

**Edyta MALINOWSKA, Przemysław DOMAŃSKI**

Laboratorium Centrum Wodne SGGW w Warszawie

Water Centre Laboratory WULS – SGGW

## **Określenie parametrów fizycznych i mechanicznych słabonośnych gruntów organicznych z podłoża trasy S2**

### **Determination of physical and mechanical parameters of organic soft subsoils taken from S2**

**Słowa kluczowe:** parametry fizyczne i mechaniczne, słabonośne grunty organiczne

**Key words:** physical and mechanical parameters, soft organic subsoil

### **Wprowadzenie**

Określenie parametrów fizycznych i mechanicznych słabonośnego podłoża budowlanego w warunkach laboratoryjnych wymaga nie tylko odpowiedniego profesjonalnego poboru próbek, ale i praktycznej wiedzy na temat przeprowadzenia samych badań, a następnie właściwej interpretacji ich wyników. Dodatkowym utrudnieniem w analizie zachowania się silnie odkształcalnego ośrodka gruntowego jest jego duża wilgotność, mała wytrzymałość i duża anizotropia, wynikająca z włóknistej struktury tego gruntu.

W praktyce inżynierskiej coraz częściej wykorzystywane są różne techniki

wzmocnienia podłoża organicznego. Po wszechnie dotychczas stosowana technika całkowitej wymiany gruntu na materiał o lepszych właściwościach powinna być zastępowana innymi rozwiązaniami, niejednokrotnie korzystniejszymi ekonomicznie. Brak informacji dotyczących zachowania się słabonośnego podłoża organicznego niejednokrotnie zniechęca inwestorów do zastosowania innych rozwiązań technicznych. Dlatego niezwykle istotnie jest pełne i dokładne rozpoznanie terenu oraz analiza parametrów geotechnicznych gruntów znajdujących się w zasięgu oddziaływania budowli inżynierskiej.

W artykule określono parametry fizyczne i mechaniczne słabonośnych gruntów organicznych torfów znajdujących się w podłożu trasy S2, na środkowym odcinku między 465 a 466 kilometrem (rys. 1). Trasa S2 będzie pełniła rolę trasy miejskiej o parametrach drogi



nej powierzchni poślizgu w momencie zniszczenia następuje zmiana kierunków naprężeń głównych, a tym samym wywołany jest różny mechanizm zniszczenia (Wrzesiński i Lechowicz 2012).

Przepuszczalność początkowa gruntu organicznego jest stosunkowo duże, lecz znacząco maleje wraz z postępującym procesem zmniejszania się porowatości (Szymański 1991, Malinowska 2005).

Naukowcy, badający zachowanie się gruntów słabonośnych, jednoznacznie potwierdzili złożoność procesów odkształceniowych, wytrzymałościowych i przepływu wody, występujących w gruntach słabonośnych (Chan i Law, red. 2006).

Inżynierskie właściwości gruntów organicznych zależą od wielu czynników i mechanizmów działania naprężeń. Analiza parametrów gruntu organicznego wskazuje na ich nieliniową zmienność w czasie.

## **Zakres badań analizowanego podłoża gruntowego**

Określenie parametrów fizycznych i mechanicznych słabonośnego podłoża organicznego, jakim są torfy, wymaga przeprowadzenia wielu badań laboratoryjnych, dotyczących określenia właściwości fizycznych, chemicznych, odkształceniowych, wytrzymałościowych i przepływu wody.

W celu analizy właściwości fizycznych torfów z podłoża trasy S2 wykonano następujące badania laboratoryjne: określenie stopnia rozkładu części organicznych oraz wilgotności naturalnej, wyznaczenie gęstości właściwej szkieletu gruntowego, wyznaczenie gęstości objętościowej, wyznaczenie gęstości

objętościowej szkieletu gruntowego, określenie porowatości gruntu i granic konsystencji gruntu organicznego.

W celu analizy właściwości chemicznych torfów z podłoża trasy S2 wykonano następujące badania laboratoryjne: określenie odczynu pH, określenie popielności i zawartości części organicznych.

W celu analizy właściwości odkształceniowych torfów z podłoża trasy S2 wykonano edometryczne badania laboratoryjne (rys. 2), na podstawie których otrzymano następujące parametry: moduł ściśliwości, odkształcenie jednostkowe, naprężenie prekonsolidacji (rys. 2).

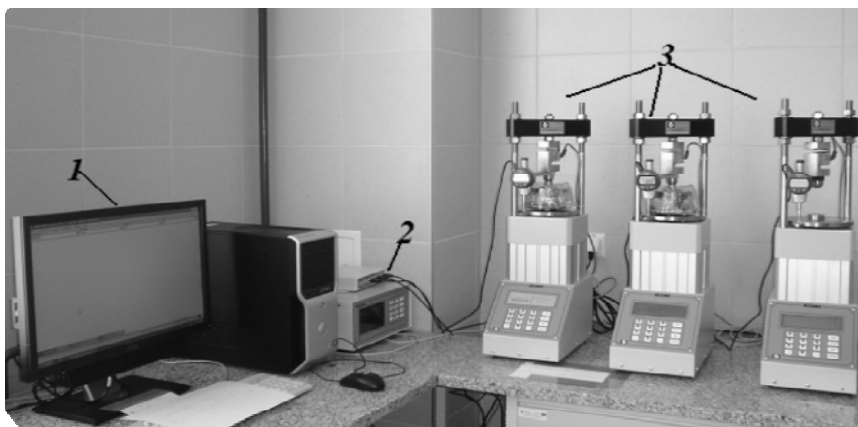
W celu analizy właściwości wytrzymałościowych torfów z podłoża trasy S2 wykonano badania w aparacie trójosiowego ściskania, na podstawie których otrzymano następujące parametry: kąt tarcia wewnętrznego, spójność i moduł Younga.

Liczbę i zakres wykonanych badań przedstawiono w tabeli 1.

## **Wyniki badań**

Określenie parametrów fizycznych i chemicznych gruntu jest podstawą do dalszej analizy zachowania się gruntu pod wpływem obciążenia, w tym przypadku nasypem drogowym. Wyniki badań właściwości fizycznych i chemicznych przedstawiono w tabeli 2.

Badania parametrów odkształcenia zostały przeprowadzone w automatycznym edometrze ACONS, który umożliwia wykonanie badań w różnych warunkach obciążania, przy różnym czasie rejestracji. Badania zostały przeprowadzone na próbkach gruntu o nienaruszonej strukturze, pobranych z podłoża trasy S2.



RYSUNEK 2. Stanowisko do edometrycznych badań laboratoryjnych ACONS: 1 – system rejestracji z programem ClispStudio, 2 – miniscanner, 3 – trzy niezależnie pracujące automatyczne edometry  
 FIGURE 2. Automatic Consolidation System: 1 – registration system with ClispStudio Programme, 2 – miniscanner, 3 – three independent working ACONS

TABELA 1. Zakres badań laboratoryjnych wykonanych według PN-86/B-02480 oraz PN ISO 14688  
 TABLE 1. The range of laboratory tests made with PN-86/B-02480 and PN ISO 14688

Type of test Typ badania	Zakres badania The range of test	Liczba wykonanych testów The quantity of test
1	2	3
Określenie właściwości fizycznych	stopień rozkładu części organicznych, $H$ [-]	1
	wilgotność naturalna, $w_n$ [%]	3
	gęstość właściwa szkieletu gruntowego, $\rho_s$ [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] ciężar właściwy szkieletu gruntowego, $\gamma_s$ [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	3
	gęstość objętościowa, $\rho$ [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] ciężar objętościowy, $\gamma$ [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	3
	gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, $\rho_d$ [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] ciężar objętościowy szkieletu gruntowego, $\gamma_d$ [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	3
	porowatość początkowa gruntu, $n$ [-] początkowy wskaźnik porowatości gruntu, $e$ [-]	3
	wilgotność całkowita gruntu, $w_r$ [%] stopień wilgotności, $S_r$ [-]	3
	granica płynności gruntu, $w_L$ [%] granica plastyczności gruntu, $w_p$ [%] wskaźnik plastyczności, $I_p$ [%] stopień plastyczności, $I_L$ [-] wskaźnik konsystencji, $I_c$ [-]	2–5
Określenie właściwości chemicznych	odczyn pH	3
	popielność, $P$ [%]	10
	zawartość części organicznych, $I_{om}$ [-]	1

Tabela 1 cd.  
Table 1 cont.

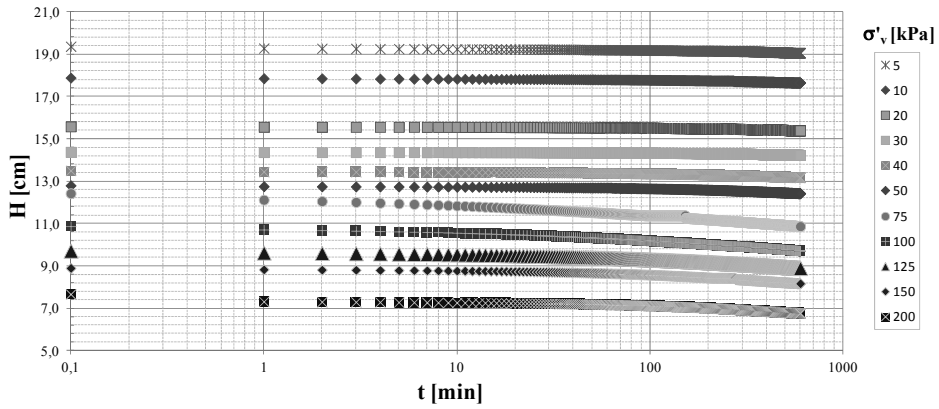
1	2	3
Określenie właściwości odkształceniowych	osiadanie gruntu, $S$ [mm]	40
	odkształcalność gruntu, $\varepsilon$ [%]	40
	krzywa konsolidacji	40
	napężenie prekonsolidacji, $\sigma_p$ [kPa]	1
	moduł ścisłości w zakresie naprężeń OC, $M_{OC}$ [kPa] moduł ścisłości w zakresie naprężeń NC, $M_{NC}$ [kPa]	15
Określenie właściwości wytrzymałościowych	kąt tarcia wewnętrznego, $\varphi$ [°]	3
	spójność, $c$ [kPa]	3
	moduł Younga, $E$ [MPa]	3

TABELA 2. Właściwości fizyczne i chemiczne gruntu słabonośnego z podłoża S2  
TABLE 2. The physical and chemical properties of soft subsoil from S2

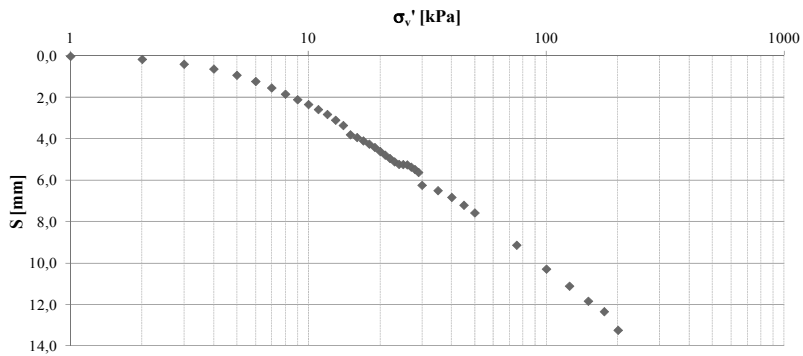
Właściwości Properties	Symbol Symbol	Jednostka Unit	Torf Peat
Wilgotność naturalna	$w_n$	%	270
Wilgotność całkowita	$w_r$	%	296
Stopień nasycenia	$S_r$	–	0,91
Ciężar właściwy	$\gamma_s$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	16,6
Ciężar objętościowy	$\gamma$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	10,25
Ciężar objętościowy szkieletu gruntowego	$\gamma_d$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	2,78
Początkowy wskaźnik porowatości gruntu	$e$	–	5,0
Wskaźnik plastyczności	$I_p$	%	132
Stopień plastyczności	$I_L$	–	0,15
Wskaźnik konsystencji	$I_c$	–	0,85
Stopień rozkładu	$H$	–	$H_6$
Odczyn pH	$pH$	–	7,0
Popielność	$P$	%	35
Zawartość części organicznych	$I_{om}$	%	> 20

Początkowa średnica próbki wynosiła 50 mm, a wysokość – 20 mm. Wyniki badań konsolidacji gruntu zostały pokazane na rysunku 3. Na rysunku 4 została przedstawiona zależność osiadania,  $S$  [mm], od wartości naprężeń pionowych,  $\sigma_v'$  [kPa], bez możliwości rozszerzalności bocznej. Na rysunku 5 przedstawio-

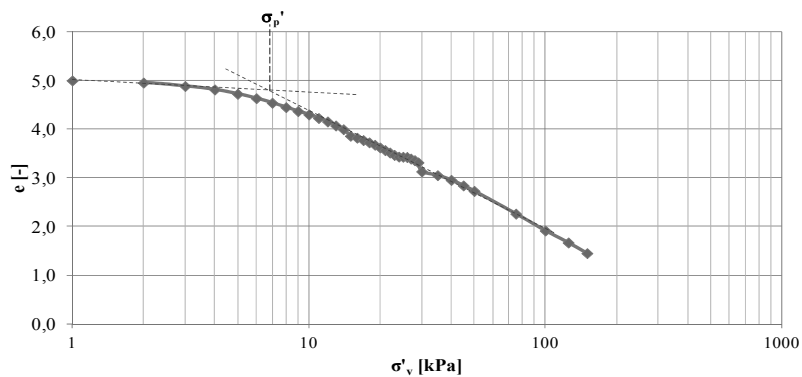
no zależność wskaźnika porowatości,  $e$  [–], od naprężenia pionowego,  $\sigma_v'$  [kPa], wraz ze stycznymi poprowadzonymi w celu określenia wartości naprężenia prekonsolidacji,  $\sigma_v'$  [kPa], której wartość przyjęto 7,0 kPa. Na rysunku 6 została przedstawiona zależność między obciążeniem a odkształceniem względnym ( $\varepsilon$ ).



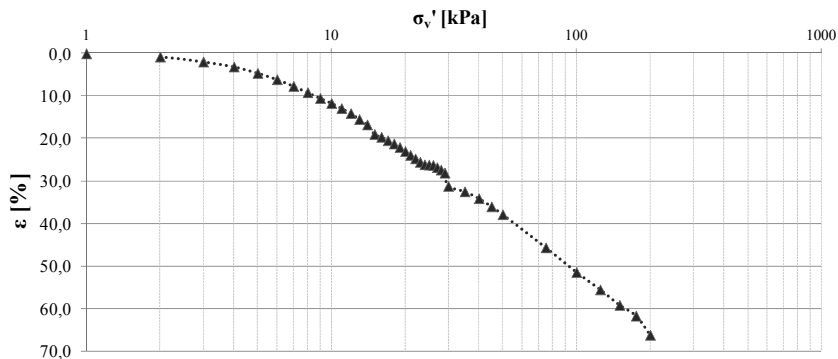
RYSUNEK 3. Krzywe konsolidacji dla torfu z podłoża S2:  $H$  – zmiana wysokości próbki,  $t$  – czas  
 FIGURE 3. Consolidation curves for peat from S2:  $H$  – height,  $t$  – time



RYSUNEK 4. Zależność osiadanie ( $S$ ) – efektywne naprężenie pionowe ( $\sigma_v'$ )  
 FIGURE 4. The relationship settlement ( $S$ ) – effective vertical stress ( $\sigma_v'$ )



RYSUNEK 5. Zależność wskaźnik porowatości ( $e$ ) – efektywne naprężenie pionowe ( $\sigma_v'$ ) ze stycznymi do wyznaczenia  $\sigma_p'$   
 FIGURE 5. The relationship void ratio ( $e$ ) – effective vertical stress ( $\sigma_v'$ ) to obtain  $\sigma_p'$

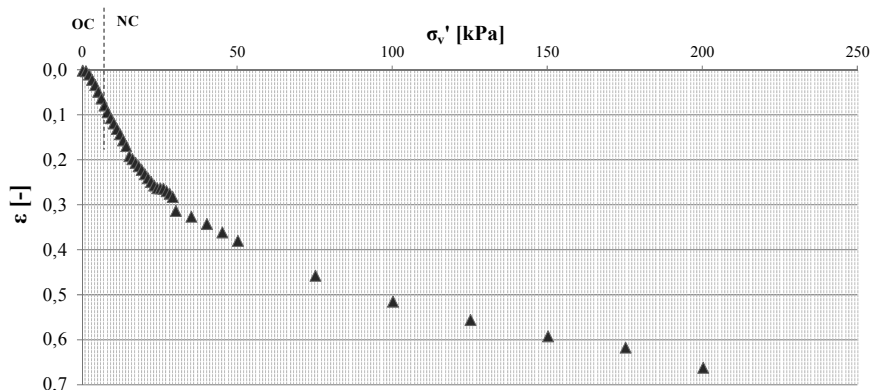


RYSUNEK 6. Zależność odkształcenie względne ( $\varepsilon$ ) – efektywne naprężenie pionowe ( $\sigma_v'$ )  
 FIGURE 6. The relationship strain ( $\varepsilon$ ) – efektywne naprężenie pionowe ( $\sigma_v'$ )

Na rysunku 7 została przedstawiona krzywa ściśliwości z podziałem na zakres naprężeń prekonsolidowanych (OC) i normalnie konsolidowanych (NC). W tabeli 3 zostały przestawione wartości modułu ściśliwości z podziałem na działanie naprężeń prekonsolidacyjnych ( $M_{OC}$ ), i normalnie konsolidowanych ( $M_{NC}$ ). Na rysunku 8 została przedstawiona charakterystyka zmian wskaźnika porowatości gruntu,  $e$  [–], w zależności od odkształcenia względnego,  $\varepsilon$  [%].

Badania wytrzymałościowe zostały przeprowadzone w aparacie trójosio-

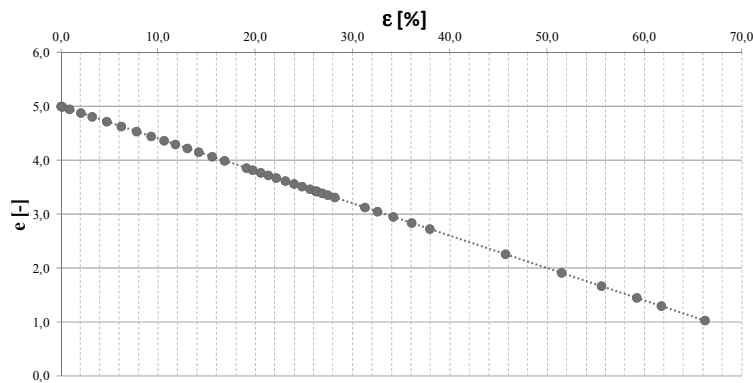
wego ściskania, który umożliwia wykonanie badań konsolidacji i ścinania. Przeprowadzono je na próbkach gruntu o nienaruszonej strukturze, pobranych z podłoża trasy S2. Początkowa średnica próbki wynosiła 35,5 mm, a wysokość – 78,8 mm. Badania zostały przeprowadzone z konsolidacją i odpływem przy trzech różnych stanach naprężenia pionowego: 30, 45 i 60 kPa. Badania składały się z kilku etapów: płukania, nasączenia, konsolidacji i ścinania. Podstawowe wyniki badań konsolidacyjnych zostały przedstawione w tabeli 4.



RYSUNEK 7. Krzywa ściśliwości z zakresem naprężeń prekonsolidacyjnych (OC) i normalnie konsolidowanych (NC)  
 FIGURE 7. Compressibility curve with OC and NC consolidation range

TABELA 3. Moduły ściśliwości dla  $M_{OC}$  i  $M_{NC}$   
 TABLE 3. Oedometer modulus in  $OC$  and  $NC$  stress range

Lp. No	$\sigma_v'$ [kPa]	$\Delta\sigma$ [kPa]	$\Delta\varepsilon$ [-]	$M$ [kPa]
1 – OC	0–7	7	0,078	89,7
1' – NC	7–200	193	0,584	330,5
2	7–10	3	0,040	75,0
3	10–15	5	0,073	68,5
4	15–20	5	0,040	124,8
5	20–25	5	0,032	157,5
6	25–30	5	0,050	100,0
7	30–40	10	0,029	343,1
8	40–50	10	0,038	266,3
9	50–75	25	0,078	321,3
10	75–100	25	0,058	433,7
11	100–125	25	0,041	609,8
12	125–150	25	0,036	688,7
13	150–175	25	0,025	990,1
14	175–200	25	0,045	557,4



RYSUNEK 8. Zależność wskaźnik porowatości ( $e$ ) – odkształcenie względne ( $\varepsilon$ )  
 FIGURE 8. The relationship void ratio ( $e$ ) – strain ( $\varepsilon$ )

Wyniki otrzymane z badań w aparacie trójosiowego ściskania pozwalają określić zachowanie się obciążonego materiału badawczego oraz określić jego parametry wytrzymałościowe. Aby wyznaczyć ich wartości, wyniki zostały opracowane w postaci następujących zależności:

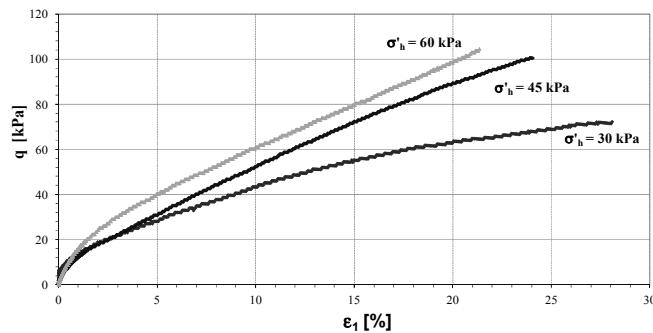
- dwiatora naprężeń od odkształceń pionowych (rys. 9),
- odkształcenia objętościowego od odkształcenia pionowego (rys. 10),
- ścieżki naprężeń w układzie  $t-s'$  (rys. 11).



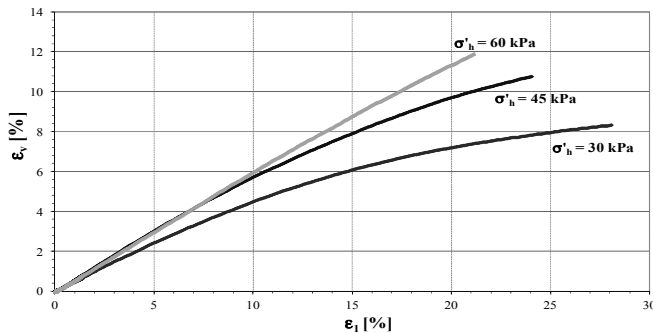
TABELA 3. Wyniki badań CD w aparacie trójosiowego ściskania:  $H$  – wysokość próbki,  $V$  – objętość próbki,  $d$  – średnica próbki

TABLE 3. The CD test results from triaxial cell:  $H$  – height,  $V$  – volume,  $d$  – diameter

Parametry Parameters	$\sigma_v' = 30$ kPa		$\sigma_v' = 45$ kPa		$\sigma_v' = 60$ kPa	
	przed konsolidacją before consolidation	po konsolidacji after consolidation	przed konsolidacją before consolidation	po konsolidacji after consolidation	przed konsolidacją before consolidation	po konsolidacji after consolidation
$H$ [m]	0,0788	0,0762	0,0788	0,0769	0,0788	0,0783
$V$ [m <sup>3</sup> ]	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$
$d$ [m]	0,0355	0,0348	0,0355	0,0339	0,0355	0,0325



RYSUNEK 9. Zależność dewiatora naprężeń ( $q$ ) od odkształcenia pionowego ( $\varepsilon_1$ )  
FIGURE 9. The relationship deviatoric stress ( $q$ ) and axial strain ( $\varepsilon_1$ )

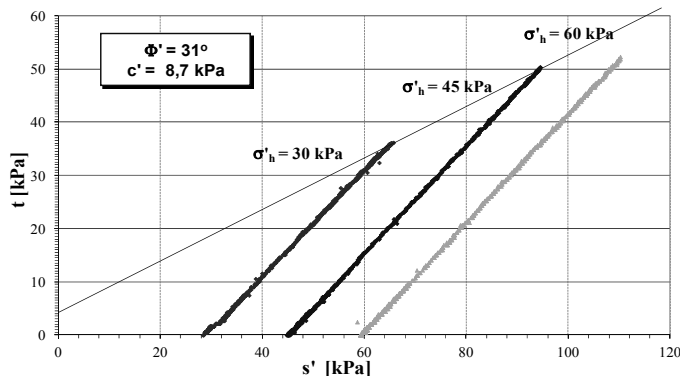


RYSUNEK 10. Zależność odkształcenia objętościowego ( $\varepsilon_v$ ) od odkształcenia pionowego ( $\varepsilon_1$ )  
FIGURE 10. The relationship between volumetric strain ( $\varepsilon_v$ ) and axial strain ( $\varepsilon_1$ )

Na podstawie wyników badań wytrzymałościowych określono wartości efektywne kąta tarcia wewnętrznego  $\phi' = 31^\circ$  i spójności  $c' = 8,7$  kPa.

## Wnioski

Poprawne wyznaczenie parametrów fizycznych i mechanicznych gruntów ograniczonych wymaga dużej precyzji



RYSUNEK 11. Ścieżki naprężeń w układzie: połowa dewiatora ( $t$ ) – średnie efektywne naprężenie ( $s'$ )  
 FIGURE 11. The relationship between: half of the deviatoric stress and mean effective stress

poboru materiału badawczego, jego przygotowania do badania laboratoryjnego, a następnie doświadczenia przy wykonywaniu badań.

Słabonośny grunt organiczny pobrany z podłoża trasy S2 jest podłożem niezwykle zróżnicowanym zarówno pod względem właściwości fizycznych, jak i chemicznych. Jego włóknista struktura, niski odczyn pH 7, wysoka popielność  $P = 35\%$ , stosunkowo niski stopień rozkładu oraz stosunkowo duża wilgotność naturalna  $w_n = 270\%$  wskazują, że jest to grunt wysokoorganiczny, torf.

Wyniki laboratoryjne badań odkształceniowych analizowanego torfu wskazują na znaczącą ściśliwość, w zależności od wartości wskaźnika porowatości, który od początkowej wartości  $e_0 = 5,0$  znacząco maleje podczas obciążania do wartości  $e = 3,62$ , przy efektywnym naprężeniu pionowym  $\sigma'_v = 20$  kPa, i do wartości  $e = 1,03$ , przy efektywnym naprężeniu pionowym  $\sigma'_v = 200$  kPa, co wskazuje na silną odkształcalność tego gruntu.

Ciśnienie pęcznienia określono w trakcie badań edometrycznych na poziomie 1,5 kPa. Naprężenia prekonsolidacji w gruntach organicznych mogą

wynikać jedynie ze zmian położenia zwierciadła wody gruntowej lub powstawania innych niewielkich naprężeń w gruncie. Naprężenie prekonsolidacji w analizowanym podłożu organicznym wyznaczono na poziomie  $\sigma'_v = 7$  kPa.

Moduł ściśliwości analizowanego gruntu organicznego określono w zakresie naprężeń  $OC$  na poziomie  $M = 89,7$  kPa, a w zakresie naprężeń  $NC - M = 330,5$  kPa.

Rysunek 8 przedstawia zależność odkształcenia od wskaźnika porowatości, z którego wynika, iż analizowany grunt organiczny odkształca się o 45% przy dwukrotnym zmniejszeniu wskaźnika porowatości. Wyniki badań wytrzymałościowych wskazują na małą spójność gruntu ( $c' = 8,7$  kPa) i kąt tarcia wewnętrznego  $\phi' = 31^\circ$ . Zatem wytrzymałość gruntu w zakresie naprężeń  $NC$  wynosi od  $\tau = 15$  kPa dla  $\sigma' = 10$  kPa,  $\tau = 68$  kPa dla  $\sigma' = 100$  kPa i  $\tau = 130$  kPa dla  $\sigma' = 200$  kPa.

W pracy zostały przedstawione wyniki parametrów fizycznych i mechanicznych słabonośnych gruntów organicznych z podłoża trasy S2. W celu szczegółowej analizy zachowania się

tego podłoża należałoby opracować na przykład model, zakładający liniową sprężystość w całym zakresie odkształceń. W tym celu niezbędne jest określenie dodatkowo modułu Younga i współczynnika Poissona.

## Literatura

- MALINOWSKA E. 2005: Analiza odkształceń wybranych gruntów organicznych z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk przepływu (in Polish). The description of soft soils deformations using the nonlinear characteristic of water flow. Doctor's thesis, Warsaw Agricultural University, Warsaw.
- MALINOWSKA E., SZYMAŃSKI A. 2009: Analiza zmian gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu słabonośnego podłoża. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 4 (46): 35–47.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane.
- PN-EN ISO 14688 Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów według norm europejskich.
- CHAN K., LAW T. (ed.) 2006: Proceeding of the Fourth International Conference on Soft Soil Engineering, 4-6 October Vancouver, Canada (e-Book Google Taylor & Francis, 2010 – 786).
- SZYMAŃSKI A. 1991: Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- WOLSKI W. et al. 1988: Two-Stage Constructed Embankments on Organic Soils. Report 32, Swedish Geotechnical Institute, Linköping.
- WRZESIŃSKI G., LECHOWICZ Z. 2012: Ocena stateczności etapowo budowanego nasypu na podłożu organicznym. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 58: 273–283.

## Streszczenie

**Określenie parametrów fizycznych i mechanicznych słabonośnych gruntów organicznych z podłoża trasy S2.** Określenie parametrów fizycznych i mechanicznych słabonośnego podłoża budowlanego w warunkach laboratoryjnych wymaga profesjonalnego poboru próbek, praktycznej wiedzy na temat przeprowadzenia samych badań oraz właściwej interpretacji ich wyników. W artykule określono parametry fizyczne i mechaniczne słabonośnych gruntów organicznych torfów znajdujących się w podłożu trasy S2, która będzie pełniła rolę trasy miejskiej o parametrach drogi ekspresowej. Wyniki badań potwierdziły znaczącą ściśliwość i odkształcalność analizowanego gruntu, jego duża wilgotność, dużą anizotropię i małą wytrzymałość:  $c = 8,7$  kPa,  $\phi' = 31^\circ$ .

## Summary

**Determination of physical and mechanical parameters of organic soft subsoil taken from S2 express road.** This paper presents the results of physical, chemical, oedometer and triaxial test. The laboratory tests were obtained on soft subsoil taken from S2 express road in Warsaw. The test results confirm, the very large compressibility and low strength parameters:  $c = 8,7$  kPa and  $\phi' = 31^\circ$ .

### Authors' address:

Edyta Malinowska, Przemysław Domański  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Laboratorium Centrum Wodne  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
Poland  
e-mail: edyta\_malinowska@sggw.pl  
p.d.11817@gmail.com