# Modyfikacja kształtu powierzchni poślizgu a stateczność zbocza w ujęciu przestrzennym

# Dr inż. Krzysztof Gajewski, mgr inż. Łukasz Pakulski Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

Jednym z ważniejszych zagadnień inżynierskich w geotechnice jest problem ilościowej oceny stateczności ogólnej obiektu geotechnicznego. Termin "obiekt geotechniczny" obejmuje tu zarówno zbocza naturalne, jak i sztuczne, a zatem wszelkiego rodzaju budowle, takie jak: konstrukcje oporowe, zapory ziemne, nasypy, itp. W większości przypadków praktycznych ocena stateczności ogólnej (na poślizg) takich obiektów opiera się na analizie dwuwymiarowej, która nie odzwierciedla przestrzennej pracy masywu osuwiska (rys. 1). Założenie, że potencjalna powierzchnia poślizgu jest powierzchnią nieskończenie długą na kierunku prostopadłym do kierunku ruchu osuwiska, najczęściej obrotową, znacznie ułatwia obliczenia, dając w większości przypadków konserwatywne wyniki. Rezultatem stosowania takiego podejścia bywa często przewymiarowanie konstrukcji geotechnicznej. Celem niniejszej pracy było ustalenie wpływu zmienności kształtu brył obrotowych opisujących potencjalny, przestrzenny masyw osuwiska na wyniki obliczeń zapasu bezpieczeństwa przykładów modelowych zboczy.

## ZAŁOŻENIA DO METODY OBLICZEŃ ORAZ PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

Zastosowaną metodę, wywodzącą się z powszechnie stosowanego w praktyce inżynierskiej uproszczonego rozwiązania Bishopa, [1], dla płaskiego stanu naprężenia i odkształcenia, w którym wprowadzono możliwość uwzględniania zmiennego nachylenia powierzchni poślizgu (kąt  $\beta$ ) na kierunku prostopadłym do potencjalnego ruchu osuwiska, opublikowano przed



Rys. 1. Kształt masywu osuwiska w analizie dwu- i trójwymiarowej

dwudziestu kilku laty [3, 4, 5]. W pierwotnej wersji programu komputerowego uwzględniono możliwość definiowania kształtu powierzchni dołączonych, zamykających masyw osuwiska, jedynie w formie stożka (funkcja liniowa) lub półelipsoidy (krzywa eliptyczna), o zmiennej wysokości (rys. 2).

Obecnie, w ramach pracy [8], rozszerzono te możliwości o rodzinę krzywych opisujących dołączoną powierzchnię obrotową funkcjami zmienności promienia wodzącego  $R = R_i$  (rys. 3).

Krzywa opisana funkcją hiperboliczną:

$$R = R_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot z'/L_X}{1 + 2 \cdot z'/L_X} \right) \tag{1}$$

Krzywa opisana funkcją eliptyczną (półelispoida):

$$R = R_{\max} \cdot \left[ (1 - z'/L_X)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(2)

Krzywa opisana funkcją liniową (stożek):

$$R = R_{\max} \cdot (1 - z'/L_X) \tag{3}$$

Krzywa opisana funkcją potęgową:

$$R = R_{\max} \cdot (1 - z'/L_X)^a \tag{4}$$

gdzie:

 $R_{\rm max}-$  maksymalny promień części dołączonej, równy promieniowi części walcowej $R_{_{C^2}}$ 

 $L_{\chi}$  – stała oznaczająca wartość z, przy której promień wiodący powierzchni obrotowej – *R* jest równy 0,  $z' = z - L_c/2$ 

Specyficzne kształty części dołączonych, tworzących wraz z częścią walcową masyw osuwiska w postaci krzywej jako funkcji hiperbolicznej oraz krzywej potęgowej a = 0,3, mogą pojawiać się w praktyce w przypadku ułożenia mocniejszych warstw gruntu w zboczu, w podobnym do tych krzywych kształcie, jak również w przypadku występowania konstrukcji podziemnych w masywie zbocza. Pozostałe krzywe można uznać za zbliżone kształtem do "naturalnego" przebiegu przestrzennych powierzchni poślizgu, zwłaszcza w gruntach spoistych oraz zboczach uwarstwionych.

Współczynnik stateczności F2D walcowej części osuwiska wyznaczono klasyczną, uproszczoną metodą Bishopa [1, 7], natomiast współczynnik stateczności  $F_j$  pojedynczego *j*-tego plastra gruntu wydzielonego z części dołączonej (zamykającej) masyw osuwiska i podzielonego na *i* pasków wyznacza się z wzoru iteracyjnego (5) będącego rozszerzeniem uproszczonej metody Bishopa. Wzór ten uwzględnia zmienne nachylenie powierzchni poślizgu zarówno w plastrze, jak i w pasku, co tworzy de facto podział plastra (a także całego masywu osuwiska) na pionowe kolumny gruntowe. Nachylenie podstawy takiej kolumny jest ściśle zależne od założonego kształtu bryły obrotowej opisanej jedną z funkcji przedstawionych na rys. 3 i we wzorach (1) ÷ (4).



Rys. 2. Kształty powierzchni dołączonych masywu osuwiska w pierwotnej wersji programu



Rys. 3. Kształt krzywych obrotowych przyjętych do analizy

$$F_{j} = F_{1} = F_{0} \cdot \left\{ 1 - \frac{\sum W \cdot \sin \alpha - \sum \frac{c' \cdot a \cdot b \cdot \sin \gamma + (W - u \cdot a \cdot b \cdot \sin \gamma) \tan \phi'}{F_{0} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + \tan \alpha \cdot \tan \phi'}}{\sum W \cdot \sin \alpha - \sum \frac{[c' \cdot a \cdot b \cdot \sin \gamma + (W - u \cdot a \cdot b \cdot \sin \gamma) \tan \phi'] \sin \alpha \cdot \tan \phi'}{(F_{0} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + \tan \alpha \cdot \tan \phi')^{2}} \right\}$$
(5)

gdzie:

- W- ciężar ij-tej kolumny,
- szerokość j-tego plastra (na kierunku prostopadłym do kierunku zsuwu), а
- szerokość i-tego paska (na kierunku zsuwu), b
- wartość ciśnienia wody w porach, w podstawie ij-tej kolumny, и
- c', \u03c6' parametry wytrzymałościowe gruntu w podstawie ij-tej kolumny,
- kąt odchylenia od poziomu podstawy ij-tej kolumny na kierunku zsuwu, α
- kąt odchylenia od poziomu podstawy ij-tej kolumny na kierunku prostoβ padłym do kierunku zsuwu,
- kąt wierzchołkowy równoległoboku tworzącego płaszczyznę podstawy ij-tej kolumny,
- wartość wyjściowa współczynnika stateczności w kolejnym kroku iteracvinym.

Współczynnik stateczności F3D wyznacza się, jako średnią ważoną współczynników stateczności F, obliczonych według wzoru (5) dla poszczególnych plastrów, ze wzoru:

gdzie:

 $F_c$  – współczynnik stateczności określony dla części walcowej,  $F_c$  = F2D,  $M_c$  – masa plastra gruntu o szerokości jednostkowej w części walcowej,

 $F_{3D} = \frac{F_C \cdot L_C \cdot M_C + \sum F_j \cdot M_j}{L_C \cdot M_C + \sum M_j}$ 

(6)

- $L_c$  szerokość połowy części walcowej masywu osuwiska,
- $F_{i}$  współczynnik stateczności w *j*-tym plastrze części dołączonej,
- $\dot{M_i}$  masa *j*-tego plastra gruntu, o szerokości *a*, w części dołączonej.

Jak wykazano w pracy [5], taki sposób wyznaczania współczynnika F3D jest w zasadzie tożsamy z sumowaniem w poszczególnych kolumnach gruntowych wszystkich sił utrzymujących oraz naruszających równowagę masywu osuwiska, których iloraz pozwala wyznaczyć również wartość współczynnika F3D. Jest to natomiast podejście znacznie prostsze obliczeniowo.



Rys. 4. Przekrój pionowy masywu osuwiska w części walcowej, parametry gruntowe (a) oraz widok przestrzenny masywu powierzchni dołączonej, wyznaczonej funkcją hiperboliczną (b)

W dalszej części pracy przedstawiono cztery przykłady obliczeniowe ilustrujące omawiane zagadnienie.

# PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

## Przykład nr 1

Przyjęto pionowy uskok o wysokości 5 m zbudowany z gruntu idealnie spoistego (rys. 4a). Szerokości części walcowej  $L_c$ oraz części dołączonej  $L_x$  wynoszą po 5 m. Część dołączoną podzielono na 20 plastrów. Przyjęcie powierzchni poślizgu w sposób przedstawiony na rys. 4a (niezgodny z przebiegiem tzw. krytycznej powierzchni poślizgu) służyło lepszej ilustracji wpływu kształtu powierzchni dołączonej na wynik obliczeń w ujęciu 3D (tabl. 1).

#### Tabl. 1. Przykład obliczeniowy nr 1. Zbiorcze wyniki analizy stateczności

Kształt powierzchni dołączonej	F2D	F3D	F3D / F2D
Funkcja hiperboliczna	1,273	1,501	1,179
Funkcja eliptyczna		1,403	1,102
Funkcja liniowa		1,464	1,150
Krzywa potęgowa $a = 0,3$		1,552	1,219
Krzywa potęgowa $a = 2,0$		1,418	1,114
Krzywa potęgowa $a = 4,0$		1,408	1,106
Krzywa potęgowa $a = 6,0$		1,408	1,106



Rys. 5. Przekrój pionowy masywu osuwiska w części walcowej, parametry gruntowe (a) oraz widok przestrzenny masywu powierzchni dołączonej, wyznaczonej funkcją elipsoidalną (b)

Kształt powierzchni dołączonej	F2D	F3D	F3D / F2D
Funkcja hiperboliczna	1,830	1,941	1,061
Funkcja eliptyczna		1,859	1,016
Funkcja liniowa		1,915	1,046
Krzywa potęgowa $a = 0,3$		1,830	1,000
Krzywa potęgowa $a = 2,0$		1,873	1,023
Krzywa potęgowa $a = 4,0$		1,869	1,021
Krzywa potęgowa $a = 6,0$		1,875	1,025

### Przykład nr 2

Jest to nachylona skarpa, zbudowana z gruntu niespoistego (rys. 5a), analizowana przez Chen'a i Chameau [2]. Masyw osuwiska tworzy symetryczna bryła w kształcie wycinka walca z dołączonymi częściami  $L_x$ . Szerokość części walcowej –  $L_c$ przyjęto równą 12 m, natomiast część dołączona  $L_x$  ma wymiar 6 m. Część dołączoną podzielono na 20 plastrów. Parametry gruntu budującego skarpę przyjęto jak na rys. 5a, natomiast wyniki obliczeń przedstawiono w tabl. 2.

# Przykład nr 3

Analizowane zbocze z gruntu spoistego jest identyczne geometrycznie ze zboczem z przykładu nr 2 (rys. 5a). Położenie



Rys. 6. Przekrój pionowy masywu osuwiska w części walcowej, parametry gruntowe (a) oraz widok przestrzenny masywu powierzchni dołączonej, wyznaczonej funkcją liniową (b)

#### Tabl. 3. Przykład obliczeniowy nr 3. Zbiorcze wyniki analizy stateczności

Tabl. 4. Przykład obliczeniowy nr 4. Zbiorcze wyniki analizy stateczności

Kształt powierzchni dołączonej	F2D	F3D	F3D / F2D
Funkcja hiperboliczna	2,261	2,494	1,103
Funkcja eliptyczna		2,381	1,053
Funkcja liniowa		2,460	1,088
Krzywa potęgowa $a = 0,3$		2,333	1,032
Krzywa potęgowa $a = 2,0$		2,460	1,088
Krzywa potęgowa $a = 4,0$		2,386	1,055
Krzywa potęgowa <i>a</i> = 6,0		2,388	1,056

Kształt powierzchni dołączonej	F2D	F3D	F3D / F2D
Funkcja hiperboliczna	1,273	1,501	1,179
Funkcja eliptyczna		1,403	1,102
Funkcja liniowa		1,464	1,150
Krzywa potęgowa $a = 0,3$		1,552	1,219
Krzywa potęgowa $a = 2,0$		1,418	1,114
Krzywa potęgowa $a = 4,0$		1,408	1,106
Krzywa potęgowa $a = 6,0$		1,408	1,106









Rys. 8. Wykres procentowego wzrostu wartości współczynnika stateczności F3D do F2D, dla różnych kształtów dołączonych brył masywu osuwiska, w przykładach nr 1, 2, 3 i 4

osi obrotu i promień części walcowej, a tym samym przebieg krytycznej powierzchni poślizgu w stanie 2D, dostosowano do materiału gruntowego. Kształt zbocza oraz parametry gruntu zastosowane do obliczeń pokazano na rys. 6a. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabl. 3.

#### Przykład nr 4

Model zbocza o budowie warstwowanej, opisanego w [7], opiera się na przykładzie rzeczywistej budowy geologicznej (rys. 7a). Masyw osuwiska podzielono tu na bryłę w kształcie wycinka walca o szerokości  $L_c = 20$  m wraz z dołączonymi częściami zamykającymi o szerokości  $L_x = 12$  m każda. Symetryczną część dołączoną podzielono w obliczeniach na 15 plastrów. Wyniki obliczeń pokazano w tabl. 4.

## PODSUMOWANIE

Na rys. 8 zestawiono wyniki przeprowadzonych w pracy [8] szczegółowych obliczeń, które na wykresie słupkowym prezentują procentowy przyrost wartości współczynnika stateczności w stanie przestrzennym, F3D, w stosunku do wartości współczynnika w stanie płaskim, F2D. Uwzględnienie w obliczeniach wpływu części dołączonych (zamykających masyw osuwiska) daje w wyniku wzrost wartości współczynnika stateczności F3D w porównaniu do F2D. Wzrost ten jest niewielki (do kilku procent) w przypadku gruntów niespoistych, a znacznie większy (nawet do kilkudziesięciu procent) w przypadku gruntów spoistych.

Widać też, że wpływ zmienności kształtu bocznych, przestrzennych powierzchni poślizgu na rezultat obliczeń (współczynnik F3D) mieści się w granicach kilku procent. Jedynie w przykładach nr 1 i 4 (przy głębokich powierzchniach poślizgu w gruncie spoistym) nietypowe, "wklęsłe" krzywe (jak krzywa hiperboliczna oraz krzywa potęgowa, a = 0,3 – patrz rys. 3, krzywe "1" i "4") dały wartości współczynnika F3D znacznie wyższe (o 18 ÷ 30%) od pozostałych.

Wyniki analizy z przykładów obliczeniowych 2 oraz 3 korespondują dobrze z ustaleniami Gensa, Hutchinsona i Cavounidisa, którzy w swojej pracy [6] stwierdzili również, że wpływ kształtu powierzchni poślizgu na zmienność wartości przestrzennego współczynnika stateczności F3D nie przekracza kilku procent. Stwierdzenie to, poparte wynikami prezentowanej obecnie analizy, daje możliwości ograniczania procedur sprawdzania stateczności ogólnej w stanie przestrzennym jedynie do wybranych kształtów powierzchni poślizgu.

Potwierdzono także kolejny raz [2, 4, 5, 6], że uwzględnienie przestrzennego, zamkniętego kształtu masywu osuwiska w analizie stateczności ogólnej zboczy prowadzonej metodami równowagi granicznej daje istotne zwiększenie obliczeniowego zapasu bezpieczeństwa (wartości współczynnika stateczności), zwłaszcza wówczas, kiedy w budowie zbocza dominują grunty spoiste. Taka wiedza może być pomocna, na przykład przy optymalizowaniu projektów konstrukcji oporowych, nasypów czy też wykopów szerokoprzestrzennych.

#### LITERATURA

1. Bishop A. W.: The use of the slip circle in stability analysis of slopes. Geotechnique, No. 5(1), 1955, 7-17.

2. Chen R.H., Chameau J. L.: Three-dimensional slope stability analysis. Proc. of 4th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, vol. 2, 1982, 672-677.

3. Gajewski K.: Uproszczone rozwiązanie przestrzennej analizy stateczności zboczy – założenia, wzory, metodyka prowadzenia obliczeń. Zeszyt Naukowy nr 6, Wyższa Szkoła Inżynierska, Koszalin 1987, 3-29.

4. Gajewski K., Madej J. S.: On the simplified solution of the three-dimensional slope stability analysis. Proc. of 5th Int. Symposium on Landslides, Lausanne, vol.1, 1987, 719-723.

 Gajewski K.: Metoda analizy stateczności zboczy w ujęciu przestrzennym. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Hydrotechniki, 1994.

 Gens A., Hutchinson J. N., Cavounidis S. Three-dimensional slope stability analysis of slides in cohesive soils. Geotechnique, No.38(1). 1988, 1-23.

7. Madej J. S.: Metody sprawdzania stateczności zboczy. WKiŁ, 1981.

8. Pakulski Ł.: Analiza wpływu kształtu powierzchni poślizgu na wyniki obliczeń stateczności zboczy w ujęciu przestrzennym, praca magisterska, Katedra Geotechniki, Politechnika Koszalińska, 2013.