

Marek Cala, Jerzy Flisiak, Antoni Tajdus

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

## Numeryczne metody analizy stateczności skarp i zboczy

### Streszczenie

Praca jest podsumowaniem dotychczasowych badań autorów w dziedzinie zastosowań metod numerycznych do analizy stateczności skarp i zboczy. Omówiono w niej klasyczną metodę określania wskaźnika stateczności poprzez redukcję wytrzymałości na ścinanie (SSR) oraz podano przykłady jej zastosowania do analizy stateczności skarp o nieskomplikowanym kształcie i budowie geologicznej. Przedstawiono również zasady zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR), szczególnie przydatnej do analizy stateczności zboczy o złożonej geometrii oraz symulacji powstawania procesów osuwiskowych. Wyniki obliczeń programem FLAC porównano z wynikami uzyskanymi z zastosowania klasycznych metod równowagi granicznej (program SLOPE/W).

### 1. Wprowadzenie

Analiza stateczności skarp i zboczy, zarówno naturalnych jak i powstałych w wyniku działalności człowieka, jest jednym z najważniejszych zadań mechaniki gruntów i geotechniki, a osuwiska związane z utratą stateczności zaliczane są, obok trzęsien Ziemi, tajfunów i powodzi, do najgroźniejszych kataklizmów trapiących ludzkość. Problematyka ta szczególnie istotna jest w górnictwie odkrywkowym, gdzie wykonuje się wykopy o głębokościach dochodzących do kilkuset metrów (w kopalni Belchatów ok. 280 m) i nasypy (zwaly) o olbrzymich wysokościach. Wystąpienie osuwisk na obiektach tej wielkości może prowadzić do katastrof o nieobliczalnych konsekwencjach.

Pomimo licznych badań w dziedzinie stateczności skarp, których początki datować można na koniec XVIII wieku (Coulomb 1776), a których intensywny rozwój wystąpił w pierwszej połowie XX wieku (fundamentalne prace Felleniusa, Terzaghi'ego, Taylora, Bishopa i innych), do chwili obecnej nie udało się stworzyć teorii w sposób pełny i jednoznaczny rozwiązującej tę problematykę (Abramson i inni 1996).

Do niedawna do oceny stateczności skarp stosowane były głównie tzw. metody równowagi granicznej (*LEM*), w których zakłada się znajomość kształtu (najczęściej kołowego) i położenia powierzchni przlizgu. W metodach tych miarą stateczności jest wskaźnik, obliczany jako stosunek sił utrzymujących równowagę bryły sztywnej do sił zsuwających. Przeprowadzenie obliczeń dla wielu powierzchni przlizgu o zróżnicowanej lokalizacji umożliwia wyznaczenie najmniejszej wartości wskaźnika, który jest miarą stateczności danego obiektu geotechnicznego. Statyczna niewyznaczalność zadania, przy różnych od prostoliniowych kształtach powierzchni przlizgu, wymaga podziału potencjalnej bryły osuwiskowej na paski (bloki) oraz przyjęcia dodatkowych założeń odnośnie sił oddziaływania

po między nimi. Jest to przyczyna powstawania licznych błędów, które powodują, że metody te należy traktować jako przybliżone a ich stosowanie do celów praktycznych wymaga przyjmowania wysokich wartości współczynników bezpieczeństwa.

W ostatnich latach do rozwiązywania zadań związanych ze statecznością skarp i zboczy coraz częściej stosuje się metody numeryczne. Zakłada się w nich, że skarpa stanowi część półprzestrzeni sprężystej lub sprężysto-plastycznej. Do obliczeń stanu naprężenia i odkształcenia wykorzystuje się programy metody elementów skończonych MES, takie jak ABAQUS, NASTRAN, COSMOS/M, Z-SOIL, programy metody elementów brzegowych MEB (np. BEASY) czy programy metody różnic skończonych MRS (np. FLAC). Związane jest to z powszechną dostępnością komputerów o olbrzymich mocach obliczeniowych oraz programów, umożliwiających budowę coraz bardziej skomplikowanych modeli. Do określenia wskaźnika stateczności wykorzystuje się najczęściej metodę redukcji oporu ścinania (zmniejszania wartości parametrów wytrzymałościowych) w kolejnych krokach, aż do wystąpienia niestabilności procesu numerycznego. Pomimo licznych ograniczeń metod numerycznych można stwierdzić, że są one metodami przyszłości, a ich popularność będzie ciągle rosła. Nie wymagają one bowiem przyjmowania założeń dotyczących powierzchni przlizgu czy rozkładu sił pomiędzy blokami oraz umożliwiają uwzględnienie szeregu czynników wpływających na warunki stateczności, związanych z budową geologiczną i własnościami masywu gruntowego, istnieniem nieciągłości, wpływem wody, oddziaływaniami dynamicznymi itp.

Poniższa praca jest podsumowaniem dotychczasowych badań autorów w dziedzinie zastosowań metod numerycznych do analizy stateczności skarp i zboczy. Omówiono w niej klasyczną metodę określenia wskaźnika stateczności poprzez redukcję wytrzymałości na ścinanie (SSR) oraz podano przykłady jej zastosowania do analizy stateczności skarp o nieskomplikowanej kształcie i budowie geologicznej. Przedstawiono również zasady zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR), szczególnie przydatnej do analizy stateczności zboczy o złożonej geometrii oraz symulacji powstawania procesów osuwiskowych. Wyniki obliczeń programem FLAC porównano z wynikami uzyskanymi z zastosowania klasycznych metod równowagi granicznej (program SLOPE/W).

## **2. Określenie wskaźnika stateczności za pomocą metod numerycznych**

Podobnie jak w metodach równowagi granicznej do oceny stateczności skarp w metodach numerycznych stosuje się wskaźnik stateczności. Do jego określenia stosowane mogą być różne procedury. Jedną z nich, polegającą na porównaniu naprężeń stycznych wynikających z zastosowania hipotezy Coulomba-Mohra wzdłuż zdeterminowanych powierzchni przlizgu z naprężeniami stycznymi otrzymanymi z obliczeń numerycznych, proponowana jest w pracy (Rahman 1997). Taki sposób postępowania stosowany jest również w programie SLOPE/W, gdzie do obliczania stanu naprężeń wykorzystywany jest moduł SIGMA/W. Procedura ta, przeniesiona bezpośrednio z metod równowagi granicznej, budzi jednak uzasadnione wątpliwości merytoryczne, jest niezwykle pracochłonna oraz trudna do zastosowania w przypadku skomplikowanej budowy geologicznej.

Interesująca propozycja określenia wskaźnika stateczności zbocza za pomocą metod numerycznych opisano w pracy (Swan i Young-Kyo 1999). Polega ona na stopniowym powiększaniu wartości przyspieszenia ziemskiego  $g$ , aż do utraty stateczności zbocza. W tym przypadku wskaźnik stateczności określany jest za wzoru:

$$FS = \frac{g}{g_f} \quad (1)$$

gdzie:

$g$  - przyspieszenie ziemskie,

$g_f$  - przyspieszenie przy utracie stateczności zbocza (niestabilności procesu numerycznego).

Przeprowadzone w pracy tej porównanie metody zwiększania wartości  $g$  z metoda redukcji wytrzymałości na scinanie daje zróżnicowane rezultaty. W większości analizowanych przypadków metoda redukcji wytrzymałości na scinanie daje wyższe wartości wskaźników stateczności niż metoda zwiększania wartości  $g$ . Jednakże autorzy podają także przykłady na sytuację odwrotną. Choć 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.

Dla określania wskaźnika stateczności zboczy za pomocą metod numerycznych najczęściej stosowana jest tzw. metoda redukcji wytrzymałości na scinanie (SSR) (Cala i Flisiak 2000, 2001, 2002, 2003, Dawson i Roth 1999, Lane i Griffith 1997). W metodzie tej górotwór traktuje się jako osrodek sprężysto-plastyczny ze stowarzyszonym lub niestowarzyszonym prawem plastycznego plynienia. Do określania powierzchni granicznej najczęściej stosuje się hipotezę Coulomba-Mohra, zmodyfikowaną hipotezę Coulomba-Mohra lub hipotezę Druckera-Pragera. W przypadku warunku plastyczności Coulomba-Mohra stosowanie SSR polega na równoczesnej redukcji kąta tarcia wewnętrznego i spójności zgodnie z wzorem:

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{t}_f}{t} = \frac{tgj}{FS} \mathbf{s}_n + \frac{c}{FS} \quad (2)$$

gdzie:

$FS$  - wskaźnik stateczności,

$j$  - kąt tarcia wewnętrznego gruntu,

$c$  - spójność materiału budującego zbocze,

$t$  - naprężenie scinające,

$t_f$  - wytrzymałość na scinanie.

W przypadku zmodyfikowanej hipotezy Coulomba-Mohra dodatkowym, podlegającym redukcji parametrem jest wytrzymałość rozciągania  $R_r$ , której wartość zawarta jest w przedziale:

$$0 \leq R_r \leq \frac{c}{tgj}$$

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

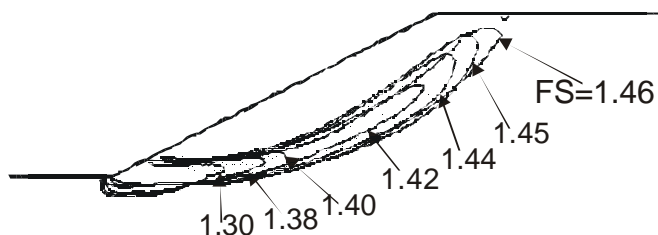
1. Budowa modelu i obliczenie stanu naprężenia, odkształcenia i wyteżenia dla zawyżonych, w stosunku do rzeczywistych, parametrów wytrzymałościowych. Krok ten stanowi bazę do dalszych obliczeń iteracyjnych.
2. Po wyzerowaniu wartości przemieszczeń i nadaniu poszczególnym materiałom ich rzeczywistych własności wytrzymałościowych przeprowadza się ponownie obliczenia.
3. Jeżeli wyniki tych obliczeń wskazują, że zbocze jest stateczne ( $FS > 1$ ), stopniowo

zmniejsza się parametry wytrzymałościowe (zgodnie ze wzorem 2), aż do utraty stateczności zbocza.

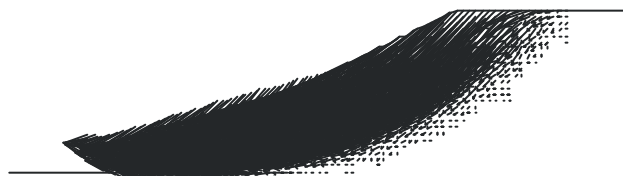
4. Jeżeli wyniki obliczeń wskazują na utratę stateczności zbocza ( $FS \leq 1$ ), parametry wytrzymałościowe zbocza należy zwiększyć aż do wartości, przy których zbocze jest stateczne. Następnie należy je stopniowo zmniejszać, aż do uzyskania utraty stateczności zbocza.

Szerszego komentarza wymaga pojęcie *utrata stateczności*, które może być rozmaicie rozumiane. Autorzy prac (Coetze i inni 1998 oraz Dawson i Roth 1999) kojarzą je z nadmiernymi wartościami maksymalnej nieodróżnowalnej siły, prędkościami przemieszczeń poszczególnych węzłów przekraczającymi  $10^{-6}$  m/s czy też nieproporcjonalnie dużymi przemieszczeniami.

Regueiro i Borja 1997 oraz Zettler i inni 1999 twierdzą z kolei, że jednym z ważniejszych zwiastunów utraty stateczności jest rozwój stref odkształcen postaciowych. Dla przykładu, na rys.1 przedstawiono rozwój strefy odkształcen stycznych w miarę obniżania parametrów odkształceniowych. Początkowo największe odkształcenia występują u podnóża skarpy, a następnie stopniowo przemieszczają się do góry, określając jednocześnie kształt powierzchni poslizgu.



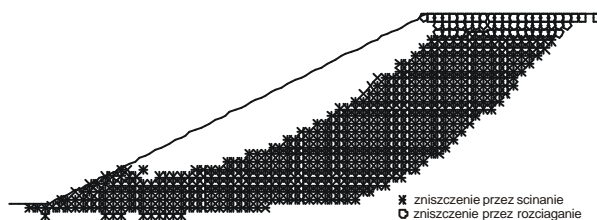
Rys.1. Rozwój strefy odkształcen postaciowych  
Fig.1. Evolution of shear strain zones



Rys.2 Przesunięcia zbocza po utracie stateczności  
Fig.2. Displacement of unstable slope

Utrata stateczności zbocza może być 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. Sjöberg (1999) zaleca wnikliwą obserwację wskaźników uplastycznienia, które wskazują sposób zniszczenia poszczególnych elementów.

Wraz z obniżaniem parametrów wytrzymałościowych następuje propagacja strefy zniszczenia przez scinanie. Z reguły proces ten rozpoczyna się w dolnej części skarpy, a strefa zniszczenia wywołana scinaniem nie dochodzi do naziomu. W pobliżu naziomu formuje się strefa zniszczenia spowodowana przez naprężenia rozciągające (rys. 3).

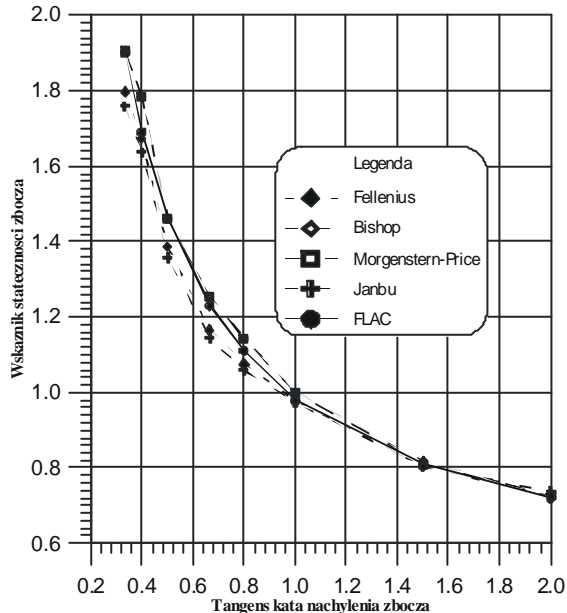


Rys.3 Rozkład wskaźników zniszczenia w zboczu po utracie stateczności  
Fig.3 Distribution of plasticity indicators for unstable slope

Wykorzystanie metod numerycznych dla analizy stateczności skarp i zboczy wymaga znajomości parametrów odkształceniowych gruntów. Dla sprawdzenia wpływu tych parametrów na wartości uzyskiwanych wskaźników stateczności w pracy (Cala i Flisiak 2000) przeprowadzono obliczenia dla skarpy o nachyleniu  $45^\circ$  i wysokości 25 m, w których zmieniano moduł Younga w zakresie od 25 MPa do 1000 MPa i liczbę Poissona w zakresie od 0.1 do 0.4. Wyniki tych obliczeń wykazały, że parametry odkształceniowe nie mają wpływu na wartość  $FS$  (w analizowanym przedziale parametrów różnice nie przekraczały 1%). Do podobnych konkluzji doszli także autorzy pracy (Griffiths i Lane, 1999), którzy zalecają stosowanie do wszystkich analiz modułu Younga równego 1000 MPa i liczby Poissona równej 0.3.

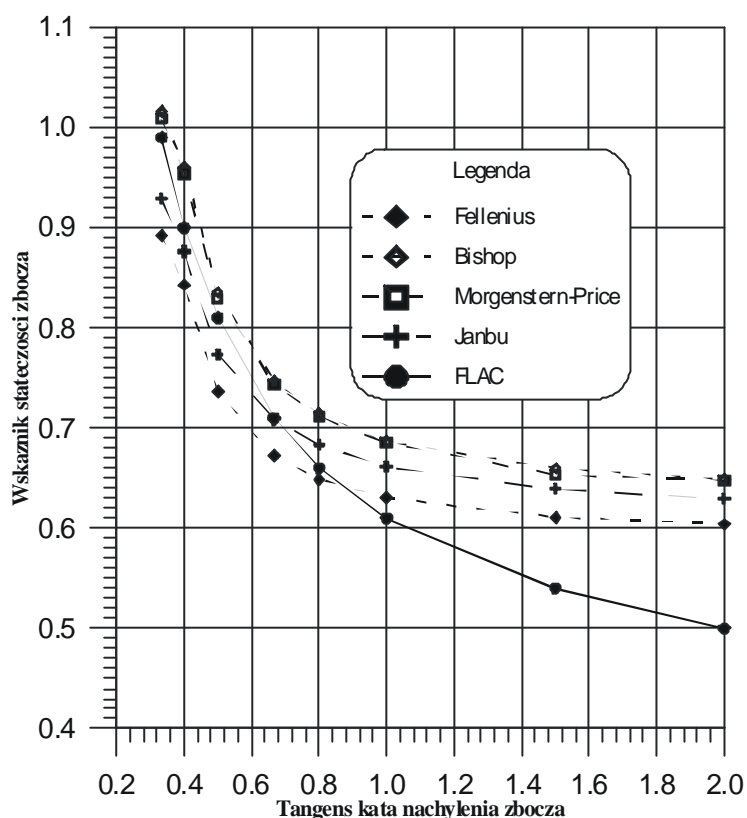
## 2. Zastosowanie metody SSR do analizy stateczności skarp

W referacie (Cala i Flisiak 2000) przedstawiono możliwości zastosowania metody redukcji wytrzymałości na scinanie (SSR) dla określenia stateczności skarp. Do obliczeń wykorzystano program Metody Różnic Skonczonych FLAC (FLAC 2000). Wyniki obliczeń metoda SSR porównano z rezultatami analiz stateczności przeprowadzonych w oparciu o metody równowagi granicznej (LEM – program SLOPE/W). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że dla skarp jednorodnych o wysokości 25 m, zbudowanych z gruntów o kącie tarcia wewnętrznego  $20^\circ$  i spójności 30 kPa oraz dla nachylen zmieniających się w przedziale od 1:3 do 2:1, wyniki obliczeń numerycznych programem FLAC dla sprzysto-plastycznego osrodka Coulomba-Mohra są prawie identyczne jak uzyskane z obliczeń metodami równowagi granicznej (rys.4).



Rys. 4. Porównanie wartości wskaźników stateczności dla skarpy jednorodnej  
 Fig.4. Comparison of safety factors for homogeneous slope

Rozbieżności w uzyskanych wynikach pojawiły się natomiast dla górotworu niejednorodnego, którego szczególnym przypadkiem jest górotwór uwarstwiony. Dla przypadku, w którym w podłożu skarpy zalega warstwa gruntów słabych o kącie tarcia wewnętrznego  $10^0$  i zerowej spójności, wartości wskaźników stateczności ( $FS$ ) uzyskane przy zastosowaniu metod numerycznych są niższe od uzyskanych przy zastosowaniu metod równowagi granicznej, szczególnie wówczas, gdy kąt nachylenia skarpy jest większy od  $45^0$  (rys. 5).

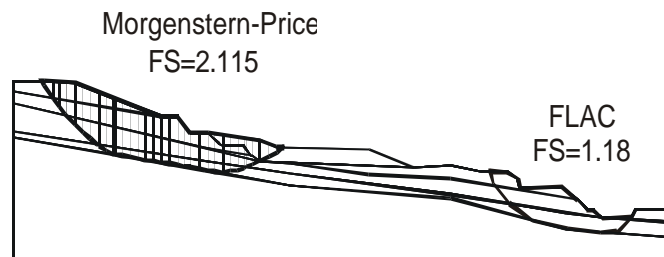


Rys.5. Porównanie wartości wskaźników stateczności dla zbocza ze słabą warstwą w podłożu

Fig.5. Comparison of safety factors for slope with weak layer

Jeszcze większe rozbieżności zaobserwowano dla zbocza stałego jednej z kopalni węgla brunatnego o złożonej geometrii i budowie geologicznej (rys. 6). Z obliczeń metodami równowagi granicznej uzyskano bardzo wysokie wartości wskaźnika stateczności, wynoszące 2.115 wg metody Morgensterna-Pricea. Metody te lokalizowały krytyczną powierzchnię poslizgu po lewej stronie zbocza, w jego górnej części. Zastosowanie metody różnic skończonych dało całkowicie odmienne wyniki zarówno pod względem ilościowym jak i lokalizacji krytycznej powierzchni poslizgu. Z metody tej wynika, że najbardziej narażona na

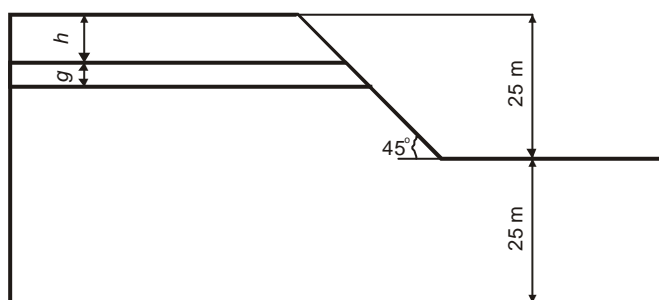
ustrate stateczności jest dolna część zbocza, obejmująca łączy międzywęglowe oraz II pokład węgla, dla której wskaźnik stateczności jest o 80% niższy i wynosi 1.118.



Rys. 6. Profil zbocza oraz lokalizacja miejsc utraty stateczności  
Fig.6. Slope profile and identified failure surfaces

W pracy (Cala i Flisiak 2002) analizowano wpływ występowania warstw słabych na warunki stateczności skarp. W poszczególnych modelach (rys. 7) zmieniano grubość warstwy słabej w przedziale od 1.0 m do 10.0 m oraz jej lokalizację w górotworze w odniesieniu do naziomu w przedziale od 0 do 50 m. Obliczenia przeprowadzono dla skarpy prostoliniowej o wysokości 25 m oraz kącie nachylenia  $45^\circ$ . Założono, że w obrębie gruntów mocnych o parametrach:

- kat tarcia wewnętrznego  $f = 30^\circ$ ,
  - spójność  $c = 75 \text{ kPa}$ ,
  - ciężar objętościowy  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ,
- znajduje się warstwa gruntów słabych o parametrach:
- kat tarcia wewnętrznego  $f = 10^\circ$ ,
  - spójność  $c = 25 \text{ kPa}$ ,
  - ciężar objętościowy  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ .

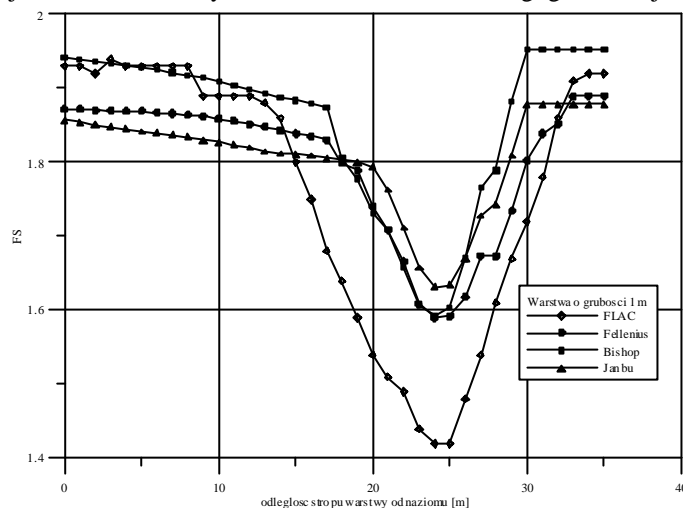


Rys. 7. Geometria modelu skarpy przyjętego do obliczeń  
Fig.7. Geometry of the assumed model

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że w zależności od analizowanej sytuacji (litologii i własności warstw), metoda SSR może dawać wartości wskaźników stateczności istotnie różniące się od otrzymanych z LEM. Różnice te są szczególnie wyraźne wówczas, gdy w skarpie występują warstwy słabe o niewielkich grubościach (1 - 3 m),

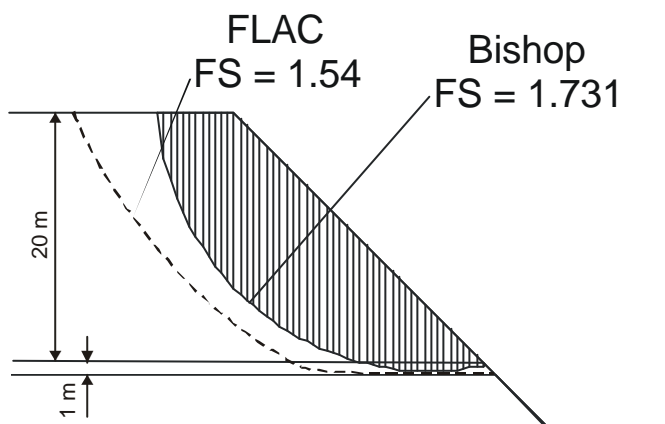
zlokalizowane w rejonie podnóza skarpy (rys. 8). Odmienny jest również kształt i przebieg powierzchni poslizgu, co ilustruje rys. 9. W metodzie SSR górna część tej powierzchni jest bardziej płaska a w dolnej przebiega w warstwie słabej.

W oparciu o obliczenia przeprowadzone w tej pracy sformulowano tezę, zgodnie z którą w przypadku skomplikowanej budowy geologicznej, gdzie powierzchnia poslizgu zdeterminowana jest naturalnymi cechami strukturalnymi górotworu, metody numeryczne dają wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości od metod równowagi granicznej.



Rys. 8. Wartości wskaźników stateczności w funkcji odległości od naziomu stropu warstwy słabej o grubości 1 m

Fig.8. Factor of safety values for 1.0 m thick weak layer



Rys. 9. Porównanie przebiegu potencjalnej powierzchni poslizgu w metodzie Bishopa i SSR

Fig.9. Critical slip surfaces identified by LEM and SSR

#### 4. Zmodyfikowana metoda redukcji wytrzymałości na scinanie MSSR

Klasyczna metoda SSR w porównaniu z metodami równowagi granicznej posiada szereg zalet, które omówiono wyżej. Posiada ona jednak kilka istotnych ograniczeń. Jej zastosowanie wymaga znajomości całego procesu modelowania numerycznego, a czas obliczeń w przypadku



bardziej skomplikowanych modeli może sięgać nawet kilkunastu lub kilkudziesięciu godzin. Najbardziej istotnym ograniczeniem metody SSR jest jednak wykrywanie *tylko pojedynczej powierzchni poslizgu*, dla której uzyskuje się najniższą wartość wskaźnika stateczności. Nie stanowi to istotnego ograniczenia w przypadku skarp o prostej geometrii. Jeżeli mamy jednak do czynienia ze zboczem o skomplikowanej budowie, to takie ograniczenie uniemożliwia pełną analizę stateczności, co może prowadzić do błędnych wniosków. Wystarczy bowiem, że w zboczu zbudowanym z szeregu skarp znajdzie się jedna skarpa o dużym kącie nachylenia, a metoda SSR wykaze tylko jej niestateczność, niezależnie od tego, czy inne skarpy oraz ich układy też będą niestateczne. Ograniczenie to jest szczególnie istotne w górnictwie odkrywkowym, gdzie zbocza z reguły składają się z szeregu skarp o kącie nachylenia większym od generalnego kąta nachylenia zbocza. W przypadkach takich niestateczność pojedynczej skarpy stwarza znacznie mniejsze zagrożenie niż niestateczność układu skarp. Określenie wskaźnika stateczności dla układu skarp, po wcześniejszym zidentyfikowaniu potencjalnej powierzchni poslizgu dla części zbocza, jest niemożliwe przy zastosowaniu metody elementów skończonych, albowiem proces obliczeniowy ulega przerwaniu po wystąpieniu niestabilności numerycznej.

Odmienny sposób postępowania stosowany jest w programach bazujących na metodzie różnic skończonych. W programach MRS układ równań różniczkowych modyfikowany jest po wykonaniu każdego kroku obliczeniowego bez tworzenia globalnej macierzy sztywności. Proces obliczeniowy może być więc kontynuowany aż do uzyskania pełnego rozwiązania postawionego zagadnienia.

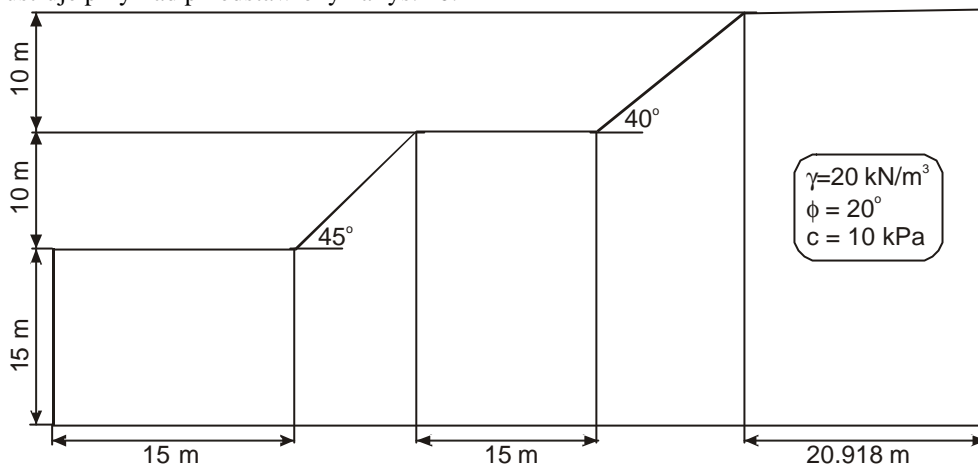
Biblioteczna procedura redukcji parametrów SSR w programach FLAC czy FLAC/Slope kończy się na znalezieniu minimalnego wskaźnika stateczności dla danej sytuacji. Można jednak zastosować ręczną lub półautomatyczną *procedurę dalszej redukcji wytrzymałości na scinanie*. Proces obliczeniowy *jest dalej kontynuowany* pomimo wystąpienia lokalnej utraty stateczności związanej z określeniem minimalnej wartości FS. Identyfikacja miejsc występowania kolejnych powierzchni poslizgu jest więc możliwa.

Tok postępowania przy stosowaniu MSSR jest następujący (Cala i Flisiak 2002 a, b):

1. **Zastosowanie klasycznej SSR.** Klasyczna technika redukcji wytrzymałości na scinanie (SSR) stosuje się dla znalezienia dla znalezienia pierwszego (najmniejszego) wskaźnika stateczności ( $FS_1$ ). Jest to punkt wyjścia do dalszych obliczeń. W pewnych przypadkach może okazać się, że technika SSR jest wystarczająca do pełnej oceny stateczności zbocza – wtedy nie ma potrzeby stosowania metody MSSR.
2. **Poszukiwanie stanu wyjściowego.** Jeżeli  $FS_1$  określony w pierwszym etapie jest mniejszy od jedności to należy zwiększyć wartości parametrów  $c$  i  $tgj$  w taki sposób, aby analizowane zbocze osiągnęło stan równowagi. Jeżeli  $FS_1$  jest większy od jedności nie ma potrzeby zwiększania parametrów  $c$  i  $tgj$ . Uzyskany w ten sposób stan traktuje się jako wyjściowy dla dalszych obliczeń.
3. **Określenie liczby kroków obliczeniowych.** Znaleźć reprezentatywną liczbę kroków obliczeniowych ( $N_f$ ), która odpowiada osiągnięciu przez model stanu równowagi (zgodnego z założonym wcześniej kryterium). W dalszych obliczeniach należy stosować liczbę kroków zwiększoną o 10%, czyli  $1.1N_f$  (FLAC/Slope, 2002).
4. **Określenie kolejnych wskaźników stateczności.** Redukujemy  $c$  i  $tgj$  dla znalezienia kolejnych wartości  $FS_i$ , za każdym razem obniżając własności w porównaniu ze stanem wyjściowym określonym w etapie 2. Dla identyfikacji

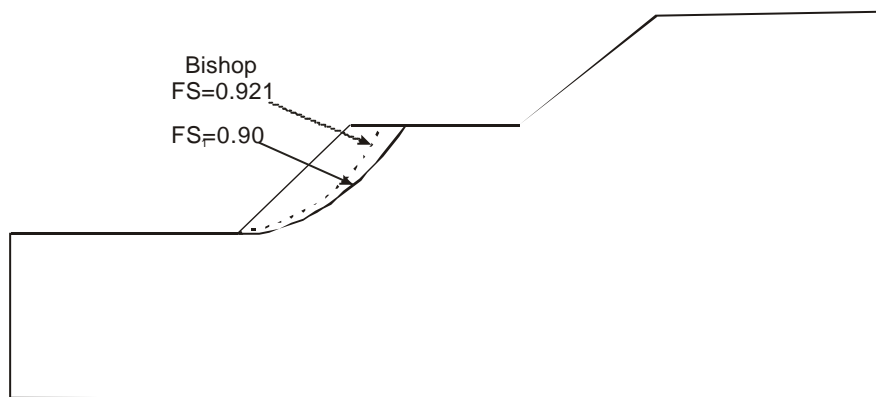
kolejnych powierzchni poslizgu należy obserwować rozkłady zwiastunów utraty stateczności.

Możliwość zastosowania MSSR do analizy stateczności zbocza o złożonej geometrii ilustruje przykład przedstawiony na rys. 10.



Rys. 10. Geometria i własności jednorodnego zbocza  
Fig.10. Geometry and mechanical properties of homogeneous slope

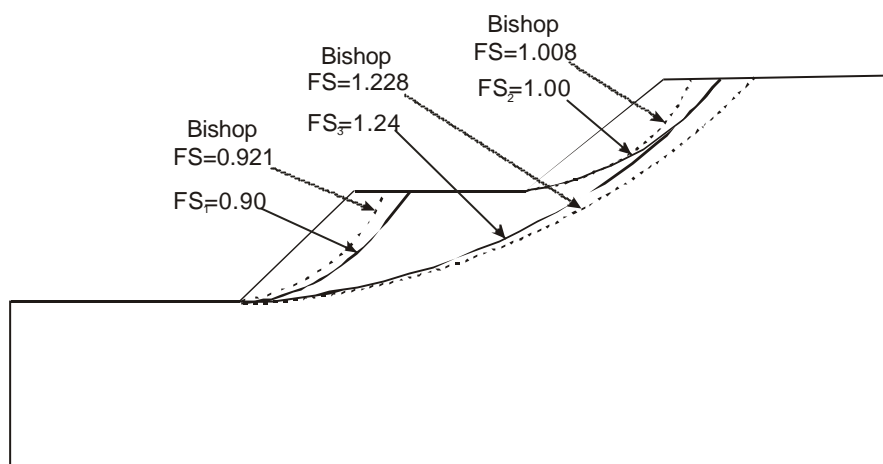
W wyniku obliczeń z zastosowaniem klasycznej metody redukcji wytrzymałości na scinanie SSR określono najniższą wartość wskaźnika stateczności  $FS=0.90$  dla dolnej, bardziej stromej skarpy (rys. 11). Zbliżona wartość wskaźnika stateczności dla tej skarpy (0.921) uzyskano przy zastosowaniu metody Bishopa.



Rys. 11. Wyniki analizy stateczności określone za pomocą klasycznej metody SSR oraz LEM  
Fig.11. The results of stability analysis with SSR and LEM

Kontynuacja obliczeń zgodnie z zasadami MSSR wykazała, że przy wartości  $FS_2=1.09$  pojawia się powierzchnia poslizgu w górnej skarpie, a przy  $FS_3=1.24$  powierzchnia poslizgu obejmująca całe zbocze. W wyniku obliczeń metoda Bishopa dla górnej skarpy uzyskano  $FS=1.008$  a dla całego zbocza  $FS=1.228$  (rys. 12). Można więc stwierdzić, że wskaźniki stateczności uzyskane za pomocą MSSR oraz wygenerowane powierzchnie poslizgu są bardzo

zblizone do uzyskanych z metody Bishopa. Wskazuje to na przydatnosc zaproponowanej metodyki do analizy statecznosc zbczy o zlozonej geometrii.



Rys. 12. Porównanie wyników analizy stateczności za pomocą metody MSSR oraz LEM  
Fig.12. The results of stability analysis with MSSR and LEM

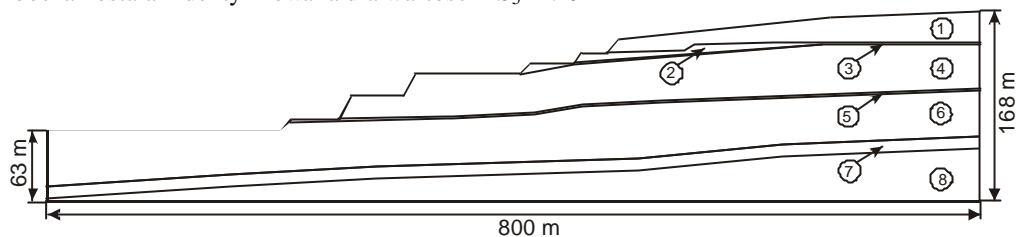
Dla sprawdzenia możliwości zastosowania MSSR do analizy stateczności zboczy rzeczywistych o skomplikowanej budowie geologicznej i geometrii przeprowadzono obliczenia dla zbocza jednej z kopalni węgla brunatnego (Cala i Flisiak 2003). Budowę geologiczną tego zbocza ilustruje rys. 13, a własności wytrzymałościowe poszczególnych warstw zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Własności mechaniczne warstw gruntu  
Table 1. Mechanical properties of soil layers

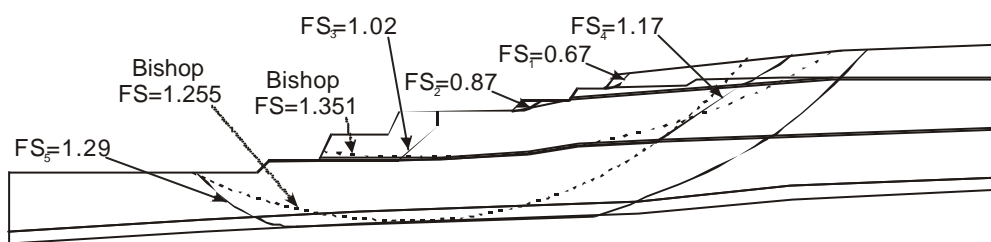
Warstwa	Ciezar objętościowy, kN/m <sup>3</sup>	Kohezja, kPa	Kąt tarcia wewnętrzny, deg
1	18.3	14	6.5
2	19.5	90	10.9
3	19.5	11.4	7.9
4	19.5	90	10.9
5	19.5	11.4	7.9
6	19.5	90	10.9
7	20	28	8.5
8	20.3	1000	30

Postępując zgodnie z zaproponowaną metodą MSSR, po wykryciu najmniejszej wartości wskaźnika stateczności  $FS_1=0.67$  przeprowadzono dalszą redukcję wytrzymałości na ścinanie (rys. 14). Przy wartości  $FS_2=0.87$  pojawiła się kolejna powierzchnia poslizgu. Procedura redukcji była prowadzona dalej, aż do wykrycia kolejnych powierzchni poslizgu,

które ujawniły się przy wartościach  $FS_3=1.02$ ,  $FS_4=1.17$ . Powierzchnia poslizgu dla całego zbocza została zidentyfikowana dla wartości  $FS_5=1.29$



Rys. 13. Geometria zbocza wraz z podziałem na warstwy  
Fig.13. Slope geometry and geology



Rys. 14. Wyniki analizy stateczności zbocza za pomocą metody MSSR oraz Bishopa  
Fig.14. Factor of safety values and critical slip surfaces identified with MSSR and LEM.

Na rys. 14 pokazano także wybrane, cylindryczne powierzchnie poslizgu uzyskane z zastosowania metody Bishopa. Analiza uzyskanych wyników wskazuje na znaczne różnice pomiędzy metodą MSSR a metodą Bishopa. Dotyczy to zarówno wartości wskaźników stateczności jak i przebiegu powierzchni poslizgu.

Wiadomym jest, że stosowanie metod równowagi granicznej wymaga znajomości kształtu i położenia powierzchni poslizgu. W metodzie Bishopa są to powierzchnie o kształcie kołowym. W rozpatrywanym przykładzie krytyczna powierzchnia poslizgu określana była na drodze poszukiwania minimalnej wartości wskaźnika stateczności dla ponad 20 000 okręgów. W metodach numerycznych wykorzystujących procedurę MSSR kształt powierzchni poslizgu jest zdeterminowany stanem naprężeń i odkształceniami panującym w osrodku gruntowym o określonej budowie geologicznej. Jest to sposób bardziej naturalny i lepiej opisujący rzeczywiste procesy zachodzące w zboczu. Dlatego też upoważnione wydaje się stwierdzenie, że dla zboczy o skomplikowanej budowie geologicznej, gdzie powierzchnia poslizgu zdeterminowana jest naturalnymi cechami strukturalnymi górotworu, metody numeryczne dają wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości. Stwierdzenie to wymaga jednak dalszej weryfikacji poprzez stosowanie metod numerycznych do analizy rzeczywistych procesów osuwiskowych.

## 5. Podsumowanie

W ostatnich latach w literaturze dotyczącej metodyki określania stateczności skarpi i zboczy daje się zauważyć dość duży optymizm jeżeli chodzi o zastosowanie metod numerycznych. Autorzy pracy (Lane i Griffiths 1997) wręcz pytają: *Dlaczego inżynierowie wciąż rysują kółka?* a w pracy (Griffiths i Lane 1999) twierdzą, że dla analizy stateczności skarpi i zboczy o

znacznych rozmiarach i skomplikowanej budowie geologicznej mogą być stosowane *tylko* metody numeryczne.

W świetle rozważań zamieszczonych w niniejszej pracy wydaje się, że optymizm ten jest w dużym stopniu usprawiedliwiony. W porównaniu do metod równowagi granicznej metody numeryczne umożliwiają bowiem uwzględnianie szeregu czynników wpływających na warunki stateczności, oraz eliminują wiele wątpliwych założeń. Szczególnie dotyczy to zbczozy o skomplikowanej budowie geologicznej, gdzie powierzchnia poslizgu zdeterminowana jest naturalnymi cechami strukturalnymi górotworu.

Wydaje się, że szersze stosowanie metod numerycznych do projektowania skarp i zbczozy, również w kopalniach odkrywkowych, może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa budowli ziemnych oraz uzyskania znacznych efektów ekonomicznych. Należy jednocześnie podkreślić, że do czasu uzyskania pełnej weryfikacji eksperymentalnej, metody numeryczne powinny być stosowane równolegle z metodami równowagi granicznej.

*Praca wykonana została w ramach grantów badawczych nr 5 T12A 022 24 oraz 5 T12A 017 22*

#### **Literatura**

- [1] Abramson L.W., Thomas S.L., Sharma S., Boyce G.M. 1996: Slope stability and stabilization methods. John Willey & Sons, inc. New York.
- [2] Brzakala W. 1998: Konsolidacja soczewki piasku w zwale. XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. str. 11-18. Zakopane-Koscielisko.
- [3] Cala M., Flisiak J. 2000: Analiza stateczności skarp i zbczozy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII ZSMG. Wydawnictwo KGBiG. Kraków, 27-37.
- [4] Cala M., Flisiak J. 2001: Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers, 111-114.
- [5] Cala M., Flisiak J. 2002: Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp. XXV ZSMG. Wydawnictwo KGBiG, Kraków, 83-92.
- [6] Cala M. & Flisiak J. 2003a: Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction. In Brummer, Andrieux, Detournay & Hart (eds.) *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*: 99-102. A.A. Balkema Publishers.
- [7] Cala M. & Flisiak J. 2003b: Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods. In Burczyński, Fedelinski & Majchrzak (eds.) *Computer Methods in Mechanics; CMM-2003*.
- [8] Cala M., Flisiak J. 2003 c: Analiza stateczności skarp i zbczozy z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na scinanie. *Geotechnika w budownictwie i górnictwie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 348-354.
- [9] Coetze M.J., Hart R.D., Varona P.M., Cundall P.A. 1998: *FLAC Basics*. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis.
- [10] Dawson E.M., Roth W.H. 1999: Slope stability analysis with FLAC. *FLAC and numerical modeling in geomechanics* (Detournay & Hart). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 3-9.
- [11] *FLAC v. 4.0a*. 2000: Users manual. Itasca Consulting Group. Minneapolis
- [12] *FLAC v. 4.0b*. 2000: Optional features. Itasca Consulting Group. Minneapolis.
- [13] *FLAC v. 4.0c*. 2000: Theory and background. Itasca Consulting Group. Minneapolis.
- [14] Griffiths D.V., Lane P.A. 1999: Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*. Vol. 49 (3) str. 387-403.
- [15] Lane P.A., Griffiths D.V. 1997: Finite element slope stability analysis – Why are engineers still drawing circles. *Numerical Models in Geomechanics* (Pietruszczak & Pande). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 589-593.
- [16] Manzari M.T., Nour M.A. 2000: Significance of soil dilatancy in slope stability analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Vol. 75 (1), str. 75-80.

- [17] Rahman H.M. 1997: 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.
- [18] Regueiro R.A., Borja R.I. 1997: Continuum finite element analysis of strain localisation in slopes. Numerical Models in Geomechanics (Pietruszczak & Pande). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 213-218.
- [19] Sjöberg J. 1999: Analysis of the Azanalcollar pit slope failures – A case study. FLAC and numerical modeling in geomechanics (Detournay & Hart). A.A. Balkema. Rotterdam. str. 63-70.
- [20] Swan C.C., Young-Kyo S. 1999: 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.
- [21] Zettler A.H., Poisel R., Roth W., Preh A. 1999: 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.

### **Numeral methods of slope stability analysis**

This work is a summary of investigations performed by authors on the application of numerical methods for slope stability analysis. Classic shear strength reduction technique (SSR) was discussed and illustrated with examples concerning mainly simple slopes. Modified shear strength reduction technique (MSSR) was also described. This method is very useful for stability analysis of complex slopes and simulation of landslide processes. The calculation results obtained from MSSR with FLAC were compared results from limit equilibrium methods (LEM) received from SLOPE/W.