

Ryszard COUFAL, Olga GWIZDKA  
Politechnika Szczecińska

## IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW ELEMENTARNEGO RÓWNIANIA KONSOLIDACJI

**Streszczenie.** W roku 1986 w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej rozpoczęto badania nad szczegółowym modelem konsolidacji gruntu organicznego. Prace te, prowadzone przez prof. Z. Meyera, są kontynuowane dzisiaj przez młodych pracowników naukowych katedry. W wyniku tych prac model jest ciągle wzbogacany o nowe elementy ilustrujące zachowanie się gruntu organicznego pod obciążeniem.

Artykuł jest wstępem do pracy doktorskiej, mającej na celu uwzględnienie w modelu własności reologicznych gruntu organicznego. Opracowanie dotyczy wstępnej estymacji parametrów równania modelu Meyera. Opisano w nim najpopularniejsze w mechanice gruntów modele konsolidacji, krótko scharakteryzowano empiryczny model Meyera, omówiono badania laboratoryjne próbek gruntu oraz dokonano wstępnej estymacji parametrów uproszczonego równania krzywej elementarnej.

## IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF THE ELEMENTARY MODEL OF CONSOLIDATION

**Summary.** In 1986 in the Department of Geotechnical Engineering of the Technical University of Szczecin research was started on detailed model of consolidation of the organic soil. The research was led by prof. Z. Meyer and it is continued by the young research workers of the department. As the result of this work the model is continually enriched by new elements which illustrate behaviour of the organic soil under the load.

The article is the introduction to the Ph. D. Dissertation which aims at taking the rheology properties of the organic soil into consideration in the model. The study applies to initial estimation of parameters of the equation of the Meyer's model. The most popular models of consolidation in soil mechanics were described, an empirical Meyer's model was also shortly described, laboratory tests of soil samples were discussed, and initial estimation of parameters of simplified equation of the elementary curve was made.

## 1. Wstęp

Grunty organiczne, ze względu na ich własności inżynierskie, zaliczane są do gruntów słabych. Panująca obecnie ekspansja budowlana spowodowała, że rozpoznanie właściwości fizyczno-mechanicznych tych gruntów stało się niezbędne. Dotychczasowa literatura geotechniczna, jak również badawcza, poświęca tematyce gruntów organicznych niewiele uwagi [5, 1].

W Szczecinie grunty organiczne zajmują znaczną część ogólnej powierzchni miasta. Są to głównie obszary położone w dolinie Odry – w rejonie Międzyodrza. Ze względu na niekorzystne własności inżynierskie tych gruntów, jakimi są: niska wytrzymałość początkowa, duża ściśliwość oraz anizotropia strukturalna, tereny te pozostają słabo zagospodarowane i w większości niezabudowane.

Jednym ze sposobów wzmocnienia gruntów słabych jest konsolidacja. Jest to proces równoczesnego zmniejszania się zawartości wody i objętości porów w gruncie po zaistnieniu przyrostu naprężeń [8]. Dotychczasowe badania wielu autorów (Terzaghi, Gibson, Giersiewanow, Florin) wykazały, iż grunt organiczny jest ośrodkiem bardzo niejednorodnym, w przypadku którego zastosowanie klasycznych modeli konsolidacji napotyka duże trudności.

Matematyczny opis procesu konsolidacji opiera się na ustaleniu związków pomiędzy obciążeniem i osiadaniem w przypadku niepełnego nasycenia porów gruntu wodą, a także związków opisujących filtrację, czyli przepływ wody w gruncie pod wpływem różnicy ciśnień [3].

Z wymienionych dwóch zjawisk dobrze rozpoznane zostało dotychczas jedynie zjawisko filtracji.

## 2. Modele konsolidacji gruntów – przegląd literatury

Podstawowa teoria konsolidacji gruntów mineralnych została sformułowana przez Terzagiego, który wprowadził szereg założeń ułatwiających proces obliczeniowy. Podana przez Terzagiego zależność odkształcenie – czas ma następującą postać:

$$s^*(t) = \frac{s(t)}{s_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{\exp\left[-\pi^2(2n+1)^2 \cdot \tau\right]}{(2n+1)^2} \right], \quad (1)$$

gdzie:  $s$  - osiadanie,

$s_\infty$  - końcowa wartość osiadania gruntu,

$\tau = \frac{t}{t_m}$ ,  $t_m = \frac{k_z}{h^2 \gamma m_v}$  - bezwymiarowa funkcja czasu,  $t$  - czas,  $k_z$  - współczynnik wodoprzepuszczalności na kierunku pionowym  $z$ ,  $h$  - wysokość próbki,  $\gamma$  - ciężar właściwy torfu,  $m_v$  - współczynnik ściśliwości objętościowej gruntu:  $m_v = \frac{1}{M_0}$ .

Drugą znaczącą teorią konsolidacji jest teoria Gibsona i Lo [4], dotycząca problemu jednowymiarowej konsolidacji gruntów mineralnych, stanowiąca rozszerzenie teorii konsolidacji Terzagiego poprzez wprowadzenie do niej pojęcia ściśliwości wtórnej. Podstawowymi parametrami teorii są: współczynnik filtracji ( $k$ ), lepkość szkieletu gruntowego ( $l/\lambda$ ), ściśliwość pierwotna ( $a$ ), ściśliwość wtórna ( $b$ ) oraz współczynnik ściśliwości ( $C_v$ ). Na podstawie tych parametrów można określić wartości osiadań dla krótkich okresów czasu  $t$ :

$$\Delta s_t = \frac{2}{\pi} \sqrt{C_v t} \cdot a \cdot \Delta \sigma' \left[ 1 + \frac{1}{3} \frac{\lambda}{a} t + C_v \left( \frac{\lambda^2 t^2}{a^2} \right) \right], \quad (2)$$

W przypadku zanikania wzrostu ciśnienia porowego w gruncie, dla okresów długich:

$$\Delta s_t = H \cdot \Delta \sigma' \left[ a + b \left( 1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \right], \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta \sigma'$  - przyrost naprężeń efektywnych,

$H$  - wysokość próbki gruntu.

Teorię Gibsona próbowano wykorzystać do opisu osiadania gruntów organicznych. Próbę takiego opisu przedstawił Przysański [2]:

$$s_t = \sigma \cdot b \cdot \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1}{b} \sum \lambda_n \Delta t \right) \right], \quad (4)$$

gdzie:  $\sigma$  - naprężenie,

$b$  - współczynnik ściśliwości,

$\lambda_n$  - parametr lepkości torfu zależny od czasu,

$\Delta t = (t_n - t_{n-1})$  - przedział czasu.

Od roku 1986 w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej prowadzone są badania nad szczegółowym modelem konsolidacji gruntu organicznego.

W 1990 roku sformułowano empiryczne równanie krzywej aproksymującej relację obciążenie – odkształcenie, otrzymaną na podstawie badań edometrycznych [3]. Równanie tej krzywej (nazwanej krzywą elementarną) – dla przypadku obciążenia nie zmieniającego się w czasie – zapisano w następującej postaci:

$$s(t, \sigma) = s_{\infty}(\sigma) \cdot [1 - \exp(-D \cdot t^p - \alpha \cdot t)], \quad (5)$$

gdzie:  $D$ ,  $p$ ,  $\alpha$  - parametry równania.

Równanie (5) jest równaniem empirycznym, które nie odzwierciedla modelu mechanicznego gruntu. Krzywa opisana równaniem (5) pozwala na statystyczne – na podstawie danych z pomiarów edometrycznych – obliczenie parametrów  $D$ ,  $p$  i  $\alpha$  dla danego rodzaju torfu oraz dla danej wielkości obciążenia  $\sigma$  [3]. W opisywanej zależności wyrażenie  $s_{\infty}(\sigma)$  oznacza końcową wartość osiadania próbki w edometrze, po upływie bardzo długiego czasu:

$$s_{\infty}(\sigma) = \lim_{t \rightarrow \infty} s(t, \sigma), \quad (6)$$

Ponieważ model konsolidacji opisany równaniem (5) jest modelem czysto empirycznym, konieczne stało się zidentyfikowanie jego parametrów [1].

### 3. Opis badań laboratoryjnych

Do badań pobrano próbki torfu z brzegu Przekopu Mieleńskiego (północno – wschodni brzeg Ostrowa Grabowskiego, rys. 1).

Zakres wykonanych badań laboratoryjnych obejmował:

- badania makroskopowe,
- wyznaczenie cech fizycznych gruntu (wilgotności i gęstości),
- oznaczenie zawartości części organicznych,
- edometryczne badania zależności odkształcenie – czas.

W wyniku badań makroskopowych badany torf zakwalifikowano – wg klasyfikacji von Posta (tab. 1) – do torfów amorficznych grupy H8 ÷ H10 [7]. Jest to torf o wysokim stopniu rozkładu i barwie brązowoczarnej. Podczas ściskania w rękę więcej niż połowa masy gruntu przechodzi między palcami, bez wpływu wody, można wyczuć jedynie większe składniki, jak włókna korzeni czy kawałki drewna.



Rys. 1. Lokalizacja miejsca pobrania próbek torfu  
 Fig. 1. The location of taking samples of the peat

Wilgotność badanego torfu wynosiła średnio 149%, natomiast jego gęstość objętościowa zawierała się w granicach  $1,21 - 1,27 \text{ g/cm}^3$ . Części organiczne stanowiły około 32% całkowitej masy cząstek gruntu.

Szczególny nacisk położono na badania edometryczne. Do badań tych zastosowano 5 zwykłych edometrów oraz 2 edometry ramieniowe. Obciążenie każdej próbki wynosiło 50 kPa. Przez cały czas trwania badań próbki torfu znajdowały się pod wodą. Miało to na celu niedopuszczenie do wysychania próbek oraz zablokowania przepływu wody przez grunt. Do komputerowej rejestracji osiadań zastosowano miernik przemieszczeń liniowych (Linear Displacement Meter) MPL 108 oraz czujniki przemieszczeń typu PTx20. Osiedlenie mierzono dla serii próbek przez okres około 19 dni. Zapis przemieszczeń prowadzono co 1 s w początkowej fazie osiadania (pierwsze 15 minut badania), a następnie co 1 min (kolejne 2 godziny badania) i dalej co 15 min, aż do końca trwania badania (19 dni).

#### 4. Uprozczone równanie konsolidacji, estymacja parametrów równania

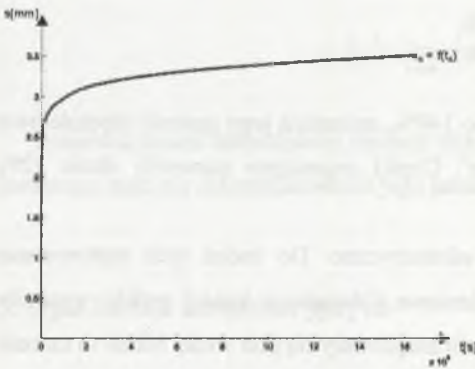
Na podstawie badań laboratoryjnych otrzymano dla każdej z próbek zależność osiadanie – czas w formie krzywej. Przykład takiej krzywej przedstawiono na rys. 2. Ze względu na wysoką niejednorodność torfu badane próbki znacznie różniły się między sobą

właściwościami fizycznymi (wilgotność, gęstość objętościowa, zawartość części organicznych), pomimo iż pochodziły z tego samego miejsca pobrania. Stąd krzywe osiadań dla poszczególnych próbek przebiegają różnie, zachowując jednak podobny kształt (rys. 3).

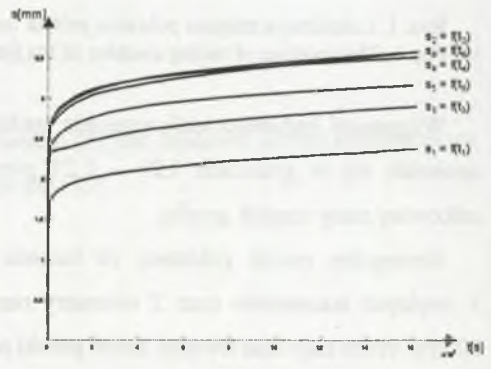
Wcześniejsze badania prowadzone w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej wykazały, że empiryczną krzywą osiadania dobrze aproksymuje równanie (5). Jest oczywiste, że dla każdej z próbek należy osobno określić wartości parametrów  $D$ ,  $p$  i  $\alpha$  tak, aby wyniki osiadań otrzymane na podstawie krzywej elementarnej (5) były zbliżone do wartości otrzymanych na podstawie badań. Określenie tych parametrów wstępnie wykonano dla uproszczonego równania konsolidacji:

$$s(t, \sigma) = s_{\infty}(\sigma) \cdot [1 - \exp(-D \cdot t^p)], \quad (7)$$

Istniejący w równaniu (5) człon  $(-\alpha t)$  odrzucono z uwagi na zbyt duże skorelowanie parametrów  $D$  i  $\alpha$ .



Rys. 2. Empiryczna krzywa osiadania  
Fig. 2. The empirical curve of settlement



Rys. 3. Krzywe osiadania dla kilku próbek  
Fig. 3. The curves of settlement for several samples

Estymacji parametrów równania (7) dokonano metodą regresji liniowej, wykorzystując program *STATISTICA 5.0 PL*. Jako metodę regresji nieliniowej zastosowano metodę Sympleksu. Przyjęto maksymalną liczbę iteracji: 1000, kryterium zbieżności: 0,0001 oraz wstępną długość kroku: 0,01. Jako funkcję straty przyjęto metodę najmniejszych kwadratów. Dla próbek opisanych i scharakteryzowanych na rys. 3 otrzymano następujące wielkości parametrów  $D$  i  $p$ :

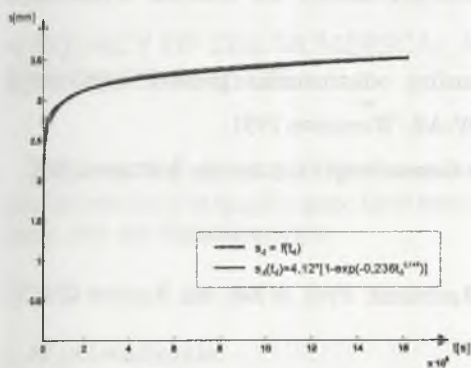
Tablica 1

Wyniki estymacji parametrów  $D$  i  $p$ 

Numer próbki	Estymatory parametrów		Współczynnik determinacji	Równanie krzywej elementarnej
	$D$	$p$		
1	-0,277	0,139	0,996	$s_1(t_1) = 2,75 \cdot [1 - \exp(-0,277t_1^{0,139})]$
2	-0,333	0,121	0,986	$s_2(t_2) = 4,22 \cdot [1 - \exp(-0,337t_2^{0,127})]$
4	-0,236	0,146	0,990	$s_4(t_4) = 4,12 \cdot [1 - \exp(-0,236t_4^{0,146})]$
5	-0,244	0,144	0,988	$s_5(t_5) = 3,72 \cdot [1 - \exp(-0,244t_5^{0,144})]$
6	-0,250	0,132	0,986	$s_6(t_6) = 4,42 \cdot [1 - \exp(-0,250t_6^{0,132})]$

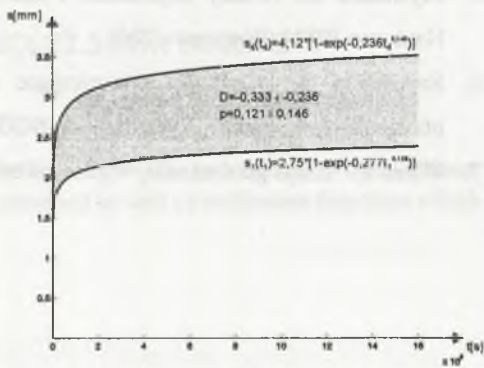
W estymacji pominięto próbkę nr 3 ze względu na zakłócenia pracy czujnika podczas badań.

Na rys. 4 przedstawiono przykład "dopasowania" krzywej elementarnej do wyników badań doświadczalnych, natomiast na rys.5 zilustrowano dwie krzywe, dla których wyestymowano minimalne i maksymalne wartości parametrów  $D$  i  $p$ .



Rys. 4. Przykład krzywej empirycznej i odpowiadającej jej krzywej elementarnej

Fig. 4. The example of the empirical curve and the adequated elementary curve



Rys. 5. Minimalne i maksymalne wartości parametrów  $D$  i  $p$

Fig. 5. Minimal and maximal values of parameters  $D$  and  $p$

## 5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników estymacji można stwierdzić, iż otrzymane wartości parametrów  $D$  i  $p$  równania krzywych elementarnych dość dobrze aproksymują krzywe osiadania uzyskane z badań laboratoryjnych. Odchyłki są nieznaczne i mieszczą się w granicach błędu pomiaru.

Empiryczny model konsolidacji gruntu organicznego, opracowany w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej, można uprościć do postaci podanej równaniem (7).

## LITERATURA

1. Bednarek R.: Model konsolidacji gruntu o własnościach sprężysto – plastycznych w warunkach zmiennego obciążenia, Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Budownictwa i Architektury, Szczecin 2000.
2. Furstenberg A.: Posadowienie budowli melioracyjnych na podłożu organicznym. Narada naukowa "Geoprojektu" pt.: Inżyniersko-geologiczne problemy badań pokrywy czwartorzędowej w Polsce, Bohenic k. Małogoszczy, maj 1980.
3. Meyer Z.: Wpływ wielokrotnych zmian obciążenia na przebieg konsolidacji torfów. Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 418, "Geotechnika VI", Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1990, s. 85 – 95.
4. Molisz R., Baran L., Werno M.: Posadawianie nasypów na gruntach organicznych metodą wstępnej konsolidacji, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.
5. Myślińska E.: Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
6. Szymański A.: Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem, Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa 1991.
7. Wiłun Z.: Zarys geotechniki, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

**Abstract**

In 1986 in the Department of Geotechnical Engineering of the Technical University of Szczecin research was started on detailed model of consolidation of the organic soil. The research was led by prof. Z. Meyer and it is continued by the young research workers of the department. As the result of this work the model is continually enriched by new elements which illustrate behaviour of the organic soil under the load.

The article is the introduction to the Ph. D. Dissertation which aims at taking the rheology properties of the organic soil into consideration in the model. The study applies to initial estimation of parameters of the equation of the Meyer's model. The most popular models of consolidation in soil mechanics were described, an empirical Meyer's model was also shortly described, laboratory tests of soil samples were discussed, and initial estimation of parameters of simplified equation of the elementary curve was made.