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

Przemysław BARAN
Akademia Rolnicza w Krakowie
Michał GRODECKI
Politechnika Krakowska

PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE I ODKSZTAŁCENIOWE ODPADÓW POWĘGLOWYCH W ŚWIETLE BADAŃ LABORATORYJNYCH I ANALIZ NUMERYCZNYCH

Streszczenie. Praca przedstawia wykorzystanie analizy wstecznej do określania wybranych właściwości mechanicznych odpadów powęglowych. Laboratoryjne badanie problemu utraty stateczności modelowej skarpy zostało wykorzystane do określenia wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ, kohezji c, kąta dylatancji ψ i modułu Younga E. Uzyskane z analizy wstecznej wartości porównano z wynikami laboratoryjnymi.

STRENGTH AND STRAIN PARAMETERS OF COLLIERY SPOILS IN THE LIGHT OF LABORATORY TESTS AND NUMERICAL ANALYSES

Summary. This paper presents the method selected to determine certain mechanical properties of colliery spoils, using back analysis. Laboratory model slip failure test have been used to estimate friction angle ϕ, cohesion c, dilatancy angle ψ and Young modulus E. Results of this analysis were compared with laboratory tests.

1. Wstęp

Odpady powęglowe (kamień dołowy, odpady kopalniane, skała płonna) stanowią produkt uboczny urobku węgla, głębienia szybów górniczych, czy też odzyskiwania węgla z samego materiału odpadowego. Składowane są najczęściej na terenach przyległych do kopalń, w postaci pojedynczych hałd, zwałowisk lub osadników. Negatywny wpływ składowisk odpadów powęglowych dotyczy zarówno estetyki krajobrazu, jak i zanieczyszczenia środowiska wodno-gruntowego (procesy chemiczne) i atmosfery (pylenie). Obecnie opisywany materiał odpadowy wykorzystuje się przede wszystkim w budownictwie

ziemnym, gdzie pełni on rolę antropogenicznego gruntu budowlanego. Dotychczasowe prace badawcze [2, 5] i in. pozwalają na stwierdzenie, że odpady kopalniane nadają się do zastosowania w różnych dziedzinach inżynierii – zwłaszcza do budowy nasypów.

Cechy mechaniczne omawianych odpadów odgrywają kluczową rolę, w sytuacji gdy docelowym ich wykorzystaniem są konstrukcje ziemne przenoszące obciążenia zewnętrzne (np. nasypy drogowe, kolejowe, groble osadników). Ustalenie wartości kąta tarcia wewnętrznego, spójności i modułu sprężystości może się odbyć na drodze badań laboratoryjnych, jednakże z uwagi na dużą niejednorodność i ostre krawędzie okruchów skalnych wymagają one specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego. Zauważa się również duże różnice w oszacowaniach wspomnianych parametrów w zależności od przyjętej metody badawczej [1]. Problem poprawnego ustalenia wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych prowadzi do poszukiwania nowych metod badawczych. Prezentowana w niniejszym artykule metoda opiera się na wynikach próbnego obciążania nasypu modelowego w małej skali [7] i na wykorzystaniu analizy wstecznej w celu wyznaczenia wybranych właściwości mechanicznych odpadów powęglowych.

2. Ogólna charakterystyka badanego materiału

Do badań modelowych zostały użyte odpady powęglowe z kopalni Makoszowy o uziarnieniu poniżej 60 mm [7], złożone ze skał ilastych (88%), węgla (10%) oraz piaskowców i mułowców (po około 1%). Według normy PN-86/B-02480 opisywany materiał odpowiadał bardzo różnoziarnistym żwirom gliniastym o wskaźniku różnoziarnistości U=158. Wartości parametrów wytrzymałościowych zostały wyznaczone w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania (skrzynka 30x30 cm wyposażona w ramki pośrednie). Badanie przeprowadzono przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0{,}90$. Tablica 1 prezentuje wartości niektórych parametrów geotechnicznych badanego materiału.

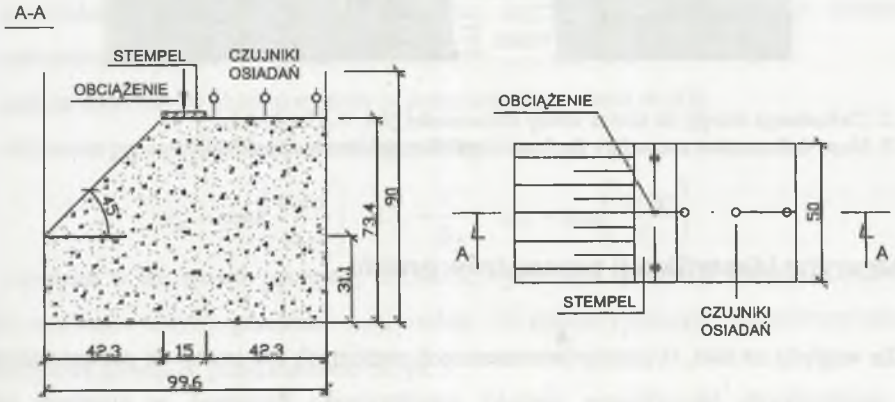
Tablica 1

Wartości wybranych parametrów geotechnicznych odpadów powęglowych KWK Makoszowy

Parametr geotechniczny	Symbol	Jedn.	Wartość
Wilgotność optymalna	w_{opt}	[%]	7,8
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	$\rho_{ds.}$	[g/cm^3]	1,77
Kąt tarcia wewnętrznego	ϕ	[^{O}]	32,8
Spójność	c	[kPa]	30,1

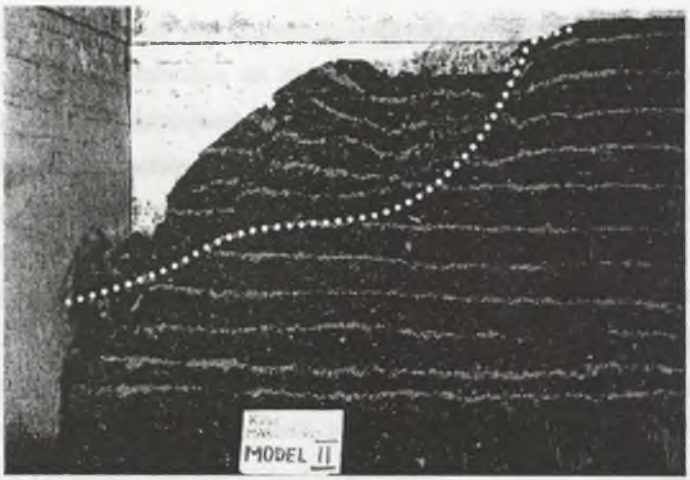
3. Metodyka badań laboratoryjnych

Badania [7] przeprowadzono w aparacie wielkowymiarowym, składającym się ze stalowej skrzyni modelowej (rys. 1) z przezroczystą przednią ścianą z pleksiglasu, stempla stalowego do obciążania powierzchni nasypu połączonego z dźwigniowym systemem obciążania (składającym się ze stalowej ramy przymocowanej do podstawy skrzyni oraz dźwigni z kompletem obciążników) i czujników zegarowych do pomiarów osiadania stempla i powierzchni nasypu.



Rys. 1. Schemat modelu skarpy wraz z urządzeniami pomiarowymi – przekroje pionowy i poziomy (wymiary w cm)
Fig. 1. Scheme of a slope model with measuring devices – vertical and horizontal cut (dimensions in cm)

Stempel obciążano stopniowo naciskami wzrastającymi około 24.5 kPa co 0.5 godziny aż do obsunięcia się skarpy. Następnie dokonano analizy powstałych deformacji (rys. 2) za pomocą pomiaru przemieszczeń poziomych pasków barwionego popiołu. W trakcie badania prowadzono pomiary osiadania stempla i korony nasypu poza stemplem [7].



Rys. 2. Deformacja skarpy na skutek utraty stateczności (fot. A. Owsiński)
Fig. 2. Slope deformation caused by the loss of stability. (photo A. Owsinski)

4. Algorytm identyfikacji parametrów gruntu

Ze względu na fakt, iż pomiar przemieszczeń poziomych był trudny do przeprowadzenia (co uniemożliwiło identyfikację wartości współczynnika Poissona), w niniejszej pracy ograniczono się do identyfikacji zbioru $\{\mathbf{k}_1\}$, przyjmując ν=0.4 zgodnie z [2]:

$$\mathbf{k}_1 = \{c, \phi, \psi, E\}. \tag{1}$$

W obliczeniach zastosowano system Metody Elementów Skończonych (MES) Z_Soil.PC, wykorzystując modele sprężysto-plastyczne Coulomba-Mohra i Druckera-Pragera. Zastosowano identyfikację wieloetapową, której algorytm przedstawiono poniżej:

- wyznaczono krzywe graniczne c-ϕ dla znanego z badań doświadczalnych obciążenia krytycznego (osobno dla stowarzyszonego i niestowarzyszonego (ψ=0) prawa płynięcia),
- poszukiwano trójkę parametrów c, ϕ, ψ dającą najlepszą zgodność w zakresie powierzchni poślizgu – z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z wyznaczonych krzywych granicznych,
- dla danych c, ϕ, ψ określono wartości modułu Younga, tak by uzyskać najlepszą zgodność pomierzonych i obliczonych zależności obciążenie-przmieszczenie (osobno dla modelu Coulomba-Mohra i Druckera-Pragera).

Przyjęto, iż poszukiwany zbiór parametrów wytrzymałościowych powinien prowadzić do uzyskania zgodności wyników doświadczalnych i numerycznych w zakresie:

a) wielkości obciążenia krytycznego

$$\left| q_{kr}^{pom} - q_{kr}^{obl} \right| = 0, \tag{2}$$

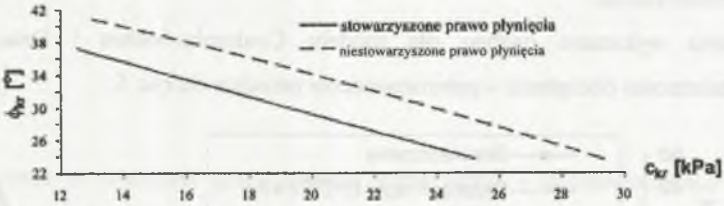
b) powierzchni poślizgu L.

Spełnienie warunku (2) na drodze analizy nośności granicznej skarpy zbudowanej z gruntu o intuicyjnie wybieranych parametrach wytrzymałościowych nastręcza znacznych problemów. Z tego powodu w niniejszej pracy zastosowano inny tok postępowania. Wykonywano analizę problemu sprężysto-plastycznego dla intuicyjnie przyjętych c i ϕ (osobno dla stowarzyszonego i niestowarzyszonego ($\psi=0$) prawa płynięcia) wg algorytmu:

a) wyznaczenie stanu naprężeń, odpowiadającego konfiguracji nieodkształconej skarpy,
b) przykładanie obciążenia zewnętrznego aż do wartości określonej w badaniach doświadczalnych jako krytyczna,
c) analiza stateczności obiektu metodą c- ϕ redukcji (opisywana w [4]),
d) obliczenie parametrów krytycznych wg zależności:

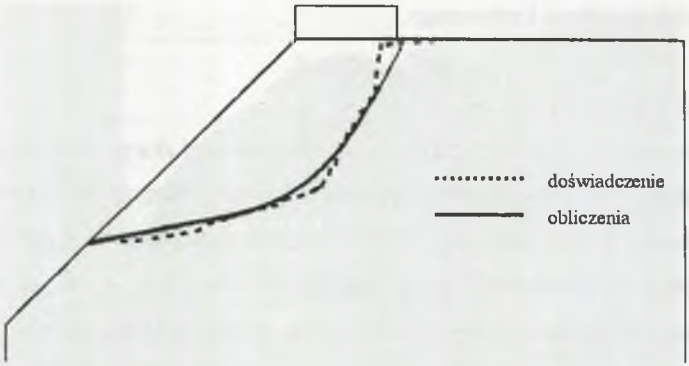
$$\varphi_{kr} = \operatorname{atan}\left(\frac{\tan\varphi}{S_f}\right) \quad C_{kr} = \frac{C}{S_f} \quad \psi_{kr} = \operatorname{atan}\left(\frac{\tan\psi}{S_f}\right). \tag{3}$$

Uzyskane w ten sposób parametry krytyczne zapewniają spełnienie warunku (2). Na ich bazie wykonano krzywe graniczne c-ϕ , osobno dla stowarzyszonego i niestowarzyszonego (ψ=0) prawa płynięcia, przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Krzywe graniczne c-ϕ dla badanej skarpy modelowej
Fig. 3. Critical curves c-ϕ for the discussed slope model

Porównując uzyskane numerycznie powierzchnie poślizgu z powierzchnią zarejestrowaną doświadczalnie, wybrano parametry wytrzymałościowe dające najlepszą zgodność wyników doświadczalnych i numerycznych. Nie udało się uzyskać zadowalającej zgodności powierzchni poślizgu w obliczeniach bazujących na niestowarzyszonym prawie płynięcia ($\psi=0$). Przy takim założeniu uzyskiwano znacznie płytsze od zarejestrowanej doświadczalnie powierzchnie poślizgu. Wskazuje to na znaczny wpływ zjawiska dylatancji na zachowanie się konstrukcji z badanego materiału. Powierzchnie poślizgu uzyskane doświadczalnie oraz numerycznie, dla parametrów dających najlepszą zgodność, przedstawia rys. 4.



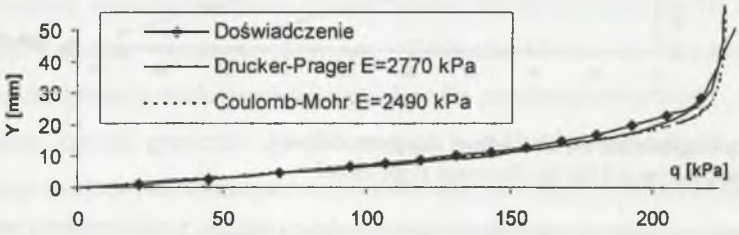
Rys. 4. Zestawienie uzyskanych powierzchni poślizgu dla parametrów gruntu dających najlepszą zgodność wyników doświadczalnych i numerycznych
Fig. 4. Comparison of sliding surfaces obtained for soil parameters giving the best correlation between experimental and numerical results

Znając wartości parametrów wytrzymałościowych, identyfikowano wartość modułu Younga, tak aby:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{pom} - Y_{obl}\right)^2 = \min, \tag{4}$$

gdzie: n – ilość punktów na określonej doświadczalnie krzywej obciążenie-przemieszczenie, Y_{pom} – przemieszczenie pionowe pomierzone doświadczalnie, Y_{obl} – przemieszczenie pionowe obliczone numerycznie.

Obliczenia wykonano osobno dla modelu Coulomba-Mohra i Druckera-Pragera. Uzyskane zależności obciążenie – przemieszczenie przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Zależności obciążenie – przemieszczenie dla punktu w połowie stempla
Fig. 5. Load- displacement curve for point in the middle of the plate

5. Wyniki analizy

Zestawienie wyników uzyskanych metodą analizy wstecznej oraz na drodze badań laboratoryjnych zawiera tablica 2.

Tablica 2

Zestawienie uzyskanych wyników

		c [kPa]	ϕ [^{0}]	ψ [^{0}]	E [kPa]
Badania laboratoryjnie		30,1	32,8	-	17100
Analiza wsteczna	model Coulomba-Mohra	16,0	32,5	22,0	2490
	model Druckera-Pragera	16,0	32,5	22,0	2770

Uzyskana metodą analizy wstecznej wartość kąta tarcia wewnętrznego jest praktycznie równa wartości uzyskanej laboratoryjnie. Natomiast istotne różnice występują w zakresie kohezji i modułu Younga; analiza wsteczna daje tu zdecydowanie niższe wartości. Podobne spostrzeżenia dotyczące wyznaczania wartości spójności w odpadach powęglowych zawiera praca Kawalca [3]. Z powyższego faktu wynika, że projektowanie budowli geotechnicznych zbudowanych z badanego materiału, na bazie określonych laboratoryjnie parametrów wytrzymałościowych gruntu, może prowadzić do rozwiązań po stronie niebezpiecznej.

6. Wnioski

a) Przedstawiona w niniejszej pracy metoda numeryczno – doświadczalnego określania właściwości mechanicznych odpadów powęglowych umożliwia wyznaczenie miarodajnych do obliczeń stateczności, nośności i przemieszczeń parametrów geotechnicznych.

b) Zachowanie się badanego gruntu w zakresie nośności budowanych z niego obiektów jak też zależności przemieszczenie-obciążenie punktów leżących na obciążonym odcinku naziomu jest poprawnie opisywane przez modele Coulomba-Mohra i Druckera-Pragera.

c) Przyjęcie typowego w geotechnice niestowarzyszonego prawa płynięcia (ψ=0) nie jest właściwe w odniesieniu do badanych odpadów powęglowych.

d) Prezentowana metoda jest otwarta i może być stosowana do innych gruntów, o ile tylko ich zachowanie poprawnie opisuje model Coulomba-Mohra lub Druckera-Pragera.

LITERATURA

1. Gruchot A.: Shear strength parameters of colliery spoils determined in middle size apparatuses. XIV European Young Geotechnical Engineer's Conference, Bulgaria, September 2001, p. 127-137.
2. Gryczmański M., Skarżyńska K. M., Kawalec B., Michalski P., Zawisza E., Kawalec J.: Podstawy geotechniczne wykorzystania odpadów powęglowych jako gruntu budowlanego do wnoszenia nasypów inżynierskich wysokich klas technicznych. Grant KBN 7 T07E 02609, Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego Akademii Rolniczej w Krakowie, Katedra Geotechniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach.
3. Kawalec J.: Ocena wytrzymałości odpadów górniczych na podstawie próbnych obciążeń nasypu. Katedra Geotechniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Gliwice 2000 (praca doktorska).
4. Sanecki L., Truty A., Urbański A.: O możliwościach modelowania komputerowego stateczności złożonych układów geotechnicznych. Materiały XLV Konf. Nauk KILiW PAN Krynica 1999, Wrocław 1999.
5. Skarżyńska K. M., Setmajer J.: Budowle hydrotechniczne wykonywane z nieprzepalonych odpadów węgla kamiennego. Wytyczne projektowania budowy i odbioru, AR Kraków 1995 (maszynopis).
6. Truty A., Urbański A., Podleś K.: Analiza zagadnień geotechnicznych w systemie Z-SOIL - w Materiałach Pokonferencyjnych X Jubileuszowej Konferencji Naukowej „Metody numeryczne do projektowania i analizy konstrukcji hydrotechnicznych", wyd. Samodzielny Zakład Podstaw Konstrukcji Budowli Wodnych, Kraków 1998, str. 100-108.
7. Zawisza E.: Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Kraków 2001.
8. Z_Soil.PC, Theoretical Manual. ZACE Services Ltd., Lozanna 1998.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Krystyna SKARŻYŃSKA

Abstract

This paper presents the method selected to determine certain mechanical properties of colliery spoils. Back analysis in conjunction with a laboratory model test was used to estimate friction angle ϕ, cohesion c, dilatancy angle ψ and Young modulus E. Results of this analysis were compared with laboratory tests. This study discovered that typical use of non-associated flow rule (ψ=0) is not recommended to determine a correct slip surface. The methodology presented in this article can be used to estimate aforementioned geotechnical parameters for any soil. However, its behaviour has to be correctly described by Mohr-Coulomb or Drucker-Prager constitutive model.