

Sols argileux normalement consolidés reconstitués par gradient hydraulique

M.P. LUONG

CNRS UMR 7649 Laboratoire de Mécanique des Solides
91128 Palaiseau Cedex

J. RIVIÈRE
CEA-CESTA

Service Expérimentation, BP 2, 33114 LE BARP

Résumé

L'expérimentation en centrifugeuse de la tenue de la fondation d'une pile de pont a nécessité la reconstitution d'un massif de sol argileux normalement consolidé présentant une cohésion croissante avec la profondeur. L'argile prélevée sur site a été rendue homogène, puis consolidée en conteneur par la méthode du gradient hydraulique. On contrôle soigneusement le débit d'infiltration et la pression interstitielle au cours de la consolidation.

Mots clés : force de masse, gradient hydraulique, argile normalement consolidée.

Abstract

Centrifuge testing of pier foundation behaviour requires a normally consolidated clayey soil mass that presents undrained shear strength increasing with depth. The soil material sampled on site was initially homogenized and consolidated in a container using the hydraulic gradient method. The water flow coming out of the model and the pore water pressure recorded by several sensors have been carefully monitored during the consolidation process.

Key words : mass force, hydraulic gradient, normally consolidated clay.

1. Introduction

Les modèles réduits en centrifugeuse (Philips, 1869) offrent une approche globale intéressante, permettant, d'une part, d'appréhender les bonnes lois de comportement en opérant avec conservation du matériau, des déformations et des contraintes (Mandel, 1962) et, d'autre part, de valider les méthodes de calcul.

L'obtention de la similitude entre la structure et le modèle suppose de satisfaire un certain nombre de conditions portant sur la géométrie des ouvrages, la dynamique des phénomènes, la nature et le comportement des matériaux.

Les modèles numériques de calcul de structure s'efforcent de prendre en compte les comportements non linéaires des matériaux ou des géométries (décollement de fondations, jeux...). Une des principales difficultés réside dans la complexité des lois rhéolo-

giques des sols à introduire dans le calcul.

Compte tenu de ses capacités exceptionnelles, la centrifugeuse LATE-COERE du CESTA est particulièrement bien adaptée à l'expérimentation sur modèles réduits dans le domaine de la géotechnique (Luong, 1987). Mais la préparation d'un matériau argileux normalement consolidé est très longue à réaliser par centrifugation.

Aussi, afin de préparer les maquettes en massif de sol argileux pour réaliser des essais de capacité portante sur modèle réduit (1/100) de pile de pont en centrifugeuse, le CESTA a développé avec le concours du Laboratoire de mécanique des solides de l'École polytechnique une technique de consolidation de l'argile par *gradient hydraulique* pour reconstituer à l'échelle le profil de résistance du sol en place (Imai *et al.*, 1984 ; Luong, 1986 ; Mikasa, 1963 ; Zelikson, 1967).

2. Technique du gradient hydraulique

Le sol argileux à l'étude est constitué de particules suffisamment fines pour qu'il soit considéré comme un milieu statistiquement continu, homogène et à porosité régulière à l'échelle du massif de sol du modèle à centrifuger.

Lorsque ce massif, saturé d'eau, est soumis à un écoulement unidimensionnel, l'équation d'équilibre en contraintes totales s'écrit :

$$\sigma_{i,j} + \rho (g_i - \xi_i) = 0 \quad (1)$$

où :

$\sigma = \sigma' + u$	Pa	la contrainte totale
σ'	Pa	la contrainte effective
u	Pa	la pression interstitielle
ρ	kg.m ⁻³	la masse volumique du sol argileux
g	m.s ⁻²	la pesanteur
ξ	m	le déplacement
t	s	le temps
\cdot, j	m ⁻¹	la dérivée par rapport à l'axe j
$\ddot{\cdot}$	t ⁻²	la dérivée par rapport au carré du temps

En contraintes effectives, l'équation (1) devient :

$$\sigma'_{i,j} + u_{,j} + \rho (g_i - \xi_i) = 0 \quad (2)$$

La relation de Bernoulli, donnant le potentiel hydraulique h le long d'un filet liquide, permet de calculer la variation de la pression interstitielle en fonction du gradient hydraulique i (Terzaghi et Peck, 1965). ∇ est l'opérateur gradient.

$$u_{,j} = \rho_w g_i (i - 1) \text{ avec } i = \nabla h \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) donnent :

$$\sigma'_{i,j} + \rho_w g_i i + (\rho - \rho_w) g_i - \rho \xi_i = 0 \quad (4)$$

On y reconnaît que la force de masse f_m est égale à :

$$f_m = \rho_w g_i i + (\rho - \rho_w) g_i = \gamma_w i + \gamma \quad (5)$$

où γ_w et γ sont respectivement les poids volumiques de l'eau interstitielle et le poids volumique déjaugé du sol argileux. La perte de charge du fluide est ainsi transmise à l'ossature du sol argileux comme une force de volume dite *force de percolation*.

3. Moyens d'essais

Le massif de sol argileux de la maquette est contenu dans une cellule en aluminium de dimensions (longueur = 1,30 m ; largeur = 0,80 m et profondeur = 0,40 m).

Alimentée par le réseau à travers une vanne mécanique VM1, une pompe multi-étages de (1,2 MPa) fournit une pression de 500 kPa maintenue constante à la surface du sol, d'une part, par une vanne mécanique VM2 et, d'autre part, grâce à des électrovannes EV1 et EV2 commandées par un régulateur. La vanne mécanique VM3 évacue l'excès d'eau et assure la régulation à la surface du sol. La vanne mécanique VM4 maintient le fond de la cellule à la pression atmosphérique.

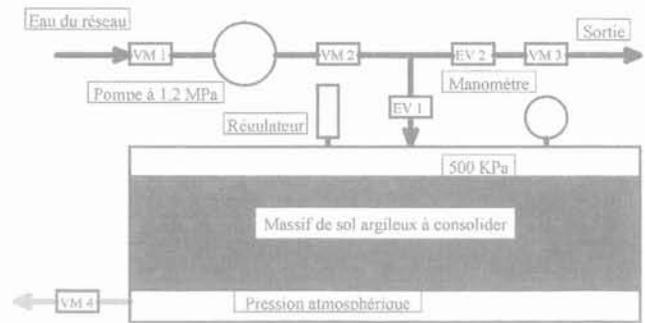


FIG. 1 Dispositif de consolidation par gradient hydraulique. Hydraulic gradient set up for clayey soil consolidation.

4. Le matériau argileux à consolider

Le sol de fondation, prélevé *in situ*, présente les caractéristiques suivantes :

- teneur en eau $w = 53 \%$
- limites d'Atterberg $LL = 47 \%$
 $LP = 27 \%$
 $IP = 20$
- coefficient de consolidation $C_v \approx 1.10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$

5. Préparation des modèles de massif de sol

Deux configurations ont été retenues pour préparer les cinq modèles de sol, soit avec :

- une couche drainante (essais 1 et 2) ou avec
- deux couches drainantes (essais 3, 4 et 5).

5.1. Configuration 1 (Fig. 2)

Le sol argileux prélevé sur le site a été mélangé et homogénéisé dans un malaxeur vertical à trois lames (capacité 200 l). Le sol malaxé a été mis en place dans la cellule de confinement en plusieurs couches. A la base du modèle, sous la première couche d'argile, un lit de sable a été mis en place pour garantir le drainage afin d'avoir une pression hydraulique proche de zéro pour l'établissement du gradient hydraulique. La surface du sol est recouverte de 2 cm d'eau à laquelle on applique une pression par incrément jusqu'à 500 kPa.

5.2. Configuration 2 (Fig. 3)

Pour accélérer le taux de consolidation de l'argile à partir du troisième essai en centrifugeuse, une mince couche drainante a été insérée à la profondeur H1 pour réduire le trajet d'écoulement. La consolidation a alors été réalisée en deux phases :

- *Phase 1* : La valeur de la pression hydraulique au niveau de la couche drainante intermédiaire a été mise à zéro en ouvrant la vanne correspondante. La couche H1 pouvait alors se consolider par le processus du gradient hydraulique sur une épaisseur de l'ordre de 20 cm alors que la couche H2 ne subissait que les effets de la pression en tête. Celle-ci a été appliquée par incrément

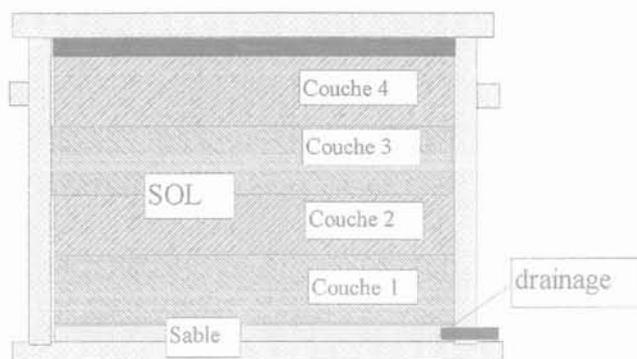


FIG. 2 Consolidation par gradient hydraulique des massifs de sol argileux pour les essais 1 et 2.
Hydraulic gradient consolidation of clayey soil masses for TEST1 and TEST2.

jusqu'à 500 kPa. La pression dans la mince couche drainante intermédiaire a été augmentée progressivement jusqu'à 250 kPa.

• Phase 2 : Après un temps t_1 , la vanne au niveau H1 est fermée ; l'épaisseur totale du modèle est alors soumise au processus du gradient.

Pour les deux configurations, la consolidation était achevée en appliquant une pression de 200 kPa au moyen d'un film étanche pour avoir une surcharge sans gradient hydraulique de façon à engendrer une cohésion près de la surface.

6. Résultats

Durant la consolidation (environ un mois pour chaque essai), le débit de l'eau et la pression interstitielle sur trois niveaux étaient mesurés et enregistrés.

Les profils de cohésion (Fig. 4) mesurés au scissomètre (type GEONOR) montrent clairement que la méthode la plus efficace pour atteindre le plus rapidement le profil du sol en place ramené à l'échelle de 1/100 (courbe site) pour les essais en centrifugeuse est

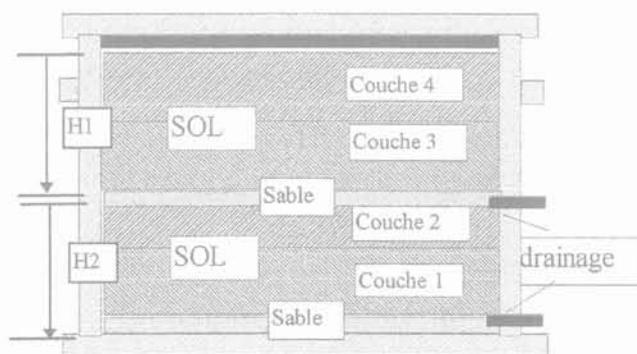


FIG. 3 Consolidation par gradient hydraulique des massifs de sol argileux pour les essais 3, 4 et 5.
Hydraulic gradient consolidation of clayey soil masses for TEST3, TEST4 and TEST5.

celle avec une couche drainante intermédiaire. Elle a été choisie suffisamment mince pour ne pas présenter un effet mécanique appréciable.

7. Conclusion

Pour réaliser des essais de mécanique des sols sur des modèles réduits en centrifugeuse à l'échelle de 1/100, il est possible, dans le cas des milieux cohérents et normalement consolidés, de préparer les modèles argileux (Fig. 5) par la méthode du gradient hydraulique. Cette méthode est plus efficace si l'on y rajoute une couche drainante intermédiaire. Les trois derniers essais avec les profils de sols proches (à l'échelle de similitude près) de celui du site ont permis d'étudier et d'optimiser les fondations sur l'argile du projet du pont.

Profil de cohésion de l'argile

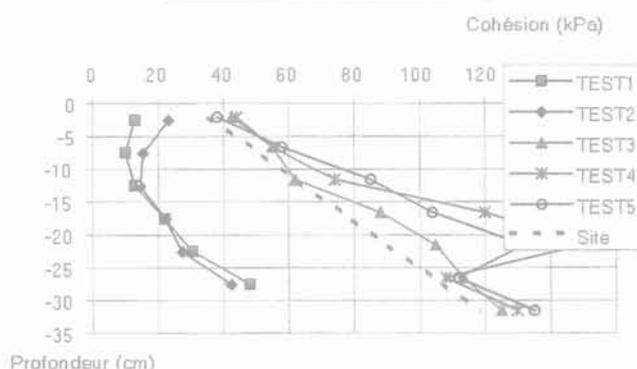


FIG. 4 Profils de cohésion obtenus par consolidation par gradient hydraulique.
Obtained cohesion profiles while using hydraulic gradient consolidation.



FIG. 5 Massif de sol argileux consolidé par gradient hydraulique.
Clayey soil mass consolidated by using hydraulic gradient.

Bibliographie

- Imai G., Yano K., Aoki S. – « Applicability of hydraulic consolidation test for very soft clayey soils ». *Soils and Foundations*, vol. 24, n° 2, 1984, p. 29-42.
- Luong M.P. – « Simulation des forces de masse ». *Annales ITBTP*, 442 (EM204), 1986, p. 111-122.
- Luong M.P. – « Simulation expérimentale des ouvrages géotechniques ». *Manuel de Rhéologie*, Presses des Ponts et Chaussées, 1987, p. 65-79.
- Mandel J. – « Essais sur modèles réduits en mécanique des terrains – Étude des conditions de similitude ». *Revue de l'Industrie minière*, vol. 44, n° 9, 1962, p. 1-10.
- Mikasa M. – « The consolidation of soft clay – A new consolidation theory and its application ». *Kajima Institution Publishing Co Ltd*, en japonais, 1963.
- Phillips E. – « De l'équilibre des solides élastiques semblables ». *Comptes rendus hebdo. Séances Académie des sciences*, tome 68, 1869, p. 75-79.
- Terzaghi K., Peck R.B. – *Mécanique des sols appliquée*. Dunod, 1965.
- Zelikson A. – « Représentation de la pesanteur par gradient hydraulique dans les modèles réduits en géotechnique ». *Annales ITBTP*, 239 (SF63), 1967, p. 1557-1579.