

# BADANIE PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH PIASKU ŚREDNIEGO W APARacie TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA Z KONTROLOWANYM CIŚNIENIEM SSANIA

Zdzisław SKUTNIK\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań trójosiowych, wytrzymałości na ścinanie piasku średniego wykonane w warunkach kontrolowanego stanu nasycenia próbki gruntu metodą „translacji osi”. Badania przeprowadzono w nowoczesnym aparacie do badań trójosiowych próbek nienasyconych. Próbki o średnicy 7 cm i wysokości 14 cm, zagęszczano w laboratorium w specjalnej formie. Wykonano dwie serie badań dla różnych wartości ciśnienia ssania  $s = u_a - u_w$ , wynoszących 60 kPa i 200 kPa, oraz naprężeń,  $\sigma_{3(netto)} = \sigma_3 - u_a$ , wynoszących 50 kPa i 200 kPa. Przeprowadzone badania wykazały wpływ ciśnienia ssania na parametry wytrzymałościowe gruntu niespoistego (piasku średniego). Wzrost ciśnienia ssania powoduje pojawienie się spójności pozornej w gruncie niespoistym, która zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia ssania.

*Słowa kluczowe:* grunt nienasycony, ciśnienie ssania, aparat trójosiowego ściskania.

## 1. Wprowadzenie

Przy projektowaniu geotechnicznym konieczna jest znajomość wytrzymałości gruntu na ścinanie, czyli określenie parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntów podłoża czy gruntów wbudowanych w budowlę ziemną. Wierzchnia warstwa podłoża oraz grunt wbudowywany w budowlę ziemne praktycznie zawsze znajduje się w strefie aeracji, a więc w stanie nienasyconym. Grunty występujące w tym stanie wykazują ujemne ciśnienie porowe (kapilarne). Przy określonej wilgotności ciśnienie przyciągania cząstek wody (ssanie), może być parametrem opisującym stan gruntu. Ssanie gruntu jest definiowane jako siła utrzymująca określoną ilość wody w gruncie (Fredlund i Rahardjo, 1993; Lu i Likos, 2004). Grunty nienasycone zachowują się odmiennie niż grunty w pełni nasycone wodą (Goulding, 2006). Badaniem zagadnień związanych ze stanem naprężenia, wytrzymałości na ścinanie, zmianami objętościowymi oraz przepływem wody w gruntach nie w pełni nasyconych wodą zajmuje się mechanika gruntów nienasyconych, która w latach osiemdziesiątych, wyodrębniła się jako osobny dział. Wcześniejsze publikacje Autora dotyczyły zmian objętościowych w gruntach nienasyconych (Garbulewski i Skutnik, 2003).

Celem artykułu jest pokazanie rezultatów badań wytrzymałości na ścinanie grunty nienasyconego, na przykładzie piasku średniego.

## 2. Cel i zakres badań gruntów nienasyconych

W odróżnieniu od gruntów w pełni nasyconych wodą gdzie występują tylko dwie fazy, właściwości gruntów nienasyconych nie mogą być analizowane tylko na podstawie jednej zmiennej stanu naprężenia to jest, naprężenia efektywnego  $\sigma' = \sigma - u_w$ . Wynika to z zupełnie odmiennego oddziaływania na szkielet gruntowy naprężenia od zewnętrznych obciążeń i ssania macierzystego fazy ciekłej wypełniającej tylko częściowo pory gruntowe. Dlatego też, do opisu stanu naprężenia gruntów nienasyconych wprowadzono dodatkowe zmienne (Fredlund i Rahardjo, 1993): naprężenie netto,  $\sigma_{net} = \sigma - u_a$  oraz ssanie macierzyste  $s = u_a - u_w$  gdzie  $u_a$  i  $u_w$  oznaczają odpowiednio ciśnienie powietrza i wody w porach gruntu. Wprowadzenie tych zmiennych w mechanice gruntów nienasyconych miało wpływ na opis matematyczny wytrzymałości na ścinanie i zmiany objętości.

Wytrzymałość na ścinanie gruntów nienasyconych, jest na ogół większa niż tych samych gruntów w pełni

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: zdzislaw\_skutnik@sggw.pl

nasyconych wodą (Fredlund i Rahardjo, 1993) i jest wyrażone równaniem:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b \quad (1)$$

gdzie:  $c'$  jest spójnością efektywną (taką samą jak dla gruntu w pełni nasyconego),  $\phi'$  jest efektywnym kątem tarcia wewnętrznego (takim samym jak dla gruntu nasyconego),  $\phi^b$  jest parametrem wytrzymałości gruntu zależnym od ciśnienia ssania macierzystego.

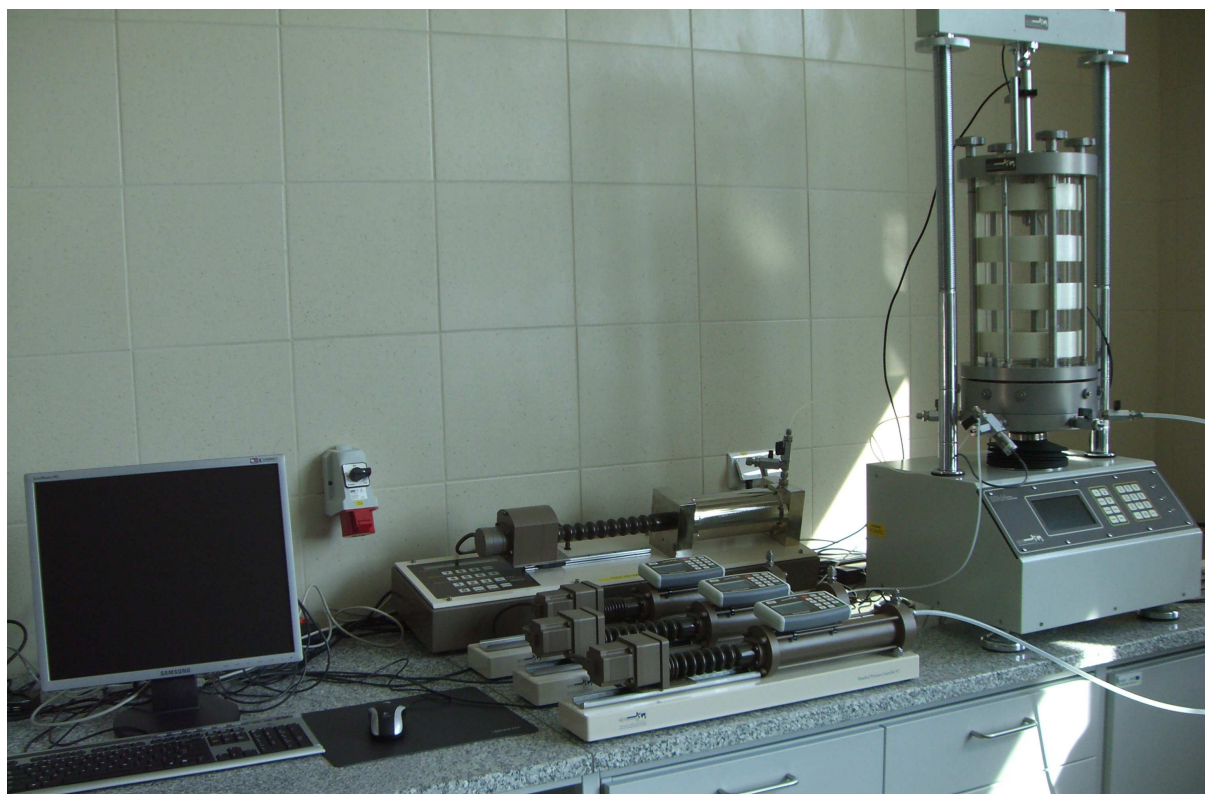
### 3. Aparatura badawcza

Wytrzymałość gruntu na ścinanie nie jest wielkością stałą dla danego rodzaju gruntu. Zależy od jego wilgotności, warunków odpływu wody, wielkości i sposobu przykładanych obciążeń. Metodyka badań w standardowym aparacie trójosiowego ściskania jest opisana w literaturze (Head, 1982). Dotyczy jednak gruntów w pełni nasyconych wodą stąd też w każdym przypadku konieczne jest nasączenie próbki. Zazwyczaj stosowanym sposobem nasączania próbek jest metoda ciśnienia wyrównawczego (tak zwana metoda „back pressure”). Pierwszym etapem nasączania jest wymiana powietrza znajdującego się w gruncie na dwutlenek węgla, który znacznie łatwiej rozpuszcza się w wodzie. Następnie, etapowo podnoszone jest ciśnienie w całym obwodzie nasączania. Etapowość podnoszenia ciśnienia wynika z konieczności utrzymania stałej wartości naprężenia efektywnego podczas całej procedury nasączania. Stopień nasycenia porów gruntu wodą

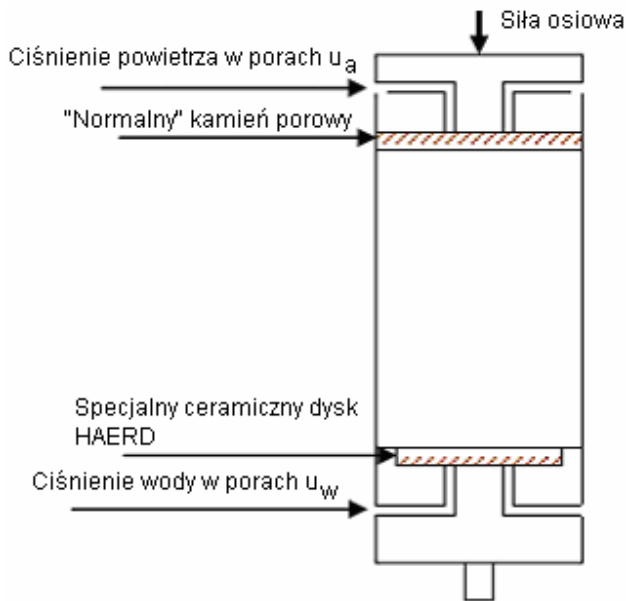
oceniany jest na podstawie parametru *Skemptona B*, który bardzo dobrze koreluje z parametrem stanu nasycenie  $S_r$ .

Badania na potrzeby niniejszego artykułu przeprowadzono w Centrum Naukowo-Dydaktycznym Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska – „Centrum Wodne” SGGW, w nowoczesnym aparacie trójosiowego ściskania przystosowanym do badania gruntów nienasyconych. W skład aparatury badawczej wchodzi: komora aparatu trójosiowego ściskania, rama o obciążeniu do 50 kN, trzy kontrolery ciśnienia i objętości wody, jeden kontroler ciśnienia i objętości powietrza oraz komputer sterujący (rys. 1). Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy podłączeń ciśnienia powietrza  $u_a$  i wody  $u_w$  do próbki. Ciśnienie powietrza porowego  $u_a$  jest podłączone od góry próbki, i zawsze ma wyższą wartość niż ciśnienie wody w porach  $u_w$  podłączone u podstawy.

W odróżnieniu od standardowego aparatu trójosiowego ściskania, badana próbka umieszczana jest na podstawie, w której znajduje się specjalny ceramiczny dysk, który zapobiega przejściu powietrza do strefy wody (HAEPD – *high-air-entry porous disk*) o ciśnieniu wejścia powietrza wynoszącym 1500 kPa. Aby dysk działał prawidłowo musi być przed badaniem całkowicie nasycony wodą, czego objawem jest pokazanie się kropeł wody na powierzchni dysku (rys. 3). Inne urządzenia niezbędne do prowadzenia badań z kontrolowanym stanem nasycenia, czy ciśnienia ssania to kontrolery ciśnienia/objętości wody i powietrza (rys. 1). Jeden z kontrolerów ciśnienia/objętości wody jest źródłem ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*). Służy także do pomiaru zmiany objętości wody w próbce. Drugi z nich jest źródłem ciśnienia działającego w komorze  $\sigma_3$ .

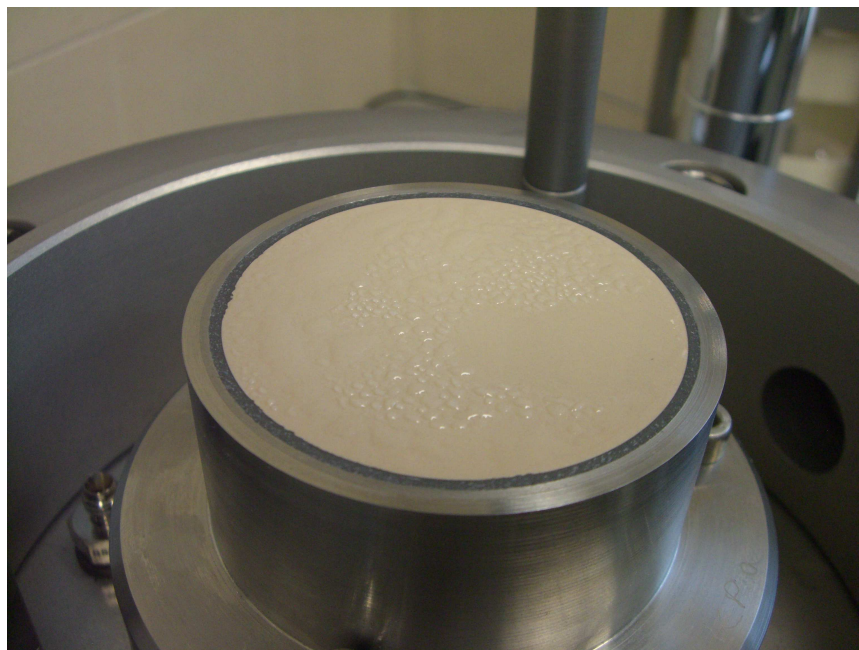


Rys. 1. Widok aparatury badawczej



Rys. 2. Schemat ideowy podłączeń ciśnienia powietrza  $u_a$  i wody  $u_w$  do próbki.

Kontroler ciśnienia/objętości powietrza jest wykorzystywany jako stałe źródło ciśnienia oraz jest wykorzystywana do pomiaru zmian objętości powietrza w próbce.



Rys. 3. Nasączony dysk ceramiczny – podstawa próbki

#### 4. Przygotowanie próbek i metodyka badań

Grunt wykorzystany do badań to piasek średni, którego krzywą uziarnienia przedstawiono na rysunku 4. Próbki do badań przygotowywano w laboratorium zagęszczając je w specjalnej formie (rys. 5).

Piasek wsypywano warstwami do środka formy wyścielonej gumową membraną stosowaną w badaniach trójosiowych. Każda warstwa była zagęszczana za pomocą ubijaka, aż do osiągnięcia założonej gęstości objętościowej. Po wyrównaniu powierzchni na próbce umieszczano kamień porowy i kopolkę oraz uszczelniano gumowymi o-ringami. W celu dokonania montażu komory i napełnienia jej wodą, w próbce utrzymywano niewielkie podciśnienie, aby nadać jej odpowiednią wytrzymałość (rys. 6).

Próbki przygotowane do badań miały wysokość 14 cm i średnicę 7 cm. Dla każdej próbki określono wilgotność początkową gruntu oraz gęstość objętościową, a następnie obliczono gęstość objętościową szkieletu gruntowego i wskaźnik porowatości. Parametry początkowe badanych próbek zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie parametrów początkowych próbek do badań trójosiowych

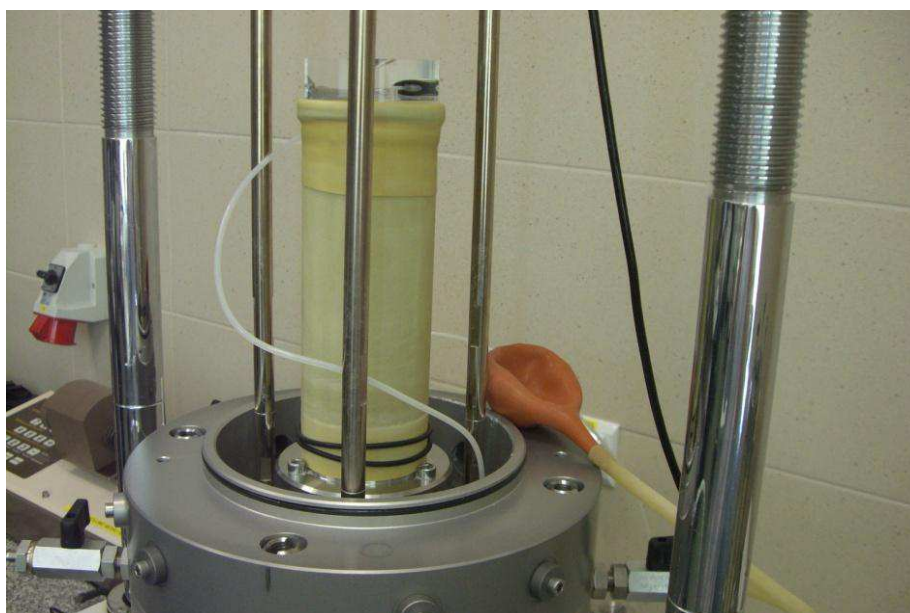
Badanie	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w_0$ [%]	$\rho_d$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [t/m <sup>3</sup> ]	$e$ [-]
TRX1	1,831	6,50	1,719	2,65	0,542
TRX2	1,876	9,16	1,718	2,65	0,542
TRX3	1,951	9,10	1,788	2,65	0,482
TRX4	1,785	9,46	1,630	2,65	0,626



Rys. 4. Krzywa uziarnienia badanego gruntu



Rys. 5. Formowanie próbki



Rys. 6. Utrzymywanie podciśnienia w próbce podczas montażu

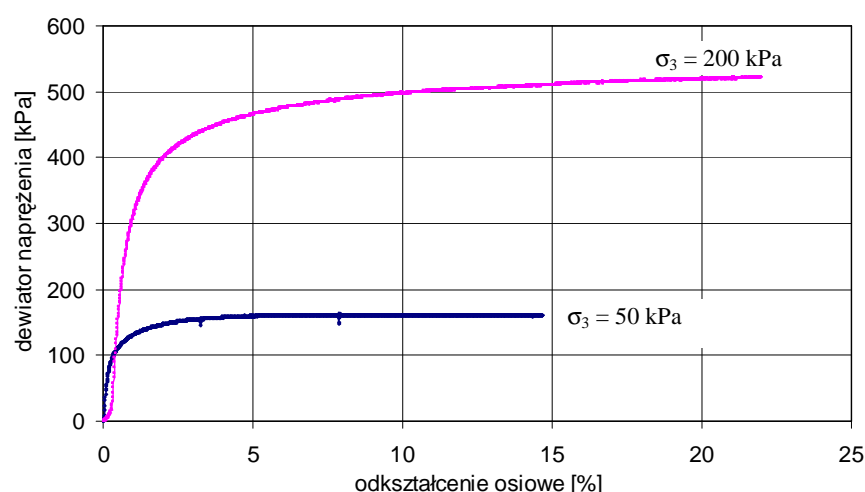
Badania przeprowadzono z konsolidacją i odpływem (metoda CD). Każda próbka gruntu była konsolidowana pod izotropowym naprężeniem  $\sigma_3$ , a ciśnienie powietrza w porach  $u_a$  i wody w porach  $u_w$  utrzymywano na założonym poziomie, po stronie wartości dodatnich – w celu ustalenia ssania matrycowego, większego niż 101,3 kPa (1 atm), aby wykluczyć kawitację w systemie pomiarowym ciśnienia wody w porach. Metoda ta jest nazywana „techniką translacji osi”. Pod koniec procesu konsolidacji, w próbce utrzymywano naprężenie netto ( $\sigma_3 - u_a$ ) i ssanie matrycowe ( $u_a - u_w$ ). Podczas etapu ścinania próbka była ściskana w kierunku osiowym, zawory powietrza i wody w porach pozostawały otwarte. Dewiator naprężenia zadawano powoli, aby zapobiec powstawaniu w próbce nadwyżki ciśnienia powietrza i wody w porach. W tabeli 2 zestawiono wartości naprężeń i ciśnień wody i powietrza w porach, przy których wykonano najpierw konsolidację, a następnie ścinanie każdej z próbek.

## 5. Wyniki badań

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono charakterystyki odkształceniowo-naprężeniowe badanych próbek piasku średniego przy ciśnieniach ssania  $s = 60$  Pa i  $s = 200$  kPa.

Tab. 2. Wartości naprężenia i ciśnienia wody i powietrza w poszczególnych etapach konsolidacji i ścinania podczas badań trójosiowych

Badanie	$\sigma_3$ [kPa]	$u_a$ [kPa]	$u_w$ [kPa]	$s = u_a - u_w$	$\sigma_{3netto} = \sigma_3 - u_a$
TRX1	160	110	50	60	50
TRX2	310	110	50	60	200
TRX3	300	250	50	200	50
TRX4	450	250	50	200	200



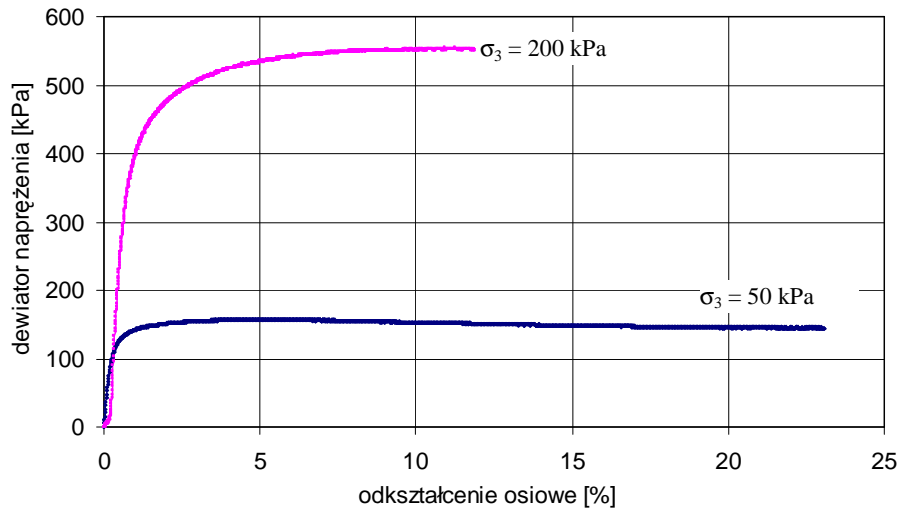
Rys. 7. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia dla próbek TRX1 i TRX2 badanych przy ciśnieniu ssania  $s = 60$  kPa

Zarówno etap konsolidacji jak ścinania próbek gruntu wykonano przy naprężeniach bocznych  $\sigma_{3netto} = 50$  kPa i  $\sigma_{3netto} = 200$  kPa, dla wyżej podanych, wzbudzonych techniką translacji osi ciśnień ssania.

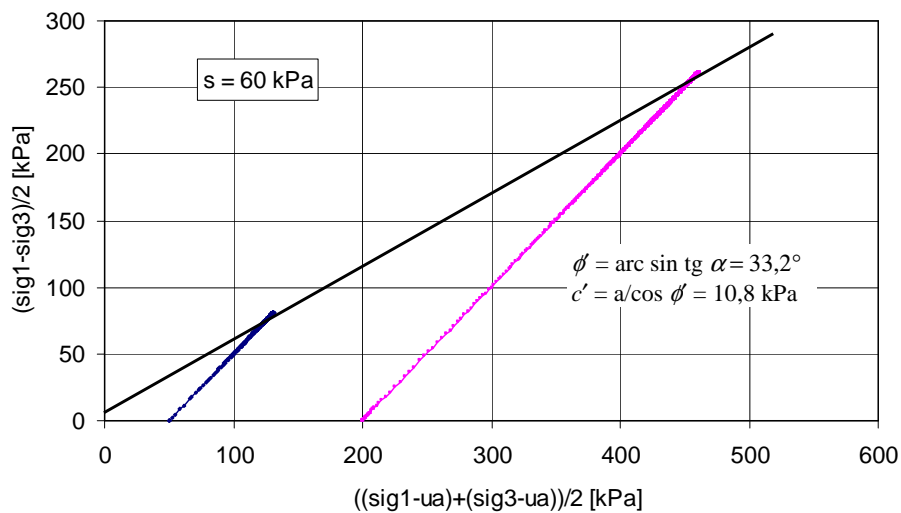
Wykresy ścieżek naprężenia i zmodyfikowanych obwiedni zniszczenia przedstawiono na rysunkach 9 i 10.

Na podstawie zależności odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia (rys. 7 i 8) określono wartości maksymalnego dewiatora, przy którym następowało zniszczenie (ścięcie) każdej z próbek. Dla każdego badania sporządzono wykresy ścieżek naprężenia, na których wrysowano zmodyfikowane obwiednie zniszczenia (rys. 9 i 10).

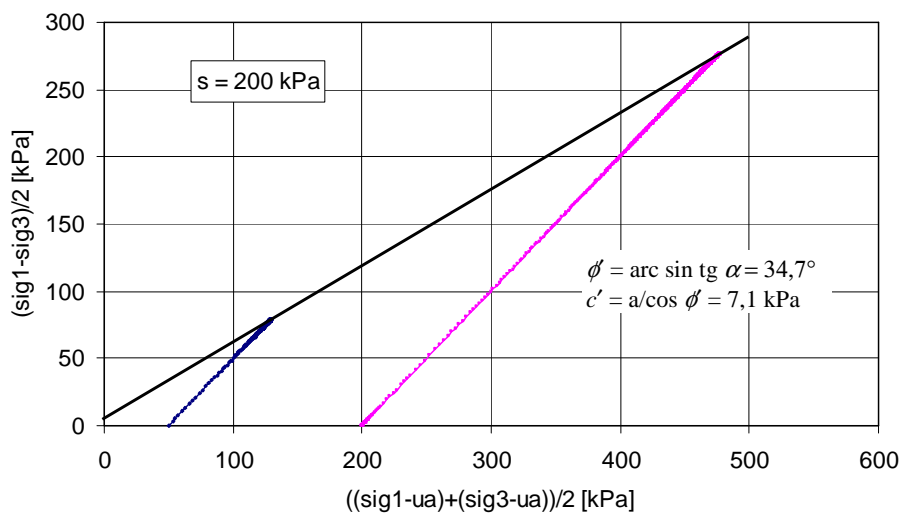
Określono następujące wartości parametrów wytrzymałościowych. Przy ciśnieniu ssania  $s = 60$  kPa, efektywny kąt tarcia wewnętrznego  $\phi' = 33,2^\circ$ , a opór spójności  $c' = 10,8$  kPa. Dla próbek badanych przy ciśnieniu ssania 200 kPa, określona wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\phi'$  wyniosła  $34,7^\circ$ , zaś opór spójności  $c' = 7,1$  kPa.



Rys. 8. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia dla próbek TRX3 i TRX4 badanych przy ciśnieniu ssania  $s = 200$  kPa.



Rys. 9. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia dla próbek TRX1 i TRX2 badanych przy ciśnieniu ssania  $s = 60$  kPa.



Rys. 10. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia dla próbek TRX3 i TRX4 badanych przy ciśnieniu ssania  $s = 200$  kPa.

## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły, że ciśnienie ssania zwiększa wytrzymałość na ścinanie piasków poprzez bezpośredni wpływ na wzrost kąta tarcia wewnętrznego gruntu oraz pojawienie się oporu spójności. Wzrost kąta tarcia jest nieznaczny i wyniósł około  $1,5^\circ$  przy zmianie ciśnienia ssania w zakresie od 60 kPa do 200 kPa. Opór spójności, który dla piasków badanych przy pełnym nasyceniu wynosi 0 kPa, zmieniała się w zakresie od 10,8 kPa do 7,1 kPa.

Dzieje się tak, ponieważ przy rosnącym ciśnieniu ssania powietrze wchodzi w pory, a wokół punktów styku między cząsteczkami gruntu zaczyna formować się ściśliwa błona (Grabowska-Olszewska, 1998). Siły kapilarne powstające w wyniku ssania w ściśliwej błonie zwiększają siły normalne w kontaktach międzycząsteczkowych a to zwiększa kąt tarcia wewnętrznego oraz powoduje większą spójność cząstek gruntu, w tym przypadku nawet niespoistego.

Wzrost oporu spójności związany z częściowym nasyceniem materiałów, takich jak piaski, jest nazywany spójnością „pozorną”. W momencie całkowitego nasycenia opór spójności może zmniejszyć się do zera. Na spójność pozorną składają się dwa rodzaje spójności, tradycyjna  $c'$ , wynikająca z mobilizacji fizykochemicznych sił międzycząsteczkowych, na przykład van der Waals'a, oraz spójność kapilarna  $c''$ , która stanowi mobilizację kapilarnych sił międzycząsteczkowych w odpowiedzi na siły ścinające. W rezultacie piasek nienasycony wykazuje wyższą wytrzymałość niż piasek nasycony.

## Literatura

- Fredlund D. G., Rahardjo H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated soils. *John Wiley and Sons*, New York.
- Goulding B. R. (2006). Tensile strength, shear strength, and effective stress for unsaturated sand. A dissertation, presented to the *Faculty of the Graduate School University of Missouri*, Columbia.
- Grabowska-Olszewska B. (1998). Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. *PWN*, Warszawa.
- Garbulewski K., Skutnik Z. (2003). Badanie gruntów nienasyconych w konsolidometrze UPC. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3/4, 126-128.
- Head K. H. (1986). Manual of Soil Laboratory Testing. Vol. 3. *Pentech Press Ltd*, London.
- Lu N., Likos W. (2004). Unsaturated soil mechanics. *John Wiley and Sons*, New York.

### THE TEST OF STRENGTH PARAMETERS OF MEDIUM SAND IN THE TRIAXIAL APPARATUS WITH CONTROLLED SUCTION PRESSURE

**Abstract:** This paper presents the results of triaxial tests, shear strength of the medium sand performed in a controlled state of the soil samples saturation using the "axis translation technique". The study was conducted in a modern apparatus for triaxial testing of unsaturated samples. Test specimens with a diameter of 7 cm and a height of 14 cm were prepared in the laboratory in a special form by compaction. Two series of tests were performed for different values of suction pressure,  $s = u_a - u_w$  of 60 kPa and 200 kPa, and stress,  $\sigma_{3(netto)} = \sigma_3 - u_a$ , equal to 50 kPa and 200 kPa. The study showed the impact of suction pressure on the soil strength parameters of medium sand. Increase of suction pressure causes the appearance of apparent cohesion in non-cohesive soil, which increases with increasing of the suction pressure.