

Marek CAŁA

TRÓJWYMIAROWA ANALIZA STATECZNOŚCI ZBOCZY Z ZASTOSOWANIEM METODY REDUKCJI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

W niniejszej pracy zajęto się przestrzenną analizą stateczności zboczy. Z reguły do analiz stateczności zboczy wykorzystuje się metody równowagi granicznej w płaskich przekrojach. Sporadycznie na świecie stosuje się metody równowagi granicznej rozszerzone do trzech wymiarów. Rozpatruje się wówczas stateczność nie płaskich bloków lecz przestrzennych kolumn. Tutaj pokazano możliwości zastosowania przestrzennych i płaskich obliczeń numerycznych do analiz stateczności zboczy. Wykorzystano w tym celu metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR). Pozwala ona na określenie wartości minimalnego wskaźnika stateczności dla dowolnego zbocza. Przeprowadzono krytyczną analizę porównawczą obliczeń z zastosowaniem metod równowagi granicznej i metod numerycznych. Przedstawione poniżej rozważania potwierdzają fakt, że w wielu przypadkach przeprowadzenie prawidłowej analizy stateczności zboczy na drodze klasycznych obliczeń 2D jest niemożliwe. Konieczna jest budowa przestrzennych modeli numerycznych, które pozwalają na w miarę wierne odtworzenie budowy geologicznej rozpatrywanego zbocza.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich kilkudziesięciu latach podejmowano liczne próby stosowania przestrzennych analiz stateczności skarp i zboczy. Większość z tych prób polegała na modyfikacji metod równowagi granicznej. W przestrzennych (3D) rozszerzeniach metod równowagi granicznej (*limit equilibrium methods* - LEM) rozpatruje się stateczność nie pasków (bloków) lecz kolumn wyodrębnionych poprzez przyjęcie trójwymiarowej powierzchni poślizgu. Pierwsze prace w tym zakresie pochodzą z początku lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Pomimo opracowania szeregu metod, przestrzenna analiza stateczności z wykorzystaniem LEM nie znalazła szerszych zastosowań praktycznych. Także przypadki stosowania przestrzennych obliczeń numerycznych, głównie z wykorzystaniem MES, były w XX wieku nieliczne. Znaczący wzrost ilości prób zastosowania obliczeń numerycznych dla przestrzennych analiz stateczności zboczy obserwuje się natomiast w ostatnich latach, co związane jest z rosnącymi możliwościami obliczeniowymi oraz powstaniem programów umożliwiających stosunkowo prostą budowę modeli trójwymiarowych.

Przykładem zastosowanie przestrzennych obliczeń może być praca Zettlera et al. (1999), którzy przeprowadzili analizę wpływu kształtu zboczy na ich stateczność w 3D. Rozpatrywali oni m. in. przypadki zboczy wklęsłych i wypukłych oraz badali jak zmienność wskaźnika stateczności zbocza w zależności od jego geometrii. Lorig i Varona (2000) zastosowali metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (*shear strength reduction* – SSR - szczegółowy opis tej metody można znaleźć w pracach Cały i Flisiaka, 2001, 2002 oraz 2003a,b) dla przestrzennej analizy stateczności zboczy kopalni odkrywkowej Boinas East w Hiszpanii.

Poysel et al. (2001) wykorzystali program FLAC3D (oparty o metodę różnic skończonych - MRS) dla modelowania osuwisk zboczy skalnych w Austrii. Udało im się zbudować wiarygodny przestrzenny model zweryfikowany pomiarami przemieszczeń powierzchni. Ledesma et al. (2002) pokazali kilka przykładów przestrzennych analiz stateczności z zastosowaniem programów FLAC3D i DRAC (MES) uzyskując dużą zgodność wyników obliczeń. Peybernes (2003) zastosował z powodzeniem FLAC3D dla analizy stateczności zapory ziemnej, stwierdzając, że tylko wyniki obliczeń w 3D były zgodne z pomiarami in situ.

Suarez i Gonzalez (2003) wykorzystali procedurę SSR do przestrzennych analiz stateczności zboczy w kopalni odkrywkowej złota w Bonias East (Hiszpania). Bardzo interesujący model rozwoju osuwiska w czasie, z uwzględnieniem zmiennych stosunków wodnych, przedstawili w swej pracy Commend et al. (2004). W pierwszej kolejności wykalibrowali parametry modelu w oparciu o pomierzone przemieszczenia, a następnie symulowali różne sposoby poprawy warunków stateczności zbocza. Pasculli et al. (2006) zajęli się przestrzenną analizą stateczności zbocza w pobliżu Roccamontepiano (Włochy) z zastosowaniem procedury SSR zaimplementowanej w programie FLAC3D. Przeprowadzili oni serię 53 obliczeń numerycznych dla tego samego zbocza stosując losowy rozkład parametrów wytrzymałościowych i ciężaru objętościowego (c , ϕ , γ), w zakresach stwierdzonych podczas badań laboratoryjnych. Doprowadziło to do uzyskania rozrzutu wartości wskaźnika stateczności (FS – *factor of safety*) w granicach od 1.25 do 1.6.

Od wielu lat prace dotyczące przestrzennej analizy stateczności zboczy zbrojonych za pomocą pali lub kotwi publikują Cai i Ugai (2003, 2004). Rozpatrują oni z reguły stosunkowo proste przestrzenne modele zboczy z jednym palem lub kotwią i określają FS w oparciu o SSR. Podobne rozważania można także znaleźć w pracy Chena i Martina (2001) oraz Navina et al. (2005), ale niestety nie kończą oni swych przestrzennych analiz obliczeniami FS.

Tapia i Gomez (2006) przeprowadzili bardzo ciekawe przestrzenne analizy stateczności zbocza zachodniego odkrywkowej kopalni miedzi Radomiro Tomic (Chile) z wykorzystaniem programu FLAC3D. Uzyskali oni bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z przemieszczeniami pomierzonymi in situ. Po wykalibrowaniu w ten sposób modelu numerycznego, sformułowali kryterium utraty stateczności zbocza, stwierdzając że następuje to po przekroczeniu granicznej prędkości przemieszczeń $2.5 \cdot 10^{-6}$ m/s, które bardzo dobrze sprawdza się w warunkach rzeczywistych.

Sporadycznie do przestrzennych analiz stateczności zboczy wykorzystuje się modelowanie z zastosowaniem Metody Elementów Odrębnych (*Distinct Element Method* – DEM). W ostatnich latach można jednakże wskazać kilka przykładów takiego podejścia do problematyki stateczności zboczy. Najczęściej są to zbocza skalne z wyraźnie wyróżniającymi się sieciami spękań pozwalającymi na wyodrębnienie poszczególnych bloków. Takie przykłady można m.in. znaleźć w pracy Valdivii i Loriga (2000), którzy zbudowali przestrzenny model kopalni

odkrywkowej Escondida (Chile) z zastosowaniem programu 3DEC. Ten sam program wykorzystali także Ferrero et al. (2004) do analizy stateczności zboczy skalnych w rejonie Arnad (Włochy). Poisel et al. (2002) także zastosowali 3DEC do analizy stateczności zboczy skalnych charakteryzujących się skomplikowaną budową geologiczną.

Dla analizy dużych obszarów (zwykle na terenach górzystych) z punktu widzenia zagrożenia osuwiskami często stosowane są metody oparte o GIS (*geographical information system*). Z reguły, za pomocą GIS buduje się przestrzenną mapę ukształtowania terenu i następnie narzuca się na nią informacje o budowie geologicznej i własnościach wytrzymałościowych (bardzo kompletny przegląd metod budowy przestrzennych map powierzchni można znaleźć w pracy Van Westena, 2004). Następnie formułuje się zazwyczaj prosty warunek równowagi i oblicza się na jego podstawie rozkład wskaźników stateczności (Jibson et al. 2000; Donati i Turrini, 2002; Coe et al. 2003; Mora et al. 2003; Ayalev et al. 2004; Duman et al. 2005; Saha et al. 2005; Fall et al. 2006; Clerici et al. 2006). Należy jednakże zauważyć, że analizy warunków równowagi prowadzone są z reguły dla prostych modeli, o nieskomplikowanej budowie geologicznej i geometrii. Często rozpatruje się stateczność zbocza o nieograniczonej długości z uwzględnieniem (lub nie) filtracji. Przykładowo w pracy Babu i Mukesh (2002) analizy stateczności prowadzono przy założeniu płaskiej powierzchni poślizgu (metoda Cullmana, 1875). Przyjęcie takiej metodyki określania wskaźników stateczności może być wiarygodne tylko w specyficznych warunkach geologicznych, gdzie występują wyraźnie ukierunkowane powierzchnie nieciągłości. W innym przypadku może prowadzić to do popełnienia istotnych błędów. Przykładowo stosując metodę Cullmana dla zbocza o wysokości 20 m, kącie nachylenia 40° , ciężarze objętościowym 20 kN/m^3 , kącie tarcia wewnętrznego 20° i kohezji równej 20 kPa – otrzymuje się wartość wskaźnika stateczności równą 1.371. Stosując metodę Bishopa do analizy zbocza o takich samych parametrach otrzymuje się wartość wskaźnika stateczności równą 1.001.

Wyjątkiem na tle cytowanych powyżej artykułów są prace Xie et al. (2003a,b, 2004a,b, 2006a,b) oraz Wanga et al. (2006), w których autorzy przedstawili metodę analizy stateczności zboczy w 3D opartą na systemie GIS. Rozpatrywali oni równowagę kolumny gruntu (jednorodnej lub wielowarstwowej) zakończonej płaszczyzną poślizgu. Dla jej zadanej geometrii określali FS oparty na warunku równowagi Coulomba-Mohra. Zakładali oni, że powierzchnie poślizgu mają kształt pobocznicy elipsoidy obrotowej. W swojej pracy przedstawiają przykłady analiz stateczności w 3D dla jednorodnego oraz dla zawodnionego zbocza złożonego z 4 warstw przeciętych dodatkowo uskokiem. Niestety, nie ma możliwości weryfikacji tych rozwiązań za pomocą SSR, albowiem oba analizowane przypadki nie wykazują przestrzennego zróżnicowania litologii. Wyniki uzyskane z SSR w 3D byłyby więc zbliżone do wartości FS uzyskanej z rozwiązania płaskiego.

Podjęmowane są także próby opracowania systemów służących do przestrzennych analiz stateczności zboczy opartych na logice rozmytej (Ercanoglu i Orcenoglu, 2002, 2004; Sabota et al. 2006) lub sieciach neuronowych (Fernandez-Steeger et al. 2002; Lee et al. 2003; Lee et al. 2004; Sakellariou i Ferentiniu, 2005; Yesilnacar i Topal, 2005; Kanungo et al. 2006; Neaupane i Piantanakulchi, 2006). Trudno jest tutaj formułować jednoznaczne poglądy na możliwości zastosowania tych metod. Wydaje się jednak, że istotną przeszkodą do ich powszechnego wykorzystania jest konieczność budowy bazy danych obejmujących zaistniałe przypadki osuwisk, które wystąpiły w charakterystycznym, pod względem geomorfologicznym, rejonie. Nie byłyby to w takim razie metody uniwersalne, a ich stosowalność na szeroką skalę byłaby

dość ograniczona.

Warto w tym miejscu wspomnieć o pewnych możliwościach zastosowania satelitarnej interferometrii radarowej (SAR) dla identyfikacji rejonów wzrastających przemieszczeń. SAR była już w Polsce stosowana do monitoringu przemieszczeń wywołanych działalnością górnictwem na obszarach GZW i LGOM (Krawczyk i Perski, 2000). W literaturze światowej można od kilku lat napotkać prace dotyczące zastosowania SAR dla monitoringu i kontroli terenów zagrożonych osuwiskami (Berardino et al. 2003; Tarchi et al. 2003; Colesanti et al. 2003; Squarzoni et al. 2003; Antonello et al. 2004; Barbieri et al. 2004; Casagli et al. 2004; Colesanti i Wasowski, 2004; Wasowski et al. 2004; Crosetto et al. 2005; Catani et al. 2005; Saha et al. 2005; Squarzoni et al. 2005; Bovenga et al. 2006; Cotecchia, 2006; Colesanti i Wasowski, 2006; Farina et al. 2006; Messina et al. 2006; Perrone et al. 2006). Najlepsze kompendium wiedzy na ten temat można znaleźć w pracy Singhroy'a (2004). Dokładność pomiaru przemieszczeń pionowych uzyskiwana w SAR może nawet sięgać kilku milimetrów. Niestety istotną wadą tych pomiarów jest ich zbyt niska częstotliwość. Interferogramy dla naszej części Europy można uzyskiwać z satelitów ERS-1 (tylko materiały archiwalne) i ERS-2, których czas obiegu wynosi 35 dni. Obserwacje z taką częstotliwością nadają się do monitoringu dużych zboczy, których utrata stateczności może być istotnym zagrożeniem. W przypadkach kopalni odkrywkowych mogą to być np. zwałowiska zewnętrzne.

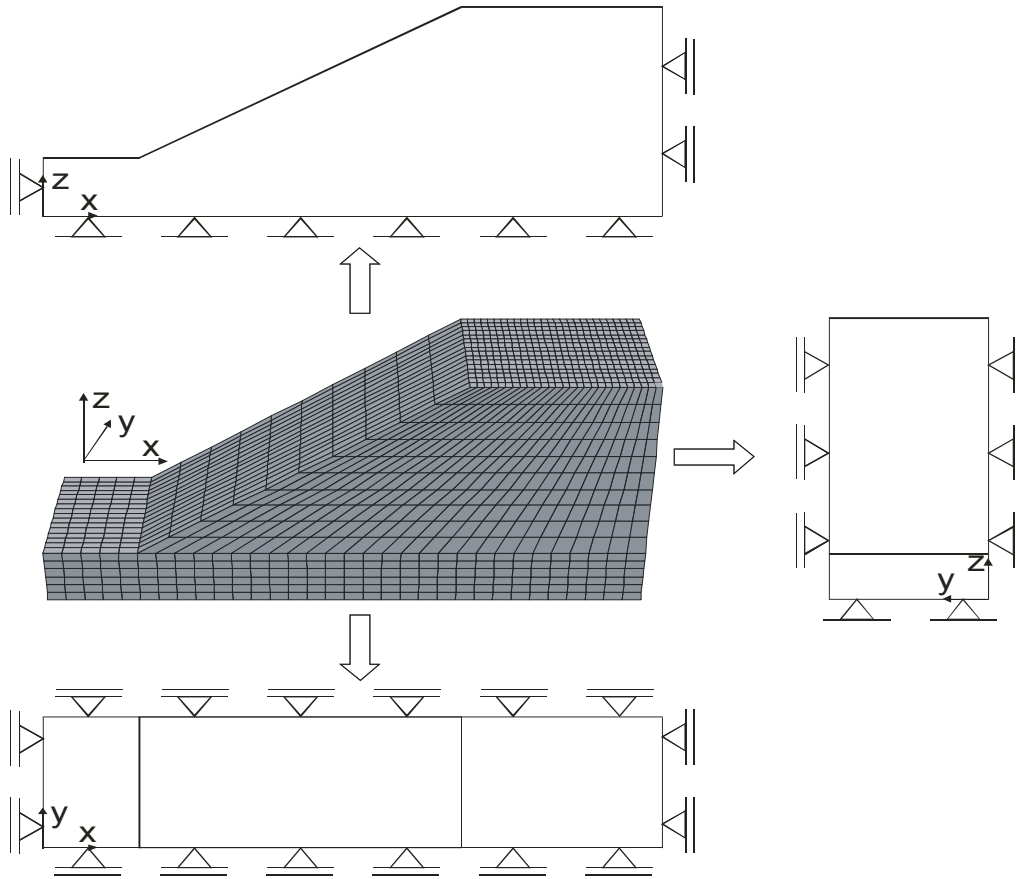
W pracach Lapenna et al. (2003), Bichlera et al. (2004), Merc et al. (2005), Donnelly et al. (2005), Wu et al. (2005), Rocha et al. (2006), Chelli et al. (2006), Otto i Sass (2006), Borgatti et al. (2006), Drahora et al. (2006) oraz Tullen et al. (2006) pokazano z kolei ciekawe przykłady zastosowania profilowań elektrooporowych, prześwietleń sejsmicznych oraz badań georadarowych dla przestrzennej identyfikacji powierzchni poślizgu.

2. WPLYW WARUNKÓW BRZEGOWYCH NA WYNIKI PRZESTRZENNYCH ANALIZ STATECZNOŚCI

Właściwe przyjęcie warunków brzegowych jest kwestią niezwykle istotną w przypadku przestrzennych analiz stateczności zboczy. Warunki brzegowe dla przypadku płaskiego stanu odkształcenia nie wzbudzają większych emocji. Na ogół wszyscy są zgodni, że powinny to być utwierdzenia w obu kierunkach dla dolnej krawędzi tarczy oraz utwierdzenie w kierunku osi poziomej dla obu krawędzi bocznych. Warunki brzegowe dla stanu 3D nie są już tak jednoznaczne. W pierwszej kolejności wspomnieć należy, że mało kto porusza tą kwestię. Na ogół nie poświęca się jej uwagi skupiając się na prezentacji wyników obliczeń.

Interesująco na tym tle wyglądają rozważania Chugha (2003), który zajmuje się tym problemem. Stwierdza on, że na dowolnej powierzchni bocznej modelu powinny być przyjęte warunki brzegowe przemieszczeniowe lub naprężeniowe. Następnie rozważa wpływ całego szeregu różnych kombinacji warunków brzegowych na obliczone dla nich wartości wskaźnika stateczności. Generalnie zaleca on wykorzystanie w obliczeniach 3D warunków przemieszczeniowych, co wydaje się słuszne. Tylko w uzasadnionych przypadkach (np. gdy dysponuje się wynikami pomiarów pierwotnego stanu naprężenia w masywie, które wskazują, że $K_0 \geq 1$) celowe jest zastosowanie warunków naprężeniowych na powierzchniach bocznych, lub też dla całej bryły modelu.

W większości przypadków zatem, przemieszczeniowe warunki brzegowe powinny wyglądać następująco (rys.1):



Rys.1. Przemieszczeniowe warunki brzegowe dla przestrzennej analizy stateczności zbroczy

- zerowe przemieszczenia w kierunkach wszystkich osi na dolnej płaszczyźnie modelu,
- zerowe przemieszczenia w kierunku osi x dla obu płaszczyzn yz ,
- zerowe przemieszczenia w kierunku osi y dla obu płaszczyzn xz .

Przyjęcie takich warunków brzegowych powoduje, że (pod warunkiem przyjęcia odpowiednich wymiarów modelu) nie będą one miały wpływu na proces utraty stateczności zbrocza.

Zdecydowanie największe kontrowersje budzą tutaj założenia odnośnie do warunków brzegowych na obu płaszczyznach bocznych modelu. W pracy Chugh (2003) przeprowadzone są obliczenia przy przyjęciu pewnej określonej budowy geologicznej zbrocza. Abstrahując od szczegółów powiedzmy tylko, że budowa ta jest niezmienna w kierunku osi y (rys. 1). Dla przypadku płaskiego stanu odkształcenia, obliczenia z zastosowaniem programu FLAC2D dały w efekcie wartość $FS=1.64$. Przyjmując, przemieszczeniowe warunki brzegowe Chugh otrzy-

mał wartość $FS=1.71$, co jest wartością wiarygodną (model obliczeniowy miał niezbyt wielki wymiar w kierunku osi y). Powiększając wymiar modelu w kierunku osi y , wartości FS powoli zmierzałyby do wartości określonych w płaskim stanie odkształcenia. Dalej Chugh (2003) przeprowadza obliczenia przyjmując zerowe przemieszczenia w kierunku osi x i y dla obu płaszczyzn xz . W efekcie uzyskuje on wzrost wartości wskaźnika stateczności do $FS=2.26$. Nie jest to wartość prawidłowa dla przyjętej budowy geologicznej zbocza. Nie ma, w tym przypadku, żadnego uzasadnienia dla zerowania przemieszczeń poziomych w obu kierunkach na płaszczyznach bocznych modelu.

Podobny przypadek opisany jest w pracy Jianga et al. (2003). Jej autorzy także prezentują dość swobodne podejście do warunków brzegowych. Przedstawiają oni obliczenia FS dla jednorodnego zbocza z zastosowaniem przestrzennych LEM, a konkretnie uproszczonej metody Janbu. Obliczenia przeprowadzono dla trzech modeli charakteryzujących się zróżnicowanymi wymiarami w kierunku prostopadłym do płaskiego przekroju zbocza. Wraz ze wzrostem tego wymiaru spadają jednocześnie wartości FS . I tak dla szerokości $L_1=48$ m otrzymano wartość $FS_1=1.71$, dla $L_2=80$ m otrzymano $FS_2=1.65$, zaś dla $L_3=112$ m otrzymano $FS_3=1.62$. Zarówno wartości FS jak i kształty i lokalizacje powierzchni poślizgu są tutaj zdecydowanie wymuszone przyjętymi warunkami brzegowymi. Trudno więc uznać takie wyniki obliczeń za wiarygodne.

Z inną sytuacją mamy do czynienia gdy płaszczyzny (czy też powierzchnie) boczne modelu wynikają z naturalnych jego ograniczeń. Taką sytuację opisują Yu et al. (2005), którzy zajmowali się przestrzennymi analizami stateczności tamy. Była ona zbudowana z gruntów i gruntów skalistych i jej naturalnymi ograniczeniami były skalne zbocza kanionu.

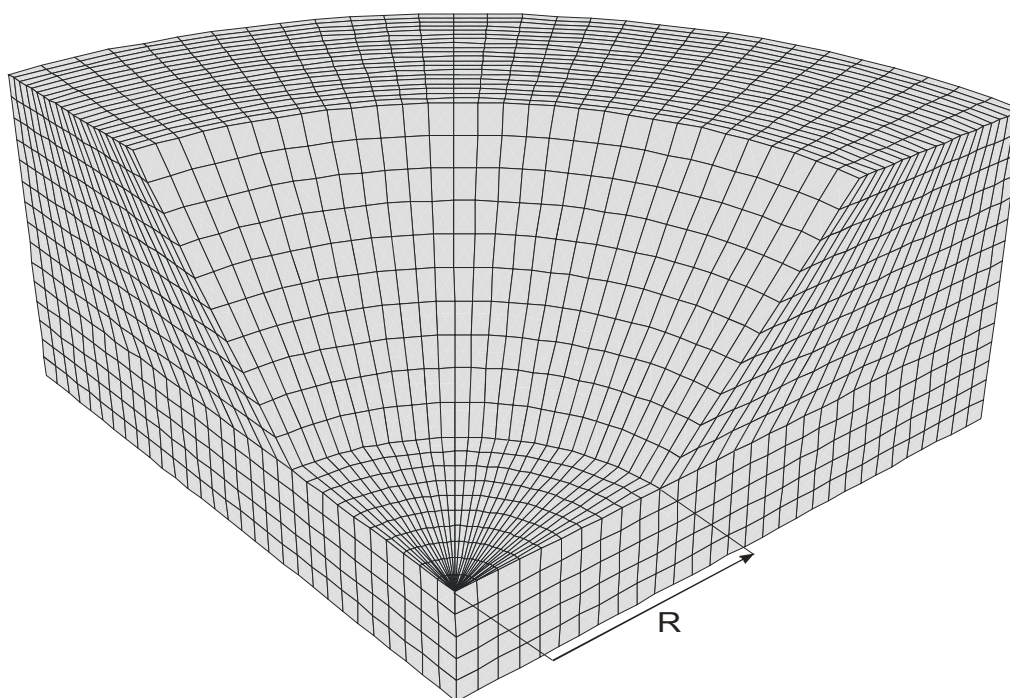
3. STATECZNOŚĆ ZBOCZY ZAKRZYWIONYCH

Jest faktem ogólnie znanym i potwierdzonym na wielu przykładach praktycznych (Hoek i Bray, 1981; Hoek et al. 2000), że wklęsłe i wypukłe zbocza zakrzywione (rys.2) charakteryzują się różnymi wartościami FS .

Wspominają o tym już Piteau i Jennings w 1970 roku, którzy na podstawie obserwacji stateczności wklęsłych zboczy skalnych, stwierdzili, że dla promieni równych $R=60$ m stateczne były zbocza nachylone pod kątem 39.5° , zaś dla promienia $R=300$ m stateczność zapewniał kąt 27.3° . Hoek i Bray (1981) przedstawiają szereg wniosków ze swoich doświadczeń z wklęsłymi zboczami. Sugerują, że jeżeli promień zbocza jest mniejszy od jego wysokości to kąt nachylenia zbocza może być o 10° większy niż to wynika z analiz w płaskich przekrojach. Dla promienia dwukrotnie większego niż wysokość zbocza należy zaniechać poprawki ze względu na krzywiznę (dla wartości promienia pomiędzy $(1\div 2)H$ należy interpolować poprawkę). Zalecenia te zostały potwierdzone poprzez obliczenia numeryczne z zastosowaniem SSR (przy wykorzystaniu programu FLAC), przeprowadzone przez Loriga (1999) oraz Loriga i Varone (2000). Badali oni stateczność wklęsłego zbocza o wysokości 500 m i kącie nachylenia 45° . W pierwszym rzędzie sprawdzali oni jaki wpływ na wartość FS ma wzrost promienia. Następnie, dla danych promieni określali, jakie są dopuszczalne kąty nachylenia zbocza (przy zachowaniu $FS=1.3$). Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki obliczeń numerycznych z prac Loriga (1999) oraz Loriga i Varona (2000)

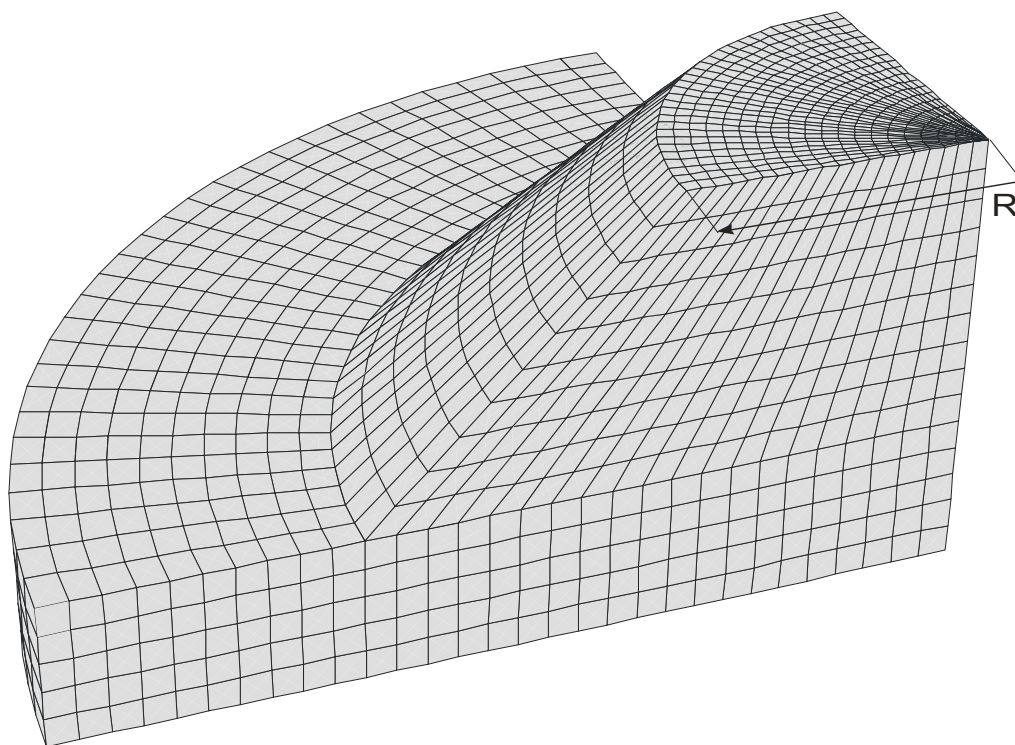
Wpływ promienia (R) na wartości FS zbocza o kącie nachylenia $\alpha=45^\circ$				
$\alpha=45^\circ$	R=100 m	R=250 m	R=500 m	R= ∞
	FS=1.75	FS=1.65	FS=1.55	FS=1.3
Wpływ promienia (R) na kąt nachylenia zbocza przy założeniu FS=1.3=constans				
FS=1.3	R=100 m	R=250 m	R=500 m	R= ∞
	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=65^\circ$	$\alpha=55^\circ$	$\alpha=45^\circ$



Rys. 2a. Zakrzywione zbocze wklęsłe (*concave*)

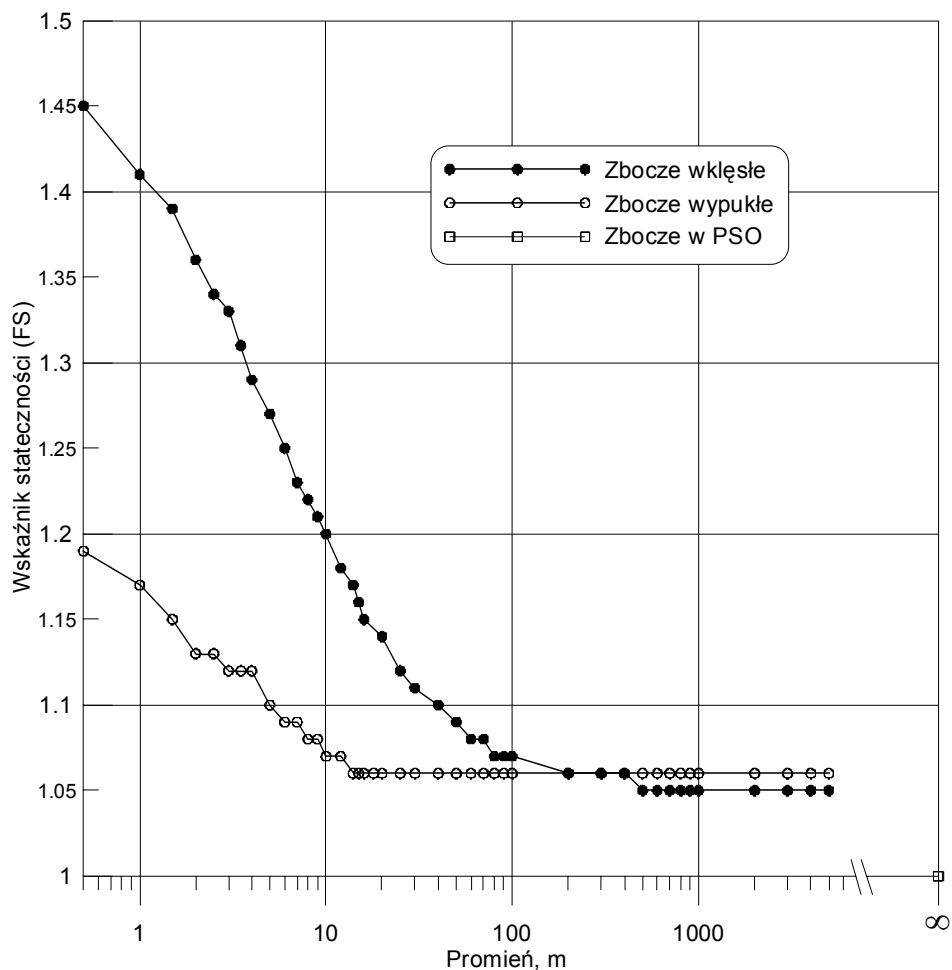
Wyniki te potwierdzają w pełni zalecenia Hoeka i Braya (1981). Należy jednakże zaznaczyć, że korzystny wpływ wklęsłości zbocza na jego wskaźnik stateczności może być zniwelowany np. poprzez istnienie powierzchni nieciągłości, uskoków etc.

Suarez i Gonzalez (2003) także zwracają uwagę na korzystny wpływ wklęsłości zbocza na jego stateczność. Przeprowadzone przez nich obliczenia z zastosowaniem SSR wykazują, że wartość FS w przypadku zbocza wklęsłego może być większa nawet o około 0.45, co potwierdza wyniki obliczeń Loriga i Varony (2000).



Rys. 2b. Zakrzywione zbocze wypukłe (*convex*)

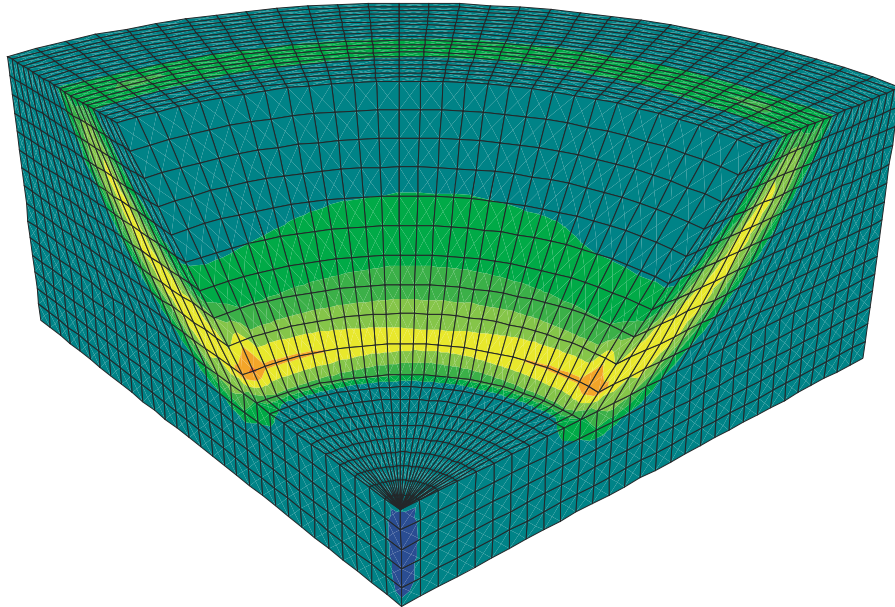
Dla weryfikacji wcześniej opisanych rozważań przeprowadzono serię obliczeń numerycznych dla zboczy wklęsłych i wypukłych. Ze względu na geometrię ograniczono się do analizy ćwiartki modelu (rys 2a i 2b), przyjmując na brzegach odpowiednie warunki przemieszczeniowe. Przyjęto, że jednorodny zbocze o wysokości 10 m i kącie nachylenia 45° jest zbudowane z gruntu o kohezji równej 9 kPa, kącie tarcia wewnętrznego 25° i ciężarze objętościowym równym 20 kN/m^3 . Promień dla zboczy wklęsłych i wypukłych zmieniano od 0 m do 5000 m.. We wszystkich obliczeniach przeprowadzonych w niniejszej pracy grunt traktowano jako ośrodek sprężysto-idealnie-plastyczny Coulomba-Mohra. Wyniki obliczeń, w postaci zależności FS od promienia, pokazano na rys. 3 w skali logarytmicznej (stąd też brakuje na wykresach wyników dla promienia $R=0$, wartości FS wynoszą 1.48 i 1.22 odpowiednio dla zbocza wklęsłego i wypukłego). Z wykresów tych wynika, że zarówno zbocza wklęsłe jak i wypukłe charakteryzują się większymi wartościami FS niż zbocza analizowane w płaskim stanie odkształcenia (PSO). Ostatecznie, przy $R \rightarrow \infty$, wartości FS dla obu przypadków zbiegają do wartości dla PSO, czyli w analizowanym, przypadku do $FS=1$.



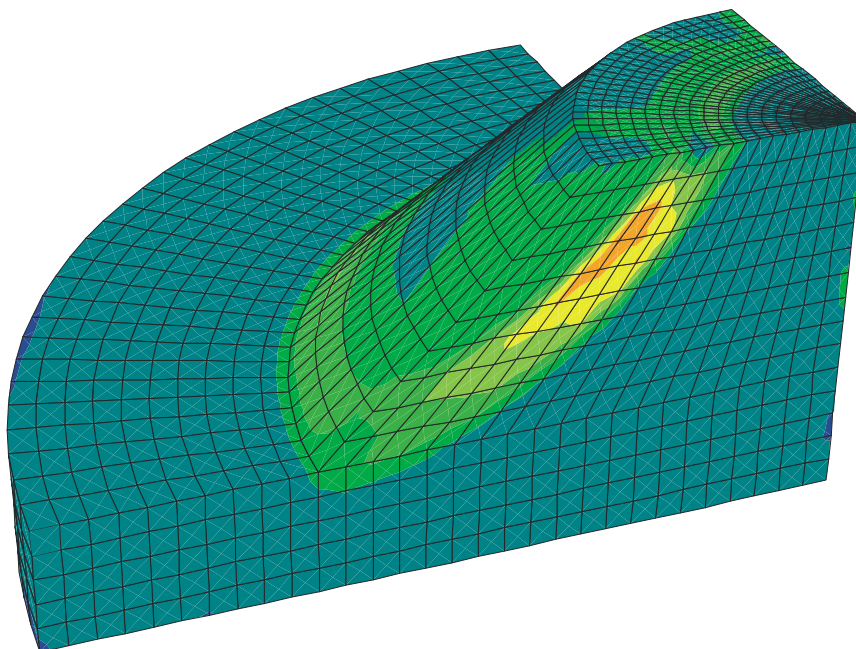
Rys.3. FS w funkcji promienia dla zboczy wklęsłych, wypukłych oraz PSO

Obliczenia przeprowadzone dla modeli osiowo-symetrycznych zostały potwierdzone przez obliczenia przeprowadzone w 3D. Na rys. 4 pokazano powierzchnię poślizgu zidentyfikowaną (poprzez rozkład odkształceń postaciowych) dla modelu wklęsłego dla promienia równego 10 m. Z modelu przestrzennego uzyskano wartość $FS = 1.19$, co bardzo dobrze koresponduje z wartością $FS = 1.2$ uzyskaną z modelowania osiowo symetrycznego.

Na rys. 5 pokazano, podobnie jak w poprzednim przypadku, powierzchnię poślizgu dla modelu wypukłego dla promienia równego 10 m. Ponownie uzyskana dla modeli 3D wartość $FS = 1.06$ jest bardzo zbliżona do wartości $FS = 1.07$ uzyskanej z modelowania osiowo symetrycznego. Praktycznie, dla rozpatrywanych powyżej zboczy wklęsłych, można stwierdzić, że wartość FS jest istotnie wyższa (o około 0.1) od przypadku w PSO dla promienia około 5-krotnie większego od wysokości zbocza.



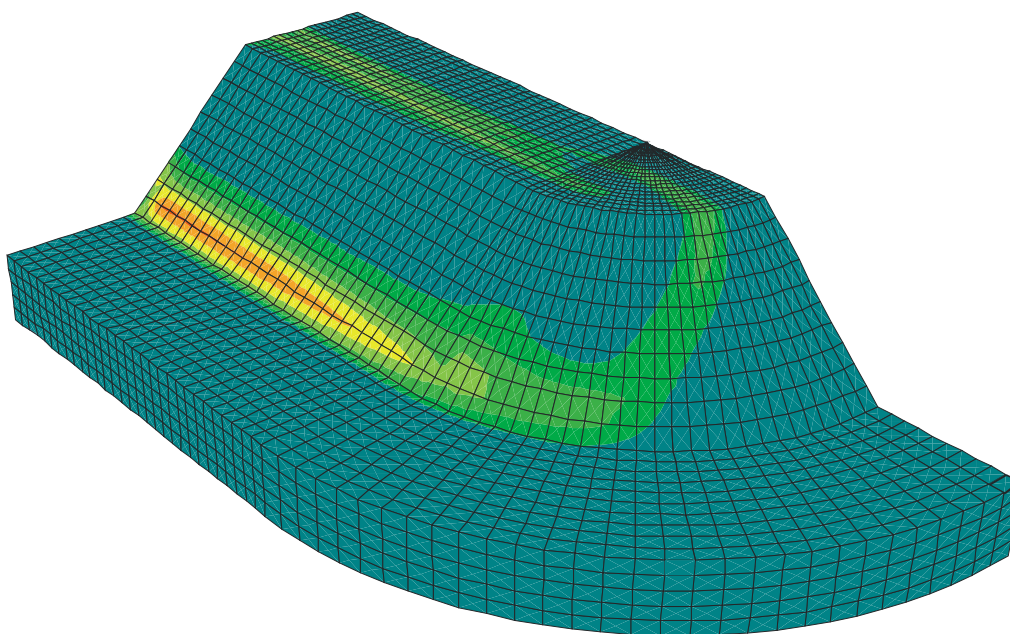
Rys.4 Powierzchnia poślizgu zidentyfikowana dla zbcza wklęsłego, FS=1.19



Rys.5 Powierzchnia poślizgu zidentyfikowana dla zbcza wypukłego, FS=1.06

Dla przypadku zboczy wypukłych istotny wzrost występuje tylko przy niewielkich wartościach promienia oscylujących około $0.6H$. Widać więc, że w przypadku zboczy wypukłych wzrost wartości FS jest stosunkowo niewielki (ale miły dla mieszkańca Krakowa – chociażby ze względu na ilość kopców w mieście i okolicach). Do zbliżonych wniosków dochodzą Jiang et al. (2003), którzy analizują zbocza wklęsłe, wypukłe oraz w PSO uzyskują dla nich odpowiednio wartości FS równe 1.87, 1.7 i 1.48. Analizy te będą szczegółowo omówione w dalszej części tej pracy.

Dla dalszej weryfikacji przypadku zbocza wypukłego wykonano obliczenia dla modelu będącego złożeniem zbocza wypukłego i wału. Rozpatrzono mianowicie wał o długości 60 m (własności gruntów dokładnie jak w poprzednich analizach) zakończony połową zbocza wypukłego. Ze względu na podwójną symetrię rozpatrzono ćwiartkę modelu. W rezultacie obliczeń uzyskano wartość FS równą 1.03 i powierzchnię poślizgu obejmującą zbocze wału oraz częściowo zbocze wypukłe (rys.6). Można przypuszczać, że dla wału o coraz większej długości uzyskiwanoby wartości FS zmierzające do 1.0, co jest wartością określoną dla PSO. Potwierdza to fakt, że wał, a nie jego zakrzywione (wypukłe) zakończenie, jest tutaj najsłabszym elementem.



Rys.6. Powierzchnia poślizgu obejmująca wał i częściowo jego zakrzywione zakończenie

Wyniki te potwierdzają także obliczenia Brząkały (2003), który po wykonaniu szeregu analiz numerycznych, szacuje wzrost wartości FS dla (niezawodnionych) zboczy zarówno wklęsłych i wypukłych, na około 10-15 %.

Potwierdza to hipotezę, że błędne jest stwierdzenie, iż zbocze wypukłe charakteryzuje się mniejszą wartością FS niż (geometrycznie podobne) zbocze w PSO. Taki błąd został przykła-

dowo popelniony w pracy Zettlera et al. (1999). Jej autorzy analizowali stateczność jednorodnego zbocza o wysokości 25 m nachylonego pod kątem 63.43° do poziomu (własności gruntu: $c=38$ kPa, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=25.7$ kN/m³). Obliczenia przeprowadzono dla modeli 3D z zastosowaniem SSR. Dla weryfikacji wyników tych obliczeń przeprowadzono obliczenia wartości FS z zastosowaniem SSR dla modeli osiowo-symetrycznych. Wyniki obu serii obliczeń zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2 Wyniki obliczeń weryfikujących pracę Zettlera et al. (1999)

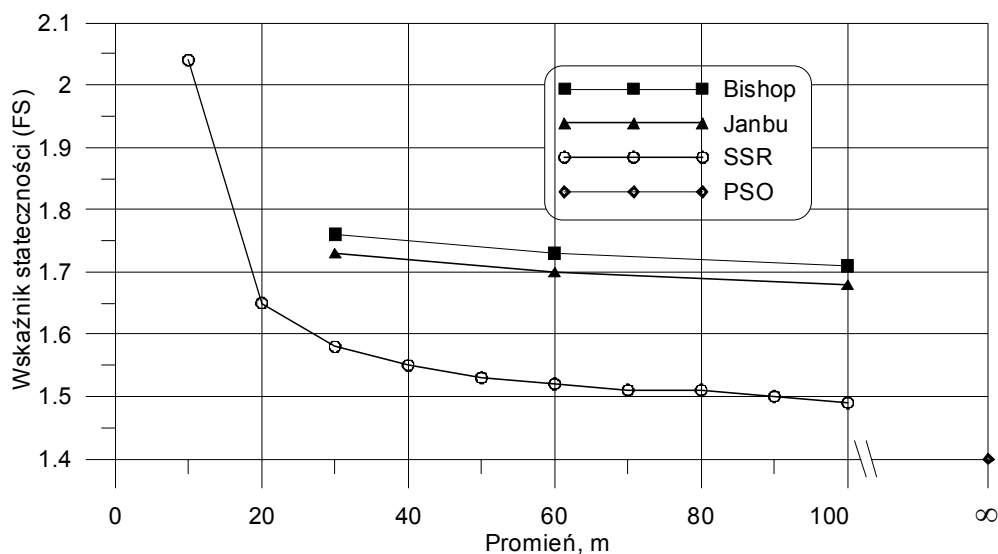
Zbocze	Wskaźnik stateczności - FS	
	Zettler et al. (1999)	Obliczenia własne
wklęsłe	1.83	1.71
wypukłe	1.37	1.32
PSO	1.41	1.24

Wyniki obliczeń weryfikujących wskazują na duże różnice w wartościach FS. Różnice w wartościach FS dla zboczy wklęsłego i wypukłego wynoszą odpowiednio 0.12 i 0.05, co można (z pewnym przybliżeniem) uznać za różnice akceptowalne. Jednakże różnica pomiędzy wartościami FS dla PSO jest już znacząca i wynosi 0.17. Zdecydowanie nie jest to rezultat prawidłowy i mylnie wskazuje na wyższą wartość wskaźnika stateczności dla zbocza w PSO w porównaniu do zbocza wypukłego.

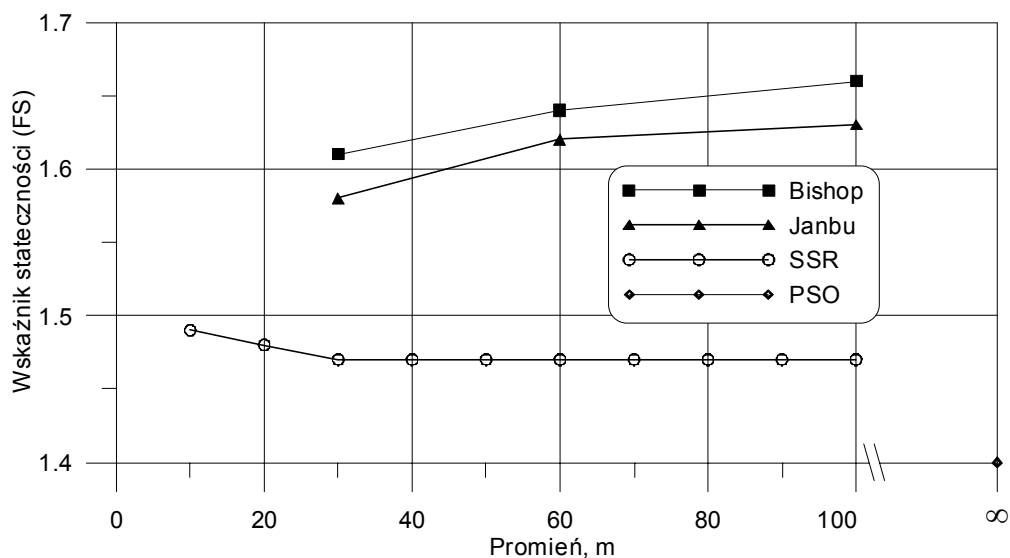
Wątpliwe wyniki obliczeń dotyczących stateczności zboczy wklęsłych i wypukłych można także znaleźć w pracy Chenga et al. (2005). Zastosowali oni metody Bishopa i Janbu do obliczeń stateczności zboczy wklęsłych i wypukłych w 3D. Analizowali stateczność zbocza o wysokości 10 m i kącie nachylenia 45 stopni dla różnych promieni (grunt charakteryzował się parametrami: $c=10$ kPa, $\varphi=36^\circ$, $\gamma=19.5$ kN/m³). Dla takich samych zboczy przeprowadzono obliczenia z zastosowaniem SSR, wykorzystując osiową symetrię zagadnienia. Na rys. 7 pokazano porównanie wyników obliczeń dla zboczy wklęsłych.

Widać wyraźnie, że wartości FS uzyskane z obliczeń z zastosowaniem metod Bishopa i Janbu są wyraźnie wyższe od FS otrzymanych z obliczeń numerycznych. Dla niewielkich wartości promieni wartości FS określone za pomocą SSR gwałtownie rosną – niestety nie można ich porównać z wynikami obliczeń metodami Bishopa i Janbu bo tych w pracy Chenga et al. (2005) nie zamieszczono.

Na rys. 8 przedstawiono, analogicznie jak poprzednio, porównanie wyników obliczeń dla zboczy wypukłych. Podobnie jak poprzednio wartości FS uzyskane z obliczeń z zastosowaniem metod Bishopa i Janbu są wyraźnie wyższe (o ponad 0.1) od FS otrzymanych z obliczeń numerycznych. Tutaj jednakże widać zupełnie odwrotną tendencję wyników obliczeń z zastosowaniem LEM w porównaniu do obliczeń SSR. Wraz ze wzrostem promienia wartości FS uzyskane z LEM rosną, co jest tendencją niezbyt wiarygodną. Zupełnie odwrotnie wyniki SSR – wykazują niewielki wzrost FS w miarę zmniejszania się promienia, co jest trendem intuicyjnie prawidłowym.



Rys.7. Porównanie wartości FS z pracy Cheng et al. (2005) i otrzymanych z SSR – zbocze wklęsłe

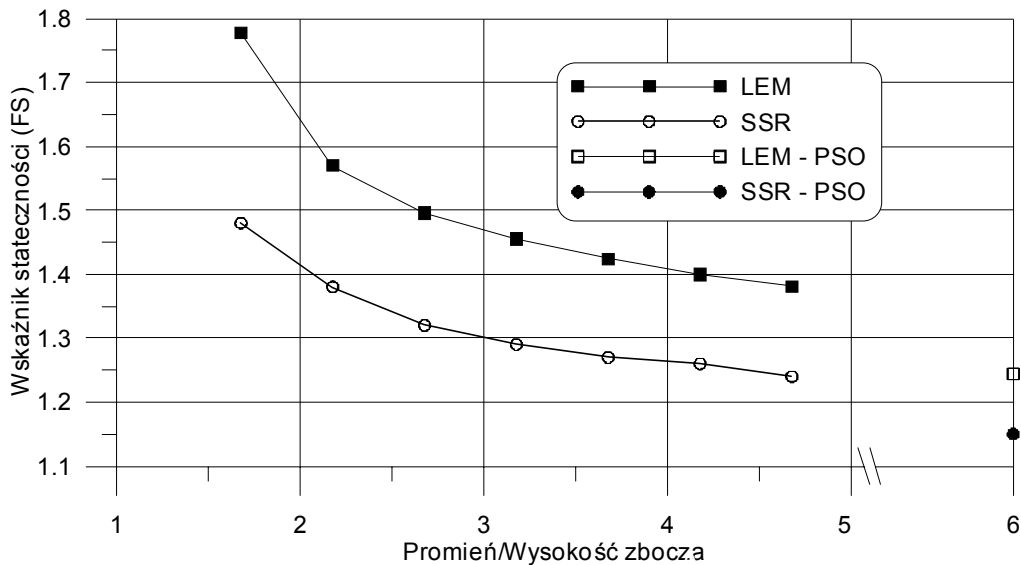


Rys.8. Porównanie wartości FS z pracy Cheng et al. (2005) i otrzymanych z SSR – zbocze wypukłe

Jak wynika z przedstawionych powyżej przykładów, tendencja do uzyskiwania niższych wartości FS z obliczeń z zastosowaniem SSR w porównaniu z LEM w 3D jest dosyć częsta. Podobne wyniki uzyskano w pracy Xinga (1988). Przedstawia on wyniki obliczeń dla wklęsłych zboczy w 3D za pomocą metody LEM opartej na metodzie Felleniusa. Rozpatrywał on

zbocze o wysokości 400 m i kącie nachylenia 35 stopni dla różnych promieni (grunt charakteryzował się parametrami: $c=600$ kPa, $\varphi=20^\circ$, $\gamma=27$ kN/m³). Porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych w pracy Xinga (1988) z obliczeniami SSR z wykorzystaniem modeli osiowo-symetrycznych i w PSO pokazano na rys. 9.

Ze względu na dużą wysokość zbocza, wartości FS pokazano w funkcji stosunku promienia do wysokości zbocza (R/H). Widać wyraźnie, że wartości FS otrzymane z SSR są mniejsze od wartości określonych za pomocą LEM. Początkowo (dla niewielkich wartości promienia) te różnice dochodzą nawet do około 0.3, aby następnie spaść do około 0.1 w PSO.



Rys. 9. Porównanie wartości FS z pracy Xinga (1988) i otrzymanych z SSR

Ciekawe analizy stateczności zboczy wklęsłych (a dokładnie stożkowych) z zastosowaniem przestrzennych analiz LEM przedstawiono w pracy Leshchinski i Huang (1992). Niestety zamieszczony tam ubogi opis uniemożliwia budowę modeli i wykonanie obliczeń weryfikacyjnych z zastosowaniem SSR.

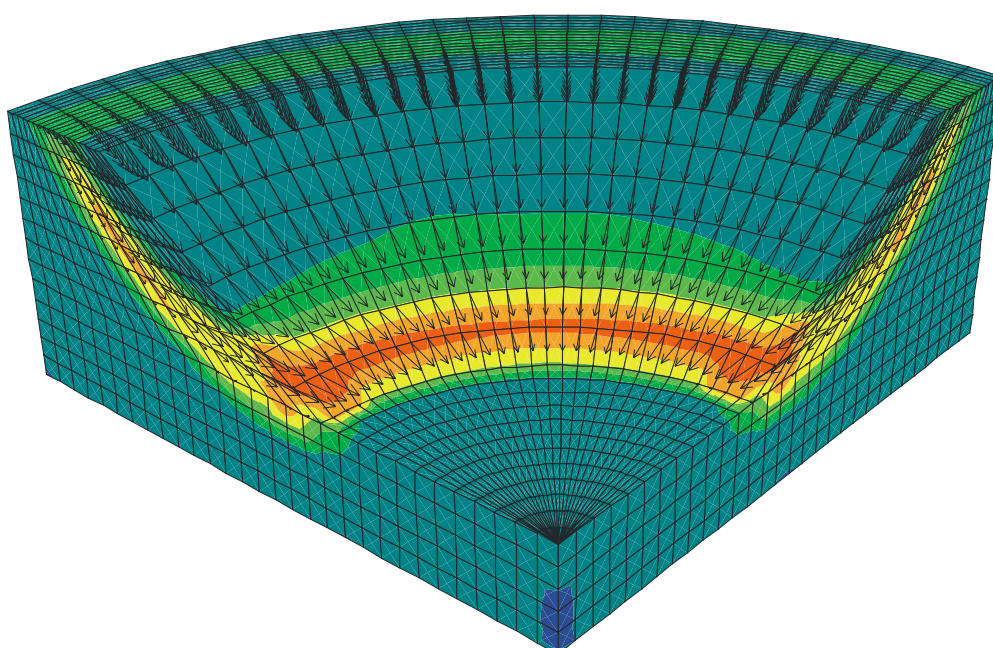
Interesujące przestrzenne analizy stateczności zboczy z zastosowaniem uproszczonej metody Janbu przedstawiono w pracy Jianga et al. (2003). Jej autorzy analizowali stateczność jednorodnych zboczy o wysokości 8 m, nachyleniu 33.7° , promieniu równym 18 m w 2D i 3D. Przyjęto, że zbocze zbudowane jest z gruntu posiadającego następujące parametry: $c=11.7$ kPa, $\varphi=24.7^\circ$, $\gamma=17.66$ kN/m³.

Dla weryfikacji wyników tych obliczeń przeprowadzono analizy płaskie i przestrzenne z zastosowaniem SSR. Wyniki przeprowadzonych obliczeń pokazano w tabeli 3.

Tabela 3 Wyniki obliczeń weryfikujących pracę Jianga et al. (2003)

Zbocze	Wskaźnik stateczności - FS	
	Jiang et al. (2003)	SSR 3D
wklęsłe	1.87	1.86
wypukłe	1.70	1.76
PSO	1.48	1.61

Zidentyfikowane, za pomocą SSR, powierzchnie poślizgu dla przypadku zbocza wklęsłego i wypukłego pokazano na rys. 10a,b.

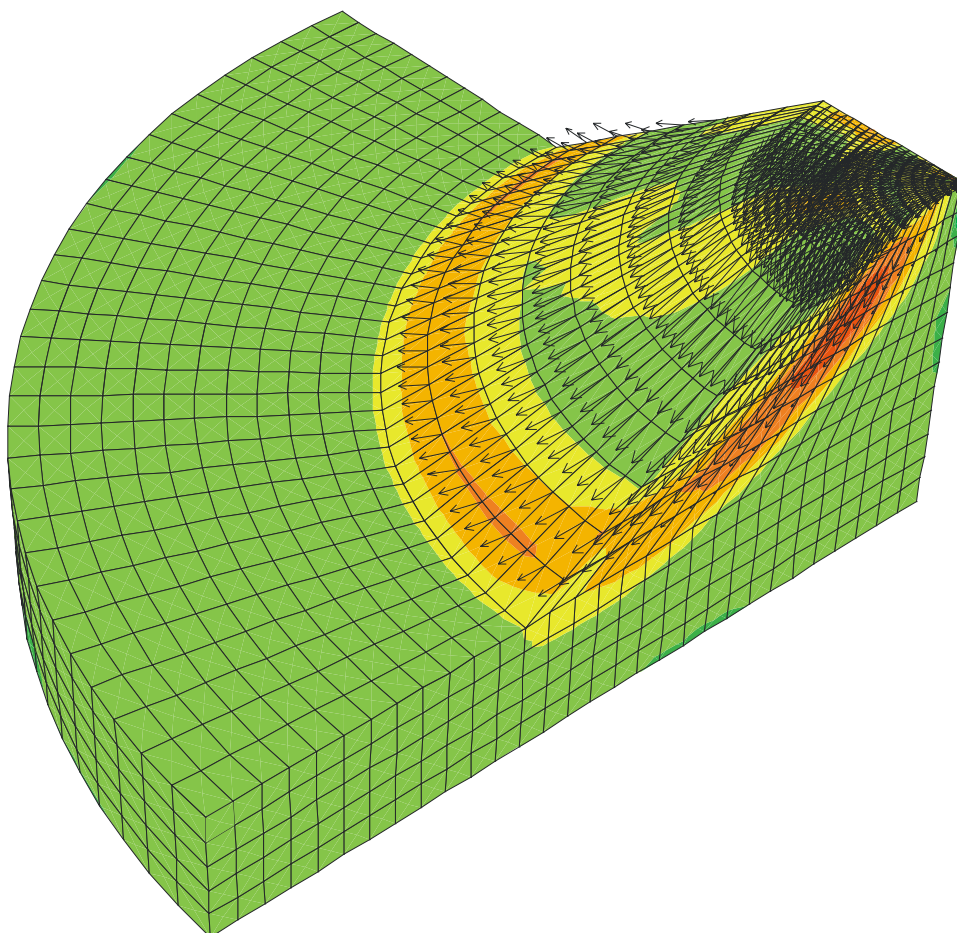


Rys.10a. Powierzchnia poślizgu zidentyfikowana za pomocą SSR dla zbocza wklęsłego

Jak dotychczas jest to jedyny przypadek, gdy analizy SSR dla zboczy wypukłych dały większą wartość wskaźnika stateczności niż przestrzenne analizy LEM. Dość ciekawie wyglądają także wyniki analiz LEM dla przypadku 2D. Obliczenia kolejnymi metodami dały następujące wartości FS: Bishop: FS=1.608, Fellenius: FS=1.53, Janbu: FS=1.493, Spencer: FS=1.605. Niemniej jednak różnica ta nie jest zbyt duża i wynosi zaledwie 0.06. Duża zgodność wyników występuje dla przypadku zbocza wklęsłego - różnica w wartościach FS wynosi zaledwie 0.01.

Podsumowując można stwierdzić, że wyniki obliczeń numerycznych wskazują jednoznacznie iż wartość wskaźnika stateczności zboczy wklęsłych i wypukłych jest większa niż w przypadku zboczy analizowanych w płaskim stanie odkształcenia. Dla analizowanych zboczy wklęsłych wartość FS jest istotnie wyższa (o 0.1) od przypadku w PSO dla promienia około 5-

krotnie większego od wysokości zbocza. Dla rozpatrywanych zboczy wypukłych istotny wzrost FS występuje tylko przy małych wartościach promienia oscylujących około 0.6H. Można zatem stwierdzić że w przypadku zboczy wypukłych wzrost ten jest stosunkowo niewielki.



Rys.10b. Powierzchnia poślizgu zidentyfikowane za pomocą SSR dla zbocza wypukłego

4. ANALIZA STATECZNOŚCI ZBOCZY W 2D I 3D Z ZASTOSOWANIEM SSR

Na ogół uważa się, że prowadzenie obliczeń w różnych przekrojach płaskich daje w efekcie wiarygodne wyniki analiz sytuacji (w rzeczywistości) przestrzennych. Należy jednak zauważyć, że w pewnych przypadkach zachodzi konieczność wykonania przestrzennych analiz

ze względu na budowę geologiczną. Analizy stateczności w płaskich przekrojach prowadzą wówczas do nadmiernego uproszczenia problemu.

Już Stark i Eid (1998) w podsumowaniu artykułu dotyczącego przestrzennych analiz stateczności zboczy stwierdzają, że „*A 3D analysis is beneficial in designing slopes with complicated topography, shear strength, and/or pore-water pressure condition*”.

Bromhead (2004) z kolei pisze: „*...there are numerous cases where slope failure cannot even approximately be represented by the 2D case, and the analysis of several sections is either impractical or inappropriate*”. Pokazuje on także kilka przykładów osuwisk nadmorskich klifów w hrabstwie Kent (Wielka Brytania), gdzie wartość wskaźnika FS dla przypadku 3D była mniejsza niż dla przypadku 2D. We wnioskach końcowych stwierdza zaś jednoznacznie: „*Since a number of practical cases are intransigent unless dealt with by 3-D analysis, 3-D analysis appears likely to find a ready place in the landslide engineer's toolbox. This finding also applies to continuum methods, so that existing 2-D continuum codes (e.g. FE and FD based methods) will prove equally inadequate for those particular cases.*”

Dla określenia różnic pomiędzy wynikami obliczeń w 2D i 3D przeprowadzono cykl symulacji numerycznych (Cała et al. 2006). Zajęto się tutaj problemem analizy stateczności 10-cio metrowego nasypu o nachyleniu 45°. Geometrię modelu przyjętego do obliczeń pokazano na rys. 11. Ze względu na symetrię modelu, tylko jego połowa była uwzględniana w obliczeniach. Założono, że jednorodny nasyp posadowiony jest na podłożu w którym lokalnie występuje słaba warstwa gruntu ($c = 6$ kPa i $\varphi = 5^\circ$) o szerokości równej 20 m i zmiennej długości L . Długość słabej warstwy w podłożu zmieniała się od 1 m to 50 m (czyli w pełnym modelu od 2 m do 100 m). Założono, że miąższość warstwy słabego podłoża będzie kolejno przyjmować wartości 1 m, 2 m i 3 m. W tabeli 4 zebrano własności warstw gruntowych.

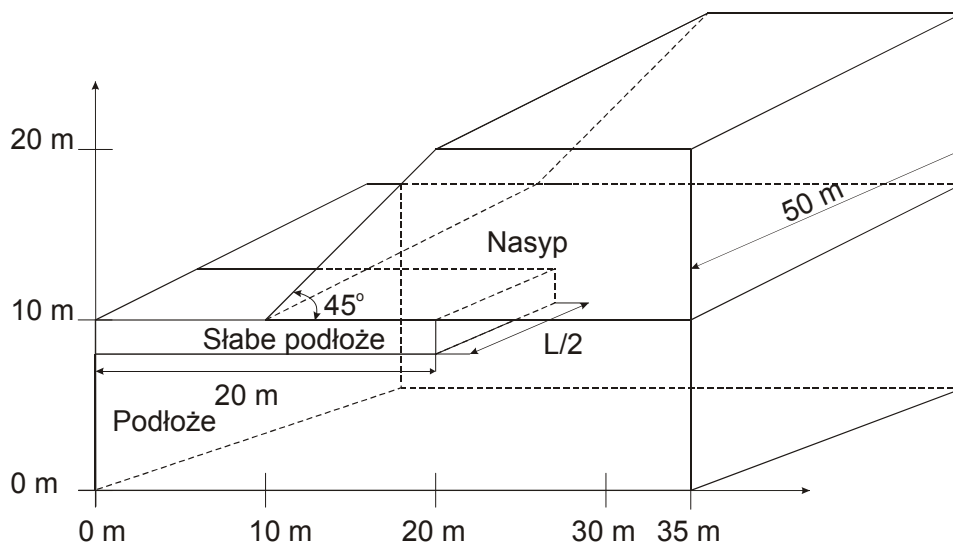
Analizy stateczności dla różnych wariantów przeprowadzono z zastosowaniem programów FLAC i FLAC3D oraz programu SLOPE/W. Wyniki obliczeń dla przypadku 2D zamieszczono w tabeli 5. Na rys. 12 pokazano powierzchnie poślizgu zidentyfikowane w toku płaskich analiz SSR i LEM (metoda Bishopa) dla warstwy słabego podłoża o grubości 1 m. Widać tutaj dobrą zgodność jeżeli chodzi o generalną lokalizację powierzchni poślizgu. Należy jednakże zauważyć jej inny kształt określony na podstawie SSR oraz nieco niższą wartość FS. Wzrost grubości słabej warstwy w podłożu prowadzi do obniżenia się wartości FS, ale intensywność tego procesu maleje.

Tabela 4. Własności warstw gruntowych.

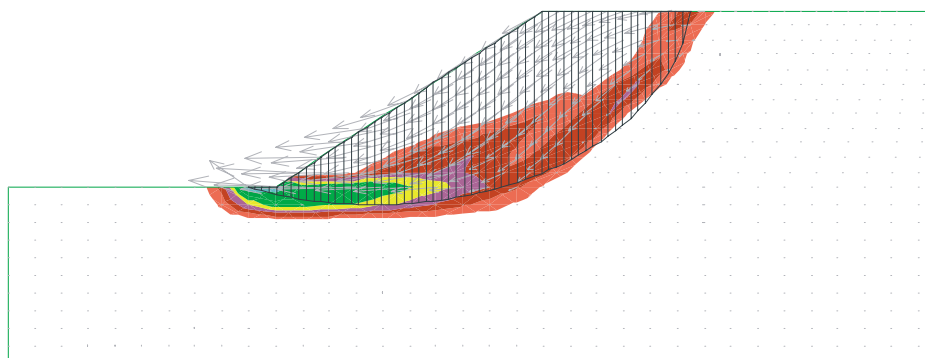
Warstwa	Kohezja, kPa	Kąt tarcia wewnętrznego, deg	Ciężar objętościowy, kN/m ³
Nasyp	20	28	20
Podłoże	50	10	20.5
Słabe podłoże	6	5	20

Tabela 5. Porównanie wyników obliczeń 2D.

Miąższość warstwy słabego podłoża	LEM (metoda Bishopa)	SSR
Brak słabego podłoża ($g = 0$ m)	1.531	1.52
Słabe podłoże o miąższości $g = 1$ m	0.997	0.91
Słabe podłoże o miąższości $g = 2$ m	0.801	0.75
Słabe podłoże o miąższości $g = 3$ m	0.729	0.71



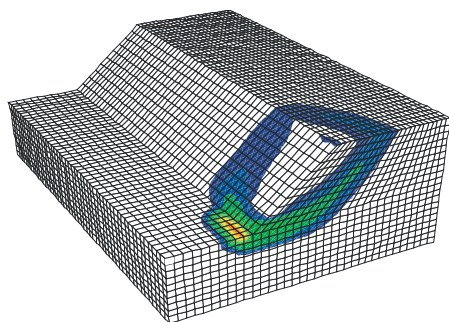
Rys. 11. Geometria modelu przyjęta do obliczeń



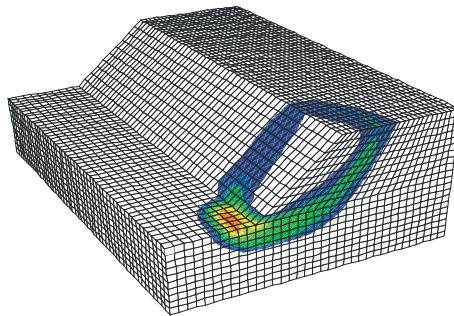
Rys. 12. Powierzchnie poślizgu zidentyfikowane podczas płaskich analiz LEM i SSR.

W następnym etapie przeprowadzono trzy serie przestrzennych obliczeń numerycznych, osobno dla każdej z założonych grubości warstwy słabego podłoża (1 m, 2 m, i 3 m). Na rys. 13 a-h przedstawiono wyniki analiz dla różnych długości oraz miąższości warstwy słabego podłoża. Widać wyraźnie jak zmienia się lokalizacja powierzchni poślizgu w funkcji tych dwóch parametrów.

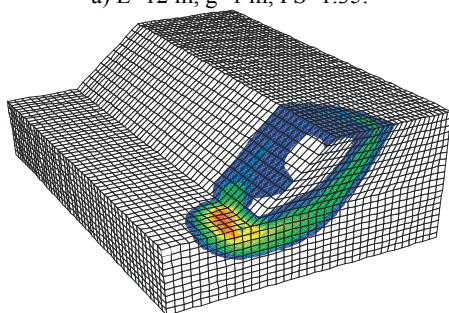
Na rys. 14 pokazano zbiorcze wyniki analiz stateczności dla wszystkich modeli. Dla grubości słabej warstwy równej 1 m wartość FS jest stała i równa $FS = 1.52$ aż do jej długości równej 8 m. Później wartość FS spada osiągając 1.3 dla długości 14 m. Wartość $FS = 1$ otrzymano dla długości słabej warstwy równej 60 m, co pokazuje jak duże mogą być różnice w wynikach obliczeń 2D i 3D. Dalsze zwiększanie długości słabej warstwy w podłożu prowadzi do obniżenia wartości FS, która powoli zmierza do wyniku analiz płaskich - $FS_{2D} = 0.91$.



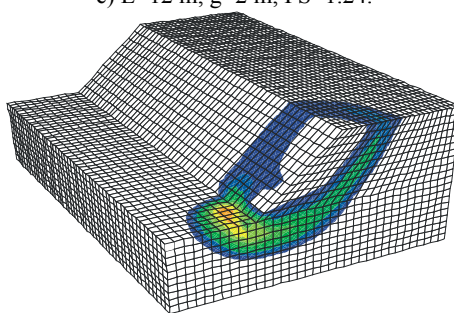
a) $L=12$ m, $g=1$ m, $FS=1.35$.



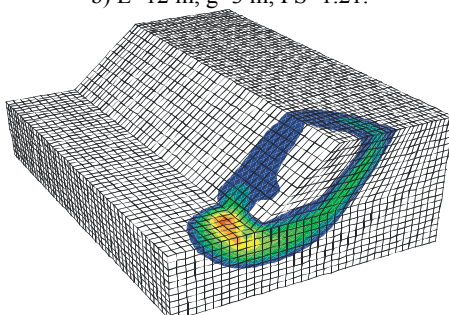
e) $L=12$ m, $g=2$ m, $FS=1.24$.



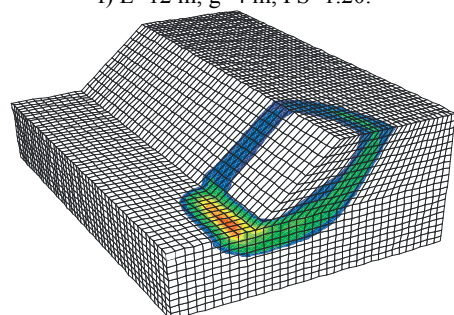
b) $L=12$ m, $g=3$ m, $FS=1.21$.



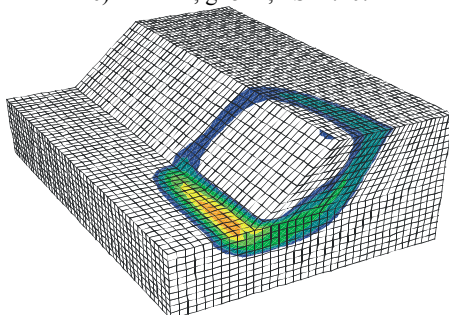
f) $L=12$ m, $g=4$ m, $FS=1.20$.



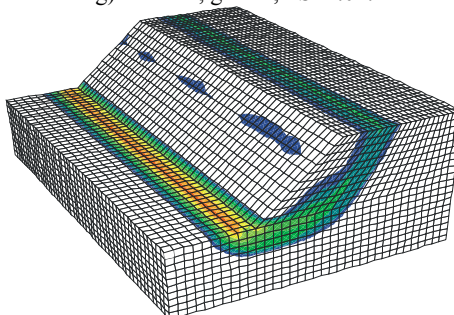
c) $L=12$ m, $g=5$ m, $FS=1.20$.



g) $L=22$ m, $g=2$ m, $FS=1.01$.



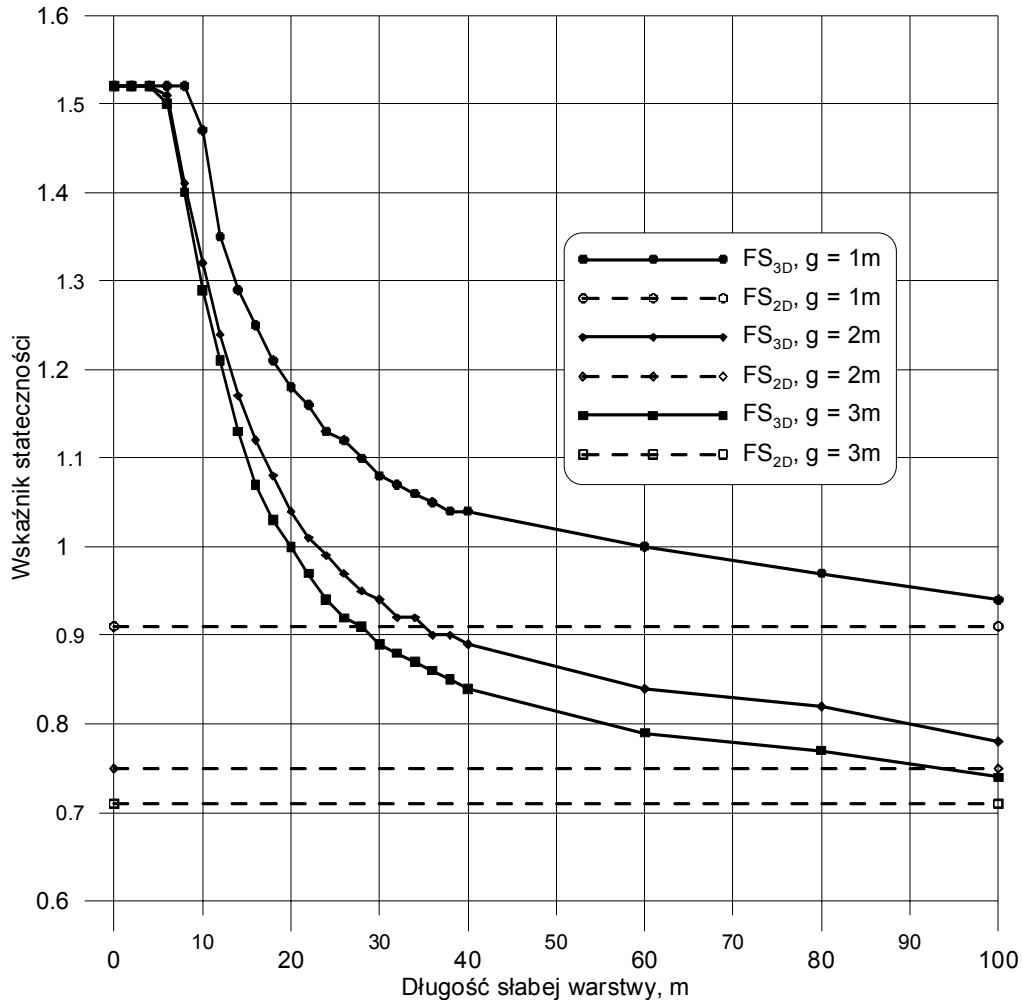
d) $L=36$ m, $g=2$ m, $FS=0.90$.



h) $L=100$ m, $g=2$ m, $FS=0.78$.

Rys. 5.13. Wyniki analiz stateczności dla wybranych przypadków

W przypadku słabej warstwy o grubości 2 m wartość FS_{3D} nie zmienia się (i wynosi 1.52) tylko do jej długości równej 4 m. Wartość $FS=1.3$ osiąga wcześniej niż poprzednio, dla długości warstwy 10 m. Dla długości warstwy $L \leq 22$ m wartości FS są większe od 1. Dalsze zwiększanie długości prowadzi do obniżania wartości FS , która, podobnie jak poprzednio, zmierza do wartości $FS_{2D} = 0.75$.



Rys. 14. Wartości FS dla różnych długości i grubości warstwy słabego podłoża – obliczenia 2D i 3D.

Przyjęcie grubości słabej warstwy w podłożu równej 3 m prowadzi do osiągnięcia wartości $FS=1.3$ dla jej długości równej 10 m, zaś $FS=1$ dla długości 20 m. Dalszy wzrost długości słabej warstwy prowadzi do spadku wartości FS , która powoli zmierza do $FS_{2D} = 0.71$.

Analiza stateczności zboczy w płaskich przekrojach prowadzi w tym przypadku do bardzo zachowawczych wyników. Porównanie wartości FS dla przypadków 2D i 3D uwidacznia duże

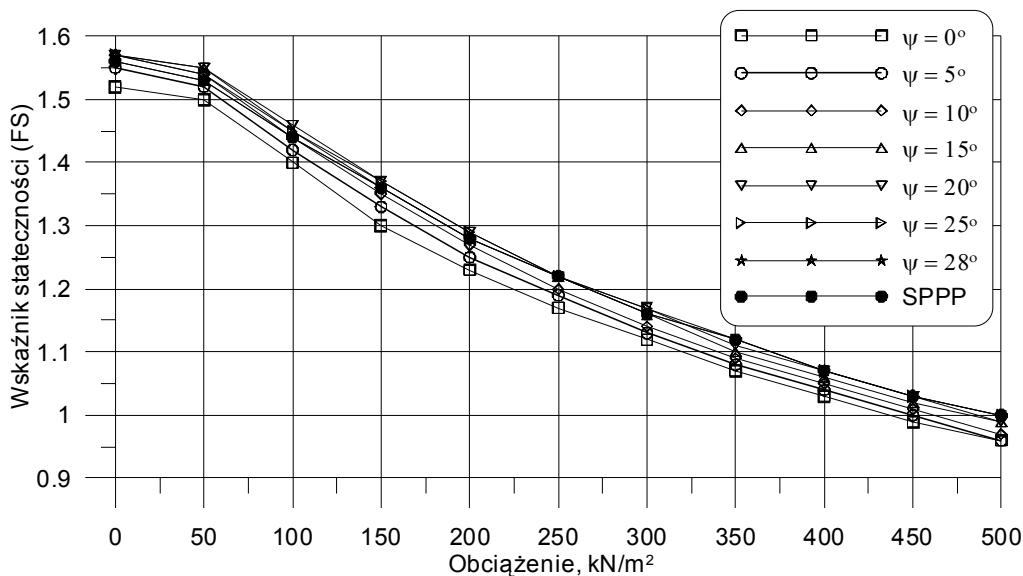
rozbieżności pomiędzy nimi w rozpatrywanej sytuacji. Wartości FS dla obliczeń 2D mogą być bardzo niedoszacowane.

Zastosowanie przestrzennych analiz prowadzi, w przypadku nawet niewielkich komplikacji w budowie geologicznej, do uzyskania bardziej wiarygodnych wyników. Metoda SSR w 3D jest bardzo „wrażliwa” nawet na niewielkie zmiany w geologii analizowanego problemu.

Wśród specjalistów zajmujących się analizami stateczności zboczy panuje szeroko rozpowszechniona opinia, że prowadzenie obliczeń w płaskich przekrojach jest bardziej konserwatywne i daje w efekcie większy zapas bezpieczeństwa. Wydaje się, że powyższe obliczenia pozwalają na sformułowanie pytania: czy rzeczywiście musimy być tak bardzo konserwatywni? Powinno się bowiem poszukiwać rozwiązań i metod projektowania, które spełniają zarówno warunki bezpieczeństwa jak i są opłacalne ekonomicznie.

Dla określenia wpływu wartości kąta dylatacji na wyniki obliczeń, przeprowadzono kilka serii symulacji dla wartości $\psi=0 \div \varphi$. Przyjęcie kąta dylatacji równego wartości kąta tarcia wewnętrznego oznacza założenie stowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia (SPPP). Dla tego samego nasypu (tym razem bez uwzględniania warstwy słabego podłoża) przeprowadzono analizy stateczności przy uwzględnieniu obciążenia naziomu o szerokości 2 m i długości 5 m. Podobnie jak poprzednio, korzystając z symetrii modelu, obliczenia przeprowadzono dla jego połowy. Obciążenie zmieniało się od 0 do 500 kPa, zaś przyłożono je w odległości 4 m od krawędzi naziomu.

Wyniki płaskich symulacji zamieszczono na rys. 15. Widać wyraźnie spadek wartości FS w miarę wzrostu przykładanego obciążenia.

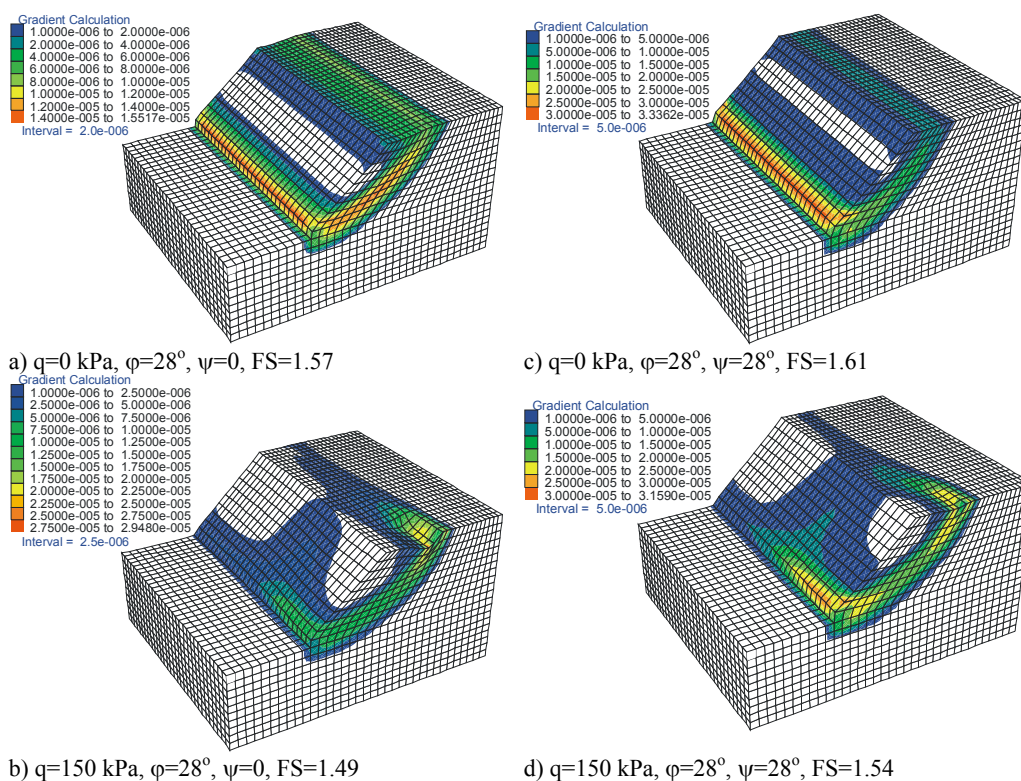


Rys. 15. Wartości FS w zależności od przyjętego obciążenia i kąta dylatacji

Wskaźnik stateczności osiąga wartość FS=1 dla obciążenia około 450 kPa. Różnice w wartościach FS wynikające z przyjęcia kątów dylatacji w zakresie $\psi=0 \div \varphi$ są minimalne i nie przekraczają 0.05.

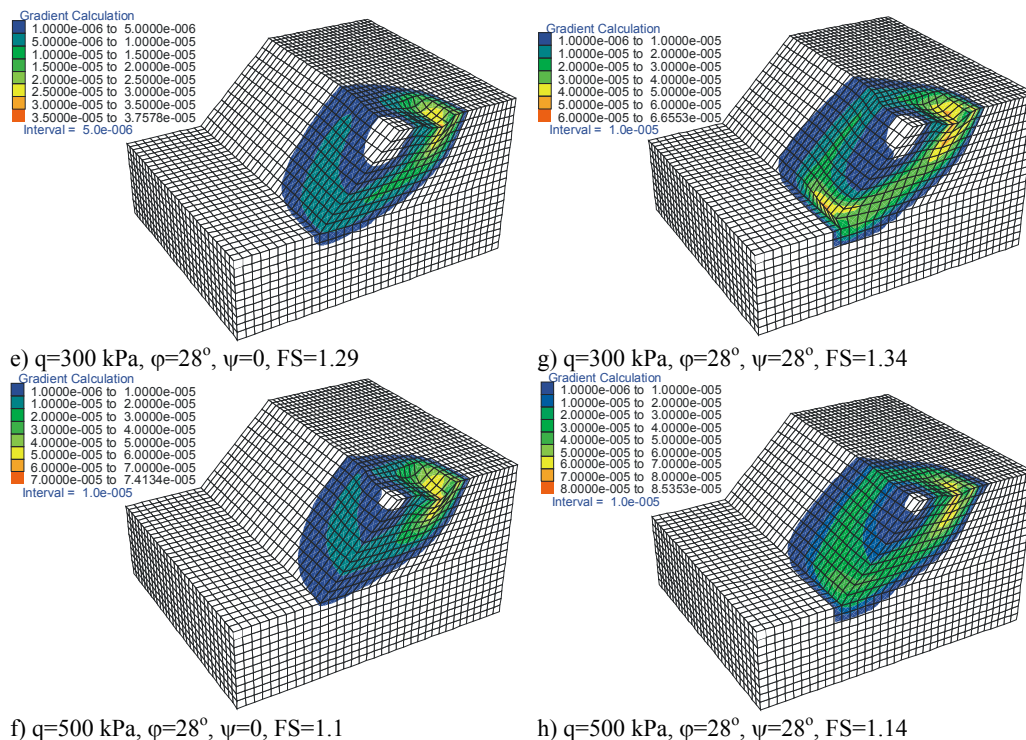
Wybrane wyniki analiz stateczności w 3D zebrano na rys.16. Widać na nim wyraźnie zmiany kształtu i lokalizacji powierzchni poślizgu oraz wartości odkształceń postaciowych w zależności od przyjętych parametrów. Na rys. 17. przedstawiono porównanie wyników obliczeń 2D i 3D. Widać tam, że przyjęcie stowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia prowadzi do uzyskania większych wartości odkształceń postaciowych.

Określone na podstawie analiz 3D wartości FS dla przypadku stowarzyszonego i niestowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia nie różnią się znacznie. Podobnie jak w przypadku obliczeń 2D różnice nie przekraczają tutaj 0.05.



Rys.16a-d. Wyniki analiz stateczności dla różnych przypadków obciążenia

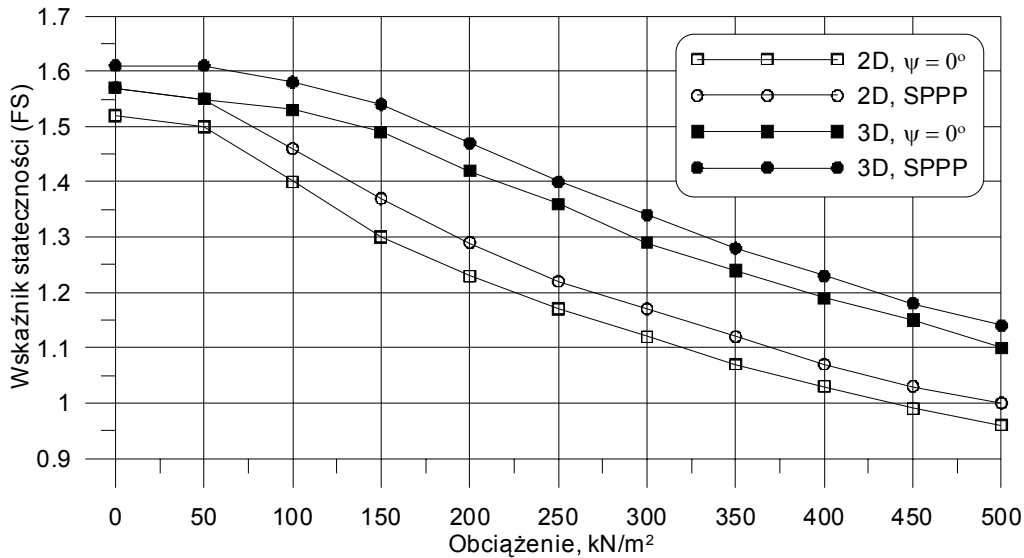
Przedstawione powyżej rozważania potwierdzają fakt, że w wielu przypadkach przeprowadzenie prawidłowej analizy stateczności z boczy na drodze klasycznych obliczeń 2D jest niemożliwe. Konieczna jest budowa przestrzennych modeli numerycznych, które pozwalają na w miarę wierne odtworzenie budowy geologicznej rozpatrywanego zbocza. Następnym krokiem jest przeprowadzenie obliczeń z wykorzystaniem SSR lub zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (Cała i Flisiak, 2003a,b,c; Cała et al. 2004).



Rys.16.e-h Wyniki analiz stateczności dla różnych przypadków obciążenia

Obliczenia te pozwalają na identyfikację możliwych powierzchni poślizgu. Jak widać z przytoczonych przykładów, wyniki z przestrzennych obliczeń numerycznych mogą się znacząco różnić od wyników uzyskanych z LEM lub SSR w 2D. Przyjęcie stowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia (SPPP) zawsze wywołuje większe odkształcenia postaciowe oraz powoduje powstanie powierzchni poślizgu o większym zasięgu niż w przypadku przyjęcia wartości kąta dylatacji równej zero. Podkreślić jednakże należy, że przyjęcie SPPP nie ma istotnego wpływu na wartości wskaźników stateczności.

Zamieszczone powyżej wyniki obliczeń w dziedzinie przestrzennych analiz stateczności zbczoły są bardzo obiecujące i badania w tym kierunku będą z pewnością kontynuowane, wbrew temu co stwierdzają Ledesma et al. (2002): „*The experience of the group is that 3D models should be avoided if possible. Alternatively, they may be used in the high risk cases only, because of the difficulty of the analysis. A 3D model requires one order of magnitude of more work than a corresponding 2D geometry, and the improvement obtained from 2D to 3D is not worthwhile in many cases.*” Nie są to obliczenia łatwe, gdyż zarówno budowa przestrzennej geometrii modeli, ich kalibracja jak i same obliczenia wymagają znacznych nakładów czasu. Można jednakże, z dużą dozą prawdopodobieństwa przypuszczać, że w nieodległej przyszłości modelowanie przestrzenne znajdzie szerokie zastosowanie, szczególnie w warunkach skomplikowanej budowy geologicznej i tektoniki.



Rys. 17. Porównane wyników analiz 2D i 3D

6. PODSUMOWANIE

Na ogół uważa się, że prowadzenie obliczeń w różnych przekrojach płaskich daje w efekcie wiarygodne wyniki analiz sytuacji przestrzennych. Należy jednakże zauważyć, że w pewnych przypadkach zachodzi konieczność wykonania przestrzennych analiz ze względu na geometrię zbocza oraz budowę geologiczną. Analizy stateczności w płaskich przekrojach często prowadzą do zbytniego upraszczania problemu. Widać także, że wartości FS uzyskane za pomocą metod numerycznych są przeważnie znacznie niższe od wartości uzyskanych z metod LEM w 3D.

Przedstawione powyżej rozważania potwierdzają fakt, że w wielu przypadkach przeprowadzenie prawidłowej analizy stateczności zbocza na drodze klasycznych obliczeń 2D jest niemożliwe. Konieczna jest budowa przestrzennych modeli numerycznych, które pozwalają na w miarę wierne odtworzenie budowy geologicznej rozpatrywanego zbocza. Następnym krokiem jest przeprowadzenie obliczeń z wykorzystaniem SSR dla identyfikacji możliwych powierzchni poślizgu. Jak widać z przytoczonych przykładów, wyniki z obliczeń numerycznych mogą się znacząco różnić od wyników uzyskanych z metod równowagi granicznej zaadoptowanych w 3D.

Uzyskiwanie z obliczeń 3D wartości FS większych niż z obliczeń 2D jest tendencją dość częstą (Gens et al. 1988; Al-Homoud i Tahtamoni, 2000). Interesująco na tym tle wyglądają rozważania dotyczące przepływu wody przez tamę przedstawione w pracy Chena et al. (2003). Z przeprowadzonych przez nich obliczeń numerycznych w 2D i 3D wynika, że obliczenia 3D wykazały znacznie wyższy poziom zagrożenia utratą stateczności niż obliczenia 2D. Mamy więc do czynienia z przypadkiem odwrotnym. Potwierdza to jeszcze raz fakt, że każdy przy-

padek powinien być analizowany indywidualnie i obliczenia 2D nie zawsze dają wyniki z „ukrytym” zapasem bezpieczeństwa.

Konfrontacja wyników obliczeń 3D uzyskanych za pomocą metod równowagi granicznej z obliczeniami numerycznymi napotyka jednakże na pewne przeszkody. W pracach Chena i Chameau (1982), Hungra (1987), Hungra et al. (1989), Gensa et al. (1988), Chena et al. (2003), Casamichele et al. (2004) oraz Chenga et al. (2005) można spotkać szereg różnych analiz stateczności zboczy. Niestety, w pracach tych rozpatruje się stateczność zboczy jednorodnych lub o geometrii niezmiennej w kierunku prostopadłym do zbocza, co uniemożliwia ich weryfikację za pomocą przestrzennych obliczeń numerycznych. W takich przypadkach, wyniki przestrzennych obliczeń numerycznych są bardzo zbliżone do wyników uzyskanych z modeli płaskich. Metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie nie wymaga założeń odnośnie kształtu i lokalizacji powierzchni poślizgu. Powstaje ona niejako samoistnie, na skutek redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntów. Stąd też bierze się niemożliwość sprawdzenia poprawności analiz zawartych w przytoczonych wyżej pracach.

Prace Zhanga (1988), Michałowskiego (1989), Lama i Fredlunda (1993), Huanga et al. (1999), Yanga et al. (1999), Huanga i Tsai (2000), Huanga et al. (2002), Chena et al. (2001, 2003), Changa (2002) oraz Farzaneha i Askari (2003) dotyczą także zastosowania przestrzennych metod równowagi granicznej dla analizy stateczności zboczy. Wyniki przeprowadzonych tam analiz różnią się istotnie (niekiedy nawet bardzo istotnie) od wyników przestrzennych analiz numerycznych z zastosowaniem metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. Z reguły obliczenia LEM w 3D dają zawyżone wyniki w porównaniu z SSR. Interpretacja wyników obliczeń porównawczych LEM i SSR w 3D oraz ich krytyczna analiza będzie przedmiotem dalszych prac.

7. LITERATURA

- [1] AL-HOMOUD A.S., TAHTAMONI W.W. *SARTEL: an expert system for probabilistic displacement-based dynamic 3D slope stability analysis and remediation of earthquake triggered landslides*. Environmental Geology. 2000, Vol. 39, 849-874.
- [2] ANTONELLO G., CASAGLI N., FARINA P., LEVE D., NICO G., SIEBER A.J., TARCHI D., *Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements*. Landslides, 2004, Vol. 1, 21-28.
- [3] AYALEV I., YAMAGISHI H., UGAVA N., *Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan*. Landslides, 2004, Vol. 1, 73-81.
- [4] BABU G.L.S., MUKESH M.D., *Landslide analysis in Geographic Information Systems*. www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides. 2002.
- [5] BARBIERI M., CORSINI A., CASAGLI N., FARINA P., COREN F., STERZAI P., LEVA D., TARCHI D. *Space-borne and ground-based SAR interferometry for landslide activity analysis and monitoring in the Apennines of Emilia Romagna (Italy): review of methods and preliminary results*. FRINGE 2003 Workshop SP550. 2004. Proceedings ESA-ESRIN Frascati. European Space Agency.
- [6] BERARDINO P., COSTANTINI M., FRANCESCHETTI G., IODICE A., PIETRANERA L., RIZZO V. *Use of differential SAR interferometry in monitoring and modeling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy)*. Engineering Geology. 2003, Vol. 68, 31-51.

- [7] BOVENGA F., NUTRICATO R., REFICE A., WASOWSKI J. *Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas*. Engineering Geology. 2006, Vol. 88, 218-239.
- [8] BICHLER A., BOBROWSKY P., BEST M., DOUMA M., HUNTER J., CALVERT T., BURNS R. *Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks landslide*. Landslides. 2004, Vol.1, 29-40.
- [9] BORGATTI L., CORSINI A., BARBIERI M., SARTINI G., TRUFFELLI G., CAPUTO G., PUGLISI C. *Large reactivated landslides in weak rock masses: a case study from the Northern Apennines (Italy)*. Landslides. 2006. Vol. 3, 115-124.
- [10] BROMHEAD E.N. *Landslide slip surfaces: their origins, behavior and geometry*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (red. Lacerda, Erlich, Fontura i Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 3-21.
- [11] BRZĄKAŁA W. *O stateczności obwałowań zakrzywionych*. Inżynieria Morska i Geotechnika. 2003. Vol. 23.
- [12] CAI F., UGAI K. *Reinforcing mechanism of anchors in slopes: a numerical comparison of results of LEM and FEM*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2003. Vol. 27, 549-564.
- [13] CAI F., UGAI K. *Finite element analysis of slope stabilizing measures*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 1569-1577.
- [14] CAŁA M., FLISIAK J. *Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych*. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Wydawnictwo KGBiG. Kraków. 2000, 27-37.
- [15] CAŁA M., FLISIAK J. *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. 2001. 111-114.
- [16] CAŁA M., FLISIAK J.: *Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp*. XXV ZSMG. Wydawnictwo KGBiG. Kraków, 2002, 83-92.
- [17] CAŁA M., FLISIAK J. *Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction*. In Brummer, Andrieux, Detournay & Hart (eds.) *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*: A.A. Balkema Publishers. 2003a. 99-102.
- [18] CAŁA M., FLISIAK J. *Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods*. In Burczynski, Fedelinski & Majchrzak (eds.) *Computer Methods in Mechanics*; 2003b, CMM-2003.
- [19] CAŁA M., FLISIAK J.: *Analiza stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie*. Geotechnika w budownictwie i górnictwie, pod redakcją Brząkały W., Butry J. i Gałczyńskiego S. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 2003c, 348-354.
- [20] CAŁA M., FLISIAK J., TAJDUŚ A. *Slope stability analysis with modified shear strength reduction technique*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004a, 1085-1089.
- [21] CAŁA M., FLISIAK J., TAJDUŚ A. *Numeryczne metody analizy stateczności skarp i zboczy*. Warsztaty Górnicze z cyklu Zagrożenia Naturalne w Górnictwie. Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2004b, 37-50.
- [22] CAŁA M., FLISIAK J., TAJDUŚ A. *Slope stability analysis with FLAC in 2D and 3D*. 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics. Hart & Varona (eds). 2006, Paper 01-02.
- [23] CATANI F., CASAGLI N., ERMINI L., RIGHINI G., MENDUNI G. *Landslide hazard and risk mapping at catchments scale in the Arni River basin*. Landslides. 2005, Vol.3, 329-342.

- [24] CASAGLI N., FARINA P., LEWA D., TARCHI D. *Landslide monitoring on the Stromboli volcano through SAR interferometry*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 803-808.
- [25] CASAMICHELE P., MAGUERI M., MOTTA E. *A new approach for a three-dimensional analysis of slope stability*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 1617-1622.
- [26] CHANG M. *A 3D slope stability analysis method assuming parallel lines of intersection and differential straining of block contacts*. Canadian Geotechnical Journal. 2002, Vol. 39, 799-811.
- [27] CHELLI A., MANDRONE G., TRUFFELLI G. *Field investigations and monitoring as tools for modelling the Rossena castle landslide (Northern Apennines, Italy)*. Landslides. 2006, Vol. 3, 252-259.
- [28] CHEN R.H., CHAMEAU J-L. *Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes*. Geotechnique. 1982. Vol. 1 (32), 31-40.
- [29] CHEN C.Y., MARTIN G.R. *Effect of embankment slope on lateral response of piles. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*. Edited by Billaux D., Rachez X., Detournay Ch. & Hart R.). Swets & Zeitlinger. A.A. Balkema Publishers. 2001. 205-213.
- [30] CHEN J., YIN J.-H., LEE C.F. *Upper bound limit analysis of slope stability using rigid finite elements and non-linear programming*. Canadian Geotechnical Journal. 2003, Vol. 40, 742-752.
- [31] CHENG Y.M., LIU H.T., WEI W.B., AU S.K. *Location of critical three-dimensional non-spherical failure surface by NURBS functions and ellipsoid with applications to highway slopes*. Computers and Geotechnics. 2005, Vol. 32, 387-399.
- [32] CHUGH A.K. *On the boundary conditions in slope stability analysis*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2003, Vol. 27, 905-926.
- [33] CLERICI A., PEREGO S., TELLINI C., VESCOVI P. *A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian northern Apennines)*. Environmental Geology. 2006, Vol. 50, 941-961.
- [34] COE J.A., ELLIS W.L., GODT J.W., SAVAGE W.Z., SAVAGE J.E., MICHAEL J.A., KIBLER J.D., POWERS P.S., LIDKE D.J., DEBRAY S. *Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998 – March 2002*. Engineering Geology. 2003, Vol. 68, 67-101.
- [35] COLESANTI C., FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique*. Engineering Geology. 2003, Vol.68, 3-14.
- [36] COLESANTI C., WASOWSKI J. *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry*. Engineering Geology. 2006, Vol. 88, 173-199.
- [37] COLESANTI C., WASOWSKI J. *Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 795-802.
- [38] COMMEND S., GEISER F., TACHER L. *3D numerical modeling of a landslide in Switzerland*. Numerical Models in Geomechanics – NUMOG IX. Pande & Pietruszczak (eds.). Taylor & Francis Group. London. 2004, 595-601.
- [39] COTECCHIA V. *The second Hans Cloos Lecture. Experience drawn from the great Ancona landslide of 1982*. Bull. Eng. Geol. En. 2006, Vol. 65, 1-41.
- [40] CROSETTO M., CRIPPA B., BIESCAS E. *Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry*. Engineering Geology. 2005, Vol. 79, 81-91.
- [41] DONATI L., TURRINI M.C. *An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy)*. Engineering Geology. 2002, Vol. 63, str. 277-289. z, London. 789-794.
- [52] GENS A., HUTCHINSON J.N., CAVOINIDIS S. *Three-dimensional analysis of slides in cohesive soils*. Geotechnique. 1988, Vol. 38 (1), 1-23.

- [53] HOEK E., BRAY J.W. *Rock slope engineering*. 3rd edition. London. 1981. The Institute of Mining & Metallurgy.
- [54] HOEK E., RIPPERE K.H., STACEY P.F. *Large scale slope designs – A review of the state of the art*. Slope stability in surface mining (edited by Hustrulid, McCarter & Van Zyl). Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Littleton. 2000, 115-124.
- [55] HUANG C.C., TSAI C.C., TATEYAMA M. *3-D stability analyses for asymmetrical and heterogeneous nailed slopes*. Slope Stability Engineering, edited by Yagi, Yamagami & Jiang. A.A. Balkema. Rotterdam. 1999. 1049-1053.
- [56] HUANG C.C., TSAI C.C. *New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000. Vol. 26, No.10, 917-927.
- [57] HUANG C.C., TSAI C.C., CHEN Y.H. *Generalized method for three-dimensional slope stability analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002, Vol. 128, No.10, 836-848.
- [58] HUNGR O. *An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions*. Geotechnique. 1987. Vol. 37 (3), 113-117.
- [59] HUNGR O., SALGADO F.M., BYRNE P.M. *Evaluation of a three dimensional method of slope stability analysis*. Canadian Geotechnical Journal. 1989. Vol. 26, 679-686.
- [60] JIANG J.C., BAKER R., YAMAGAMI T. *The effect of strength envelope nonlinearity on slope stability computations*. Canadian Geotechnical Journal. 2003. Vol. 40, 308-325.
- [61] JIBSON R.W., HARP E.L., MICHAEL J.A. *A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard map*. Engineering Geology. 2000. Vol. 58, 271-289.
- [62] KANUNGO D.P., ARORA M.K., SARKAR S., GUPTA R.P. *A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation In Darjeeling Himalayas*. Engineering Geology. 2006, Vol. 85, 347-366.
- [63] KIM J., SALADO R., LEE J. *Stability analysis of complex soil slopes using limit analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002. Vol. 128 (7), 546-557.
- [64] KRAWCZYK A., PERSKI Z. *Application of satellite radar interferometry on the areas of underground exploitation of copper ore in LGOM – Poland*. Proc. Of 11th Congress of the International Society for Mine Surveying. 2000. Vol. 2, 209-018.
- [65] LAM L., FREDLUND D.G. *A general limit-equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis*. Canadian Geotechnical Journal. 1993, Vol. 30, 905-919.
- [66] LAPENNA V., LORENZO P., PERRONE A., PISCITELLI S., SDAO F., RIZZO E. *High resolution geoelectrical tomographies in the study of Giarrossa landslide (southern Italy)*. Bull. Eng. Geol. Env. 2003, Vol. 62, 259-268.
- [67] LEE S., RYU J-H., LEE M-J., WON J-S. *Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea*. Environmental Geology. 2003, Vol. 44, 820-833.
- [68] LEE S., RYU J-H., WON J-S., PARK H-J. *Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network*. Engineering Geology. 2004, Vol. 71, 289-302.
- [69] LESHCHINSKY D., HUANG CH-CH. *Generalized slope stability analysis: interpretation, modification and comparison*. Journal of Geotechnical Engineering. 1992, Vol. 118, 1559-1576.
- [70] LEDESMA A., HURLIMANN M., PRAT P., SCAVIA C., AMATRUDA G., POISEL R., ROTH W., PREH A. *D8-Guidelines of the use of numerical methods for the prediction of failure. Impact of large landslides in the mountain environment: identification and mitigation of risk*. 2002.
- [71] LORIG L. *Lessons learned from slope stability studies*. FLAC and numerical modeling in geomechanics (Detournay & Hart). A.A. Balkema. Rotterdam. 1999, 17-21.
- [72] LORIG L., VARONA P. *Practical slope stability analysis using finite-difference codes*. Slope stability in surface mining (edited by Hustrulid, McCarter & Van Zyl). Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Littleton, 2000, 115-124.

- [73] MERIC O., GRAMBOIS S., JONGMANS D., WATHELET M., CHATELAIN J.L., VENGON J.M. *Application of geophysical methods for the investigation of large gravitational mass movement of Sechilienne, France*. Canadian Geotechnical Journal. 2005. Vol. 42, 1105-1115.
- [74] MESSINA C., ZUCHA F., FOSSATI D., CERIANI M., ALLEVI J. *Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: the example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy)*. Engineering Geology. 2006. Vol. 88, 240-259.
- [75] MICHALOWSKI R.L. *Three-dimensional analysis of locally loaded slopes*. Geotechnique. 1989, Vol. 39, 27-38.
- [76] MORA P. BALDI P., CASULA G., FABRIS M., GHIROTTI M., MAZZINI E., PESCI A. *Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements : application to the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Appenines, Italy)*. Engineering Geology. 2003, Vol. 68, 103-121.
- [77] NAVIN M.P., KIM M., FILZ G.M. *Stability of embankments founded on deep-mixing-method columns: three-dimensional considerations*. Proc. of 16 ISMGE Congress. Osaka. Japan. 2005, 1227-1230.
- [78] NEAUPANE K.M., PIANTANAKULCHI M. *Analytic network process model for landslide hazard zonation*. Engineering Geology. 2006. Vol. 85, 281-294.
- [79] OTTO J.C., SAAS O. *Comparing geophysical methods for talus slope investigations in the Turtmann valley (Swiss Alps)*. Geomorphology. 2006. Vol. 76, 257-272.
- [80] PASCULLI A., CALISTA M., MANGIFIESTA M. *The effects of spatial variability of mechanical parameters on a 3D landslide study*. 4th International FLAC Symposium on Numerical Methods in Geomechanics – Hart & Varona (eds.). 2006, 27-34.
- [81] PITEAU D.R., JENNINGS J.E. *The effects of plan geometry on the stability of natural slopes in rock in the Kimberley area of South Africa*. Proc. Of the Second Congress of the International Society of Rock Mechanics. Belgrade. 1970, Vol. 3, paper 7-4.
- [82] PERRONE A., ZENI G., PISCITELLI S., PEPE A., LOPERTE A., LAPENNA V., LANARI R. *Joint analysis of SAR interferometry and electrical resistivity tomography surveys for investigating ground deformation: the case-study of Satrino di Lucania (Potenza, Italy)*. Engineering Geology. 2006, Vol. 88, 260-273.
- [83] POISEL R., ROTH W., PREH A., ANGERER H. *The Eiblschrofen rock falls – interpretation of monitoring results based on FLAC3D investigations*. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. Edited by Billaux D., Rachez X., Detournay Ch. & Hart R.). Swets & Zeitlinger. A.A. Balkema Publisher. 2001, 157-161.
- [84] POISEL R., ROTH W., PREH A., TENTSCHERT E., ANGERER H. *The Eiblschrofern rock falls – interpretation of monitoring results*. Landslides (ed. by Rybar, Stemberk & Wagner). Swets & Zeitlinger, Lisse. 2002, 449-454.
- [85] PEYBERNES C. *Analysis of hydraulic fracture risk in a zoned dam with FLAC3D*. In Brummer, Andrieux, Detournay & Hart (eds.) FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics: A.A. Balkema Publisher. 2003, 103-108.
- [86] ROCH K-H., CHWATAL W., BRUCKL E. *Potentials of monitoring rock fall hazard by GPR: considering as example the results of Salzburg*. Landslides. 2006. Vol.3, 87-94.
- [87] SABOTA F., ALVES M., PINTO W.D. *Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic*. Engineering Geology. 2006, Vol. 86, 211-214.
- [88] SAHA A.K., GUPTA R.P., SARKAR I., ARORA M.K., CSAPLOVICS E. *An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation - with a case study in the Himalayas*. Landslides 2, 2005, 61-69.
- [89] SAKELLARIOU M.G., FERENTINOU M.D. *A study of slope stability prediction using neural networks*. Geotechnical and Geological Engineering. 2005, Vol. 23, 419-445.

- [90] SINGHROY V. *Remote sensing of landslides*. Landslide hazard and risk. Edited by Glade T., Anderson M. & Crozier M. J. Wiley & Sons Ltd. 2004, 469-492.
- [91] SQUARZONI C., DELACOURT C., ALLEMAND P. *Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry*. Engineering Geology. 2003, Vol. 68, 53-66.
- [92] SQUARZONI C., DELACOURT C., ALLEMAND P. *Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps)*. Engineering Geology. 2005, Vol. 79, 215-229.
- [93] STARK T.D., EID H.T. *Performance of three-dimensional slope stability methods in practice*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1998, Vol. 124 (11), 1049-1060.
- [94] SUAREZ A.V. GONZALEZ L.I.A. *3D slope stability analysis At Boinas East gold mine*. In Brummer, Andrieux, Detournay & Hart (eds.) FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics: A.A. Balkema Publishers. 2003, 117-123.
- [95] TAPIA A., GOMEZ P. *Three-dimensional calibration and stability analyses for the west wall at Radomiro Tomic (RT) Mine*. 4th International FLAC Symposium on Numerical Methods in Geomechanics – Hart & Varona (eds.). 2006, 21-26.
- [96] TARCHI D., CASAGLI N., FANTI R., LEVE D.D., Luzi G., Pasuto A., Pieraccini M., Silvano S. *Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy*. Engineering Geology. 2003, Vol. 68, 15-30.
- [97] TULLEN P., TURBERG P., PARRIAUX A. *Radiomagnetotelluric mapping, groundwater numerical modelling and 18-Oxygen isotopic data as combined tools to determine the hydrogeological system of a landslide prone area*. Engineering Geology. 2006, Vol. 87, 195-204.
- [98] VALDIVIA C., LORIG L. *Slope stability at Escondida Mine*. Slope stability in surface mining (edited by Hustrulid, McCarter & Van Zyl). Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Littleton, 2000. 153-162.
- [99] WANG C., ESAKI T., XIE M., QIU C. *Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata-Hougawachi area, Japan*. Environmental Geology. 2006. Vol. 51, 91-102.
- [100] WASOWSKI J., LOLLINO P., LIMONI P.P., DEL GAUDIO V., LOLLINO G., GOSTELOW P. *Towards an integrated field and EO based approach for monitoring peri-urban slope instability*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 809-816.
- [101] WESTEN VAN. *Geo-Information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004, 39-56.
- [102] WU J.H., LIN H.M., LEE D.H., FANG S.C. *Integrity assessment of rock mass behind the shotcreted slope using thermography*. Engineering Geology. 2005, Vol. 80, 164-173.
- [103] XIE M., ESAKI T., ZHOU G., MITANI Y. *Three-dimensional stability evaluation of landslides and a sliding process simulation using a new geographic information systems component*. Environmental Geology. 2003a, Vol. 43, 503-512.
- [104] XIE M., ESAKI T., ZHOU G., MITANI Y. *Geographic Information Systems- based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003b, Vol. 129 (12), 1109-1118.
- [105] XIE M., ESAKI T., CAI M. *A GIS-based method for locating the critical slip surface in a slope*. Computers and Geotechnics. 2004a, Vol. 32, 267-277.
- [106] XIE M., ESAKI T., MITANI Y., CAI M. *A 3-D-deterministic approach for mapping landslide hazards using GIS*. Landslides: Evaluation and Stabilisation (edited by Lacerda, Erlich, Fontura & Sayao) Taylor & Francis Group, London. 2004b, 97-102.
- [107] XIE M., ESAKI T., QIU CH., WANG CH. *Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis*. Computers and Geotechnics. 2006a, Vol. 33, 260-274.

- [108] XIE M., ESAKI T., CAI M. *GIS-based Implementation of three-dimensional limit equilibrium approach of slope stability*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2006b, Vol. 129 (12), 656-660.
- [109] XING Z. *Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view*. Journal of Geotechnical Engineering. 1988, Vol. 114, 658-671.
- [110] YANG X.Q., HE S.X., LIU Z.D. *Three-dimensional stability analysis of locally loaded slopes*. Slope Stability Engineering, edited by Yagi, Yamagami & Jiang. A.A. Balkema. Rotterdam, 1999, 277-280.
- [111] YESILNACAR E., TOPAL T. *Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey)*. Engineering Geology. 2005, Vol. 79, 251-266.
- [112] YU Y., XIE L., ZHANG B. *Stability of earth-rockfill dams: Influence of geometry on the three-dimensional effect*. Computers and Geotechnics. 2005, Vol. 32, 326-339.
- [113] 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. 1999. 11-16.
- [114] ZHANG X. *Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view*. Journal of Geotechnical Engineering. 1988, Vol. 114, 658-671.

3D slope stability analysis with shear strength reduction method

This paper deals with three-dimensional (3D) slope stability analysis. Factor of safety for slopes is often estimated by means of Limit Equilibrium Methods (LEM) developed during the last 80 years. In fact, all geotechnicians are familiar with LEM. In spite of the fact, that most landslides display not cylindrical but spatial slip surfaces, 2D slope stability analysis are widely used. Application of 2D modeling sometimes forces the user to considerable simplification of the problem. Using several cross-sections may sometimes provide a reasonable assessment of the 3D effect. However, in some cases 3D calculations are necessary in order to take the complexity of geology under consideration. 3D limit equilibrium methods use columns instead of slices. Application of LEM to solve 3D problems is rather limited due to several simplifying assumptions. Due to the rapid development of computing efficiency, several numerical methods are gaining increasing popularity in slope stability engineering. A very popular numerical method of slope stability estimation in 2D is shear strength reduction technique (SSR). In that procedure, the factor of safety (FS) of a soil slope is defined as the number by which the original shear strength parameters must be divided in order to bring the slope to the point of failure. Shear strength reduction technique may be easily adopted for 3D slope stability analysis. Application of 2D models, for certain cases, may lead to a very conservative approach. This paper presents the considerable differences between the factors of safety of an embankment estimated from 2D and 3D numerical calculations. The presence of a soft subsoil layer of limited dimensions was modeled to investigate its effect on FS values. FS obtained from 2D calculations were much lower than from 3D – the difference even ranged 0.78 for analyzed cases. It seems that, for certain cases, FS obtained from 2D calculations may be seriously underestimated. Application of SSR in 3D may produce a reasonable value of FS for most cases. This refers not only to convex or concave slopes but also to complex geology cases (thinning out of layers, faults, folds etc.). With the increasing speed of computers, application of Shear Strength Reduction technique (SSR) in 3D seems to be a reasonable alternative to 2D. The examples presented in this paper clearly showed that 3D analysis were required to determine realistic value of FS. The effect of 3D is often considered as an additional safety reserve. But on the other hand, one must find a reasonable equilibrium between safety and economy. It seems that there is a widespread opinion that considering

problem in 2D is always conservative and that engineering design doesn't need the third dimension. Do we really have to be that conservative?