



Ustalenie parametrów wytrzymałościowych popioło-żuźla i piasku pylastego z wykorzystaniem niszczących badań nasypów modelowych

Przemysław Baran, Mariusz Cholewa
Uniwersytet Rolniczy, Kraków

1. Wstęp

Jedną z najstarszych form budownictwa, która towarzyszy ludzkości od zarania dziejów jest budownictwo ziemne [5]. Podstawową funkcję, jako materiału budowlanego, pełni tutaj grunt, z którego tworzone są struktury przestrzenne, takie jak nasypy budowlane oraz wykopy. Grunt wykorzystany jako tworzywo do wykonywania budowli ziemnych został podzielony według normy EN ISO 14688 na grunt naturalny i antropogeniczny. W procesach produkcji energii elektrycznej i cieplnej w czasie spalania materiału węglowego powstają różnorodnego typu odpady, takie jak: popioły lotne, żuźle, popioło-żuźle, pozostałości z kotłów fluidalnych, odpad z odsiarczania spalin (np. gips), itp. Przez wiele lat nie potrafiono skutecznie zagospodarować wymienionych wyżej odpadów. Najczęściej lokowano je na składowiskach w postaci hałd. W ostatnich latach wspomniane odpady nazwano „Ubocznymi Produktami Spalania”. UPS posiadają bardzo dobre właściwości zagęszczające, co uzasadnia ich wykorzystanie w budowie obwałowań, grobli czy nasypów. Popioły często zostają wykorzystywane do poprawy i stabilizacji gruntów spoistych, które charakteryzują się dużym stopniem plastyczności oraz gruntów organicznych. Możliwe jest również mieszanie popiołów z grubookruchowymi odpadami powęglowymi dzięki czemu uzyskuje się materiał o bardzo dobrych parametrach fizycznych i mechanicznych [12]. Struktura gruntu naturalnego poprzez dodatek np. popiołu

lotnego ulega zmianie, czego efektem jest wzrost wytrzymałości na ścinanie i zmniejszenie odkształcalności [4]. Znajomość właściwości geotechnicznych gruntów naturalnych i antropogenicznych jest niezbędna do ekonomicznego i bezpiecznego projektowania budowli ziemnych. Należy podkreślić, iż obliczenia stateczności podłoża, skarp, a także parcia gruntu na konstrukcje oporowe, nie byłoby możliwe bez znajomości wytrzymałości gruntu na ścinanie oraz wartości parametrów określających tę wytrzymałość. Na problemy poprawnego ustalenia wartości kąta tarcia wewnętrznego (Φ) i spójności gruntu (c) zwraca uwagę Kawalec i in. w pracach [8, 9] oraz Gryczmański i in. [7], a także Pieczyrak [10], proponując alternatywną w stosunku do laboratoryjnej metodę pozyskania parametrów wytrzymałościowych, polegającą na próbnym obciążaniu korony nasypu. Wspomniana metoda wymaga badań *in situ* w dużej skali i rozwiązania odwrotnego zagadnienia brzegowego. W zagadnieniu takim dane są obciążenia eksploatacyjne lub graniczne, oraz odpowiadające im przemieszczenia; niewiadomymi są wartości parametrów gruntu. Autorzy niniejszego artykułu przedstawili podobną do omawianej powyżej metodę określania wartości wybranych parametrów wytrzymałościowych gruntu, opierając się nie na badaniach wielkoskalowych, a na laboratoryjnych badaniach w skali półtechnicznej. W ramach przedmiotowych badań przeprowadzono niszczące testy na nasypach modelowych, wykonanych z dwóch rodzajów gruntu: naturalnego (piasku pylastego) i antropogenicznego (popioło-żuźla). Celem tych badań było również skonfrontowanie uzyskanych wyników z parametrami wytrzymałościowymi oznaczonymi metodą standardową, a także określenie możliwości wykorzystania modelowych badań niszczących do oceny parametrów wytrzymałościowych gruntów antropogenicznych i naturalnych.

2. Zastosowane metody badawcze

Pierwszym z wykonanych badań było oznaczenie gęstości właściwej szkieletu gruntowego (ρ_s) metodą piknometru, co pozwoliło na wykonanie analizy sedymentacyjnej w celu określenia zawartości frakcji gruntów poniżej 0.063 mm. Oznaczenie uziarnienia popioło-żuźla oraz piasku pylastego w zakresie frakcji większych od wyżej wymienionej średnicy wykonano metodą przemywania. Aby możliwe było uformowanie nasypów modelowych przy założonym wskaźniku zagęszczenia (I_s),

wykonano oznaczenie wilgotności optymalnej (w_{opt}) i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (ρ_{ds}) wykorzystując standardowy aparat Proctora. Dysponując wynikami badań odnośnie uziarnienia i zagęszczenia, przygotowano grunty o wilgotności optymalnej w ilości około 1000 kg na każdy z wymienionych rodzajów. Następnie oznaczono wytrzymałość na ścinanie w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania, co pozwoliło ustalić dla potrzeb analizy porównawczej, wartość spójności i kąta tarcia wewnętrznego badanych materiałów gruntowych.

W dalszej kolejności uformowano nasypy modelowe (pierwszy o nachyleniu skarpy 45° i drugi 60°), które uzbrojono w aparaturę pomiarową do mierzenia przemieszczeń i przykładając coraz większe obciążenie w konkretnych odstępach czasowych doprowadzono do oberwania się skarpy nasypu modelowego. Jako wynik badań niszczących uzyskano przebieg płaszczyzny poślizgu i wartość obciążenia granicznego przyłożonego na krawędzi naziomu w chwili zainicjowania się mechanizmu ścięcia. Te dane pozwoliły przejść do wykonania obliczeń metodą analizy wstecznej adoptując jedną z metod służących do oceny stateczności skarp.

Następnie założono przedziały kąta tarcia wewnętrznego i spójności oraz obliczono dla każdego z nich wartości współczynnika stateczności F , co pozwoliło ustalić tzw. krzywe graniczne, które skonfrontowano z wynikami uzyskanymi z zastosowania standardowego aparatu bezpośredniego ścinania. Uzyskane wyniki pozwoliły ponadto na określenie możliwości wykorzystania modelowych badań niszczących do oceny parametrów wytrzymałościowych gruntów antropogenicznych i naturalnych.

3. Wybrane parametry geotechniczne wykorzystanych materiałów badawczych

Pierwszym z materiałów badawczych był popioło-żużel – odpad paleniskowy o dużym zróżnicowaniu właściwości fizycznych i chemicznych pochodzący z Elektrowni Skawina (woj. małopolskie), powstały w procesie obróbki cieplnej węgla kamiennego z dodatkiem 10% biomasy, co dyktują uwarunkowania prawne. W skład biomasy wchodziły trociny oraz pelet słonecznikowy. Odpad pozyskiwany jest z dolnej części paleniska, gdzie mechanicznie jest usuwany z kotła, rozdrabniany i transportowany na składowisko [2]. Materiał do przedmiotowych badań został pozyskany ze składowiska. Rozkład uziarnienia badanego popioło-

żuźła wraz z wybranymi wartościami parametrów fizycznych przedstawiono w tabeli 1. Według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4 badany materiał sklasyfikowano jako piasek drobny pylasty z domieszką żwiru.

Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne popioło-żuźła z Elektrowni Skawina
Table 1. Selected physical properties of ash-slag from Skawina Power Station

Parametr geotechniczny	Symbol	Jedn.	Wartość
Zawartość frakcji:			
- żwirowa 63–2 mm	Gr		16,81
- piaskowa 2–0,063 mm	Sa	%	58,81
- pyłowa 0,063–0,002 mm	Si		21,82
- ilowa < 0,002 mm	Cl		2,56
Średnice miarodajne	d_{10}	mm	0,016
	d_{30}		0,070
	d_{50}		0,130
	d_{60}		0,215
Wilgotność optymalna	w_{opt}	%	33,2
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	ρ_{ds}	g/cm^3	1,14
Gęstość właściwa szkieletu	ρ_s		2,43

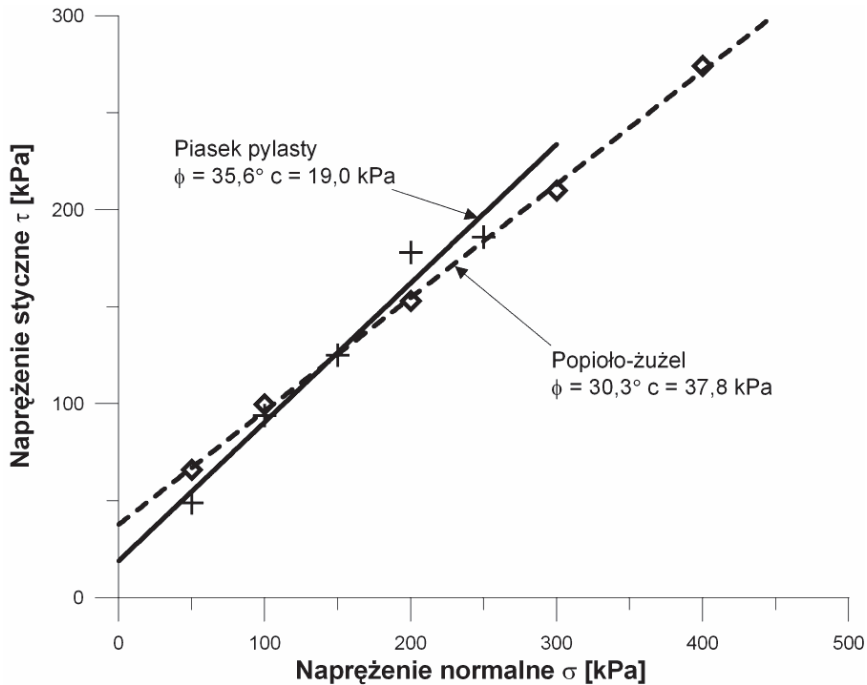
Drugim materiałem badawczym był grunt naturalny pozyskany z wykopów fundamentowych pod jedną z komercyjnych inwestycji zlokalizowanych w Krakowie-Bronowicach (woj. małopolskie). Z punktu widzenia geologicznego rejon poboru gruntu leży w obrębie Zapadliska Przedkarpackiego, tektonicznego obniżenia wypełnionego osadami miocenu. Osady te są reprezentowane przez łąy warstw chodenickich (podpiętro grabowieckie) wieku Torton Górny. Nad wspomnianymi osadami znajdują się nadkłady gruntów czwartorzędowych, w skład których wchodzi: piaski średnie, piaski drobne, piaski pylaste, piaski gliniaste, oraz grunty spoiste – głównie gliny pylaste i piaszczyste [11].

Wybrane wartości parametrów fizycznych badanego gruntu naturalnego zestawiono w tabeli 2. Według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4 badany materiał sklasyfikowano jako piasek pylasty.

Tabela 2. Wybrane właściwości fizyczne piasku pylastego z Krakowa-Bronowic**Table 2.** Selected physical properties of silty sand from Kraków-Bronowice

Parametr geotechniczny	Symbol	Jedn.	Wartość
Zawartość frakcji:			
- żwirowa 63–2 mm	Gr		0,01
- piaskowa 2–0,063 mm	Sa	%	66,78
- pyłowa 0,063–0,002 mm	Si		29,23
- ilowa < 0,002 mm	Cl		3,98
Średnice miarodajne	d_{10}	mm	0,013
	d_{30}		0,053
	d_{50}		0,150
	d_{60}		0,200
Wilgotność optymalna	w_{opt}	%	9,7
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	ρ_{ds}	g/cm^3	1,99
Gęstość właściwa szkieletu	ρ_s		2,68

Wartości parametrów wytrzymałościowych wyznaczono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania. Badanie wykonano na pięciu próbkach o wymiarach 100 x 100 x 31,1 mm. Aparat standardowy został doposażony w ramki pośrednie tworzące strefę ścinania o grubości 1 cm. Badanie przeprowadzono na próbkach o wilgotności optymalnej, przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$. Próbkę poddano konsolidacji przy obciążeniu pionowym: 50, 100, 200, 300, 400 kPa (w przypadku popioło-żużla) oraz 50, 100, 150, 200, 250 kPa (w przypadku piasku pylastego) przez pół godziny, a następnie ścinano przy prędkości 0,2 mm/min. Wyniki przeprowadzonych badań parametrów wytrzymałościowych wraz z przebiegiem prostych Coulomba przedstawiono na rysunku 1.

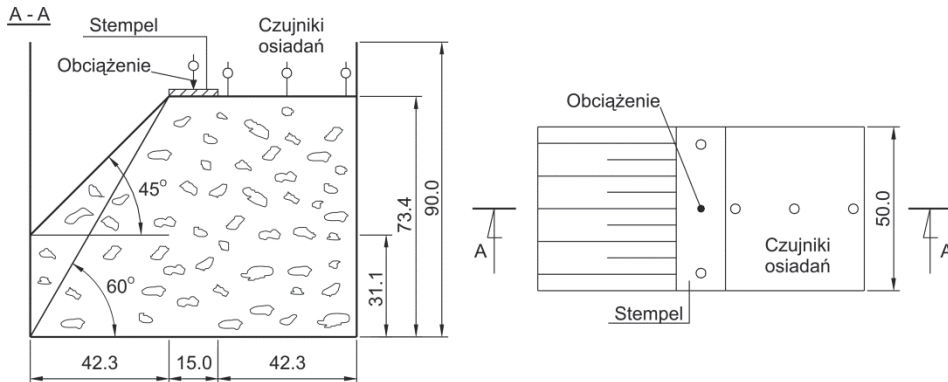


Rys. 1. Proste Coulomba dla badanych materiałów

Fig. 1. Coulombs lines for tested materials

4. Przebieg niszczących badań modelowych

Badania przeprowadzono w skrzyni modelowej (schemat skrzyni przedstawiono na rysunku 2) o długości 99,9 cm, szerokości 50,4 cm i wysokości ok. 100 cm. Skrzynia wykonana jest ze stalowej konstrukcji pokrytej blachą z elementami plexi, obudowana stalową ramą, do której zamontowana jest dźwignia dająca przełożenie 1:10. Na dłuższym końcu dźwigni zamontowane są wieszaki na obciążniki. Drugi koniec dźwigni mocowany jest do ramy, a kilkanaście centymetrów wcześniej dźwignia posiada mocowanie stempla, który jest umieszczany na powierzchni naziomu tuż przy krawędzi skarpy. Wymiary podstawy stempla to: 15x49,77 cm. Dodatkowo na stemple i naziomie zamocowano pięć czujników zegarowych do pomiaru osiadań.



Rys. 2. Schemat skrzyni modelowej

Fig. 2. Scheme of model test box

Popioło-żużel został wbudowany w dwa nasypy o nachyleniu skarp 45° i 60° . Każdy z nasypów był formowany warstwami przy założonym wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$ i wilgotności optymalnej, a pomiędzy formowane warstwy wprowadzono na wąskim odcinku paski barwionego popiołu w celu łatwiejszej identyfikacji przebiegu krzywej poślizgu. Po każdorazowym ułożeniu warstwy przeprowadzano kontrolę jej zagęszczenia i wilgotności. Po skończeniu formowania nasypu i nadaniu odpowiedniego nachylenia, średnio co 2 minuty, obciążano stempel wielokrotnością naprężenia $24,5 \text{ kPa}$. Badanie przerwano z chwilą utraty stateczności przy przyłożonym naprężeniu pionowym równym $722,8 \text{ kPa}$ dla nasypu o nachyleniu skarpy 45° (rys. 3), oraz $598,9 \text{ kPa}$ dla nasypu o nachyleniu skarpy 60° (rys. 4).

Po utracie stateczności badany model w płaszczyźnie przechodzącej przez jego środek (przekrój A-A, rys. 2) został rozkopany, aby odstać się do pasków barwionego popiołu. Na podstawie pomiaru ich przemieszczeń poziomych oraz widocznego obsunięcia się nasypu, dokonano analizy deformacji, określając przebieg płaszczyzny poślizgu (rys. 5 i 6).



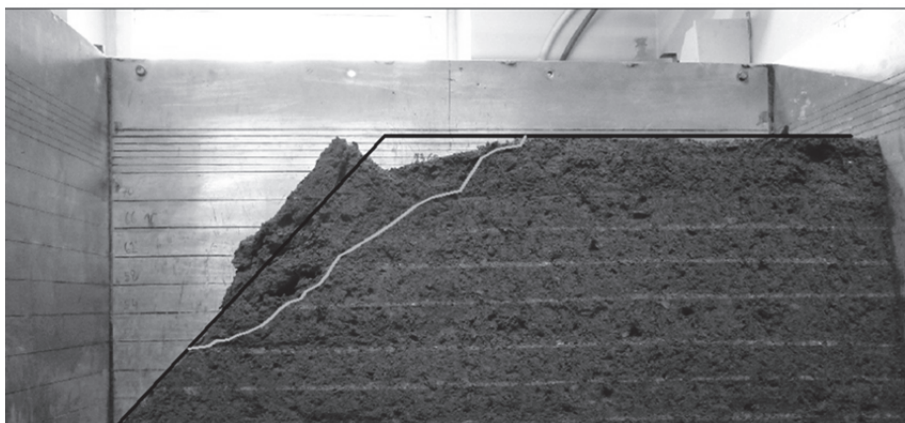
Rys. 3. Deformacje modelu nasypu z popioło-żużla na skutek utraty stateczności – skarpa o nachyleniu 45° (fot. K. Olsiński)

Fig. 3. Deformations of the embankment model made of ash-slag due to slope failure – slope elongation 45° (photo K. Olsiński)



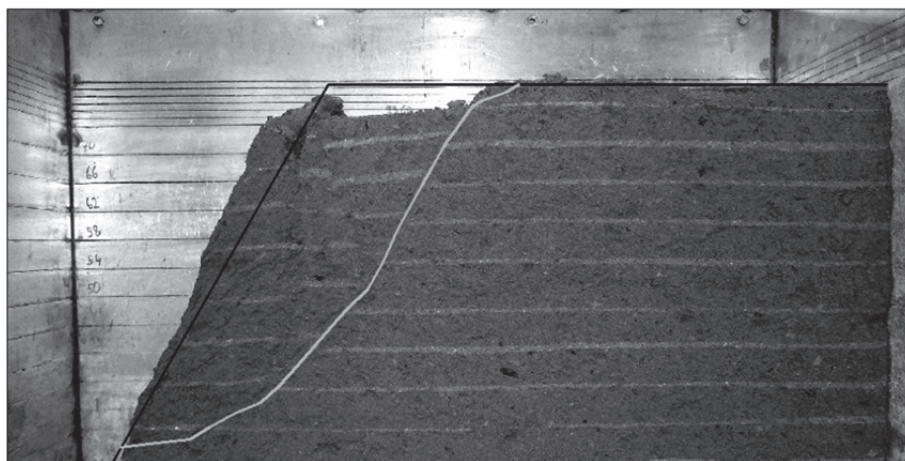
Rys. 4. Deformacje modelu nasypu z popioło-żużla na skutek utraty stateczności – skarpa o nachyleniu 60° (fot. P. Baran)

Fig. 4. Deformations of the embankment model made of ash-slag due to slope failure – slope elongation 60° (photo P. Baran)



Rys. 5. Deformacja modelu skarpy z popioło-żużłu wraz z przebiegiem powierzchni poślizgu – nachylenie 45° (fot. K. Olsiński)

Fig. 5. Deformations of the embankment model made of ash-slag with a failure surface – slope elongation 45° (photo K. Olsiński)



Rys. 6. Deformacja modelu skarpy z popioło-żużłu wraz z przebiegiem powierzchni poślizgu – nachylenie 60° (fot. K. Olsiński)

Fig. 6. Deformations of the embankment model made of ash-slag with a failure surface – slope elongation 60° (photo K. Olsiński)

Tą samą technologię formowania nasypów, którą opisano wyżej zastosowano do zbudowania nasypów modelowych o nachyleniu skarp 45° i 60° z piasku pylastego. Założono wskaźnik zagęszczenia równy $I_s = 0,98$ i wilgotność gruntu równą optymalnej. Po każdorazowym ułożeniu warstwy przeprowadzano kontrolę jej zagęszczenia i wilgotności – tak, jak miało to miejsce w przypadku nasypów z popioło-żuźla. Procedura obciążania nasypów modelowych z piasku pylastego przebiegała identycznie, ale uzyskano inne wartości naprężeń granicznych: 238,8 kPa dla nasypu o nachyleniu skarpy 45° (rys. 3), oraz 217,0 kPa dla nasypu o nachyleniu skarpy 60° (rys. 4). Na podstawie pomiaru przemieszczeń poziomych pasków barwionego popiołu oraz widocznego obsunięcia się nasypu dokonano analizy deformacji, określając przebieg płaszczyzny poślizgu (rys. 5 i 6).



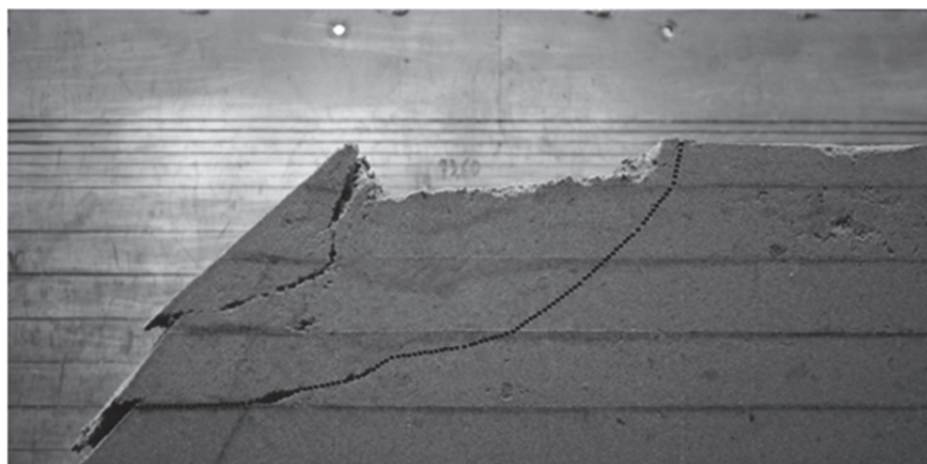
Rys. 7. Deformacje modelu nasypu z piasku pylastego na skutek utraty stateczności – skarpa o nachyleniu 45° (fot. P. Baran)

Fig. 7. Deformations of the embankment model made of silty sand due to slope failure – slope elongation 45° (photo P. Baran)



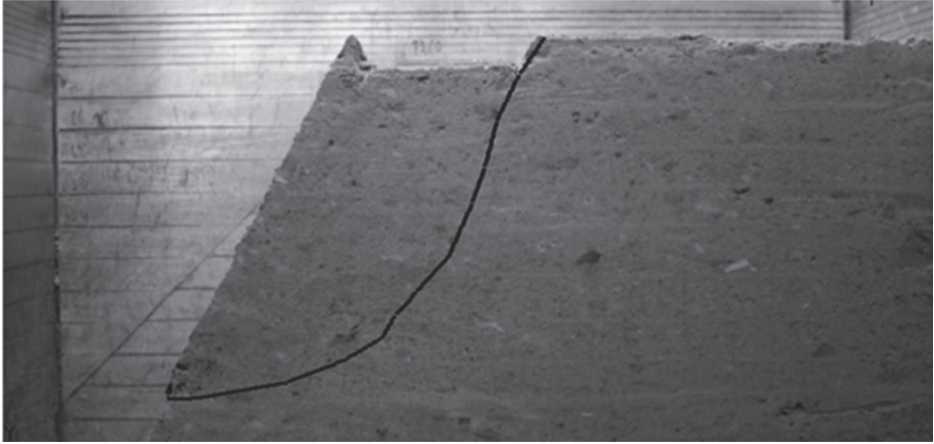
Rys. 8. Deformacje połowy modelu nasypu z piasku pylastego na skutek utraty stateczności – skarpa o nachyleniu 60° (fot. P. Baran)

Fig. 8. Deformations half of the embankment model made of silty sand due to slope failure – slope elongation 60° (photo P. Baran)



Rys. 9. Deformacja modelu skarpy z piasku pylastego wraz z przebiegiem powierzchni poślizgu – nachylenie 45° (fot. P. Baran)

Fig. 9. Deformations of the embankment model made of silty sand with a failure surface – slope elongation 45° (photo P. Baran)



Rys. 10. Deformacja modelu skarpy z piasku pylastego wraz z przebiegiem powierzchni poślizgu – nachylenie 60° (fot. P. Baran)

Fig. 10. Deformations of the embankment model made of silty sand with a failure surface – slope elongation 60° (photo P. Baran)

W wyniku przeprowadzonych badań niszczących nasypy modelowe można stwierdzić, że popioło-żużel charakteryzuje się znacznie większą możliwością przeniesienia obciążeń zewnętrznych w porównaniu z badanym gruntem naturalnym – piaskiem pylastym. Zarówno popioło-żużel jak i piasek pylasty, mimo różnych obciążeń niszczących, uzyskały podobne co do kształtu płaszczyzny poślizgu. W przypadku skarpy o nachyleniu 45° płaszczyzna poślizgu jest płytsza i przebiega znacznie łagodniej niż w przypadku skarpy o nachyleniu 60° , gdzie wspomniana płaszczyzna sięga znacznie głębiej i jest ostrzej nachylona – zwłaszcza w strefie blisko naziomu. Może to świadczyć zdaniem autorów, iż mechanizm zniszczenia propaguje się w tym samym kierunku, niezależnie od rodzaju materiału, pod warunkiem, że ten jest jednorodny.

5. Ustalenie granicznych parametrów wytrzymałościowych dla badanych modeli nasypów

Jednym z najczęściej wykorzystywanych kryteriów wytrzymałościowych gruntu jest kryterium Coulomba-Mohra, które można wyrazić w przestrzeni naprężeń głównych [6]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \Phi + 2c \cos \Phi \quad (1)$$

gdzie:

σ_1 i σ_3 – większe i mniejsze naprężenie główne,

oraz na płaszczyźnie naprężeń σ i τ :

$$\tau = \sigma \tan \Phi + c \quad (2)$$

W tym ostatnim przypadku, wzór jest wykorzystywany w obliczeniach stateczności metodami równowagi granicznej oraz ustaleniu kształtu skarpy w stanie granicznym, a także do ustalenia granicznej wartości naprężenia przyłożonego na krawędzi skarpy [3]. Powyższa postać wzoru umożliwi również wykorzystanie jej w celu znalezienia parametrów wytrzymałościowych na drodze badań w aparacie bezpośredniego ścinania. Zatem, prowadząc niszczące badania modelowe i odnosząc uzyskane wielkości mechaniczne do równania (2), możemy używając wybranej metody równowagi granicznej dotrzeć do parametrów wytrzymałościowych gruntu.

Założono, iż badane modele nasypów tuż przed zniszczeniem znajdowały się w stanie granicznym. W takiej sytuacji współczynnik stateczności F skarpy modelowej charakteryzował się wartością równą 1,0. Aby wykonać analizę stateczności posłużono się jedną z metod równowagi granicznej – metodą Morgensterna-Price'a, która rygorystycznie podchodzi do spełnienia wszystkich warunków równowagi jakim podlega masyw gruntowy. Szczegółowy opis zastosowanej metody można znaleźć w publikacji [1]. W tym rozdziale ograniczono się do opisu przebiegu ustalenia granicznych parametrów wytrzymałościowych.

Powstałe powierzchnie osuwiskowe ograniczone skarpią modelową i krzywą poślizgu podzielono na paski w liczbie od 25 do 30. Dla każdego paska obliczono pole powierzchni, objętość jaką zajmuje w przestrzeni modelu, ciężar, szerokość, kąt nachylenia podstawy i graniczną zewnętrzną siłę przyłożoną przez stempel w naziemie. Po wyznaczeniu tych danych następnym krokiem było wyznaczenie współczynników stateczności skarp modelowych w następujący sposób:

- założono przedział wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności dla piasku pylastego: $\Phi = 10\text{--}40^\circ$ (skarpa 45°), $\Phi = 20\text{--}50^\circ$ (skarpa 60°),
 $c = 5\text{--}30$ kPa,

- założono przedział wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności dla popioło-żuźła: $\Phi = 10\text{--}50^\circ$ (skarpa 45°), $\Phi = 20\text{--}60^\circ$ (skarpa 60°), $c = 0\text{--}40$ kPa,
- dla wszystkich kombinacji Φ i c z wyżej wymienionych przedziałów określono współczynnik stateczności F (tabela 3–6)
- na podstawie określonych wartości F znaleziono takie pary Φ i c dla których $F = 1$ (wartości graniczne parametrów wytrzymałościowych) i na ich podstawie wykreślono krzywe graniczne dla wszystkich modeli (rys. 11 i 12).

Tabela 3. Wartości współczynnika stateczności i granicznych parametrów wytrzymałościowych dla popioło-żuźła (skarpa 45°)

Table 3. Values of stability coefficient and limit strength parameters of ash-slag (slope 45°)

$\Phi [^\circ]$	c [kPa]				
	0	10	20	30	40
10	0,343	0,399	0,478	0,556	0,633
20	0,708	0,732	0,818	0,898	0,976
30	1,122	1,092	1,200	1,284	1,364
40	1,631	1,506	1,655	1,752	1,837
50	2,317	2,568	2,244	2,368	2,465
Φ_{gr}	27,05	27,44	24,76	22,64	20,62

Tabela 4. Wartości współczynnika stateczności i granicznych parametrów wytrzymałościowych dla popioło-żuźła (skarpa 60°)

Table 4. Values of stability coefficient and limit strength parameters of ash-slag (slope 60°)

$\Phi [^\circ]$	c [kPa]				
	0	10	20	30	40
20	0,264	0,365	0,453	0,537	0,619
30	0,418	0,523	0,616	0,704	0,789
40	0,608	0,716	0,813	0,904	0,992
50	0,863	0,974	1,074	1,169	1,26
60	1,255	1,367	1,471	1,57	1,665
Φ_{gr}	53,49	50,66	47,16	43,62	40,30

Tabela 5. Wartości współczynnika stateczności i granicznych parametrów wytrzymałościowych dla piasku pylastego (skarpa 45°)

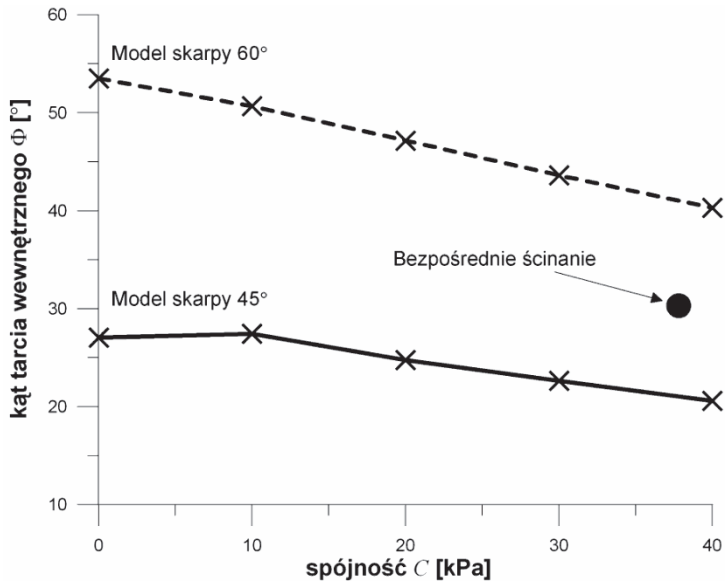
Table 5. Values of stability coefficient and limit strength parameters of silty sand (slope 45°)

Φ [°]	c [kPa]					
	5	10	15	20	25	30
10	0,471	0,571	0,671	0,771	0,87	0,969
15	0,664	0,764	0,864	0,964	1,064	1,163
20	0,867	0,967	1,067	1,167	1,266	1,366
25	1,082	1,182	1,282	1,382	1,482	1,582
30	1,316	1,416	1,516	1,616	1,716	1,816
35	1,575	1,675	1,775	1,875	1,975	2,075
40	1,868	1,968	2,067	2,167	2,267	2,367
Φ_{gr}	23,09	20,77	18,35	15,89	13,35	10,80

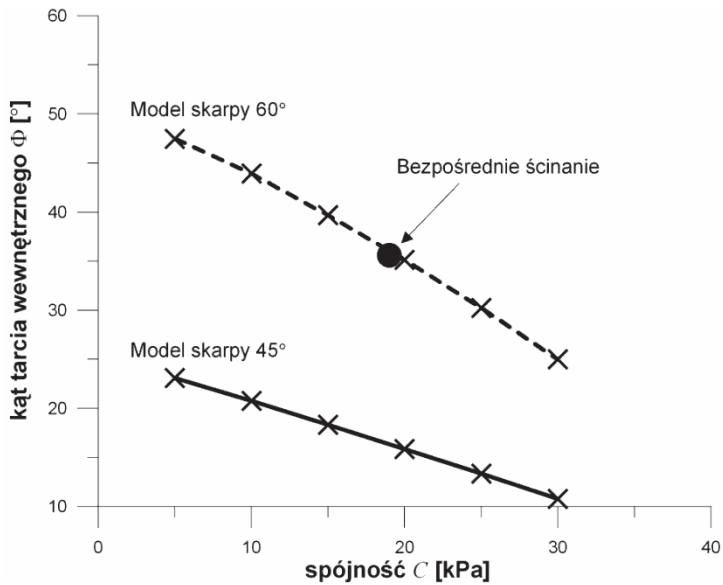
Tabela 6. Wartości współczynnika stateczności i granicznych parametrów wytrzymałościowych dla piasku pylastego (skarpa 60°)

Table 6. Values of stability coefficient and limit strength parameters of silty sand (slope 60°)

Φ [°]	c [kPa]					
	5	10	15	20	25	30
20	0,404	0,510	0,612	0,712	0,812	0,910
25	0,487	0,595	0,699	0,800	0,900	1,000
30	0,576	0,686	0,791	0,894	0,995	1,095
35	0,674	0,786	0,893	0,997	1,100	1,201
40	0,785	0,898	1,007	1,112	1,216	1,318
45	0,913	1,028	1,138	1,245	1,350	1,453
50	1,089	1,182	1,294	1,402	1,508	1,613
Φ_{gr}	47,47	43,92	39,69	35,13	30,24	25,00



Rys. 11. Krzywe graniczne dla modelu nasypu z popioło-żużla
 Fig. 11. Limit curves for the embankment model made of ash-slag



Rys. 12. Krzywe graniczne dla modelu nasypu z piasku pylastego
 Fig. 12. Limit curves for the embankment model made of silty sand

Jak można zauważyć na powyższych wykresach, mniejsze obciążenie niszczące nasyp modelowy, pociąga za sobą powstanie większych wartości granicznego kąta tarcia wewnętrznego przy odpowiednio mniejszej spójności granicznej. Zakres wartości granicznego kąta tarcia wewnętrznego jest w tym przypadku większy, niż dla gruntu mogącego przenieść większe obciążenie naziomu (krzywa graniczna jest ostrzej nachylona). Widoczne jest również, że grunt mogący przenieść większe obciążenie niszczące charakteryzuje się mniejszym przedziałem wartości granicznego kąta tarcia wewnętrznego (krzywa graniczna jest łagodniej nachylona).

Z punktu widzenia metod równowagi granicznej, wykorzystujących kryterium wytrzymałościowe gruntu opisane równaniem (2), warunki stateczności odpowiadające stanowi granicznemu ($F=1$), uzyska się dla dowolnej konfiguracji granicznych parametrów wytrzymałościowych, pod warunkiem, że dana konfiguracja kąta tarcia wewnętrznego i spójności leży na krzywej granicznej.

6. Wnioski

1. Ustalone parametry wytrzymałościowe w aparacie bezpośredniego ścinania nie potwierdzają w pełni mechanizmu utraty stateczności badanych skarp modelowych, gdyż konfiguracja uzyskanych wartości Φ i c nie pokrywa się we wszystkich przypadkach badanych modeli i użytych rodzajów gruntu z uzyskanymi krzywymi granicznymi.
2. Zgodność w ustalonych metodą bezpośredniego ścinania parametrach wytrzymałościowych, uzyskuje się dla modelu wykonanego z piasku pylastego o nachyleniu skarpy 60° , co sugeruje, iż mechanizm zniszczenia w aparacie skrzynkowym jest taki sam, jak dla badanego modelu.
3. W przypadku skarp modelowych o nachyleniu 45° , wartość parametrów wytrzymałościowych uzyskanych z aparatu bezpośredniego ścinania jest zawyżona. To oznacza, że przy granicznym obciążeniu naziomu, wspomniane parametry podstawione do obliczeń współczynnika stateczności, dadzą jego wartość powyżej 1,0.
4. Brak przecięcia się krzywych granicznych w jednym punkcie dla nachylenia skarpy 45° i 60° w przypadku tego samego gruntu, uniemożliwił ustalenie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie, które

by były wspólne dla danego gruntu w różnych konfiguracjach nachylenia skarp.

5. Stosując w analizie wstecznej metody równowagi granicznej do ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntu, uzyskuje się docelowo zbiór tych parametrów, leżących na krzywej granicznej, wykreślanej dla konkretnego mechanizmu zniszczenia skarpy budowli ziemnej.
6. Grunty pochodzenia antropogenicznego (w tym UPS) powinny być badane z punktu widzenia wytrzymałości na ścinanie przy użyciu testów niszczących, modelujących warunki pracy, zwłaszcza jeżeli docelowa budowla będzie pracować pod obciążeniem zewnętrznym.
7. Zastosowana metoda oznaczania parametrów wytrzymałości na ścinanie, mimo znacznego wykorzystania materiału gruntowego, powinna być stosowana tam, gdzie zależy projektantowi na uzyskaniu właściwości mechanicznych gruntu pracującego w warunkach obciążenia zewnętrznego.

Podziękowania

Autorzy niniejszego artykułu pragną wyrazić wdzięczność za pomoc w realizacji badań modelowych Panom: mgr inż. Krzysztofowi Olsińskiemu i mgr inż. Piotrowi Dzikowi – absolwentom Wydziału Inżynierii Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

Literatura

1. **Baran P., Cholewa M., Zawisza E., Kulasik K.:** *Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection) 15, 2071–2089 (2013).
2. **Cholewa M.:** *Stateczność nawodnionej skarpy z mieszanki popioło-żuźlowej.* Inżynieria i Ochrona Środowiska. Tom 15, nr 2, 181–190 (2012).
3. **Dębicki E.:** *Obciążone skarpy ziemne w stanie równowagi granicznej.* Archiwum Hydrotechniki. Tom XIV. Zeszyt 2. (1967).
4. **Filipiak J.:** *Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection) 13, 1043–1054 (2011).
5. **Gradkowski K.:** *Budowle i roboty ziemne.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2010.

6. **Gryczmański M.:** *Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów*. Studia z zakresu inżynierii, nr 40. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Warszawa 1995.
7. **Gryczmański M., Kawalec J., Kawalec B.:** *Destructive slope stability tests for assessment of mining waste strength parameters*. Slovak Journal of Civil Engineering. Vol. 4. 32–35 (1996).
8. **Kawalec J.:** *Ocena wytrzymałości odpadów górniczych na podstawie próbnych obciążeń nasypu*. Praca doktorska. Maszynopis. (2000).
9. **Kawalec J., Kawalec B.:** *Parametry wytrzymałościowe odpadów kopalnianych w świetle badań modelowych*. Materiały XLI Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB Krynica '95. Tom 8 Geotechnika, 77–84 (1995).
10. **Pieczyrak J.:** *Problemy wyznaczania parametrów geotechnicznych na podstawie próbnych obciążeń*. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w budownictwie i transporcie. Gdańsk. Tom 2, 127–131 (1997).
11. **Sarlej K., Sarlej L.:** *Dokumentacja geotechniczna na temat budowy Narodowego Centrum Radioterapii Hadronowej na terenie Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie*. Maszynopis. (2008).
12. **Zawisza E.:** *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej, nr 280. Rozprawy. Kraków 2001.

Determination of Strength Parameters of Ash-slag and Silty Sand Using a Destructive Embankments Model Tests

Abstract

Soil used as a material to form earth structures has been divided according to EN ISO 14688 on natural and anthropogenic soil. In the process of electricity and heat production, during combustion of carbonaceous material the various types of waste has been arising, such as: fly ashes, slags, ash-slugs, etc. These wastes have a very good compaction properties, which is use in the construction of flood banks, dykes and embankments. The ashes are often used to improve and stabilize cohesive soils (which are characterized by a high degree of plasticity) and organic soils. The addition of fly ash improves the shear strength of the soil and reduce the deformability. It is important that before using anthropogenic soil for construction purposes, examine its suitability for use within a given type of a structure and the most effective method of verification are laboratory and field tests. Knowledge of geotechnical properties of soils is

essential for the economic and safe design of earth structures. Stability calculations of a ground, slopes, and earth pressure on retaining structures, it would not be possible without the knowledge of soil shear strength and the values of the parameters defining this strength.

Destructive tests of model embankments, made of two types of soil: natural (silty sand) and anthropogenic (ash-slag) have been performing for the purpose of this article. The aim of this study was to reach the real values of strength parameters - parameters that determine the safety of earth structures, and to confront them with strength parameters obtained from a standard tests. Problems with determination of real values of the angle of internal friction and cohesion in soil inspire to seek alternative methods involving the trial loading of embankment in real dimensions, simulating a usability load. That method requires in situ studies on a large scale of the embankment and to solve the inverse boundary problem. In this issue the known data are operational or limit loads, and the corresponding displacement, and the unknowns are the values of soil parameters.

The authors of this article presented a similar to the described above method for determining the values of selected soil strength parameters, based not on the large scale but on laboratory test models in semi-technical scale. Parameters which we were looking for were: the angle of internal friction (Φ) and cohesion (c). After forming the embankments test model with slopes 45° and 60° , and performing overload tests, the limit load applied in top of the embankment model and slip surface have been obtaining. These data allowed to pass to the calculation phase using a back-analysis method by adopting one of the slopes stability methods estimation.

It was assumed that the tested models of embankments were in limit state just before the destruction. So, the stability coefficient F of the slope had value equals 1.0. To perform a stability analysis one of the limit equilibrium method (Morgenstern-Price method) was used. This method rigorously approaches to meet all of the equilibrium conditions governing the soil. A detailed description of the method can be found in another publication of the authors [1]. The determination of the limit strength parameters has been describing in this article.

The obtained landslide surfaces limited by a scarp and slip line have been dividing into 25 to 30 slices and the stability coefficients of model slopes was determining as follows:

- range values of the angle of internal friction and cohesion of silty sand has assumed: $\Phi = 10\text{--}40^\circ$ (slope 45°), $\Phi = 20\text{--}50^\circ$ (slope 60°), $c = 5\text{--}30$ kPa,
- range values of the angle of internal friction and cohesion of ash-slag has assumed: $\Phi = 10\text{--}50^\circ$ (slope 45°), $\Phi = 20\text{--}60^\circ$ (slope 60°), $c = 0\text{--}40$ kPa,

- for all combinations of the Φ and c from aforementioned range values, the stability coefficient have been obtaining (table 3–6).

On the basis of specific values of F , the pairs of Φ and c for which $F = 1$ (limit values of strength parameters) the limit curves have been plotting for all test models (Fig. 11 and 12). It was noted that smaller embankment failure load implicate the larger values of the limited angle of internal friction corresponding to lower limited cohesion. The range values of the angle of internal friction in this case is larger than in the soil that could take a larger load (limit curve is sharply inclined). There is also shown that the soil that could take a larger load is characterized by a smaller range of values of the angle of internal friction (limit curve is gently inclined).

From the limit equilibrium methods point of view, using the strength criterion described by equation (2), the conditions of stability corresponded to limit state ($F = 1$) is obtained for any configuration of limit strength parameters, provided that the configuration of the angle of internal friction and cohesion is laying on the limit curve.

Słowa kluczowe:

wytrzymałość na ścinanie, badania niszczące, analiza wsteczna, analiza stateczności

Keywords:

shear strength, destructive tests, back-analysis method, stability analysis