

Janusz KONKOL
Politechnika Rzeszowska

PORÓWNANIE METOD UWZGLĘDNIANIA WARSTWOWOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO W ANALIZIE STATECZNOŚCI SKARP

W artykule dokonano porównania dwóch metod (MPW i MPU) uwzględniania warstwowości podłoża gruntowego w skarpach o danych parametrach geometrycznych i geotechnicznych, przy założeniu cylindrycznej powierzchni poślizgu.

1. Wstęp

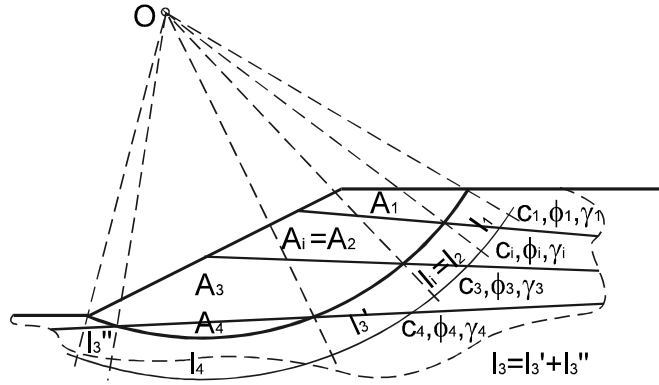
Najbardziej popularną, a jednocześnie normową metodą oceny stateczności skarp jest metoda Felleniusa [1, 2]. W metodzie tej masyw potencjalnego osuwiska dzieli się na pionowe elementy, zwane popularnie paskami. Następnie dokonuje się analizy sił działających na każdy pasek. Spełnienie warunków równowagi statycznej sił działających w masywie potencjalnego osuwiska prowadzi do wyznaczenia wskaźnika stateczności skarpy, odpowiadającego danej powierzchni poślizgu. W praktyce wskaźnik stateczności oblicza się jako stosunek momentu utrzymującego do obracającego, przy założeniu najbardziej niekorzystnego położenia potencjalnej powierzchni poślizgu. Położenie najbardziej niekorzystnej powierzchni poślizgu można wyznaczyć, posługując się nomogramami [3] lub metodą prób. Dopuszczalne jest również przyjęcie założenia, że powierzchnia poślizgu przechodzi przez podnóże skarpy [4-6]. Założenie takie stawia wyznaczony wówczas wskaźnik stateczności po stronie bezpiecznej [7].

W rzeczywistym podłożu gruntowym występujące warstwy geotechniczne mogą się charakteryzować zdecydowanie odmiennymi parametrami geotechnicznymi (c , Φ , γ). Konieczne jest wówczas zastosowanie metody uwzględniania warstwowości tego podłoża.

2. Opis metod uwzględniania warstwowości podłoża gruntowego

Pierwszym sposobem uwzględniania warstwowości podłoża gruntowego jest metoda iteracyjnego uśredniania parametrów geotechnicznych MPU [8]. W metodzie tej podłoża warstwowe sprowadzone jest do równoważnego podłoża.

za jednorodnego, charakteryzującego się zastępczymi wartościami parametrów geotechnicznych. Z uwagi na zmianę pola powierzchni kolejnych warstw w obrębie potencjalnej bryły osuwiskowej, na skutek przyjęcia innego położenia powierzchni poślizgu (poszukiwanie najbardziej niekorzystnej powierzchni poślizgu) zmianie ulegają również wartości zastępczych parametrów geotechnicznych.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy dla podłoża uwarstwowionego

Zastępcze wartości parametrów geotechnicznych oblicza się na podstawie wzorów (1), według przyjętego schematu (rys. 1.):

$$\gamma_z = \frac{\sum \gamma_i \cdot A_i}{\sum A_i} ; \quad c_z = \frac{\sum c_i \cdot l_i \cdot A_i}{\sum l_i \cdot A_i} ; \quad \Phi_z = \frac{\sum \Phi_i \cdot l_i \cdot A_i}{\sum l_i \cdot A_i}, \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n,$$

gdzie: n – liczba warstw geotechnicznych, A_i – pole powierzchni kolejnych warstw w obrębie potencjalnej bryły osuwiskowej, l_i – suma długości śladu powierzchni poślizgu w i -tej warstwie, c_i , Φ_i , γ_i – parametry geotechniczne gruntu i -tej warstwy.

Metoda przyjmowania do obliczeń parametrów uśrednionych (MPU) może być stosowana w przypadkach, gdy parametry geotechniczne poszczególnych warstw nie różnią się znacząco. W przypadku znacznych różnic należy stosować rozwiązanie, w którym do obliczeń przyjmowane są parametry warstwy, przez którą przechodzi potencjalna powierzchnia poślizgu (MPW).

3. Obliczenia skarp modelowych

Przyjęto założenie, że podłoże gruntowe rozważanych skarp modelowych składa się z 3 warstw, z których stałymi parametrami geotechnicznymi charakteryzują się grunty warstw I i III. Jako grunt warstwy I i III przyjęto ility w stanie twardoplastycznym, należące do gruntów bardzo spoistych, o stopniu plastyczności I_L równym odpowiednio 0,05 i 0,1. Zmienny natomiast był stan warstwy II z gliny pylastej od stopnia plastyczności I_L wynoszącego 0,1-0,4. Charakterystykę gruntów zamieszczono w tab. 1.

Wszystkie podawane wartości c , Φ i γ są wartościami charakterystycznymi. Obliczenia przeprowadzono przy zastosowaniu programu komputerowego STATGRUNT [9, 10].

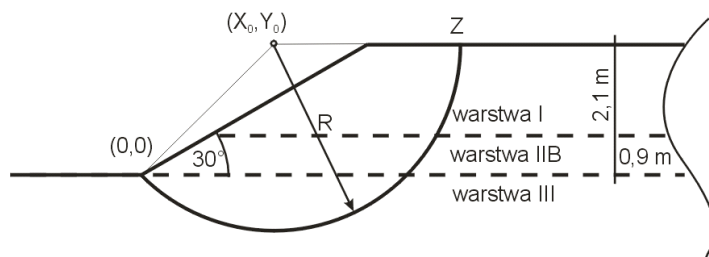
Tabela 1. Charakterystyka gruntu

Symbol warstwy	Nazwa gruntu (symbol)	Stan gruntu (I_L)	Parametry geotechniczne		
			c	Φ	γ
[-]	[-]	[-]	[kPa]	[°]	[kN/m ³]
I	bardzo spoiste (D), ilt	twardoplastyczny (0,05)	57	12,3	20
II	B	twardoplastyczny (0,1)	21	16,5	20
	C	twardoplastyczny (0,2)	17	14,8	20
	D	plastyczny (0,3)	13	13,2	19
	E	plastyczny (0,4)	10,5	11,5	19
III	bardzo spoiste (D), ilt	twardoplastyczny (0,1)	55	11,6	20

Przeprowadzono symulacje zachowania się skarp o nachyleniu 30° w zależności od zmiennego położenia warstwy najsłabszej oraz od zmiany stopnia plastyczności warstwy najsłabszej. Na podstawie symulacji wstępnych stwierdzono, że pomimo łagodnego pochylenia skarp (nachylenie zbocza skarpy w stosunku do poziomu równe 30°) wpływ warstwy słabszej na stateczność ogólną może być znaczący.

W pierwszej kolejności przeanalizowano zachowanie się skarp, w których zmieniano położenie warstwy najsłabszej od głębokości 3; 2,1; 1 do 0,3 m (rys. 2.). Przyjęto miąższość warstwy II równą 0,9 m z gruntu o symbolu IIB (głina pylasta zwięzła w stanie twardoplastycznym o $I_L = 0,1$).

Wyniki przeprowadzonych symulacji zamieszczono w tab. 2. i 3. Na rysunku 2. pokazano również rozwiązanie dla skarpy z wariantu 2. (położenie potencjalnej powierzchni poślizgu) metodą MPW.



Rys. 2. Schemat obliczeniowy podłoża uwarstwionego w wariancie 2.

Na podstawie analizy wyników skarp modelowych (warianty 1-4) nie stwierdzono prawidłowości zmiany wartości określanych parametrów na skutek zwiększenia zagłębienia warstwy II. Z uwagi na wartość wskaźnika stateczności skarpy z wariantu 1. należy uznać za najmniej bezpieczną. Taki rezultat uzyskano w przypadku obu metod obliczeniowych, gdyż występowanie przewarstwienia ze słabych gruntów w rejonie podnóża skarpy może znacząco wpłynąć na jej stateczność ogólną. Okazuje się również, że taka lokalizacja przewarstwienia oraz nieodpowiedni sposób podejścia do obliczeń mogą powodować duże błędy obliczeniowe. Potwierdzają to różnice w wynikach wskaźnika stateczności uzyskanych metodą MPU i MPW (rys. 3a), pomimo dużej zgodności pozostałych parametrów: X_0 , Y_0 , R , Z , A_i , l_i (tab. 2. i 3., rys. 3a i b). Uśrednianie parametrów geotechnicznych w tym przypadku jest niedopuszczalne.

Tabela 2. Zestawienie wyników symulacji – warianty 1-4

Wariant	Metoda	F	Położenie osi obrotu			Zasięg powierzchni poślizgu Z	Parametry uśrednione		
			X_0	Y_0	R		c_z	Φ_z	γ_z
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kPa]	[°]	[kN/m ³]
1	MPW	3,510	2,492	3	3,900	6,393	45,46	13,65	20
	MPU	4,470	2,491	3	3,899	6,390	45,36	13,66	20
2	MPW	4,736	3,055	3	4,282	7,338	52,32	12,28	20
	MPU	4,869	2,690	3	4,030	6,720	51,44	12,46	20
3	MPW	4,574	2,533	3	3,927	6,460	53,43	11,86	20
	MPU	4,992	2,957	3	4,213	7,170	53,74	11,81	20
4	MPW	4,723	2,893	3	4,167	7,060	54,25	11,71	20
	MPU	5,029	2,957	3	4,213	7,170	54,26	11,71	20

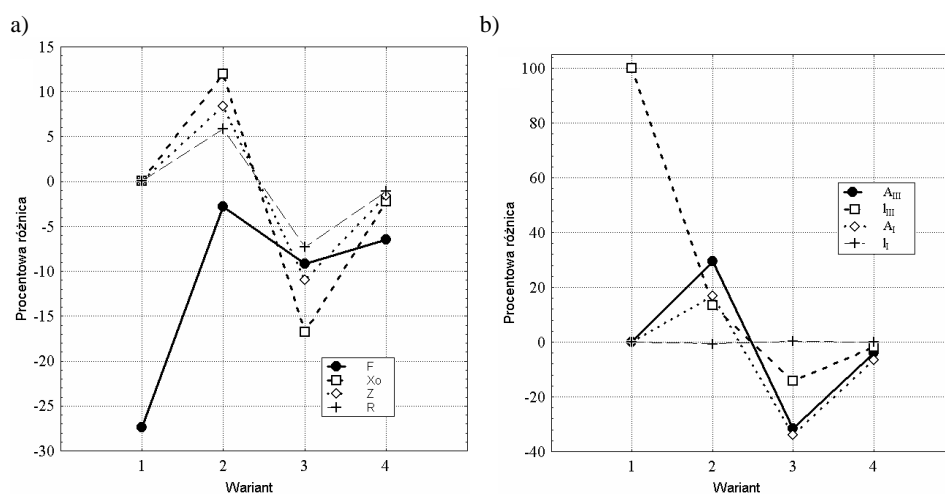
W każdym przypadku wartość wskaźnika stateczności uzyskana metodą MPW była wartością mniejszą (tab. 2.). Niewielką różnicę między wynikami wskaźnika stateczności dla obu metod, wynoszącą –2,81%, uzyskano jedynie w przypadku skarpy z wariantu 2. Na podstawie otrzymanych w tym przypadku

wyników można stwierdzić, że obie metody są równie wiarygodne, jednak tylko w przypadku wyznaczania wskaźnika stateczności, ponieważ uzyskane najbardziej niekorzystne powierzchnie poślizgu różnią się między sobą (tab. 2. i 3., rys. 3a i b).

Tabela 3. Zestawienie wyników symulacji – warianty 1-4

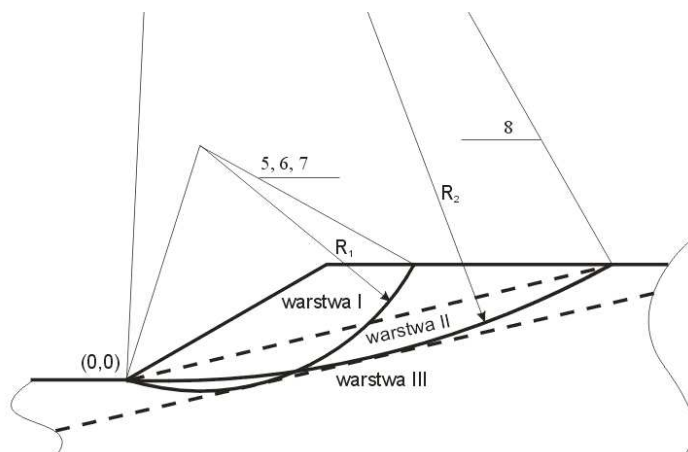
Wariant	Metoda	Pole powierzchni każdej warstwy			Długość linii poślizgu w obrębie każdej warstwy		
		A_I [m ²]	A_{II} [m ²]	A_{III} [m ²]	l_I [m]	l_{II} [m]	l_{III} [m]
1	MPW	10,13	3,07	0	3,42	5,33	0,08
	MPU	10,12	3,06	0	3,42	5,40	0
2	MPW	7,99	5,12	5,41	2,20	1,13	6,81
	MPU	6,65	4,51	3,81	2,21	1,18	5,89
3	MPW	2,10	3,13	8,32	1,00	0,97	6,95
	MPU	2,81	3,78	10,95	1,00	0,96	7,94
4	MPW	0,64	2,85	13,40	0,30	0,92	8,53
	MPU	0,68	2,94	13,91	0,30	0,92	8,68

Ekstremalne procentowe różnice między wartościami X_0 uzyskiwanymi metodą MPW w stosunku do metody MPU wynosiły od +11,95 do -16,74%, w przypadku zasięgu klina odłamu Z od +5,89 do -7,28%, w przypadku promienia R od +8,42 do -10,99%, a w przypadku wskaźnika stateczności od -2,81 do -27,35%.



Rys. 3. Procentowe różnice między wartościami parametrów wyznaczonych metodą MPU i metodą MPW: a) F , X_0 , Z i R , b) A_{III} , l_{III} , A_I , l_I

Warianty 5-8 dotyczą skarp o nachyleniu 30° z przewarstwieniem o tej samej miąższości jak w wariantach 1-4, jednak nachylonych w stosunku do poziomu naziomu i z gruntu o zmiennym stopniu plastyczności. Współrzędne punktów wyznaczających linię ograniczającą od góry warstwę II to: $(0; 0)$ i $(5,2; 1,2)$, a punktów wyznaczających linię ograniczającą warstwę II od dołu to: $(0; -0,9)$ i $(5,2; 0,3)$. Wyniki obliczeń zamieszczono w tab. 4. i 5. oraz na rys. 4. (metoda MPW). Takie założenie lokalizacji przewarstwienia o słabszych parametrach geotechnicznych niż pozostałych warstw jest jednym z najbardziej niebezpiecznych.



Rys. 4. Schemat obliczeniowy podłoża uwarstwionego – warianty 5-8

Przeprowadzone obliczenia wykazały bardzo duże różnice między obiema metodami oceny stateczności skarp, zwłaszcza dotyczące położenia najbardziej niekorzystnej powierzchni poślizgu (rys. 4., tab. 4. i 5.).

Ekstremalne procentowe różnice (rys. 5a) między wartościami X_0 uzyskanymi metodą MPW w stosunku do metody MPU wynosiły od $+0,26$ do $+41,44\%$, w przypadku Y_0 od $-308,45\%$ do $+0,12\%$, w przypadku zasięgu klina odłamu Z od $-73,80$ do $+0,13\%$, w przypadku promienia R od $-290,9$ do $+0,13\%$, a w przypadku wskaźnika stateczności od $-17,8$ do $-3,61\%$. Jednocześnie w każdym przypadku wartość wskaźnika stateczności uzyskana metodą MPW była wartością mniejszą (tab. 4.).

Tabela 4. Zestawienie wyników symulacji – warianty 10-17

Wariant /grunt II warstwy	Metoda	F	Położenie osi obrotu			Zasięg po- wierzchni poślizgu	Parametry uśrednione		
			X_0	Y_0	R		c_z	Φ_z	γ_z
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kPa]	[°]	[kN/m ³]
5/IIB	MPW	3,346	1,911	6,061	6,355	7,480	34,46	14,93	20
	MPU	3,798	1,906	6,054	6,347	7,470	34,12	14,97	20
6/IIC	MPW	2,983	1,911	6,061	6,355	7,480	31,96	13,87	20
	MPU	3,514	1,906	6,054	6,347	7,470	31,58	13,89	20
7/IID	MPW	2,662	1,911	6,061	6,355	7,480	29,46	12,86	19,66
	MPU	2,767	1,119	24,817	24,842	13,000	13,08	13,20	19,59
8/IE	MPW	2,216	1,103	23,163	23,189	12,558	12,50	11,53	19,62
	MPU	2,296	1,027	25,210	25,231	12,999	10,53	11,50	19,60

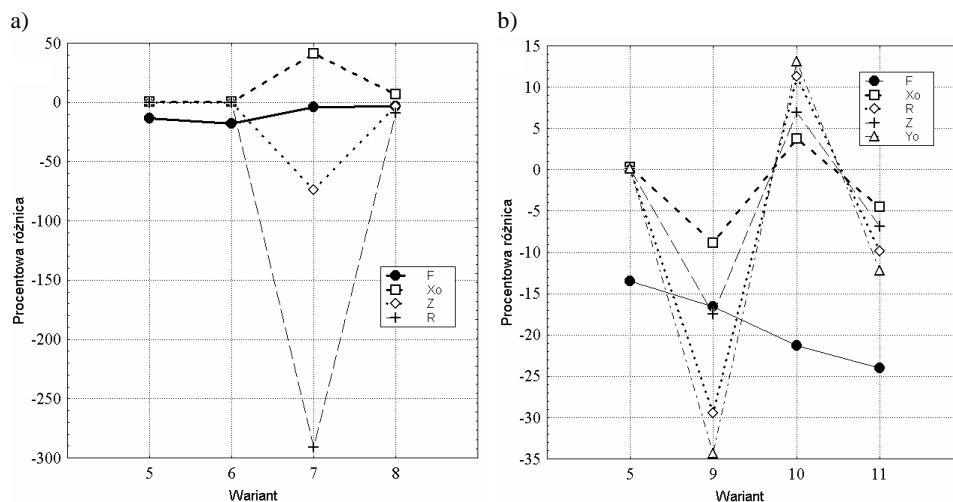
Tabela 5. Zestawienie wyników symulacji – warianty 10-17

Wariant /grunt II warstwy	Metoda	Pola powierzchni każdej warstwy			Długości linii poślizgu w obrębie każdej warstwy		
		A_I	A_{II}	A_{III}	l_I	l_{II}	l_{III}
[-]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m]	[m]	[m]
11/IIB	MPW	7,53	3,84	0	1,97	6,45	0,32
	MPU	7,51	3,82	0	1,97	6,75	0
12/IIC	MPW	7,53	3,84	0	1,97	6,45	0,32
	MPU	7,51	3,82	0	1,97	6,75	0
13/IID	MPW	7,53	3,84	0	1,97	6,45	0,32
	MPU	11,70	8,09	0,06	0	10,85	2,66
14/IE	MPW	11,69	7,29	0	0,36	12,73	0
	MPU	11,70	7,99	0,03	0	11,46	2,04

W przypadku skarpy z wariantu 7. różnice między wynikami z obu metod są największe (tab. 4. i 5. oraz rys. 5a). Występuje tu różnica w położeniu najbardziej niekorzystnej powierzchni poślizgu oraz znaczne przesunięcie osi potencjalnej powierzchni poślizgu od podnóża skarpy.

W przypadku skarp (warianty: 5. i 9-11) dokonano zmiany nachylenia linii ograniczających warstwę II. Zmienny kąt nachylenia wynosił: 12,99° (wariant 5.), 9,82° (wariant 9.), 6,58° (wariant 10.) i 3,30° (wariant 11.).

W miarę zmniejszania pochylenia warstwy II wskaźnik stateczności zwiększał się (tab. 6.), jednocześnie rosła różnica w wartościach wskaźnika stateczności F wyznaczonego metodami MPU i MPW od -13,51 do -23,98% (rys. 5b). Ponownie najmniejsze wartości F uzyskano w przypadku metody MPW.



Rys. 5. Procentowe różnice między wartościami F , X_0 , Z i R wyznaczonymi metodą MPU oraz metodą MPW dla wariantów: a) 5-8, b) 5., 9-11

Tabela 6. Zestawienie wyników symulacji – warianty: 5. i 9-11

Wariant /grunt II warstwy	Metoda	F	Położenie osi obrotu			Zasięg powierzchni poślizgu	Parametry geotechniczne uśrednione		
			X_0	Y_0	R		c_z	Φ_z	γ
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kPa]	[°]	[kN/m ³]
5/IIB	MPW	3,346	1,911	6,061	6,355	7,480	34,46	14,93	20
	MPU	3,798	1,906	6,054	6,347	7,470	34,12	14,97	20
9/IIB	MPW	3,443	2,009	3,917	4,402	6,315	38,21	14,49	20
	MPU	4,015	2,187	5,263	5,699	7,418	37,99	14,52	20
10/IIB	MPW	3,460	2,454	5,093	5,653	7,705	41,55	14,10	20
	MPU	4,197	2,362	4,424	5,015	7,170	41,19	14,14	20
11/IIB	MPW	3,519	2,464	3,654	4,407	6,822	43,96	13,82	20
	MPU	4,363	2,576	4,099	4,841	7,290	43,76	13,85	20

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz modelowych skarp uwarstwionych stwierdzono znaczące różnice w wartościach określanych parametrów (F , X_0 , Y_0 , R , Z , A_i , l_i) w zależności od zastosowanego sposobu uwzględniania warstwowości podłoża gruntowego. Wprowadzenie warstwy o słabych parametrach geotechnicznych, występującej w obrębie potencjalnej powierzchni poślizgu skutkowało znacznymi zmianami geometrii skarpy, zwłaszcza położenia osi obrotu potencjalnej powierzchni poślizgu.

Stwierdzono również, że w przypadku występowania przewarstwień z gruntów słabych, zwłaszcza przechodzących przez podnóże skarpy, należy uwzględniać w obliczeniach parametry warstwy, przez którą przechodzi potencjalna powierzchnia poślizgu (MPW), a stosowanie metody parametrów uśrednionych MPU należy ograniczyć jedynie do przypadków mało zróżnicowanych parametrów geotechnicznych poszczególnych warstw.

Literatura

1. Fellenius W.: *Erdstatische berechnungen*. W. Ernst und Sohn, Berlin 1927
2. PN-83/B-03010: *Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*
3. Konkol J.: Wyznaczenie położenia najniekorzystniejszych osi obrotu dla jednorodnych skarp oraz cylindrycznych powierzchni poślizgu. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 6, 2000, s. 331-339
4. Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A.: *Zapory ziemne*. Arkady, Warszawa 1973
5. Dembicki E., Tejchman A.: *Wybrane zagadnienia fundamentowania budowli hydrotechnicznych*. PWN, Warszawa-Poznań 1981
6. Głazer Z.: *Mechanika gruntów*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1985
7. Przewłócki J.: Kilka uwag o ocenie stateczności zboczy. Cz. I. Analiza deterministyczna. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2, 2004, s. 89-97
8. DIN 4017. Teil 1. Beiblatt. Baugrund. Grundbruchberechnungen von lotrecht mittig belasten Flachgründungen. Erläuterungen und Berechnungsbeispiele
9. Konkol J., Szyszka J.: *Stateczność skarp i zboczy w ujęciu komputerowym*. Mat. Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Problemy teorii i praktyki budownictwa”, t. IV, Lwów 1997
10. Konkol J.: *STATGRUNT. Program komputerowy, 1997*. Załącznik 1. do pracy dyplomowej J. Konkola. Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Rzeszów 1997

COMPARISON OF METHODS OF SUBSOIL HETEROGENEITY CONSIDERATION IN SLOPES STABILITY ANALYSIS

Summary

Comparison of two methods (MPW and MPU), enabling to check stability of ground slopes for given geometrical and geotechnical parameters, has been realized in the work, assuming cylinder surface of the slide and heterogeneous subsoil.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w czerwcu 2008 r.