

Marek Cała, Michał Betlej**

TRÓJWYMIAROWA ANALIZA STATECZNOŚCI ZBOCZA W SKOMPLIKOWANYCH WARUNKACH GEOLOGICZNYCH

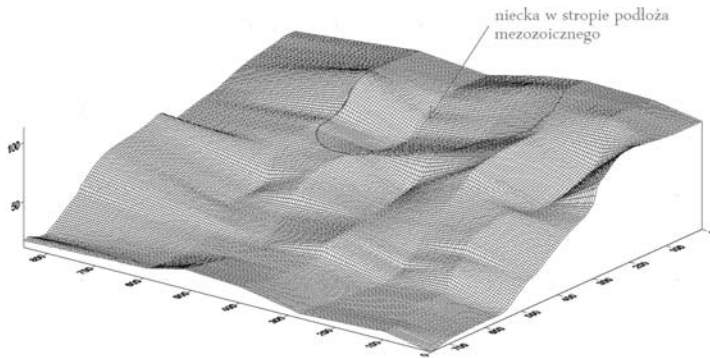
1. Wstęp

Dotychczas stosowane, dwuwymiarowe metody obliczeń, zakładające płaski stan odkształcenia, nie pozwalały na analizowanie zboczy w warunkach skomplikowanej przestrzennej budowy geologicznej. Nie uwzględniały one wpływu złożonego przebiegu powierzchni strukturalnych w trzecim (prostopadłym do przekroju) wymiarze. Dopiero w ostatnich latach, rozwój komputerów pozwolił na wykorzystanie trójwymiarowego modelowania numerycznego w zagadnieniach stateczności zboczy. Możliwe stało się dokładne odwzorowywanie przestrzennej budowy geologicznej, realnie oddającej warunki rzeczywiste. Niestety analizy takie są wciąż rzadko spotykane, ze względu na dużą pracochłonność wymaganą do zbudowania modelu i przeprowadzenia obliczeń. W niniejszej pracy pokazano, jak duże korzyści może mieć wysiłek włożony w przeprowadzenie takiej trójwymiarowej analizy numerycznej.

2. Analiza zbocza w skomplikowanych warunkach geologicznych

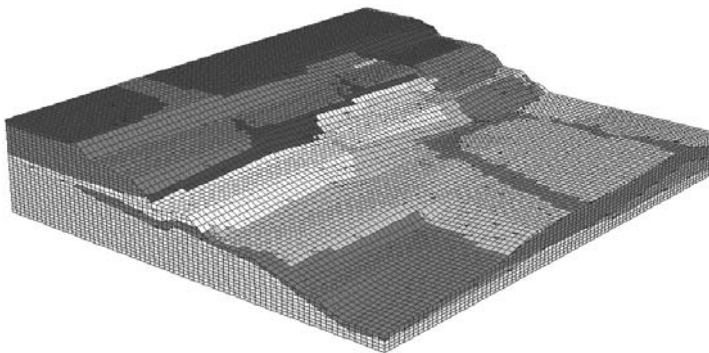
Dla zaprezentowania procesu obliczeniowego, wymaganego do określenia wskaźnika stateczności zbocza w skomplikowanych warunkach geologicznych, wybrano fragment południowego zbocza odkrywki „Bełchatów”. W rozpatrywanym rejonie w grudniu 2005 roku powstało osuwisko, nazwane później 24S, które jest aktywne do dnia dzisiejszego. Dokładna dokumentacja geologiczno-inżynierska kopalni pozwoliła na odwzorowanie przestrzennej budowy geologicznej w modelu numerycznym. Na bazie siedmiu przekrojów dostarczonych przez służby geologiczne kopalni (od 51,5 SN do 55 SN) wygenerowane zostały powierzchnie odpowiadające podłożu mezozoicznemu (rys. 1) oraz wydzielonym 33 warstwom w ramach utworów trzecio- i czwartorzędowych.

* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków



Rys. 1. Powierzchnia podłoża mezozoicznego

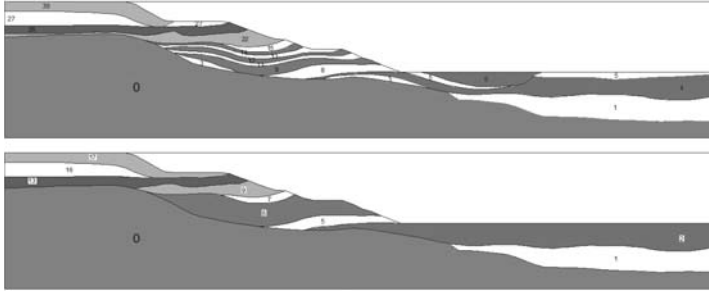
Ze względu na specyfikę obliczeń numerycznych oraz ich czas, z wydzielonych pierwotnie 33 warstw, utworzono ostatecznie 17, które weszły w skład modelu numerycznego (rys. 2). Model składał się z około 138 tys. elementów, obejmując obszar o powierzchni 637,5 tys. m² (850×750 m).



Rys. 2. Model numeryczny analizowanego rejonu zbocza

Na budowę geologiczną zbocza [4] w tym rejonie składają się głównie utwory trzeciorzędowe oraz w mniejszym stopniu utwory czwartorzędowe. Utwory czwartorzędowe to osady dolnego i górnego piętra strukturalnego budujące I i II piętro górnicze. Osady dolnego piętra strukturalnego reprezentowane są głównie przez szare i zielono-szare gliny glacialne i w mniejszym stopniu przez piaski, muły oraz utwory zastoiskowe. Osady górnego piętra strukturalnego to głównie gliny glacialne oraz fluwioglacjalne osady piaszczyste i piaszczysto-żwirowe tworzące subhoryzontalnie zalegające warstwy. Utwory trzeciorzędowe reprezentowane są przede wszystkim przez utwory kompleksu ilasto-piaszczystego, budujące zasadniczą część masywu zbocza w analizowanym rejonie. Wykształcone są w postaci brunatnych piasków różnoziarnistych, ilów i mułów barwy zielonej i szarej, sporadycznie w postaci ilów i mułów brunatnych, pylastych piasków szarozielonych oraz przez utwory

zwietrzelinowe. Charakter litologiczny zwietrzelin wynika z litologii skał podłoża mezozoicznego, które ulegały niszczeniu w wyniku erozji. Strop podłoża mezozoicznego budują skały jury górnej. Na rysunku 3 przedstawiony został jeden z przekrojów przez zbocze, ilustrujący złożoność budowy geologicznej w rozpatrywanym rejonie (u góry).



Rys. 3. Przekrój 52 SN – rzeczywista budowa geologiczna (u góry) i po uproszczeniach.
 0 — podłoże mezozoiczne, 1 — piasek, 2 — ił w stanie zwartym, 5 — piasek, 6 — ił w stanie plastycznym, 7 — piasek, 9 — glina, 13 — mułki zapiaszczone, 16 — piasek, 17 — glina

Po dokładnych analizach stwierdzono, że zasadniczymi czynnikami kształtującymi warunki stateczności zbocza w rejonie zaistniałego osuwiska były: obecność niekorzystnej z punktu widzenia stateczności budowy geologicznej oraz zmiana pierwotnych właściwości fizyczno-mechanicznych iłów zielonych wskutek oddziaływania wód resztkowych i infiltracyjnych. Najbardziej niekorzystną cechą budowy geologicznej było występowanie w obszarze całego zbocza konsekwentnych nachyleń osadów o stosunkowo dużej miąższości, wypełniających nieckowate zagłębienie morfologiczne na stropie podłoża mezozoicznego (kreda górna) (rys. 1). Niekorzystna była również obecność sekwencji litologicznych (utwory piaszczyste współwystępujące z gruntami spoistymi) sprzyjających infiltracji wód opadowych, ich migracji, a w efekcie nawadnianiu i rozmakaniu utworów ilastych [4].

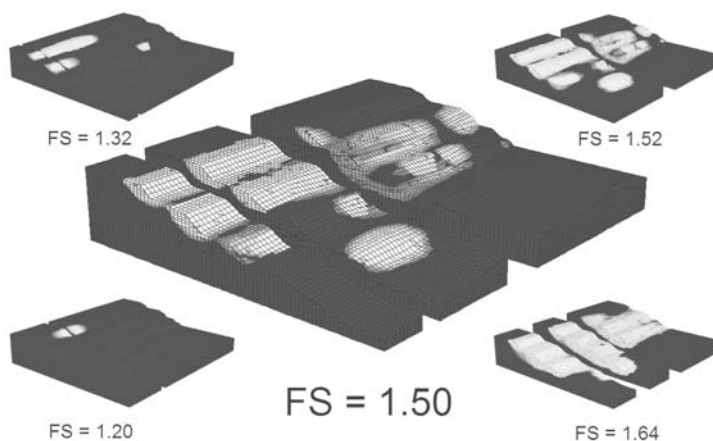
Gromadzeniu wód resztkowych oraz tzw. wód bliskiego krążenia (pochodzących z infiltracji wód powierzchniowych i opadowych), sprzyjała również nieckowata struktura osadów, powodująca spływ wód ku osi zagłębienia i ułatwiająca w ten sposób długotrwałe ich oddziaływanie na stan utworów ilastych [4].

W dokumentacji hydrogeologicznej można było znaleźć informację, że powierzchnia zdepresjonowanego podstawowego zwierciadła wód podziemnych w okresie przed powstaniem osuwiska znajdowała się znacznie poniżej stropu podłoża mezozoicznego — około 80 m w górnej części zbocza i około 50 m u podnóża [1]. Dlatego pierwszym etapem obliczeń było przeanalizowanie modelu, w którym nie uwzględniono działania wody. Przyjęto parametry wytrzymałościowe zgodne z tymi otrzymanymi z badań laboratoryjnych (tab. 1) i następnie, wykorzystując program metody różnic skończonych FLAC 3D oraz zmodyfikowaną metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie [2], określono wskaźniki stateczności dla skarpy dolnej, zespołu dwóch dolnych skarp oraz całego zbocza. Wyniki prezentuje rysunek 4.

TABELA 1

Parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe w modelu pierwotnym [4]

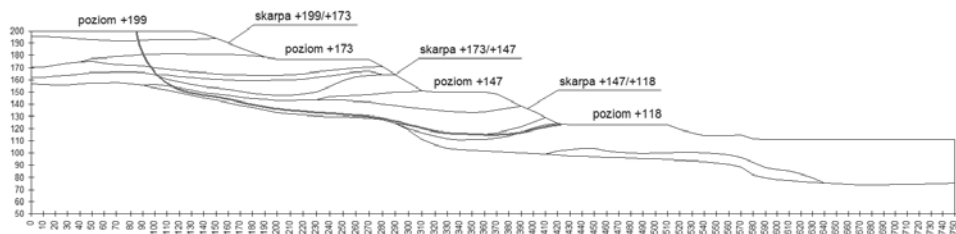
Materiał	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Kohezja [kPa]	Kąt tarcia wewnętrzznego [°]	Wytrzymałość na rozciąganie [kPa]	Moduł Younga [kPa]	Współczynnik Poissona	Kąt dyktacji [°]
Podłoże mezozoiczne	25,0	200,0	35,0	200,0	1,0e+6	0,20	0
Piasek	19,0	1,0	30,5	0	1,3e+5	0,25	0
Il	20,0	60,0	13,0	0	1,5e+4	0,37	0
Mułki zapiaszczone	20,5	14,0	20,4	0	1,5e+4	0,32	0
Glina	21,9	69,0	17,6	0	2,0e+4	0,32	0



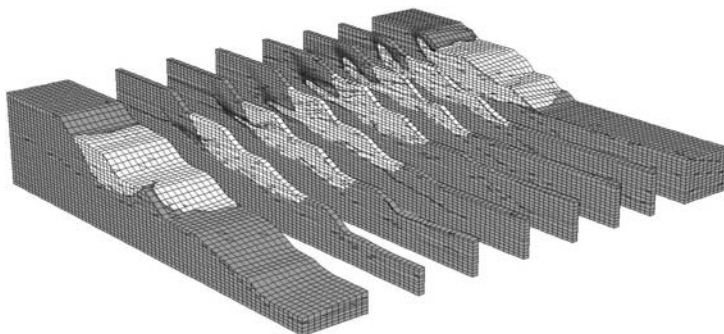
Rys. 4. Wyniki analiz pierwszego modelu w pięciu charakterystycznych stadiach obliczeń (opis w tekście). Widok na mapę przyrostu odkształceń postaciowych. Kolor biały — przyrost większy od $1 \cdot 10^{-5}$

Przeprowadzone obliczenia pokazały, że zbocze zostało prawidłowo zaprojektowane dla sytuacji, w której nie uwzględnia się występowania statycznego zwierciadła wody grunтовой. Najniższy wskaźnik stateczności (1,20) charakteryzuje najwyższą ze skarp, wskaźnik 1,32 skarpe drugą, natomiast całe zbocze ma bardzo wysoki wskaźnik stateczności, wynoszący 1,64. Widać że przy braku wody najslabszymi ogniwami są pojedyncze skarpy, co nie stanowi poważnego utrudnienia w pracy zakładu, a ewentualne szkody są stosunkowo łatwe do naprawienia. Pierwsze większe zagrożenie stanowi utrata stateczności zespołu dwóch skarp, jednak to zagrożenie pojawia się dopiero przy wskaźniku stateczności wynoszącym 1,52, czyli jest bardzo mało prawdopodobne. Dla wskaźnika stateczności 1,50 widać powoli kształtującą się powierzchnię poślizgu w obrębie tych skarp.

Z danych meteorologicznych wynikało, że wystąpienie osuwiska poprzedzone było kilkudniowymi intensywnymi opadami deszczu. Na tej podstawie można było przypuszczać, że na stan gruntów spoistych w utworach trzecio i czwartorzędowych miały wpływ głównie wody opadowe infiltrujące przez powierzchnię zbocza i teren bezpośrednio przyległy do odkrywki. Dlatego kolejnym etapem obliczeń było uwzględnienie osłabienia w pewnych ośrodkach w wyniku zmiany stanu gruntu. W wyniku przeprowadzonej wizji lokalnej (po wystąpieniu osuwiska) stwierdzono, że powierzchnia poślizgu przebiegała w większości w warstwie iłów zielonych zalegających równoległe do opadającego podłoża mezozoicznego, bezpośrednio nad nim (rys. 5). Wprowadzona została więc na całej szerokości modelu dodatkowa warstwa odpowiadająca osłabionym iłom (zamiana warstwy iłów w stanie zwartym na iły w stanie plastycznym). Parametry wytrzymałościowe zostały zmniejszone (w stosunku do iłów w stanie zwartym) do wartości $\varphi = 6,8^\circ$ i $c = 27$ kPa (por. tab. 1). Analiza pokazała, że zasięg osuwiska nie pokrywa się z rzeczywistym i jest znacznie od niego większy (rys. 6). Tym samym założenie, że iły na całej szerokości rozpatrywanego odcinka zbocza uległy uplastycznieniu, jest błędne.



Rys. 5. Przybliżona powierzchnia poślizgu przebiegająca bezpośrednio nad podłożem mezozoicznym w jednym z przekrojów

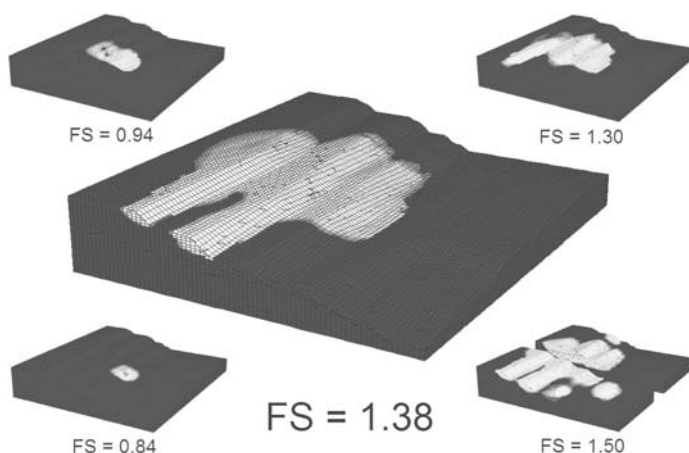


Rys. 6. Wyniki analizy modelu po pierwszej kalibracji. Zbyt duży zasięg osuwiska. Widok na mapę przyrostu odkształceń postaciowych

W obliczeniach należało więc uwzględnić wpływ niecki w podłożu mezozoicznym, tzn. możliwość spływania i gromadzenia się wody w niecce, a tym samym nasączenia utworów

ilastych. Tym razem obszar, na którym zmieniono wytrzymałość iłów, został dostosowany do wymiarów i położenia niecki. Obliczenia zostały przeprowadzone ponownie.

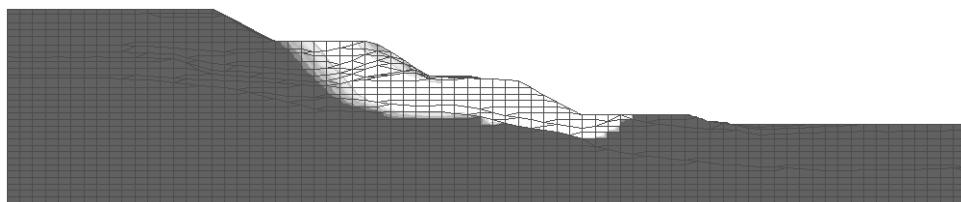
Przyglądając się wynikom (rys. 7), można spostrzec, że założenie o obniżeniu parametrów wytrzymałościowych tylko w obrębie niecki było prawidłowe. Lokalizacja osuwiska praktycznie idealnie pokrywa się z jego rzeczywistym zasięgiem. Problem pojawia się dopiero przy analizie wartości wskaźników stateczności, ponieważ teoretycznie powinien on wynosić 1 (dla całego zbocza) przy zgodności obwiedni. W tym przypadku wynosi on 1,38, co wydaje się wartością bardzo dużą. Na uwagę jednak zasługuje jednak fakt, że wskaźniki stateczności dla najniższej ze szarp, oraz zespołu dwóch dolnych szarp są znacznie mniejsze od 1. W takiej sytuacji, przy braku podparcia, górna część zbocza również uległaby osunięciu. Istnieje oczywiście możliwość dostosowania parametrów wytrzymałościowych iłów w rejonie osłabienia tak, aby otrzymać wskaźnik stateczności równy 1. Jednak zmiany takie muszą być uzasadnione warunkami rzeczywistymi. W tym przypadku, biorąc pod uwagę i tak bardzo niskie wskaźniki stateczności dla dolnych szarp już na tym etapie obliczeń, przyjęto, że nieuzasadnione jest dalsze zmniejszanie parametrów wytrzymałościowych na odpowiadające iłom w stanie miętko plastycznym bądź płynnym.



Rys. 7. Wyniki analizy modelu po kalibracji w pięciu charakterystycznych stadiach obliczeń (opis w tekście). Widok na mapę przyrostu odkształceń postaciowych. Kolor biały — przyrost większy od $1 \cdot 10^{-5}$

Utrata stateczności dwóch górnych szarp (każda oddzielnie), znajdujących się po lewej stronie modelu (rys. 7) wynika ze specyfiki obliczeń zmodyfikowaną metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie [2] oraz tego, że mają one o wiele większy generalny kąt nachylenia niż całe zbocze. Wskaźnik stateczności dla słabszej z nich, tj. górnej, wynosi 1,28, a dla mocniejszej (dolnej) 1,34. Wykorzystanie zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie, często wiąże się z lokalną utratą stateczności pojedynczych szarp w trakcie poszukiwania globalnego (odniesionego co całego zbocza) wskaźnika stateczności, co wynika jak wspo-

mniano z różnych kątów nachylenia. W rozpatrywanym przypadku, należy zwrócić uwagę na bardzo niskie wskaźniki stateczności (poniżej 1) dla skarpy dolnej i zespołu skarp środkowej i dolnej, w ramach których doszło do osuwiska. Aktywacja procesu osuwiskowego powoduje wiele zmian w zboczu, m.in. niszczenie struktury gruntów, przemieszczanie warstw względem siebie, otwarcie nowych miejsc intensywnej infiltracji wody. W rozpatrywanym przypadku, należy wziąć pod uwagę fakt bardzo dużej różnicy pomiędzy wskaźnikami stateczności dla zespołu dwóch dolnych skarp oraz całego zbocza (prawie 0,5). Nie wydaje się realne, aby najwyższa skarpa, a tym samym górna część zbocza, była stateczna, w przypadku powstania procesu osuwiskowego bezpośrednio pod nią, obejmującego praktycznie $\frac{2}{3}$ zbocza (rys. 8).



Rys. 8. Powierzchnia poślizgu dla wskaźnika stateczności 0,94 w przekroju 54 SN

3. Wnioski

W pracy starano się przedstawić proces prowadzący do oceny stateczności zbocza w skomplikowanych warunkach geologiczno-inżynierskich, bazujący na weryfikacji uzyskanych wyników obliczeń o rzeczywiste obserwacje terenowe. Czynnikiem przyjętym jako kryterium wskazujące poprawność rozwiązania była zgodność obwiedni powierzchni poślizgu uzyskanej z obliczeń oraz rzeczywistego zasięgu osuwiska.

Prowadzenie tego typu analiz, uwzględniających czynniki wynikające z budowy geologicznej oraz z oddziaływań zewnętrznych, umożliwia dopracowywanie modeli numerycznych dla obszarów o podobnej budowie geologicznej (np. w ramach jednej kopalni odkrywkowej) i prowadzenie ekonomicznych działań zapobiegających powstaniu procesów osuwiskowych w przyszłości, m.in. efektywne projektowanie skarp i zboczy.

Rozwój techniki, a tym samym zwiększanie możliwości obliczeniowych komputerów pozwala na przeprowadzanie coraz bardziej skomplikowanych analiz. Możliwe staje się odwzorowywanie złożonej budowy geologicznej oraz uwzględnianie wpływu przestrzennego układu powierzchni strukturalnych na stateczność zboczy.

LITERATURA

- [1] *Betlej M.*: Analiza stateczności zboczy w kopalniach odkrywkowych w oparciu o wyniki trójwymiarowej analizy numerycznej. Kraków 2009 (praca magisterska)
- [2] *Cała M., Flisiak J.*: Analiza stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. Geotechnika w budownictwie i górnictwie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003, s. 348–354

- [3] *Cała M.*: Numeryczne metody analizy stateczności zboczy. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2007
- [4] *Cała M., Flisiak D., Flisiak J., Kowalski M., Mazurek J., Rybicki S., Tajduś A.*: Ocena stateczności rejonu osuwiska 24S: możliwości zabezpieczenia stateczności skarpy południowej ograniczającej osuwisko 24S oraz ocena stanu stateczności rejonu posadowienia linii elektrycznej zakładu energetycznego i drogi gminnej. Kraków 2008 (praca niepublikowana)
- [5] FLAC 3D v. 3.1: User's Manual. Itasca Consulting Group. Minneapolis 2006
- [6] *Rybicki S., Flisiak J., Cała M., Tylikowski M., Sowiński L., Orszulak A., Chomiak I.*: Dokumentacja geologiczno-inżynierska procesów osuwiskowych 22S I 24S wraz z weryfikacją przyjętych kryteriów bezpieczeństwa (BOT KWB „Bełchatów”). Kraków 2007 (praca niepublikowana)
- [7] *Wilun Z.*: Zarys Geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005