

*Zydroń Tymoteusz**, *Kogut Małgorzata ***, *Gruchot Andrzej**

WPLYW PRĘDKOŚCI ŚCINANIA NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH GRUNTÓW Z OBSZARU KARPACKIEGO

1. Wprowadzenie

Ruchy masowe należą do jednych z najbardziej destrukcyjnych czynników naturalnych kształtujących współczesną rzeźbę powierzchni terenu. Wśród tego typu procesów najczęściej uwagę zwraca się na osuwiska, które definiowane są jako przemieszczenie mas ziemnych i skalnych w niżej położone partie zboczy. Główny impuls inicjujący tego typu procesy stanowią długotrwałe lub gwałtowne opady deszczu, w okresach wiosennych roztopy śniegu, a okresom nasilenia procesów osuwiskowych bardzo często towarzyszą powodzie.

W Polsce obszarem szczególnie narażonym na procesy osuwiskowe są Karpaty Zewnętrzne, zwane również fliszowymi. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu osuwisk w tym rejonie są przede wszystkim duże deniwelacje terenu, większe niż w innych częściach naszego kraju sumy opadów, a przede wszystkim skomplikowana budowa geologiczna regionu, która charakteryzuje się naprzemianległym występowaniem skalnych warstw utworów osadowych, najczęściej piaskowców i łupków.

Z punktu widzenia mechaniki gruntów i geotechniki utrata stateczności zboczy związana jest ze zmianami stanu naprężeń w ośrodku gruntowym, a najbardziej widocznym tego objawem jest zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie gruntów i utworów skalnych formujących zbocza dolin. Wytrzymałość ta najczęściej charakteryzowana jest jako maksymalna wartość oporu rozpatrywanego ośrodka, jaki stawia on naprężeniom ścinającym. W przypadku terenów aktywnych osuwiskowo większego znaczenia nabiera znajomość ustalonej wartości oporu, uzyskiwanej w zakresie dużych odkształceń próbek — wytrzymałości resztkowej (rezydual-

* Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

** absolwentka, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

nej). W naszym kraju problematyka badań wytrzymałości resztkowej była poruszana w przypadku prowadzenia analiz przyczyn i mechanizmu powstawania osuwisk zarówno w regionie karpackim [8, 9], jak i na zboczach odkrywek węgla brunatnego [2, 3, 5]. Z reguły badania wytrzymałości resztkowej są prowadzone przy niewielkich prędkościach odkształceń próbki, natomiast jak podają m.in. Tika i Hutchison [11], Tika i in. [10], Lemos [6] w przypadkach analiz dotyczących dynamiki przebiegu procesu przemieszczania się mas ziemnych niezbędna jest również znajomość kształtowania się wytrzymałości resztkowej przy dużych prędkościach ścinania. Dodatkowym czynnikiem powodującym zmiany wytrzymałości gruntów w wytworzonej powierzchni poślizgu jest jego zawodnienie, które przykładowo w przypadkach gruntów ilastych powoduje zmniejszenie początkowej wilgotności gruntu nawet o 70% [2].

Dlatego też celem pracy było określenie zmian wytrzymałości gruntów na ścinanie poddanych dużym odkształceniom i zawodnieniu w zależności od zastosowanych prędkości odkształceń. Przedmiotem badań były grunty spoiste pochodzące z regionu Beskidu Małego, Niskiego i Sądeckiego oraz Pogórza Wielickiego.

2. Charakterystyka badanych gruntów

Do badań pobrano grunty z terenów występowania powierzchniowych ruchów masowych w:

- 1) Chalakówce (Pogórze Wielickie). Próbki gruntu pochodziły z głębokości 7,8–8,6 m p.p.t. z jednego z otworów geologicznych wykonanych na obszarze czynnego osuwiska znajdującego się w okolicach Wieliczki. Próbki te zostały udostępnione do badań dzięki uprzejmości pracowników Przedsiębiorstwa Geologicznego S.A. w Krakowie.
- 2) Krynicy (Beskid Sądecki). Osuwisko znajduje się w dolinie Czarnego Potoku u podstawy zbocza znajdującego się w pomiędzy Górą Krzyżową, a Górą Drobiakówka,
- 3) Ropicy Polskiej (Beskid Niski). Osuwisko powstało w drugie połowie lat 90-tych u podnóża Taborówki, stoku charakteryzującego się aktywnością osuwiskową. Próbki gruntu pochodziły z powierzchniowej warstwy zbocza w pobliżu jego podnóża. Należy nadmienić, że kilka lat temu w tej części zbocza prowadzona była eksploatacja materiałów ziemnych.
- 4) Targanicach k. Andrychowa (Beskid Mały). Osuwisko usytuowane jest w pobliżu posesji znajdującej się przy ul. Brzezińskiej i było następstwem wystąpienia gwałtownego opadu deszczu. Grunt pobrano z nienaruszonej części zbocza, znajdującej się w pobliżu niszy osuwiskowej.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe właściwości fizyczne badanych gruntów. Według nomenklatury geotechnicznej uziarnienie gruntów z Chalakówki i Ropicy Polskiej odpowiada pyłom piaszczystym, gruntu z Krynicy pyłom ilastym z domieszką żwiru, natomiast grunt z Targanic określono jako żwir ilasty. Pod względem wartości wskaźnik plastyczności badane grunty można scharakteryzować jako utwory o średniej plastyczności, a jedynie grunt z Targanic wykazał się niską plastycznością. Z kolei konsystencja w przypadku wszystkich gruntów w okresie ich poboru do badań (przy wilgotności naturalnej) określona została jako bardzo zwarta.

TABELA 1

Charakterystyka geotechniczna badanych gruntów

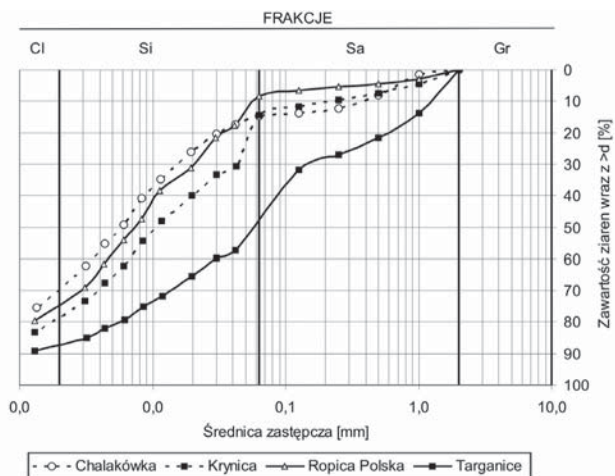
Parametr	Chalakówka	Krynica	Ropica Polska	Targanice
Zawartość frakcji [%]:				
— kamienistej (> 63 mm)	0	0	0	9,3
— żwirowej (63–2 mm)	0	45,9	0	46,9
— piaskowej (2–0,063 mm)	14,7	10,5	7,1	8,6
— pyłowej (0,063–0,002 mm)	55,5	28,8	70,8	27,2
— ilowej (< 0,002 mm)	29,8	14,8	22,1	8,0
Nazwa gruntu wg [14]	clSi	grclSi	clSi	clGr
Wilgotność naturalna [%]	17,2	19,4	19,0	12,1
Gęstość objętościowa [g/cm ³]	2,13	1,99	2,08	2,07
Gęstość objętościowa szkieletu [g/cm ³]	1,82	1,67	1,75	1,85
Gęstość właściwa [g/cm ³]	2,76	2,73	2,77	2,73
Granice konsystencji [%]:				
— plastyczności	22,5	20,7	22,2	19,7
— płynności	42,7	45,2	49,4	30,9
Wskaźnik plastyczności [%]	20,2	24,5	27,2	11,2
Wskaźnik konsystencji [—]	1,26	1,05	1,12	1,68

3. Metoda badań

Badania przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzynki 60×60 mm na materiale pozbawionym ziaren grubszych od 2 mm (rys. 1). Próbkę formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wilgotności naturalnej. Przed ścięciem próbkę poddano obciążeniu konsolidacyjnemu o wartościach 25, 50, 75, 100 i 125 kPa do momentu uzyskania stabilizacji osiadań, a następnie ścinano przy trzech prędkościach 0,1; 1,0 i 10 mm/min. Każda próbka była ścinana 3-krotnie (z cofaniem górnej skrzynki aparatu do pozycji wyjściowej po każdym ścięciu) do uzyskania odkształceń względnych 20%, a pomiędzy kolejnymi ścięciami tej samej próbki stosowano 4-godzinne przerwy. W trakcie badań próbka gruntu była zalana do poziomu płaszczyzny ścięcia. Maksymalną wartość oporu na ścinanie oznaczono podczas pierwszego ścięcia próbek, natomiast minimalną wytrzymałość na ścinanie określono jako ustaloną wielkość oporu w ostatnim ścięciu. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie obliczono metodą najmniejszych kwadratów.

Ilościową ocenę zmian wytrzymałości na ścinanie od wartości maksymalnej (τ_f) do minimalnej (τ_{\min}) dokonano na podstawie obliczeń wskaźnika Bishopa [2] wg poniższego wzoru:

$$I_B = \frac{\tau_f - \tau_{\min}}{\tau_f} \cdot 100[\%] \quad (1)$$



Rys. 1. Topologia bryły odłamu wraz z wyjściowymi współzrędnymi węzłów siatki bryły odłamu

4. Wyniki badań

W tabeli 2 zestawiono wyniki parametrów charakteryzujących maksymalną i minimalną wytrzymałość na ścinanie badanych gruntów. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności określone przy maksymalnej wartości oporu na ścinanie były duże, kształtowały się w przedziałach odpowiednio 19–41° oraz 20–82 kPa i wynikały one ze niewielkiej początkowej wilgotności badanych gruntów. Skutkiem kilkukrotnego ścinania próbek było wyraźne

TABELA 2

Maksymalne i minimalne parametry wytrzymałościowe badanych gruntów

Pochodzenie gruntu	Prędkość ścianania	Wytrzymałość maksymalna		Wytrzymałość minimalna	
		Kąt tarcia wewnętrznego	Spójność	Kąt tarcia wewnętrznego	Spójność
	v_s [mm/min]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ_{\min} [°]	c_{\min} [kPa]
Chalakówka	0,1	29,4	26,8	11,2	6,8
	1,0	32,1	36,9	8,6	4,7
Krynica	0,1	38,9	19,8	27,0	8,0
	1,0	34,0	43,5	20,4	12,6
	10,0	19,3	82,6	15,0	14,3
Ropica Polska	0,1	32,4	35,5	21,8	8,4
	1,0	32,0	53,4	13,1	12,3
	10,0	24,4	67,3	11,8	7,7
Targanice	0,1	41,4	22,8	31,3	6,8
	1,0	37,7	33,9	29,4	6,1
	10,0	39,1	53,1	22,7	16,6

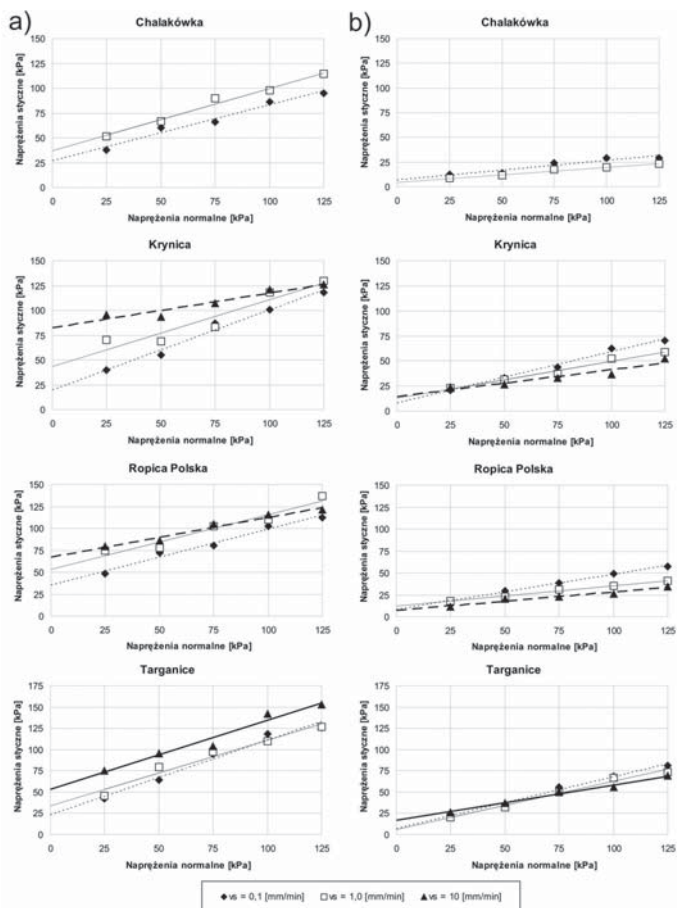
zmniejszenie wartości maksymalnej wytrzymałości gruntów na ścinanie, a w konsekwencji ustalenie się minimalnych wartości oporu na ścinanie. Wyznacznikiem ilościowym zmian wytrzymałości gruntów na ścinanie były wartości wskaźników Bishopa (tabela 3), które mieściły się w zakresie 42–81%, przy czym największe wartości tego wskaźnika wykazały grunty pochodzące z Chalakówki i Ropicy Polskiej, a najmniejsze grunt z Targanicy. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpowiadające minimalnej wytrzymałości na ścinanie wyniosły odpowiednio 8,6–31,3° oraz 4,7–16,6 kPa.

TABELA 3
Zestawienie wartości wskaźników Bishopa

Pochodzenie gruntu	Prędkość ścianania v_s [mm/min]	Wskaźniki Bishopa dla naprężeń normalnych [kPa]					Średnio
		25	50	75	100	125	
Chalakówka	0,1	67,7	77,0	64,0	66,2	69,2	68,8
	1,0	83,7	82,6	80,7	79,6	79,7	81,3
Krynica	0,1	47,5	39,8	49,5	37,6	40,7	43,0
	1,0	67,7	54,2	55,6	55,6	54,8	57,6
	10,0	75,6	71,3	69,0	69,6	58,7	68,8
Ropica Polska	0,1	64,1	59,0	51,9	52,3	48,7	55,2
	1,0	76,0	70,2	69,2	68,1	70,0	70,7
	10,0	85,4	75,8	78,0	76,9	71,4	77,5
Targanice	0,1	46,6	47,2	41,1	41,7	35,5	42,4
	1,0	55,4	60,1	48,8	38,8	42,4	49,1
	10,0	65,0	60,6	51,3	60,8	54,7	58,5

Wpływ prędkości ścinania na kształtowanie się maksymalnych i minimalnych wartości oporu na ścinanie badanych gruntów zobrazowano na rysunku 2. Analizując maksymalnego wartości oporu na ścinanie można stwierdzić, że niższe jego wartości odnotowano przy prędkości ścinania 0,1 mm·min⁻¹. W przypadku gruntu z Targanicy było one średnio o 6–36%, a w przypadku pozostałych gruntów o ponad 20% mniejsze niż odpowiednie wartości maksymalnego oporu na ścinanie otrzymane przy prędkości 10 mm·min⁻¹. Zmiana wartości wytrzymałości na ścinanie w analizowanym zakresie prędkości odkształceń związana była przede wszystkim ze zmianą wartości spójności (o 10–63 kPa), a w mniejszym stopniu ze zmianą wartości kąta tarcia wewnętrznego, która jedynie w przypadku gruntu z Krynicy była większa od 10°. Należy zwrócić uwagę, że przy prędkości odkształceń 10 mm·min⁻¹ uzyskane wartości spójności wynosiły w wielu przypadkach powyżej 60 kPa, co odpowiada wartościom podawanym w literaturze dla bardzo zwartych gruntów ilastych [12, 13]. Największe wartości spójności uzyskano dla gruntu z Krynicy, który charakteryzował się stosunkowo niewielką zawartością frakcji ilastej, a najmniejsze dla gruntu z Chalakówki, cechującego się największą zawartością tej frakcji. Opisana powyżej zależność jest sprzeczna z podawanymi w literaturze zależnościami dla gruntów naturalnych [12]. Dlatego też uzyskane wartości spójności w przypadku gruntów

z Krynicy i Targanic należałoby interpretować je jako parametry pozorne, wynikające efektu klinowania się ziaren frakcji piaskowej w trakcie ścinania.

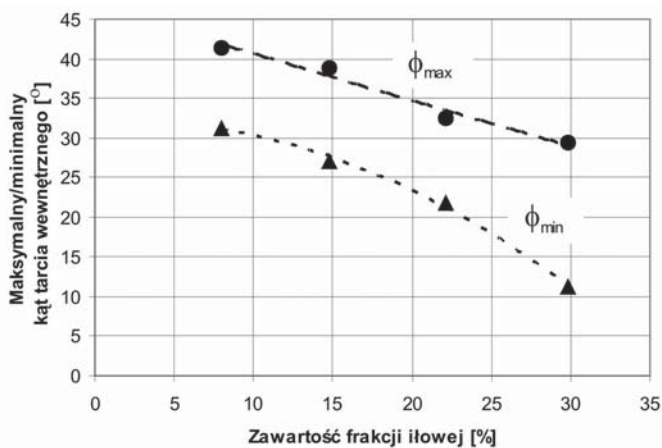


Rys. 2. Wpływ prędkości odkształceń próbek gruntów na ich maksymalną (a) i minimalną (b) wytrzymałość na ścinanie

Nieco inaczej kształtowała się zależność pomiędzy wartościami wytrzymałości minimalnej od prędkości ścinania. Ogólnie niższe wartości minimalnego oporu na ścinanie uzyskano przy prędkości 10 mm·min⁻¹. Zależność ta była zauważalna w zakresie wartości naprężeń normalnych (rzędu 125 kPa) w przypadku gruntów z Chalakówki, Krynicy i Ropicy Polskiej, gdzie wartości oporu uzyskane przy prędkościach ścinania 0,1 i 10 mm·min⁻¹ różniły się średnio o 9–25%. Natomiast w przypadku gruntu z Targanic wartości oporu na ścinanie uzyskane w zakresie niskich naprężeń normalnych (rzędu 25 kPa) przy prędkości 0,1 mm·min⁻¹ były większe od odpowiednich wartości tego parametru otrzymanych przy prędkości 10 mm·min⁻¹, a odwrotną zależność uzyskano w zakresie dużych wartości naprężeń normalnych. Różnice pomiędzy wartościami

minimalnej wytrzymałości na ścinanie uzyskanych przy różnych prędkościach ścinania miały większy wpływ na wartości kąta tarcia wewnętrznego, a w nieco mniejszy na spójność.

Uzyskane wartości maksymalnych jak i minimalnych parametrów wytrzymałości na ścinanie, a także wielkość zmian wytrzymałości wywołanej naruszeniem struktury i zawodnieniem badanych gruntów, związane są w dużym stopniu z ich uziarnieniem, a przede wszystkim zawartością płaskich cząstek frakcji ilastej, które poddane dużym odkształceniom mają tendencję do układania się w kierunku równoległym do płaszczyzny ścięcia [m.in. 1, 10]. W przypadku badanych gruntów najmniejszą zawartością frakcji ilowej charakteryzował się grunt z Targanic, a jego parametry wytrzymałościowe uzyskane przy zawodnieniu były wśród badanych gruntów największe i zarazem w najmniejszym stopniu zależne od prędkości odkształceń. Z kolei skrajnie inne zależności wśród badanych gruntów uzyskano dla materiału z Chalakówki, który zawierał najwięcej frakcji ilastej. Opisaną zależność zilustrowano na rysunku 3, gdzie jako reprezentatywne parametry wytrzymałościowe przedstawiono wyniki uzyskane przy prędkości odkształceń $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Rys. 3. Zależność maksymalnego i minimalnego kąta tarcia wewnętrznego badanych gruntów od zawartości frakcji ilowej

Analizując wartości spójności uzyskane po trzykrotnym ścieniu próbek można zwrócić uwagę, że mimo zniszczenia struktury gruntu, otrzymano niewielkie jej wartości, które są również spotykane w przypadku badań parametrów reszkowych [1, 2, 4]. Według Boreckiej i in. [1] spójność ta jest charakterystyczna dla gruntów ilastych i określana jest mianem spójności wodno-koloidalnej, wynikającej z częściowego uplastycznienia gruntów w trakcie ścinania. Z kolei Stark i Eid [7] twierdzą, że reszkowa spójność uzyskiwana w zakresie dużych odkształceń wynika przede wszystkim z zastosowania liniowego opisu charakterystyki wytrzymałościowej gruntów.

5. Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań potwierdzają ogólnie znane zależności, że na skutek dużych odkształceń gruntów i ich zawodnienia w płaszczyźnie poślizgu następuje zmniejszenie wy-

trzymałości na ścinanie i wartości parametrów ją charakteryzujących. Z praktycznego punktu widzenia istotne są jednak przedstawione w pracy zakresy zmian analizowanych parametrów, które w przypadku badanych gruntów były również współzależne z ich właściwościami geotechnicznymi. Wykazano, że zawodnienie wytworzonej w gruncie powierzchni poślizgu prowadzi do zmniejszenia ich początkowej wytrzymałości na ścinanie w skrajnych przypadkach nawet o 80%. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na kształtowanie się wielkości oporu na ścinanie gruntów jest prędkość ścinania, gdzie większe wartości maksymalnego oporu na ścinaniu badanych gruntów otrzymano przy wysokich ich wartościach. Szczególnie ważne są rezultaty uzyskane po trzykrotnym ścinaniu, gdzie najmniejsze wartości wytrzymałości na ścinanie odnotowano przy dużych prędkościach ścinania. Otrzymana zależność może stanowić wyjaśnienie obserwowanych w naturze zmian dynamiki (wzrost prędkości) osuwających się mas ziemnych w trakcie powstawania osuwisk.

LITERATURA

- [1] *Atkinson J.*: An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations. Through Critical State Soil Mechanics. McGraw–Hill Book Company, London, 1993
- [2] *Borecka A., Herzig J., Kaczmarczyk R., Woźniak H.*: Właściwości fizykomechaniczne wybranych gruntów spoistych ze zboczy wyrobiska KWB „Bełchatów”. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo, 28/1, 2006, s. 39–50
- [3] *Borecka A., Kaczmarczyk R.*: Czynniki wpływające na parametry wytrzymałości na ścinanie w strefach zagrożeń osuwiskowych na przykładzie odkrywek węgla brunatnego. Kwartalnik AGH Geologia, 34/4, 2008, s. 709–719
- [4] *Garbulewski K., Laskowska J., Wolski W.*: Wytrzymałość rezydualna ilów z naturalnymi powierzchniami osłabienia. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w budownictwie i transporcie, II, 1997, s. 65–70
- [5] *Kaczmarczyk R., Woźniak H., Borecka A.*: Wytrzymałość na ścinanie stref kontaktów warstw w górotworze złóż węgla brunatnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo, 28, I, 2006, s. 147–154
- [6] *Lemos L.J.L.*: Shear Behaviour of Pre-existing Shear Zones Under Fast Loading — Insights on the Landslide Motion. International Conference on: Fast Slope Movements—Prediction and Prevention for Risk Mitigation, IC–FSM 2003, Naples, 11–13 May, 2003
- [7] *Stark T., Eid H.*: Drained Residual Strength of Cohesive Soils. Journal of Geotechnical Engineering, 120, 5, 1990, pp. 856–871
- [8] *Thiel K.* (red). Kształtowanie fliszowych stoków karpaccich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk, 1989
- [9] *Thiel K.* (red.). Właściwości fizyko–mechaniczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliszowych. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk, 1995
- [10] *Tika T.E., Vaughan P.R., Lemos L.J.L.*: Fast Shearing of Pre-existing Shear Zones in Soil. Geotechnique, 46/2, 1996, pp. 197–233
- [11] *Tika T.E., Hutchinson J.N.*: Ring Shear Tests on Soil from the Vaiont Landslide Slip Surface. Geotechnique, 49/1, 1999, pp. 59–74
- [12] *Wilun Z.*: Zarys geotechniki. WKiŁ, 2003
- [13] *Wysokiński L.*: Ocena stateczności skarp i zboczy. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, 424. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 1999
- [14] PN-EN ISO 14688-2 . Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. PKN, Warszawa, 2006