

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE GRUNTÓW NIENASYCONYCH NA PRZYKŁADZIE UTWORÓW ZWIETRZELINOWYCH Z OKOLIC GORLIC

Tymoteusz Zydróż, Paweł Miętus

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie gruntów pochodzących z terenów osuwiskowych z okolic Bielanki i Bystrej k. Gorlic. Celem pracy było określenie wpływu wilgotności i prędkości ścinania na wartości wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów. Wyniki badań wykazały, że badane grunty cechują się zróżnicowaniem wytrzymałości na ścinanie oraz parametrów ją charakteryzujących, które w znaczącym stopniu były zależne od ich uziarnienia gruntów i wilgotności oraz zastosowanej prędkości ścinania. Wzrost uwilgotnienia gruntu wpływa na zmniejszenie jego wytrzymałości na ścinanie, co przede wszystkim związane jest ze zmianą jego wartości spójności. Wpływ prędkości ścinania zaznaczył się głównie przy dużym uwilgotnieniu gruntu, tzn. większe wartości kąta tarcia wewnętrznego, a mniejsze spójności uzyskano, stosując mniejszą prędkość ścinania. Wykazano również, że otrzymane z badań wartości wytrzymałości na ścinania można opisać teoretycznie za pomocą modelu Matsushiego i Matsukury jako wartości zależne od spójności pozornej gruntu, związanej z działaniem ciśnienia ssącego.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na ścinanie, grunty nienasycone, Karpaty,

WPROWADZENIE

Wśród cech geotechnicznych gruntów istotne znaczenie ma wytrzymałość na ścinanie, która charakteryzuje zdolność gruntu do przeciwstawiania się naprężeniom stycznym. Cecha ta jest bardzo ważna w kontekście oceny nośności podłoża gruntowego oraz stateczności skarp i zboczy. Podstawowymi czynnikami warunkującymi wytrzymałość gruntów na ścinanie są ich skład granulometryczny, zagęszczenie oraz wilgotność. Ostatni z podanych czynników ma szczególnie istotny wpływ na mierzone wartości wytrzymało-

Adres do korespondencji – Corresponding Author: dr inż. Tymoteusz Zydróż, mgr inż. Paweł Miętus, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

ści na ścinanie i dlatego też zmiana uwilgotnienia gruntów, przede wszystkim nasycenie gruntów, stanowiących pokrywy stokowe, jest powszechnie uważane za główną przyczynę uruchamiania procesów osuwiskowych. Jednym z rejonów o szczególnie dużym nasileniu ruchów masowych są okolice Gorlic, gdzie głównym czynnikiem determinującym tego typu procesy jest skomplikowana budowa geologiczna regionu. W obszarze tym powszechnym zjawiskiem są osuwiska strukturalne, których badania opisane są m.in. w pracach Chrzanowskiej [1980], Thiela [1989], Zabuskiego i in. [2003], a przede wszystkim udokumentowane są w bazie SOPO [<http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO>], ale również spotykane są przykłady płytkich ruchów masowych [Zydróż i Baran 2011, Zydróż i Demczuk 2013, Zydróż i Gadowska 2013].

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu wilgotności i prędkości ścinania na wytrzymałość na ścinanie wybranych gruntów spoistych pochodzących z okolic Gorlic. Dodatkowo otrzymane rezultaty badań zostały porównane z teoretycznym opisem wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH GRUNTÓW

Badania wykonano dla dwóch gruntów pochodzących z dwóch zboczy zlokalizowanych w miejscowościach Bielanka i Bystra, położonych w pobliżu Gorlic. Grunt z Bielanki, znajdującej się pod względem geograficznym w Beskidzie Niskim, pobrano z powierzchniowej warstwy zbocza przylegającego od południowego wschodu do wzniesienia Miejska Góra. Pod względem geologicznym wzniesienie to zbudowane jest z piaskowców gruboławicowych i łupków oligoceńskich płaszczowiny magurskiej w frakcji glaukonitowej, natomiast w dolnych partiach stoku występują łupki pstrze z okresu eocenu.

Z kolei grunt pochodzący z Bystrej pobrano z dolnej północno-zachodniej części zbocza Bystrzyca, zlokalizowanej administracyjnie na pograniczu miejscowości Bystra i Szymbark. Zbocze to zlokalizowane jest w strefie granicznej Pogórza Ciężkowickiego i Beskidu Niskiego, natomiast pod względem geologicznym podłoże skalne w tym terenie stanowią piaskowce i łupki warstw inoceramowych, a w dolnej części doliny, podobnie jak w Bystrej, pojawiają się wychodnie łupków pstrych.

Badane grunty charakteryzowały się obecnością pojedynczych okruchów skalnych, których zawartość dochodziła do 25%, natomiast do badań pobierano materiał pozbawiony ziaren frakcji żwirowej, wychodząc z założenia, że najbardziej istotny wpływ na właściwości inżynierskie badanych gruntów mają frakcje drobnoziarniste. Wartości parametrów geotechnicznych badanych gruntów zestawiono w tab. 1. Według nomenklatury geotechnicznej [PN-EN ISO 14688-2: 2006] grunt z Bielanki sklasyfikowano jako ilt pylasty, natomiast grunt z Bystrej określono jako ilt pylasto-piaszczysty. Grunty te posiadają podobną zawartością frakcji pyłowej, z kolei grunt z Bystrej charakteryzuje się wyraźnie większą wartością frakcji piaskowej. Stąd też grunty te różnią się wyraźnie pod względem właściwości plastycznych, gdzie wyraźnie większą wartość wskaźnika plastyczności posiada grunt z Bielanki.

Tabela 1. Zestawienie parametrów geotechnicznych badanych gruntów
Table 1. Physical parameters of tested soils

Parametry Parameters	Jednostka Unit	Pochodzenie gruntu Origin of soils	
		Bielanka	Bystra
Zawartość frakcji – Fraction content			
– piaskowa – sand (2–0,063 mm)	%	1,8	26,0
– pyłowa – silt (0,002–0,063 mm)		59,9	52,8
– ilowa – clay (< 0,002 mm)		38,3	21,2
Nazwa gruntu wg PN-EN ISO 14688-2: 2006 Name acc to PN-EN ISO 14688-2:2006	–	siCl	saclSi
Wilgotność naturalna – Natural moisture content, w_n	%	30,24	12,60
Gęstość objętościowa – Density, ρ	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,90	1,87
Granica plastyczności – Plastic limit, w_p	%	25,8	18,1
Granica płynności – Liquid limit, w_L	%	51,4	27,8
Wskaźnik plastyczności – Index of plasticity, I_p	%	25,6	9,7
Stopień plastyczności – Degree of plasticity, I_L	%	0,17	–0,57
Aktywność koloidalna – Activity index	—	0,67	0,45

METODYKA I ZAKRES PRACY

Badania wytrzymałości na ścinanie wykonano metodą bezpośredniego ścinania w skrzynce o przekroju 60×60 mm. W zasadniczej części badań zastosowano dwie prędkości ścinania 0,1 oraz $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Prędkość $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ stosowana jest standardowo w przypadku badań gruntów spoistych. Z kolei prędkość ścinania $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ zaleca się stosować w przypadku badań gruntów nienasyconych [Vanapalli i Lane 2002], wychodząc z założenia, że krótki czas ścięcia próbki ogranicza możliwości wystąpienia zmian ciśnienia ssania w gruncie, a co za tym idzie, stan naprężeń w gruncie ma niezmienną wartość.

Oznaczenie wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono dla trzech wartości wilgotności badanych gruntów: naturalnej oraz dwóch wartości większych o 5% i o 10% od naturalnej. W ramach przygotowań do badań próbki gruntów o wilgotności naturalnej zagęszczano w okrągłych pierścieniach do wartości gęstości objętościowej odpowiadającej wartości określonej z badań terenowych. Dalszy tok postępowania uzależniony był od założonej docelowej wartości wilgotności gruntu. W przypadku badań gruntu o wilgotności naturalnej próbki wycinano z pierścieni za pomocą prostopadłościennego pierścienia tnącego o wymiarach $60 \times 60 \times 17$ mm, które następnie umieszczano w skrzynce aparatu bezpośredniego ścinania. W przypadku badań gruntu z Bielanki, próbek o wilgotności większej o 5 i 10% od naturalnej, grunt był umieszczany w pojemniku i zalewany wodą, początkowo do ok. połowy wysokości pierścienia, a potem całkowicie. W trakcie nasycania kontrolowano masę gruntu z pierścienia, dążąc do

uzyskania założonej wilgotności, a po jej osiągnięciu wycinano próbki prostopadłościennie, określano ich gęstość objętościową, a następnie umieszczano je w aparacie skrzynkowym. Dodatkowo z pozostałej części gruntu pobierano próbkę celem kontroli jej wilgotności. Nieco inna procedura badań wystąpiła w przypadku gruntu z Bystrej. Przygotowanie próbek o wilgotności większej o 5% od naturalnej polegało na stopniowym dodawaniu odpowiedniej porcji wody do próbek, natomiast próbki o wilgotności o 10% większej od naturalnej były przygotowywane w sposób analogiczny jak próbki z Bielanki. Kolejnym problemem występującym w trakcie badań było przygotowanie próbek o wilgotności zbliżonej do naturalnej, przy której konsystencja gruntu była zwarta, co powodowało trudności z wyciśnięciem próbki gruntu z pierścienia tnącego do skrzynki aparatu. W celu ominięcia tego problemu zastosowano dwie metody przygotowania gruntu. W pierwszej grunt o wilgotności naturalnej zagęszczano bezpośrednio w skrzynce aparatu. Z kolei według drugiej metody grunt formowano wstępnie przy wilgotności większej od naturalnej (zbliżonej do granicy plastyczności) i gęstości objętościowej szkieletu takiej samej jak określona z badań terenowych, a następnie próbki pozostawiano w warunkach powietrznych do uzyskania założonej masy, odpowiadającej wilgotności naturalnej.

Przed ścięciem każda próbka była poddawana konsolidacji, której czas trwania wynosił 60 min. Wartości obciążenia pionowego, w każdej serii badań, wynosiły w zakresie od 25 do 150 kPa, a po zakończeniu badań każdorazowo określano wilgotność gruntu. Parametry wytrzymałościowe zostały obliczone metodą najmniejszych kwadratów.

W teorii wytrzymałość gruntów na ścinanie opisana jest równaniem Coulomba-Mohra, które w postaci obowiązującej dla gruntów nienasyconych [Fredlund i in. 1978] ma następującą postać:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (1)$$

gdzie:

c' – efektywna spójność,

σ_n – składowa normalna,

u_a – ciśnienie powietrza w porach,

u_w – ciśnienie wody w porach,

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego,

ϕ^b – kąt określający wzrost wytrzymałości na ścinanie w związku ze wzrostem ciśnienia ssania,

$\sigma_n - u_a$ – naprężenie netto,

$u_a - u_w$ – ssanie gruntu.

Przyjmując typową interpretację wyników badań z aparatu bezpośredniego ścinania, uzyskane wartości wytrzymałości na ścinanie oraz parametry je charakteryzujące traktuje się jako parametry całkowite, uznając czasami za mało użyteczne. Niemniej, jak pokazują przykładowe wyniki prac, m.in. Vanapalli i Lane [2002], Wen i Yan [2014], aparatura tego typu jest z powodzeniem stosowana do analiz wytrzymałości na ścinanie gruntów w stanie niepełnego nasycenia. Do opisu wytrzymałości na ścinanie z typowych badań bezpośredniego ścinania, Matsushi i Matsukura [2006] zaproponowali model empiryczny opisany następującym wzorem:

$$\tau_f = \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\phi' + C \cdot e^{-\mu\theta} \quad (2)$$

gdzie:

- σ – naprężenie normalne,
- ϕ' – kąt tarcia wewnętrznego, równoznaczny wartości efektywnej tego parametru,
- C – hipotetycznie największa wartość spójności gruntu absolutnie suchego,
- μ – współczynnik odwzorowujący zmniejszenie spójności wraz ze wzrostem wilgotności gruntu,
- θ – wilgotność objętościowa gruntu,
- e – podstawa logarytmu naturalnego.

W metodzie tej parametry równania określa się na podstawie danych doświadczalnych, uzyskanych z badań: wilgotności objętościowej, naprężenia normalnego i oporu na ścinanie. Wartość kąta tarcia wewnętrznego ustalana jest arbitralnie, tak aby otrzymane wyniki badań (wytrzymałość na ścinanie) były jak najlepiej skorelowane z wilgotnością objętościową badanych próbek, a pozostałe parametry równania (2) stanowią parametry opisujące tę korelację. Zaletą tej metody polega głównie na tym, że do jej zastosowania nie ma potrzeby znajomości efektywnych parametrów wytrzymałościowych oraz charakterystyki retencyjnej gruntów, której wymagają np. uproszczone równania wytrzymałości gruntów podane w pracy Vanappali i Fredlunda [1999]. Metoda ta z powodzeniem stosowana była do analizy zmian wytrzymałości na ścinanie nienasyconych gruntów pochodzenia naturalnego [Matsushi i Matsukura 2006, Zydróż i Zgoda 2012, Zydróż i Gadowska 2013], sprawdziła się również w przypadku gruntów antropogenicznych [Gruchot i Zydróż 2013]. Natomiast wada metody wynika z tego, że wartości parametrów równania są wrażliwe na parametry wejściowe, a więc wartości parametrów uzyskanych z badań.

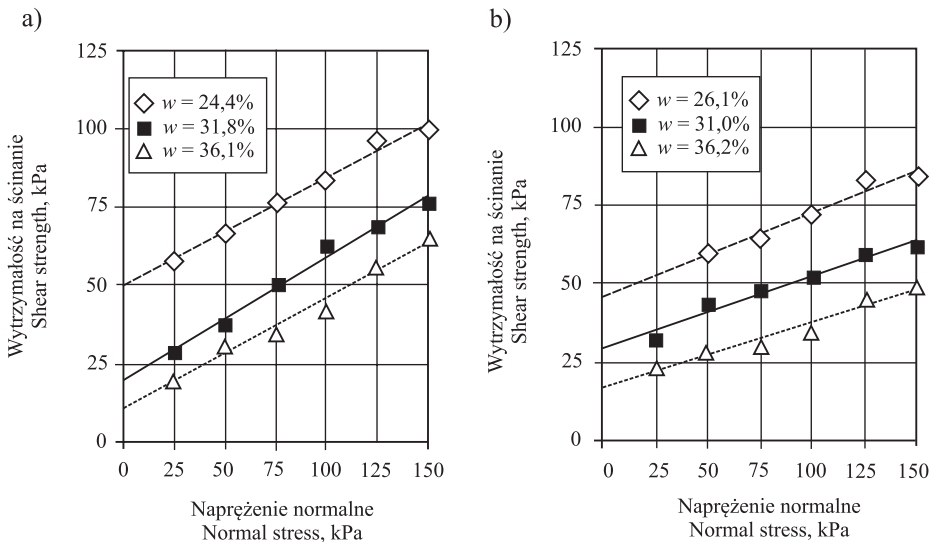
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki oznaczeń wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów przedstawiono na ryc. 1–2 oraz zestawiono zbiorczo w tab. 2. Ogólnie można stwierdzić, że zgodnie z teorią mechaniki gruntów wartości wytrzymałości na ścinanie zmniejszają się wraz ze wzrostem wilgotności, co jest szczególnie zauważalne w przypadku gruntu z Bystrej, który charakteryzował się szerokim przedziałem wartości stopnia plastyczności. Interesujące są wyniki badań tego gruntu uzyskane przy niskich wartościach wilgotności (ok. 11–12%), gdzie pomimo niewielkich różnic wilgotności uzyskano bardzo istotne różnice wytrzymałości na ścinanie. Znacznie większe wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskano dla próbek otrzymanych poprzez przesuszenie gruntu do założonej wilgotności, niż próbek gruntu formowanych bezpośrednio w skrzynce aparatu. Wyniki te wskazują, że ścinanie gruntu bezpośrednio po zagęszczaniu uniemożliwia wytworzenie się odpowiednich warunków do wytworzenia się sił wiązania pomiędzy cząsteczkami gruntu. W związku z tym w dalszej analizie pominięto mniej korzystne wyniki badań.

Analizując nachylenie prostych Coulomba i rozpatrując oddzielnie każdą serię badań (dla każdego gruntu i każdej prędkości ścinania: ryc. 1a–2b), można zauważyć, że w każdym z badanych zakresów wilgotności mają one podobne nachylenia. Oznacza to,

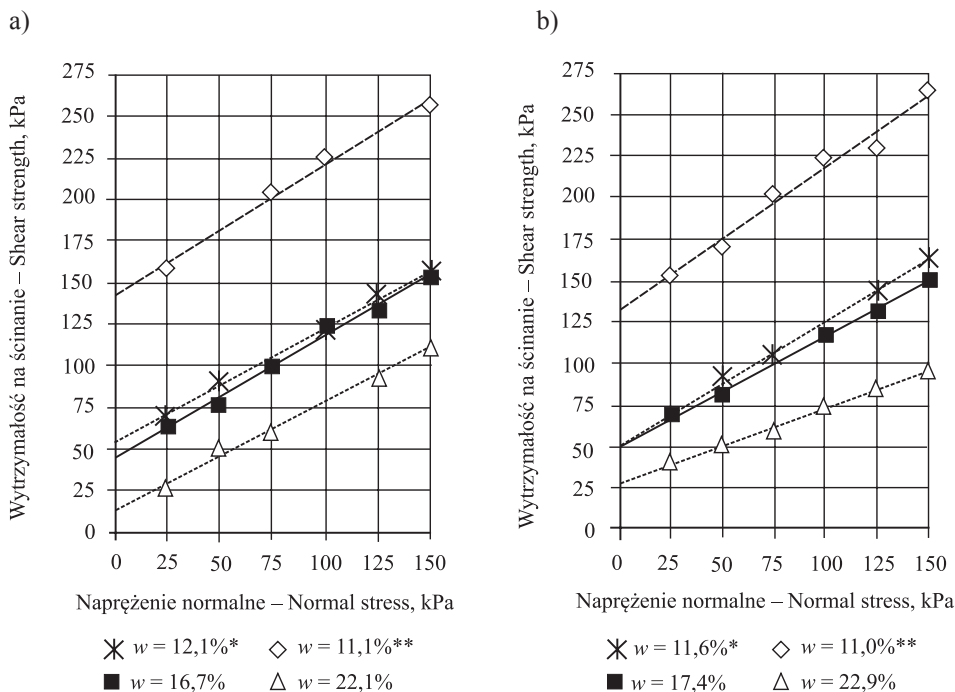
że grunt badany przy tej samej prędkości charakteryzuje się podobnymi wartościami kąta wewnętrznego (ryc. 3a, tab. 2). W przypadku gruntu z Bielanki wartości tego parametru uzyskane przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ wyniosły do $19,2$ do $21,5^\circ$, natomiast przy prędkości $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ były one mniejsze i mieściły się w zakresie $11,6$ – $14,9^\circ$. Z kolei wartości kąta tarcia wewnętrznego dla gruntu z Bystrej były wyraźnie większe i mieściły się w zakresie $33,2$ – $38,1^\circ$ dla próbek ścinanych przy prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Natomiast przy większej prędkości ścinania otrzymany zakres wartości kąta tarcia wewnętrznego był największy i wyniósł $24,4$ – $41,0^\circ$. Otrzymane wartości kąta tarcia wewnętrznego dla gruntu z Bielanki są podobne do wartości tego parametru podawanych dla gruntów ilastych z okolic Gorlic w pracy Bednarczyka [2005]. Z kolei wysokie wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu z Bystrej, pomimo stosunkowo dużej zawartości frakcji ilastej, mogą być efektem przede wszystkim wysokiej zawartości frakcji piaskowej. Dla porównania Matsushi i Matsukura [2006] dla gruntu o podobnym składzie granulometrycznym do gruntu z Bystrej uzyskali wartości wilgotności kąta tarcia wewnętrznego w przedziale od $27,9$ do nawet $53,3^\circ$.

Z kolei wartości spójności badanych gruntów zawierają się w dużych zakresach wartości, co było szczególnie zauważalne w przypadku gruntu z Bystrej, który badany był w większym zakresie stopnia plastyczności. Przykładowo dla tego gruntu wartości spójności uzyskane przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ wyniosły od $12,9$ do $142,3 \text{ kPa}$, co wykracza poza typowy zakres tego parametru podawany dla typowych gruntów spoistych [Wiłun 2000]. Natomiast podobnie wysokie wartości spójności przedstawione są w pracy Zabuskiego i in. [2003], którzy dla gruntów ilastych pochodzących z okolic Gorlic (Szymbark, osuwisko Kawiorzy) w stanie zwartym uzyskali wartości tego parametru



Ryc. 1. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu z Bielanki przy prędkości ścinania $0,1$ (a) i $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (b)

Fig. 1. Results of shear strength tests of soil from Bielanka obtained at shear velocity $0,1$ (a) and $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (b)



Ryc. 2. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu z Bystrej przy prędkości ścinania 0,1 (a) i 1,0 mm · min⁻¹ (b)

Objaśnienie: * – próbki formowane w skrzynce aparatu przy wilgotności naturalnej, ** – próbki uzyskane przez przesuszenie wilgotnych próbek

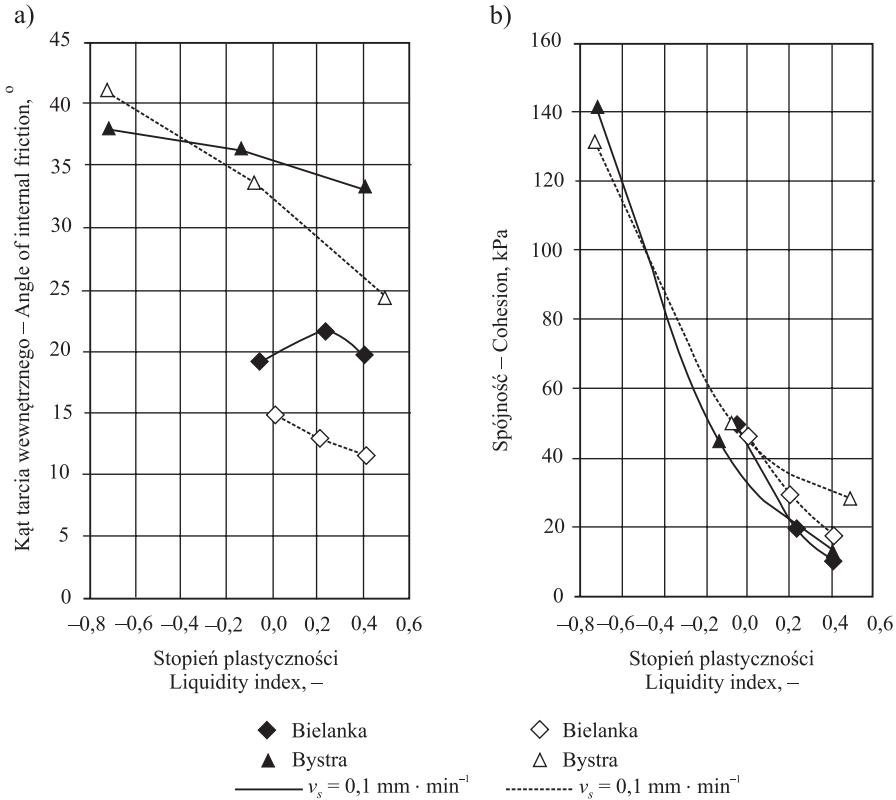
Fig. 2. Results of shear strength tests of soil from Bystra obtained at shear velocity 0,1 (a) and 1,0 mm · min⁻¹ (b)

Explanation: * – samples formed directly in box of direct-shear apparatus at natural moisture content, ** – samples obtained by drying of moist soil

tru 121–190 kPa. Podobnie wysoka wartość spójności dla łupków pstrych z okolic Gorlic podana jest również w innej pracy współautora niniejszej pracy [Zydroń i in. 2015].

Porównując wartości wytrzymałości na ścinanie (ryc. 1–2, por tab. 2) oraz parametrów ją charakteryzujących (ryc. 3) obu gruntów przy podobnych wartościach stopnia plastyczności, można stwierdzić, że większą wartością wytrzymałości na ścinanie charakteryzuje się grunt z Bystrej. Grunt ten uzyskał większe wartości kąta tarcia wewnętrznego, a podobną spójność w porównaniu do gruntu z Bielanki. Z kolei analizując wpływ prędkości na uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że staje się on widoczny dopiero przy dużych wartościach wilgotności gruntów, gdzie większe wartości wytrzymałości na ścinanie (por. ryc. 1a i 1b oraz 2a i 2b) oraz kąta tarcia wewnętrznego, a mniejsze wartości spójności uzyskano stosując prędkość ścinania 0,1 mm · min⁻¹.

W dalszej części pracy otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ścinanie porównano z wynikami teoretycznych obliczeń tego parametru, wykorzystując uproszczoną metodę obliczeniową zaproponowaną przez Matsuhi-Matsukurę [2006]. Na podstawie wyników badań wytrzymałości na ścinanie, naprężeń normalnych oraz oszacowanej wilgotności



Ryc. 3. Zależność wartości kąta tarcia wewnętrznego (a) i spójności (b) badanych gruntów od ich stopnia plastyczności

Fig. 3. Angle of internal friction (a) and cohesion (b) vs. liquidity index obtained for tested soils.

objętościowej, określono parametry równania (2), które zestawiono w tab. 3. Zauważalne jest w przypadku obu gruntów, że wartość efektywnego kąta tarcia wewnętrznego zależy od prędkości ścinania, tzn. przy większej prędkości uzyskano mniejsze wartości kąta tarcia wewnętrznego. Dla porównania, na ile wartości te odpowiadają parametrom efektywnym, przeprowadzono badania wytrzymałości wg procedury zalecanej w PKN-CEN ISO/TS 17892-10: 2009, która zakłada warunki badań umożliwiające drenaż próbki gruntu, co pozwala określać otrzymane parametry wytrzymałościowe gruntu jako efektywne. W przypadku obu gruntów zastosowano prędkość ścinania $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Dla gruntu z Bielanki uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpowiednio $22,9^\circ$ oraz $10,9 \text{ kPa}$, a w przypadku gruntu z Bystrej parametry te wyniosły odpowiednio $29,6^\circ$ i $5,5 \text{ kPa}$. Można więc zauważyć, że w przypadku gruntu z Bystrej wartość kąta tarcia wewnętrznego oszacowana modelem Matsushiego i Matsukury dla prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ jest zgodna z wynikami badań. Natomiast w przypadku gruntu z Bielanki wartość kąta tarcia wewnętrznego z badania bezpośredniego ścinania jest większa (o $6,5^\circ$ i $11,6^\circ$ dla prędkości ścinania odpowiednio $0,1$ i $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), niż wartości tego parametru określone za pomocą modelu obliczeniowego.

Tabela 2. Wyniki oznaczeń parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów

Table 2. Results of shear strength tests of tested soils

Pochodzenie gruntu Origin of tested soil	Prędkość ścinania Velocity of shearing $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Wilgotność wagowa Moisture content $w, \%$	Wilgotność objętościowa gruntu Volumetric water content θ	Stopień plastyczności Liquidity index I_L	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction $\varphi, ^\circ$	Spójność Cohesion c, kPa
Bielanka	0,1	24,4	0,388	-0,06	19,2	49,6
		31,8	0,473	0,24	21,5	19,6
		36,4	0,496	0,41	19,6	10,4
	1,0	26,1	0,397	0,01	14,9	46,2
		31,0	0,466	0,20	13,0	29,5
		36,2	0,494	0,41	11,6	17,2
Bystra	0,1	12,1*	0,201	-0,62	34,8	53,7
		11,1**	0,202	-0,72	38,1	142,3
		16,7	0,288	-0,14	36,2	44,9
		22,1	0,372	0,41	33,2	12,9
	1,0	11,6*	0,195	-0,67	36,8	49,5
		11,0**	0,204	-0,73	41,0	131,4
		17,4	0,318	-0,07	33,6	50,6
		22,9	0,371	0,49	24,4	27,7

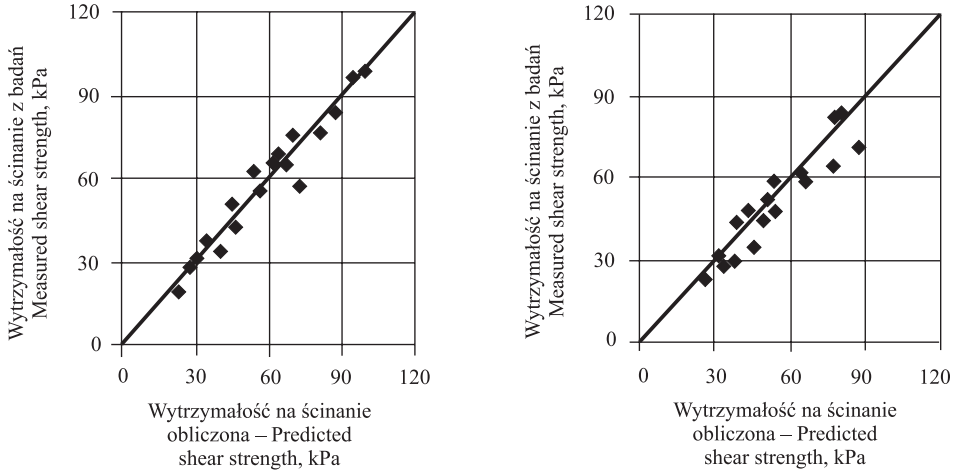
Objaśnienie: * – próbki formowane w skrzynce aparatu przy wilgotności naturalnej, ** – próbki uzyskane przez przesuszenie wilgotnych próbek

Explanation: * – samples formed directly in box of direct-shear apparatus at natural moisture content, ** – samples obtained by drying of moist soil

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń parametrów równania Matsushi i Matsukury

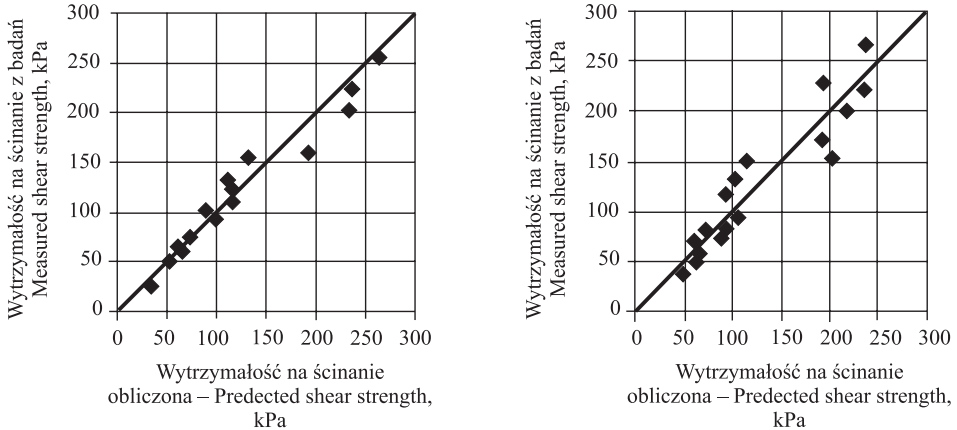
Table 3. Values of parameters of Matsushi and Matsukura equation

Pochodzenie gruntu Origin of soil	Prędkość ścinania Shearing velocity $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego Effective angle of internal friction φ	Parametr μ Parameter μ	Parametr C parameter C kPa
Bielanka	0,1	16,4	-18,81	92370,2
	1,0	11,5	-15,86	32069,2
Bystra	0,1	29,7	-15,37	4049,14
	1,0	22,0	-10,7	1450,63



Ryc. 4. Porównanie wytrzymałości na ścinanie określonej na podstawie obliczeń metodą Matsushiego i Matsukury oraz otrzymanej z bezpośrednich badań dla gruntu z Bielanki przy prędkości (a) 0,1 (b) 1,0 $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 4. The results of comparing shear strength calculated using Matsushi and Matsukura equation and measured from direct shear tests for soils from Bielanka at shearing velocity (a) 0,1 (b) 1,0 $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$.



Ryc. 5. Porównanie wytrzymałości na ścinanie określonej na podstawie obliczeń metodą Matsushiego i Matsukury oraz otrzymanej z bezpośrednich badań dla gruntu z Bystrej przy prędkości (a) 0,1 (b) 1,0 $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 5. The results of comparing shear strength calculated using Matsushi and Matsukura equation and measured from direct shear tests for soils from Bystra at shearing velocity (a) 0,1 (b) 1,0 $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$

W dalszej części pracy parametry zestawione w tab. 3 wykorzystano do określenia wytrzymałości na ścinanie w oparciu o wartości naprężeń normalnych i wilgotności objętościowej analogicznych do uzyskanych z badań. W ten sposób otrzymano wartości wytrzymałości na ścinanie, które porównano z wynikami bezpośrednich badań (ryc. 4 i 5). Wyniki obliczeń wykazały, że średni błąd względny oznaczenia wytrzymałości na ścinanie w przypadku gruntu z Bielanki wyniósł 8,5 i 11,2% odpowiednio dla badań przeprowadzonych przy prędkości ścinania 0,1 oraz 1,0 mm · min⁻¹. Z kolei w przypadku gruntu z Bystrej średnie błąd względny oznaczenia wytrzymałości na ścinanie wyniosły 10,4 i 17,6% odpowiednio dla badań przeprowadzonych przy mniejszej oraz większej prędkości ścinania. Można zatem stwierdzić, że lepszy opis charakterystyki wytrzymałościowej gruntów dały badania przeprowadzone przy prędkości ścinania 0,1 mm · min⁻¹. Dodatkowym argumentem przemawiającym za stosowaniem tej prędkości w badaniach jest lepsza zgodność wartości kąta tarcia wewnętrznego, otrzymanych na podstawie modelu obliczeniowego, z wartościami tego parametru uzyskanymi z bezpośrednich badań przy niskiej prędkościach ścinania.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawione zostały wyniki badań wytrzymałości na ścinanie dwóch gruntów pochodzących z terenów osuwiskowych z okolic Gorlic. Grunty te wykazały się zróżnicowanymi wartościami wytrzymałości na ścinanie, które w znaczącym stopniu były zależne od ich uziarnienia gruntów i wilgotności oraz zastosowanej prędkości ścinania. Ogólnie mniejszymi wartościami wytrzymałości na ścinanie wykazał się grunt z Bielanki, który charakteryzował się większą zawartością frakcji ilowej w stosunku do gruntu z Bystrej. Wpływ prędkości ścinania na wartości wytrzymałości na ścinanie gruntów staje się wyraźny przy dużych wartościach wilgotności gruntów. W przypadku badanych gruntów większe wartości kąta tarcia wewnętrznego, a mniejsze wartości spójności uzyskano, stosując mniejszą prędkość ścinania. Wyniki badań potwierdziły również znaną zależność, że wzrost uwilgotnienia gruntu wpływa na zmniejszenie jego wytrzymałości na ścinanie. Otrzymane wyniki wskazują, że zmniejszenie to jest związane przede wszystkim ze zmianami wartości spójności, a w znacznie mniejszym stopniu ze zmianą wartości kąta tarcia wewnętrznego.

Analiza wyników badań wykazała, że otrzymane wartości wytrzymałości na ścinanie można opisać teoretycznie jako wartości zależne od spójności pozornej, związanej z występowaniem w gruncie nienasyconym sił ssących. Wyliczone z wykorzystaniem modelu empirycznego Matsushi i Matsukury wartości wytrzymałości na ścinanie były stosunkowo dobrze dopasowane do wyników badań bezpośrednich, przy czym lepsze dopasowanie uzyskano opierając się na wynikach badań uzyskanych przy niskiej prędkości ścinania.

PIŚMIENNICTWO

- Bednarczyk, Z. (2005). Examples of the mass movement investigations in different types of deposits. Polish Geol. Inst. Special Papers 20, 14–26.
- Chrzanowska, E. (1980). Osuwisko „Zapadle” w Szymbarku. Analiza wyników badań geofizycznych i geologiczno-inżynierskich. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotech. J.*, 15(3), 313–321.
- Gruchot, A.T., Zydroń, T. (2013). Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego. *Annual Set The Environment Protection*, 15, 1719–1737.
- Matsushi, Y., Matsukura, Y. (2006). Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content. *Bull. Engin. Geol. Environ.*, 65, 449–455.
- PKN–CEN ISO/TS 17892–10: 2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10. Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania. PKN, Warszawa.
- PN–EN ISO 14688–2: 2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. PKN, Warszawa.
- SOPO, PIG: <http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO> (7.05.2016).
- Thiel, K. (red.) (1989). Kształtowanie fliszowych stoków karpaccich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku. PAN IBW, Gdańsk.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. (1999). Empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils. *Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hong et al. (eds.), Balkema, 93–96.
- Vanapalli, S.K., Lane, J.J. (2002). A simple technique for determining the shear strength of fine-grained unsaturated soils using the conventional direct shear apparatus. *Proceedings of the Second Canadian Specialty Conference on Computer Applications in Geotechnique*, Winnipeg, 245–253.
- Wen, B-P., Yan, Y-J. (2014). Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China. *Engin. Geol.*, 168, 46–58.
- Wiłun, Z. (2000). *Zarys geotechniki*. WKiŁ, Warszawa.
- Zabuski, L., Gil E., Rączkowski W., Wójcik A. (2003). Badania reprezentatywnego procesu osuwiskowego w masywie fliszu karpacciego – osuwisko eksperymentalne w Beskidzie Niskim. IBW PAN, ms, Gdańsk.
- Zydroń, T., Baran P. (2011). Analiza uwarunkowań stateczności wybranego zbocza w Beskidzie Niskim. *Inżyn. Morska Geotech.*, 256–264.
- Zydroń, T., Demczuk, P. (2013). Analiza ruchów masowych wywołanych ulewnym opadem na przykładzie osuwisk w Owczarach koło Gorlic. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 12(4), 107–118.
- Zydroń, T., Gadowska, B. (2013). Wytrzymałość na ścinanie gruntów nienasyconych w świetle badań laboratoryjnych oraz modeli empirycznych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 12(4), 119–130.
- Zydroń, T., Gryboś, M., Kubiś, M., Hobot, E., Janus, A. (2015). Właściwości geotechniczne łupków pstrych z okolic Szymbarku k. Gorlic. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14(2), 231–241.
- Zydroń, T., Zgoda, J. (2012). Wpływ wilgotności na właściwości wytrzymałościowe gruntów z obszaru Karpacciego. *Acta Sci, Pol., Formatio Circumiectus*, 11(2), 75–84.

SHEAR STRENGTH OF UNSATURATED SOILS FROM VICINITY OF GORLICE

Abstract. The results of shear strength parameters of soils from Bielanka and Bystra near Gorlice are presented in the paper. Determination of the influence of moisture content and shearing velocity on values of shear strength of tested soils was the subject of research. Test results revealed that soils have various shear strength and shear strength parameters, which significantly depends on grain distribution of soil, their moisture content and shearing velocity. It was showed that the increase of moisture content causes decline in shear strength

of soils, which significantly depends on changes of cohesion. The influence of shearing rate was significant at higher values of moisture content, higher values of angle of internal friction and lower values of cohesion were obtained in tests where lower value of shearing rate was used. It was also stated, that obtained shear strength values can be theoretically described using empirical Matsushi and Matsukuura model as values dependent on apparent cohesion, related to the matrix suction of soil.

Key words: shear strength, unsaturated soils, the Carpathians

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.03.2016

Do cytowań – For citation: Zydróż, T., Miętus, P. (2016). Wytrzymałość na ścinanie gruntów nienasyconych na przykładzie utworów zwietrzelinowych z okolic Gorlic. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 15(1), 151–163.