

Badania wpływu ciśnienia ssania na wytrzymałość i sztywność gruntu spoistego i niespoistego

Dr inż. Zdzisław Skutnik, mgr inż. Marcin Biliniak, prof. dr hab. inż. Alojzy Szymański

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

GRUNTY NIENASYCONE

Grunt wbudowany w budowlę ziemną, jak również grunt występujący w wierzchniej warstwie podłoża praktycznie zawsze znajduje się w stanie niepełnego nasycenia wodą. Zazwyczaj do określenia parametrów wytrzymałości na ścinanie takiego gruntu jest stosowany konwencjonalny aparat trójosiowego ściskania i teoria mechaniki gruntów nasyconych [6]. W odróżnieniu od gruntu w pełni nasyconego wodą, gdzie występują tylko dwie fazy, właściwości gruntu nienasyconego nie mogą być analizowane tylko na podstawie jednej zmiennej stanu naprężenia, tj. naprężenia efektywnego, $\sigma' = \sigma - u_w$. W gruncie nienasyconym występuje odmienne oddziaływanie na szkielet gruntowy naprężenia od zewnętrznych obciążeń i ssania macierzystego fazy ciekłej wypełniającej tylko częściowo pory gruntowe. Dlatego

też do opisu stanu naprężenia gruntu nienasyconego wprowadzono dodatkowe zmienne: naprężenie netto $\sigma_{net} = \sigma - u_a$ oraz ssanie macierzyste $s = u_a - u_w$, gdzie: u_a – ciśnienie powietrza w porach, u_w – ciśnienie wody w porach [1].

Wytrzymałość na ścinanie gruntu nienasyconego jest na ogół większa niż tego samego gruntu w pełni nasyconego wodą, szczególnie gruntu spoistego [1]. Jest funkcją składowej normalnej naprężenia netto, $(\sigma - u_a)$ i ciśnienia ssania macierzystego $s = u_a - u_w$, co wyraża równanie:

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

gdzie:

c' – spójność efektywna (taka sama jak gruntu w pełni nasyconego),

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego (taki sam jak gruntu nasyconego),

ϕ^b – parametr wytrzymałości gruntu zależny od ciśnienia ssania macierzystego.

Graficzną interpretację równania (1) w układzie trójwymiarowym przedstawiono na rys. 1.

Grunt występujący w stanie nienasyconym wykazuje ujemne ciśnienie wody w porach (kapilarne). Przy określonej wilgotności ciśnienie przyciągania cząstek wody (ssanie) może być parametrem opisującym stan gruntu, które jest definiowane jako siła utrzymująca określoną ilość wody w gruncie [2, 7]. Stąd grunt nienasycony zachowuje się odmiennie niż grunt w pełni nasycony wodą [4]. Obecność w porach w gruncie zarówno wody, jak i powietrza, sprawia, że całkowita zmiana objętości próbki gruntu nie jest równa objętości odpływającej wody z porów w gruncie.

Sztywność gruntu zależy w tym przypadku od wartości ciśnienia ssania, stanu naprężenia, jak również od przepuszczalności wody i powietrza w zależności od wskaźnika porowatości i stopnia nasycenia ośrodka gruntowego [8, 9]. Konieczne jest zatem badanie właściwości takiego gruntu w rzeczywistych

warunkach naprężenia i nasycenia [3]. Charakterystyki ścinania gruntu uzyskiwane z badań w aparacie trójosiowego ściskania, szczególnie badań prowadzonych w warunkach swobodnego drenażu, są wykorzystywane do oceny wartości modułów odkształcenia (sztywności) gruntu. W zależności od zakresu odkształcenia, metod pomiaru odkształcenia jest możliwe określenie wartości danego rodzaju modułu [10].

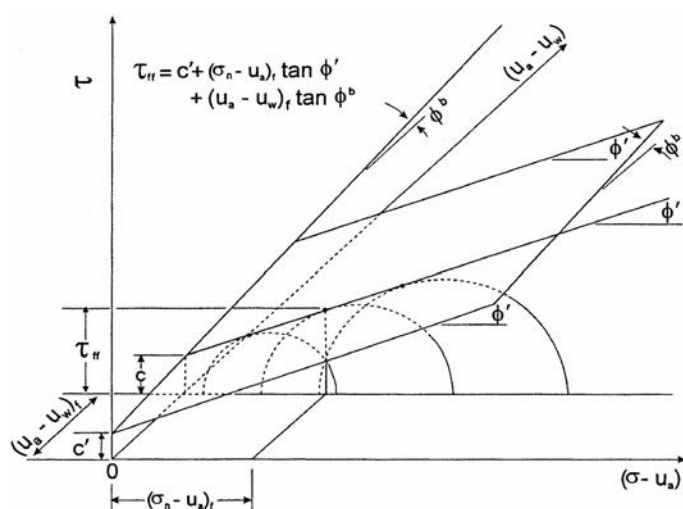
APARATURA BADAWCZA I METODYKA BADAŃ

Badania, na potrzeby niniejszego artykułu przeprowadzono w nowoczesnym aparacie trójosiowego ściskania, przystosowanym do badania gruntów nienasyconych. Schemat aparatury przedstawiono na rys. 2.

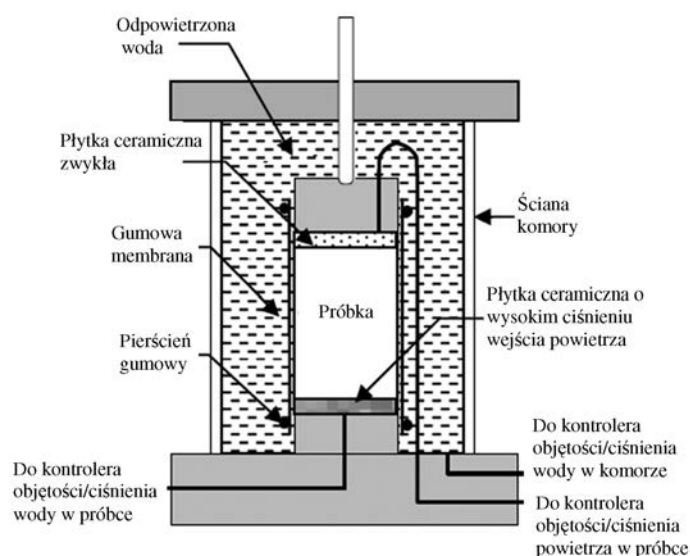
W odróżnieniu od standardowego aparatu trójosiowego ściskania badana próbka jest umieszczona na podstawie, w której znajduje się specjalna płytka ceramiczna o wysokim ciśnieniu wejścia powietrza, która pozwala na wytworzenie ssania macierzystego poprzez zastosowanie techniki translacji osi (*axis translation technique*) [1, 8]. Inne urządzenia niezbędne do prowadzenia badań z kontrolowanym stanem nasycenia (ciśnieniem 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 w komorze σ_3 . Kontroler ciśnienia/objętości powietrza jest wykorzystywany jako stałe źródło ciśnienia oraz służy do pomiaru zmian objętości powietrza w próbce.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH GRUNTÓW I WYNIKI BADAŃ

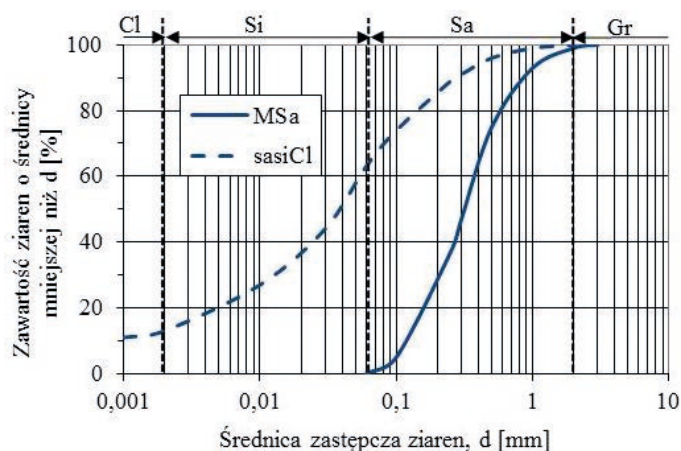
Grunty, z których przygotowano próbki do badań w aparacie trójosiowego ściskania, to według klasyfikacji PN-86/B-2480 piasek średni i glina, zaś według obowiązującej normy PN-EN ISO 14688 sklasyfikowane jako MSa – piasek średni i sasiCl – il pylasto-piaszczysty. Krzywe uziarnienia badanych gruntów przedstawiono na rys. 3.



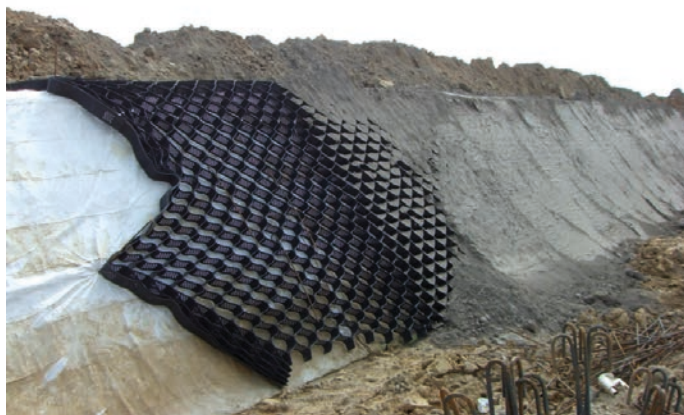
Rys. 1. Graficzna interpretacja obwiedni zniszczenia Coulomba-Mohra dla gruntów nienasyconych [1]



Rys. 2. Schemat połączeń komory aparatu trójosiowego ściskania do badań gruntów nienasyconych



Rys. 3. Krzywe uziarnienia badanych gruntów



Rys. 4. Wykonywanie nasypów stanowiących ekran akustyczny wzdłuż trasy szybkiego ruchu

Piasek MSA jest stosowany często jako warstwa drenażowa w różnego rodzaju konstrukcjach ziemnych, natomiast ilu sasiC1 pobrano z jednej z tras szybkiego ruchu, budowanych w okolicach Warszawy. Z tego gruntu wykonywano nasypy ziemne o bardzo stromych skarpach pełniące funkcję ekranów akustycznych (rys. 4), praktycznie przez cały czas pozostające w stanie niepełnego nasycenia.

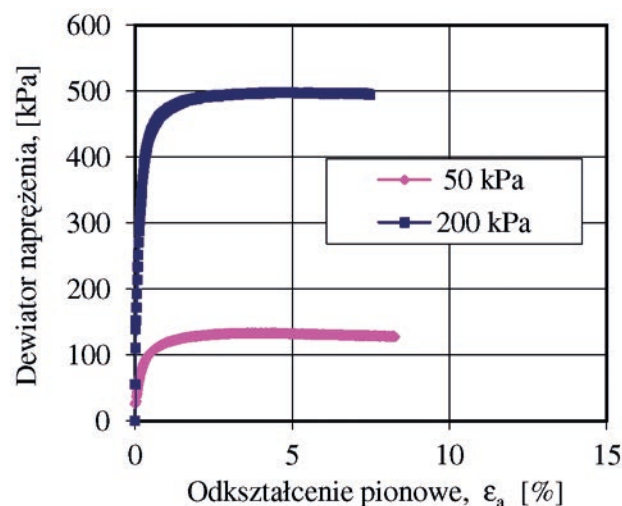
Podobna sytuacja, gdy mamy stan niepełnego nasycenia gruntu wodą, występuje w przypadku innych budowli ziemnych, takich jak: wały przeciwpowodziowe, nasypy drogowe, a także w przypadku podłoża budowli, w którym zwierciadło wody jest położone bardzo głęboko.

Próbki do badań przygotowywano w laboratorium metodą zagęszczania z energią odpowiadającą metodzie normalnej Proctora. Probki umieszczane w komorze aparatu trójosiowego ściskania miały wysokość 14 cm i średnicę 7 cm. Dla każdej z nich określono gęstość objętościową oraz wilgotność początkową gruntu. Gęstość objętościowa próbek piasku MSA zawierała się w przedziale od 1,78 g/cm³ do 1,90 g/cm³, a wilgotność początkowa od 6,5% do 9,4%. Parametry początkowe badanych próbek ilu sasiC1 były następujące; gęstość objętościowa zawierała się w przedziale od 2,15 g/cm³ do 2,21 g/cm³, a wilgotność zmieniała się od 11,5% do 14,4%. Wilgotność optymalna badanego ilu wynosiła 13,5%.

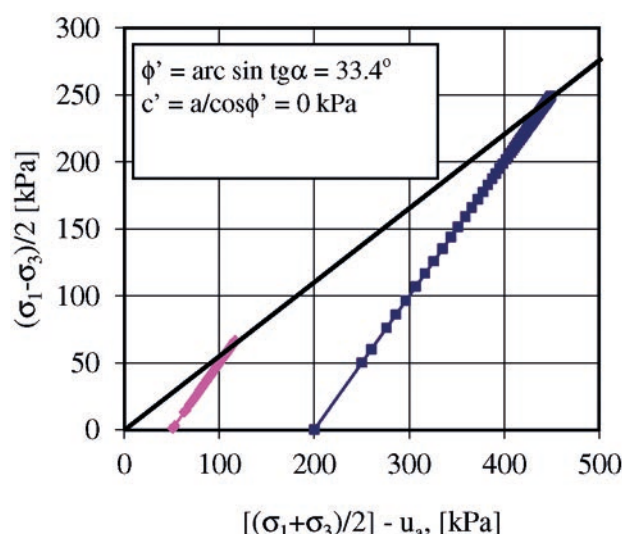
Badania w aparacie trójosiowego ściskania przeprowadzono metodą z konsolidacją i odpływem CD. Każda próbka gruntu była konsolidowana pod izotropowym naprężeniem σ_3 , a ciśnienie powietrza w porach u_a i wody w porach u_w utrzymywano na ustalonym poziomie w celu wytworzenia w próbce założonego naprężenia netto ($\sigma_3 - u_a$) i ssania matrycowego ($u_a - u_w$). 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.

WYNIKI BADAŃ

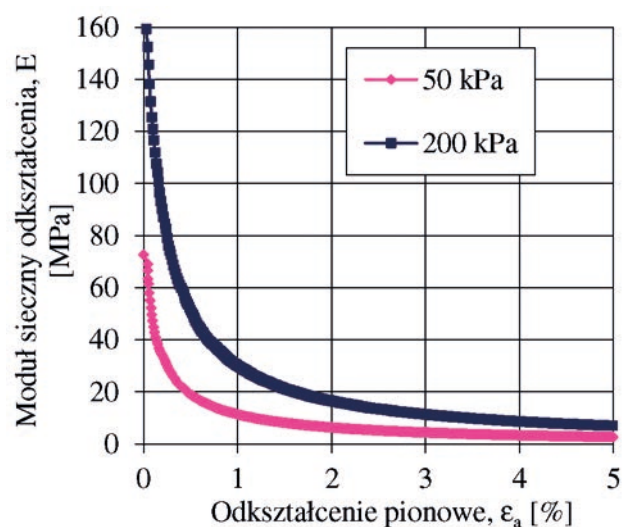
Na rys. 5 ÷ 13 przedstawiono wyniki badań próbek piasku MSA, zaś na rys. 14 ÷ 19 wyniki badań próbek ilu sasiC1.



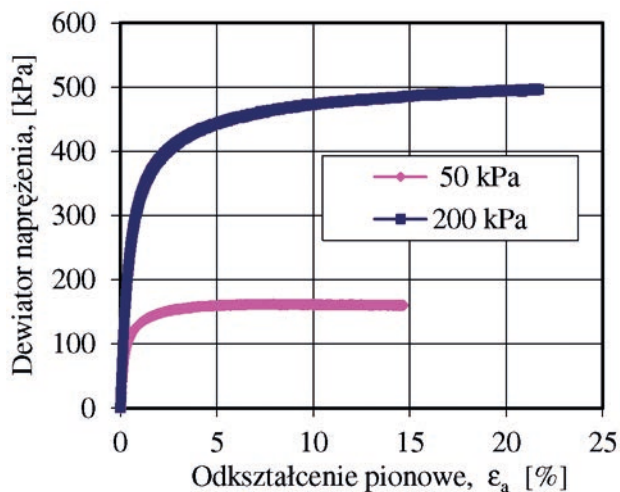
Rys. 5. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia próbek piasku MSA badanych przy pełnym nasyceniu (ciśnienie ssania $s = 0$ kPa) i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



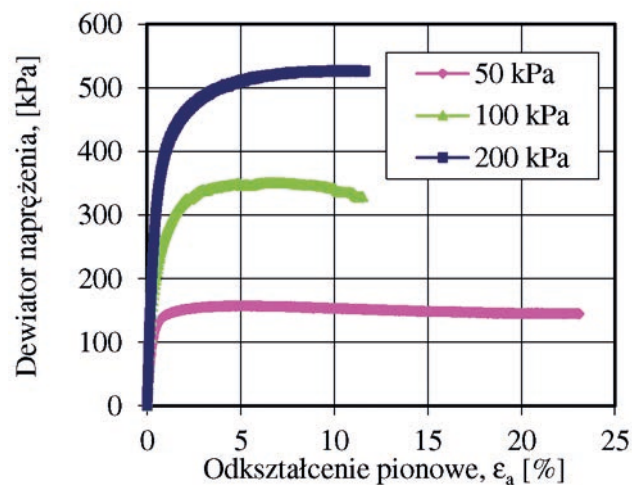
Rys. 6. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia próbek piasku MSA badanych przy pełnym nasyceniu próbek (ciśnienie ssania $s = 0$ kPa)



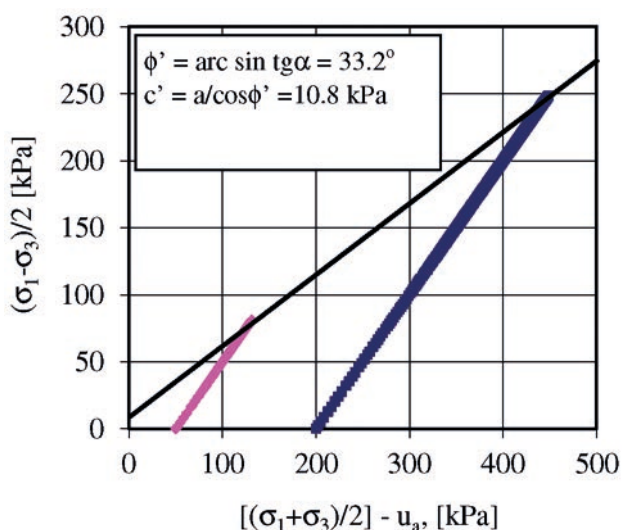
Rys. 7. Rozkład modułu siecznego odkształcenia próbek piasku MSA badanych przy pełnym nasyceniu (ciśnienie ssania $s = 0$ kPa) i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



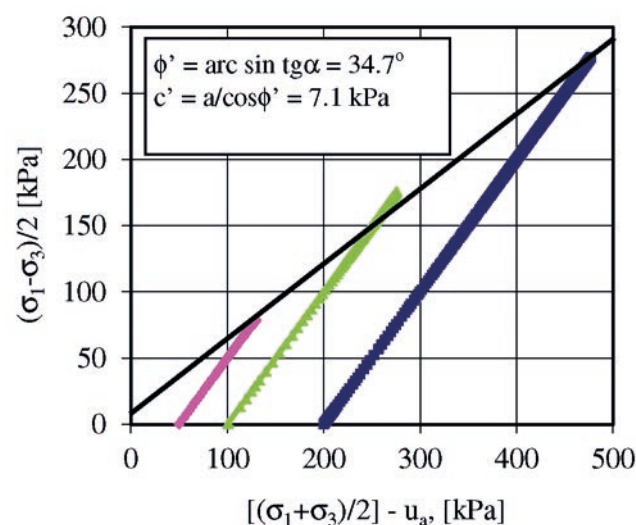
Rys. 8. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia próbek piasku MSa badanych przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



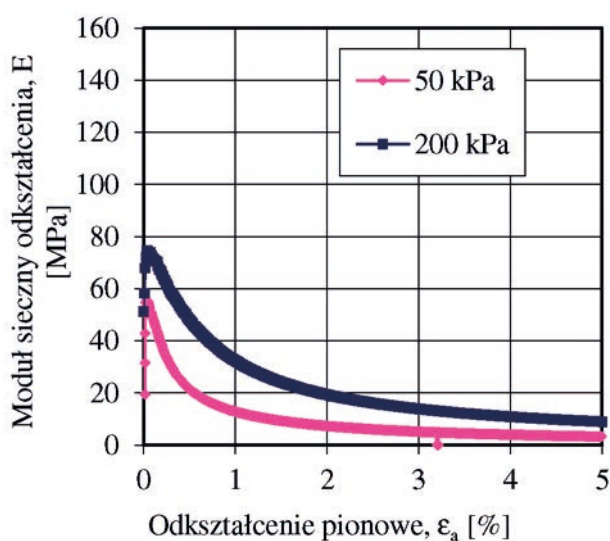
Rys. 11. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia próbek piasku MSa badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa, $\sigma_{3netto} = 100$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



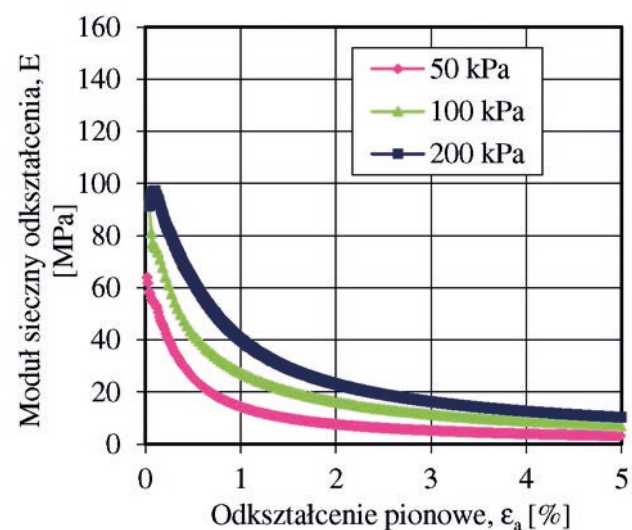
Rys. 9. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia próbek piasku MSa badanych przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa



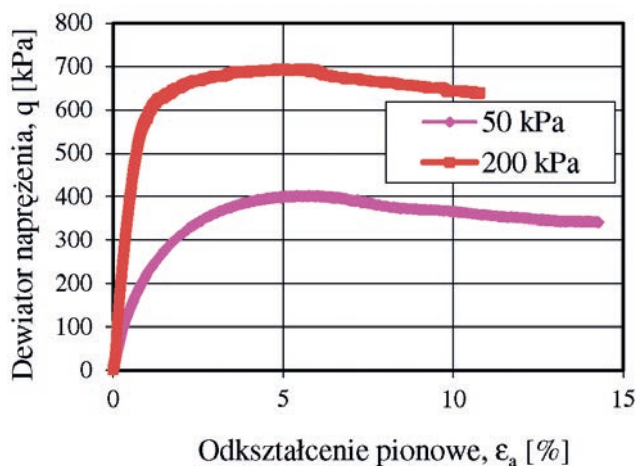
Rys. 12. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia próbek piasku MSa badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa



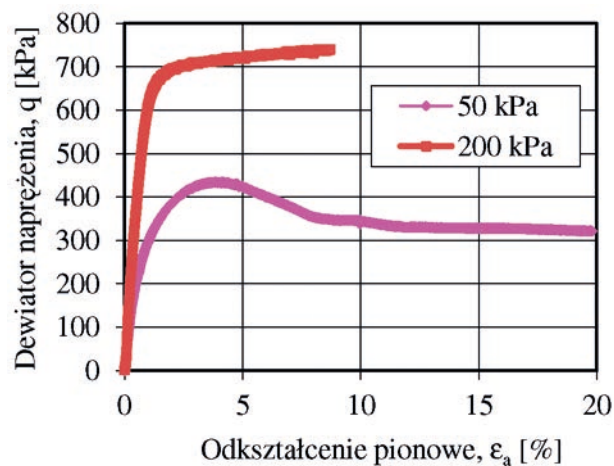
Rys. 10. Rozkład modułu ścieżnego odkształcenia próbek piasku MSa badanych przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



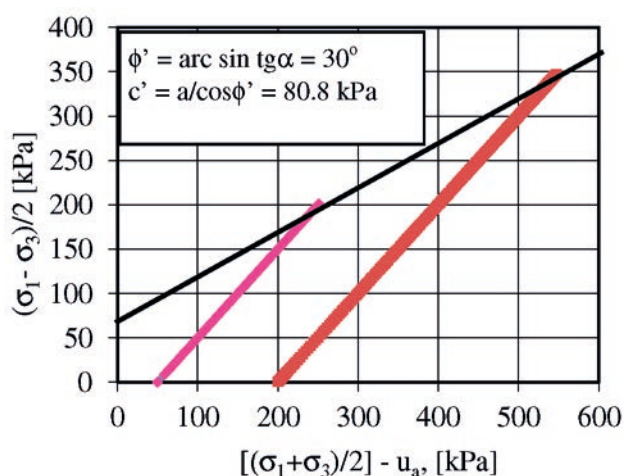
Rys. 13. Rozkład modułu ścieżnego odkształcenia próbek piasku MSa badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa, $\sigma_{3netto} = 100$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



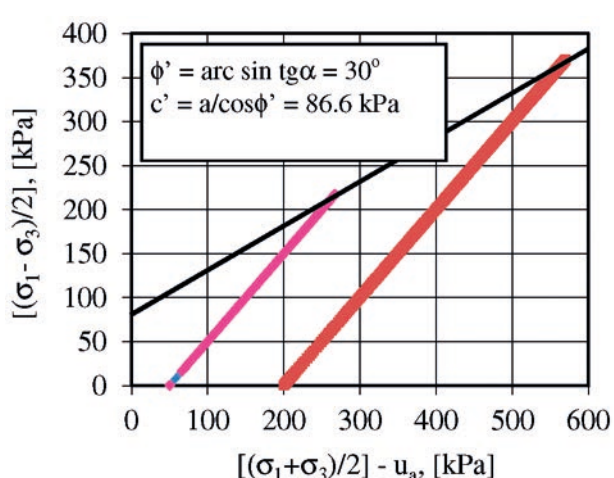
Rys. 14. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia próbek iltu sasiCl badanych przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



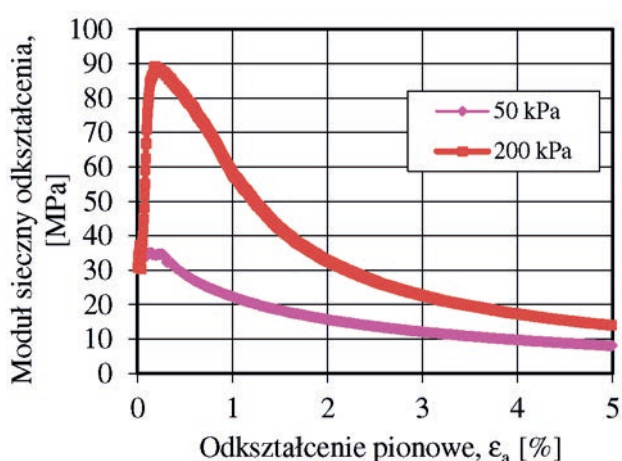
Rys. 17. Zależność: odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia próbek iltu sasiCl badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



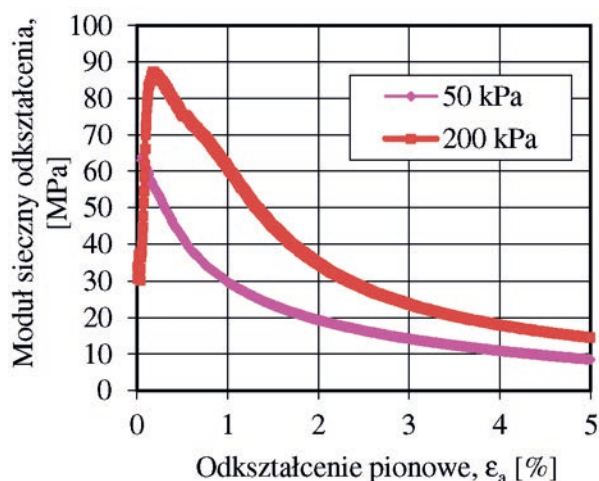
Rys. 15. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia próbek iltu sasiCl badanych przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa



Rys. 18. Zmodyfikowana obwiednia zniszczenia próbek iltu sasiCl badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa



Rys. 16. Rozkład modułu ściecznego odkształcenia próbek iltu sasiCl badanych przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa



Rys. 19. Rozkład modułu ściecznego odkształcenia próbek iltu sasiCl badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa i naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa

**Tabl. 1. Warunki badań
i zestawienie uzyskanych parametrów wytrzymałościowych**

Grunt	Numer badania	$\sigma_{3netto} = \sigma_3 - u_a$ [kPa]	$s = u_a - u_w$ [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]
MSa	1	50	0	33,4	0
	2	200			
	3	50	60	33,2	10,8
	4	200			
	5	50	200	34,7	7,1
	6	100			
	7	200			
sasiCl	8	50	60	30	80,8
	9	200			
	10	50	200	30	86,6
	11	200			

Na rys. 5, 8 i 11 przedstawiono charakterystyki odkształceniowo-naprężeniowe badanych próbek piasku MSa przy pełnym nasyceniu próbki (ciśnieniu ssania $s = 0$ kPa) oraz ciśnieniach ssania $s = 60$ Pa i $s = 200$ kPa. Zarówno etap konsolidacji, jak ścinania próbek gruntu, wykonano przy naprężeniu efektywnym netto $\sigma_{3netto} = 50$ kPa i $\sigma_{3netto} = 200$ kPa oraz dodatkowo przy $\sigma_{3netto} = 100$ kPa dla jednej z próbek badanych przy ciśnieniu ssania $s = 200$ kPa. Próbkę iłu sasiCl badano przy ciśnieniach ssania $s = 60$ kPa i $s = 200$ kPa. Charakterystyki odkształceniowo-naprężeniowe badanych próbek iłu sasiCl przedstawiono na rys. 14 i 17. Na podstawie zależności odkształcenie osiowe – dewiator naprężenia (rys. 5, 8, 11, 14 i 17) określono wartości maksymalnego dewiatora, jak kryterium ścięcia.

Do każdego badania sporządzono wykresy ścieżek naprężenia, na których wrysowano zmodyfikowane obwiednie zniszczenia. Wykresy te przedstawiono na rys. 6, 9 i 12 (dla próbek piasku MSa) i rys. 15 i 18 (dla próbek iłu sasiCl). Do każdej serii badań określono wartości parametrów wytrzymałościowych, które zestawiono w tabl. 1.

W celu oceny wpływu ciśnienia ssania na sztywność badanych gruntów wykorzystano charakterystyki ścinania gruntu z badań w aparacie trójosiowego ściskania, do określenia siecznych modułów odkształcenia. Zmienność siecznych modułów odkształcenia w funkcji odkształcenia każdej z badanych próbek przedstawiono na rys. 7, 10, 13, 16 i 19.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że wzrost ciśnienia ssania wpływa korzystnie na wartości parametrów wytrzymało-

ściowych i odkształceniowych. Wpływ ten jest różny i zależy od rodzaju badanego gruntu i wartości ciśnienia ssania. W przypadku piasków wartość kąta tarcia wewnętrznego nie zależy praktycznie od wartości ciśnienia ssania, jednakże wzrost ciśnienia ssania powoduje pojawienie się spójności w niespoistym gruncie. Wzrost spójności związany z częściowym nasyceniem materiałów, takich jak piaski, jest nazywany spójnością „pozorną”. W momencie całkowitego nasycenia spójność może zmniejszyć się do zera. Miało to miejsce w przypadku próbek badanych przy pełnym nasyceniu. Na spójność „pozorną” składają się dwa rodzaje spójności: tradycyjna c' , wynikająca z mobilizacji fizykochemicznych sił międzycząsteczkowych, np. van der Waalsa, oraz spójność kapilarna c' , która stanowi mobilizację kapilarnych sił międzycząsteczkowych w odpowiedzi na siły ścinające [5]; i to najprawdopodobniej miało miejsce w tym przypadku. Nie zaobserwowano wyraźnego wpływu ciśnienia ssania na rozkład modułu siecznego odkształcenia badanych próbek piasku.

W przypadku gruntu spoistego, dla którego przeprowadzono badania przy ciśnieniu ssania $s = 60$ kPa i $s = 200$ kPa, wartość efektywnego kąta tarcia wewnętrznego wynosi 30° , zaś spójność efektywna c' wyraźnie wzrosła i zawiera się w przedziale od 80,8 kPa do 86,6 kPa. Zazwyczaj w badaniach tego rodzaju gruntów w stanie pełnego nasycenia w aparacie trójosiowego ściskania metodą CD wartość spójności jest bliska 0 lub wynosi kilka czy kilkanaście kPa.

LITERATURA

1. Alonso E. E., Gens A., Josa A.: A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique* 40, No. 3, 405-429, 1990.
2. Fredlund D. G., Rahardjo H.: *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley and Sons, INC, New York, 1993.
3. Garbulewski K., Skutnik Z.: Badanie gruntów nienasyconych w konsolidometrze UPC, *Inżynierska Morska i Geotechnika*, Nr 3/4, 2003.
4. Goulding B. R.: Tensile strength, shear strength, and effective stress for unsaturated sand, A dissertation, presented to the Faculty of the Graduate School University of Missouri – Columbia, 2006.
5. Grabowska-Olszewska B.: *Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych*, PWN, Warszawa, 1998.
6. Head K. H.: *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 3., 1982.
7. Lu N., Likos W.: *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley and Sons, INC, New York, 2004.
8. Romero, E.: Characterization and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1999.
9. Toll D. G.: A framework for unsaturated soil behaviour. *Géotechnique* 40 (1), 1990, 31-44.
10. Truty A.: Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń. Aspekty modelowania numerycznego. *Czasopismo Techniczne*, z. 3-ś, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008, 107-126.