

# 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.*

# Amélioration de Propriétés Mécaniques de la Tourbe due à la Consolidation

## Improvement of Peat Soils Properties by Consolidation

J. PRZYSTANSKI  
J. RZEZNICZAK  
W. WOCH

Professeur Assistant, L'Institut de Génie Civil Ecole Polytechnique de Poznań, Pologne  
Adjoint, L'Institut de Génie Civil Ecole Polytechnique de Poznań, Pologne  
M-Assistant, L'Institut de Génie Civil Ecole Polytechnique de Poznań, Pologne

**RÉSUMÉ** Le changement de la densité de la tourbe dans le processus de consolidation décide de ses paramètres de résistance en état limite. Ce changement est résultat de la diminution de l'eau libre et l'eau adsorbée mécaniquement. On a déterminé la quantité de l'eau en ses différents types pendant la consolidation suivant deux méthodes: isotopique et dérivatographique. L'influence de la consolidation sur les paramètres de résistance était l'objet des études de laboratoire. On a comparé les résultats avec ceux obtenus au scissomètre "in situ". On propose l'application de l'effet de consolidation dans les calculs de la résistance limite du sol tourbeux.

### INTRODUCTION

Les propriétés mécaniques de la tourbe dans le sous-sol dépendent des conditions de la formation et surtout du mode d'application de charges. Au moment d'arriver à l'état limite ils diffèrent sensiblement des propriétés dans l'état naturel. En basant sur les études de changements dans la structure de la tourbe pendant la consolidation les auteurs proposent un mode d'estimation des changements de paramètres mécaniques suivant une analyse du développement du processus de consolidation. On a pris en considération des coefficients de perméabilité et de compressibilité variables. Les relations entre les paramètres mécaniques et les indices initiaux étaient déterminées empiriquement.

### MODIFICATION DE STRUCTURE ET DE TYPES D'EAU DANS LA TOURBE PENDANT LA CONSOLIDATION

On distingue dans la tourbe l'eau mobile et immobile. L'eau immobile peut être: l'eau libre fermée dans les pores, l'eau adsorbée à la phase solide mécaniquement avec une énergie de liaison inférieure à 0,1 kcal/mol et l'eau adsorbée par des forces physico-chimiques où l'énergie de liaison dépasse 0,1 kcal/mol. Il y a encore un petit important volume de l'eau adsorbée chimique avec une énergie de liaison plus grande que 100 kcal/mol. Les propriétés mécaniques de la tourbe dépendent du volume de différents types d'eaux. Pour déterminer de quantités d'eau liée dans la tourbe on a utilisée deux méthodes: l'analyse de filtration isotopique et la méthode dérivatographique /Rzeźniczak 1980/. La première a permis de déterminer le volume de l'eau immobile  $V_i$  la deuxième a permis de déterminer la quantité d'eau fortement liée  $V_{af}$  et quantité total d'eau liée  $V_{at}$ . La fig. 1 présente des modifications qui se font dans les volumes d'eau mobile et immobile et dans la porosité effective sous l'influence de la charge qui

augmente progressivement. On y a présenté aussi les relations entre les volumes de ces eaux avant la charge, après la charge et après la détente.

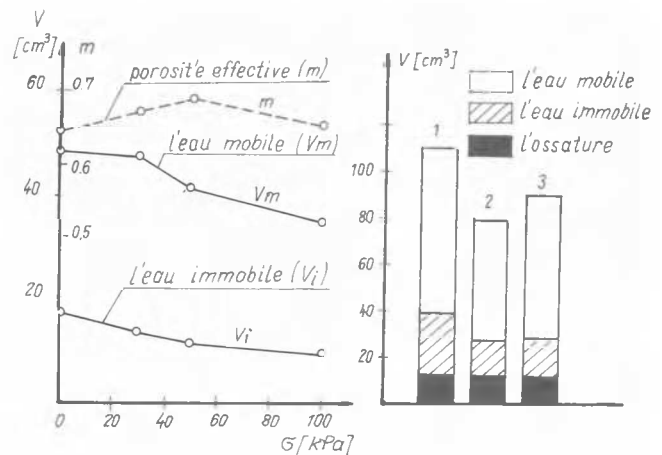


Fig. 1 Changement de structure de la tourbe:  
1-avant la charge, 2-après la charge de  $\sigma = 100$  kPa, 3-après la détente

L'accroissement de la porosité effective c'est -à-dire de volume d'eau mobile par rapport au volume total, dans l'intervalle de contraintes 30 - 50 kPa y est caractéristique. Une partie d'eau immobile sous l'influence de cette charge est libérée et devient eau libre. Dans la tourbe examinée on a pas trouvé plus d'eau libre dans les pores fermés après la charge comprise entre 80 - 100 kPa. La méthode dérivatographique permet de déterminer des quantités d'eau liée de différents types dans la tourbe après la détente ou bien avec de différents agents chimiques.

Le tableau I présente certains résultats de telles déterminations. Ces caractéristiques montrent que la charge de la tourbe modifie avant tout le volume d'eau liée faiblement. Il est aussi évident que les ions  $Ca^{++}$  introduits en supplément, réduisent la quantité total d'eau liée et les ions  $Na^+$  l'augmentent.

TABLEAU I

Type d'échantillon	Teneur en eau totale %	Quantité d'eau adsorbée %	
		Wat	Waf
Tourbe intacte	577	208	54
Tourbe chargée $G_c = 100 \text{ kPa}$	250	90	29
Tourbe + $CaCl_2$	552	155	41
Tourbe + $NaOH$	567	245	47

TASSEMENT DU SOL TOURBEUX PENDANT LE PROCESSUS DE CONSOLIDATION

Les études sur les changements de structure et de relations d'eau pendant la consolidation ont montré que la consolidation est due à la diminution de l'eau des pores ouverts et fermés. Le processus de la diminution de l'eau change dans le temps et dans l'espace à la longueur de la piste de drainage. Dans l'état de déformation unidimensionnel ce processus peut être décrit conformément aux principes de la théorie de Terzaghi avec des coefficients de perméabilité et de compressibilité variables. L'équation initiale a reçu la forme:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad /1/$$

En substituant:

$$v = ki; \quad i = \frac{\partial h}{\partial z}; \quad u_w = \gamma \cdot h; \quad G = G' + u_w$$

on reçoit

$$\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} (k - \frac{\partial \sigma'}{\partial z}) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad /2/$$

On a pris en considération le changement de coefficients de perméabilité et de compressibilité en admettant les liaisons suivantes:

$$k = A \exp\{eB\} \quad /3/ \quad G' = C \exp\{-eD\} \quad /4/$$

où

$$A = k_0 \exp\{e_0 B\} \quad C = G'_f \exp\{e_f D\}$$

$$B = 2,3 (tg \alpha)^{-1} \quad D = 2,3 (tg \beta)^{-1}$$

Si l'on substitue les équations /3/ et /4/ à l'équation /2/, introduit la variable  $x = \frac{z}{H}$  et fait la différenciation on reçoit l'équation du second degré extrêmement non-linéaire:

$$M(1+e) \exp\{eG\} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad /5/$$

où

$$M = \frac{ACDE}{H^2 \gamma_w} = \frac{k_0 G'_f}{H^2 \gamma_w} \exp\{e_f D - e_0 B\}$$

$$G = B - D$$

L'équation /5/ était résolue numériquement avec l'ordinateur ODRA 1305. On y a pris en considération pour chaque petite distance de temps le changement de la longueur H de la piste de drainage. Les conditions aux limites étaient suivantes:

$$t = 0 \quad 0 \leq x \leq 1 \quad e(x,t) = e_0$$

$$t \rightarrow \infty \quad 0 \leq x \leq 1 \quad e(x,t) = e_f$$

$$t > 0 \quad x = 0 \quad e(x,t) = e_f$$

$$t > 0 \quad x = 1 \quad \frac{\partial e(x,t)}{\partial t} = 0$$

Sur le fig. 2 on a présenté les résultats des calculs qui étaient comparés avec les valeurs expérimentales. Les paramètres de la tourbe examinée, obtenus aux cours des essais de laboratoire se trouvent dans le tableau II.

TABLEAU II

	$e_0$	$k_0$ [m/s]	B	D	H [m]	$e_f$
$G = 40 \text{ kPa}$ $G = 60 \text{ kPa}$	11	$4,8 \cdot 10^{-7}$	1,144	0,447	0,18	$\frac{6,4}{5,4}$

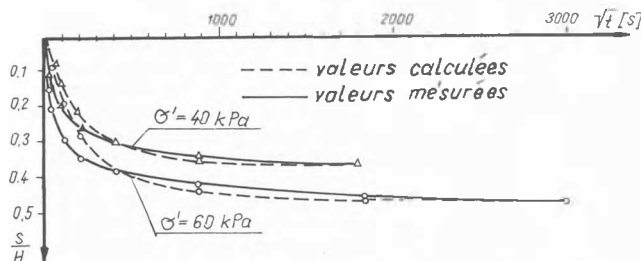


Fig. 2 Valeurs calculées et mesurées

ÉTUDE SUR LE CHANGEMENT DES PARAMETRES DE RESISTANCE PENDANT LE PROCESSUS DE CONSOLIDATION

Pour fixer des relations entre les facteurs déterminant le processus de consolidation et les paramètres caractérisant la résistance de la tourbe au cisaillement, on a fait les essais de laboratoire sur des appareils triaxiaux, sur des appareils de cisaillement direct et les essais "in situ" au scissomètre.

On a examiné sur des appareils triaxiaux les échantillons intacts de la tourbe faiblement décomposée  $R = 0,19 - 0,25$ , aux dimensions  $\phi 35,6 \text{ mm}$ ,  $H = 200 \text{ mm}$ , consolidés dans les conditions de la déformation unidimensionnelle pendant la période jusqu'au 3 mois et ensuite coupés sans drainage. La teneur en eau des échantillons était dans l'intervalle  $w_0 = 325 - 515 \%$ . On a constaté que les paramètres essentiels formant la résistance au cisaillement de la tourbe sont: la valeur de la contrainte consolidante et le temps de durée de cette contrainte. La résistance au cisaillement est écrite en forme:

$$c_t = c_0 + \Delta c; \quad \Delta c = G_c tg \phi_{cu}; \quad tg \phi_{cu} = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t}$$

$$c_t = c_0 + G_c (\alpha_0 + \alpha_t \sqrt{t}) \quad /6/$$

où:  $\alpha_0$  - coefficient déterminant l'influence initiale de la consolidation sur l'angle du développement de la consolidation,  
 $\alpha_t$  - coefficient déterminant l'influence du temps

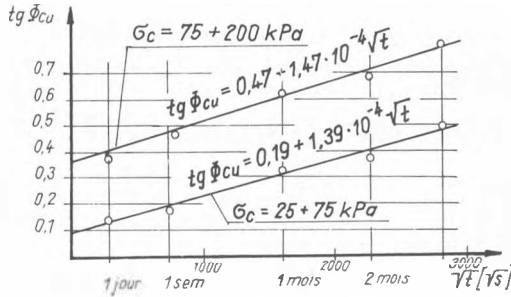


Fig. 3 Résultats des essais non drainés sur des appareils triaxiaux

Dans le tableau III on a complété les valeurs déterminées de coefficients  $\alpha_0$  et  $\alpha_t$ .

TABLEAU III

$G_c$ [kPa]	$\alpha_0$	$\alpha_0$ (moyen)	$\alpha_t$	$\alpha_t$ (moyen)
25 ÷ 75	0,15 ÷ 0,30	0,19	$(1,14 \div 1,90) \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$
75 ÷ 200	0,27 ÷ 0,52	0,47	$(1,20 \div 4,10) \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$

L'application de la formule /6/ nécessite l'utilisation de la loi:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^n \quad /7/$$

où:  $H_1$  - hauteur des échantillons examinées  
 $H_2$  - puissance d'une couche consolidée  
 $n = 1,0 - 2,0$ ; pour la tourbe examinée  
 $n = 1,15 - 1,5$ .

La formule /6/ prend alors la forme:

$$c_t = c_0 + G_c \left[ \alpha_0 + \alpha_t \sqrt{t \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^n} \right] \quad /8/$$

Le coefficient  $\alpha_0$  déterminant l'influence initiale de la consolidation est un résultat de l'interprétation des effets des essais faits après 24 heures. Il en résulte que quoiqu'il, ne dépende pas du temps, cependant l'effet résultant de ce coefficient ne peut être obtenu qu'après le temps

$$t_2 = t_1 \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^n$$

Dans les conditions naturelles, pour  $n=1,15-1,5$  et  $H_2=2,0$  m cela correspond au temps  $t=16-30$  jours. On a effectué les essais sur des appareils de cisaillement direct avec les échantillons intacts de la tourbe à la décomposition  $R=0,64$ . La teneur en eau initiale de la tourbe naturelle se plaçait dans l'intervalle  $w = 490 - 519$  %. Les résultats des essais sont présentés sur la fig. 4.

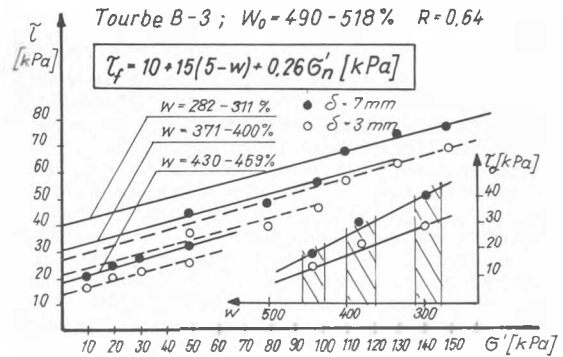


Fig. 4 Résultats des essais sur des appareils de cisaillement direct

Les essais "in situ" au scissomètre étaient faits sous un remblai de chaussée à la hauteur différente fondée sur un sol tourbeux, consolidé au cours des 20 années. Les résultats sont présentés sur la fig. 5. Le tableau IV comporte une comparaison entre les valeurs mesurées "in situ" et celles calculées de la formule /8/. On a obtenu les valeurs approximatives pour  $n = 1$ .

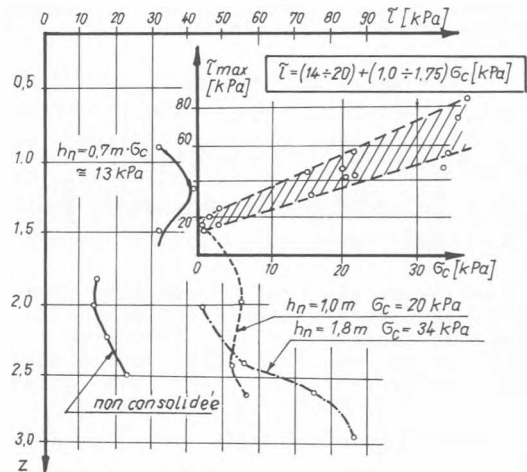


Fig. 5 Résultats des essais "in situ" au scissomètre

TABLEAU IV

Valeurs calculées et mesurées de la résistance au cisaillement sous le remblai

Profondeur h (m)	$\tau$ (kPa)		
	Calculée d'après la formule (8)		Mesurées "in situ"
	n = 2	n = 1	
2,0	26	47	45
2,5	35	56	64

### UTILISATION DES EFFETS DE CONSOLIDATION DANS LA DETERMINATION DE LA FORCE PORTANTE DU SOL TOURBEUX

Le changement de densité du sol, dû à la charge transmise par l'ouvrage d'art avant d'atteindre l'état limite n'est pas uniforme. On propose de prendre en considération l'influence de différents degrés de consolidation du sol d'une façon approximative. En déterminant la force portante du sol on distingue 3 zones: active, intermédiaire et passive. Dans la zone active, l'effet de consolidation est complet, dans la zone passive l'influence de la consolidation n'existe pas, dans la zone intermédiaire l'effet est partiel. Pour déterminer la force portante du sol on utilise la formule suivante:

$$q_f = N_c c + N_D \gamma_D D_{min} + N_B \gamma_B B \quad /9/$$

où:

$$N_D = tg^2(45 + \frac{\Phi}{2}) e^{\pi tg \Phi}; \quad N_c = ctg \Phi (N_D - 1)$$

$$N_B = tg \Phi (N_D - 1)$$

D'habitude dans tourbe  $\beta < 10^\circ$ , d'où  $N_B = 0$ ;  $D_{min} = 0,0$ . On admet alors que l'effet de consolidation ne peut être obtenu que par l'augmentation de la cohésion  $c$ . La résistance limite du sol due à la cohésion se divise en résistances des zones respectives:

$$N_c c = N_{c1} c_1 + N_{c2} c_2 + N_{c3} c_3 \quad /10/$$

où:

$$N_{c1} = \frac{N_c}{2} + \frac{ctg \Phi}{2} [1 - \exp(\pi tg \Phi)]$$

$$N_{c2} = \frac{N_c}{2} + \frac{ctg \Phi}{2} [\exp(\pi tg \Phi) - tg^2(45 + \frac{\Phi}{2})]$$

$$N_{c3} = \frac{ctg \Phi}{2} [tg^2(45 + \frac{\Phi}{2}) - 1]$$

La distinction de ces trois composants permet de prendre en considération l'influence du changement de densité sur les paramètres géotechniques du sol, séparément pour chaque zone. La formule /10/ peut prendre la forme:

$$N_c c = N_c [c_1 r_1 + c_2 r_2 + c_3 r_3] \quad /11/$$

où:

$$r_1 = \frac{N_{c1}}{N_c}; \quad r_2 = \frac{N_{c2}}{N_c}; \quad r_3 = \frac{N_{c3}}{N_c}$$

Les coefficients  $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$  sont présentés sur la fig. 6.

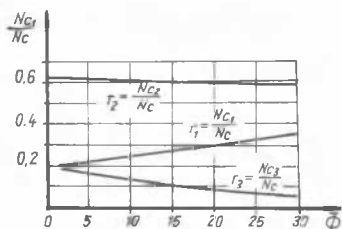


Fig. 6 Coefficients  $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$

On admet que, dans la première zone, apparaît une consolidation complète  $c_1 = c_0 + \Delta c$ , dans la deuxième zone l'effet de consolidation partiel est de 60 %,  $c_2 = c_0 + 0,6 \Delta c$ , dans la troisième zone la consolidation ne se produit pas  $c_3 = c_0$ . Il résulte de la fig. 6 que l'influence des zones respectives sur la force portante du sol dépend dans un tout petit degré de l'angle de frottement. En admettant les moyennes, pour l'intervalle  $\Phi = 0,0 - 15^\circ$

$$r_1 = 0,25; \quad r_2 = 0,60; \quad r_3 = 0,15$$

on reçoit:

$$q_f = N_c (c + 0,61 \Delta c) + N_D \gamma_D D_{min} + N_B \gamma_B B \quad /12/$$

D'où conclusion suivante que l'effet de consolidation peut être pris en considération, pendant les calculs de la force portante du sol, en 60 % approximativement.

### CONCLUSION

La consolidation de la tourbe est due à la diminution de l'eau libre, adsorbée mécanique et physico-chimique. Pendant le processus de consolidation changent la structure de la tourbe et les types d'eau respectifs. Ces changements étaient établis avec des méthodes isotopiques et dérivatographiques. On a décrit les changements de volume suivant les principes de la consolidation de filtration, avec les coefficients de perméabilité et de compressibilité variables. Le changement de densité de la tourbe pendant le processus de consolidation modifie les paramètres mécaniques. On a établi empiriquement les formules déterminant l'amélioration prévue des paramètres. L'influence de l'amélioration de la cohésion due à la consolidation peut être prise en considération, dans les calculs de force portante du sol, en 60 %.

### BIBLIOGRAPHIE

- Amarian, L.S. /1969/. Procznost i deformirujemost torfiannych gruntow. Moskwa,
- Fürstenberg, A., Gołebowska, A., Wolski, W. /1975/. Stability analysis of embankment on peat subsoil. Proc. I Baltic Conf. on SMFE, s.347, Gdańsk.
- Hanrahan, E.T., Wallshe, J.A. /1965/. Investigation of peat under varying stress and strain. Proc. 6th ICSMFE, Montreal.
- Przystański, J. /1978/. Accroissement des paramètres mécaniques des sols du à la consolidation pendant l'élevation du bâtiment. Comptes Rendus du Colloque Franco-Polonais sur la Mécanique des Sols Appliquée, Gdańsk.
- Rzeźniczak, J. /1980/. The application of isotope to the assessment of the consolidation effect on the structure of peats. Studia Geotechnica et Mechanica, Wrocław.