



Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo- żużlowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego

*Andrzej Gruchot, Tymoteusz Zydróż
Uniwersytet Rolniczy, Kraków*

1. Wstęp

Jednym z głównych współczesnych zagadnień gospodarczych krajów o rozwiniętym przemyśle jest gospodarka odpadami. Dużą grupę odpadów stanowią mieszanki popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych ze spalania węgla kamiennego lub brunatnego, których tylko w roku 2010 wytworzono blisko 9 mln ton, a 253,7 mln ton jest wciąż nagromadzonych na składowiskach [12] stanowiąc tym samym obciążenie dla środowiska [18, 21]. Dlatego istotne znaczenie ma ich utylizacja, a jednym z jej kierunków jest wykorzystanie w szeroko rozumianym budownictwie. Odpady poenergetyczne powszechnie stosuje się, jako komponent służący do produkcji materiałów budowlanych oraz w budownictwie ziemnym [3, 11, 22].

W budownictwie ziemnym mieszaniny popiołowo-żużłowe dopuszcza się do wbudowania w dolne warstwy nasypów drogowych pod warunkiem, że zalegają w miejscach suchych lub są izolowane od wody [19]. Wyniki wielu prac [7, 15] wskazują, że odpady paleniskowe mogą być stosowane jako wartościowy materiał konstrukcyjny do wznoszenia nasypów ziemnych. Biorąc pod uwagę właściwości popiołów lotnych i mieszanin popiołowo-żużłowych, unika się ich stosowania do budowy konstrukcji ziemnych lub też ich elementów zlokalizowanych w sąsiedztwie zwierciadła wody gruntowej. Wynika to głównie z dużej wrażliwości odpadów paleniskowych na zmiany uwilgotnienia [14, 17, 24] oraz

wysokiej ich podatności na deformacje filtracyjne [4]. Dlatego też istotne jest określenie charakterystyki wytrzymałościowej tego typu materiałów w kontekście zmian ich uwilgotnienia.

Celem pracy było określenie wpływu wilgotności mieszaniny popiołowo-żużlowej pochodzącej z Elektrowni „Skawina” na jej wytrzymałość na ścinanie i parametry ją charakteryzujące oraz określenie stateczności nasypów ziemnych wykonanych z tego typu materiału poddanych infiltracji wywołanej opadami deszczu. Zagadnienie to wydaje się autorem interesujące na względu na znaczną zmienność właściwości geotechnicznych mieszanin na skutek zmiany wilgotności oraz niewielką ilość publikacji dotyczących wpływu procesu infiltracji na kształtowanie się warunków równowagi nasypów wykonanych z tego typu materiałów.

2. Zakres i metodyka pracy

W ramach badań laboratoryjnych określono podstawowe właściwości geotechniczne (skład granulometryczny, gęstość właściwą, maksymalną gęstość objętościową szkieletu i wilgotność optymalną) oraz wytrzymałość na ścinanie i wodoprzepuszczalność mieszaniny popiołowo-żużlowej. Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach w przekroju poprzecznym 12 x 12 cm i wysokości próbki 7,7 cm z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o wysokości 10 mm. Do badań wykorzystano materiał o uziarnieniu poniżej 10 mm. Próbkę do badań formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy trzech wskaźnikach zagęszczenia, tj. $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Wilgotność mieszaniny w trakcie formowania próbek odpowiadała wilgotności optymalnej (30,6%) oraz o 5% mniejszej (26%) i większej (36%) od optymalnej [10]. Badania wodoprzepuszczalności przeprowadzono w aparacie ZWk2 na próbkach o wysokości 6,1 cm i średnicy 11,3 cm. Próbkę były formowane bezpośrednio w aparacie, przez zagęszczenie materiału o wilgotności zbliżonej do optymalnej do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,90$ i $1,00$.

Uzyskane wyniki badań parametrów wytrzymałościowych w aparacie bezpośredniego ścinania odnoszą się do warunków uwzględniających naprężenia całkowite panujące w ośrodku gruntowym:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

gdzie:

- τ – wytrzymałość na ścinanie [kPa],
- c – spójność [kPa],
- σ – naprężenia normalne [kPa],
- ϕ – kąt tarcia wewnętrznego [$^{\circ}$].

Badania te najczęściej wykonywane są na próbkach o niepełnym nasyceniu, dla których opis wytrzymałości ośrodka gruntowego powinien uwzględniać fazę stałą – szkielet gruntowy, ciekłą – wodę i gazową – powietrze [6]:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b \quad (2)$$

gdzie:

- c' – efektywna spójność [kPa],
- σ_n – składowa normalna [kPa],
- u_a – ciśnienie powietrza w porach [kPa],
- u_w – ciśnienie wody w porach [kPa],
- ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [$^{\circ}$],
- ϕ^b – kąt określający wzrost wytrzymałości na ścinanie w związku ze wzrostem ciśnienia ssania [$^{\circ}$],
- $(\sigma_n - u_a)$ – naprężenie netto [kPa],
- $(u_a - u_w)$ – ssanie gruntu [kPa].

W przypadku gruntu nasyconego wartości ciśnienia u_a i u_w są równe zero i formuła powyższa przybiera postać klasycznego równania Coulomba-Mohra:

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi' \quad (3)$$

W literaturze można się spotkać z uproszczonymi (empirycznymi) postaciami równania wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych. Jedną z takich propozycji stanowi formuła podana przez Ho i Fredlunda [13]:

$$\tau = (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' + c_d + c' \quad (4)$$

gdzie:

- c_d – spójność gruntu nienasyconego, uzyskana z badań z drenażem [kPa].

Z kolei, z punktu widzenia typowych rozwiązań inżynierskich, zamiast pojęcia ciśnienia ssania najczęściej używa się pojęcia wilgotności wagowej i wówczas interesująca wydaje się propozycja Matsushi i Matsukury [16]:

$$\tau_f = C \cdot e^{-\mu\theta} + \sigma \cdot \tan \phi' \quad (5)$$

gdzie:

- C – maksymalna wartość spójności pozornej przy $\theta = 0$ [kPa],
- θ – wilgotność objętościowa [-],
- e – podstawa logarytmu naturalnego [-],
- μ – parametr redukcyjny [-],
- ϕ' – kąt tarcia wewnętrzznego [°].

W równaniu tym kąt tarcia wewnętrzznego dobierany jest arbitralnie, tak aby otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ścinanie były jak najlepiej skorelowane z wilgotnością badanych próbek, a pozostałe parametry równania uzyskuje się na podstawie linearyzacji równania (5).

Charakterystykę wytrzymałościową opisaną modelem Matsushi-Matsukury [16] wykorzystano do obliczeń stateczności nasypów wykonanych z przedmiotowej mieszanki popiołowo-żuźlowej. Obliczenia te przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie porównano stateczność skarpy o nieograniczonej długości, przyjmując parametry wytrzymałości na ścinanie mieszanki uzyskane z badań w aparacie bezpośredniego ścinania oraz obliczone na podstawie propozycji Matsushi-Matsukury (wzór 5) (równanie dla płaskiej powierzchni poślizgu). W drugim etapie przeprowadzono analizę stateczności skarpy nasypu w układzie dwuwymiarowym stosując metodę Janbu. Celem analizy było określenie wpływu oddziaływania procesu infiltracji na zmiany uwilgotnienia w obrębie skarpy nasypu i co za tym idzie na jej stateczność. Charakterystykę retencyjną mieszanki popiołowo-żuźlowej określono wykorzystując model Aubertina i in. [1] oraz pomiary ciśnienia ssania próbek mieszanki popiołowej-żuźlowej z wykorzystaniem tensjometrów. Model Aubertina zasadniczo jest dedykowany gruntem naturalnym, ale jak wykazały wyniki badań Fourie i in. [5] charakterystyka retencyjna odpadów paleniskowych jest zbliżona do charakterystyki retencyjnej gruntów piaszczystych.

3. Wyniki badań i ich analiza

Podstawowe parametry geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna mieszaniny popiołowo-żużlowej [10]
Table 1. Geotechnical properties of ash-slag mixture [10]

Lp.	Parametr	Wartość
1	Zawartość frakcji [%]:	
	- żwirowa Gr: $63 \div 2$ mm	13,7
	- piaskowa Sa $2 \div 0,063$ mm	63,5
	- pyłowa Si $0,063 \div 0,002$ mm	21,1
	- iłowa Cl $< 0,002$ mm	1,7
2	Nazwa wg [19]	Piasek pylasty (siSa)
3	Zawartość cząstek [%]:	
	$\leq 0,075$ mm	24,5
	$\leq 0,02$ mm	12,0
4	Wskaźnik jednorodności uziarnienia, C_u [-]	13,5
5	Gęstość właściwa szkieletu, ρ_s [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,54
6	Wilgotność optymalna, w_{opt} [%]	30,6
7	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, ρ_{ds} [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,263
8	Współczynnik filtracji, k_{10} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] przy wskaźniku zagęszczenia I_s [-]	0,90
		1,00
		$1,7\cdot 10^{-6}$
		$4,5\cdot 10^{-6}$

Na podstawie otrzymanych wyników badań wytrzymałości na ścinanie (tab. 2) stwierdzono, że wartości kąta tarcia wewnętrznego są wysokie, mieszczą się w przedziale od około 31 do 47° i są to wartości typowe dla tego rodzaju odpadów [8]. Wartości spójności są również wysokie, mieszczą się w przedziale od $9,0$ do około 42 kPa, co wydaje się być nietypowe dla gruntów, w których dominującą frakcją jest frakcja piaskowa ze żwirową (por. tab. 1). Wartości te wynikają z efektu klinowania się ziaren i niskiej wilgotności badanej mieszaniny, przede wszystkim w odniesieniu do próbek o wilgotności równej lub mniejszej

od optymalnej. Wilgotność optymalna odpowiada wagowej zawartości wody w gruncie i jest powszechnie stosowaną jednostką miary. Z kolei z punktu widzenia modelowania zjawisk fizycznych zachodzących w gruncie bardziej uniwersalną jednostką miary jest wilgotność objętościowa, która określa jednostkową objętość porów zajmowaną przez wodę. Dlatego w dalszej części pracy przyjęto, że do opisu uwilgotnienia gruntu stosowaną miarą będzie wilgotność objętościowa.

Tabela 2. Parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie mieszanki popiołowo-żuźlowej [10]

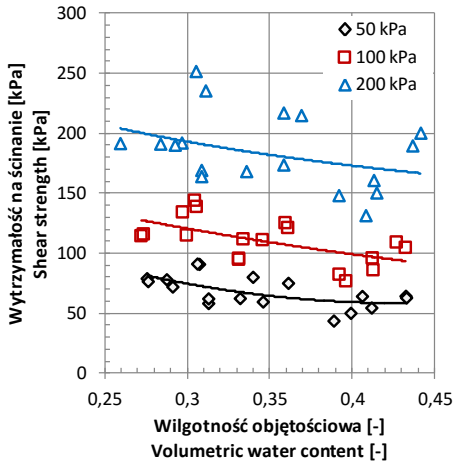
Table 2. Shear-strength parameters of tested ash-slag mixture [10]

Prędkość ścinania, v_s	Wskaźnik zagęszczenia, I_s [-]	Wilgotność, w			Kąt tarcia wewnętrzneg, ϕ [°]	Spójność, c [kPa]
		oznaczenie	wagowa [%]	objętościowa [-]		
0,1 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	0,90	$W_{\text{opt}} - 5\%$	26	0,296	37,2	39,6
	0,95			0,312	37,2	41,8
	1,00			0,328	45,5	39,9
	0,90	W_{opt}	30,6	0,348	35,4	23,4
	0,95			0,367	35,5	31,2
	1,00			0,386	42,7	31,2
	0,90	$W_{\text{opt}} + 5\%$	36	0,409	31,6	16,7
	0,95			0,432	32,7	25,0
	1,00			0,455	41,2	19,6
1,0 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	0,90	$W_{\text{opt}} - 5\%$	26	0,296	37,7	25,6
	0,95			0,312	41,3	30,6
	1,00			0,328	44,2	48,4
	0,90	W_{opt}	30,6	0,348	39,1	14,8
	0,95			0,367	40,1	21,3
	1,00			0,386	43,4	25,3
	0,90	$W_{\text{opt}} + 5\%$	36	0,409	32,1	9,0
	0,95			0,432	34,3	13,4
	1,00			0,455	35,6	23,5

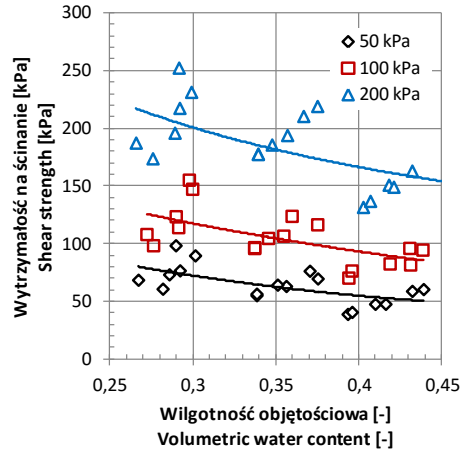
Z danych przedstawionych na rysunku 1 wynika, że wytrzymałość na ścinanie analizowanej mieszanki zależy od wilgotności objętościowej i zagęszczenia. Zależność ta jest szczególnie widoczna dla próbek poddanych ścięciu z prędkością 1,0 mm/min (rys. 1b), co może wy-

nikać z krótkiego czasu ścięcia próbek, który ogranicza wielkość odkształceń pionowych próbek.

a) $v_s=0,1$ mm/min



b) $v_s=1,0$ mm/min



Rys. 1. Wytrzymałość na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej w zależności od wilgotności objętościowej, prędkości ścinania i naprężeń normalnych

Fig. 1. Shear strength of ash-slag mixture vs volumetric water content, shearing velocity and normal stress

Na podstawie wyników badań wytrzymałości na ścinanie określono parametry równania Matsushi-Matsukury. Parametry te zróżnicowano ze względu na zagęszczenie i prędkość ścinania (tab. 3). Uzyskane z obliczeń wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego przy wskaźniku zagęszczenia mieszanki $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$ wyniosły odpowiednio $31,3; 34,4$ i $41,4^\circ$ w przypadku próbek poddanych ścinaniu z prędkością $0,1$ mm/min oraz $32,7; 35,4$ i $37,4^\circ$ dla próbek ścinanych przy prędkości $1,0$ mm/min. Należy nadmienić, że wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego określone w badaniach trójosiowego ściskania mieszanki popiołowo-żużlowej wyniosły $36,4^\circ$ [9]. Porównując wartości parametrów μ i C równania (5) można zauważyć, że znacząco większe wartości parametrów uzyskano dla próbek poddanych badaniu przy większej prędkości ścinania. Na rysunku 2 porównano wartości wytrzymałości na ścinanie określone bezpośrednio z badań oraz obliczone z wykorzystaniem równania (5). Można stwierdzić, że lepsze dopasowanie rezultatów

obliczeń i wyników badań uzyskano w przypadku próbek ścinanych z prędkością 0,1 mm/min. Dlatego w obliczeniach stateczności przyjęto parametry uzyskane z badań próbek poddanych ścięciu z prędkością 0,1 mm·min⁻¹.

Tabela 3. Parametry równania Matsushi-Matsukury (5) dla mieszaniny popiołowo-żuźlowej

Table 3. Parameters of Matsushi-Matsukura equation (5) for ash-slag mixture

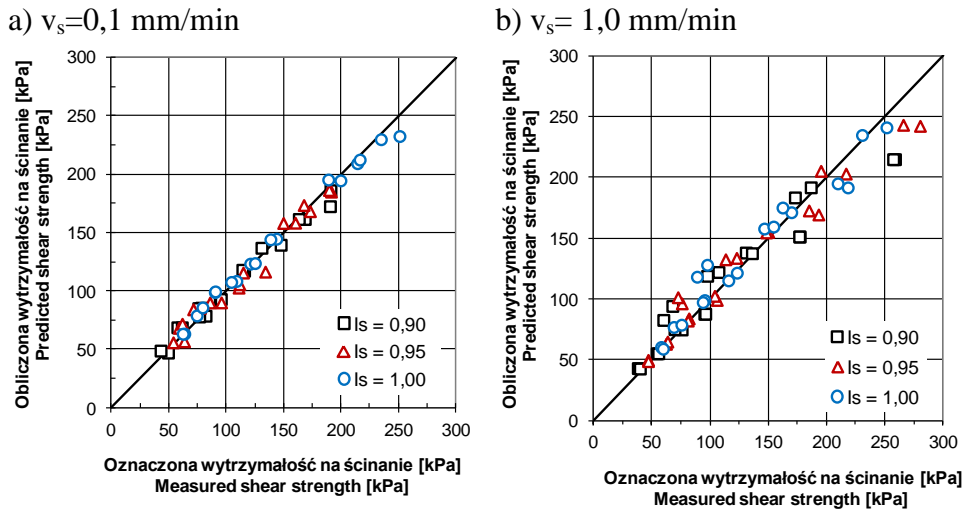
Wskaźnik zagęszczenia I_s [-]	Prędkość ścinania, v_s [mm·min ⁻¹]	Kąt tarcia wewnętrzznego, ϕ [°]	Parametr, μ [-]	Parametr, C [kPa]
0,90	0,1	31,3	9,84	824,7
0,95		34,4	7,04	384,1
1,00		41,5	8,56	753,7
0,90	1,0	32,7	14,03	2625,4
0,95		35,4	12,54	2360,2
1,00		37,4	9,94	1592,4

Obliczenia stateczności przeprowadzono dla skarp nasypu o nachyleniu 1:1,5 zakładając zsuw translacyjny warstwy o miąższości 2,0 m. Obliczenia wykonano wykorzystując klasyczne równanie stateczności dla modelu zbocza o nieograniczonej długości oraz modyfikację tego równania zaproponowaną przez Matsushi-Matsukure [16]:

$$F_s = \frac{tg\phi'}{tg\alpha} + \frac{C \cdot e^{-\mu\theta}}{(\gamma_d + \theta \cdot \gamma_w) \cdot Z \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha} \quad (6)$$

gdzie:

- α – kąt nachylenia zbocza,
- Z – głębokość powierzchni poślizu,
- γ_w – jak we wzorze (3),
- γ_d – ciężar objętościowy szkieletu gruntowego,
- C, e, ϕ', μ, θ – oznaczenia jak w (5).



Rys. 2. Porównanie wartości wytrzymałości na ścinanie określonej na podstawie badań oraz obliczeń dla próbek poddanych ścięciu z prędkością 0,1 oraz 1,0 mm·min⁻¹

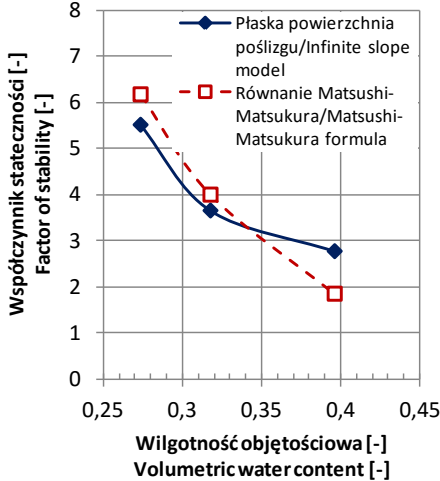
Fig. 2. Comparison of predicted and measured shear strength of samples sheared at velocity of 0,1 and 1,0 mm·min⁻¹

Uzyskane wyniki obliczeń (rys. 3) wskazują, że przy dużej wilgotności objętościowej mieszanki, niższe wartości współczynnika stateczności otrzymano wykorzystując zmodyfikowane równanie Matsushi-Matsukury, co wynika ze znacznie mniejszych wartości spójności w stosunku do wartości określonych na podstawie badań laboratoryjnych.

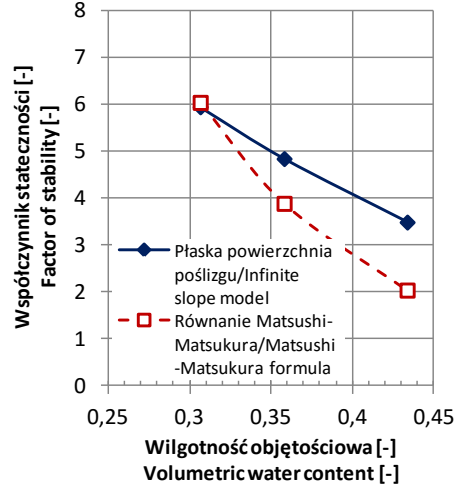
Stateczność nasypów zależy w dużym stopniu od wilgotności budujących je gruntów. W przypadku powierzchniowych warstw zboczy głównym zjawiskiem powodującym pogorszenie stateczności zboczy są przede wszystkim opady deszczu. Woda opadowa infiltrując w głąb budowli zwiększa wilgotność gruntu i tym samym powoduje redukcję ciśnienia ssania, przy czym intensywność tego procesu zależy od wodoprzepuszczalności ośrodka gruntowego oraz rozkładu ciśnienia ssania w profilu gruntowym. Wartości współczynnika wodoprzepuszczalności badanej mieszanki przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,9$ wyniosły $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($392 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$), a dla mieszanki przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,0$ – $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($146 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$). Uzyskane wartości wodoprzepuszczalności są większe niż intensywność maksymalnych dobowych

opadów na terenie Polski, gdzie przykładowo dobową wysokość opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% dla okolic Krakowa wynosi około $100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ [2].

a) $I_s = 0,9$



b) $I_s = 1,0$

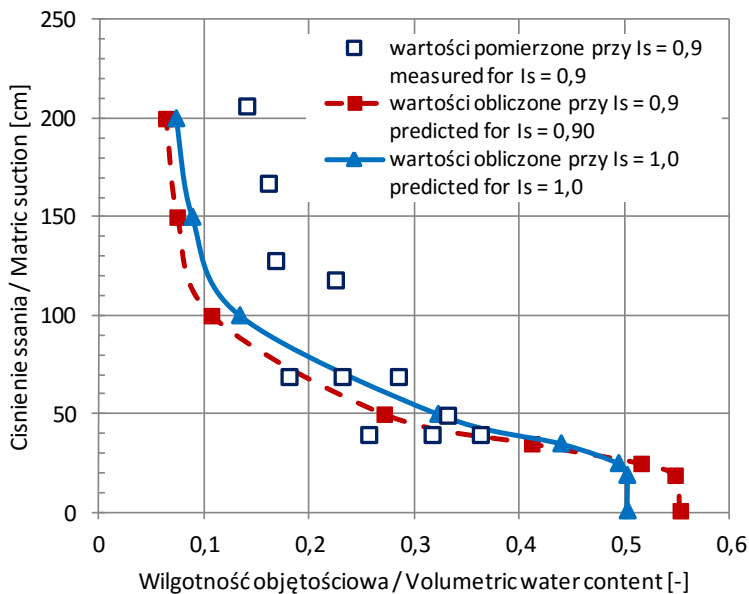


Rys. 3. Porównanie obliczeń stateczności według modelu zbocza o nieograniczonej długości oraz propozycji Matsushi-Matsukury dla mieszanki przy $I_s = 0,9$ i $1,0$

Fig. 3. Comparison of slope stability calculations for infinite slope obtained using infinite slope model and Matsushi-Matsukura method for ash-slag mixture at compaction index $I_s = 0,9$ and $1,0$

Dla potrzeb drugiego etapu analizy stateczności założono, że opad o dobowej intensywności wynoszącej 100 mm trwa 1, 2 oraz 3 doby. Wartości kąta tarcia wewnętrznego przyjęto na podstawie obliczeń metodą Matsushi-Matsukury (tab. 3), a wartości spójności z równania (5) zakładając, że wilgotność pełnego nasycenia (maksymalna wartość wilgotności) odpowiada porowatości mieszanki. Otrzymane w ten sposób wartości spójności wyniosły około 4 i 10 kPa , odpowiednio dla mieszanki przy wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,9$ oraz $1,0$. Wartości te były mniejsze od spójności efektywnej otrzymanej z badań trójosiowego ściśnięcia, które wyniosły ponad 20 kPa . Właściwości retencyjne przedmiotowej mieszanki popiołowo-żużlowej określono wykorzystując model

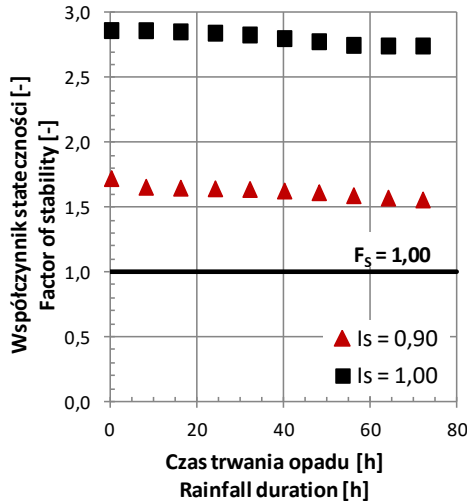
Aubertina i in. [1]. Porównując uzyskane wyniki obliczeń ciśnienia ssania z wynikami oznaczeń tego parametru można stwierdzić, że są one zbliżone w zakresie wilgotności objętościowej 0,3–0,4, a poniżej tego przedziału mniejsze wartości uzyskano stosując model Aubertina i in. [1]. Należy jednak zwrócić uwagę, że w numerycznych obliczeniach przepływu wody w strefie nienasyconej sugerowane maksymalne wartości ciśnienia ssania nie powinny przekraczać 50 kPa, co jest równoważne ciśnieniu 500 cm słupa wody. Z uwagi na niską zdolność retencyjną analizowanej mieszanki, do obliczeń warunków przepływu wody w strefie niepełnego nasycenia oraz stateczności przyjęto dwa warianty maksymalnych wartości ciśnienia ssania 5 oraz 3,5 kPa. Pierwsza z tych wartości jest w przybliżeniu równoznaczna wilgotności optymalnej mieszanki (por. rys. 1 i 4). Jako podłoże nasypu przyjęto pył o współczynniku filtracji 10^{-7} m/s, a głębokość położenia zwierciadła wody gruntowej przyjęto równą 4,0 m ppt. Wyniki obliczeń stateczności przedstawiono na rysunku 5.



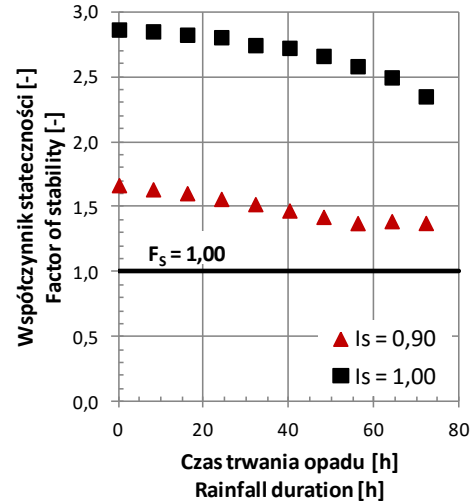
Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń charakterystyki retencyjnej mieszanki popiołowo-żużlowej z wynikami pomiarów

Fig. 4. Comparison of soil-water characteristic curves of ash-slag mixture obtained using pedotransfer function and determined from tests

a) ciśnienie ssania – 5 kPa



b) ciśnienie ssania – 3,5 kPa

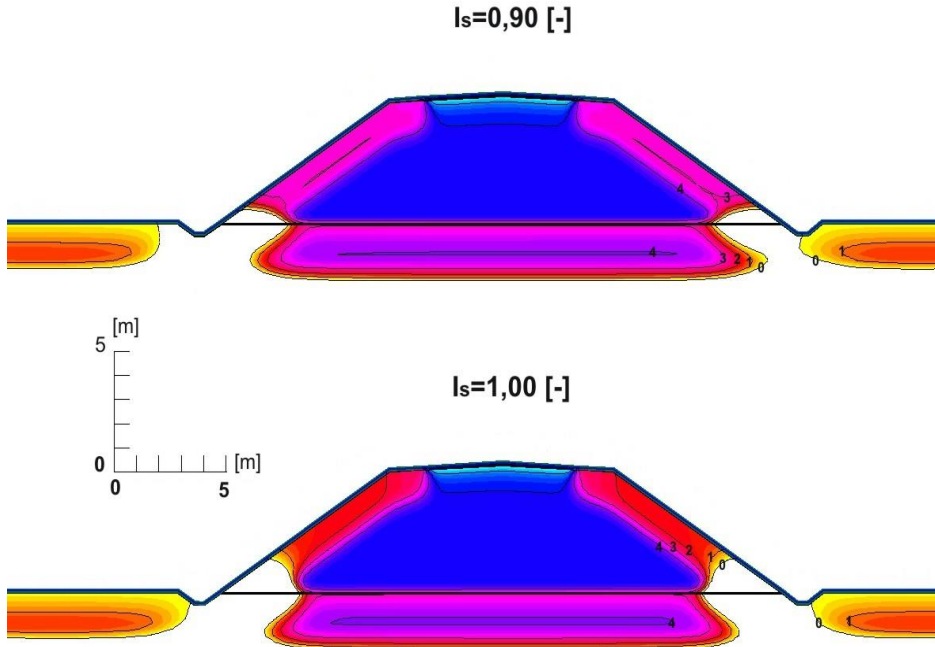


Rys. 5. Wyniki obliczeń współczynnika stateczności dla nasypu wykonanego z mieszanki popiołowo-żuźlowej dla początkowej wartości ciśnienia ssania 5 kPa (a) oraz 3,5 kPa (b)

Fig. 5. Results of calculations of stability factors of road embankment made of ash-slag mixture with initial value of matric suction 5 kPa (a) and 3,5 kPa (b)

Obliczenia infiltracji potwierdziły, że intensywność tego procesu jest zależna od wodoprzepuszczalności mieszanki oraz początkowej wartości ciśnienia ssania. W obliczeniach wykazano, że opad o założonej intensywności nie powoduje bezpośrednio nasycenia mieszanki. Zakładając początkową wartość ciśnienia ssania w nasypie równą 5 kPa zarówno w przypadku mieszanki o zagęszczeniu odpowiadającym $I_s = 0,9$ jak $I_s = 1,0$ w efekcie infiltracji wody opadowej dochodzi do redukcji ciśnienia ssania w obrębie górnej i środkowej części skarpy nasypu oraz zawodnienia podstawy skarp (rys. 6). Większą redukcję ciśnienia ssania uzyskano dla mieszanki o wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,0$, której wodoprzepuszczalność była zbliżona do intensywności opadu niż mieszanki o wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,9$. Zawodnienie podstawy skarpy było efektem występowania w podłożu gruntu o mniejszej wodoprzepuszczalności od mieszanki. Z kolei wyniki obliczeń infiltracji dla wyj-

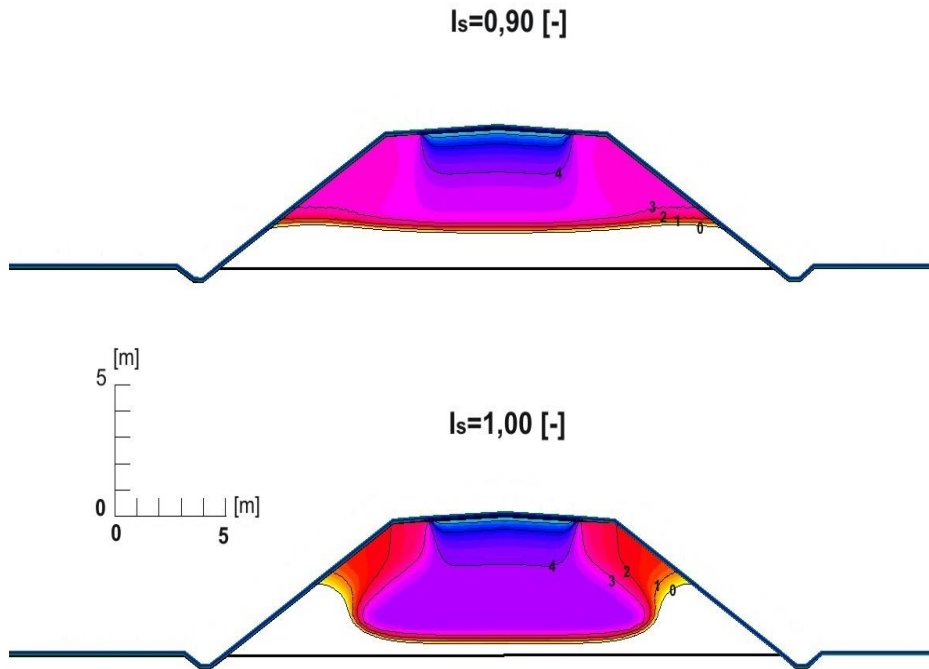
ściowej wartości ciśnienia ssania wynoszącej 3,5 i 5 kPa wykazały, że opad powoduje nasycenie dolnej części nasypu, co związane jest zasadniczo z podniesieniem poziomu zwierciadła wody gruntowej. Otrzymane wyniki obliczeń z fizycznego punktu widzenia mogą być przeszacowane, gdyż uwzględniają dwuwymiarowy model nasypu, a więc w bilansie wodnym nie jest w pełni uwzględniona rola odwodnienia nasypu.



Rys. 6. Rozkład ciśnienia ssania (w kPa) w końcowej fazie opadu w nasypie z mieszanki popiołowo-żużlowej o wyjściowej wielkości ciśnienia ssania 5 kPa
Fig. 6. Distribution of matric suction (in kPa) at the end of rainfall for road embankment made of ash-slag mixture with the initial value of matric suction equal to 5 kPa

Wyniki obliczeń stateczności wykazały, że infiltracja powoduje zmniejszenie współczynnika stateczności nasypu wykonanego z mieszanki popiołowo-żużlowej. Zakres zmian wartości tego parametru zależał od zagęszczenia materiału oraz warunków wyjściowych, związanych z początkową wartością ciśnienia ssania. Niższe wartości współczynnika stateczności uzyskano dla nasypu wykonanego z mieszanki przy

wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,9$, co wynika również z gorszych parametrów wytrzymałościowych. Współczynnik stateczności dla nasypu wykonanego z mieszanki przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,9$ wynosił od 1,38 do 1,57, a przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,0$ był wysoki i wynosił ponad 2,0. Należy zwrócić uwagę, że otrzymane wyniki obliczeń stateczności uwzględniały efektywny stan naprężeń w gruncie związany z działaniem sił ciśnienia ssania.



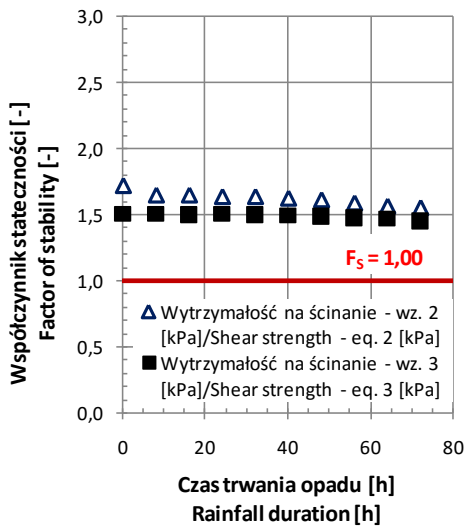
Rys. 7. Rozkład ciśnienia ssania (w kPa) w końcowej fazie opadu w nasypie z mieszanki popiołowo-żuźlowej o wyjściowej wielkości ciśnienia ssania 3,5 kPa

Fig. 7. Distribution of matric suction (in kPa) at the end of rainfall for road embankment made of ash-slag mixture with the initial value of matric suction equal to 3,5 kPa

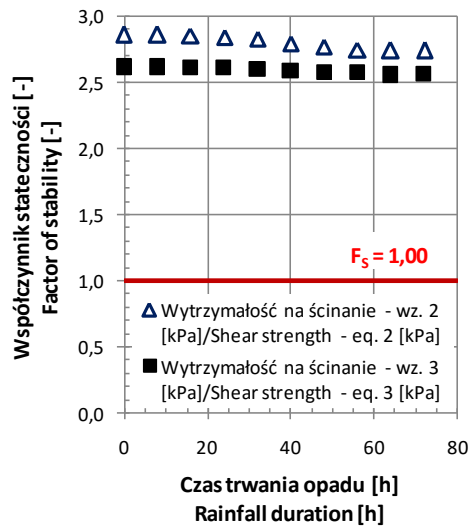
Wyniki obliczeń infiltracji wykazały, że znaczna część nasypu pozostaje nienasycona, co powoduje, że jego stateczność była większa w stosunku obliczeń w oparciu o klasyczne kryterium wytrzymałości Cou-

lomba-Mohra, w którym nie uwzględnia się wpływu ciśnienia ssania na wytrzymałość gruntów na ścinanie przyjmując je równe zero. Wyniki obliczeń stateczności uzyskane w oparciu o równania wytrzymałości na ścinanie dla gruntów nienasyconych (wzór 2) dały w przypadku przedmiotowej mieszanki o około 7–14% większe wartości współczynnika stateczności niż obliczenia oparte o równanie Coulomba-Mohra (wzór 3) przy założeniu, że ciśnienie ssania wynosi 0 kPa (rys. 8).

a) $I_s = 0,90$



b) $I_s = 1,00$



Rys. 8. Porównanie wyników obliczeń stateczności nasypu wykonanego z mieszanki popiołowo-żużlowej w zależności od przyjętej wytrzymałości na ścinanie mieszanki

Fig. 8. Comparison of slope stability calculations for road embankment made of ash-slag mixture considering Mohr-Coulomb and Fredlund et all [6] theory of shear strength of ash-slag mixture

4. Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że mieszanka popiołowo-żużłowa z Elektrowni „Skawina” charakteryzuje się wysokimi wartościami parametrów charakteryzujących jej wytrzymałość na ścinanie oraz stosunkowo wysokimi wartościami współczynnika filtracji, przy czym wartości tych parametrów są w znaczącym stopniu uza-

leżnione od zagęszczenia mieszaniny. Badania wytrzymałości na ścinanie mieszaniny metodą bezpośredniego ścinania wykazały ponadto istotny wpływ wilgotności na jej wartość. Opierając się o wyniki tych badań oraz korzystając z propozycji Matsushi-Matsukury oszacowano efektywne parametry wytrzymałościowe mieszaniny. Porównując uzyskane wyniki z wartościami otrzymanymi z badań trójosiowego ściskania stwierdzono, że zaproponowany model obliczeniowy daje bezpieczne wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych. W związku z tym zostały one wykorzystane do zintegrowanych obliczeń infiltracji wód opadowych i stateczności dla modelowego nasypu drogowego. Obliczenia przeprowadzono zakładając opad o dobowej intensywności $100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, odpowiadającej prawdopodobieństwu wystąpienia 1%. Uzyskane wyniki obliczeń wykazały, że wysoka wodoprzepuszczalność mieszaniny ma istotny wpływ na zakres zmian uwilgotnienia skarp nasypu, a w dalszej konsekwencji na jego stateczność. Przyjęta do obliczeń intensywność opadu jest niewystarczająca do nasycenia mieszaniny, gdy występuje swobodny przepływ wody w zboczu. Zjawisko to może wystąpić jedynie w przypadku posadowieniu nasypu na podłożu o mniejszej przepuszczalności niż cechuje się rozpatrywana mieszanina popiołowo-żużłowa.

Obliczenia stateczności wykazały, że nasyp wykonany z mieszaniny o wysokim zagęszczeniu charakteryzował się wysoką wartością współczynnika stateczności. W związku z tym można stwierdzić, że przedmiotowa mieszanina popiołowo-żużłowa jest wartościowym substytutem gruntów naturalnych. Należy jednak zauważyć, że pomimo dobrej charakterystyki wytrzymałościowej, niezbędne są dodatkowe badania, w tym uwzględniające wpływ zmian temperatury (mrożenia) na właściwości mechaniczne mieszaniny popiołowo-żużłowej.

Literatura

1. **Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussièrè, B. and Chapuis, R.P.:** *A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties*. Canadian Geotechnical Journal, 40(6): 1104–1122 (2003).
2. **Cebulak E.:** *Maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne, 90, 79–96 (1992).
3. **Długosz P., Darlak P., Drzymała P., Sobczak J.:** *Popioły lotne, jako zbrojenie kompozytów metalowych na osnowie stopów metali lekkich*. Część 2. Badania wysokotemperaturowe. Prace Instytutu Odlewnictwa. 1, 5–25 (2012).

4. **Drągowski A., Górka H., Kaczyński R.:** *Własności filtracyjne popiołów węglowych Elktrowni Łaziska, Jaworzno i Blachowni Śląskiej. Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych*". Wyd. Geolog. Częstochowa, 93–107 (1973).
5. **Fourie A.B., Rowe D., Blight G.E.:** *The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump*. Geotechnique, 49,1, 1–13 (1999).
6. **Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A.:** *The shear strength of unsaturated soils*. Canad. Geotech. J. 15(3): 313–321 (1978).
7. **Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.:** *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 1, 23–42 (2005).
8. **Gruchot A.:** *Wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej w zależności od przyjętego kryterium zniszczenia*. Drogownictwo 7–8, 238–242 (2010).
9. **Gruchot A.:** *Wybrane parametry geotechniczne odpadów poenergetycznych w aspekcie obliczeń stateczności nasypów*. Katedra Inżynierii Wodnej i Geoetchniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, maszynopis, 2012.
10. **Gruchot A., Łojewska M.:** *Wpływ zagęszczenia, wilgotności i prędkości ścinania na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej*. Acta Scientiarum Poloniarum, Formatio Circumiectus, 10, 31–38 (2011).
11. **Gruchot A.T.:** *Wpływ stabilizacji wybranych popiołów na wartość wskaźnika nośności CBR*. Zesz. Nauk. Polit. Białostockiej, Budownictwo – Z. 28,1, 99–108, 2006.
12. GUS: Rocznik Statystyczny Warszawa, 2011.
13. **Ho D.F.Y., Fredlund D.G.:** *Increase to strength due to suction for two Hong Kong soils*. Engineering and Construction in Tropical Soils ASCE Speciality Conf. Hawaii, 263–295 (1982).
14. **Kiereś W.:** *Zagadnienia wpływu „wilgotności krytycznej” na wartości mechanicznych parametrów popiołów z węgla kamiennego*. Sympozjum „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych”. Wyd. Geolog., Częstochowa, 119–128 (1973).
15. **Kim B., Prezzi M., Salgado R.:** *Geotechnical properties of Ely and bottom Ash mixtures for use in highway embankments*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 7, 914–924 (2005).
16. **Matsushi Y., Matsukura Y.:** *Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65: 449–455 (2006).
17. **Mioduszewski W.:** *Charakterystyka inżynierskich właściwości odpadów paleniskowych składowanych hydraulicznie w zbiorniku osadowym*. Sympozjum „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych”. Wyd. Geolog. Częstochowa, 25–36 (1973).

18. **Olkuski T., Stala-Szlugaj K.:** *Pierwiastki promieniotwórcze w węglu oraz w produktach odpadowych powstających podczas jego spalania*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 11 913–922 (2009).
19. PN-EN ISO 14668-2:2004. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
20. PN-S-02205:1998. *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
21. **Rosik-Dulewska Cz., Karwaczyńska U.:** *Metody ługowania zanieczyszczeń z odpadów mineralnych w aspekcie możliwości ich zastosowania w budownictwie hydrotechnicznym*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 10. 205–219 (2008).
22. **Zawisza E.:** *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, 280, Kraków 2001.
23. **Zawisza E., Zydróż T.:** *Badania wpływu zagęszczenia i wilgotności na wytrzymałość na ścinanie popiołów lotnych*. XI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”. Wyd. Ekotech Sp z o.o., 255–266 (2004).
24. **Zawisza E., Zydróż T.:** *An analysis of the influence of compaction and moisture content on the shearing strength of coal ashes*. Proceedings of the XIII-th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering. Ljubljana, 171–176 (2006).

Geotechnical Parameters of the Ash-slag Mixture from Hard Coal Burning Concerning Its Usability for Earthworks

Abstract

In Poland, the production of electricity and thermal energy is based mainly on hard and brown coal burning. It causes great amount of furnace waste, including ash-slag mixtures from wet deposition of waste. According to GUS data in 2010 9 million tons of waste were produced and 253.7 million tons are still on landfills being a burden to the environment. One of possible ways of their usage is earthworks, where ash-slag mixtures are allowed to use in low layers of road embankments, under the condition that they will be built in places that are dry or isolated from water. This restriction is a result of high sensitivity of furnace waste for changes in moisture content as well as their high susceptibility to filtration deformations. Therefore it is crucial to determine strength characteristics of this

type of materials depending on their moisture content. The purpose of the paper was to determine the influence of moisture content of ash-slag mixture from "Skawina" Power Plant on its shear strength parameters as well as to determine stability of embankments formed from this type of material.

Within the scope of laboratory tests, basic geotechnical parameters as well as shear strength parameters and permeability of ash-slag mixture were determined. Shear strength tests were carried out in the standard direct shear box apparatus at the compaction indexes $I_s = 0.90, 0.95$ and 1.00 . The moisture content was close to optimal and 5% lower or higher than the optimal moisture content. Permeability tests were carried out with the constant hydraulic gradient on samples at the compaction indexes $I_s = 0.90$ and 1.00 . Based on obtained results it was stated that ash-slag mixture from "Skawina" Power Plant has high shear strength parameters and relatively high values of permeability coefficient, although values of these parameters greatly depend on mixture compaction. Additionally shear strength tests showed that the moisture content has a great influence on shear strength parameters. Depending on these tests results and using proposal of calculative model by Matsushi-Matsukury effective strength parameters of the mixture were estimated. Comparing calculations results with parameters obtained from the triaxial shear tests it was stated that the proposed model gives safe values of effective strength parameters so they were used for stability calculations for a model road embankment, which was exposed to heavy rainfall. Infiltration calculations were carried out assuming daily intensity of rainfall on 100 mm/day, which corresponds with 1% probability of rainfall for the Kraków area. These calculations showed, that high permeability of the mixture has a significant influence on the range of changes in the slopes moisture content and the accepted rainfall density was insufficient to saturate this material when there is a free water flow in the embankment's body. This process can occur only in case of the embankment formed from the mixture on the ground that has lower permeability than the mixture. Calculation results showed that embankment formed from the mixture at high compaction had a high value of safety factor, which indicates that the ash-slag mixture can be a valuable substitute for natural soils.