

Analiza wybranych właściwości geotechnicznych torfu w zależności od jego gatunku i wilgotności

Dr hab. Jędrzej Wierzbicki¹, prof. UAM, dr inż. Katarzyna Stefaniak², mgr Bartłomiej Boczkowski³

¹Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych

²Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska

³GEOOPTIMA, Poznań

Stosunkowo szybki rozwój przemysłu oraz budownictwa mieszkalnego i usługowego w Polsce powoduje jednocześnie wzrost zapotrzebowania na tereny zajmowane przez budowle związane z infrastrukturą, takie jak: drogi, mosty, wiadukty itp. Coraz częściej zdarza się, że najlepsza lokalizacja inwestycji znajduje się na obszarach, w których podłożu występują grunty słabonośne. Nie zawsze w takich przypadkach wymiana gruntu słabego na nośny jest możliwa i konieczna, a także uzasadniona [6]. Zaawansowane technologie geotechniczne stosowane w takich przypadkach do wzmacniania podłoża wymagają bardzo precyzyjnego rozpoznania warunków geotechnicznych *in situ*. Dotyczy to zarówno stwierdzenia przestrzennego układu warstw słabych, jak i określenia wartości parametrów geotechnicznych. W tym celu stosuje się obecnie coraz częściej nowoczesne badania terenowe, takie jak sondowania statyczne i badania dylatometryczne [10]. W wielu jednak sytuacjach ich wyniki mogą nie dostarczać wystarczającej wiedzy o charakterystyce badanych gruntów. Dotyczy to w szczególności gruntów organicznych [8, 12], w przypadku których pełna analiza zachowania się podłoża w wyniku obciążenia wymaga przeprowadzenia laboratoryjnych badań wytrzymałościowych i odkształceniowych [7].

Grunty organiczne (przede wszystkim torfy) zajmują w Polsce obszar około 1,5 mln ha, co wynosi około 5,5% powierzchni naszego kraju [9]. W ogólności grunty te są bardzo niekorzystnym podłożem w strefie oddziaływania obiektów budowlanych [7]. Charakteryzują się one przede wszystkim: małą gęstością objętościową, szkieletem gruntowym składającym się z cząstek mineralnych i organicznych, często tworzących włóknistą strukturę oraz porami, które w znaczącym stopniu są wypełnione wodą z rozproszoną materią organiczną, co z kolei wpływa na wodoprzepuszczalność tych gruntów [15]. Grunty organiczne wyróżniają się dużą różnorodnością właściwości geotechnicznych w zależności od rodzaju oraz liczby występujących w nich składników mineralnych i organicznych oraz charakteryzują się nieliniową zmiennością uzyskanych charakterystyk wytrzymałościowych i odkształceniowych. Ponadto, w podłożu organicznym występują na ogół: mała początkowa wytrzymałość oraz niewielkie początkowe naprężenie efektywne.

Względy te powodują, że aktualnym problemem staje się poznanie właściwości geotechnicznych gruntów organicznych w kontekście nie tylko zmienności rodzaju gruntu, ale i różnic obserwowanych w obrębie poszczególnych rodzajów gruntów organicznych wynikających z ich genezy.

ZAŁOŻENIA DO ANALIZY

Analiza właściwości gruntów organicznych była już przedmiotem wcześniejszych prac wielu autorów [3, 13]. W przypadku metod pośrednich, takich jak większość badań *in situ*, obserwuje się na ogół bardzo skomplikowany związek pomiędzy parametrami badań a właściwościami gruntu. Przykładem mogą być prace [8, 11, 12, 14]. W większości tych analiz, jako jedno z najważniejszych czynników wpływających na wyniki badań są wymieniane: zawartość węgla wapnia, zawartość części organicznych i struktura gruntu, a więc te czynniki, które w bezpośredni sposób wynikają z genezy gruntu organicznego. Pełne uwzględnienie ich wpływu na właściwości podłoża organicznego, a w szczególności na ich charakterystykę w zależności od zmieniających się warunków środowiskowych oraz antropopresji, nie jest jednak możliwe przy zastosowaniu jedynie metod *in situ*. Stąd przyjęty program badań obejmował badania laboratoryjne, stanowiące w istocie podstawę do przyszłych analiz związanych z możliwościami wykorzystania badań *in situ*.

W celu ograniczenia wpływu innych czynników na uzyskiwane wyniki niniejsze badania ograniczono do jednego rodzaju gruntu organicznego: torfu. Za główną zmienną w prowadzonych badaniach przyjęto gatunek genetyczny torfu wpływający w zasadniczy sposób na jego strukturę i skład botaniczny. Wybrane do analizy torfy pochodziły z jednego złoża, powstałego w holocenie, a próbki pobrano z tej samej głębokości. Tym samym ograniczono znaczenie zmian poziomu wód gruntowych, potencjalnie istotnych ze względu na wywołanie efektu prekonsolidacji [7, 11]. Próbki pozyskano z wykopów i pobrano do cylindrów o średnicy i wysokości równej 15 cm. Odpowiednio zabezpieczone grunty były następnie transportowane do laboratorium

Tabl. 1. Charakterystyka badanych torfów, wartości liczbowe są średnimi z próby

Gatunek	Barwa	Stopień rozkładu według von Posta	Wilgotność naturalna w_n [%]	Zawartość części organicznych I_{om} [%]	Gęstość objętościowa ρ [g/cm ³]	Uwagi
Trzciniowy	ciemnobrązowa	H_3	318	98,6	0,921	wyraźna struktura włóknista
Turzycowy	ciemnobrązowa	H_4 / H_5	290	96,5	0,976	widoczne włókna roślin
Turzycowo-mszysty	czarno-brunatna	H_6	420	96,4	0,940	słabo zauważalne włókna roślin

i instalowane w urządzeniach badawczych. Ze względu na to, że celem prowadzonych prac była ocena zależności pomiędzy różnymi gatunkami torfu a jego właściwościami geotechnicznymi w zmiennym stanie naprężenia i zawilgocenia gruntu, analiza obejmowała badania edometryczne oraz badania trójosiowego ściskania prowadzone według standardowych procedur.

CHARAKTERYSTYKA BADANEGO MATERIAŁU

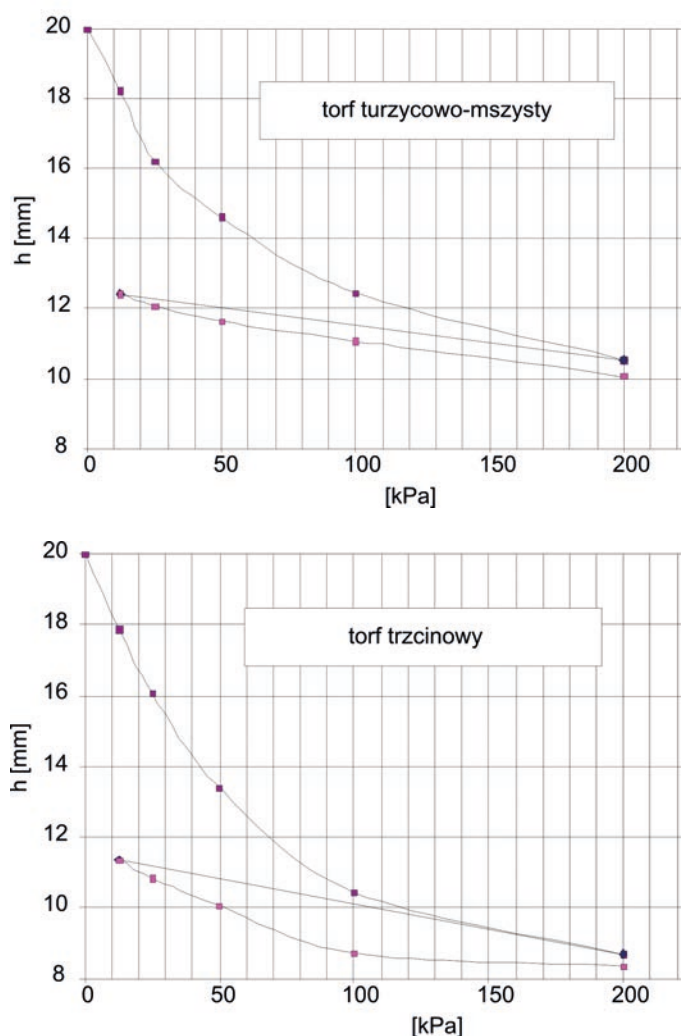
Badany materiał pobrano z torfowiska Chlebowo, położonego na skraju Puszczy Noteckiej, około 30 km na północ od Poznania. Torfowisko to należy zaliczyć do torfowisk przejściowych; w szczególności niektóre jego partie mają cechy torfowiska wysokiego, a inne niskiego [2]. Spośród siedmiu gatunków (według klasyfikacji Tołpy [16]) spotykanych na torfowisku do analizy wybrano trzy: trzcinowy, turzycowy i turzycowo-mszysty, wszystkie typowe dla torfowiska rodzaju niskiego. Podczas doboru gatunków torfu kierowano się wynikami badań wstępnych, które wskazywały na pewne podobieństwa, ale i wyraźne różnice tak w strukturze torfu, jak i w jego właściwościach geotechnicznych [2]. Istotnym, brany pod uwagę elementem, była również możliwość pobrania próbek o nienaruszonej strukturze i prawidłowego ich zamontowania w aparaturze badawczej (ograniczana niekiedy przez włóknistość torfu). Podstawową charakterystykę badanych gruntów w warunkach naturalnych podano w tabl. 1.

Badane grunty pobrano z głębokości około 1,2 m p.p.t., i około 0,5 m powyżej poziomu wód gruntowych, co niewątpliwie wpływa na stosunkowo niskie wartości wilgotności naturalnej i gęstości objętościowej. Wszystkie badane gatunki cechowały się bardzo wysoką zawartością części organicznych, ale różniły składem botanicznym oraz stopniem rozkładu i wyrazistością struktury włóknistej. Biorąc pod uwagę klasyfikację Karlssona i Hansbo [5], torf trzcinowy należy zaliczyć do torfów włóknistych, a pozostałe dwa do torfów pseudowłóknistych.

BADANIA ŚCISŁIWOŚCI

Badania ścisłości przeprowadzono w edometrach rodzaju IL, stosując standardowe stopniowanie obciążenia: od 12,5 kPa do 200 kPa, zarówno w zakresie naprężenia pierwotnego, jak i wtórnego. Obciążenia prowadzono w cyklu 24-godzinny, co w zamyśle miało zminimalizować możliwość niekontrolowanych zmian wilgotności podczas długotrwałej konsolidacji próbek. Takie założenie wynikało z przyjętej metodyki badań, która przewidywała równoległe badania próbek tego samego gatunku torfu w trzech różnych stanach nawodnienia odpowiadającym: wilgotności naturalnej gruntu, wilgotności gruntu przesuszonego powietrznie (około 40 ÷ 60% zawartości wody) i wilgotności gruntu nawodnionego (około 450 ÷ 560% zawartości wody, w zależności od gatunku torfu). Tym samym uzyskano możliwość porównania charakterystyk odkształceniowych gruntów nie tylko różniących się gatunkiem, ale i wilgotnością. Po zakończeniu cyklu badań uzyskano krzywe ścisłości pierwotnej i wtórnej w czterech powtórzeniach dla każdego z przypadków (rys. 1).

Na tej podstawie obliczono edometryczne moduły ścisłości pierwotnej w pięciu przedziałach naprężenia (0 ÷ 12,5;



Rys. 1. Przykładowe krzywe ścisłości i odpężenia torfu turzycowo-mszystego i trzcinowego uzyskane w badaniu IL przy maksymalnej wilgotności gruntu

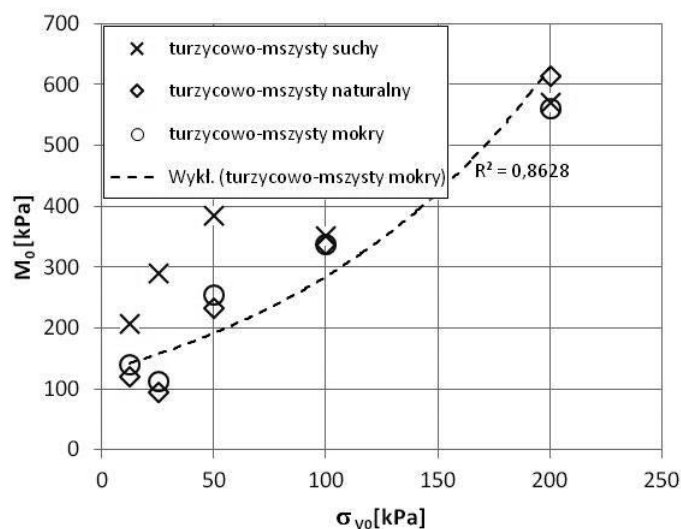
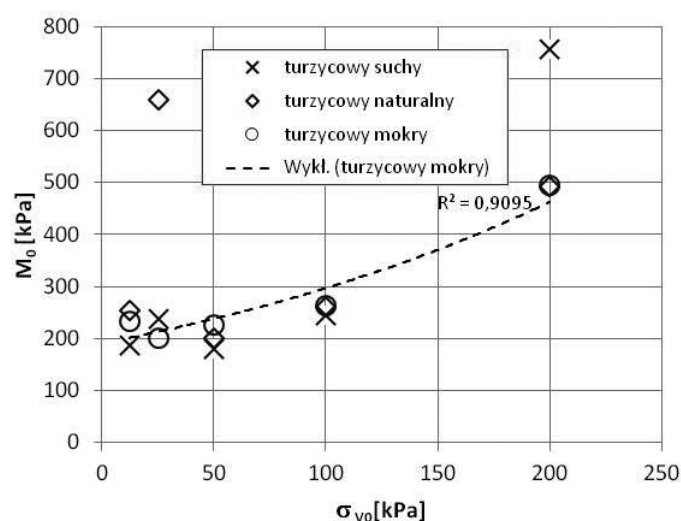
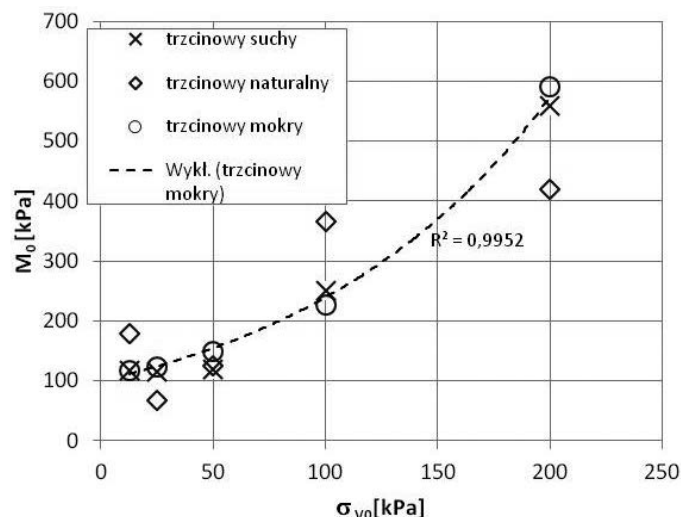
12,5 ÷ 25; 25 ÷ 50; 50 ÷ 100; 100 ÷ 200 kPa). Do dalszej analizy przyjęto średnie wartości modułu ścisłości z powtórzeń, wyznaczone w poszczególnych przedziałach. W efekcie uzyskano 9 zestawów wartości modułów ścisłości pierwotnej zdefiniowanych przez gatunek torfu oraz stan naprężenia i zawilgocenia próbki (rys. 2)

Podobną analizę przeprowadzono w przypadku zakresu naprężenia wtórnego, tym razem jednak, ze względów technicznych określenie modułu ścisłości ograniczono do czterech przedziałów naprężenia (rys. 3).

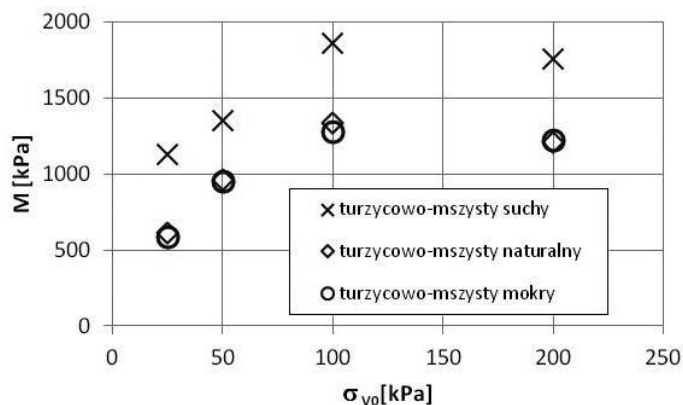
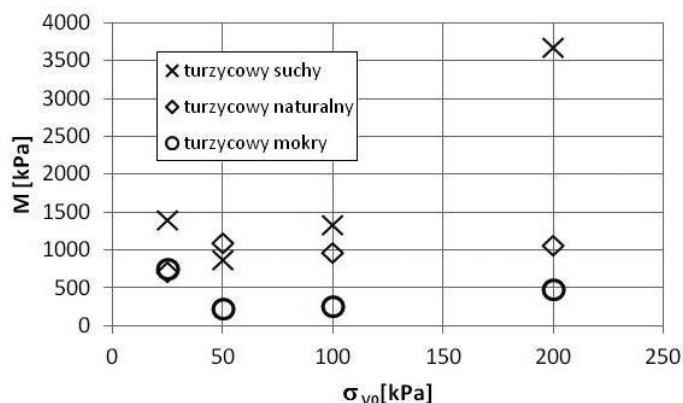
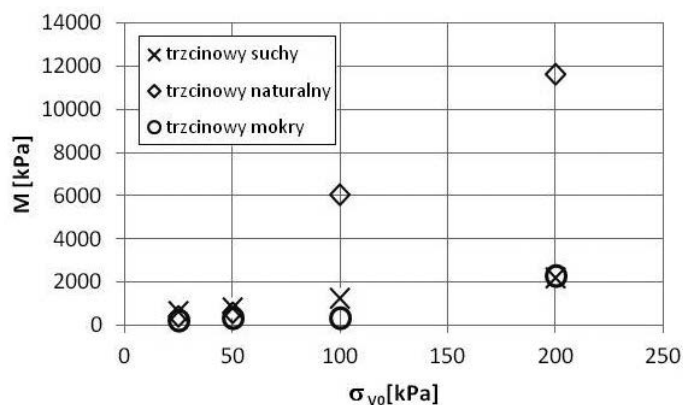
BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

Do badań wytrzymałości na ścinanie wykorzystano aparat trójosiowego ściskania firmy GEOTEKO SERWIS. Procedura badawcza składała się z trzech etapów: nasączenia, konsolidacji oraz ścicia badanej próbki gruntu.

W pierwszym etapie badania próbki były nasączone i konsolidowane izotropowo. Proces nasycenia próbki wodą składał się z dwóch etapów nasączenia: pierwszego – metodą nasączenia grawitacyjnego i drugiego – metodą ciśnienia wyrównawczego



Rys. 2. Wartości modułu ściśliwości pierwotnej M_0 w zależności od gatunku torfu, jego nawodnienia oraz przedziału naprężenia (jako σ_{v0} podano górną granicę przedziału); wykładnicza linia trendu i wartość współczynnika dopasowania R^2 dla gruntu mokrego



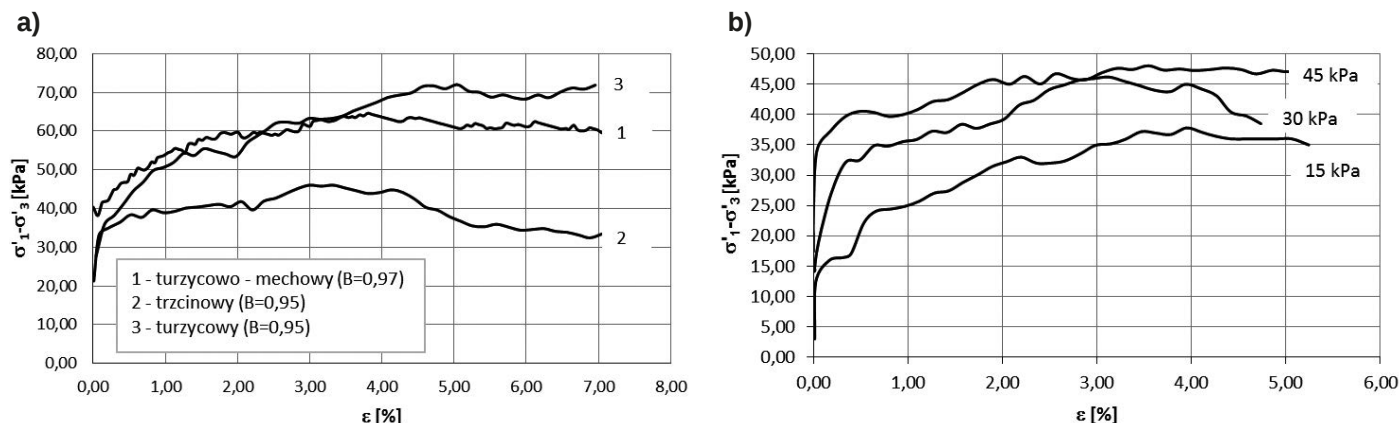
Rys. 3. Wartości modułu ściśliwości wtórnej M w zależności od gatunku torfu, jego nawodnienia oraz przedziału naprężenia (jako σ_{v0} podano górną granicę przedziału)

(tzw. *back pressure*) [1]. Nasączenie metodą ciśnienia wyrównawczego rozpoczynano od ciśnienia w komorze wynoszącego 100 kPa i ciśnienia *back pressure* 90 kPa. W trakcie każdego badania podnoszono wartość ciśnienia w komorze o 100 kPa, zwiększając równolegle ciśnienie – *back pressure* i odczytując ciśnienie wody w porach gruntu u . Stopień nasycenia próbki gruntu wodą oceniano na podstawie parametru Skemptonu B (1):

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (1)$$

gdzie:

u – ciśnienie wody w porach gruntu,
 σ_3 – składowa stanu naprężenia.



Rys. 4. Wyniki badania w aparacie trójosiowego ściskania różnych gatunków torfu przy naprężeniu 30 kPa (a) oraz torfu trzcinowego przy różnych naprężeniach (b)

Tabl. 2. Efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności

Torf trzcinowy		Torf turzycowy		Torf turzycowo-mszysty	
ϕ' [°]	c' [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]
23	10,4	19	18,0	25	7,8

Średnie wartości parametru Skemptonia badanych torfów przedstawiono na rys. 4a. Ze względu na fakt, że próbki torfu pobrano z niewielkich głębokości (0,3 i 0,6 m), przyjęto że proces konsolidacji następował w trakcie procesu nasączenia.

Wszystkie badania przeprowadzono przy stałej prędkości przyrostu przemieszczenia wynoszącej 0,05 mm/h [4]. Ściskanie próbek o nienaruszonej strukturze przeprowadzono przy wartościach naprężenia wynoszących kolejno 15; 30; 45 kPa (rys. 4).

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ' oraz spójności c' badanych trzech gatunków torfu, które przedstawiono w tabl. 2.

ANALIZA I DISKUSJA WYNIKÓW

Analiza ściśliwości prowadzona zgodnie z przyjętymi założeniami pozwoliła zaobserwować wyraźne różnice w charakterystyce gruntu zarówno w zależności od gatunku torfu, jak i jego wilgotności. Istotnym spostrzeżeniem jest fakt, że w przypadku wszystkich trzech gatunków, w miarę przyrostu naprężenia, najbardziej przewidywalnie zmienia się wartość modułu ściśliwości pierwotnej M_0 gruntu w pełni nawodnionego. Zależność tę można z bardzo dużą precyzją opisać funkcją wykładniczą (przy wartości R^2 sięgającej 0,98) (rys. 3). Warto podkreślić, że podobną zależność uzyskano w przypadku gruntu suchego jedynie dla torfu trzcinowego, o wyraźnej strukturze włóknistej, a w przypadku gruntu nie w pełni nawodnionego, jedynie dla torfu turzycowo-mszystego. Związek stopnia przewidywalności wartości M_0 wydaje się więc zależeć w od stopnia nawodnienia, ale także, i choć w mniejszym stopniu, od struktury i stopnia rozłożenia torfu. Można przypuszczać, że warunki pełnego nawodnienia lub przesuszenia gruntu odpowiadają ośrodkom dwufazowym (oczywiście o udziale różnych faz), natomiast grunt o wilgotności naturalnej odpowiada ośrodkowi trójfazowemu. W warunkach

ośrodku trójfazowego przewidywalność zmian wartości M_0 jest możliwa zatem tylko w przypadku torfu o słabo zauważalnej strukturze i o większym stopniu rozkładu. Jeszcze silniejszy wpływ gatunku torfu na jego właściwości odkształceniowe zauważono w przypadku analizy ściśliwości wtórnej. W tym przypadku każdy z badanych gruntów charakteryzował się bowiem odmiennym trendem zmian wartości modułu ściśliwości, w pewnym sensie niezależnym nawet od stopnia nawodnienia. Torf trzcinowy o wyrazistej strukturze charakteryzował się stałym wzrostem wartości wtórnego modułu ściśliwości (M) (a więc niezależnie od wartości OCR), podczas gdy pozostałe grunty wykazywały pewną stabilizację wartości analizowanego parametru. Torf turzycowo-mszysty, charakteryzował się wręcz niemal identycznymi zmianami wartości M niezależnie od wilgotności. Poczynione obserwacje nasuwają przypuszczenie, że w zakresie naprężenia pierwotnego decydującą rolę w ściśliwości torfu odgrywają zarówno nawodnienie, jak i jego gatunek, co można łączyć z różnym udziałem fazy ciekłej i różną wodoprzepuszczalnością poszczególnych gatunków torfu. Z kolei w przypadku zakresu naprężenia wtórnego decydującą rolę odgrywa skład botaniczny i struktura gruntu, wpływając w wyraźny sposób na zależność ściśliwości od zakresu naprężenia i wartości OCR.

Na obecnym etapie realizacji programu badań, dysponując pojedynczymi rezultatami badań trójosiowego ściskania, trudno jest o wiarygodną analizę właściwości wytrzymałościowych badanych torfów. Dostępne wyniki, odnoszące się naturalnie do gruntu nawodnionego, potwierdzają jednak ogólne różnice pomiędzy różnymi gatunkami torfu zaobserwowane podczas badań edometrycznych. Wbrew częstym, makroskopowym obserwacjom, wyraźna struktura włóknista torfu trzcinowego nie powoduje, że cechuje się on najlepszymi parametrami wytrzymałościowymi. Z kolei pewną prawidłowość wykazuje reakcja na obciążenie amorficznego torfu turzycowo-mszystego, który w zakresie naprężenia do 100 kPa cechuje się największymi wartościami zarówno kąta tarcia wewnętrznego, jak i edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania mają charakter początkowych analiz, które wymagają uzupełnienia, co najmniej w zakresie liczności powtórzeń poszczególnych badań. Dostępna aktualnie

niewielka próba wyników, przy obserwowanej jednocześnie ich zmienności w obrębie tego samego gatunku torfu, każe z ostrożnością podchodzić do generalizacji uzyskanych rezultatów. Pomimo tego zastrzeżenia należy sądzić, że zaobserwowano pewne ogólne zależności przedstawione poniżej.

Stwierdzono wyraźny wpływ stopnia rozkładu i wilgotności naturalnej na przebieg procesu ściśliwości torfu i jego przewidywalność za pomocą modelu wykładniczego. Warunki pełnego nawodnienia torfu umożliwiają precyzyjne wyznaczenie wartości modułu ściśliwości pierwotnej przy dowolnej wartości składowej pionowej naprężenia.

W przypadku wtórnego obciążenia decydujący wpływ na charakterystykę ściśliwości ma gatunek torfu. Torf o wyrazistej strukturze (trzciniowy) wykazuje stały przyrost wartości modułu wtórnego, natomiast torf o strukturze słabo zaznaczonej wykazuje stabilizację wartości modułu.

Najwyższymi wartościami modułu ściśliwości pierwotnej, kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności charakteryzuje się niemal amorficzny torf turzycowo-mszysty. Obecność wyraźnej struktury roślinnej nie wpływa zatem na poprawę właściwości mechanicznych torfu. Właściwości te w głównym stopniu zależą od gatunku torfu (jego składu botanicznego).

LITERATURA

1. Bishop A. W., Henkel D. J.: The measurement of soil properties in the triaxial test. Arnold London, 1962.
2. Boczkowski B.: Ocena wpływu zmian wilgotności na ściśliwość torfu. Praca magisterska, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, 2013.
3. Hartlen J., Wolski W.: Embankments on organic soils. Elsevier, Amsterdam, 1996.
4. Head K. H.: Soil laboratory testing. Vol. 3, Effective stress tests. Pentech Press, 1986.
5. Karlsson R., Hansbo S.: Soil classification and identification. Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1984.
6. Kumor L.A., Kumor M. K., Młynarek Z.: Wybrane problemy uszkodzeń konstrukcji drogowej jako wynik niewłaściwego rozpoznania geologiczno-inżynierskiego. Przegląd Geologiczny, vol. 62, nr 10/2, Warszawa 2014, 641-644.
7. Lechowicz Z., Bajda M., Rabarjoeely S., Wrzesiński G.: Use of SDMT for the evaluation of the geotechnical parameters of organic soils. W: CPTU and DMT in soft clays and organic soils. Red.: Z. Młynarek, J. Wierzbicki, Exemplum Poznań 2014, 107-118.
8. Lechowicz Z., Szymański A.: Odształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Cz. I. Metodyka Badań, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2002.
9. Maksimov A.: Torf i jego użytkowanie w rolnictwie. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa, 1965.
10. Młynarek Z., Wierzbicki J., Gogolik S., Bogucki M.: Shear strength and deformation parameters of peat and gyttja from CPTU, DMT and VT tests. W: CPTU and DMT in soft clays and organic soils. Red.: Z. Młynarek, J. Wierzbicki, Exemplum Poznań 2014, 193-210.
11. Młynarek Z., Wierzbicki J.: Nowe możliwości i problemy interpretacyjne polowych badań gruntów. Geologos nr 11, 2007, 97-118.
12. Młynarek Z., Wierzbicki J., Long M.: Factors affecting CPTU and DMT characteristics in organic soils. W: Geotechnical in Maritime Engineering. Proc. of the 11th Baltic Sea Geotechnical Conference. Red.: Z. Młynarek, Z. Sikora & E. Dembicki 2008, Vol. 1, 407-417.
13. Przysański J.: O konsolidacji torfów niskich niziny Wielkopolskiej. II Konf. Nauk. Wydziału Budownictwa Lądowego politechniki Poznańskiej, Poznań, 1973.
14. Rabarjoeely S.: Wykorzystanie badań dylatometrycznych do wyznaczania parametrów gruntów organicznych obciążonych nasypem. Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Środowiska SGGW Warszawa, 1999.
15. Tobolski K. – Przewodnik do oznaczania torfów i osadów jeziornych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
16. Tolpa S., Jasnowski M., Palczyński A.: System der genetischen Klassifizierung der Torfe Mitteleuropas. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 76, 1967, 9-99.