renforcement d'un sol lâche par inclusion de micropieux

reinforcement of weak soil by inserts of micropiles

C. PLUMELLE C.E.B.T.P.*

Résumé

Quatre essais de groupes et de réseaux de micropieux ont été réalisés en vraie grandeur pour tester l'augmentation de capacité portante du sol en place.

Les essais se sont déroulés à la station de fondations profondes du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics, sur un sable de Fontainebleau faiblement compacté.

L'instrumentation des micropieux et l'équipement du sable ont permis d'étudier le fonctionnement du sol renforcé.

Abstract

Four full scale tests of groups and reticulated micropiles were carried out to measure improvment of bearing capacity of soil.

Tests were made at a deep foundation station of « Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics » in weakly compacted fine sand (Fontainebleau).

By the instrumentation of micropiles and equipment of sand, it was possible to study the behaviour of reinforced soil.

1. BUT DE LA RECHERCHE

Le C.E.B.T.P. a étudié la possibilité d'une amélioration d'un sol de caractéristiques médiocres par inclusions de groupes ou de réseaux de micropieux verticaux ou inclinés (fig. 1).

2. SITE EXPÉRIMENTAL

Les essais se sont déroulés à la station de fondations profondes du C.E.B.T.P. dans la cuve de 6,40 m de diamètre et de 10 m de profondeur. Le sable utilisé est du sable de Montabé, de type sable de Fontainebleau. Ses caractéristiques physiques sont indiquées sur la figure 2. Le remplissage est effectué par couches de 20 cm à compacité contrôlée sur une épaisseur totale de 7,70 m. Il n'a été effectué qu'une passe de compacteuse pour obtenir une densité lâche $\gamma d = 13.5 \text{ kN/m}^3$ ce qui pour ce sable donne une densité relative $D_R = 37 \%$.

^{*} Centre Expérimental de Recherche et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, 12, rue Brancion, 75737 Paris Cedex 15.









Fig. 1. — Etude expérimentale du renforcement d'un sol lâche par inclusion de micropieux.

- Essai S.P.T.

Nº 30

Il a été réalisé les essais in situ suivants (fig. 3).

- Essais au mini-pressiomètre :

 $0,27 \text{ MPa} < P_1 < 0,5 \text{ MPa}$

Si on élimine la valeur à 7 mètres la valeur moyenne est de 0,38 MPa et à titre indicatif les modules $E_{mini.p.}$ varient de 2,1 à 4,7 MPa.

— Essais au pressiomètre normal après essai et battage d'un pieu métallique: $\begin{array}{ll} \mbox{0,28 MPa} < \mbox{P}_1 < \mbox{0,47 MPa} & \mbox{\bar{P}_1} = \mbox{0,388 (0,70)} \\ \mbox{2,6 MPa} < \mbox{E} < \mbox{5,2 MPa} & \mbox{\bar{E}} = \mbox{4,3 (0,93)} \\ \end{array}$

Mis à part le résultat au première mètre, le S.P.T. est

≤ 2.

- Essai au pénétromètre dynamique léger:

Les résistances dynamiques R_d sont en moyenne égales à 1 MPa.



Fig. 2. — Analyse granulométrique.



Fig. 3. — Micropieux essais de contrôle.

4. RÉALISATION DES GROUPES ET RÉSEAUX DE MICROPIEUX

4.1. Exécution (fig. 4)

Le groupe comprend 16 micropieux verticaux d'entr'axes 0,50 m.

Le forage d'une profondeur de 6 m a été réalisé en \emptyset 64 mm à l'aide d'une tarière hélicoïdale légère à moteur thermique. Le micropieu est constitué d'un coulis C/E = 1 avec un faible pourcentage de bentonite, il est armé de Diwidag \emptyset 14 mm.

Le réseau comprend également 16 micropieux inclinés de 10° ; leurs entr'axes varient de 0,45 à 0,60 m. Ils ont été exécutés avec le même procédé que le groupe.

On constate comme c'est habituel pour des sables lâches une impossibilité de déterminer la charge de rupture.

De même pour les courbes de fluage, on note dès le départ des vitesses importantes et il paraît délicat de fixer une charge critique de fluage.

A titre indicatif on peut se fixer un déplacement admissible, par exemple 10 mm :

$$\Delta l = 10 \text{ mm}$$
 $\sigma = 78 \text{ kPa}$ $\alpha = 0.56 \text{ mm}$

Inversement, si on fixe la vitesse de fluage du dernier point de la première phase:

 $\alpha = 0,86 \text{ mm}$ $\sigma = 125 \text{ kPa}$ $\Delta l = 17 \text{ mm}$



Fig. 4. - Implantation des micropieux.

3. PROGRAMME D'ESSAIS

Il a été réalisé:

1. Un essai de semelle de 2 \times 2 m sur sable vierge.

2. Un essai de semelle de 1×1 m sur sable vierge.

3. Un essai de semelle de 1 \times 1 m sur une couche de sable de 0,50 m reposant sur un groupe de micropieux verticaux.

4. Un essai de semelle de $1 \times 1\,\mathrm{m}$ sur une couche de sable de 0,50 m reposant sur un réseau de micropieux inclinés.

5. Un essai de semelle de 1×1 m sur une couche de tout venant de 0,50 m reposant sur un groupe de micropieux verticaux.

6. Un essai de semelle de $1 \times 1\,\mathrm{m}$ sur une couche de tout venant de 0,50 m reposant sur un réseau de micropieux inclinés.

7. Un essai de semelle de 2 \times 2 reposant directement sur un groupe de micropieux verticaux.

8. Un essai de semelle de 2 \times 2 reposant directement sur un réseau de micropieux inclinés.

4.2. Equipement des micropieux

Six micropieux ont été instrumentées de jauges de déformation aussi bien pour le groupe que pour le réseau.

4.3. Equipement du sol

- Pour les essais 1, 2, 3 et 4 le sol a été équipé de capteurs de pression totale.

— Pour les essais 1, 2, 3 et 4 des bandes noires étaient placées afin de relever les déplacements du sable après chargement.

— Pour les essais 1, 2, 3 et 4 des comparateurs étaient placés directement sur le sable dans l'axe des semelles pour suivre les mouvements du sol pendant le chargement.

5. RÉSULTATS DES ESSAIS DE SEMELLES SUR SOL VIERGE

5.1. Semelle de 2 \times 2 m

Ce premier essai a été fait avec des paliers de fluage pour tenter de déterminer à la fois la charge de rupture (fig. 5) et la charge critique de fluage (fig. 6).



Fig. 5. — Courbe contrainte-déplacement.



Fig. 6. — Essai de semelle nº 1 (2.00/2.00) Fluage-courbe des pentes des droites de stabilisation.

RENFORCEMENT D'UN SOL LÂCHE PAR INCLUSION DE MICROPIEUX

5.2. Semelle de 1 \times 1 m

La courbe contraintes-déplacements a la même allure que précédemment (fig. 7).

Pour le même déplacement de 10 mm on a : $\sigma = 126 \text{ kPa}.$



Fig. 7. — Essai nº 2 Courbe contraintes-déplacement.

Le calcul de la capacité portante de cette semelle par les méthodes pressiométriques MENARD donnerait une contrainte admissible de 75 kPa avec un coefficient de sécurité de 3. Sous cette même contrainte le tassement serait d'environ 8 mm, valeur légèrement supérieure à celle de l'essai de 5 mm.

Après les 2 essais sur semelles nous avons décaissé de 1 mètre, ce qui nous a permis de relever les déplacements des bandes noires (fig. 8 et 9).

6. ESSAI DE MICROPIEU ISOLÉ

Le micropieu isolé d'une longueur de 6 m a été foré à la tarière hélicoïdale \emptyset 64 mm. Il est constitué d'un coulis C/E = 1 et armé d'un Diwidag \emptyset 14 mm. L'essai de chargement indique une rupture franche comme chaque fois que le frottement latéral est prépondérant (fig. 10).

La rupture s'est produite à 53 kN pour un déplacement de 7 mm ce qui correspond à un frottement latéral unitaire moyen de 40 kPa.

L'instrumentation de la barre en jauges de déformation a permis en estimant le modèle du coulis à 7 000 MPa de tracer la répartition des efforts le long du bulbe (fig. 11).

On remarque que dès le 2^e palier la quasi totalité du micropieu est mobilisée en frottement et que même à la rupture la part de la pointe est totalement négligeable.



Fig. 8. — Semelle nº 1 : 2.00/2.00 Profil des bandes noires sur l'axe.





Fig. 9. — Semelle nº 2: 1.00/1.00 Profil des bandes noires sur l'axe.



Fig. 10. — Micropieu isolė Courbe effort-déplacement.

7. MISE EN PLACE DU SABLE AU-DESSUS DES TÊTES DE MICROPIEUX

Après les essais de semelles sur sol vierge, la cuve a été vidée sur une largeur de 2 m et une profondeur de 1 m afin d'éliminer la couche superficielle compactée et d'exécuter les micropieux du groupe et du réseau.

Les essais de contrôle (fig. 3) au mini pressiomètre et au pénétromètre dynamique léger ont permis de constater une légère augmentation des caractéristiques du sable. Par exemple, à 1 m de profondeur par rapport à l'état initial, c'est-à-dire au niveau des têtes de micropieux, on a les valeurs suivantes avant et après:

P₁: 0,27 / 0,37 MPa P₃: 0,33 / 0,48 MPa P4: 0,35 / 0,47 MPa

Les résultats des pénétromètres dynamiques légers confirment ceux du mini pressiomètre.

Une nouvelle couche de sable compacté avec le même processus que précédemment a été mise en place sur 0,50 m au-dessus des têtes de micropieux verticaux ou inclinés.

8. ESSAIS DE SEMELLE DE 1×1 M SUR UNE COUCHE DE SABLE DE 0,50 M REPOSANT SUR UN GROUPE DE MICROPIEUX VERTICAUX

L'essai de chargement (fig. 12) a été conduit jusqu'aux grands déplacements pour pouvoir le comparer à l'essai de référence sur sol vierge.

On constate également qu'il n'est pas possible de déterminer une charge de rupture (fig. 13).

Si on compare à l'essai de référence pour un déplacement donné on a par exemple pour :

10 mm: 0,126 / 0,140 MPa

50 mm: 0,27 / 0,31 MPa

soit environ une augmentation de 10%.







Fig. 12. — Micropieux verticaux -Schéma de principe.



Fig. 13. — Courbes contraintes-déplacement

9. ESSAI DE SEMELLE DE 1 \times 1 M SUR UNE COUCHE DE SABLE DE 0,50 M REPOSANT SUR UN GROUPE DE MICROPIEUX INCLINÉS

Les résultats de l'essai de chargement (fig. 14) montrent une amélioration meilleure qu'avec le groupe (fig. 13).

Les mêmes comparaisons indiquent: 10 mm: 0,126 / 0,160 MPa 50 mm: 0,27 / 0,340 MPa

soit une augmentation d'environ 25 %.



ESSAI Nº 4

11. ESSAI DE SEMELLE DE 1×1 M SUR UNE COUCHE DE TOUT-VENANT DE 0,50 M REPOSANT SUR UN GROUPE DE MICROPIEUX VERTICAUX

Les résultats (fig. 15) montrent une augmentation de la capacité portante comparable à celles apportées par les semelles sur sablon pour des déplacements de l'ordre de 10 mm, par contre pour de grands déplacements l'amélioration devient très sensible:

10 mm: 0,126 / 0,200 MPa 50 mm: 0,270 / 0,540 MPa

soit un doublement de la contrainte.



Fig. 15. — Courbes contraintes-déplacement

Fig. 14. — Micropieux inclinés -Schéma de principe.

10. MISE EN PLACE DU TOUT-VENANT AU-DESSUS DES TÊTES DE MICROPIEUX

La couche de sable de 0,50 m a été remplacée par une couche de tout-venant de même épaisseur mis en place en 3 couches compactées à la petite dame. Le poids spécifique moyen de $17,2 \text{ kN/m}^3$ est à 87% de l'O.P.M.

12. ESSAI DE SEMELLE DE 1×1 M SUR UNE COUCHE DE TOUT-VENANT DE 0,50 M REPOSANT SUR UN RÉSEAU DE MICROPIEUX INCLINÉS

Les résultats (fig. 15) sont comparables à ceux sur micropieux verticaux:

10 mm: 0,126 / 0,146 MPa 50 mm: 0,270 / 0,55 MPa



Fig. 16. — Courbes effort-déplacement

13. ESSAIS DE SEMELLES REPOSANT DIRECTEMENT SUR MICROPIEUX

Après vidage de la couche de tout-venant de 0,50 m il a été réalisé les essais de chargement direct sur le groupe et le réseau de micropieux à l'aide de la dalle de 2×2 m.

Pour le groupe de micropieux verticaux, la rupture a été obtenue à 800 kN. Pour le réseau de micropieux inclinés, la rupture a été atteinte à un niveau un peu plus élevé à environ 850 kN.

On constate donc que les charges de rupture sont très proches de seize fois la charge de rupture unitaire, aucun effet de groupe n'étant décelé.

Bien que les courbes efforts-déplacements puissent être entachées d'erreurs par des contacts délicats de la dalle et des seize têtes de micropieux, on note à la rupture un déplacement beaucoup plus important que pour le pieu unique. Pour le groupe, le déplacement est proche de 30 mm pour le réseau voisin de 20 mm.

Pour la moitié de la charge de rupture, le déplacement est de 2,5 mm pour le pieu isolé, il passe à 4 mm pour le réseau et à 8 mm pour le groupe.

14. RÉSULTATS DES JAUGES DE DÉFORMATION

L'examen des résultats enregistrés par les jauges de déformation permet d'examiner les reports d'efforts sur les micropieux et leur mode de fonctionnement. Pour les quatre micropieux verticaux sur sablon n° 23, 30, 29 et 25 (fig. 4) on constate le même mécanisme. L'effort en tête reste faible et atteint seulement 3 kN au dernier palier. Le frottement négatif augmente pour atteindre de 20 à 50 kPa, il s'inverse vers 2,00 m (fig. 17).

Si l'on rapproche ces résultats des tassements de la semelle seule, on constate qu'au niveau de la tête, le tassement du sable est d'environ 50 mm et qu'il devient négligeable vers 1,50 m de profondeur.

C'est ce que l'on constate par exemple pour le n° 23 sur les courbes de répartition des efforts le long du fût où à 1 m de profondeur soit 1,50 m par rapport au niveau de la semelle, l'effort repris par le micropieu atteint environ 13 kN pour décroître ensuite quand le tassement du pieu devient supérieur à celui du sable (fig. 17).

Par ailleurs, on peut penser d'après les indications des jauges que les pieux 20 et 26 travaillent en flexion, ce qui est logique, leurs positions étant assez éloignées de l'emprise de la semelle.

Pour les micropieux inclinés sur sablon, l'examen des jauges est plus délicat, pour le n° 6 il donne les mêmes genres de résultats, un effort en tête de l'ordre de 6 kN et un frottement négatif s'inversant vers 2 m. Les mêmes micropieux ayant resservi pour les essais sur tout-venant, les résultats des jauges sont plus difficiles à interpréter. On peut constater malgré tout sur le groupe de micropieux verticaux que les efforts en tête restent modestes et qu'il y a une amplification du frottement négatif (fig. 18).



N° 30

Fig. 17. — Semelle sur groupe de micropieux verticaux-sable.



Fig. 18. — Semelle sur groupe de micropieux verticaux tout-venant.

56

CONCLUSION

Cette première étude expérimentale en semi vraie grandeur du renforcement d'un sol lâche par inclusion de micropieux a permis de dégager les principaux enseignements suivants:

— Le réseau des micropieux apporte une plus grande efficacité que le groupe. Dans les deux cas, le report de charges en tête des micropieux est faible et est loin de saturer l'effort de rupture du micropieu isolé, les longueurs de micropieux devront être ajustées dans chaque cas pour retrouver une longueur suffisante où s'exerce le frottement positif.

— Les caractéristiques de la couche de remblai sont importantes. Il sera difficile d'assurer un compactage efficace sur sol mou, par contre, on peut jouer sur la granulométrie et on a constaté une nette amélioration avec le tout-venant dans les grandes déformations.

NOTATIONS

- yd: Poids spécifique apparent sec, kN/m³.
- D_R: Densité relative, %.
- P1: Pression limite pressiométrique, MPa.
- E: Module pressiométrique, MPa.
- Δ1: Déplacement, mm.
- σ: Contrainte du sol, kPa.
- α: pseudo-vitesse de fluage
- $\Delta 1 = \Delta 10 + \alpha \log t$, mm/décade.
- O.P.M.: Optimum proctor modifié, kN/m3.