

Numerical study of a vertical pullout capacity of strip anchor plate on a frictional soil

Étude numérique de la capacité d'arrachement vertical d'une plaque d'ancrage filante dans un sol frottant

Hicham Mokhbi^{1✉}, Mekki Mellas¹, Abdelhak Mabrouki¹, Jean-Michel Pereira²

1 Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra, BP 145 Biskra 07000, Algérie

2 Laboratoire NAVIER, École des Ponts ParisTech, 6 et 8 avenue Blaise Pascal, 77420 Champs-sur-Marne, France

Received 21 February 2016

Revised 02 June 2016

Accepted 06 June 2016

Published online: 19 June 2016

Keywords

Plate anchor

Pullout capacity

Finite element

Frictional soil

Abstract: This paper presents a numerical study of the ultimate pullout capacity of an isolated strip plate anchor, using the finite element method by Plaxis 2D software. The plate anchor is assumed rigid horizontally installed in a frictional soil and subjected to a centered vertical load. The soil behavior is governed by an elastic-perfectly plastic law, and Mohr-Coulomb criterion was adopted. The ultimate pullout capacity is expressed in terms of pullout factor N_y for different values of the depth H and the internal friction angle of soil φ' . The numerical results obtained allow us to propose a simple relationship to calculate the pullout factor of a strip plate anchor embedded horizontally in frictional soil. The numerical results of this study are finally compared to those available in the literature.

© 2016 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: Le présent article s'intéresse à l'étude numérique de la capacité ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante isolée, en utilisant la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis 2D. La plaque d'ancrage est supposée rigide installée horizontalement dans un sol frottant et soumise à une charge verticale centrée. Le comportement du sol est régi par une loi élastique-parfaitement plastique et le critère de Mohr-Coulomb a été adopté. La capacité ultime d'arrachement est exprimée en fonction du facteur d'arrachement N_y pour différentes valeurs de la profondeur H et l'angle de frottement interne du sol φ' . Les résultats numériques obtenus permettent de proposer une relation simple pour évaluer le facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante enterrée horizontalement dans un sol frottant. Les résultats numériques obtenus par cette étude sont finalement comparés à ceux disponibles dans la littérature.

Mots clés : Plaque d'ancrage; Capacité d'arrachement; Éléments finis; Sol frottant.

1. Introduction

Les plaques d'ancrages horizontales sont utilisées dans la construction des fondations qui subissent des forces d'arrachement verticales, tels que les pipelines submergés, les constructions offshores ou encore les pylônes de transmission. Dans la littérature, il existe différents travaux théoriques, numériques et expérimentaux traitant le calcul de la résistance ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage isolée. De nombreux auteurs ont développé différentes méthodes pour calculer la résistance ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage. On trouve le calcul à la rupture, la méthode de la ligne de glissement, la méthode d'analyse limite et les méthodes numériques basées en général sur la méthode des éléments finis ou la méthode des différences finies.

Pour calculer la capacité ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage circulaire enterrée à faible profondeur, Mors (1959) a supposé que le mécanisme de rupture dans le sol peut avoir une forme de cône tronqué. La force ultime d'arrachement est alors égale au poids du sol situé à l'intérieur de la surface de rupture. Downs et Chieurzzi (1966) ont supposé de façon similaire que la

force ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage circulaire enterrée dans un sol frottant est égale au poids du sol situé au-dessus de la plaque mais en considérant un mécanisme de rupture de forme cylindrique, auquel s'ajoute la résistance au frottement du sol développée sur la surface de rupture.

Meyerhof et Adams (1968) ont développé une théorie générale approximative basée sur des observations et des résultats expérimentaux pour estimer la capacité ultime d'arrachement des plaques d'ancrage horizontales filantes, circulaires et rectangulaires. Pour une plaque filante, ils ont remarqué que la surface de rupture est approximativement sous forme de pyramide tronquée. La capacité ultime d'arrachement est obtenue par l'étude de l'équilibre du bloc de sol situé directement au-dessus de la plaque (limité par des plans verticaux étendus des bords de la plaque jusqu'à la surface du sol) en prenant en considération la force cohésive le long des plans verticaux, ainsi que la résultante des pressions passives des terres. L'angle que fait la résultante des pressions passives des terres avec les plans verticaux est déterminé à partir des essais au laboratoire, et les pressions passives sont évaluées à partir des

✉ Corresponding author. E-mail address: hicham.mokhbi@gmail.com

tables de Caquot et Kerisel (1949). Meyerhof et Adams (1968) ont généralisé cette analyse pour des plaques d'ancrage circulaires et rectangulaires en introduisant un facteur de forme semi-empirique.

Merifield et al. (2006) ont présenté une excellente synthèse des travaux expérimentaux et théoriques réalisés par différents auteurs, pour calculer la résistance ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage horizontale.

Les investigations expérimentales antérieures ont été réalisées généralement sur des modèles réduits dans des chambres d'étalonnage ou en centrifugeuse. Elles ont permis de développer des relations semi-empiriques pour calculer la capacité ultime d'arrachement des plaques d'ancrage dans des sols frottant (Mors 1959; Griffels et al. 1960; Balla 1961; Turner 1962; Hanna et al. 1971; Das et Seeley 1975; Rowe 1978; Murray et Geddes 1987; Sakai et Tanaka 1998; Ilamparuthi et al. 2002).

La méthode des éléments finis a été utilisée par plusieurs auteurs pour calculer la capacité ultime d'arrachement des plaques d'ancrages horizontales enterrées dans un sol frottant. On peut citer Sakai et Tanaka (1998), Koutsabelous et Griffith (1989), Tagaya et al. (1983, 1988) et Vermer et Sutijadi (1985).

Les résultats numériques de Koutsabelous et Griffith (1989) ont montré que la règle d'écoulement associée a une petite influence sur la charge ultime d'arrachement des plaques d'ancrage filantes par rapport aux plaques d'ancrage circulaires dont la règle d'écoulement a une influence significative.

Des calculs en éléments finis en utilisant des lois de comportement élasto-plastiques ont été également effectués par Rowe et Davis (1982a, 1982b) pour évaluer la capacité ultime d'arrachement des plaques d'ancrage filantes dans un sol frottant et cohérent, en étudiant l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement des plaques d'ancrage.

Murray et Geddes (1987) ont développé des relations du facteur d'arrachement pour des plaques d'ancrage filantes, circulaires et rectangulaires, ancrées dans un sol frottant, en utilisant la méthode d'équilibre limite, et la méthode de la borne inférieure de l'analyse limite. Pour une plaque d'ancrage filante, ils ont trouvé la relation (1) du facteur d'arrachement. Cette solution donne des résultats satisfaisants par rapport à leurs résultats expérimentaux pour un sable très dense, par contre elle surestime les résultats pour un sable moyennement dense.

$$N_\gamma = 1 + \frac{H}{B} \tan \varphi' \quad (1)$$

L'objectif de cet article est l'étude numérique par la méthode des éléments finis de la capacité ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante enterrée dans un sol frottant. Les valeurs du facteur d'arrachement obtenues dans cette étude sont comparées à celles disponibles dans littérature. L'influence de la règle d'écoulement sur la capacité ultime d'arrachement est étudiée ; Aussi, une relation du facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante est proposée.

2. Études récentes

Le tableau 1 présente la synthèse bibliographique donnée par Merifield et al. (2006), ce tableau est actualisé avec des études théoriques effectuées entre 2003 et 2015 sur des plaques d'ancrages horizontales enterrées dans un sol frottant. On peut noter que peu d'études expérimentales ont été réalisées sur des plaques d'ancrage horizontales, à l'exception de Ghaly et Hanna (2003) qui ont étudié le problème des plaques d'ancrage hélicoïdales enterrées dans un sable, et Wang et al. (2013) qui ont traité les plaques d'ancrage hélicoïdales enterrées dans une argile.

3. Présentation du problème

Comme illustré sur la Figure 1, le problème étudié dans cet article considère une plaque d'ancrage filante de largeur $B = 2\text{m}$, installée horizontalement dans un sol frottant à une profondeur H et soumise à une force d'arrachement verticale; la plaque d'ancrage est supposée rigide et rugueuse. En pratique, la capacité ultime d'arrachement peut être estimée en utilisant l'équation suivante :

$$q_u = \gamma H N_\gamma \quad (2)$$

Avec γ est le poids volumique du sol, H est la profondeur d'ancrage et N_γ est le facteur d'arrachement.

Il est intéressant de noter que l'équation (2) est similaire à celle proposée par Terzaghi (1943) pour calculer la capacité portante des fondations superficielles.

Le facteur d'arrachement N_γ dépend du mécanisme de rupture considéré ainsi que d'hypothèses simplificatrices.

Dans ce travail, il est estimé à partir des simulations numériques et calculé pour cinq valeurs du rapport profondeur/largeur $H/B = 1, 2, 3, 4$ et 5 , et pour un angle de frottement interne du sol φ' variant de 20° à 40° .

4. Modélisation numérique

Le modèle numérique a été établi en déformations planes et utilise la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis 2D (Brinkgreve et al. 2012).

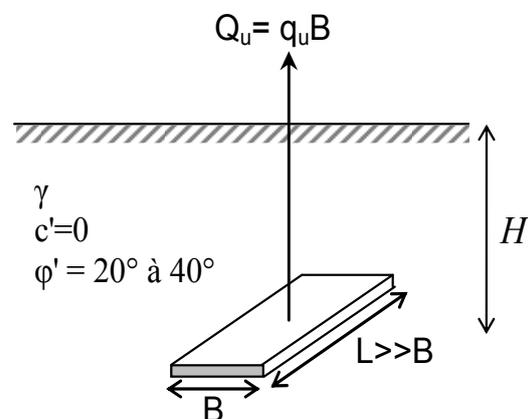
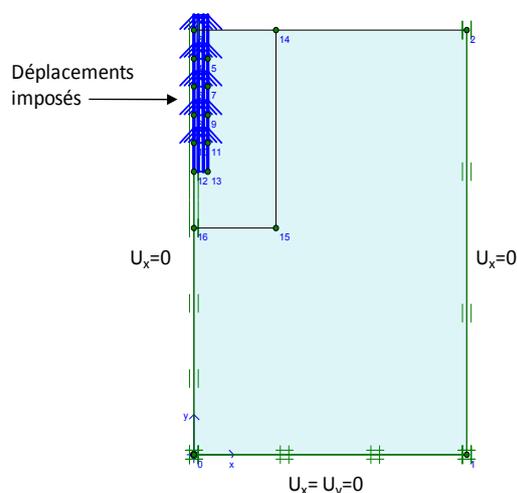


Fig. 1. Présentation du problème.

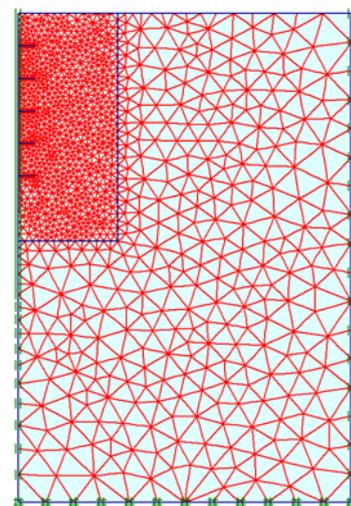
Tableau 1. Études théoriques sur les plaques d'ancrages horizontales dans un sol frottant.

Auteurs	Méthode	Forme de la plaque	Angle de frottement	Rugosité de la plaque	H/B ou H/D
Meyerhof & Adams (1968)	Équilibre limite : semi-analytique	Filante, circ., rec.	-	-	-
Vesic (1971)	Expansion de cavité	Filante, circ.	0° - 50°	-	0 - 5
Rowe & Davis (1982)	Éléments finis élastoplastique	Filante	0° - 45°	Lisse	1 - 8
Vermeer & Sutjiadi (1985)	Éléments finis élastoplastique / Borne supérieure	Filante	Tout	-	1 - 8
Tagaya et al. (1988)	Éléments finis élastoplastique	Circ., rec.	31,6°; 35,1°; 42°	-	-
Tagaya et al. (1983)	Éléments finis élastoplastique	L/B = 2	42°	-	-
Saeedy (1987)	Équilibre limite	Circ.	20° - 45°	-	1 - 10
Murray & Geddes (1987)	Analyse limite et équilibre limite	Filante, circ., rec.	Tout	-	Tout
Koutsabeloulis & Griffiths (1989)	Éléments finis : méthode des contraintes initiales	Filante, circ.	20°, 30°, 40°	-	1 - 8
Sarac (1989)	Équilibre limite	Circ., rec.	0° - 50°	-	1 - 4
Basudhar & Singh (1994)	Analyse limite : borne inférieure	Filante	32°	Rugueuse/lisse	1 - 8
Kanakapura et al. (1994)	Méthode des caractéristiques	Filante	5° - 50°	Rugueuse	2 - 10
Ghaly & Hanna (1994)	Équilibre limite	Circ.	30° - 46°	-	1-10
Smith (1998)	Analyse limite borne inférieure	Filante	25° - 50°	Rugueuse	1 - 28
Sakai & Tanaka (1998)	Éléments finis élastoplastique	Circ.	Dense	-	1 - 3
Merifield & al (2006)	Borne supérieure tridimensionnelle	Circ., carrée	20° - 40°	Rugueuse	1 - 10
Merifield & Sloan(2006)	Borne supérieure et inférieure / Éléments finis	Filante	20° - 40°	Lisse/Rugueuse	1 - 10
Hanna & al (2007)	Équilibre limite	Hélicoïdale, Circ.	30° - 40°	Rugueuse	1 - 8
Kumar & Kouzer(2008)	Borne supérieure - Éléments finis	Filante	20° - 40°	Rugueuse	1 - 7
Ghosh (2009)	Borne supérieure (pseudo-dynamique)	Filante	30° - 50°	Rugueuse	-
Ahmad izadeh & al (2011)	Borne supérieure	Filante	15° - 55°	Rugueuse	1 - 7
Khatri & Kumar (2011)	Borne inférieure - Éléments finis	Filante	25° - 40°	Rugueuse	1 - 7
Bhattacharya & Kumar (2014)	Borne inférieure - Éléments finis	Filante	30°	Rugueuse	3 ; 5 ; 7
Mabrouki & Mellas (2014)	Différences finies	Circ.	25° - 40°	Rugueuse	1 - 5
Ganesh & Sahoo (2015)	Eléments finis	Circ.	20° - 45°	Lisse	1 ; 3 ; 5

Les dimensions du modèle sont de dix fois la largeur de la plaque dans la direction horizontale, et de trois fois la profondeur d'ancrage maximale étudiée dans ce problème selon la direction verticale. L'axe vertical (oy) est un plan de symétrie du problème (Figure 2). Le comportement du sol est régi par une loi élastique-parfaitement plastique et le critère de Mohr-Coulomb, avec les paramètres suivants: le module de Young $E = 30000 \text{ kN/m}^2$, le coefficient de poisson $\nu = 0.3$, le poids volumique du sol $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, l'angle de frottement interne du sol $\varphi' = 20^\circ, 30^\circ$, et 40° une cohésion nulle, et l'angle de dilatance $\psi' = \varphi'$. La plaque d'ancrage rigide indéformable a été modélisée par des déplacements imposés verticalement et bloqués horizontalement

**Fig. 2.** Modèle géométrique et conditions aux limites pour une plaque d'ancrage filante.

au niveau des nœuds, pour les cinq profondeurs étudiées comme illustré sur la Figure 2. Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant les déplacements horizontaux et verticaux pour la limite inférieure, et en bloquant les déplacements horizontaux pour les deux frontières latérales (Figure 2). Le maillage a été adopté après plusieurs tests, il est constitué de 2631 éléments triangulaires de 15 nœuds, avec un maillage raffiné localement dans les zones de forte concentration de déformations au voisinage de la plaque d'ancrage, comme illustré sur la Figure 3. Un maillage unique a été utilisé pour les cinq profondeurs étudiées.

**Fig. 3.** Maillage adopté pour une plaque d'ancrage filante.

Lors du processus de calcul, les déplacements imposés augmentent progressivement par incrément jusqu'à la stabilisation de la force résultante qui présente la charge ultime d'arrachement Q_u de la plaque d'ancrage, puis le facteur d'arrachement N_y peut être calculé à partir de la relation (2).

5. Résultats et discussions

5.1 Courbe charge-déplacement

Les forces de réaction correspondant aux déplacements imposés verticalement selon la direction y représentent la force ultime d'arrachement Q_u . La capacité ultime d'arrachement q_u est calculée par la relation (3) :

$$q_u = \frac{Q_u}{B} \tag{3}$$

La Figure 4 représente l'évolution de la force de réaction en fonction du déplacement imposé d'une plaque d'ancrage filante dans le cas de l'angle de frottement interne du sol $\varphi' = 20^\circ$ pour les rapports $H/B = 1, 2, 3, 4,$ et 5 . Pour chaque profondeur étudiée, la force de réaction augmente avec l'augmentation du déplacement imposé, jusqu'à stabilisation à une certaine valeur qui représente la force ultime d'arrachement. Cette dernière augmente avec l'augmentation de la profondeur d'ancrage.

5.2 Facteur d'arrachement

La Figure 5 présente la comparaison entre les valeurs de N_y obtenues par la présente étude et les bornes inférieure et supérieure obtenues par Merifield et Sloan (2006) en utilisant la méthode d'analyse limite.

D'une manière générale, les valeurs de N_y obtenues par la présente étude sont en très bon accord avec les résultats de Merifield et Sloan (2006). Les courbes de N_y obtenues par la présente étude sont situées entre les deux bornes données par Merifield et Sloan (2006). Il est à noter que les valeurs données par la borne inférieure de Merifield et Sloan (2006) sont en excellent accord avec celles données par l'équation (1) développée par Murray et Geddes (1987). Ainsi, on peut noter que les calculs numériques en éléments finis donnent des valeurs de N_y raisonnables par rapport aux deux bornes supérieure et inférieure de la méthode d'analyse limite.

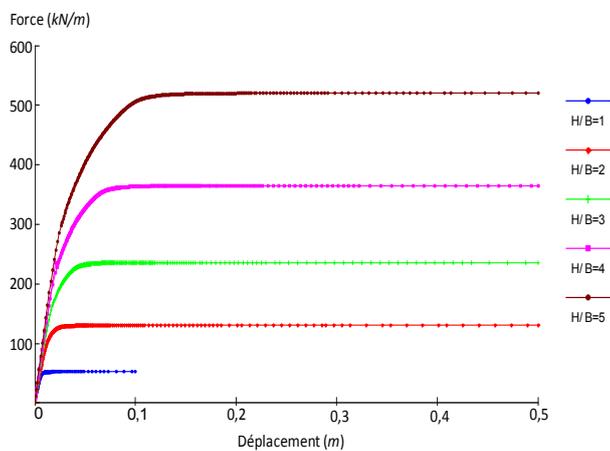


Fig. 4. La force ultime d'arrachement pour une plaque d'ancrage filante.

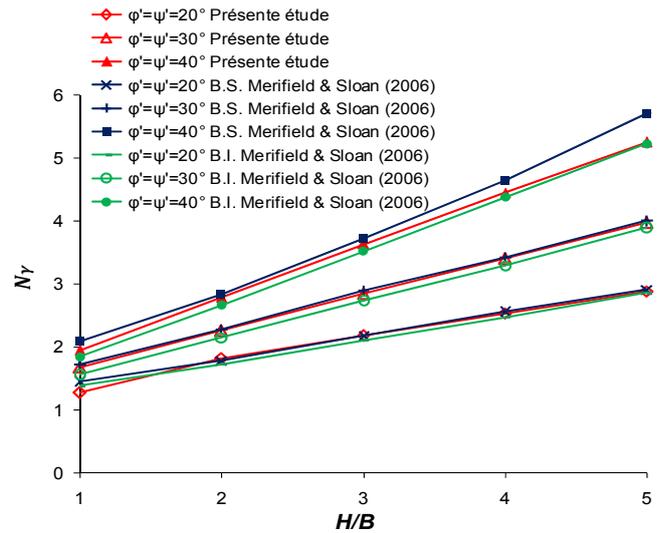


Fig. 5. Comparaison du facteur d'arrachement obtenu par les calculs numériques avec les résultats de Merifield et Sloan (2006) obtenus par les bornes inférieure et supérieure de l'analyse limite.

La Figure 5 montre que la variation du facteur d'arrachement N_y est linéaire par rapport à H/B pour les trois valeurs de l'angle de frottement interne du sol. En choisissant une relation entre N_y et H/B donnée par la relation (4) et en ajustant la pente a , on obtient les trois relations (5), (6) et (7) ci-dessous.

$$N_y = a \frac{H}{B} + 1 \tag{4}$$

avec a est un paramètre fonction de l'angle de frottement interne du sol.

Pour $\varphi' = 20^\circ$, on a: $N_y = 0,388 \frac{H}{B} + 1$ (5)

Pour $\varphi' = 30^\circ$, on a: $N_y = 0,603 \frac{H}{B} + 1$ (6)

Pour $\varphi' = 40^\circ$, on a: $N_y = 0,863 \frac{H}{B} + 1$ (7)

À partir des valeurs de a données dans les équations (5), (6) et (7), la relation linéaire (8) est ajustée:

$$a = 0,02 + \tan \varphi' \tag{8}$$

Finalement le facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante enterrée dans un sol frottant peut être exprimé par la relation (9):

$$N_y = 1 + \frac{H}{B} (0,02 + \tan \varphi') \tag{9}$$

La relation (9) établie dans cette étude est très proche à la relation (1) donnée par Murray et Geddes (1987) en utilisant la méthode de la borne inférieure en analyse limite. Pour vérifier les valeurs données par la relation (9), le facteur d'arrachement N_y a été calculé pour un angle de frottement interne φ' varie de 20° à 40° et pour un rapport profondeur/largeur H/B varie entre 1 et 10. Les valeurs obtenues sont comparées avec les résultats de Merifield et Sloan (2006) obtenus par la borne inférieure de la méthode d'analyse limite. Cette comparaison est présentée sur les Figures 6 et 7 qui montrent une très bonne concordance entre les deux résultats.

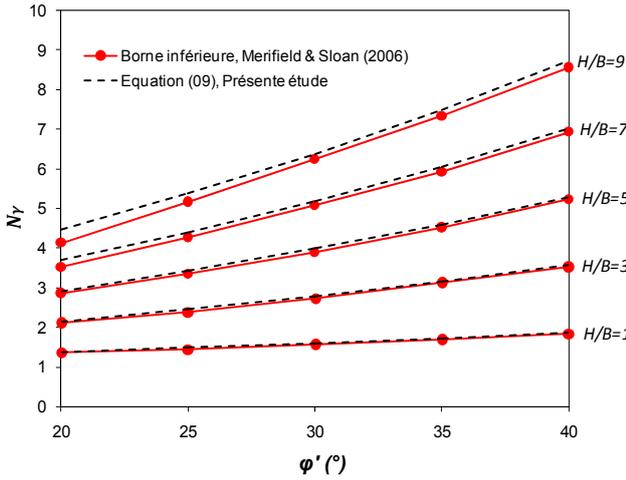


Fig. 6. Comparaison du facteur d'arrachement obtenu par la relation (9) avec la solution de Merifield et Sloan (2006) obtenue par la méthode de la borne inférieure

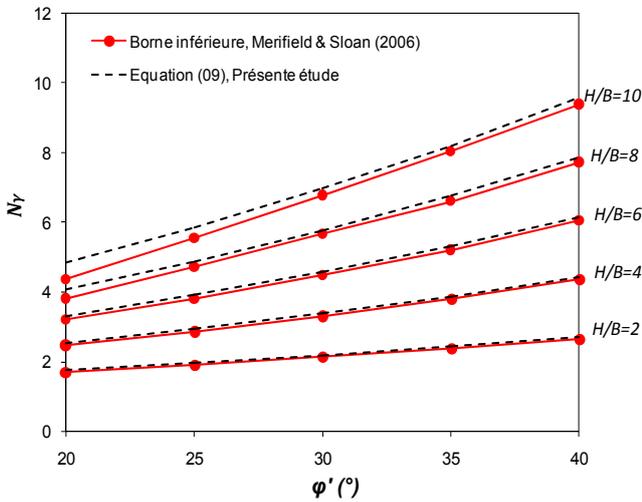


Fig. 7. Comparaison du facteur d'arrachement obtenu par la relation (9) avec la solution de Merifield et Sloan (2006) obtenue par la méthode de la borne inférieure.

6. Influence de la non-associativité du sol

Les calculs numériques effectués en considérant une règle d'écoulement associée ont donné des bons résultats en regard des résultats de la méthode d'analyse limite disponibles dans la littérature. Ces derniers considèrent également un sol associé, mais en réalité le sol possède un comportement non associé.

Pour montrer l'influence de la non-associativité du sol sur le facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante dans un sol frottant, des calculs numériques avec une règle d'écoulement non associée ($\psi'=0$ et $\psi'=\varphi'/2$) ont été effectués dans cette étude. La Figure 8 montre une comparaison des valeurs de N_y obtenues par la présente étude pour les trois cas $\psi'=\varphi'$, $\psi'=0$ et $\psi'=\varphi'/2$. Il est observé que la règle d'écoulement a une grande influence sur le facteur d'arrachement surtout pour des valeurs de φ' élevées. Cependant, pour le cas d'un sol parfaitement non associé ($\psi'=0$), les résultats des calculs sont un peu perturbés notamment pour $\varphi'=30^\circ$ et 40° où on remarque que la variation

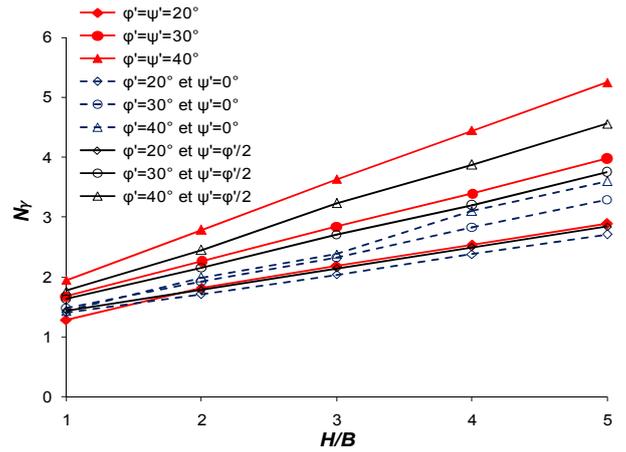


Fig. 8. Influence de la règle d'écoulement sur le facteur d'arrachement.

non-linéaire de N_y , et les valeurs obtenues sont très proches, notamment pour $H/B \leq 3$. Par contre pour le cas de $\psi'=\varphi'/2$ les résultats semblent raisonnables, et l'évolution du facteur d'arrachement est linéaire selon les équations (10), (11) et (12) correspond aux cas de $\varphi'=20^\circ$, 30° et 40° respectivement.

Pour $\varphi' = 20^\circ$, on a: $N_y = 0,35 \frac{H}{B} + 1,1$ (10)

Pour $\varphi' = 30^\circ$, on a: $N_y = 0,53 \frac{H}{B} + 1,1$ (11)

Pour $\varphi' = 40^\circ$ on a: $N_y = 0,70 \frac{H}{B} + 1,1$ (12)

En suivant la méthode appliquée précédemment pour établir une équation générale qui donne le facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante, on obtient la relation (13) qui est basée sur les résultats des calculs relatifs au cas d'un sol non associé avec $\psi'=\varphi'/2$.

$N_y = 1,1 + \frac{H}{B} (0,091 + 0,733 \tan \varphi')$ (13)

La Figure 9 représente une comparaison du facteur d'arrachement calculé par l'équation (13) avec celui obtenu par des essais expérimentaux réalisés par Dickin (1988), Das et Seely (1959), et Rowe et David (1982).

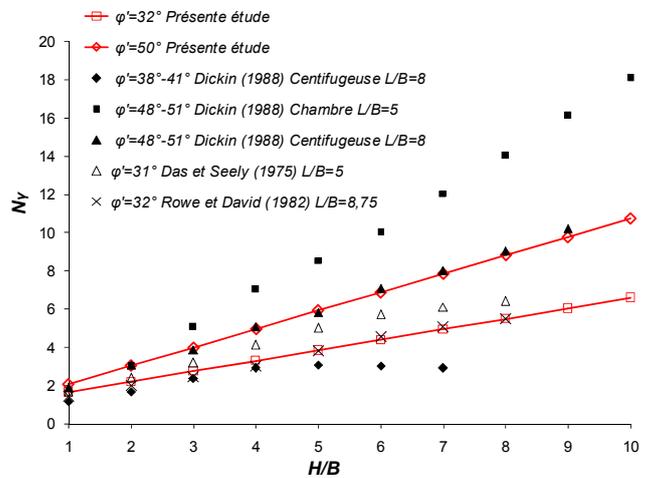


Fig. 9. Comparaison du facteur d'arrachement avec les résultats expérimentaux des autres auteurs.

Les valeurs de N_y obtenues par l'équation (13) sont en excellent accord avec les résultats expérimentaux de Rowe et David (1982) et ceux de Dickin (1988) dans le cas de $L/B=8$.

Les résultats expérimentaux montrent que la capacité ultime d'arrachement pour $L/B=5$ est supérieure à celle du cas $L/B=8$, et à celle donnée par l'équation (13) à cause du changement de mécanisme de rupture lié à la forme de la plaque d'ancrage qui ne peut pas être considérée comme une plaque filante dans le cas de $L/B=5$.

7. Conclusion

L'étude numérique de la capacité ultime d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante installée horizontalement dans un sol frottant a été abordée. Une modélisation numérique en déformations planes a été faite à l'aide du code Plaxis 2D, permettant de calculer le facteur d'arrachement N_y pour différentes valeurs de l'angle de frottement interne du sol et du rapport profondeur/largeur H/B .

Les valeurs numériques de N_y obtenues pour $\varphi' = \psi' = 20^\circ, 30^\circ$ et 40° avec $H/B \leq 5$ sont en excellent accord avec les résultats de Merifield et Sloan (2006), obtenus par la borne inférieure et la borne supérieure de l'analyse limite. Ces résultats montrent que l'évolution du facteur d'arrachement N_y en fonction de la profondeur est parfaitement linéaire pour les trois valeurs de φ' étudiées.

Les résultats obtenus pas la présente ont permis de proposer une relation simple et proche à celle de Murray et Geddes (1987) pour calculer le facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante installée horizontalement dans un sol frottant. Les valeurs de N_y obtenues par cette relation pour φ' variant de 20° à 40° et H/B variant de 1 à 10, sont très satisfaisantes par rapport aux résultats obtenus par Merifield et Sloan (2006) en utilisant l'analyse limite.

L'étude de l'influence de la non-associativité du sol sur la capacité ultime d'arrachement a permis de mettre en évidence que le calcul avec une règle d'écoulement associée surestime la capacité ultime d'arrachement notamment pour les grandes valeurs de φ' . Par ailleurs les calculs effectués dans cette étude avec une règle d'écoulement non associée ($\psi'=\varphi'/2$) ont démontré que la variation du facteur d'arrachement en fonction de la profondeur est également linéaire. Ces résultats ont permis d'établir une nouvelle équation générale qui donne le facteur d'arrachement d'une plaque d'ancrage filante enterrée horizontalement dans le sable. Cette équation donne des valeurs de N_y très proches à celles obtenues expérimentalement par d'autres auteurs.

Références

Ahmadzadeh, V., B. Kalantari & A. Eskandarinejad (2011) Influence of non-associated flow rule on seismic uplift capacity of horizontal strip anchors. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 16: 1175–1184.

Balla, A. (1961) The resistance of breaking-out of mushroom foundations for pylons. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France. Rotterdam, The Netherlands* 1:569–576.

Basudhar, P. K. & D. N. Singh (1994) A generalized procedure for predicting optimal lower bound break-out factors of strip anchors. *Géotechnique* 44(2):307-318.

Bhattacharya, P. & J. Kumar (2014) Vertical pullout capacity of horizontal anchor plates in the presence of seismic and seepage forces. *Geomechanics and Geoengineering* 9(4):294-302.

Brinkgreve, R. B. J. E. Engin, W. M Swolfs (2012) *Plaxis user's manual*. Netherlands: Plaxis BV.

Caquot, A. & L. Kerisel (1948) *Traité de mécanique des sols*. Paris: Gauthier-Villars, Paris.

Das, B. M., & G. R. Seeley (1975) Break-out resistance of shallow horizontal anchors. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers* 101(9): 999–1003.

Dickin, E. A. (1988) Uplift behaviour of horizontal anchor plates in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers* 114(11): 1300–1317.

Downs, D. I. & R. Chieurzzi (1966) Transmission tower foundations. *Journal of the Power Division, American Society of Civil Engineers* 92(2): 91–114.

Ganesh, R. & J. P. Sahoo (2015) Influence of ground water on the ultimate uplift resistance of circular plate anchors. 50th Indian Geotechnical Conference, 17th – 19th December 2015, Pune, Maharashtra, India.

Ghaly, A. & A. Hanna (2003) Response of anchors to variations in displacement-based loading. *Canadian Geotechnical Journal* 40(3):694–701.

Ghosh, P. (2009) Seismic vertical uplift capacity of horizontal strip anchors using pseudo-dynamic approach. *Computers and Geotechnics* 36(1) :342–351.

Giffels, W. C., R. E. Graham & J. F. Mook (1960) Concrete cylinder anchors proved for 345-KV tower line. *Electrical World* 154:46–49.

Hanna, A., T. Ayadat, & M. Sabry (2007) Pullout resistance of single vertical shallow helical and plate anchors in sand. *Geotechnical and Geological Engineering* 25(5):559–573.

Hanna, T. H, R. Sparks & M. Yilmaz (1971) Anchor behaviour in sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. American Society of Civil Engineers* 98(11):1187–1208.

Ilamparuthi, K., E. A. Dickin & K. Muthukrisnaiah (2002) Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand. *Canadian Geotechnical Journal* 39(3):648–664.

Kanakapura, S., S. Rao & J. Kumar (1994) Vertical uplift capacity of horizontal anchors. *Journal of Geotechnical Engineering* 120(7):1134–1147.

Khatri, V. N. & J. Kumar (2011) Effect of anchor width on pullout capacity of strip anchors in sand. *Canadian Geotechnical Journal* 48(3):511–517.

Koutsabeloulis, N. C. & D. V. Griffiths (1989) Numerical modelling of the trapdoor problem. *Géotechnique* 39(1):77–89.

Kumar, J. & K. M. Kouzer (2008) Vertical uplift capacity of horizontal anchors using upper bound limit analysis and finite elements. *Canadian Geotechnical Journal* 45(5):698–704.

Mabrouki, A. & M. Mellas (2014) Étude tridimensionnelle de la capacité ultime des plaques d'ancrage dans un sol frottant. *Courrier du Savoie*, 18:15–19.

Merifield, R. S. & S. W. Sloan (2006) The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils. *Canadian Geotechnical Journal* 43(8):852–868.

Merifield, R. S., A. V. Lyamin & S. W. Sloan (2006) Three-dimensional lower-bound solutions for the stability of plate anchors in sand. *Géotechnique* 56(2):123–132.

- Meyerhof, G. G. & J. I. Adams (1968) The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal* 5(4):225–244.
- Mors, H. (1959) The behaviour of mast foundations subject to tensile forces. *Bautechnik* 10: 367–378.
- Murray, E. J. & J. D. Geddes (1987) Uplift of anchor plates in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers* 113(3): 202– 215.
- Rowe, R. K. & E. H. Davis (1982) The behaviour of anchor plates in sand. *Géotechnique* 32(1):25–41.
- Rowe, R. K. (1978) Soil structure interaction analysis and its application to the prediction of anchor behaviour. Ph.D. thesis, University of Sydney, Sydney, Australia.
- Saeedy, H. S. (1987) Stability of circular vertical earth anchors. *Canadian Geotechnical Journal* 24(3):452-456.
- Sakai, T. & T. Tanaka (1998) Scale effect of a shallow circular anchor in dense sand. *Soils and Foundations, Japan*, 38(2): 93–99.
- Sarac, D. Z. (1989) Uplift capacity of shallow buried anchor slabs. *Proceedings, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 12(2):1213-1218.
- Smith, C. S. (1998) Limit loads for an anchor/trapdoor embedded in an associated coulomb soil. *International journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 22(11):855-865.
- Tagaya, K., A. Tanaka & H. Aboshi (1983) Application of finite element method to pullout resistance of buried anchor. *Soils and Foundations, Japan*, 23(3):91–104.
- Tagaya, K., R. F. Scott & H. Aboshi (1988) Pullout resistance of buried anchor in sand. *Soils and Foundations, Japan*, 28(3): 114–130.
- Terzaghi, K. (1943) *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York.
- Turner, E. Z. (1962) Uplift resistance of transmission tower footings. *Journal of the Power Division, American Society of Civil Engineers* 88(2):17–33.
- Vermeer, P. A. & W. Sutjiadi (1985) The uplift resistance of shallow embedded anchors. *Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco* 4:1635–1638.
- Vesic, A. S., (1971) Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineers* 97(SM9):1183-1205.
- Wang, D., R. S. Merifield & C. Gaudin (2013) Uplift behaviour of helical anchors in clay. *Canadian Geotechnical Journal* 50:575-584.