

PRACE ORYGINALNE

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 3 (49), 2010: 3–11

(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 3 (49), 2010)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 3 (49), 2010: 3–11

(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 3 (49), 2010)

Wojciech SAS, Katarzyna GABRYŚ, Alojzy SZYMAŃSKI

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Wpływ tempa przykładania obciążenia na parametry odkształceniowe gruntów organicznych

The influence of loading rate on deformation of organic soil

Słowa kluczowe: grunty organiczne, badania edometryczne, charakterystyki odkształceniowe

Key words: organic soils, oedometer tests, deformation characteristics

Wprowadzenie

Rozwój przemysłu powoduje wzrost zapotrzebowania na różne tereny pod zabudowę. Coraz częściej zdarza się, iż atrakcyjne lokalizacje tych terenów związane są z obecnością gruntów słabonośnych. Określenie „grunty słabonośne” odnosi się głównie do gruntów o pochodzeniu organicznym, na przykład torfów oraz nieskonsolidowanych gruntów spoistych, o dużej wilgotności (Meyer i Kozłowski 2007). Zwiększenie wykorzystania organicznego podłoża do posadowienia różnych budowli ziemnych, jak zapory zbiorników wodnych, obwałowania rzek oraz cieków wodnych czy nasypy drogowe, spowodowa-

ło konieczność lepszego zapoznania się z właściwościami gruntów organicznych i dokładniejszej analizy ich zachowania pod przyłożonym obciążeniem.

Grunty pochodzenia organicznego charakteryzuje duże zróżnicowanie właściwości zależne od rodzaju oraz zawartości poszczególnych składników mineralnych i organicznych. Prócz tego grunty te cechuje nieliniowa zmienność uzyskiwanych charakterystyk (Lechowicz 1992). Problemy inżynierskie, które stwarza posadowienie nasypów na organicznym podłożu, są niezwykle skomplikowane m.in. ze względu na duże pionowe i poziome odkształcenia podłoża, występujące zarówno w trakcie, jak i po ukończeniu budowy nasypu. Dodatkowo duża ściśliwość tych gruntów, niewielkie początkowe naprężenia efektywne oraz mała początkowa wytrzymałość to przyczyny dużych trudności z gwarancją stateczności budowli. W rezultacie niemożliwe jest jednoetapowe posadowie-

nie budowli na organicznym podłożu, bez wcześniejszego jego wzmocnienia. Konieczne jest więc przykładanie obciążenia etapowo bądź na wzmocnione podłoże, a istotnym problemem staje się wybór właściwej metody budowy, który polega na znalezieniu rozwiązania optymalnego pod względem nie tylko technicznym, ale także ekonomicznym (Szymański 1991, Hartlen i Wolski 1996).

Przebieg procesu konsolidacji podłoża organicznego

Proces deformacji organicznego podłoża cechuje złożony przebieg odkształceń oraz długi czas trwania. Konsolidacja gruntów, charakteryzujących się dużą ścisłością, składa się z trzech głównych etapów: I – odkształcenia natychmiastowego, II – odkształcenia konsolidacyjnego, III – odkształcenia wtórnego (Den Haan 1994, Koda 1996).

Etap I zwany jest konsolidacją początkową bądź też odkształceniem nagłym lub natychmiastowym. Etap ten zachodzi w momencie przyłożenia obciążenia, aż do chwili wytworzenia nadwyżki ciśnienia wody, znajdującej się w porach gruntowych. Powietrze usuwane zostaje ze struktury gruntu, następuje sprężyste zginanie oraz reorientacja cząstek gruntu. Podczas konsolidacji natychmiastowej zachodzi wypychanie powietrza, nie zaś wody. Odkształcenia początkowe przebiegają w warunkach bez odpływu i przyjmuje się, iż są równe odkształceniom sprężystym.

Etap II to konsolidacja pierwotna, zachodząca wtedy, gdy nadwyżka ciśnienia wody porowej jest stosunkowo duża (Sas i in. 2007). W etapie tym ma

miejsce rozpraszanie nadwyżki wody, spowodowane ograniczeniem przestrzeni między cząsteczkami gruntu zmieniającymi swe położenie, budując jednocześnie nową strukturę, odporną na obciążenie zewnętrzne. Kiedy zostanie przyłożone pełne obciążenie, a cząsteczki gruntu ułożą się na skutek zachodzących reakcji, to zaistniała sytuacja odpowiada teorii Therzagiego, dotyczącej jednowymiarowych zmian objętości (Therzaghi 1943). Odkształcenia etapu II są ściśle związane z redukcją objętości gruntu oraz stopniową jego konsolidacją. Przepuszczalność gruntu jest tu najważniejszym czynnikiem, od którego zależy czas postępowania odkształceń konsolidacyjnych. Im mniejsza jest przepuszczalność gruntu, tym dłuższej trwają odkształcenia.

Etap III to odkształcenia wtórne, wynik długotrwałych strukturalnych odkształceń gruntu (efekt pełzania). Mimo rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody deformacja gruntu jest nadal widoczna. Konsolidacja utrzymuje się w nieprzerwanym odcinku czasu i bardzo powolnym tempie. Prędkość zachodzących w etapie III odkształceń strukturalnych zależy od właściwości reologicznych ośrodka, tj. lepkości. Większa lepkość strukturalna gruntu daje dłuższy proces pełzania. Ścisłość wtórna to rezultat plastycznych odkształceń, na deformację szkieletu gruntowego wpływa stałe naprężenie efektywne (Sas i in. 2007).

Odkształcenia gruntów uzależnione są od parametrów opisujących ich ścisłość oraz od wielkości przykładanych obciążeń. Przepuszczalność gruntu, proces pełzania szkieletu oraz warunki drenażu wpływają na samą zmianę od-

kształceń w czasie. Deformacji szkieletu towarzyszy zmiana porowatości ośrodka, pociągając za sobą zmianę cech fizycznych i mechanicznych, m.in. współczynnika filtracji.

Nieliniowy przebieg charakterystyk wytrzymałości, odkształcalności oraz przepływu wody w gruncie powoduje ogromne trudności z matematycznym opisem procesu odkształcenia gruntów organicznych. Niezbędne wydaje się zachowanie właściwego, wolnego tempa wznoszenia budowli na gruncie słabym, gdyż wówczas osiąga się zwiększenie parametrów wytrzymałościowych ośrodka. Nieodpowiednie obciążanie oraz zbyt szybkie tempo budowy może stać się bezpośrednią przyczyną ewentualnej utraty nośności podłoża oraz stateczności konstrukcji (Lechowicz i Szymański 2002b).

Podsumowując, o wielkości oraz zmianach w czasie wartości odkształceń podłoża decydują: miąższość oraz układ słabych warstw, zasięg wraz z harmonogramem obciążania, rodzaj gruntu oraz historia jego naprężenia, charakterystyka przepływu wody w gruncie – początkowa przepuszczalność gruntu i zmiana przepuszczalności w trakcie trwania procesu odkształcenia, warunki drenażu wody porowej – długość drogi drenażu, przepuszczalność drenujących warstw (Foott i Ladd 1980, Szymański 1991).

Parametry oceny odkształceń podłoża organicznego

Główną charakterystyką, nieodzowną w obliczeniach odkształceń podłoża, jest zależność między naprężeniem, odkształceniem oraz czasem. Współzależ-

ność ta przedstawiana jest za pomocą: wskaźnika ścisłości – C_c (C_r), współczynnika zmian objętościowych – m_{vo} (m_v), modułu edometrycznego – M_o (M), modułu odkształcalności postaciowej – G_o (G_{max}), współczynnika filtracji – k , współczynnika ścisłości – c_v , współczynnika ścisłości wtórnej – c_u .

Wymienione parametry określone są przy użyciu charakterystyk konsolidacyjnych, na podstawie badań edometrycznych typu IL, tj. z obciążeniem stopniowym, albo CL – z obciążeniem ciągłym. Badania edometryczne jednakże wzbudzają często wiele kontrowersji, gdyż wykorzystywane próbki mogą ulec naruszeniu podczas pomiarów, a ponadto otrzymane wyniki trudno jednoznacznie zinterpretować. Stąd do wstępnego określenia parametrów konsolidacji oraz ścisłości służą zależności empiryczne pozyskiwane w wielu laboratoriach. Wadą wzorów empirycznych jest to, iż tworzone są one w wyniku przeprowadzenia pewnej liczby badań określonego rodzaju gruntu i dla niego są ważne. Ich zastosowanie do odmiennych gruntów staje się przyczyną istotnych błędów (Lechowicz i Szymański 2002a).

Cel i metodyka badań

W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych jako przykład gruntu organicznego wykorzystano kredę jeziorną. Próbki tego materiału pobrano do analiz z poligonu doświadczalnego uczelni zlokalizowanego na Warmii i Mazurach, na Łąkach Dymerskich, leżących między gminą Dźwierzuty a Biskupcem. Próbki kredy jeziornej o nienaruszonej strukturze pobrano z głębokości 0,8–1,0 m me-

todą wciskaną, z zastosowaniem próbników do pobierania prób NNS. Pobrano materiał w kształcie bloków (block samples) o wielkości 50 × 50 cm, z których następnie w laboratorium przygotowano próbki do analiz edometrycznych. Przed rozpoczęciem właściwej części badań próbki były rekonsolidowane do σ'_{v0} (napężenie geostatyczne w podłożu). Właściwości fizyczne badanej kredy jeziornej zaprezentowano w tabeli 1.

Celem określenia parametrów koniecznych do opisanie przebiegu odkształceń słabonośnych badanej kredy jeziornej w Laboratorium Geotechnicznym Katedry Geoinżynierii SGGW wykonano standardowe badania edometryczne. Przeprowadzone analizy w płaskim, jednoosiowym stanie odkształcenia umożliwiły uzyskanie charakterystyk odkształceniowych, a pozyskane zależności w dalszej kolejności wykorzystywane są w prognozie osiadań gruntów słabych.

Do badania wykorzystano dwa edometry – nr 1 i 6, znajdujące się w laboratorium. Zastosowano badanie edometryczne ze stopniowo wzrastającym obciążeniem próbek typu IL (badanie w edometrze nr 1) oraz ze stałym obciążeniem próbek (badanie w edometrze nr 6).

Próbka kredy została kolejno obciążona: 0,125, 0,25, 0,5, 1 i 2 kg, co

odpowiadało napężeniu pionowemu równemu: 7,5, 12,5, 25, 50 i 100 kPa. Podczas badania, obserwując zachowanie się gruntu pod obciążeniem, wykreślano krzywą konsolidacji, czyli zależność zmiany wysokości próbki od czasu. Dzięki temu można było zaobserwować brak dalszych odkształceń i zdecydować o przejściu do kolejnego etapu – dociążenia próbki. Ostatni etap obciążenia zakończono przy napężeniu pionowym równym 100 kPa.

Badanie w jednoosiowym stanie odkształcenia przeprowadzono na dwa sposoby. Badanie edometryczne typu IL umożliwiło wykreślenie krzywej konsolidacji, czyli uzyskanie zależności między wysokością próbki (h) a czasem (t) oraz narysowanie krzywej ściśliwości, która przedstawia zależność odkształcenia (ε) rozumianego jako zmiana wysokości próbki do początkowej wysokości próbki) bądź wskaźnika porowatości (e) oraz składowej pionowej naprężenia efektywnego (σ'_v).

Drugi sposób przeprowadzenia badania edometrycznego dotyczył badania z osobnym, stałym obciążeniem dla kolejnych próbek gruntu. Procedura postępowania podczas wykonywania badania była identyczna jak przy badaniu typu IL, z tą różnicą, iż każdy etap obciążenia był wykonywany na oddzielnych

TABELA 1. Zestawienie fizycznych właściwości badanego gruntu organicznego
TABLE 1. Composition of physical properties of examined soft soil

Właściwości / Properties	Symbol	Jednostka Unit	Kreda jeziorna Lacustrine chalk
Wilgotność Water content	w	%	150–300
Gęstość objętościowa Bulk density	ρ	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1,15–1,41
Gęstość objętościowa szkieletu Dry density	ρ_d	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0,29–0,51

próbkach, a wynikiem tych badań były tworzone krzywe przedstawiające przebieg osiadania próbki w czasie – krzywe konsolidacji.

Wyniki i analiza badań

Przeprowadzone badania wykazały wpływ tempa posadowienia na nośność podłoża. Próbka gruntu poddana stopniowemu dociążaniu osiadła bardziej niż próbki dociążane stałym obciążeniem, a uzyskane wyniki zostały zestawione i zaprezentowane w tabeli 2. Otrzymane wyniki potwierdzają fakt występowania odkształceń wtórnych podczas procesu konsolidacji badanych próbek gruntu.

Przeprowadzając dalszą analizę uzyskanych wyników, w przypadku badania edometrycznego ze stopniowo rosnącym obciążeniem obserwuje się zwiększenie wartości parametrów ścisłości (wskaźników ścisłości – C_c i C_r , oraz modułów ścisłości – M_o i M) wraz ze zwiększeniem przyłożonego obciążenia, wzrost współczynnika wtórnej konsolidacji – c_α (rys. 2), a zmniejszenie się wartości parametru konsolidacji (współczynnika konsolidacji – c_v) – tabela 3, rysunek 1. Po przyłożeniu stałych obciążeń na poszczególne próbki kredy jeziornej wartości c_v i c_α rosną wraz z przyrostem pionowej składowej naprężenia, co obrazuje tabela 4 oraz rysunki 1 i 2.

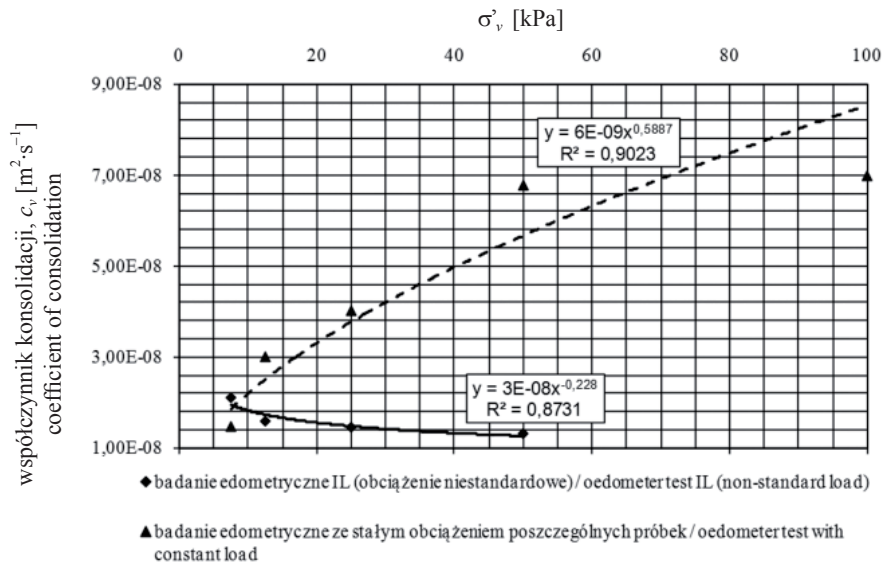
TABELA 2. Zestawienie osiadań próbek kredy jeziornej przy zadanym obciążeniu
TABLE 2. Composition of lacustrine chalk's settlement by the given load

σ [kPa]	Badanie ze stopniowo rosnącym obciążeniem Investigation by gradually increasing load	Badanie ze stałym obciążeniem Investigation by constant load
	osiadanie / settlement [mm]	
7,5	1,07	1,28
12,5	1,84	2,11
25,0	3,50	3,13
50,0	5,68	4,32
100,0	7,47	6,28

TABELA 3. Zestawienie parametrów z badania edometrycznego IL ze stopniowo zwiększającym obciążeniem

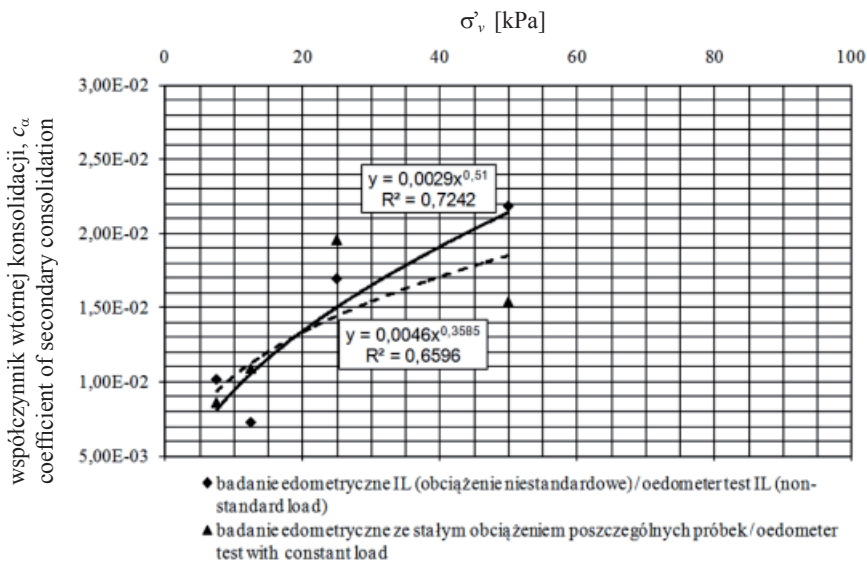
TABLE 3. Composition of parameters from oedometer test IL with gradually increasing load

σ [kPa]	M [kPa]	C_r/C_c [-]	c_v [$m^2 \cdot s^{-1}$]	c_α [-]
7,5	178,57	0,048	2,100 E-08	1,02 E-02
12,5	156,25	0,144	1,586 E-08	0,73 E-02
25,0	204,92	0,203	1,451 E-08	1,70 E-02
50,0	271,74	0,306	1,314 E-08	2,19 E-02
100,0	476,19	0,349	×	×



RYSUNEK 1. Zmiana współczynnika konsolidacji (c_v) w zależności od naprężenia (σ'_v) z badania edometrycznego kredy jeziornej ze stopniowo zwiększającym się obciążeniem oraz przy stałym obciążeniu poszczególnych próbek

FIGURE 1. Change of coefficient consolidation (c_v) with dependence of stress (σ'_v) from oedometer test of lacustrine chalk with gradually increasing load and constant load



RYSUNEK 2. Zmiana współczynnika wtórnej konsolidacji (c_α) w zależności od naprężenia (σ'_v) z badania edometrycznego kredy jeziornej ze stopniowo zwiększającym się obciążeniem oraz przy stałym obciążeniu poszczególnych próbek

FIGURE 2. Change of secondary coefficient consolidation (c_α) with dependence of stress (σ'_v) from oedometer test of lacustrine chalk with gradually increasing load and constant load

TABELA 4. Zestawienie parametrów z badania edometrycznego ze stałym obciążeniem
TABLE 4. Composition of parameters from oedometer test with constant load

σ [kPa]	c_v [m ² ·s ⁻¹]	c_a [-]
7,5	1,475 E-08	0,86 E-02
12,5	3,013 E-08	1,09 E-02
25,0	4,027 E-08	1,96 E-02
50,0	6,790 E-08	1,54 E-02
100,0	6,999 E-08	1,80 E-02

Duże, zwiększające się wartości edometrycznych modułów ścisłości wskazują, że badane grunty są bardzo ściśliwe, a ściśliwość ich zwiększa się wraz ze zwiększaniem przykładanego na grunt obciążenia. Na szczególną uwagę zasługuje rosnący współczynnik konsolidacji (c_v) przy badaniu ze stałym obciążeniem przykładanym na poszczególne próbki (rys. 1), co wskazuje na gorszą jakość tego typu badania, a tym samym na gorszy sposób przykładania obciążenia. Stopniowo zwiększające się obciążenie to w rzeczywistości przykład etapowego wznoszenia konstrukcji, gdzie zachodzi stopniowe, ale wciąż zwiększające się przekazywanie obciążenia na grunt. Ta procedura dociążania jest korzystna, gdyż dochodzi do skonsolidowania podłoża, grunt może poprawić swą wytrzymałość i tym samym przenieść większe obciążenia. Analizy edometryczne prowadzone ze stałym obciążeniem odwzorowują szybki oraz nagły przyrost obciążenia na podłożu, nie dopuszczając do prawidłowej konsolidacji gruntu. Prowadzi to do przenoszenia mniejszych obciążeń niż przy etapowej budowie.

Krzywe ściśliwości z badań edometrycznych kredy jeziornej ze stopniowo zwiększającym się obciążeniem oraz

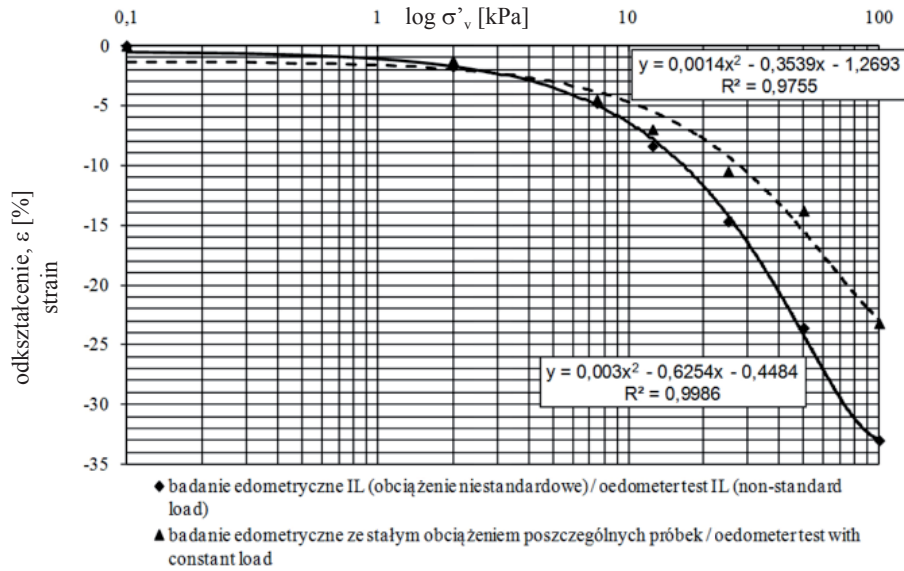
przy stałym obciążeniu poszczególnych próbek zaprezentowano na rysunku 3. Na rysunku 4 ukazano zależność odkształcenia w funkcji naprężenia.

Podsumowanie

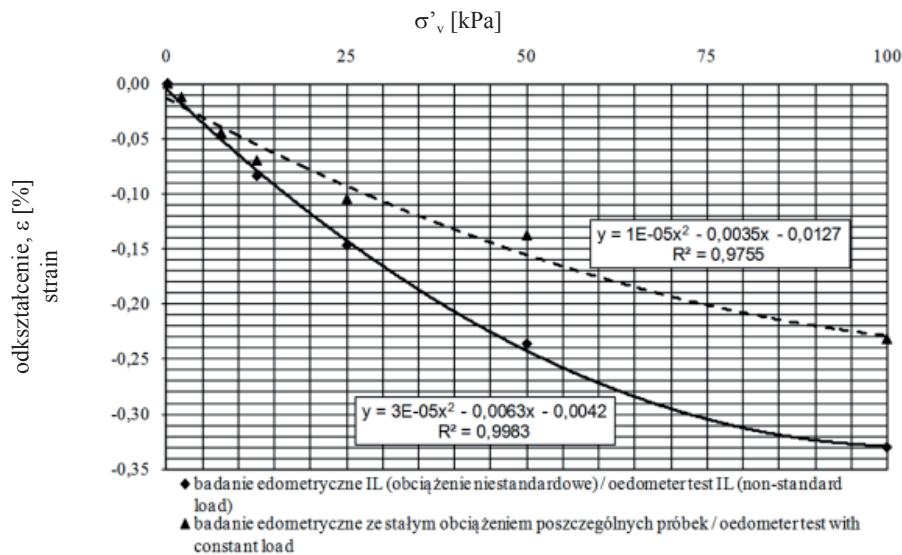
Uzyskane wyniki badań wykazują dużą złożoność problematyki, dotyczącej słabych gruntów organicznych reprezentowanych przez kredę jeziorną. Grunty organiczne cechuje zróżnicowane zachowanie pod obciążeniem. Rozmaitość ta dowodzi mnogości czynników, które decydują o przebiegu odkształcenia tych gruntów w czasie i co za tym idzie – o prognozie osiadań, a jednym z tych czynników jest tempo i wielkość przykładanego obciążenia.

Wyniki badań wykonane na reprezentatywnych próbkach gruntu organicznego wskazują na dużą zmienność parametrów geotechnicznych podczas procesu deformacji podłoża organicznego. Obliczenia przebiegu odkształceń powinny być zatem oparte na nieliniowych związkach, ukazujących zależność parametrów gruntowych od poziomu naprężenia efektywnego. Przy analizie odkształceń gruntu niezbędne staje się również uzależnienie charakterystyk opisujących zmienność parametrów w czasie od danego zakresu naprężenia i tempa jego przykładania.

W dalszej analizie wpływu sposobu przykładania obciążenia na parametry odkształceniowe należy uwzględnić również zmienność parametrów przepuszczalności, ściśle związanych z poziomem naprężenia, zmianami wskaźnika porowatości oraz właściwościami filtracyjnymi ośrodka gruntowego.



RYSUNEK 3. Krzywa ściśliwości z badania edometrycznego kredy jeziornej ze stopniowo zwiększającym się obciążeniem oraz przy stałym obciążeniu poszczególnych próbek
 FIGURE 3. Compression curve from oedometer test of lacustrine chalk with gradually increasing load and constant load



RYSUNEK 4. Zmiana odkształcenia (ε) w zależności od naprężenia (σ'v) z badania edometrycznego kredy jeziornej ze stopniowo zwiększającym się obciążeniem oraz przy stałym obciążeniu poszczególnych próbek
 FIGURE 4. Change of strain (ε) with dependence of stress (σ'v) from oedometer test of lacustrine chalk with gradually increasing load and constant load

Literatura

- Den HAAN E.J. 1994: One – dimensional behavior. Proceedings of the International Workshop on Advances in understanding and Modeling the Mechanical Behaviour of Peat. 16–18 June 1993, Delft, Netherlands.
- FOOTT R., LADD C.C. 1980: Undrained settlement of plastic and organic clays. *J. Geot. Eng. Div.* 107; GT8.
- HARTLEN J., WOLSKI W. 1996: Embankments on organic soils. Elsevier, Amsterdam.
- KODA E. 1996: Wpływ drenażu pionowego na przyspieszenie konsolidacji gruntów organicznych. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.
- LECHOWICZ Z. 1992: Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKI A. 2002a: Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Część I. Metodyka badań. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKI A. 2002b: Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Część II. Metodyka obliczeń. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- MEYER Z., KOZŁOWSKI T. 2007: Określenie współczynnika Poissona dla gruntów słabych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 5.
- SAS W. i in. 2007: Charakterystyki odkształceń podłoża słabonośnego uzyskane w badaniach terenowych. *Inżynieria i Budownictwo* 7–8.
- SZYMAŃSKI A. 1991: Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.

THERZAGHI K. 1943: Theoretical soil mechanics. John Wiley and Sons, New York.

Summary

The influence of loading rate on deformation of organic soil. In this review paper the changes of deformation parameters in the organic soils characteristics are presented. The main view was put on the influence of loading rate on presented soils. The results of soft soils used to the analysis were obtained in laboratory using oedometer tests. To describe the deformation process of organic soils two kinds of oedometer tests were held: with gradually increasing load and constant load. Both techniques show the wide range of factors determine deformations and settlements of organic subsoil, among which important are also the velocity and the value of loading rate.

Authors' address:

Wojciech Sas, Katarzyna Gabrys, Alojzy Szymański
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa,
Poland
e-mail: wojciech_sas@sggw.pl
katarzyna_gabrys@sggw.pl
alojzy_szymanski@sggw.pl