

ANALIZA RUCHÓW MASOWYCH WYWOŁANYCH ULEWNYM OPADEM NA PRZYKŁADZIE OSUWISK W OWCZARACH KOŁO GORLIC

ANALYSIS OF RAINFALL-INDUCED SHALLOW LANDSLIDES – A CASE STUDY IN OWCZARY NEAR GORLICE

Tymoteusz Zydrón

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Piotr Demczuk

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań płytkich osuwisk powstałych w okolicach Owczar k. Gorlic (Beskid Niski) w wyniku nawalnego opadu w dniach 3–4 czerwca 2010 roku. Głównym przedmiotem analiz był przebieg procesu infiltracji wód opadowych oraz jego wpływ na stateczność zboczy. Obliczenia infiltracji przeprowadzono wykorzystując jednowymiarowe modele infiltracji Iversona i Green-Ampta oraz model dwuwymiarowy opisany fizycznym równaniem Richardsa. Wyniki obliczeń dla analizowanych osuwisk wykazały, że w trakcie trwania opadu istniały odpowiednie warunki umożliwiające dotarcie infiltrującej wody do warstwy nieprzepuszczalnej, co doprowadziło do powstania zawieszoności zwierciadła wody gruntowej i uruchomienia sił ciśnienia sphywowego. Analiza porównawcza zastosowanych metod obliczeń infiltracji wykazała, że obliczenia numeryczne oparte na równaniu Richardsa oraz model Green-Ampta dają porównywalne wyniki, natomiast zakres zmian ciśnienia ssania określony na podstawie modelu Iversona był znacznie mniejszy niż uzyskano z obliczeń numerycznych.

Abstract. Results of geotechnical research of two shallow landslides in Owczary near Gorlice induced by torrential rainfall in 3–4 June 2010 are presented in the paper. The main purpose of the paper was analysis of rainfall infiltration process and its influence on

Adresy do korespondencji – Corresponding Authors: dr inż. Tymoteusz Zydrón, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, mgr inż. Piotr Demczuk, Zakład Geomorfologii, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie; e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl., demczuk@poczta.umcs.lublin.pl.

slope stability conditions. Analysis of transient seepage were done using one-dimensional infiltration Iverson and Green-Ampt models, and two-dimensional model using physical Richards' equation. The calculation results performed for analyzed slopes revealed that during considered rainfall were preferable conditions for infiltration process. The rainwater could have seeped up to impermeable layer and formed perched groundwater table inducing seepage forces. Comparative analysis of tested infiltration models showed also that the numerical model based on Richards equation and Green-Ampt model give comparable results of calculations but results of matric suction changes calculated using Iverson model were much smaller than results obtained using numerical method.

Słowa kluczowe: stateczność, opad, infiltracja, osuwiska, Karpaty

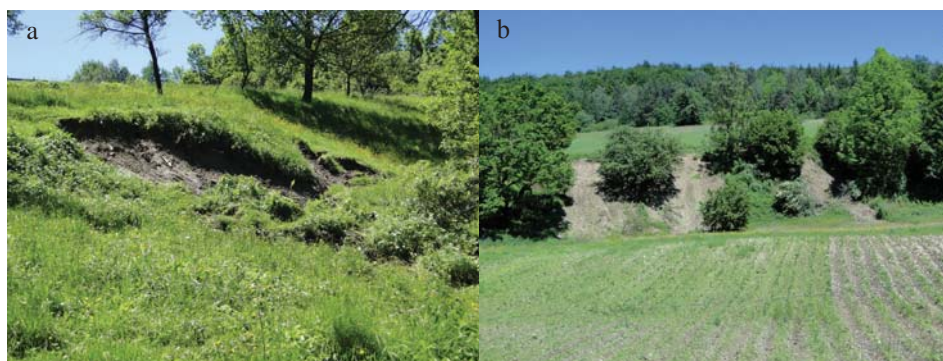
Key words: slope stability, rainfall, infiltration, shallow landslides, the Carpathians

WPROWADZENIE

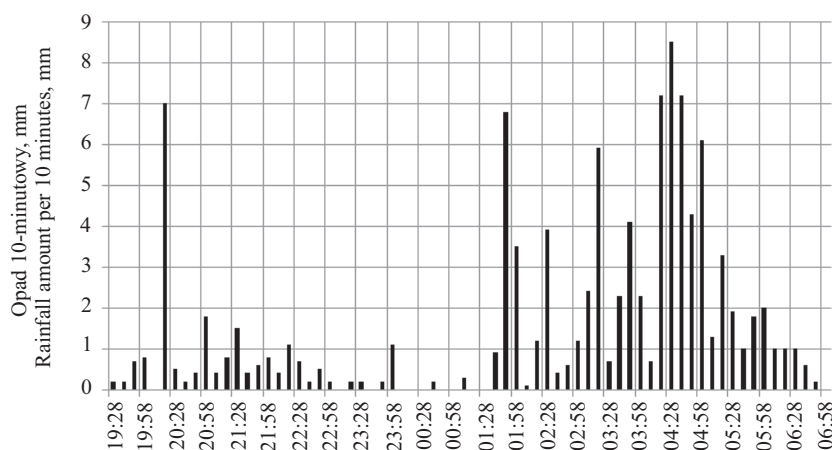
Ruchy masowe stanowią procesy geologiczne kształtujące współcześnie rzeźbę na obszarach wyżynnych i górskich. Procesy te w wielu przypadkach są przyczyną szkód o charakterze zarówno gospodarczym, jak i społecznym i dlatego od wielu lat stanowią przedmiot badań wielu specjalistów m.in. z zakresu geografii, geomorfologii, geologii czy geotechniki. Podstawowymi czynnikami warunkującymi stateczność zboczy są warunki geologiczne, rzeźba terenu, właściwości geotechniczne gruntów i utworów skalnych formujących wzniesienia, ale jak zauważają Crosta i Frantini [2008] głównym czynnikiem wywołującym zarówno płytkie, jak i głębokie osuwiska są najczęściej opady. Szczególnie groźne ze względu na swą dynamikę wydają się być osuwiska określane w literaturze zagranicznej terminem *shallow landslides*, które inicjowane są zazwyczaj przez intensywne opady. Obejmują one swym zasięgiem powierzchniowe warstwy zboczy i zwykle klasyfikowane są jako zsuwy translacyjne lub spływy błotne, błotno-gruzowe albo gruzowe. Badania tego typu ruchów masowych są szczególnie rozpowszechnione w regionach obejmujących strefę zwrotnikową oraz rejony wysokich gór [m.in. Lumb 1975, Wang i in. 2002, Lan i in. 2004, Chen i in. 2005, Morrissey i in. 2008]. Problem wpływu ulewnych deszczy na aktywność procesów osuwiskowych jest również aktualny w naszym kraju [Ziętara 1968, Dziewański i in. 2003, Gorczyca 2004, Bucala 2009, Długosz 2011, Starkel 2011]. Jednak w większości przypadków analiza tych procesów ogranicza się do określenia zasięgu i skutków oddziaływania ekstremalnych opadów, natomiast nie rozpatruje procesów fizycznych zachodzących w ośrodku gruntowym. Przedmiotem badań autorów pracy są wybrane osuwiska z okolic Gorlic, które wywołane zostały katastrofalnymi opadami w czerwcu 2010 roku. Z uwagi na przyczynę powstania osuwisk głównym celem pracy była analiza przebiegu procesu infiltracji i ocena jego wpływu na stateczność zboczy.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW BADAŃ

Analizowane osuwiska powstały w miejscowości Owczary koło Gorlic (ryc. 1) bezpośrednio w następstwie katastrofalnego opadu z okresu 3–4 czerwca 2010 roku (ryc. 2), którego wysokość wyniosła 107 mm. Obszar analiz pod względem tektonicznym znajduje się w strefie brzeżnej jednostki magurskiej. Osuwiska te powstały w dolnych



Ryc. 1. Widok ogólny osuwisk po lewej (a) i prawej (b) części doliny potoku Siary
 Fig 1. General view of landslides on the left (a) and right (b) part of the Siary stream valley



Ryc. 2. Hietogram opadowy z 3–4 czerwca 2010 r. ze Stacji Naukowo-Badawczej IGiPZ PAN w Szymbarku

Fig 2. Hyetograph of torrential rainfall from 3 and 4th June of 2010 recorded by research station of the Institute of Geography and Spatial Organisation of the Polish Academy of Sciences in Szymbark

partiach zboczy schodzących do doliny potoku Siary. Podstawowe kompleksy geologiczne doliny w strefie korytovej cieką stanowią warstwy inoceramowe pochodzące z okresu późno kredowo-paleogeńskiego. Z kolei dolne partie zboczy tworzą eoceńskie łupki pstre, sporadycznie warstwy zembrzyckie (łupki z Szymbarku) górnioeocieńskie, a w wyższych partiach zboczy zalegają piaskowce magurskie facji glaukonitowej (piaskowiec z Wątkowej) reprezentujący najwyższy górny eocen i najniższy dolny oligocen [Warchoń 2007]. Ponadto w okolicach Owczar w różnych strefach zlewni występują również warstwy nadmagurskie (łupki budzowskie) zaliczane do środkowego i wyższego

dolnego oligocenu. W trakcie wizji terenowych dokonanych bezpośrednio po wystąpieniu opisanych wyżej opadów stwierdzono, że w niszy osuwiska zlokalizowanego po lewej stronie doliny występują ciemnoszare ły zawierające pojedyncze okruchy skalne. Z kolei w przypadku osuwisk powstałych po prawej stronie doliny potoku Siary materiał nisz osuwiskowych stanowiły pyły oraz czerwone i szare łupki pstre. W okresie wystąpienia analizowanych osuwisk w prawej części doliny potoku Siary w bliskim sąsiedztwie analizowanych osuwisk (ryc. 1a) stwierdzono również obecność młaki, która w 2011 roku przekształciła się w duże osuwisko. W niszy tego osuwiska stwierdzono obecność łupków pstrych już na głębokości 0,6 m p.p.t.

METODYKA I ZAKRES PRAC

By zrealizować cel pracy, przeprowadzono badania terenowe obejmujące rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich w sąsiedztwie osuwisk oraz badania laboratoryjne, które posłużyły określeniu podstawowych właściwości geotechnicznych gruntów. W trakcie badań polowych określono położenie warstw geotechnicznych oraz wykonano oznaczenie ich wodoprzepuszczalności metodą infiltrometru dwupierścieniowego. Badania laboratoryjne obejmowały oznaczenie składu granulometrycznego gruntów, granic konsystencji oraz parametrów charakteryzujących ich wytrzymałość na ścinanie. Określenie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie określono metodą bezpośredniego ścinania wg PN-EN ISO 17892-10, stosując prędkości ścinania w przedziale 0,05–0,1 mm · min⁻¹. Ponadto w przypadku badań iłów pobranych z prawej części doliny potoku Siary przeprowadzono również szybkie ścięcie próbek przy prędkości 1,0 mm · min⁻¹. Wyniki badań polowych i laboratoryjnych zostały wykorzystane do obliczeń infiltracji i stateczności. Obliczenia przepływu w strefie nienasyconej przeprowadzono, korzystając z trzech metod. Dwie metody obliczeń oparte były na jednowymiarowych modelach infiltracji. Pierwszy z nich stanowiła propozycja Iversona [2000], która proces infiltracji opisuje zmianami ciśnienia porowego za pomocą zlinearyzowanego równania Richardsa:

$$\psi(z, t \leq T) = (z - d) \cdot \cos^2 \beta + \frac{J}{k_s} \left[\left(\frac{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot t}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(- \frac{z}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot t} \right) - z \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{z^2}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot t} \right)^{1/2} \right] \quad (1)$$

$$\psi(z, t > T) = \psi(z, t \leq T) - \frac{J}{k_s} \left[\left(\frac{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot (t - T)}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(- \frac{z}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot (t - T)} \right) - z \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{z^2}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot (t - T)} \right)^{1/2} \right] \quad (2)$$

gdzie:

- z – głębokość mierzona od powierzchni terenu,
- T – czas trwania opadu,
- t – czas odniesiony do momentu rozpoczęcia opadu,
- d – głębokość położenia zwierciadła wody gruntowej,
- β – nachylenie zbocza,
- D – efektywna dyfuzyjność hydrauliczna gruntu, określana na podstawie formuły

$$D = 4 \cdot D_0 \cdot \cos^2 \beta = 4 \cdot \frac{k_s}{C_0} \cdot \cos^2 \beta$$

C_0 – minimalna wartość różniczkowej pojemności wodnej gruntu,

$$C_0 = \min C(\psi) = \min \frac{d\theta}{d\psi}$$

$erfc$ – uzupełniająca funkcja błędu,

k_s – współczynnik filtracji gruntu.

Drugą metodę opisu przepływu wody w strefie nienasyconej stanowił model Green-Ampta, w którym obliczenia polegają na bilansowaniu rozdziału wody opadowej w spływ powierzchniowy i infiltrację. Do obliczeń zastosowano jedną z modyfikacji modelu Green-Ampta [Chow i in. 1988] dostosowaną do warunków opadu niestabilnego. W ogólnym zarysie obliczenia polegają na określeniu chłonności gruntu (f) oraz wielkości akumulacji wody w profilu gruntowym (F):

$$f = \frac{dF}{dt} = k_s \left(\frac{\psi_f}{z_f} + 1 \right) \quad (5)$$

$$F = k_s \cdot t + (\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f \cdot \ln \left| \frac{(\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f + F}{(\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f} \right| \quad (6)$$

gdzie:

- $\frac{dF}{dt}$ – zmiana akumulacji infiltracji w czasie,
- ψ_f – wysokość ssania gruntu u podstawy frontu zwilżenia,
- z_f – głębokość frontu zwilżenia,
- θ_i – początkowa wilgotność objętościowa gruntu,
- θ_s – wilgotność objętościowa gruntu przy jego pełnym nasyceniu,
- k_s – współczynnik filtracji gruntu.

Z kolei w trzeciej metodzie obliczenia infiltracji przeprowadzono dla płaskiego (dwuwymiarowego) modelu zbocza. Obliczeń tych dokonano, korzystając z aplikacji SEEP/W, gdzie przepływ wody w strefie nienasyconej opisany jest równaniem:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7)$$

gdzie:

H – ciśnienie całkowite,

k_x, k_y – współczynniki filtracji w kierunku odpowiednio poziomym i pionowym.

Parametry retencyjne badanych gruntów określono metodą płyt porowatych w komorach ciśnieniowych, a wyniki tych badań przedstawione są w innej pracy autora [Zydroń i Zaleski 2012]. W przypadku iłów charakterystykę retencyjną przyjęto, opierając się na wynikach badań próbki ładu pochodzącej z Ropicy Polskiej, miejscowości zlokalizowanej w sąsiedniej dolinie.

Wyniki obliczenia infiltracji wykorzystano do obliczeń stateczności, które przeprowadzono metodą Morgernsterna-Price'a w programie GEOSLOPE/W.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań terenowych wykazały, że w obrębie analizowanych zboczy występują dwie zasadnicze warstwy geotechniczne. Po obu stronach doliny potoku Siary powierzchnią pokrywę zboczy stanowią pyły ilaste charakteryzujące się średnią przepuszczalnością, a poniżej nich występują ropy pyłaste. W przypadku zbocza po lewej części doliny obecność iłów stwierdzono już na głębokościach 0,2–0,55 m p.p.t., przy czym najpłytsza strefa ich występowania odpowiadała położeniu dolnej części strefy odklucia. Z kolei po prawej części doliny w strefie zbocza położonej powyżej osuwiska warstwa ładu pyłastego pojawiała się już na głębokości 0,45 m p.p.t., a największa głębokość jej występowania była w strefie skarpy głównej (0,8 m p.p.t.). Parametry fizyczne gruntów z poszczególnych warstw z obu części doliny zestawiono w tabeli 1.

Obliczenia infiltracji wykonano, stosując trzy metody: dwie oparte były na fizycznym równaniu Richardsa przepływu wody w strefie niepełnego nasycenia, trzecia zaś stanowiła uproszczony model fizyczny Green-Ampta. W obliczeniach przyjęto, że warstwa ładu stanowi barierę dla infiltracji wody opadowej, a kluczowy dla analizy jest przepływ w strefie zalegania utworów pyłastych (pyły ilaste). W pierwszych dwóch metodach podstawową daną wyjściową do obliczeń stanowi rozkład ciśnienia porowego. Wyniki pomiarów tego parametru prowadzone przez zespół Thiela [1989] w okolicach Gorlic wykazały, że w okresach dużych opadów praktycznie cały profil gruntowy ulega nasyceniu. Przymiślnie podobne warunki pogodowe panowały w okresie poprzedzającym powstanie analizowanych osuwisk. W związku z tym dla potrzeb analizy przyjęto, że maksymalna wartość ciśnienia ssania w strefie obu analizowanych zboczy wynosi 10 kPa. Z kolei w przypadku metody Green-Ampta zasadniczy wpływ na prędkość infiltracji ma wodoprzepuszczalność gruntu, wielkość ciśnienia ssania u podstawy frontu zwilżenia oraz deficyt wilgotności będący różnicą wilgotności końcowej gruntu po nawodnieniu (wilgotność pełnego nasycenia) i wilgotności początkowej gruntu. W przypadku obu części dolin założono, że początkowa wilgotność gruntu odpowiada wartości ciśnienia ssania 10 kPa.

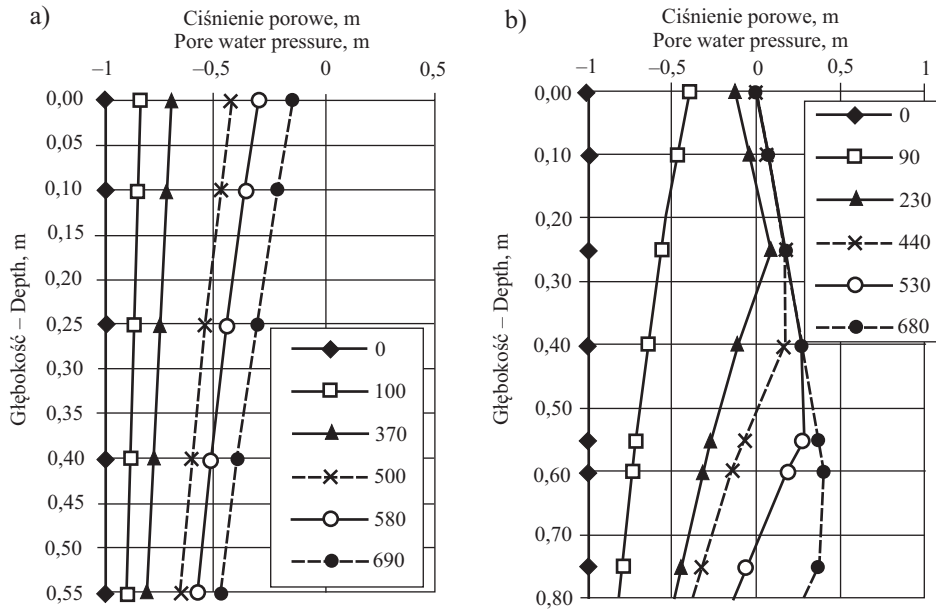
Tabela 1. Charakterystyka badanych gruntów
Table 1. Geotechnical parameters of tested soils

Parametr – Parameter	Lewa część doliny Left side of valley		Prawa część doliny Right side of valley	
	1 warstwa 1 layer	2 warstwa 2 layer	1 warstwa 1 layer	2 warstwa 2 layer
	Zawartość frakcji Fraction content, %			
• żwirowa – gravel (63–2 mm)	15,6		7,7–14,8	12,1–14,8
• piaskowa – sand (2–0,063 mm)	14,1	2,1–9,1	10,3–23,0	4,3–6,5
• pyłowa – silt (0,063–0,002 mm)	59,7	57,7–66,1	55,7–60,5	45,7–51,2
• ilowa – clay (<0,002 mm)	10,7	31,8–35,1	12,2–17,3	32,4–32,9
Nazwa gruntu wg – Soil type acc. to PN-EN ISO 14688-2:2006	clSi	siCl	clSi	siCl
Gęstość objętościowa Bulk density, $g \cdot cm^{-3}$	1,90–2,01	1,93–1,99	1,88–1,90	1,86–1,95
Wilgotność naturalna Natural moisture content, %	20,9–26,8	37,2–38,9	25,3	25,4–30,3
Granica plastyczności – Plastic limit, %	18,1	25,0	16,5–21,5	21,4–23,8
Granica płynności – Liquid limit, %	33,8	56,7	28,4–31,9	50,3–51,0
Wskaźnik plastyczności Plasticity index, %	15,7	31,7	10,4–11,9	26,5–29,7
Współczynnik filtracji Coefficient of permeability, $m \cdot s^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$ $-6,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$ $-3,1 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$
Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction, °	34,7 ³	12,0–15,8 ⁴	36,2 ¹	17,6 ¹ , 10,3 ²
Spójność – Cohesion, kPa	1,7 ³	6,0–9,9 ⁴	5,9 ¹	6,5 ¹ , 5,0 ⁴

¹ – na podstawie Źydrów i Zgoda [2012] – from Źydrów i Zgoda [2012], ² – parametry resztkowe – residual parameters, ³ – prędkość ścinania $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ – velocity of shearing $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, ⁴ – prędkość ścinania $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ – velocity of shearing $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Wyniki obliczeń numerycznych w programie SEEP/W wykazały, że w przypadku fragmentu zbocza zlokalizowanego w lewej części doliny nasycenie profilu miało miejsce dwukrotnie. Stwierdzono, że występuje ono już w początkowej fazie opadu, po ok. 3,2 godz. jego trwania (ok. 22:30 – por. ryc. 2), następnie dochodzi do rozproszenia ciśnienia porowego przy powierzchni terenu, co związane jest z niską intensywnością opadu, oraz ponownego nasycenia profilu zbocza po ok. 4,6 godz. od rozpoczęcia opadu (ok. 24:00 – por. ryc. 2), w jego fazie charakteryzującej się dużą intensywnością. Z kolei w przypadku zbocza po prawej stronie doliny nasycenie profilu nastąpiło praktycznie po ok. 4,6 godz. opadu (ok. godz. 24:00).

Z kolei wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu Iversona wykazały, że w przypadku ciśnienia ssania przy początkowej wartości ciśnienia ssania w profilu 10 kPa proces infiltracji dla zbocza po lewej stronie doliny powoduje niewielkie zmniejszenie wartości ciśnienia porowego (ryc. 3a), które nie prowadzi do nasycenia profilu. Natomiast obli-

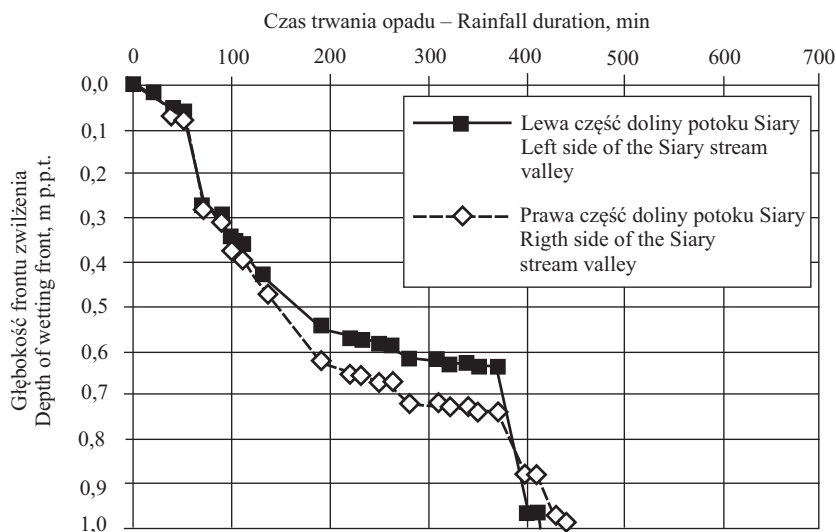


Ryc. 3. Zakres zmian ciśnienia porowego w trakcie trwania opadu (w minutach) określonych modelem Iversona dla fragmentu zbocza po lewej (a) i prawej (b) części doliny potoku Siary w miejscowości Owczary

Fig. 3. Changes of pore water pressure obtained using Iverson's model during rainfall (in minutes) for right (a) and left (b) part of the Siary stream valley in Owczary

czenia infiltracji dla zbocza w prawej części doliny wykazały, że nasycenie profilu do głębokości 0,8 m, czyli maksymalnej głębokości położenia stropu ilów pylistych, występuje w końcowej fazie opadu (ok. godz. 6:40). Nasycenie profilu do głębokości 0,5 m (mięszkość pyłów ilastych w dolnej części strefy odkłucia) ma miejsce nieco wcześniej, ok. godz. 2:30.

Wyniki obliczeń infiltracji uzyskane z obliczeń metodą Green-Ampt (ryc. 4) wskazują, że przebieg procesu infiltracji w obu częściach dolin w warstwach pylistych w początkowej fazie trwania opadu (do ok. 100 min) jest bardzo podobny, co wynika z niskiej intensywności opadu powodującej tym samym, że praktycznie cały opad infiltruje w grunt. Z kolei po tym okresie zauważalne jest, że proces infiltracji przebiega intensywniej w warstwie pyłu ilastego zalegającego w prawej części doliny, co wynika z mniejszego deficytu wody w tym gruncie w stosunku do wielkości deficytu w warstwie pylistej z lewej części doliny. Biorąc jednak pod uwagę, że na zboczu znajdującym się po lewej stronie doliny strop ilów pylistych zalega maksymalnie na głębokości 0,55 m p.p.t., to zawodnienie tej warstwy w procesie infiltracji następuje po ok. 180 min trwania opadu (ok. 22:30). Ponadto w przypadku tej części doliny warstwa pyłu charakteryzuje się wysoką wodoprzepuszczalnością, większą niż intensywność opadu, co sprawia, że prędkość infiltracji w trakcie praktycznie całego opadu jest równoznaczna intensywności opadu. Z kolei w przypadku warstwy pyłu ilastego zalegającej w prawej części doliny, którego wodoprzepuszczalność jest przez dużą część trwania opadu mniejsza od natężenia opadu, znaczna jego część jest transponowana



Ryc. 4. Zakres zmian położenia frontu zwilżenia w trakcie trwania opadu określonych modelem Green-Ampt'a dla fragmentu zbocza po prawej i lewej części doliny potoku Siary w miejscowości Owczary

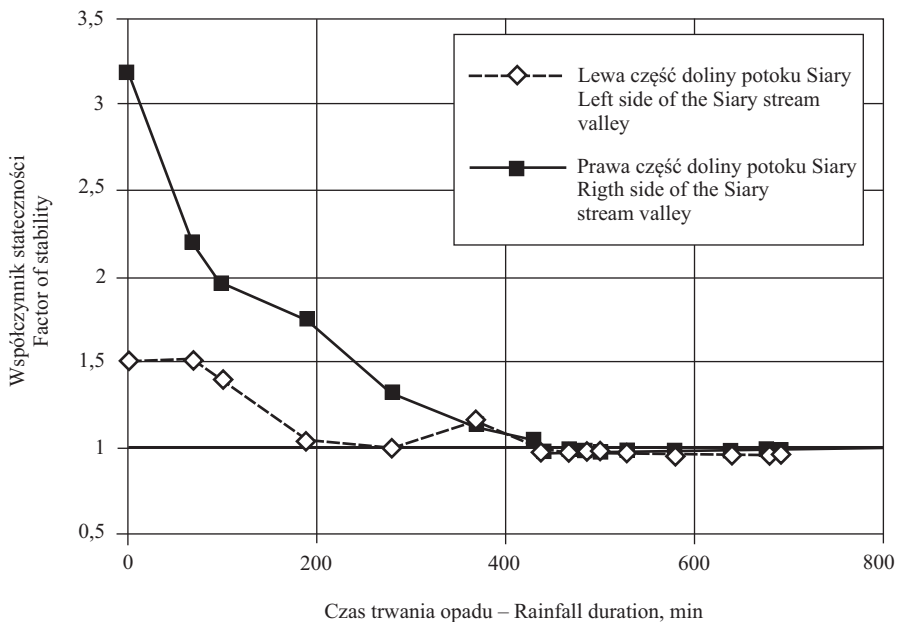
Fig. 4. Theoretical depth of wetting front depth obtained Green-Ampt model during rainfall for right and left parts of Siary stream in Owczary

w spływ powierzchniowy. Obliczona wielkość spływu powierzchniowego dla założonych warunków wilgotnościowych wyniosła 54 mm (ok. 50% całkowitej ilości opadu). Biorąc pod uwagę, że w przypadku zbocza w tej części doliny głębokość położenia stropu ilów pylastych wyniosła maksymalnie 0,8 m, wyniki obliczeń infiltracji metodą Green-Ampta wskazują, że nasycenie powierzchniowej warstwy zbocza nastąpiło po ok. 380 min trwania opadu (ok. godz. 1:30 – por. ryc. 2).

Wyniki obliczeń numerycznych oraz metodą Green-Ampta wykazały zgodnie, że w trakcie analizowanego opadu istniały warunki umożliwiające nasycenie analizowanych fragmentów zboczy. Wyniki różnią się nieco czasem wystąpienia nasycenia warstwy powierzchniowej (pyłu ilastego), przy czym trochę większą prędkość przebiegu procesu infiltracji uzyskano z obliczeń numerycznych. Z kolei wyniki obliczeń modelem Iversona wykazały, że przebieg procesu infiltracji analizowanych fragmentów zboczy jest znacznie wolniejszy niż przy wyżej podanych metodach obliczeniowych, a w przypadku zbocza zlokalizowanego po lewej części doliny analizowany opad nie powoduje istotnych zmian ciśnienia ssania.

W ramach dalszej części prac wykonano obliczenia stateczności. Początkowe wyniki obliczeń wykazały, że wartości współczynnika stateczności analizowanych zboczy nawet w najniekorzystniejszych warunkach rozkładu ciśnienia są większe niż 1,5, a więc istnieje duża rozbieżność pomiędzy wynikami obserwacji terenowych a wynikami obliczeń. Na rozbieżności pomiędzy wynikami modelowania opartymi na parametrach wytrzymałościowych gruntów a wynikami obserwacji zdarzeń rzeczywistych wskazują w swych pracach m.in. Casagli i in. [2006] czy też Zabuski i in. [2009]. Główną przyczyną uzyska-

nych różnic była duża spójność gruntów zlokalizowanych w strefie poślizgu. W związku z tym dla ładu pylastego z lewej części doliny przyjęto, że jego spójność resztkowa jest równa zero, a przeliczona wartość resztkowego kąta tarcia wewnętrznego wyliczona dla zakresu naprężeń do 50 kPa wyniosła $19,1^\circ$. W przypadku jednego z osuwisk prawej części doliny parametry wytrzymałościowe warstwy ładu pylastego przyjęto analogicznie jak w przypadku warstwy z lewej części doliny, a wartość spójności pyłu ilastego zredukowano do 1 kPa. Ponowne wyniki obliczeń stateczności wykazały, że w przypadku analizowanych fragmentów zbocza w lewej części doliny wartość współczynnika stateczności osiąga wartość poniżej 1,00 (ryc. 5) po 280 min trwania opadu (ok. 24:00), a wartość minimalną osiąga po 680 min trwania opadu. Z kolei w przypadku zbocza w prawej części doliny współczynnik stateczności o wartości poniżej 1,0 uzyskano po 440 min trwania opadu (ok. 2:40), przy czym jego minimalna wartość pojawiła się już w 470 min trwania opadu.



Ryc. 5. Wyniki obliczeń stateczności dla zboczy zlokalizowanych po lewej i prawej części doliny potoku Siary w Owczarach

Fig. 5. Results of slope stability calculations obtained for slope in the left and right part of the Siary stream valley in Owczary

PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń infiltracji oraz stateczności wykazały ścisły związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy opadem a powstaniem analizowanych osuwisk. Wykazano, że w trakcie trwania opadu istniały odpowiednie warunki umożliwiające dotarcie infiltrują-

cej wody do warstwy nieprzepuszczalnej, co doprowadziło do powstania zawieszoności wody gruntowej i uruchomienia sił ciśnienia spływowego. Niewątpliwie czynnikiem sprzyjającym temu zjawisku była obecność płytko zalegających warstw iłów, które stwierdzono w obu analizowanych fragmentach doliny potoku Siary.

Zastosowane w pracy metody obliczeń infiltracji: numeryczna, oparta o równanie Richardsa oraz uproszczony model fizyczny Green-Ampt, pomimo różnic w sposobie opisu procesu przepływu wody w strefie niepełnego nasycenia dały podobne wyniki odnośnie do zakresu i przebiegu zmian stanu uwilgotnienia w obrębie analizowanych fragmentów zboczy. Niewątpliwą przewagą metody numerycznej jest jej dokładność oraz możliwość adaptacji w dowolnych warunków gruntowo wodnych. Z kolei metoda Green-Ampt wydaje się bardzo praktyczna, głównie ze względu na niewielki zakres danych potrzebnych do wykonania analiz. Metoda owa wymaga przede wszystkim znajomości wilgotności, porowatości i wodoprzepuszczalności gruntów, które to parametry należą do podstawowych oznaczeń geotechnicznych. Natomiast wyniki obliczeń infiltracji wykonane z wykorzystaniem modelu Iversona wykazały znacznie mniejszy zakres zmian ciśnienia porowego niż ten, który otrzymano z obliczeń numerycznych.

PIŚMIENNICTWO

- Bucała A., 2009. Rola opadów nawalnych w kształtowaniu stoków i koryt w Gorcach na przykładzie zlewni potoków Jaszczce i Jamne. *Przeł. Geogr.* 81(3), 399–418.
- Casagli N., Dapporto S., Ibsen M.L., Tofani V., Vannocci P., 2006. Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th–21st November 2000, in Northern Tuscany. *Landslides* 3, 13–21.
- Crosta G.B., Frantini P., 2008. Preface – Rainfall-Induced landslides and debris flows. *Hydrol. Process.* 22, 473–477.
- Chen C.-Y., Chen T.-C., Yu W.-H., Lin S.-C., 2005. Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide. *Environ. Geol.* 48, 466–479.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill New York, ss. 588.
- Długosz M., 2011. Rola intensywnych opadów burzowych w transformacji rzeźby Karpat (na przykładzie zdarzenia z czerwca 2009 r. na Podhalu). *Przeł. Geogr.* 83(1), 51–68.
- Dziewański J., Wota A.K., Limanówka D., Cebulak E., Michalik S., 2003. *Katastrofalny spływ wodno-gliniasty w Muszynie w lipcu 2002 roku*. Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN Kraków.
- Gorczyca E., 2004. *Przekształcanie stoków fliszowych przez procesy masowe podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny)*. Wyd. Uniwersytetu Jagiellońskiego Kraków, ss. 101.
- Iverson R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour. Res.* 36, 7, 1897–1910.
- Lan H.X., Lee C.F., Zhou C.H., Martin C.D., 2005. Dynamic characteristic analysis of shallow landslides in response to rainfall event using GIS. *Environ. Geol.* 47, 254–267.
- Lumb P., 1975. Slope Failures in Hong Kong. *Quart. J. Engin. Geol.* 8, 31–65.
- Morrissey M.M., Wiczonek G.F., Morgan B.A., 2008. A comparative analysis of simulated and observed landslide locations triggered by Hurricane Camille in Nelson County, Virginia. *Hydrol. Process.* 22, 524–531.
- PN-EN ISO 14688-2. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. PKN Warszawa 2006.
- PN-EN ISO 17892-10. *Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania*. PKN Warszawa 2004.

- Starkel L., 2011. Złożoność czasowa i przestrzenna opadów ekstremalnych – ich efekty geomorfologiczne i drogi przeciwdziałania im. *Landform Anal.* 15, 65–80.
- Thiel K. (red.), 1989. Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku. Wyd. IBW PAN Gdańsk.
- Wang F.W., Sassa K., Wang G., 2002. Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan. *Engin. Geol.* 63, 169–185.
- Warchoń M., 2007. Architektura depozycyjna warstw magurskich w strefie Siar na południe od Gorlic (płaszczyzna magurska, polskie Karpaty zewnętrzne). *Przeł. Geol.* 55, 7, 601–610.
- 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). *Geol. Quart.* 53(3), 317–332.
- Ziętara T., 1968. Rola gwałtownych ulew i powodzi w modelowaniu rzeźby Beskidów. *Pr. Geogr.* 60. Wyd. Geologiczne Warszawa.
- Zydrón T., Zgoda J., 2012. Wpływ wilgotności na właściwości wytrzymałościowe gruntów z obszaru Karpackiego. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 11(2), 75–84.
- Zydrón T., Zaleski T., 2013. Analiza porównawcza wybranych funkcji pedotransferu do określenia właściwości retencyjnych gruntów na przykładzie utworów pochodzących z obszarów osuwiskowych. *Inżyn. Morska Geotech.* 1, 36–42.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 18.12.2013