

*Andrzej Gruchot**, *Edyta Resiuła***

WPŁYW ZAGĘSZCZENIA I NAWODNIENIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŻLOWEJ I STATECZNOŚĆ WYKONANEGO Z NIEJ NASYPU

1. Wstęp

W budownictwie ziemnym obserwuje się coraz większe zainteresowanie stosowaniem wyselekcjonowanych odpadów przemysłowych zamiast drogich i w wielu przypadkach trudno dostępnych gruntów mineralnych. Odpady przemysłowe są materiałem o dobrych właściwościach geotechnicznych pod warunkiem prawidłowego ich wbudowania w obiekty budownictwa ziemnego [1, 2]. Stosowanie surowców wtórnych, jakimi są odpady, jest istotne z punktu widzenia potrzeb gospodarczych. Wykorzystując je do celów budownictwa ziemnego uzyskujemy znaczne oszczędności zasobów naturalnych i materiałów energetycznych [4, 5].

Jednym z sektorów budownictwa ziemnego, gdzie odpady przemysłowe znajdują szerokie zastosowanie jest budownictwo drogowe [6]. Właściwe określenie ich przydatności wymaga przeprowadzenia badań geotechnicznych obejmujących między innymi oznaczenie składu granulometrycznego, parametrów zagęszczalności oraz wytrzymałości na ścinanie.

W miarę rozwoju technologii niezastąpione staje się wykorzystanie programów komputerowych pozwalających na ocenę zachowania się planowanych budowli, bądź też już istniejących. Pozwala to na przeprowadzenie m.in. analiz stateczności nasypów wykonanych z odpadów przemysłowych, w różnych, często nawet mało sprzyjających warunkach posadowienia.

* Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

** STAAND, Ośrodek Usług Inżynierskich, sp. z o.o., Kraków

2. Cel i zakres pracy

Celem prezentowanych w pracy badań było określenie wpływu zagęszczenia, nawodnienia oraz przyjętego kryterium ścięcia na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żuźlowej pobranej z osadnika Elektrowni „Skawina”. Dla weryfikacji możliwości zastosowania przedmiotowej mieszaniny do celów budownictwa ziemnego wykonano obliczenia stateczności nasypu wykonanego z tego materiału.

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 objętościowa szkieletu oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości $2,2 \text{ dm}^3$ przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$. Kapilarność bierną oznaczono w kapilarymetrze laboratoryjnym, a wskaźnik piaskowy w cylindrze o średnicy 32 mm i wysokości 430 mm.

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach 120×120 mm, z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o wysokości 10 mm. Do badań wykorzystano materiał o uziarnieniu poniżej 10 mm zakładając, że średnica maksymalnego ziarna będzie odpowiadać wysokości strefy ścinania. Próbkę formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wilgotności zbliżonej do optymalnej (tabela 1) i trzech wartościach wskaźnika zagęszczenia: $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Badania ścinania przeprowadzono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz na próbkach poddanych nawodnieniu przez całkowite ich zanurzenie w wodzie przez 2 godziny. Ścinanie próbek po nawodnieniu wykonano utrzymując poziom wody w strefie ścinania. Próbkę poddano obciążeniu o wielkości 50, 100, 200 i 300 kPa (próbki o wilgotności optymalnej) oraz o wielkości 25, 50, 75 i 100 kPa (próbki nawodnione), a następnie ścinano przy prędkości $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Jako kryterium ścięcia przyjęto naprężenia ścinające — maksymalne w przypadku ścięcia kruchego ($\max \tau_f$) lub uzyskane przy poziomym odkształceniu próbki równym 10% (τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$) w przypadku ścięcia plastycznego.

Obliczenia stateczności skarp nasypu wykonanego z mieszaniny popiołowo-żuźlowej o nachyleniu 1:1, 1:1,5, 1:2, wysokości 6 i 12 m oraz szerokości korony 10 m przeprowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego Slope/W. Jako podłoże nasypu przyjęto grunt o grupie nośności G1 [3] o wartości kąta tarcia wewnętrznego równej 16° oraz spójności równej 22 kPa. Obliczenia wykonano dla parametrów wytrzymałościowych mieszaniny uzyskanych przy wilgotności optymalnej oraz w warunkach nawodnienia, przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90, 0,95, 1,00$. Analiza wyników obliczeń została przeprowadzona dla minimalnych wartości współczynnika stateczności obliczonych metodą Felleniusa (the ordinary method of slices). Przyjęto, że skarpa będzie stateczna jeżeli współczynnik stateczności będzie równy lub większy od 1,3.

3. Wyniki badań i ich analiza

3.1. Właściwości fizyczne

Pod względem geotechnicznym mieszanina popiołowo-żużłowa odpowiadała różnoziarnistym piaskom pylastym (siSa) [6]. W składzie uziarnienia przeważała frakcja piaskowa, której średnia zawartość wynosiła ponad 68%. Średnia zawartość frakcji żwirowej wynosiła około 16%, pyłowej 15%, a iłowej poniżej 1% (tabela 1). Zawartość cząstek mniejszych od 0,075 mm wynosiła średnio 18,5%, a cząstek mniejszych od 0,02 mm — 6,0%.

Gęstość właściwa szkieletu wynosiła średnio 2,48 g·cm⁻³. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu wynosiła średnio 1,26 g·cm⁻³ przy wilgotności optymalnej około 31%. Kapilarność bierna wynosiła 0,44 m, a wskaźnik piaskowy — 48,6%.

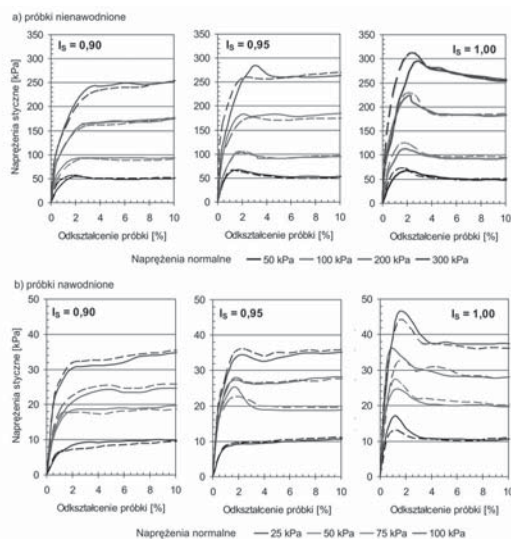
TABELA 1
Charakterystyka geotechniczna mieszaniny popiołowo-żużłowej

Parametr	Wartość		
	próbka		średnia
	1	2	
Zawartość frakcji [%]:			
— żwirowa Gr: 63÷2 mm	17,2	14,6	15,9
— piaskowa Sa: 2÷0,063 mm	74,7	62,2	68,4
— pyłowa Si: 0,063÷0,002 mm	7,9	22,3	15,1
— iłowa Cl: < 0,002 mm	0,2	0,9	0,6
Nazwa wg [6]	siSa	siSa	siSa
	Piasek pylasty		
Zawartość cząstek [%]:			
≤ 0,075 mm	11,0	26,0	18,5
≤ 0,02 mm	3,0	9,0	6,0
Wskaźnik jednorodności uziarnienia C_U [—]	4,6	10,4	7,5
Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	30,0	31,2	30,6
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} [g·cm ⁻³]	1,258	1,268	1,263
Gęstość właściwa szkieletu ρ_s [g·cm ⁻³]	2,47	2,49	2,48
Kapilarność bierna H_{kb} [m]	0,46	0,42	0,44
Wskaźnik piaskowy WP [%]	47,7	49,6	48,6

3.2. Wytrzymałość na ścinanie

Analizując zmiany naprężeń stycznych w trakcie ścinania próbek stwierdzono, że zagęszczenie wpływało na charakter ścięcia. Przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90$ ścięcie miało charakter plastyczny — wraz ze wzrostem odkształcenia próbek naprężenia styczne zwiększały się. Dlatego dla tych próbek przyjęto kryterium odpowiadające wartości naprę-

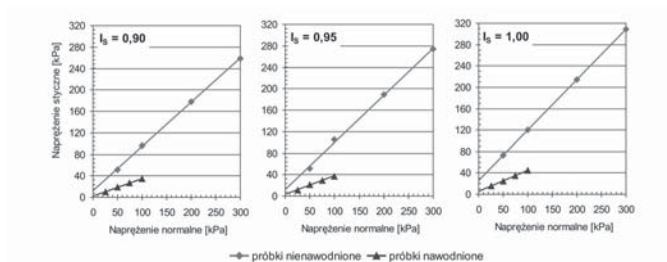
żeń stycznych przy odkształceniu próbki $\varepsilon_i = 10\%$ (rys. 1). Natomiast przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$ i $1,00$ uzyskano kruche ścinanie próbek i dlatego przyjęto kryterium odpowiadające maksymalnej wartości naprężeń stycznych — $\max \tau_f$ (rys. 1). Wartość tę uzyskiwano w początkowej fazie ścinania w zakresie od około 1 do 3% odkształcenia próbki. Po uzyskaniu wartości maksymalnego naprężenia styczne malały lub następowała ich stabilizacja. Należy podkreślić, że charakter ścinania próbek był podobny zarówno w przypadku próbek o wilgotności optymalnej (nienawodnionych) jak i nawodnionych.



Rys. 1. Zmiany naprężeń stycznych w trakcie ścinania próbek nienawodnionych i nawodnionych o różnym zagęszczeniu

Wraz ze wzrostem zagęszczenia próbek wartości naprężeń stycznych zwiększały się. Najwyższe wartości uzyskano przy $I_s = 1,00$, a najniższe przy $I_s = 0,90$ zarówno dla próbek o nienawodnionych jak i nawodnionych (rys. 2). Nawodnienie spowodowało co najmniej 2-krotne zmniejszenie wartości naprężeń stycznych w stosunku do próbek nienawodnionych, przy odpowiednich wartościach naprężeń normalnych. Przy wartościach naprężeń normalnych o 50 kPa w przypadku próbek nienawodnionych naprężenia styczne wynosiły średnio od 51 do 72 kPa odpowiednio do wzrostu wskaźnika zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do $1,00$, podczas gdy w przypadku próbek nawodnionych wartości te wynosiły od 18 do 25 kPa, a zatem były nawet 3-krotnie mniejsze. Wzrost naprężeń normalnych do 100 kPa spowodował zwiększenie naprężeń stycznych i w przypadku próbek nienawodnionych wynosiły one od 96 do 120 kPa, a w badaniach próbek nawodnionych od 35 do 45 kPa, odpowiednio do wzrostu zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do $1,00$.

Uzyskana wytrzymałość na ścinanie znalazła swoje odzwierciedlenie w wartościach kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono dla obydwu kryteriów ścinania (tabela 2).



Rys. 2. Zależność naprężeń stycznych od naprężeń normalnych próbek nienawodnionych i nawodnionych o różnym zagęszczeniu

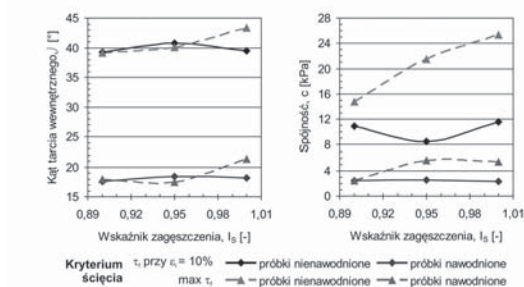
TABELA 2

Wartości kąta tarcia wewnętrznego (ϕ) i spójności (c) badanej mieszaniny popiołowo-żużlowej

Wskaźnik zagęszczenia I_s [—]	Kryterium ścięcia							
	$\max \tau_{\max}$				τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$			
	ϕ [°]		c [kPa]		ϕ [°]		c [kPa]	
	dla próbki	średnia	dla próbki	średnia	dla próbki	średnia	dla próbki	średnia
próbki nienawodnione								
0,90	39,3	39,1	13,8	14,8	39,2	39,2	10,9	10,9
	38,9		15,7		39,2		10,8	
0,95	41,1	40,1	19,1	21,5	40,5	40,8	10,4	8,5
	39,0		23,4		41,1		6,5	
1,00	43,2	43,4	22,3	25,3	39,9	39,5	9,5	11,6
	43,6		28,3		39,2		13,7	
próbki nawodnione								
0,90	17,4	18,0	2,7	2,4	18,3	17,6	3,0	2,4
	18,6		2,1		16,9		1,8	
0,95	18,0	17,5	6,2	5,6	19,2	18,4	3,0	2,5
	17,0		5,0		17,6		2,0	
1,00	21,5	21,4	4,7	5,4	18,6	18,2	2,9	2,3
	21,3		6,1		17,8		1,6	

W przypadku próbek nienawodnionych wpływ zagęszczenia i przyjętego kryterium ścięcia na wartości kąta tarcia wewnętrznego był niewielki. Dla kryterium ścięcia $\max \tau_f$ zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego wyniosło od 39 do 43°, a dla kryterium τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$ od 39 do 41° — wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00 (rys. 3). Natomiast wartości spójności zwiększyły się od około 15 do 25 kPa dla kryterium ścięcia $\max \tau_f$ oraz od 8 do 12 kPa dla kryterium ścięcia τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$ wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia.

W przypadku próbek nawodnionych obserwowano również niewielki wpływ zagęszczenia na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie. W przypadku kąta tarcia wewnętrznego i kryterium ścicia $\max \tau_f$ było to zwiększenie od 18 do 21° odpowiednio do wzrostu wskaźnika zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 1,00, a dla kryterium ścicia τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$ kąt tarcia wewnętrznego wynosił około 18° (rys. 3). Wartości spójności dla kryterium ścicia $\max \tau_f$ przy wszystkich wskaźnikach zagęszczenia próbek nie przekraczała 6 kPa, a dla kryterium ścicia τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$ wynosiła średnio nieco ponad 2 kPa.



Rys. 3. Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na parametry wytrzymałościowe badanej mieszanki popiołowo-żużlowej

Porównując uzyskane parametry wytrzymałości na ścinanie dla obydwu kryteriów ścicia stwierdzono, że w przypadku kąta tarcia wewnętrznego różnice były niewielkie i nie przekraczały 2°. W przypadku spójności, jedynie w badaniach próbek nienawodnionych i kryterium ścicia $\max \tau_f$ uzyskano wyższe wartości o około 4 do 14 kPa w stosunku do kryterium τ_f przy $\varepsilon_i = 10\%$. Natomiast w przypadku próbek nawodnionych różnice pomiędzy wartościami spójności dla obydwu kryteriów ścicia nie przekraczały 3 kPa.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że nawodnienie spowodowało znaczne zmniejszenie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej. Dlatego stosując mieszankę popiołowo-żużłową do celów budownictwa drogowego należy ją chronić przed kontaktem z wodą. Nadmiar wody powoduje zmniejszenie sił kontaktowych i w konsekwencji istotne zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie.

3.3. Stateczność skarp nasypu

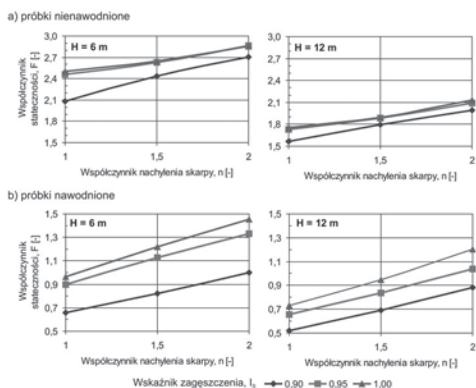
Wyniki obliczeń współczynnika stateczności wskazują, że skarpy nasypu z przedmiotowej mieszanki o wilgotności optymalnej będą stateczne zarówno o wysokości 6 jak i 12 m przy przyjętych wskaźnikach zagęszczenia. Dla nasypu o wysokości 6 m i przyjętych nachyleń skarpy uzyskano wyższe o około 0,74 wartości współczynnika stateczności w stosunku do nasypu o wysokości 12 m.

Wyniki obliczeń współczynnika stateczności skarp nasypu z mieszanki o parametrach wytrzymałościowych uzyskanych dla próbek o wilgotności optymalnej wskazują, że będą one stateczne zarówno przy wysokości 6 jak i 12 m dla przyjętych wskaźników zagęszczenia

nia. Dla nasypu o wysokości 6 m wartości współczynnika stateczności były wyższe średnio o około 0,74 w stosunku do nasypu o wysokości 12 m dla zastosowanych nachyleń skarp.

Wzrost wskaźnika zagęszczenia mieszaniny w nasypie spowodował zwiększenie współczynnika stateczności. W przypadku nasypu o wysokości 6 m zwiększenie to wynosiło 0,15 dla nachylenia skarpy 1:2 i 0,42 dla nachylenia 1:1, natomiast dla nasypu o wysokości 12 m — 0,32 dla nachylenia skarpy 1:1 i 0,45 dla nachylenia 1:2.

Znacznie większy wpływ na wartości współczynnika stateczności miało nachylenie skarp. Wraz z jego zmniejszeniem od 1:1 do 1:2 współczynnik stateczności dla nasypu o wysokości 6 m zwiększył się o 0,36 dla $I_s = 0,90$ i o 0,63 dla $I_s = 1,00$, a dla nasypu o wysokości 12 m — zwiększył się o 0,34 i o 0,49 wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00.



Rys. 4. Wpływ nachylenia skarpy i zagęszczenia na wartości współczynnika stateczności skarp nasypu z mieszaniny popiołowo-żużlowej

Wyniki obliczeń współczynnika stateczności skarp nasypów z mieszaniny o parametrach wytrzymałościowych uzyskanych dla próbek nawodnionych wskazują, że będą one stateczne jedynie dla skarpy o nachyleniu 1:2 nasypu o wysokości 6 m. Natomiast dla pozostałych nachyleń skarp nasypów zarówno o wysokości 6 jak i 12 m obliczenia wskazują, że będą one niestateczne. Uzyskane wartości są znacznie poniżej dopuszczalnej wartości współczynnika stateczności to jest 1,3. Również w tym przypadku wyższe wartości współczynnika stateczności o około 0,22 uzyskano dla nasypu o wysokości 6 m w stosunku do nasypu o wysokości 12 m. Wzrost wskaźnika zagęszczenia mieszaniny w nasypie spowodował zwiększenie współczynnika stateczności o około 0,14 dla nasypu o wysokości 6 m. Natomiast dla nasypu o wysokości 12 m było to zwiększenie o 0,21 i o 0,32 odpowiednio do zmniejszenia nachylenia skarpy od 1:1 do 1:2.

Zmniejszenie nachylenia skarpy spowodowało zwiększenie współczynnika stateczności i tak dla nasypu o wysokości 6 m średnio o 0,39, a dla nasypu o wysokości 12 m średnio o 0,41 (rys. 4).

Porównując wyniki obliczenia współczynnika stateczności skarp nasypów należy wskazać na istotny wpływ nawodnienia mieszaniny na jego wartości. Wartości tego współczyn-

nika były 2 do 3-krotnie większe przy uwzględnieniu parametrów wytrzymałościowych dla mieszaniny o wilgotności optymalnej niż dla mieszaniny nawodnionej.

4. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań mieszaniny popiołowo-żuźłowej z Elektrowni „Skawina” oraz obliczeń stateczności nasypu z niej wykonanego można stwierdzić, że:

- 1) Badana mieszanina charakteryzuje się dużymi wartościami parametrów wytrzymałości na ścinanie, wykazując niewielką zależność od zagęszczenia.
- 2) Stwierdzono, że nawodnienie mieszaniny powoduje zmniejszenie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie. Wartości kąta tarcia wewnętrznego mieszaniny nawodnionej były co najmniej 2-krotnie, spójności nawet 6-krotnie mniejsze niż dla mieszaniny przy wilgotności optymalnej.
- 3) Obliczenia stateczności skarp nasypów wykonanych z przedmiotowej mieszaniny wykazały, że będą one stateczne w przypadku przyjęcia parametrów wytrzymałości na ścinanie próbek o wilgotności optymalnej oraz, że będą nie stateczne w przypadku przyjęcia parametrów wytrzymałości na ścinanie próbek nawodnionych.
- 4) Uzyskane wyniki badań parametrów wytrzymałościowych i obliczeń stateczności skarp nasypów potwierdzają wysoką przydatność badanej mieszaniny popiołowo-żuźłowej do celów budownictwa ziemnego, pod warunkiem izolowania go od wody.

LITERATURA

- [1] *Gruchot A.*: Wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żuźłowej z Elektrowni „Skawina” w zależności od przyjętego kryterium zniszczenia. UR w Krakowie, 2010 (maszynopis)
- [2] *Gruchot A., Zawisza E.*: Badania parametrów geotechnicznych wybranych odpadów przemysłowych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego. *Przegląd Górniczy*, 10, 2007, s. 26–32
- [3] *Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych*. Wydawnictwo IBDIM, Warszawa, 2001
- [4] *Kuźniewski J., Licznar P.*: Odpady przemysłowe — nowe cenne materiały. *Ekotechnika. Kwartalnik Techniki w Ochronie Środowiska*. Wydawnictwo Lektorium, 4/8, 1998, s. 26–27
- [5] *Szydło A.*: Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żuźłowych z Elektrociepłowni „Wrocław” w budownictwie drogowym. X Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja „Popioły z Energetyki”, 2003, Warszawa, s. 181–199
- [6] *Wiłun Z.*: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007
- [7] PN-EN ISO 14688:2006. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis*. PKN. Warszawa