

WPLYW WILGOTNOŚCI I PRĘDKOŚCI ŚCINANIA NA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE GRUNTÓW PYLASTYCH Z OKOLIC KOTLINY SĄDECKIEJ

Tymoteusz Zydróż, Tomasz Zaleski
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Dominika Janik
Frapol Sp. z o.o., Kraków

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie gruntów pochodzących z okolic Starego Sącza (Kotlina Sądecka), podobnych pod względem uziarnienia. Celem pracy było określenie wpływu wilgotności oraz prędkości ścinania na otrzymane wartości wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów oraz porównanie otrzymanych wyników badań z opisem teoretycznym wytrzymałości na ścinanie wykorzystującym uproszczony model wytrzymałości gruntów nienasyconych zaproponowany przez Vanapalli i in. [1996]. Wyniki badań wykazały, że wzrost wilgotności gruntów powoduje wyraźne zmniejszenie ich wytrzymałości na ścinanie, wpływając przede wszystkim na wartości spójności. Wyniki obliczeń wykazały, że wartości wytrzymałości na ścinanie określone teoretycznie dały stosunkowo dobrą zgodność z wynikami badań, potwierdzając tym samym istotny wpływ sił ssania na wytrzymałość gruntów na ścinanie. Wykazano również, że bardziej korzystne parametry wytrzymałościowe uzyskano dla gruntu charakteryzującego się mniejszą zawartością części organicznych.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na ścinanie, grunty nienasycone, Karpaty

WPROWADZENIE

Wytrzymałość na ścinanie gruntów należy do podstawowych cech geotechnicznych, która charakteryzuje zdolność gruntów do przeciwdziałania naprężeniom ścinającym, co ma duże znaczenie zarówno w przypadku oceny stateczności zboczy, jak i projektowania

Adres do korespondencji – Corresponding Authors: dr inż. Tymoteusz Zydróż, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, dr hab. inż. Tomasz Zaleski, Katedra Gleboznawstwa i Ochrony Gleb, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, mgr inż. Dominika Janik, Frapol Sp. z o.o., ul. Mierzeja Wiślana 8, 30-732 Kraków; e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl, t.zaleski@ur.krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

wielu rodzajów obiektów inżynierskich. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi wytrzymałość na ścinanie są kąt tarcia wewnętrznego i spójność, które w dużym stopniu zależą od uziarnienia gruntu, jego zagęszczenia i wilgotności. Szczególnie istotne znaczenie w ocenie wytrzymałości gruntów na ścinanie ma wilgotność, a jej zmiany wywołane działaniem opadów atmosferycznych są w dużym stopniu odpowiedzialne za powstawanie osuwisk. Stąd też przedmiotem niniejszej pracy były badania wytrzymałości na ścinanie wybranych gruntów pochodzących z okolic Kotliny Sądeckiej w zależności od ich uwilgotnienia, właściwości geotechnicznych oraz zastosowanej w badaniach prędkości ścinania. Dodatkowym celem pracy było porównanie otrzymanych wyników badań wytrzymałości na ścinanie z wynikami obliczeń teoretycznych wytrzymałości gruntów nienasyconych.

ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Grunty do badań laboratoryjnych zostały pobrane z dwóch sąsiadujących ze sobą miejscowości: Gaboń i Gołkowice Górne, które położone są w granicach gminy Stary Sącz. Pod względem geograficznym [Kondracki 2002] miejscowości te leżą w Kotlinie Sądeckiej. Grunt z Gabonia zlokalizowany był w pobliżu terenu osuwiska, które powstało w roku 2010, natomiast grunt z Gołkowic Górnych pochodził z pola ornego zlokalizowanego w dolinie rzeki Dunajec.

W ramach badań terenowych wykonano wkopy badawcze w powierzchniowej warstwie profilu gruntowego do głębokości ok. 0,7 m. W dniu wykopu metodą pierścienia tnącego określono gęstość objętościową gruntu oraz pobrano próbki do badań laboratoryjnych, które obejmowały oznaczenie podstawowych parametrów fizycznych gruntów (skład granulometryczny, wilgotność naturalną, granice konsystencji, gęstość właściwą szkieletu gruntowego, straty prażenia oraz zawartość części organicznych). Zasadniczy zakres badań dotyczył oznaczeń wytrzymałości na ścinanie. Badania te przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania, w skrzynce o przekroju 60×60 mm, stosując dwie prędkości ścinania $0,1$ i $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pierwsza z nich stosowana jest powszechnie w standardowych badaniach gruntów spoistych. Z kolei większa prędkość ścinania ($1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) jest zwykle stosowana w przypadku badań gruntów nienasyconych metodą bezpośredniego ścinania [Vanapalli i Lane 2002, Matsushi i Matsukura 2006], a uzasadnieniem dla jej stosowania jest krótki czas ścięcia próbki, która ogranicza możliwości wystąpienia zmian stanu naprężeń w gruncie.

Przed przystąpieniem do ścinania próbki poddawano obciążeniu wstępnemu wynoszącemu 100 kPa przez 60 min , a następnie ścinano przy naprężeniach $25, 50, 75, 100, 125$ oraz 150 kPa . Każdą serię ścięć przeprowadzano w trzech różnych wartościach wilgotności: odpowiadającej wilgotności naturalnej oraz większej i mniejszej od naturalnej. Sposób przygotowania próbek do badań był zróżnicowany w zależności od założonej docelowej wilgotności gruntu. Początkowo grunty o wilgotności naturalnej zagęszczano w metalowych pierścieniu o kształcie walca do uzyskania gęstości objętościowej analogicznej do otrzymanej z badań terenowych. W przypadku próbek o wilgotności naturalnej z walca wycinano prostopadłościenne próbki o wymiarach $60 \times 60 \times 17 \text{ mm}$ i umieszczano je w aparacie. W przypadku próbek o wilgotności mniejszej od naturalnej walce z gruntem

poddawano suszeniu w temperaturze pokojowej do utraty masy odpowiadającej ok. 5% ubytkowi wody. Z kolei próbki o wilgotności większej od naturalnej uzyskiwano, zanurzając pierścienie z gruntem w wodzie na okres co najmniej jednej doby. W trakcie badań, oprócz pomiarów oporu na ścinanie próbek gruntu i ich odkształcenia poziomego, rejestrowano również zmiany wysokości gruntu, co posłużyło do określenia gęstości objętościowej, a w dalszej kolejności do obliczenia wilgotności objętościowej gruntu.

Wartości wytrzymałości na ścinanie otrzymane w każdej serii badań zostały wykorzystane do obliczenia wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności, które określono metodą najmniejszych kwadratów.

Opisana powyżej metodyka pracy umożliwiła określenie wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności jako parametrów uzależnionych od stopnia nasycenia porów gruntowych wodą. Wyniki tego typu wydają się mieć ograniczone zastosowanie, gdyż odnoszą się jedynie do konkretnego stanu uwilgotnienia gruntu, a dodatkowo nie uwzględniają rzeczywistego stanu naprężeń w ośrodku gruntowym opisanego zmodyfikowanym równaniem Coulomba-Mohra [Fredlund i in. 1978]:

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

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 równaniu powyższym istotny wpływ na wytrzymałość gruntu posiadają zarówno jego parametry efektywne (kąt tarcia wewnętrznego i spójność), jak i siła ssania, która wynika z charakterystyki retencyjnej gruntu – krzywej pF. Dodatkowym parametrem wpływającym na wytrzymałość na ścinanie gruntu nienasyconego jest parametr ϕ^b , który określany jest na podstawie badań w specjalistycznej aparaturze umożliwiającej kontrolę stanu naprężeń w trakcie procesu ścinania próbki [Gan i Fredlund 1988, Nam i in. 2011]. Stąd też dla celów praktycznych opracowano alternatywne metody opisu wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych, wśród których wyróżnić można równanie zaproponowane przez Vanapalli i in. [1996]:

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

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' – jak we wzorze (1).

W równaniu powyższym κ stanowi wielkość, która służy dopasowaniu danych teoretycznych do danych pomiarowych, a do określenia wytrzymałości gruntu na ścinanie niezbędna jest znajomość ciśnienia ssania, którą można oszacować na podstawie krzywej retencyjnej gruntu.

W związku z tym dla potrzeb niniejszej pracy oznaczono krzywe retencyjności wodnej gruntów metodą płyt porowatych w komorach ciśnieniowych w zakresie potencjałów pF od 1 do 4,2 (1–15484 cm) na drodze osuszania, w aparaturze wyprodukowanej przez Eijkelkamp. Przy każdej wartości ciśnienia badanie prowadzono do momentu stabilizacji masy próbek, którą następnie przeliczano na wilgotność objętościową. Uzyskane z badań krzywe retencyjne zostały opisane równaniem van Genuchtena [1980]:

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

gdzie:

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

Równanie powyższe zostało w dalszej części pracy wykorzystane do określenia wartości ciśnienia ssania gruntu odpowiadającej jego wilgotności objętościowej.

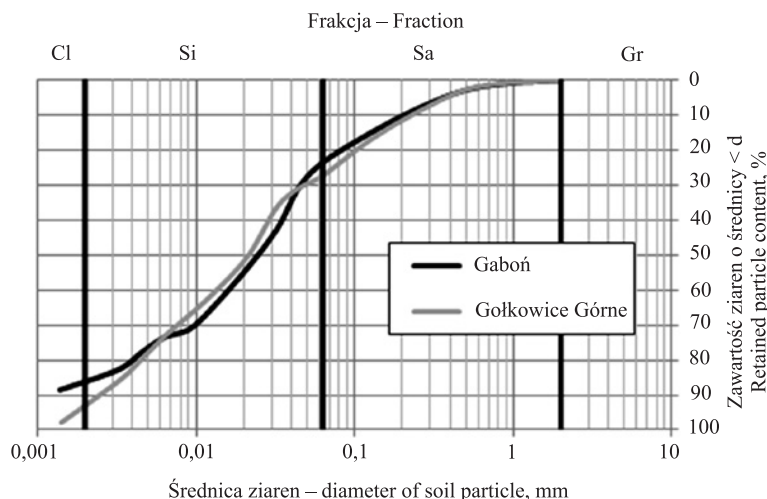
Dla potrzeb zastosowania metody Vanapalli i in. [1996] przeprowadzono również badania wytrzymałości na ścinanie przy prędkości ścinania $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, gdzie w trakcie badań próbki były zanurzone w wodzie, co teoretycznie [PKN–CEN ISO/TS 17892–10: 2009] umożliwia określenie parametrów wytrzymałościowych gruntu w zakresie naprężeń efektywnych.

CHARAKTERYSTYKA GEOTECHNICZNA BADANYCH GRUNTÓW

W tab. 1 zestawiono podstawowe właściwości fizyczne badanych gruntów, na ryc. 1 zilustrowano ich krzywe granulometryczne, natomiast na ryc. 2 przedstawiono ich krzywe retencyjności wodnej. Uziarnienie badanych gruntów jest podobne w zakresie frakcji piaskowej i pyłowej, natomiast nieco większą zawartością frakcji iłowej charakteryzuje się grunt z Gabonia, który pod względem geotechnicznym [PN–EN ISO 14688–2: 2006] sklasyfikowano jako pył ilasty z piaskiem. Z kolei uziarnienie gruntu z Gołkowic Górnych odpowiadało pyłowi piaszczystemu. Badane grunty charakteryzują się podobnymi wartościami wskaźnika plastyczności, przy czym większe wartości obu granic konsystencji posiada grunt z Gołkowic Górnych. Badane grunty różnią się pod względem zawartości części organicznych, których ponad dwukrotnie więcej zawiera grunt z Gołkowic Górnych.

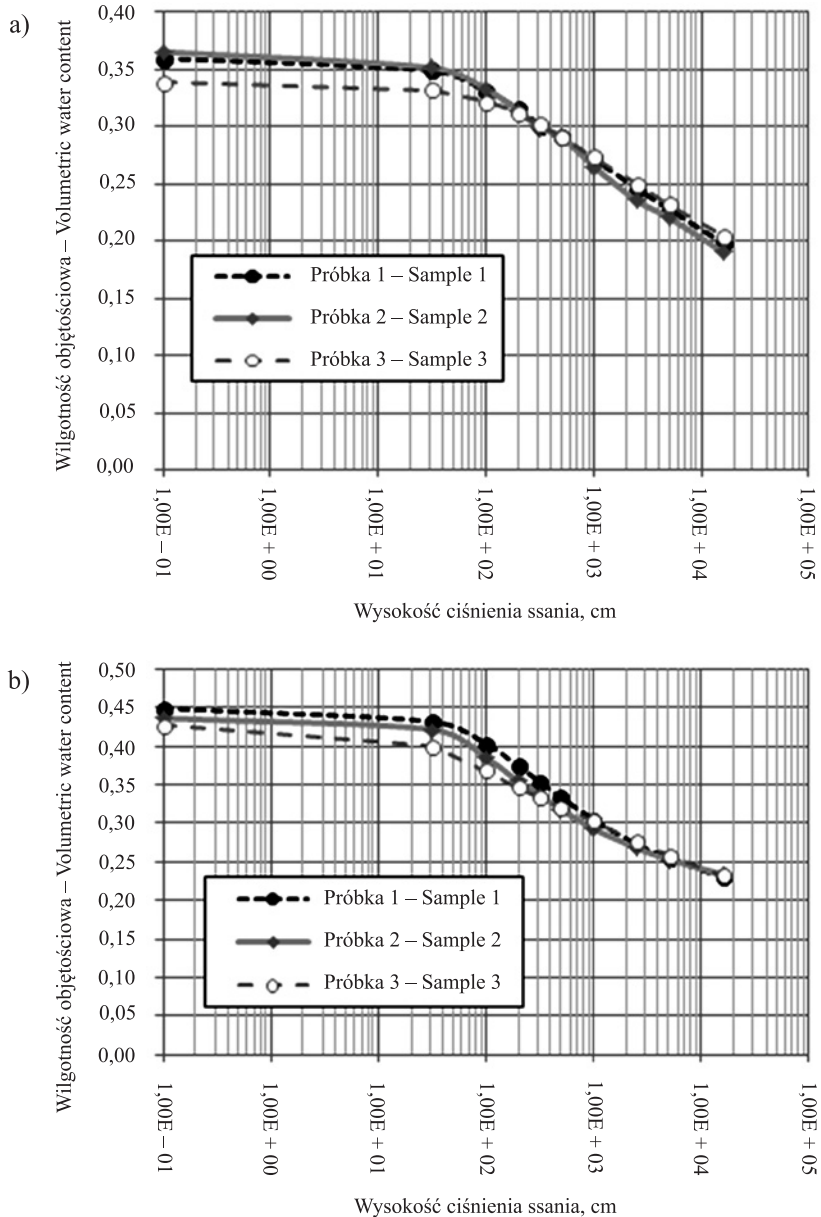
Tabela 1. Zestawienie parametrów geotechnicznych badanych gruntów
Table 1. Physical parameters of tested soils

Parametry Parameters	Jednostka Unit	Pochodzenie gruntu Origin of soils	
		Gaboń	Gołkowice Górne
Zawartość frakcji – Fraction content:			
– zwirowa – gravel (63–2 mm)		0,1	0,1
– piaskowa – sand (2–0,063 mm)	%	23,4	27,1
– pyłowa – silt (0,002–0,063 mm)		62,7	65,8
– ilowa – clay (< 0,002 mm)		13,8	7,0
Nazwa gruntu wg PN–EN ISO 14688–2:2006 Name acc to EN ISO 14688–2:2006	–	saclSi	saSi
Wilgotność naturalna – natural moisture content, w_n	%	19,8	26,1
Gęstość objętościowa – Density, ρ	$g \cdot cm^{-3}$	1,99	1,90
Gęstość objętościowa szkieletu – Dry density, ρ_d	$g \cdot cm^{-3}$	1,66	1,51
Granica plastyczności – Plastic limit, w_p	%	16,5	23,9
Granica płynności – Liquid limit, w_L	%	31,8	42,9
Wskaźnik plastyczności – Index of plasticity, I_p	%	15,3	19,0
Stopień plastyczności – Degree of plasticity, I_L	%	0,21	0,11
Straty prażenia – Self-ignition content, I_p	%	1,8	3,8
Zawartość części organicznych – organic matter content,	%	0,6	1,6



Ryc. 1. Krzywe uziarnienia badanych gruntów
Fig. 1. Grain-size distribution of tested soils

Na podstawie otrzymanych krzywych retencyjności wodnej określone zostały parametry równania van Genuchtena [1980] obu gruntów. Dla gruntu z Gabonia wyniosły one $\alpha = 0,00866 \text{ cm}^{-1}$ oraz $n = 1,1398$, a dla gruntu z Gołkowic Górnych $\alpha = 0,02124 \text{ cm}^{-1}$ oraz $n = 1,1347$.



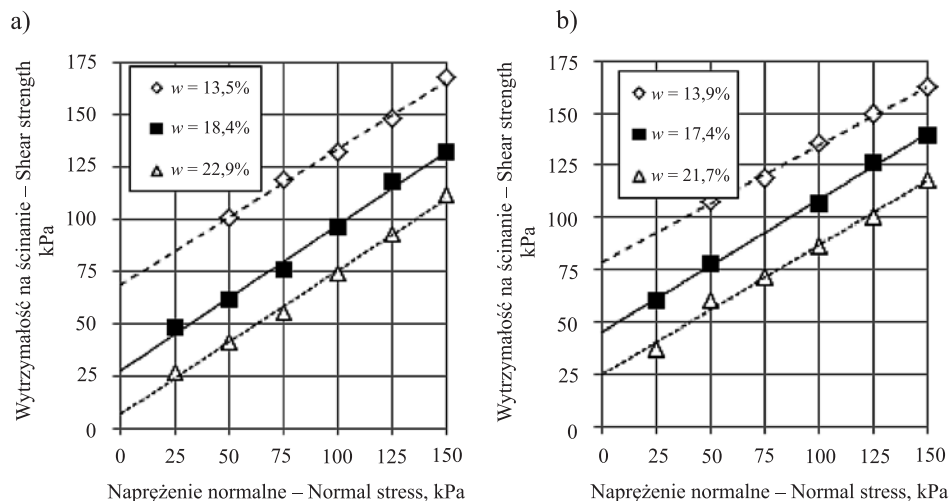
Ryc. 2. Krzywe retencyjności wodnej gruntu z Gabonia (a) i Gołkowic Górnych (b)
Fig. 2. Soil-water characteristic curve of soils from Gabon (a) and Gólkowice Górne (b)

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na ryc. 3–4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie w zależności od prędkości ścinania i wilgotności, a w tab. 2 zestawiono zbiorczo wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów. Ogólnie można stwierdzić, że badane grunty charakteryzują się dużymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego, przy czym nieco większe wartości tego parametru uzyskano dla gruntu z Gabonia. Można zauważyć, że wartości kąta tarcia wewnętrznego obydwu gruntów wykazały niewielkie zmiany w badanym zakresie wilgotności. Wyraźnie większy zakres wartości uzyskano w przypadku spójności, który dla gruntu z Gabonia wyniósł od 7,1 do 78,6 kPa, natomiast w przypadku gruntu z Gołkowic Górnych był on mniejszy (10,2–47,8 kPa).

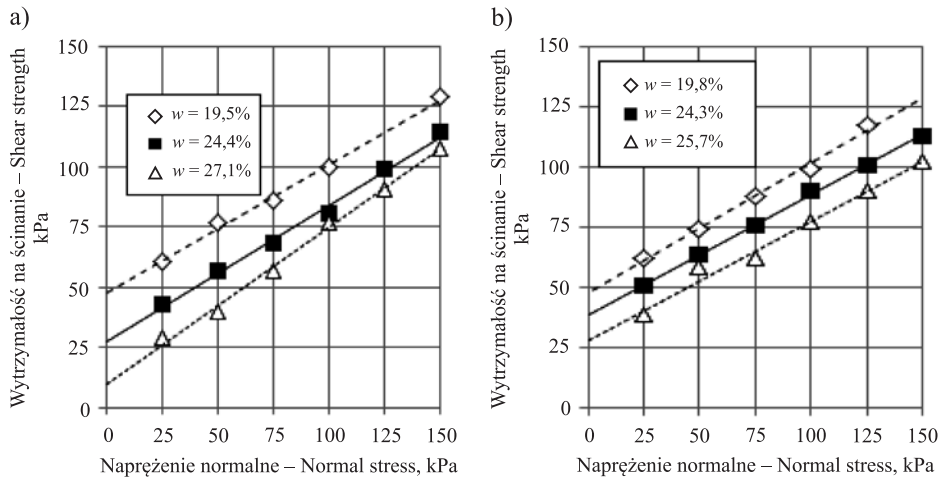
Analizując wyniki badań stwierdzono wyraźną ich zależność od wilgotności, prędkości ścinania oraz właściwości fizycznych badanych gruntów. Badania wykazały, że wzrost uwilgotnienia powoduje zmniejszenie wytrzymałości gruntu na ścinanie, a zmiany te znajdują odzwierciedlenie zwłaszcza w wartościach spójności. Natomiast wpływ wilgotności na wartości kąta tarcia wewnętrznego był nieznaczny, o czym świadczy prawie równoległy układ linii wytrzymałościowych uzyskanych w każdej serii badań, co jest wyraźnie widoczne na ryc. 3 i 4. Większy zakres zmian wytrzymałości na ścinanie oraz parametrów ją charakteryzujących otrzymano dla gruntu z Gabonia, który w badanym zakresie wilgotności wykazał większe zmiany stopnia plastyczności niż grunt z Gołkowic Górnych.

Wpływ prędkości ścinania na otrzymane wyniki badań był niejednoznaczny. W przypadku gruntu z Gabonia przy wilgotności wynoszącej ok. 13% uzyskano bardzo zbliżone wartości wytrzymałości na ścinanie, natomiast próbki o większych wartościach wilgotno-



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

Fig. 3. Results of shear strength tests of soil from Gabon obtained at shearing rate 0,1 (a) and 1,0 (b) mm · min⁻¹



Ryc. 4. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu z Gólkowice Górnych przy prędkości ścinania 0,1 (a) i 1,0 (b) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$

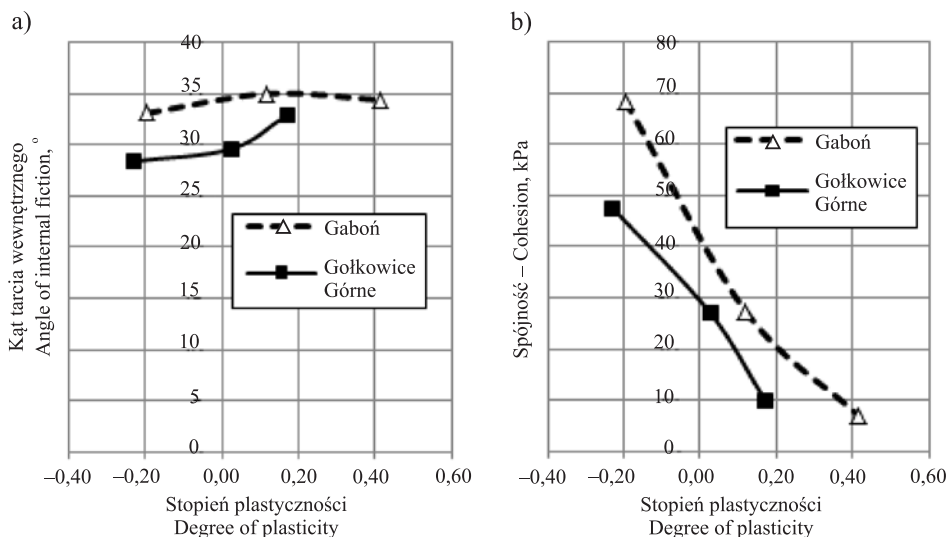
Fig. 4. Results of shear strength tests of soil from Gólkowice Górne obtained at shearing rate 0,1 (a) and 1,0 (b) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$

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 $w, \%$	Początkowa wilgotność objętościowa gruntu Initial volumetric water content θ	Stopień plastyczności Liquidity index I_L	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction $\varphi, ^\circ$	Spójność Cohesion c, kPa
Gaboń	0,1	13,5	0,251	-0,20	33,1	68,5
		18,3	0,330	0,12	35,0	27,4
		22,9	0,382	0,41	34,4	7,1
	1,0	13,9	0,260	-0,17	29,3	78,6
		17,4	0,310	0,06	32,1	45,8
		21,7	0,367	0,34	31,7	25,0
Gólkowice Górne	0,1	19,5	0,335	-0,23	28,4	47,8
		24,4	0,386	0,02	29,6	27,3
		27,1	0,423	0,17	32,9	10,2
	1,0	19,8	0,340	-0,22	28,4	47,7
		24,3	0,388	0,02	26,5	38,8
		25,7	0,405	0,09	26,2	28,5

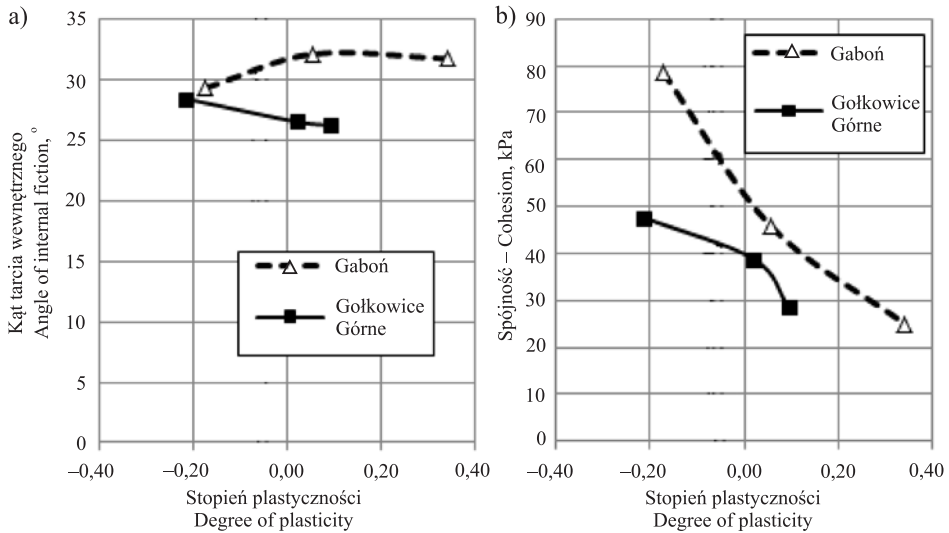
ści uzyskały większe wartości oporu na ścinanie przy prędkości $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Z kolei w przypadku gruntu z Gołkowic Górnych w całym badanym zakresie wilgotności w niskim zakresie naprężeń normalnych większe wartości wytrzymałości uzyskano przy prędkości ścinania $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, a w zakresie większych naprężeń normalnych wytrzymałość na ścinanie uzyskana przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ była nieco większa lub podobna niż przy $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jednoznaczny wpływ prędkości ścinania uwidocznił się w przypadku wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Ogólnie przy większej prędkości ścinania uzyskano mniejsze wartości kąta tarcia wewnętrznego, a większe spójności (por. ryc. 5–6). Podobne zależności przedstawione są również w pracy Zydronia i Gadowskiej [2013].



Ryc. 5. Zależność kąta tarcia wewnętrznego (a) i spójności (b) od stopnia plastyczności badanych gruntów przy prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 5. Angle of internal friction (a) and cohesion (b) vs. degree of plasticity obtained at the shearing rate $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Porównując wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów (ryc. 5 i 6), można stwierdzić, że ogólnie bardziej korzystne wartości zarówno kąta tarcia wewnętrznego, jak i spójności posiada grunt z Gabonia. Różnice wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskane przy podobnych wartościach stopnia plastyczności wynoszą maksymalnie $5,4^\circ$, natomiast różnice wartości spójności dochodzą nawet do ok. 30 kPa. Tak wyraźna różnica wartości parametrów charakteryzujących badane grunty może wynikać z nieco innej zawartości substancji organicznej, której większą ilość stwierdzono w gruncie z Gołkowic Górnych. Można nadmienić, że grunt ten cechował się wyraźnie ciemniejszą barwą, charakterystyczną dla gruntów organicznych. Właściwość ta wydaje się mieć wpływ na porowatość oraz gęstość objętościową szkieletu, która jest wyraźnie większa w gruncie z Gabonia. Porównując krzywe retencyjne obydwu gruntów można zauważyć, że kształtem są one podobne, ale grunt z Gołkowic Górnych charakteryzuje się wyraźnie większą wartością wilgotności pełnego nasycenia oraz dwukrotnie większą zawartością wody grawitacyjnej.



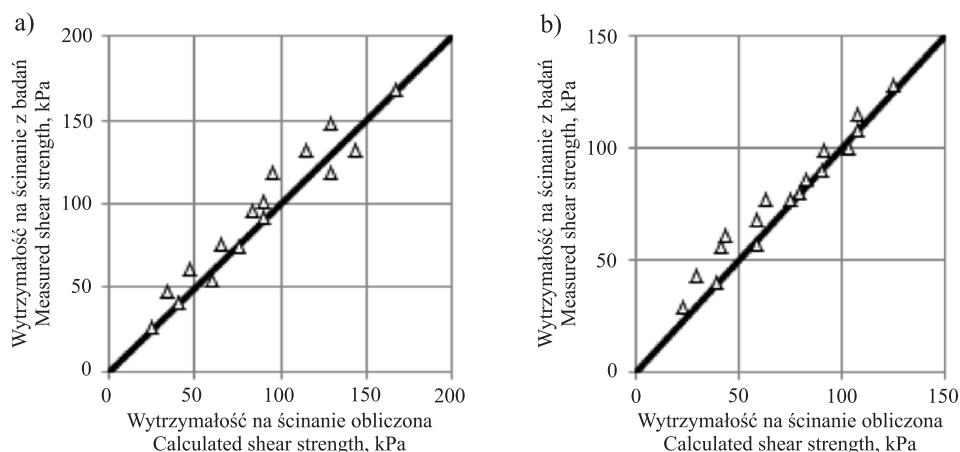
Ryc. 6. Zależność kąta tarcia wewnętrznego (a) i spójności (b) od stopnia plastyczności badanych gruntów przy prędkości $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 6. Angle of internal friction (a) nad cohesion (b) vs. degree of plasticity obtained at the shearing rate $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Uzyskane wyniki badań parametrów wytrzymałościowych odbiegają nieco od wartości podawanych w pracy Wiłuna [2000] dla gruntów podobnych pod względem uziarnienia. Przede wszystkim zauważalne jest, że otrzymane wartości kąta tarcia wewnętrznego są większe, a wartości spójności mniejsze od podawanych w wyżej cytowanej pracy. Natomiast wyniki oznaczeń kąta tarcia wewnętrznego próbek o wysokich wartościach wilgotności są podobne do danych przedstawionych w pracy Smolczyka [2002] dla pyłów o niskiej i średniej plastyczności, a nieco niższe niż uzyskali dla gruntu pyłastego Zydroń i Gadowska [2013], czy też wartości tego parametru podawanej przez Wysokińskiego [2006] dla gruntów o średniej plastyczności. Należy zauważyć także, że wartości spójności podane przez Wysokińskiego [2006] oraz uzyskane przez Zydroń i Gadowska [2013] są bardzo zbliżone do uzyskanych w niniejszej pracy dla próbek o dużych wartościach wilgotności.

Otrzymane wyniki badań wykazały istotny wpływ wilgotności na wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów, przy czym zmiany tego parametru związane były w niewielkim stopniu ze zmianą kąta tarcia wewnętrznego, a w większym ze zmianą spójności. Tego typu zależności wskazują zatem, że zmiany oporu na ścinanie związane są ze zmianą tzw. spójności pozornej, wynikającej z występowania w gruncie nienasyconym sił ssania matrycowego (negatywnego ciśnienia porowego). Dlatego też dla weryfikacji tej tezy porównano otrzymane wyniki badań z teoretycznym modelem wytrzymałości na ścinanie ośrodków nienasyconych. Dla potrzeb analizy wykonano badania parametrów efektywnych, które określono metodą bezpośredniego ścinania dla próbek nasyconych. Dla gruntu z Gaboń określone w ten sposób wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności wyniosły odpowiednio $33,0^\circ$ i $5,8 \text{ kPa}$. Z kolei dla gruntu z Gołkowic Górnych

uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego $33,4^\circ$, a spójności $3,9$ kPa. Wartości ciśnienia ssania, odpowiadające wilgotności gruntu w końcowej fazie badań, przyjęto na podstawie krzywych retencyjnych zestawionych na ryc. 2 i opisanych równaniem van Genuchtena. Na ryc. 7 zestawiono wyniki obliczeń wytrzymałości na ścinanie określonych metodą Vanapalli i in. [1996] oraz uzyskane z badań wartości tego parametru przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Porównanie to wskazuje na stosunkowo dobrą zgodność wyników danych empirycznych z teoretycznym opisem wytrzymałości na ścinanie, wskazując tym samym na istotny wpływ sił ciśnienia ssania matrycowego na wytrzymałość gruntów na ścinanie. Względny błąd pomiaru, wyrażający odchylenie wartości oporu na ścinanie z badań od teoretycznej wartości tego parametru, wyniósł w przypadku gruntu z Gabonia $11,2\%$, a dla gruntu z Gołkowic $10,5\%$. Nieco gorsze wyniki obliczeń uzyskano przy większej prędkości ścinania, gdzie średni błąd oznaczenia wytrzymałości na ścinanie wyniósł $17\text{--}17,2\%$, a wartości wytrzymałości na ścinanie obliczone były z reguły zaniżone w stosunku do wyników badań. Wyniki innych prac współautora [Gruchot i Zydroń 2013, Zydroń i Miętus 2015] wskazują również, że mniejsza prędkość ścinania pozwala uzyskać lepsze dopasowanie wyników badań do teoretycznych obliczeń wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych. Zależność ta może być spowodowana tym, że przy wysokiej wartości prędkości na ścinanie dochodzi do dużych deformacji próbek gruntu, co może generować błędy pomiarowe przy oznaczaniu gęstości objętościowej gruntu, a w dalszej konsekwencji wpływa na określenie jego wilgotności objętościowej.



Ryc 7. Porównanie wytrzymałości na ścinanie określonej na podstawie obliczeń metodą Vanapalli i in. [1996] oraz otrzymanej z bezpośrednich badań dla gruntu z Gabonia (a) oraz Gołkowic Górnych (b) – próbki badane przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 7. Comparison of shear strength obtained by calculation using Vanapalli et al. [1996] model and measured for soils from Gabon (a) and Gólkowice górne (b) – samples tested at shearing rate $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania gruntów pochodzących z miejscowości Gaboń i Gołkowice Górne k. Starego Sącza wykazały, że charakteryzują się one zróżnicowanymi wartościami wytrzymałości na ścinanie jak i parametrów ją charakteryzujących, które w znaczącym stopniu zależne były od ich właściwości fizycznych gruntów oraz prędkości ścinania. Otrzymane wyniki badań potwierdzają znane zależności odnośnie do negatywnego wpływu wilgotności na wytrzymałość gruntów na ścinanie. Wykazano, że w przypadku analizowanych gruntów parametrem bardziej wrażliwym na zmiany wilgotności jest spójność. Zależność tę potwierdzają wyniki teoretycznych obliczeń wytrzymałości na ścinanie, wskazując jednocześnie na bardzo istotny wpływ sił ssania, wynikający z właściwości retencyjnych gruntów, na ich wytrzymałość w stanie niepełnego nasycenia.

W pracy wykazano także niejednoznaczny wpływ prędkości ścinania na wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów, niemniej zauważalne było, że stosowanie większych prędkości ścinania prowadziło do uzyskiwania większych wartości spójności, a mniejszych kąta tarcia wewnętrznego.

Wykazano, że badane grunty pomimo podobnego składu granulometrycznego różnią się wartościami parametrów wytrzymałościowych. Większe ich wartości uzyskano dla gruntu z Gabonia, a wynikały one prawdopodobnie z mniejszej zawartości części organicznych.

PIŚMIENNICTWO

- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotech. J.*, 15(3), 313–321.
- Gan, K.J., Fredlund, D.G. (1988). Multistage direct shear testing of unsaturated soils. *Geotech. Testing J.*, 11(2), 132–138.
- 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.
- Gruchot, A., Zydróń, T. (2013). Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego. *Annual Set Environ. Prot.*, 15, 1719–1737.
- Kondracki, J. (2002). *Geografia regionalna Polski*, PWN, Warszawa.
- Nam, S., Gutierrez, M., Diplas, P., Petrie, J. (2011). Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engin. Geol.*, 122(3–4), 272–280.
- 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. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. PKN, Warszawa.
- Smolczyk, U. (2002). *Geotechnical engineering handbook. Vol. 1. Fundamentals*. Ernst & Sohn. A Wiley Company, Berlin.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clifton, A.W. (1996). Model for prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotech. J.*, 33, 379–392.
- 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.

Wiłun, Z. (2000). *Zarys geotechniki*. Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa.

Wysokiński, L. (2006). *Ocena stateczności skarp i zboczy*. Instrukcje, Wytyczne, Poradnik 424/2006, ITB, Warszawa.

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., Miętus, P. (2015). Wpływ wilgotności i prędkości na ścinanie na wytrzymałość na ścinanie gruntów pokryw stokowych z okolic Gorlic. Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ms.

INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT AND SHEARING RATE ON SHEAR STRENGTH OF SILTY SOILS FROM THE NEIGHBOURHOOD OF KOTLINA SĄDECKA

Abstract. The results of shear strength tests of cohesive soils from neighborhood of Stary Sącz (Kotlina Sądecka), similar in terms of grain-size distribution, are presented in the paper. Determination of the influence of moisture content and shearing rate on values of shear strength of tested soils were the main subjects of the test. The aim of paper was also comparison of obtained results of shear strength and results of theoretical calculation of shear strength using simplifying method for evaluation of shear strength of unsaturated soils proposed by Vanapalli et al. [1996]. Results of tests revealed that the increase of moisture content of tested soils causes significant decrease in their shear strength, which has significant influence on cohesion values. Calculations of shear strength revealed that values of soil shear strength determined using simplifying model gave good agreement with results of shear tests, confirming that important role of matric suction on shear strength of unsaturated soils. It was also shown that better shear strength parameters were obtained for soil having lower organic content.

Key words: shear strength, unsaturated soils, the Carpathians

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 9.02.2016

Do cytowań – For citation: (2016). Zydroń, T., Janik, D., Zaleski, T., Wpływ wilgotności i prędkości ścinania na wytrzymałości na ścinanie gruntów pylastych z okolic Kotliny Sądeckiej. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(1), 165–177.