journal of Geotechnical Engineering*. 111(6): 712-729.
- Green, A.P (1954) The plastic yielding of metal junctions due to combined shear and pressure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2(3): 197-211.
- Huang, M., H.L. Qin (2009) Upper-bound multi-rigid-block solutions for bearing capacity of two-layered soils. *Computers and Geotechnics*. 36(3): 525-529.
- Ibrahim K.M.H.I (2014) Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay. *Housing and Building National Research Center Journal*. 12: 71-77.
- Khitas, N.E.H., D. Benmeddour, M. Mellas, A. Mabrouki (2017) The undrained bearing capacity of strip footings under eccentric loading: effect of soil-footing interface tensile strength. *International Journal of Geotechnical Engineering*, doi: 10.1080/19386362.2017.1416570.
- Lee, J. K., S. Jeong, J. Q. Shang (2016) Undrained bearing capacity of ring foundations on two-layered clays. *Ocean Engineering*. 119: 47-57.
- Loukidis, D., T. Chakraborty, R. Salgado (2008) Bearing capacity of strip footings on purely frictional soil under eccentric and inclined loads. *Canadian Geotechnical Journal*. 45(6): 768-787.
- Merifield R.S, S.W. Sloan, H.S.Yu (1999) Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two-layered clays. *Géotechnique* ; 49(4):471-490.
- Merifield, R.S., S.W. Sloan, H.S. Yu (2001) Discussion-Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two-layered clays. *Géotechnique*. 51(2): 179-184.
- Meyerhof, G.G (1963) Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*. 1(1): 16-26.
- Meyerhof, G.G (1974) Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 11(2): 223-229.
- Meyerhof, G.G., A.M. Hanna (1978) Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load. *Canadian Geotechnical Journal*. 15(4): 565-572.
- Michalowski, R.L., L. Shi (1995) Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 121(5): 421-428.
- Ouahab, M.Y., A. Mabrouki, M. Mellas, D. Benmeddour (2017) Inclination Factors for Strip Footings on Non-Homogeneous Clay. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 54(3): 155-160.
- Rao, P., Y. Liu, J. Cui (2015) Bearing capacity of strip footings on two-layered clay under combined loading. *Computers and Geotechnics*. 69 : 210-218.
- Shiau, J. S., A.V. Lyamin, S.W. Sloan (2003) Bearing capacity of a sand layer on clay by finite element limit analysis. *Canadian Geotechnical Journal*. 40(5): 900-915.
- Smith I.M. D.V. Griffiths (1988) *Programming the finite element method*. Ion Wiley & Sons, 1988.
- Taiebat, H.A., J.P. Carter (2000) Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading. *Géotechnique*. 50(4): 409-418.
- Terzaghi K, R.B. Peck (1948) *Soil mechanics in engineering practice*. 1st ed New York: John Wiley and Sons.
- Terzaghi K. (1943) *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.
- Vesić, A (1975) Bearing capacity of shallow foundations. In: Winterkorn, H.F., Fang, H.Y. (Eds.), *Foundation Engineering Handbook*. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 121–147.
- Yahia-Cherif, H., A. Mabrouki, D. Benmeddour, M. Mellas (2017) Bearing Capacity of Embedded Strip Footings on Cohesionless Soil Under Vertical and Horizontal Loads. *Geotechnical and Geological Engineering*. 35(2): 547-558.
- Youssef-Abdel Massih, D.Y.A., E. El-Hachem, A.H. Soubra (2005) Bearing Capacity of Eccentrically and/or Obliquely Loaded Strip Footing Over Two-Layer Foundation Soil By A Kinematical Approach. In *Proc. VIII International Conference on Computational Plasticity* (pp. 1-4).
- Zhan, Y.G (2011) Undrained bearing capacity behavior of strip footings on two-layer clay soil under combined loading. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 16: 251-268.