

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Une méthode intégrée pour dimensionner les réseaux d'inclusions rigides en déformation

An integrated displacement-based design approach for network of vertical rigid inclusions

B.Simon – Terrasol, Montreuil, France. Immeuble Helios, 72 avenue Pasteur, 93108 Montreuil Cedex, France

RÉSUMÉ: La méthode intégrée de dimensionnement des réseaux d'inclusions rigides verticales est une approche en déformation associant les principes généraux du calcul des déformations pour les sols et les poutres à des formes étendues des lois de Combarieu pour le frottement négatif et Frank et Zhao pour la mobilisation du frottement le long des pieux. La compatibilité des déformations de l'inclusion avec celles nécessaires pour développer un frottement entre l'inclusion et le sol encaissant est ainsi prise en compte. Cette nouvelle approche conduit à préciser la notion de profondeur critique pour les effets d'accrochage et permet de mieux analyser les redistributions d'efforts au sommet de la zone renforcée par les inclusions. Les résultats sont comparés à des calculs par éléments finis et confrontés à des observations faites sur un plot expérimental de chargement.

ABSTRACT: The proposed integrated design approach combines the general principles involved in the calculation of soil and beam displacements with some specifically extended forms of the semi-empirical laws derived by Combarieu to describe negative friction against piles and the side friction transfer laws proposed by Frank and Zhao. Compatibility of the displacements required to develop friction between the inclusion and the soil is taken into account. By this new approach the concept of critical depth can be precised and load transfer at top of the inclusion network can receive a better attention. Results by the proposed method are compared to those obtained by FEM calculation and some observations got from a full scale load test.

1 PRESENTATION

Les réseaux d'inclusions rigides sont utilisés pour le renforcement des sols de fondations sous des remblais ou des dallages. Ce type de fondation peut être caractérisé par le fait que les charges se trouvent appliquées simultanément aux têtes d'inclusions et au sol entre celles-ci. Les inclusions y sont mobilisées par l'effet d'accrochage qui se développe avec le sol encaissant lorsque celui-ci tend à tasser sous le chargement appliqué par le remblai ou le dallage.

Le fonctionnement de ce type de fondation est le plus souvent considéré sous l'angle de la réduction des tassements obtenue par rapport au cas d'une fondation non renforcée. La détermination des déplacements des inclusions et du sol placé entre celles-ci revêt donc une grande importance.

La méthode intégrée de dimensionnement repose sur la combinaison des principes généraux du calcul des déformations pour les sols et les poutres avec des formes étendues des lois proposées par Combarieu (1985) pour le frottement négatif et par Frank et Zhao (1982) pour la mobilisation du frottement le long des pieux.

2 METHODOLOGIE

2.1 Frottement négatif, Combarieu (1985)

Le frottement contre le pieu (rayon R) est relié à la contrainte verticale dans le sol :

$$\tau(z) = K \tan \delta \cdot \sigma'_v(z, R)$$

Les variations de la contrainte verticale autour du pieu sont supposées représentées par :

$$\sigma'_v(z, r) = \sigma'_v(z, R) + [\sigma'_1(z) - \sigma'_v(z, R)][1 - e^{-\lambda(r-R)/R}]$$

$\sigma'_1(z)$: contrainte verticale en l'absence de renforcement
 λ : facteur empirique relié à $K \tan \delta$

$\sigma'_v(z, R)$ est solution d'une équation différentielle linéaire du premier ordre :

$$d\sigma'_v(z, R)/dz + m_2 \sigma'_v(z, R) = d\sigma'_1(z)/dz$$

$$m_2 = f(\lambda, b, R, K \tan \delta)$$

La solution peut être calculée dans les situations où le terme $d\sigma'_1(z)/dz$ peut être considéré constant : cas où le profil $\sigma'_1(z)$ peut être linéarisé par couche.

Valeur moyenne sur la maille élémentaire du réseau (rayon équivalent b) :

$$\sigma^*(z) = \sigma_1(z) - [\sigma_1(z) - \sigma'_v(z, R)](1 - T_2)$$

$$T_2 = 2R \cdot K \tan \delta / m_2(b^2 - R^2)$$

Le tassement du sol $y_s^*(z)$ entre les inclusion peut être calculé à partir de $\sigma^*(z)$ selon une formulation de type oedométrique ou en faisant intervenir le module oedométrique équivalent E_{oed} .

Dans sa formulation initiale, le frottement négatif est supposé se développer tant que la contrainte $\sigma'_v(z, R)$ demeure supérieure ou égale à la contrainte initiale $\sigma'_{v0}(z)$. Selon l'approche proposée ici, le frottement négatif sera supposé se développer tant que la contrainte moyenne $\sigma^*(z)$ demeurera supérieure ou égale à la contrainte initiale $\sigma'_{v0}(z)$.

2.2 Mobilisation du frottement et du terme de pointe

Frank et Zhao (1982) ont proposé une méthode de détermination de la loi de mobilisation du frottement (respectivement du terme de pointe) avec le déplacement relatif pieu-sol à partir du module pressiométrique et de la valeur du frottement latéral limite q_{sl} (respectivement q_{pl}). Les résultats de nombreux essais de chargement de pieux instrumentés leur ont permis de proposer des expressions de K_t et K_p applicables à différentes catégories de pieux (foré, battu ouvert ou battu fermé).

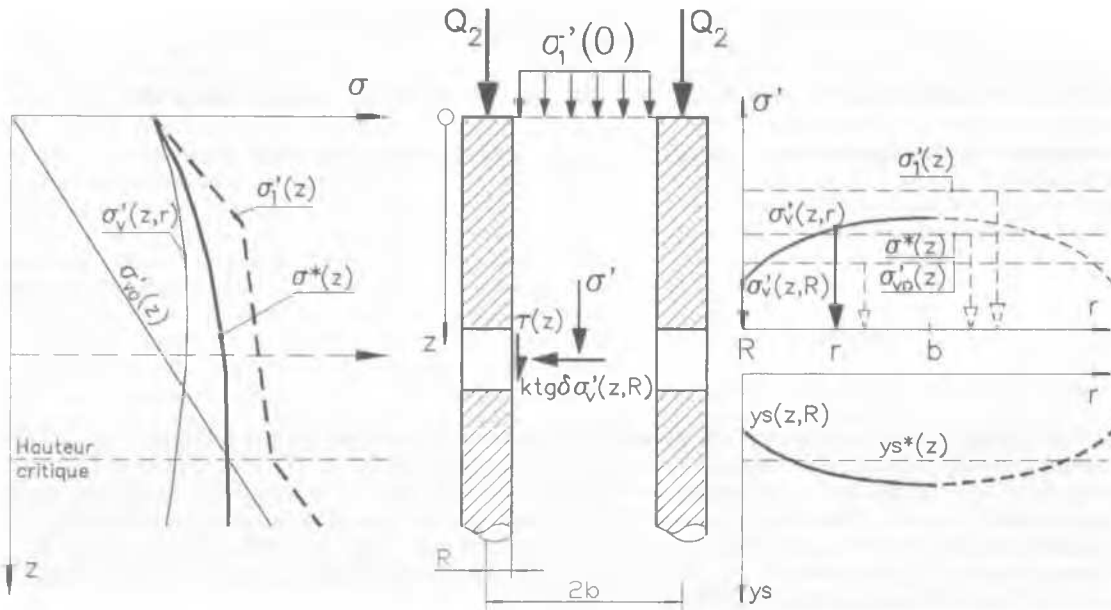


Figure 1 : Prise en compte des effets d'accrochage selon Combarieu (1985)

Dans le cas des réseaux d'inclusions, il est nécessaire de considérer également la compatibilité des déformations de chaque inclusion avec le tassement du sol entre les inclusions. Ceci fait donc introduire le déplacement relatif $[y(z) - y_s^*(z)]$ en lieu et place du déplacement absolu, la forme de chacune des lois demeurant inchangée :

$$\tau(z) = F[y(z) - y_s^*(z)]$$

- $y(z)$: déplacement de l'inclusion
- $y_s^*(z)$: déplacement du sol entre les inclusions

2.3 Equilibre d'une cellule élémentaire du réseau

Pour une cellule élémentaire du réseau d'inclusions :

- Les effets d'accrochage entre les inclusions déterminent, pour la distribution des contraintes $\sigma_1'(z)$ en l'absence de renforcement, l'état des contraintes contre les inclusions, $[\sigma'(z,R), \tau(z)]$ et le tassement moyen $y_s^*(z)$ du sol entre les inclusions ;
- La courbe de chargement de chaque inclusion résulte du profil des valeurs de frottement limite $\tau(z)$ et du champ de déplacement imposé du sol $y_s^*(z)$;

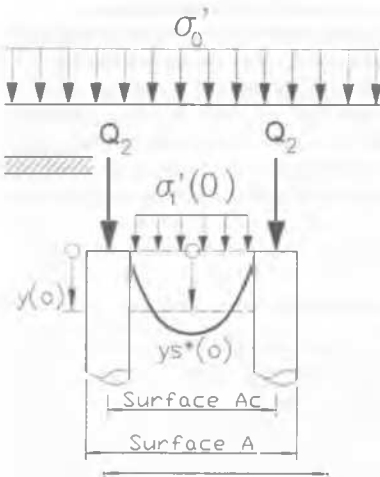


Figure 2 : Compatibilité des déformations au sommet de la cellule élémentaire.

- La charge totale appliquée est équilibrée par les efforts que représentent la pression $\sigma_1'(0)$ appliquée entre les colonnes (surface $A - A_c$) et la force Q_2 exercée en tête de l'inclusion (surface A_c) :

$$A\sigma_0 = (A - A_c) \sigma_1'(0) + Q_2$$

σ_0 est le chargement appliqué au sommet du massif granulaire coiffant les inclusions.

Lorsque une dalle est disposée à la base du remblai il est légitime de rechercher σ_1 et Q_2 sous la condition que les déplacements au toit du matelas granulaire soient égaux, à l'aplomb des inclusions et entre les inclusions. De la sorte, les conditions d'équilibre et de compatibilité sont remplies lorsque le déplacement $y_s^*(0)$ en tête du profil de sol soumis à la contrainte $\sigma_1'(0)$ est égal au tassement $y(0)$ de l'inclusion sous la charge Q_2 .

2.4 Mise en œuvre de la méthode

La méthode de dimensionnement peut être mise en œuvre en associant de manière itérative certains modules usuels du calcul de dimensionnement des fondations :

- distribution des contraintes verticales sous un chargement réparti à la surface d'un massif supposé semi-

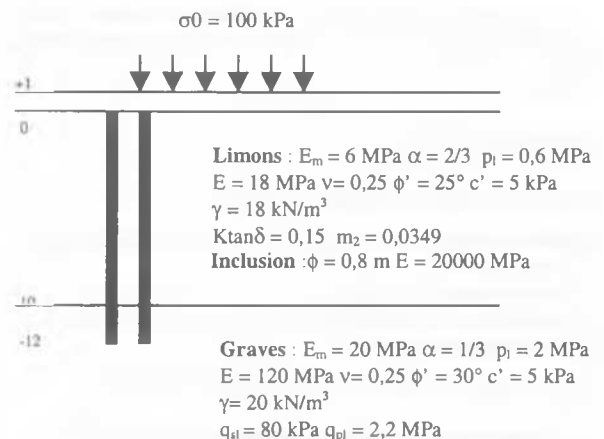


Figure 3. Coupe et paramètres des calculs comparatifs

infini, élastique, homogène et isotrope (détermination du champ de contraintes $\sigma_1(z)$);

- frottement négatif contre des éléments de fondations profondes (détermination du champ des contraintes $\sigma'(z,r)$ et $\tau(z)$ et champ des déplacements $y_s(z)$);
- courbe de chargement d'un pieu sous charge axiale par la méthode des fonctions de transfert (Coyle, 1966) :

$$y(0) = f(Q1, y_s^*(z))$$

Ces développements ont été intégrés dans un logiciel spécifique dédié au dimensionnement des fondations superficielles, profondes ou renforcées (Foxta, 2000).

3 EXEMPLES

3.1 Comparaison à des calculs par éléments finis

Le réseau est constitué de pieux forés de diamètre 0,8 m implantés selon une maille carrée 2,5 x 2,5 m². Un matelas granulaire d'épaisseur 1 m coiffe les inclusions. La charge appliquée σ_0 vaut 100 kPa.

Le tassement au toit du matelas, à l'aplomb des inclusions est calculé en considérant l'inclusion prolongée par une section de même diamètre mais de module égal à celui du matelas granulaire.

Les résultats obtenus selon la méthodologie décrite ont été comparés à des calculs conduits avec le logiciel Plaxis selon un modèle de Mohr-Coulomb.

En négligeant toute redistribution entre le sol et les inclusions, le tassement obtenu avec le logiciel Foxta est de 2,2 cm sur la hauteur de la fondation renforcée soit 46 % du tassement qui serait atteint en l'absence de renforcement. Le tassement estimé par Plaxis est de 2,7 cm, dont 0,55 cm proviennent des niveaux placés sous la pointe des inclusions. Les tassements estimés par l'une ou l'autre méthode entre 0 et 12 m sont donc du même ordre de grandeur.

En prenant en compte une redistribution des contraintes entre le sol et les inclusions telle que les tassements soient uniformes, Foxta établit un tassement de 1,4 cm. Celui-ci résulte d'une re-

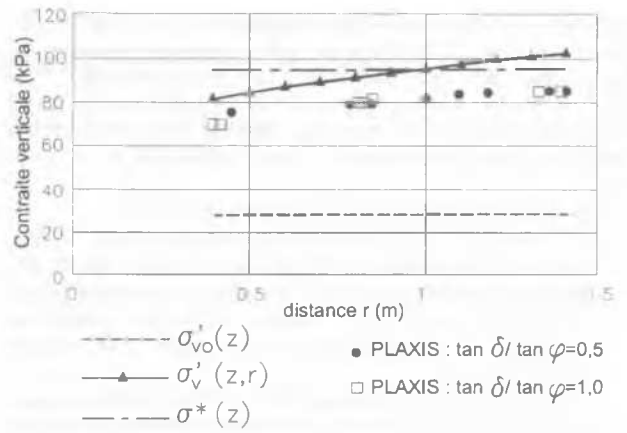


Figure 4. Comparaison des contraintes verticales selon les calculs FOX-TA et PLAXIS (cote -1).

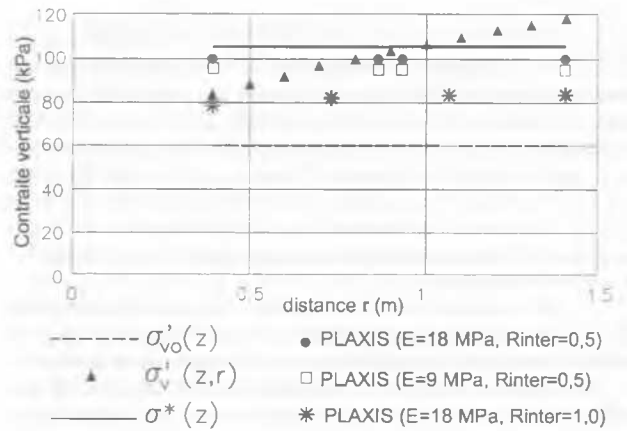


Figure 5 : Comparaison des contraintes verticales selon les calculs FOX-TA et PLAXIS (cote -5).

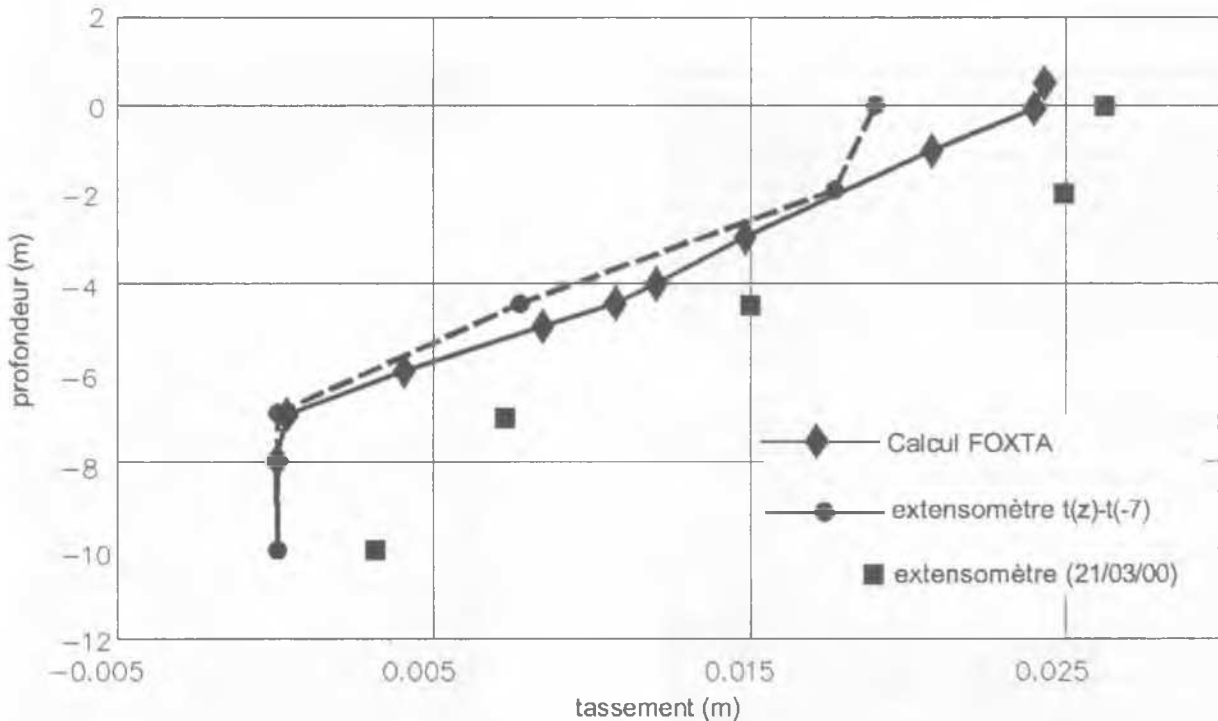


Figure 6. Comparaison des mesures expérimentales de tassement aux résultats des calculs FOXTA

distribution des charges avec une contrainte $\sigma_1 = 70$ kPa appliquée au sol et une charge $Q_2 = 223$ kN sur chaque inclusion. Le calcul comparatif Plaxis établit pour sa part un tassement 1,3 cm entre +1 et -12, une contrainte en tête du profil voisine de 62 kPa et une charge en tête de l'inclusion égale à 268 kN. L'accord observé en terme de tassement est donc satisfaisant au plan pratique.

Une comparaison détaillée des résultats établit :

- La forme de la loi $\sigma'_v(z,r)$ adoptée dans la méthode Combarieu est représentative en tête du profil (Fig.4); plus en profondeur la distribution tend à être plus uniforme que postulée ce qui suggère une valeur du facteur $K_{tan\delta}$ qui augmente avec la profondeur dans la couche compressible (Fig.5).
- Le calage entre les résultats Foxta et Plaxis dépend largement du choix de la valeur du rapport $\tan\delta/\tan\phi$, de l'angle ϕ lui-même et du module d'Young adopté E. Les paramètres $K_{tan\delta}$ et λ du modèle Combarieu apparaissent ainsi comme des facteurs composés de ces grandeurs géotechniques ; leur justification est essentiellement d'ordre expérimental.

3.2 Comparaison à un plot expérimental de chargement

La Figure 6 présente la comparaison des tassements estimés à ceux mesurés lors d'un plot expérimental de chargement. Le plot était constitué de 9 inclusions de type Colonnes à Module Contrôlé de diamètre 0,4 m, implantées selon une maille carrée 3 m x 3 m; la charge représentant 3 m de remblai était appliquée par l'intermédiaire d'un matelas granulaire d'épaisseur 0,4 m et d'une dalle béton d'épaisseur 0,15 m. Les tassements ont été mesurés par des plaques de tassement posées sur la dalle et des extensomètres verticaux.

Un plot identique mais non renforcé a permis de valider le choix des caractéristiques géotechniques en référence aux données d'un sondage pressiométrique réalisé entre les deux plots.

Les calculs menés selon la méthode proposée s'accordent aux observations recueillies. Ils montrent que les déformations du matelas granulaire contrôlent de manière importante le fonctionnement de la cellule élémentaire.

4 CONCLUSION

Le fonctionnement d'une fondation renforcée par des inclusions rigides verticales peut être appréhendé correctement en combinant certaines approches usuelles du calcul des fondations, adaptées pour prendre en compte les effets d'accrochage et la compatibilité des déformations du sol et des inclusions. La comparaison des résultats obtenus par la méthode proposée à des résultats de calculs par éléments finis fournit un éclairage intéressant sur le choix des paramètres semi-empiriques des lois de Combarieu. Les résultats d'un plot expérimental de chargement témoignent également de l'intérêt de la méthode au plan pratique.

REMERCIEMENTS

Les résultats du plot expérimental de chargement sont publiés avec l'accord de la société Ménard Sol Traitement.

REFERENCES

- Combarieu, O. 1985. Frottement négatif sur les pieux, Rapport de recherche LPC, n° 136.
- Coyle, H. M., & Reese, L. C., 1966, Load transfer for axially loaded piles in clay, Jnl. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 92, N° SM2
- Foxta, 2000, documentation du logiciel, Terrasol
- Frank, R. & Zhao S.R. 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale des pieux forés dans les sols fins. Bull. Liaison Labo P. et Ch., n° 119.