

Zygmunt MEYER, Roman BEDNAREK
Politechnika Szczecińska

STAŁA CZASOWA W EMPIRYCZNYM MODELU OSIADANIA GRUNTU ORGANICZNEGO

Streszczenie. W pracy został przedstawiony empiryczny model osiadania gruntu organicznego. Na podstawie prowadzonych badań osiadania gruntu organicznego w laboratorium, w edometrze do opisu zjawiska została opracowana krzywa elementarna. Parametry krzywej elementarnej p , D , α są funkcją obciążenia, właściwości fizycznych i mechanicznych badanego gruntu. Tematem pracy jest skala czasu, która jest kluczowym parametrem opisującym zachowanie się gruntu organicznego pod obciążeniem, różnicującym rodzaj badanego gruntu.

TIME-SCALE IN EMPIRICAL MODEL OF ORGANIC SOIL SETTLEMENT

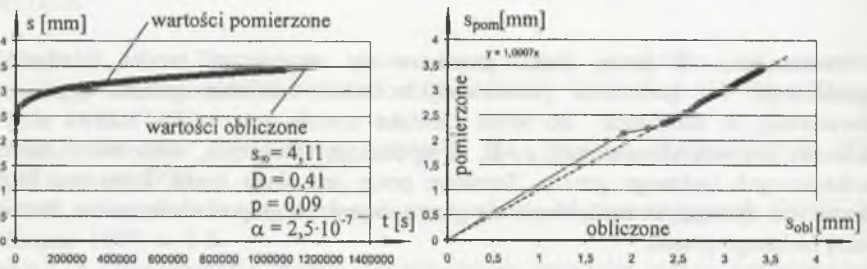
Summary. The paper presents empirical model of organic soils settlement in laboratory tests. Settlement is described by means of elementary curve. Parameters p , D , α of elementary curve are functions of load, and physical and mechanical properties of soil. Authors define the time scale of the model settlement. This scale allows to introduce dimensionless parameters which control the phenomenon. The time scale is a subject of verification against measured parameters of the analysed settlement. To describe this phenomenon the time scale has essential meaning. The coefficient of kinematic viscosity is adopted to the time-constant.

1. Wprowadzenie

W Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej prowadzone są badania nad prognozowaniem osiadania gruntu organicznego, empirycznym modelem gruntu organicznego [1, 2, 3, 4]. Badania prowadzone są na próbkach gruntu pochodzenia organicznego, namułach i torfach. Do opisu zachowania się próbki gruntu pod obciążeniem został stworzony empiryczny model podłoża gruntowego. Formułując związek matematyczny, empiryczny model można zapisać w postaci równania (1).

$$s(t) = s_{\infty} [1 - \exp(-Dt^p - \alpha t)] \quad (1)$$

Prezentowany model wymaga przeprowadzenia laboratoryjnych badań w celu wyznaczenia parametrów krzywej elementarnej. Praktycznie jest możliwe dobranie tak parametrów równania (1), żeby otrzymać dość dokładny obraz przebiegu osiadań pomierzonych w laboratorium obciążonej próbki gruntu w edometrze. Ponieważ równanie stanowi model empiryczny, dlatego istotne jest odpowiednie przyjęcie jednostek, w jakich odmierzona jest zmienna niezależna, czyli czas. Przykładowo na rys. 1 przedstawiono wyniki optymalizacji jednego z przebiegów.



Rys. 1. Pomierzone i obliczone osiadanie próbki gruntu organicznego w edometrze
Fig. 1. The measured and calculated settlement of organic soil in oedometer test

Dysponując zbiorem danych $\{t_i, s_i\}$ możemy przedstawić przebieg osiadania w postaci wykresu jak na rys. 1. Przebieg taki możemy opisać równaniem (1) w taki sposób, żeby otrzymać najwierniejsze odwzorowanie otrzymanego zbioru danych z badań osiadania próbki gruntu. Za pomocą wyznaczonych parametrów D, p, α otrzymujemy bardzo wierny obraz w porównaniu z przebiegiem wartości pomierzonych w laboratorium.

2. Opis i analiza zjawiska

Równanie (1) opisujące przebieg osiadania próbki gruntu pod obciążeniem wymaga stosowania do opisu odpowiedniej jednostki czasu, skali czasu. W celu uzyskania bardziej uniwersalnego charakteru krzywej w równaniu (1) wprowadzono stałą czasową, która pozwala na uniezależnienie równia (1) od doboru jednostki czasu. Dla każdej chwili t musi istnieć równość (2) przy obliczaniu wartości osiadania w skali czasu i bezwymiarowej skali czasu.

$$s(t) = s_{\infty} [1 - \exp(-Dt^p - \alpha t)] = s_{\infty} \left[1 - \exp \left(-D_* \left(\frac{t}{t_0} \right)^p - \alpha_* \frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (2)$$

Wprowadzenie skali czasu wymaga uwzględnienia jej również w parametrach równania elementarnego (1). Mamy:

$$D_* = Dt_0^p \quad (3)$$

oraz

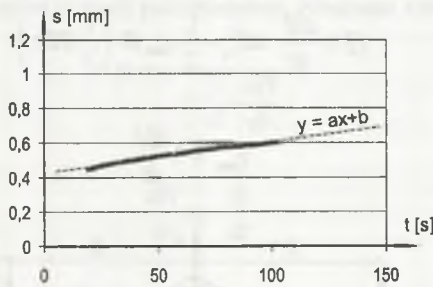
$$\alpha_* = \alpha t_0 \quad (4)$$

Wprowadzona stała czasowa t_0 pozwala odnaleźć związki między poszczególnymi parametrami w równaniach (1) i (2). W efekcie można zapisać związek między parametrami równania (1) w postaci związku (5).

$$\frac{D_*}{D} = \left(\frac{\alpha_*}{\alpha} \right)^p \quad (5)$$

W celu wprowadzenia skali czasu t_0 i uzależnienia jej od wielkości fizycznych autorzy pracy porównali pierwsze chwile odkształcania próbki po obciążeniu do zjawiska płynięcia znanego z mechaniki płynów. Podczas prowadzonych badań laboratoryjnych okazało się, że w początkowym etapie możemy wyodrębnić odcinek, dla którego zmiana osiadania w czasie a_i jest wielkością stałą (rys. 2).

$$a_i = \frac{ds}{dt} = const \quad (6)$$



Rys. 2. Przebieg osiadania próbki gruntu z wydzielonym odcinkiem stałego osiadania w czasie
Fig. 2. Initial curve of settlement of organic soil

Fakt ten pozwala na przyjęcie opisu przepływu płynu lepkiego do tej fazy odkształcania. Do opisu zachowania się gruntu organicznego pod obciążeniem zastosowano współczynnik kinematycznej lepkości κ . Lepkość stosowana do opisu tarcia wewnętrznego jako właściwość przyporządkowana płynom polegająca na występowaniu w nich naprężeń zależnych od szybkości odkształcania [5]. Warstwa poruszająca się szybciej działa przyspieszająco na warstwę poruszającą się wolniej i odwrotnie. Pojawiające się wtedy siły tarcia wewnętrznego skierowane są stycznie do powierzchni styku tych warstw. Zjawisko takie może wystąpić w przypadku osiadania gruntu organicznego. Następnym obciążeniem próbki gruntu jest

przemieszczanie się struktury gruntowej; jeżeli mowa o gruntach organicznych, to w badanej próbce przemieszczeniu ulega płynna masa, zwykle organiczna. Przemieszczanie się masy organicznej w próbkach, które mają dużą wilgotność, było podstawą opisu. Badane próbki gruntu pochodziły z miejsc znajdujących się pod zwierciadłem wody gruntowej. W czasie badania również dla zachowania reżimu wilgotności znajdowały się po wodą. Dla próbki gruntu obciążonej znajdującej się pod wodą możemy przyjąć, że płyn wypełniający wolne przestrzenie wraz z masą organiczną przemieszcza się i ulega prawu lepkiego przepływu. Przemieszczająca się masa organiczna wywołuje pojawianie się wewnątrz obciążonej próbki gruntu opisywane wcześniej tarcie. Naprężenia ścinające τ wynikające z przemieszczania się masy organicznej zgodnie z zasadami mechaniki płynów przyrównuje się do poprzecznego gradientu prędkości płynącej masy, jej gęstości ρ i kinematycznego współczynnika lepkości κ . Mamy [5]:

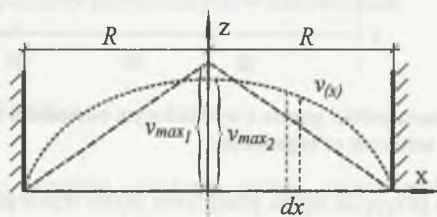
$$\tau = -\rho \kappa \frac{dv_x}{dx} \quad (7)$$

Można założyć, że dla pewnej odległości od wieciska edometru wartość naprężeń jest stała i wówczas w myśl zasady ciągłości przepływu cieczy w kierunku pionowym przepływ ten dla założonego liniowego (trójkątnego) rozkładu prędkości $v(x)$ jest równy:

$$Q = \frac{dH}{dt} \cdot \pi R^2 = \frac{1}{2} v_{\max} R \cdot \left(\frac{1}{3} R 2\pi \right) \quad (8)$$

a stąd

$$v_{\max} = 3 \frac{dH}{dt} \quad (9)$$



Rys. 3. Paraboliczny i trójkątny rozkład prędkości w próbce gruntu
Fig. 3. Assumed velocity distribution in soil sample

Gdyby przyjąć paraboliczny rozkład prędkości, to otrzymamy:

$$v_{\max} = 2 \frac{dH}{dt} \quad (10)$$

Ponieważ barak jest bardziej szczegółowych informacji o naturze tego rozkładu, a stała będzie przedmiotem optymalizacji w dalszej części niniejszego opracowania dlatego dla dalszych obliczeń przyjęto zależność (9).

Napężenia ścinające wewnątrz badanej próbki gruntu przyjmą wówczas postać:

$$\tau = -\rho \kappa \frac{3}{R} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (11)$$

Dla badań wykonywanych na tym samym edometrze, na tym samym gruncie oraz przy tym samym obciążeniu, σ możemy napisać:

$$\rho, H, R, \sigma, \phi, c = \text{const} \quad (12)$$

Stała czasowa w równaniu (1), charakterystyczna dla danej próbki gruntu, będzie dodatkowym parametrem różnicującym rodzaj badanego gruntu. Różnicowanie badanego gruntu za pomocą stałej czasowej pozwala uzależnić parametry empiryczne równania krzywej elementarnej od rodzaju gruntu. Każda próbka gruntu będzie charakteryzowała się odpowiednią stałą czasową. Jednym ze sposobów wyznaczenia stałej czasowej jest uzupełnienie równania elementarnego o współczynnik lepkości kinematycznej wyznaczany laboratoryjnie. Stałą czasową można uzależnić od współczynnika lepkości kinematycznej κ , miąższości badanej warstwy gruntu H oraz przyspieszenia ziemskiego g w podobny sposób stosowany w mechanice płynów w teorii podobieństwa. Ponieważ z równania (11) mamy:

$$\kappa = -\frac{\tau}{\rho \frac{3}{R} \cdot \frac{dH}{dt}} \quad (13)$$

oraz

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{ds}{dt} \quad (14)$$

dlatego otrzymamy:

$$\kappa = -\frac{\tau}{\rho \frac{3}{R} \cdot \frac{ds}{dt}} \quad (15)$$

Z teorii podobieństwa przepływów płynów lepkich stałą czasową t_0 można określić jako:

$$t_0 = \frac{\kappa}{H \cdot g} \quad (16)$$

a po podstawieniu κ :

$$t_0 = \frac{\tau R}{3\rho Hg} \cdot \frac{1}{\frac{ds}{dt}} \quad (17)$$

Związek (14) można zapisać w poniższej postaci:

$$t_0 = \frac{1}{C} \cdot \frac{H}{a_i} \quad (18)$$

gdzie C jest wielkością bezwymiarową stałą, która przyjmuje postać (19), uwzględnia parametry gruntu i cechy analizowanego ruchu.

$$C = \frac{3\rho H^2 g}{\tau R} = const \quad (19)$$

Natomiast zgodnie z (6) a_i jest szybkością osiadania.

Wprowadzenie stałej czasowej wymaga zmiany wartości parametrów D i α odpowiednio:

$$D_i = \frac{D_0}{\left(\frac{H}{Ca_i}\right)^{p_i}} \quad (20)$$

oraz

$$\alpha_i = \frac{a_i C}{H} \alpha_0 \quad (21)$$

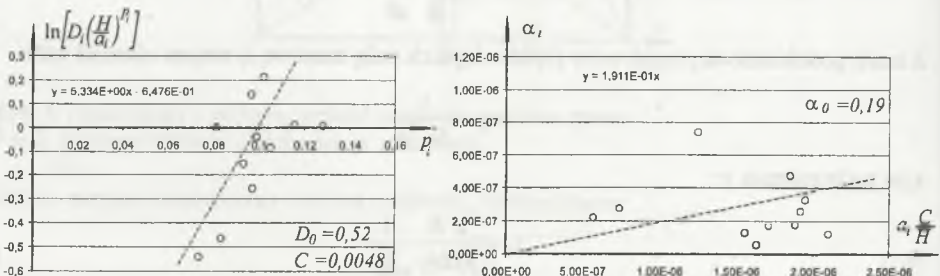
Związek (20) pomiędzy parametrami krzywej elementarnej można przedstawić w postaci liniowej (22) przez logarytmowanie. Otrzymamy:

$$\ln \left[D_i \left(\frac{H}{Ca_i} \right)^{p_i} \right] = \ln D_0 + p_i \ln C \quad (22)$$

Obliczanie stałej C oraz D_0 odbywa się statystycznie metodą najmniejszych kwadratów, tak jak dla linii prostej. W podobny sposób znając stałą C można obliczyć drugi parametr krzywej elementarnej α_0 z równania (21). Przykładowe wyniki obliczeń dla wybranej serii pokazano na rys. 4. Znajomość stałej C pozwala również na obliczenie wykorzystywanego w obliczeniach współczynnika lepkości κ , dla każdej i -tej próbki otrzymamy:

$$\kappa = \frac{g H^2}{C \cdot a_i} \quad (23)$$

Posługując się równaniem (21) i (22) można wyznaczyć niezależne stałe równania empirycznego w zakresie jednej serii obciążenia dla różnych próbek.



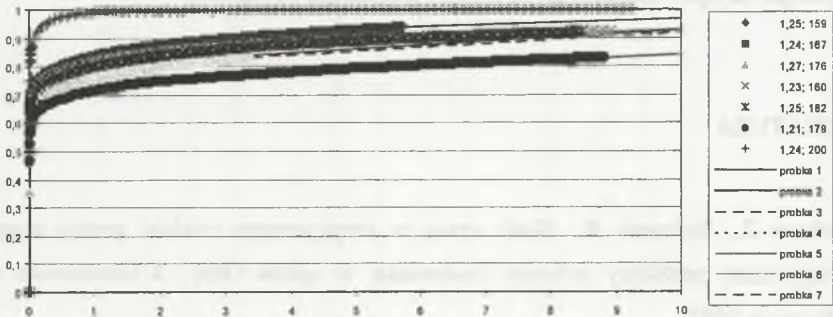
Rys. 4. Metoda wyznaczania niezależnych parametrów D_0 i α_0

Fig. 4. The results of calculation of independent parameters

Wprowadzając do równania (1) stałą czasową t_0 oraz niezależne stałe parametry równania otrzymamy związek w postaci (24) zapisany w postaci bezwymiarowej:

$$\frac{s_i(t)}{s'_\infty} = 1 - \exp \left[- \frac{D_0}{\left(\frac{H}{Ca_i} \right)^{p_i}} \cdot t^{p_i} - \alpha_0 \frac{a_i C}{H} t \right] \quad (24)$$

W równaniu tym stałe D_0 oraz α_0 są stałymi dla wszystkich próbek, natomiast dla każdej próbki zmieniają się a_i oraz p_i stosownie do własności gruntu. Znajomość tych współczynników umożliwia obliczenie osiadania próbki gruntu według takiej skali czasu, która odpowiada danemu rodzajowi próbki gruntu. Różnice w kształcie przebiegu osiadania związane są tylko ze stałą czasową odpowiednio dla każdego badanego przypadku oraz parametru s'_∞ . Na rys. 5 przedstawiono wyniki badań i analizy prezentowanego zjawiska. Próbki do badań zostały pobrane z jednego miejsca i można powiedzieć, że każda z badanych próbek charakteryzowała się podobnymi cechami fizycznymi i mechanicznymi. Dla każdej opisanej próbki gruntu otrzymano dobrą zgodność wartości pomierzonych i obliczonych. Anizotropia, niejednorodność podłoża organicznego oraz różnice w porowatości i wilgotności są przyczyną różnic pojawiających się w wyniku stosowania uniwersalnej stałej czasowej, która jest czynnikiem zależnym od właściwości fizycznych i mechanicznych gruntu i zadaniem jej jest różnicowanie zachowania się każdej próbki gruntu.



Rys. 5. Weryfikacja przeprowadzonych badań
Fig. 5. Performance of verifying tests

3. Wnioski

1. W pracy przedstawiono analizę parametrów krzywej elementarnej, która opisuje związek osiadania próbek gruntu organicznego w czasie. Ponieważ jest to równanie empiryczne, w którym istotne znaczenie ma dobór jednostek, dlatego podano próbę przedstawienia tej krzywej w postaci, gdy czas osiadania jest reprezentowany przez bezwymiarową zmienną. Zmienna ta to stosunek czasu rzeczywistego do stałej t_0 .
2. Stałą czasową t_0 wyznaczano opierając się na wymiarach próbki oraz parametrach fizycznych gruntu. W szczególności wykorzystano zasadę podobieństwa dla wolnych przepływów pełzających znaną w mechanice płynów, opierając tę stałą czasową na współczynniku, który w mechanice płynów odpowiada lepkości kinematycznej.
3. Weryfikacja zaproponowanej metody określania stałej czasowej t_0 na podstawie badań edometrycznych wykazuje, że w analizowanym osiadaniu próbki gruntu organicznego można wyznaczyć stałą, która odpowiada w płynach lepkości kinematycznej. Obliczony następnie czas t_0 pozwala na dobre odwzorowanie przebiegu osiadania. Porównanie krzywych przebiegu osiadania obliczonych analitycznie z uwzględnieniem stałej czasowej t_0 oraz pomierzonych w badaniach edometrycznych dla różnych próbek, wskazuje na dużą dokładność proponowanej metody.
4. Przedstawiona w niniejszej pracy analiza została przeprowadzona przy założeniu, że każda z próbek obciążona była takimi samymi naprężeniami. Kolejny etap pracy będzie polegał na wprowadzeniu do tej metody zmiennego obciążenia.

LITERATURA

1. Meyer Z., Bednarek R.: Skala czasu w empirycznym modelu gruntu organicznego. Regionalne problemy ochrony środowiska w ujściu Odry. X Seminarium naukowe. Szczecin 2002.
2. Meyer Z.: Empiryczny model konsolidacji torfów. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 1988.
3. Meyer Z.: Empirical model of peat consolidation. International Workshop Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat, Delft 1993.

4. Meyer Z.: Advances in Modelling of Peat Consolidation vol. 3, Szczecin 2000.
5. Puzyrewski R., Sawicki J.: Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki. PWN, Warszawa 1987.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

The paper presents empirical model of organic soils settlement in laboratory tests. Settlement is described by means of elementary curve. Parameters p , D , α of elementary curve are functions of load, and physical and mechanical properties of soil. Authors define the time scale of the model settlement. This scale allows to introduce dimensionless parameters which control the phenomenon. The time scale is a subject of verification against measured parameters of the analysed settlement. To describe this phenomenon the time scale has essential meaning. The coefficient of kinematic viscosity is adopted to the time-constant.