



# **Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych**

*Przemysław Baran, Mariusz Cholewa, Eugeniusz Zawisza*  
*Uniwersytet Rolniczy, Kraków*

*Kamil Kulasik*  
*Bureau Veritas Polska*

## **1. Wstęp**

Od 29 grudnia 2012 r. obowiązuje nowa ustawa o odpadach wprowadzająca unijne unormowania dotyczące gospodarki takimi materiałami. Nowe przepisy regulują między innymi obowiązki wytwórców odpadów, posiadaczy odpadów gospodarujących nimi oraz nowych podmiotów – sprzedawców i pośredników, w obrocie odpadami, a także obowiązki organów administracji publicznej w zakresie gospodarki odpadami. Unormowania zawarte w ustawie wprowadzają postanowienia dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE i zastąpią obowiązującą od października 2001 roku ustawę o odpadach. Nowa ustawa przyjmuje hierarchię sposobów postępowania z odpadami: zapobieganie, przygotowywanie do ponownego użycia, recykling lub inne metody odzysku (np. odzysk energii) i unieszkodliwianie. W porównaniu do dotychczasowych przepisów, kładzie duży nacisk na zapobieganie powstawaniu odpadów oraz na ponowne ich użycie. W Polsce ponad 90% odpadów stanowią odpady przemysłowe wytwarzane w przemyśle energetycznym, metalurgicznym i górnictwie. Powołując się na Główny Urząd Statystyczny [7], w roku 2011, 124 mln Mg odpadów stanowiły odpady przemysłowe, a 9,8 mln. Analizując przytoczone opracowanie możemy znaleźć między innymi, iż 3.6% odpadów to popioły lotne ze spalania

węgla, a według Zadrogi i Olańczuk-Neyman [9] 42,5% odpadów przemysłowych, to odpady powęglowe z kopalń i zakładów przetwórczych. Tym też rodzajom odpadów poświęcono niniejszy artykuł.

W ujęciu geotechnicznym odpady powęglowe to mieszanina okruchów skalnych pochodzących z warstw towarzyszących pokładowi węgla oraz z przewarstwień serii węglonośnych wydobytych na powierzchnię ziemi w procesie urobku węgla w czasie drażenia szybików i chodników międzypokładowych. Okruchy te składają się głównie ze skał ilastych, mułowców, piaskowców i zlepieńców [5].

Wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych węglem powoduje powstawanie różnego rodzaju odpadów paleniskowych. W procesie spalania w kotłach cząstki lotne, czyli popiół, unoszone są razem ze spalinami i osadzane w elektrofiltrach. Frakcje grubsze, czyli żużel, są usuwane spod kotła mechanicznie. W Polsce popioły lotne i żużle stanowią około 15% nagromadzonych 300 mln ton odpadów przemysłowych. Składowane są one na składowiskach zajmujących łączną powierzchnię ponad 3 tys. hektarów [8].

Zapotrzebowanie na materiały ziemne jest bardzo duże, dlatego coraz częściej zamiast rekultywacji hałd, wykorzystuje się wspomniane odpady jako surowiec mineralny. Zmniejsza się w ten sposób koszty magazynowania, czerpiąc korzyści techniczne i ekonomiczne, gdyż zmniejsza się koszty oraz zużycie gruntów naturalnych w budownictwie ziemnym hydrotechnicznym i drogowym redukując koszty inwestycji o około 5–8%.

## **2. Metodyka badań**

Dotychczasowe prace badawcze pozwalają na stwierdzenie, że odpady kopalniane i poenergetyczne 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. Problem poprawnego ustalenia wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie prowadzi do poszukiwania alternatywnych metod badawczych [1, 2, 4]. W celu wiarygodnego określenia parametrów wytrzymałościowych gruntów antropogenicznych zdecydowano się skorzystać z metody analizy półwstecznej wyników próbných obciążeń nasypu. Formowanie nasypu zgodnie z obowiązującą technologią prowadzenia robót ziemnych po-

zwala na dobre dopasowanie ścieżki obciążenia, co jest istotne w przypadku wrażliwości materiałów rozdrobnionych na tę właściwość. Kolejną niewątpliwą zaletą badań modelowych jest większa powierzchnia badawcza, w porównaniu z próbą laboratoryjną, umożliwiającą przy mniejszej liczbie badań a nawet jednostkowym badaniu formułowanie wiarygodnych wniosków [4]. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki z dwóch metod badawczych: bezpośredniego ścinania oraz analizy nośności granicznej skarp modelowych. Następnie wyniki tych badań połączono ze sobą, aby sprawdzić czy istnieje związek między parametrami wytrzymałości na ścinanie uzyskanymi w laboratorium, a możliwością zainicjowania się zjawiska utraty stateczności nasypów badawczych wykonanych z materiałów odpadowych. W wyniku połączenia powyższych metod oraz wprowadzenia pewnych parametrów wskaźnikowych możliwe było uzyskanie realnych, w danych warunkach pracy, wartości parametrów wytrzymałości gruntów na ścinanie.

## **2. Charakterystyka geotechniczna wykorzystanych materiałów odpadowych**

Do badań zostały użyte odpady powęglowe z kopalni węgla kamiennego Makoszowy, o uziarnieniu mniejszym od 60 mm. Z petrograficznego punktu widzenia dominujący składnik stanowiły skały ilaste, których udział wynosił 95% (90% przypadało na łupki ilaste, a 5% na ilowce węglowe zawierające przerosty węgla). Skały piaskowcowe występowały w badanych odpadach w ilości 5% jako piaskowce arkozowe [10]. Rozkład uziarnienia badanych odpadów powęglowych wraz z wybranymi wartościami parametrów fizycznych przedstawiono w tabeli 1. Według normy PN-86/B-02480 opisywana skała płona odpowiadała bardzo różnoziarnistym żwirom gliniastym – wskaźnik różnoziarnistości wyniósł 158. Według normy PN-EN ISO 14688 materiał użyty w badaniach to żwir pylasty.

Drugim materiałem badawczym był popiół z elektrociepłowni Skawina, pochodzący ze spalania węgla kamiennego dostarczanego przez kopalnie: Piast, Wesola i Rydułtowy, w ilości odpowiednio 50, 30 i 20%. Biorąc pod uwagę skład fazowy badanych popiołów należy wyróżnić przede wszystkim kwarc, mullit i hematyt. Z punktu widzenia chemicznego, popiół z Elektrowni Skawina jest popiołem krzemianowym. Pierwiastkami wiodącymi są natomiast cynk, mangan i ołów, przy

stosunkowo niskiej zawartości chromu, miedzi i niklu. Rozpuszczalność popiołów z węgla kamiennego szacuje się na około 2%. Najłatwiej rozpuszczane związki w popiołach to: siarczan wapnia, magnezu, sodu i potasu oraz tlenek wapnia, decydujący o alkaliczności roztworu. Wymywalność metali z popiołu pochodzącego z Elektrowni Skawina nie przekracza w żadnym przypadku 50%. Najlepsze wartości wymywania do roztworu zaobserwowano dla cynku, a najmniejsze dla kadmu [3]. Wybrane wartości parametrów fizycznych badanego popiołu zestawiono w tabeli 2. Według normy PN-86/B-02480 opisywany materiał badawczy sklasyfikowano jako pył piaszczysty, a według normy PN-EN ISO 14688 jako pył ilasty.

**Tabela 1.** Wybrane właściwości fizyczne odpadów powęglowych z KWK Makoszowy

**Table 1.** Selected physical properties of Makoszowy minestone

Parametr geotechniczny	Symbol	Jedn.	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	$f_\pi$		6,0
-iłowa < 0,002 mm	$f_i$		3,1
Wilgotność optymalna	$w_{opt}$		%
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	$\rho_{ds}$	g/cm <sup>3</sup>	1,77
Gęstość właściwa szkieletu	$\rho_s$		2,8

Oznaczenie uziarnienia odpadów powęglowych i popiołów lotnych wykonano metodą przemywania (dla frakcji powyżej 0.063 mm) oraz sedymentacyjną. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu wyznaczono w aparacie Proctora śreniowymiarowym (odpady powęglowe) i standardowym (popiół). Gęstość właściwą szkieletu określono metodą piknometru.

**Tabela 2.** Wybrane właściwości fizyczne popiołów lotnych z Elektrowni Skawina  
**Table 2.** Selected physical properties of ashes from Skawina Power Station

Parametr geotechniczny	Symbol	Jedn.	Wartość
Zawartość frakcji:			
-piaskowa 2–0,05 mm	$f_p$	%	16,0
-pyłowa 0,05–0,002 mm	$f_\pi$		68,0
-iłowa < 0,002 mm	$f_i$		16,0
Wilgotność optymalna	$w_{opt}$	%	29,8
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	$\rho_{ds}$	g/cm <sup>3</sup>	1,26
Gęstość właściwa szkieletu	$\rho_s$		2,19

### 3. Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych metodą bezpośredniego ścinania

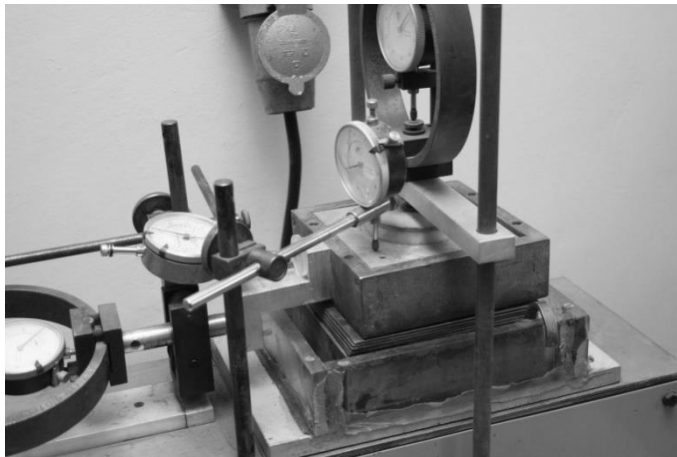
Wartości parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych wyznaczono w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 1). Skrzynka aparatu miała wymiary 30 x 30 x 20 cm, i doposażona została w ramki pośrednie tworzące strefę ścinania o grubości 3 cm. Badanie przeprowadzono na próbkach o wilgotności optymalnej, przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,90$ . Próbkę poddano konsolidacji przy obciążeniu pionowym: 110, 200, 300 i 400 kPa przez pół godziny, a następnie ścinano przy prędkości 1 mm/min.

Wartości parametrów wytrzymałościowych badanego popiołu ustalono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania. Badanie wykonano na pięciu próbkach o wymiarach 60 x 60 x 27,7 mm. Podobnie jak w przypadku aparatu średniowymiarowego, standardowy został doposażony w ramki pośrednie tworzące strefę ścinania o grubości 1 cm (rys. 2). Badanie przeprowadzono na próbkach o wilgotności optymalnej, przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,95$ . Próbkę poddano konsolidacji przy obciążeniu pionowym: 200, 400, 500, 700 i 900 kPa przez pół godziny, a następnie ścinano przy prędkości 1 mm/min.

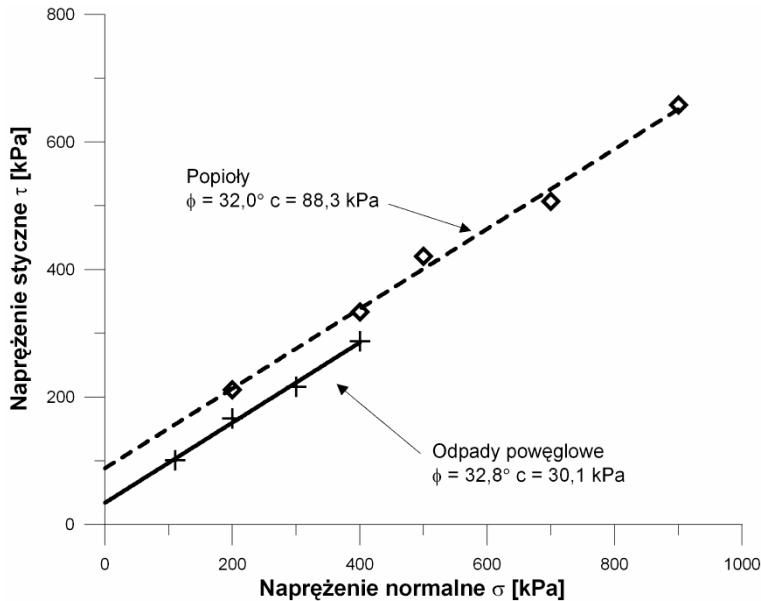
Wyniki przeprowadzonych badań wraz z przebiegiem prostych Coulomba dla odpadów powęglowych i popiołu elektrownianego przedstawiono na rys. 3.



**Rys. 1.** Użyty do badań średniowymiarowy aparat bezpośredniego ścinania  
**Fig. 1.** Medium-size direct shear box apparatus used for tests



**Rys. 2.** Użyty do badań standardowy aparat bezpośredniego ścinania  
(fot. P. Baran)  
**Fig. 2.** Standard-size direct shear box apparatus used for tests (photo P. Baran)



Rys. 3. Proste Coulomba dla badanych materiałów

Fig. 3. Coulomb's straight lines for tested materials

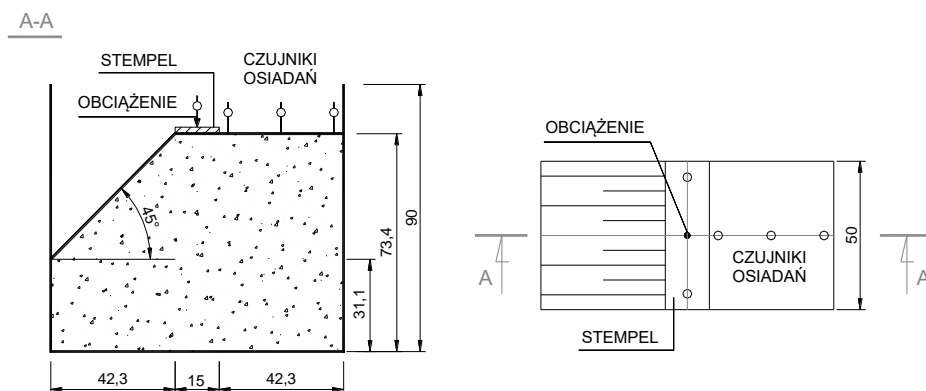
#### 4. Ustalenie granicznego obciążenia skarp modelowych

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

- skrzyni modelowej (rys. 4) o wymiarach w rzucie około 50 x 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 x 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.

Do budowy modelu doświadczalnego został użyty popiół o uziarnieniu poniżej 2 mm. Nasyp modelowy był budowany warstwami przy założonym wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,95$  i wilgotności optymalnej,

a pomiędzy formowane warstwy dodawano paski barwionego popiołu w celu łatwiejszego ustalenia przebiegu krzywej poślizgu. Po każdorazowym ułożeniu warstwy przeprowadzano kontrolę jej zagęszczenia. Na górnej krawędzi skarpy umieszczono stempel obciążeniowy. Następnie, średnio co 2 minuty, obciążano go wielokrotnością naprężenia 24,5 kPa. Badanie zakończono z chwilą utraty stateczności nasypu modelowego (rys. 5).



**Rys. 4.** Schemat skrzyni modelowej

**Fig. 4.** Scheme of model test box

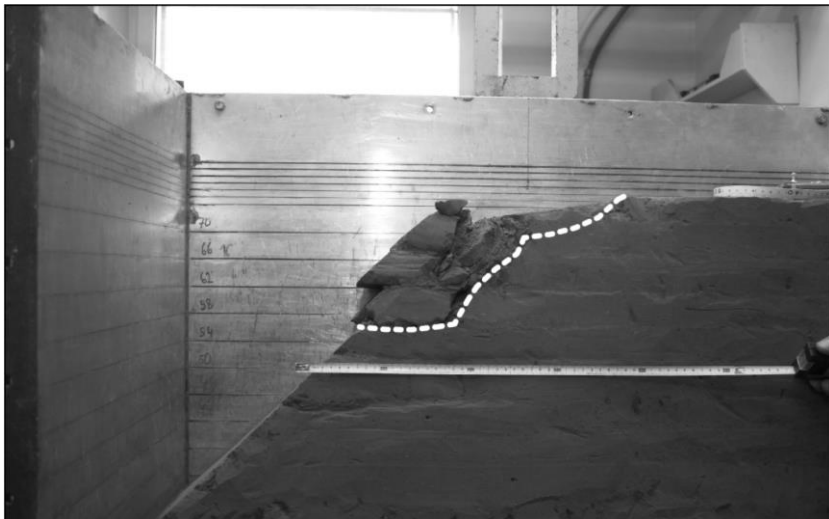
Na podstawie pomiaru przemieszczeń poziomych pasków barwionego popiołu oraz widocznego obsunięcia się nasypu dokonano analizy deformacji, określając przebieg płaszczyzny poślizgu (rys. 6). badanym przypadkiem graniczne naprężenie przekazane przez stempel, przy którym zainicjował się mechanizm utraty stateczności, wyniosło ~823 kPa.





**Rys. 5.** Deformacje modelu nasypu z popiołów lotnych na skutek utraty stateczności

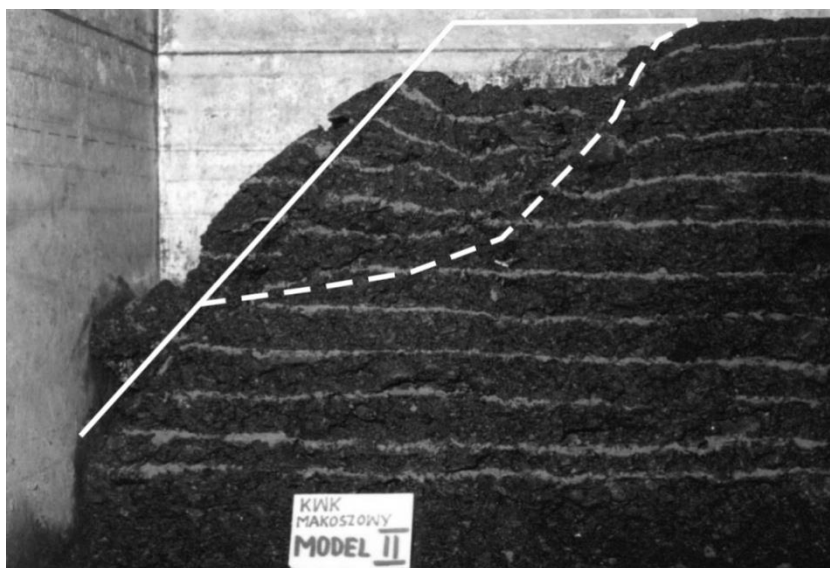
**Fig. 5.** Deformations of the embankment model made of ashes due to slope failure



**Rys. 6.** Deformacja modelu skarpy z popiołów lotnych wraz z przebiegiem powierzchni poślizgu

**Fig. 6.** Deformations of the embankment model made of ashes with a failure surface

Nasyp modelowy z odpadów powęglowych budowano z materiału o wilgotności zbliżonej do optymalnej, warstwami o grubości 4 cm. Podobnie jak w przypadku wspomnianych wcześniej badań popiołu, na powierzchni każdej warstwy w osi nasypu wprowadzano paski barwionego popiołu. Wskaźnik zagęszczenia materiału w nasypie wynosił  $I_S = 0,90$ . Stempel umieszczono na krawędzi górnej powierzchni skarpy i obciążano stopniami o wielokrotności 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 za pomocą pomiaru przemieszczeń pasków barwionego popiołu (rys. 7). W badanym przypadku graniczne naprężenie przekazane przez stempel, przy którym zainicjował się mechanizm utraty stateczności, wyniosło  $\sim 230$  kPa.



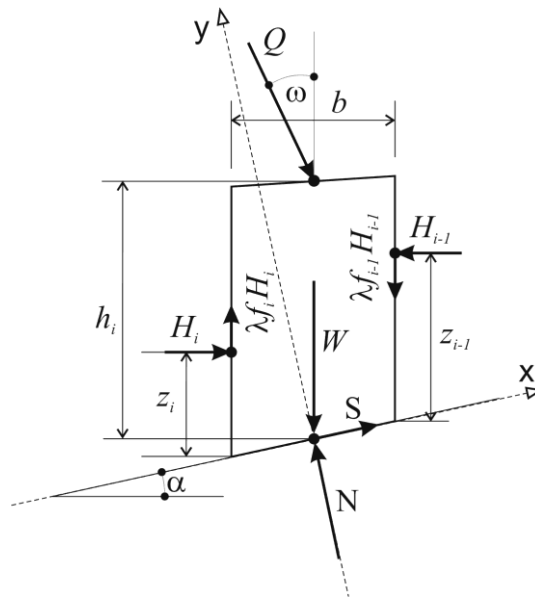
**Rys. 7.** Deformacja modelu skarpy z odpadów powęglowych wraz z przebiegiem powierzchni poślizgu

**Fig. 7.** Deformations of the embankment model made of colliery spoils with a failure surface

Znacząca różnica w wartościach naprężenia granicznego badanych modeli nasypów wynikała z cementacji popiołu.

### 5. Sprawdzenie stateczności obciążonych modeli nasypów

Zakładając, iż badane modele nasypów tuż przed zniszczeniem znajdują się w stanie granicznym, ich współczynnik stateczności ma wartość około 1,0. Aby to sprawdzić, wykonano analizę stateczności wykorzystując jedną z metod równowagi granicznej – metodę Morgensterna-Price’a. Wybór metody został podyktowany rygorystycznym podejściem do spełnienia wszystkich warunków równowagi jakim podlega masyw gruntowy. Metoda opiera się na założeniu, iż poślizg bryły osuwiskowej przebiega po dowolnie ukształtowanej płaszczyźnie poślizgu. Opisane poniżej równania są w nieco odmienny sposób formułowane niż w oryginalnej pracy Morgensterna – Price’a [6]. Zaproponowano tu pewną modyfikację [11], w której rezygnuje się z wielkości nieskończenie małych, a tym samym równania nie mają charakteru równań różniczkowych, stąd ich rozwiązanie jest prostsze i zawsze istnieje.



**Rys. 8.** Układ sił działających na 1 m szerokości wydzielonego bloku gruntu w metodzie Morgensterna-Price’a

**Fig. 8.** Group of force acting on 1 m width of selected soil block in the Morgenstern-Price method

Na każdy z wydzielonych bloków bryły osuwiskowej (rys. 8) działają następujące siły:  $W$  – ciężaru własnego,  $N$  – normalna do podstawy,  $H_i, H_{i-1}$  – składowe poziome sił oddziaływania z lewej i prawej strony bloku,  $S$  – zmobilizowana tarcia,  $Q$  – zewnętrzna. Ponadto:  $\lambda$  – współczynnik liczbowy,  $f$  – wartość funkcji międzyblokowej ustalana dla danego bloku.

Poniżej przedstawiono równania zmodyfikowanej metody, które zostały użyte bezpośrednio w obliczeniach stateczności.

$$R_i = [W_i \cdot \cos \alpha_i + Q_i \cdot \cos(\omega_i - \alpha_i)] \operatorname{tg} \phi_i + c_i \cdot b_i \cdot \sec \alpha_i \quad (1)$$

$$T_i = W_i \cdot \sin \alpha_i - Q_i \cdot \sin(\omega_i - \alpha_i) \quad (2)$$

gdzie:

$R$  – suma oporów tarcia wywołana siłami działającymi na blok (z wyjątkiem sił międzyblokowych),

$T$  – suma składowych sił działających na blok (z wyjątkiem sił międzyblokowych) dążących do jego osunięcia,

$i$  – numer bloku,

(pozostałe oznaczenia zgodnie z rys. 8).

$$\Phi_i = (\sin \alpha_i - \lambda \cdot f_i \cdot \cos \alpha_i) \operatorname{tg} \phi_i + (\cos \alpha_i + \lambda \cdot f_i \cdot \sin \alpha_i) F \quad (3)$$

$$\Phi_{i-1} = (\sin \alpha_{i-1} - \lambda \cdot f_{i-1} \cdot \cos \alpha_{i-1}) \operatorname{tg} \phi_{i-1} + (\cos \alpha_{i-1} + \lambda \cdot f_{i-1} \cdot \sin \alpha_{i-1}) F \quad (4)$$

$$\Psi_{i-1} = \frac{[(\sin \alpha_i - \lambda \cdot f_{i-1} \cdot \cos \alpha_i) \operatorname{tg} \phi_i + (\cos \alpha_i + \lambda \cdot f_{i-1} \cdot \sin \alpha_i) F]}{\Phi_{i-1}} \quad (5)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j \right) + T_n} \quad (6)$$

gdzie:

$\Phi, \Psi$  – współczynniki liczbowe,

$F$  – współczynnik stateczności,

$f$  – wartość funkcji międzyblokowej przyjęta w postaci:

$$f(x_i) = \sin^\mu \left[ \pi \left( \frac{x_i}{x_{n+1}} \right)^\nu \right] \tag{7}$$

$x_i$  – odległość pozioma mierzona od początku układu odniesienia do krawędzi  $i$ -tego bloku,

$\mu, \nu$  – parametry funkcji ( $\mu = 0-4,0$  i  $\nu = 0.5-1,5$ ).

$$H_i = \frac{\Psi_{i-1} \cdot H_{i-1} \cdot \Phi_{i-1} + F \cdot T_i - R_i}{\Phi_i} \tag{8}$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i(H_i + H_{i-1}) \operatorname{tg} \alpha_i + 2 \cdot Q_i \cdot \sin \omega_i \cdot h_i]}{\sum_{i=1}^n [b_i(f_i \cdot H_i + f_{i-1} \cdot H_{i-1})]} \tag{9}$$

Obliczenia współczynnika stateczności wykonano dla parametrów wytrzymałościowych pozyskanych z badań laboratoryjnych (rys. 3). Bryły odłamu podzielono na 30 bloków zgodnie ze schematami przedstawionymi na rys. 9. Przebieg krzywej poślizgu wynikał z przeprowadzonych badań modelowych. Przyłożone od strony naziomu obciążenie odpowiadało naciskowi jednostkowemu stempla w chwili zainicjowania mechanizmu zniszczenia skarpy. W toku obliczeń otrzymano następujące wyniki (tab. 3).



**Rys. 9.** Profile analizowanych brył osuwiskowych

**Fig. 9.** Profiles of analyzed sliding masses

Do analizy uzyskanych wyników obliczeń współczynnika stateczności  $F$  w funkcji parametrów  $\mu$  i  $\nu$  przyjęto tylko te jego wartości,

dla których parametr skali  $\lambda$  nie przekraczał 1,0 (wyróżniono szarym tłem). Z powyższego zestawienia wynika jednoznacznie, iż w żadnej akceptowalnej konfiguracji  $\mu$  i  $\nu$ , zarówno w przypadku modelu wykonanego z odpadów, jak i z popiołów, nie uzyskano wyniku sugerującego utratę stateczności. Skłania to do konieczności zmodyfikowania uzyskanych w drodze badań laboratoryjnych wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie.

**Tabela 3.** Porównanie obliczonych wartości  $F$  i  $\lambda$

**Table 3.** Comparison of computed values of  $F$  and  $\lambda$

$\mu$	$\nu$	Popiół		Odpady powęglowe	
		$\lambda$	$F$	$\lambda$	$F$
0	n/d	0,864	2,031	0,711	1,553
0,5	0,5	0,956	2,017	0,808	1,544
	1	0,979	2,004	0,867	1,519
	1,5	1,080	2,000	0,996	1,497
1	0,5	1,085	2,011	0,885	1,556
	1	1,126	1,984	0,992	1,491
	1,5	1,242	1,987	1,183	1,447
2	0,5	1,341	2,007	1,027	1,582
	1	1,389	1,960	1,186	1,425
	1,5	1,442	1,992	1,442	1,390
3	0,5	1,571	2,006	1,159	1,611
	1	1,602	1,944	1,320	1,367
	1,5	1,604	2,013	1,658	1,382
4	0,5	1,756	2,004	1,282	1,641
	1	1,772	1,932	1,422	1,326
	1,5	1,769	2,040	1,856	1,393

## 6. Proponowana procedura modyfikacji wartości parametrów wytrzymałościowych

Modyfikacja parametrów wytrzymałości na ścinanie powinna odbywać się z założeniem, iż zmianie ma podlegać tylko jeden z parametrów (analiza półwsteczna). W celu określenia który parametr będzie ulegać zmianie, konieczne jest wprowadzenie wielkości wskaźnikowych. Zaproponowano następujące parametry:

- tarcia bezwymiarowego:

$$\eta = \frac{\tan \phi_{ABS} \sum_{i=1}^n \frac{W_i \cdot \cos^2 \alpha_i}{b_i}}{q_{gr}} \quad (10)$$

- spójności bezwymiarowej:

$$\xi = \frac{c_{ABS}}{q_{gr}} \quad (11)$$

gdzie:

$\phi_{ABS}$ ,  $c_{ABS}$  – parametry wytrzymałości gruntu uzyskane w aparacie bezpośredniego ścinania,

$q_{gr}$  – graniczne naprężenie w naziomie modelu nasypu.

(pozostałe oznaczenia zgodnie z rozdz. 5)

Jeżeli  $\eta > \xi$ , to zmianie ulega spójność, a gdy  $\eta < \xi$ , to zmiana dotyczy kąta tarcia wewnętrznego. Uzyskane wartości wskaźnikowe dla nasypu modelowego z odpadów powęglowych wyniosły:  $\eta = 0,152$ ;  $\xi = 0,131$ . Na ich podstawie dokonano modyfikacji spójności przez podstawienie takiej wartości do obliczeń metodą omówioną w rozdz. 5, dla której współczynnik stateczności  $F = 1,0$  (rys. 10).

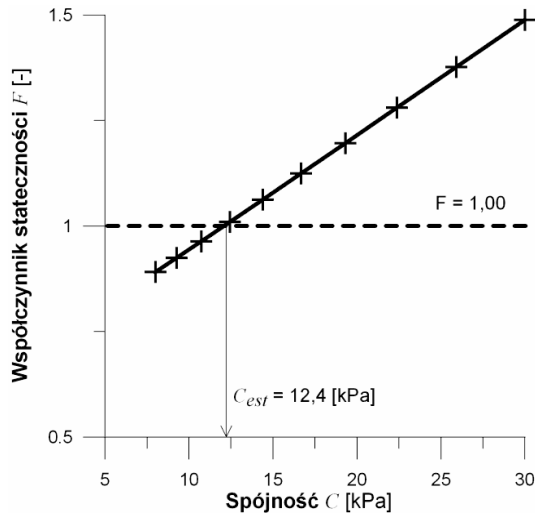
W przypadku modelu nasypu z popiołów elektrownianych wartości wskaźnikowe wyniosły:  $\eta = 0,012$ ;  $\xi = 0,108$ . W tym przypadku zmodyfikowano wartość kąta tarcia wewnętrznego (rys. 11) w oparciu o ten sam sposób jak w modelu z odpadów powęglowych.

Zestawienie wyjściowych i zmodyfikowanych parametrów wytrzymałości na ścinanie przedstawiono w tab. 4.

**Tabela 4.** Zestawienie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie badanych materiałów

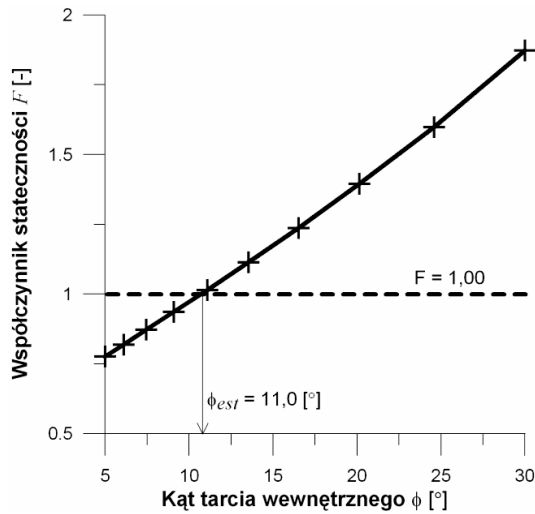
**Table 4.** Listing of shear strength parameters values of tested materials

Materiał	Parametry wytrzymałości na ścinanie			
	aparat bezpośredniego ścinania		analiza półwsteczna	
	$\phi$ [°]	c [kPa]	$\phi$ [°]	c [kPa]
Odpady powęglowe	32,8	30,1	32,8	12,4
Popiół elektrowniany	32,0	88,3	11,0	88,3



**Rys. 10.** Wpływ spójności na wartość współczynnika stateczności modelu nasypu z odpadów powęglowych ( $\phi = \text{const}$ )

**Fig. 10.** An influence of cohesion on the value of stability factor in the embankment model made of colliery spoils ( $\phi = \text{const}$ )



**Rys. 11.** Wpływ kąta tarcia wewnętrzznego na wartość współczynnika stateczności modelu nasypu z popiołu elektrownianego ( $c = \text{const}$ )

**Fig. 11.** An influence of friction angle on the value of stability factor in the embankment model made of fuel ashes ( $c = \text{const}$ )



## **7. Wnioski**

1. Rodzaj metody badawczej użytej do ustalenia wartości parametrów wytrzymałościowych odpadowego materiału grubookruchowego i droбноziarnistego silnie oddziałuje na warunki brzegowe badania.
2. Parametry wytrzymałościowe badanych materiałów odpadowych są silnie związane ze ścieżką obciążenia, w związku z tym istotne jest w jakich warunkach materiał ma pracować, a w jakich się go bada.
3. W analizowanych materiałach odpadowych wbudowanych w nasypy modelowe poddane obciążeniu niszczącemu, użyte do sprawdzenia stateczności wartości parametrów wytrzymałościowych uzyskane z aparatu bezpośredniego ścinania nie potwierdziły zaobserwowanego zjawiska utraty stateczności.
4. Zaproponowane parametry wskaźnikowe (tarcia bezwymiarowego  $\eta$  i spójności bezwymiarowej  $\xi$ ) mogą być użyte w celu sprawdzenia, który z parametrów wytrzymałościowych, ustalonych na drodze bezpośredniego ścinania, wymaga skorygowania.
5. Badanie parametrów wytrzymałościowych kopalnianego grubookruchowego materiału odpadowego w aparacie bezpośredniego ścinania zawiąza w istotny sposób wartość spójności.
6. W przypadku droбноziarnistego materiału odpadowego jakim był popiół, badanie w aparacie bezpośredniego ścinania zawiąza wartość kąta tarcia wewnętrzznego. Uzyskana w tym badaniu wartość spójności jest zauważalnie wyższa niż w przypadku gruntów naturalnych i jest wynikiem wiązania cząstek na skutek stosunkowo dużej zawartości związków wapnia (szczególnie w popiołach po pólsuchym i suchym odsiarczaniu spalin [10]).
7. Postuluje się, aby z uwagi na bezpieczeństwo użytkowania budowli ziemnej, parametry wytrzymałościowe materiałów antropogenicznych były ustalone w rzeczywistych warunkach ich pracy. Jeżeli nie jest to możliwe, to uzyskane wartości na drodze badań laboratoryjnych powinny być skorygowane przy użyciu badań symulujących pracę danej budowli.

## Literatura

1. **Baran P., Zawisza E., Szymacha A.:** *Próba weryfikacji parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych metodą granicznego stanu naprężenia.* Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczo-Hutniczej i Geoinżynierii. Geotechnika i Budownictwo Specjalne. Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej. Górnictwo I Geoinżynieria. rok 33. zeszyt 1. 47–55. (2009).
2. **Baran P., Zawisza E., Trela A.:** *Użycie wybranych metod równowagi granicznej jako narzędzia analizującego wartość parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych.* Inżynieria Morska i Geotechnika. Nr 4/2012. 456–461 (2012).
3. **Damijan E., Sikora W., Szczawiński W.:** *Charakterystyka odpadów energetycznych z elektrowni w Belchatowie i Skawinie.* Ochrona powietrza i problemy odpadów. 1/1999 [33] (1999).
4. **Kawalec J.:** *Określanie parametrów wytrzymałościowych gruntów antropogenicznych na podstawie wstecznej analizy deformacji nasypu.* Przegląd Naukowy SGGW w Warszawie. Zeszyt nr 20. 161–166 (2001).
5. **Krzyk P., Baran P.:** *Analiza stateczności skarp nasypów wykonanych z odpadów powęglowych.* Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Z. 3-B/2001. 106–113 (2001).
6. **Morgenstern N.R., Price V.E.:** *The analysis of the stability of general slip surfaces.* Geotechnique Nr 1 79–93 (1965).
7. Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa 2012.
8. **Zabielska-Adamska K.:** *Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających.* Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok 2006.
9. **Zadroga B., Olańczuk-Neyman K.:** *Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego.* Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2001.
10. **Zawisza E.:** *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi.* Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Kraków 2001.
11. **Zhu D.Y., Lee C.F., Qian Q.H., Chen G.R.:** *A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern – Price method.* Can Geotech J.42, 272–278 (2005).

## **The Problem of Unequivocal Determination of the Shear Strength Parameters of Colliery Waste and Fuel Ashes**

### **Abstract**

Previous researches conclude that coal mining waste and fly ashes are useful in many kind of engineering – especially in building of embankments. In fact that the embankments transfer self weight and external loads, determination of strength parameters is very crucial. The problem of well-determined shear strength parameters conducts to searching alternative investigation methods. In the aim of credible determination of strength parameters of anthropogenic soils, the half-back analysis have been proposing.

The paper presents the results of two investigation method: direct shear and limit bearing capacity analysis of slope models. Results of the tests were combined together, for verification of a relationship between shear strength obtained during laboratory tests and possibility slope failure to be initiate in embankment models made of the waste materials. In consequence of the methods combination and apply of some indexing factors into analysis, a real values of the shear strength were obtained in a specific working conditions. Proposed indexing factors can be use to examine what strength parameter, determined using direct shear test, have to be modify.

In the analysed waste materials incorporated into embankments treated by braking load, the shear strength parameters determined in direct shear apparatus used for stability analysis, did not confirm stability failure phenomena what has occurred. Investigation of shear strength parameters of coarse mine-stone waste material in direct shear box apparatus overstate in significant way the value of cohesion. In case of fine size fly ash, the direct shear box test overstate the value of friction angle.

It has to be postulated in attention of earth structure safety exploitation, the strength parameters of anthropogenic soils should be determine in real work conditions. If it is not possible, the laboratory tested strength parameters should by modify using tests simulating real work condition of the structure.

A testing method used for obtaining the shear strength parameters of coarse and fine size granular waste material, strong interacting on the boundary conditions in test. Shear strength parameters of the tested waste materials are strong associated with the loading path. In consequence, is very crucial what are the work and test conditions of the material.