

WIESŁAW ODROBIŃSKI*

Analyse de la formation du mécanisme de rupture et la butée en espace

1. Introduction

Le problème de butée en espace, l'influence des zones latérales dans le cas des charges horizontales joue un rôle décisif dans l'analyse de la capacité portante et du déplacement des différents types des constructions des fondations. Dans l'article on tâche de montrer des quelques aspects liés avec la détermination des valeurs de la butée et les conditions qui causent l'origine des zones des déplacements du sol en forme du cône retourné, connu de l'expérience. L'examen de ces phénomènes fait mieux comprendre le procès d'évolution de l'état des contraintes dans le massif du sol, permet d'évaluer la validité et l'exactitude des solutions et de tirer quelques conclusions pratiques.

2. Influence des zones latérales sur la valeur de butée en espace

On montre sur la figure 1 quelques exemples des fondations pour lesquelles l'influence de la butée tridimensionnelle est très importante. On peut ici énumérer les plaques et les blocs d'ancrage, les fondations des poteaux, les pieux isolés et en groupe et des fondations à longueur limitée sollicitées par des forces horizontales - comme les cullées des ponts et certaines sortes des constructions de soutènement. L'augmentation de la butée causée par des zones latérales accroît avec la profondeur et peut être quelque fois plus grande que dans l'état plan (Table I).

On montre sur la figure 2 les différentes formes des zones de butée adaptées dans les solutions qui concernent l'influence des zones latérales du sol dans le cas du chargement

*W. ODROBIŃSKI, University Technique de Gdańsk, Faculté d'Hydrotechnique, 11/12 rue Majakowskiego, 80-952 Gdańsk.

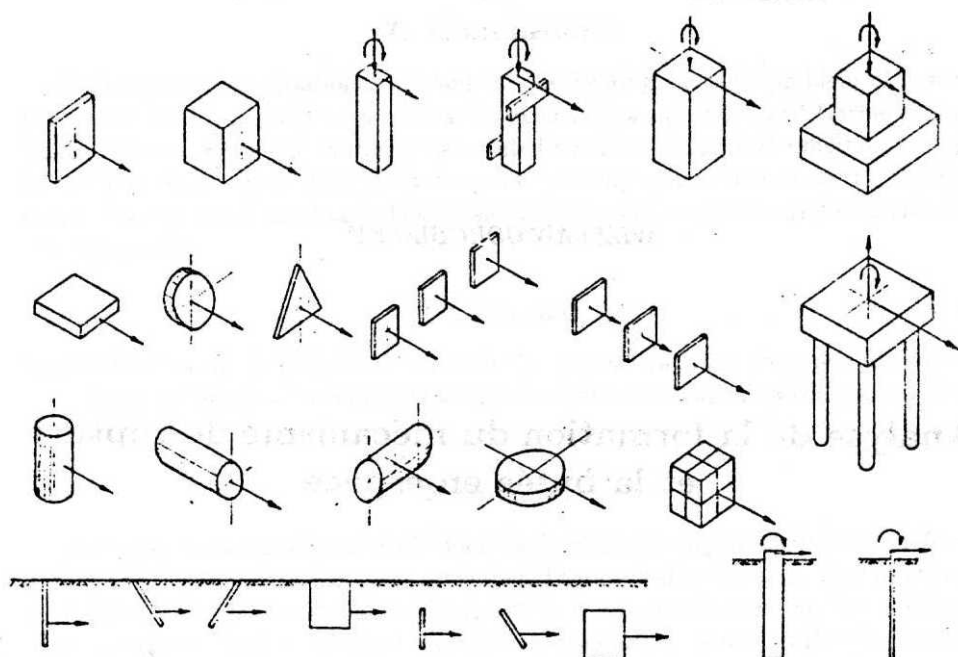


Fig. 1. Exemples des éléments et des ensembles des fondations soumises à des forces horizontales-plaques et blocs d'ancrage avec formes diverses qui travaillent isolément et comme un ensemble, fondations des poteaux, fondations de blocs, pieux isolés et fondations sur pieux

Table I

Coefficients d'augmentation de butée

$\frac{z}{b}$	ϕ°						
	20	25	30	32	35	40	45
0.2	0.1269	0.1395	0.1540	0.1604	0.1708	0.1906	0.2146
0.5	0.3174	0.3488	0.3849	0.4009	0.4269	0.4766	0.5365
1.0	0.6347	0.6973	0.7698	0.8018	0.8538	0.9531	1.0730
1.5	0.9521	1.0465	1.1547	1.2027	1.2807	1.4297	1.6095
2.0	1.2695	1.3953	1.5396	1.6036	1.7075	1.9062	2.1460
4.0	2.5389	2.7906	3.0792	3.2070	3.4151	3.8125	4.2919
10.0	6.3480	6.9730	7.6980	8.0180	8.5380	9.5310	10.7300

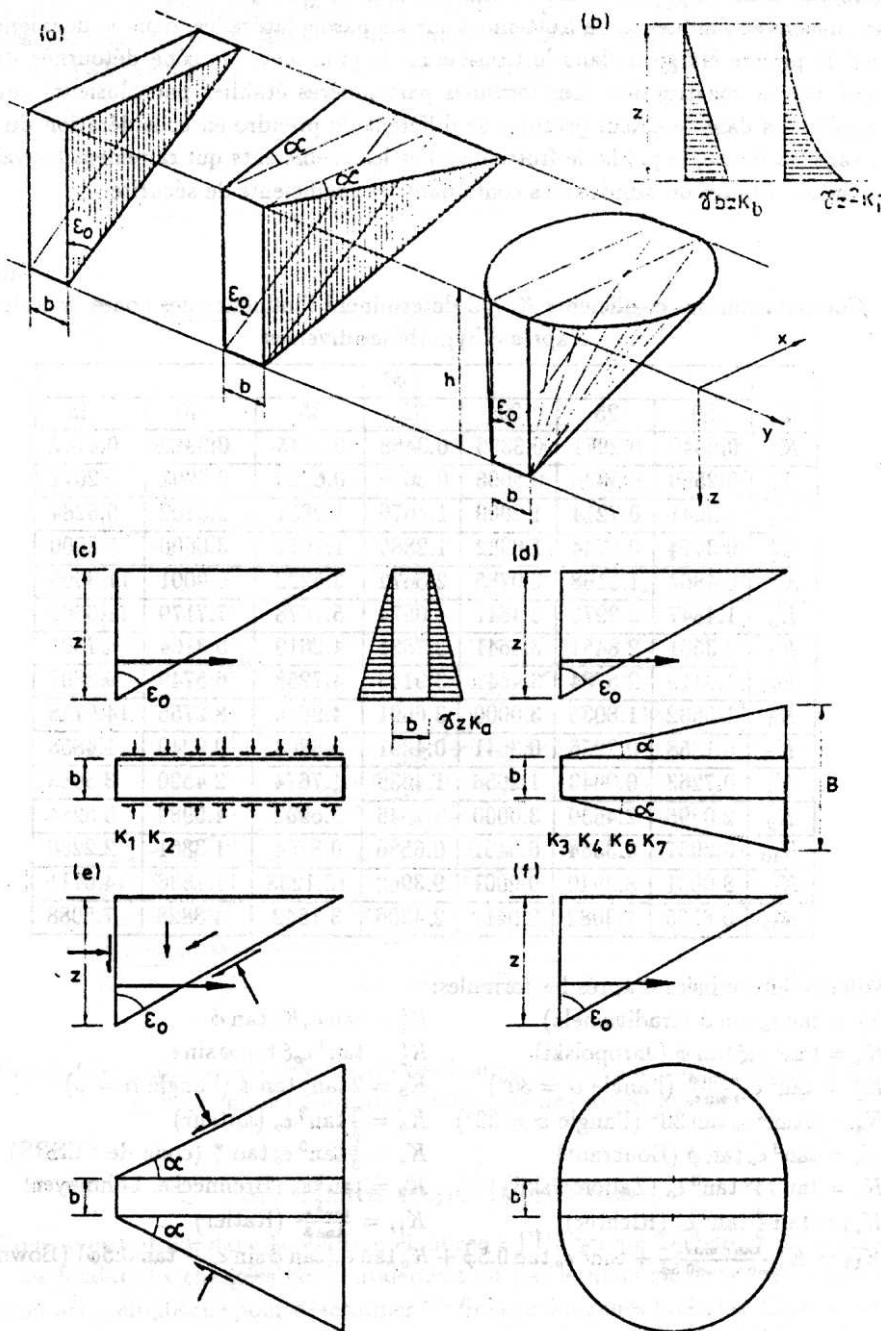


Fig. 2. Formes des zones de butée adaptées dans les solutions qui concernent l'influence des zones latérales du sol dans le cas du chargement horizontal

horizontal. Dans le premier cas on considère le prisme de butée tel comme dans l'état plan mais avec l'influence de frottement sur les parois latérales, dans le deuxième on prend le prisme élargi et dans le troisième - le plus réel - le cône détournée du sol poussé par la construction. Les formules particulières établies par plusieurs auteurs et appliquées dans le calcul pratique se diffèrent de prendre en considération du coin envisagé (la forme, le poids, le frottement) et les coefficients qui ramènent les valeurs cherchées - limites ou admissibles contenant les coefficients de sécurité.

Table II

Comparaison des coefficients K_i qui déterminent l'influence des zones latérales d'après d'hypothèses diverses

K_i	ϕ°						
	20	25	30	32	35	40	45
K_1	0.0642	0.2971	0.3333	0.3468	0.3645	0.3913	0.4142
K'_1	0.2599	0.3636	0.5000	0.3636	0.6725	0.8997	1.2071
K_2	0.4241	0.7214	1.2000	1.4676	1.9854	3.3102	5.6284
K'_2	0.3474	0.5744	1.0392	1.2885	1.7611	3.0000	5.2000
K''_2	0.4864	1.2168	2.0785	2.5672	3.5222	6.0001	11.3999
K_3	1.4847	2.2979	3.4641	4.0674	5.1678	7.7179	11.6569
K_4	2.3551	2.8451	3.4641	3.7581	4.2610	5.3104	6.7301
K_5	1.9419	2.5784	3.4641	3.9143	4.7258	6.5749	9.3807
K_6	1.0602	1.8035	3.0000	3.6691	4.9636	8.2755	14.0718
K_7	0.1358	0.2256	0.3641	0.4391	0.5803	0.9240	1.4858
K_8	0.7263	0.9643	1.2956	1.4639	1.7674	2.4590	3.5083
K_9	2.0396	2.4639	3.0000	3.2546	3.6902	4.5989	5.8284
K_{10}	0.2037	0.3384	0.5461	0.6586	0.8704	1.3861	2.2286
K_{11}	8.0031	8.2940	9.0001	9.3962	10.1238	11.7536	14.0711
K_{12}	0.8165	1.3082	2.0412	2.4306	3.1542	4.8828	7.5088

Valeurs déterminées d'après les formules:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \tan \epsilon_0 \tan \phi \text{ (traditionele)} & K'_1 &= \tan \epsilon_0 K_0 \tan \phi \\
 K_2 &= \tan^3 \epsilon_0 \xi \tan \phi \text{ (Jaropolski)} & K'_2 &= \tan^3 \epsilon_0 \xi \tan \phi \sin \epsilon_0 \\
 K''_2 &= \tan^3 \epsilon_0 \xi \frac{\sin \phi}{\sin \epsilon_0} \text{ (l'angle } \alpha = 30^\circ) & K_3 &= 2 \tan^2 \tan \phi \text{ (l'angle } \alpha = \phi) \\
 K_4 &= 2 \tan^2 \epsilon_0 \tan 30^\circ \text{ (l'angle } \alpha = 30^\circ) & K_5 &= \frac{2}{3} \tan^3 \epsilon_0 \text{ (auteur)} \\
 K_6 &= \tan^3 \epsilon_0 \tan \phi \text{ (Boucraut)} & K_7 &= \frac{2}{3} \tan^3 \epsilon_0 \tan \frac{\phi}{5} \text{ (code de l'USRS)} \\
 K_8 &= \tan 14^\circ \tan^3 \epsilon_0 \text{ (Zaborowski)} & K_9 &= \tan^2 \epsilon_0 \text{ (Brennecke, Lohmeyer)} \\
 K_{10} &= \tan \frac{\phi}{5} \tan^3 \epsilon_0 \text{ (Richter)} & K_{11} &= \frac{\tan^3 \epsilon_0}{\tan \phi} \text{ (Ratier)} \\
 K_{12} &= K_0 \frac{\tan \phi \sin \epsilon_0}{\tan \epsilon_0 \cos 0.5\phi} + \tan^3 \epsilon_0 \tan 0.5\phi + K_0 \tan \epsilon_0 (\tan \phi \sin \epsilon_0 - \tan 0.5\phi) \text{ (Bowman)}
 \end{aligned}$$

Dans la table II est présenté la comparaison des valeurs et des formules des coefficients K_i qui détermine l'influence des zones latérales d'après diverses suppositions.

On montre sur le dessin Fig. 3 la grande dispersion parmi les valeurs des coefficients calculés: par exemple pour l'angle du frottement $\phi = 30^\circ$ les valeurs des coefficients qui varient de 0.33 jusqu'à 9.0 et pour 14° - de 0.39 jusqu'à 11.75.

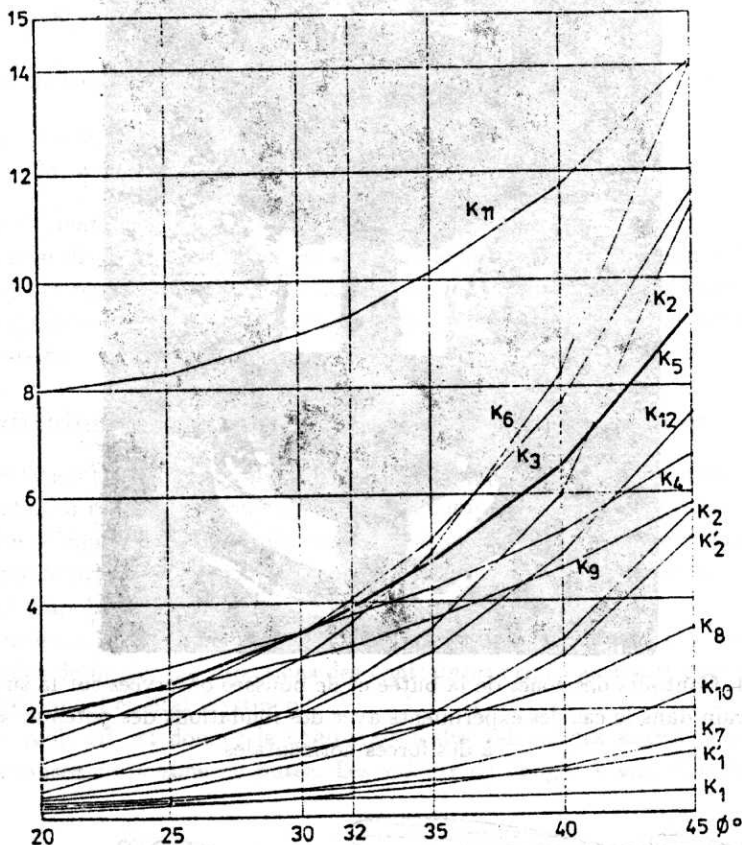


Fig. 3. Comparaison des valeurs des coefficients k_i obtenus d'après les formules diverses pour déterminer l'influence des zones latérales

3. Bases expérimentales

Nous avons utilisé dans la solution élaborée à l'Université Technique de Gdańsk - pour les fondations chargées horizontalement ou par le moment de renversement une solution demi-empirique pour déterminer l'influence des zones latérales. Cette solution est basée sur les observations du contour des zones de butée et de poussée à la surface du terrain (Fig. 4) et sur la similitude de la forme du bloc des déplacements des particules du sol en butée et du bloc des contraintes (Fig. 5).

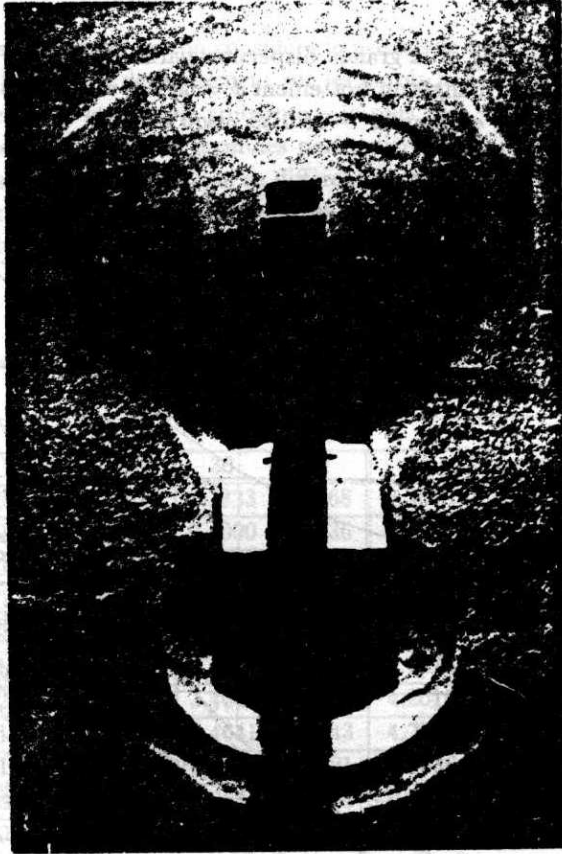


Fig. 4. Contours des zones de la butée et de poussée observées sur la surface du terrain dans le cas des expériences avec des fondations des poteaux soumis à des forces horizontales

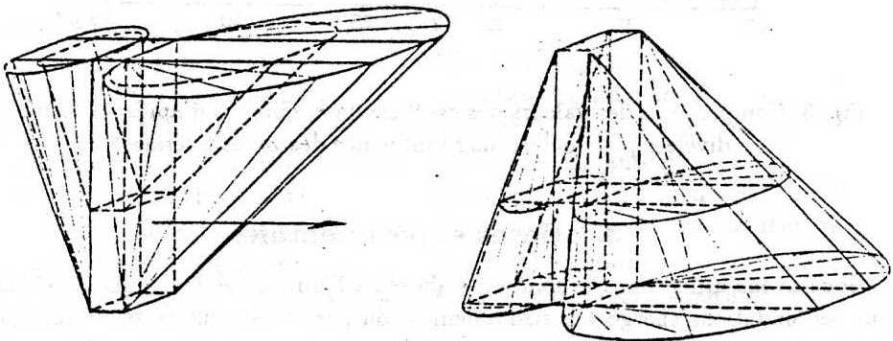


Fig. 5. Formes des zones des déplacements des particules du sol et des zones correspondantes dans le cas du déplacement parallèle de la plaque d'ancrage ou de la fondation rigide

Dans l'analyse approchée ce contour, base du cône retourné, est remplacé par un rectangle correspondant à l'état plan et deux demi-cercles des zones latérales.

L'analyse de cette dépendance donne la formule finale qui détermine les valeurs de la butée à la profondeur z :

$$2p_z = \frac{2}{3} \gamma K_p \cos \delta \eta \tan \epsilon_o z^2 \quad (1)$$

où K_p est le coefficient de butée en état plan.

$$\text{Pour } \sigma = 0, K_p = \tan^2 \epsilon_o, \epsilon_o = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \text{ et} \quad (2)$$

$$2p_z = \frac{2}{3} \eta \gamma \tan^3 \epsilon_o z^2$$

avec η - coefficient correctif prenant en évidence la déformation du contour du cône de butée à la surface. La vérification expérimentale de cette solution montre la bonne concordance des résultats mesurés et calculés pour quelques centaines d'épreuves concernant les modèles des éléments d'ancrage et les fondations chargées par des moments de renversement.

4. Conditions de la formation du bloc de la butée en espace

La vérification théorique comprend l'analyse de l'histoire d'accroissement de l'état de contrainte, les conditions résultant du loi de comportement du type de Coulomb, les conditions d'équilibre et les conditions cinématiques. La dépendance de la direction de la contrainte principale maximale σ_1 et de l'angle $\epsilon_o = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ résulte du critère de l'état limite d'après Coulomb-Mohr.

On montre sur la figure 6 l'analyse de la condition de glissement à la surface des zones latérales de butée. Les directions des contraintes principales sont définies par le type du chargement en état élastique.

Dans le table III est donnée la comparaison des valeurs des angles α et ϵ_o pour la forme idéalisée de la zone de butée. Les valeurs de l'angle α sont données par la formule:

$$\cos \alpha = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \tan^2 \epsilon_o \cos^4 \varphi}} \quad (3)$$

Le dessin 7 présente la bonne concordance des valeurs des angles α et ϵ_o . L'angle α est formé par la direction de la contrainte principale σ_1 d'après la solution élastique et la normale à la surface du cône idéalisé, adapté dans la solution demi-empirique. L'angle $\epsilon_o = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ résulte du critère de Coulomb-Mohr. On peut voir une assez bonne concordance dans l'intervalle de 0 jusqu'à 40 à 60. Le dessin suivant (fig. 8) montre les contours théoriques de la zone de butée résultant de la dépendance entre la direction du σ_1 et l'angle ϵ_o . Les courbes sont dessinées d'après la formule provenant du loi de Coulomb et des formules de l'état élastique:

$$r = \frac{2ke^{-k\varphi}}{1 + e^{-2k\varphi}} \quad \text{où } k = \tan \epsilon, \epsilon_o = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

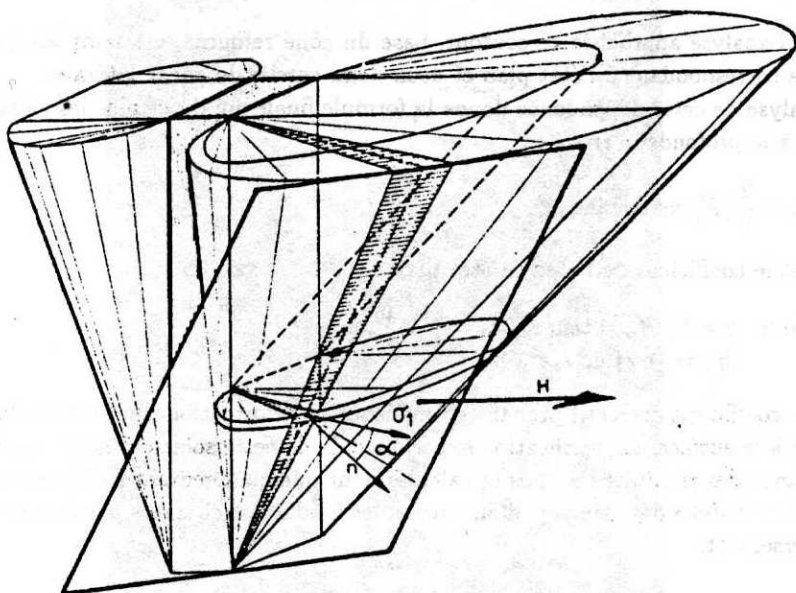


Fig. 6. Analyse des conditions de glissement sur la surface des zones latérales de butée dans le cas du chargement horizontal

Table III
Comparaison des valeurs de l'angle α et ϵ_0 pour la forme idéalisée de la zone de butée

ϕ	5°	20°	32°	45°	ϕ	5°	20°	32°	45°
ϵ_0	47.5°	55°	61°	67.5°	ϵ_0	47.5°	55°	61°	67.5°
φ°	α°				φ°	α°			
5	47.48	54.95	60.94	67.44	50	54.13	56.39	58.98	62.93
10	47.44	54.80	60.75	67.24	55	57.33	58.73	60.45	63.31
15	47.40	54.56	60.43	66.92	60	61.16	61.91	62.88	64.65
20	47.42	54.28	60.03	66.48	65	65.49	65.83	66.28	67.17
25	47.55	53.99	59.54	65.92	70	70.17	70.28	70.45	70.78
30	47.92	53.78	59.02	65.25	75	75.04	75.07	75.11	74.80
35	48.63	53.74	58.55	64.51	80	80.01	80.01	80.01	80.03
40	49.83	54.05	58.26	63.78	85	85.00	85.00	85.00	85.00
45	51.63	54.86	58.32	63.19	90	90	90	90	90

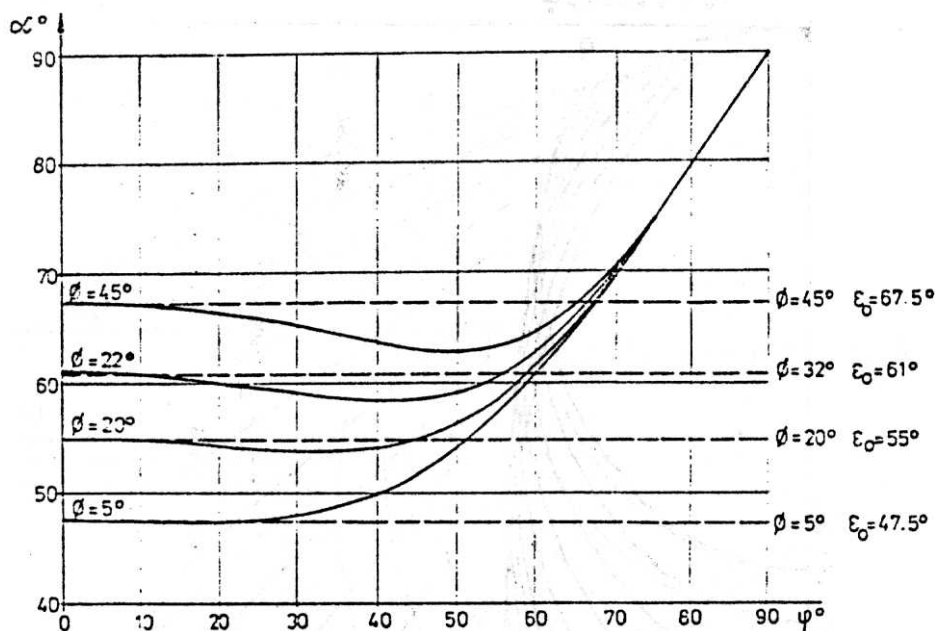


Fig. 7. Comparaison des valeurs de l'angle α - entre la direction de la contrainte principale σ_1 d'après la solution élastique et la normale à la surface du cône idéalisé adapté dans la solution semi-empirique - avec l'angle $\epsilon_0 = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ résultant du critère de Coulomb-Mohr

Pour les valeurs avancées de l'angle ϕ , plus grandes que 65° , la solution perd la validité. Les formes obtenues des contours ressemblent aux formes observées mais plus plates. On peut expliquer ces divergences par l'approche concernant les caractéristiques géométriques des contraintes en état élastique. Le dessin suivant (fig. 9) présente les fragments de l'analyse des forces sectorielles de butée et en même temps les conditions cinématiques - la géométrie du cône, l'histoire des contraintes et la possibilité du commencement du mouvement (valeurs des forces en état élastique et en état plastique, continuité de la surface de glissement).

La table IV et figure 10, qui comprennent les valeurs des forces résultant de la résistance des secteurs des zones latérales de butée, montre les parts qui correspondent aux secteurs particuliers et leur somme croissante. On peut remarquer, que la partie des zones latérales de 0 jusqu'à 50° forme plus de 90% . Cela doit être utile pour déterminer l'exactitude de la méthode. Sur la figure 11 est montrée la comparaison des valeurs des forces sectorielles dans la phase élastique et d'après la solution simplifiée dans l'état limite. Cette comparaison est importante pour l'étude de l'influence des contraintes en état élastique sur la formation du mécanisme de la rupture et la phase cinématique.

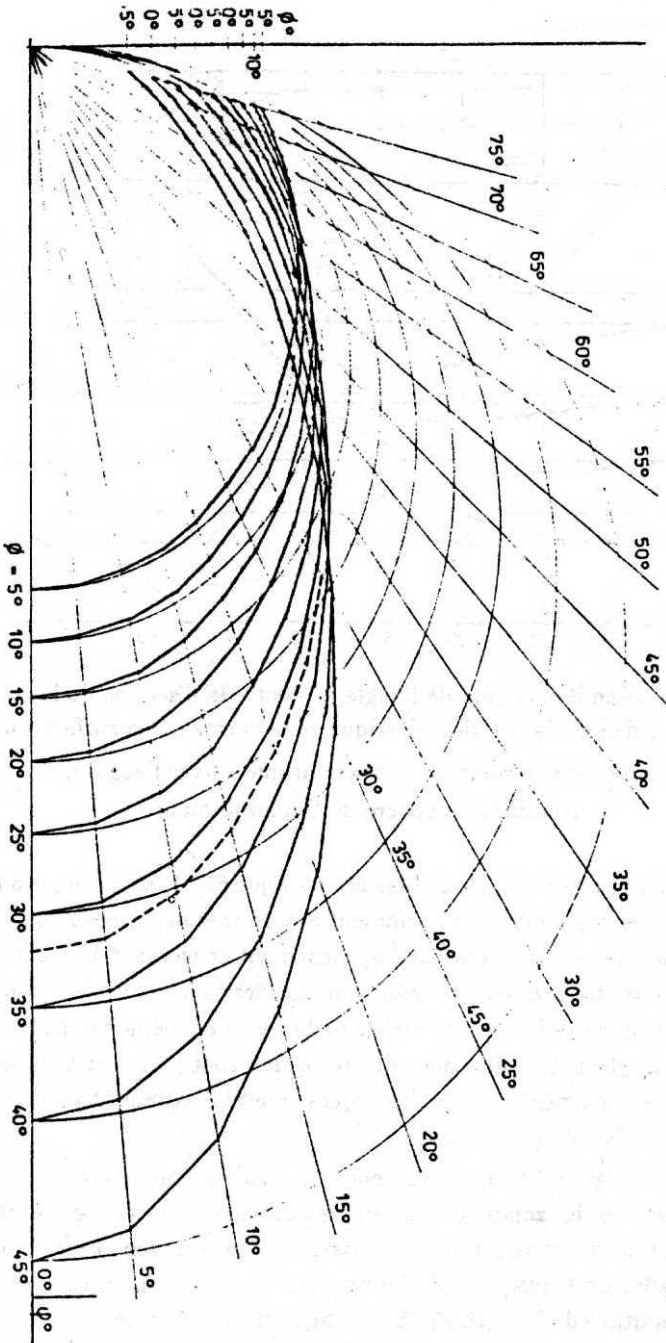


Fig. 8.

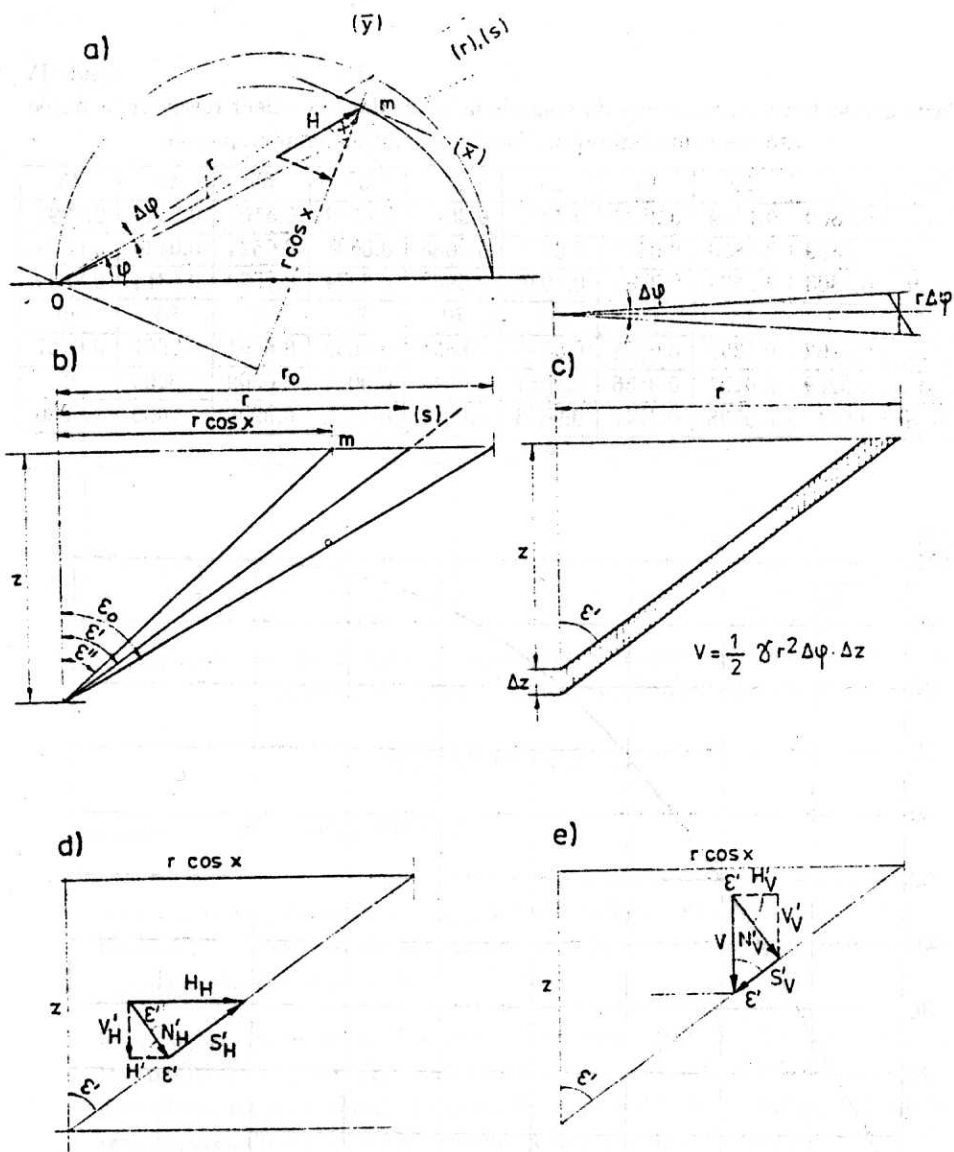


Fig. 9. Détermination des forces sectorielles de la butée dans les zones latérales pour la forme réelle du cône des déplacements du sol

Table IV

Parts des secteurs particuliers du cône de la butée dans la valeur totale de la butée limite des zones latérales, d'après la solution semi-empirique

φ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$A\varphi_i$	0.0869	0.1719	0.2530	0.3287	0.3975	0.4583	0.5107	0.5543	0.5893
$\Delta A\varphi$	0.0869	0.0850	0.0811	0.0757	0.0688	0.0608	0.0524	0.0436	0.0350
% H	0.1303	0.2578	0.3795	0.4930	0.5962	0.6874	0.7660	0.8314	0.8839
φ°	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$A\varphi_i$	0.6162	0.6359	0.6495	0.6582	0.6631	0.6655	0.6664	0.6667	0.6667
$\Delta A\varphi$	0.0269	0.0197	0.0136	0.0087	0.0049	0.0024	0.0009	0.0003	0
% H	0.9243	0.9538	0.9742	0.9873	0.9946	0.9982	0.9996	1.0000	1.0000

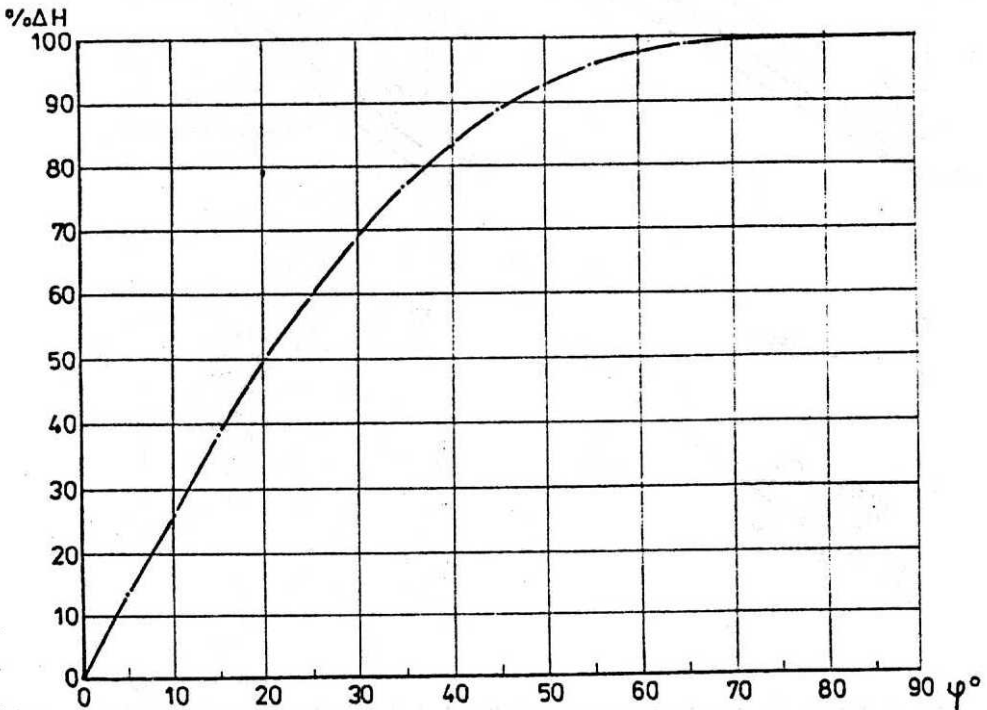


Fig. 10. Valeurs d'influence des secteurs angulaires dans la butée totale des parties latérales d'après la solution semi-empirique

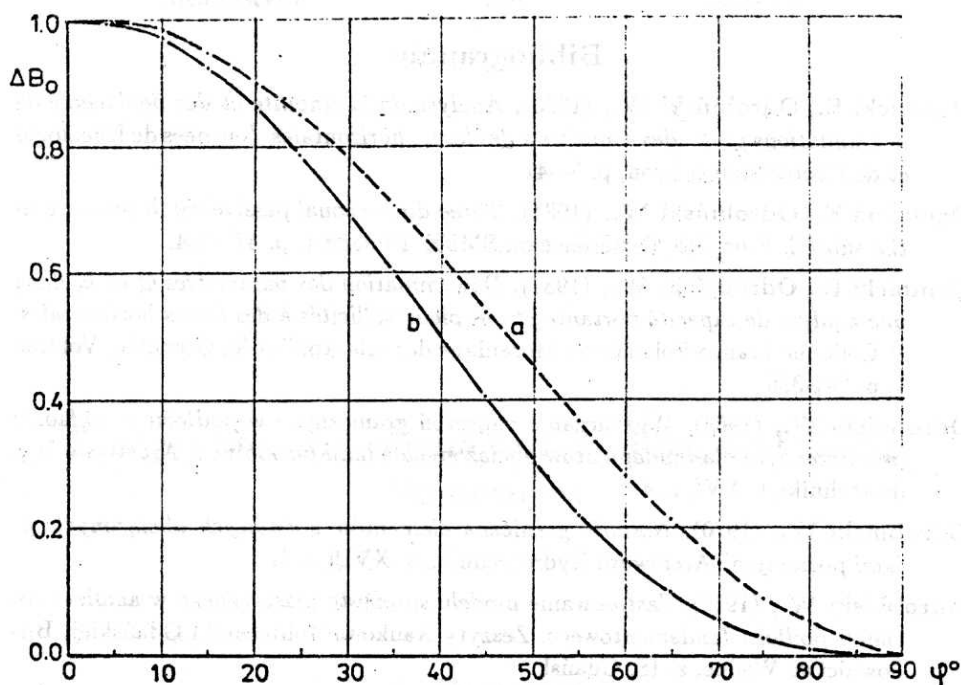


Fig. 11. Comparaison des valeurs des forces sectorielles pour la phase élastique (a) et la solution simplifiée pour l'état limite (b)

5. Conclusions

On peut constater en conclusion que:

- les analyses réalisées justifient en général la validité de la solution semi-empirique basée sur les observations des surface de glissement et sur la dépendance entre déplacements et contraintes,
- les analyses contiennent l'histoire de l'accroissement de l'état des contraintes, les conditions de l'état limite d'après le critère de Coulomb-Mohr, les conditions d'équilibre local et global. Elles contiennent aussi les conditions cinématiques réunies avec l'histoire du chargement et la possibilité du mouvement,
- les analyses rendent possible l'appréciation de l'exactitude et l'étendue de la validité de la solution. De cette manière elles peuvent faciliter le choix de la construction (formes et dimensions) le plus effectives,
- elles peuvent fournir les indications méthodiques qui se rapportent aux mécanismes de rupture et aux déplacements pour les systèmes plus compliqués, par exemple dans le sol stratifié.

Bibliographie

- Dembicki E., Odrobiński W., (1980), *Analyse de la stabilité et des déplacements des fondations profondes soumises à des forces horizontales*. Journées de Rhéologie et de Géotechnique, Lyon, p. 30-41.
- Dembicki E., Odrobiński W., (1984), *Three-dimensional passive earth pressure in the subsoil*. Proc. 6th Conference on SMFE, Budapest, p. 477-484.
- Dembicki E., Odrobiński W., (1987), *Détermination des paramètres Q et k , dans une analyse de capacité portante et des pieux sollicités à des forces horizontales*. 4^e Colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols Appliquée, Grenoble, Volume 1, p. 341-356.
- Odrobiński W., (1969), *Wyznaczanie naprężeń granicznych w podłożu w układzie przestrzennym dla fundamentów obciążonych siłami poziomymi*. Archiwum Hydrotechniki, t. XVI, z. 4.
- Odrobiński W., (1970), *Nośność graniczna elementów kotwiących obciążonych siłami poziomymi*. Archiwum Hydrotechniki, t. XVII, z. 1.
- Odrobiński W., (1976), *Zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego w analizie nośności podłoża fundamentowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Wodne, z. 18, Gdańsk.
- Odrobiński W., (1990), *Poziome obciążenie pali. Analiza nośności i przemieszczeń*. Prace IBW PAN Nr 21, Gdańsk.

Summary

Analysis of the function of failure mechanism and passive pressure in three dimensional condition

The coefficients qualifying the influence of lateral zones on the values of passive pressure are presented. The results of the verification analyses for these semi empirical solution are included. The history of limit state development in three dimensional condition, static and kinematic criteria and accuracy of proposed method were checked.

Streszczenie

Analiza funkcji mechanizmu zniszczenia i oporu w układzie przestrzennym

Przedstawiono porównanie współczynników określających wpływ stref bocznych na wartości oporu. Zawarto również wyniki analiz weryfikujących rozwiązanie półempiryczne tego zagadnienia. Sprawdzono historię rozwoju stanu granicznego w układzie przestrzennym, warunki statyczne, kinetyczne i dokładność proponowanej metody.