INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr I/1/2014, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 73–87
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

ANALIZA STATECZNOŚCI POKRYW STOKOWYCH NA PRZYKŁADZIE ZBOCZA Z OKOLIC SIAR K. GORLIC

Tymoteusz Zydroń, Mariusz Cholewa
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

SLOPE STABILITY ANALYSIS OF SUPERFICIAL SLOPE LAYERS – SIARY NEAR GORLICE AS AN EXAMPLE

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań płytkich ruchów masowych powstałych w czerwcu 2010 r. w miejscowości Siary k. Gorlic. Przeprowadzono badania terenowe mające na celu rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich w sąsiedztwie osuwisk oraz badania laboratoryjne, które obejmowały oznaczenie podstawowych właściwości geotechnicznych gruntów (skład uziarnienia, granice konsystencji, parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie). Zasadnicza część pracy obejmowała analiza wpływu procesu infiltracji na stateczność zboczy. Do analiz wykorzystano dwie metody opisu przepływu wody w strefie nienasyconej. Pierwszą z nich stanowił tłokowy model infiltracji zaproponowany przez Lumb'a, a drugą model Montrasio-Valentino. Wyniki badań oraz przeprowadzonych analiz wykazały, że głównym czynnikiem inicjującym powstanie analizowanych osuwisk był katastrofalny opad deszczu. który spowodował zawodnienie pokrywy stokowej tworzonej przez utwory pylaste. Istotnym czynnikiem biernym sprzyjającym powstaniu osuwisk stanowiła płytko zalegająca warstwa mało przepuszczalnego gruntu spoistego. Zintegrowane obliczenia infiltracji i stateczności z zastosowaniem modelu opracowanego przez Montrasio i Valentino wykazały jego wrażliwość na sposób doboru parametru K opisującego zdolność drenażową gruntów. Wykazano, że parametr ten można interpretować jako zmienną zależną od współczynnika filtracji. Wyniki obliczeń stateczności z wykorzystaniem modelu Montrasio-Valentino wykazały w analizowanym przy-

http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2014.1.1.006

padku, że daje on bardziej niekorzystne wyniki obliczeń niż metoda opierająca się o obliczenia infiltracji z wykorzystaniem modelu tłokowego.

Słowa kluczowe: osuwiska, stateczność zboczy, infiltracja

Summary

The paper presents results of shallow landslides research located in Siary near Gorlice in June of 2010. In the frame of investigations were done in-situ tests including evaluation of geologic – engineering condition near the landslides and laboratory tests including determination of geotechnical properties of soils (grain-size distribution, Atterbergs' limits, shear strength parameters). The main part of paper included analysis of infiltration process and its influence on stability of slope. There were used two methods describing water flow through unsaturated soil: piston model of Lumb and Montrasio-Valentino model. Tests and slope stability analysis results proved that main factor controlling failure of analyzed parts of slope were very intense rainfall, which caused saturation of superficial slope layer built of gravelly silt. The another factor which contributed to saturation were impermeable soil layer of cohesive soil. Integrated infiltration and slope stability calculation results using Montrasio-Valentino model revealed its sensitivity on K parameter, which describes drainage capability of soil. It was indicated that K parameter can be interpreted as function of coefficient of permeability. Slope stability calculations made using Montrasio-Valentino model in analyzed case gave less values of stability factors than the ones based of infiltration calculations using piston flow model.

Key words: *landslides, slope stability, infiltration*

WPROWADZENIE

Jednym z istotnych procesów geodynamicznych powodujących przeobrażenia rzeźby współczesnych dolin są ruchy masowe. Procesy te w naszym kraju są szczególnie rozpowszechnione w obszarze Karpat zewnętrznych, nazywanych również Karpatami fliszowymi. Na obszarze tym występuje 95% wszystkich osuwisk zarejestrowanych w Polsce [Rączkowski i Poprawa 2003], a zasadniczymi czynnikami przyczyniającymi się do ich powstawania są m.in. duże deniwelacje terenu, skomplikowana budowa geologiczna i tektonika oraz duże sumy opadów. Woda opadowa infiltrując w grunt oraz podłoże skalne stanowią często ważny czynnik inicjujący ruchy masowe i dlatego też okresy ich

nasilenia w latach 1997, 2000-2002 [Poprawa i Rączkowski 2003] czy też 2010 r. związane były z występowaniem ponadprzeciętnych opadów. Obszarem charakteryzującym się obecnością dużej ilości osuwisk są okolice Gorlic, gdzie zarejestrowanych jest wiele dużych i głębokich osuwisk strukturalnych m.in. Huciska, Zapadle [Chrzanowska 1980], Bystrzyca [Thiel 1989], Kawiory [Zabuski i in. 2009], Maślana Góra [Rączkowski i Zabuski 2008], niemniej w okolicach tych odnotowane są również przypadki występowania płytkich osuwisk wywołanych stosunkowo krótkimi i intensywnymi opadami [m.in. Zydroń i Baran 2011, Zydroń i Demczuk 2013]. Przedmiotem pracy były analiza dwóch wybranych osuwisk powstałych w obrębie pokryw stokowych w miejscowości Siary koło Gorlic. Ze względu na czynnik inicjujący ich powstanie szczegółowej analizie poddano proces infiltracji i jego wpływ na stateczność analizowanych fragmentów zbocza. W tym celu wykorzystano dwa uproszczone modele opisu przepływu wody w strefie nienasyconej.

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Analizowane osuwiska (rys. 1, współ. geogr. N 49°37’11, E 21°10’14) powstały w odległości ok. 20 m od siebie i stanowią jeden z wielu przykładów ruchów masowych, które powstały w dolinie potoku Siary w okresie 3-4.06.2010 r. w następstwie 12-godzinnego opadu (690 minut) o wysokości 107 mm. Pod względem geologicznym analizowany obszar znajduje się w brzeżnej części płaszczowiny magurskiej strefy Siar, gdzie podstawowe utwory stanowią warstwy inoceramowe wieku późnokredowego-paleogeńskiego [Warchoł 2007] tworzące kompleksy naprzemianległych piaskowców i łupków ilastych. W sąsiedztwie warstw inoceramowych obecność swoją zaznaczają łupki pstre formacji z Łabowej.

Zbocze, na którym powstały analizowane osuwiska, jest pokryte roślinnością trawiastą, a powyżej niego w rozstawie co kilkadziesiąt metrów zlokalizowane są terasy związane z rolniczym użytkowaniem terenu. Przeciętne nachylenie zbocza wynosi ok. 15-20°, natomiast u jego podnóża i jednocześnie w miejscu powstania obu osuwisk, jest ono nieco większe. Ponadto u podnóża zbocza występuje teren podmokły, który w przeszłości wykorzystywany był jako wyrobisko materiałów ziemnych wykorzystywanych do uszczelniania szybów naftowych w okolicach Gorlic. W ramach wizji terenowej stwierdzono, że pod względem geotechnicznym zasadniczą warstwę pokrywy stokowej stanowią grunty pylaste ze żwirem, a w strefie odkłucia stwierdzono również punktową obecność gruntów bardzo spoistych.



Rysunek 1. Lokalizacja i widok ogólny analizowanych osuwisk
Figure 1. Location and general view of the analyzed landslides

METODYKA I ZAKRES PRAC

Badania terenowe i laboratoryjne

W ramach pracy przeprowadzono badania terenowe obejmujące rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich w sąsiedztwie osuwisk oraz badania laboratoryjne, które obejmowały oznaczenie podstawowych właściwości geotechnicznych gruntów. Na podstawie badań polowych określono położenie zasadniczych warstw geotechnicznych oraz wykonano oznaczenia wodoprzepuszczalności gruntu powierzchniowej warstwy zbocza metodą infiltrometru dwupierścieniowego. Z kolei w ramach badań laboratoryjnych oznaczono skład granulometryczny, granice konsystencji gruntów oraz parametry charakteryzujące ich wytrzymałość na ścinanie oraz wodoprzepuszczalność. Oznaczenie parametrów wytrzymałości na ścinanie określono metodą bezpośredniego ścinania zgodnie z PN-EN ISO 17892-10 oraz trójosiowego ściskania wg BS 1377: 1990. W przypadku iłów przeprowadzono również ścięcie próbek przy dużej prędkości (1,0 $mm \cdot min^{-1}$) celem określenia wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu. Wyniki badań polowych i laboratoryjnych zostały wykorzystane do obliczeń infiltracji i stateczności.

Obliczenia infiltracji i stateczności

Dla określenia wpływu procesu infiltracji na stateczność zboczy zastosowano dwie uproszczone metody opisu przepływu wody w strefie nienasyconej. Pierwszą z nich stanowił tłokowy model infiltracji zaproponowany przez Lumb'a [1975], w którym głębokość położenia frontu zwilżenia obliczana jest z następującego wzoru:

$$z_f = \frac{k \cdot t}{(\theta_i - \theta_0)} \tag{1}$$

gdzie: k – współczynnik filtracji gruntu, t – czas trwania opadu, θ_0 – początkowa wilgotność gruntu, θ_i – końcowa wilgotność gruntu.

Jak zauważają Lee i in. [2009] równanie powyższe jest odpowiednie w przypadku gdy intensywność opadu jest większa niż wodoprzepuszczalność gruntu. W sytuacji odwrotnej przybiera ono postać:

$$z_f = \frac{J \cdot t}{(\theta_i - \theta_0)} \tag{2}$$

gdzie: J – intensywność opadu, t, θ_0, θ_i – jak we wzorze (1).

Znajomość położenia frontu zwilżenia w dowolnym momencie trwania opadu można wykorzystać do określenia stateczności zboczy, przy czym zależ-

nie od przebiegu procesu infiltracji współczynnik stateczności można określać następującymi równaniami:

$$FS = \frac{tg\phi'}{tg\beta} + \frac{c + \gamma_w \cdot \psi}{\gamma \cdot z \cdot sin\,\beta \cdot cos\,\beta} \qquad \text{gdy } H > z > z_f \qquad (3)$$

$$FS = \frac{tg\phi'}{tg\beta} + \frac{c}{\gamma_{sat} \cdot z \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} \qquad \text{gdy } z \le z_f \qquad (4)$$

$$FS = \frac{H \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot \cos^2\beta \cdot tg\phi + c'}{H \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} \qquad \text{gdy } z > H \qquad (5)$$

gdzie: ϕ' – kąt tarcia wewnętrznego, c' – spójność, β – kąt nachylenia zbocza (lub/i płaszczyzny poślizgu), H – miąższość profilu gruntowego (lub głębokość położenia warstwy nieprzepuszczalnej/podłoża skalnego), γ – gęstość objętościowa gruntu, γ_{sat} – gęstość objętościowa gruntu przy pełnym jego nasyceniu, z – głębokość, ψ – wysokość ciśnienia ssania u frontu zwilżenia.

Równanie (3) opisuje zgodnie z propozycją Crosty [1998] stateczność zbocza w stanie nienasyconym. Z kolei wzór (4) opisuje stateczność zbocza dla gruntu znajdującego się w stanie nasyconym dla strefy znajdującej się powyżej frontu zwilżenia. Równanie (4) charakteryzuje krytyczne warunki stateczności typowe w jednorodnym przepuszczalnym ośrodku gruntowym opisane w pracy Lee i in. [2009]. Z kolei w równaniu (5) uwzględnia się, że po dotarciu frontu zwilżenia do stropu warstwy nieprzepuszczalnej zostaje zawodniony profil gruntowy oraz uruchomione zostają siły ciśnienia spływowego.

Drugą metodą opisu dystrybucji wody opadowej w profilu gruntowym zastosowaną w niniejszej pracy stanowiła propozycja Montrasio i Valentino [2008] opisywana w literaturze jako model SLIDE [Liao i in. 2012], który z powodzeniem był stosowany do analiz przestrzennych stateczności w pracach Liao i in. [2012] oraz Zizioli i in. [2013]. Autorzy metody założyli, że trakcie opadu występuje pionowy przepływ wody siecią makroporów w głębsze strefy profilu gruntowego, gdzie następuje jej rozprzestrzenianie w innych kierunkach siecią mikroporów. W efekcie tego procesu następuje nasycanie gruntu, co w przypadku dłużej trwających opadów prowadzi do nasycania coraz większych partii profilu gruntowego prowadząc do nasycenia znacznych partii zbocza i utraty jego stateczności. W metodzie swej Montrasio i Valentino [2008] zmiany nasycenia profilu opisali następującym równaniem:

$$m(t) = \sum \exp\left(K \cdot \frac{\sin\beta}{n \cdot (1 - S_r)} \cdot t \right) \cdot \frac{h}{n \cdot H \cdot (1 - S_r)} \qquad (6)$$

gdzie: m(t) – stosunek wysokości nasyconej strefy w gruncie do jego miąższości w czasie t, n – porowatość gruntu, h – opad w czasie t, S_r – stopień wilgotności gruntu, K – zdolność drenażowa gruntu, Δt –czas, H, β – jw.

Według sugestii autorów metody parametr K należy dobierać indywidualnie. Natomiast analizując wielkości fizyczne parametrów równania wyjściowego modelu można domniemywać, że parametr ten można interpretować jako iloraz współczynnika filtracji gruntu przez długość zbocza bądź długość strefy oderwania. Analiza danych przedstawionych w pracy Zizioli i in. [2013] wykazała, że wartości tego parametru uzyskano dzieląc współczynnik filtracji gruntów przez liczby z zakresu od 2-20.

Wielkość nasycenia profilu gruntowego profilu gruntowego w metodzie tej można więc przedstawić jako sumę składowych cząstkowych zmian nasycenia profilu w poszczególnych interwałach czasu.

Z kolei współczynnik stateczności Montrasio i Valentino [2008] opisali następującym wzorem:

$$FS = \frac{ctg\beta \cdot tg\phi' \cdot \left[\Gamma + m \cdot \left(n_w - 1\right)\right] + C' \cdot \Omega}{\Gamma + m \cdot n_w} \tag{7}$$

gdzie:

$$\Gamma = \rho_s \cdot \left(1 - n\right) + n \cdot S_r \tag{8}$$

$$n_w = n \cdot \left(1 - S_r\right) \tag{9}$$

$$\Omega = \frac{2}{sin\,2\beta \cdot H \cdot \gamma_w} \tag{10}$$

$$C' = c' + c_\psi = \left[c' + A \cdot S_r \cdot \left(1 - S_r\right)^\lambda \cdot \left(1 - m^\alpha\right)\right] \cdot \Delta s \tag{11}$$

gdzie: c_ψ – spójność pozorna gruntu, Δs – długość jednostkowa paska, A, λ, α – parametry dopasowania modelu (wg autorów dla piasków A = 40, λ = 0,4, a wartość α można przyjmować jako równą 3,4),, m – stopień zawodnienia profilu gruntowego, ϕ' c' – jw.

Równanie (7) stanowi funkcję zależną od zmian nasycenia profilu gruntowego, który w dowolnym momencie trwania opadu określano z równania (6).

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna badanych gruntów
Table 1. Geotechnical parameters of tested soils

Parametr / Parameter	1 warstwa / 1 layer	2 warstwa / 2 layer
Zawartość frakcji / Fraction content		
– żwirowa / gravel (63-2 mm)	4,4-30,2	
– piaskowa / sand (2-0,063 mm)	24,9-40,2	1,8-20,4
– pyłowa / silt (0,063-0,002 mm)	34,9-53,5	46,1-63,1
– iłowa / clay (<0,002 mm)	8,0-11,9	26,4-35,1
Nazwa gruntu wg PN-EN ISO 14688-2 / Soil type acc. to PN-EN ISO 14688-2	sagrSi/saclSi	siCl
Gęstość objętościowa / Bulk density, $g \cdot cm^{-3}$	1,84-1,89	1,95-2,06
Wilgotność naturalna / Natural moisture content, %	20,9-21,5	18,3-23,3
Porowatość / Porosity [-]	0,416	0,385
Granica plastyczności / Plastic limit, %	17,3-18,1	22,7
Granica płynności / Liquid limit, %	27,0-30,6	51,3
Wskaźnik plastyczności / index, %	9,1-13,3	28,6
Współczynnik filtracji / Coefficient of permeability, $m \cdot s^{-1}$	$1,3\text{-}5,0 \cdot 10^{-5}$ *	$5 \cdot 10^{-11}$ **
Parametry wytrzymałości na ścinanie:		
1. Metoda bezpośredniego ścinanie		
– kąt tarcia wewnętrznego / angle of internal friction, °	36,2	15,5
– spójność / cohesion, kPa	1,7	23,5
2. Metoda trójosiowego ściskania		
– kąt tarcia wewnętrznego / angle of internal friction, °	34,6	-
– spójność / cohesion, kPa	14,5	-

Objaśnienie/ Explaination: * – pomiary terenowe / in-situ tests,
** – pomiary laboratoryjne / laboratory tests

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na podstawie badań terenowych stwierdzono, że w obrębie analizowanych osuwisk wyróżnić można dwie zasadnicze warstwy geotechniczne (rys. 2). Pierwszą z nich tworzą pyły ze żwirem i piaskiem oraz pyły ilasto-piaszczyste. Utwory te występują do głębokości 1,1 m ppt. w pobliżu ścian osuwisk oraz w części zbocza położonej powyżej nich, natomiast mają one mniejszą miąższość w dolnej części strefy odkłucia. Polowe badania wodoprzepuszczalności wykazały, że wodoprzepuszczalność tej warstwy jest stosunkowo wysoka

i wynosi 10^{-5} m·s^{-1}. Wyniki badań wytrzymałości w aparacie bezpośredniego ścinania wykazały, że utwory te charakteryzowały się niską spójnością oraz wysokim kątem tarcia wewnętrznego. Z kolei wyniki badań trójosiowych dały bardzo podobną wartość kąta tarcia wewnętrznego, natomiast otrzymana wartość spójności była znacznie większa niż otrzymano z badań bezpośredniego ścinania. Utwory te charakteryzowały się niedużą zawartością frakcji ilastej oraz niewielką plastycznością, co powoduje, że są one wrażliwe na zmiany wilgotności, a ze względu na niską plastyczność są podatne na płytkie ruchy masowe wywołane intensywnymi opadami. Poniżej tej warstwy zlokalizowano warstwę iłów, których miąższość wahała się od 0,05 do 0,15 m. Utwory te charakteryzowały się obecnością pojedynczych okruchów skalnych. Badania wytrzymałości na ścinanie przy prędkości ścinania 0,05 mm·min^{-1} wykazały, że grunt ten charakteryzuje się wysoką spójnością i niskim kątem tarcia wewnętrznego. Z kolei ścinanie przy prędkości ścinania 1,0 mm·min^{-1} dało wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójność odpowiednio 2,7° i 18 kPa. Ze względu na niewielką grubość tej warstwy nie było możliwe przeprowadzenie polowych pomiarów wodoprzepuszczalności, natomiast pomiary laboratoryjne wykazały, że warstwa ta jest praktycznie nieprzepuszczalna. Podobną budowę geologiczną charakteryzują się zbocza w innej części doliny potoku Siary [Zydroń i Demczuk 2013]. Z kolei poniżej warstwy iłów stwierdzono obecność utwory pylastych. Charakterystykę geotechniczną powierzchniowej warstwy zbocza oraz zalegającej poniżej niej warstwy iłów zestawiono w tabeli 1.

W dalszej części pracy wykonano obliczenia infiltracji przyjmując założenie, że warstwa iłu stanowi barierą dla infiltracji wody opadowej, a kluczowe dla stateczności są zmiany stopnia nasycenia gruntu w obrębie warstwy utworów pylastych.

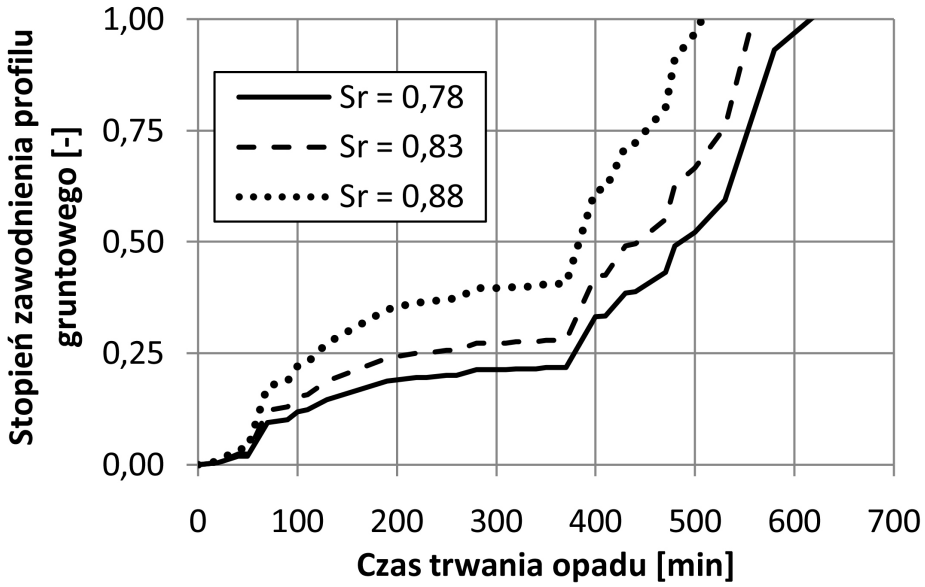
Obliczenia infiltracji modelem Lumb'a przeprowadzono przyjmując, że miąższość warstwy pyłu wynosi 1,1 m, a wyniki obliczeń położenia frontu zwilżenia przedstawiono jako iloraz położenia frontu zwilżenia i miąższość warstwy pyłów. Wyniki badań obliczeń wykazały (rys. 3), że w każdym z przyjętych wariantów początkowego uwilgotnienia zbocza w trakcie trwania analizowanego opadu istniały warunki sprzyjające pełnemu nasyceniu profilu gruntowego w obrębie powstałych osuwisk, przy czym zauważalne jest, że im większy jest początkowy stopień uwilgotnienia gruntu tym szybciej następuje zawodnienie zbocza.

Kolejne obliczenia infiltracji przeprowadzono wykorzystując model Montrasio-Valentino opisany wzorem (6) zakładając, że początkowy stopień wilgotności gruntu 0,78. Z braku możliwości jednoznacznej możliwości określania wielkości parametru K przyjęto do obliczeń cztery jego wartości stanowiące iloraz, w którym dzielną był współczynnik filtracji, a dzielnik stanowiły dowolnie wybrane liczby. Otrzymane wyniki obliczeń (rys. 4) wykazały, że wpływ

wielkości parametru K na rezultaty analiz staje się pomijalny w przypadkach gdy parametr ten przyjmuje się dzieląc wartość współczynnika filtracji przez liczbę większą bądź równą 7. W celach porównawczych na rysunku 4 zestawiono również wyniki obliczeń infiltracji otrzymane modelem Lumb'a, przy czym przedstawione wielkości wyrażają iloraz położenia zasięgu frontu zwilżenia względem miąższości przepuszczalnej warstwy gruntu. Wyniki porównań rezultatów otrzymanych za pomocą obu modeli wskazują, że w pewnych przypadkach – przy $K \leq k/7$ – – model Montrasio – Valentino daje podobne wyniki jak model Lumb'a. Należy jednak mieć na uwadze, że modele te zupełnie inaczej opisują przebieg procesu infiltracji. W modelu Montrasio-Valentino wzrost zawodnienia profilu oznacza wzrost poziomu tymczasowego zwierciadła wody gruntowej, natomiast w modelu Lumb'a wzrost stopnia zawodnienia informuje o zmianie położenia frontu zwilżenia względem miąższości warstwy przepuszczalnej.



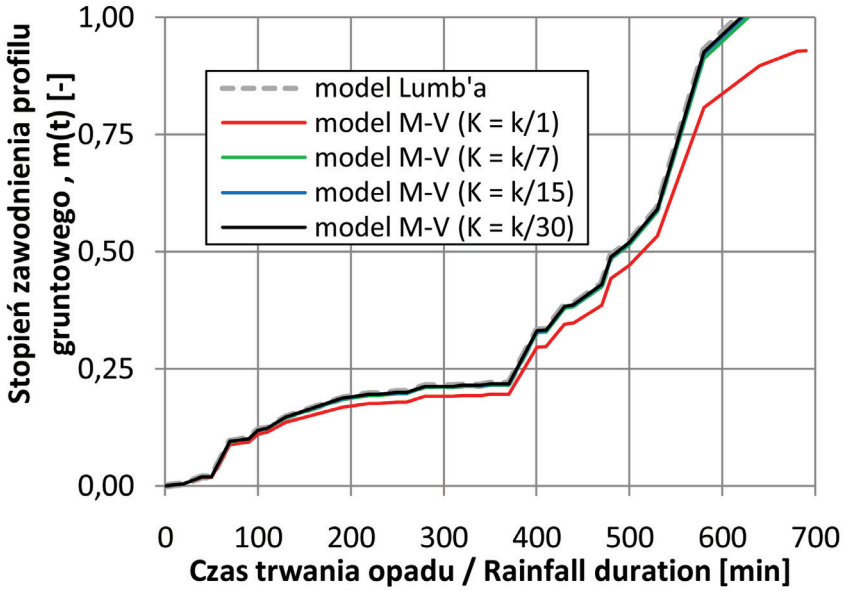
Rysunek 2. Profile podłużne analizowanych osuwisk
Figure 2. Longitudinal section along analyzed landslides



Rysunek 3. Zależność zmian stopnia nasycenia profilu gruntowego modelem Lumb'a w zależności od czasu trwania opadu oraz początkowej wartości stopnia wilgotności gruntu
Figure 3. Results of changes of degree of saturation of soil profile using Lumb's model in relation to rainfall duration and initial degree of soil saturation

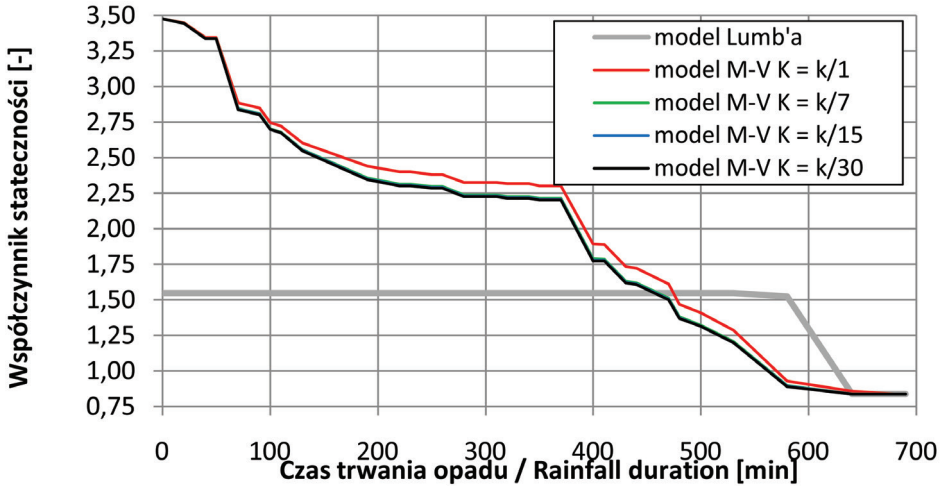
Wyniki obliczeń infiltracji wykorzystano do określenia stanu równowagi analizowanych fragmentów zbocza . W obliczeniach założono, że głębokość płaszczyzny poślizgu wynosi 1,1 m i odpowiada ona maksymalnej głębokości płaszczyzny poślizgu analizowanych osuwisk. W analizie nachylenie płaszczyzny poślizgu przyjęto jako równe minimalnemu nachyleniu górnej części strefy oderwania, które zawierało się w zakresie od 29 do 34^{o}. Do analizy przyjęto ponadto, że w momencie rozpoczęcia opadu początkowy stopień uwilgotnienia wynosi 0,78. Obliczenia stateczności wykonano w dwojaki sposób. W pierwszym przypadku oparto się na wynikach obliczeń infiltracji otrzymanych na podstawie modelu Lumb'a, gdzie do obliczeń współczynnika stateczności wykorzystano wzory (3–5). Z kolei w drugiej metodzie – model Montrasio-Valentino – wykorzystano równanie (10) analizując dodatkowo pośredni wpływ wartości parametru K na wyniki obliczeń współczynnika stateczności. Wyniki obliczeń stateczności (rys. 5) przeprowadzonych w oparciu o tłokowy model infiltracji Lumb'a wykazały bardzo niewielkie zmiany wartości współczynnika stateczności w początkowej oraz środkowej fazie trwania opadu. Dopiero w momen-

cie dotarcia frontu zwilżenia do stropu warstwy nieprzepuszczalnej dochodzi do uruchomienia działania sił ciśnienia spływowego, w efekcie czego następuje zmniejszenie wartości współczynnika stateczności poniżej granicznego stanu równowagi (FS=1,0). Z wyniki obliczeń stateczności uzyskane z wykorzystaniem metody Montrasio-Valentino wykazały widoczną wrażliwość tej metody na dobór parametru K, co można szczególnie wyraźne zauważyć w środkowej części trwania opadu. Porównując wyniki obliczeń otrzymanych z pomocą obu modeli można stwierdzić, że bardziej niekorzystny przebieg zmian wartości współczynników stateczności uzyskano stosując model Montrasio-Valentino, gdzie graniczny stan równowagi uzyskano przy niepełnym zawodnienia profilu gruntowego. Z kolei w przypadku modelu tłokowego dla uzyskania granicznego stanu równowagi niezbędne było dotarcie frontu do warstwy nieprzepuszczalnej, co było równoznaczne zawodnieniu całego profilu gruntowego. Otrzymane różnice obliczeń stateczności są pochodną założeń obu metod opisanych we wcześniejszej części pracy. Model Montrasio-Valentino wydaje się być ciekawym narzędziem obliczeniowym dla powierzchniowych warstw zboczy, gdzie sieci makroporów występują powszechnie będąc efektem obecności w gruncie organizmów żywych.



Rysunek 4. Zależność zmian stopnia nasycenia profilu gruntowego metodą Lumb'a oraz Montrasio-Valentino w zależności od czasu trwania opadu oraz początkowej wartości stopnia wilgotności gruntu

Figure 4. Results of changes of degree of saturation of soil profile using Lumb's and Montrasio-Valentino model in relation to rainfall duration and initial degree of soil saturation



Rysunek 5. Wpływ metody obliczeniowej na wyniki obliczeń stateczności
Figure 5. Influence of calculation method on results of slope stability calculations

PODSUMOWANIE

Wyniki badań oraz przeprowadzonych analiz wykazały, że głównym czynnikiem inicjującym powstanie analizowanych osuwisk w Siarach k. Gorlic był katastrofalny opad deszczu. który spowodował zawodnienie pokrywy stokowej tworzonej przez utwory pylaste. Utwory te charakteryzowały się niewielką spoistością, średnią przepuszczalnością oraz niewielką spójnością, co sprzyja powstawaniu w ich obrębie płytkich ruchów masowych. Istotnym czynnikiem biernym sprzyjającym powstaniu osuwisk stanowiła płytko zalegająca warstwa mało przepuszczalnego iłu pylastego, który stanowił barierę dla infiltrującej wody powodując powstanie zawieszonego zwierciadła wody gruntowej i wzbudzenie działania sił ciśnienia spływowego w wyżej leżącej warstwie gruntów pylastych.

Zintegrowane obliczenia infiltracji i stateczności potwierdziły związek przyczynowo-skutkowo zainicjowania analizowanych ruchów masowych. Analiza wyników obliczeń z zastosowaniem modelu opracowanego przez Montrasio i Valentino wykazały stosunkowo wyraźną jego wrażliwość na sposób doboru parametru K opisującego zdolność drenażową gruntów. Wykazano, że parametr ten można interpretować jako zmienną zależną od współczynnika filtracji, przy czym kilkukrotne pomniejszenie wartości tego parametru daje ilościowo wyniki zbliżone do obliczeń otrzymywanych z wykorzystaniem tłokowego modelu

Lumb'a. Wyniki obliczeń stateczności z wykorzystaniem modelu Montrasio-Valentino wykazały w analizowanym przypadku, że daje on bardziej niekorzystne wyniki obliczeń niż metoda opierająca się o obliczenia infiltracji z wykorzystaniem modelu tłokowego.

LITERATURA

BS 1377: 1990. *British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes. Part 8. Shear strength tests (effective stress)*. British Standards Institution.

Chrzanowska E. (1980). *Osuwisko "Zapadle" w Szymbarku. Analiza wyników badań geofizycznych i geologiczno-inżynierskich.* Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

Crosta G. (1998). *Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation.* Environmental Geology 35 (2–3), 131-145.

Hydrology handbook. Second Edition. (1996). American Society of Civil Engineers, ASCE manuals and reports on engineering practice, 28, 784.

Lee L.M., Gofar N., Rahardjo H. (2009). *A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability.* Engineering Geology, 108, 272–285.

Liao Z., Hong Y., Kirschbaum D., Liu C. (2012). *Assesment of shallow landslides from Hurricane Mitch in central America using a physically based model.* Environmental and Earth Sciences, 66, 1697-1705.

Lumb, P. (1975). *Slope Failures in Hong Kong.* Quarterly Journal of Engineering Geology, 31–65.

Montrasio L., Valentino R. (2008). *A model for triggering mechanism of shallow landslides.* Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 1149-1159.

PN-EN ISO 14688-2 . *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.* PKN, W-wa, 2006.

PN-EN ISO 17892-10. *Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania.* PKN, W-wa, 2004.

Poprawa D., Rączkowski W. (2003*). Osuwiska Karpat.* Przegląd Geologiczny, 51, 685-692.

Rączkowski W., Zabuski L. (2008). *Numeryczne modelowanie deformacji stoku osuwiskowego – Maślana Góra w Szymbarku koło Gorlic.* Kwartalnik AGH Geologia, 34,4, 733-742.

Thiel K. (red). 1989. *Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku.* Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.

Zabuski L., Wójcik A., Gil E., Mrozek T., Rączkowski W. (2009). *Landslide processes in a flysch massif – case study of the Kawiory landslide, Beskid Niski Mts. (Carpathians, Poland)*. Geological Quarterly, 53, 3, 317-332.

Warchoł M. (2007). *Architektura depozycyjna warstw magurskich w strefie Siar na południe od Gorlic (płaszczowina magurska, polskie Karpaty zewnętrzne).* Przegląd Geologiczny, 55, 7, 601-610.

Zizioli D., Meisina C., Valentino R., Montrasio L. (2013). *Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy.* Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 559-573.

Zydroń T., Baran P. (2011). *Analiza uwarunkowań stateczności wybranego zbocza w Beskidzie Niskim.* Inżynieria Morska i Geotechnika, 256-264.

Zydroń T., Demczuk P. (2013). *Analiza ruchów masowych wywołanych ulewnym opadem na przykładzie osuwisk w Owczarach k. Gorlic.* Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, 4, (w druku).

Dr inż. Tymoteusz Zydroń,
dr inż. Mariusz Cholewa
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e:mail: t.zydron@ur.krakow.pl, m.cholewa@ur.krakow.pl