

*Przemysław Baran**, *Eugeniusz Zawisza**, *Agata Szymacha***

PRÓBA WERYFIKACJI PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH ODPADÓW POWĘGLOWYCH METODĄ GRANICZNEGO STANU NAPRĘŻENIA

1. Wstęp

Odpady powęglowe (kamień dołowy, odpady kopalniane, skała płona) stanowią produkt uboczny urobku węgla, głębień szypów 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 pozwalają na stwierdzenie, że odpady kopalniane nadają się do zastosowania w różnych dziedzinach inżynierii — zwłaszcza do budowy nasypów. Z uwagi na fakt, iż tego typu konstrukcje przenoszą obciążenia tak własne, jak i zewnętrzne, ustalenie wartości parametrów wytrzymałościowych wspomnianych odpadów nabiera kluczowego znaczenia. Mając na względzie grubookruchowy charakter materiału, oznaczenie wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności wymaga użycia specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego. Zauważa się również duże różnice w oszacowaniach wspomnianych parametrów, w zależności od przyjętej metody badawczej [3]. Warto tu także zaznaczyć, iż zdaniem niektórych naukowców grunty gruboziarniste z racji sił ciężkości poszczególnych ziaren, znacznie większych od sił ich przyciągania, nie mogą posiadać spójności [7]. Niektórzy autorzy zalecają przyjęcie zerowej wartości wspomnianego parametru do celów projektowych budownictwa ziemnego [2]. Problem poprawnego ustalenia wartości parametrów wytrzymałościowych prowadzi do poszukiwania nowych metod badawczych.

* Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

** Absolwentka Wydziału Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

W niniejszym artykule wykorzystano wyniki z dwóch metod: bezpośredniego ścinania oraz analizy wstecznej nośności granicznej skarpy modelowej. Następnie wyniki tych badań poddano weryfikacji wykorzystując metodę granicznego stanu naprężenia w aspekcie stateczności skarpy modelowej.

2. Charakterystyka użytego materiału odpadowego

Do badań zostały użyte odpady powęglowe z kopalni Makoszowy o uziarnieniu mniejszym od 60 mm. W składzie petrograficznym dominowały skały ilaste, których udział wynosił 88%, zawartość węgla wynosiła około 10%, niewielka była zawartość piaskowców i mułowców (po około 1%). Rozkład uziarnienia materiału wykorzystanego w badaniach przedstawia tabela 1. Według normy PN-86/B-02480 opisywana skała płona odpowiadała bardzo różnoziarnistym żwirom gliniastym — wskaźnik różnoziarnistości wyniósł 158.

TABELA 1

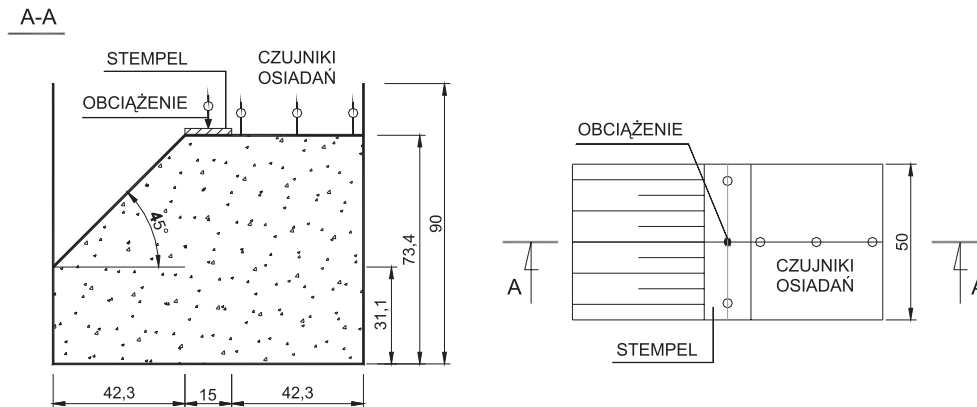
Wybrane właściwości fizyczne odpadów powęglowych z KWK „Makoszowy”

Parametr geotechniczny	Symbol	Jednostka	Wartość
Zawartość frakcji:			
— kamienista > 40 mm	f_k	%	5,7
— żwirowa 40÷2 mm	f_z		66,8
— piaskowa 2÷0,05 mm	f_p		18,4
— pyłowa 0,05÷0,002 mm	f_π		6,0
— ilowa < 0,002 mm	f_i		3,1
Wilgotność optymalna	w_{opt}	%	7,8
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	ρ_{ds}	g/cm ³	1,77
Gęstość właściwa	ρ_s		32,8

3. Opis stanowiska badawczego nośności skarpy

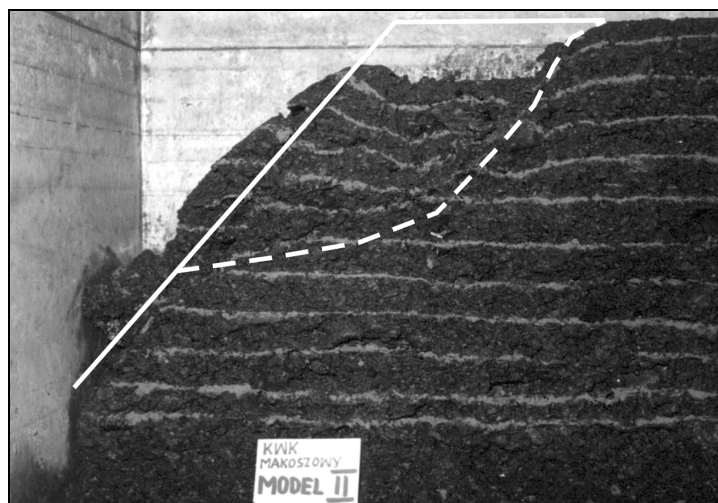
Badania przeprowadzono na wielkowymiarowym stanowisku badawczym, składającym się z następujących elementów:

- skrzyni modelowej (rys. 1) o wymiarach w rzucie około 50 × 100 cm i wysokości 90 cm, z przezroczystą przednią ścianą z pleksiglasu i pozostałymi ścianami z blachy stalowej;
- stempla stalowego o wymiarach w rzucie 15 × 49,8 cm do obciążania powierzchni nasypu;
- dźwigniowego systemu obciążania, składającego się ze stalowej ramy przymocowanej do podstawy skrzyni oraz dźwigni z kompletem obciążników;
- czujników zegarowych do pomiarów osiadania stempla i powierzchni nasypu.



Rys. 1. Schemat modelu skarpy wraz z urządzeniami pomiarowymi — przekrój pionowy i poziomy

Nasyp modelowy budowano z materiału o wilgotności zbliżonej do optymalnej, warstwami o grubości 4 cm. Na powierzchni każdej warstwy w osi nasypu wprowadzono paski barwionego popiołu. Wskaźnik zagęszczenia materiału w nasypie wynosił 0,90. Stempel umieszczono na krawędzi górnej powierzchni skarpy i obciążano stopniami o wartości 24,5 kPa, przykładanymi co pół godziny. W trakcie badania prowadzono pomiary osiadania stempla i powierzchni nasypu poza stemplem. Badanie zakończono z chwilą obsunięcia się skarpy. Następnie dokonano analizy powstałych deformacji (rys. 2) za pomocą pomiaru przemieszczeń pasków barwionego popiołu.



Rys. 2. Deformacja skarpy na skutek utraty stateczności (fot. A. Owsiański)

4. Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych

Wartości parametrów wytrzymałościowych wyznaczono w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania (skrzynka $30 \times 30 \times 20$ cm, wyposażona w ramki pośrednie tworzące strefę ścinania o grubości 3 cm). Badanie przeprowadzono na próbkach o wilgotności optymalnej, przy wskaźniku zagęszczenia $I_S = 0,90$. Próbki poddano konsolidacji przy obciążeniu pionowym: 110, 200, 300 i 400 kPa przez pół godziny a następnie ścinano przy prędkości 1 mm/min.

W przypadku analizy wstecznej problemu nośności granicznej skarpy modelowej przyjęto, iż poszukiwany zbiór parametrów wytrzymałościowych powinien prowadzić do uzyskania zgodności wyników doświadczalnych z wynikami uzyskanymi na drodze analizy numerycznej w zakresie wielkości obciążenia krytycznego oraz przebiegu powierzchni poślizgu. Wykonywano analizę problemu sprężysto-plastycznego dla intuicyjnie przyjętych c i ϕ według algorytmu:

- wyznaczano stan naprężeń wyjściowych (odpowiadający konfiguracji nieodkształconej skarpy),
- przykładano obciążenie zewnętrzne, aż do wartości określonej w badaniach doświadczalnych jako krytyczna,
- wykonywano analizę stateczności obiektu metodą $c - \phi$ redukcji,
- obliczano krytyczne parametry wytrzymałościowe wg zależności:

$$\phi_{kr} = \text{atan} \left(\frac{\tan \phi}{F} \right), \quad (1)$$

$$c_{kr} = \frac{c}{F},$$

gdzie F — jest współczynnikiem stateczności.

Szczegółowy opis wykorzystanej procedury obliczeniowej można znaleźć w pracy [1]. W tym miejscu zacytowano tylko końcowe wyniki obliczeń (tab. 2) wraz z wartościami uzyskanymi z badania w aparacie bezpośredniego ścinania.

TABELA 2
Zestawienie wartości parametrów wytrzymałościowych

Met. badawcza \ Parametr	c , [kPa]	ϕ , [°]
Bezpośrednie ścinanie	30,1	32,8
Analiza wsteczna	16,0	32,5

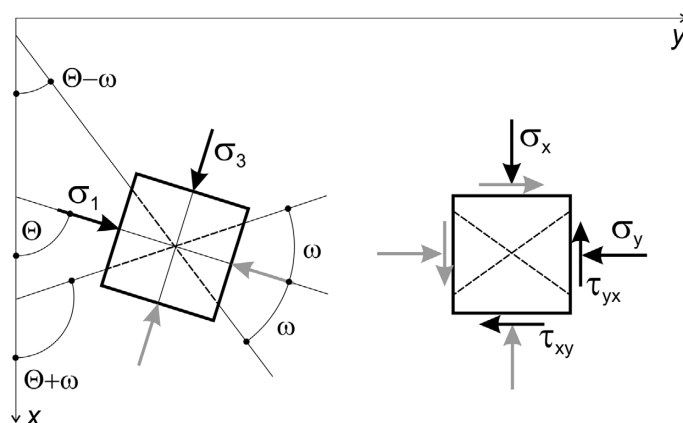
Można zauważyć, iż uzyskana metodą analizy wstecznej wartość kąta tarcia wewnętrznej jest praktycznie równa wartości uzyskanej z bezpośredniego ścinania. Natomiast istotne różnice występują w przypadku spójności. Analiza wsteczna daje tu zdecydowanie niższe wartości. Podobne spostrzeżenia dotyczące wyznaczania wartości spójności w odpadach powęglowych zawiera praca [5].

5. Skrócony opis metody granicznego stanu naprężenia (GSN) w odniesieniu do stateczności skarp

Metoda bazuje na rozwiązaniu układu równań równowagi elementarnej objętości gruntu przy założeniu, że ośrodek gruntowy jest w stanie granicznym, opisanym liniowym warunkiem Coulomba-Mohra. W przypadku płaskim (rys. 3), kiedy jedyną siłą masową jest ciężar gruntu γ_{on} , równania równowagi przyjmują postać:

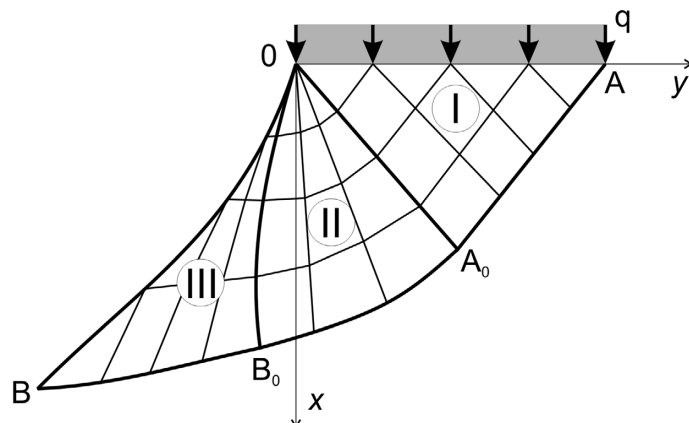
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \gamma_{on} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0.$$



Rys. 3. Płaszczyzna fizyczna naprężeń

Dla nasypów budowli ziemnych rozwiązanie (2) pozwala oszacować przebieg profilu skarpy oraz wyznaczyć wartości naprężenia. Dokładny opis metody można znaleźć w pracach [4, 6]. W tym miejscu przedstawiono tylko najważniejsze informacje. Rozwiązując układ równań równowagi wykorzystuje się najczęściej metodę różnicową, wynikiem której jest siatka charakterystyk — linii poślizgu (rys. 4).



Rys. 4. Schemat charakterystyk wraz z podziałem na obszary obliczeniowe

Wspomniane charakterystyki tworzą strefę obliczeniową składającą się z trzech obszarów. Obszar I znajduje się tuż pod naziemem. Gdy jego obciążenie jest pionowe i równomiernie rozłożone obszar ten jest w kształcie trójkąta równoramiennego, którego kąty $A0A_0$ i $0AA_0$ wynoszą $45^\circ + (\phi/2)$. Charakterystyki są tutaj liniami prostymi i przecinają się tak, jak pokazano na powyższym rysunku. W obrębie tego obszaru kąt θ — kąt między kierunkiem naprężenia głównego σ_1 a osią x (rys. 3) wynosi zero. Wyznaczenie punktów przecięcia się charakterystyk w tym przypadku nie jest konieczne i wystarczy się ograniczyć do podania wartości naprężenia σ na granicy obszarów I i II, tj. na linii $0A_0$. W tym celu należy się posłużyć poniższym równaniem:

$$\sigma = \frac{q + \gamma_{on} x + c \cdot \operatorname{ctg} \phi}{1 + \sin \phi}, \quad (3)$$

gdzie:

q — obciążenie naziomu,

x — współrzędna punktu w układzie odniesienia (rys. 4).

Obszar II to zbiór przecinających się charakterystyk, w którym jedna ich rodzina wychodzi z punktu „0”, który jest punktem osobliwym. Ten obszar uwzględnia się w obliczeniach w przypadku, gdy obciążenie naziomu spełnia poniższy warunek:

$$q > \sigma_{\min} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}. \quad (4)$$

Współrzędne punktu przecięcia się charakterystyk (x_0, y_0) wyznacza się z równań:

$$\begin{cases} y_0 - y_1 = \tan(\Theta_1 + \omega) \cdot (x_0 - x_1) \\ y_0 - y_2 = \tan(\Theta_2 - \omega) \cdot (x_0 - x_2) \end{cases} \quad (5)$$

gdzie ω — nachylenie płaszczyzny ścięcia (rys. 3) równe $45^\circ - (\phi/2)$.

Indeksem „1” i „2” oznaczono wartości parametrów wyjściowych, na podstawie których obliczana jest wartość opisana danym równaniem (lub równaniami). W powyższym przypadku chodzi o wartości x_0 i y_0 . Natomiast naprężenie średnie σ_0 i kąt Θ_0 oblicza się z równań:

$$\begin{cases} \cos \phi (\sigma_0 - \sigma_1) + 2\sigma_1 \sin \phi (\Theta_0 - \Theta_1) = d_1 (x_0 - x_1) \\ \cos \phi (\sigma_0 - \sigma_2) - 2\sigma_2 \sin \phi (\Theta_0 - \Theta_2) = e_2 (x_0 - x_2) \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} d_1 &= -\gamma_{on} \frac{\sin(\Theta_1 - \omega)}{\cos(\Theta_1 + \omega)}, \\ e_1 &= \gamma_{on} \frac{\sin(\Theta_2 + \omega)}{\cos(\Theta_2 - \omega)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Obszar III ograniczony jest z jednej strony profilem skarpy. W przeciwieństwie do poprzedniego, linie charakterystyk nie wychodzą z jednego punktu. Ponadto na całej długości linii OB wartość naprężenia jest stała i wynosi:

$$\sigma_s = \frac{c \cdot \operatorname{ctg} \phi}{1 - \sin \phi}. \quad (8)$$

Stąd dla krawędzi skarpy punkty wyjścia jednej rodziny charakterystyk (x_s, y_s) wyznacza się w oparciu o poniższe zależności:

$$\begin{cases} y_s - y_1 = \tan(\Theta_1) \cdot (x_s - x_1) \\ y_s - y_2 = \tan(\Theta_2 - \omega) \cdot (x_s - x_2) \end{cases} \quad (9)$$

W pozostałej części obszaru obowiązują równania (5)–(7).

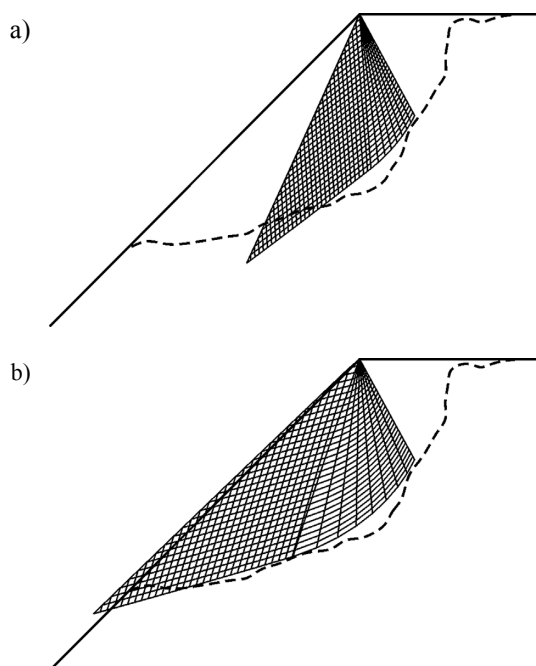
Obliczenia zaczyna się od przyjęcia gęstości siatki charakterystyk. Nadmienić tutaj należy, iż w przypadku obciążenia naziomu bliskiego wartości:

$$\sigma_{\max} = c \cdot \operatorname{ctg} \phi \cdot \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right). \quad (10)$$

Zbyt rzadka siatka może prowadzić do niestabilności numerycznej i wyników całkowicie niezgodnych z rzeczywistością. Mając na uwadze możliwości obliczeniowe współczesnych „domowych” komputerów, można z powodzeniem nie „oszczędzać” na gęstości siatki. Warto też zwrócić uwagę, iż przy gęstych siatkach nie jest celowe stosowanie technik zwiększania dokładności obliczeń np. metodą aproksymacji nieliniowej wielomianami szeregów Taylora. Tego typu podejście było uzasadnione w czasach, gdy nie było szybkich komputerów. Obecnie prowadzi to do niepotrzebnego skomplikowania algorytmu obliczeniowego.

6. Weryfikacja wartości parametrów wytrzymałościowych

Znając wartość ciężaru objętościowego odpadów powęglowych KWK „Makoszowy” ($\gamma_{on}=17,36 \text{ kN/m}^3$) oraz znając wartości parametrów wytrzymałościowych dla dwóch cytowanych metod badawczych (tab. 2), wykonano obliczenia profilu skarpy metodą GSN. Na wstępie przyjęto gęstość siatki na poziomie 30 linii charakterystyk wychodzących z linii $0A_0$ i 38 linii charakterystyk wychodzących z profilu skarpy $0B$ (rys. 4). Otrzymane w wyniku obliczeń graniczne profile skarpy zostały „nałożone” na rzeczywisty nasyp modelowy, w którym naniesiona została rzeczywista krzywa poślizgu (rys. 5).



Rys. 5. Porównanie profilu skarpy i krzywej poślizgu dla parametrów wytrzymałościowych: a) ustalonych w aparacie bezpośredniego ścinania; b) obliczonych metodą analizy wstecznej

Z powyższego wynika, że skarpa graniczna wyznaczona dla parametrów wytrzymałościowych pochodzących z analizy wstecznej, pokrywa się wręcz idealnie z rzeczywistym obrysem skarpy modelu i jego linią poślizgu. W przypadku użycia wartości spójności wyznaczonej w drodze badań w aparacie bezpośredniego ścinania, profil skarpy wynikający z metody GSN jest znacznie „ostrzejszy”. Sugeruje to, że przyłożone obciążenie przy rzeczywistym nachyleniu nie spowodowałoby utraty stateczności skarpy modelowej.

7. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań i obliczeń można stwierdzić, że badanie parametrów wytrzymałościowych kopalnianego grubokruczowego materiału odpadowego w aparacie bezpośredniego ścinania zawyża wartość spójności. Potwierdzeniem tego są obliczenia wspomnianego parametru metodą analizy wstecznej, porównane z wynikami obliczeń metodą GSN. Ponieważ wartość spójności jest w tym przypadku prawie o połowę mniejsza, może to prowadzić do rozwiązań projektowych po stronie niebezpiecznej dla konstrukcji.

LITERATURA

- [1] *Baran P., Grodecki M.*: Próba ustalenia wybranych właściwości mechanicznych skały płonej metodą analizy wstecznej. „XIV Konferencja Naukowa Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbiewów, marzec 2002, 253–262
- [2] *Cisek A., Kawalec B., Soczawa A.*: Wpływ czasu składowania na właściwości nieprzepalonych odpadów powęglowych. Gliwice, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. 57. 1982, 25–43
- [3] *Gruchot A.*: Shear strength parameters of colliery spoils determined in middle size apparatuses. “XIV European Young Geotechnical Engineer’s Conference”, Bułgaria, September 2001, 127–137
- [4] *Jeske T., Przedecki T., Rossiński R.*: *Mechanika gruntów*. Łódź, Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1965
- [5] *Kawalec J.*: Ocena wytrzymałości odpadów górniczych na podstawie próbných obciążeń nasypu. Praca doktorska — maszynopis. Gliwice, Politechnika Śląska w Gliwicach 2000
- [6] *Szymacha A.*: Analiza stateczności nasypów z odpadów powęglowych metodą granicznego stanu naprężeń. Praca magisterska — maszynopis. Kraków, Uniwersytet Rolniczy 2008
- [7] *Wilun Z.*: *Zarys geotechniki*. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2000