

MAREK CAŁA
JERZY FLISIAK

Katedra Geomechaniki Górniczej i Geotechniki, AGH

Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych.

STRESZCZENIE: W pracy przeprowadzono porównanie wyników analizy stateczności skarp i zboczy klasycznymi metodami równowagi granicznej oraz metodą numeryczną różnic skończonych z wykorzystaniem programu FLAC. Po szczegółowym omówieniu metodyki określania wskaźnika stateczności przy zastosowaniu programu Metody Różnic Skończonych FLAC przeprowadzono szereg obliczeń dla skarp o zróżnicowanej geometrii, których wyniki porównano z wynikami uzyskanymi z zastosowania programu SLOPE/W, wykorzystującego metody równowagi granicznej. Porównanie to wskazuje na bardzo dużą zgodność obydwóch metod, szczególnie dla skarp o prostej budowie geologicznej. Podjęto również próbę numerycznej analizy stateczności rzeczywistego zbocza o skomplikowanej budowie geologicznej oraz o znacznych wymiarach. W końcowej części referatu przedstawiono podsumowanie oraz wnioski dotyczące możliwości stosowania metod numerycznych dla określania stateczności skarp i zboczy.

1. Wprowadzenie

Analiza stateczności skarp i zboczy, zarówno naturalnych jak i powstałych w wyniku działalności człowieka, jest jednym z najważniejszych zadań geomechaniki i geotechniki. Problematyka ta szczególnie istotna jest w górnictwie odkrywkowym, gdzie wykonuje się wykopy o olbrzymich, gdzie indziej nie spotykanych głębokościach i nasypy (zwały) o olbrzymich wysokościach.

Zagadnienie stateczności od dawna stanowi przedmiot zainteresowań wielu badaczy. Pierwsze naukowe prace z tej dziedziny pojawiły się w XVIII wieku, a ich autorem był Coulomb (1777). Gwałtowny rozwój metod analizy stateczności obserwuje się na początku XX wieku, kiedy to opracowano fundamentalne i do dziś stosowane metody analizy (Pettersen 1916, Fellenius 1927, Terzaghi 1925) oraz w latach 50-tych i 60-tych (Masłow 1949, Taylor Bishop 1954, Janbu 1956, Nonveiller 1965, Morgenstern i Price 1963, Spencer 1967) [1]. Pomimo tak licznych badań do chwili dzisiejszej nie udało się stworzyć teorii w sposób pełny i jednoznaczny rozwiązującej problematykę stateczności. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest duża liczba czynników wpływających na warunki stateczności oraz trudności w określaniu stanu naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia dla skarpy. Przyczyny powodujące utratę stateczności skarp i zboczy są bardzo skomplikowane. Najogólniej mówiąc, są nimi siły ciężkości wywołane przyciąganiem ziemskim i innych ciał niebieskich, oraz wywołane nimi naprężenia. Na rozkład naprężeń w masywie gruntowym wpływ ma szereg dodatkowych czynników, których nawet dokładne określenie jest niemożliwe. Najważniejsze z tych czynników to:

- obciążenia dynamiczne, wywołane ruchem pojazdów i pracą maszyn, robotami strzałowymi, trzęsieniami ziemi etc.,

- woda, przejawiająca się działaniem ciśnienia hydrostatycznego i spływowego,
- budowa geologiczna, a szczególnie istnienie nieciągłości w postaci powierzchni kontaktowych i powierzchni zaburzeń tektonicznych,
- kształt i wymiary skarpy,
- warunki atmosferyczne,
- wpływy chemiczne,
- wpływy biologiczne.

Dodatkowym czynnikiem utrudniającym teoretyczne rozwiązanie zagadnienia stateczności skarp są problemy natury matematycznej, związane z rozwiązywaniem równań opisujących tensor naprężenia i odkształcenia w ośrodku gruntowym dla skomplikowanych warunków brzegowych w otoczeniu skarpy. Wszystko to jest przyczyną, że do chwili obecnej nie uzyskano rozwiązania analitycznego, opisującego rozkład naprężeń w skarpie, nawet dla najprostszych, najbardziej wyidealizowanych modeli. Poszczególne indywidualne przypadki można rozwiązywać stosując metody numeryczne. Zakładając, że skarpa zbudowana jest z ośrodka sprężystego lub sprężysto-plastycznego można zastosować jedną ze znanych metod całkowania równań różniczkowych, takich jak: metoda różnic skończonych (MRS), metoda elementów skończonych (MES), metoda elementów brzegowych (MEB), metody mieszane.

W ostatnich latach obserwuje się gwałtowny wzrost zainteresowania tymi metodami, w odniesieniu do rozwiązywania zadań związanych ze statecznością skarp i zboczy. Związane jest to z rewolucją informatyczną, powszechną dostępnością komputerów o olbrzymich mocach obliczeniowych oraz programów, umożliwiających budowę coraz bardziej skomplikowanych modeli.

Największą popularność zdobyły programy MES, takie jak ABAQUS, NASTRAN, COSMOS/M, Z-SOIL. Programy te umożliwiają uzyskanie rozwiązań dla modeli płaskich i przestrzennych zbudowanych z ośrodków sprężystych i sprężysto-plastycznych. Niektóre z nich umożliwiają również uwzględnianie problemów kontaktowych z tarciami i kohezją. Z programów metody elementów brzegowych wymienić można program BEASY, a z programów metody różnic skończonych największą przydatnością do rozwiązywania problemów geomechanicznych i geotechnicznych cechuje się program FLAC.

W chwili obecnej możliwości szerokiego stosowania metod numerycznych do rozwiązywania konkretnych problemów inżynierskich są ograniczone, głównie ze względu na słabą znajomość parametrów stosowanych modeli. O ile bowiem własności wytrzymałościowe gruntów badane są powszechnie od szeregu lat, to własności odkształceniowe, których znajomość jest niezbędna przy stosowaniu wymienionych metod numerycznych, są rozpoznane w znacznie mniejszym stopniu. Istotną przeszkodą w szerokim stosowaniu tych metod jest również słaba praktyczna weryfikacja w warunkach rzeczywistych. Pomimo wymienionych ograniczeń można sądzić, że metody numeryczne są metodami przyszłości, a ich popularność będzie ciągle rosła. Umożliwiają one bowiem uwzględnianie szeregu czynników wpływających na warunki stateczności, których to możliwości, z racji przyjmowanych założeń, nie mają inne metody.

W niniejszym referacie podjęto próbę zastosowania ogólnie znanych i powszechnie używanych metod analitycznych, oraz metod numerycznych dla określania stateczności skarp i zboczy. Dla analizy stateczności zbocza za pomocą metod równowagi granicznej wykorzystano program SLOPE/W pozwalający na określenie wskaźnika stateczności na podstawie, między innymi, metod Felleniusa, Bishopa, Morgensterna-

Pricea oraz Janbu. Analizy numeryczne przeprowadzono za pomocą programu MRS FLAC v.3.4.

2. Metodyka określania wskaźnika stateczności zbocza za pomocą programu MRS FLAC

Dla określania wskaźnika stateczności zbocza za pomocą metod numerycznych najczęściej stosowana jest tzw. metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie. Jest ona szeroko stosowana zarówno w świecie [6,7,4] jak i w Polsce [2]. Poniżej przedstawiono szczegółową charakterystykę metody redukcji wytrzymałości na ścinanie z wykorzystaniem programu MRS FLAC.

Wszelkie analizy stateczności skarp i zboczy prowadzono traktując górotwór jako ośrodek sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra. Wskaźnik stateczności zbocza jest określany jako:

$$FS = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_f} = \frac{c}{c_f} = \frac{R_r}{R_{rf}} \quad (1)$$

gdzie:

FS - wskaźnik stateczności zbocza,

φ - kąt tarcia wewnętrznego materiału budującego zbocze, deg,

φ_f - kąt tarcia wewnętrznego materiału budującego zbocze, przy którym traci ono stateczność, deg,

c - kohezja materiału budującego zbocze, MPa,

c_f - kohezja materiału budującego zbocze, przy którym traci ono stateczność, MPa,

R_r - wytrzymałość na rozciąganie materiału budującego zbocze, MPa,

R_{rf} - wytrzymałość na rozciąganie materiału budującego zbocze, przy którym traci ono stateczność, MPa.

Dwa pierwsze człony po prawej stronie równania stanowią ogólnie znaną definicję wskaźnika stateczności. Dodatkowy człon związany z wytrzymałością na rozciąganie wynika z modyfikacji hipotezy Coulomba-Mohra występującej w programie FLAC. W klasycznej hipotezie Coulomba Mohra wytrzymałość na rozciąganie jest określana jako

$R_r = \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi}$. Model Coulomba-Mohra w programie FLAC pozwala na wprowadzeniu

wartości wytrzymałości na rozciąganie z przedziału od zera do $\frac{c}{\operatorname{tg} \varphi}$. Stąd też, przy

określaniu wskaźnika stateczności istnieje możliwość uwzględnienia także wytrzymałości na rozciąganie.

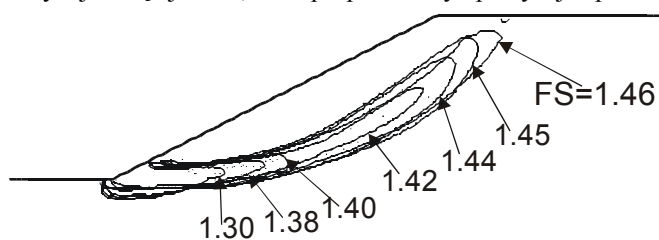
Metodyka określania wskaźnika stateczności zbocza w programie FLAC przedstawia się następująco:

1. Budowa geometrii modelu i przeliczenie stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia dla zawyżonych, w stosunku do rzeczywistych, parametrów wytrzymałościowych górotworu. Krok ten stanowi bazę do dalszych obliczeń iteracyjnych.

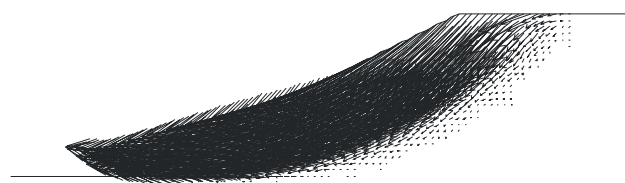
2. Po wyzerowaniu wartości przemieszczeń poszczególnym materiałom przypisuje się ich rzeczywiste własności wytrzymałościowe i ponownie przelicza model.
3. Jeżeli wyniki wskazują, że zbocze jest stateczne ($FS > 1$), to stopniowo zmniejsza się parametry wytrzymałościowe (zgodnie ze wzorem 1), aż do uzyskania utraty stateczności zbocza.
4. Jeżeli zaś wyniki wskazują na utratę stateczności zbocza ($FS \leq 1$) to parametry wytrzymałościowe zbocza należy zwiększyć aż do wartości przy których zbocze jest stateczne. Następnie należy je stopniowo zmniejszać, aż do uzyskania utraty stateczności zbocza.

Stopniowe zmniejszanie (zwiększanie) parametrów wytrzymałościowych jest niewątpliwie czasochłonne. Dawson i Roth [4] proponują metodę poszukiwania opartą na zasadzie dowolnej zmiany parametrów wytrzymałościowych i poszukiwania wartości FS metodą prób i błędów. Wydaje się jednak, że proponowany powyżej sposób postępowania najlepiej oddaje rzeczywisty proces utraty stateczności zbocza.

Samo pojęcie *utrata stateczności zbocza* wymaga tutaj szerszego komentarza. Przykładowo autorzy prac [3,4] kojarzą go z nadmiernymi wartościami maksymalnej nie zrównoważonej siły, prędkościami przemieszczeń poszczególnych węzłów przekraczającymi 10^{-6} m/s czy też nieproporcjonalnie dużymi przemieszczeniami.



Rys.1. Rozwój strefy odkształceń stycznych



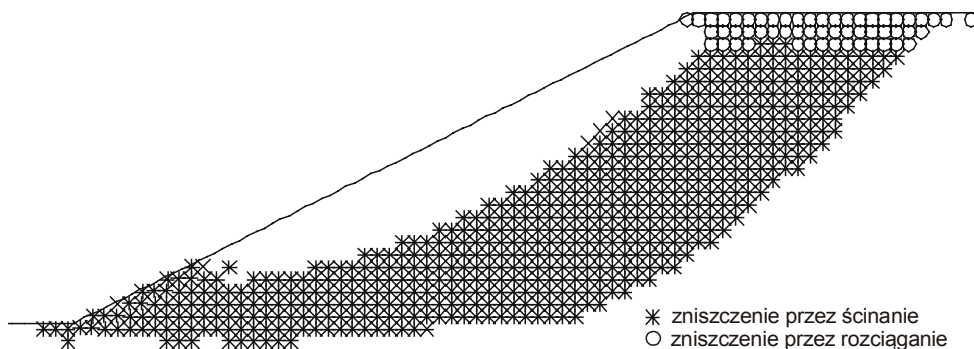
Rys.2 Przemieszczenia zbocza po utracie stateczności

Autorzy prac [10,13] twierdzą, że jednym z ważniejszych indykatorów wskazujących na rozwój procesów utraty stateczności zbocza jest tutaj rozkład odkształceń stycznych. Z kolei Sjöberg [11] zaleca wnikliwą obserwację wskaźników uplastycznienia, które precyzują sposób zniszczenia poszczególnych elementów. Analizy numerycznych symulacji rozwoju procesu zniszczenia wskazują, że wszyscy wspomniani powyżej badacze mają po części rację. Wszystkie wyżej wymienione wielkości pozwalają bowiem na obserwację rozwoju procesu utraty stateczności zbocza. Dla przykładu, na rys.1 przedstawiono rozwój strefy odkształceń stycznych w miarę obniżania parametrów odkształceniowych. Początkowo największe odkształcenia występują u podnóża zbocza, a następnie stopniowo przemieszczają się do góry, określając jednocześnie kształt powierzchni poślizgu.

Utrata stateczności zbocza jest także sygnalizowana anormalnym wzrostem przemieszczeń w stosunku do uzyskanych z poprzednich przeliczeń (rys.2). Taki wzrost przemieszczeń pozostaje w bezpośrednim związku z dużymi wartościami ich prędkości, co również wskazuje na utratę stateczności.

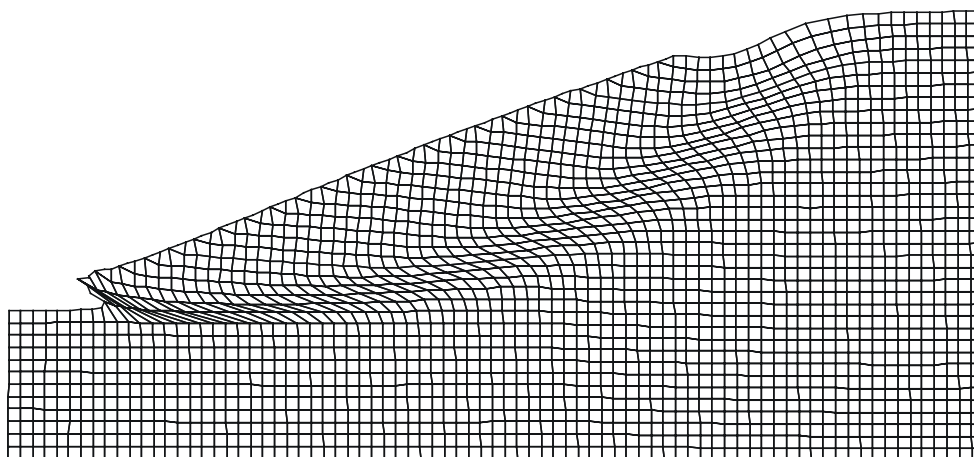
Innym indykátorem utraty stateczności zbocza jest sposób jego zniszczenia. Wraz z obniżaniem parametrów wytrzymałościowych następuje propagacja strefy zniszczenia

przez ścinanie. Z reguły przebiega ona z dołu do góry, a strefa zniszczenia wywołana ścinaniem nie dochodzi do naziomu. W pobliżu naziomu formuje się strefa zniszczenia spowodowana przez naprężenia rozciągające, tak jak pokazano na rys. 3.



Rys.3 Rozkład wskaźników zniszczenia w zboczu po utracie stateczności

Obserwacje wszystkich wymienionych powyżej czynników mogą wskazywać na utratę stateczności zbocza. Na rys. 4 pokazano zdeformowaną siatkę po utracie stateczności zbocza.



Rys.4. Zdeformowana siatka po utracie stateczności zbocza

W literaturze można także znaleźć przykłady metod kombinowanych określania warunków prowadzących do utraty stateczności zboczy. Jeden z takich, dość żmudnych sposobów opisany jest w pracy [9]. Jej autor stosuje MES do określania stanu naprężenia w zboczu, a następnie bada wartość ilorazu naprężeń stycznych wynikających z hipotezy Coulomba-Mohra do naprężeń stycznych otrzymanych z obliczeń wzdłuż możliwych, kołowych powierzchni poślizgu. Wydaje się jednak, że procedura ta budzi uzasadnione wątpliwości merytoryczne oraz jest niezwykle pracochłonna, nawet wzięwszy pod uwagę zastosowanie nowoczesnej techniki obliczeniowej.

Interesująca propozycja określania wskaźnika stateczności zbocza za pomocą metod numerycznych jest opisana w pracy [12]. Jej autorzy proponują stopniowe

powiększanie wartości przyśpieszenia ziemskiego g aż do utraty stateczności zbocza. W takim przypadku wskaźnik stateczności jest równy:

$$FS = \frac{g}{g_f} \quad (2)$$

gdzie:

g - przyśpieszenie ziemskie,

g_f - przyśpieszenie przy utracie stateczności zbocza.

Przeprowadzone w pracy [12] porównanie metody zwiększania wartości g z metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie daje zróżnicowane rezultaty. W zależności od budowy geologicznej zbocza oraz stosunków wodnych obie metody dają porównywalne lub dość zróżnicowane wyniki. W większości analizowanych w pracy [12] przypadków metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie daje wyższe wartości wskaźników stateczności niż metoda zwiększania wartości g . Jednakowoż autorzy podają także przykłady na sytuację odwrotną. Chociaż sama koncepcja zwiększania wartości g jest bardzo interesująca, wydaje się, że wymaga ona jeszcze wielu badań zanim będzie w pełni przydatna do określania wskaźnika stateczności zboczy.

Metody numeryczne posiadają pewne zalety w porównaniu do metod równowagi granicznej. Przede wszystkim nie wymagają założenia lokalizacji powierzchni zniszczenia. Utrata stateczności zbocza odbywa się niejako naturalnie, w tych strefach, gdzie przekroczona została wytrzymałość na ścinanie gruntu. Nie wymagają one także podziału potencjalnej bryły osuwiskowej na paski (bloki), a co za tym idzie określania wartości sił na ich ściankach. Ich zastosowanie pozwala również na obserwacje rozwoju procesu zniszczenia zbocza.

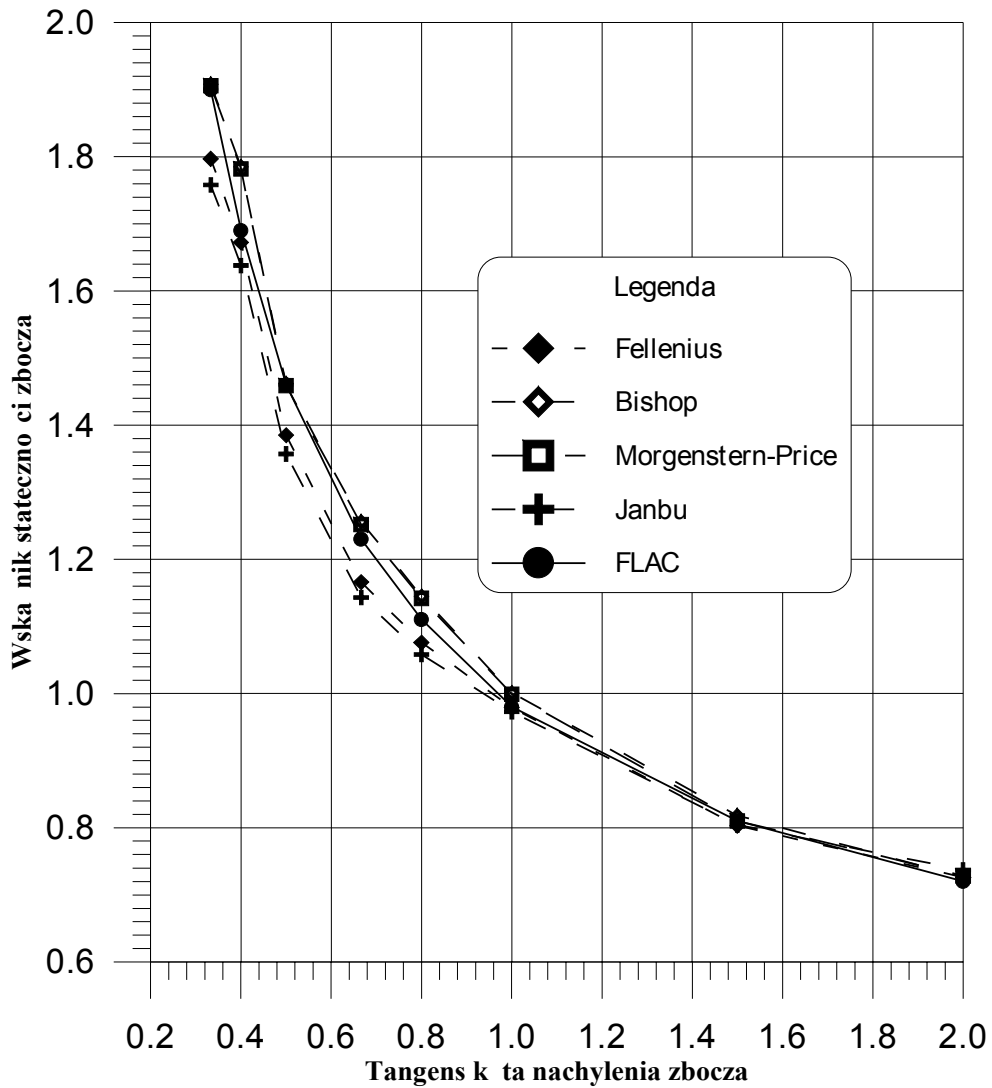
Wykorzystanie metod numerycznych dla analizy stateczności skarp i zboczy wymaga zdefiniowania parametrów odkształceniowych gruntu, co nie jest, jak wiadomo łatwym zagadnieniem. W związku z powyższym przeprowadzono wariantowe obliczenia dla zbocza o nachyleniu 45° zmieniając wartości modułu Younga (w zakresie od 25 MPa do 1000 MPa) oraz liczby Poissona (w zakresie od 0.1 do 0.4). Wyniki obliczeń wskazują jednoznacznie, że parametry odkształceniowe nie mają wpływu na wartość FS – w analizowanym przedziale parametrów jego wartości różniły się nie więcej niż o 1 %. Do podobnych konkluzji doszli także autorzy pracy [6], którzy wręcz zalecają stosowanie do wszystkich analiz modułu Younga równego 1000 MPa i liczby Poissona równej 0.3.

3. Porównanie wartości wskaźników stateczności zbocza otrzymanych z obliczeń analitycznych oraz numerycznych

Dla porównania wartości FS obliczanych za pomocą metod równowagi granicznej oraz metod numerycznych przeprowadzono obliczenia na wybranych przykładach. W przykładzie pierwszym rozpatrzono stateczność jednorodnego zbocza o wysokości 25 m. Założono, że kąt tarcia wewnętrznego gruntu jest równy 20° , a spójność 30 kPa. Obliczenia przeprowadzono dla różnych kątów nachylenia zbocza w przedziale od 18.43° (nachylenie 1:3) do 63.43° (nachylenie 2:1). Zebrane wyniki obliczeń są przedstawione na rys.5. Ich analiza wskazuje, że wartości FS określone na podstawie obliczeń numerycznych przyjmują bardzo zbliżone wartości do wartości FS obliczonych przy zastosowaniu metod równowagi granicznej.

W przykładzie drugim założono, że w podłożu zbocza znajduje się bardzo słaba

Zbocze jednorodne

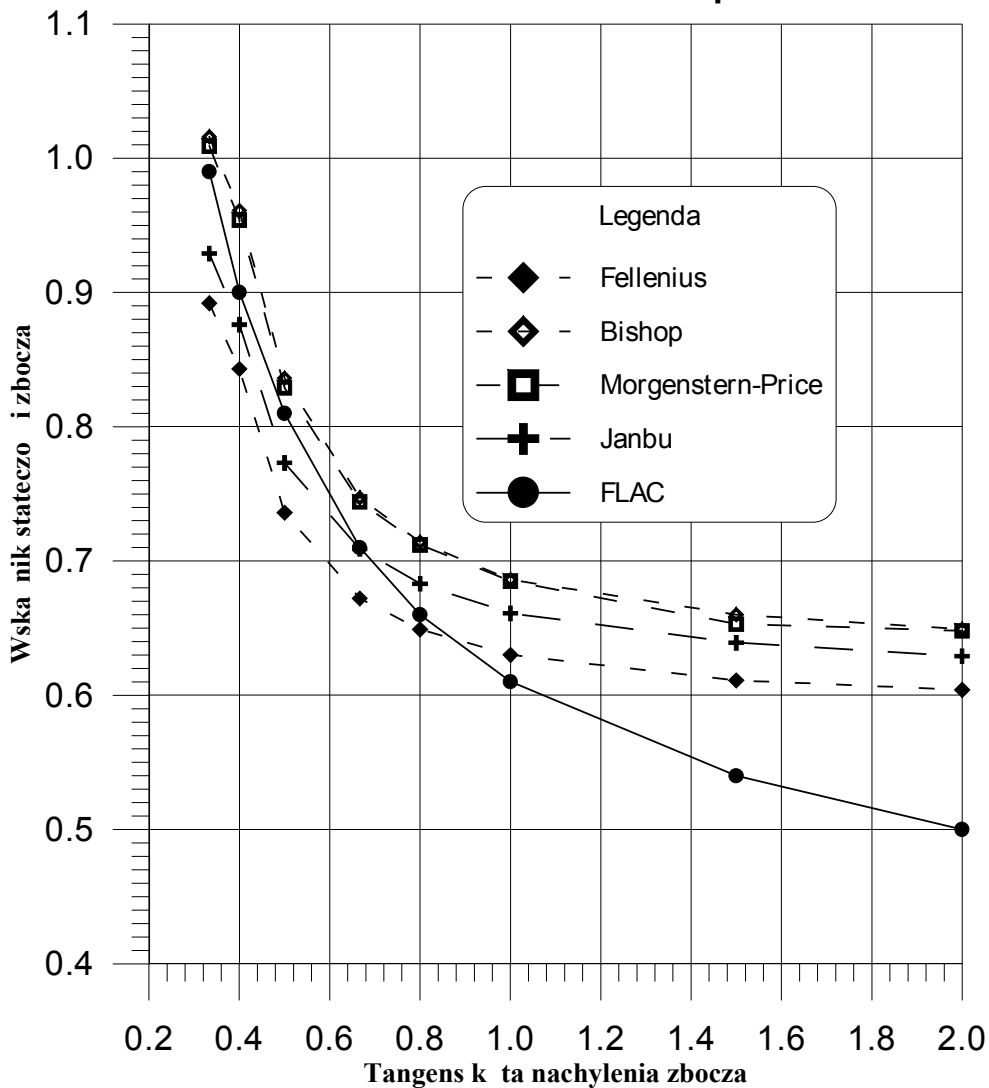


Rys.5. Porównanie wartości wskaźników stateczności dla zbocza jednorodnego

warstwa gruntu o kohezji równej zero i kącie tarcia wewnętrznego równym 10° . Obliczenia przeprowadzono dla takiego samego przedziału kątów nachylenia zbocza. Zebrane wyniki obliczeń są przedstawione na rys.6. Analiza wyników obliczeń wskazuje, że wskaźniki stateczności zbocza określone na podstawie metod numerycznych pozostają w zgodzie z metodami równowagi granicznej w przedziale kątów nachylenia zbocza od 18.43° do około 41° . Poczynając od kąta nachylenia 41° aż do kąta 63.43° narastają rozbieżności w wartościach wskaźnika stateczności. Wartości FS uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych są mniejsze niż obliczone na podstawie metod równowagi granicznej.

Różnice dochodzą nawet do 20 %.

Zbocze ze słabą warstwą w podłożu



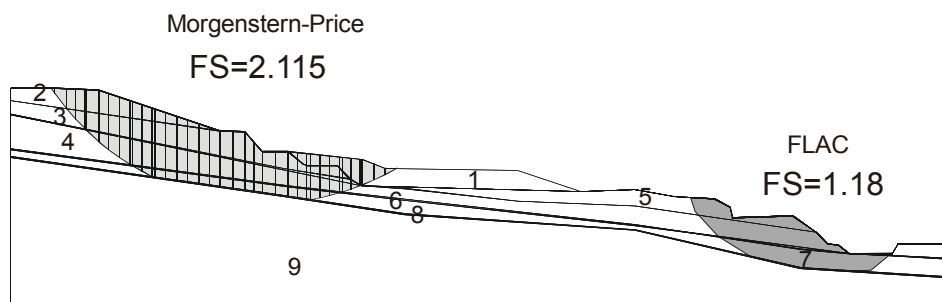
Rys.6. Porównanie wartości wskaźników stateczności dla zbocza ze słabą warstwą w podłożu

Najprawdopodobniej spowodowane to jest faktem, że powierzchnie poślizgu otrzymane na podstawie metod numerycznych sięgają znacznie głębiej w słabe podłoże niż powierzchnie otrzymane z metod równowagi granicznej. Wydaje się, że akurat dla tego przypadku, wartości FS otrzymane z obliczeń numerycznych są bardziej prawdopodobne niż wynikające z zastosowania metod równowagi granicznej. Ostateczna weryfikacja wiarygodności stosowania metod numerycznych w analizie stateczności skarp i zboczy wymaga jednak przeprowadzenia znacznie większej liczby obliczeń, dla zboczy o bardziej

zróznicowanej budowie geologicznej i geometrii.

4. Analiza stateczności rzeczywistego zbrocza o skomplikowanej budowie

Dla weryfikacji przydatności metody różnic skończonych do określania wskaźnika stateczności zbroczy przeanalizowano rzeczywisty profil zbrocza występujący w jednej z kopalń odkrywkowych. Zbrocze to charakteryzowało się dużymi rozmiarami – jego wysokość wynosiła 170 m a generalny kąt nachylenia 10.38° - oraz skomplikowaną budową geologiczną. Profil zbrocza z zaznaczeniem poszczególnych warstw gruntu pokazano na rys.7. Model numeryczny uwzględniający z dużą dokładnością geometrię i litologię zbrocza składał się z 164344 elementów. Przyjmowane do obliczeń własności warstw gruntu zebrano w tabeli 1.



Rys.7 Profil zbrocza oraz lokalizacja miejsc utraty stateczności wynikające z obliczeń analitycznych i numerycznych

Tabela 1. Własności warstw gruntu budujących zbrocze.

Warstwa	Ciężar objętościowy, $\gamma, \frac{kN}{m^3}$	Kohezja, kPa	Kąt tarcia wewnętrznego, $[^{\circ}]$
1. przypora	1900	38.2	9.3
2. iły	1900	112	18.1
3. węgiel I	1900	154.7	33
4. iły między-węglowe	1900	122.2	18.1
5. węgiel II	1400	154.7	33
6. warstwa kontaktowa węgiel –iły podwęglowe	1900	59.4	16.29
7. iły podwęglowe	1900	122.2	18.1
8.kontakt iły podwęglowe- zwietrzelina	1900	60	0
9.zwietrzelina	1900	239	14.1

Porównanie wyników analiz stateczności zbrocza dało bardzo interesujące rezultaty. Z obliczeń metodami równowagi granicznej wynikają bardzo wysokie wartości wskaźnika stateczności, które wynoszą od 1.873 wg metody Felleniusa do 2.115 wg metody Morgensterna-Pricea. Metody te lokalizowały także krytyczną powierzchnię poślizgu po lewej stronie zbrocza, w jego górnej części (rys.7). Zastosowanie metody różnic skończonych ze stopniową redukcją wytrzymałości na ścinanie dało całkowicie odmienne

wyniki zarówno pod względem ilościowym jak i lokalizacji krytycznej powierzchni poślizgu. Z metody tej wynika (rys.7), że najbardziej narażona na utratę stateczności jest dolna część zbocza, obejmująca ility międzywęglowe oraz II pokład węgla. Dla tej, najbardziej nachylonej części zbocza wartość wskaźnika stateczności jest o blisko 80% niższa od wartości FS otrzymanej z zastosowania metody Morgensterna-Pricea.

Trudno jest jednoznacznie określić przyczyny takiego stanu rzeczy. FLAC wykrył rejon utraty stateczności zbocza tam, gdzie układ skarp był stosunkowo najbardziej stromy. Niewątpliwie jedną z przyczyn niskiej wartości FS jest także oddziaływanie górnej części zbocza, wymuszające ruch mas gruntowych ze strony lewej na prawą modelu. Ograniczenie wymiarów modelu numerycznego i analiza stateczności tylko newralgicznego rejonu, najprawdopodobniej dałoby w efekcie znacznie wyższe wartości wskaźnika FS . Czy jednak byłyby to wartości bardziej zbliżone do rzeczywistych? Na tym etapie badań jesteśmy zmuszeni pozostawić to pytanie bez odpowiedzi.

5. Podsumowanie

We wszystkich obliczeniach wykonanych dla potrzeb powyższego referatu przyjmowano, że kąt dylatacji jest równy zero. Zdania na temat wpływu tego kąta na uzyskiwane wartości wskaźników stateczności skarp i zboczy są podzielone. Jak wynika z pracy [8] wartość tego kąta ma istotny wpływ na wskaźnik stateczności zbocza, a przyjęcie jego wartości równej zero zaniża uzyskiwane wartości wskaźników stateczności. Z kolei autorzy pracy [6] stwierdzają, że przyjęcie wartości kąta dylatacji równej zero prowadzi do sensownych wyników analiz. Abstrahując od trudności w poprawnym wyznaczeniu wartości kąta dylatacji wydaje się, że warto szczegółowo przeanalizować jego wpływ na wartość wskaźnika stateczności.

W przeciągu ostatnich kilku lat w literaturze dotyczącej metodyki określania stateczności skarp i zboczy daje się zauważyć dość duży optymizm jeżeli chodzi o zastosowanie metod numerycznych. Autorzy pracy [7] wręcz pytają w tytule: *Dlaczego inżynierowie wciąż rysują kółka?* Wydaje się, że optymizm ten jest nieco przesadzony. Nie umniejszając w niczym walorów metod numerycznych sądzimy, że w sferze poprawnego ich stosowania jest jeszcze wiele niewyjaśnionych zagadnień. Stosowane z powodzeniem od kilkudziesięciu lat metody równowagi granicznej wielokrotnie udowodniły już swoją przydatność, podczas gdy istotną przeszkodą w szerokim stosowaniu metod numerycznych jest słaba praktyczna weryfikacja w warunkach rzeczywistych. Łatwo jest stwierdzić, że metody numeryczne można bezkrytycznie stosować do zagadnień stateczności skarp i zboczy, dysponując tylko wynikami przeliczeń kilkunastu przykładów, szczególnie jeżeli cechują się one stosunkowo prostą geometrią i budową litologiczną. Jak wynika z przedstawionego w pracy przykładu rzeczywistego profilu z kopalni odkrywkowej, rozbieżności pomiędzy metodami równowagi granicznej i metodami numerycznymi rosną w miarę stopnia skomplikowania rozpatrywanej sytuacji. Nie podlega jednak dyskusji fakt, że metody numeryczne mogą być przydatne do analizy stateczności zboczy. W porównaniu do metod równowagi granicznej umożliwiają one uwzględnianie szeregu czynników wpływających na warunki stateczności, oraz eliminują wiele wątpliwych założeń. Za wcześniej jednak na jednoznaczne stwierdzenie, że dają one w pełni wiarygodne i poprawne wyniki.

Reasumując można stwierdzić, że wyniki powyższej analizy na razie nie upoważniają do potwierdzenia nieco huraoptymistycznego wniosku wynikającego na

przykład z pracy [6], że dla analizy stateczności skarp i zboczy o znacznych rozmiarach i skomplikowanej budowie geologicznej mogą być stosowane *tylko* metody numeryczne.

6. Literatura

1. Abramson L.W., Thomas S.L., Sharma S., Boyce G.M. Slope stability and stabilization methods. John Willey & Sons, inc. New York. 1996.
2. Brząkała W. Konsolidacja soczewki piasku w zwale. XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej. str. 11-18. Zakopane-Kościelisko. 1998.
3. Coetze M.J., Hart R.D., Varona P.M., Cundall P.A. FLAC Basics. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis. 1998.
4. Dawson E.M., Roth W.H. Slope stability analysis with FLAC. FLAC and numerical modeling in geomechanics (Detournay & Hart). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 3-9. 1999.
5. FLAC. Users Manual. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis. 1998.
6. Griffiths D.V., Lane P.A. Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique. Vol. 49 (3) str. 387-403. 1999.
7. Lane P.A., Griffiths D.V. Finite element slope stability analysis – Why are engineers still drawing circles. Numerical Models in Geomechanics (Pietruszczak & Pande). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 589-593. 1997.
8. Manzari M.T., Nour M.A. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. Vol. 75 (1), str. 75-80. 2000.
9. Rahman H.M. Landslide hazards and stability analysis of coastal cliff regions of Bangladesh. Environmental and Safety Concerns in Underground Construction (Lee, Yang & Chung). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 909-914. 1997.
10. Regueiro R.A., Borja R.I. Continuum finite element analysis of strain localisation in slopes. Numerical Models in Geomechanics (Pietruszczak & Pande). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 213-218. 1997
11. Sjöberg J. Analysis of the Azanacollar pit slope failures – A case study. FLAC and numerical modeling in geomechanics (Detournay & Hart). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 63-70. 1999.
12. Swan C.C., Young-Kyo S. Limit state analysis of earthen slopes using dual continuum/FEM approaches. International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics. Vol. 23, str. 1359-1371. 1999.
13. Zettler A.H., Poisel R., Roth W., Preh A. Slope stability analysis based on the shear reduction technique in 3D. FLAC and numerical modeling in geomechanics (Detournay & Hart). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 11-16. 1999.

ABSTRACT: This paper shows the application of analytical and numerical methods for the estimation of the factor of safety for the slopes. The majority of slope stability analysis performed in practice still use classical limit equilibrium approaches involving method of slices. These methods have remained practically unchanged for decades. The finite difference method (numerical code FLAC) represents a powerful alternative approach for slope stability analysis. Application of FLAC for the estimation slope stability seems to be accurate, versatile and regards no assumptions about failure mechanism – especially for simple geometry slopes. Several examples of calculations are presented and discussed in the paper.