

Zenon PILECKI*, Jacek STANISZ*, Krzysztof KRAWIEC*, Henryk WOŹNIAK**,
Eiżbieta PILECKA***

Numeryczna analiza stateczności skarp i zboczy z wykorzystaniem metody zbiorów losowych

Streszczenie: W artykule omówiono zagadnienie dotyczące poprawy wiarygodności analizy stateczności skarp i zboczy w wyniku zastosowania metody zbiorów losowych w doborze parametrów fizyczno-mechanicznych. W praktyce inżynierskiej do analiz stateczności skarp i zboczy, przyjmuje się uśrednione wartości parametrów lub wartości najbardziej niekorzystne. Rozwiązanie takie nie jest korzystne, gdyż może prowadzić do niewłaściwego zaprojektowania konstrukcji zabezpieczenia osuwiska. Naturalna zmienność parametrów charakteryzujących ośrodek geologiczny, a zwłaszcza utworów fliszowych, oraz błędy ich oznaczenia, wskazują na potrzebę analizy zakresów ich wartości. Umożliwia to metoda zbiorów losowych, coraz szerzej wykorzystywana w rozwiązywaniu zadań geoinżynierskich. W artykule scharakteryzowano podstawy teoretyczne metody zbiorów losowych. Opracowano algorytm obliczeniowy z uwzględnieniem numerycznej analizy stateczności metodą różnic skończonych. Przedstawiono przykład analizy stateczności zbocza zbudowanego z utworów fliszu karpackiego, położonego w pobliżu zbiornika Świnna Poręba. Otrzymane wyniki różnią się od wyników obliczeń bazujących na parametrach średnich i wskazują na ich większą przydatność dla konstruktora budowlanego. W podsumowaniu podkreślono zalety i ograniczenia numerycznej analizy stateczności z wykorzystaniem metody zbiorów losowych.

Słowa kluczowe: analiza stateczności skarp i zboczy, modelowanie numeryczne, metoda zbiorów losowych, analiza parametryczna, dobór parametrów wejściowych, niepewność

Numerical stability analysis of slope with use of Random Set Theory

Abstract: The article concerns improving the reliability of slope stability analysis using Random Set Theory to select the geotechnical properties. In engineering practice, when analyzing slope stability the average values or the most unfavorable parameters are assumed. Such a solution, however, is not preferred because it can lead to the design of improper protection measures against slopes. The natural variability of the parameters

* Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: kris@min-pan.krakow.pl

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*** Politechnika Krakowska, Kraków

characterizing the geological medium, especially flysch, and the errors in their determination, indicate the need to analyze the ranges of their values. The method of Random Set Theory, increasingly used in geoen지니어ing, makes it possible to solve that problem. This article describes the theoretical basis of Random Set Theory. It details the calculation algorithm, which incorporates numerical stability analysis based on the Finite Differences Method. Also presented is an example of stability analysis for a slope in flysch formations located near a lake in Swinna Poreba. It shows different results obtained when compared to standard calculations, and data more useful for construction engineers. In summary, the article highlights the advantages and limitations of numerical stability analysis with the use of Random Set Theory.

Key words: slope stability analysis, numerical modeling, random set theory, parametric analysis, input parameters selection, uncertainty

Wprowadzenie

Modelowania numeryczne są coraz częściej wykorzystywane w analizie stateczności skarp i zboczy (Zabuski i in. 1999; Dziewański i Pilecki 2002; Cała i Flisiak 2000; Stopkowicz i Cała 2004; Stanisław i in. 2012). Jednym z głównych problemów modelowania numerycznego jest przyjęcie właściwych parametrów wejściowych do obliczeń.

W praktyce inżynierskiej, w analizach stateczności skarp i zboczy przyjmuje się wartości charakterystyczne parametrów ośrodka geologicznego, które są średnią arytmetyczną z wyznaczonych wartości parametrów geotechnicznych, lub wartości obliczeniowe, które otrzymuje się z wartości charakterystycznych po uwzględnieniu współczynnika materiałowego (PN-81/B-03020), a często najbardziej niekorzystne wartości parametrów geotechnicznych. W przypadku złożonych ośrodków geologicznych, na przykład takich jak utwory fliszowe, podejście to może nie dawać wiarygodnych wyników obliczeń. Naturalna zmienność parametrów geotechnicznych oraz niepewność ich oznaczenia wskazują na potrzebę przeprowadzenia tzw. analizy parametrycznej. Analizę taką, z przypisaniem konkretnej miary prawdopodobieństwa dla określonego zakresu możliwych zmian wartości parametru, można przeprowadzić metodą zbiorów losowych (Sysik i Siemińska 2006; Nasekhian i Schweiger 2010; Hall i in. 2004; Schweiger i Peschl 2007).

Interesującą ocenę zastosowania metody zbiorów losowych w analizie stateczności zbocza przedstawili Hall i inni (2004). Zastosowanie tej metody uzasadnili potrzebą uwzględnienia niepewności w wyznaczeniu parametrów charakteryzujących warunki wodno-gruntowe ośrodka. Przeprowadzili oni złożone obliczenia numeryczne zakładając, że ośrodek można opisać modelem sprężysto-plastycznym z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra. W obliczeniach uwzględniali wpływ opadów atmosferycznych, przepływu wody i zawodnienia na zachowanie się badanego ośrodka. Analizowali dziewięć parametrów charakteryzujących ośrodek, pochodzących z czterech różnych źródeł informacji. W wyniku obliczeń otrzymali granice rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia danej wartości współczynnika bezpieczeństwa. W podsumowaniu podkreślili przydatność metody zbiorów losowych do analizy prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska w odniesieniu do nieprecyzyjnej informacji o parametrach wejściowych do obliczeń stateczności zbocza.

W artykule omówiono podobne zagadnienie do przedstawionego w pracy Halla (Hall i in. 2004) związane z obliczeniem prawdopodobieństwa wystąpienia wartości współczynnika bezpieczeństwa dla stwierdzonego osuwiska, z zastosowaniem metody zbiorów losowych. Różnica polegała na tym, że numeryczną analizę stateczności przeprowadzono porównując

wyniki obliczeń otrzymane dla przedziałów wartości parametrów wejściowych zestawionych zgodnie z metodą zbiorów losowych oraz dla średnich arytmetycznych z wartości wszystkich parametrów wejściowych. Obliczenie przeprowadzono dla zbadanego osuwiska od strony geologiczno-inżynierskiej, które powstało w warunkach typowych dla fliszu karpackiego, położonego w Mucharzu w pobliżu zbiornika wodnego Świnna Poręba (Gaszyński i in. 2005).

W części wstępnej artykułu scharakteryzowano podstawy teoretyczne metody zbiorów losowych. Omówiono również metodykę numerycznej analizy stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem metody zbiorów losowych. Metodykę tę zilustrowano schematem blokowym. W podsumowaniu podkreślono zalety i ograniczenia numerycznej analizy stateczności z zastosowaniem metody zbiorów losowych.

1. Podstawy teoretyczne metody zbiorów losowych

Podstawy teoretyczne metody zbiorów losowych były szczegółowo opisywane w pracach wielu autorów (np. Debois i Prade 1991; Tonon i in. 2000; Schweiger i Peschl 2007; Hall i in. 2004). Rozwój tej metody został zapoczątkowany w połowie lat siedemdziesiątych XX wieku (Tonon i Bernardini 1998). Metoda ta w dużym uproszczeniu służy do matematycznego opisu niepewności związanej z określeniem wartości parametrów wejściowych do różnego rodzaju obliczeń. Wobec takich trudności, metoda pozwala na przypisanie konkretnej miary prawdopodobieństwa wystąpienia wielkości obliczeniowej dla określonego zakresu możliwych zmian wartości parametru wejściowego. W metodzie zbiorów losowych jest możliwość uwzględnienia różnych źródeł informacji o parametrach.

Metoda zbiorów losowych znajduje zastosowanie w różnego rodzaju relacjach funkcyjnych (Tonon i in. 2000). Niech g będzie odwzorowaniem $X_1 \times \dots \times X_N \rightarrow Y$, a $x_1 \times \dots \times x_N$ zmiennymi, których wartości nie są całkowicie znane. Niepełna wiedza na temat $x = (x_1, \dots, x_N)$ może być wyrażona w postaci relacji losowej \mathfrak{R} , którą jest zbiór losowy (\mathfrak{F}, m) oparty na iloczynie kartezjańskim zbiorów $X_1 \times \dots \times X_N$. Zbiór losowy (\mathfrak{R}, ρ) , który jest obrazem (\mathfrak{F}, m) w odwzorowaniu można przedstawić jako:

$$\mathfrak{R} = \{R_j = g(A_i), (A_i) \in \mathfrak{F}\}, \quad g(A_i) = \{g(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in A_i\}$$

$$\rho(R_j) = \sum_{A_i: R_j = g(A_i)} m(A_i)$$

Jeśli A_1, \dots, A_n są odpowiednio zbiorami $X_1 \times \dots \times X_N$ i $x_1 \times \dots \times x_N$ są niezależne, to połączone podstawowe prawdopodobieństwo wartości wynikowej $m(A_1 \times \dots \times A_n)$ jest dane przez:

$$m(A_1 \times \dots \times A_n) = \prod_{i=1}^n m_i(A_i), \quad A_1 \times \dots \times A_n \in \mathfrak{R}$$

Jeśli element A_i jest zamkniętym przedziałem liczb rzeczywistych: $A_i = \{x | x \in [l_i, u_i]\}$ to funkcje dolnej $P_*(x)$ i $P^*(x)$ górnej granicy skumulowanego prawdopodobieństwa można otrzymać ze wzorów (Schweiger i Peschl 2005):

$$P_*(x) = \sum_{i: x \geq u_i} m(A_i)$$

$$P^*(x) = \sum_{i: x \geq l_i} m(A_i)$$

Metoda zbiorów losowych daje możliwość obliczenia górnej i dolnej granicy prawdopodobieństwa wystąpienia danej wielkości obliczeniowej lub dla konkretnej wartości prawdopodobieństwa pozwala wyznaczyć przedział wartości wielkości obliczeniowej oraz odpowiadający mu zestaw parametrów wejściowych (Tonon i in. 2000).

2. Metodyka numerycznej analizy stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem metody zbiorów losowych

Sposób numerycznej analizy stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem metody zbiorów losowych zilustrowano schematem obliczeniowym przedstawionym na rysunku 1.

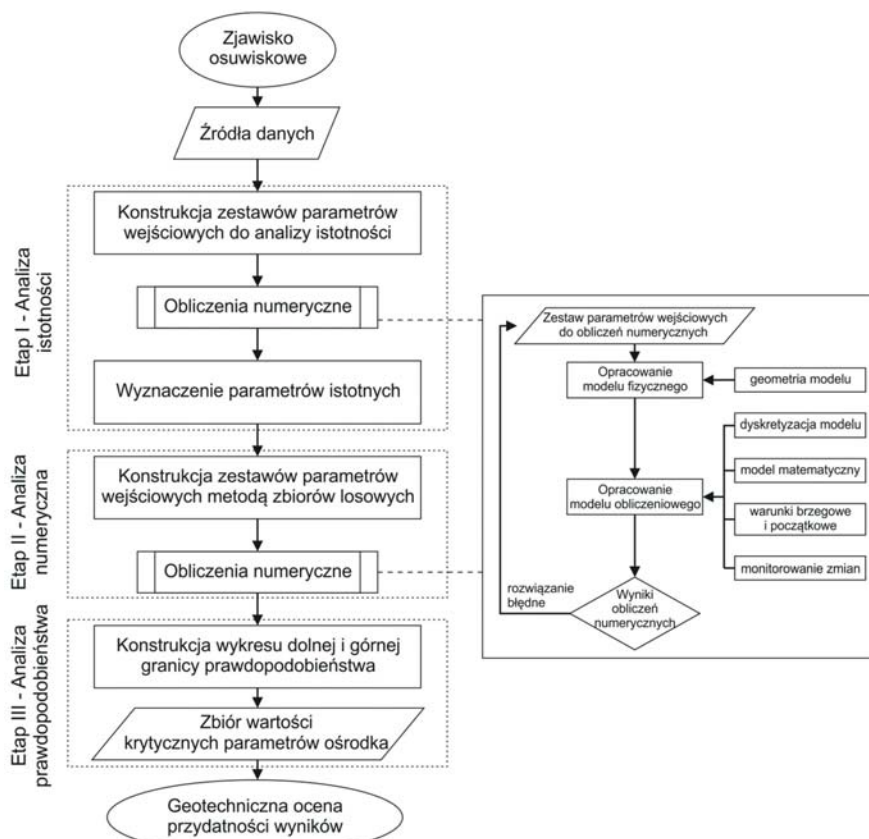
Algorytm podzielono na trzy główne części: analizę istotności, analizę numeryczną oraz analizę prawdopodobieństwa wystąpienia wyników obliczeń.

Analiza istotności

Analiza istotności ma na celu ocenę wpływu parametrów fizyczno-mechanicznych na wyniki obliczeń. Wyznacza się tzw. istotne parametry wejściowe, które służą do opracowania zestawów wartości parametrów wejściowych do podstawowych obliczeń.

Metoda zbiorów losowych wymaga obliczeń dla wszystkich kombinacji wartości minimalnych i maksymalnych parametrów pochodzących z różnych źródeł. Dane o wartościach parametrów mogą pochodzić z badań terenowych, badań laboratoryjnych, danych literaturowych lub opinii eksperta. W celu redukcji liczby zestawów parametrów oblicza się współczynnik istotności. Jest on stosunkiem względnej zmiany wartości wielkości wynikowej do względnej zmiany wartości konkretnego parametru wejściowego (Sysik i Siemińska-Lewandowska 2006). Poprzez normalizację tego współczynnika obliczonego dla każdego z parametrów można wyznaczyć całkowitą istotność danego parametru wyrażoną w procentach. W efekcie opracowuje się zestawy parametrów wejściowych do obliczeń, składające się z parametrów istotnych w postaci minimalnej i maksymalnej ich wartości oraz parametrów nieistotnych w postaci wartości średniej arytmetycznej. Liczba zestawów n_c jest określona wzorem (Tonon i in. 2000):

$$n_c = 2^N \prod_{i=1}^N n_i$$



Rys. 1. Algorytm numerycznej analizy stateczności skarp i zboczy z zastosowaniem metody zbiorów losowych
 Fig. 1. The algorithm of numerical stability analysis of slope using the random set theory

gdzie:

- N – liczba parametrów istotnych,
- n – liczba źródeł informacji o parametrach.

Analiza numeryczna

Analiza numeryczna ma na celu wyznaczenie współczynników bezpieczeństwa obliczanych, w przypadku przedstawionego rozwiązania, na podstawie zmian prędkości odkształcania ośrodka (Cała i Flisiak 2000; *FLAC* 2007), dla różnych zestawów wartości parametrów wejściowych określonych zgodnie z metodą zbiorów losowych. Wyznacza się kombinacje maksymalnej i minimalnej wartości parametrów pochodzących z różnych źródeł informacji. Wartości mniej istotnych parametrów, wchodzących w skład parametrów wejściowych przyjmuje się jako średnie arytmetyczne. Konstruuje się model numeryczny na podstawie danych geologiczno-inżynierskich i innych badań. Wprowadza się siatkę obliczeniową oraz warunki brzegowe i początkowe. Określa się również model matematyczny obliczeń oraz w razie potrzeby monitorowanie zmian wielkości w określonych punktach modelu.

Analiza prawdopodobieństwa

Przeprowadza się analizę prawdopodobieństwa wystąpienia współczynnika bezpieczeństwa F_S jako wielkości wynikowej. Obejmuje ona konstrukcję wykresu największego i najmniejszego prawdopodobieństwa wystąpienia F_S . Wyznaczając prawdopodobieństwo wystąpienia konkretnej wartości F_S wyznacza się zestaw wartości parametrów wejściowych, dla których obliczono tę wartość. W przypadku, gdy wartości F_S wskazują na utratę stateczności skarpy lub zbocza, wówczas taki zestaw nazywa się zestawem krytycznych wartości parametrów wejściowych.

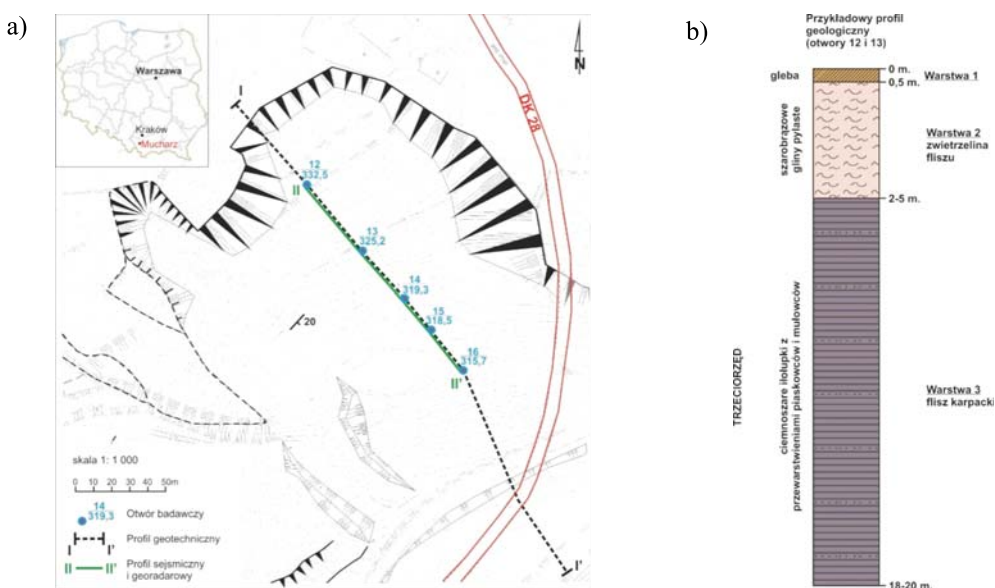
3. Przykład numerycznej analizy stateczności osuwiska z zastosowaniem metody zbiorów losowych

Położenie i warunki geologiczno-inżynierskie osuwiska

Osuwisko w Mucharzu znajduje się u podnóża Tarnowskiej Góry (503 m n.p.m.) w powiecie wadowickim (rys. 2). Występuje ono w obrębie jednostki fizyczno-geograficznej – Pogórze Śląskie (Kondracki 1994). Ukształtowanie terenu jest charakterystyczne dla Beskidu Małego, gdzie deniwelacje osiągają 200 m (Starkel 1972).

Na podstawie badań geologiczno-inżynierskich, geotechnicznych i geofizycznych w obrębie osuwiska wyróżniono trzy warstwy główne (Gaszyński i in. 2005; Gaszyński i in. 2006):

- warstwa I – utwory koluwalne zwiertzelinowej pokrywy czwartorzędowej – wykształcone w postaci glin pylastych, glin pylastych zwięzłych i glin ze zwiertzeliną



Rys. 2. Lokalizacja osuwiska wraz z położeniem otworów badawczych i profili geofizycznych (a) oraz profilem geologicznym (b) (Gaszyński i in. 2005)

Fig. 2. Location of the landslide with the position of boreholes, geophysical survey profiles (a) and geological profile (b) (Gaszyński et al. 2005)

i domieszką innych gruntów (pyły, piaskowce, łożupki oraz łupki ilaste), w twaroplastycznym stanie konsystencji. Tę warstwę rozpoznano na głębokościach od 2,0 do 6,1 m. W centralnej części osuwiska oraz u podnóża zbocza warstwa przechodzi w utwory, w plastycznym i miękkoplastycznym stanie konsystencji,

- warstwa II – utwory koluwalne obejmujące kompleks łupkowo-piaskowcowy, we wszystkich stanach konsystencji. Miąższość kompleksu w centralnej części przekracza 10 m. Strop warstwy zalega na głębokości od 4,6 do 18 m,
- warstwa III – podłoże fliszowe – w jej skład wchodzi piaskowce i łożupki, a głębiej łupki ilaste o konsystencji zwartej.

Na podstawie badań geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych (Gaszyński i in. 2005, 2006) wyznaczono przedziały wartości parametrów fizyczno-mechanicznych dla wyróżnionych warstw geotechnicznych, które zestawiono w tabeli 1, oznaczając ich pochodzenie jako źródło danych I. W tabeli 1 zestawiono również wartości parametrów oznaczonych jako źródło danych II na podstawie danych z pracy Zabuskiego i in. (1999) oraz opinii eksperta.

TABELA 1. Parametry fizyczno-mechaniczne przyjęte do numerycznej analizy stateczności osuwiska w Mucharzu

TABLE 1. Physical and mechanical properties assumed to numerical stability analysis of landslide in Mucharz

Warstwa geotechniczna	Źródło danych	Prawdopodo bieństwo	Gęstość objętościowa [kg/m ³]			Spójność [kPa]			Kąt tarcia wewnętrznego [deg]		
			min	max	średnia	min	max	średnia	min	max	średnia
Warstwa I Gлина pylasta (Gπ)	I*	0,5	1970	2080	2015	9,6	19,0	9,5	12,8	15,0	20,0
	II**	0,5	1950	2050		0,0	16,0		10,0	30,0	
Warstwa II Zwierzczelina fliszu (Zf)	I*	0,5	1890	2210	2070	0,0	15,4	22,0	8,7	16,9	19,0
	II**	0,5	1900	2250		3,0	44,0		4,0	34,0	
Warstwa III Flisz karpacki (Fk)	I*	0,5	2150	2390	2220	13,0	28,0	65,0	13,0	28,0	20,5
	II**	0,5	2050	2350		10,0	120,0		17,0	23,0	

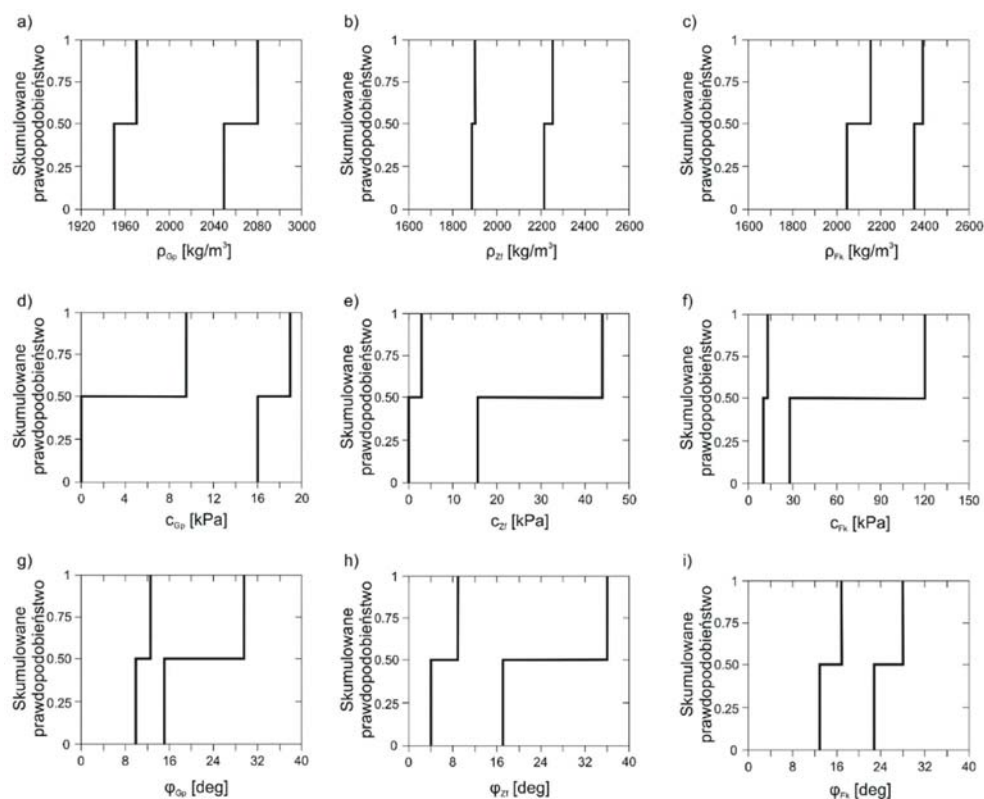
* Źródło danych I – Gaszyński i in. 2005, Gaszyński i in. 2006,

** Źródło danych II – Zabuski i in. (1999), opinia eksperta.

Analiza istotności

Analizę istotności przeprowadzono dla parametrów wejściowych opracowanych zgodnie z założeniami metody zbiorów losowych z wykorzystaniem obliczeń numerycznych wykonanych w programie *FLAC* v. 7.0 (rys. 1). W obliczeniach każde ze źródeł informacji potraktowano jako jednakowo prawdopodobne, przypisując im prawdopodobieństwo wystąpienia równe 0,5. Dało to możliwość przedstawienia poszczególnych zakresów wartości parametrów w formie zbiorów losowych z przyporządkowanym prawdopodobieństwem ich wystąpienia (rys. 3). Liczba zestawów parametrów do obliczeń przy dziewięciu parametrach i dwóch źródłach informacji wynosi 6561.

W przeprowadzonej analizie przyjęto 7% próg istotności parametrów (rys. 4). W efekcie wyróżniono cztery istotne parametry: spójność, gęstość objętościową i kąt tarcia wewnętrznego gliny pylastej warstwy I oraz kąt tarcia wewnętrznego zwierzczeliny fliszowej.



Rys. 3. Parametry wejściowe: gęstość objętościowa, spójność i kąt tarcia wewnętrzznego przedstawione w postaci zbiorów losowych dla każdej warstwy geotechnicznej: warstwa I (a, d, g); warstwa II (b, e, h); warstwa III (c, f, i)

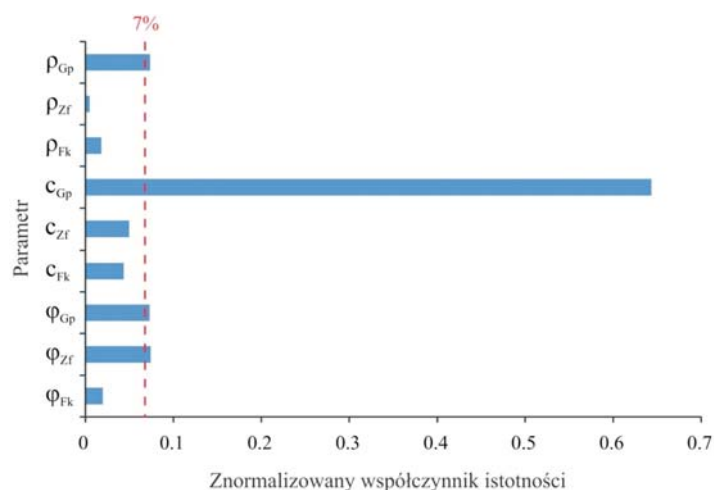
Fig. 3. Input data: volumetric density, cohesion and internal friction angle are presented as a random sets for each geotechnical layer: layer I (a, d, g); layer II (b, e, h); layer III (c, f, i)

Parametry te w dalszej części obliczeń były rozpatrywane w postaci przedziałów wartości, a dla pozostałych parametrów przyjęto średnie arytmetyczne z ich wartości.

Analiza numeryczna

Obliczenia numeryczne przeprowadzono metodą różnic skończonych (MRS) według schematu zaproponowanego przez Pileckiego (2010). Symulacje numeryczne zostały wykonane w płaskim stanie odkształcenia. Przyjęto model sprężysto-plastyczny, z uwzględnieniem kryterium wytrzymałościowego Coulomba-Mohra przy zastosowaniu stowarzyszonego prawa płynięcia. Naprężenie pionowe w modelu wzrasta liniowo wraz z głębokością.

Obliczenia wykonano za pomocą programu *FLAC v. 7.0*, który w najprostszym rozwiązaniu wymaga deklaracji jedynie trzech parametrów: gęstości objętościowej, spójności i kąta tarcia wewnętrzznego. Do obliczeń współczynnika bezpieczeństwa osuwiska wykorzystano metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (Cała i Flisiak 2003; *FLAC* 2007).



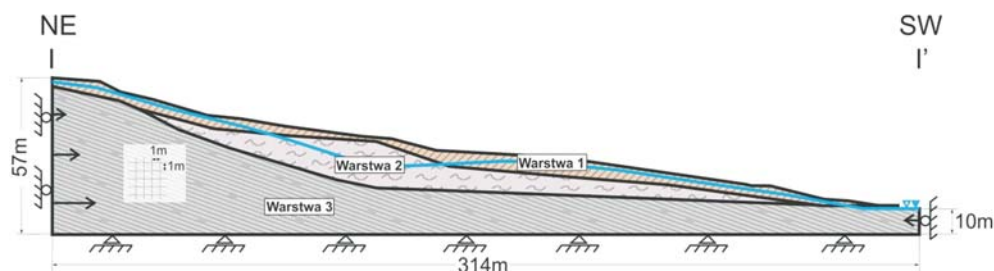
Rys. 4. Istotność parametrów fizyczno-mechanicznych w numerycznej analizie stateczności osuwiska w Mucharzu

Fig. 4. Total relative sensitivity of physical-mechanical parameters in the numerical stability analysis of landslide in Mucharz

Geometrię modelu fizycznego opracowano na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Gaszyński i in. 2005) zgodnie z podłużnym przekrojem I-I' przebiegającym przez centralną i południową część osuwiska (rys. 2). W modelu wyróżniono trzy warstwy geotechniczne oraz odwzorowano położenie poziomu wód gruntowych (rys. 5). Długość modelu wyniosła 314 metrów. Wysokości lewej i prawej ramki modelu wynosiły odpowiednio 57 i 10 metrów.

Sposób skrupowania modelu zilustrowano na rysunku 5. Warunki brzegowe wprowadzono w taki sposób, że na prawej i lewej ramce zablokowano możliwość przemieszczeń poziomych, a na dolnej pionowych. Linia określająca morfologię jest powierzchnią swobodną, w której przemieszczenia są dopuszczalne w każdym kierunku. Model poddano dyskretyzacji regularną siatką obliczeniową o rozmiarach 1×1 m.

Do obliczeń przyjęto zestawy parametrów wejściowych przedstawione w tabeli 2. Rezultatem symulacji numerycznych były izoliniowe obrazy prędkości odkształcenia ze



Rys. 5. Numeryczny model fizyczny i obliczeniowy osuwiska w Mucharzu

Fig. 5. Numerical physical and calculation model of landslide in Mucharz

TABELA 2. Kombinacje istotnych parametrów pochodzących z dwóch źródeł informacji

TABLE 2. Combination of sensitive input parameters from two sources of information

Numer kombinacji	Kombinacje istotnych parametrów pochodzących ze źródła I i II			
	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(I)$
1	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(I)$
2	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(II)$
3	$\rho_{Gp}(II)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(I)$
4	$\rho_{Gp}(II)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(II)$
5	$\rho_{Gp}(II)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(I)$
6	$\rho_{Gp}(II)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(II)$
7	$\rho_{Gp}(II)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(I)$
8	$\rho_{Gp}(II)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(II)$
9	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(I)$
10	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(II)$
11	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(I)$
12	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(I)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(II)$
13	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(I)$
14	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(I)$	$\varphi_{Zf}(II)$
15	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(I)$
16	$\rho_{Gp}(I)$	$c_{Gp}(II)$	$\varphi_{Gp}(II)$	$\varphi_{Zf}(II)$

TABELA 3. Zestawy parametrów wejściowych do obliczeń numerycznych dla kombinacji nr 1

TABLE 3. Set of the input parameters for the numerical calculation of combination number 1

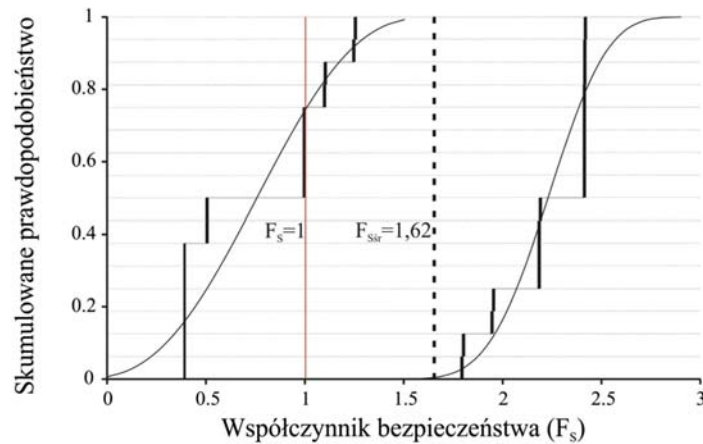
Numer zestawu		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Realizacje obliczeniowe (1-16)	Prawdopodobieństwo wystąpienia	Parametr	Numer źródła	DDDD*	DDDD	DDGD	DDGG	DGDD	DGDG	DGGD	DGGG	GDDD	GDDG	GDGD	GDGG	GGDD	GGDG	GGGD	GGGG
	0,5	ρ_{Gp} (kg/m ³)	I	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080
	0,5	c_{Gp} (kPa)	I	9,6	9,6	9,6	9,6	19,0	19,0	19,0	19,0	9,6	9,6	9,6	9,6	19,0	19,0	19,0	19,0
	0,5	φ_{Gp} (deg)	I	12,8	12,8	15	15	12,8	12,8	15	15	12,8	12,8	15	15	12,8	12,8	15	15
0,5	φ_{Zf} (deg)	I	8,7	16,9	8,7	16,9	8,7	16,9	8,7	16,9	8,7	16,9	8,7	16,9	8,7	16,9	8,7	16,9	16,9

*D oznacza minimalną, dolną wartość parametru, G oznacza maksymalną, górną wartość parametru

ścianania (ang. *shear strain rate*) oraz obliczenia globalnego współczynnika bezpieczeństwa (ang. *factor of safety*).

Analiza prawdopodobieństwa

W wyniku obliczeń dla każdej kombinacji otrzymano po 16 wartości współczynników bezpieczeństwa. W dalszej kolejności wybrano minimalną i maksymalną wartość współczynnika w każdym zbiorze. Wartości te posłużyły do skonstruowania dwóch wykresów: dolnej i górnej granicy prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnych wartości F_S . Na

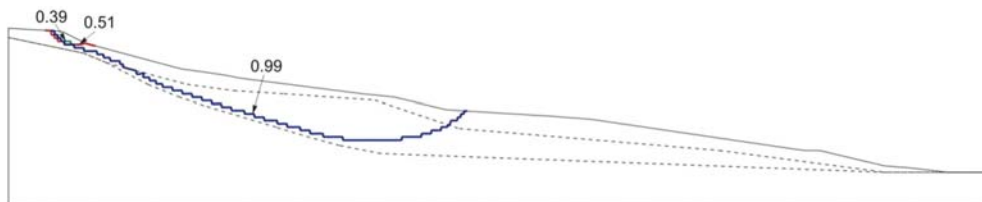


Rys. 6. Wykres funkcji dolnej i górnej granicy prawdopodobieństwa wystąpienia współczynnika bezpieczeństwa

Fig. 6. Plot of upper and lower probability distribution function

rysunku 6 wartości F_S zmieniają się w przedziale od 0,39 do 2,42. Każdej wartości F_S odpowiada na wykresie jedna kombinacja parametrów. Przybliżając dyskretnie rozkłady dolnej i górnej granicy prawdopodobieństwa ciągłą funkcją rozkładu beta wyznaczono prawdopodobieństwo utraty stateczności zbocza. Dla analizowanych zakresów wartości parametrów wejściowych prawdopodobieństwo utraty stateczności wynosi od 0 do 0,74 dla F_S mniejszego od 1.

Na rysunku 7 widać, że dwie najmniejsze obliczone wartości F_S (0,39 i 0,51) dotyczą lokalnej utraty stateczności. Największy zasięg o charakterze globalnej utraty stateczności osuwiska dotyczy $F_S = 0,99$. Wynik ten został obliczony dla następujących dwóch zestawów parametrów wejściowych: ($\rho_{Gp} = 2050 \text{ kg/m}^3$, $c_{Gp} = 9,6 \text{ kPa}$, $\varphi_{Gp} = 10^\circ$, $\varphi_{zf} = 4^\circ$) i ($\rho_{Gp} = 2080 \text{ kg/m}^3$, $c_{Gp} = 9,6 \text{ kPa}$, $\varphi_{Gp} = 10^\circ$, $\varphi_{zf} = 4^\circ$). Dla górnej granicy prawdopodobieństwa, F_S nie przyjmuje wartości mniejszych od 1. Na wykresie skumulowanego prawdopodobieństwa (rys. 6) linią przerywaną zaznaczono wartość współczynnika bezpieczeństwa obliczoną dla wariantu, w którym zestaw wszystkich parametrów wejściowych przyjmuje średnie arytmetyczne ich wartości. Wartość F_S wynosi 1,62 i nie wskazuje na utratę stateczności osuwiska.



Rys. 7. Przebiegi powierzchni poślizgu osuwiska w Mucharzu dla $F_S < 1$

Fig. 7. The course of failure surface of landslide in Mucharzu for $F_S < 1$

Podsumowanie

W praktyce inżynierskiej do analiz stateczności skarp i zboczy przyjmuje się uśrednione wartości parametrów lub wartości najbardziej niekorzystne. Rozwiązanie takie nie jest korzystne, gdyż może prowadzić do niewłaściwego zaprojektowania konstrukcji zabezpieczenia osuwiska. Naturalna zmienność parametrów charakteryzujących ośrodek geologiczny oraz niepewność ich oznaczenia, wskazują na potrzebę szerszej analizy uwzględniającej zmienność wartości parametrów.

W pracy omówiono zagadnienie dotyczące poprawy wiarygodności analizy stateczności osuwiska w wyniku zastosowania metody zbiorów losowych. W takiej analizie uzyskuje się różne rozwiązania w zależności od wartości współczynnika bezpieczeństwa. W ogólności zastosowanie metody zbiorów losowych daje możliwość obliczenia górnej i dolnej granicy prawdopodobieństwa wystąpienia danego wyniku lub dla konkretnej wartości prawdopodobieństwa pozwala wyznaczyć przedział wynikowy oraz odpowiadający mu zestaw parametrów wejściowych.

Przedstawiony przykład analizy stateczności dla osuwiska w utworach fliszu karpackiego pokazuje, że wyniki obliczeń bazujące na parametrach średnich różnią się od wyników obliczeń z zastosowaniem metody zbiorów losowych. W pierwszym przypadku uzyskano wartość $F_S = 1,62$ wskazującą na brak utraty stateczności, natomiast w drugim przypadku uzyskano różne wartości współczynnika bezpieczeństwa od 0,39 do 2,42 z określonym prawdopodobieństwem wystąpienia, w tym wskazujące na utratę stateczności o charakterze lokalnym i globalnym.

Istotnym ograniczeniem przedstawionego schematu obliczeniowego jest jego pracochłonność związana z dużą liczbą obliczeń wzrastającą w miarę komplikowania modelu obliczeniowego oraz wzrostu liczby źródeł informacji. Należy również podkreślić potrzebę właściwego doświadczenia i wiedzy w przeprowadzeniu obliczeń numerycznych, a zwłaszcza w interpretacji uzyskanych wyników.

Literatura

- [1] Cała, M. i Flisiak, J. 2000. Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. *XXIII ZSMG*. Wydawnictwo KGBiG. Kraków, s. 27–37.
- [2] Cała, M. i Flisiak, J. 2003. Analiza stateczności skarp z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. *XXVI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, s. 348–354.
- [3] Dubois, D. i Prade, H. 1991. Random sets and fuzzy interval analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 42, 87–101.
- [4] Dziewański, J. i Pilecki, Z. 2002. *Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach*. Studia, Rozprawy, Monografie 109, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [5] *FLAC*. Users Manual. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, 2007.
- [6] Gaszyński, J., Pabian, Z., Zapał, A., Broniatowska, M., Łach, K., Borys, M., Gaszyńska-Freiwald, G., Posłajko, M. i Wawok, M. 2005. *Dokumentacja geologiczno-inżynierska osuwisk dla potrzeb projektowania zabezpieczeń drogi nr 28 na odcinku Mucharz–Tarnawa Dolna w ramach zadania Budowa Zbiornika Wodnego Świnna Poręba*. Kraków (praca niepublikowana).
- [7] Gaszyński, J., Pabian, Z., Posłajko, M. i Zapał, A. 2006. Analiza warunków geotechnicznych terenów osuwiskowych na trasie projektowanej drogi nr 28 Mucharz–Tarnawa Dolna w rejonie budowy zbiornika wodnego Świnna Poręba. *Mat. XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej*, s. 367–377.

- [8] Hall, J.W., Rubio, E. i Anderson, M.J. 2004. Random sets of probability measures in slope hydrology and stability analysis. *ZAMM: J Appl Math Mech.* 84(10–11), s. 710–20.
- [9] Kondracki, J. 1994. *Geografia Polski Mezoregiony fizyczno-geograficzne*. Wyd. PWN, Warszawa.
- [10] Nasekhian, A. i Schweiger, H.F. 2010. Random set finite element method application to tunneling. M. Beer, R.L. Muhanna, R.L. Mullen (Eds.), Proceedings of the 4th international workshop on reliable engineering computing (REC2010), robust design – coping with hazards, risk and uncertainty. Research Publishing, Singapore, s. 369–385.
- [11] Norma PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [12] Pilecki, Z. 2010. Identyfikacja etapów modelowania numerycznego w zastosowaniach geoinżynierskich. *Mat. Konf. Nauk. XIV Warsztaty Górnicze*, Hucisko, 16–18 czerwca 2010. Materiały elektroniczne.
- [13] Schweiger, H.F. i Peschl, G.M. 2005. Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics* 32, s. 422–435.
- [14] Schweiger, H.F. i Peschl, G.M. 2007. Basic Concepts and Applications of Random Sets in Geotechnical Engineering. Book Series CISM International Centre for Mechanical Sciences, (eds.) D.V. Griffiths & G.A. Fenton Vol 491, s. 113–126.
- [15] Stanisz, J., Pilecki, Z. i Woźniak, H. 2012. Wybrane zagadnienia numerycznej analizy stateczności osuwiska w Swoszowicach. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* Nr 2, s. 77–89.
- [16] Starkel, L. 1972. Karpaty Zewnętrzne. [W:] Klimaszewski M. (red.). *Geomorfologia Polski*. T. 1. *Polska Południowa – góry i wyżyny*. Wyd. PWN, Warszawa, s. 52–115.
- [17] Stopkowicz, A. i Cała, M. 2004. Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych. *Mat. Konf. XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej*. Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków, s. 519–530.
- [18] Sysik, P. i Siemińska-Lewandowska, A. 2006. Zastosowanie metody zbiorów losowych do obliczeń tunelu budowanego nową metodą austriacką (NATM). *Górnictwo i Geoinżynieria* nr 3/1, s. 1–5.
- [19] Tonon, F. i Bernardini, A. 1998. A random set approach to the optimization of uncertain structures. *Computers and Structures* 68 (6) (1998), s. 583–600.
- [20] Tonon, F., Bernardi, A. i Mammio, A. 2000. Determination of parameters in rock engineering by means of Random Set Theory. *Reliability Engineering and System Safety* 70, s. 241–261. DOI:10.1016/S0951-8320(00)00058-2.
- [21] Zabuski, L., Thiel, K. i Bober, L. 1999. *Osuwiska we fliszu Karpat polskich*. Wyd. OBW PAN.

