

OCENA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH GRUNTÓW Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY WSTECZNEJ NA PRZYKŁADZIE JEDNEGO Z OSUWISK NA ZBOCZU WIATRÓWKI (BESKID NISKI)

Tymoteusz Zydrón

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie: Celem pracy było określenie parametrów wytrzymałościowych gruntów jednego ze zboczy osuwiskowych w okolicach Szymbarku k. Gorlic określonych za pomocą analizy wstecznej. Do analiz wykorzystano wyniki pomiarów jednego z osuwisk na zboczu Wiatrówki, które powstało w obrębie terasy rolniczej w wyniku katastrofalnego opadu deszczu. Drugim celem pracy było określenie przyczyn lokalizacji osuwiska w tym konkretnym miejscu terasy rolniczej. Obliczenia stateczności wykonano metodą Spencera, a określenie granicznych wartości parametrów wytrzymałościowych przeprowadzono według metodyki zaproponowanej przez Duncana i Wrighta [2005], która umożliwia określenie dla danej płaszczyzny poślizgu jednej pary wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Z kolei dla określenia stanu naprężeń w momencie powstania osuwiska wykonano obliczenia infiltracji. Badania filtracji wykazały, że wodoprzepuszczalność gruntu w obrębie analizowanego osuwiska była mniejsza niż w innej części rozpatrywanej terasy rolniczej. Natomiast obliczenia infiltracji wykazały, że opad był wystarczająco intensywny, aby nasycić profil gruntowy w miejscu powstania osuwiska. Przeprowadzona w dalszej części pracy analiza wsteczna wykazała, że grunt w miejscu powstania osuwiska charakteryzuje się stosunkowo niską spójnością efektywną (0,6 kPa) oraz wysokim efektywnym kątem tarcia wewnętrznego (40,1°).

Słowa kluczowe: płytkie osuwiska, infiltracja, analiza wsteczna, Beskid Niski

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych problemów geologiczno-inżynierskich w południowej Polsce są ruchy masowe. Na obszarze polskich Karpat Zewnętrznych, obejmujących zaledwie 5% powierzchni naszego kraju, występuje ok. 95% wszystkich osuwisk. Szacuje się, że

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

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

w skrajnych sytuacjach zajmują one nawet do 70% powierzchni stoków [Rączkowski 2007]. Podstawowymi czynnikami przyczyniającym się do nasilenia występowania ruchów masowych na tym obszarze są przede wszystkim skomplikowana budowa geologiczna regionu, związana z powstaniem warstw fliszu karpackiego, oraz rzeźba terenu, charakterystyczna dla terenów górzystych. Innymi czynnikami przyczyniającymi się do powstawania osuwisk są także czynniki klimatyczne oraz działalność człowieka. Dlatego też często na obszarze tym pojawia się konieczność wykonywania zabezpieczeń osuwisk celem ochrony bądź przywrócenia użyteczności infrastruktury technicznej. Dla potrzeb tego typu prac, ale również w celach wykonywania analiz uwarunkowań ruchów masowych, potrzebne są badania geologiczno-inżynierskie i geotechniczne, wśród których zasadnicze znaczenie mają przede wszystkim badania właściwości wytrzymałościowych gruntów i skał. Jak zauważają Zabuski i in. [2009], Baran i in. [2013], parametry określone z badań wytrzymałościowych nie zawsze w sposób satysfakcjonujący opisują masyw osuwiskowy, co może powodować rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń stateczności, czy też deformacji terenu, a wynikami obserwacji terenowych (procesem osuwiskowym), bądź też badań modelowych. W związku tym jedną z powszechnie stosowanych technik określania parametrów wytrzymałościowych gruntów jest analiza wsteczna. Dlatego w niniejszej pracy podjęto próbę określenia wiarygodnych parametrów wytrzymałościowych gruntu w oparciu o analizę wsteczną, wykonaną dla jednego z osuwisk w okolicach Szymbarku k. Gorlic (Beskid Niski).

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Analizę stateczności przeprowadzono dla jednego z wielu osuwisk powstałych w okresie 3–4 czerwca 2010 r. w obszarze zlewni potoku Bystrzanka w miejscowości Szymbark k. Gorlic. W większości przypadków ruchy masowe zarejestrowane na tym terenie stanowią osuwiska strukturalne, które były przedmiotem wielu prac naukowych [m.in. Chrzanowska 1980, Thiel (red.) 1989, Zabuski i in. 2009, Mrozek 2013]. Analizowane osuwisko (ryc. 1) powstało w na północno-wschodniej części zbocza Wiatrówki. Pod względem geologicznym obszar ten znajduje się w strefie brzeżnej nasunięcia płaszczowiny magurskiej na jednostkę śląską. Podstawową jednostką litostratygraficzną w tym miejscu stanowią warstwy inoceramowe, które są reprezentowane przez formacje naprzemianległych i cienko- i średnio-ławicowych piaskowców i łupków [Żytko (red.) 1973, Zabuski i in. 2009] o podobnym udziale. Piaskowce są twarde i charakteryzują się barwą szaroniebieską, sporadycznie zieloną, zawierają również liczne „strzałki” kalcytowe. Z kolei łupki posiadają barwę ciemnoszarą, czarną, niekiedy zielono-szarą, a w ich obrębie pojawiają się również wkładki margli. Warstwy inoceramowe przykryte są utworami czwartorzędowymi, które stanowią koluwia zbudowane z gruntów gliniastych ze zróżnicowaną zawartością okruchów skalnych frakcji kamienistej i żwirowej. Należy zaznaczyć, że analizowane osuwisko powstało na progu terenowym, który stanowił granicę użytkowania terenu. W miejscu tym nachylenie było większe w porównaniu z terenem położonym powyżej oraz poniżej osuwiska i było ono związane z rolniczym charakterem użytkowania terenu – utworzeniem terasy dla celów optymalizacji prac rolnych. Od kilku lat teren ten jest jednak użytkowany głównie do wypasu zwierząt. U podstawy terasy zlokalizowana jest jedna z dróg dojazdowych do budynku mieszkalnego i na niej został zdeponowany materiał osuwiska. Interesujący był

fakt, że osuwisko powstało w miejscu, gdzie nachylenie terasy rolnej nie było największe, a ruch mas ziemnych był ukośny względem linii największego spadku terenu. Kształt osuwiska odpowiada typowemu zsuwowi rotacyjnemu. Należy nadmienić, że bezpośrednio nad domem mieszkalnym, oprócz analizowanego osuwiska, znajduje się również stare, okresowo aktywne osuwisko, które zostało zalesione. Powyżej budynku, kilkanaście metrów w bok od osuwiska, znajduje się płytka studnia gospodarcza. Z informacji uzyskanej od mieszkańców domu znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie osuwiska wynika, że poziom wody gruntowej jest zwykle bliski powierzchni terenu.

a)



b)



Ryc. 1. Widok ogólny (a) i zbliżenie badanego osuwiska (b)
Fig. 1. Overall view (a) and close-up of analyzed landslide (b)

Na podstawie informacji ustnych mieszkańców domu zlokalizowanego przy osuwisku ustalono, że analizowane osuwisko powstało w dniu 4 czerwca 2010 r. w godzinach porannych. Głównym czynnikiem inicjującym obsunięcie się fragmentu zbocza był opad, którego wysokość zarejestrowana w Stacji Naukowej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania w Szymbarku wyniosła 107 mm. Długość trwania tego opadu wyniosła ok. 11,5 godziny, przy czym największą intensywnością charakteryzował się on w końcowej fazie trwania. Jego szczegółowa charakterystyka przedstawiona została m.in. w pracy Zydrónia i Demczuka [2013].

ZAKRES I METODYKA PRACY

W ramach prac badawczych dokonano wizji terenowej analizowanego osuwiska, przeprowadzono pomiary geodezyjne, wykonane zostało oznaczenie gęstości objętościowej i wilgotności oraz współczynnika wodoprzepuszczalności gruntów w sąsiedztwie górnej skarpy zsuwu, a także w miejscu znajdującym się kilkanaście metrów obok osuwiska, zlokalizowanym również w bezpośrednim sąsiedztwie terasy rolnej. Właściwości geotechniczne gruntów w tych miejscach przedstawione są w pracy Lech [2012], a w niniejszym tekście porównywane zostały pod kątem określenia przyczyn lokalizacji osuwiska w tej konkretnej części zbocza. Z obszaru skarpy głównej pobrano próbki gruntów o nienaruszonej strukturze do badań wytrzymałości na ścinanie. Na podstawie pomiarów geodezyjnych opracowano dwuwymiarowy model zbocza, który wykorzystano w dalszej części pracy do obliczeń stateczności.

Przed rozpoczęciem obliczeń stateczności wykonano obliczenia infiltracji celem określenia wpływu opadu na warunki przepływu wody w profilu gruntowym (stan nasycenia gruntu). W tym celu zastosowano uproszczony model infiltracji Greena i Ampta [1911], opracowany do obliczeń infiltracji nieustalanej [Chow i in. 1988]. Celem tych obliczeń było sprawdzenie, czy opad był w stanie nasycić pory gruntowe i spowodować wzrost ciśnienia porowego w gruncie. Wykonując obliczenia określano chłonność gruntu, która opisuje teoretyczną prędkość infiltracji wody opadowej:

$$f = k_s \cdot i = k_s \frac{z_f + \Psi_f + H_p}{z_f} \quad (1)$$

gdzie:

- k_s – przewodność hydrauliczna gruntu przy jego pełnym nasyceniu, $m \cdot s^{-1}$,
- i – spadek hydrauliczny, —,
- H_p – wysokość zatopienia powierzchni gruntu, m, pomijalny w obliczeniach,
- z_f – głębokość położenia frontu zwilżania, m,
- Ψ_f – wysokość ciśnienia ssania gruntu na froncie zwilżania, m.

W modelu tym przewodność hydrauliczna gruntu może być przyjmowana jako tożsama współczynnikowi filtracji [Chow i in. 1988], bądź może odpowiadać połowie wartości tego parametru [Morel-Seytoux i Khanji 1974]. Dla potrzeb niniejszej analizy przyjęto to drugie rozwiązanie.

Metodyka obliczeń infiltracji w warunkach opadu nieustalonego polega na jego podziale na mniejsze jednostki (interwały czasowe), które są jednorodne pod względem intensywności opadu. W każdym interwale czasu określa się początkową i końcową wartość chłonności gruntu, a następnie porównuje się ją z intensywnością opadu, co umożliwia określenie ilości wody infiltrującej w grunt oraz ilości wody transformowanej w spływ powierzchniowy. Zaletą tej metody jest możliwość zastosowania jej praktycznie w każdych warunkach gruntowych, a przede wszystkim nie wymaga ona szczegółowej znajomości charakterystyki retencyjnej gruntów.

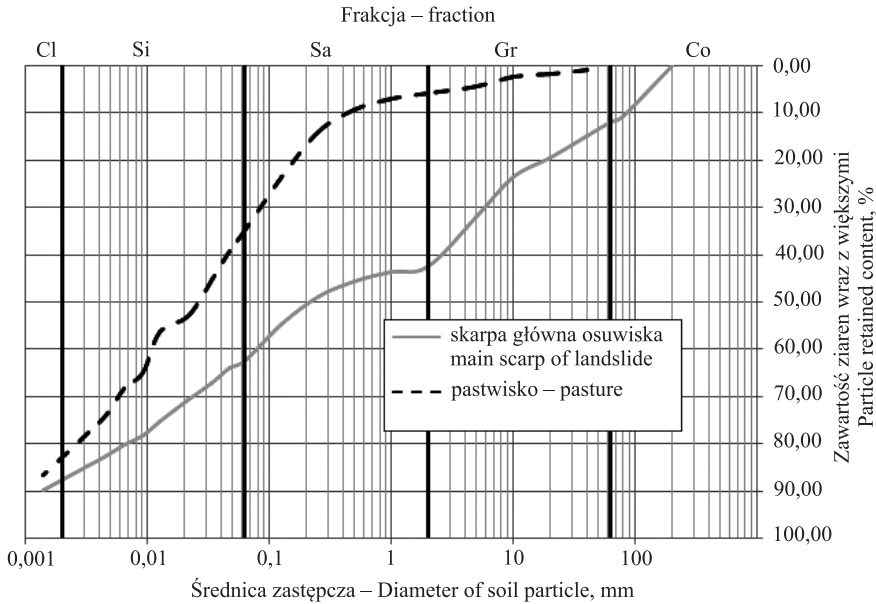
Następnie dla założonej geometrii osuwiska wyznaczono płaszczyznę poślizgu. Dalsze obliczenia polegały na określeniu granicznych wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie w zakresie wartości naprężeń zarówno efektywnych, jak i całkowitych. W kolejnej części prac zastosowano metodę opisaną przez Duncana i Wrigtha [2005], służącą do określania pary granicznych wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie. W metodzie tej poszukuje się takiej pary wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie, aby położenie płaszczyzny poślizgu wyznaczonej z obliczeń dla przyjętej pary parametrów wytrzymałościowych, było jak najbardziej zbliżone do jej rzeczywistego położenia i jednocześnie prowadziło do uzyskiwania granicznej wartości współczynnika bezpieczeństwa ($FS = 1,0$). Analizę tę wykonano z wykorzystaniem programu Geostudio, stosując metodę Spencera [1967].

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki pomiarów geodezyjnych wykazały, że nachylenie zbocza powyżej osuwiska nie przekracza 20° , a tylko nieco większe jest w górnej części strefy oderwania. Długość osuwiska wyniosła ok. 22 m, a różnica wysokości pomiędzy skarpią główną a podnóżem osuwiska wynosiła 9,3 m. Wysokość kolumium u podstawy osuwiska została oszacowana na ok. 1,0–1,2 m. Wysokość skarpy głównej była niewielka i wyniosła ok. 0,2–0,4 m, co może świadczyć, że głębokość płaszczyzny poślizgu jest również niewielka.

Wyniki badań laboratoryjnych próbek gruntu wykazały, że w sąsiedztwie skarpy głównej osuwiska występują grunty gliniaste z dużą zawartością okruchów skalnych, zarówno łupków ilastych, jak i piaskowców. Z kolei w przypadku terenu położonego tuż nad terasą rolną, ale w oddaleniu od osuwiska, zawartość okruchów skalnych była dużo mniejsza, co prawdopodobnie związane było z użytkowaniem tej części zbocza w przeszłości jako gruntu ornego. Na ryc. 2 przedstawiono krzywe granulometryczne badanych gruntów z obu stref terasy. W tab. 1 przedstawiono wyniki oznaczeń podstawowych właściwości fizycznych obu gruntów. Należy wspomnieć, że w obrębie strefy skarpy głównej stwierdzono obecność zarówno okruchów piaskowca, jak i łupka, a przedstawione w tab. 2 parametry geotechniczne uzyskano z dużej próby stanowiącej mieszaninę obu typów skał.

Badania wodoprzepuszczalności zostały wykonane na podstawie pomiarów prędkości infiltracji wody w grunt i wykazały one zróżnicowaną wodoprzepuszczalność gruntów położonych w analizowanych częściach terasy. W przypadku badań przeprowadzonych w pobliżu skarpy głównej osuwiska uzyskano w końcowej fazie pomiarów prędkość infiltracji wynoszącą $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, podczas gdy w przypadku innej części tego zbocza była



Ryc. 2. Krzywe granulometryczne gruntów z sąsiedztwa analizowanego osuwiska [na podstawie Lech 2012]

Fig. 2. Grain-size distribution of soils from neighborhood of analyzed landslide [source: Lech 2012]

znacząco większa ($3 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Wyniki te wykorzystano w dalszej części do określenia chłonności gruntu, występującej w trakcie trwania opadu w obu strefach analizowanego fragmentu zbocza (ryc. 3). Przeprowadzone obliczenia infiltracji wykazały, że w przypadku terenu położonego w bezpośrednim sąsiedztwie osuwiska (ryc. 3a), występowały okresowo warunki odpowiadające infiltracji zatopionej (intensywność opadu większa od chłonności gruntu), wskazując tym samym na możliwość nasycenia profilu gruntowego. Obliczona wartość spływu powierzchniowego dla tego fragmentu zbocza wyniosła 40 mm. Z kolei w przypadku fragmentu terasy oddalonej od osuwiska, użytkowanej jako pastwisko, w każdym momencie trwania opadu jego intensywność była mniejsza niż chłonność gruntu (ryc. 3b), co oznacza, że warunki infiltracji odpowiadały przepływowi wody przy niepełnym nasyceniu gruntu. Wyniki te wskazują zatem, że istotnym czynnikiem wpływającym na powstanie osuwiska na analizowanym fragmencie zbocza (terasy) była niska wodoprzepuszczalność gruntów, co przy dużej intensywności opadu umożliwiło nasycenie powierzchniowej strefy profilu gruntowego. Z kolei druga część terasy, na skutek prowadzonych w latach wcześniejszych prac rolnych, została dobrze zdrenowana, co wpłynęło na zwiększenie wodoprzepuszczalności gruntu, a tym samym mocno ograniczyło możliwości jego nasycenia.

W dalszej części pracy przeprowadzone zostały obliczenia stateczności metodą analizy wstecznej w zakresie naprężeń efektywnych i całkowitych. W pierwszym przypadku założono, że położenie zwierciadła wody gruntowej odpowiada powierzchni terenu. Wyniki obliczeń (ryc. 4) wykazały, że wartości parametrów efektywnych są większe niż wartości parametrów całkowitych, a różnica pomiędzy tymi parametrami jest szczegól-

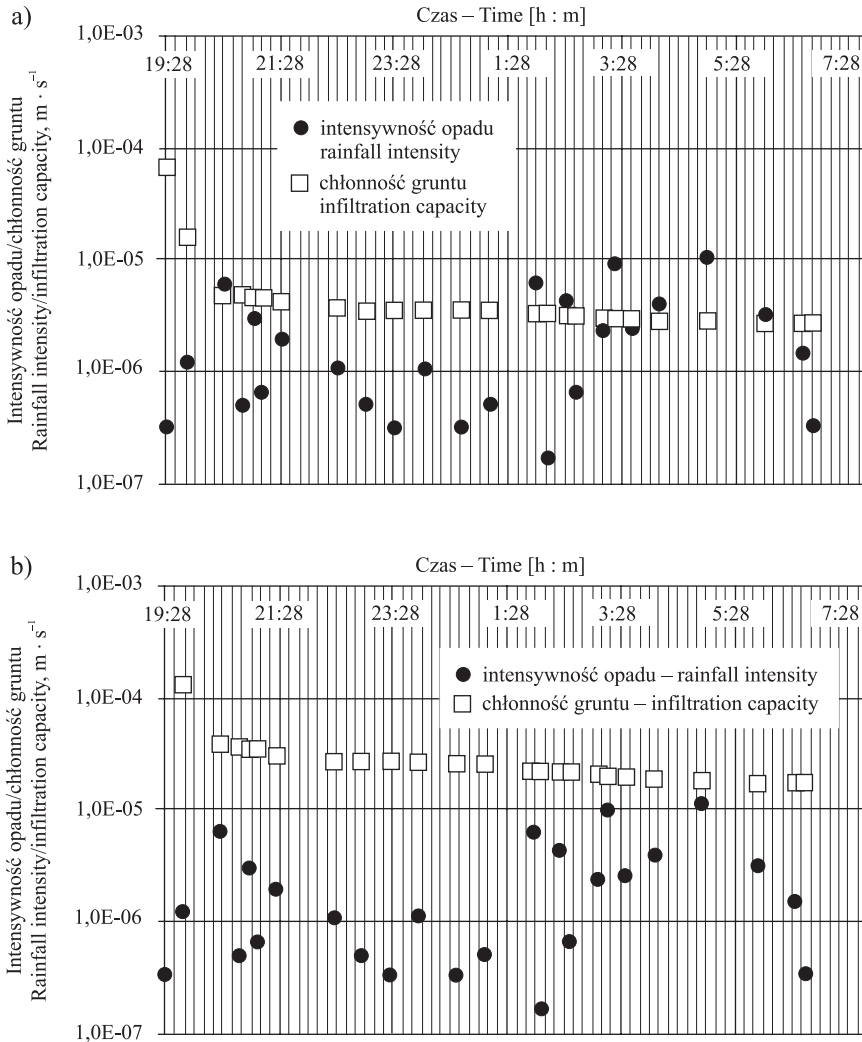
Tabela 1. Właściwości fizyczne gruntów z sąsiedztwa osuwiska [na podstawie Lech 2012]
 Table 1. Geotechnical parameters of soils from neighbourhood of the analyzed landslide [source Lech 2012]

Parametr – Parameter	Grunt z łąki przy osuwisku – Soil from pasture lokated AT neighbour of landslide	Grunt ze skarpy głównej osuwiska Soil from main scarp of landslide
Zawartość frakcji – Fraction content		
– kamienista – cobble, (> 63 mm)	0	12,0
– żwirowa – gravel (2–63 mm)	5,6	30,5
– piaskowa – sand (0,063–0,2 mm)	29,1	19,9
– pyłowa – silt (0,002–0,063 mm)	49,2	25,8
– ilowa – clay (< 0,002 mm)	16,1	11,8
Nazwa gruntu wg PN – EN ISO 14688-2:2002 Type of soil acc. to PN – EN ISO 14688-2:2002	sasiCl	clGr
Wilgotność naturalna – Natural moisture content, w_n , %	23,70	20,40
Gęstość objętościowa – Bulk density, ρ , $g \cdot cm^{-3}$	1,88	1,97
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Dry density ρ_d , $g \cdot cm^{-3}$	1,520	1,635
Granica plastyczności – Plasticity index, * w_p , %	21,9	18,3**
Granica płynności – Liquid limit, * w_L , %	33,7	36,9**
Wskaźnik plastyczności – Plasticity index, I_p	11,8	18,6**
Straty prażenia – Loss ignition, I_{om} , %	1,60	1,70
Straty utleniania – Organic matter content, %	2,34	2,10

Objaśnienie: * – frakcja < 2 mm, ** – próba uśredniona

Explanation: * – tested for fraction smaller than 2 mm, ** – average sample

nie wyraźna przy niskich wartościach spójności. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami badań wytrzymałości na ścinanie próbek pobranych z terenu i ścinanych w aparacie bezpośredniego ścinania. Dla nasyconych próbek łupka uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności odpowiednio 13,9° i 11,9 kPa, co wykracza znacznie poza zakres wartości granicznych tych parametrów, określonych z analizy wstecznej. Z kolei z badań łupka piaszczystego uzyskano kąt tarcia wewnętrznego 38,5°, a spójność wyniosła 17,6 kPa. Przyjęto, że otrzymana w tym przypadku wysoka wartość spójności jest efektem klinowania się ziaren i niepełnego nasycenia próbki w trakcie ścinania. Natomiast wartość kąta tarcia wewnętrznego jest podobna do wartości tego parametru podawanego w literaturze dla kompleksów łupkowo-piaszczystych [Thiel (red.)

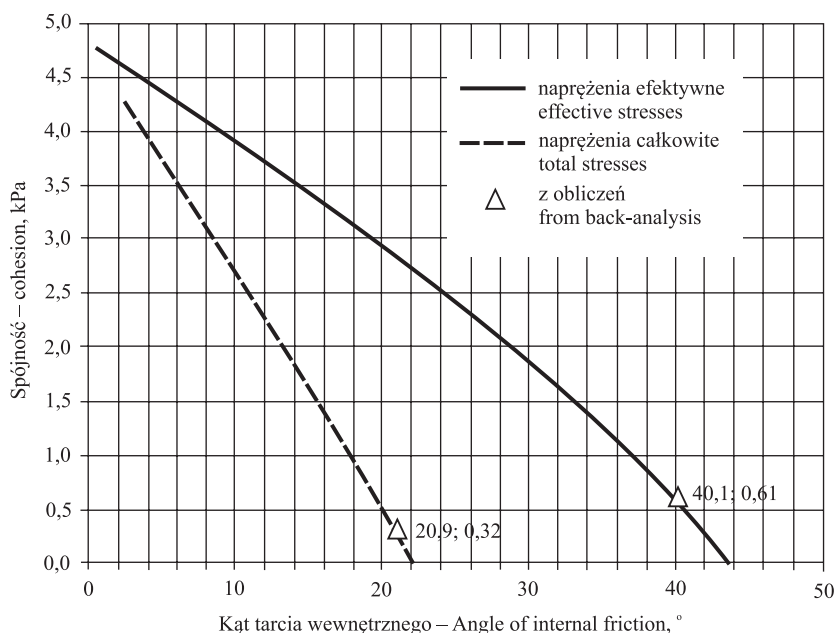


Ryc. 3. Wyniki obliczeń infiltracji dla gruntu ze skarpy głównej osuwiska (a) i położonych w sąsiedztwie osuwiska na pastwisku (b)

Fig. 3. Results of infiltration calculation for soils: from main scarp of landslide (a) and located in the neighborhood of landslide at pasture (b)

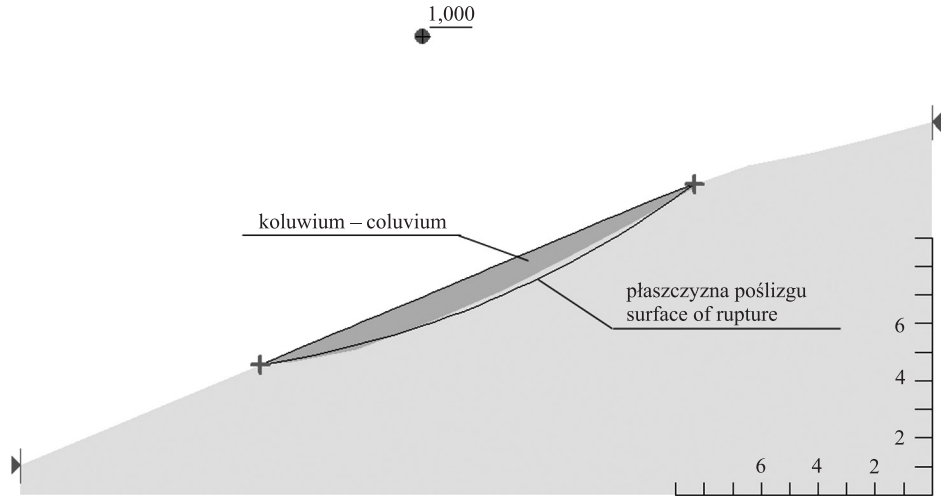
1995]. Stąd też w dalszej części analizy parametr ten został przyjęty jako wyjściowy dla poszukiwań pary granicznych parametrów wytrzymałościowych. Wykonując obliczenia, przyjęto, że parametry wytrzymałościowe powinny prowadzić do uzyskania minimalnego współczynnika bezpieczeństwa równego 1,0, a jednocześnie uzyskana z obliczeń płaszczyna poślizgu powinna jak najbardziej odpowiadać jej rzeczywistemu położeniu. W przypadku analizy przeprowadzonej dla naprężeń efektywnych uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpowiednio $40,1^\circ$ oraz 0,6 kPa, a najbardziej

niekorzystna płaszczyzna poślizgu (ryc. 5), wyznaczona przez program obliczeniowy stosunkowo dobrze pokrywa się ze strefą oderwania. W przypadku analizy, w zakresie naprężeń całkowitych, nie uwzględniano wpływu wody na stan naprężeń i w związku z tym uzyskane z obliczeń parametry wytrzymałościowe (kąt tarcia wewnętrznego $20,9^\circ$ i spójność $0,3$ kPa) były mniejsze niż uzyskane z analizy uwzględniającej naprężenia efektywne. Należy zwrócić uwagę, że uzyskane z obu rodzajów analiz wartości spójności są bardzo niskie, co jest typowe dla utworów ziarnistych takich jak piaski, żwiry czy też utwory spoiste charakteryzujące się wytrzymałością resztkową. W przypadku analizowanego gruntu niska spójność wynika prawdopodobnie ze stosunkowo dużej zawartości okruchów frakcji kamienistej i żwirowej (łącznie ok. 40%), przy stosunkowo niedużej zawartości frakcji ilastej. Zbliżone wartości efektywnych parametrów wytrzymałości na ścinanie ($\phi' = 37,4\text{--}38,6^\circ$ oraz $c' = 0\text{--}3,9$ kPa) dla gruntów o podobnym uziarnieniu uzyskał autor dla gruntów z okolic Beskidu Małego [Zydroń 2010]. Podobne niskie wartości spójności z analizy wstecznej dla gruntów z okolic Szymbarku przedstawione są także w pracy Thiela [1989], przy czym w analizie tej autorzy uwzględniali wytrzymałość resztkową gruntu. Osuwiska w gruntach o niskiej spójności zwykle charakteryzują się zwykle płytko położoną płaszczyzną poślizgu. Przeprowadzone obliczenia, przy założonych wartościach spójności rzędu 2 kPa, lokalizowały powierzchnię poślizgu znacznie głębiej, niż wykazywały pomiary terenowe.



Ryc. 4. Krzywe graniczne parametrów wytrzymałościowych w zakresie naprężeń całkowitych i efektywnych

Fig. 4. Limit curves of shear strength parameters for total and effective stresses



Ryc. 5. Wizualizacja wyników obliczeń stateczności w zakresie naprężeń całkowitych
 Fig. 5. Visualization of slope stability calculation results in terms of effective stresses

PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń można stwierdzić, że analizowane osuwisko powstało jako efekt katastrofalnego opadu deszczu. W pracy wykazano, że istotny wpływ na powstanie osuwiska miała wodoprzepuszczalność ośrodka gruntowego. Analizowane osuwisko powstało na fragmencie terasy rolnej przecinającej poprzecznie stok. Stwierdzono, że mimo podobnego nachylenia terenu, zarówno w miejscu powstania osuwiska, jak i na pozostałej części terasy, osuwisko powstało w miejscu, gdzie grunt miał mniejszą wodoprzepuszczalność, co w powiązaniu z wysoką intensywnością opadu przyczyniło się do nasycenia powierzchniowej części profilu gruntowego.

Na podstawie analizy wstecznej określono graniczne wartości efektywnych i całkowitych parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie ośrodka gruntowego. Przeprowadzone w dalszej części pracy obliczenia wykazały, że zgodność poszukiwanej płaszczyzny poślizgu z jej faktycznym położeniem uzyskano dla stosunkowo niskich wartości spójności oraz wysokich kąta tarcia wewnętrznego, co wydaje się być uzasadnione, biorąc pod uwagę skład granulometryczny gruntu z obszaru osuwiska oraz głębokość strefy oderwania.

PIŚMIENNICTWO

- Baran, P., Cholewa, M., Zawisza, E., Kulasik, K. (2013). Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych. *Rocz. Ochr. Środ.* (Annual Set of Environment Protection), 15(3), 2071–2089.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York.

- Chrzanowska, E. (1980). Osuwisko „Zapadle” w Szymbarku. Analiza wyników badań geofizycznych i geologiczno-inżynierskich. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Duncan, J.M., Wright, S.G. (2005). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons. Inc., New Jersey.
- Green, W.H., Ampt, G.A. (1911). Studies of soils physics I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 4, 1–24.
- Lech, M. (2012). Polowe i laboratoryjne badania wodoprzepuszczalności wybranych gruntów z obszaru Beskidu Niskiego. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, praca magisterska, ms.
- Morel-Seytoux, H.J., Khanji, J. (1974). Derivation of an equation of infiltration. *Water Resour. Res.*, 10(4), 795–800.
- Mrozek, T. (2013). Zagrożenie i ryzyko osuwiskowe w rejonie Szymbarku (Beskid Niski). *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 199, 1–40.
- Rączkowski, W. (2007). Zagrożenia osuwiskowe w polskich Karpatach. Konferencja „GEOZAGROŻENIA – zmniejszanie ryzyka, podnoszenie świadomości”. V Międzynarodowe Targi Geologiczne, Warszawa, 30 maja 2007.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11–26.
- Thiel, K. (red.) (1989). Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.
- Thiel, K. (red.) (1995). Właściwości fizyko-mechaniczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliszowych. IBW Pan, Gdańsk.
- Zabuski, L., Wójcik, A., Gil, E., Mrozek, T., Rączkowski, W. (2009). Landslide processes in a flysch massifs — case study of the Kawiory land slide, Beskid Niski Mts. (Carpathians, Poland). *Geol. Quart.*, 53(3), 317–332.
- Zydroń, T. (2010). Analiza warunków stateczności przypowierzchniowych warstw zboczy fliszowych zlokalizowanych w regionie Beskidu Małego. *Inżyn. Morska Geotech.*, 4, 511–518.
- Zydroń, T., Demczuk P. (2013). Analiza ruchów masowych wywołanych ulewnym opadem na przykładzie osuwisk w Owczarach koło Gorlic. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 12(4), 107–118.
- Żytko, K. (red.) (1973). Przewodnik po wschodnich Karpatach fliszowych. Wyd. Geologiczne, Warszawa.

ESTIMATION OF SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF SOILS ON THE EXAMPLE OF ONE OF LANDSLIDE ON THE SLOPE OF WIATRÓWKI (BESKID NISKI MTS.)

Abstract. The main aim of the paper was estimation of shear strength parameters of soil from one landslide located in Szymbark near Gorlice using back-analysis method. Shallow landslide located on Wiatrówki slope (Beskid Niski Mts.) was the object of analysis. The landslide was located on the border of agricultural terrace and it was induced by very intense rainfall. Causes of location of analyzed landslide in specific part of terrace were also considered in the paper. Slope stability calculations were made using Spencer’s method. The methodology of back-analysis was done according to recommendations of Duncan and Wright [2005] which allow to obtain one pair of values of internal friction angle and cohesion. Then, calculation of infiltration to estimate pore water pressure regime in the moment of failure were done. Permeability tests revealed that the coefficient of permeability in the location of the landslide was lower than in other part of analyzed terrace. Furthermore infiltration results revealed that the analyzed rainfall was intense enough to saturate the soil profile in area of the landslide. Back-analysis showed that the soil from landslide’s area

is characterized by relatively low value of effective cohesion (0,6 kPa) and high value of effective angle of internal friction (40,1°).

Keywords: shallow landslides, infiltration, back-analysis, Beskid Niski Mts.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.02.2016

Do cytowań – For citation: Zydroń, T. (2016). Ocena właściwości wytrzymałościowych gruntów z wykorzystaniem analizy wstecznej na przykładzie jednego z osuwisk na zboczu Wiatrówki (Beskid Niski). *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(1), 139–150.