

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.

Méthode de construction des courbes $\bar{p}-y$ pour l'analyse des barrettes chargées latéralement

An approach to the construction of $\bar{p}-y$ curves for laterally loaded piers analysis

N. Rădulescu – Technical University of Civil Engineering, Bucharest, Romania

RESUME: Les barrettes représentent des éléments de fondation profonde très efficaces pour des forces latérales importantes. L'objet de cet article est de présenter une méthode modifiée pour la construction des courbes de réaction ($\bar{p}-y$) en tenant compte de l'effet de la forme rectangulaire de la section transversale sur le comportement des barrettes chargées latéralement en sable homogène. Le principe de la méthode proposée consiste en l'obtention de la courbe de réaction globale ($\bar{p}-y$) la composition entre la courbe de réaction latérale ($\bar{p}_{lat}-y$) et la courbe de réaction frontale ($\bar{p}_{fr}-y$).

ABSTRACT: The bored piers represent a very efficient deep foundation elements for carrying large lateral loads. The purpose of this paper is to present a modified approach to the construction of $\bar{p}-y$ curves taking into account the effect of the rectangular shape of the cross section on the behaviour of bored piers subjected to lateral loading in homogeneous sand. The principle of the proposed approach consists in the composition between the lateral reaction curve ($\bar{p}_{lat}-y$) and the frontal reaction curve ($\bar{p}_{fr}-y$).

INTRODUCTION

Les barrettes sont réalisées à l'aide des équipements et des technologies spécifiques aux parois moulées et par conséquent la section transversale résulte d'une forme allongée.

Les barrettes sont utilisées, tout comme les pieux, pour réaliser des fondations profondes.

La forme allongée de la section transversale ainsi que le choix convenable de la position des barrettes dans le plan de la fondation, en corrélation avec la direction d'application de la force latérale extérieure, permettent la réalisation des fondations d'une très grande capacité portante.

L'optimisation du projet d'une fondation sur barrettes, c'est à dire la minimisation du nombre des barrettes utilisées, demande une bonne connaissance, d'un part, du comportement de l'élément isolé et, d'autre part, du comportement des éléments en groupe.

L'article présente les aspects concernant le comportement et le calcul de la barrette isolée chargée latéralement.

Les essais «in situ» restent, pour le moment, la meilleure méthode d'obtenir la relation entre la force latérale appliquée et le déplacement correspondant mais, le coût élevé de ces essais fait que, jusqu'à présent, leur nombre reste relativement réduit.

Les résultats expérimentaux existants donnent, quand même, la possibilité d'obtenir quelques conclusions générales en ce qui concerne l'effet de la forme de la section transversale sur le comportement des barrettes chargées latéralement.

Les résultats expérimentaux analysés correspondent à un nombre de 30 essais sur 16 sites, dont 10 essais sur barrettes et 20 essais sur pieux forés.

Les caractéristiques géométriques des barrettes sont présentées dans le tableau 1.

Les 20 pieux forés analysés ont eu des diamètres, B, variant entre 0,60 et 1,00 m et des longueurs de 10 à 20 mètres.

Les 16 sites envisagés ont été caractérisés par une grande diversité des sols et par une gamme variée des valeurs des caractéristiques géotechniques.

Afin d'interpréter les résultats expérimentaux on a pris en compte l'aspect concernant la loi de variation du déplacement latéral au niveau zéro du terrain en fonction de l'intensité de la force appliquée.

Tableau 1. Les caractéristiques géométriques des barrettes

| | Barrette no. | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|----|--|
| | I | | II | | III | | IV | | V | | VI | |
| | Essai no. | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| L | 0,8 | 2,6 | 0,8 | 2,0 | 0,8 | 3,8 | 0,8 | 2,3 | 0,8 | 2,8 | | |
| B | 2,6 | 0,8 | 2,0 | 0,8 | 3,8 | 0,8 | 2,3 | 0,8 | 2,8 | 0,8 | | |
| ℓ | 8 | 8 | 20 | 13 | 16 | 16 | 16 | 16 | 20 | 20 | | |
| n | 0,3 | 3,25 | 0,4 | 2,5 | 0,21 | 4,75 | 0,35 | 2,85 | 0,29 | 3,45 | | |

Légende: L(m) - le côté de la section transversale parallèle à la direction de l'application de la force latérale;
 B (m)- le côté normal sur la direction de la force
 ℓ (m) - le longueur de la barrette.
 $n = L/B$

Les diagrammes de chargement-déplacement latéral obtenus «in situ» ont été comparés avec les diagrammes obtenus par le calcul automatique en utilisant la méthode des courbes de réaction ($\bar{p}-y$).

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats calculés a mis en évidence les aspects suivants:

1. En ce qui concerne les 20 pieux analysés les diagrammes expérimentaux sont comparables, en générale, avec ceux calculés.

2. En ce qui concerne les 10 essais sur barrettes:

- pour les essais dont la valeur du rapport des côtés, n, est surunitaire (les cas I.2, III.4, IV.6, V.8 et VI.10) les valeurs calculées des déplacements latéraux sont plus élevées que les valeurs mesurées pour la même force appliquée. Pour le déplacement latéral de 25 mm mesuré au niveau zéro (selon les codes roumains pour les pieux le déplacement de 25 mm représente un maximum acceptable) les forces calculées ont été moins grandes que les forces mesurées, les différences croissant avec l'augmentation du rapport n;
- pour les essais dont la valeur du rapport des côtés, n, est sousunitaire (les cas I.1, II.3, IV.5, V.7 et VI.9) les forces calculées correspondant au déplacement latéral de 25 mm ont été plus grandes que les forces mesurées, les différences croissant avec la diminution du rapport n.

Les résultats obtenus par cet étude comparative démontrent l'influence de l'effet de forme sur le comportement des barrettes chargées latéralement.

LA CONSTRUCTION DES COURBES $\bar{p} - y$ POUR SABLE

Reese (1989) recommande la méthodologie de construction des courbes $\bar{p} - y$ pour les pieux circulaires installés dans le sable.

Pour une profondeur donnée, z , la relation entre la réaction globale, $\bar{p}(F/L)$, et le déplacement latéral, $y(L)$, est définie par les suivants points caractéristiques (Fig. 1):

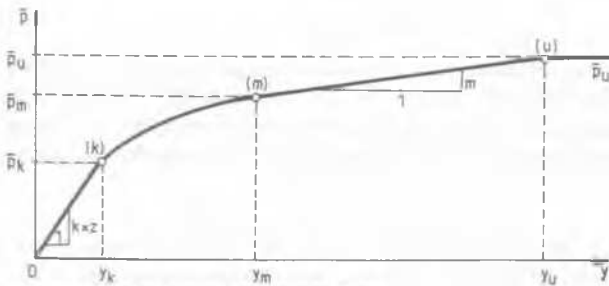


Figure 1. Courbe de réaction globale, $\bar{p} - y$.

Le point (u):

$$\bar{p}_u = A_s \cdot \bar{p}_{cr} \quad (1)$$

où: A_s - coefficient adimensionnel de correction, déterminé en fonction de la profondeur réduite, z/B ;

$$\bar{p}_{cr} = p_{cr} \cdot B \quad (2)$$

où $p_{cr}(F/L^2)$ - la pression critique de surface (pour $z \leq z_{cr}$) ou de profondeur (pour $z > z_{cr}$) qui peut être obtenue en utilisant les diagrammes présentés dans la figure 2, en fonction de l'angle de frottement, Φ , et de la profondeur réduite, $\alpha = z/B$. La pression, p_{cr} , peut être exprimée par la relation:

$$p_{cr} = \beta \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot B \quad (3)$$

$$\bullet \quad y_u = 3B/80 \quad (4)$$

Le point (m):

$$\bullet \quad \bar{p}_m = B_s \cdot \bar{p}_{cr} \quad (5)$$

où: B_s - coefficient adimensionnel de correction, déterminé en fonction de z/B

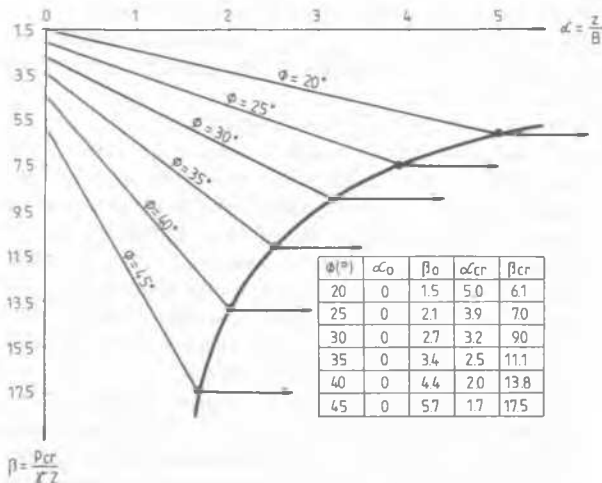


Figure 2. Diagrammes de pression critique, $p_{cr} - \alpha$.

$$\bullet \quad y_m = B/60 \quad (6)$$

Le point (k):

$$\bullet \quad \bar{p}_k = k \cdot z \cdot y_k \quad (7)$$

où: $k(F/L^3)$ - gradient du module horizontal du sol, E_s

$$\bullet \quad y_k = \left(\frac{\bar{c}}{k \cdot z} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (8)$$

$$\text{où: } \bar{c} = \frac{\bar{p}_m}{y_m^{1/n}} \quad (9)$$

$$\text{où: } \bar{n} = \frac{\bar{p}_m}{m \cdot y_m} \quad (10)$$

$$\text{où: } m = \frac{\bar{p}_u - \bar{p}_m}{y_u - y_m} \quad (11)$$

Afin de tenir compte de l'effet de forme des barrettes on propose une méthode de construction des courbes ($\bar{p} - y$) basée en principe sur la méthodologie présentée, mais qui considère que la réaction globale, \bar{p} , est composée par la réaction latérale, \bar{p}_{lat} , et par la réaction frontale (avant et arrière), \bar{p}_{fr} .

Les résultats obtenus sur un modèle bidimensionnel, en utilisant la méthode des éléments finis (Baquelin, Carayannacou-Trézou et Frank, 1979), mettent en évidence, d'une part, l'effet de forme sur le module horizontal global du sol, E_s , et, d'autre part, la répartition du module global, E_s , entre le module latéral, $E_{s,lat}$, et le module frontal, $E_{s,fr}$, en fonction du rapport, n . En partant de ces résultats on a obtenu les diagrammes r , r^* et \bar{r} en fonction du rapport des côtés, n (Fig. 3).

Les coefficients r , r^* , \bar{r} sont définis par les relations suivantes:

$$r = E_s / E_{s0} \quad (12)$$

où: $E_s(F/L^2)$ - module horizontal global correspondant à une barrette caractérisée par le côté frontal, B , et le rapport des côtés, n ;

$E_{s0}(F/L^2)$ - module horizontal global correspondant à un pieu ayant la section circulaire de diamètre, B .

Les valeurs r sont valables pour le cas des éléments rigides, caractérisés par une rigidité relative, $\ell/\ell_0 \leq 3$, où ℓ_0 représente la longueur de transfert.

$$r^* = E_s^* / E_{s0}^* \quad (13)$$

où: E_s^* , E_{s0}^* sont définis analogiquement aux définitions données à la relation (12).

Les valeurs r^* sont valables pour le cas des éléments très souples, ayant le rapport $\ell/\ell_0 \geq 10$.

$$\bar{r} = E_{s,lat} / E_s = E_{s,lat}^* / E_s^* \quad (14)$$

où: $E_{s,lat}$, $E_{s,lat}^*$ représentent le module horizontal latéral pour un rapport donné, n .

Les diagrammes des coefficients r , r^* , \bar{r} mettent en évidence quelques aspects très importants. Les valeurs r et r^* sont égales à l'unité pour $n=0,5$, ce qui signifie que pour ce rapport il n'y a pas d'effet de forme. D'autre part, pour le rapport $n = 2,1$, la valeur \bar{r} est de 0,5, c'est à dire $E_{s,lat} = E_{s,fr} = 1/2 E_s$, ce qui représente aussi le cas des pieux circulaires.

Dans les relations (12), (13) et (14) on a considéré le cas du module du sol constant pour n'importe quelle profondeur. Tant les études théoriques que celles expérimentales montrent que le module horizontal augmente avec la profondeur dans un sol homogène. Si on considère une variation linéaire du module, E_s , en fonction du gradient, k , les coefficients r , r^* et \bar{r} deviennent:

$$r = k / k_0 \quad (12')$$

$$\bar{r}^* = k^* / k_0^* \quad (13')$$

$$\bar{r} = k_{lat} / k = k_{lat}^* / k^* \quad (14')$$

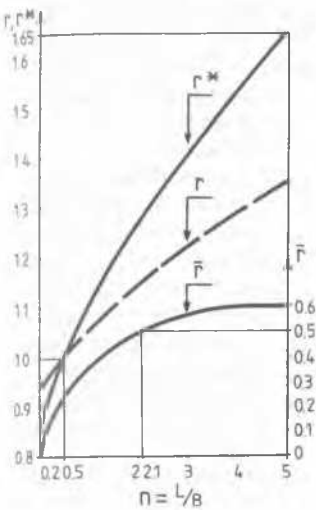


Figure 3. Diagrammes des coefficients r , r^* , \bar{r} .

unitaire de frottement mobilisée au long des deux côtés parallèles à la direction de la force latérale.

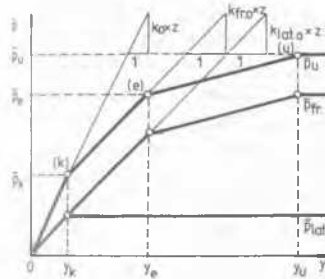


Figure 4. Courbes $\bar{p} - y$, $\bar{p}_{lat} - y$, $\bar{p} - y$, pour un pieu.

En remplaçant les rel. (16'), (18) et (19) dans la rel. (15) on obtient:

$$\frac{y_k}{B} = \frac{n C_{\Phi}}{\bar{r} C_k} \quad (20)$$

où: $\bar{r} k = k_{lat}$

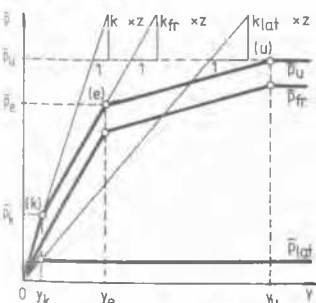


Figure 5. Courbes $\bar{p} - y$, $\bar{p}_{lat} - y$, $\bar{p} - y$, pour une barrette.

Le point (e):

$$\bar{p}_e = k_{fr} \cdot z \cdot y_e + \bar{p}_{lat} \quad (21)$$

$$\bar{p}_e = \bar{p}_k + k_{fr} \cdot z (y_e - y_k) \quad (22)$$

La courbe de réaction globale ($\bar{p} - y$) obtenue en composant la courbe de réaction latérale ($\bar{p}_{lat} - y$) et la courbe de réaction frontale ($\bar{p}_{fr} - y$) est représentée dans la figure 4 pour un pieu circulaire et dans la figure 5 pour une barrette ayant, par exemple, la valeur du rapport n entre 0,5 et 2,1. Pour une profondeur donnée, z , la courbe ($\bar{p} - y$) est définie par les points suivants:

Le point (k):

$$\bar{p}_k = k \cdot z \cdot y_k \quad (7)$$

$$y_k = \frac{\bar{p}_{lat}}{k_{lat} \cdot z} \quad (15)$$

$$\text{où: } \bar{p}_{lat} = 2L \cdot f \quad (16)$$

$$\text{où: } f(F/L^2) - \text{force}$$

$$f = \gamma z K_0 \operatorname{tg} \Phi \quad (17)$$

$$\text{où: } \gamma (F/L^3) - \text{poids volumique du sable;}$$

$K_0 (-)$ - coefficient en état de repos;

$\operatorname{tg} \Phi (-)$ - coefficient de frottement.

En remplaçant la rel (17) dans la rel (16) on obtient:

$$\bar{p}_{lat} = 2nB\gamma z K_0 \operatorname{tg} \Phi \quad (16')$$

$$\text{où: } nB = L$$

On note: $C_{\Phi} = 2K_0 \operatorname{tg} \Phi \quad (18)$

$$C_k = k/\gamma \quad (19)$$

La relation (20) exprime la condition du déplacement nécessaire pour la mobilisation intégrale de la force de frottement sur les deux côtés latéraux de la barrette. Pour des déplacements, y , plus grands que le déplacement limite, y_k , la valeur \bar{p}_{lat} n'augmente plus.

L'identité entre les rel. (21) et (22) donne:

$$\frac{y_e}{y_k} = \frac{\bar{p}_e - \bar{p}_{lat}}{\bar{p}_k - \bar{p}_{lat}} \quad (23)$$

$$\text{On note: } \omega_e = \frac{\bar{p}_e - \bar{p}_{lat}}{\bar{p}_k - \bar{p}_{lat}} \quad (24)$$

$$\bullet \quad y_e = \omega_e \cdot y_k \quad (25)$$

Le point (u):

$$\bullet \quad \bar{p}_u = \bar{p}_{fr} + \bar{p}_{lat} \quad (26)$$

$$\bullet \quad y_u = \lambda \cdot y_e \quad (27)$$

LA DETERMINATION DES VALEURS C_{k0}

Les valeurs C_{k0} (voir la rel. (19)) correspondent au cas du pieu circulaire.

En utilisant les rel. (1), (2), (3), (5), (19), (25) et (27), la rel. (8) devient:

$$y_k = \frac{E^A}{G^C} \quad (8')$$

$$\text{où: } E = \frac{B_s \beta B}{C_k} \quad (28)$$

$$G = \omega_e y_k \quad (29)$$

$$A = \frac{(\lambda - 1) B_s}{\lambda B_s - A_s} \quad (30)$$

$$C = A - 1 \quad (30')$$

En imposant la condition d'égalité entre les rel. (8') et (20) on obtient:

$$\omega_e = \frac{(B_s \beta - n C_{\Phi}) \bar{r}}{n C_{\Phi} (1 - \bar{r})} \quad (31)$$

$$\lambda = \frac{(A_s - B_s) \log \omega_e}{B_s \log \frac{\bar{r} B_s \beta}{n C_{\Phi}}} + 1 \quad (32)$$

Pour obtenir la relation qui permet de calculer les valeurs C_{k0} on a mis la condition d'identité entre le déplacement, y_m , exprimé par la rel. (6) et le déplacement, y_e , donné par la rel. (25) en utilisant l'expression de ω_e donné par la rel. (31).

On a tenu compte, d'une part, que pour le pieu circulaire la valeur \bar{r} est 0,5 et, d'autre part, que dans le cas des sections allongées, la valeur \bar{r} de 0,5 correspond à un rapport n de 2,1.

En conséquence, on a obtenu la relation suivante:

$$C_{k0} = 120 (B_s \beta - 2,1 C_{\Phi}) \quad (33)$$

Les valeurs C_{k0} calculées par la rel. (33) sont données dans le tableau 2.

Tableau 2. :Les valeurs C_{k0} pour pieux circulaires.

| Φ (°) | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
|--------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| C_{k0} (-) | 245 | 330 | 550 | 1000 | 1585 | 2345 |

Les valeurs C_{k0} permettent d'obtenir les valeurs du gradient du module, k_0 , en fonction de l'angle de frottement, Φ , et du poids volumique, γ , du sable.

LA DETERMINATION DES VALEURS C_k

Les diagrammes des valeurs C_k obtenus en partant des valeurs C_{k0} et en tenant compte (par l'intermédiaire des coefficients r, r^*) de l'effet de forme et de l'effet de la rigidité relative sont

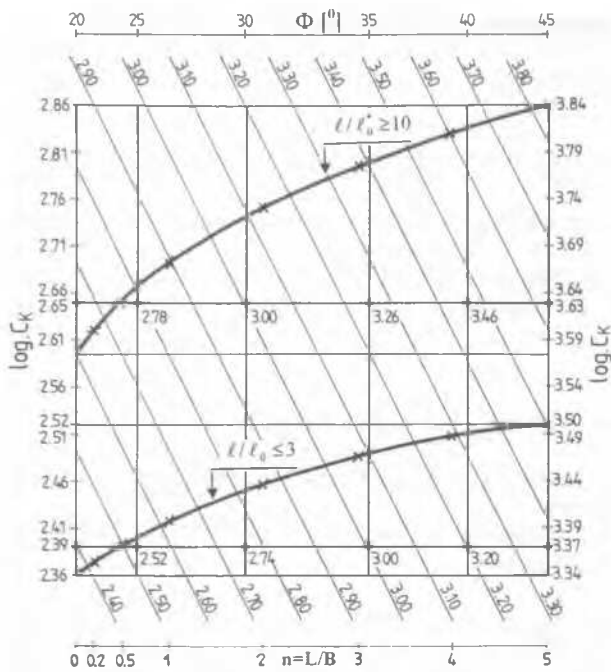


Figure 6. Diagrammes des valeurs $\log C_k$ en fonction de n , Φ , l/l_0 .

représentées dans la figure 6. On retrouve, inscrites sur la ligne horizontale inférieure, les valeurs C_{k0} données dans le tableau 2, exprimées en échelle logarithmique. Ces valeurs correspondent aussi aux barrettes ayant le rapport $n = 0,5$, car pour ce cas, la valeur du coefficient de forme, r , est 1.

Les diagrammes permettent, par des interpolations, de déterminer la valeur C_k pour toute valeur du rapport, n , compris entre 0,2 et 5, de l'angle de frottement, Φ , compris entre 20° et 45° et de la rigidité relative, l/l_0 . La longueur de transfert, l_0 , dépend de la valeur du module du sol, E_s , considéré constant pour n'importe quelle profondeur. En admettant que le module du sol est, en effet, variable avec la profondeur, on calcule la valeur moyenne du module, $E_{s,med}$, correspondant à la profondeur réduite critique, α_{cr} .

$$E_{s,med} = C_k \gamma \alpha_{cr} B \quad (34)$$

Parce que, d'une part, la valeur de C_k dépend de la valeur l/l_0 et, d'autre part, la valeur de l_0 est en fonction de $E_{s,med}$, dépendant lui-même de C_k , on détermine la valeur de C_k par un processus itératif. Initialement on calcule les valeurs extrêmes, C_k et C_k^* , pour les rigidités relatives limites considérées, $l/l_0 = 3$ et $l/l_0 = 10$. En utilisant la rel. (34) on obtient les valeurs $E_{s,med}$, $E_{s,med}^*$ et puis les valeurs l_0 , l_0^* . Pour une longueur, l , donnée on obtient la rigidité relative minimale, l/l_0 . Si ce rapport résulte plus grand que 3, on détermine une nouvelle valeur C_k par interpolation entre les valeurs limites considérées et la valeur obtenue. Après deux-trois itérations on arrive à la convergence des valeurs l/l_0 , ce qui permet de trouver la valeur C_k et finalement la valeur du module, k , propre au cas considéré.

LES COURBES DE REACTION MODIFIEES

Pour une profondeur, z , donnée, la courbe de réaction modifiée, $\bar{p} - y$, est définie par les points caractéristiques (k), (e) et (u).

Les pressions réactives \bar{p}_k , \bar{p}_e et \bar{p}_u sont données par les rel. (7), (21) et (1). Les déplacements correspondants s'obtiennent à l'aide des rel. (20), (25) et (27). La valeur du rapport y_e/y_k et

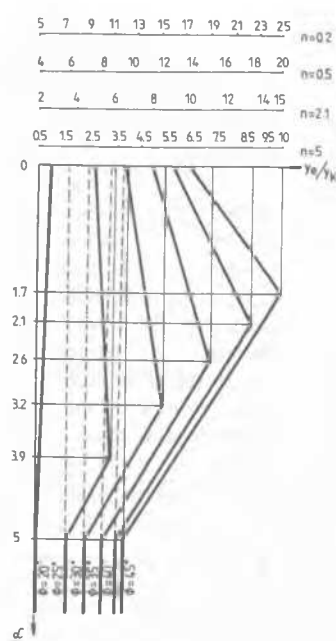


Figure 7. Diagrammes des valeurs y_e/y_k en fonction de n , Φ , α .

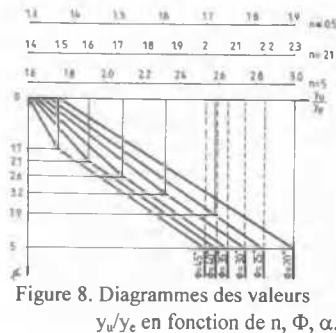


Figure 8. Diagrammes des valeurs y_e/y_k en fonction de n , Φ , α .

donc la valeur y_e peut être obtenue aussi en utilisant les diagrammes présentés dans la figure 7. Le déplacement limite, y_u , exprimé en fonction de la valeur y_e , s'obtient graphique par les diagrammes donnés dans la figure 8.

La famille des courbes de réaction qui caractérise le comportement du sol en interaction avec l'élément structural chargé latéralement s'obtient en considérant différentes valeurs pour la profondeur, z , entre le niveau zéro du sol et la longueur, l , de l'élément.

CONCLUSIONS

La méthode présentée permet:

1. La détermination de la valeur du gradient du module du sol, k , en tenant compte de l'influence de la forme de la section transversale (circulaire, carrée ou allongée) et de la rigidité relative de l'élément en interaction avec le sol. Pour un sable en état sec les limites des valeurs, k , obtenues sont: $\bullet 3400 \text{ kN/m}^3$, valeur qui correspond à un sable très lâche ayant le poids volumique, γ , de 15 kN/m^3 et l'angle de frottement, Φ , de 20° et à une barrette caractérisée par le rapport, n , de 0,2 et la rigidité relative, l/l_0 , de 3; $\bullet 124500 \text{ kN/m}^3$ pour un sable très serré ($\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ et $\Phi = 45^\circ$) et pour une barrette ayant $n = 5$ et $l/l_0 = 10$. Les valeurs, k , utilisées d'habitude pour les pieux circulaires varient entre 6800 et 61000 kN/m^3 , en fonction du degré de serrage du sable en état sec.
2. La prise en compte de l'effet de groupe.

A cause de l'interaction entre deux éléments voisins, le sol se trouvant entre eux met en évidence une tendance d'amollissement qui conduit à la nécessité de la modification de la courbe de réaction globale pour l'élément qui se trouve en arrière. Cette modification est due, pratiquement en totalité, à la réduction de la pression frontale. En connaissant la courbe de la réaction frontale, on peut intervenir sur cette courbe par l'application des coefficients de réduction déterminés en fonction de la distance entre les éléments et de leur position par rapport à la direction de l'application de la force latérale. En composant la courbe de réaction frontale résultante avec la courbe de réaction latérale on obtient la courbe de réaction globale modifiée à cause de l'effet de groupe.

REFERENCES

- Baguelin, F., S. Carayannacou-Trézous & R. Frank 1979. Réaction latérale des pieux: effets de forme et effets tridimensionnels. *Bull. Liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées* 104:33-47.
- Reese, L. 1989. Analysis of piles subjected to lateral loading. *Lectures Notes*. University of Texas, Austin.