

Eugeniusza ZAWISZA¹
Przemysław BARAN²
Marek CAŁA³

OBLICZENIA STATECZNOŚCI PODŁOŻA ZE SZLAMÓW POFLOTACYJNYCH OBCIĄŻONEGO ZWAŁEM Z ODPADÓW POWĘGLOWYCH

1. Wstęp

W procesie odzysku węgla ze zwałowisk odpadów powęglowych oraz po płucce w zakładach wzbogacania węgla w kopalni powstają duże ilości szlamów (odpadów poflotacyjnych) gromadzonych w osadnikach. Ze względu na ograniczone możliwości pozyskiwania terenu na zwałowanie odpadów powęglowych, zachodzi potrzeba, a niekiedy nawet konieczność, wykorzystania powierzchni wypełnionych osadników szlamów poflotacyjnych jako terenu zwałowiska. Szlamy stanowią materiał bardzo drobnoziarnisty, o zmiennej konsystencji zarówno w profilu pionowym, jak i na przestrzeni osadnika. Powoduje to zmienność parametrów fizycznych i mechanicznych szlamów. Określenie możliwości zwałowania na ich powierzchni gruboziarnistych odpadów powęglowych wymaga przeprowadzenia obliczeń stateczności w oparciu o oznaczone parametry geotechniczne szlamów.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy stateczności podłoża ze szlamów poflotacyjnych, obciążanego sukcesywnie warstwami zwału z odpadów powęglowych. Przyjęto jednakowy kąt nachylenia skarpy, natomiast grubość kolejnych warstw zwału była różna. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników obliczeń stateczności wykonanych dwiema metodami numerycznymi: elementów skończonych (MES) z wykorzystaniem programu komputerowego Z_SOIL.PC oraz różnic skończonych (MRS) z wykorzystaniem programu FLAC.

¹ Dr hab.inż., Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego Akademii Rolniczej w Krakowie

² Mgr inż., Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego Akademii Rolniczej w Krakowie

³ Dr inż., Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

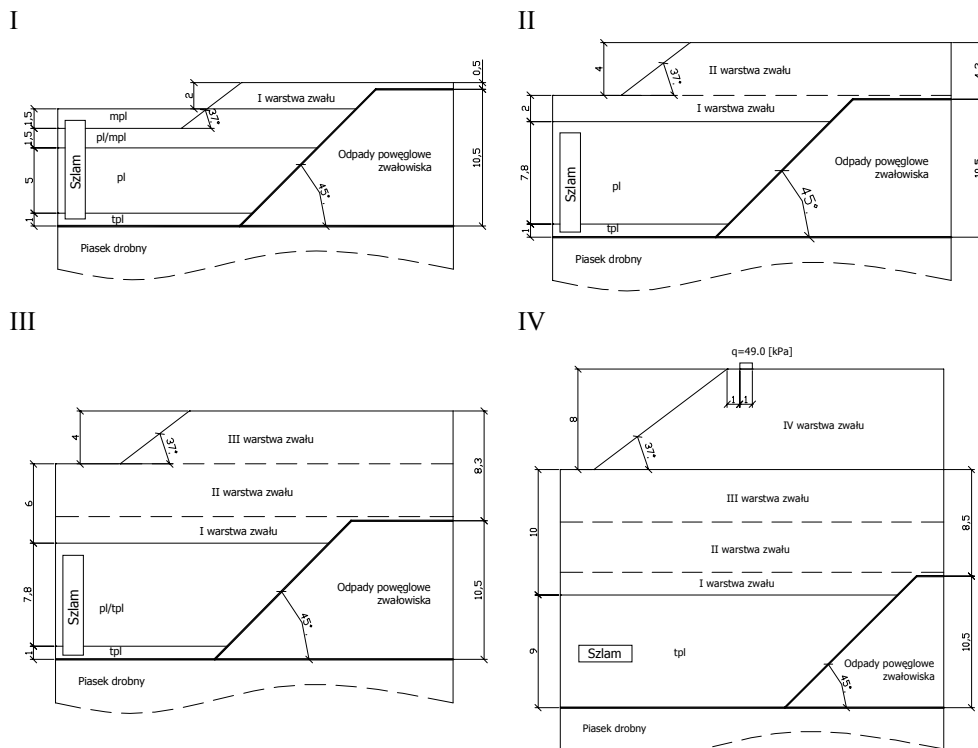
2. Założenia obliczeniowe

Założenia do obliczeń stateczności opracowano w oparciu o wyniki badań terenowych i laboratoryjnych [1] wykonanych na osadniku szlamów Zakładu Odzysku Węgla w Trachach (Gwarex-Ryan). Badania wykonano po około półrocznym okresie od zakończenia składowania szlamów w osadniku. Całkowita miąższość szlamu wynosi 9 m, przy czym wydzielono warstwy o różnej konsystencji i odpowiadających im parametrach wytrzymałościowych (tab. 1). Warstwa przypowierzchniowa do głębokości 1,5 m jest w stanie miękkoplastycznym, niżej do głębokości 3 m w stanie miękkoplastycznym na pograniczu plastycznego, następnie na głębokości 8 m w stanie plastycznym, a do głębokości 9 m w stanie twardoplastycznym (rys. 1). Podłoże rodzime stanowią zagęszczone piaski drobne.

Tablica 1. Parametry szlamu, odpadów powęglowych i gruntu podłoża oraz wymiary zwał u przyjęte do obliczeń stateczności.

Rodzaj odpadów i gruntu	Parametry			
	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Spójność [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego [°]	
Szlam w osadniku w stanie:				
- miękkoplastycznym	14,62	4	3	
- plastycznym na pograniczu miękkoplastycznego	15,60	7	5	
- plastycznym	15,99	7	7	
- plastycznym na pograniczu twardoplastycznego	15,99	10	15	
- twardoplastycznym	15,99	10	21	
Odpady powęglowe:				
- w zwałowisku (skarpa osadnika), zagęszczone	19,62	29	36	
- w formowanym zwale, niezagęszczone	17,17	10	33	
Grunt podłoża:				
- piasek drobny	17,66	0	30	
Wymiary skarpy zwał u	Wartości dla kolejnych warstw			
	I	II	III	IV
Wysokość [m]	2	4	4	8
Kąt nachylenia [°]	37	37	37	37

W koncepcji zazwałowania osadnika odpadami powęglowymi założono, że jego rozpoczęcie nastąpi po okresie półrocznym od zakończenia składowania szlamu, w celu odsączenia wody [1]. Ze względu na małą wytrzymałość szlamu założono stopniowe zazwałowanie osadnika warstwami odpadów powęglowych dla spowodowania konsolidacji szlamu. Wysokość pierwszej warstwy zwał u z odpadów powęglowych przyjęto 2 m, a drugiej i trzeciej po 4 m. Założono, że odpady powęglowe będą dowożone transportem samochodowym, a formowanie warstw będzie się odbywać przy użyciu spycharek. Czwartą warstwę odpadów powęglowych przyjęto o wysokości 8 m, zakładając kolejowy transport odpadów i formowanie zwał u przy zastosowaniu pługozwałowarki, od której obciążenie przyjęto równe 49 kPa. Kąt nachylenia skarpy osadnika, którą budują zagęszczone odpady powęglowe, wynosi 45°, natomiast kąt nachylenia skarp kolejnych warstw zwał u z odpadów powęglowych przyjęto 37°.



Rys. 1. Schematy zazwałowania osadnika szlamów poflotacyjnych odpadami powęglowymi, I, II, III, IV – etapy zazwałowania osadnika (wymiary w m): m/pl – miękkoplastyczny, pl – plastyczny, t/pl - twaroplastyczny.

Stateczność układu podłoże-zwał analizowano na podstawie wyników obliczeń opartych na teorii plastyczności. Zachowanie się ośrodków budujących podłoże i zwał pod wpływem naprężeń zostało opisane modelem Coulomba-Mohra, traktując je jako nieliniowo sprężyste – idealnie plastyczne. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych stosując program komputerowy Z_SOIL.PC [2] oraz metodą różnic skończonych stosując program FLAC [3, 4, 5].

Procedurę obliczeniową wartości współczynnika stateczności układu podłoże-zwał oparto na metodzie przyrostowo-iteracyjnej redukcji spójności i kąta tarcia wewnętrznego do wartości granicznych, symulujących utratę stateczności [6, 7, 8, 9]. Metoda ta polega na zmniejszaniu w kolejnych iteracjach wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego przy zachowaniu stosunku:

$$\frac{c}{c^F} = \frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}\phi^F} = F \quad (1)$$

gdzie: F – współczynnik stateczności, c – spójność [kPa], ϕ – kąt tarcia wewnętrznego [°], c^F – spójność graniczna [kPa], ϕ^F – kąt tarcia wewnętrznego graniczny [°].

Przy wartościach granicznych c^F i ϕ^F inicjuje się mechanizm utraty stateczności podłoża i skarpy zwał.

Dyskretyzację układu obliczeniowego przeprowadzono czterowęzłowymi elementami czworokątnymi (MES – Z_SOIL) oraz za pomocą podziału na węzły (MRS – FLAC).

3. Wyniki obliczeń

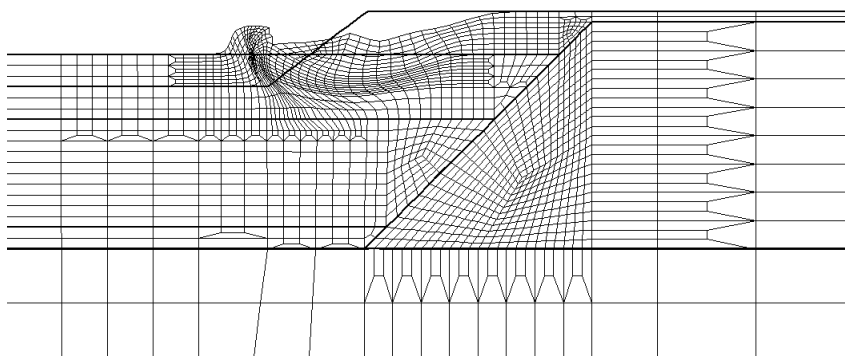
Wartości współczynnika stateczności podłoża ze szlamów obciążanego kolejnymi warstwami zwału z odpadów powęglowych otrzymane z obliczeń obydwoma metodami zestawiono w tablicy 2. Interpretacje zasięgu strefy deformacji plastycznych i lokalizacji teoretycznej powierzchni poślizgu po zredukowaniu kąta tarcia wewnętrznego i spójności do wartości granicznych (obraz zniszczenia po utracie stateczności) przeprowadzono na podstawie deformacji siatki, zagęszczenia izolinii przemieszczeń węzłów siatki i mapy przemieszczeń wypadkowych (MES – Z_SOIL) oraz na podstawie mapy odkształceń postaciowych i wektorów prędkości przemieszczeń (MRS – FLAC).

Tablica 2. Wyniki obliczeń stateczności układu podłoże-zwał.

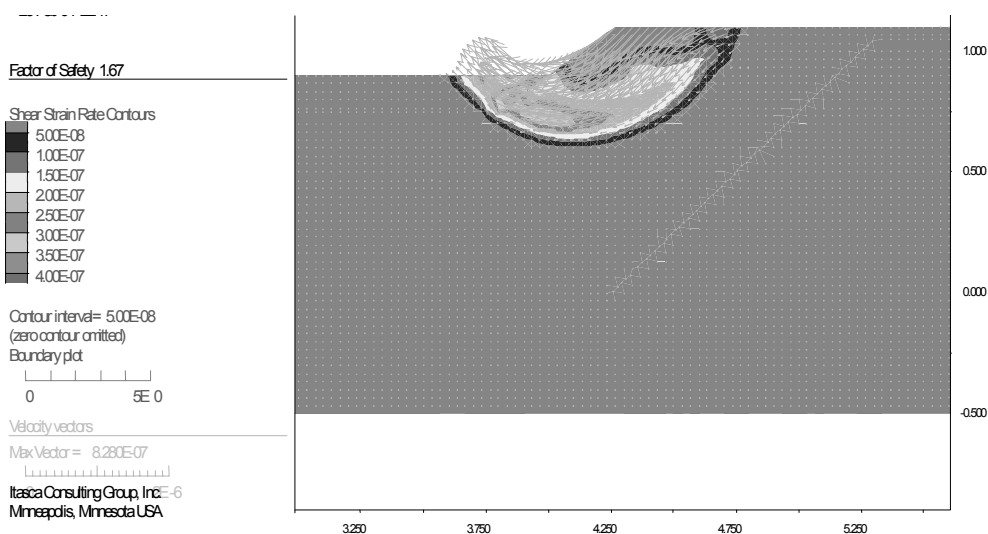
Wysokość zwału [m]	Współczynnik stateczności	
	MES Z SOIL	MRS FLAC
2	1,695	1,67
6	1,93	1,93
10	2,32	2,41
18	1,565	1,60

Przy obciążeniu podłoża pierwszą warstwą zwału o wysokości 2 m układ podłoże-zwał jest stateczny, wartość współczynnika stateczności wynosi około 1,7 (MES) oraz 1,67 (MRS). Strefa deformacji plastycznych i powierzchnia poślizgu obejmuje warstwę szlamu w stanie miękkoplastycznym na granicy plastycznego (rys. 2, 3), przy czym nieco większy zasięg otrzymano według metody MRS. Przeprowadzono także obliczenia z zastosowaniem Zmodyfikowanej Metody Redukcji Wytrzymałości na Ścinanie (MSSR), sprawdzając po kolei każdą wartość wskaźnika stateczności (co 0,01), aż do wartości $F = 3,0$. Nie przyniosły one wykrycia kolejnych możliwych powierzchni poślizgu. Przyjęto, że formowany zwal spowoduje częściową konsolidację górnej warstwy szlamu (zmiana stanu z miękkoplastycznego na plastyczny).

Po zwiększeniu obciążenia podłoża drugą warstwą zwału o wysokości 4 m wartość współczynnika stateczności w obydwu metodach wynosi 1,93, co wskazuje na zachowanie stateczności układu podłoże-zwał. Strefa odkształceń plastycznych oraz wektory prędkości przemieszczeń po redukcji parametrów wytrzymałościowych do wartości granicznych wskazują, że powierzchnia poślizgu sięga według MES 2,5-3 m (rys. 4), a według MRS 4-5 m w głąb warstwy szlamu plastycznego (rys. 5). Podobnie jak dla poprzedniej warstwy zwału przeprowadzono także obliczenia z zastosowaniem MSSR. Nie przyniosły one wykrycia kolejnych możliwych powierzchni poślizgu, tylko nieznaczne powiększanie się zasięgu stref zniszczenia. Początkowo powierzchnia poślizgu sięga do połowy miąższości warstwy szlamu plastycznego. Dla $F = 3,0$ powierzchnia poślizgu sięga w głąb, aż do warstwy szlamu twardoplastycznego, a z prawej strony opiera się o skarpe starego zwału. Przyjęto, że obciążenie drugą warstwą zwału spowoduje dalszą konsolidację szlamu (stan plastyczny na pograniczu twardoplastycznego).



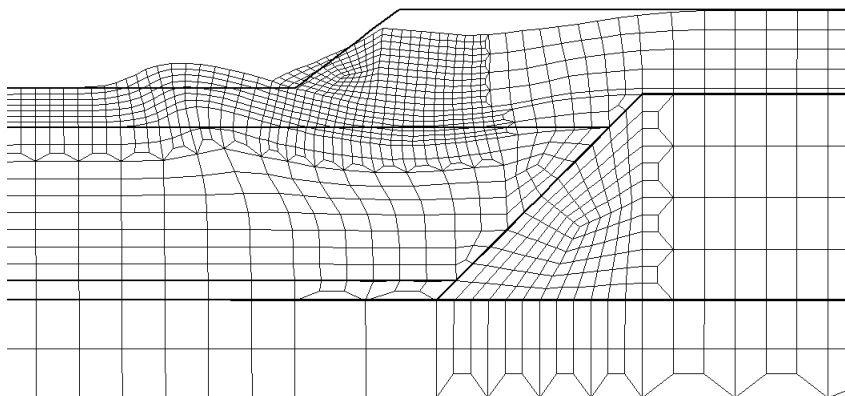
Rys. 2. Deformacje siatki dla pierwszej warstwy zwału po utracie stateczności - MES – Z_SOIL.



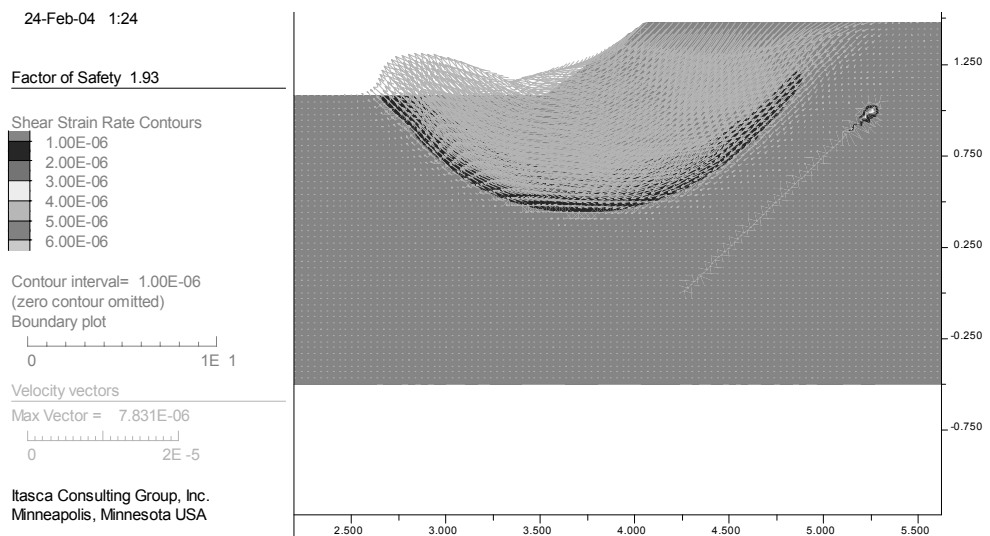
Rys. 3. Mapa odkształceń postaciowych oraz wektory prędkości przemieszczeń dla pierwszej warstwy zwału po utracie stateczności - MRS – FLAC.

Zwiększenie obciążenia podłoża trzecią warstwą zwału o wysokości 4 m nie spowoduje pogorszenia stateczności – wartość współczynnika stateczności układu podłoże-zwał jest duża i wynosi 2,32 (MES) i 2,41 (MRS). Obraz strefy deformacji plastycznych wskazuje na utworzenie się obszaru niestateczności tylko w warstwie zwału – powierzchnia poślizgu przechodzi przez podnóże skarpy (rys. 6a). W omawianym przypadku nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wynikami z obydwu metod. Założono dalszą konsolidację szlamu po obciążeniu trzecią warstwą zwału (stan twaroplastyczny).

Kolejna warstwa zwału o wysokości 8 m z obciążonym naziemem spowodowała, że współczynnik stateczności układu podłoże-zwał ma wyraźnie mniejsze niż w poprzednim przypadku wartości, które wynoszą 1,56 (MES) i 1,60 (MRS). Obraz zniszczenia po zredukowaniu spójności i kąta tarcia wewnętrznego do wartości granicznych wskazuje, że powierzchnia poślizgu występuje tylko w warstwie zwału i przechodzi przez podnóże skarpy (rys. 6b). Wpływ obciążenia naziemu skarpy na jej odkształcenia zaznacza się dość



Rys. 4. Deformacje siatki dla drugiej warstwy zwał po utracie stateczności - MES-Z_SOIL



Rys. 5. Mapa odkształceń postaciowych oraz wektory prędkości przemieszczeń dla drugiej warstwy zwał po utracie stateczności - MRS – FLAC.

wyraźnie. Obliczenia za pomocą MSSR nie przyniosły, podobnie jak dla poprzedniej warstwy zwał, wykrycia kolejnych powierzchni poślizgu.

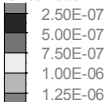
4. Podsumowanie

Wyniki obliczeń stateczności wskazują, że przyjęty sposób zazwałowania osadnika szlamu odpadami powęglowymi, poprzez sukcesywne formowanie kolejnych warstw zwał, jest prawidłowy. Zastosowanie pierwszej warstwy zwał o niedużej grubości (2 m) umożliwi zachowanie stateczności ($F = 1,67$) słabego podłoża (miękkoplastyczny stan górnej warstwy szlamu i wynikające stąd małe wartości parametrów wytrzymałościowych). Zwiększenie w kolejnych etapach zazwałowania osadnika grubości warstw zwał do 4 m, a nawet 8 m, przy założeniu postępującego wzmocnienia szlamu w wyniku konsolidacji, nie pogorszyło

a)

Factor of Safety 2.41

Shear Strain Rate Contours



Contour interval= 2.50E-07
(zero contour omitted)

Boundary plot

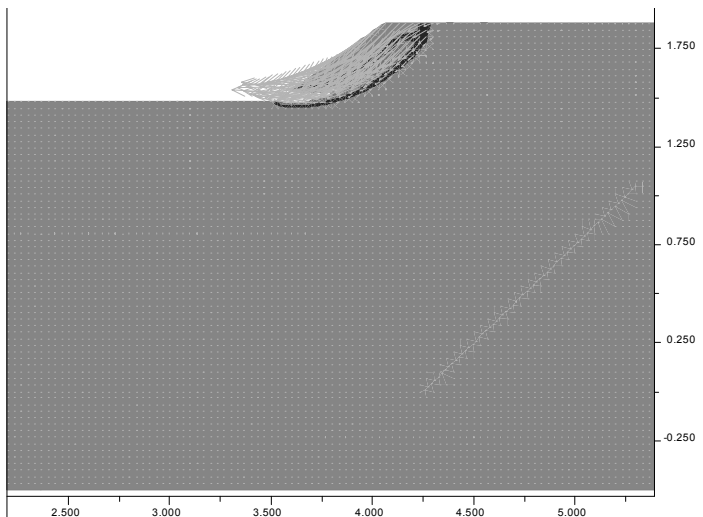


Velocity vectors

Max Vector = 1.420E-06



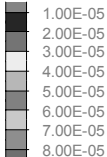
Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



b)

Factor of Safety 1.60

Shear Strain Rate Contours



Contour interval= 1.00E-05
(zero contour omitted)

Boundary plot

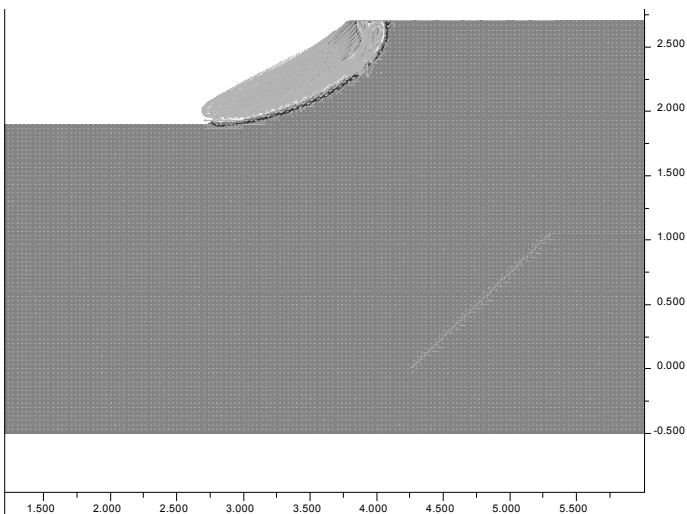


Net Applied Forces

Max Vector = 1.878E+04



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



Rys. 6. Mapa odkształceń postaciowych oraz wektory prędkości przemieszczeń dla trzeciej (a) i czwartej (b) warstwy zwału po utracie stateczności - MRS – FLAC.

warunków stateczności. W najbardziej niekorzystnym przypadku, tj. przy łącznej wysokości zwału 18 m z obciążonym naziemem, wartość współczynnika stateczności ($F = 1,56$) wskazuje na zachowanie bezpieczeństwa układu podłoże-zwał.

Stwierdzono dobrą zgodność wyników obliczeń stateczności metodą elementów skończonych z wynikami obliczeń metodą różnic skończonych. Wartości współczynnika stateczności są zbliżone dla wszystkich przypadków obliczeniowych, odpowiadających warunkom pracy podłoża pod zwiększającym się obciążeniem (rozkład naprężeń i odkształceń w układzie podłoże-zwał). Stwierdzone różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi z obydwu metod dotyczą jedynie wielkości strefy deformacji plastycznych. Większy zasięg potencjalnej powierzchni poślizgu wykazała metoda różnic skończonych. Zastosowane w obydwu metodach programy obliczeniowe umożliwiają obserwacje rozwoju

odkształceń plastycznych w miarę redukcji wartości parametrów wytrzymałościowych, a w konsekwencji otrzymanie obrazu zniszczenia układu po utracie stateczności.

Reasumując można stwierdzić, że zastosowane metody numeryczne charakteryzują się istotnymi zaletami i stanowią bardzo użyteczne narzędzia do analizy stateczności podłoża poddanego stopniowo zwiększającemu się obciążeniu zewnętrznemu.

Literatura

- [1] ZAWISZA E., SETMAJER J., SKALICZ F. Ekspertyza w zakresie możliwości zawałowania osadników szlamu z Zakładu Odzysku Węgla w Trachach odpadami powęglowymi. Ms, 1993.
- [2] Z_SOIL.PC, Theoretical Manual. Lozanna, ZACE Services Ltd., 1998.
- [3] FLAC v.4.0. Users manual. Itasca Consulting Group Inc., 2000.
- [4] CAŁA M., FLISIAK J. Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej: Geotechnika i budownictwo specjalne. Bukowina Tatrzańska, 2000, s. 27-36.
- [5] CAŁA M., FLISIAK J. Analiza stateczności skarp z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. XXVI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2003. s. 348-354.
- [6] DŁUŻEWSKI J. M., CIUHAK K., TOMASZEWICZ A., JANKOWSKI W. Wpływ konsolidacji podłoża na osiadania i stan bezpieczeństwa zapór czołowych Jeziorsko i Mietków w ujęciu metody elementów skończonych. Inżynieria Morska i Geotechnika. 2001, No 1, s. 22-29.
- [7] DŁUŻEWSKI J. M., TOMASZEWICZ A., CIUHAK K., JANKOWSKI W. Stateczność zapory Czaniec przy uwzględnieniu wykonywanej przesłony antyfiltracyjnej. XIII Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”. 2001, s. 85-91.
- [8] ZAWISZA E. Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozprawy, 2001, Zeszyt 280.
- [9] ZAWISZA E., BARAN P., ZYDRON T. 2004. Analiza stateczności słabego podłoża obciążonego nasypem. Artykuł zgłoszony na II Problemową Konferencję Geotechniki „Współpraca budowlanej z podłożem gruntowym”. Białystok – Białowieża, 2004.

CALCULATIONS OF STABILITY OF SUBBASE MADE OF POST-FLOTATION SLUDGES SURCHARGED WITH AN EMBANKMENT OF COAL MINING WASTES

Summary

Abstract: The paper presents results of calculations of stability of subbase made of post-flotation sludges, surcharged with consecutive layers of coal mining wastes of different thickness and an equal angle of slope. The calculations were carried out by means of Finite Elements Method (FEM) using computer program Z_SOIL.PC as well as Finite Difference Method (FDM) using computer program FLAC. As the result of computations, where the procedure of strength parameter reduction was applied, the safety factors of the subbase-embankment complex and deformations after the failure were determined. Finally, the results of calculations by means of both methods were compared.