

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE GRUNTÓW NIENASYCONYCH W ŚWIETLE BADAŃ LABORATORYJNYCH ORAZ MODELI EMPIRYCZNYCH

SHEAR STRENGTH OF UNSATURATED SOIL UNDER LABORATORY AND THEORETICAL CALCULATIONS

Tymoteusz Zydrzeń, Beata Gadowska

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie gruntów pochodzących z osuwisk w Szymbarku k. Gorlic (Beskid Niski) oraz Winiarach k. Gdowa (Pogórze Ciężkowickie). Celem pracy było określenie wpływu wilgotności na wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów oraz porównanie wyników obliczeń teoretycznych wytrzymałości na ścinanie za pomocą wybranych uproszczonych modeli wytrzymałościowych gruntów nienasyconych (Vanapalli i in. [1996], Matsushi i Matosukura [2006]) z wynikami badań bezpośrednich. Wyniki badań wykazały, że wzrost wilgotności powoduje wyraźne zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów oraz parametrów ją charakteryzujących. Wyniki obliczeń wykazały, że wartości wytrzymałości na ścinanie określone za pomocą modelu Matsushi-Matsukury dały stosunkowo dobrą zgodność z wynikami badań.

Abstract. The results of shear strength parameters of soils from Szymbark Winiary are presented in the paper. Determination of the influence of moisture content on values of shear strength of tested soils was the subject of the test. The second aim of paper was comparison results of theoretical calculation of shear strength using semi-empirical methods for evaluation of shear strength of unsaturated soils (Vanapalli et al. [1996], Matsushi and Matsukura [2006]) and results of direct shear strength tests. Results of tests revealed that the increase of moisture content causes decrease in shear strength and shear strength parameters of tested soils. Calculations of shear strength revealed that values of soil resistance determined using Matsushi-Matsukura method give good agreement with results of shear tests.

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

Key words: shear strength, unsaturated soils, the Carpathians

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Tymoteusz Zydrzeń, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydrzen@ur.krakow.pl.

WPROWADZENIE

Jednym z istotnym problemów geologiczno-inżynierskich na obszarze polskich Karpat zewnętrznych są ruchy masowe ziemi, wśród których najbardziej rozpowszechnione są osuwiska (zsuwy). Procesy te prowadzą do znaczącego przekształcanie rzeźby stoków, powodując w wielu przypadkach szkody materialne i społeczne. Według raportu Ministerstwa Środowiska z dnia 6 września 2010 r. w okresie maja i czerwca 2010 r. wskutek uruchomienia osuwisk na terenie polskich Karpat uszkodzonych zostało 2269 budynków, w tym całkowicie całkowitemu zniszczeniu uległo 560 budynków, a łączne straty spowodowane przez osuwiska oszacowano na 2,9 mld euro. Z mechanicznego punktu widzenia inicjacja ruchu mas ziemnych następuje, gdy naprężenia styczne w ośrodku gruntowym są większe niż wytrzymałość gruntu na ścinanie. Głównym czynnikiem powodującym uruchomienie osuwiska jest woda, która w postaci deszczu lub roztopu infiltruje w profilu gruntowym, powodując zmianę wilgotności gruntu, a w konsekwencji wpływając na zmianę jego wytrzymałości na ścinanie. Stąd też przy badaniach przyczyn i uwarunkowań występowania ruchów masowych dużego znaczenia nabiera znajomość zależności parametrów wytrzymałościowych gruntu od jego uwilgotnienia. W teorii wytrzymałość gruntów opisana jest zmodyfikowanym przez D.G. Fredlunda i in. [1978] równaniem Coulomba-Mohra:

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

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.

W praktyce inżynierskiej niewiele laboratoriów posiada aparaturę umożliwiającą pełną kontrolę stanu naprężeń w trakcie badań i dlatego dla potrzeb praktycznych opracowano szereg metod uproszczonych, opisanych w m.in. w pracach Vanapalli i Fredlund D.G. [1999] oraz Guan i in. [2010], które umożliwiają wykorzystanie standardowych badań metodą bezpośredniego ścinania do określenia wytrzymałości na ścinanie gruntu nienasyconego.

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu wilgotności na wytrzymałość na ścinanie gruntów pochodzących z terenów osuwiskowych oraz porównanie wyników teoretycznych obliczeń wytrzymałości na ścinanie opartych o uproszczone modele wytrzymałościowe gruntów nienasyconych, z wynikami badań bezpośrednich. Obliczenia te wykonano w aspekcie możliwości wykorzystania tych modeli do szacowania wytrzymałości na ścinania dla potrzeb prognozowania stateczności zboczy.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH GRUNTÓW

Badane grunty stanowiły utwory pochodzące z powierzchniowych warstw zboczy z okolic Szymbarku koło Gorlic oraz Winiar koło Gdowa, na których w okresie czerwca 2010 r. wystąpiły ruchy masowe (ryc. 1). Osuwisko w Szymbarku powstało na zboczu pod Kamionką w dniu 4 czerwca 2010 r. i zainicjowane zostało 14-godzinnym opadem o wysokości 107 mm. Pod względem geologicznym obszar osuwiska zalega w strefie brzeżnej jednostki magurskiej, gdzie zasadnicze utwory podłoża stanowią oligoceńskie piaskowce gruboławicowe i łupki zapadające się w kierunku południowo-zachodnim. Analiza składu granulometrycznego pobranego do badań gruntu wykazała, że pod względem geotechnicznym tworzy go il pylasty z dużą zawartością okruchów żwirowych (tab. 1). Grunt ten charakteryzuje się niewielką wodoprzepuszczalnością, o czym świadczy m.in. obecność w pobliżu osuwiska terenów podmokłych oraz występowanie w okresie poboru prób intensywnego spływu powierzchniowego na zboczu.

W przypadku osuwiska w Winiarach nie jest znana dokładna data jego powstania. Osuwisko to zlokalizowane jest w bezpośrednim sąsiedztwie skrzyżowania drogi wojewódzkiej 967 z drogą lokalną prowadzącą z Winiar do miejscowości Rudnik. Pod względem tektonicznym obszar ten położony jest w obrębie jednostki śląskiej, gdzie w podłożu skalnym występują warstwy istebniańskie górne, a pokrywą stokową stanowią plejstocenijskie gliny lessowate. Zgodnie z nomenklaturą geotechniczną [PN-EN ISO 14688-2-2004] uziarnienie gruntu pobranego z osuwiska odpowiadało pyłowi ilastemu.

Przy porównaniu parametrów fizycznych badanych gruntów zauważalne jest, że grunt z Szymbarku charakteryzuje się większymi wartościami granic konsystencji oraz wyraźnie większą wartością wskaźnika plastyczności (33%), która odpowiada gruntom bardzo spoistym. Z kolei w przypadku gruntu z Winiar wartość wskaźnika plastyczności wynosi 11%, co odpowiada gruntom średnio spoistym. Biorąc pod uwagę wartości wilgotności naturalnej oraz granic konsystencji, można zauważyć, że badane grunty charakteryzowały się bardzo podobnymi wartościami stopnia plastyczności.



Ryc. 1. Widok ogólny osuwisk w Szymbarku (a) i Winiarach (b)

Fig. 1. General view of landslides in Szymbark (a) and Winiary (b)

Tabela 1. Podstawowe parametry geotechniczne badanych gruntów
Table 1. Geotechnical parameters of tested soils

Parametry – Parameters	Jednostka Unit	Szymbark*	Winiary**
Zawartość frakcji – Fraction content:			
• żwirowa – gravel (2–63 mm)	%	28,6	0,1
• piaskowa – sand (0,063–2 mm)	%	11,6	2,9
• pyłowa – silt (0,002–0,063 mm)	%	37,6	85,1
• ilowa – clay (<0,002 mm)	%	22,2	11,9
Nazwa gruntu wg EN ISO 14688-2-2004 Soil acc. to EN ISO 14688-2-2004		grsiCl	clSi
Wilgotność naturalna Natural moisture content	%	27,2	20,4
Gęstość objętościowa – Bulk density	g · cm ⁻³	1,91	2,11
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Dry density	g · cm ⁻³	1,50	1,75
Granice konsystencji – Atterberg's limits:			
• plastyczności – plastic limit	%	24,8	19,8
• płynności – liquid limit	%	58,1	31,25
Wskaźnik plastyczności – Index of plasticity	%	33,3	11,45
Stopień plastyczności – Degree of plasticity	%	0,07	0,05
Straty masy przy prażeniu – Loss of ignition	%	1,9	1,9
Zawartość części organicznych Organic matter content	%	4,2	2,5

* na podstawie Lech [2012] – from Lech [2012]

** na podstawie Pietrawska [2012] – from Pietrawska [2012]

METODYKA I ZAKRES PRACY

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania o przekroju skrzynki 60 × 60 mm na próbkach o maksymalnej średnicy ziaren 2 mm, stosując dwie prędkości ścinania: 0,1 oraz 1,0 mm · min⁻¹, dla określenia wpływu tego czynnika na wyniki badań. Pierwsza z tych prędkości, 0,1 mm · min⁻¹, stosowana jest standardowo w przypadku badań gruntów spoistych. Z kolei prędkość ścinania 1,0 mm · min⁻¹ zaleca się stosować w przypadku badań gruntów nienasyconych, gdzie przyjmuje się, że krótki czas ścięcia próbki ogranicza zmiany ciśnienia ssania w gruncie, a zatem stan naprężeń w trakcie ścinania gruntu jest stały.

W ramach przygotowań do badań próbki gruntu o wilgotności naturalnej zagęszczano w okrągłych pierścieniach do wartości gęstości objętościowej 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 specjalnego pierścienia prostopadłościennego o wymiarach 6 × 6 × 1,8 cm, które następnie umieszczano w skrzynce aparatu bezpośredniego ścina-

nia. W przypadku badań gruntu o wilgotności mniejszej od naturalnej próbki przesuszano do momentu utraty masy odpowiadającej zmniejszeniu wilgotności o ok. 5%. Z kolei dla wariantu badań z gruntem o wilgotności większej od naturalnej grunt był umieszczony w pojemniku i zalewany wodą, początkowo do ok. połowy wysokości pierścienia, a potem całkowicie. Po co najmniej dwóch dobach nasycania z pierścienia wycinano próbki prostopadłościowe, określano ich gęstość objętościową, a następnie umieszczano je w aparacie skrzynkowym. Dodatkowo z pozostałej części gruntu pobierano próbkę celem kontroli jej wilgotności.

Przed ścięciem każda próbka była poddawana konsolidacji, której czas trwania był uzależniony od prędkości ścinania. W przypadku serii badań prowadzonych z zastosowaniem prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ czas konsolidacji wynosił 60 min, natomiast w przypadku badań przeprowadzonych przy prędkości ścinania $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ konsolidacja trwała 30 min. Wartości obciążenia pionowego w każdej serii badań mieściły się w zakresie od 25 do 150 kPa, a po zakończeniu badań każdorazowo określano wilgotność gruntu. Parametry wytrzymałościowe zostały obliczone metodą najmniejszych kwadratów.

W dalszej części pracy porównano wytrzymałość na ścinanie określoną metodą bezpośredniego ścinania z obliczeniami według modeli wytrzymałościowych gruntów nienasyconych. Do obliczeń wykorzystano dwa modele opisu wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych. Pierwszy stanowił uproszczony model wytrzymałościowy gruntu opisany w pracach Vanapalli i in. [1996] oraz Vanapalli i Lane'a [2002]:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \Theta^\kappa \cdot \tan \phi' \quad (2)$$

gdzie:

- κ – parametr dopasowania równania,
- Θ – stopień nasycenia gruntu (θ/θ_s , gdzie: θ – wilgotność objętościowa gruntu, θ_s – wilgotność objętościowa gruntu nasyconego),
- c' , σ_n , u_a , u_w , ϕ' – zob. wzór (1).

W metodzie tej przyjmuje się, że napężenie netto jest równoznaczne obciążeniu zewnętrznemu przekazywanemu na grunt, a wartość ciśnienia ssania określana jest na podstawie charakterystyki retencyjnej gruntu i jego wilgotności objętościowej. Dla potrzeb obliczeń niezbędna jest również znajomość parametrów efektywnych badanego gruntu. Według propozycji autorów, metody badania wytrzymałości próbek nienasyconych służą określeniu parametru dopasowania, który jest stosunkowo dobrze skorelowany z wskaźnikiem plastyczności gruntów.

Oznaczenie efektywnych parametrów wytrzymałościowych badanych gruntów wykonano metodą bezpośredniego ścinania według zaleceń PKN-CEN ISO/TS 17892-10. Z braku danych dotyczących charakterystyki retencyjnej badanych gruntów wykorzystano wyniki badań właściwości retencyjnych gruntów pochodzących z okolic Szymbarku i Gdowa podobnych pod względem uziarnieniu do badanych w niniejszej pracy, które przedstawione są w pracy Zydronia i Zaleskiego [2013]. Jako drugi sposób określenia właściwości retencyjnych gruntów zastosowano model obliczeniowy zaproponowany w pracy Aubertina i in. [2003]. W obu przypadkach do opisu zależności pomiędzy ciśnieniem ssania, a wilgotności gruntu wykorzystano równanie van Genuchtena [1980]:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (a \cdot (u_a - u_w))^n\right]^{\left(\frac{1}{1-n}\right)}} \quad (3)$$

gdzie:

- θ_r – rezydualna wilgotność objętościowa,
- a, n – stałe równania, parametr a, m^{-1} ,
- $\theta, u_a, u_w, \theta_s$ – zob. wzory (1) i (2).

Większość uproszczonych modeli opisu wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych wymaga znajomości efektywnych parametrów wytrzymałościowych oraz charakterystyki retencyjnej gruntów, co wykracza poza zakres typowych prac geologicznych i geotechnicznych, gdzie podstawowym parametrem opisującym grunty jest jego wilgotność wagowa. Stąd też interesującą metodą opisu wytrzymałości gruntów jest równanie Matsushi i Matsukury [2006]:

$$\tau_f = \sigma \cdot \operatorname{tg}\phi' + C \cdot e^{-\mu\theta} \quad (4)$$

gdzie:

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

W metodzie tej parametry równania są określane na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych z badań bezpośredniego ścinania. Wartość kąta tarcia wewnętrzznego dobierana jest arbitralnie, tak aby otrzymane wyniki badań były jak najlepiej skorelowane z wilgotnością badanych próbek, a pozostałe parametry równania uzyskuje się na podstawie linearyzacji powyższego równania.

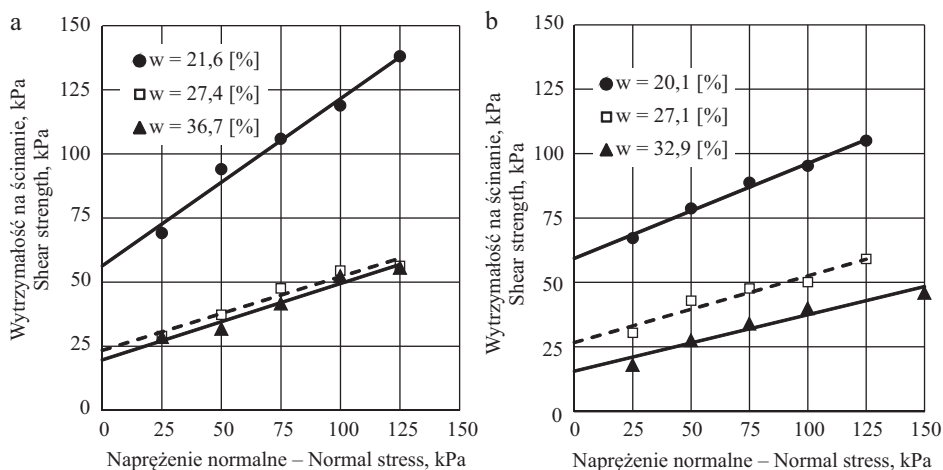
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunkach 2–3 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie, natomiast parametry charakteryzujące wytrzymałość badanych gruntów zestawiono w tabeli 2. Ogólnie można stwierdzić, że w przypadku gruntu z Szymbarku zakres uzyskanych wartości kąta tarcia wewnętrzznego był stosunkowo szeroki i wyniósł od 12,4 do 33,0°, jakkolwiek większość uzyskanych wartości tego parametru była mniejsza od 21°. Podobnego rzędu wartości kąta tarcia wewnętrzznego dla iłów z okolic z Gorlic podane są w pracach Zabuskiego i in. [2003] oraz Bednarczyka [2005]. Z kolei inne wyniki badań Bednarczyka [2005] oraz Zydroń i Zgody [2012] wykazały, że

wartości kąta tarcia wewnętrznego dla łupków ilastych i ich zwietrzelin są w wielu przypadkach większe od 20° . Wartości spójności dla gruntu Szymbarku mieściły się w przedziale od 15,5 do 59,2 kPa, co pokrywa się w dużej mierze z wynikami badań przedstawionymi w podanych powyżej pracach. W przypadku gruntu z Winiar wartości kąta tarcia wewnętrznego były wyraźnie większe niż dla gruntu z Szymbarku i mieściły się w zakresie $29,4\text{--}39,7^\circ$. Natomiast zakres wartości spójności dla gruntu z Winiar był nieco większy niż w przypadku gruntu z Szymbarku i wyniósł od 12,8 do 71,2 kPa, przy czym maksymalna wartość tego parametru uzyskano dla gruntu w stanie bardzo zwartym.

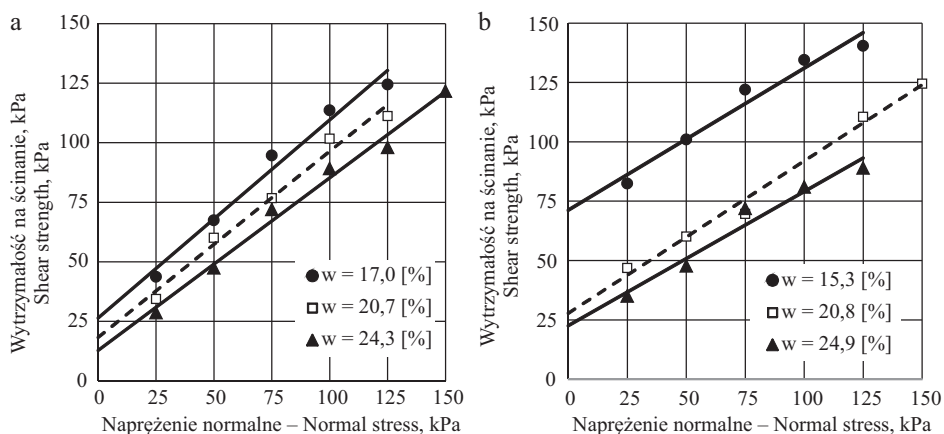
Wyniki badań wykazały jednoznacznie istotny związek pomiędzy wytrzymałością gruntów na ścinanie a ich wilgotnością. W przypadku obu gruntów wraz ze wzrostem wilgotności następowało zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie oraz parametrów ją charakteryzujących, tj. kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności, przy czym większe zmiany tych parametrów uzyskano w przypadku gruntu z Szymbarku. Ponadto porównując wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów o podobnych wartościach stopnia plastyczności (por. tab. 2) można zauważyć, że większymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i mniejszymi wartościami spójności wykazuje się grunt z Winiar, który charakteryzuje się niewielką zawartością frakcji ilowej w porównaniu z gruntem z Szymbarku.

Porównanie wyników badań uzyskanych przy obu prędkościach ścinania (zob. tab. 2 i ryc. 2–3) wykazało, że w przypadku gruntu z Szymbarku wpływ tego czynnika zaznaczył się jedynie dla próbek o niskiej wilgotności. Natomiast dla próbek o wilgotności naturalnej w przypadku obu gruntów wpływ prędkości ścinania na wyniki oznaczeń oporu gruntu na ścinanie był niejednoznaczny, tzn. w zakresie niskich wartości naprężeń normalnych (do ok. 50 kPa) większe wartości oporu na ścinanie wykazywał grunt



Ryc. 2. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu z Szymbarku przy prędkości ścinania $0,1$ (a) i $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (b)

Fig. 2. Results of shear strength tests of soil from Szymbark obtained at shear velocity $0,1$ (a) i $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (b)



Ryc. 3. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu z Winiary przy prędkości ścinania 0,1 (a) i 1,0 mm · min⁻¹ (b)

Fig. 3. Results of shear strength tests of soil from Winiary obtained at shear velocity 0,1 (a) i 1,0 mm · min⁻¹ (b)

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

Table 2. Results of shear strength tests of tested soils

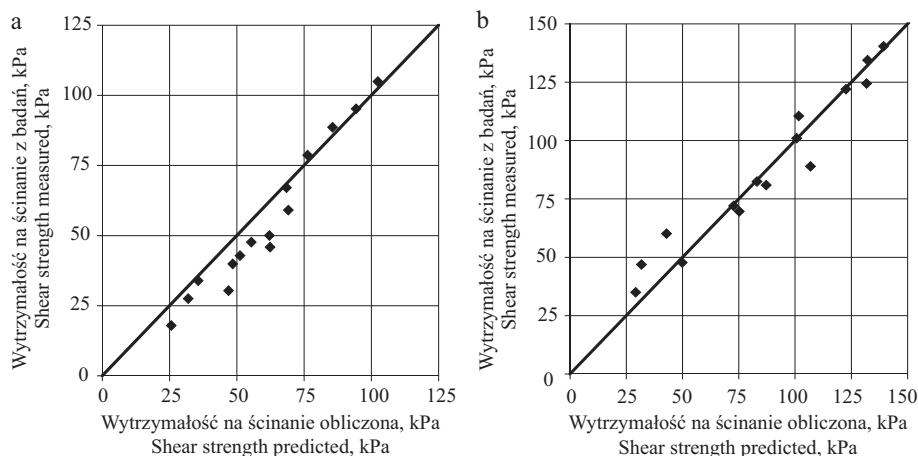
Pochodzenie gruntu Origin of tested soil	Prędkość ścinania, Velocity of shearing	Wilgotność wagowa, Moisture content	Wilgotność objętościowa, Volumetric water content	Stopień plastyczności Liquidity index	Kąt tarcia wewnętrznego, Angle of internal friction	Spójność Cohesion
	mm · min ⁻¹	w, %	θ	I _L	φ, °	c, kPa
Szymbark	0,1	21,6	0,356	-0,10	33,0	56,4
		27,3	0,408	0,08	16,0	23,3
		36,7	0,520	0,36	16,6	19,7
	1,0	20,1	0,337	-0,14	20,2	59,2
		27,1	0,407	0,07	14,5	26,6
		32,9	0,480	0,24	12,4	15,5
Winiary	0,1	17,0	0,307	-0,25	39,7	26,4
		20,7	0,363	0,07	38,0	18,3
		24,3	0,416	0,39	35,9	12,8
	1,0	15,3	0,284	-0,39	30,9	71,2
		20,8	0,365	0,08	32,7	27,8
		24,8	0,424	0,44	29,4	22,6

ścianany przy prędkości $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, natomiast przy wartościach naprężeń normalnych powyżej 75 kPa większe wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskano dla gruntu ścinanego przy prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Otrzymane z badań wartości wytrzymałości na ścinanie znalazły odzwierciedlenie w wartościach kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Porównując dane zestawione w tabeli 2, można stwierdzić, że w przypadku obu gruntów większe wartości kąta tarcia wewnętrznego, a mniejsze wartości spójności uzyskano, stosując prędkość ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, przy czym nieco większy wpływ prędkości ścinania na wartości parametrów wytrzymałościowych uzyskano dla gruntu z Winiar.

W dalszej części pracy wykonano teoretyczne obliczenia wytrzymałości na ścinanie, wykorzystując metody zaproponowane w pracach Vanapalli i in. [1996] oraz Matsuhi i Matsukury [2006]. W przypadku pierwszej z tych metod wykonano dodatkowo oznaczenie parametrów wytrzymałościowych badanych gruntów, stosując prędkość ścinania $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ i przyjmując, że prędkość ta umożliwia swobodny odpływ wody z próbki gruntu. Dla gruntu z Szymbarku uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpowiednio $16,8^\circ$ i 10,7 kPa, natomiast w przypadku gruntu z Winiar wartości tych parametrów wyniosły odpowiednio $33,7^\circ$ i 6,8 kPa. Do obliczeń wykorzystano znajomość charakterystyki retencyjnej badanych gruntów. W przypadku każdego gruntu zastosowano dwie pary wartości parametrów równania van Genuchtena. Pierwszą z nich stanowiły dane otrzymane z badań dla gruntów pochodzących z okolic Szymbarku (ił pylasty z Ropicy Polskiej) i Winiar (pył ilasto-piaszczysty), które były podobne pod względem uziarnienia do badanych w niniejszej pracy. Wartości parametrów retencyjnych określone dla gruntu z Ropicy Polskiej wyniosły $a = 0,041 \text{ m}^{-1}$ oraz $n = 1,56$, a dla gruntu z Winiar $a = 0,397 \text{ m}^{-1}$ oraz $n = 1,19$. Z kolei druga para wartości parametrów równania van Genuchtena określona została na podstawie funkcji semi-pedotransferu Aubertina i in. [2003] i wyniosła dla gruntu z Szymbarku $a = 0,056 \text{ m}^{-1}$, $n = 1,54$ oraz $a = 0,128 \text{ m}^{-1}$, $n = 1,50$ dla gruntu z Winiar.

Weryfikację uzyskanych wyników obliczeń wytrzymałości na ścinania badanych gruntów stanowiło ich porównanie z wynikami bezpośrednich badań przedstawionych we wcześniejszej części pracy. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie wyników badań bezpośrednich z obliczeniami wytrzymałości na ścinanie ustalonych na podstawie wartości parametrów retencyjnych, które określono z wykorzystaniem modelu Aubertina i in. [2003], gdyż wykazały one najlepsze dopasowanie do wyników badań. Średni błąd względny oznaczenia wytrzymałości na ścinanie wyniósł w przypadku gruntu z Szymbarku 17,7% oraz 9,1% dla gruntu z Winiar. Dla porównania obliczenia wytrzymałości na ścinanie oparte na charakterystyce retencyjnej iłu pylastego z okolic Szymbarku dały średni błąd oznaczenia oporu gruntu na ścinanie 24,3%.

Obliczenia wytrzymałości na ścinanie z wykorzystaniem metody Matsushi i Matsukury polegały w pierwszej kolejności na określeniu parametrów równania (4) (tab. 3), które obliczono, opierając się na wynikach badań otrzymanych przy prędkości ścinania $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Następnie parametry te wykorzystano do obliczeń wytrzymałości na ścinanie i porównano w wynikami bezpośrednich badań (ryc. 5). Wyniki obliczeń wykazały, że średni błąd względny oznaczenia wytrzymałości na ścinanie w przypadku gruntu z Szymbarku wyniósł 8,0%, a dla gruntu z Gdowa 8,2%. Zatem otrzymane wyniki obliczeń wytrzymałości na ścinanie wskazują, że model Matsushi i Matsukury daje lepsze dopasowanie do wyników badań niż model zaproponowany w pracy Vanapalliego i in. [1996].



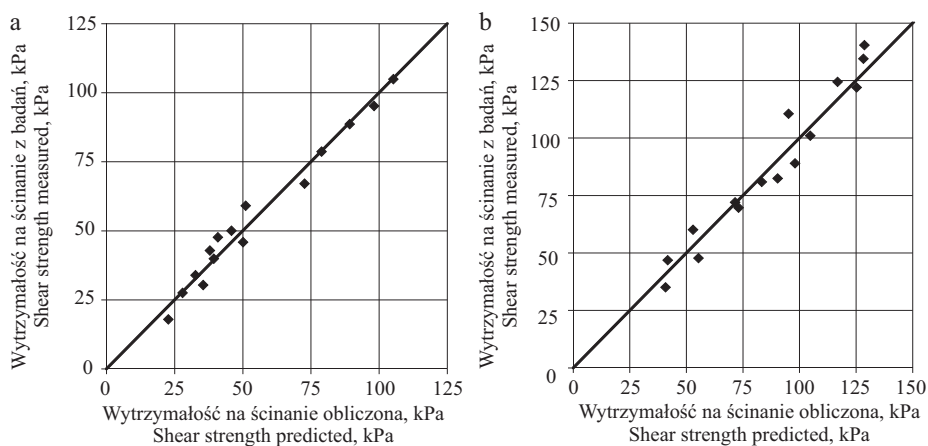
Ryc. 4. Porównanie wytrzymałości na ścinanie obliczonej metodą Vanapalli i in. [1996] oraz określonej z bezpośrednich badań dla gruntu z Szymbarku (a) oraz Gdowa (b)

Fig. 4. The results of comparing shear strength calculated using Vanapalli et al. [1996] and measured from direct shear tests for soils from Szymbark (a) and Gdów (b)

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń parametrów równania Matsushi i Matsukury

Table 3. Values of parameters of Matsushi-Matsukura equation

Grunt – Soil	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ' , ° Angle of internal friction ϕ' , °	Parametr μ Parameter μ	Parametr C, kPa Parameter C, kPa
Szymbark	12,5	-14,0	6849
Winiary	27,5	-12,1	1924



Ryc. 5. Porównanie wytrzymałości na ścinanie obliczonej metodą Matsushi-Matsukury oraz z bezpośrednich badań dla gruntu z Szymbarku (a) oraz Gdowa (b)

Fig. 5. The results of comparing shear strength calculated using Matsushi-Matsukura equation and measured from direct shear tests for soils from Szymbark (a) and Gdów (b)

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie dwóch gruntów pochodzących z terenów osuwiskowych z okolic Szymbarku koło Gorlic oraz Winiar koło Gdowa, które to grunty stanowiły odpowiednio ilt pylasty ze żwirem oraz pył iltasty. Pierwszym celem pracy było określenia wpływu wilgotności badanych gruntów na ich wytrzymałość na ścinanie oraz parametrów ją charakteryzujących. Wyniki badań potwierdziły znane zależności, że wraz ze wzrostem uwilgotnienia gruntu następuje zmniejszenie wartości ich całkowitych parametrów wytrzymałościowych, przy czym zakres zmian jest zróżnicowany, zależny przede wszystkim od ich uziarnienia. Ogólnie mniejsze wartości wytrzymałości na ścinanie wykazał grunt z Szymbarku, który charakteryzował się większą zawartością frakcji iłowej niż grunt z Winiar.

Drugim celem pracy było porównanie wyników obliczeń wytrzymałości na ścinanie za pomocą wybranych uproszczonych modeli wytrzymałościowych dla gruntów nienasyconych z wynikami bezpośrednich badań. Modele te stanowiły propozycja Vanappaliego, będąca modyfikacją prawa Coulomba-Mohra dla ośrodków nienasyconych, oraz model Matsushi i Matsukury, w którym spójność pozorna gruntu jest wyrażona jako funkcja jego wilgotności objętościowej. Zastosowane w pracy metody obliczeniowe różnią się pod względem zasobu danych niezbędnych do określenia wytrzymałości na ścinanie. W metodzie zaproponowanej przez zespół Vanappaliego wymagana jest znajomość efektywnych parametrów wytrzymałościowych gruntów oraz ich charakterystyki retencyjnej, co wykracza poza zakres typowych badań geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych. Ponadto wyniki obliczeń wykazały, że model ten jest wrażliwy na parametry wejściowe opisujące właściwości retencyjne gruntów. Metoda zaproponowana przez Matsushi i Matsukurę wydaje się nieco prostsza, gdyż wymaga jedynie bezpośrednich wyników badań wytrzymałości na ścinanie gruntów przy zróżnicowanej ich wilgotności. Przeprowadzana analiza porównawcza wykazała częściową zbieżność wyników obliczeń z wynikami badań, przy czym lepsze dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych uzyskano, stosując model Matsushi i Matsukury.

PIŚMIENNICTWO

- Aubertin M., Mbonimpa M., Bussière B., Chapuis R.P., 2003. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canad. Geotech. J.* 40(6), 1104–1122.
- Bednarczyk Z., 2005. Examples of the mass movement investigations in different types of deposits. *Polish Geolog. Inst. Special Papers* 20, 14–26.
- Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A., 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canad. Geotech. J.* 15(3), 313–321.
- Guan G.S., Rahardjo H., Choon L.E., 2010. Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.* 136(4), 594–606.
- Lech M., 2012. Polowe i laboratoryjne badania wodoprzepuszczalności wybranych gruntów z obszaru Beskidu Niskiego. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, maszynopis.
- Matsushi Y., Matsukura Y., 2006. Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content. *Bull. Engin. Geol. Environ.* 65, 449–455.

- Pietrawska P., 2012. Terenowe i laboratoryjne badania wodoprzepuszczalności gruntów z obszaru karpackiego. Praca magisterska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, maszynopis.
- PN-EN ISO 14688-2-2004 Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów. Cz. 2. Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-10. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Cz. 10. Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- van Genuchten M.T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44, 892–898.
- Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E., Clifton A.W., 1996. Model for prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canad. Geotech. J.* 33, 379–392.
- Vanapalli S.K., Fredlund D.G., 1999. Empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils. 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Red. Hong et al. 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. *Proceed. 2nd Canadian Specialty Conference on Computer Applications in Geotechnique*. Winnipeg, 245–253.
- Zabuski L., Gil E., Rączkowski W., Wójcik A., 2003. Badania reprezentatywnego procesu osuwiskowego w masywie fliszu karpackiego – osuwisko eksperymentalne w Beskidzie Niskim. IBW PAN Gdańsk, maszynopis.
- Zydroń T., Zgoda J., 2012. Wpływ wilgotności na właściwości wytrzymałościowe gruntów z obszaru karpackiego. *Acta Sci. Pol., Form. Circum.* 11(2), 75–84.
- Zydroń T., Zaleski T., 2013. Analiza porównawcza wybranych funkcji pedotransferu do określenia właściwości retencyjnych gruntów na przykładzie utworów pochodzących z obszarów osuwiskowych. *Inżyn. Morska Geotech.* 1, 36–42.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 18.12.2013