

Anna DROŹDŹ

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering WAU

Badania charakterystyk odkształceniowych gruntów słabonośnych

Laboratory investigations of deformation characteristics in soft soils

Słowa kluczowe: grunty organiczne, badania laboratoryjne, charakterystyki odkształceń, konsolidacja, odkształcenia wtórne

Key words: organic soils, laboratory tests, deformation characteristics, consolidation, secondary compression

Wprowadzenie

Posadawianie budowli na słabych gruntach organicznych stwarza szczególne problemy. Najbardziej oczywisty z nich to duże pionowe i poziome odkształcenia podłoża, pojawiające się podczas budowy i po jej zakończeniu. Przemieszczenia podłoża często występują bardzo szybko, lecz mogą również rozwijać się przez bardzo długi okres na skutek efektu pełzania. Mała wytrzymałość początkowa gruntów organicznych często powoduje trudności z zapewnieniem stateczności budowli, w związku z czym obciążenie musi być przykładane etapowo lub na wzmocnione podłoże.

Wybór metody budowy polega na poszukiwaniu rozwiązania optymalnego

pod względem ekonomicznym i technicznym. W zależności od warunków geotechnicznych podłoża, wymagań stawianych budowli i czasu budowy dokonuje się wyboru jednej z trzech podstawowych metod posadowienia budowli, polegających na:

- całkowitej lub częściowej wymianie gruntu słabego na bardziej nośny materiał,
- dostosowaniu obciążenia od nasypu do właściwości podłoża lub przeniesieniu obciążenia na bardziej wytrzymałe warstwy gruntu,
- ulepszeniu właściwości gruntu przez wcześniejsze zabiegi.

Podstawą wyboru odpowiedniej metody posadowienia konstrukcji jest ocena stateczności budowli oparta na analizie odkształceń i procesu konsolidacji podłoża. W procesie odkształcania gruntu pod obciążeniem następuje przyrost naprężenia efektywnego, co powoduje wzrost wytrzymałości na ścinanie, a zatem i poprawę warunków stateczności budowli. Proces wzmocnienia pod-

łoża uzależniony jest jednak od intensywności rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach, a zatem od rodzaju i miąższości gruntu organicznego i jego przepuszczalności (Lechowicz i Szymański 2002).

Dlatego projektowanie posadowień budowli musi być poprzedzone analizą wartości i przebiegu w czasie odkształceń podłoża oraz rozpraszania w nim ciśnienia porowego. Wartość odkształceń podłoża prognozowana jest na podstawie wzorów empirycznych opracowanych dla danego rodzaju gruntu i wartości obciążenia lub z wykorzystaniem modeli gruntowych opisujących zależność naprężenie – odkształcenie albo naprężenie – odkształcenie – czas, z wykorzystaniem teorii konsolidacji.

Przebieg procesu osiadań gruntów słabych można podzielić na trzy etapy:

- osiadanie początkowe (S_i), wynikające z postaciowych odkształceń nasyconego ośrodka gruntowego najczęściej w warunkach przyrostu nadwyżki ciśnienia porowego; występuje ono głównie podczas obciążania podłoża i w krótkim czasie po przyłożeniu obciążenia,
- osiadanie konsolidacyjne (S_c), wynikające z rozpraszania powstałej po przyłożeniu obciążenia nadwyżki ciśnienia porowego; prędkość konsolidacji pierwotnej zależy od zmian objętościowych i charakterystyk przepuszczalności gruntu, jak również od usytuowania warstw drenujących,
- ścisłość wtórna – pełzanie (S_s), wynikająca z plastycznych odkształceń szkieletu gruntowego pod wpływem naprężenia efektywnego; zależy ona od właściwości reolo-

gicznych gruntu i jest rozłożona w czasie.

Wyniki badań prowadzonych przez wielu badaczy (Gibson i Lo 1961b, Szymański 1991) wskazują, że charakterystyki opisujące proces konsolidacji gruntów organicznych są nieliniowe, co w znacznym stopniu utrudnia wykorzystanie ich w metodach obliczeniowych.

Niezbędne więc jest poprawne oszacowanie parametrów lub charakterystyk odkształceniowych gruntów opisujących poszczególne etapy procesu odkształcenia. Charakterystyki definiujące proces odkształcenia uzależniają wartość parametru od stanu naprężenia i czasu dla danego rodzaju gruntu.

Parametry i charakterystyki niezbędne w prognozowaniu odkształceń

Określenie parametrów gruntowych, opisujących zachowanie gruntu pod budowlą, wykonuje się z różną dokładnością w zależności od ważności projektowanej konstrukcji i miąższości warstwy słabej.

W obliczeniach odkształceń podłoża główną charakterystyką, niezbędną w obliczeniach, jest zależność pomiędzy naprężeniem, odkształceniem i czasem, opisywana za pomocą takich parametrów, jak: wskaźnik ścisłości (C_c), współczynnik zmian objętościowych (m_v), moduł edometryczny (M), współczynnik filtracji (k) oraz współczynnik ścisłości wtórnej (C_a). Parametry te określa się na podstawie charakterystyk konsolidacyjnych, uzyskanych z badań edometrycznych (badania

IL – ze stopniowym obciążaniem, badania CL – z ciągłym obciążaniem).

Określanie parametrów ścisłości i konsolidacji dla gruntów organicznych z badań edometrycznych jest często kontrowersyjne ze względu na naruszenie próbek oraz trudności w interpretacji otrzymanych wyników (Hanrahan i Rogers 1981, Landva i La Rochelle 1982, Landva i in. 1986). Dlatego też wstępnego oszacowania tych parametrów można dokonać, korzystając z zależności empirycznych pomiędzy współczynnikiem zmian objętościowych (m_v) lub modułem edometrycznym (M) oraz współczynnikiem (C_a) a wilgotnością (w_n) i stopniem rozkładu (H) uzyskiwanych w wielu laboratoriach (Flaate 1968, Helenelund 1975, Azzouz i in. 1976, Kogure i Ohira 1977, Carlsten 1988).

Trzeba jednak pamiętać, że wzory empiryczne powstają w wyniku przeprowadzenia określonej liczby badań próbek wybranego gruntu. Ich zastosowanie do innych gruntów, odmiennych od tych, dla których je uzyskano, może powodować istotne błędy.

W szczególnych przypadkach przy projektowaniu ważnych obiektów na podłożu słabym o dużej miąższości wymagane jest określenie przebiegu odkształceń w stanie płaskim. Występuje wówczas konieczność określenia w badaniach trójosiowych parametrów gruntu zdefiniowanych teorią sprężystości i plastyczności, tj. dwóch z czterech stałych sprężystych: modułu Younga (E), współczynnika Poissona (ν) lub modułu ścinania (G) i modułu odkształcenia objętościowego (K), oraz parametrów opisujących obwiednie plastyczności gruntu.

Należy zauważyć, że zestaw parametrów gruntowych wymaganych w obliczeniach projektowych zależy od stopnia ważności obiektu, warunków podłoża oraz stosowanej metody obliczeń, a także od dostępności sprzętu laboratoryjnego i programów numerycznych.

Badania charakterystyk procesu konsolidacji gruntów organicznych

Analiza przebiegu odkształceń.

Analizę przebiegu odkształceń podłoża organicznego budowli ziemnych przeprowadzono, wykorzystując wyniki badań terenowych wykonanych w Katedrze Geoinżynierii SGGW na poligonach doświadczalnych Antoniny, Mielimąka i Kampus SGGW. Na poligonach tych wykonano próbne obciążenia nasypami doświadczalnymi posadowionymi na podłożu torfowo-gytiowym. Właściwości geotechniczne badanych gruntów organicznych przedstawiono w tabeli 1 i tabeli 2.

Z obserwacji terenowych rozwoju odkształceń wynika, że poziome przemieszczenia pojawiają się głównie w trakcie przyrostu obciążenia, wywołując osiadanie początkowe budowli, oraz podczas wtórnych odkształceń w warunkach stanu krytycznego, wywołując tzw. konsolidację trzeciorzędową prowadzącą do utraty stateczności budowli. Wyniki te dowodzą, że przemieszczenia poziome nie odgrywają znaczącej roli w procesie deformacji gruntów organicznych jedynie podczas przebiegu konsolidacji filtracyjnej. Zatem obliczenia przebiegu osiadań podłoża organicznego budowli

TABELA 1. Właściwości fizyczne gruntów organicznych z poligonu doświadczalnego Antoniny
TABLE 1. Physical properties of organic soils at Antoniny site

Właściwości Properties	Symbol	Jednostka Unit	Torf Peat	Gytia Calcareous soil
Wilgotność Water content	w	%	310–315	105–114
Granica plastyczności Plastic limit	w_p	%	185–200	50–58
Granica płynności Liquid limit	w_L	%	315–320	104–112
Gęstość właściwa Density of solid particles	ρ_s	kN/m ³	> 15,8	> 25,5
Gęstość objętościowa Bulk density	ρ	kN/m ³	10,8–12,2	14,1–14,3
Gęstość objętościowa szkieletu Dry density	ρ_d	kN/m ³	2,6–3,0	6,7–6,9
Zawartość części organicznych Organic matter content	I_{OM}	%	74–88	32–38
Stopień rozkładu Degree of humification	R	%	50–70	–

TABELA 2. Właściwości fizyczne torfu ze skarpy ursynowskiej w Warszawie
TABLE 2. Physical properties of peat at Campus SGGW test site

Właściwości Properties	Symbol	Jednostka Unit	Torf Peat
Wilgotność / Water content	w	%	131–136
Gęstość właściwa / Density of solid particles	ρ_s	kN/m ³	18,85
Gęstość objętościowa / Bulk density	ρ	kN/m ³	12,3–12,44
Gęstość objętościowa szkieletu / Dry density	ρ_d	kN/m ³	5,2–5,3
Zawartość części organicznych Organic matter content	I_{OM}	%	39,62–40,58
Stopień rozkładu / Degree of humification	R	%	60

ziemnych, wykorzystując teorię jednowymiarowej konsolidacji, powinny być uzupełniane prognozą osiadań powstających podczas odkształceń plastycznych, będących efektem pracy gruntu w stanie krytycznym w warunkach bez odpływu w trakcie obciążania oraz w warunkach pełnego drenażu w trakcie rozwoju odkształceń wtórnych (Szymański i in. 2005).

Charakterystyki opisujące odkształcenie początkowe. Podczas wznoszenia budowli ziemnych na gruntach słabych obciążenie przykłada się na ograniczonej powierzchni podłoża, wynikającej z wymiarów budowli. Na skutek tego pojawiają się w podłożu odkształcenia postaciowe, przebiegające w warunkach bez odpływu i powodujące początkowe przemieszczenia gruntu niezależne od czasu. Wartości początkowych przemieszczeń pionowych i poziomych określone są najczęściej przy wykorzystaniu równań teorii sprężystości przy założeniu

słabych obciążenie przykłada się na ograniczonej powierzchni podłoża, wynikającej z wymiarów budowli. Na skutek tego pojawiają się w podłożu odkształcenia postaciowe, przebiegające w warunkach bez odpływu i powodujące początkowe przemieszczenia gruntu niezależne od czasu. Wartości początkowych przemieszczeń pionowych i poziomych określone są najczęściej przy wykorzystaniu równań teorii sprężystości przy założeniu

niu stałych wielkości współczynnika Poissona $\nu = 0,5$ i modułu odkształcenia bez odpływu (E_u).

Badania laboratoryjne modułu E_u przeprowadzone w aparacie trójosiowym wskazują, że wartość tego parametru w gruntach organicznych jest zmienna i zależy od poziomu naprężenia efektywnego (rys. 1, 2).

Analiza wyników badań wskazuje, że zmienność modułu E_u jest mała przy poziomie naprężenia mniejszego od naprężenia prekonsolidacji (σ'_p). Natomiast po przekroczeniu naprężenia prekonsolidacji (σ'_p) następuje znaczące zmniejszenie wartości modułu E_u wraz ze wzrostem pionowej składowej naprężenia (σ'_v). Pomierzone wartości modułu E_u zawierały się w granicach $E_u = 300 \div 3000$ kPa dla torfu i $E_u = 300 \div 8000$ kPa dla gytii.

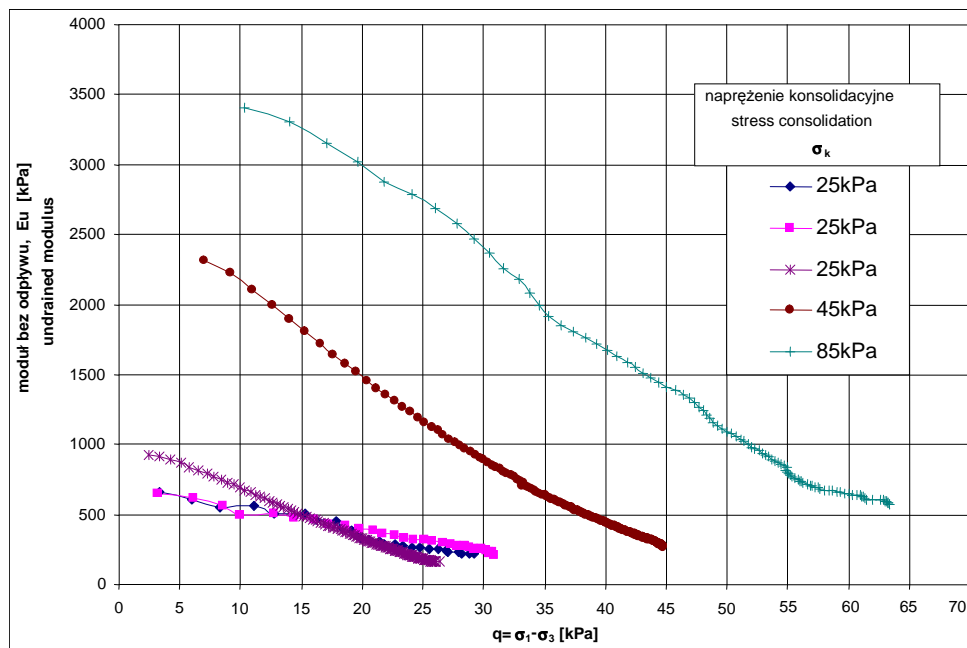
Charakterystyki opisujące odkształcenia konsolidacyjne. Wyniki badań laboratoryjnych gruntów organicznych wskazują, że na potrzeby obliczeń inżynierskich można przyjąć logarytmiczną zależność pomiędzy wskaźnikiem porowatości (e) a naprężeniem pionowym (σ'_v) w postaci:

$$e = e_o - C_c \log(\sigma'_v / \sigma'_{v0})$$

Analiza wyników badań przeprowadzonych przez wielu autorów (Kogure i in. 1986, Szymański 1991, Sas 2001) wskazuje, że wartość wskaźnika ścisłości (C_c) dla gruntów organicznych zależy od wskaźnika porowatości (e).

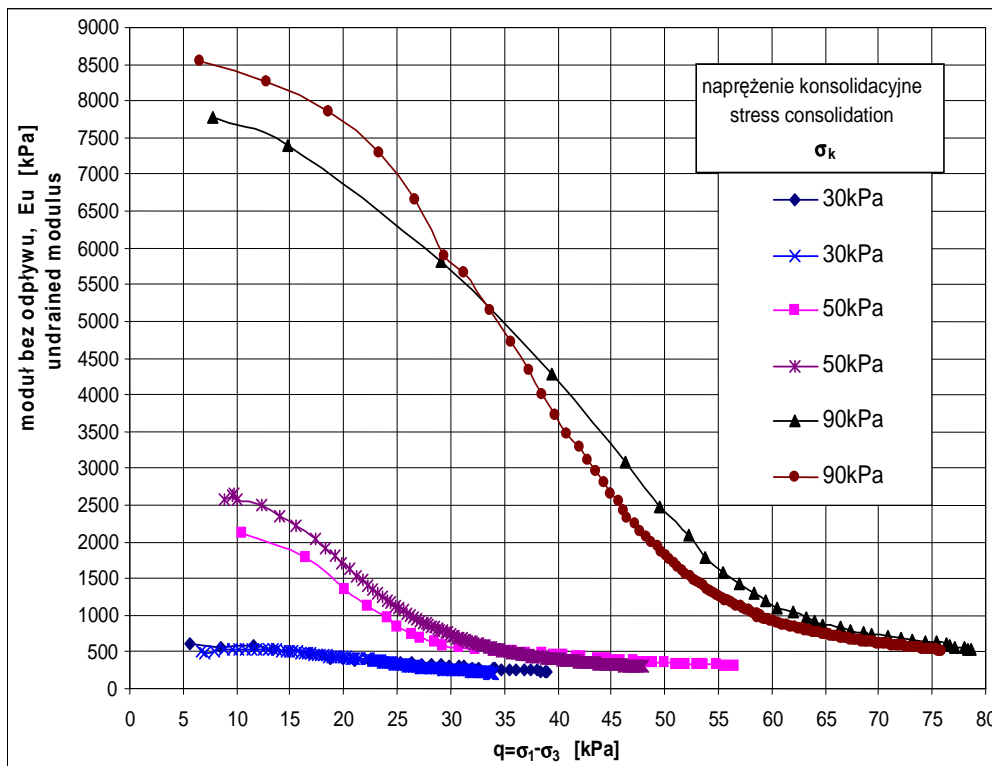
Dla badanych gruntów organicznych uzyskano zmienność wskaźnika (C_c) w zakresie $C_c = 0,4 \div 5$.

W obliczeniach konsolidacji obciążonego podłoża organicznego wykony-



RYSUNEK 1. Zmienność modułu odkształcenia bez odpływu (E_u) uzyskanego w badaniu trójosiowym CU torfu

FIGURE 1. Variability of undrained modulus (E_u) obtained in triaxial tests CU for peat



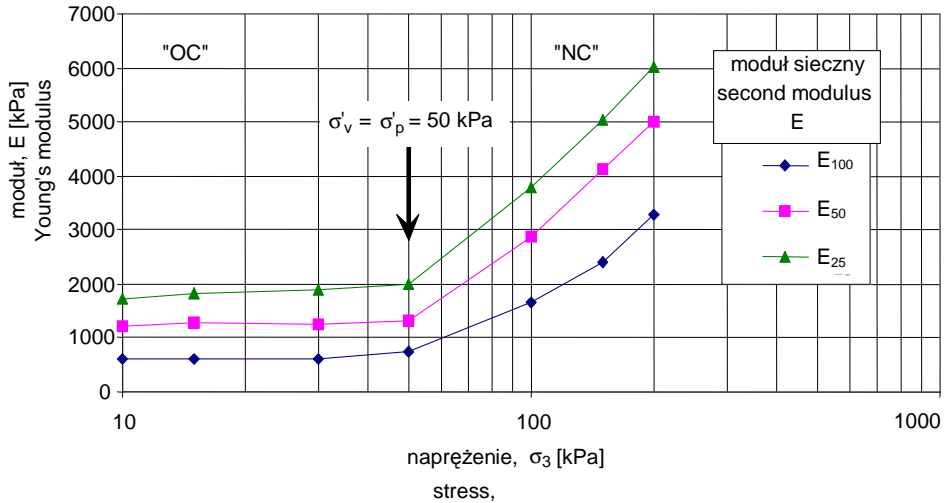
RYSUNEK 2. Zmienność modułu odkształcenia bez odpływu (E_u) uzyskanego z badań trójosiowych CU w warunkach bez odpływu gytii
 FIGURE 2. Variability of undrained modulus (E_u) obtained in triaxial tests CU for calcareous soil

wanych w warunkach płaskiego stanu odkształcenia wykorzystuje się moduł odkształcenia (E) wyznaczany w badaniach trójosiowych z pełnym drenażem próbek gruntu. W badaniach tych wyznacza się zwykle wartości charakterystyczne modułu, definiując je jako E_{25} , E_{50} i E_{100} odniesione do 25, 50 i 100% maksymalnej wartości dewiatora naprężenia.

Badania trójosiowe przeprowadzone na próbkach torfu i gytii (rys. 3 i 4) wykazały wyraźną zależność modułu od stanu i historii naprężenia. W zakresie naprężeń mniejszych od naprężenia prekonsolidacji (σ'_p) wartość modułu

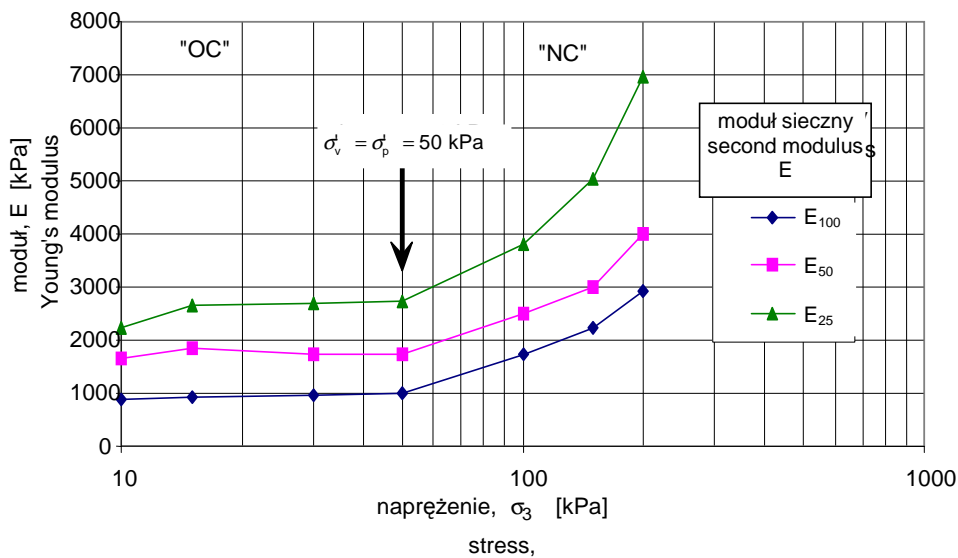
wzrasta niewiele natomiast po przekroczeniu σ'_p obserwuje się kilkakrotny wzrost jego wartości. Fakt ten powinien być uwzględniony w obliczeniach przebiegu odkształceń gruntów organicznych obciążonych budowlą.

Charakterystyki opisujące odkształcenia wtórne. Przebieg wtórnej ściśliwości szkieletu gruntowego jest najczęściej opisywany współczynnikiem ściśliwości wtórnej (C_a), wyznaczanym z nachylenia dolnego odcinka krzywej konsolidacji po zakończeniu rozpraszania ciśnienia porowego. Z krzywych konsolidacji torfu i gytii otrzymanych z długotrwałych badań



RYSUNEK 3. Zależność modułu E od napężenia σ_3' dla torfu (badania trójosiowe CD – grunt skonsolidowany)

FIGURE 3. Relationship between Young modulus (E) and effective stress component (σ_3') obtained in triaxial tests CD for peat



RYSUNEK 4. Zależność modułu E od napężenia σ_3' dla gytii (badania trójosiowe CD – grunt skonsolidowany)

FIGURE 4. Relationship between Young modulus (E) and effective stress component (σ_3') obtained in triaxial tests CD for calcareous soil

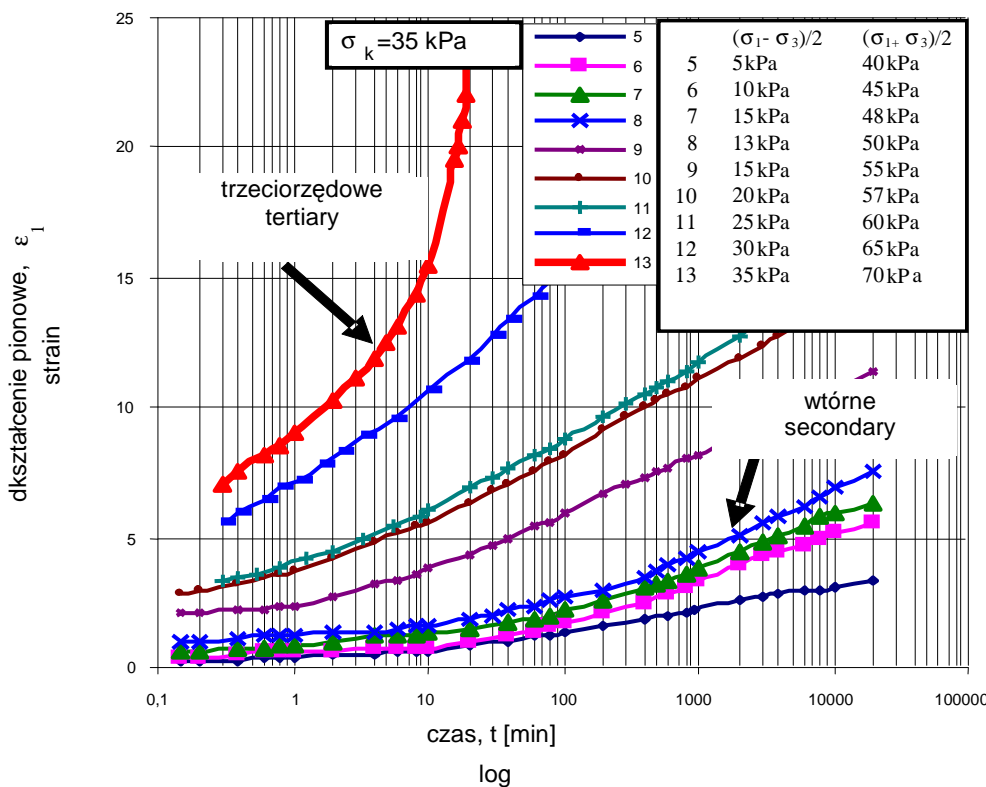
edometrycznych wynika, że nachylenie to zależy również od wielkości przyłożonego naprężenia (rys. 5).

Z uwagi na fakt, że wtórna ścisłość gruntów organicznych jest wynikiem lepkiego pełzania szkieletu gruntowego w warunkach zmiennego naprężenia efektywnego, to do oceny parametrów opisujących lepkoplastyczny etap odkształceń niezbędne jest określenie wpływu stanu naprężenia na przebieg odkształceń wtórnych. Dlatego też, oprócz badań edometrycznych, służących wyznaczeniu współczynnika C_α do oceny przebiegu odkształceń wtórnych, wykorzystuje się badania pełzania wykonywane w warunkach pełnego drena-

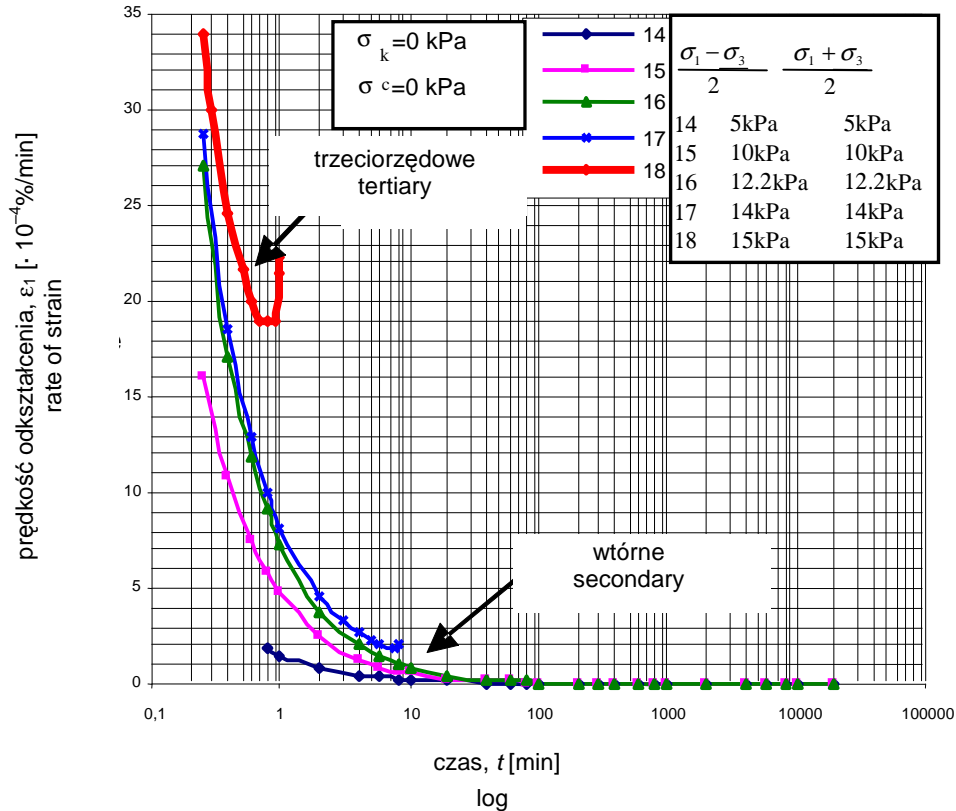
żu w standardowej komorze aparatu trójosiowego (Larsson 1977).

Wyniki badań pełzania wykonane na próbkach torfu przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Wskazują one, że prędkość odkształceń wtórnych zależy od wartości dewiatora naprężenia (rys. 6).

Analiza wyników badań wykazuje, że kiedy dewiator naprężenia jest mniejszy od dewiatora niszczącego, to przyrost prędkości odkształceń regularnie maleje, podczas gdy naprężenie styczne osiąga wartość wytrzymałości na ścinanie, prędkość odkształceń w początkowej fazie maleje, a następnie gwałtownie przyrasta aż do maksymalnej wartości w momencie zniszczenia.



RYSUNEK 5. Wyniki badań pełzania torfu
FIGURE 5. Strain versus log time for consolidated peat



RYSUNEK 6. Wyniki badań pełzania gytii
 FIGURE 6. Rate of strain versus log time for in-situ calcareous soil

Podsumowanie

Zatem opis przebiegu odkształceń wtórnych powinien obejmować obydwie fazy, tj. fazę odkształceń wtórnych, wpływających na wzmocnienie konsolidowanego ośrodka, oraz fazę odkształceń niszczących, powodujących osłabienie szkieletu gruntowego. Wielkość poszczególnych faz odkształceń uzależniona jest od stanu naprężenia efektywnego powstającego w podłożu budowli ziemnej oraz od czasu.

Analiza odkształceń gruntów organicznych wykazuje duże pionowe i poziome przemieszczenia w obciążonej strefie podłoża. Jednakże z obserwacji rozwoju odkształceń wynika, że poziome przemieszczenia pojawiają się głównie w trakcie przyrostu obciążeń, wywołując osiadania początkowe budowli, oraz podczas wtórnych odkształceń w warunkach stanu krytycznego.

Wyniki te dowodzą, że obliczenia przebiegu odkształceń gruntów organicznych, wykorzystujące teorię jednowymiarowej konsolidacji, należy uzupełnić prognozą odkształceń plastycznych, będących efektem pracy gruntu w warunkach bez odpływu w trakcie obciążenia oraz w warunkach pełnego drenażu w trakcie rozwoju odkształceń wtórnych.

Z uwagi na dużą zmienność parametrów geotechnicznych w trakcie procesu deformacji gruntów organicznych, obliczenia przebiegu odkształceń powinny być oparte na nieliniowych związkach uzależniających parametry gruntowe od poziomu naprężenia efektywnego.

Prognoza odkształceń wtórnych powinna obejmować ich rozwój w czasie, a szczególnie zmianę charakteru tych odkształceń wraz ze zmianą dewiatora naprężenia.

Ponadto duża ściśliwość gruntów organicznych powoduje konieczność uwzględnienia zmiennej geometrii podłoża w trakcie obliczeń konsolidacji i wtórnych odkształceń szkieletu gruntowego.

Literatura

- AZZOUZ A.S., KRIZEK R.J., COROTIS P.B. 1976: Regression analysis of soil compressibility. *Soils and Foundations* 16(2): 19–22.
- CARLSTEN P. 1988: The use of preloading when building roads on peat. Proc. 2nd Baltic Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tallin.
- FLAATE K. 1968: Setninger i torv ordarter. Innlegg ved NVF-Konferansen, Voksenssen.
- GIBSON R.E., LO K.Y. 1961: A consolidation for soil exhibiting secondary compression. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute Publication 41.
- HANRAHAN E.T., ROGERS M.G. 1981: Road on peat. Observation and design. *J. of the Geot. Eng. Div.* 107, GT10: 1234–1265.
- HELENELUND K.V. 1975: Geotechnical peat investigations. Proc. of the 1st Baltic Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Gdańsk.
- KOGURE K., OHIRA Y. 1977: Statistical forecasting of compressibility of peaty ground. *Can. Geot. J.* 14: 562–570.
- KOGURE K., YAMAGUCHI H., OHIRA Y., ISHIOROSHI H. 1986: Physical and engineering properties of a peat ground. Proc. Advan. in Peatlands Eng., Ottawa.
- LANDVA A.O., LA ROCHELLE P. 1982: Compressibility and shear characteristics of Rodforth peats. ASTM Special Technical Publication 820, Toronto.
- LANDVA A.O., PHEENEY P.E., LA ROCHELLE P., BRIAND I., 1986: Structures on peatland-geotechnical investigations. Proc. Advances in Peatlands Engineering, Ottawa.
- LARSSON R. 1977: Basic behaviour of Scandinavian soft clays. Swedish Geotechnical Institute, Report No 4, Linköping.
- LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKI A. 2002: Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Cz. I. Metodyka badań. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- SAS W. 2001: Modelowanie odkształceń gruntów organicznych z uwzględnieniem zmian właściwości ośrodka. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.
- SZYMAŃSKI A. 1991: Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Rozpr. Nauk. i Monogr., Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.
- SZYMAŃSKI A., SAS W., DROZDZ A., MALINOWSKA E. 2005: Field and laboratory experience with the construction of embankments on organic soils. Proc. of the Conf. on Problematic soils, Cypr.

Summary

Laboratory investigations of deformation characteristics in soft soils. Construction of structures on soft organic soils gives rise to special problems. The most

obvious ones are large deformations that may occur during and after the construction period, both vertically and horizontally. The settlements often appear quickly but may also continue for very long time periods due to secondary compression. In this paper the results of laboratory tests of peat and calcareous soil samples to define deformation characteristics are presented. Laboratory tests were comprised of oedometer and triaxial tests. Deformation characteristics obtained in laboratory tests were used for determination of variability in deformation modulus describing the deformation process in soft soils. The results of laboratory tests

performed for organic soils indicate the different character of variation in parameters values which depends on effective stress components. It is important to know that the rate of strain can be increasing or decreasing during the creep phase. It depends on level of deviatoric stress. In final effect the increasing of rate can lead to soil failure.

Author's address:

Anna Drożdż
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland