

Analiza stateczności skarp z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie

Marek Cała, Jerzy Flisiak**

WPROWADZENIE

Poniższa praca jest kontynuacją badań autorów nad porównaniem różnych metod analizy stateczności skarp i zboczy. W referacie opublikowanym w materiałach XXIII ZSMG (Cała i Flisiak, 2000) przedstawiono możliwości zastosowania metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR) dla określania stateczności zboczy. Do obliczeń wykorzystano program Metody Różnic Skończonych FLAC (FLAC, 2000) oraz FLAC/Slope (2002). Wyniki obliczeń metodą 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 wyniki uzyskane z obliczeń numerycznych programem FLAC dla ośrodka sprężysto-plastycznego z niestowarzyszonym prawem płynięcia są prawie identyczne jak uzyskane z obliczeń metodami równowagi granicznej. Rozbieżności w uzyskanych wynikach pojawiły się natomiast dla górotworu niejednorodnego, którego szczególnym przypadkiem jest górotwór uwarstwiony.

Jeszcze większe rozbieżności zaobserwowano dla zbocza o złożonej geometrii i budowie geologicznej, dla którego metody numeryczne wykazały odmienną lokalizację strefy zagrożonej oraz prawie dwukrotnie niższą wartość wskaźnika stateczności (Cała i Flisiak, 2001).

W pracy (Cała i Flisiak, 2002) opublikowanej w materiałach XXV ZSMG badano wpływ występowania warstw słabych na warunki stateczności skarp, w których 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). Zwrócono tam uwagę na fakt, że w zależności od analizowanej sytuacji (litologii i własności warstw), metoda SSR może dawać wartości FS istotnie różniące się od FS otrzymanych z LEM w przypadku skarp niejednorodnych. Różnice w określonych różnymi metodami FS są szczególnie wyraźnie widoczne wówczas, gdy w skarpi występują warstwy słabe o

* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH

niewielkich grubościach (1 - 3 m) zlokalizowane w rejonie podnóża skarpy. W pracy tej postawiliśmy pytanie: *Czy nie należałoby się zastanowić nad koniecznością stosowania metod numerycznych dla analiz stateczności skarp?* Niewątpliwie posiadają one szereg zalet w porównaniu do LEM, w pewnych sytuacjach dają odmienne wartości FS oraz istotnie różniące się kształty powierzchni poślizgu. Z naszych doświadczeń wynika, że w przypadku skomplikowanej budowy geologicznej, gdzie powierzchnia poślizgu zdeterminowana jest naturalnymi cechami strukturalnymi górotworu, metody numeryczne dają wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości.

Klasyczna metoda SSR, w porównaniu do metod LEM, posiada jednakże kilka istotnych ograniczeń. Jej zastosowanie wymaga znajomości całego procesu modelowania numerycznego, czas obliczeń w przypadku bardziej skomplikowanych modeli może sięgać nawet kilkunastu lub kilkudziesięciu godzin. Jednakże najbardziej istotnym ograniczeniem metody SSR jest wykrywanie *tylko pojedynczej płaszczyzny poślizgu* – niejako najslabszego ogniwa w zboczu. W rezultacie otrzymujemy jedną wartość FS , która jest związana z określoną płaszczyzną poślizgu. Nie ma możliwości analizy wystąpienia płaszczyzny w innych rejonach zbocza. Nie stanowi to istotnego ograniczenia w przypadku zboczy o prostej geometrii. Jeżeli mamy jednak do czynienia ze skarpą o skomplikowanej budowie, to takie ograniczenie uniemożliwia pełną analizę stateczności, co może prowadzić do błędnych wyników.

METODYKA ANALIZY STATECZNOŚCI ZBOCZA ZA POMOCĄ ZMODYFIKOWANEJ METODY REDUKCJI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

Metodyka określania wskaźnika stateczności zbocza za pomocą klasycznej metody SSR w programie FLAC przedstawia się następująco:

1. Budowa geometrii modelu i przeliczenie stanu naprężenia, przemieszczenia i wyjątkowania 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 ($1 > FS$), to stopniowo zmniejsza się parametry wytrzymałościowe (kohezję i kąt tarcia wewnętrznego) aż do uzyskania utraty stateczności zbocza.
4. Jeżeli zaś wyniki wskazują na utratę stateczności zbocza ($1 < FS$) to parametry wytrzymałościowe zbocza należy zwiększyć aż do wartości przy których zbo-

cze jest stateczne. Następnie należy je stopniowo zmniejszać, aż do uzyskania utraty stateczności zbocza.

Rozpatrzmy możliwość utraty stateczności jednorodnej skarpy o geometrii i własnościach przedstawionych na rys.1. Do obliczeń wykorzystano programy metody różnic skończonych FLAC 4.0 i FLAC/Slope (metoda SSR) oraz program bazujący na metodach równowagi granicznej SLOPE/W (metoda Bishopa). Obliczenia wskaźnika stateczności programem FLAC i FLAC/Slope przeprowadzono dla ośrodka sprężysto-plastycznego z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra i niestowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia, stosując biblioteczną procedurę redukcji parametrów SSR. Ponieważ parametry odkształceniowe w niewielkim stopniu wpływają na wartości wskaźników stateczności (Cała i Flisiak, 2001) w pracy przyjęto jednakowe wartości modułu Younga (100 MPa) i liczby Poissona (0.3). Obliczenia numeryczne przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia. Na obu bocznych krawędziach tarczy założono zerowe przemieszczenia poziome, zaś na dolnej zerowe przemieszczenia pionowe i poziome. Obciążenie tarczy stanowił ciężar wynikający z grawitacji.

Na rys. 2 przedstawiono płaszczyzny poślizgu otrzymane na podstawie zastosowania klasycznej metody SSR oraz LEM. Są one bardzo zbliżone i zgodne z oczekiwaniami – płaszczyzna poślizgu wystąpiła w najbardziej stromej skarpie. Minimalna wartość wskaźnika stateczności uzyskana przy zastosowaniu programu FLAC i metody SSR wynosi 0.90, a z metody Bishopa 0.921.

Taki rezultat nie stanowi jednak pełnego rozwiązania postawionego problemu. W tym miejscu należy postawić następane pytania: jaki jest wskaźnik stateczności górnej skarpy?, jaki jest wskaźnik stateczności całego zbocza?

Metody równowagi granicznej pozwalają na udzielenie w miarę prostej odpowiedzi na to pytanie (rys.3). Minimalna wartość wskaźnika stateczności dla górnej skarpy uzyskana z metody Bishopa wynosi 1.008 zaś dla całego zbocza 1.228.

Identyfikacja powierzchni poślizgu dla górnej skarpy i całego zbocza nie jest możliwa przy zastosowaniu klasycznej metody SSR. Program FLAC jest oparty o metodę różnic skończonych. Szczególnie dobrze nadaje się ona dla modelowania procesów utraty stateczności. Biblioteczną procedurę redukcji parametrów SSR w programach FLAC czy FLAC/Slope kończy się na znalezieniu minimalnego wskaźnika stateczności dla danej sytuacji. Można jednak zastosować ręczą lub półautomatyczną *procedurę dalszej redukcji wytrzymałości na ścinanie*. Proces obliczeniowy *jest dalej kontynuowany* pomimo wystąpienia lokalnej utraty stateczności związanej z określeniem minimalnej wartości FS. Jest to możliwe dzięki temu, że programy MRS modyfikują układ równań różniczkowych po wykonaniu każdego kroku obliczeniowego nie tworząc globalnej macierzy sztywności. Identyfikacja miejsc występowania kolejnych

płaszczyzn poślizgu jest dość utrudniona, ale możliwa. Proces obliczeniowy może być kontynuowany aż do uzyskania pełnego rozwiązania postawionego zagadnienia.

Postępując w opisany powyżej sposób, po wykryciu najmniejszej wartości wskaźnika stateczności $FS_1=0.90$ przeprowadzono dalszą redukcję wytrzymałości na ścinanie (rys.3). Przy wartości $FS_2=1.90$ pojawiła się płaszczyna poślizgu w górnej skarpie. Procedura redukcji była prowadzona dalej, aż do wykrycia płaszczyny poślizgu dla całej skarpy, co zostało osiągnięte przy wartości $FS_3=1.24$. Obliczenia wskaźników stateczności za pomocą metody Bishopa dało $FS=0.921$ dla dolnej skarpy, $FS=1.008$ dla górnej skarpy oraz $FS=1.228$ dla całego zbocza.

Wskaźniki stateczności uzyskane za pomocą MSSR są bardzo zbliżone do wskaźników uzyskanych z metody Bishopa. Warto też podkreślić, że zastosowanie MSSR pozwoliło wykrycie możliwości utraty stateczności zarówno dla górnej jak i dla dolnej skarpy. Wykorzystanie klasycznej SSR pozwoliłoby tylko na identyfikację płaszczyny poślizgu w dolnej skarpie.

ANALIZA STATECZNOŚCI DUŻEGO ZBOCZA Z ZASTOSOWANIEM MSSR

Dla porównania wartości FS obliczanych za pomocą MSSR i LEM przeprowadzono obliczenia dla dużego zbocza (rys.4). Założenia co do własności odkształceniowych oraz warunków brzegowych w obliczeniach numerycznych przyjęto takie same jak dla poprzednio rozpatrywanego zagadnienia. Własności poszczególnych warstw gruntu budujących zbocze zebrano w tabeli 1.

TABELA 1. WŁASNOŚCI MECHANICZNE WARSTW GRUNTU

Warstwa	Ciężar objętościowy, kN/m ³	Kohezja, kPa	Kąt tarcia wewnętrznego, 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 MSSR, po wykryciu najmniejszej wartości wskaźnika stateczności $FS_1=0.67$ przeprowadzono dalszą redukcję wytrzymałości na ścinanie (rys.5). Przy wartości $FS_2=0.87$ pojawiła się kolejna płaszczyna poślizgu. Procedura redukcji była prowadzona dalej, aż do wykrycia kolejnych płaszczyn po-

ślizgu, które ujawniły się przy wartościach $FS_3=1.02$, $FS_4=1.17$. Płaszczyzna poślizgu dla całej skarpy została zidentyfikowana dla wartości $FS_5=1.29$.

Na rys.5 pokazano także cylindryczne powierzchnie poślizgu wraz ze wskaźnikami stateczności określonymi metodą Bishopa. Ograniczono się tylko do pokazania dwóch powierzchni - odpowiadających dwóm ostatnim etapom obliczeń MSSR (FS_4 i FS_5). Wartości wskaźników stateczności uzyskane za pomocą metody Bishopa różnią się od wskaźników otrzymanych za pomocą MSSR.

Powierzchnia poślizgu zidentyfikowana przez MSSR ($FS_4=1.17$) występuje w głównej mierze na warstwie nr 5 charakteryzującej się niewielką miąższością i niskimi parametrami wytrzymałościowymi. Cylindryczna powierzchnia poślizgu określona na podstawie metody Bishopa posiada (z racji swego wymuszonego kształtu) odmienną lokalizację oraz znacznie większy wskaźnika stateczności $FS=1.351$.

Z kolei powierzchnia poślizgu dla wskaźnika $FS_5=1.29$ występuje w znacznej części w warstwie nr 7 także cechującej się niskimi parametrami wytrzymałościowymi i niewielką miąższością. Powierzchnia poślizgu według Bishopa także przecina warstwę nr 7 i posiada dość zbliżoną wartość wskaźnika stateczności ($FS=1.255$). Warto jednak zauważyć, że powierzchnia poślizgu otrzymana z metody Bishopa obejmuje swym zasięgiem znacznie mniejszą objętość gruntu.

Wiadomym jest, że stosowanie metod równowagi granicznej wymaga znajomości kształtu i położenia powierzchni poślizgu. Tutaj były to powierzchnie o kształcie kołowym, a krytyczna powierzchnia poślizgu określana była na drodze poszukiwania minimalnej wartości wskaźnika stateczności spośród uzyskanych dla ponad 20 000 okręgów. W metodach numerycznych wykorzystujących procedurę MSSR kształt powierzchni poślizgu jest zdeterminowany stanem naprężeń i odkształceń panującym w ośrodku gruntowym o określonej budowie geologicznej. Trudno jest jednak na tym etapie badań stwierdzić czy jest ona bardziej wiarygodna niż powierzchnia poślizgu otrzymana w oparciu o metodą Bishopa.

PODSUMOWANIE

Powyższa praca jest kontynuacją cyklu publikacji autorów dotyczącego zagadnienia zastosowania różnych metod obliczeniowych dla określania stateczności skarp. Przedstawiono w niej propozycję modyfikacji metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. W swej klasycznej postaci, procedura SSR w programach FLAC czy FLAC/Slope kończy się na znalezieniu minimalnego wskaźnika stateczności dla danej sytuacji. Specyfika Metody Różnic Skończonych pozwala jednakże na dalszą redukcję wytrzymałości na ścinanie - proces obliczeniowy może być dalej kontynuowany pomimo wystąpienia lokalnej utraty stateczności związanej z określeniem minimalnej

wartości FS. Oznacza to, że możliwa jest identyfikacja miejsc występowania kolejnych płaszczyzn poślizgu, a co za tym idzie, uzyskanie kompletnego rozwiązania postawionego zagadnienia.

Wydaje się, że dla skarp o skomplikowanej budowie geologicznej, gdzie powierzchnia poślizgu zdeterminowana jest naturalnymi cechami strukturalnymi górotworu, metody numeryczne dają wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości. Stwierdzenie to wymaga jednakże dalszej weryfikacji poprzez stosowanie metod numerycznych do analizy rzeczywistych przypadków.

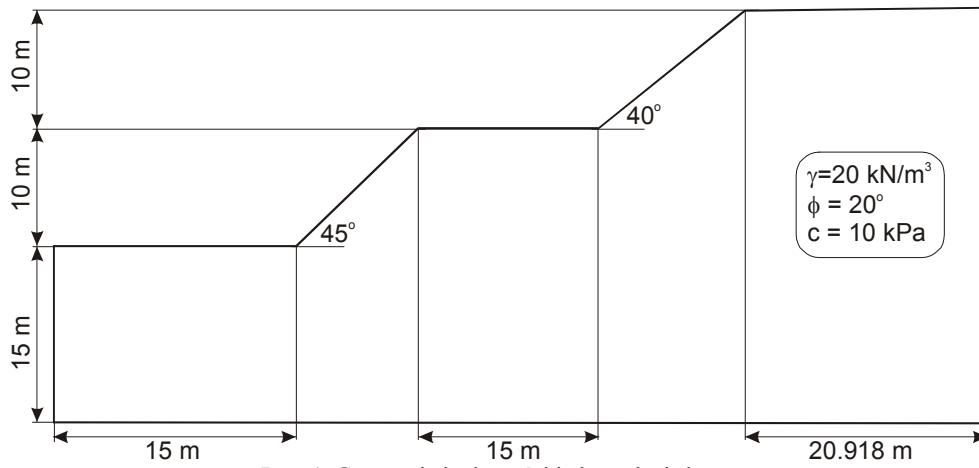
LITERATURA

- CAŁA M., FLISIAK J. 2000. Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII ZSMG. Wydawnictwo KGBiG. Kraków, 27-37.
- CAŁA 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.
- CAŁA M., FLISIAK J. 2002. Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp. XXV ZSMG. Wydawnictwo KGBiG, Kraków, 83-92.
- FLAC v. 4.0. 2000. Users Manual. Itasca Consulting Group. Inc. Minneapolis. Minnesota.
- FLAC/Slope. 2002. Users Manual. Itasca Consulting Group. Inc. Minneapolis. Minnesota.

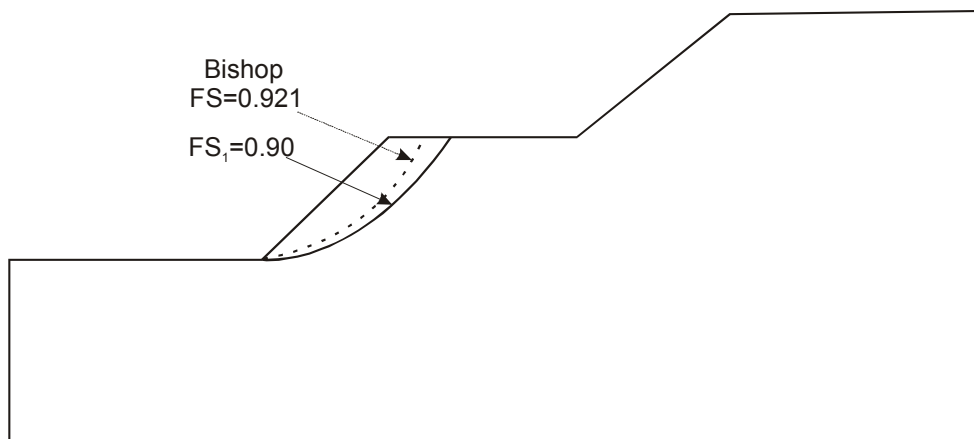
STRESZCZENIE: Analiza stateczności skarp z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie

W pracy przedstawiono wyniki analiz stateczności skarp, przeprowadzonych w oparciu o metody równowagi granicznej (LEM) oraz o metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR). Pokazano pewne ograniczenia mogące wynikać z zastosowania klasycznej metody SSR. Pozwala ona tylko na identyfikację płaszczyzny poślizgu charakteryzującej się najmniejszą wartością wskaźnika stateczności. Dla wyeliminowania tych ograniczeń zaproponowano modyfikację metody SSR z zastosowaniem programu metody różnic skończonych FLAC. Pozwala ona na zastosowanie ręcznej lub półautomatycznej procedury dalszej redukcji wytrzymałości na ścinanie. Proces obliczeniowy jest dalej kontynuowany pomimo wystąpienia lokalnej utraty stateczności związanej z określeniem minimalnej wartości FS. Jest to możliwe dzięki temu, że programy MRS modyfikują układ równań różniczkowych po wykonaniu każdego kroku obliczeniowego nie tworząc globalnej macierzy sztywności. Identyfikacja miejsc występowania kolejnych płaszczyzn poślizgu jest dość utrudniona, ale możliwa. Proces obliczeniowy może być kontynuowany aż do uzyskania pożądanego roz-

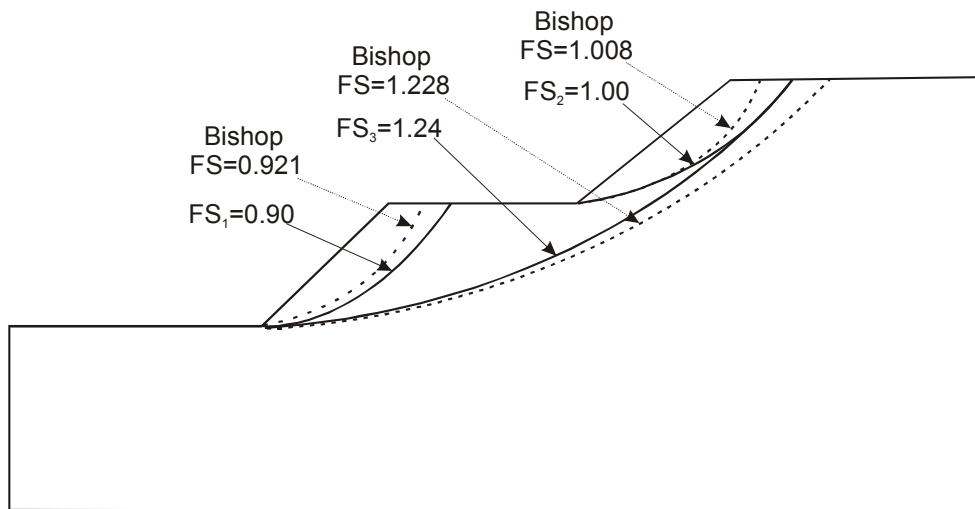
wiązania postawionego zagadnienia. Zmodyfikowana metoda SSR pozwala na pełną analizę stateczności dowolnej skarpy.



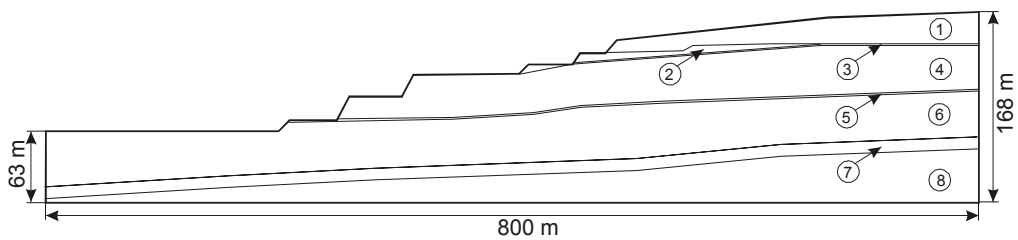
Rys. 1. Geometria i własności jednorodnej skarpy



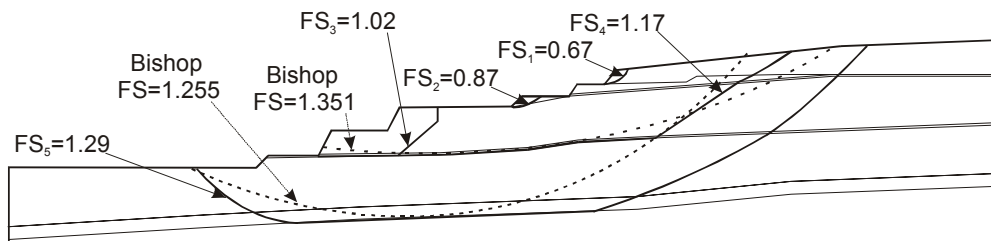
Rys.2. FS dolnej skarpy określone za pomocą klasycznej metody SSR oraz LEM



Rys.3. Pełna analiza stateczności zbocza za pomocą zmodyfikowanej metody SSR oraz LEM



Rys.4. Geometria zbocza wraz z podziałem na warstwy



Rys.5. Pełna analiza stateczności zbocza za pomocą zmodyfikowanej metody SSR oraz LEM