

UWARUNKOWANIA STATECZNOŚCI POKRYW STOKOWYCH NA PRZYKŁADZIE ZBOCZA Z OKOLIC MIEJSCOWOŚCI PŁAWNA K. CIĘŻKOWIC (POGÓRZE CIĘŻKOWICKIE)

STABILITY ANALYSIS OF SLOPE COVER-BEDS – A CASE STUDY IN PŁAWNA NEAR CIĘŻKOWICE (CIĘŻKOWICKIE FOOTHILLS)

Tymoteusz Zydróż,
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Damian Durałek
Eko Wod SA, Nowy Sącz

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analiz stateczności fragmentu zbocza Piekarówka w miejscowości Pławna k. Ciężkowic, gdzie w czerwcu 2010 roku powstał spływ błotny, a koluwium osuwiskowe zatrzymało się na znajdujących poniżej budynkach gospodarczych. W ramach pracy przeprowadzono badania terenowe, laboratoryjne oraz wykonano zintegrowane obliczenia infiltracji i stateczności. Badania terenowe i laboratoryjne wykazały, że osuwisko objęło swym zasięgiem powierzchnią warstwę zbocza, którą stanowiły grunty średnio i zwięzłe spoiste charakteryzujące się słabą wodoprzepuszczalnością. Obliczenia infiltracji przeprowadzone za pomocą modelu Montrasio-Valentino oraz Green-Ampta dały zróżnicowane pod względem jakościowym i ilościowym wyniki opisu przebiegu procesu infiltracji w gruncie, przy czym w analizowanym przypadku bardziej niekorzystne wyniki obliczeń uzyskano, stosując model Montrasio-Valentino. Obliczenia stateczności wykazały, że czynnikiem niezbędnym do uruchomienia analizowanego osuwiska było nasycenie profilu gruntowego wodą oraz uruchomienie sił ciśnienia spływowego.

Abstract. The analysis of slope stability of slope Piekarówka localized in Pławna near Ciężkowice is presented in the paper. In the slope in June of 2010 as a consequence of

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Tymoteusz Zydróż, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl; Damian Durałek, Eko Wod S.A., ul. Śniadeckich 14, 33-302 Nowy Sącz, e-mail: damian_duralek@o2.pl.

intensive rainfall was induced mud flow which was stopped on buildings located below the landslide. In the frame of investigation were done in-situ, laboratory tests and were done integrated infiltration and slope stability calculations. Field and laboratory tests revealed that the landslide movement was limited to superficial layer of slope, which was built of cohesive soils of low permeability. Infiltration calculations made using Montrasio-Valentino and Green-Ampt models gave varied due to quality as well as quantity, results of progress of infiltration process. In considered case more negative calculation results were determined using Montrasio-Valentino model. Stability analysis revealed that a necessary condition for the initiation of instability process was saturation of superficial slope layer and increase of seepage forces.

Słowa kluczowe: spływ błotny, stateczność, Pogórze Ciężkowickie,

Key words: mud flow, shear strength, Ciężkowickie Foothills

WSTĘP

Osuwiska stanowią formy rzeźby terenu powstałe w wyniku przemieszczenia się materiału skalnego w dół stoku wzdłuż powierzchni poślizgu na skutek działania sił grawitacji. Procesy te odgrywają dużą rolę w tworzeniu rzeźby obszarów górskich na całym świecie, często stwarzając zagrożenie dla życia i działalności gospodarczej człowieka [Długosz 2011]. W Polsce obszarem szczególnie narażonym na ruchy osuwiskowe są Karpaty Zewnętrzne, czemu sprzyjają charakter ich rzeźby, fliszowa budowa geologiczna, obecność dużej miąższości pokryw zwietrzelinowych podatnych na procesy osuwiskowe oraz budowa tektoniczna [Bednarczyk 2007]. Jak podaje Margielewski [2008], wśród obecnie występujących ruchów masowych przeważają płytkie osuwiska powstałe w utworach pokrywowych lub skalno-zwietrzelinowych, co w dużej mierze stanowi efekt zmian zagospodarowania terenów przez człowieka, czego skutkiem są zmiany sposobu krążenia wody w systemie stokowym z głębokiego na powierzchniowy i podpowierzchniowy. Stąd też z punktu widzenia oceny podatności zboczy na ruchy masowe istotne znaczenie ma przebieg procesu infiltracji wody opadowej w systemie stokowym oraz wpływ tego procesu na stateczność zboczy. Przedmiotem analiz w niniejszej pracy był fragment jednego ze zboczy (ryc. 1a) położonego na terenie Pogórza Ciężkowickiego, na którym w efekcie katastrofalnego opadu w okresie 3–4 czerwca 2010 roku uruchomiony został spływ błotny.

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Analizowany teren stanowił północno-wschodni fragment zbocza Piekarówka położonego nad doliną rzeki Białej w miejscowości Pławna k. Ciężkowic, gdzie zasadnicze pokrycie terenu stanowią łąki oraz las, przy czym powstałe osuwisko wystąpiło na środkowej części stoku, na łące. Poniżej osuwiska, w odległości ok. 80 m zlokalizowany jest dom mieszkalny oraz budynki gospodarskie (ryc. 1b), na które spłynął materiał koluwium. Bezpośrednim czynnikiem inicjującym powstanie osuwiska był długotrwały i intensywny opad, którego wysokość, odnotowana na położonym w pobliżu posterunku meteorologicznym IMiGW w miejscowości Jastrzębia, wyniosła 88,8 mm. Dodatkowo

w okresie poprzedzającym powstanie zsuwu – chodzi o maj i początek czerwca 2010 roku – występowały opady o sumarycznej wysokości 302,5 mm.

Według informacji zamieszczonych na szczegółowej mapie geologicznej Polski [Cieszkowski i in. 1987] obszar osuwiska zlokalizowany jest w strefie występowania trzeciorzędowych piaskowców cienko- i średnioławicowych warstw krośnieńskich dolnych serii śląskiej, które lokalnie zawierają wkładki oligoceńskich wapieni jasielskich. Warstwy te zapadają się w kierunku południowo-wschodnim, a ich bieg jest mniej więcej prostopadły względem przebiegu spadku zbocza. W trakcie wizji terenowej nie stwierdzono obecności odsłoneń skalnych w pobliżu osuwiska, natomiast stwierdzono, że zasadniczo materiał pokrywowy stoku stanowią utwory spoiste ilasto-pylaste, a w strefie odklucia stwierdzono również pojedyncze okruchy piaskowców.

a)



b)



Ryc. 1. Ogólny widok na badane osuwisko (a) oraz widok z niszy osuwiskowej na fragment doliny rzeki Białej Tarnowskiej (b)

Fig. 1. General view of the investigated landslide (a) and the view from the crown of the landslide on the valley of Biała Tarnowska River (b)

ZAKRES I METODYKA PRACY

W ramach badań terenowych dokonano rozpoznania budowy geologicznej terenu osuwiska, opierając się na wierceniach penetracyjnych i wkopach badawczych, dokonano obmiaru geodezyjnego terenu, pobrano próbki gruntów do badań oraz przeprowadzono polowe pomiary współczynnika filtracji (metoda infiltrometru dwupięścieniowego). W ramach prac laboratoryjnych wykonano oznaczenie składu granulometrycznego, granic konsystencji oraz wytrzymałości na ścinanie próbek gruntu. Oznaczanie składu granulometrycznego odbyło się na podstawie analizy sitowej oraz areometrycznej. Granice płynności wyznaczono metodą Cassagrande'a, natomiast badania wytrzymałości na ścinanie zrealizowano metodą bezpośredniego ścinania na próbkach o wymiarach $60 \times 60 \times 19$ mm. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w trzech seriach badań. W pierwszej próbki gruntu po umieszczeniu w aparacie

były zalewane wodą, poddawane 90-minutowej konsolidacji przy naprężeniu 150 kPa, a następnie ścinane z prędkością $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, przy zastosowaniu naprężeń 50, 100 i 150 kPa. Przyjęto, że niska prędkość ścinania umożliwia swobodny odpływ wody, co według PKN-CEN ISO/TS 17892-10 można uznać za badanie prowadzone w zakresie naprężeń efektywnych. W drugiej serii badań badano próbki o wilgotności naturalnej, które ścinane były z prędkością $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ przy naprężeniach 50, 100 i 150 kPa celem określenia wytrzymałości na ścinanie gruntów w stanie niepełnego nasycenia. W ostatniej serii badano próbki o wilgotności zbliżonej do oraz większej od naturalnej. Czas konsolidacji w tym przypadku wynosił 2 min, a prędkość ścinania $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ przy naprężeniu normalnym 50, 100 i 150 kPa. Celem tej serii badań było określenie wytrzymałości gruntu w warunkach ograniczonego odpływu wody. Dodatkowo przeprowadzono również badanie wytrzymałości na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania metodą CIU wg wskazówek podanych w BS 1377:1990 na próbkach o średnicy 50 mm i wysokości 100 mm, stosując etapowe nasycania próbki gruntu z zastosowaniem ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*), aż do momentu uzyskania wartości wskaźnika Skemptona co najmniej 0,95. Prędkość ściskania próbek ustalano na podstawie przebiegu procesu konsolidacji.

W dalszej części pracy przeprowadzono obliczenia stateczności zbocza, uwzględniające oddziaływanie opadu i procesu infiltracji na stateczność fragmentu zbocza objętego osuwiskiem. W celu określenia możliwości nasycenia zbocza w obrębie analizowanego osuwiska dokonano obliczeń infiltracji z wykorzystaniem modelu Green-Ampta [Green i Ampt 1911], stanowiącego uproszczony fizyczny opis przepływu wody w strefie niepełnego nasycenia, oraz zastosowano model dystrybucji wody w ośrodku gruntowym zaproponowany przez Montrasio i Valentino [2008]. Model pierwszy służy zasadniczo do określania chłonności gruntu f (potencjalnej prędkości infiltracji):

$$f = \frac{dF}{dt} = k \left(1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f}{F} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- $\frac{dF}{dt}$ – zmiana akumulacji infiltracji w czasie,
- ψ_f – wysokość ssania gruntu u podstawy frontu zwilżenia,
- θ_i – początkowa wilgotność objętościowa gruntu,
- θ_s – wilgotność objętościowa gruntu przy pełnym nasyceniu,
- k – współczynnik filtracji gruntu,
- F – akumulacja infiltracji, w podstawowej formie może być obliczana ze wzoru:

$$F = k_s \cdot t + (\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f \cdot \ln \left| \frac{(\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f + F}{(\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_f} \right| \quad (2)$$

Obliczenia infiltracji z zastosowaniem modelu Green-Ampta polegają na określeniu wartości akumulacji infiltracji w dowolnym momencie trwania opadu oraz określeniu na

tej podstawie chłonności gruntu. Porównanie chłonności gruntu z intensywnością opadu umożliwi określenie, jaka ilość opadu jest transponowana w spływ powierzchniowy. Ze względu na uwikłaną postać równania (2) określenie wielkości wody zakumulowanej w profilu gruntowym dokonuje się metodą kolejnych przybliżeń. Głębokość położenia frontu zwilżenia (z_f) można obliczyć za pomocą formuły:

$$z_f = \frac{(\theta_s - \theta_i)}{F} \quad (3)$$

Nieco inny sposób opisu przebiegu procesu infiltracji zaproponowali Montrasio i Valentino, którzy model swój oparli na wynikach obserwacji ruchów masowych podczas powodzi w Piemontie w 1994 roku. Autorzy ci stwierdzili m.in., że część masy gruntowej, która ulega osunięciu, na ogół charakteryzuje się pewną niejednorodnością ze względu na obecność przewodów spowodowanych np. przez aktywność różnych żywych organizmów, a powierzchnia poślizgu nie jest umiejscowiona w kontakcie pomiędzy gruntem i podłożem skalnym, ale znajduje się bliżej powierzchniowych warstw gruntu. Montrasio i Valentino założyli, że infiltrująca pionowo w gruncie woda opadowa bardzo łatwo dociera siecią makroporów do głębszych części profilu, gdzie zaczyna płynąć w różnych kierunkach siecią mikroporów. Infiltracja wody poprzez mikropory zlokalizowane w strefie obecności makroporów powoduje nasycenie otaczającej strefy profilu. W warunkach dłuższej trwającego opadu proces infiltracji powoduje nasycania coraz większych obszarów w profilu gruntowym. Proces osuwania rozpoczyna się, gdy zostaje utworzona stosunkowo szeroka ciągła warstwa profilu nasyczonego wodą, a rozwój osuwiska może być bardziej lub mniej katastroficzny, w zależności od grubości tej warstwy. Wielkość nawodnienia profilu gruntowego można określać za pomocą formuły:

$$m(t) = \sum \exp\left(K \cdot \frac{\sin \alpha}{n \cdot (1 - S_r)}\right) \cdot \frac{h}{n \cdot H \cdot (1 - S_r)} \quad (4)$$

gdzie:

- m – stosunek wysokości nasyczonej strefy w gruncie do jego miąższości,
- n – porowatość gruntu,
- S_r – stopień wilgotności gruntu,
- K – zdolność drenażowa gruntu,
- t – czas,
- H – głębokość płaszczyzny poślizgu,
- α – kąt nachylenia zbocza/płaszczyzny poślizgu,
- h – opad w czasie t .

Podstawowym problemem w modelu jest dobór wartości zdolności drenażowej gruntu. Montrasio i Valentino [2008] podają, że parametr ten można określać drogą analizy wstecznej. Z kolei studium wpływu tego parametru na wyniki obliczeń infiltracji [Zydroń i Cholewa 2013] wykazały, że zdolność drenażową gruntu można przyjmować jako pomniejszoną co najmniej siedmiokrotnie wartość współczynnika filtracji gruntu.

Wyniki obliczeń infiltracji otrzymane z powyższych modeli mogą być wykorzystane do obliczeń stateczności, przy czym ze względu na to, że uwzględniają one pionowy przepływ wody w gruncie, integruje się je z jednowymiarowym modelem zbocza. W przypadku modelu Green-Ampta zaproponowano kilka sposobów opisu stateczności zboczy w zależności od relacji intensywności opadu do współczynnika filtracji gruntu. W przypadku występowania intensywnych opadów, przewyższających wodoprzepuszczalność gruntów oraz w warunkach głęboko zalegającego zwierciadła wody gruntowej może dochodzić do powstania zawieszoności zwierciadła wody gruntowej, a stateczność zbocza można opisać następująco [Raharjo i in. 1995]:

$$FS = \frac{c' + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot z_f \cdot \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi'}{\gamma_s \cdot z_f \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (5)$$

gdzie:

- c' – efektywna spójność gruntu,
- ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu,
- γ_s – ciężar objętościowy gruntu przy pełnym nasyceniu,
- γ_w – ciężar objętościowy wody,
- α, z_f – jak wyżej.

W przypadku nienasyconej strefy profilu gruntowego stateczność zbocza można opisywać zgodnie z propozycją Crosty [1998]:

$$FS = \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{c' + \gamma_w \cdot \Psi_f}{\gamma \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (6)$$

gdzie:

- z – głębokość,
- γ – ciężar objętościowy gruntu,
- $\phi', c', \Psi_f, \alpha$ – jak wyżej.

W modelu Montrasio-Valentino przy określaniu stateczności ośrodka gruntowego nienasyconego uwzględnia się również wpływ sił ciśnienia ssania na wytrzymałość gruntu na ścinanie, przy czym równanie jednowymiarowego modelu zbocza Skeptona-McLory zostało rozbudowane do następującej postaci:

$$FS = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi' \cdot [\Gamma + m \cdot (n_w - 1)] + C' \cdot \Omega}{\Gamma + m \cdot n_w} \quad (7)$$

gdzie:

$$\Gamma = \rho_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r \quad (8)$$

$$n_w = n \cdot (1 - S_r) \quad (9)$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin 2\beta \cdot H \cdot \gamma_w} \quad (10)$$

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

gdzie:

c_ψ – spójność pozorna gruntu,

Δs – jednostkowa długość paska,

A, λ, α – parametry dopasowania modelu (wg autorów dla utworów pylastych można przyjąć $A = 80, \lambda = 0,4$, a wartość $\alpha = 3,4$),

ϕ', c', m – jw.

W powyższym równaniu dyskusyjny jest dobór parametrów efektywnych gruntów, gdyż model uwzględnia przypadek występowania w gruncie sił ciśnienia spływowego, a wartości ciężaru gruntu w liczniku i mianowniku równania uwzględniają siłę wyporu. Zgodnie ze wskazówkami podanymi w pracy Sozańskiego [1977] parametry wytrzymałościowe gruntu w niniejszej pracy interpretowano jako całkowite, uzyskane w warunkach ograniczonego odpływu wody, którym odpowiadało ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania przy dużej prędkości ($1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

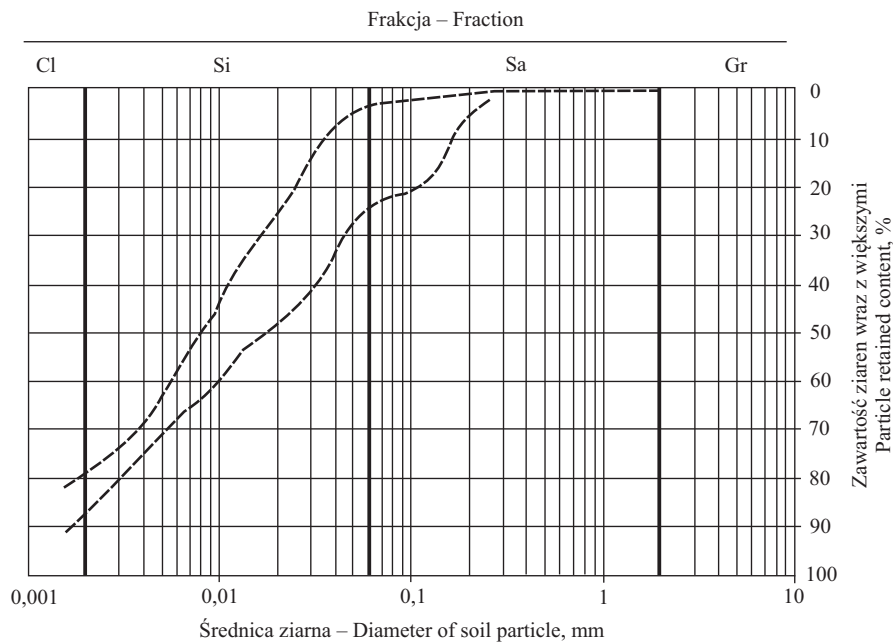
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki pomiarów geodezyjnych wykazały, że długość osuwiska wynosi 69,00 m przy szerokości 19,3 m, a jego przeciętna głębokość to ok. 1,5 m, maksymalnie 1,6 m. Całkowita wysokość osuwiska wyniosła 25,8 m. Średnie nachylenie stoku w miejscu powstania zsuwu wyniosło 22° , a kształt zbrocza można opisać jako planarny, w profilu zaś prostoliniowy. Wiercenia penetracyjne zostały przeprowadzone w pięciu punktach do głębokości ponad 3,0 m p.p.t. Badania te wykazały, że analizowany fragment zbrocza jest w zasadzie jednorodny pod względem rodzaju pokrywy stokowej. W dwóch otworach wiertniczych zlokalizowano również strop podłoża skalnego, który określono na 1,25 m p.p.t. w strefie położonej powyżej osuwiska oraz ok. 2,2 m p.p.t. w strefie położonej w górnej części niszy osuwiskowej.

Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych potwierdziły wyniki wstępnej wizji terenowej wykazując, że w strefie osuwiska zalegają grunty o bardzo zbliżonym uziarnieniu (ryc. 2), a różnice uzyskanych wartości granic konsystencji (tab. 1) związane są ze zróżnicowaną zawartością frakcji piaskowej. Pod względem wartości wskaźnika plastyczności grunty te można scharakteryzować jako utwory średnio i związła spoiste o wysokiej zawartości węgla wapnia. Polowe pomiary wodoprzepuszczalności (tab. 1) przeprowadzone w trzech wkopach zlokalizowanych w górnej i środkowej części osuwiska wykazały, że badane grunty charakteryzują się słabą przepuszczalnością w zakresie od $4,0 \cdot 10^{-6}$ do $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości wilgotności naturalnej oznaczone w terenie mieściły się w dość szerokim przedziale i wynikały ze zmiennych warunków atmos-

Tabela 1. Właściwości geotechniczne badanych gruntów
Table 1. Geotechnical parameters of tested soils

Parametr – Parameter	Jednostki Units	Zakres wartości Range of values	Średnia Average value
Zawartość frakcji – Fraction content			
• piaskowa – sand (2–0,063 mm)	%	3,0–23,0	15,1
• pyłowa – silt (0,063–0,002 mm)	%	56,5–78,4	66,9
• ilowa – clay (<0,002 mm)	%	13,2–20,8	18,0
Nazwa wg – Name acc. to PN-EN ISO 14688-2		ClSi, siCl, sasiCl	–
Gęstość objętościowa – Bulk density	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,79–1,87	1,85
Wilgotność – Moisture content	%	19,8–29,1	23,0
Gęstość objętościowa szkieletu – Dry density	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,45–1,55	1,49
Granica plastyczności – Plastic limit	%	17,3–22,6	20,7
Granica płynności – Liquid limit	%	34,3–49,1	42,3
Wskaźnik plastyczności – Plasticity index	%	17,0–26,5	21,6
Współczynnik filtracji Permeability coefficient	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$ – $1,4 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$



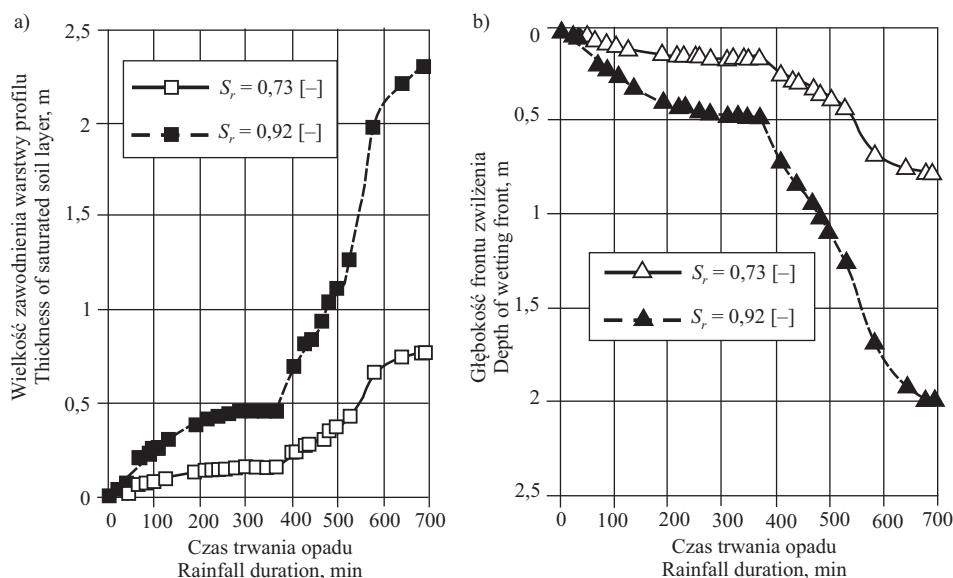
Ryc. 2. Zakres uziarnienia badanych gruntów ze zbocza Piekarówka

Fig. 2. Grain-size distribution range of soils originated from Piekarówka slope

ferycznych w trakcie badań. Początkowo wartości tego parametru wynosiły ok. 21%, natomiast po kilkudziesięciominutowym opadzie wilgotność gruntu wzrosła do 25%, nie wykazując różnicowania zależnie od głębokości poboru próbek. Część próbek charakteryzowała się wilgotnością 28–29% i były to próbki pobrane tuż po okresie opadowym z rynny osuwiskowej.

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie wykonanych metodą bezpośredniego ścinania dla próbek o wilgotności naturalnej wykazały, że grunty charakteryzują się wysokimi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności zawierającymi się w przedziałach odpowiednio 23,1–31,9° oraz 18,4–38,4 kPa. Z kolei z badań przeprowadzonych na próbkach nasyconych ścinanych z prędkością 0,05 mm · min⁻¹, odpowiadających wg PKN-CEN ISO/TS 17892-10 badaniom przy naprężeniach efektywnych, uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego w zakresie 25,8–31,1° oraz spójności 6,4–20,3 kPa. Nieco inny zakres wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskano z badań wykonywanych dla próbek ścinanych z prędkością 1,0 mm · min⁻¹. Przy wilgotności gruntu w zakresie 28–33% uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego w przedziale 4,4–15,3° oraz spójności 6,6–12,4 kPa. Z kolei badania trójosiowe wykazały, że najbardziej niekorzystne wartości parametrów wytrzymałościowych, uzyskane przy kryterium zniszczenia odpowiadającym maksymalnej wartości ciśnienia porowego, wyniosły 32,1° oraz 7,3 kPa odpowiednio w przypadku kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Należy zwrócić uwagę, że wartości parametrów wytrzymałościowych otrzymane z badania trójosiowego były bardzo zbliżone do wyników badań bezpośredniego ścinania przy prędkości 0,05 mm · min⁻¹, gdzie dla jednej z próbek uzyskano kąt tarcia wewnętrznego 31,1° przy spójności 6,4 kPa.

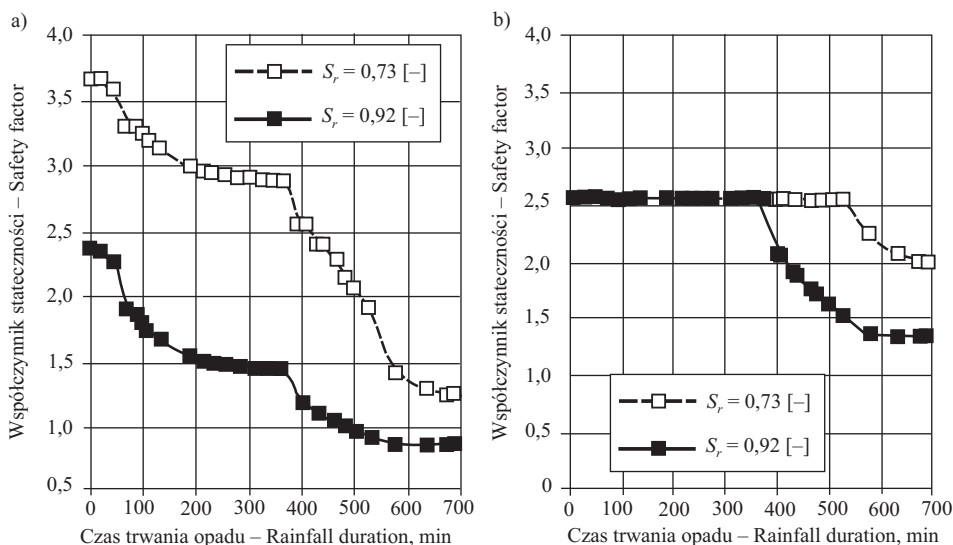
W dalszej części pracy otrzymane wyniki badań wykorzystano do obliczeń infiltracji oraz stateczności. W obliczeniach infiltracji przyjęto dwie wyjściowe wartości wilgotności gruntu, odpowiadające skrajnym wartościom tego parametru określonym w trakcie badań terenowych. Do obliczeń przyjęto, że wielkość opadu inicjująca ruch osuwiska, zgodnie z informacją otrzymaną od IMiGW, wyniosła 88,8 mm, natomiast charakter i czas trwania opadu jest analogiczny do opadu odnotowanego w tym czasie na Stacji Naukowej IGiPZ w Szymbarku, który przedstawiony był m.in. w pracy Zydronia i Demczuka [2013]. Do obliczeń przyjęto również, że wodoprzepuszczalność profilu gruntowego odpowiada najmniejszej wartości współczynnika filtracji podanej w tabeli 1. Wyniki obliczeń infiltracji uzyskanych za pomocą modeli Montrasio-Valentino oraz Green-Ampta (ryc. 3) wykazują różnice zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym. W modelu Montrasio-Valentino infiltracja powoduje wzrost przewodnienia warstwy profilu gruntowego w strefie występowania mikro- i makroporów, a w związku z tym efekt działania procesu infiltracji wydaje się być analogiczny jak w przypadku wzrostu poziomu zwierciadła wody gruntowej. Z kolei w modelu Green-Ampta proces infiltracji wody opadowej prowadzi do tworzenia się frontu zwilżenia w powierzchniowej części profilu gruntowego, a ciągły opad powoduje sukcesywne przemieszczanie się frontu w głąb gruntu. Porównując wyniki zmian przewodnienia/położenia frontu zwilżenia, można zwrócić uwagę, że im większy początkowy stopień przewodnienia profilu gruntowego tym bardziej intensywnie przebiega proces infiltracji. W przypadku obu modeli wykazano, że początkowe uwilgotnienie gruntu odpowiadające stopniowi wilgotności $S_r = 0,73$ było niewystarczające do nasycenia warstwy gruntu o miąższości 1,6 m, która



Ryc. 3. Wyniki obliczeń infiltracji według modelu Montrasio-Valentino (a) oraz Grern-Ampta (b)
 Fig. 3. Results of infiltration calculations according to Montrasio-Valentino (a) and Green-Ampt model (b)

odpowiadała maksymalnej głębokości położenia powierzchni poślizgu. Można również zwrócić uwagę, że bardziej intensywny przebieg procesu infiltracji, wyrażony poprzez miąższość strefy zawodnienia, uzyskano z modelu Montrasio-Valentino, co wynikało z faktu, że model Green-Ampta stosowany jest zasadniczo do określania wielkości spływu powierzchniowego. Obliczenia wykazały, że przy początkowych wartościach stopnia wilgotności gruntu $S_r = 0,73$ oraz $0,92$ wielkość spływu powierzchniowego wyniosła odpowiednio 3,8 oraz 12,6 mm.

Wyniki obliczeń stateczności wykazały, że wraz z zawodnieniem profilu gruntowego (ryc. 4a) czy też wraz ze zmianą głębokości położenia frontu zwilżenia (ryc. 4b) następuje zmniejszenie się wartości współczynnika stateczności. Bardziej niekorzystne wyniki obliczeń uzyskano, rozpatrując warunki równowagi w zakresie naprężeń całkowitych. W przypadku metody Montrasio-Valentino (ryc. 4a) minimalna wartość współczynnika stateczności wyniosła 0,87, przy czym warunkiem koniecznym uzyskania granicznej wartości współczynnika stateczności ($FS = 1,0$) było prawie całkowite zawodnienie profilu gruntowego (por. ryc. 3a i 4a) oraz uruchomienie działania sił ciśnienia spływowego. Nieco inaczej kształtowały się wyniki obliczeń stateczności w zakresie naprężeń efektywnych, gdzie minimalna wartość współczynnika stateczności wyniosła 1,35 (ryc. 4b).



Ryc. 4. Wyniki obliczeń stateczności otrzymanych w oparciu o model infiltracji Montrasio-Valentino (a) oraz Green-Ampt (b)

Fig. 4. Results of slope stability calculations based on infiltration calculations using Montrasio-Valentino (a) and Green-Ampt model (b)

PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników badań i ich analizy stwierdzono, że analizowane osuwisko stanowił sływ błotny, mający w początkowej fazie charakter zsuwu translacyjnego obejmującego swym zasięgiem pokrywę stokową zbocza, którą stanowiły średnio i związane spoiste grunty o słabej wodoprzepuszczalności. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie wykazały, że grunty te przy dużej wilgotności w warunkach szybkiego przyrostu obciążeń i ograniczonej możliwości odpływu wody charakteryzują się niską wytrzymałością na ścinanie. Obliczenia stateczności wykazały, że powstanie osuwiska było efektem intensywnych opadów deszczu, a warunek niezbędny do jego zainicjowania stanowiło nasycenie pokrywy stokowej oraz uruchomienie działania sił ciśnienia sływowego. Z kolei wyniki obliczeń infiltracji wskazały, że czynnikiem niezbędnym do nasycenia profilu gruntowego musiało być wysokie uwilgotnienie pokrywy stokowej w okresie poprzedzającym wystąpienie analizowanego opadu. Porównanie wyników obliczeń za pomocą modeli Montrasio-Valentino oraz Green-Ampt wykazało, że w odmienny sposób ujmują przebieg procesu nasycania profilu gruntowego. W modelu Montrasio-Valentino zakłada się, że całość opadu, niezależnie od jego intensywności, infiltruje w podłoże – spowodowało to, że gdy chodzi o stateczność zbocza, owa metoda dała w analizowanym przypadku bardziej niekorzystne wyniki obliczeń niż model Green-Ampt, w którym dystrybucja wody opadowej uwzględnia zarówno infiltrację wody w grunt, jak i sływ powierzchniowy. Dlatego z punktu widzenia potrzeb modelowania

stateczności zboczy metoda Montrasio-Valentino wydaje się być szczególnie przydatna w przypadku, gdy pokrywy stokowe charakteryzują się dużą wodoprzepuszczalnością lub też występuje w nich intensywne życie biologiczne, które prowadzi do powstawania uprzywilejowanych dróg filtracji.

PIŚMIENNICTWO

- Bednarczyk Z., 2007. Badania geologiczno-inżynierskie karpackich osuwisk fliszowych w rejonie Gorlic (Beskid Niski). *Geologos* 11, 333–345.
- BS 1377, 1990. British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes. Part 8. Shear strength tests (effective stress). British Standards Institution.
- Cieszkowski M., Koszarski A., Leszczyński S., Michalik M., Radomski A., Szulc J., 1987. Szczegółowa mapa geologiczna Polski. Arkusz Ciężkowice. PIG Warszawa.
- Crosta G., 1998. Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environ. Geol.* 35(2–3), 131–145.
- Długosz M., 2011. Podatność stoków na osuwanie w Polskich Karpatach Fliszowych. Wyd. IGiPZ PAN Warszawa.
- 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.
- Margielewski W., 2008. Wpływ ruchów masowych na współczesną ewolucję rzeźby Karpat fliszowych. [W:] L. Starkel, A. Kostrzewski, A. Kotarba, K. Krzemień (red.). *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. 4, 69–79.
- Montrasio L., Valentino R., 2008. A model for triggering mechanism of shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 8, 1149–1159.
- PN-EN ISO 14688-2, 2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-10. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- Rahardjo H., Lim T.T., Chang M.F., Fredlund D.G., 1995. Shear strength characteristics of a residual soil. *Canad. Geotech. J.* 32, 60–77.
- Sozański J., 1977. Stateczność wykopów, hałd i nasypów. Wyd. Śląsk Katowice.
- Zydroń T., Cholewa M., 2013. Analiza stateczności pokryw stokowych na przykładzie zbocza z okolic Siar k. Gorlic. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiejs.* I(1), 73–87.
- Zydroń T., Demczuk P., 2013. Analiza ruchów masowych wywołanych ulewnym opadem na przykładzie osuwisk w Owczarach k. Gorlic. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiecetus* 12(4), 107–118.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 24.03.2014