Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 90 (1964)
Heft: 2: Autoroute Genève-Lausanne, fascicule no 3

Artikel: Utilisation de machines électroniques pour calculer la stabilité des talus
Autor: Karakas, I.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-66961

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

a) *Cas cercle-cercle*

$$a_1 = R_2 - R_1$$
$$a_2 = R_2 + R_1$$
$$a_3 = R_2^2 \,.\, R_1^2$$
$$a_4 = \frac{a_1^2}{a_2}$$

$$p = \sqrt{\left| \frac{4\sqrt{3}\, a_3}{a_1\, a_2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(a_1 + D)\,(a_1 - D)}{(D - a_4)\,(D + a_4)}} \right|}$$

b) *Cas droite-cercle*

$$a_1 = D - |R|$$

$$p = \sqrt{4\sqrt{3}\, R^2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a_1}{2R - a_1}}}$$

Ces relations, appliquées en conjugaison avec celles du paragraphe 5, nous ont permis d'établir une sous-routine de calcul du paramètre pour notre ordinateur IBM 1620, dont le temps de fonctionnement est en général de l'ordre de 8 secondes et qui occupe environ 2500 caractères de la mémoire.

7. *Calcul des fonctions transcendantes* ξ, η, ξ_c et η_c

Les divers développements analytiques des paragraphes précédents nous ont conduits à prendre en considération les fonctions transcendantes ξ, η, ξ_c et η_c. On démontre que ces quatre fonctions sont continues et dérivables dans l'intervalle $-\infty, +\infty$. Nous avons vu cependant que dans la pratique du calcul de routes on se limite à l'intervalle $0 \leqq t \leqq \sqrt{\pi}$. Comme ces fonctions sont d'un usage courant, il était nécessaire de mettre au point une méthode de calcul très rapide. Nous avons fixé notre choix sur des approximations de type polynomial (en raison de la lenteur de la division), c'est-à-dire de la forme

$$f(t) = a_0\, t^n + a_1\, t^{n-1} + \ldots + a_{n-1}\, t + a_n\,.$$

Le développement des fonctions ξ, η, ξ_c et η_c en série de Taylor autour de 0 nous a fourni provisoirement une réponse à notre problème. Les séries obtenues étant alternées, nous avons la garantie que l'erreur commise en supprimant les termes de degré élevé n'excède pas la valeur absolue du premier terme négligé. Nous obtenons à ce jour d'excellents résultats en ne retenant que les huit premiers termes de chaque développement. Par exemple, l'expression retenue pour η_c est

$$\eta_c = t^2(a_0 + a_1 t^4 + a_2 t^8 + a_3 t^{12} + a_4 t^{16} + a_5 t^{20} + a_6 t^{24} + a_7 t^{28})$$

avec
$$a_0 = 8.3333333 \,.\, 10^{-2}$$
$$a_1 = -2.9761905 \,.\, 10^{-3}$$
$$a_2 = 6.3131313 \,.\, 10^{-5}$$
$$a_3 = -8.2671958 \,.\, 10^{-7}$$
$$a_4 = 7.2519261 \,.\, 10^{-9}$$
$$a_5 = -4.5384254 \,.\, 10^{-11}$$
$$a_6 = 2.1242121 \,.\, 10^{-13}$$
$$a_7 = -7.7088344 \,.\, 10^{-16}$$

En fait, cette solution — d'ailleurs très satisfaisante — s'avère être une solution de première urgence. On n'ignore pas que la série de Taylor tronquée fournit une approximation excellente au voisinage de l'origine mais que la précision se détériore rapidement lorsqu'on s'écarte de celle-ci ; l'erreur est en quelque sorte mal répartie. En fait il existe des approximations polynomiales de degré moindre que celles adoptées jusqu'ici dont l'erreur globale n'est cependant pas plus grande. Ce sont les approximations polynomiales de norme minimum au sens de Chebyschev. C'est dans le but de remplacer prochainement les fonctions adoptées par de meilleures que nous avons déjà calculé les dix-neuf premiers coefficients des développements de Taylor de nos quatre fonctions avec une précision de trente chiffres significatifs. Un calcul de relaxation sur ces coefficients qui sera confié à la machine électronique elle-même nous fournira la solution définitive de ces approximations. Ainsi nous espérons gagner encore 10 à 20 % du temps actuellement nécessaire au calcul sans perdre la précision déjà obtenue.

UTILISATION DE MACHINES ÉLECTRONIQUES POUR CALCULER LA STABILITÉ DES TALUS

par I. KARAKAS, ing. dipl. SIA - ASCE, chef de la Section des essais

I. Introduction

Les caractéristiques des routes modernes nécessitent souvent l'exécution de talus très hauts sur des terrains inclinés et pour les remblais d'accès à des ouvrages d'art par-dessus des routes, des voies ferrées, etc. D'autre part, l'ingénieur est souvent dans l'obligation de construire la route sur des sols de fondation de très mauvaise qualité et parfois même sur des marais. Dans une masse de terre, quand l'effort de cisaillement dépasse la résistance à celui-ci, une rupture ou glissement se produit le long d'une surface. Le coefficient de sécurité à la rupture d'un talus est fonction de l'inclinaison, de la hauteur du talus et des caractéristiques géotechniques des couches de sols dont le talus est formé.

A proximité du niveau du terrain naturel, les caractéristiques déterminant la résistance au cisaillement peuvent facilement varier selon la saison. Certains sols gonflent pendant la saison pluviale, aussi leur résistance au cisaillement est beaucoup plus faible que la résistance correspondante en saison sèche. La résistance des sols après le dégel est également très inférieure à celle existant en saison sèche. Le niveau de la nappe phréatique dans les sols est aussi fonction des saisons. Les niveaux maxima et minima jouent un grand rôle dans la détermination théorique des talus stables. Il est évident que les caractéristiques qui doivent être prises en considération dans un calcul de stabilité sont celles qui correspondent à l'état le plus défavorable. A tous ces facteurs qui compliquent déjà considérablement l'analyse de la stabilité s'ajoute encore la variation des caractéristiques géotechniques en profondeur. Un sol homogène sur toute la hauteur d'un talus et en profondeur est très rare ; l'ingénieur doit donc tenir compte des variations de couches très différentes.

II. Méthodes classiques de calcul

Les méthodes classiques appliquées de nos jours pour l'étude de ce problème ne sont pas très nombreuses. La méthode de D. W. Taylor, décrite dans son ouvrage *Fundamentals of Soil Mechanics*, permet de calculer pour une pente donnée la hauteur stable d'un talus en supposant que les caractéristiques géotechniques de la masse intéressée sont homogènes en tous points. Cette méthode ne tient pas compte non plus des variations du niveau d'eau dans le sol. La méthode de K. Culmann décrite dans son ouvrage *Die graphische Statik*, malgré de nombreux inconvénients, admet que le glissement probable se produit sur une surface plane passant par le pied du talus. La méthode des moments stabilisant et renversant suppose également que les surfaces de glissement sont cylindriques, elle permet de tenir compte des couches ayant des caractéristiques différentes, mais le travail nécessaire pour trouver le cercle le plus défavorable est énorme. La méthode actuellement la plus employée par les ingénieurs est celle de Fellenius, qui est également connue sous le nom de « méthode suédoise des tranches ». Cette méthode, décrite dans presque tous les ouvrages de mécanique des sols, permet de tenir compte de toutes les variables intervenant dans un calcul de stabilité. Il s'agit, dans cette méthode, de déterminer des cercles correspondant à des surfaces de glissement probable et de diviser le volume inscrit dans le cercle en tranches de largeur égale. En admettant que les forces qui s'exercent latéralement sur les deux côtés d'une tranche s'annulent l'une l'autre, il est possible de calculer graphiquement les forces qui tendent à stabiliser et à renverser la tranche qui fait partie de la masse entière définie par le cercle d'une surface probable de glissement. Le temps et le travail nécessités par l'utilisation de cette méthode, permettant l'introduction de toutes les variables, sont considérables. Elle est de ce fait presque inutilisable si on veut faire varier les constantes fournies par les essais de laboratoire ou étudier des variantes.

III. La méthode du calcul électronique

1. *Introduction*

Avec l'accroissement de la complexité des problèmes, les délais nécessaires pour l'étude de variantes deviennent très importants et, à ce stade, l'expérience de l'ingénieur joue un rôle capital dans le choix des solutions à étudier. Le problème a été résolu en collaboration avec P. Besson, licencié en mathématiques, par un programme adapté à la machine IBM 1620, propriété du Bureau de construction des autoroutes. La méthode adoptée est celle de Fellenius.

2. *Conditions limites*

a) Nombre des couches géotechniques avec variation des épaisseurs, poids spécifiques apparents, angles internes de frottement et cohésions : 6.
b) Nombre des points caractérisés par un changement de pente dans le même talus : 8.
c) Nombre des différentes surcharges : 6.
d) Nombre de cercles à essayer : illimité.

3. *Préparation des données*

La préparation des données par l'ingénieur se fait en deux étapes :

A. Définitions géotechniques, géométriques et des surcharges du talus.

B. Définition des cercles représentant les surfaces probables de glissement.

La figure 1 représente un talus caractérisé par quatre couches géotechniques, cinq points de changement de pente et quatre surcharges ; la définition de ce talus se fera comme indiqué sur la feuille n° 1, soit :

A (1) Identification du talus.

A (2) Dans le compartiment réservé au terrain.
a) Indication du nombre de couches sur la ligne de tête.
b) Indication de l'épaisseur de chaque couche en m et des valeurs de l'angle interne de frottement ∅ en degrés, de la cohésion c en t/m² et du poids spécifique apparent γ en t/m³ correspondants dans les colonnes respectives.

A (3) Dans le compartiment réservé au talus.
a) Indication du nombre des points de changement de pente sur la ligne de tête.
b) Choix d'une origine et indication des abscisses de chaque point de changement de pente en m avec la pente suivante, en % dans l'ordre descendant et dans les colonnes respectives.

A (4) Dans le compartiment réservé aux surcharges.
a) Indication du nombre des surcharges sur la ligne de tête.
b) Toujours par rapport à l'origine choisie pour A (3) *b*), indication des abscisses dès début et fin des surcharges, en m avec la valeur des surcharges en t/m² dans les colonnes respectives.

B La définition des cercles se fait comme indiqué dans la feuille n° 2, sur la première ligne réservée à chaque cercle, soit :
a) Indication du nombre des cercles à essayer sur la ligne de tête.
b) Par rapport à l'origine choisie pour A (3) *b*), indication des abscisses des points d'intersection X_a, X_b des cercles avec le talus en m et le rayon en m de chaque cercle correspondant dans les colonnes respectives.

CALCUL ELECTRONIQUE DE STABILITE DE TALUS

Identification: LARGES PIECES - PRØFIL 8 - CØTE JURA.

Terrain — 4 couches

i	e_i (m.)	φ_i (°)	c_i (t/m²)	γ'_i (t/m³)
1	5.4000000	10.000000	.50000000	1.9000000
2	3.0000000	8.0000000	1.0000000	2.0000000
3	4.0000000	15.000000	1.2000000	2.0500000
4	20.000000	.00000000	2.0000000	2.0300000
5				
6				

Talus — 5 épaulements

i	X_i (m.)	P_i (%)
1	8.0000000	31.200000
2	16.000000	8000.0000
3	16.050000	.00000000
4	25.000000	100.00000
5	29.000000	.00000000
6		
7		
8		

Surcharges — 4 surcharges

i	$X_{in.}$ (m.)	X_f (m.)	P (t/m²)
1	2.0000000	4.5000000	.60000000
2	16.000000	17.000000	1.8000000
3	29.000000	31.000000	.70000000
4	31.010000	33.000000	1.6000000
5			
6			

Feuille 1.

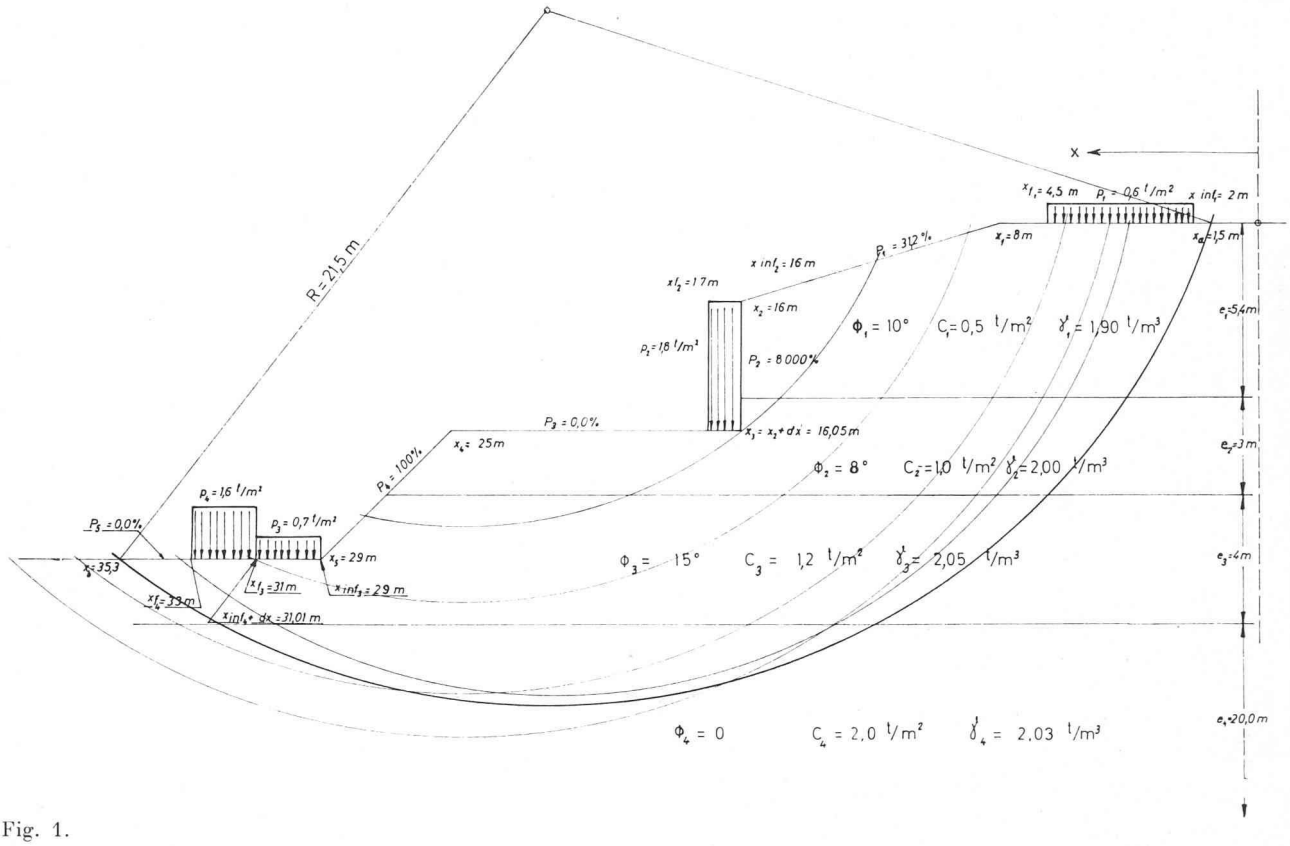

Fig. 1.

IV. Résultats

Pour ne pas compliquer le dessin, un seul cercle est dessiné sur la figure nº 1. Comme indiqué plus haut, le nombre des cercles est illimité. Pour le cas où plus de douze cercles sont à essayer, il suffit de répéter la feuille nº 2.

Les feuilles 1 et 2 sont ainsi prêtes à être données à l'opérateur de l'ordinateur. Les résultats suivants sont donnés par l'ordinateur sur la feuille nº 2 à la deuxième ligne réservée pour chaque cercle.

$a = \Sigma N \text{ tg } \varnothing$ en t/m = la somme des forces normales à l'arc du cercle multiplié par la tangente de l'angle interne de frottement correspondant.

$b = \Sigma cL$ en t/m = la somme des forces mobilisées dues à la cohésion sur la longueur de l'arc.

$c = \Sigma T$ en t/m = la somme des forces tangentielles à l'arc.

$$fs = \frac{\Sigma N \text{ tg } \varnothing + \Sigma cL}{\Sigma T}$$ = facteur de sécurité totale par rapport à l'angle interne de frottement et à la cohésion.

$$fh = \frac{\Sigma cL}{\Sigma T - N \, \Sigma \text{tg } \varnothing}$$ = facteur de sécurité par rapport à la cohésion seule (facteur de sécurité par rapport à la hauteur du talus).

Cercles de glissement	6 cercles				
	X_a (m.)	X_b (m.)	R (m.)		
	a (t/m.)	b (t/m.)	c (t/m.)	f_s	f_h
1	1.50	35.30	21.50		
1					
2	4.00	33.40	18.00		
2					
3	4.50	38.50	20.50		
3					
4	6.10	36.50	19.20		
4					
5	8.90	31.20	16.40		
5					
6	11.80	27.70	14.00		
6					
7					
7					
8					
8					
9					
9					
10					
10					
11					
11					
12					
12					

a = Σ N tg Ø b = Σ c L c = Σ T

Feuille 2.

Cercles de glissement	6 cercles				
	X_a(m.)	X_b(m.)	R (m.)		
	a (t/m)	b (t/m)	c (t/m.)	f_s	f_h
1	1.5000000	35.300000	21.500000		
1	27.884645	62.286322	127.31633	.70824353	.62642324
2	4.0000000	33.400000	18.000000		
2	24.308340	55.614517	109.86918	.72743654	.64999966
3	4.5000000	38.500000	20.500000		
3	20.435924	66.683417	123.19916	.70714233	.64890341
4	6.1000000	36.500000	19.200000		
4	25.032133	55.462897	100.80134	.79855119	.73199782
5	8.9000000	31.200000	16.400000		
5	38.804970	28.345393	59.904451	1.1209578	1.3434166
6	11.800000	27.700000	14.000000		
6	13.926140	18.482781	23.564433	1.3753320	1.9176405
7					
7					
8					
8					
9					
9					
10					
10					
11					
11					
12					
12					

$a = \Sigma N \operatorname{tg} \phi$ $\quad b = \Sigma c L$ $\quad c = \Sigma T$

Feuille 2 complétée.

V. Quelques aspects pratiques

a) La définition des parois verticales d'un talus ne peut pas se faire par leur valeur réelle, soit l'infini. Il faut donc remplacer cette valeur infinie par une pente très élevée (8000 % dans le cas de la fig. 1).

b) Pour des surcharges consécutives, l'abscisse finale de la première surcharge ne peut pas servir comme abscisse inférieure de la deuxième. Il suffit d'augmenter cette abscisse d'une valeur minime ($xf_3 = 31$ m devient $x\,inf_4 = 31{,}01$ m dans le cas de la fig. 1), afin de permettre à la machine de faire la différentiation voulue.

c) L'épaisseur de la dernière couche n'est pas définie. Elle doit être admise jusqu'à la profondeur maximum d'une surface de glissement probable.

d) Un niveau horizontal de la nappe d'eau peut être défini en utilisant le poids spécifique apparent pour les couches supérieures à ce niveau et le poids spécifique submergé pour les couches inférieures.

e) Une couche horizontale rigide peut être définie en donnant des valeurs élevées correspondant à une couche rigide.

f) La couche supérieure de dessiccation peut être définie comme une surcharge, en admettant qu'elle ne possède aucune résistance.

g) Pour le choix des cercles à essayer, on peut procéder de la manière suivante :

La première méthode est celle des centres fixes (fig. 2); alors que le centre « O » des cercles reste fixe, des cercles concentriques sont essayés en augmentant systématiquement le rayon.

La deuxième méthode est celle des points fixes (fig. 3). Quand le talus possède des points critiques, des cercles passant obligatoirement par ces points sont tracés avec des centres variables.

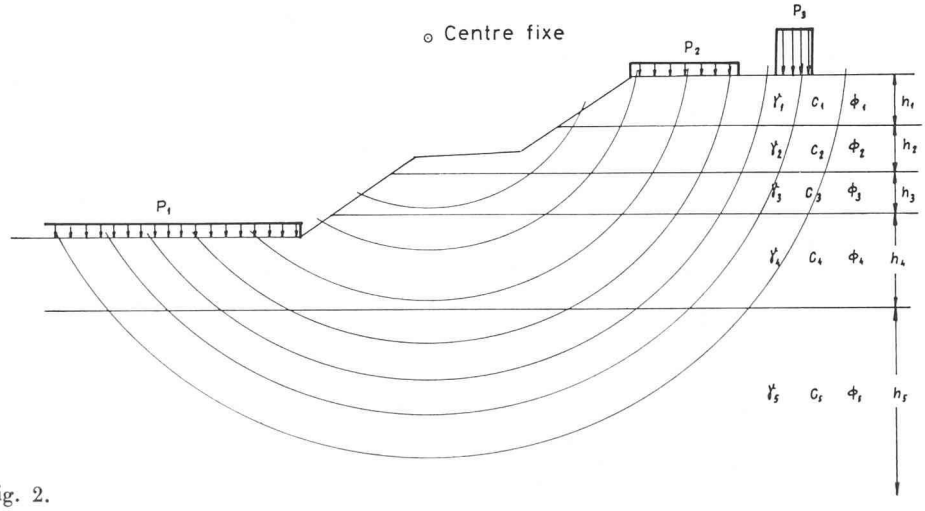

Fig. 2.

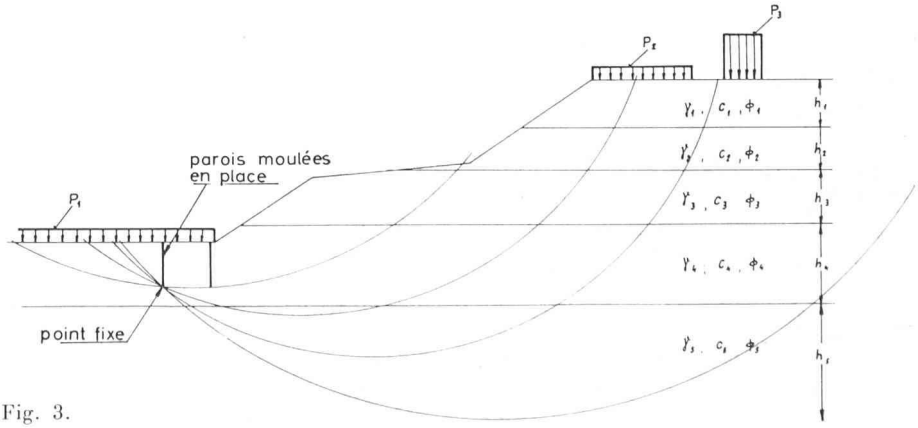

Fig. 3.