



Wpływ wilgotności i zagęszczenia na wytrzymałość na ścinanie popioło-żuźli i stateczność budowlanych z nich nasypów

Tymoteusz Zydróż, Andrzej T. Gruchot
Uniwersytet Rolniczy, Kraków

1. Wstęp

Jednym z głównych producentów odpadów masowych w Polsce jest przemysł energetyczny i ciepłowniczy, gdzie wciąż głównym nośnikiem energii jest węgiel kamienny i brunatny. Spalanie węgla powoduje powstawanie pyłów dymnicowych, które powszechnie określane są jako popioły elektrowniane (paleniskowe) oraz popioło-żuźli będących mieszaniną popiołów i żużli, które uległy wymieszaniu na skutek hydrotransportu na składowisko. Materiały te pomimo wielu zastosowań wciąż są składowane stanowiąc zagrożenie dla środowiska przyrodniczego [23].

Dlatego w celu ograniczenia negatywnego wpływu odpadów na środowisko podejmowane są próby wykorzystania ich w różnych dziedzinach gospodarki, m.in. w budownictwie do wytwarzania materiałów budowlanych [7], produkcji spoiw hydraulicznych, dodatków do betonów [12] czy też w budownictwie ziemnym [2, 4–6, 24, 26]. Odpady elektrowniane charakteryzują się jednak znacznym zróżnicowaniem cech fizycznych i mechanicznych zależnie od rodzaju spalanego węgla i technologii jego spalania, sposobu transportu oraz składowania i dlatego wymagają indywidualnej oceny ich właściwości geotechnicznych [7]. Jednym z możliwych kierunków utylizacji odpadów paleniskowych jest budownictwo drogowe, gdzie dopuszcza się ich stosowanie do wznoszenia dolnych warstw nasypów poniżej strefy przemarzania w miejscach suchych lub gdy są izolowane od wody [21].

Zastosowanie tych materiałów do tego typu konstrukcji związane jest z wymogiem uzyskania odpowiedniej stateczności budowli, która w głównej mierze zależy od wytrzymałości na ścinanie materiału, z którego wykonana jest budowla.

2. Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu wilgotności i zagęszczenia na wytrzymałość na ścinanie popioło-żużli ze składowiska Pleszów Elektrociepłowni „Kraków” w aspekcie oceny stateczności skarp nasypu z nich wykonanego.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia określono metodą sitową (dla $d \geq 0,063$ mm) oraz areometryczną (dla $d < 0,063$ mm), a gęstość właściwą szkieletu – metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości $2,2 \text{ dm}^3$ przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. Współczynnik filtracji oznaczono w edometrach wyposażonych w oprzyrządowanie do pomiarów wodoprzepuszczalności, na próbkach o wysokości 2,0 cm i średnicy 6,5 cm formowanych bezpośrednio w pierścieniu aparatu. Oznaczenie polegało na pomiarze przepływu wody z dołu do góry próbki w warunkach zmiennego spadku hydraulicznego. Przygotowane próbki umieszczono w edometrach, a następnie przykładano obciążenie o wartości 12,5 kPa. Pomiar filtracji rozpoczęto po całkowitym przepływie wody przez próbkę. Badania polegały na rejestracji zmian poziomu wody w rurce aparatu w jednostce czasu.

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach 12×12 cm i wysokości próbki 9,7 cm z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o wysokości 1,0 cm. Próbkę formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wilgotności odpowiadającej 0,6, 0,8, 1,0 oraz 1,2 wilgotności optymalnej do uzyskania zagęszczenia odpowiadającego wskaźnikowi zagęszczenia $I_s = 0,90, 0,94, 0,97$ i 1,00. Próbkę poddano obciążeniu o wielkości 50, 100, 200, 300 i 400 kPa, a następnie ścinano przy prędkości $1,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Jako kryterium ścięcia przyjęto maksymalną wartość naprężeń ścinających.

Wytrzymałość na ścinanie określono zgodnie z [19], przyjmując, że wielkość siły stycznej odnieszona jest do powierzchni wyjściowej przekroju skrzynki. Badania wykonywano w co najmniej dwóch powtórzeniach (łącznie poddano ścinaniu 130 próbek), a ich wyniki uśredniano i poddano dalszej analizie. Wyniki tych badań były częściowo prezentowane w pracy Zawiszy i Zydrónia [28]. Przyjęto, że uzyskane wyniki badań odpowiadają wytrzymałości na ścinanie ośrodku nienasyconego, a do matematycznego opisu tej charakterystyki wykorzystano uproszczony model Montrasio i Valentino [2008].

W kolejnej części pracy, w oparciu o charakterystykę wytrzymałościową popioło-żużla obliczono stateczność skarp nasypu o nachyleniu skarp 1:1,5 wybudowanego z badanego materiału. W analizie uwzględniono efekt czasu trwania opadu i prędkość infiltracji wody w nasypie na stan uwilgotnienia popioło-żużla, a w dalszej konsekwencji na stateczność jego skarp .

3. Wyniki badań

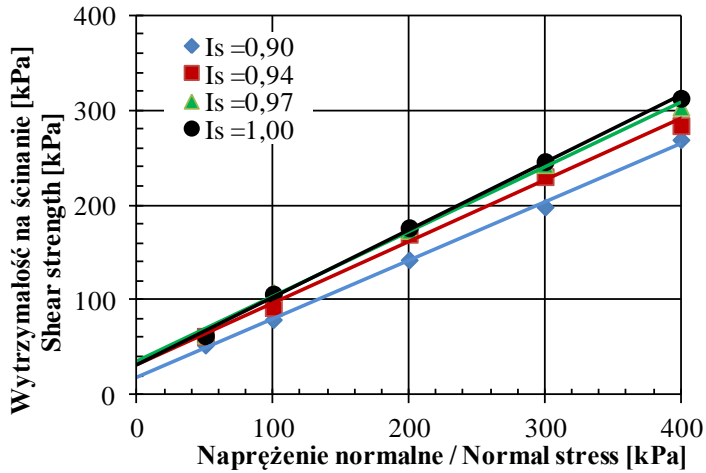
Pod względem geotechnicznym uziarnienie popioło-żużli odpowiadało wielofrakcyjnym piaskom pylastym (tabela 1) [20].

Wartości gęstości właściwej (średnio $2,2 \text{ g cm}^{-3}$) są znacznie mniejsze od odpowiednich wartości dla gruntów mineralnych o zbliżonym uziarnieniu. Z kolei wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu ($1,11 \text{ g cm}^{-3}$) spełnia wymagania normy [21], a więc jest wystarczająco wysoka z punktu widzenia potrzeb wykorzystania popioło-żużli do celów budownictwa ziemnego. Wilgotność optymalna (około 34%) jest stosunkowo duża, co wynika z dużej zawartości cząstek drobnych, odpowiadających przede wszystkim frakcji pyłowej.

Tabela 1. Podstawowe właściwości geotechniczne popioło-żuźla**Table 1.** Geotechnical properties of ash-slag mixture

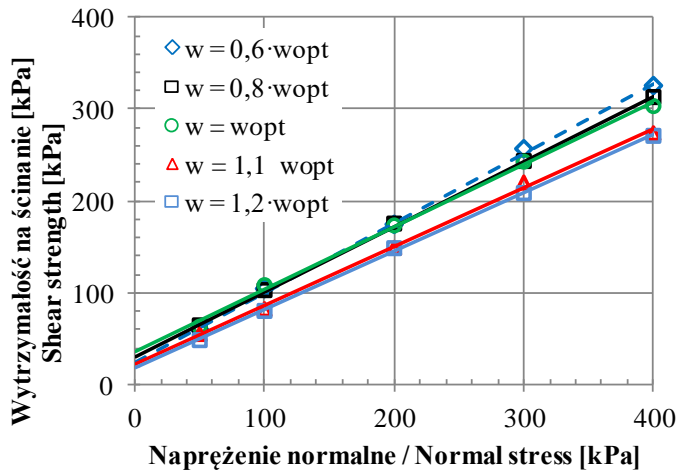
Lp	Parametr	Wartość parametru
1	Zawartość frakcji [%]: - żwirowej Gr: 2-63 mm - piaskowej Sa: 0,063-2 mm - pyłowej Si: 0,002-0,063 mm - ilowej: <0,002 mm	11,5 51,7 34,9 1,9
2	Nazwa wg [20]	Piasek pylasty (siSa)
3	Zawartość cząstek [%]: ≤ 0,075 mm ≤ 0,02 mm	41,3 19,6
4	Wskaźnik różnoziarnistości Cu [-]	16,7
5	Wskaźnik niejednorodności uziarnienia, Cc [-]	1,18
6	Gęstość właściwa	2,13÷2,28
7	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	1,11
8	Wilgotność optymalna	33,8
9	Współczynnik filtracji, k [m·s ⁻¹] przy wskaźniku zagęszczenia I _s = 0,90 I _s = 0,97 I _s = 0,97	3,1·10 ⁻⁷ 1,5·10 ⁻⁷ 1,2·10 ⁻⁷

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie popioło-żuźla wykazały jej zależność od wilgotności i zagęszczenia. Wpływ zagęszczenia na wartości wytrzymałości na ścinanie (rys. 1) zaznaczył się przede wszystkim przy wysokich wartościach naprężenia normalnego. Z kolei wpływ wilgotności był istotny w przypadku, gdy wilgotność popioło-żuźli była większa od wilgotności optymalnej (rys. 2).



Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ścinanie popioło-żużli od naprężeń normalnych dla próbek o wilgotności zbliżonej do optymalnej.

Fig. 1. Shear strength vs. normal stress of ash-slag mixture tested at optimum moisture content.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ścinanie popioło-żużli od naprężeń normalnych dla próbek o wskaźniku zagęszczenia $I_s=0,97$.

Fig. 2. Shear strength vs. normal stress of ash-slag mixture determined at compaction index $I_s = 0.97$.

Stwierdzono, że badany popioło-żużel charakteryzuje się wysokimi wartościami parametrów wytrzymałości na ścinanie (tabela 2). Zaważalne jest, że wraz ze wzrostem wilgotności popioło-żużla następuje zmniejszenie wartości kąta tarcia wewnętrznego (rys. 3a), przy czym wartości te w całym przedziale wilgotności badanego materiału wynoszą powyżej 30° . Zależność ta jest częściowo zbieżna z badaniami Kiereś [10], Kim i in. [11], Zydronia i in. [29] czy też Gruchota i Łojewskiej [8]. Wyniki badań Kiereś [10] wykazały, że w zakresie wilgotności popiołów lotnych od 0 do 45% wartości kąta tarcia wewnętrznego wynosiły ponad 30° i były praktycznie niezależne od wilgotności. Natomiast przy wyższych wartościach wilgotności popiołów stwierdzono znaczne zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego. Według Kiereś [10] wilgotność krytyczna popiołów wynosi od około 10 do 15% poniżej wilgotności całkowitej. W przypadku popioło-żużla będącego przedmiotem badań wilgotność całkowita wynosiła od 44,3 do 54,3% przy wskaźniku zagęszczenia odpowiednio $I_s = 1,00$ i 0,90. Zatem, próby charakteryzujące się wilgotnością większą od optymalnej zgodnie z Kiereś [10] posiadały uwilgotnienie odpowiadające krytycznemu. Otrzymane różnice wartości kąta tarcia wewnętrznego badanych popioło-żużli oraz popiołów badanych przez Kiereś mogą wynikać z faktu, że warunki badań autorów przeprowadzone w aparacie bezpośredniego ścinania umożliwiły drenaż próbki, podczas gdy badania Kiereś [10] przeprowadzone zostały w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu. Natomiast wyniki badań Kim'a i in. [11], przeprowadzonych również w aparaturze trójosiowej, ale w warunkach z drenażem, nie potwierdziły wyników badań Kiereś.

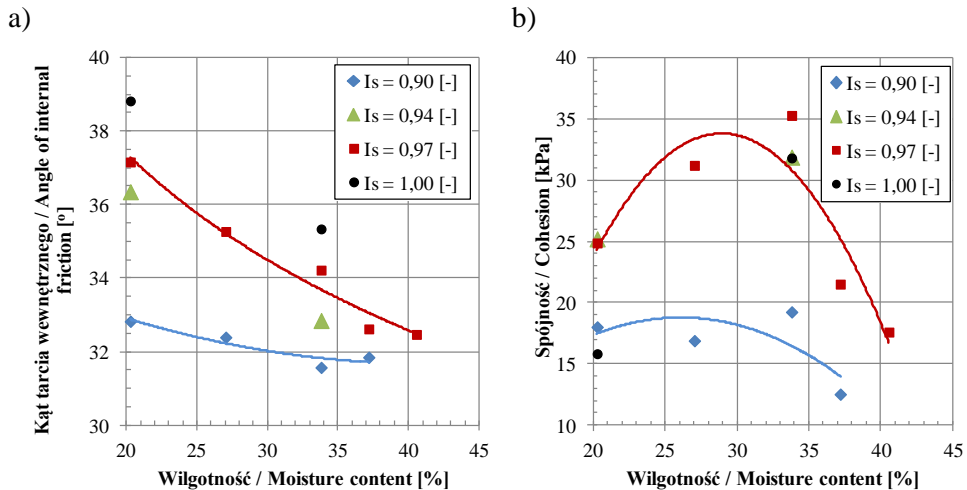
Z kolei interesujące są zależności spójności popioło-żużla od jego wilgotności (rys. 3b). Wzrost wilgotności spowodował zwiększenie wartości spójności, a po uzyskaniu wilgotności optymalnej nastąpiło jej znaczne zmniejszenie. Podobne zależności uzyskano dla części próbek popioło-żużli z Elektrociepłowni „Skawina” [29]. Natomiast wyniki prac Gruchota i Łojewskiej [8] oraz Gruchota i Zydronia [9] wskazują, że wartości spójności, jak i również kąta tarcia wewnętrznego, ulegały zmniejszeniu wraz ze wzrostem wilgotności materiału. Wyniki badań Kiereś [10] wykazały, że spójność popiołów nie zależy od ich wilgotności, ale stanowi indywidualną właściwość materiału związaną z jego zagęszczeniem. Wydaje się jednak, że spójność popiołów nie ma

tego samego charakteru jak w przypadku gruntów mineralnych. Z podobnego założenia wyszli Kim i in. [11], którzy przy interpretacji wyników badań własnych przyjęli, że popioły i mieszaniny popiołowo-żużlowe charakteryzują się zerową spójnością, a wartości kąta tarcia wewnętrznego wahają się od 27 do 47°, zależnie od udziału frakcji drobnych w mieszaninie popiołowo-żużlowej.

Autorzy niniejszej pracy przyjęli, że popioło-żużle, których uziarnienie odpowiadało piaskom pylastym, mogą wykazywać spójność wyłącznie jako efekt działania sił ssania matrycowego, czyli tzw. spójność pozorną, a nie jako efekt wzajemnego oddziaływania sił międzycząsteczkowych. Jedną z przyczyn uzyskiwania niezerowych wartości spójności dla gruntów niespoistych jest liniowy sposób opisu wytrzymałości gruntów na ścinanie. Stąd też w literaturze można spotkać propozycje opisu wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntów jako zmiennej naprężeń normalnych [25, 13].

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie popioło-żużli
Table 2. Results of shear strength tests for ash-slag mixture

Wskaźnik zagęszczenia, I_s	Wilgotność			Kąt tarcia wewnętrznego, ϕ	Spójność, c
	opis	masowa	objętościowa		
[-]	-	[%]	[-]	[°]	[kPa]
0,90	0,6 w_{opt}	20,3	0,204	32,8	18,0
0,94			0,213	36,3	25,2
0,97			0,219	37,2	24,9
1,00			0,226	38,8	15,8
0,90	0,8 w_{opt}	27,0	0,271	32,4	16,9
0,97			0,292	35,3	31,2
0,90	1,0 w_{opt}	33,8	0,339	31,6	19,2
0,94			0,354	32,8	31,9
0,97			0,366	34,2	35,3
1,00			0,377	35,3	31,8
0,90	1,1 w_{opt}	37,2	0,373	31,8	12,5
0,97			0,402	32,6	21,5
0,97	1,2 w_{opt}	40,6	0,439	32,5	17,6



Rys. 3. Wpływ wilgotności na wartości kąta tarcia wewnętrznego (a) i spójność (b) popioło-żużli

Fig. 3. Influence of moisture content on angle of internal friction (a) and cohesion (b) of tested ash-slag mixture

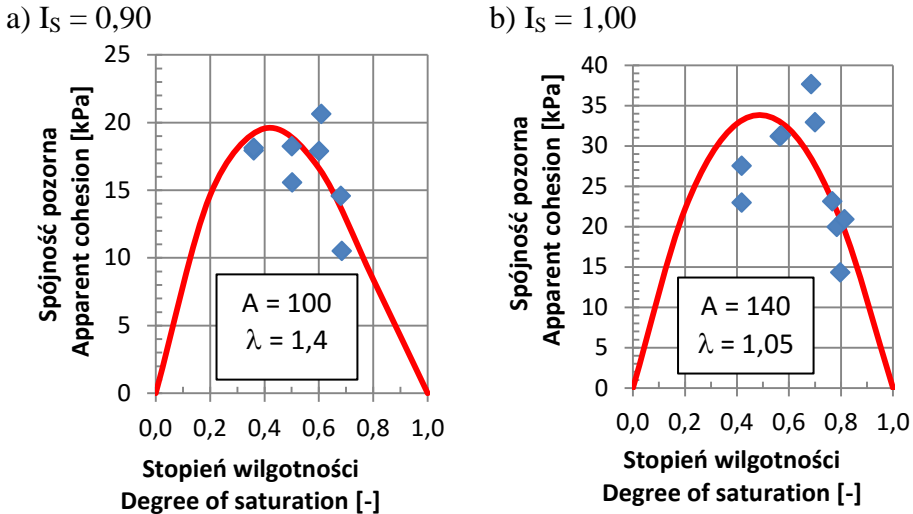
Badania wytrzymałości na ścinanie popioło-żużli przeprowadzono na próbkach o niepełnym nasyceniu jego porów wodą. W związku z tym założono, że spójność popioło-żużla będzie wynikać z działania sił ssania, a do opisu wpływu tych sił wykorzystano równanie empiryczne zastosowane w pracy Montrasio i Valentino [16]:

$$c_{app} = A \cdot S_r \cdot (1 - S_r)^\lambda \quad (1)$$

gdzie:

c_{app} – spójność pozorna,
 S_r – stopień wilgotności,
 A, λ – stałe gruntowe.

Wartości parametrów A i λ określono na zasadzie dopasowywania wartości spójności wyliczanych za pomocą równania (1) do wartości uzyskanych bezpośrednio z badań (rys. 4).



Rys. 4. Zależność spójności pozornej od stopnia wilgotności dla popioło-żużla przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ i $0,97$

Fig. 4. Apparent cohesion vs degree of saturation for ash-slag mixture with compaction indexes $I_s = 0.90$ and 0.97

Następnie określono wytrzymałość badanego popioło-żużla korzystając z uproszczonego równania Coulomba:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi' + c_{app} \quad (2)$$

gdzie:

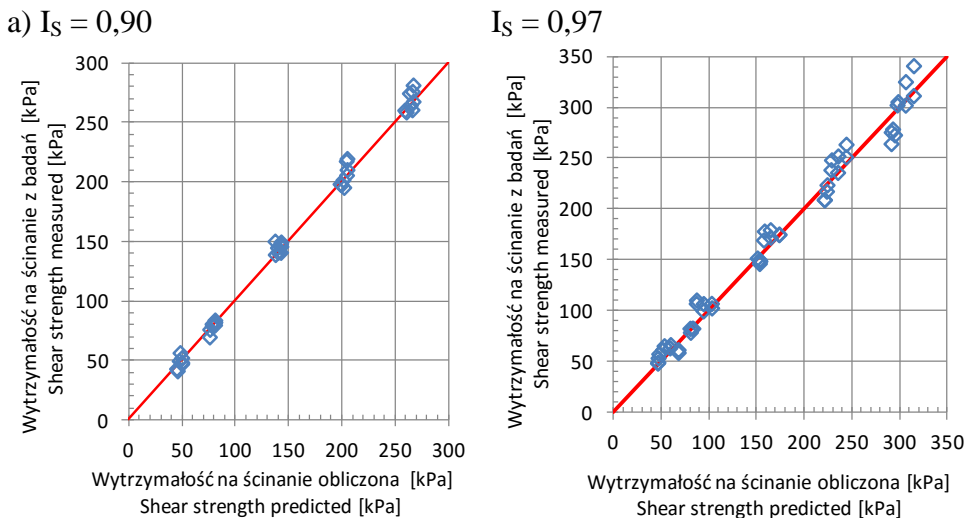
σ - naprężenie normalne,

ϕ' - efektywny kąt tarcia wewnętrznego,

c_{app} - jak we wzorze (1).

W równaniu (2) niewiadomą stanowi wartość kąta tarcia wewnętrznego, którą ustalono metodą kolejnych przybliżeń dopasowując jego wartość tak, aby wyliczona wartość wytrzymałości na ścinanie była jak najbardziej zbliżona do uzyskanej z badań laboratoryjnych. W wyniku tych obliczeń określono, że efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego popioło-żużla przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ i $0,97$ wynosiły odpowiednio $31,8$ i $35,3^\circ$.

Porównanie wytrzymałości na ścinanie obliczonej za pomocą wzoru (2) z wartościami otrzymanymi z badań wykazały dobre dopasowanie dla popioło-żużla przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$, gdzie odchylenie standardowe wyniosło 4,0 kPa. Z kolei w przypadku popioło-żużla przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$ dobre dopasowanie wyników obliczeń uzyskano dla niskich wartości naprężeń normalnych (50-200 kPa), gdzie odchylenie standardowe wyniosło tutaj 6,7 kPa. Natomiast odchylenie standardowe dla pełnego zakresu zastosowanych naprężeń normalnych przy tym wskaźniku zagęszczenia wyniosło 9,0 kPa.



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń wytrzymałości na ścinanie z wynikami badań laboratoryjnych popioło-żużla przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ i $0,97$

Fig. 5. Comparison of predicted and measured values of shear strength for ash-slag mixture at compaction indexes $I_s = 0.90$ and 0.97

Znajomość wytrzymałości na ścinanie jest podstawą informacją, która wykorzystywana jest do oceny stateczności zboczy i skarp nasypów inżynierskich. Drugim czynnikiem wpływającym w sposób pośredni na zmianę stateczności konstrukcji inżynierskich jest woda, której obieg wpływa na zmiany stanu naprężeń w ośrodku gruntowym. Stąd też rozpatrując stateczność zboczy lub nasypów niezbędna jest również znajomość właściwości hydraulicznych gruntów je budujących. Wodoprze-

puszczalność badanego popioło-żużla w zależności od zagęszczenia wynosiła od $1,2 \cdot 10^{-7}$ do $3,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ($10,4$ - $26,8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$). Wartości te oznaczają minimalną intensywność opadu zdolnego do nasycenia analizowanego materiału, a więc do uzyskania najbardziej niekorzystnych warunków stateczności. W przypadku analizy stateczności ośrodka nasyconego możliwe są dwa scenariusze zdarzeń. W pierwszym infiltrująca woda opadowa przemieszcza się pionowo w kolumnie gruntowej powodując redukcję spójności pozornej, a współczynnik stateczności w przypadku modelu zbocza o nieograniczonej długości zgodnie z propozycją Rahardjo i in. [22] można zapisać następująco:

$$FS = \frac{z \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi' \cdot \gamma_{\text{sat}} + c'}{z \cdot \gamma_{\text{sat}} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (3)$$

gdzie:

z – głębokość infiltracji,

β - kąt nachylenia zbocza,

γ_{sat} – ciężar objętościowy gruntu przy pełnym nasyceniu porów,

c' – efektywna spójność,

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego.

Drugi możliwy schemat infiltracji wód uwzględnia sytuację, gdy infiltrująca woda natrafia na warstwę nieprzepuszczalną. W takiej sytuacji może nastąpić uruchomienie działania sił ciśnienia spływowego, a stateczność zbocza można opisać równaniem [22]:

$$FS = \frac{z \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi' \cdot (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) + c'}{z \cdot \gamma_{\text{sat}} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (4)$$

gdzie:

γ_w – ciężar objętościowy wody,

$z, \beta, \gamma_{\text{sat}}, \phi', c'$ – jak we wzorze (3).

Jeżeli intensywność opadu jest mniejsza niż wodoprzepuszczalność gruntu, to współczynnik stateczności można opisać następująco:

$$FS = \frac{z \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi' \cdot (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) + c' + c_{\text{app}}}{z \cdot \gamma_{\text{sat}} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (5)$$

Po uwzględnieniu równania (1) powyższe równanie można sprowadzić do następującej postaci:

$$FS = \frac{z \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi' \cdot (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) + c' + A \cdot S_r \cdot (1 - S_r)^\lambda}{z \cdot \gamma_{\text{sat}} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (6)$$

We wzorach (4, 5, 6) głębokość położenia frontu zwilżenia można opisać za pomocą przekształconego wzoru Lumb'a [14]:

$$z = \frac{k \cdot t}{(\theta_{\text{av}} - \theta_i) \cdot \cos \beta} \quad (7)$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji gruntu,

t – czas trwania opadu,

θ_{av} – wilgotność końcowa (gdy intensywność opadu przewyższa wodoprzepuszczalność gruntu $\theta_{\text{av}} = \theta_s$ (θ_s – wilgotność gruntu nasyconego),

θ_i – wilgotność początkowa gruntu,

$\theta_s - \theta_i$ – deficyt wilgotności.

W przypadku występowania opadów o intensywności mniejszej niż wodoprzepuszczalność gruntu podstawowym problemem jest określenie wilgotności gruntu. Według Cho [3] wilgotność ta odpowiada wartości wodoprzepuszczalności gruntu w stanie niepełnego nasycenia, która z kolei w trakcie trwania opadu ustalonego zrównuje się z jego intensywnością. Dla potrzeb niniejszej analizy charakterystykę retencyjną badanego popiołu-żużla określono wykorzystując model Aubertina i in. [1], a następnie opisano równaniem van Genuchtena [27]:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (a \cdot \psi)^n\right]^m} \quad (8)$$

gdzie:

θ – wilgotność objętościowa gruntu,

θ_s – wilgotność objętościowa gruntu przy pełnym nasyceniu porów gruntowych,

θ_r – rezydualna wilgotność objętościowa gruntu,

ψ – ciśnienie ssania wyrażone w cm słupa wody,

α , n , m – stałe równania ($m=1-1/n$), parametr α może być wyrażany w cm^{-1} .

Parametry uzyskane z równania (8) wykorzystano do opisu zależności wodoprzepuszczalność-ciśnienie ssania posługując się następującym równaniem [27]:

$$k_r(S_e) = \frac{\left[1 - (\alpha \cdot \psi)^{n-1} \cdot \left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right]^{-m}\right]^2}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right]^{m/2}} \quad (9)$$

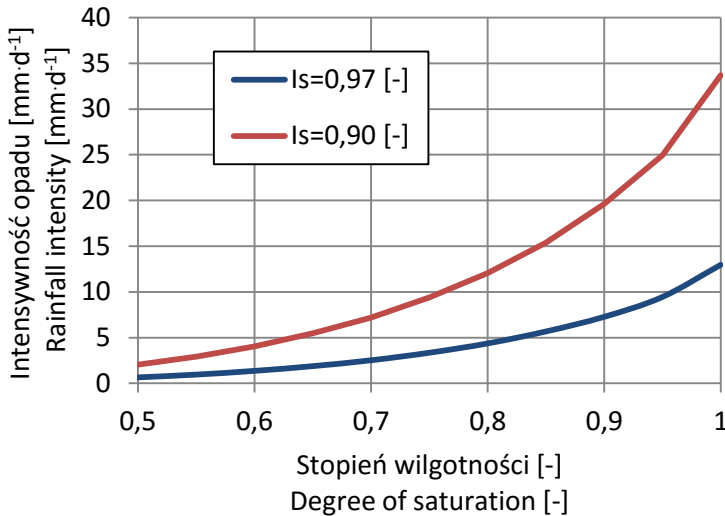
gdzie:

S_e – znormalizowany stopień wilgotności, [-],

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m \quad (10)$$

Zależności (8) oraz (9) wykorzystano do określenia wartości wilgotności objętościowej mieszaniny jaką ona osiągnie w czasie trwania opadu o intensywności mniejszej od jej wodoprzepuszczalności.

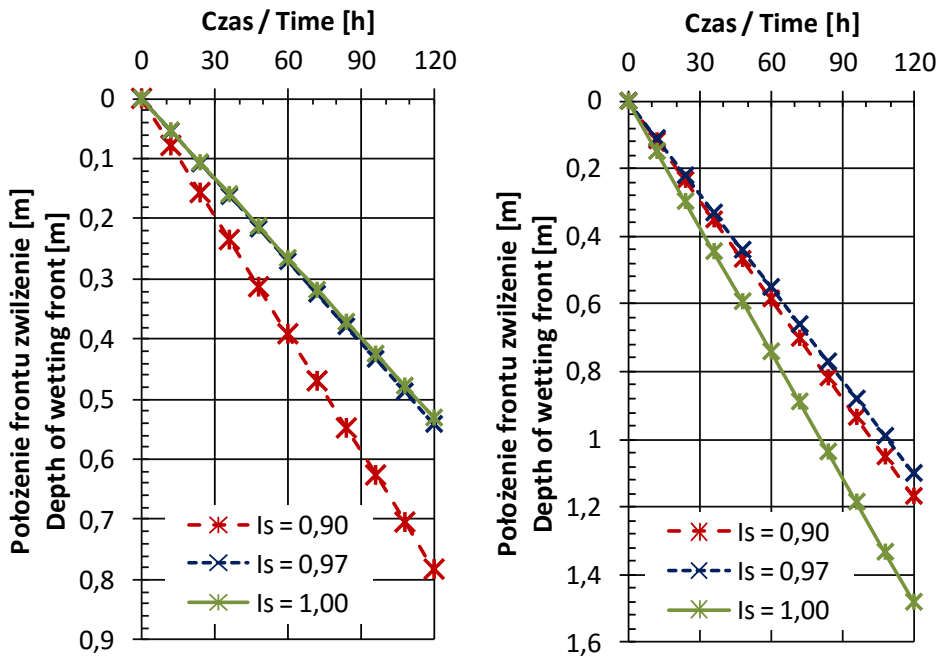
Na rysunku 6 przedstawiono teoretyczne wyniki obliczeń intensywności opadu ustalonego, która jest konieczna do uzyskania odpowiednich wartości stopnia wilgotności badanego popioło-żuźła. Porównując wyniki obliczeń można zauważyć, że dla uzyskania wysokich wartości stopnia wilgotności w przypadku materiału o mniejszym wskaźniku zagęszczenia niezbędne są większe opady niż dla materiału o wysokim zagęszczeniu. Różnica ta wynika ze zmiennej wodoprzepuszczalności popioło-żuźła, która przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ jest prawie trzykrotnie większa niż dla materiału przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,97$. Należy także zwrócić uwagę na wyraźnie nieliniowy charakter zależności pomiędzy intensywnością opadu ustalonego, a możliwym do uzyskania stopniem wilgotności analizowanego popioło-żuźła. Przykładowo intensywność opadu potrzebna do uzyskania stopnia wilgotności $S_r = 0,90$ popioło-żuźła przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ wynosi $20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, ale już uzyskanie stopnia wilgotności $S_r = 0,8$ uwarunkowane jest wystąpieniem opadu o intensywności $12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$.



Rys. 6. Teoretyczne wartości intensywności opadu ustalonego dla popiołu-żużla, a jego stopień wilgotności

Fig. 6. Theoretical values of threshold steady rainfall intensity necessary to obtain degree of saturation for ash-slag mixture

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki obliczeń przemieszczania się frontu zwilżenia dla badanego popioło-żużla wbudowanego w nasyp o nachyleniu skarp 1:1,5 w zależności od jego zagęszczenia i początkowej wilgotności. W obliczeniach tych założono, że warunki infiltracji odpowiadają infiltracji przy pełnym nasyceniu gruntu. Zauważalne jest, że w przypadku gdy początkowe uwilgotnienie popioło-żużla odpowiada wilgotności optymalnej rozwój frontu zwilżenia w materiale przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ jest bardziej wyraźny stosunku do materiału o większym zagęszczeniu. Różnice te wynikają przede wszystkim ze zmiennej wodoprzepuszczalności popioło-żużla, gdzie przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ jest ona prawie trzykrotnie większa niż przy wskaźnikach zagęszczenia $I_s = 0,97$ i $1,00$. Z kolei w przypadku, gdy wilgotność popioło-żużla jest większa niż optymalna bardziej istotny wpływ na prędkość przemieszczania się frontu zwilżenia ma wielkość deficytu wilgotności, który dla popioło-żużla przy wskaźnikach zagęszczenia $I_s = 0,90$ i $1,00$ wyniósł odpowiednio $0,138$ i $0,042$. Rozwój frontu zwilżenia był największy dla materiału o najwyższym zagęszczeniu.

a) $w = w_{opt}$ b) $w = 1,2 \cdot w_{opt}$ 

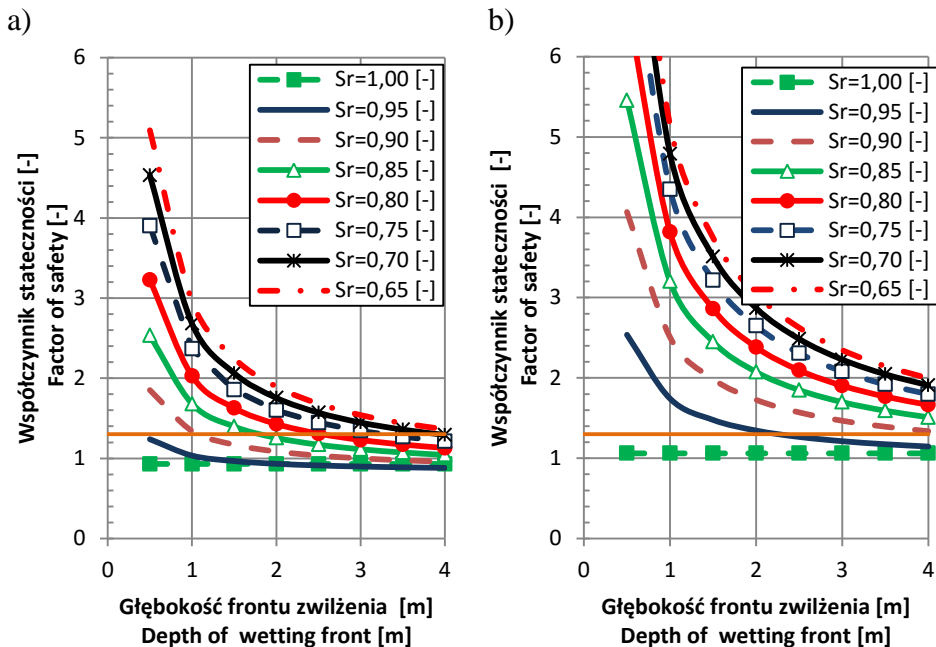
Rys. 7. Wyniki obliczeń przemieszczania się frontu zwilżenia w popioło-żuźlu w zależności od jego zagęszczenia i wilgotności

Fig. 7. Position of wetting front vs time for ash-slag mixture compacted at different compaction indexes at initial moisture content

Wyniki obliczeń wykazały, że w warunkach infiltracji prowadzącej do pełnego nasycenia popioło-żuźła wartości współczynników stateczności obliczone na podstawie wzorów (3) i (4) są niezależne od głębokości infiltracji wody opadowej i wynoszą od 0,33 do 1,06, co pozwala stwierdzić, że nasyp ten nie będzie stateczny. Wyniki badań Kim'a i in. [11] również wykazały pośrednio, że w warunkach infiltracji wymuszonej i zatopionej oraz wzbudzenia sił ciśnienia sphywowego nasypy o nachyleniu 1:1,5 nie gwarantują zachowania stateczności konstrukcji. Z kolei wyniki obliczeń stateczności dla popioło-żuźła o niepełnym nasyceniu (rys 8) wykazały, że współczynniki stateczności w większości przypadków obliczeniowych są wysokie, powyżej 1,3, co pozwoliło stwierdzić, że nasyp wykonany z przedmiotowego materiału będzie sta-

tecny. Ogólnie większe wartości współczynnika stateczności uzyskano dla materiału o większym wskaźniku zagęszczenia.

Otrzymane wyniki wskazują, że dla zachowania stateczności nasypu wykonanego z przedmiotowego popioło-żuźla niezbędne jest zmniejszenie nachylenia skarp nasypu lub zastosowanie systemu odwodnienia, który miałby na celu przejąć wody infiltrujące w obręb popioło-żuźla. Rozwiązanie takim może być drenaż przyporowy, który jest stosunkowo szeroko rozpowszechnionym rozwiązaniem w drogownictwie.



Rys. 8. Wyniki obliczeń stateczności nasypu wykonanego z popioło-żuźla przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ (a) i $0,97$ (b)

Fig. 8. Results of slope stability calculations of embankment erected from ash-slag mixture at compaction indexes $I_s = 0,90$ (a) and $0,97$ (b)

4. Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że analizowany popioło-żuźel pochodzący ze składowiska Elektrociepłowni „Kraków” w warunkach niepełnego nasycenia charakteryzuje się wysoką

wytrzymałością na ścinanie. Wyniki badań wykazały, że zwiększenie wilgotności popioło-żuźla wpływa na zmniejszenie jego wytrzymałości na ścinania, przy czym zakres tych zmian jest szczególnie wyraźny przy wilgotności większej od optymalnej.

Analizując wyniki badań stwierdzono, że w przypadku popioło-żuźli uzyskiwane wartości spójności mogą być dyskusyjne. W związku z tym do opisu wytrzymałości przedmiotowego popioło-żuźla wykorzystano uproszczony model opisu jego wytrzymałość ścinanie. Przyjęto, że materiał ten w stanie nasycenia ma zerową spójność, natomiast uzyskane w badaniach wartości spójności wynikają z działania sił ciśnienia ssania, które są zależne od stopnia wilgotności. Wyniki teoretycznych obliczeń wytrzymałości na ścinanie za pomocą zastosowanego modelu dały stosunkowo dobrą zgodność z bezpośrednimi wynikami badań.

Obliczenia stateczności zintegrowane z obliczeniami infiltracji wykazały istotny wpływ wodoprzepuszczalności gruntów na warunki równowagi skarp. Wyniki analizy wskazują, że typowe nachylenie skarp nasypów 1:1,5 nie gwarantuje zachowania stateczności tego typu konstrukcji w przypadku infiltracji wymuszonej i zatopionej. Z kolei nie dopuszczenie do nasycenia przedmiotowej mieszaniny znacznie poprawia stateczność skarp nasypu. Otrzymane wyniki wskazują zatem, że dla określenia przydatności tego typu materiałów powinna decydować jego wytrzymałość na ścinanie oraz wodoprzepuszczalność. Dlatego podejmując decyzję o przydatności popioło-żuźli do celów budownictwa ziemnego niezbędne jest każdorazowe określenie ich właściwości geotechnicznych.

Praca wykonana w ramach badań statutowych: DS-3322/KIWiG/2013

Literatura

1. **Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, 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. **Baran P., Cholewa M., Zawisza E., Kulasik K.:** *Problem jednoznaczności ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 15, 2071–2089 (2013).

3. **Cho S.E.:** *Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics.* Engineering Geology, 105, 32–43 (2009).
4. **Cholewa M., Baran P.:** *Modeling of permeability flow in embankments formed from ash-slag mixture.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 15:479–491 (2013).
5. **Filipiak J.:** *Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 13:1043–1054 (2011).
6. **Filipiak J.:** *Wykorzystanie ubocznych produktów spalania jako stabilizatora do wzmacniania gruntów organicznych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 15, 1153–1163 (2013).
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., Łojewska M.:** *Wpływ zagęszczenia, wilgotności i prędkości ścinania na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej.* Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus 10 (3): 31–38 (2011).
9. **Gruchot A., Zydróż T.:** *Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 15, 1719–1737 (2013).
10. **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).
11. **Kim B., Prezzi M., Salgado R.:** *Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 7, 914–924 (2005).
12. **Kosior-Kazberuk M.:** *Nowe dodatki mineralne do betonu.* Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2, 47–55 (2011).
13. **Lade P.V.:** *The mechanics of surficial failure in soil slopes.* Engineering Geology, 114, 54–64 (2010).
14. **Lee L.M., Gofar N., Rahardjo H.:** *A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability.* Engineering Geology, 108, 272–285 (2009).

15. **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).
16. **Montrasio L., Valentino R.:** *A model for triggering mechanism of shallow landslides*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 1149–1159 (2008).
17. **Pachowski J.:** *Badania popiołów lotnych zdeponowanych przez E.C. Siekierki na składowisku „Zawady” w aspekcie ich wykorzystania do budowy nasypów drogowych tras komunikacyjnych w Warszawie*. Sesja Naukowa z okazji Jubileuszu 70-lecia prof. dr hab. inż. Zbigniewa Grabowskiego, Warszawa, 189–194 (2000).
18. **Pachowski J.:** *Badania popiołów lotnych zdeponowanych przez E.C. Siekierki na składowisku „Zawady” w aspekcie ich wykorzystania do budowy nasypów drogowych tras komunikacyjnych w Warszawie*. Sesja Naukowa z okazji Jubileuszu 70-lecia prof. dr hab. inż. Zbigniewa Grabowskiego, Warszawa, 189–194 (2000).
19. **PKN-CEN ISO/TS 17892-10.** *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10. Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
20. **PN-EN ISO 14668-2:2004.** *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
21. **PN-S-02205:1998.** *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*. PKN, Warszawa.
22. **Rahardjo H., Lim T.T., Chang M.F., Fredlund D.G.:** *Shear strength characteristics of a residual soil*. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 60–77 (1995).
23. **Rosik-Dulewska Cz., Karwaczyńska U.:** *Metody ługowania zanieczyszczeń z odpadów mineralnych w aspekcie możliwości ich zastosowania w budownictwie hydrotechnicznym*. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection)*, 10, 205–219 (2008).
24. **Sobik-Szołtysek J., Bień J.B., Milczarek M.:** *Analiza współczynnika filtracji w aspekcie możliwości stosowania alternatywnych materiałów do budowy barier izolacyjnych na składowiskach odpadów*. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection)*, 15, 1393–1410 (2013).
25. **Stark, T., Eid, H.:** *Drained residual strength of cohesive soils*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (5): 856–871 (1994).

26. **Szczygielski T.:** *Obwodnica Sochaczewa – 259 tys. ton popiołów w nasypie*. XI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”. Wyd. Ekotech Sp z o.o., 255–266 (2004).
27. **Van Genuchten M.T.:** *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society American Journal, 44, 892–898 (1980).
28. **Zawisza E., Zydroń 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).
29. **Zydroń T., Zawisza E., Cieślak P.:** *Wpływ zagęszczenia i wilgotności na wytrzymałość na ścinanie wybranych odpadów paleniskowych*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska, 54, 153–162 (2007).

Influence of Moisture and Compaction on Shear Strength and Stability of Embankments from Ash-Slag Mixture

Abstract

Coal combustion in the heat and power plants causes producing of smoke-box ash, which is generally called fly ash (furnance ash) and ash-slag, which is the result of mixing ash and slag during hydro transport to the landfill. These materials, despite many ways of usage, are still deposited, being a threat to the natural environment. Therefore in order to limit the negative influence of this waste on the environment there are attempts to use them in different fields of industry, for example to produce building materials, hydraulic binding agents, concrete additions or in earthworks for building embankments. However, furnance waste is characterized by a significant diversity of physical and mechanical properties, depending on the coal type, combustion technology, way of transport and depositing, therefore it requires individual evaluation of its geotechnical parameters. Usage of these materials for earthworks means obtaining a proper stability of the construction or its low deformability as a result of loading. Stability of earth constructions depends mainly on the material's shear strength.

The topic of the tests was shear strength of ash-slag from Pleszów landfill of “Kraków” Power Plant in Cracow. The tests were carried out in order to determine the influence of moisture content and compaction on values of angle of internal friction and cohesion. These tests were carried out on samples at the moisture content from the range $(0.6-1.2) \cdot w_{opt}$ and the compaction indexes of $I_s = 0.90, 0.94, 0.97$ and 1.00 .

Based on obtained results it was stated that the unsaturated ash-slag from “Kraków” Power Plant landfill is characterized by high shear strength. Values of angle of internal friction obtained from tests in shear box apparatus were from 31.6 to 38.8° , whereas values of cohesion were from 12.5 to 35.3 kPa. While analyzing tests results it was stated that the increase in ash-slag moisture content influences the decrease in strength parameters of this material, although the changes are not significant.

While analyzing tests results it was stated that in case of this type of materials obtained values of cohesion can be debatable. Hence to describe the strength of the ash-slag a simplified model was used. It was assumed that this material when saturated has a zero cohesion, whereas values of cohesion obtained from testes are the result of forces of suction pressure, which depend on the material's moisture content. The results of theoretical calculations of shear strength gave relatively good compatibility with the direct tests results.

Stability calculations integrated with infiltration calculations showed a significant influence of soils' permeability on slopes equilibrium condition. Analysis results show that typical slopes inclination of $1:1.5$ does not guarantee stability of the embankment in case of forced and drowned infiltration. Whereas not allowing the saturation of the mixture significantly improves slope stability. Obtained results show that in order to determine the usability of this material, apart from shear strength parameters, permeability should also be taken into consideration. Stability calculations results prove that to make a decision about usability of this type of material for earthworks it is necessary to determine their geotechnical parameters each time.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na ścinanie, popioło-żuźle, stateczność zboczy
Keywords: shear strength, ash-slag, slope stability