

MICHAŁ GRODECKI*, JACEK GWÓZDŹ**, PIOTR FRYŚ**, ANDRZEJ TRUTY*,
ALEKSANDER URBAŃSKI*, KRZYSZTOF WOJDYŁA*

OSUWISKO W NADOLANACH. BADANIA GEOLOGICZNE I SYMULACJE NUMERYCZNE

LANDSLIDE AT NADOLANY – GEOLOGICAL INVESTIGATIONS AND NUMERICAL SIMULATIONS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań geologicznych oraz symulacji numerycznych osuwiska w Nadolanach. Przeprowadzone prace umożliwiły identyfikację parametrów materiałowych warstwy, w której zlokalizowana została strefa ścięcia, oraz ocenę możliwości dalszej jego propagacji.

Słowa kluczowe: osuwisko, stateczność, analiza MES

Abstract

In this paper results of geological investigations and numerical simulations of a landslide at Nadolany are presented. Simulations that were carried out helped to identify strength parameters in the layer where localized failure occurred and allowed to assess the potential for further propagation of the landslide.

Keywords: landslides, stability analysis, FEM analysis

* Dr inż. Michał Grodecki, dr hab. inż. Andrzej Truty, prof. PK, dr hab. inż. Aleksander Urbański, prof. PK, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Piotr Fryś, mgr inż. Jacek Gwóźdź, mgr inż. Krzysztof Wojdyła, Geokrak Sp. z o.o.

Oznaczenia

ϕ	– kąt tarcia wewnętrznego [deg]
γ	– ciężar objętościowy gruntu [kN/m ³]
c	– spójność [kPa]
X	– współrzędna pozioma [m]
SF	– współczynnik stateczności [–]

1. Wstęp

Osuwisko w Nadolanach powstało w nocy 21/22 VII 2008 na skutek erozyjnego podcięcia podstawy zbocza przez wezbrane wody potoku Pielnica. Zsunięte masy gruntu zawęziły przekrój potoku, którego wody wtargnęły na teren działki zlokalizowanej po przeciwnej stronie koryta.

Zakres prac podjętych w celu identyfikacji mechanizmu powstania osuwiska, parametrów mechanicznych warstwy, w obrębie której nastąpił poślizg, oraz tendencji osuwiska do dalszej propagacji obejmuje:

- kartowanie powierzchniowe,
- wiercenie otworów badawczych (otwory rdzeniowe o głębokości 10–16 m oraz otwory płytkie o głębokości do 2,5 m),
- pomiary sytuacyjne z wykorzystaniem systemu GPS w siatce około 10 × 10 m,
- badania geofizyczne: georadarowe i mikrosejsmiczne,
- symulacje numeryczne obejmujące: analizę wsteczną pierwszej fazy osuwiska oraz analizę tendencji osuwiska do dalszej propagacji,
- opracowanie wariantowej koncepcji zabezpieczenia osuwiska.

2. Wyniki rozpoznania geologicznego

Rejon występowania osuwiska w Nadolanach znajduje się w obrębie fliszowych Karpat zewnętrznych. Podłoże fliszowe reprezentowane jest przez utwory jednostki strukturalnej płaszczowiny śląskiej, wykształconej jako ogniwo łupkowo-piaskowcowe warstw krosieńskich dolnych wieku trzeciorzęd – oligocen. Podłoże fliszowe jest mocno pofałdowane. Występują też elementy tektoniki uskokowej.

Na podstawie wyników prac terenowych ustalono, że badane osuwisko jest głębokim osuwiskiem strukturalnym obejmującym skaliste warstwy podłoża gruntowego. W profilach otworów ustalono zasięg głębokościowy strefy naruszonej na maksymalnie 8,5 m p.p.t. Przedmiotowe osuwisko jest konsekwentne. Przeciętne azymuty kąta upadu warstw fliszowych wynoszą 225–250°. Kąty zapadania warstw podłoża wahają się w zakresie od 10 do 20°. Azymut nachylenia zbocza wynosi ok. 240°.

Wyznaczony azymut osi osuwiska to ok. 240–250°. Pokrywa się on z azymutem kierunku kąta zapadania warstw podłoża fliszowego i kierunkiem maksymalnego nachylenia zbocza.

Na podstawie wyników przeprowadzonych prac terenowych w podłożu obszaru objętego procesami osuwiskowymi wydzielono następujące kompleksy genetyczne warstw (pakiety geotechniczne):

- I – grunty pokrywowe–deluwialne – występujące maksymalnie do głębokości 1,9 m p.p.t., reprezentowane są przez gliny i gliny pylaste,
- II – grunty zwietrzelinowe – występujące maksymalnie do głębokości 3,2 m p.p.t. – stanowią stropową, zwietrzałą strefę podłoża fliszowego. Są to w większości gliny związane z domieszkami grubookruchowymi fragmentami skał macierzystych,
- III – podłoże skalne – reprezentuje fliszowy kompleks łupkowo-piaskowcowy. Dominują warstwy skały miękkiej (łupka marglistego i ilastego). Piaskowiec drobnziarnisty występuje w warstwach o miąższości maksymalnie $m = 0,5$ m. Udział piaskowca w rozpoznanym profilu nie przekracza 20%.

W obrębie kompleksów genetycznych wydzielono warstwy geotechniczne i wyznaczono dla nich parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe. Podstawą określenia parametrów warstw geotechnicznych były wyniki badań laboratoryjnych:

- konsystencji dla gruntów nieskalistych,
- wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie dla gruntów skalistych.

Ze względu na strukturalny charakter osuwiska i stosunkowo małą miąższość nadkładu najważniejsze znaczenie dla mechanizmu osuwiskowego mają parametry warstw gruntów skalistych. W obrębie gruntów skalistych wydzielono następujące warstwy geotechniczne:

- skała miękka bardzo spękana – łupek marglisty i ilasty (warstwa IIIa),
- skała miękka mało spękana – łupek marglisty i ilasty (warstwa IIb),
- skała twarda lita – piaskowiec drobnziarnisty (warstwa IIIc).

Tabela 1

Przyjęte wartości parametrów materiałowych gruntu

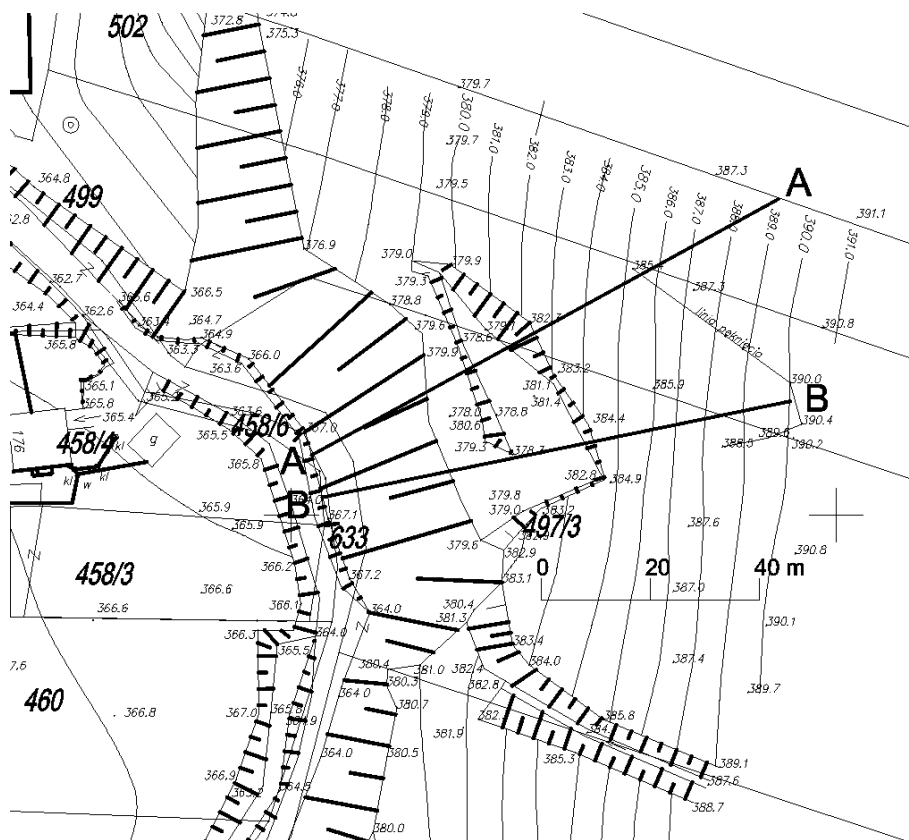
Warstwa	C [kPa]	ϕ [°]	γ [kN/m ³]
IIb	51,5	11,0	21,0
IIc	57,0	12,0	22,0
IIIa	21,4	8,6	20,0
IIIc	3160,0	55,0	24,0

Analiza profili wiertniczych oraz wyników kartowania i obserwacji terenowych wykazała, że warstwą, w obrębie której nastąpiło ścięcie i zsuw mas gruntowych, była warstwa skały miękkiej bardzo spękanej. Podczas obserwacji makroskopowych wykazywała ona cechy skały naruszonej z zaburzonymi pierwotnymi cechami strukturalnymi. Jej parametry wytrzymałościowe określono metodą analizy wstecznej, co dokładnie opisano w kolejnym rozdziale niniejszego artykułu.

Parametry pozostałych warstw skalnych przyjęto na podstawie wyników badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Parametry gruntów nieskalistych przyjęto na podstawie określonego laboratoryjnie stopnia plastyczności I_L oraz korelacji normowej. W obrębie terenu objętego badaniami nie stwierdzono obecności zwierciadła wody gruntowej.

3. Symulacje numeryczne

Obliczenia wykonano przy założeniu płaskiego stanu odkształceń w dwóch przekrojach A-A i B-B, pokazanych na rys. 1.



Rys. 1. Lokalizacja przekrojów obliczeniowych

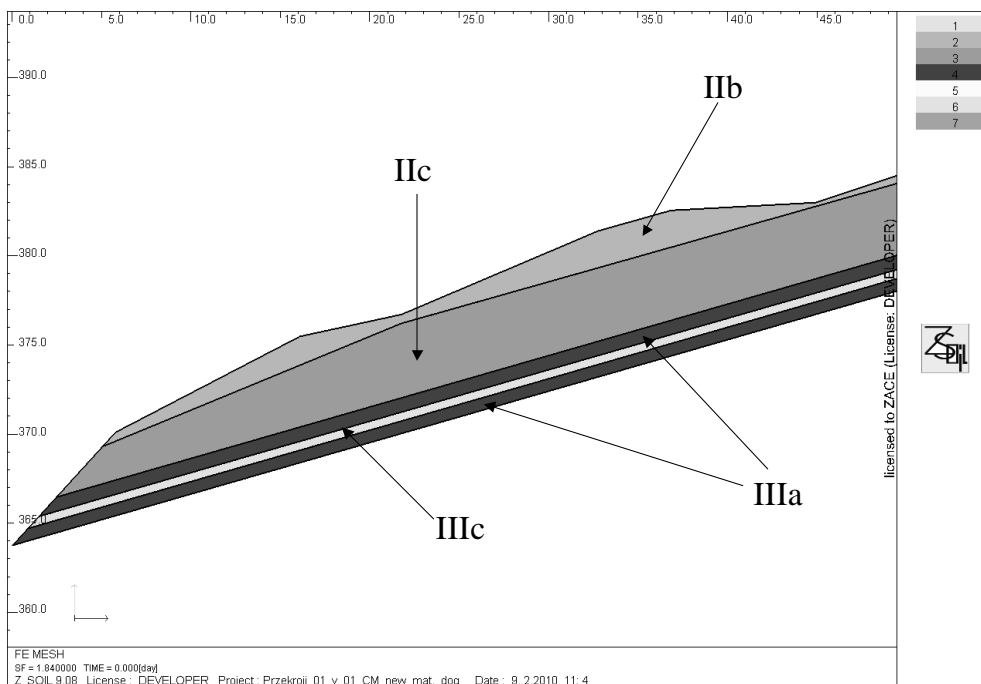
Fig. 1. Localization of analyzed cross sections

Analizę stateczności oraz scenariusz propagacji osuwiska wykonano z zastosowaniem programu metody elementów skończonych Z_SOIL.PC v2009 [2, 3]. Do analizy przyjęto idealnie sprężysto-plastyczny model Mohra–Coulomba uzupełniony o warunek Rankine’a z zerową wartością wytrzymałości na rozciąganie. Zastosowanie takiej złożonej powierzchni granicznej umożliwia realistyczny opis rozwoju powierzchni zniszczenia, gdzie dominują dwa mechanizmy, tj. powstawania szczeliny oraz ścinania.

Współczynniki stateczności określono metodą proporcjonalnej redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntu (redukcja $c - \phi$), omówioną szczegółowo w pracy [1].

3.1. Przekrój A-A

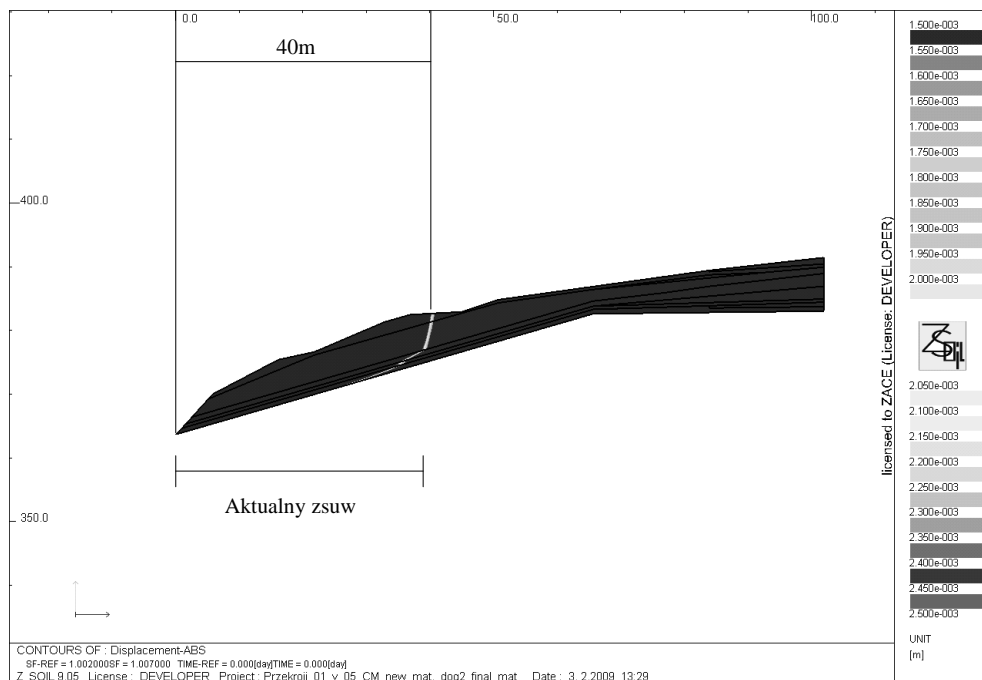
Celem oszacowania wyjściowych wartości parametrów wytrzymałościowych warstw w podłożu wykonano symulacje numeryczne powstawania osuwiska obserwowanego obecnie. W tym celu zbudowany został model obliczeniowy w przekroju A-A (por. rys. 2) o geometrii początkowej niezakłóconej obserwowanym aktualnie stanem osuwiskowym.



Rys. 2. Fragment modelu obliczeniowego przekroju A-A

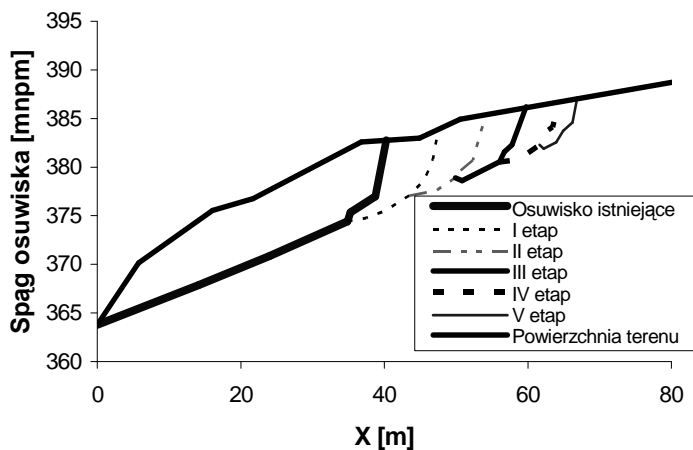
Fig. 2. Computational model, A-A cross-section

Przyjmując, że pasmo ścinania występuje w warstwie IIIa, co potwierdzone jest wynikami badań georadarowych oraz wierceniami, wykonano wiele symulacji inicjacji tego osuwiska dla wielu par wartości parametrów ϕ i c tak, aby wartość współczynnika pewności była równa w przybliżeniu 1,0. Takie założenie odpowiada występowaniu stanu granicznego stateczności analizowanego zbocza. Każdej z analizowanych par (ϕ , c) odpowiada jedna forma utraty stateczności. Z pośród nich wybrano tę, dla której forma utraty stateczności była najlepiej dopasowana do mechanizmu obserwowanego w terenie. Najlepszą zgodność uzyskano dla wartości kąta tarcia wewnętrznego $\phi = 8,6^\circ$ oraz spójności $c = 21,4$ kPa. W fazie analizy wstecznej, stosując metodę redukcji $c - \phi$, zredukowano wyłącznie parametry dla warstwy IIIa.



Rys. 3. Postać mechanizmu zniszczenia, stan przed wystąpieniem osuwiska, przekrój A-A

Fig. 3. Failure mechanism, before the landslide, A-A cross-section



Rys. 4. Kolejne fazy propagacji osuwiska w przekroju A-A

Fig. 4. Propagation of the landslide in cross section A-A

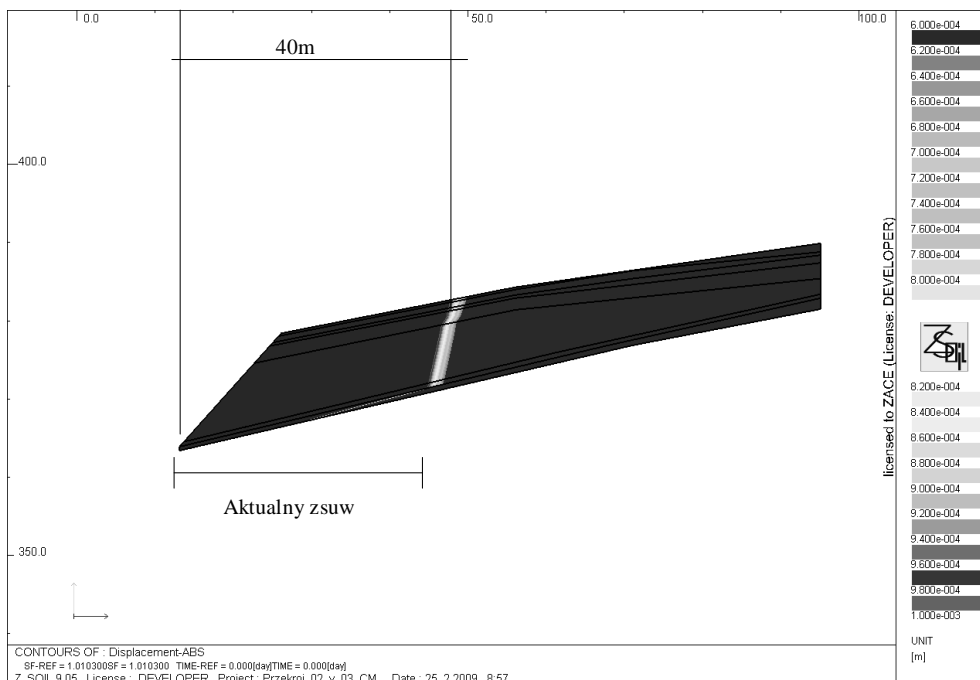
Powstające osuwisko oraz związane z nim duże ruchy masowe w istotny sposób zmieniają geometrię zbocza, stąd też możliwe jest powstanie nowego klina odłamu. W celu

oceny stateczności pozostałej części zbocza wykonano analizę stateczności kolejnych faz potencjalnego osuwiska (por. rys. 4), przyjmując stosunkowo konserwatywne założenie, że warstwa która uległa zsuwowi, nie generuje żadnych sił stabilizujących pozostałą część zbocza. W analizie stateczności kolejnych faz, stosując metodę $c - \phi$ redukowano parametry wszystkich warstw geotechnicznych.

Stwierdzono, że dla kolejnych trzech faz współczynnik stateczności przyjmuje wartości od 1,01 do 1,04, więc ich zsuw jest bardzo prawdopodobny. Mniej prawdopodobny jest zsuw fazy IV ($SF = 1,24$). Zsuw fazy V ($SF = 1,43$) jest mało prawdopodobny. Oszacowano, że osuwisko może podlegać propagacji w górę zbocza o kolejne 25 m.

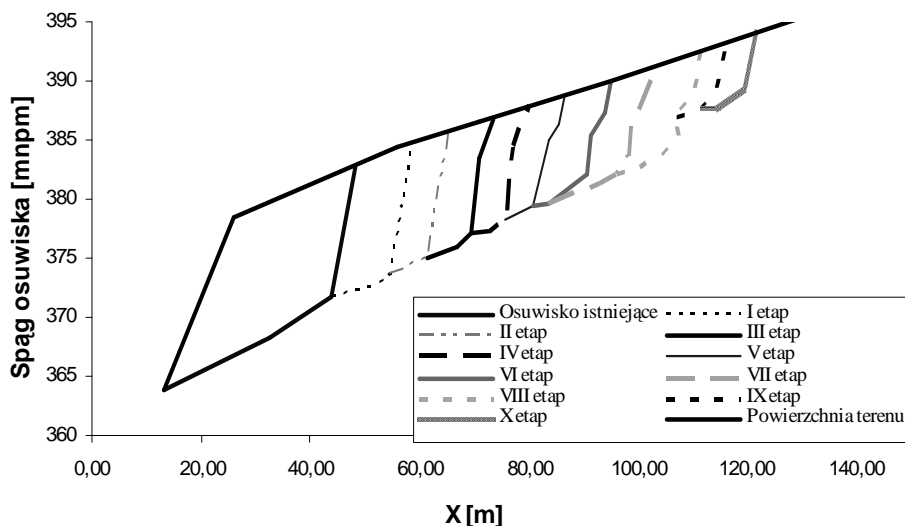
3.2. Przekrój B-B

Zakres obliczeń dotyczących przekroju B-B obejmował analizę stateczności stanu przed wystąpieniem osuwiska oraz kolejnych faz jego propagacji. Uzyskano współczynnik stateczności bliski 1 dla stanu początkowego osuwiska (co stanowi potwierdzenie poprawnej identyfikacji wstecznej parametrów podłoża) (por. rys. 5) oraz kolejnych siedmiu faz propagacji osuwiska. Dla fazy VIII uzyskano współczynnik stateczności 1,18, dla fazy IX – 1,20, dla fazy X – 1,35. Uznano, że zsuw fazy X jest już mało prawdopodobny. Zasięg całkowity prawdopodobnego osuwiska w przekroju B-B wynosi więc około 100 m od krawędzi skarpy w stanie przed osuwiskiem i jest wyraźnie większy niż w przekroju A-A.



Rys. 5. Postać mechanizmu zniszczenia w przekroju B-B. Stan przed wystąpieniem osuwiska

Fig. 5. Failure mechanism in cross section B-B. Stage just before occurrence of the landslide

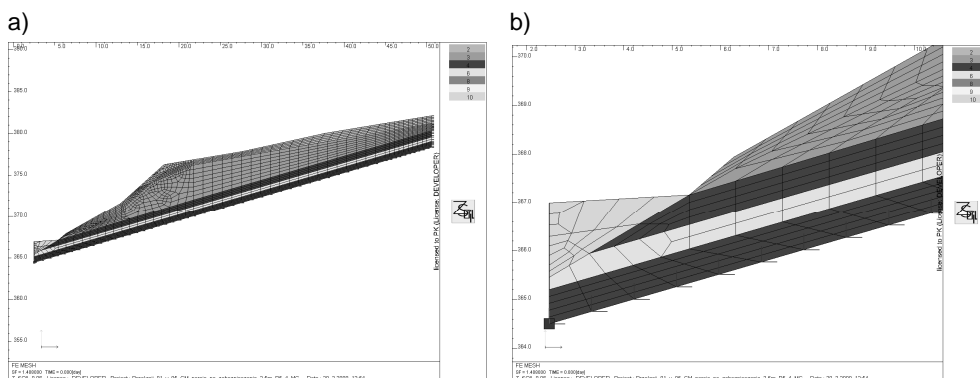


Rys. 6. Kolejne fazy propagacji osuwiska w przekroju B-B

Fig. 6. Propagation of the landslide in cross-section B-B

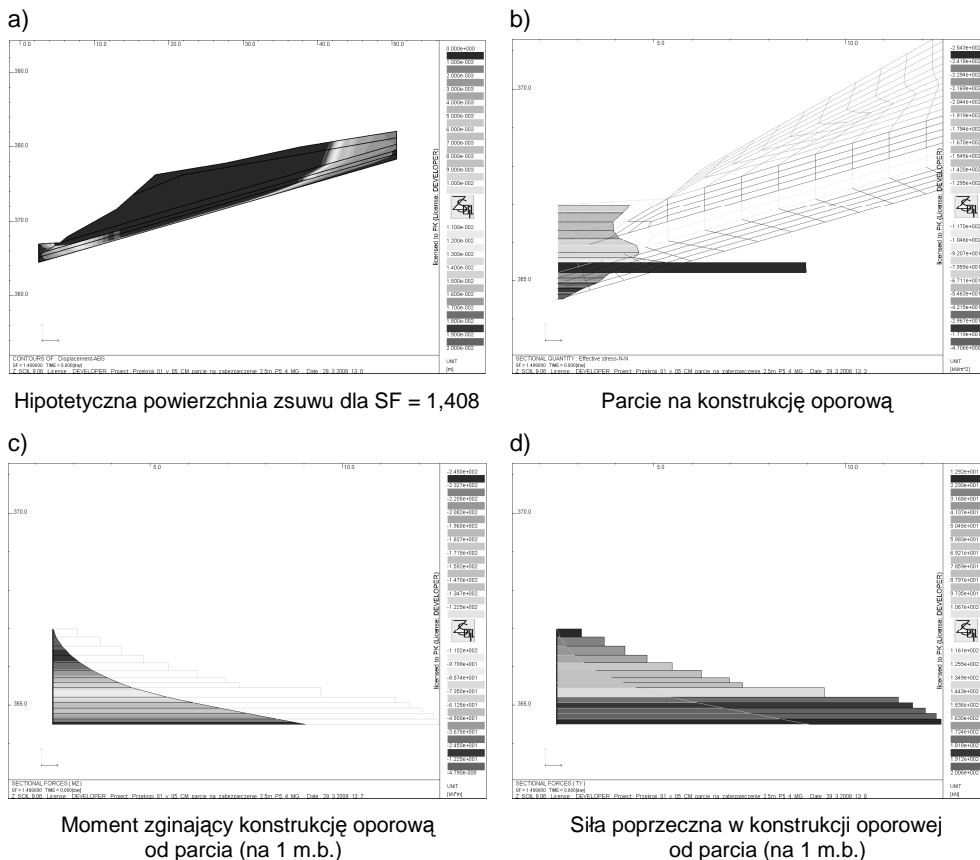
4. Koncepcja zabezpieczenia osuwiska

Ponieważ obszar niszy osuwiska jest niestabilny (współczynnik stateczności $SF = 1,01$), prowadzenie jakichkolwiek prac inżynierskich bezpośrednio na nim nie wydaje się obecnie uzasadnione. Możliwe jest wykonanie zabezpieczenia w formie konstrukcji inżynierskiej, tj. ściany oporowej zakotwionej u podnóża strefy osuwiskowej w warstwach skał niepodlegających ruchom osuwiskowym.



Rys. 7. Jeden ze schematów obliczeniowych służących oszacowaniu sił działających na konstrukcję zabezpieczenia: a) widok ogólny, b) szczegół przy konstrukcji zabezpieczającej

Fig. 7. Computational model (for one section) to evaluate forces acting on retaining structure:
a) overview, b) detail



Rys. 8. Wyniki obliczeń dla jednego z przekrojów

Fig. 8. Calculations results for one of cross-sections

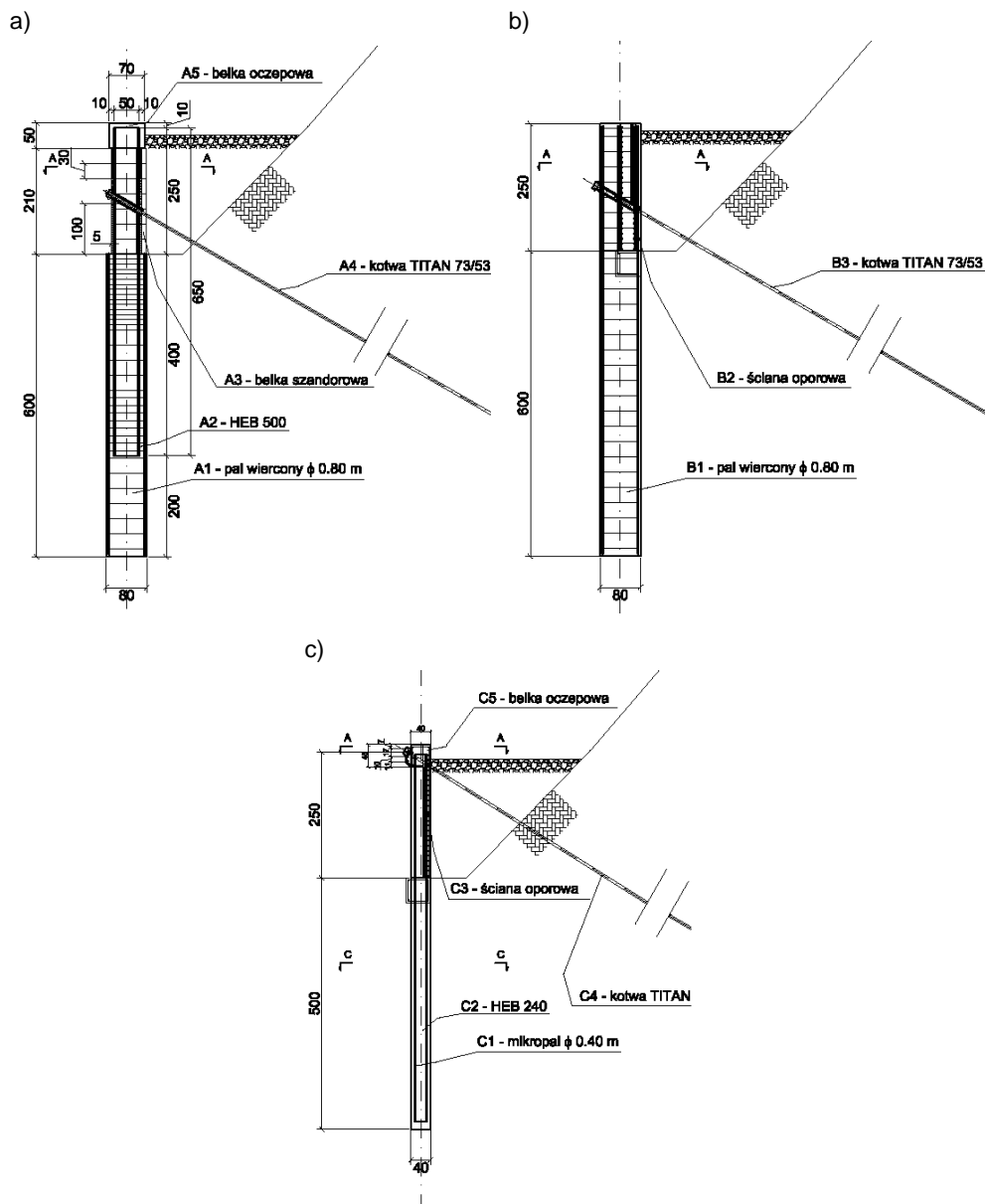
Prace te mają na celu:

- w przypadku dalszego uaktywnienia się ruchów masowych zabezpieczenie terenu poniżej osuwiska, a w szczególności potoku przed wypełnieniem koryta masami ziemnymi, co mogłoby skutkować katastrofalnym w skutkach spiętrzeniem wód,
- regulację potoku w obszarze osuwiska i przeciwdziałanie dalszej erozji jego brzegu w zakolu.

Dalszym środkiem zabezpieczającym osuwisko jest odwodnienie terenu osuwiska i terenów z nim sąsiadujących przez wykonanie odpowiednich drenaży powierzchniowych, mających na celu odprowadzenie wód opadowych, mogących potencjalnie nawadniać strefę osuwiskową.

Zabezpieczenie osuwiska wymaga oszacowania sił czynnych działających na konstrukcję oporową w przypadku uaktywnienia się zsuwu mas ziemnych. Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych, za pomocą programu Z_Soil.PC v. 2009. Dotyczą one stanu równowagi granicznej uzyskanego metodą redukcji $c - \phi$ w mo-

mencie wystąpienia zsuwu, przy współczynniku stateczności SF charakterystycznym dla rozważanego przekroju. W obliczeniach tych wykorzystano aktualną (po wystąpieniu osuwiska) geometrię zbocza, identyfikowaną pomiarami GPS.



Rys. 9. Trzy warianty konstrukcji palisady zabezpieczającej brzeg potoku przed osuwiskiem

Fig. 9. Three variants of retaining structure

Wyniki powyższe umożliwiły zaprojektowanie trzech wariantów palisady zabezpieczającej osuwisko:

- Wariant A – palisada z pali wierconych o średnicy 80 cm z osadzonymi profilami HEB 500 w rozstawie 5 m, pomiędzy palami prefabrykowane belki szandorowe,
- Wariant B – palisada z pali wierconych o średnicy 80 cm, silnie zbrojonych, w rozstawie 5 m, pomiędzy palami monolityczna ściana oporowa,
- Wariant C – palisada z mikropali Ø360 wierconych z osadzonymi profilami HEB 240, w rozstawie 1,25 m, pomiędzy mikropalami monolityczna ściana oporowa.

We wszystkich wariantach konstrukcja wymaga kotwienia kotwami ukośnymi sięgającymi do warstwy nienaruszonego podłoża skalnego. Wybór wariantu konstrukcji uzależniony jest od wyników szczegółowej analizy kosztów.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania polowe oraz obliczenia numeryczne wskazują na tendencję osuwiska do dalszej propagacji, dlatego opracowano koncepcję jego zabezpieczenia. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych wykazują zgodność z obserwacjami terenowymi.

Literatura

- [1] Sanecki L., Truty A., Urbański A., *O możliwościach modelowania komputerowego stateczności złożonych układów geotechnicznych*, Materiały XLV Konferencji Nauk KILiW PAN, Krynica–Wrocław 1999.
- [2] Truty A., Urbański A., Podleś K., *Analiza zagadnień geotechnicznych w systemie Z-SOIL*, Materiały Pokonferencyjne X Jubileuszowej Konferencji Naukowej „Metody numeryczne do projektowania i analizy konstrukcji hydrotechnicznych”, wyd. Samodzielny Zakład Podstaw Konstrukcji Budowli Wodnych, Politechnika Krakowska, Kraków 1998.
- [3] *Z_Soil.PC, Theoretical Manual*, ZACE Services Ltd., Lozanna 1998.