

MAREK CAŁA
JERZY FLISIAK

Katedra Geomechaniki Budownictwa i Geotechniki, AGH

Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp

STRESZCZENIE: W pracy porównano wyniki analiz stateczności skarp, przeprowadzonych w oparciu o metody równowagi granicznej (LEM) oraz o metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR). Dla zbadania wpływu występowania warstw słabych na warunki stateczności skarp przeprowadzono obliczenia programami FLAC i SLOPE/W dla 350 modeli, 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). Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na sformułowanie szeregu wniosków i spostrzeżeń dotyczących wpływu lokalizacji i miąższości warstwy słabej na wskaźniki stateczności (FS) skarp w zależności od przyjętej metodyki obliczeń.

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilku lat na świecie odbyło się kilka konferencji naukowych oraz ukazało się dużo publikacji dotyczących analizy stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem metod numerycznych (Slope Stability Engineering, 1999; GeoEng2000, 2000). Poniższa praca jest kontynuacją studiów 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). 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. Dla przypadku, w którym w podłożu skarpy zalega warstwa gruntów słabych, wartości wskaźników stateczności (FS) uzyskane przy zastosowaniu metod numerycznych są niższe od uzyskanych przy zastosowaniu metod równowagi granicznej, szczególnie wówczas, gdy kąt nachylenia skarpy jest większy od 45° . 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).

Dla zbadania wpływu występowania warstw słabych na warunki stateczności skarp w ramach niniejszej pracy przeprowadzono obliczenia programami FLAC i SLOPE/W dla 350 modeli, 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).

2. Założenia przyjmowane do obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla skarpy prostoliniowej o wysokości 25 m oraz kącie nachylenia 45° . Założono, że w obrębie gruntów mocnych o parametrach:

- kąt tarcia wewnętrznego $\varphi = 30^{\circ}$,
- spójność $c = 75$ kPa,
- ciężar objętościowy $\gamma = 20$ kN/m³,

znajduje się warstwa gruntów słabych o parametrach:

- kąt tarcia wewnętrznego $\varphi = 10^{\circ}$,
- spójność $c = 25$ kPa,
- ciężar objętościowy $\gamma = 20$ kN/m³.

W poszczególnych modelach grubość poziomej warstwy słabej zmieniała się w przedziale od 1.0 m do 10.0 m a odległość jej stropu od naziomu w przedziale od 0 do 50 m (rys. 1).

Do obliczeń wykorzystano program metody różnic skończonych FLAC 4.0 oraz program bazujący na metodach równowagi granicznej SLOPE/W.

Wykorzystując program SLOPE/W wykonano obliczenia wskaźników stateczności klasycznymi, najczęściej stosowanymi w praktyce metodami równowagi granicznej, a mianowicie metodą Felleniusa (*ordinary*), uproszczoną metodą Bishopa oraz Janbu.

Obliczenia wskaźnika stateczności programem FLAC 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, Flisiak, 2001) w pracy przyjęto, że zarówno warstwa gruntów słabych jak i mocnych mają jednakową wartości modułu Younga równą 1000 MPa i liczby Poissona równą 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.

3. Omówienie wyników obliczeń

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości FS wyznaczonych za pomocą różnych metod dla rozpatrywanych modeli.

Przykładowe wyniki obliczeń wskaźników stateczności FS określanych za pomocą LEM oraz SSR dla warstwy słabej o miąższości 1 m zamieszczono w tabeli 1 a dla warstwy słabej o grubości 5 m w tabeli 2.

Na rys. 2 przedstawiono wykresy FS obliczanego za pomocą różnych metod w funkcji odległości stropu słabej warstwy od naziomu przy założeniu grubości warstwy równej 1 m. Na kolejnych rysunkach przedstawiano te same zależności dla różnych grubości warstwy słabej: rys.3 - warstwa 2 m, rys.4 - warstwa 3 m, rys.5 - warstwa 4 m, rys.6 - warstwa 5 m, rys.7 - warstwa 7.5 m, rys.8 - warstwa 10 m.

Analiza tych rysunków pozwala na sformułowanie kilku interesujących wniosków. Z wstępnych obliczeń przeprowadzonych dla skarpy jednorodnej zbudowanej z gruntu mocnego wynika, że uzyskane z różnych metod wartości wskaźników stateczności są do siebie zbliżone. Minimalna wartość wskaźnika stateczności uzyskana przy zastosowaniu programu FLAC i metody SSR wynosi 1.92, z metody Felleniusa 1.905 a z metody Bishopa 1.97, co potwierdza wcześniej sformułowane wnioski.

Tabela 1. *FS* dla warstwy o grubości 1 m

Poziom	FLAC	Fellenius	Bishop	Janbu
0	1.93	1.872	1.941	1.857
1	1.93	1.872	1.939	1.854
2	1.92	1.871	1.936	1.851
3	1.94	1.87	1.934	1.848
4	1.93	1.869	1.931	1.845
5	1.93	1.869	1.928	1.842
6	1.93	1.867	1.925	1.84
7	1.93	1.866	1.921	1.837
8	1.93	1.864	1.918	1.834
9	1.89	1.862	1.914	1.83
10	1.89	1.859	1.909	1.827
11	1.89	1.856	1.904	1.824
12	1.89	1.852	1.899	1.82
13	1.88	1.848	1.893	1.815
14	1.86	1.843	1.888	1.812
15	1.8	1.839	1.884	1.811
16	1.75	1.835	1.879	1.809
17	1.68	1.83	1.874	1.806
18	1.64	1.799	1.806	1.804
19	1.59	1.789	1.778	1.8
20	1.54	1.74	1.731	1.794
21	1.51	1.709	1.709	1.763
22	1.49	1.666	1.659	1.712
23	1.44	1.609	1.607	1.658
24	1.42	1.59	1.592	1.632
25	1.42	1.592	1.603	1.634
26	1.48	1.618	1.67	1.67
27	1.54	1.674	1.766	1.728
28	1.61	1.673	1.789	1.744
29	1.67	1.734	1.882	1.809
30	1.72	1.8031	1.952	1.879
31	1.78	1.839	1.952	1.879
32	1.86	1.852	1.952	1.879
33	1.91	1.89	1.952	1.879
34	1.92	1.89	1.952	1.879
35	1.92	1.89	1.952	1.879

Pojawienie się warstwy słabej przyczynia się, co jest oczywiste, do spadku wartości *FS*. Wielkość tego spadku zależna jest zarówno od grubości warstwy jak i od jej odległości od naziomu.

Przy małej grubości słabej warstwy jej wpływ na wartości *FS* jest stosunkowo niewielki w przypadkach, gdy jej strop zlokalizowany jest w niewielkich odległościach od naziomu. Przy warstwie o grubo-

Tabela 2. *FS* dla warstwy o grubości 5 m

Poziom	FLAC	Fellenius	Bishop	Janbu
0	1.87	1.881	1.751	1.445
1	1.71	1.873	1.747	1.39
2	1.55	1.752	1.732	1.381
3	1.52	1.569	1.714	1.359
4	1.5	1.534	1.7	1.353
5	1.43	1.527	1.685	1.246
6	1.4	1.373	1.616	1.28
7	1.37	1.348	1.616	1.213
8	1.36	1.265	1.499	1.219
9	1.33	1.255	1.485	1.172
10	1.31	1.207	1.423	1.154
11	1.29	1.205	1.41	1.118
12	1.27	1.188	1.38	1.1
13	1.24	1.167	1.362	1.105
14	1.22	1.164	1.346	1.095
15	1.19	1.164	1.341	1.061
16	1.15	1.138	1.3	1.064
17	1.11	1.136	1.295	1.038
18	1.1	1.128	1.278	1.047
19	1.08	1.122	1.26	1.039
20	1.07	1.114	1.244	1.049
21	1.07	1.121	1.242	1.065
22	1.09	1.148	1.252	1.079
23	1.11	1.156	1.251	1.094
24	1.13	1.195	1.277	1.112
25	1.17	1.214	1.277	1.124
26	1.25	1.294	1.337	1.158
27	1.33	1.353	1.377	1.202
28	1.4	1.432	1.437	1.235
29	1.47	1.512	1.5	1.269
30	1.54	1.571	1.549	1.303
31	1.61	1.659	1.617	1.337
32	1.67	1.722	1.664	1.383
33	1.71	1.786	1.713	1.41
34	1.8	1.85	1.763	1.457
35	1.86	1.943	1.837	1.489
36	1.92	1.956	1.882	1.536
37	1.92	1.956	1.882	1.576
38	1.92	1.956	1.882	1.621
39	1.92	1.956	1.882	1.667
40	1.92	1.956	1.882	1.682
41	1.92	1.956	1.882	1.753
42	1.92	1.956	1.882	1.796
43	1.92	1.956	1.882	1.839
44	1.92	1.956	1.882	1.848
45	1.92	1.956	1.882	1.888

ści 1 m (rys. 2) istotne wpływy istnienia warstwy słabej obserwuje się, gdy zlokalizowana jest ona w odległości od naziomu mniejszej od 14 m wg obliczeń programem FLAC, 17 m wg metody Bishopa i Felleniusa oraz 20 m wg metody Janbu. Przy większych głębokościach wpływ warstwy słabej na warunki stateczności jest coraz większy, co przejawia się szybkim spadkiem wartości wskaźnika stateczności. Charakterystyczne jest, że spadek ten najsilniej obserwuje się w metodzie numerycznej, dla której najmniejsza wartość FS wynosi 1.42. Wartość ta uzyskana została przy położeniu stropu warstwy słabej na poziomie dolnej krawędzi skarpy. Wartość FS określona dla tego przypadku przy zastosowaniu metody Bishopa wynosi 1.603, a więc jest wyższa o około 13%. Wzrost grubości warstwy słabej powoduje zmniejszenie odległości od naziomu, przy której wpływy są mało istotne. Przy warstwie pięciometrowej odległość ta wynosi od 0 (FLAC) do 6 m (metoda Janbu) a przy grubościach większych spada do zera dla wszystkich metod.

Można również zaobserwować, że w miarę wzrostu grubości warstwy słabej, niezależnie od jej lokalizacji, różnice pomiędzy minimalnymi wartościami FS otrzymanymi z obliczeń numerycznych oraz metod równowagi granicznej maleją. Szczególnie dotyczy to metody Bishopa, dla której nie przekraczają one 8%.

Dla niewielkich grubości warstwy słabej najmniejsze wartości FS uzyskuje się z metody SSR. W analizowanych modelach ze stanem takim mamy do czynienia przy grubości nie przekraczającej 5 m. Dla warstwy o tej grubości z metody Bishopa uzyskano $FS = 1.114$ a dla metody SSR $FS = 1.07$. Dla kolejnych analizowanych grubości warstw (7.5 m i 10 m) najmniejsze wartości FS uzyskano z metody Bishopa (odpowiednio 0.926 i 0.811), podczas gdy z metody SSR odpowiednio wartości FS równe 0.95 i 0.87.

Można więc stwierdzić, że dla grubości warstwy słabej mniejszej lub równej 5 m metoda SSR daje mniejsze wartości FS niż którakolwiek metoda równowagi granicznej.

Wydaje się, że wśród wykorzystywanych metod równowagi granicznej, najbardziej wiarygodne wyniki daje metoda Bishopa. Wyniki uzyskiwane z tej metody są równocześnie najbardziej zbliżone do uzyskanych z metod numerycznych. Metoda Felleniusa daje mało prawdopodobne wartości FS w przypadku zalegania stropu słabej warstwy poniżej dolnego poziomu zbrocza. Wpływ ten obserwowany jest nawet wówczas, gdy strop warstwy słabej zlokalizowany jest w odległości od podłoża większej od 15 m.

Analizując przebiegi FS na rysunkach 2 do 8 generalnie można stwierdzić, że im grubsza warstwa słaba tym większy gradient spadku FS w miarę przesuwania się jej lokalizacji w dół.

Stosowanie metod równowagi granicznej wymaga znajomości kształtu i położenia powierzchni poślizgu. W stosowanych w pracy metodach 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 SSR kształt powierzchni poślizgu jest zdeterminowany stanem naprężeń i odkształceń panującym w ośrodku gruntowym o określonej budowie geologicznej. Dla przykładu na rys. 9 przedstawiono powierzchnie poślizgu otrzymane z obliczeń numerycznych oraz w oparciu o metodą Bishopa dla przypadku, w którym słaba warstwa o grubości 1 m zlokalizowana była w odległości 20 m od naziomu. Powierzchnie poślizgu zidentyfikowane przez obie metody różnią się znacząco. Powierzchnia poślizgu otrzymana na podstawie obliczeń numerycznych w dolnej swej części przebiega prawie poziomo w warstwie słabej, w górnej części jest bardzo stroma i obejmuje swym zasięgiem znacznie większą część skarpy. Trudno jest jednak na tym etapie badań stwierdzić czy jest ona bardziej wiarygodna niż powierzchnia poślizgu otrzymana w oparciu o metodą Bishopa.

3. Podsumowanie

Powyższa praca jest kontynuacją cyklu publikacji autorów dotyczącego zagadnienia zastosowania różnych metod obliczeniowych dla określania stateczności skarp.

Wnioski wynikające z powyższej pracy mogą mieć tylko charakter jakościowy i dotyczą pewnego wąskiego, analizowanego zakresu. Chodzi tutaj zarówno o analizowane profile litologiczne skarp (miąższość i położenie warstwy słabej) jak i parametry wytrzymałościowe warstwy słabej, czy też ich stosunek do parametrów całości skarpy. Zdajemy sobie w pełni sprawę z ograniczeń w stosowalności wniosków, jakie narzuca zakres przeanalizowanych modeli. Bardziej chodziło nam tutaj o zwrócenie uwagi na fakt, że 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 skarpie występują warstwy słabe o niewielkich grubościach (1 - 3 m) zlokalizowane w rejonie podnóża skarpy.

Zróżnicowanie wartości FS w zależności od przyjętej metody obliczeń można znaleźć także w pracy Dolezalová *et al.* (2001). Jej autorzy stwierdzili różnice pomiędzy wartościami FS określonymi na podstawie SSR, LEM oraz w oparciu o Metodę Elementów Skończonych (MES). Analizowali stateczność niejednorodnego nasypu i otrzymali na podstawie analiz MES i SSR takie same wartości $FS = 1.75$. Zastosowanie metody Janbu przyniosło im prawie identyczną linię poślizgu, ale FS był równy 1.85, co daje odchyłkę wynoszącą 5.7 %. Co ciekawe, autorzy tej pracy podają także wyniki analiz w oparciu o metodę Bishopa, z której uzyskano wartość $FS = 2.16$, co daje odchyłkę równą 23 %. Niestety nie przedstawiają żadnego wyjaśnienia tak znaczących różnic w wartościach FS .

Wynika z tego, że w zależności od analizowanej sytuacji (litologii i własności warstw) wartości FS uzyskane w oparciu o różne metody równowagi granicznej mogą się znacząco różnić od siebie oraz od wyników uzyskanych z zastosowania metody SSR. Czy w takim razie 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.

Pragniemy jednakże zaakcentować, że nie podważamy celowości stosowania LEM. Z doświadczeń wynika jednak, że w przypadku skomplikowanej budowy geologicznej, gdzie powierzchnia poślizgu zdeterminowana jest naturalnymi cechami strukturalnymi górotworu, metody numeryczne dają wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości.

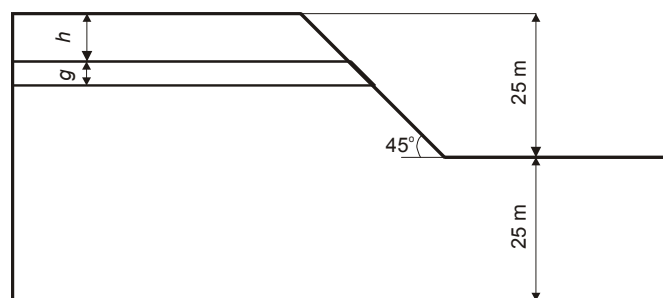
Udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, która z metod analizy stateczności daje bardziej wiarygodne wyniki wymaga weryfikacji obliczeń na rzeczywistych, a nie teoretycznych przykładach.

4. Literatura

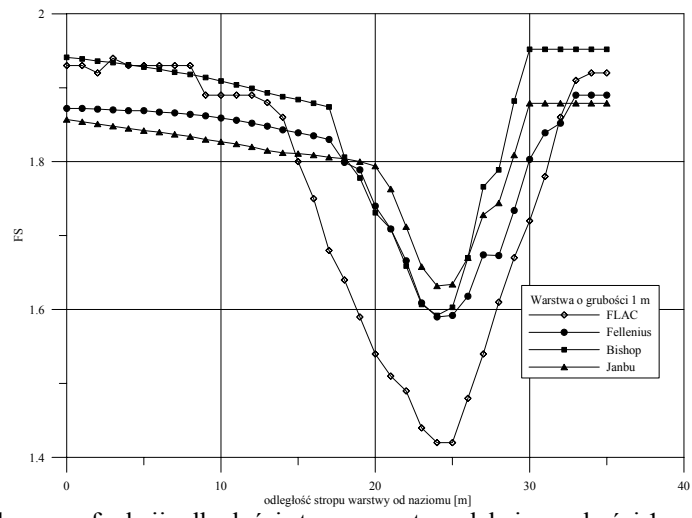
1. Cała M., Flisiak J. Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Kraków. 2000.
2. Cała M., Flisiak J.. Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers. Str. 111-114. 2001.

3. Dolezalová M., Hladík I., Zemanová V. Stability analysis of a motorway embankment on soft subsoil using FEM, FLAC and limit equilibrium method. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers. Str. 125-132. 2001.
4. *FLAC v. 4.0. Users Manual*. Itasca Consulting Group. Inc. Minneapolis. Minnesota. 2000.
5. *Slope Stability Engineering*. Proc. of the Int. Symp. Vol.1-2. Edited by Yagi, Yamagami & Jiang. A.A. Balkema. Rotterdam. 1999.
6. *GeoEng2000*. Proc. of the Int. Conf. On Geotechnical & Geological Engineering Vol.1-2. Technomic Publishing Co. Inc. 2000.

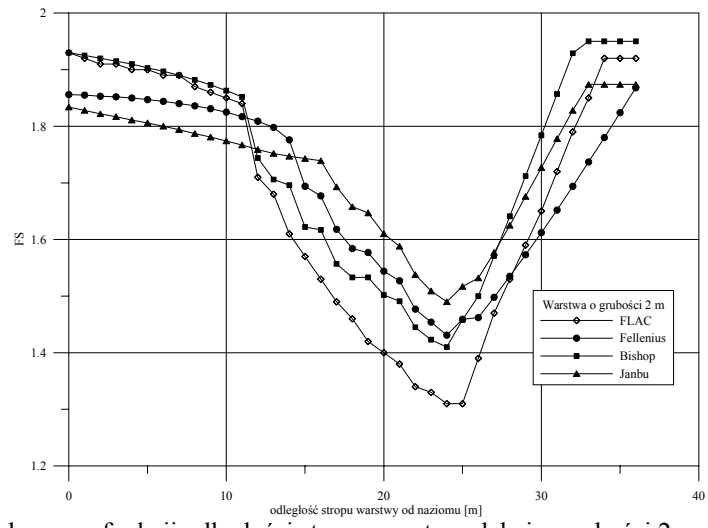
ABSTRACT: This paper shows the comparison of limit equilibrium methods (LEM) and shear stress reduction method (SSR) for the estimation of the factor of safety (FS) for the slopes. For to investigate the influence of weak stratum on FS some 350 models were analyzed. The thickness of weak stratum was changed from 1.0 to 10.0 m. The weak layer was localized from 0 to 50 m from the top of the slope. Several examples of calculations are presented and discussed in the paper. Some conclusions concerning the influence of weak layer thickness and its localization on FS of slopes were also formulated.



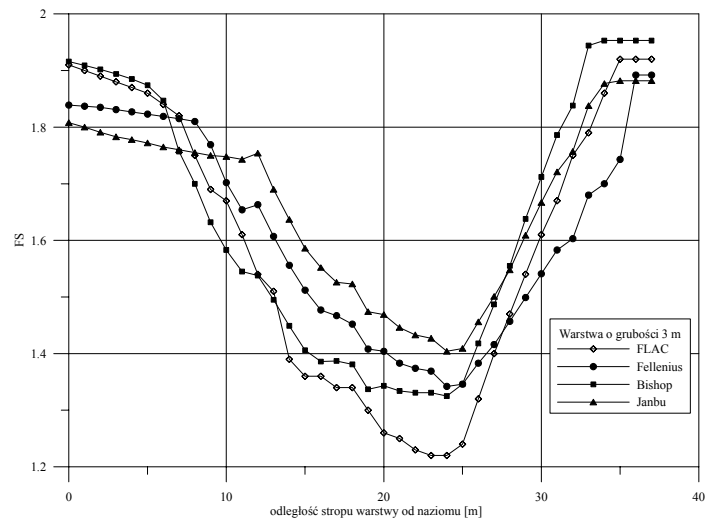
Rys. 1. Geometria modelu przyjętego do obliczeń



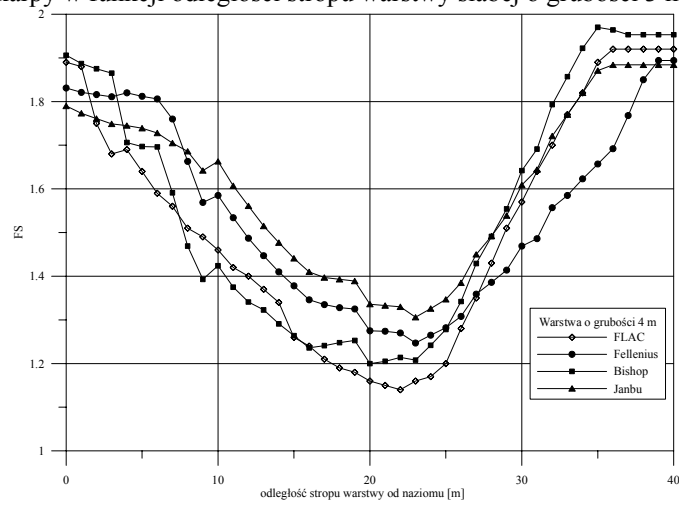
Rys.2. *FS* skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 1 m od naziomu.



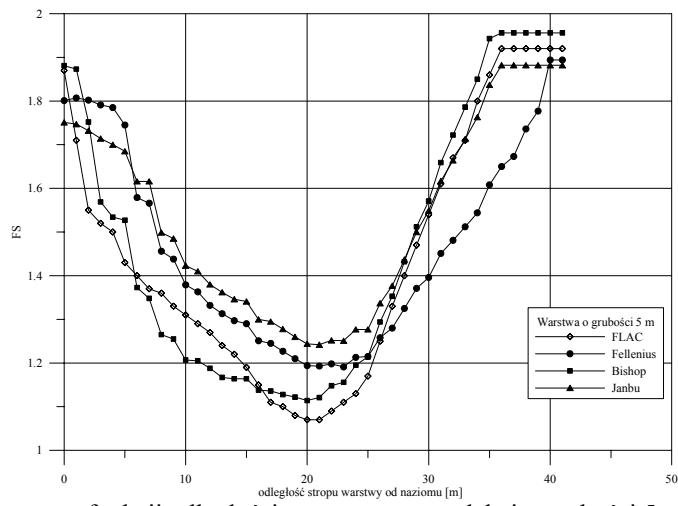
Rys.3. *FS* skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 2 m od naziomu



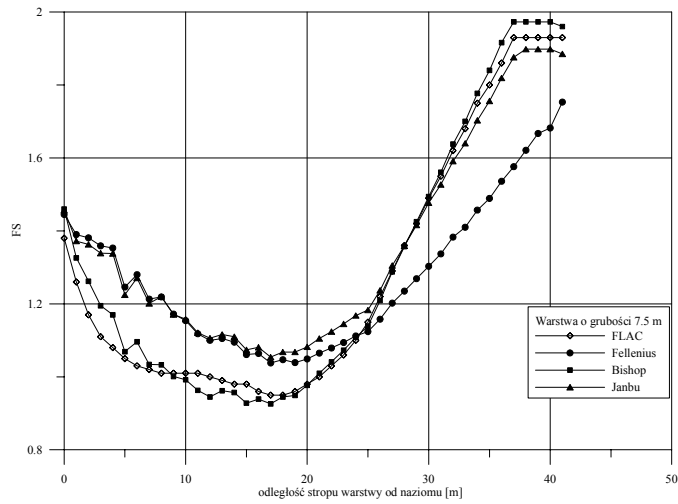
Rys.4. *FS* skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 3 m od naziomu



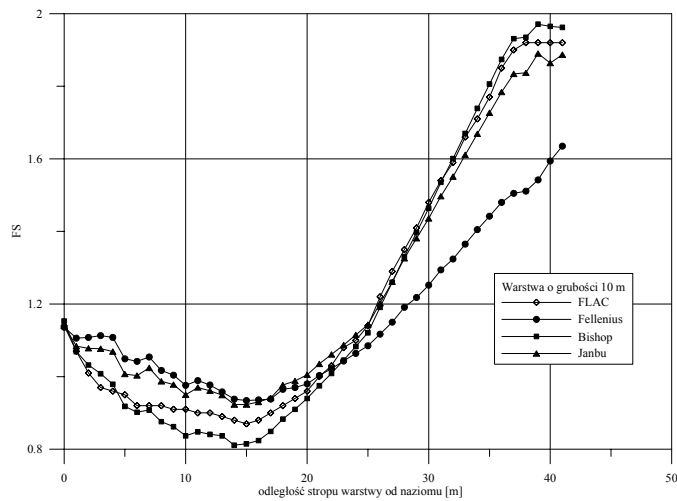
Rys.5. *FS* skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 4 m od naziomu



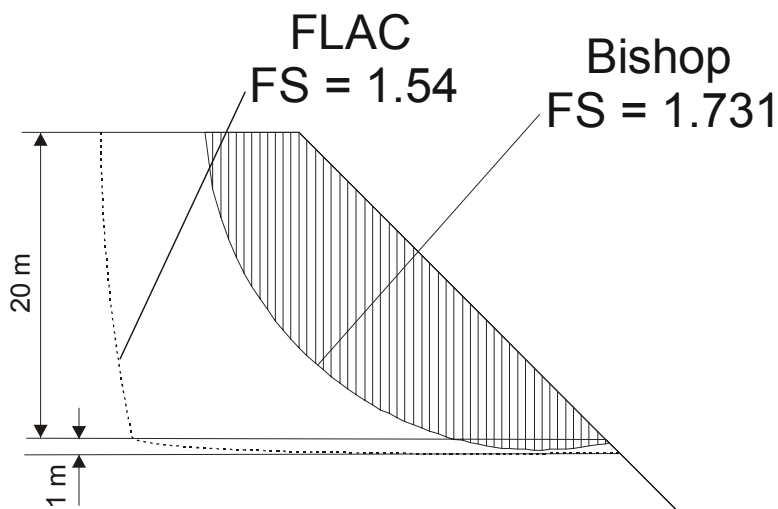
Rys.6. *FS* skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 5 m od naziomu



Rys.7. *FS* skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 7.5 m od naziomu



Rys. 8. FS skarpy w funkcji odległości stropu warstwy słabej o grubości 10 m od naziomu



Rys. 9. Powierzchnie poślizgu dla słabej warstwy o grubości 1 m zlokalizowanej 20 m od naziomu otrzymane z obliczeń numerycznych oraz w oparciu o metodą Bishopa.