

MODELISATION DES PIEUX ISOLES CHARGES LATERALEMENT EN CENTRIFUGEUSE

Ali Bouafia ; Jacques Garnier Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes.

ABSTRACT

The paper presents lateral loading tests on single piles in sand carried out on the LCPC centrifuge. The two models tested and the devices and instrumentation are described.

From the measured bending moments, the P-Y curves are derived and the subgrade reaction modulus are compared with values from different methods (Menard, PHRI).

The effect of a slope on the behaviour of laterally loaded pile was studied and results related to head displacements and bending moments are presented.

I. INTRODUCTION

Le pieu, fondation profonde, a pour fonction de transmettre les charges de service provenant de la structure au sol avoisinant.

Outre le chargement axial dû au poids et aux charges permanentes de l'ouvrage, il arrive qu'un chargement latéral sollicite le pieu. Le sol réagit pour l'équilibrer, en mobilisant une réaction latérale.

La nature du chargement latéral provenant de la structure est variée. Le chargement peut être statique, comme l'effet de la poussée de terres sur une culée de pont. Il peut être cyclique, comme l'effet de la houle sur les plateformes *off shore*.

Enfin, le chargement peut être sous forme d'un choc, comme l'accostage des navires sur un quai ou un duc d'albe.

Il arrive que le chargement latéral provienne du sol lui même en cas de séisme par exemple, ou lors du déplacement latéral d'une couche d'argile compressible.

Il s'agit donc d'un problème d'interaction sol-fondation.

Différentes voies de recherches sur ce problème peuvent être envisagées : - L'approche théorique, où la difficulté réside dans la modélisation du comportement du système sol-fondation.

Devant la complexité du problème liée à la multitude des facteurs entrant en jeu d'une part, et la rhéologie mal connue des sols d'autre part, les méthodes actuelles de dimensionnement des fondations profondes sous chargement latéral, se basent sur des hypothèses simplificatrices qui ne représentent pas le comportement réel de la fondation ;

- L'expérimentation sur des ouvrages en vraie grandeur. Elle est limitée par les coûts, les délais et la quasi impossibilité d'effectuer des études paramétriques.

- L'étude sur des modèles réduits. Les forces de masse sont prépondérantes en mécanique des sols. Or, la réduction des dimensions de l'ouvrage ne doit pas modifier son comportement. Il est donc nécessaire d'augmenter les forces de masse du modèle.

La technique actuellement utilisée consiste à centrifuger le modèle.

Aprés un bref rappel des conditions de similitude, l'article décrit les modèles utilisés, leur instrumentation, et leur étalonnage, puis il présente les principaux résultats d'essais réalisés sur deux pieux, l'un long et souple, l'autre court et rigide.

2. CONDITIONS DE SIMILTUDE

Les conditions de similitude d'un phénomène sont des relations entre les différentes échelles des paramètres, qui sont déduites de la conservation des équations régissant le phénomène en prototype et en modèle.

Dans le problème du chargement latéral des pieux, les conditions usuelles de similitude sont rappelées dans le tableau I, pour un modèle réduit à l'échelle géométrique 1/N.

GRANDEUR PHYSIQUE	ECHELLE	
contrainte	1	
déformation	1	
rotation	1	
déplacement	1/N	
dimension	1/N	
force	1/N ²	
moment fléchissant	1/N ³	
rigidité E _p I _p	1/N ⁴	

tableau I : conditions de similitude

3. DESCRIPTION DES MODELES ET DISPOSITIFS EXPERI-**MENTAUX**

Les essais de chargement des modèles ont été réalisés sur la centrifugeuse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Les performances de cette machine sont décrites dans la communication de J. Garnier, à ces journées.

Les modèles de pieux sont constitués de deux tubes en aluminium instrumentés chacun par 12 paires de jauges de déformation, placées en demi pont, collées à l'extérieur et protégées contre l'humidité et le frottement direct du sable (cf fig 1).

Le tableau II regroupe les principales caractéristiques des deux modèles.

PIEU	MODELE		PROTOTYPE	
	P1	P2	P1	P2
échelle de réduction	1/18	1/20		
fiche (m)	0,280	0,250	5,00	5,00
diamètre (mm)	28,00	45,00	500,00	900,00
rigidité (N.m ²)	558	4631	56,5 . 10 ⁶	740 . 10 ⁶
cote de l'effort (m)	0,056	0,050	1	1

tableau II : caractéristiques des modèles de pieux

Les jauges de déformation ont été calibrées, en sollicitant les deux modèles, suivant le schéma d'une console chargée à son extrémité, par des poids connus.

Une bonne coïncidence entre les réponses théorique et mesurée des jauges a été constatée (l'écart est de 4 % au plus).

Divers modes d'installation des modèles dans le sable ont été réalisés, notamment le fonçage, le battage, le forage en sable humide, et la pluviation du sable autour du pieu.



fig. 1 : modèles de pieux P1, P2

170

Les jauges de déformation permettent d'obtenir la courbe des moments fléchissants, le long du pieu. La tête du pieu est en contact avec deux capteurs de déplacement résistifs type MCB, ou inductifs type HBM, de 20 mm de course, qui permettent de mesurer les déplacements et la rotation en tête.

L'effort sur le pieu est exercé par le dispositif de chargement des fondations développé au LCPC. L'effort latéral est fourni par un câble métallique souple passant par une poulie, et mis en tension par le déplacement d'une masse mobile, sur une poutre de chargement. Cette dernière peut pivoter autour d'un axe horizontal (cf figure 2).

Les modèles sont embarqués sur la centrifugeuse, et soumis à une accélération centrifuge NG, qui permet le respect des conditions de similitude (le niveau d'accélération NG est l'inverse de l'échelle de réduction, soit l/N). Le chargement latéral est alors exercé, par déplacement convenable de la masse mobile, commandé depuis le poste de pilotage de la centrifugeuse.

4. MASSIF DE SABLE

Le sol est constitué du sable quartzeux sec rougeâtre, propre et mal gradué, provenant du site du RHEU.

Les poids volumiques secs maximum et minimum, déterminés selon le mode opératoire ASTM, sont de 16.8 et 13.4 KN/m3 respectivement.

La construction du massif de sable à une densité donnée, se fait par pluviation dans l'air, à l'aide d'une trémie mobile. En effet, la densité d'un massif de sable dépend de la hauteur de chute, du débit, ainsi que de la vitesse de balayage.

Au préalable, un étalonnage de la densité du sable, en fonction de ces paramètres a été fait pour le sable.





171

Des essais de pénétration statique à l'aide de pénétromètres miniatures (pointes de 6 et 12 mm), embarqués en centrifugeuse, ont été réalisés dans les différents conteneurs de sable .Les profils de résistance en pointe ainsi obtenus, permettent de caractériser le massif (cf figure 3).

Le conteneur de sable est consolidé, avant les essais, par des cycles de montée et descente en accélération

Le programme de chargement du pieu P1 consiste en une série d'incréments d'efforts statiques de 50 KN, jusqu'à 200 KN (en grandeur prototype), suivie d'un déchargement avec le même incrément. Pour le pieu P2, l'incrément est de 60 KN, jusqu'à 480 KN. La durée de chaque incrément est de 3 mn.

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1. Massif de sol horizontal

Pour un effort latéral donné, les moments fléchissants, les déplacements et rotation en tête sont mesurés.

L'un des objectifs des essais, est la détermination des courbes de réaction P-Y liant, à une profondeur donnée, la réaction du sol et le déplacement du pieu.Ces courbes sont trés utilisées dans les méthodes de dimensionnement au module de réaction.



fig. 3 : profils de résistance en pointe

Les courbes P-Y sont obtenues en effectuant un lissage convenable de la courbe des moments, par des splines quintiques ou des polynômes, afin de pouvoir effectuer d'une part la double dérivation qui permet d'obtenir la pression latérale du sol,telle que :

$$P = \frac{1}{B} \frac{d^2 M(Z)}{dZ^2}$$

et d'autre part, la double intégration, qui permet d'obtenir les déplacements latéraux, tels que:

$$EY = \frac{1}{E_p I_p} \iint (M \cdot dZ) dZ + Yo' \cdot Z + Yo$$

Yo', Yo sont la rotation et le déplacement mesurés en surface

La figure 4, nous montre un exemple de courbes P-Y obtenues, pour le modèle de pieu P1 rugueux foncé dans le sable sec et dense ($\gamma d=16.4 \text{ KN/m}^3$, I_d=91 %).



La méthode de construction des courbes P-Y, a été validée en réintroduisant ces courbes dans un calcul permettant de déterminer la courbe de moments et les déplacements du pieu. Le logiciel PILATE, basé sur une méthode de module de réaction, élaborée par le LCPC, a été utilisé pour ce calcul.



Les figures 5 et 6 nous montrent la bonne concordance entre les déplacements et moments, calculés et mesurés.

fig. 5 : comparaison des déplacements mesurés et calculés

Le module tangent initial déduit de la courbe P-Y a été comparé aux recommandations de littérature, notamment à la théorie pressiométrique de Ménard, et la méthode de l'institut japonais des recherches portuaires PHRI. Le module de Ménard a été déduit des corrélations classiques entre le pénétromètre et le pressiomètre, soient :

$$Q_{c}/P_{1} = 7$$
 et $Em/qc = 1.5$

Dans la méthode du PHRI, la courbe P-Y est décrite par l'expression suivante :

$$P = K_s \cdot Z \cdot Y^{1/2}$$

 K_s étant présenté sous forme d'abaque en fonction du diamètre du pieu. Cet abaque a été proposé par Terashi et al (1989), suite à des essais sur le sable sec de Toyoura, réalisés sur la centrifugeuse de Yokosuka (Japon).

Un exemple de comparaison des modules expérimentaux et des modules recommandés par les deux méthodes est illustré sur la figure 7.

Les modules tangents déterminés expérimentalement sont très proches des valeurs préconisées tant par la méthode pressiométrique que par celle du PHRI.



fig 7: comparaison des modules mesurés et calculés de réaction

5.2. Effet de la proximité d'un talus

Les modèles de pieux P1 et P2 ont servi par la suite, à étudier l'effet de la proximité d'une pente sur le comportement d'un pieu chargé latéralement. Des essais ont été réalisés sur ces modèles implantés prés d'un talus de sable dense ($\gamma d = 16.6 \text{ KN/m}^3$), de 3 m de hauteur, et dressé à 2/1.

La distance du pieu à la tête du talus a varié de 0 à 20 diamètres. Pour une distance donnée, les déplacements et la rotation sont mesurés. Les pieux instrumentés par des jauges ont été installés dans la tête du talus, afin de pouvoir mesurer les moments.

La figure 8 regroupe l'ensemble des déplacements mesurés sur le pieu P2 à différentes distances du talus.

L'effet du talus se manifeste pour des distances inférieures à 6 diamètres environ.

Les moments fléchissants sont peu influencés par la proximité du talus. En effet, comme le montre la figure 9, le rapport des moments pour un pieu en tête du talus (t = 0), à celui d'un pieu dans un massif horizontal (t = ∞), varie peu et reste voisin de 1. Au niveau du point de moment maximal, ce rapport reste inférieur à 1,17.



fig 8 : courbes de déplacement de P2

6. CONCLUSIONS

Les essais sur des modèles réduits de deux pieux ont permis d'exploiter les moments et les déplacements mesurés, pour construire les courbes P-Y. La méthode de construction de ces courbes a été validée par un calcul numérique à rebours.

Les valeurs du module de réaction déduites de ces courbes, sont en bonne concordance avec les recommandations de la théorie pressiométrique et de la méthode de PHRI.

Les essais sur des modèles prés d'un talus ont permis d'examiner l'effet de la proximité du talus sur le déplacements, et les moments.



fig 9 : effet du talus sur les moments

Ces essais ont montré que l'effet du talus dépend de la rigidité du pieu. Pour un pieu rigide, à proximité d'un talus de 3 m dressé à 2/1, la distance limite au-delà de laquelle le talus n'a plus d'effet est d'environ 6 diamètres. Pour un pieu en crête de talus, les déplacements en tête sont presque doublés, mais le moment maximum n'est augmenté que d'environ 17 %

REFERENCES

A.Bouafia(1990) "modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse" thèse université de Nantes (décembre 1990).

SESSION II

J.Garnier(1988) "la centrifugeuse du LCPC:moyens de préparation des modèles et instrumentation" congrés int. centrifuge 88, Paris, avril 1988, pages 83-93

M.Cassan(1978) "corrélations entre essais in-situ" Les essais in-situ en mécanique des sols.tome I, Eyrolles éditeur

M.Terashi et al(1989) "Centrifuge modelling of a laterally loaded piles" 12ème ICSMFE, Rio de Janeiro, Août 1989 vol 2.