

Jacek STANISZ
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30
Zenon PILECKI

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN
30-950 Kraków, ul. Wybickiego 7,
Henryk WOŹNIAK
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2012

WYBRANE ZAGADNIENIA NUMERYCZNEJ ANALIZY STATECZNOŚCI OSUWISKA W SWOSZOWICACH

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia numerycznej analizy stateczności osuwiska w Swoszowicach związane z oceną położenia i rozwoju powierzchni poślizgu. Rozważano dwa modele: podstawowy, trójwarstwowy oraz zmodyfikowany, dwuwarstwowy opracowane na podstawie podłużnego przekroju geologiczno-inżynierskiego wzdłuż osi osuwiska. W wyniku obliczeń otrzymano izoliniowe przekroje prędkości odkształcenia stycznego, pole wektorów prędkości przemieszczenia cząstek gruntu oraz wartości globalnych współczynników bezpieczeństwa.

W modelu podstawowym w stanie suchym współczynnik bezpieczeństwa wynosił 1,32, a w stanie w pełni zawodnionym zmniejszył się do 1,1. W modelu zmodyfikowanym dwuwarstwowym współczynnik ten wynosił 2,42. Podobnie najmniej korzystne wartości prędkości odkształcenia stycznego uzyskano dla podstawowego modelu zawodnionego. Wyniki te pokazały, że ruch osuwiskowy dokonał się wzdłuż płytszej powierzchni poślizgu. Powierzchnia ta rozwinęła się w koronie drogi oraz między warstwami zwięzłej gliny pylastej a iłami pylastymi na głębokości od 3,8 do 6,8 m.

W pracy podkreślono możliwość uaktywnienia się osuwiska wzdłuż głębszej powierzchni poślizgu w przypadku osłabienia właściwości wytrzymałościowych ośrodka. Niewątpliwie negatywny wpływ na stateczność osuwiska w Swoszowicach ma zawodnienie ośrodka gruntowego.

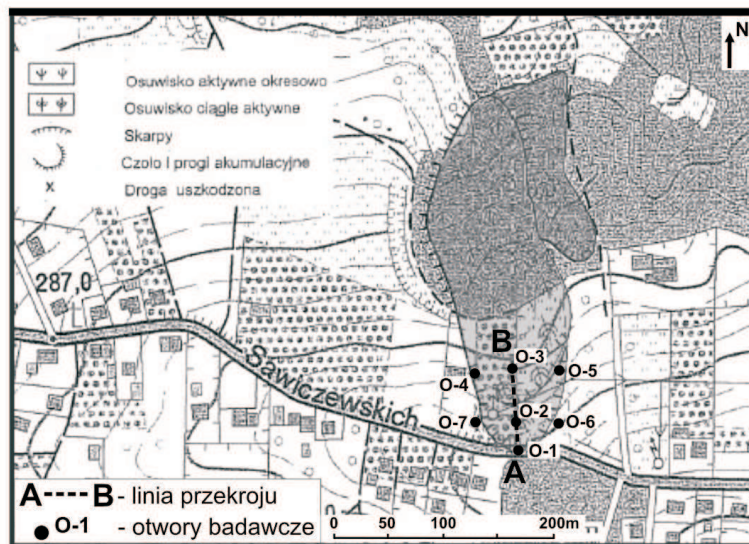
SŁOWA KLUCZOWE

Osuwisko, analiza numeryczna, stateczność zbcza, powierzchnia poślizgu, Swoszowice, Kraków

* * *

WPROWADZENIE

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia analizy numerycznej stateczności osuwiska położonego w rejonie ul. Sawiczewskich w dzielnicy Swoszowice w południowej części Krakowa (rys. 1). Osuwisko znajduje się na północnym stoku wzniesienia w sąsiedztwie Fortu Wróblewski. Teren zaliczany jest do Wyżyny (Wysoczyzny) Krakowskiej, która jest częścią Wyżyny Małopolskiej wchodzącej w skład prowincji Wyżyny Polskie (Starkel 1972). Obszar ten zaliczany jest do jednostki zgłobickiej (wielickiej) zapadliska przedkarpackiego. W odległości kilku kilometrów na południe od osuwiska występują utwory fliszowe Karpat Zewnętrznych. W podłożu występują osady miocenu (baden) wykształcone w postaci gruboławicowych ilów z wkładkami margli, tufitów i gipsów warstw chodenickich z lokalnymi przewarstwieniami piasków bogucickich. Głębiej zalegają wapienie górnej jury. Cały obszar przykrywają osady czwartorzędowe, na które składają się głównie gliny pylaste, zwięzłe i piaszczyste. Wody podziemne występują w osadach holoceńsko-plejstoceniowych.



Rys. 1. Zasięg osuwiska przy ulicy Sawiczewskich, w dzielnicy Swoszowice w Krakowie według Wójcika (2010)

Fig. 1. The range of landslide near Sawiczewskich street in the Swoszowice district in the Cracow (Wojcik 2010)

Omawiane osuwisko jest częścią obszaru skłonnego do osuwania się, które zostało udokumentowane wiosną 2006 roku (Brzozowski 2006). Wcześniej na terenie osuwiska zlokalizowana była kopanka gliny. W jej centralnej części znajdowało się okresowe źródło, które zostało zasypane gruntami pochodzącymi z przebudowy ulicy Sawiczewskich i budowy autostrady w rejonie osiedla Piaski w Krakowie w latach 2001–2003. Cały obszar został

podwyższony o około 3 m i wyrównany. Grunty nasypowe były sypane wprost na zbocze porośnięte bujną trawą. Wójcik (2010) przyjmuje, że to właśnie ona, po zbutwieniu i nawodnieniu stanowiła płytszą powierzchnię poślizgu. Wiosną 2006 roku teren ponownie został podwyższony. Do granic lasu utworzyły się progi o charakterze lobowym, o wysokości 1–3,5 m, a samo osuwisko uległo odmłodzeniu. W latach 2006–2008 pojawiały się szczeliny w koronie ulicy Sawiczewskich oraz w części wschodniej (Brzozowski 2006), a w maju 2010 roku w wyniku infiltracji i stagnacji wód opadowych oraz dodatkowego obciążenia, osuwisko powiększyło się w kierunku południowym osiągając powierzchnię około 3 ha. Uszkodzona została korona drogi oraz infrastruktura wodociągowa, elektryczna i telefoniczna. Część południowa została sklasyfikowana jako osuwisko czynne, natomiast część północno-wschodnia (w obrębie lasu) jako okresowo aktywna.

Problem numerycznej analizy stateczności osuwisk w warunkach utworów zapadliska przedkarpackiego i fliszu karpackiego podejmowano w wielu pracach (np. Zabuski i in. 1999; Dziewański, Pilecki 2002; Marczak i in. 2002; Stopkiewicz, Cała 2004). Bardzo dużo tego rodzaju analiz numerycznych zostało przeprowadzonych przez różnego rodzaju firmy i zamieszczonych w opracowaniach o charakterze dokumentacyjnym.

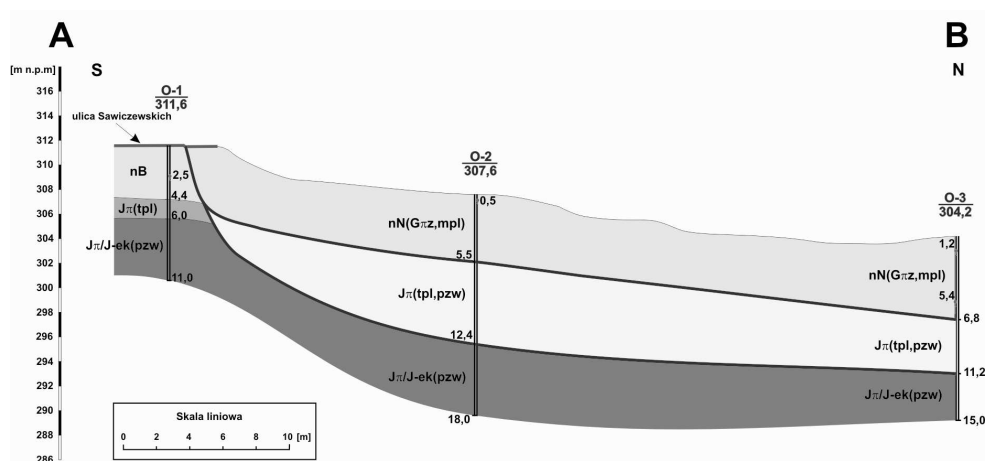
Przedstawiona w pracy analiza numeryczna dotyczy oceny położenia i rozwoju dwóch powierzchni poślizgu omawianego osuwiska. W pracy pominięto zagadnienia związane z propozycją poprawy stateczności zbocza. Nie przeprowadzono również studium parametrycznego ze względu na ograniczoną informację geologiczną. Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą programu FLAC/SLOPE ver. 6.0 bazującego na metodzie różnic skończonych (MRS). Artykuł został opracowany na podstawie wybranych zagadnień z pracy dyplomowej Stanisza (2012).

1. OGÓLNY OPIS WARUNKÓW TERENOWYCH I GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH W REJONIE OSUWISKA

Długość osuwiska wynosi około 350 m, a jego szerokość 150 m (Wójcik 2010). Rzędne terenu osuwiska wahają się od 311,5 m do 272,05 m n.p.m. Różnica wysokości dochodzi do 39 m. Czoło osuwiska osiąga wysokość około 1 m. W nasypie ulicy Sawiczewskich zarysowała się nisza osuwiskowa o wysokości około 2 m. Pozostała część osuwiska rozwinęła się poniżej nasypu, w dolnej części wypukło-wklęsłego stoku. Cały teren pokryty jest formami charakterystycznymi dla zsuwania się mas gruntu z częściową rotacją w obrębie niszy. Na powierzchni osuwiska wyróżnić można wiele nierówności, pęknięcia, nisze wtórne, liczne szczeliny poprzeczne o głębokościach od 0,2 do 0,8 m, pagóry oraz stawy wewnątrzosuwiskowe o zmieniającym się zasięgu po opadach deszczu. W północnej części widoczny jest tzw. pijany las, progi z nasunięcia mas gruntu oraz kilka wysięków. Osuwisko ma charakter insekwentny.

W 2011 roku Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. w Krakowie na zlecenie Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu przeprowadziło prace geologiczno-inżynierskie na

terenie osuwiska (Jaskólski i in. 2011). Wykonano trzy otwory badawcze o głębokościach 13 metrów (otwory O-3, O-4 i O-5), odwiert O-2 do głębokości 18 m oraz trzy odwierty poza osuwiskiem, o głębokościach 11 metrów (otwory O-1, O-6 i O-7). Wydzielono kilka warstw geotechnicznych. Miocen reprezentują łył pylaste oraz łył w stanie twardoplastycznym (głębiej w stanie półzwałym) nawiercone na głębokościach od 3 do 6,8 m. Lokalnie występują łyłupki. Utwory czwartorzędowe wykazują dużą zmienność litologiczną. W przeważającej części są to grunty nasypowe (gliny piaszczyste, gliny pylaste, piaski gliniaste). Obecne są również gliny z gruzem i okruchami cegieł. Miąższość tej warstwy dochodzi do około 5,4 m. Poniżej zalegają gliny pylaste zwięzłe, gliny zwięzłe, gliny piaszczyste w stanach od twardoplastycznego przez plastyczny do miękkoplastycznego. Płaszczyznę poślizgu rozpoznano na głębokościach od 3,8 do 6,8 m oraz od 9 do 12,4 m. Charakterystyczny geologiczno-inżynierski przekrój podłużny przez osuwisko przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Geologiczno-inżynierski przekrój podłużny A-B przez oś osuwiska przy ul. Sawiczewskich w Swoszowicach (Jaskólski i in. 2011)

Fig. 2. Longitudinal cross-section AB through the landslide axis near Sawiczewskich street in Swoszowice (Jaskólski i in. 2011)

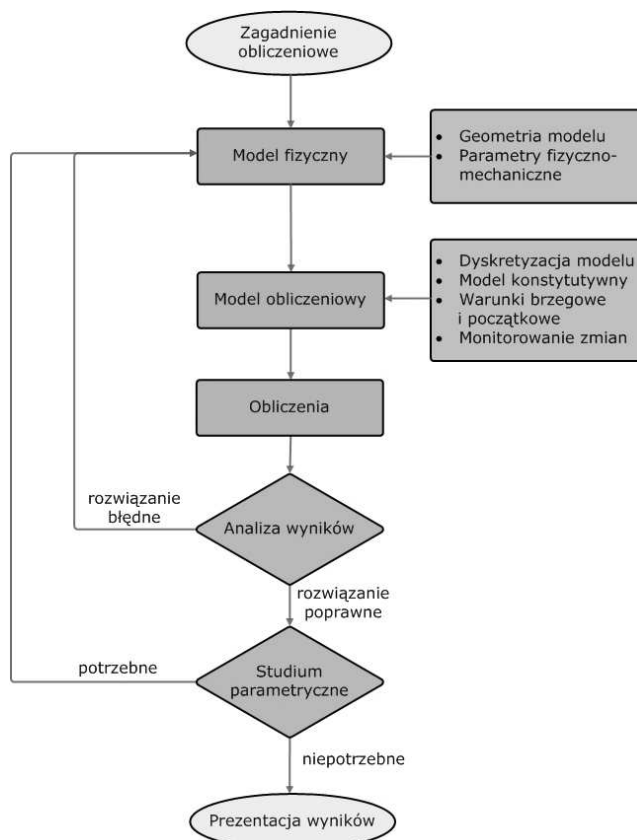
Na terenie osuwiska zaobserwowano sączenia na głębokościach od 0,5 do 5,4 m. Wypływy wody obserwowane są również na powierzchni w utworach gliniastych. Ich ujście znajduje się w części południowej poza koluwium. Po opadach atmosferycznych pojawiają się również liczne podmokłości i stawy.

2. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA NUMERYCZNEJ ANALIZY STATECZNOŚCI OSUWISKA

Symulację numeryczną stateczności osuwiska przeprowadzono w kilku etapach (rys. 3):

- opracowanie modelu fizycznego wraz z doбором stałych materiałowych,

- opracowanie modelu obliczeniowego,
- obliczenia i analiza zmian prędkości odkształcenia stycznego (*shear strain rate*), wektorów prędkości przemieszczenia (*displacement vectors*) cząsteczek gruntu i współczynników bezpieczeństwa (*factor of safety*).



Rys. 3. Ogólny schemat modelowania numerycznego (Pilecki 2010)

Fig. 3. The general scheme of numerical modeling (Pilecki 2010)

W pierwszym etapie opracowano geometrię modelu na podstawie przekroju geologiczno-inżynierskiego przechodzącego podłużnie przez centralną część osuwiska (przez niszę osuwiska) pokazanego na rysunku 2. Skoncentrowano się jedynie na tej części z uwagi na dostępne dane geologiczne oraz przypuszczalnie reprezentatywne zmiany stanu naprężenia i przemieszczenia zachodzące w niszy osuwiska.

W kolejnym etapie opracowano model obliczeniowy. Wprowadzono warunki brzegowe i początkowe. W wyniku obliczeń opracowano przekroje obrazujące kierunki wektorów prędkości przemieszczania się cząsteczek gruntu oraz wartości prędkości odkształcenia stycznego. Obliczono również współczynniki bezpieczeństwa dla konkretnych przekrojów geologiczno-inżynierskich.

Obliczenia numeryczne zostały wykonane metodą różnic skończonych za pomocą programu FLAC/SLOPE wersji 6.0. Metoda ta wykorzystuje do obliczeń prawa mechaniki ośrodków ciągłych opisane układami równań różniczkowych, uwzględniających warunki brzegowe badanego ośrodka. Jej niewątpliwą zaletą jest duża szybkość i dokładność dla optymalnie dobranej gęstości siatki dyskretyzacyjnej. Modelowanie oparte jest na jawnym sposobie obliczania wyników, tzn. przebieg zmian wartości funkcji następuje w punktach dyskretnych, uwzględniając sąsiednie punkty pokazując rozwój procesów fizyczno-mechanicznych zachodzących w modelu. W całym modelu obliczenia wykonywane są od punktu do punktu aż do ustalenia się stanu równowagi w ośrodku. Rozwiązane równania różniczkowe przekształcane są za pomocą szeregów Taylora na wyrażenia różnicowe. Dla każdego kroku obliczeniowego przyjmuje się określone warunki początkowe i brzegowe oraz parametry ośrodka. Efektem obliczeń są określone wartości w poszczególnych węzłach. Wartości te są aproksymowane za pomocą interpolacji Lagrange'a i w rezultacie mogą być przedstawione w postaci izoliniowych obrazów. Błędy obliczeniowe wynikają głównie z przybliżeń arytmetycznych oraz błędów operatorów różnicowych. Błędy interpretacyjne mogą być różnego pochodzenia, a zwłaszcza związane z niepewnością parametrów modelu. Dla ich oceny wskazane jest przeprowadzenie tzw. studium parametrycznego. W pracy pominięto ten etap symulacji numerycznej ze względu na nieliczne dane wejściowe. W związku z tym wykonane obliczenia mają charakter jakościowy.

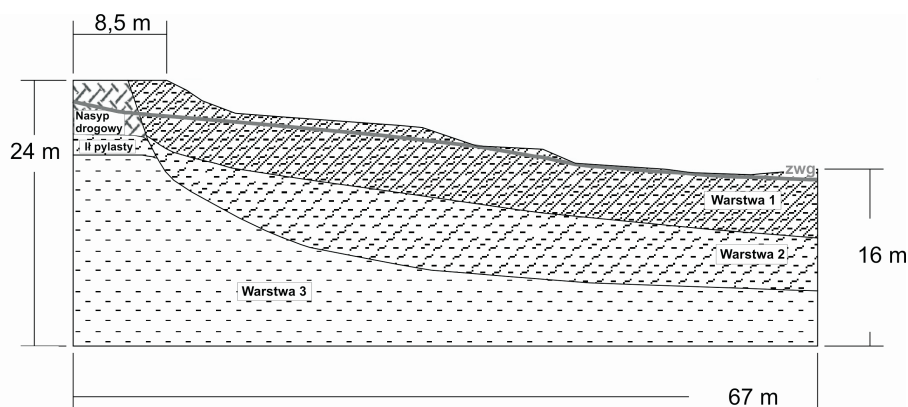
3. KONSTRUKCJA MODELU NUMERYCZNEGO

3.1. Model fizyczny

Rozważano dwa modele fizyczne:

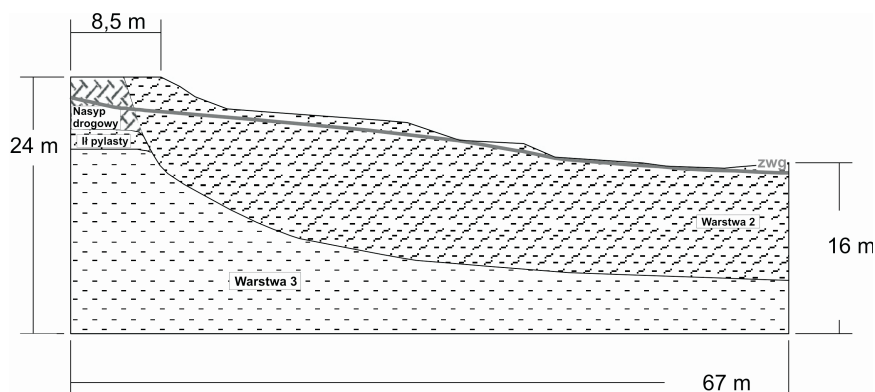
- Podstawowy model osuwiska – obrazuje stan naprężenia i przemieszczenia opracowany na podstawie danych z badań przeprowadzonych przez Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. w Krakowie w 2010 (Jaskólski i in. 2011). Składa się on z trzech warstw oraz nasypu. Analizowano wariant suchy i w pełni zawodniony. Model przedstawiono na rysunku 4.
- Model zmodyfikowany, dwuwarstwowy osuwiska. W modelu przyjęto warstwę ekwiwalentną dla dwóch przypowierzchniowych warstw gliny pylastej zwięzłej i iltu pylastego o zbliżonych parametrach fizyczno-mechanicznych (warstwa 1 i 2), przyjmując parametry tej ostatniej. Pozwoliło to w sposób bardziej obrazowy uwidocznić głębszą powierzchnię poślizgu osuwiska. Model jest dwuwarstwowy oraz analogicznie jak w modelu podstawowym uwzględniono nasyp. Analizowano wariant w pełni zawodniony. Model fizyczny pokazano na rysunku 5.

Oba modele mają długość 67 metrów. Ramka lewa ma wysokość 24 metrów (rzędna 311,6 m n.p.m.), z kolei ramka prawa ma wysokość 16 metrów (rzędna terenu 304,2 m n.p.m.).



Rys. 4. Podstawowy model fizyczny. Widoczne są wydzielenia wszystkich warstw geotechnicznych oraz położenie zwierciadła wód gruntowych (zwg)

Fig. 4. Basic physical model. There are visible all geotechnical layers and water table (zwg)



Rys. 5. Zmodyfikowany, dwuwarstwowy model fizyczny. Warstwy przypowierzchniowe zostały zastąpione warstwą ekwiwalentną

Fig. 5. Modified, two-layer physical model. Upper layers have been substituted by equivalent layer

Parametry fizyczno-mechaniczne zestawiono w tabeli 1. Algorytm programu FLAC/SLOPE wersji 6.0 w najprostszym rozwiązaniu wymaga deklaracji jedynie trzech parametrów: gęstości objętościowej, spójności i kąta tarcia wewnętrznego. Parametry nasypu drogowego przyjęto na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Jaskólski i in. 2011) oraz polskich norm.

3.2. Model obliczeniowy

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia, w ośrodku sprężysto-plastycznym z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra przy zastoso-

Tabela 1

Parametry modelu numerycznego osuwiska w Swoszowicach

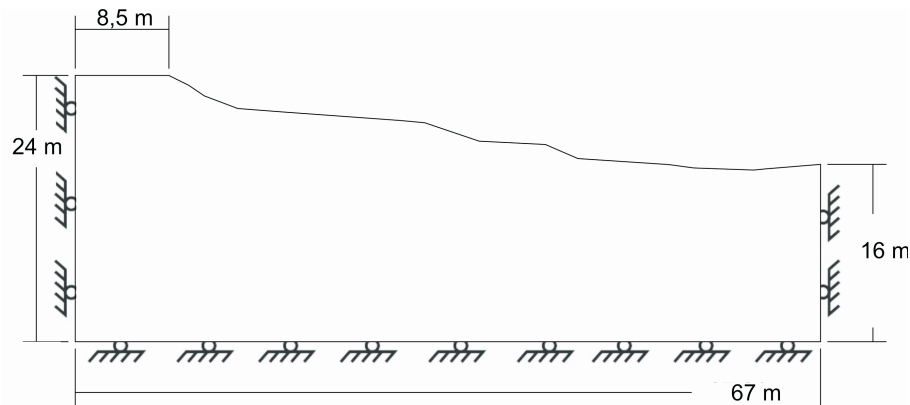
Table 1

Material constants of numerical model of landslide in Swoszowice

Rodzaj gruntu	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Spójność [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego [deg]
Warstwa 1 (głina pylasta zwięzła)	2061	10	5
Warstwa 2 (ił pylasty)	1950	40	6
Warstwa 3 (iłowupek)	2020	65	9
Nasyp drogowy	1750	0	36
Warstwa iłu pylastego w podłożu nasypu	1950	50	7

waniu stowarzyszonego prawa płynięcia. Stan naprężenia w modelu uzyskano wprowadzając siłę grawitacji.

Na prawej i lewej krawędzi modelu unieruchomiono przemieszczenia poziome dopuszczając jedynie swobodny ruch w kierunku pionowym. Natomiast na dolnej krawędzi zablokowano przemieszczenia pionowe dopuszczając ruch w kierunku poziomym. Górna ramka – powierzchnia terenu była powierzchnią swobodną. Oczko siatki dyskretyzacyjnej miało wymiary 25 × 25 cm. Schemat modelu obliczeniowego przedstawiono na rysunku 6.

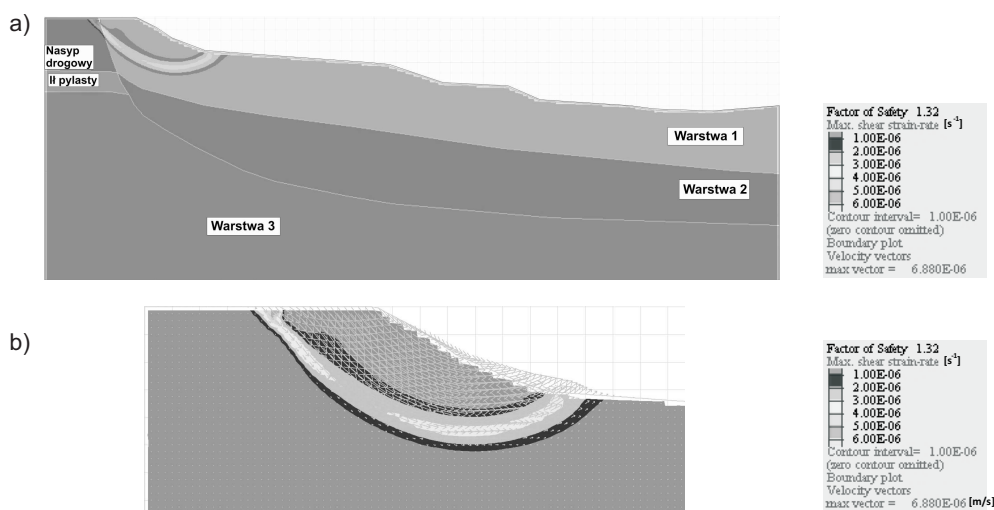


Rys. 6. Model obliczeniowy osuwiska

Fig. 6. Computational model of the landslide

4. WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

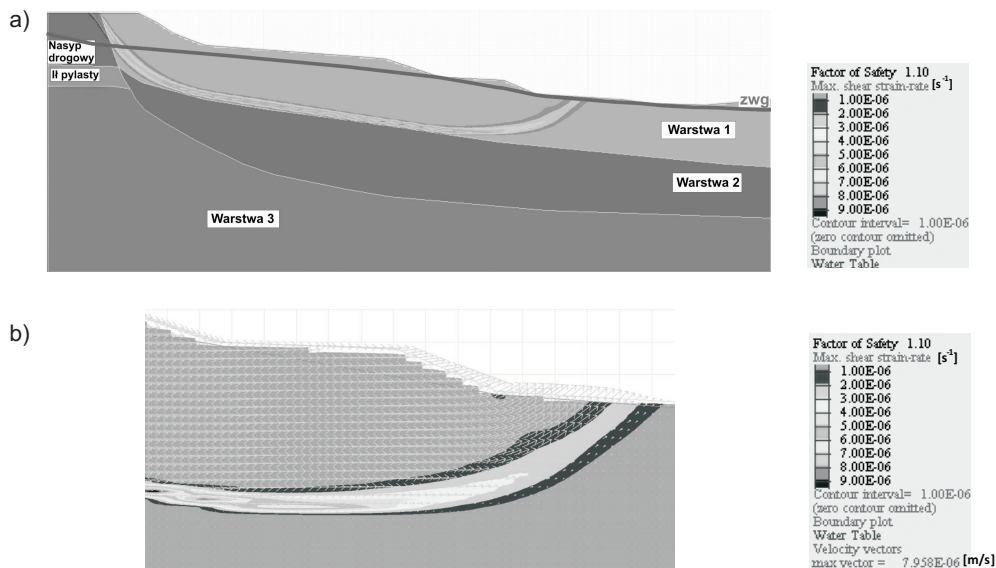
Wyniki dla modelu podstawowego „suchego” w postaci przekroju izoliniowego prędkości odkształcenia stycznego przedstawiono na rysunku 7. Na przekroju zarysowała się powierzchnia poślizgu w górnej części osuwiska, obejmując swym zasięgiem nasyp drogowy oraz północną część zbocza. Osuwisko zachowuje stateczność, gdyż globalny współczynnik bezpieczeństwa wynosi 1,32. Maksymalne prędkości odkształcenia stycznego wynoszące $6 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ występują w górnej części nasypu. Największe prędkości przemieszczenia, pokazane na rysunku 7b, występują na końcu płaszczyzny poślizgu i osiągają wartości $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.



Rys. 7. Przebieg powierzchni poślizgu w suchym modelu podstawowym osuwiska
a) obraz prędkości odkształcenia stycznego; b) obraz w powiększeniu z dodatkową ilustracją wektorów prędkości przemieszczenia cząsteczek gruntu

Fig. 7. The course of failure surface of dry model of landslide
a) the image of shear strain rate; b) enlarged image with additional information about velocity vectors of soil particles

W wyniku zawodnienia model nadal zachowuje stateczność z dużym prawdopodobieństwem jej utraty, gdyż wartość współczynnika bezpieczeństwa obniżyła się do 1,1 (rys. 8). Stan taki wskazuje na możliwość uaktywnienia się osuwiska w warunkach oddziaływania dodatkowych czynników, jak np. obciążenie dynamiczne od przejeżdżających ciężkich pojazdów, osłabienie parametrów wytrzymałościowych ośrodka w wyniku procesów wietrzeniowych itp. Zarysowująca się powierzchnia poślizgu zmieniła kształt, została wydłużona w kierunku nachylenia zbocza i w przeważającej części przebiega na kontakcie 1 i 2 warstwy. Maksymalna prędkość odkształcenia wzrosła w porównaniu do modelu suchego i wynosi około $9 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (rys. 8). Maksymalna prędkość przemieszczenia występująca

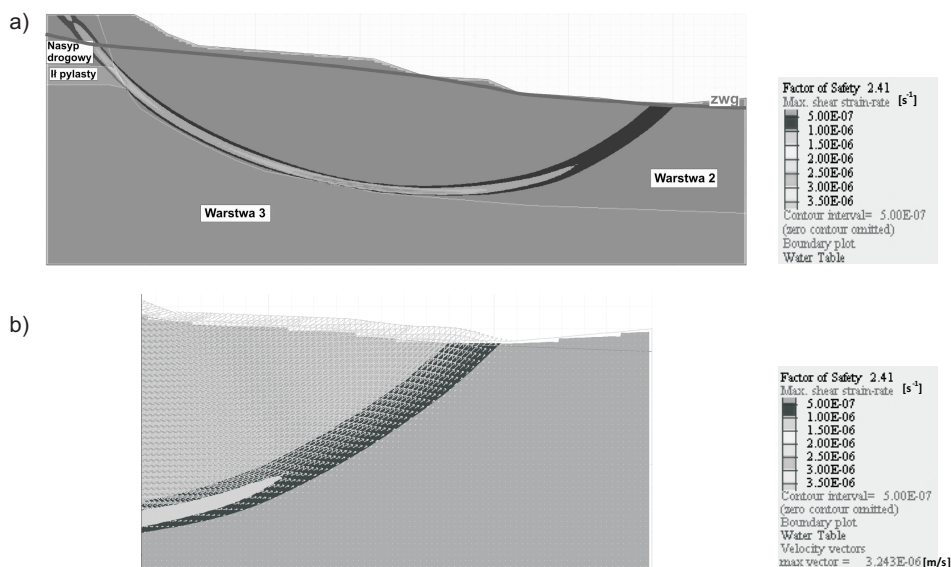


Rys. 8. Przebieg powierzchni poślizgu w zawodnionym modelu podstawowym osuwiska
 a) obraz maksymalnej prędkości odkształcenia stycznego; b) obraz w powiększeniu z dodatkową ilustracją wektorów prędkości przemieszczenia cząsteczek gruntu

Fig. 8. The course of failure surface of wet model of landslide
 a) the image of shear strain rate; b) enlarged image with additional information about velocity vectors of soil particles

w końcowej części powierzchni poślizgu również wzrosła do wartości około $7,9 \cdot 10^{-6}$ m/s (rys. 8b). W tej strefie w terenie zaobserwowano deformacje powierzchni (nasunięcia, spiętrzenia gruntu).

Dla modelu zmodyfikowanego ograniczono się do przedstawienia modelu zawodnionego, stwarzającego większe prawdopodobieństwo uaktywnienia się osuwiska (rys. 9). Obliczony współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 2,41 wskazuje na dużą stateczność tego modelu. Na przekroju na rysunku 9a widoczna jest zarysowująca się powierzchnia poślizgu na granicy dwóch warstw: połączonej 1 i 2 oraz 3 przebiegającej na głębokości do około 11 m. Taki przebieg powierzchni poślizgu został również przedstawiony w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Jaskólski i in. 2011). W jezdni drogi w strefie wschodniej obliczonej powierzchni poślizgu zaobserwowano głębokie szczeliny. Największe prędkości odkształcenia stycznego wynoszące $3,5 \cdot 10^{-6}$ s⁻¹ pojawiły się w części powierzchni położonej najgłębiej. Widoczna jest znacząca różnica w wartościach prędkości odkształceń stycznych w prezentowanym modelu i w modelu podstawowym osuwiska. Wektory prędkości przemieszczenia przyjmują mniejsze wartości w porównaniu do poprzednich modeli, maksymalnie do $3,2 \cdot 10^{-6}$ m/s.



Rys. 9. Przebieg powierzchni poślizgu w zawodnionym zmodyfikowanym, dwuwarstwowym modelu osuwiska

a) obraz maksymalnej prędkości odkształcenia stycznego; b) obraz w powiększeniu z dodatkową ilustracją wektorów prędkości przemieszczenia cząsteczek gruntu

Fig. 9. The course of failure surface of modified, two-layer, wet model of landslide

a) the image of shear strain rate; b) enlarged image with additional information about velocity vectors of soil particles

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej stateczności wybranych modeli osuwiska w Swoszowicach. Rozważano dwa modele: podstawowy trójwarstwowy oraz zmodyfikowany, dwuwarstwowy. Pierwszy z nich analizowano w stanie suchym i w pełni zawodnionym. Drugi jedynie zawodniony dla oceny najbardziej niekorzystnych warunków.

W modelu podstawowym suchym globalny współczynnik bezpieczeństwa wyniósł 1,32. W wyniku zawodnienia modelu współczynnik ten obniżył wartość do 1,1, a jednocześnie wydłużył się kształt powierzchni poślizgu. W modelu dwuwarstwowym współczynnik bezpieczeństwa był największy i wyniósł 2,42. Wyniki te wskazują, że najbardziej prawdopodobna jest aktywizacja osuwiska wzdłuż płytszej powierzchni poślizgu. Powierzchnia ta rozwinęła się w koronie drogi oraz między warstwami zwięzłej gliny pylastej a łąkami pylastymi na głębokości od 3,8 do 6,8 m. Obliczone prędkości odkształcenia stycznego i prędkości przemieszczenia gruntu potwierdziły największe prawdopodobieństwo rozwoju płytszej powierzchni poślizgu pokazanej w zawodnionym modelu podstawowym. Bardziej skomplikowana sytuacja mogła się rozwinąć w nasypie drogowym, gdzie położenie szczelin

przypuszczalnie może być związane z tworzeniem się kolejnej, głębszej powierzchni poślizgu.

Niewątpliwie negatywny wpływ na stateczność osuwiska w Swoszowicach ma zawodnienie ośrodka gruntowego. Silne zawodnienie w wyniku intensywne i długotrwałych opadów atmosferycznych i jednocześnie osłabienie właściwości wytrzymałościowych warstw przypowierzchniowych może się również przyczynić do uruchomienia głębszej powierzchni poślizgu.

Przedstawione wyniki mają charakter jakościowy ze względu na zbyt dużą niepewność parametrów wprowadzonych do modelu związanych ze słabo rozpoznanymi właściwościami ośrodka. Dla poprawy jakości wyników należałoby wykonać większą liczbę wierceń badawczych oraz oznaczeń parametrów ośrodka.

LITERATURA

- BRZOZOWSKI J., 2006 — Opinia geotechniczna dotycząca podwyższenia nasypami działek o nr: 201/3, 202/13, 202/24 i 202/26 na działkę nr 122/53, przy ulicy Sawiczewskich w Krakowie Swoszowicach, Kraków.
- DZIEWAŃSKI J., PILECKI Z., 2002 — Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach. *Studia, Rozprawy, Monografie* 109, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- JASKÓLSKI Z., KOS J., FORYŚ M., BARTOSZ L., 2011 — Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla stabilizacji osuwiska przy ulicy Sawiczewskich, Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. w Krakowie, Kraków.
- MARCAK H., PILECKI Z., PILECKA E., KŁOSIŃSKI J., 2002 — Prediction of slope failure using seismic refraction and numerical modelling. *Proc. 8th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, EEGS-ES*, 8–12 Sept. 2002, Aveiro, Portugal (Dokument elektroniczny).
- PILECKI Z., 2010 — Identyfikacja etapów modelowania numerycznego. *Mat. Konf. Nauk. XIV Warsztaty Górnicze, Hucisko*, 16–18 czerwca 2010, Materiały elektroniczne.
- STANISZ J., 2012 — Przyczyny powstania i możliwy sposób zabezpieczenia osuwiska w Swoszowicach w rejonie ulicy Sawiczewskich. *Praca dyplomowa, Biblioteka Wydz. Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków*.
- STARKEL L., 1972 — Charakterystyka rzeźby polskich Karpat (i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej). *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, Z. 10, s. 75–150, Kraków.
- STOPKIEWICZ A., CAŁA M., 2004 — Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych. *Mat. Konf. XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu*, Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, Kraków, 519–530.
- WÓJCIK A., 2010 — Karta rejestracyjna osuwiska wraz z opinią przy ulicy Sawiczewskich w Krakowie, *PIG-PIB, Oddział Karpacki, Kraków*.
- ZABUSKI L., THIEL K., BOBER L., 1999 — *Osuwiska we fliszu Karpat Polskich*. Wyd. IBW PAN, Gdańsk.

SELECTED ASPECTS OF NUMERICAL ANALYSIS OF LANDSLIDE STABILITY IN SWOSZOWICE

ABSTRACT

The article presents selected aspects of numerical analysis of landslide stability in Swoszowice, related to the evaluation of development and location of the failure surface. Two models have been considered the basic, three-layer, and the modified two-layer developed of the longitudinal geological engineering cross-section along the landslide axis. In the calculation of the cross sections obtained isolines shear strain rate, field of velocity vectors of displacement of soil particles and the value of global safety factors.

In the basic, dry model safety factor was 1.32, and in a state of fully hydrated decreased to 1.1. In the modified two-layer model, this ratio was 2.42. Similarly, the least favorable shear strain rate values obtained for the basic, hydrated model. These results have showed that the landslide moved along shallow failure surface. This area developed into the crown of the road and between the geotechnical layers of clay and silty clay at a depth of 3.8 to 6.8 m. The study highlighted the potential activation of deeper failure surface in the case of weakening the strength properties of the medium. Undoubtedly a hydrating of the medium has a negative impact on the global stability of the landslide.

KEY WORDS

Landslide, numerical analysis, slope stability, failure surface, Swoszowice, Cracow

