ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 98 Nr kol. 1574

Jakub BATORY
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

PROBABILISTYCZNA ANALIZA STATECZNOŚCI NASYPU NA PODŁOŻU ORGANICZNYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono probabilistyczną analizę stateczności nasypu na przykładzie nasypu doświadczalnego w Antoninach. Podano w nim profile skorygowanej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu pomierzonej polową sondą krzyżakową. Porównanie współczynników stateczności uzyskanych z analizy deterministycznej i probabilistycznej wskazuje na konieczność stosowania metod probabilistycznych w obliczeniach stateczności, umożliwiających określenie ilościowego prawdopodobieństwa zniszczenia oraz uwzględnienie niepewności wytrzymałości na ścinanie podłoża organicznego.

PROBABILISTIC STABILITY ANALYSIS OF EMBANKMENT ON ORGANIC SOIL

Summary. The paper presents probabilistic stability analysis of embankment on organic subsoil using the example of test embankment in the Antoniny site. The profiles of undrained shear strength obtained from field vane tests are presented. Comparison of safety factors obtained from deterministic and probabilistic analyses indicates the necessity of application of probabilistic methods in stability analyses, what makes possible the evaluation of quantitative probability of failure and also taking into account uncertainties of undrained shear strength of organic subsoil.

1. Wprowadzenie

W fazie projektowania nasypu na gruntach organicznych jednym z podstawowych problemów obliczeniowych jest ocena stateczności. Z praktycznego punktu widzenia przy posadowieniu nasypów na podłożu organicznym najbardziej krytyczne warunki stateczności pojawiają się w okresie budowy.

W deterministycznych metodach oceny stateczności nasypów przyjmuje się, że stateczność jest zachowana, jeżeli współczynnik stateczności jest większy od jedności. W

praktycznych obliczeniach warunek ten sprowadza się najczęściej do tego, aby siły czy momenty utrzymujące nasyp w równowadze były większe od sił czy momentów dążących do jej naruszenia. Analiza powstałych awarii wykazuje jednak, że niektóre z nich wystąpiły wtedy, gdy współczynnik stateczności, obliczony na podstawie ustalonych parametrów, był większy od jedności (Knabe i Przewłócki 1990).

Niepewność oceny stateczności nasypów związana jest z brakiem pełnej informacji i zmiennością szeregu czynników wpływających na stateczność. Do głównych czynników należy zaliczyć niepewności dotyczące cech fizycznych i mechanicznych gruntu, zwłaszcza parametrów wytrzymałościowych, ciśnienia wody w porach, geometrii nasypu i budowy geologicznej podłoża, a także niepewności związanych z rodzajem modelu stosowanego do obliczeń. Można stwierdzić, że każdy z wymienionych czynników obarczony jest pewną wielkością niepewności, jednakże niektóre z nich mogą mieć niewielki wpływ na wyniki obliczeń.

W artykule na przykładzie nasypu doświadczalnego w Antoninach skoncentrowano się na przedstawieniu wpływu zmienności wytrzymałości na ścinanie podłoża organicznego na stateczność przy wykorzystaniu probabilistycznej analizy stateczności. Zastosowanie probabilistycznej analizy stateczności umożliwiło określenie ilościowego prawdopodobieństwa zniszczenia poprzez obliczenie prawdopodobieństwa zniszczenia P_F i wskaźnika niezawodności β (Knabe i Przewłócki 1990). Obliczeń stateczności nasypu dokonano przy użyciu programu Geo-Slope i wykorzystaniu metody Monte Carlo, przedstawiając zmienność wytrzymałości przy użyciu rozkładu normalnego, podając wartość średnią i odchylenie standardowe wytrzymałości na ścinanie (Geo-Slope 1997).

Prawdopodobieństwo zniszczenia P_F jest prawdopodobieństwem uzyskania współczynnika stateczności mniejszego niż 1, a w programie Geo-Slope obliczane jest poprzez całkowanie powierzchni poniżej krzywej opisującej funkcję gęstości prawdopodobieństwa przy współczynniku stateczności mniejszym niż 1. Wskaźnik β natomiast obliczany jest według szeroko stosowanego i ogólnie przyjętego wzoru (CUR 1996), (Xu i Chowdhury 1999):

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F}, \tag{1}$$

gdzie:

σ_F – odchylenie standardowe współczynnika stateczności,

μ_F – średnia wartość współczynnika stateczności.

2. Charakterystyka obiektu doświadczalnego Antoniny

Nasyp doświadczalny w Antoninach został wykonany w ramach współpracy Katedry Geoinżynierii SGGW ze Szwedzkim Instytutem Geotechnicznym (Wolski i in. 1989), (Lechowicz 1992). Nasyp posadowiony na podłożu torfowo – gytiowym został zbudowany w trzech etapach w latach 1983-1987 do łącznej miąższości 3.9 m. W kolejnych etapach czas realizacji podwyższenia nasypu o 1.2, 1.3 i 1.4 m wynosił od jednego do dwóch tygodni. Przerwa technologiczna pomiędzy pierwszym a drugim etapem wyniosła 150 dni, pomiędzy drugim a trzecim 400 dni.

Podłoże organiczne o miąższości 7.8 m podścielane piaskiem drobnym składa się z amorficznego torfu o miąższości 3.1 m, oraz gytii węglanowej o miąższości 4.7 m i zawartości części organicznych 50 – 65% oraz węglanu wapnia 65 – 75%. Występujące w podłożu organicznym, oprócz ciśnienia hydrostatycznego, ciśnienie artezyjskie powoduje, że składowa pionowa naprężenia efektywnego przed obciążeniem jest stosunkowo mała. Grunty organiczne są prekonsolidowane o współczynniku prekonsolidacji OCR wynoszącym dla torfu 3 – 5, a dla gytii 1.5 – 2.5. Przyrost składowej pionowej naprężenia, wywołany etapową budową, powoduje istotne przekroczenie początkowej wartości naprężenia prekonsolidacji.

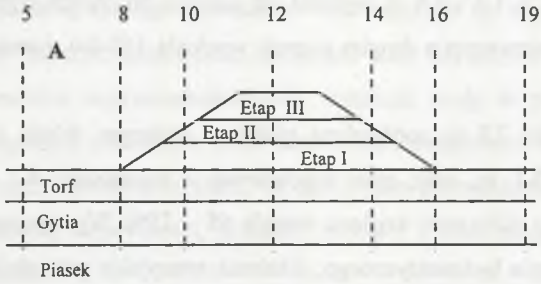
3. Analiza wyników badań wytrzymałości na ścinanie

Badania polową sondą krzyżakową są stosunkowo prostym sposobem pomiaru wytrzymałości na ścinanie w warunkach in situ. Uwzględniając różny zasięg oddziaływania końcówki krzyżakowej na ścinany grunt, wytrzymałość na ścinanie pomierzona w badaniach sondą krzyżakową, przed wykorzystaniem jej w obliczeniach projektowych, wymaga skorygowania poprzez wykorzystanie współczynnika poprawkowego μ:

$$\tau_{fu} = \mu \cdot \tau_{fv} \tag{2}$$

Przy projektowaniu obiektów na głębokim podłożu organicznym, w celu zweryfikowania współczynników poprawkowych zalecane jest przeprowadzenie porównania wyników badań terenowych i laboratoryjnych. W pracy wykorzystano współczynniki poprawkowe wyznaczone wg metody Swedish Geotechnical Institute (Larsson i in. 1984) oraz średnie współczynniki poprawkowe wyznaczone na podstawie badań: trójosiowych przy ściskaniu, rozciąganiu oraz prostego ścinania (Lechowicz 1992).

Lokalizację badań polową sondą krzyżakową oraz zestawienie wartości współczynników poprawkowych zaprezentowano na rysunku 1. Przykładowe wyniki badań przeprowadzone przed obciążeniem pierwszym etapem przedstawione w postaci pomierzonych oraz skorygowanych wartości wytrzymałości na ścinanie pokazano na rysunku 2. Średnie wartości skorygowanej wytrzymałości na ścinanie wyznaczono na podstawie wcześniej poddanych korekcie pomierzonych wartości wytrzymałości na ścinanie.

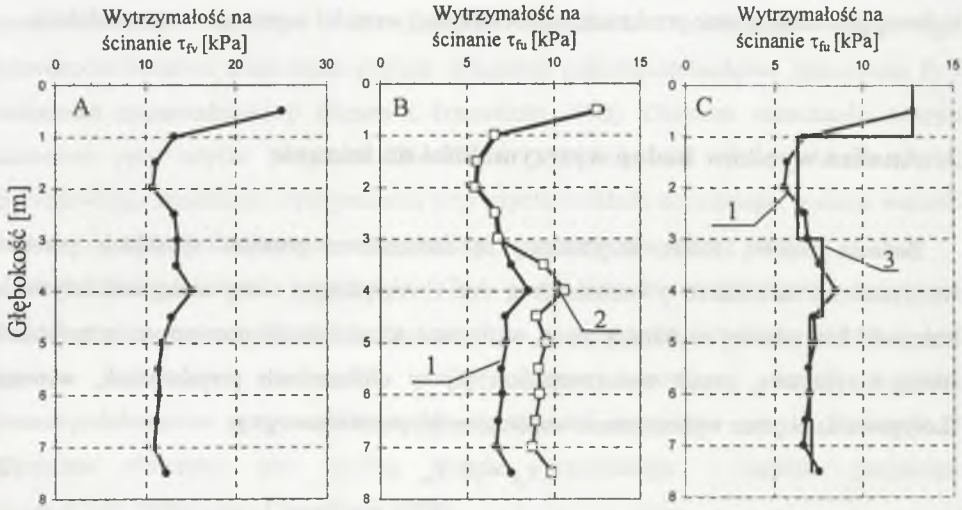


B

Grunt	$\mu(w_L)$	μ(lab)
torf	0.50	0.51
gytia (3.1 – 4.5m)	0.70	0.56
gytia (4.5 – 7.8m)	0.80	0.61

Rys. 1. Nasyp doświadczalny w Antoninach: A – lokalizacja badań polową sondą krzyżakową przed obciążeniem; B – zestawienie użytych współczynników poprawkowych

Fig. 1. Test embankment in the Antoniny site: A – location of field vane tests before embankment construction; B – values of correction factors



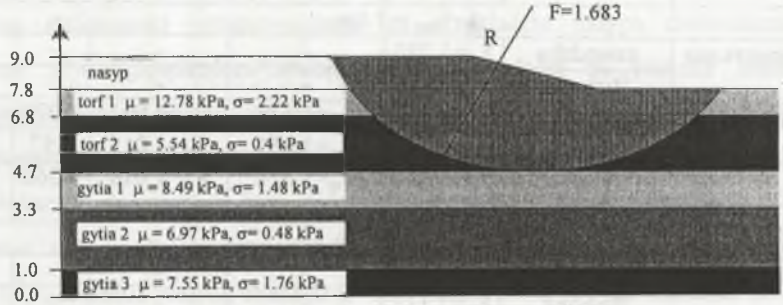
Rys. 2. Wyniki badań polową sondą krzyżakową przed obciążeniem pierwszym etapem: A – średnia wartość pomierzonej wytrzymałości na ścinanie; B – średnie wartości skorygowanej wytrzymałości przy wykorzystaniu współczynników poprawkowych: 1 – μ(lab), 2 – $\mu(w_L)$; C – podział podłoża na warstwy obliczeniowe: 1 – wytrzymałość skorygowana μ(lab), 3 – wartości przyjęte w analizie stateczności

Fig. 2. Results of field vane tests before loading at the first stage: A – average values of measured shear strength ; B – average values of undrained shear strength corrected by: 1 – μ(lab), 2 – $\mu(w_L)$; C – division of subsoil layers: 1 – shear strength corrected by μ(lab), 3 – values used in stability analysis

Obliczenia stateczności nasypu w Antoninach

Analizę stateczności nasypu w Antoninach z uwzględnieniem zmienności wytrzymałości na ścinanie podłoża organicznego przeprowadzono w warunkach naprężeń całkowitych dla pierwszego etapu obciążenia, tj. budowy nasypu do wysokości 1.2 m. Na podstawie skorygowanych wartości wytrzymałości na ścinanie wyznaczonych z badań polową sondą krzyżakową dokonano podziału podłoża na warstwy o jednakowej wytrzymałości na ścinanie τ_{fu}.

Schemat podziału podłoża organicznego wykorzystany w analizie stateczności nasypu, wraz z przyjętą średnią wartością wytrzymałości na ścinanie μ i odchyleniem standardowym σ, przedstawiono na rysunku 3. W obliczeniach użyta została wytrzymałość na ścinanie τ_{fu} skorygowana przy wykorzystaniu μ(lab) – do obliczeń przyjęto mniejsze wartości τ_{fu} w porównaniu z otrzymanymi po użyciu $\mu(w_L)$, a tym samym mniej korzystne warunki. Średnie wartości współczynników stateczności oraz maksymalne wartości otrzymane dla $\mu+5\sigma$ i minimalne dla $\mu-5\sigma$ zestawiono w tablicy 1.



Rys.3. Schemat obliczeniowy przyjęty w analizie stateczności wraz z przykładową powierzchnią poślizgu otrzymaną z metody szwedzkiej

Fig. 3. Calculation scheme used in the stability analysis with critical failure surface obtained by the Swedish method

Tablica 1

Wyniki analizy stateczności dla pierwszego etapu budowy

Analiza	Metoda	Współczynnik stateczności			β	P_F
		średni	maksymalny	minimalny		
Deterministyczna	szwedzka	F_m=1.683	-	-	-	-
	Bishopa	F_m=1.753	-	-	-	-
Probabilistyczna	szwedzka	F_m=1.684	F_m=2.084	F_m=1.199	5.47	10^{-6}
	Bishopa	F_m=1.753	F_m=2.161	F_m=1.254	5.881	10^{-6}
	Morgensterna – Price`a	F_m=1.742 F_f=1.739	F_m=2.155	F_m=1.254	5.911	10^{-6}

Porównanie otrzymanych współczynników stateczności z obu metod wskazuje, że nasyp podczas pierwszego etapu budowy jest stateczny. Uzyskany z analizy probabilistycznej wskaźnik niezawodności β i prawdopodobieństwo zniszczenia P_F wskazują, jak duży był zapas bezpieczeństwa. Dla budowli tej klasy ważności (niewielkie straty materialne na skutek zniszczenia oraz brak ryzyka utraty życia) przyjęto prawdopodobieństwo zniszczenia podczas budowy β=2.6 oraz $P_F=5.0\cdot10^{-3}$ (CUR 1996). We wszystkich użytych metodach otrzymano prawdopodobieństwo utraty stateczności $P_F=1\cdot10^{-6}$, co oznacza, że możliwa była budowa nasypu o większej wysokości.

Dla nasypu w Antoninach celem weryfikacji przyjętego harmonogramu budowy etapowej, w szczególności wartości przyłożonego obciążenia w pierwszym etapie, przeprowadzono również obliczenia stateczności dla trzech przypadków, tj. przy założeniu wysokości nasypu 1.6, 1.8 i 2.0 m. Otrzymane wyniki analizy stateczności dla wysokości 1.6 oraz 2.0 m zestawione zostały w tablicy 2.

Tablica 2

Wyniki analizy stateczności przy założeniu wysokości nasypu 1.6 i 2.0 m

Analiza	Metoda	Współczynnik stateczności			β	P_F
		średni	maksymalny	minimalny		
h_{nas} = 1.6m						
Deterministyczna	szwedzka	F_m=1.280	-	-	-	-
	Bishopa	F_m=1.346	-	-	-	-
Probabilistyczna	szwedzka	F_m=1.279	F_m=1.574	F_m=0.961	2.978	$1.4\cdot10^{-3}$
	Bishopa	F_m=1.347	F_m=1.653	F_m=1.015	3.57	$1.8\cdot10^{-4}$
	Morgensterna – Price`a	F_m=1.347 F_f=1.345	F_m=1.654	F_m=1.014	3.562	$1.8\cdot10^{-4}$
h_{nas} = 2.0m						
Deterministyczna	szwedzka	F_m=1.039	-	-	-	-
	Bishopa	F_m=1.111	-	-	-	-
Probabilistyczna	szwedzka	F_m=1.038	F_m=1.277	F_m=0.805	0.525	0.299
	Bishopa	F_m=1.108	F_m=1.36	F_m=0.859	1.397	0.081
	Morgensterna – Price`a	F_m=1.107 F_f=1.105	F_m=1.358	F_m=0.858	1.382	0.083

Analiza stateczności przy założonej wysokości nasypu 1.6 m wskazuje, że możliwe było wykonanie pierwszego etapu wyżej o 0.40 m od zrealizowanej wysokości nasypu doświadczalnego. Minimalny współczynnik stateczności mniejszy od jedności otrzymano tylko w metodzie szwedzkiej, która ze względu na liczne uproszczenia jest metodą najmniej dokładną. Należy jednak zauważyć, że według wszystkich metod uzyskane wielkości β i P_F spełniają wymagania stawiane tej klasie budowli. Natomiast otrzymane współczynniki stateczności w nasypie o wysokości 1.8 i 2.0 m wskazują, że podczas budowy nastąpi utrata

stateczności. Według wszystkich metod przy wysokości nasypu 2.0 m otrzymano wartości minimalnego współczynnika stateczności rzędu 0.8÷0.86 przy prawdopodobieństwie zniszczenia P_F=0.30 według metody szwedzkiej i P_F=0.08 według metody Bishopa.

4. Podsumowanie

Na niepewność oceny stateczności nasypu na podłożu organicznym ma wpływ wiele czynników, z których podstawowym jest zmienność wytrzymałości na ścinanie. Wytrzymałość na ścinanie określana jest na podstawie szeregu badań, na dokładność których wpływają czynniki, takie jak prędkość ścinania, rodzaj aparatury badawczej czy błędy pomiaru i inne. Zastosowanie probabilistycznej oceny stateczności umożliwia uwzględnienie zmienności wytrzymałości na ścinanie oraz obliczenie wskaźnika niezawodności β i prawdopodobieństwa zniszczenia P_F. Generalnie przyjmuje się, że w zależności od klasy budowli postulowany wskaźnik niezawodności β zmienia się w przedziale od 1.3 do 4.7, co odpowiada prawdopodobieństwu utraty stateczności w zakresie od 10^{-1} do 10^{-6}.

Analiza stateczności przeprowadzona na przykładzie nasypu doświadczalnego w Antoninach z uwzględnieniem zmienności wytrzymałości na ścinanie wskazuje, że wykorzystanie metody probabilistycznej umożliwia bardziej precyzyjną ocenę stateczności nasypu posadowionego na podłożu organicznym niż metody deterministyczne. Otrzymane wyniki wskazują, że możliwe było wykonanie pierwszego etapu o wysokości 1.6 m przy zachowaniu stateczności nasypu. Według metody szwedzkiej otrzymano β=2.98 oraz $P_F=1.4\cdot10^{-3}$, natomiast według Bishopa β=3.57 oraz $P_F=1.8\cdot10^{-4}$, co oznacza, że spełniono wymagania stawiane tej klasie budowli, tzn. β=2.6 oraz $P_F=5.0\cdot10^{-3}$ (CUR 1996).

LITERATURA

1.Bishop A.W.: The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique 5, 1955, p. 7-17.

2.CUR Reports: Building on soft soils. A. A. Balkema, Rotterdam 1996, p. 28-47.

3.Fellenius W.: Calculation of the stability of earth dams. Proc. Second Congress on Large Dams, 4, 1936, p. 445-463.

4.Geo-Slope: Instruction manual. Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canada 1997.

5.Knabe W., Przewłócki J.: Probabilistyczna ocena stateczności zboczy. PAN, Instytut Budownictwa Wodnego, Gdańsk 1990.

6.Larsson R., Bergdahl U., Eriksson L.: Evaluation of shear strength in cohesive soils with special reference to Swedish practice and experience. Swedish Geotechnical Institute, Information No. 3, 1984, p. 1-32.

7.Lechowicz Z.: Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Rozprawy Naukowe i Monografie, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 1992.

8.Morgenstern N.R., Price V.E.: Analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique 15, 1, 1965, p. 79-93.

9.Wolski W., Szymański A., Lechowicz Z., Larsson R., Hartlen J., Bergdahl U.: Full – scale failure test on stage – constructed test fill on organic soil. Swedish Geotechnical Institute, Linkoping, Report 36, 1989.

10.Xu D., Chowdhury R.: Probabilistic analysis of structured rock/soil slopes – Several methods compared. Slope Stability Engineering. Yagi, Yamagami & Jiang. Balkema, Rotterdam 1999.

Recenzent: Prof. zw. dr hab.inż. Eugeniusz DEMBICKI

Abstract

In general, it is inevitable that geotechnical engineers deal with uncertainties, which may be associated with subsoil mechanical properties and groundwater, when they conduct the stability assessment of embankments. However, the conventional deterministic approach for the embankment stability analysis cannot consider these uncertainties quantitatively. To avoid the limitation of the deterministic analysis approach, numerous geotechnical engineers have developed probabilistic methods for the stability assessment of embankments.

This paper presents stability analysis of test embankment on organic subsoil in the Antoniny site. Geo-Slope computer package was used to estimate the reliability index β and corresponding failure probability P_F. Results of stability analysis indicate a possibility of first stage construction up to the height of 1.6m. Values of β=3.57 and $P_F=1.8\cdot10^{-4}$ obtained from Bishop's method fulfil requirements for this class of structures, i.e. β=2.6 and $PF=5.0\cdot10^{-3}$ (CUR 1996).