

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ GRUNTÓW SPOISTYCH Z TERENÓW OSUWISKOWYCH OKOLIC SZYMBARKU K. GORLIC

Katarzyna Staromłyńska

G4 Geodezja

Tymoteusz Zydrzeń

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości resztkowej gruntów spoistych pochodzących z terenów osuwiskowych okolic Szymbarku k. Gorlic. Badania przeprowadzone zostały w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach o przekroju 60×60 mm. Zastosowano dwie prędkości ścinania $0,05$ i $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, każda próbka była ścinana sześciokrotnie, a zakres poziomych odkształceń próbek wynosił 20%. Badania wykazały, że resztkowa wytrzymałość na ścinanie wzdłuż wytworzonej płaszczyzny osłabienia stanowi 52–78% jego wytrzymałości maksymalnej, a do wytworzenia płaszczyzny osłabienia niezbędne jest co najmniej 5-krotne ścinanie próbki. Wpływ prędkości ścinania miał niejednoznaczny wpływ na otrzymane wartości wytrzymałości resztkowej. Wykazano, że stosując do uzyskanych wyników badań liniową interpretację równania Coulomba-Mohra, otrzymano niezerowe wartości spójności resztkowej. W związku z tym dla ograniczenia wpływu tego parametru na ocenę stateczności należałoby stosować nieliniową obwiednię wytrzymałościową, do której opisu można zastosować przedstawione w pracy równanie Lade.

Słowa kluczowe: wytrzymałość resztkowa, Karpaty fliszowe, osuwiska

WSTĘP

Określenie wytrzymałości na ścinanie należy do jednych z podstawowych badań geotechnicznych, którego wyniki wykorzystywane są do obliczeń stateczności zboczy naturalnych oraz ziemnych budowli inżynierskich. Stateczność zboczy jest szczególnie istotnym problemem na terenie Polski południowej obejmującej swym zasięgiem obszar

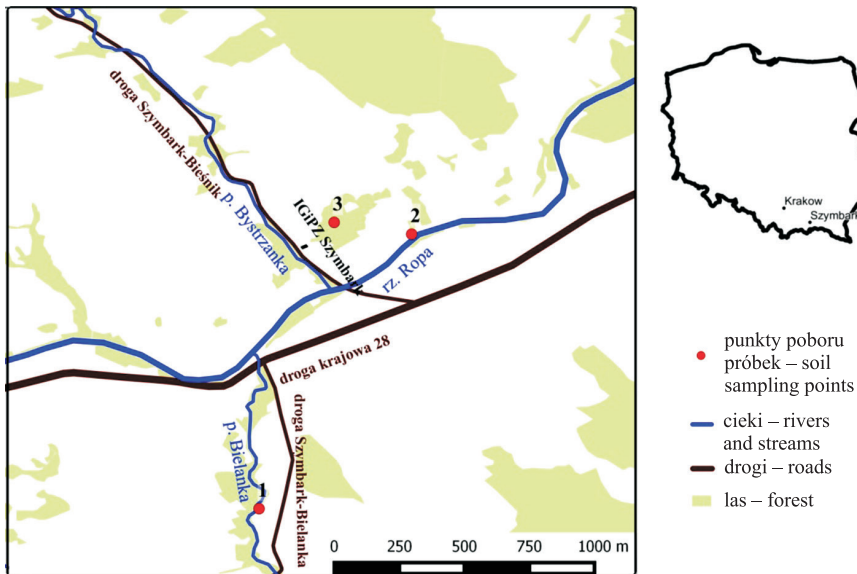
Adres do korespondencji – Corresponding Author: mgr inż. Katarzyna Staromłyńska, G4 Geodezja, 31-619 Kraków, ul. Orła Białego 29, dr inż. Tymoteusz Zydrzeń, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydrzen@ur.krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

Karpat Zewnętrznych (tzw. Karpat fliszowych) charakteryzujących się dużym natężeniem ruchów masowych. Wśród obszarów charakteryzujących się występowaniem osuwisk są okolice Szymbarku k. Gorlic, który znajduje się w strefie nasunięcia płaszczowiny magurskiej na jednostkę śląską. Duża część osuwisk opisywanych w literaturze dotyczącej tego regionu [Gil i Starkel 1979, Bober i in. 1984, Thiel 1989, Gil 1993, Zabuski i in. 2003, Bednarczyk 2005, Gil i Długosz 2006] charakteryzuje się okresową aktywnością, która związana jest zazwyczaj z okresami nasilenia opadów atmosferycznych. W przypadku tego typu procesów praktycznego znaczenia nabiera znajomość wytrzymałości na ścinanie występująca w strefach płaszczowiny poślizgu (tzw. wytrzymałość resztkowa lub residualna), która powstaje po przewyciężeniu maksymalnej wytrzymałości gruntu na ścinanie. Celem niniejszej pracy było określenie wytrzymałości resztkowej gruntów spoistych pochodzących z obszaru dwóch osuwisk zlokalizowanych w okolicach Szymbarku.

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE BADANYCH GRUNTÓW

Badania wytrzymałości na ścinanie zostały przeprowadzone na próbkach gruntu pobranych ze strefy brzegu potoku Bielanka oraz dwóch strefach osuwiska Kawiory (ryc. 1). Próbki z brzegu potoku Bielanka oraz dolnej strefy osuwiska Kawiory reprezentowane były przez eocenijskie łupki pstre, przy czym charakteryzowały się one różnym stopniem diagenety. Łupki ze strefy brzegowej potoku Bielanka (ryc. 2a) miały barwę



Ryc. 1. Lokalizacja punktów poboru próbek gruntu

Fig. 1. Location of sample collection sites

Objaśnienie: 1 – brzeg potoku Bielanka, 2 – dolna część osuwiska Kawiory, 3 – boczna nisza osuwiska Kawiory

Explanation: 1 – riverbank of Bielanka stream, 2 – lower part of Kawiory landslide, 3 – lateral niche of Kawiory landslide

czerwoną oraz teksturę zbliżoną do łupkowej, co objawiało się ich kruszeniem w trakcie poboru. Z kolei łupki pstre pochodzące z dolnej części osuwiska Kawiorzy pobrane zostały w strefie brzegowej rzeki Ropy i charakteryzowały się barwą szaro-czerwoną, a ich tekstura była zbliżona do typowych gruntów spoiстых. Do badań pobrano także próbki gruntu z bocznej niszy osuwiska Kawiorzy, która zlokalizowana jest na terenie Stacji Naukowej IGiPZ PAN w Szymbarku.

W ramach badań wstępnych określono podstawowe właściwości geotechniczne gruntów (skład uziarnienia, granice konsystencji, zawartość części organicznych i straty prażenia). Przy określaniu składu granulometrycznego pomijano ziarna większe od 2 mm, zakładając, że ich zawartość jest bardzo zmienna, a wytrzymałość resztkowa nie jest w istotnym stopniu zależna od ich obecności. Posługując się obecnie obowiązującą nomenklaturą geotechniczną [PN-EN ISO 14688-2:2006] analizowane grunty zostały sklasyfikowane jako ły pyłaste (tab. 1), natomiast według uprzednio obowiązującej

Tabela 1. Zestawienie podstawowych właściwości geotechnicznych badanych gruntów
Table 1. Geotechnical parameters of tested soils

Parametry Parameters	Jednostka Unit	Pochodzenie gruntu Origin of tested soils		
		Brzeg potoku Bielanka Riverbank of the Bielanka stream	Podnóże osuwiska Kawiorzy Lower part of Kawiorzy landslide	Boczna nisza osuwiska Kawiorzy Lateral niche of Kawiorzy landslide
Zawartość frakcji – Fraction content:				
– piaskowa – sand (2–0,063 mm)	%	1,6	5,6	13,6
– pyłowa – silt (0,063–0,002 mm)	%	76,4	72,0	57,8
– ilowa – clay (< 0,002 mm)	%	22,0	22,4	28,6
Nazwa rodzaju gruntu wg PN-EN ISO 14688:2002 – Soil type acc. to PN-EN ISO 14688:2002	–	siCl	siCl	siCl
Nazwa rodzaju gruntu wg PN-86/B-02480 – Soil type acc. to PN-86/B-02480	–	G _{πz}	G _{πz}	G _{πz}
Gęstość objętościowa – Density	g · cm ⁻³	2,16	1,95	1,91
Wilgotność naturalna Natural moisture content	%	16,3	25,2	20,7
Granica plastyczności – Plastic limit	%	21,1	27,3	19,5
Granica płynności – Liquid limit	%	42,8	75,6	52,5
Wskaźnik plastyczności – Plasticity index	%	21,7	48,3	33,0
Stopień plastyczności – Liquidity index	–	–0,22	–0,04	0,04
Zawartość części organicznych Organic matter content	%	0,05	0,57	1,19
Zawartość części palnych – Ignition loss	%	4,26	4,07	3,40

klasyfikacji geotechnicznej [PN-86/B-02480] jako gliny zwięzło-pylaste. Można zwrócić uwagę na bardzo podobny skład granulometryczny gruntu pobranego z brzegu potoku Bielanka oraz gruntu pochodzącego z dolnej części osuwiska Kawiory, co najprawdopodobniej jest związane z ich pochodzeniem (łupki pstre). Zauważalne jest jednak, że grunt z dolnej strefy osuwiska Kawiory charakteryzuje się znacznie większymi wartościami granic konsystencji niż pozostałe grunty. Próbkę gruntu pobierane były w okresie letnim w 2014 r., w związku z czym wartości ich stopnia plastyczności są niskie, odpowiadające konsystencji zwartej lub twardoplastycznej. Zawartość części organicznych w badanych gruntach była niska i nie przekraczała 2%.

METODYKA I ZAKRES PRACY

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach o wymiarach $60 \times 60 \times 19$ mm. Próbkę gruntu o wilgotności naturalnej formowano w prostopadłościennym pierścieniu do wartości gęstości objętościowej ustalonej w trakcie badań terenowych, a następnie umieszczano w skrzynce aparatu i zalewano wodą do poziomu odpowiadającego około połowie wysokości próbki (nieznacznie powyżej płaszczyzny ścięcia). Następnie próbki poddawano obciążeniu konsolidacyjnemu o wartości 100 kPa przez około 16 godzin i ścinano przy naprężeniach 50, 100 lub 150 kPa do uzyskania względnego odkształcenia próbki 20%. Zastosowano dwie prędkości ścinania 0,1 oraz 0,05 mm · min⁻¹. Pierwsza z nich jest standardową prędkością stosowaną w badaniach inżynierskich, natomiast druga prędkość uważana jest za odpowiednią do uzyskania warunków ścinania z drenażem [Thiel 1989]. Po zakończeniu ścinania górna skrzynka aparatu była cofana do pozycji wyjściowej i ścinanie powtarzano. Każda próbka była ścinana sześciokrotnie.

Wartość wytrzymałości resztkowej interpretowano jako naprężenia styczne występujące w końcowej fazie ścinania. Otrzymane wyniki badań z każdej serii ścięć były przeliczane metodą najmniejszych kwadratów na wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Zmiany wartości wytrzymałości na ścinanie określano poprzez wskaźnik Bishopa [1967]:

$$I_B = \frac{\tau_f - \tau_r}{\tau_f} [-]$$

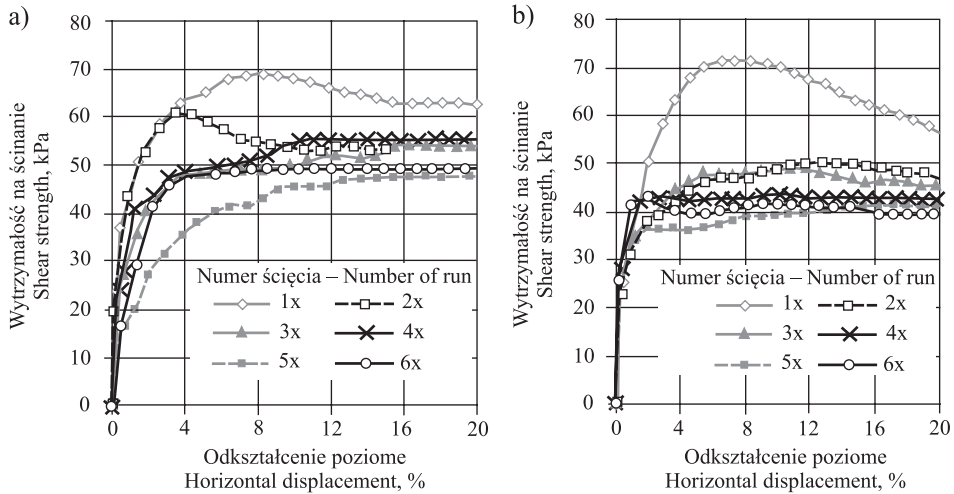
gdzie:

- τ_f – wytrzymałość maksymalna (z pierwszego ścinania próbek),
- τ_r – wytrzymałość resztkowa (końcowa podczas każdego ścięcia).

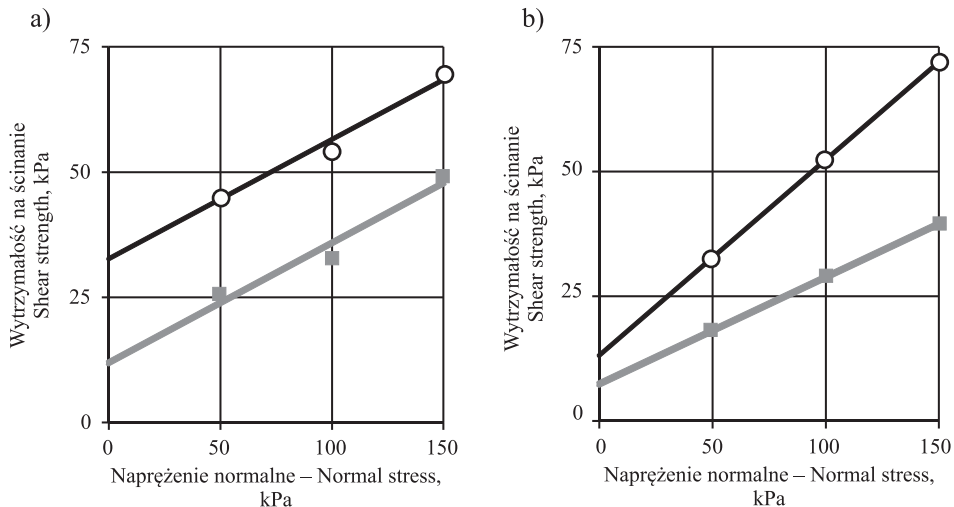
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na ryc. 2 przedstawiono przykładowe wyniki oznaczeń wytrzymałości na ścinanie uzyskane w kolejnych seriach badań. Zauważalne jest, że największe wartości oporu na ścinanie występowały w początkowej fazie pierwszego ścinania próbek, a po jego przewyciężeniu następował ich wyraźny spadek. W trakcie kolejnych ścięć wartości oporu

na ścinanie wzrastały w początkowym zakresie odkształceń, a następnie stabilizowały się w przybliżeniu na stałym poziomie. Na ryc. 3 przedstawiono maksymalne i reszkowe wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskane po 6 serii ścięć.

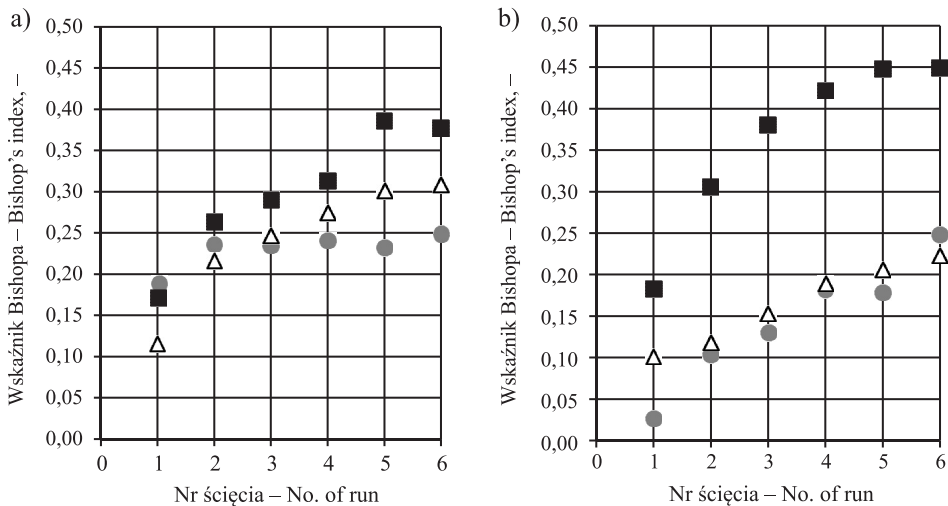


Ryc. 2. Przykładowe wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu dolnej części osuwiska Kawiory przy obciążeniu 150 kPa przy prędkości ścinania 0,1 (a) oraz 0,05 mm · min⁻¹ (b)
Fig. 2. Exemplary shear strength test results obtained for soil from the lower part of Kawiory landslide at normal stress of 150 kPa and shearing rate 0,1 (a) and 0,05 mm · min⁻¹ (b)



Ryc. 3. Maksymalna i reszkowa wytrzymałość na ścinanie gruntu z dolnej części osuwiska Kawiory uzyskana przy prędkości 0,1 (a) i 0,05 mm · min⁻¹ (b)
Fig. 3. Maximum and residual shear strength of soil from the lower part of Kawiory landslide obtained at shearing rate 0,1 (a) and 0,05 mm · min⁻¹ (b)

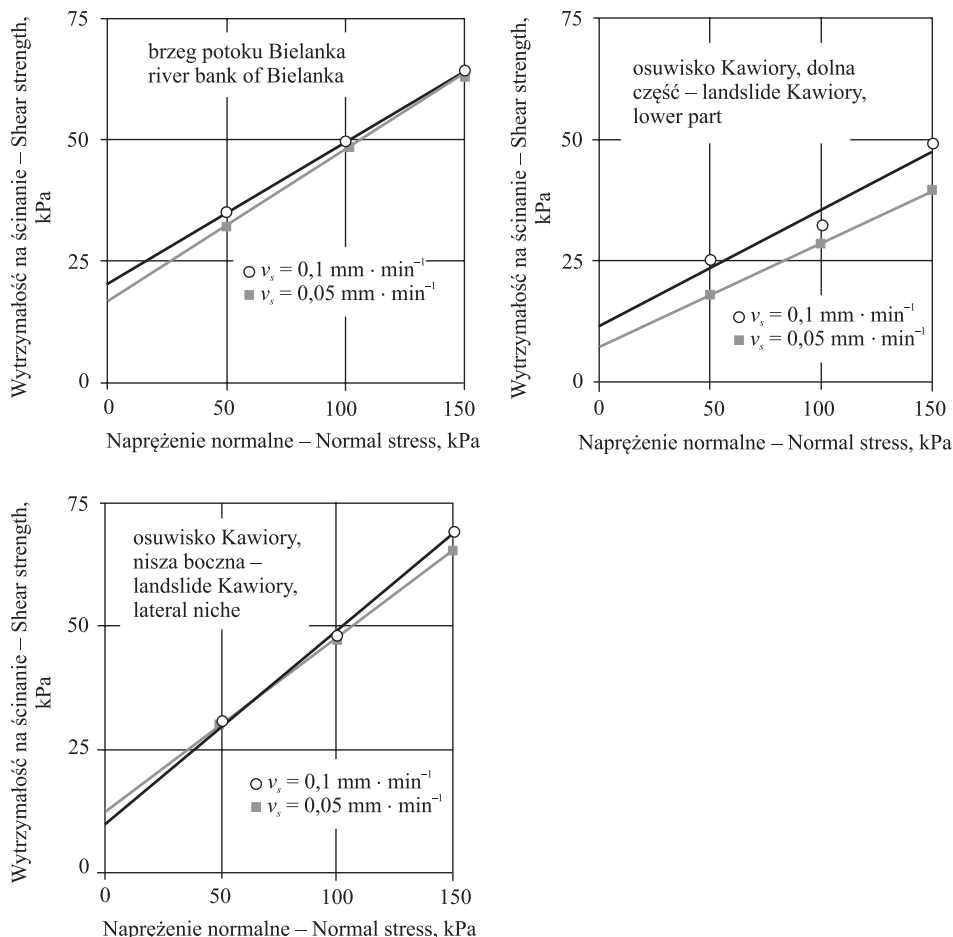
Wyniki obliczeń wskaźników Bishopa (ryc. 4) wykazały, że już w trakcie pierwszego ścięcia próbek występowało wyraźne (maksymalnie 18%) zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie w przypadku wszystkich badanych gruntów, a w kolejnych ścięciach następowało dalsze zmniejszanie się wartości tego parametru. Wskaźniki Bishopa otrzymane po 3 serii ścinania mieściły się w zakresie 0,13–0,38, natomiast utrzymane po ostatniej serii badań wyniosły 0,22–0,48. Niemniej zauważalne jest, że względna stabilizacja uzyskanych wartości wskaźników występuje najczęściej przy 5 ścięciu próbek, co jest większą wartością niż zalecana liczba ścinań tej samej próbki podana w PKN-CEN ISO/TS 17892-10. Największe zmiany wartości wskaźnika Bishopa niezależnie od zastosowanej prędkości ścinania uzyskano w przypadku gruntu z dolnej części osuwiska Kawiory, co może być związane było z dużą plastycznością tego gruntu. W przypadku pozostałych gruntów wytrzymałość resztkowa otrzymana w ostatniej serii ścięć była o około 25–30% mniejsza niż wytrzymałość maksymalna.



Ryc. 4. Wyniki obliczeń średnich wartości wskaźników Bishopa w kolejnych seriach badań przy prędkości 0,1 (a) i 0,05 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (b)

Fig. 4. Bishop's index values after various series of shearing obtained at shearing rate of 0,1 (a) and 0,05 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (b)

Na ryc. 5 porównano wyniki oznaczeń resztkowej wytrzymałości na ścinanie otrzymanej po szóstej serii ścięć przy obu prędkościach ścinania. Ogólnie można stwierdzić, że wpływ prędkości ścinania na wartości oporu na ścinanie zaznaczył się w przypadku gruntu z dolnej części osuwiska Kawiory, natomiast w przypadku pozostałych gruntów wartości tego parametru uzyskane przy obu prędkościach ścinania były bardzo podobne. Otrzymane zależności pokrywają się w dużej części z wynikami podawanymi w pracy Chen i in. [2014], którzy prowadzili badania na gruncie o średniej plastyczności stosując prędkości ścinania 0,02 i 0,1 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskane przy tych prędkościach różniły się o 3–4% i zostały przez tych autorów uznane za pomijalnie małe.



Ryc. 5. Zależność resztkowej wytrzymałości na ścinanie od prędkości ścinania

Fig. 5. The influence of shearing rate on residual shear strength of tested soils

Otrzymane wartości wytrzymałości na ścinanie znalazły odzwierciedlenie w wartościach parametrów ją charakteryzujących tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności. W tabeli 2 zestawiono wartości obu parametrów uzyskane w kolejnych seriach ścięć. Ogólnie można stwierdzić, że w efekcie kolejnych ścięć zauważalna jest zmiana wartości obu parametrów, przy czym zakres zmian był nieco inny przy obu prędkościach ścinania. Przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ wielokrotne ścinanie próbek wpłynęło w znaczącym stopniu na zmniejszenie wartości spójności (prawie trzykrotnie), natomiast w niewielkim na zmiany kąta tarcia wewnętrznego. Podobne zależności podane są w pracach Boreckiej i in. [2006] oraz Kaczmarczyka i in. [2006]. Autorzy ci stwierdzili, że w przypadku gruntów o konsystencji zwartej lub twar doplastycznej redukcja wytrzymałości na ścinanie spowodowana kilkukrotnym ścinaniem powoduje znaczące zmiany spójności. Z kolei w przypadku badań z zastosowaniem prędkości ścinania $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ większy zakres zmian wartości dotyczył kąta tarcia wewnętrznego,

Tabela 2. Wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego i resztkowej spójności uzyskane w kolejnych seriach

Table 2. Values of residual angle of internal friction and residual cohesion obtained after series of shearing

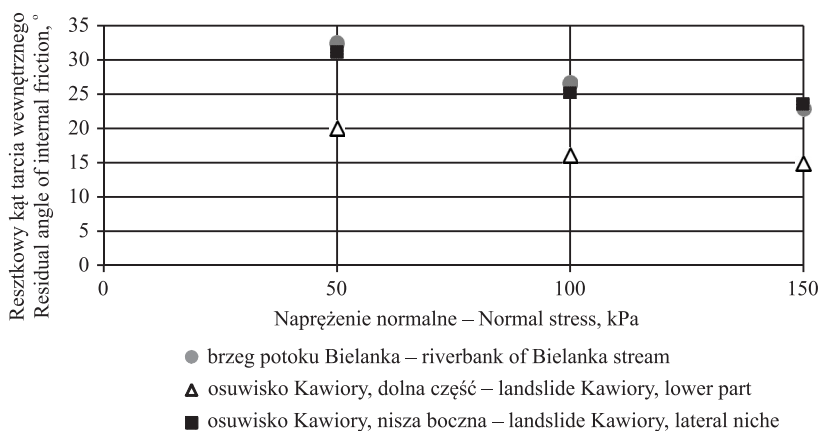
Nr ścięcia	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction, °			Spójność – Cohesion, kPa		
	Brzeg potoku Bielanka riverbank of the Bielanka stream	Podnóże osuwiska Kawiory Lower part of Kawiory landslide	Boczna nisza osuwiska Kawiory Lateral niche of Kawiory landslide	Brzeg potoku Bielanka Riverbank of the Bielanka stream	Podnóże osuwiska Kawiory Lower part of Kawiory landslide	Boczna nisza osuwiska Kawiory Lateral niche of Kawiory landslide
$v_s = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$						
1*	22,4	13,4	22,5	24,6	32,6	29,4
1	23,7	16,1	22,8	10,7	18,6	21,0
2	21,3	13,4	21,0	12,0	18,2	17,6
3	20,3	12,8	21,3	14,0	17,8	14,8
4	21,5	15,4	22,1	11,3	12,0	11,2
5	21,1	13,5	21,6	12,7	11,2	10,1
6	18,9	13,4	21,4	13,5	11,9	10,0
$v_s = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$						
1*	25,4	21,4	24,9	17,3	13,1	14,7
1	24,2	19,9	23,3	18,0	7,1	12,1
2	20,5	15,1	23,5	20,1	9,3	10,8
3	20,5	14,7	22,6	18,7	6,3	10,5
4	20,2	13,8	21,4	16,0	5,7	10,5
5	20,2	13,3	21,2	16,3	5,5	10,1
6	17,4	12,6	19,3	16,9	6,8	12,8

* maksymalna wytrzymałość na ścinanie – peak shear strength

a znaczące zmiany wartości spójności wystąpiły w zasadzie tylko w przypadku gruntu z dolnej części osuwiska Kawiory. W pozostałych przypadkach spójność resztkowa wykazały zmiany wartości maksymalnie o około 2 kPa. Porównując wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego po ostatniej serii ścięć uzyskane przy obu prędkościach ścinania, można stwierdzić, że różnią się one o 0,8–2,1°, przy czym większe wartości tego parametru uzyskano przy prędkości 0,1 mm · min⁻¹. Z kolei w przypadku resztkowej spójności otrzymano większe różnice wartości tego parametru, przy czym wpływ prędkości na ten parametr był niejednoznaczny. Dla porównania Garbulewski i in. [1997] badając ility z okolicach zbiornika Żelazny Most uzyskali przy prędkości ścinania 0,1 mm · min⁻¹ wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpowiednio

10,5° i 6 kPa, a przy prędkości 0,01 mm · min⁻¹ wartości tych parametrów wyniosły 7° i 5 kPa, przy czym autorzy ci podkreślili, że próbki ścinane przy większej prędkości były przygotowywane bez zwracania szczególnej uwagi na orientację powierzchni zlustrzeń względem powierzchni ścinania. Z kolei Kimura i in. [2014] stosując prędkości ścinania 0,01 i 0,5 mm · min⁻¹ stwierdzili, że wpływ tego czynnika na wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego zaznacza się przede wszystkim przy niskich wartościach naprężeń normalnych wynoszących do około 50 kPa.

Zauważalne jest, że pomimo zastosowania kilku serii ścięć wszystkie badane grunty charakteryzują się resztkowymi wartościami spójności różnymi (większymi) od zera, co nie jest zgodne z założeniami teoretycznymi [Skempton 1964, Smolczyk 2002], natomiast jest zgodne z wynikami badań innych autorów [Thiel 1989, 1995, Garbulewski i in. 1997, Borecka i in. 2006, Wen i in. 2007, Carrubba i Del Fabbro 2008, Chen in. 2014], którzy uzyskiwali z badań wartości resztkowej spójności przekraczające często wartość 10 kPa. Jak zauważają Lupini i in. [1981], występowanie niezerowych wartości spójności resztkowej może być efektem stosowania w badaniach niskich wartości naprężeń normalnych, które, jak podają Kimura i in. [2014], mają ograniczony lub zerowy wpływ na wykształcenia się płaszczyzny osłabienia w ścinanym gruncie. W związku tym [m.in. Thiel 1989, Stark i Eid 1994, Kimura i in. 2014] proponuje się stosowanie nieliniowego opisu prawa Coulomba-Mohra, gdzie kąt tarcia stanowi zmienną zależną od wartości naprężeń normalnych.



Ryc. 6. Wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego w funkcji naprężeń

Fig. 6. Residual angle of internal friction as dependent variable of normal stress

Na ryc. 6 przedstawiono resztkowe wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskane z ostatniej serii ścięć przy prędkości ścinania 0,05 mm · min⁻¹, które wyliczono ze wzoru:

$$\varphi_r = \arctg \left(\frac{\tau_r}{\sigma} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- τ_r – resztkowa wytrzymałość na ścinanie,
- σ – napężenie normalne.

Z danych przedstawionych na ryc. 6 wynika, że wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego zmieniają się istotnie wraz ze wzrostem naprężeń normalnych, przy czym wartości kąta tarcia wewnętrznego są większe niż resztkowe wartości kąta tarcia wewnętrznego opisane liniowym równaniem Coulomba-Mohra (por. ostatni wiersz tab. 2). Spośród badanych gruntów najniższe wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego posiada grunt z dolnej części osuwiska Kawiory, który charakteryzuje się największą plastycznością. Z kolei wartości resztkowego kąta tarcia wewnętrznego uzyskane dla dwóch pozostałych gruntów są bardzo podobne.

Wadą przedstawionej powyżej zależności opisującej resztkowy kąt tarcia wewnętrznego jako zmienną zależną od naprężeń normalnych jest brak ciągłości opisu zmian analizowanego parametru. W związku z tym otrzymane wyniki badań resztkowej wytrzymałości na ścinanie opisano równaniem Lade'a [2010], które w ogólnej postaci przedstawia się następująco:

$$\tau = a \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma}{p_a} \right)^b \quad (3)$$

gdzie:

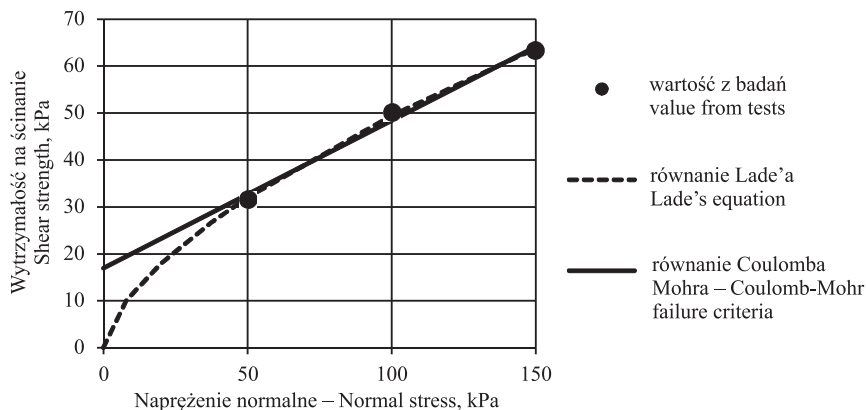
- p_a – ciśnienie atmosferyczne (wg autora metody można przyjmować 100 kPa),
- a, b – stałe równania, zależne od gruntu.

W tabeli 3 zestawiono estymowane wartości parametrów równania (3), a na ryc. 7 przedstawiono porównawczo krzywą wytrzymałości na ścinanie opisaną równaniem (3) oraz liniowym równaniem Coulomba-Mohra. Z danych przedstawionych na rycinie wynika, że zastosowanie nieliniowej obwiedni wytrzymałości na ścinanie daje znacząco różne wartości oporu na ścinanie niż liniowe równanie Coulomba-Mohra przede wszystkim w zakresie najniższych naprężeń normalnych, co będzie miało wpływ na ocenę stateczności.

Tabela 3. Zestawienie wartości parametrów równania Lade'a

Table 3. Values of Lade's equation parameters obtained for tested soils

Pochodzenie gruntu Origin of tested soils	Parametry – Parameters	
	a	b
Brzeg potoku Bielanka Riverbank of the Bielanka stream	0,494	0,628
Podnóże osuwiska Kawiory Lower part of Kawiory landslide	0,296	0,733
Boczna nisza osuwiska Kawiory Lateral niche of Kawiory landslide	0,487	0,692



Ryc. 7. Porównanie wytrzymałości na ścinanie opisanej za pomocą liniowego równania Coulomba-Mohra i równania Lade'a – grunt z brzegu potoku Bielanka

Fig. 7. Comparison of shear strength estimated using linear Coulomb-Mohr failure criterion and Lade's equation – example for soil from riverbank of Bielanka stream

PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki badań potwierdzają istotne znaczenie naruszenia struktury gruntu na zmniejszenie jego wytrzymałości na ścinanie. W przypadku badanych gruntów wytrzymałość resztkowa uzyskana po trzech seriach ścinań stanowiła średnio 76% wartości maksymalnego oporu na ścinanie, a po sześciu ścięciach około 69%. Wykazano, że dla wytworzenia się stabilnej powierzchni osłabienia niezbędne jest co najmniej pięciokrotne ścinanie próbki gruntu.

Wyniki badań nie wykazały jednoznacznie istotnych różnic wartości resztkowej wytrzymałości na ścinanie uzyskanych przy prędkościach ścinania 0,1 i 0,05 mm · min⁻¹. Niemniej z punktu widzenia możliwości uzyskania odpowiednich warunków odpływu wody bardziej uzasadnione jest stosowanie mniejszej prędkości ścinania.

Wyniki badań wykazały, że stosowanie liniowego prawa Coulomba-Mohra może prowadzić do uzyskania niezerowych wartości spójności. W celu ograniczenia wpływu tego parametru na ocenę stateczności należałoby stosować nieliniową obwiednię wytrzymałościową, której przykładem jest zastosowane w pracy równanie Lade'a.

PIŚMIENNICTWO

- Bednarczyk, Z. (2005). Examples of the mass movement investigations in different types of deposits. Polish Geolog. Inst. Special Papers 20, 14–26.
- Bishop, A. (1967). Progressive failure – with special reference to the mechanism causing it. Proceedings of the Geotechnical Conference, Oslo, Norway. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway. 2, 142–150.
- Bober, L., Gil, E., Szymański, J., Zabuski, L. (1984). Geological and geotechnical characterization of experimental landslide slope in Szymbark. Proceedings of the CNR-PAN Meeting, Progress

- in Mass Movement and Sediment Transport Studies, Problems of Recognition and Prediction, Torino, 161–191.
- Borecka, A., Herzig, J., Kaczmarczyk, R., Woźniak, H. (2006). Właściwości fizykomechaniczne wybranych gruntów spoistych ze zboczy wyrobiska KWB „Bełchatów”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*, 28, 39–50.
- Carrubba, P., Del Fabbro, M. (2008) Laboratory investigation on reactivated residual strength. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 134 (3), 302–315.
- Chen, X.P., Liu D. (2014) Residual strength of slip zone soils. *Landslides*, 11, 305–314.
- Chrzanowska, E. (1980). Osuwisko „Zapadle” w Szymbarku. Analiza wyników badań geofizycznych i geologiczno-inżynierskich. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Garbulewski, K., Laskowska, J., Wolski, W (1997). Wytrzymałość rezydualna ilów z naturalnymi powierzchniami osłabienia. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w budownictwie i transporcie, PG, 25–27 czerwca 1997, 65–70.
- Gil, E., Starkel, L. (1979). Long-term extreme rainfalls and their role in modelling of flysch slopes. *Proceedings of Polish-Italian Seminar, Superficial Mass Movements in Mountain Regions, Szymbark*, 123–133, Wyd. IMiGW, Warszawa.
- Gil, E. (2003). Meteorologiczne i hydrologiczne warunki ruchów masowych. [red Starkel L., Prokop P.] *Przemiany środowiska przyrodniczego Karpat i Kotlin Podkarpackich: sesja naukowa w 40-lecie Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyzyn IGiPZ PAN, Kraków*, 89–102.
- Gil, E., Długosz, M. (2006). Threshold values of rainfalls triggering selected deep-seated landslides in the polish flysch Carpathians. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, XL, 21–43.
- Kaczmarczyk, R., Woźniak, H., Borecka, A. (2006). Wytrzymałość na ścinanie stref kontaktów warstw w górotworze złóż węgla brunatnego *Zesz. Nauk. Politechniki Białostockiej*, 28(1), 147–154.
- Kimura, S., Nakamura, S., Vithana, S.B., Sakai, K. (2014). Shearing rate effect on residual strength of landslide soils in the slow rate range. *Landslides*, 11, 969–979.
- Lade, P.V. (2010) The mechanics of surficial failure in soil slopes. *Engin. Geology*, 114, 54–64.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E., Vaughan, P.R. (1981). Drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique*, 31(2), 181–213.
- PKN EN ISP 14688-2:2004. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Cz. 2. Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-10. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10. Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa.
- Skempton, A.W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77–102.
- Smolczyk, U. (2002). *Geotechnical engineering handbook. T. 1. Fundamentals*. Ernst & Sohn, Berlin.
- Stark, T.D., Eid, H.T. (1994). Drained residual strength of cohesive soils. *J. Geotech. Engin.*, 120(5), 856–871.
- Thiel, K. (red.) (1989). *Kształtowanie fliaszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku*. Wyd. IBW, Gdańsk.
- Thiel, K. (red.) (1995). *Właściwości fizyko-mechaniczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliaszowych*. Wyd. IBW, Gdańsk.
- Wen, B.P., Aydin, A., Duzgoren-Aydin, N.S., Li, Y.R., Chen, H.Y., Xiao, S.D. (2007). Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China. *Engineering Geology*, 93, 82–98.
- Zabuski, L., Gil, E., Rączkowski, W., Wójcik, A. (2003). *Badania reprezentatywnego procesu osuwiskowego w masywie fliasz karpackiego – osuwisko eksperymentalne w Beskidzie Niskim*. IBW PAN, Gdańsk, maszynopis.

RESIDUAL SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS FROM LANDSLIDE PRONE AREAS OF SZYMBARK NEAR GORLICE

Abstract. Results of residual shear strength of cohesive soils derived from landslide-prone areas in Szymbark near Gorlice (the Flysch Carpathians) are presented in the paper. Shear tests were done using direct shear strength apparatus on samples of dimensions 60×60 mm. Two shearing rates were applied: 0,05 and 0,1 mm per min. Each sample were repeated sheared six times and rate of horizontal deformations of samples were equal 20%. Test results revealed that the residual shear strength formed along the plane of weakness is of 52–78% of its maximum strength and to its produce at least 5 repeated series of shearing should be done. Effect of shearing rate on the obtained values of residual strength was inconclusive. It was also revealed that interpretation of test results using linear equations using Coulomb-Mohr failure criterion can give nonzero values of the residual cohesion. It was stated that for purpose of reduction of the impact of this parameter for the assessment of slope stability calculations it can be used non-linear envelope of shear strength described by Lade's equation.

Keywords: residual shear strength, the Flysch Carpathians, landslides

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.02.2017

Do cytowań – For citation: Staromłyńska, K., Zydróż, T. (2017). Badania wytrzymałości resztkowej gruntów spoistych z terenów osuwiskowych okolic Szymbarku k. Gorlic. Acta. Sci. Pol., *Formatio Circumiectus*, 16(1), 173–185.