

Marek CAŁA, Michał BETLEJ

Akademia Górniczo - Hutnicza Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków

Wybrane aspekty trójwymiarowego modelowania numerycznego stateczności zboczy w warunkach skomplikowanej budowy geologicznej

Słowa kluczowe

stateczność zboczy, osuwiska, modelowanie numeryczne, wskaźnik stateczności

Streszczenie

Proces oceny stateczności zboczy wymaga stosowania wielu założeń upraszczających, których wpływ jest złożony i zależny od budowy geologicznej badanego obszaru. Im bardziej skomplikowana jest budowa geologiczna, tym więcej istnieje czynników istotnie wpływających na stateczność, które powinny być w miarę możliwości uwzględnione w analizie. W pracy pokazano przykłady trójwymiarowych analiz stateczności zboczy z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. Przedstawiono zagadnienie doboru prawidłowych warunków brzegowych, wielkości elementów i samego modelu przestrzennego oraz ich wpływ na wyniki obliczeń. Zaprezentowano sposób kalibracji modelu numerycznego w oparciu o rzeczywisty zasięg procesu osuwiskowego oraz prawidłowy sposób interpretacji wyników.

1. Wstęp

Wykorzystanie trójwymiarowego modelowania numerycznego pozwala na lepsze i bardziej realistyczne analizowanie stateczności zboczy w porównaniu np. z metodami równowagi granicznej (LEM), czy analizą płaskich przekrojów metodami numerycznymi. Szczegółowe informacje na ten temat można znaleźć w pracach [1, 2, 3, 8]. Już samo przejście z metod równowagi granicznej do metod numerycznych daje dużo korzyści. Nie wymagają one bowiem przyjmowania założeń dotyczących powierzchni poślizgu czy rozkładu sił pomiędzy blokami jak w LEM oraz umożliwiają uwzględnienie szeregu czynników wpływających na zachowanie stateczności, związanych z budową geologiczną i właściwościami masywu gruntowego, istnieniem nieciągłości, wpływem wody, czy oddziaływań dynamicznych. Niestety możliwości te są ograniczone, głównie ze względu na słabą znajomość parametrów stosowanych modeli. O ile bowiem właściwości wytrzymałościowe gruntów badane są powszechnie od szeregu lat, to właściwości odkształceniowe, których znajomość jest niezbędna przy stosowaniu metod numerycznych, są rozpoznane w znacznie mniejszym stopniu. Nie należy jednak traktować tego jako wady, ponieważ LEM w ogóle nie dają możliwości uwzględnienia tych parametrów.

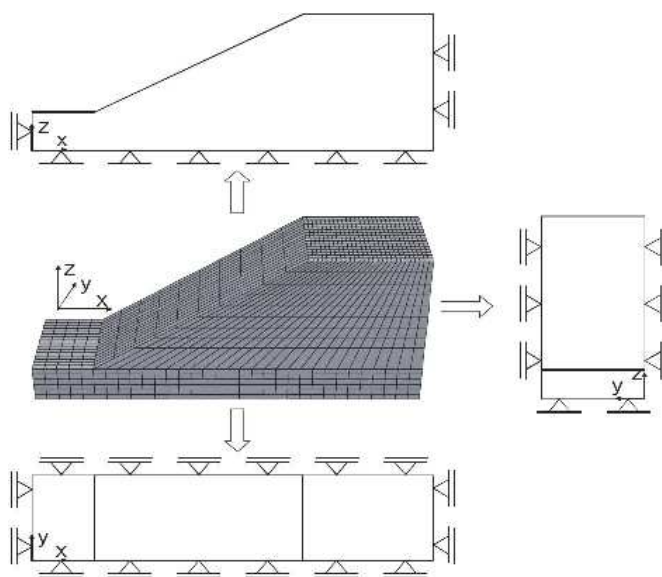
Trójwymiarowe modelowanie numeryczne pozwala na uwzględnienie szeregu czynników wpływających na zachowanie stateczności, których to możliwości, z racji przyjmowanych założeń, nie mają inne metody. Najważniejszym z nich jest możliwość odwzorowania

rzeczywistego przebiegu warstw geologicznych, a tym samym uwzględnienia przestrzennej zmienności oraz wpływu krzywizn na stateczność zboczy. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w pracy [4]. Niestety uwzględnianie wielu czynników jednocześnie powoduje konieczność weryfikacji wyników obliczeń o rzeczywiste, pomierzone wielkości. Coraz częstsze wykorzystanie przestrzennego modelowania numerycznego pozwala na poszerzenie wiedzy w tym zakresie i zapewne spowoduje jeszcze szybszy rozwój takiego sposobu oceny warunków stateczności zboczy.

2. Wybrane aspekty modelowania przestrzennego i ich wpływ na wyniki obliczeń

2.1. Przemieszczeniowe warunki brzegowe

Przemieszczeniowe warunki brzegowe są najczęściej spotykane w analizach stateczności zboczy. Stosuje się je jako blokady konkretnych kierunków przemieszczeń węzłów siatki na krawędziach lub na powierzchniach bocznych modeli, w przypadku analiz przestrzennych. O ile dla rozważań płaskich (dwuwymiarowych), nie ma większych wątpliwości w jaki sposób je utwierdzić, to w modelach przestrzennych nie jest to już tak jednoznaczne. Wątpliwości budzą warunki brzegowe dla bocznych (prostopadłych do rozciągłości zbocza) płaszczyzn. Na rysunku 2.1 przedstawiony został prawidłowy sposób utwierdzenia modelu trójwymiarowego.

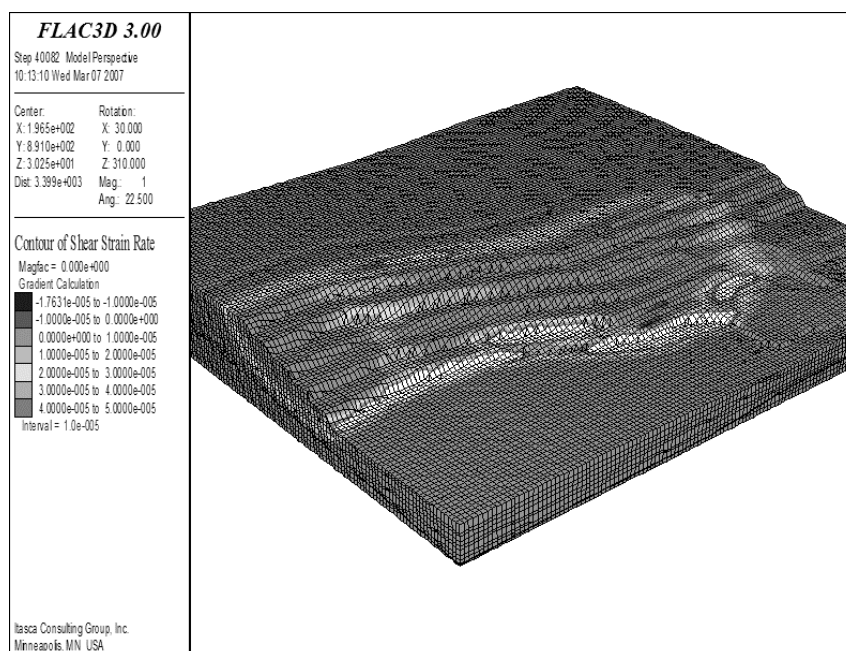


Rys. 2.1. Prawidłowy sposób utwierdzenie modelu przestrzennego
Fig. 2.1. Correct fixing method for three-dimensional numerical model

Jak przedstawiono na rysunku 2.1, na bocznych płaszczyznach modelu, węzły siatki powinny mieć zablokowany przesuw w kierunku prostopadłym, a tym samym swobodę ruchu na kierunkach równoległych. Całkowite zlikwidowanie możliwości przesuwności węzłów na wspomnianych płaszczyznach możliwe jest tylko w uzasadnionych przypadkach, mających odzwierciedlenie w rzeczywistości. Niestety można spotkać w literaturze przykłady analiz,

w których świadomie bądź nieświadomie zastosowany został taki zabieg, skutkujący błędnie zwiększoną wartością wskaźnika stateczności.

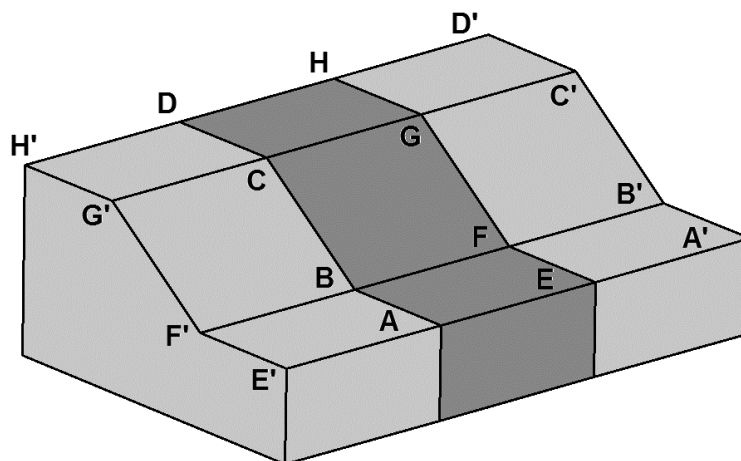
W niektórych przypadkach, gdy mamy do czynienia ze skomplikowaną i niedokładnie rozpoznaną budową geologiczną, sposób utwierdzenia przedstawiony na rysunku 2.1 może powodować niepoprawne rozwiązanie modelu numerycznego. Taką sytuację ilustruje rysunek 2.2 na którym można zauważyć powierzchnię poślizgu (obraz odkształceń postaciowych) osiagającą powierzchnię boczną modelu.



Rys. 2.2. Niewłaściwy zasięg powierzchni poślizgu
Fig. 2.2. Improper range of slide surface

Rozwiązanie przedstawione na rysunku 2.2 dotyczy analizy stateczności filara ochronnego rzeki Nysy Łużyckiej w kopalni węgla brunatnego Turów. Zbudowany dla tego przypadku model numeryczny okazał się zbyt mały (niestety nie dysponowano dokładnymi informacjami o budowie geologicznej poza przedstawionym obszarem). Przebieg powierzchni poślizgu w centralnej części modelu był zgodny z obserwowanymi w rzeczywistości objawami osuwania, jednak w południowej części zbocza (lewa strona modelu) zasięg potencjalnej bryły osuwiskowej okazał się zbyt duży. Wynikało to z przyjętych warunków brzegowych (rys. 2.1), które powodują, że po obu stronach modelu mamy do czynienia z rozwiązywaniem zagadnień symetrycznych (rys. 2.3), co nie jest zgodne z rzeczywistością. Jest to jednak podejście bezpieczniejsze, niż zastosowanie całkowitego zablokowania przemieszczenia węzłów na płaszczyźnie bocznej modelu. W analizowanym przypadku widać, w południowej (lewej) części zbocza, kształtującą się powierzchnię poślizgu, obejmującą wszystkie skarpy, zgodną z jej prawdopodobnym przebiegiem. Aby zbudować w pełni poprawny model numeryczny, należałoby przedłużyć go w kierunku południowym, wprowadzając dodatkowo rozpoznaną

budowę geologiczną, co doprowadziłoby prawdopodobnie do uzyskania konturu osuwiska zgodnej z rzeczywistym, mniejszym zasięgiem.



Rys. 2.3. Symetria modelu wynikająca z przyjętych warunków brzegowych
Fig. 2.3. Symmetry of numerical model as an effect of applied boundary conditions

2.2. Wielkość modelu numerycznego

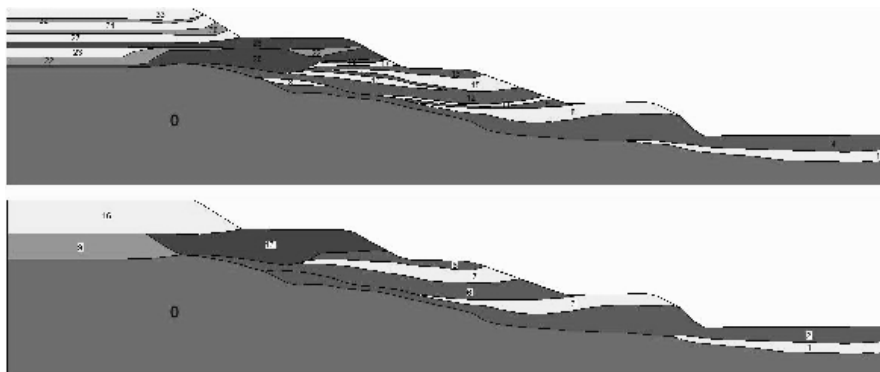
Wielkość przestrzennego modelu numerycznego jest pewnym kompromisem pomiędzy dokładnością obliczeń, a czasem potrzebnym do ich wykonania. Cechą niezmienną i niepodlegającą dyskusji jest zasięg analizy, który powinien być tak dobrany, aby potencjalna powierzchnia poślizgu była odpowiednio oddalona od powierzchni bocznych modelu. W przypadku, gdy zasięg jest zbyt mały, jej przebieg może zostać zakłócony przez zadane warunki brzegowe. W pokazanej na rysunku 2.2 analizie wpływ ten ujawnił się w postaci nieuzasadnionego powiększenia bryły osuwiskowej, jednak gdyby problem dotyczył powierzchni przedniej lub tylnej modelu, to efekt mógłby być odwrotny. Uzyskana powierzchnia poślizgu mogłaby mieć mniejszy zasięg, niż wynikałoby to z rozwiązania poprawnego, większego modelu numerycznego. Szacowanie na podstawie takiego rozwiązania wskaźnika stateczności skutkowałoby nieuzasadnionym wzrostem jego wartości.

Wielkość poszczególnych elementów siatki jest uzależniona od wielkości modelu, grubości utworów budujących zbocze, wymaganej dokładności obliczeń oraz mocy maszyn obliczeniowych. Zbyt duże elementy skutkować będą złym, a czasem nieadekwatnym odwzorowaniem budowy geologicznej, natomiast zastosowanie zbyt małych elementów spowoduje znaczny wzrost czasu obliczeń oraz, co najważniejsze, wymaganej pamięci operacyjnej.

2.3. Wydzielenie warstw geotechnicznych

Analizując zagadnienia o złożonej budowie geologicznej pojawia się problem wydzielenia warstw geotechnicznych (o jednakowych parametrach wytrzymałościowo-odkształceniowych). W analizach przestrzennych, często nie ma możliwości uwzględnienia wszystkich,

wyodrębnionych np. w analizach płaskich warstw. Związane jest to z opisanym w punkcie 2.2 czasem obliczeń i wymaganą pamięcią operacyjną. Konieczne staje się zastosowanie pewnych uproszczeń, polegających na łączeniu warstw w pakiety w taki sposób, aby nie zniekształcić istotnie charakteru procesu niszczenia oraz na wartość wskaźnika stateczności. Na rysunku 2.4 pokazano przykład takiego postępowania w odniesieniu do jednego z przekrojów na południowym zboczu odkrywki Bełchatów.



Rys. 2.4. Proces łączenia warstw w pakiety
Fig. 2.4. Packetting of single soil layers

Pierwotnie w przekroju przedstawionym na rysunku 2.4 wydzielone zostały 24 warstwy geotechniczne o przebiegu wynikającym z otrzymanej dokumentacji geologicznej. Jednak ograniczenie wynikające z przyjętej minimalnej wysokości elementu (2 metry), wymusiło połączenie niektórych utworów i utworzenie grubszych pakietów o parametrach materiału którego było najwięcej. Efektem tych działań było utworzenie nowego przekroju, zawierającego 10 warstw, który był możliwy do zastosowania przy budowie modelu numerycznego.

Weryfikacja przeprowadzonego procesu łączenia warstw w pakiety, powinna być każdorazowo zakończona rozwiązaniem obu przypadków (starego i nowego przekroju) jako zagadnień płaskich, w celu sprawdzenia czy charakter zniszczenia oraz wartość wskaźnika stateczności nie odbiegają istotnie od siebie. Taka bieżąca kontrola z wykorzystaniem metod dwuwymiarowych, dokładniej oddających lokalną budowę geologiczną, powinna pozwolić na wyeliminowanie większych błędów przy budowie, rozwiązywaniu oraz interpretacji wyników z modelu trójwymiarowego.

3. Kalibracja modelu numerycznego

3.1. Z czego wynika konieczność kalibracji?

Konieczność kalibracji modeli numerycznych odzwierciedlających skomplikowaną budowę geologiczną wynika z trzech zasadniczych przyczyn. Pierwszą jest niedokładne rozpoznanie geologiczne, które przeważnie opiera się na wynikach punktowych wierceń badawczych, na bazie których tworzone są przekroje geologiczne. W skali zboczy występujących np. w kopalniach węgla brunatnego, gdzie towarzyszące pokładom utwory nadkładu mają często

bardzo małe grubości, nie jest możliwe dokładne określenie przebiegu warstw. Dodatkowo interpretacja budowy geologicznej w przekrojach pomiędzy otworami badawczymi, zależy od przesłanek co do lokalnej budowy geologicznej rejonu oraz od wiedzy i doświadczenia osób tworzących taki przekrój.

Drugim czynnikiem wymuszającym konieczność kalibracji modelu numerycznego jest zmiana parametrów ośrodków budujących zbcze pod wpływem czynników zewnętrznych. Należy pamiętać, że procesy osuwiskowe najczęściej powstają w wyniku chwilowej zmiany właściwości wytrzymałościowych, odkształceniowych czy zmiany stanu naprężeń w górotworze. Często po wystąpieniu osuwiska nie ma możliwości zbadania jakie warunki panowały w chwili jego powstania.

Trzecią, ale nie mniej ważną przyczyną są uproszczenia stosowane zarówno podczas budowy modelu numerycznego jak i podczas obliczeń. Mowa tu o wspomnianych wcześniej warunkach brzegowych, wielkościach elementów i modelu, uproszczeniach odnośnie budowy geologicznej oraz o specyfice wybranej metody obliczeniowej. Wszystkie te czynniki wpływają na konieczność weryfikacji wyników uzyskiwanych w drodze przestrzennych obliczeń numerycznych.

3.2. Rodzaje kalibracji

W zasadzie kalibracji modelu numerycznego można dokonać w oparciu o dowolną mierzalną wielkość, którą można wyznaczyć w terenie i porównać z jej odpowiednikiem uzyskanym w drodze rozwiązania problemu numerycznego. Jednak pomiar pewnych wielkości jak np. naprężeń jest dosyć skomplikowany, a czasem nawet niemożliwy. Dlatego w praktyce w odniesieniu do osuwisk przyjęło się stosować w zasadzie dwa parametry, których pomiar nie przysparza większych problemów. Są nimi: pomiary przemieszczeń (lub odkształceń) i pomiary prędkości przemieszczeń. Na ich podstawie oraz poprzez obserwację zjawisk towarzyszących powierzchniowym ruchom masowym, takich jak szczeliny, spękania, czy nasunięcia można określić przebieg powierzchni ścięcia i również wykorzystać to jako parametr służący do kalibracji modelu. W niektórych przypadkach, ze względu na brak pomiarów geodezyjnych bądź inklinometrycznych, pozostaje tylko obserwacja tych charakterystycznych i zawsze wstępujących objawów. Dodatkową zaletą takiego podejścia jest całościowa ocena procesu osuwiskowego uwzględniająca charakter zniszczenia w modelu numerycznym w odniesieniu do rzeczywistej budowy geologicznej, a nie tylko do pojedynczych punktów pomiarowych.

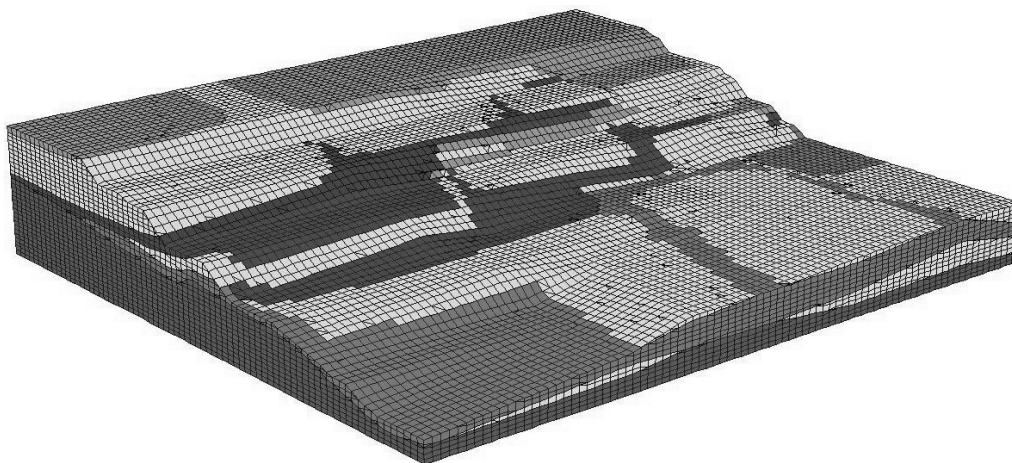
3.3. Kalibracja modelu fragmentu zbcza południowego odkrywki Bełchatów

Jako przykład kalibracji trójwymiarowego modelu numerycznego zaprezentowano ocenę stateczności fragmentu zbcza południowego odkrywki Bełchatów, w rejonie zaistniałego osuwiska 24S. Analiza przeprowadzona była z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie dla ośrodka Coulomba-Mohra, do której wykorzystano program metody różnic skończonych FLAC 3D w wersji 3.1 firmy Itasca.

W rozpatrywanym rejonie zbcze uformowane było w utworach kenozoiku i charakteryzowało się bardzo skomplikowaną budową geologiczną (rys. 2.4). Występowanie naprzemianległych warstw słabo i dobrze przepuszczalnych oraz konsekwentne w stosunku do zbcza ich zaleganie, bardzo niekorzystnie wpływało na warunki stateczności tego obszaru.

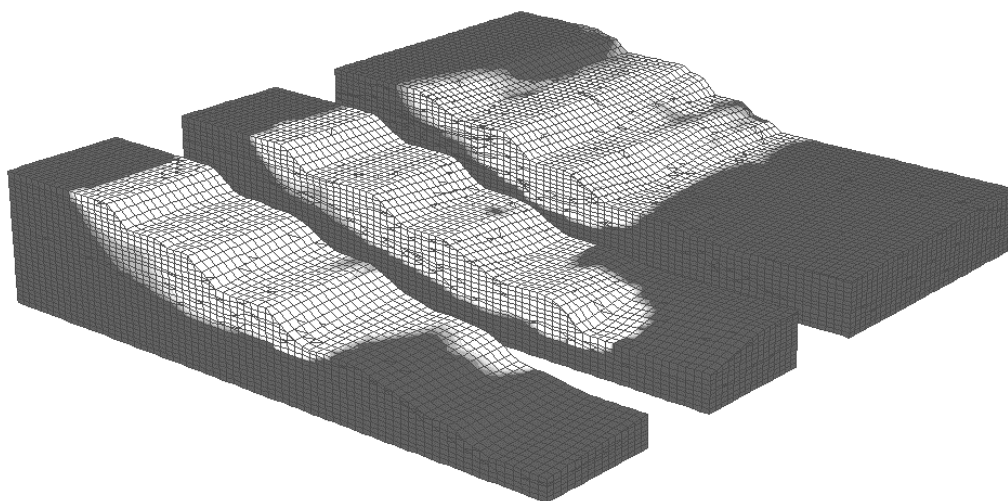
Wynikało to z możliwości intensywnej infiltracji wody opadowej w utwory słabo przepuszczalne (iły, gliny, mułki), za to bardzo wrażliwe na zmianę wilgotności.

Analizę rozpoczęto od zbudowania trójwymiarowego modelu numerycznego, z uwzględnieniem wcześniej opisanych aspektów mogących wpływać na wyniki obliczeń. Pierwotny model (rys. 3.1) składał się z około 138 tys. elementów obejmując obszar o powierzchni 637,5 tys. m² (850 m x 750 m). Utworzony on został na bazie siedmiu przekrojów (od 51,5 SN do 55 SN), w ramach których pierwotnie wyodrębniono 33 warstwy, które następnie poddane zostały procesowi łączenia w większe pakiety o minimalnej grubości 2 metrów. Ostatecznie do budowy modelu wykorzystano 17 nowo powstałych pakietów o parametrach odpowiadających temu ośrodkowi gruntowemu, którego było najwięcej w danym pakiecie. Efekt przeprowadzenia tego procesu dla przekroju 54 SN prezentuje rysunek 2.4.



Rys. 3.1. Pierwotny model numeryczny fragmentu zbocza południowego odkrywki Bełchatów
Fig. 3.1. Initial numerical model of south slope part in Bełchatów open pit

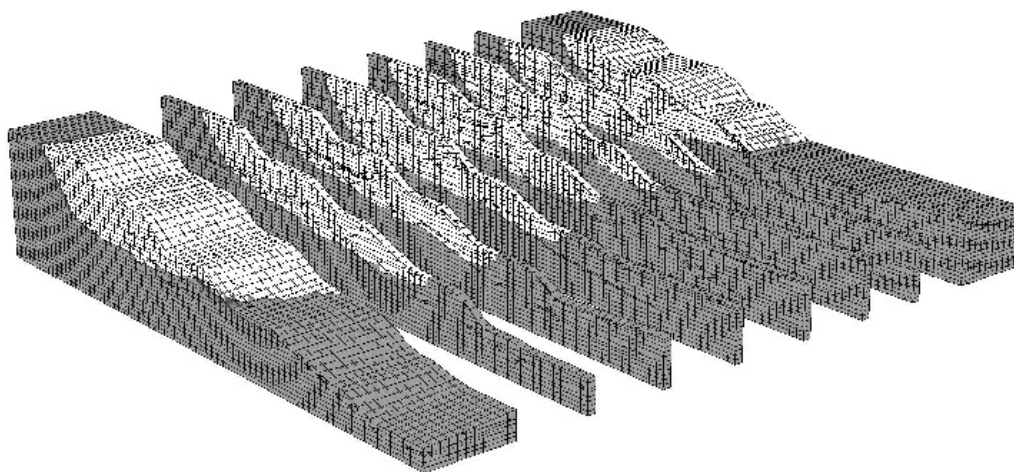
Rozwiązanie modelu numerycznego przedstawionego na rysunku 3.1 ujawniło błędy, objawiające się zbyt dużym zasięgiem powierzchni poślizgu, która osiągnęła po obu stronach modelu jego powierzchnie boczne (rys. 3.2) oraz bardzo wysoką wartością wskaźnika stateczności, wynoszącą 1,64. Sytuacja była podobna do tej przedstawionej na rysunku 2.2. W tym przypadku nie istniały żadne przesłanki co do uzyskania poprawnego rozwiązania w wyniku rozszerzenia modelu numerycznego. Nie istniał bowiem żaden wyraźnie zarysowany obszar, w ramach którego mógłby się zamknąć proces osuwiskowy, jak to było w przypadku analizy stateczności filara rzeki Nysy Łużyckiej.



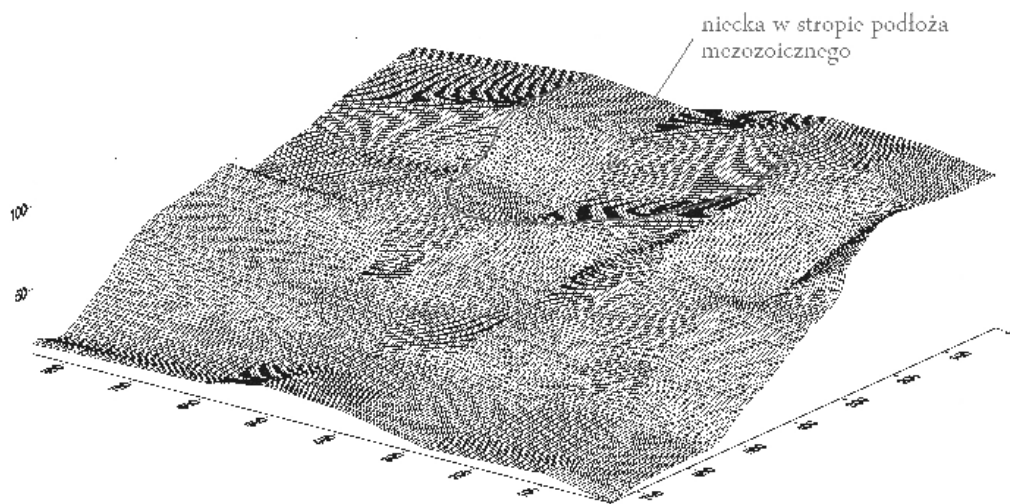
Rys. 3.2. Błędne rozwiązanie pierwotnego modelu numerycznego
Fig. 3.2. Incorrect solution for initial numerical model

Jak wspomniano w punkcie 3.1, w chwili powstania osuwiska, zmianie musiały ulec właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowe pewnych utworów budujących zbocze. Świadczy o tym fakt, że przez długi okres czasu rejon ten nie podlegał żadnym ruchom. W opracowaniach dotyczących osuwiska 24S [5, 7] znaleziono informację, że prawdopodobną przyczyną jego powstania była zmiana stanu warstwy ilów zielonych pod wpływem różnic wilgotności. Na podstawie tej informacji, na całej szerokości modelu zmienione zostały parametry tego ośrodka, na odpowiadające ilom w stanie plastycznym. Po rozwiązaniu tego nowego wariantu, ponownie okazało się, że przebieg powierzchni poślizgu jest zbyt duży i osiąga powierzchnie boczne modelu (rys. 3.3). Tym razem jednak wskaźnik stateczności oszacowany został na poziomie 1,10.

Ponowna analiza budowy geologicznej, szczególnie poza analizowanym obszarem pokazała, że rozszerzenie modelu numerycznego, przy niezmiennych założeniach odnośnie warunków początkowych, nie będzie skutkowało uzyskaniem poprawnego konturu powierzchni poślizgu. Konieczne więc stało się znalezienie innego czynnika, decydującego o warunkach stateczności tego rejonu. Rozwiązanie znaleziono analizując geometrię powierzchni podłoża mezozoicznego, charakteryzującego się znacznie mniejszą przepuszczalnością niż wszystkie wyżej zalegające utwory kenozoiczne. W rejonie wystąpienia osuwiska, w podłożu tym występowała dosyć duża niecka (rys. 3.4), w ramach której istniała możliwość spływania i gromadzenia się wody, mogącej nawadniać nadległe utwory. Było to szczególnie istotne w przypadku występowania dużych i długotrwałych opadów deszczu.



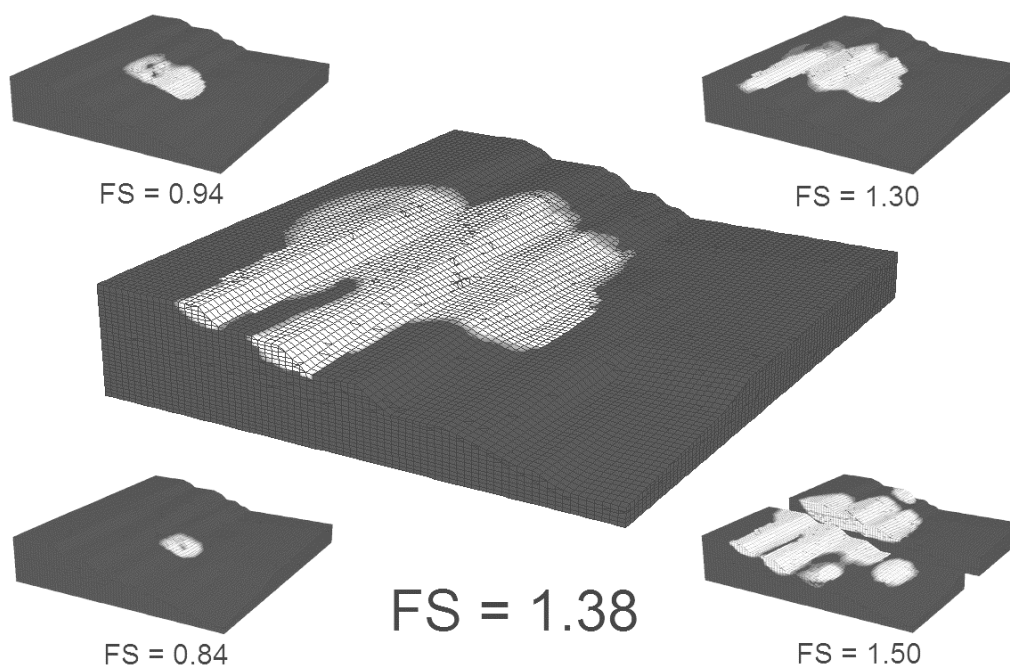
Rys. 3.3. Błędne rozwiązanie drugiego modelu numerycznego
Fig. 3.3. Incorrect solution for second numerical model



Rys. 3.4. Niecka w stropie podłoża mezozoicznego
Fig. 3.4. Basin in roof of Mesozoic subsoil

Zatem kolejnym etapem w procesie szukania zgodności konturu osuwiska była zmiana parametrów w warstwie ilów zielonych tylko w obrębie niecki w podłożu mezozoicznym. Wyniki obliczeń dla kilku charakterystycznych wartości wskaźnika stateczności ilustruje rysunek 3.5. Śledząc kolejne fazy powstawania osuwiska można zauważyć, że proces ten zaczyna się w najniższej ze skarp, przy bardzo niskim wskaźniku stateczności wynoszącym 0,84 i rozwija się w górę zbocza. Zespół dwóch dolnych skarp ulega osunięciu przy wskaźniku stateczności wynoszącym 0,94, natomiast całe zbocze przy 1,38. Na rysunku 3.5 widać, że począwszy od jego wartości w granicach 1,3, do utraty stateczności dochodzi w najwyższej

skarpie, a powierzchnia poślizgu w jej obrębie osiąga krawędź modelu. Dalej przy wartości około 1,38 zniszczeniu ulega kolejna skarpa. Wynika to ze specyfiki obliczeń zmodyfikowaną metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie, w której w procesie szukania globalnego współczynnika stateczności dla całego zbocza, mogą wystąpić lokalne zniszczenia. W tym konkretnym przypadku istotny jest fakt, że dla tak przyjętych parametrów obliczeniowych dolna część zbocza podlega procesowi osuwania przy bardzo niskich wartościach wskaźnika stateczności (znacznie poniżej 1). W takiej sytuacji trudno sobie wyobrazić, że przy braku podparcia wyżej zalegające utwory nie ulegną osunięciu.



Rys. 3.5. Etapy rozwiązań prawidłowego modelu numerycznego
Fig. 3.5. Solution stages of correct numerical model

W rozpatrywanym przypadku wpływ warunków brzegowych nie jest istotny dla rejonu, w którym powierzchnia poślizgu ma najgłębszy zasięg (centralna część modelu). Jest to sytuacja odwrotna do tej przedstawionej na rysunku 2.2, gdzie krawędź modelu osiągnęła powierzchnia zniszczenia obejmująca całe zbocze, a nie tylko pojedyncze skarpy.

Ostateczny model numeryczny dla fragmentu południowego zbocza odkrywki Bełchatów, wykazał pełną zgodność obwiedni powierzchni poślizgu w rejonie zaistniałego osuwiska 24S.

4. Wnioski

Wykorzystanie trójwymiarowego modelowania numerycznego daje ogromne możliwości w analizowaniu procesów zachodzących w ośrodku geologicznym. W zagadnieniach analizy stateczności zboczy pozwala na dokładne i rzeczywiste oddanie budowy geologicznej oraz lepszy opis właściwości ośrodków budujących zbocza. Największą zaletą takiego podejścia

jest rezygnacja z założenia o płaskim stanie odkształcenia oraz możliwość uwzględniania czynników związanych z przestrzennym układem warstw, które jak wiadomo istotnie wpływają na warunki stateczności.

Pojawiające się problemy, w tym konieczność przypisywania parametrów odkształceniowych, będą wymagały ciągłych badań oraz weryfikacji modeli obliczeniowych w oparciu o pomiary terenowe. Wraz z rozwojem jednostek obliczeniowych pojawiała się będzie możliwość analizowania coraz bardziej złożonych zagadnień oraz dokładniejsze odwzorowywanie problemów obecnie rozwiązywanych.

Literatura

- [1] Betlej M. 2009: Ocena stateczności zboczy w kopalniach odkrywkowych w oparciu o wyniki trójwymiarowej analizy numerycznej, AGH, Kraków (praca magisterska).
- [2] Cała M., Flisiak J. 2000: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. Geotechnika i budownictwo specjalne: XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Wyd. KGGIG AGH, Kraków, 27–37.
- [3] Cała M., Flisiak J., Tajduś A. 2004: Numeryczne metody analizy stateczności skarp i zboczy. Warsztaty Górnicze z cyklu "Zagrożenia naturalne w górnictwie", Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 37–50.
- [4] Cała M. 2007: Trójwymiarowa analiza stateczności zboczy z zastosowaniem metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. Analiza numeryczna propagacji fal oraz stateczności zboczy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 59-90.
- [5] Cała M., Flisiak D., Flisiak J., Kowalski M., Mazurek J., Rybicki S., Tajduś A. 2008: 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, (praca niepublikowana).
- [6] Cała M., Betlej M. 2010: Trójwymiarowa analiza stateczności zboczy w skomplikowanych warunkach geologicznych. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 34, Zeszyt 2, 141-148.
- [7] Rybicki S., Flisiak J., Cała M., Tylikowski M., Sowiński L., Orszulak A., Chomiak I. 2007: Dokumentacja geologiczno-inżynierska procesów osuwiskowych 22S I 24S wraz z weryfikacją przyjętych kryteriów bezpieczeństwa (BOT KWB "Bełchatów"), (praca niepublikowana).
- [8] Stopkiewicz A., Cała M. 2004: Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpaccim z zastosowaniem metod numerycznych: XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Wyd. KGBIG AGH, Kraków, 519–529.

Chosen aspects of three dimensional slope stability analysis in complex geological conditions

Key words

slope stability, landslides, numerical modeling, factor of safety

Abstract

The process of slope stability analysis requires several simplifying assumptions. The influence of these assumptions is complex and depends on the geology of analyzed region. A very complex geology results in increasing number of factors influencing stability necessary to be taken under consideration. This paper shows a few examples of three-dimensional slope stability analyses utilising modified shear strength reduction technique. The problems of correct estimation of boundary conditions, element and model size were discussed and its influence on calculations results was also presented. The numerical model calibration process was performed with actual range of landslide and correct way of result's interpretation.

Przekazano: 8 kwietnia 2010 r.