



ANDRZEJ GRUCHOT

Uniwersytet Rolniczy
w Krakowie
rmgrucho@cyf-kr.edu.pl

Wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żuźłowej w zależności od przyjętego kryterium zniszczenia

Mieszanki popiołowo-żuźłowe są odpadami powstającymi w wyniku spalania węgla w kotłach paleniskowych elektrowni i elektrociepłowni.

Jako materiał o znacznie większym zakresie uziarnienia w stosunku do popiołów lotnych osadzanych na elektrofiltrach są transportowane metodami hydraulicznymi na składowisko i tam składowane. Zgodnie z dyrektywami Unii Europejskiej „producent” odpadów jest zobowiązany do wskazania odpowiedniej metody ich wykorzystania. Dlatego ważnym staje się problem ich utylizacji np. poprzez zastosowanie ich do celów budownictwa komunikacyjnego. Obowiązujące normatywy wskazują na możliwość ich wykorzystania z pewnymi zastrzeżeniami, które odnoszą się do odizolowania ich od wpływu wody. Właściwe wykorzystanie mieszanin wymaga każdorazowo rozpoznania ich właściwości geotechnicznych decydujących o stateczności czy też nośności obiektu lub podłoża wykonanego z tego typu materiału odpadowego. Wynika to z jakości i pochodzenia spalanego węgla. Przeprowadzone badania [1], [2], [3], [4], [5] wskazują na dość istotne różnicowanie parametrów geotechnicznych odpadów paleniskowych zdeponowanych na składowiskach.

Cel i metody badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu przyjętego kryterium zniszczenia na wartości wytrzymałości na ścinanie mieszaniny popiołowo-żuźłowej pobranej z osadnika Elektrowni „Skawina”.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczenia oznaczono zgodnie z normą [PN-B-04481:1988]. Skład uziarnienia oznaczono metodą sitową (dla $d \geq 0,063$ mm) oraz areometryczną (dla $d < 0,063$ mm). Gęstość właściwą oznaczono 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 $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. 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 standardowym aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach $120 \times 120 \times 77$ mm, z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o wysokości 10 mm. Do badań wykorzystano materiał o uziarnieniu poniżej 10 mm (rys. 1) zakładając, że średnica maksymalnego ziarna będzie odpowiadać wysokości strefy ścinania. Próbkę formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy jednakowej wilgotności zbliżonej do optymalnej (tab. 1) i trzech wskaźnikach zagęszcze-

nia: $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Przed ścięciem, w celu wyrównania ciśnienia wody w porach, próbki poddano obciążeniu w zakresie od 100–400 kPa przez 30 minut, a następnie ścinano przy prędkości $1,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próby.

Podstawowymi wadami aparatu bezpośredniego ścinania jest brak kontroli ciśnienia porowego, niejednorodny stan naprężenia i odkształcenia w trakcie badania oraz zmieniająca się w procesie ścinania powierzchnia ścięcia. Zakładając jednak, że w prezentowanych badaniach mamy do czynienia ze strefą ścięcia o wysokości 10 mm, co stanowi około 13% wysokości próbki, zmiany powierzchni ścięcia nie powinny w znaczący sposób wpływać na uzyskiwane wyniki. W związku z tym obliczenia naprężeń stycznych (τ) warunkujących wytrzymałość na ścinanie (τ_c) przeprowadzono zgodnie z zaleceniami polskiej normy [6] z uwzględnieniem tzw. poprawki na przesuw skrzynki oraz zgodnie z normą brytyjską [7], która nie wskazuje na konieczność stosowania tej poprawki. Do obliczeń naprężeń stycznych (τ) wykorzystano równania:

a) z poprawką na przesuw

$$\tau = \frac{Q}{a \cdot (a - \varepsilon_h)} \quad (1)$$

b) bez poprawki na przesuw

$$\tau = \frac{Q}{a^2} \quad (2)$$

gdzie:

Q – siła ścinająca powodująca przesuw skrzynki w [kN],

a – długość boku próbki w [mm] przy $\varepsilon_h = 0\%$,

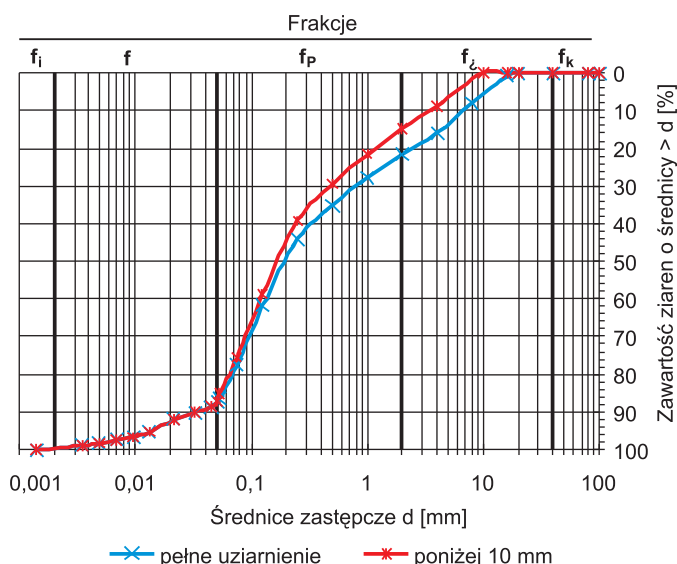
ε_h – przesunięcie skrzynki aparatu w momencie uzyskania siły Q w [mm].

Właściwy opis zjawiska wytrzymałości na ścinanie gruntów i w konsekwencji parametrów wytrzymałościowych wiąże się z przyjęciem warunków definiujących stan zniszczenia próbki, a więc kryterium zniszczenia (ścięcia). W badaniach, w aparacie bezpośredniego ścinania najczęściej jest to kryterium dotyczące stanu odkształcenia – przyjmuje się pewną graniczną wartość tego odkształcenia lub stanu naprężenia – osiągnięcie przez nie wartości maksymalnej. Dlatego w pracy przedstawiono analizę wyników wytrzymałości na ścinanie, a następnie parametrów wytrzymałościowych uzyskanych przy zastosowaniu kryterium ścięcia odpowiadającemu wartości naprężeń stycznych przy 10% odkształceniu próbki lub maksymalnej wartości naprężeń stycznych.

Wyniki badań i ich analiza

Właściwości fizyczne

W składzie uziarnienia badanej mieszaniny popiołowo-żuźłowej dominowała frakcja piaskowa (blisko 66% dla materiału



Rys. 1. Krzywe uziarnienia mieszanki popiołowo-żużlowej

wyjściowego oraz około 72% dla materiału o uziarnieniu poniżej 10 mm). Zawartość frakcji żwirowej w materiale wyjściowym wynosiła ponad 21% oraz 15% dla materiału o uziarnieniu poniżej 10 mm. Frakcji pyłowej było ponad 12%, natomiast udział frakcji ilowej był znikomy – zarówno w materiale o uziarnieniu pełnym, jak i poniżej 10 mm (rys. 1). Według nomenklatury geotechnicznej uziarnienie mieszanki odpowiadało różnoziarnistym pospółkom (tab. 1). Gęstość właściwa szkieletu wynosiła $2,50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Wilgotność optymalna mieszanki popiołowo-żużlowej wynosiła blisko 26%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu $1,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (tab. 1).

Tabela 1. Podstawowe właściwości geotechniczne mieszanki popiołowo-żużlowej

Parametr	Zakres uziarnienia	
	Pełne	d < 10 mm
Zawartość frakcji [%]:		
– żwirowa 40÷2 mm	21,6	15
– piaskowa 2,0÷0,05 mm	65,8	72,3
– pyłowa 0,05÷0,002 mm	12,6	12,6
– ilowa < 0,002 mm	0,1	0,1
Wskaźnik różnoziarnistości [-]	10,6	7,0
Nazwa wg [8]	Pospółka	
Zawartość cząstek [%]	≤ 0,075 mm	22,5
	≤ 0,02 mm	7,5
Gęstość właściwa szkieletu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,50	–
Kapilarność bierna [cm]	20,3	–
Wskaźnik piaskowy [%]	46,9	–
Wilgotność optymalna [%]	25,90	–
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,35	–

Badaną mieszaninę pod względem wysadzinowości można zaliczyć do gruntów wątpliwych, ponieważ zawartość cząstek mniejszych od 0,075 mm wynosiła 22,5%, cząstek mniejszych od 0,02 mm – 7,5% [PN-S-02205:1998]. Należy jednak zaznaczyć, że wskaźnik piaskowy o wartości około 47% i niewielka kapilarność bierna – około 20 cm, charakteryzuje grunty niewysadzinowe.

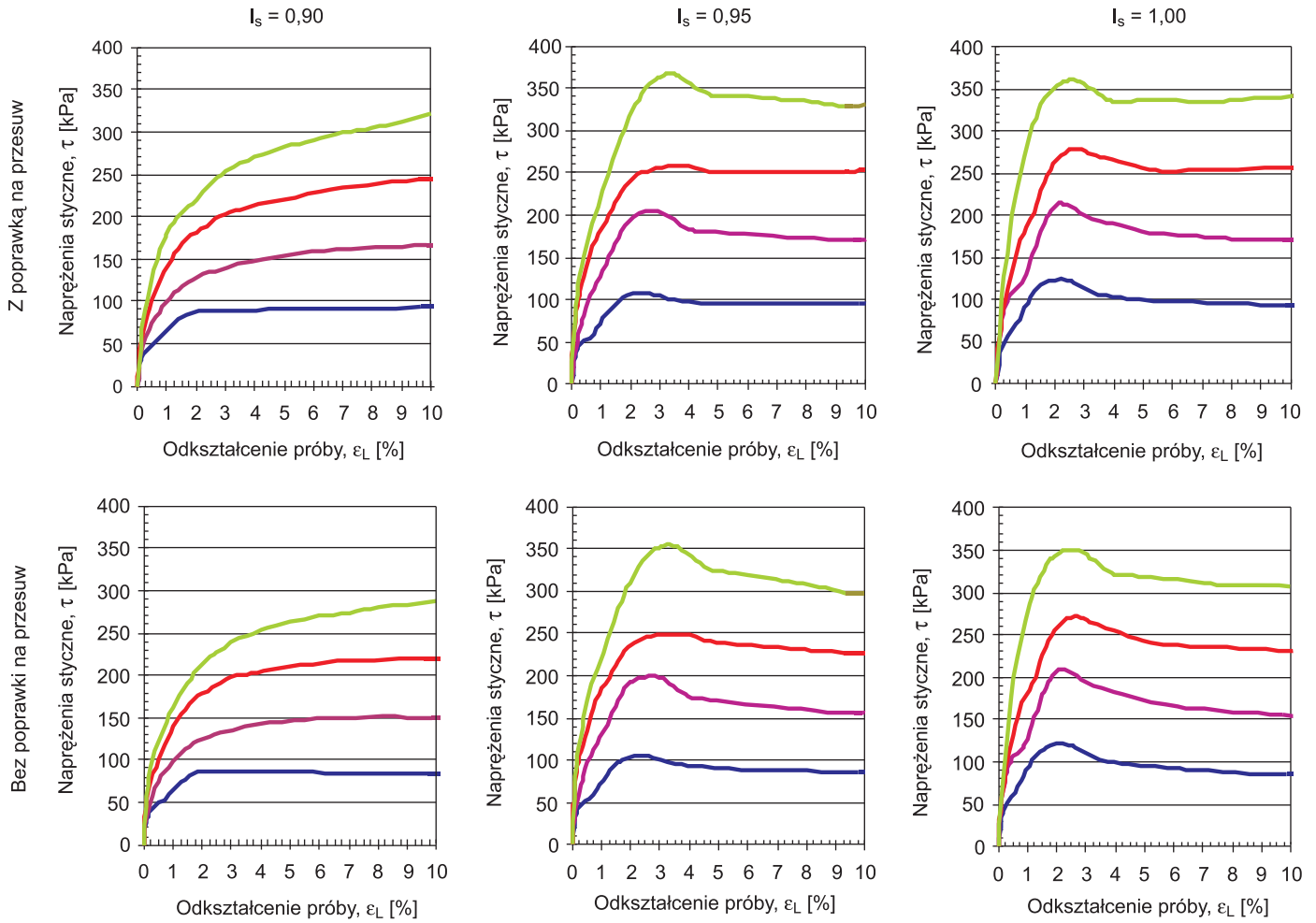
Wytrzymałość na ścinanie

Analizując zmiany naprężeń stycznych w trakcie ścinania próbek można stwierdzić, że zagęszczenie próbek wpływa na charakter ich ścicia. Przy zagęszczeniu odpowiadającemu $I_s = 0,90$ ścicie miało charakter plastyczny i dlatego przyjęto, że właściwym kryterium ścicia była wartość naprężeń stycznych przy odkształceniu próbki $\varepsilon_i = 10\%$ (rys. 2). Natomiast przy zagęszczeniu odpowiadającemu $I_s = 0,95$ i 1,00 uzyskano ścicie kruche próbek i dlatego przyjęto, że odpowiednim kryterium ścicia będzie wartość maksymalnych naprężeń stycznych – $\max \tau$.

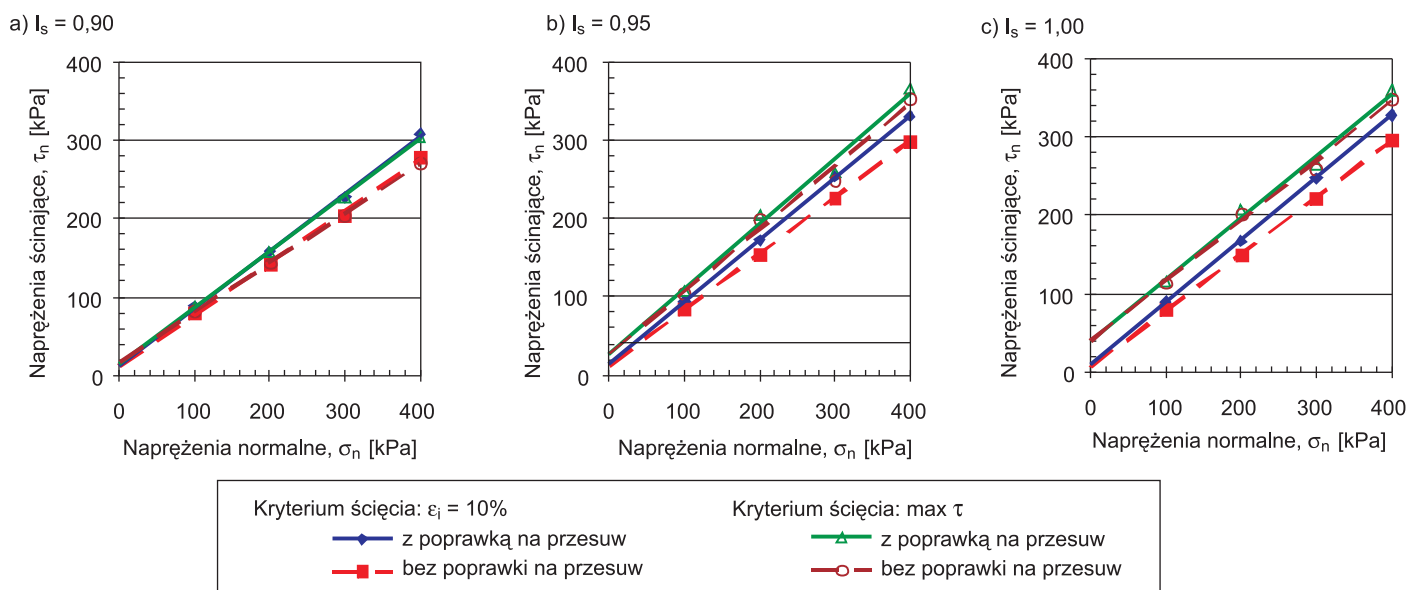
Należy zaznaczyć, że w przypadku wystąpienia ścicia kruchego (zagęszczenie odpowiadające $I_s = 0,95$ i 1,00) wartości maksymalnych naprężeń stycznych uzyskiwano w początkowej fazie ścinania próbek. W zależności od wielkości naprężeń normalnych zakres odkształcenia wahał się w przedziale od około 2 do 4% dla obydwu metod obliczeniowych. Po uzyskaniu wartości maksymalnej naprężenia styczne generalnie malały, przy czym w przypadku metody uwzględniającej poprawkę na przesuw pod koniec ścinania następowała ich stabilizacja. W metodzie nie uwzględniającej poprawki na przesuw po osiągnięciu wartości maksymalnej następowało zmniejszanie się naprężeń stycznych.

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy wytrzymałości na ścinanie badanej mieszanki popiołowo-żużlowej oznaczonej z uwzględnieniem poprawki na przesuw skrzynki i bez niej, dla obydwu kryteriów ścicia. Ogólnie można stwierdzić, że wytrzymałość na ścinanie uzyskana z metody obliczeniowej uwzględniającej przesuw skrzynki była nieznacznie większa od uzyskanej w przypadku nieuwzględnienia przesuwu skrzynki aparatu. W przypadku kryterium ścicia odpowiadającego odkształceniu próbki 10% różnica ta wzrosła wraz ze zwiększaniem naprężeń normalnych. Różnice pomiędzy wartościami wytrzymałości na ścinanie otrzymanymi z obydwu metod odpowiednio do zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00 wynoszą od około 8 do 10 kPa dla naprężeń normalnych wynoszących 100 kPa oraz od około 29 do 34 kPa dla naprężeń wynoszących 400 kPa. Natomiast dla kryterium $\max \tau$ różnice pomiędzy obydwo metodami nie były duże. Dla próbek ścinanych przy zagęszczeniu $I_s = 0,95$ i 1,00 różnice te nie przekraczały 15 kPa przy naprężeniach normalnych wynoszących 400 kPa oraz były pomijalnie małe przy naprężeniach wynoszących 100 kPa.

Podsumowując należy podkreślić, że właściwe ustalenie kryterium ścicia powinno być przeprowadzone w odniesieniu do rodzaju badanego materiału, celu jego wykorzystania, jak również po dokładnej analizie uzyskanych wartości naprężeń stycznych.



Rys. 2. Zmiany naprężeń stycznych w trakcie ścinania próbek w zależności od naprężeń normalnych i metody obliczeniowej



Rys. 3. Wytrzymałość na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej uzyskana na podstawie zastosowanych metod obliczeniowych

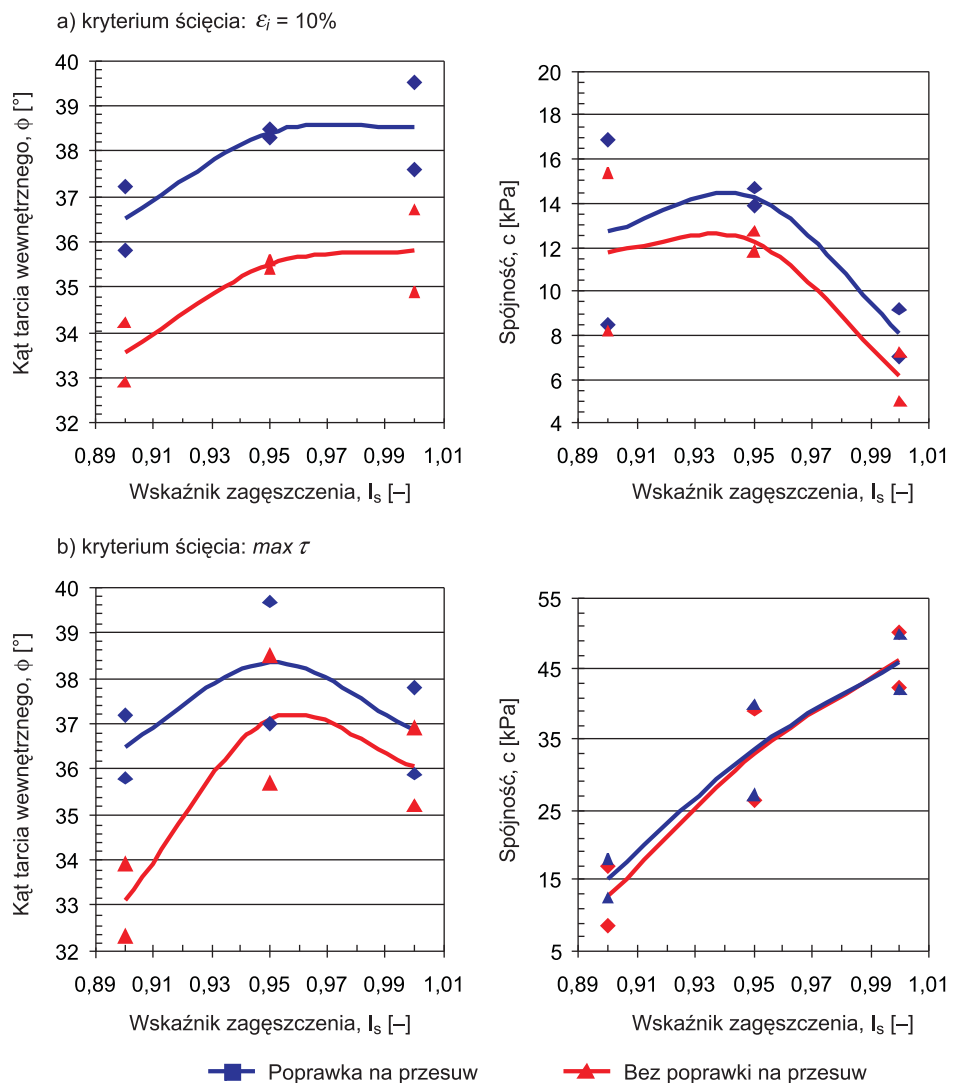
Tabela 2. Parametry wytrzymałości na ścinanie mieszanki popiołowo-żuźlowej

Wskaźnik zagęszczenia, I_s [-]	Zastosowana metoda obliczeniowa							
	Z poprawką na przesuw				Bez poprawki na przesuw			
	Kąt tarcia wewnętrznego, ϕ [°]		Spójność, c [kPa]		Kąt tarcia wewnętrznego, ϕ [°]		Spójność, c [kPa]	
	badanie	średnia	badanie	średnia	badanie	średnia	badanie	średnia
Kryterium ścicia: $\varepsilon_i = 10\%$								
0,90	35,8	36,5	8,5	12,7	32,9	33,6	8,2	11,8
	37,2		16,9		34,2		15,4	
0,95	38,5	38,4	13,9	14,3	35,6	35,5	11,8	12,3
	38,3		14,7		35,4		12,7	
1,00	39,5	38,6	9,2	8,1	36,7	35,8	7,2	6,1
	37,6		7,0		34,9		5,0	
Kryterium ścicia: $\max \tau$								
0,90	35,8	36,5	8,5	12,7	32,3	33,1	12,5	15,3
	37,2		16,9		33,9		18,0	
0,95	37,0	38,4	39,2	32,9	35,7	37,1	40,0	33,6
	39,7		26,5		38,5		27,1	
1,00	37,8	36,9	50,2	46,3	36,9	36,1	49,9	46,0
	35,9		42,3		35,2		42,1	

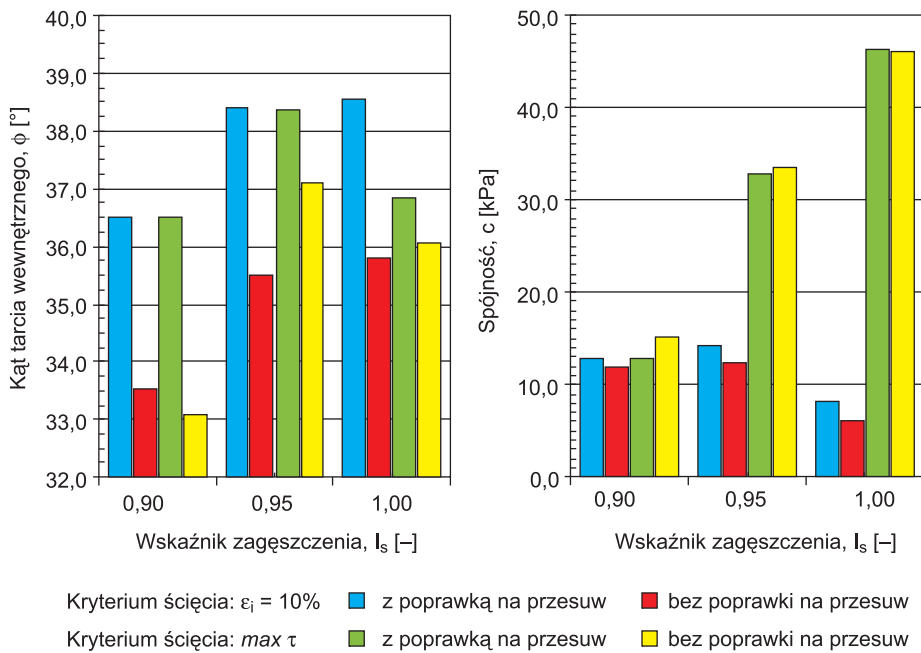
Kąt tarcia wewnętrznego i spójność

Uzyskane duże wartości wytrzymałości na ścinanie znalazły swoje odzwierciedlenie w wysokich wartościach kąta tarcia wewnętrznego i spójności badanej mieszanki popiołowo-żuźlowej (tab. 2).

W przypadku przyjęcia kryterium ścicia $\varepsilon_i = 10\%$ należy podkreślić niewielki wpływ zagęszczenia na uzyskiwane wartości parametrów wytrzymałościowych (rys. 4a). Wartości kąta tarcia wewnętrznego wahały się w przedziale od 36,5 do 38,6° odpowiednio do wzrostu zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00 (rys. 4). Natomiast wartości spójności zmniejszały się od 12,7 do 8,1 kPa wraz ze wzrostem zagęszczenia próbek. Przedstawione zmiany odnoszą się do metody obliczeniowej uwzględniającej poprawkę na przesuw skrzynki. W metodzie nie uwzględniającej poprawki na przesuw wartości kąta tarcia wewnętrznego wahały się w przedziale od 33,6 do 35,8°, a spójności od 11,8 do 6,1 kPa odpowiednio do wzrostu zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00. Różnice pomiędzy obydwoema metodami były nieznaczne i nie przekraczały 3° w przypadku kąta tarcia wewnętrznego i 2 kPa w przypadku spójności. Dlatego można stwierdzić, że obydwie metody pozwalają uzyskać podobne parametry wytrzymałości na ścinanie.



Rys. 4. Zależność parametrów wytrzymałości na ścinanie mieszanki popiołowo-żuźlowej od zagęszczenia dla zastosowanych kryteriów ścicia



Rys. 5. Porównanie wartości parametrów wytrzymałościowych mieszanki popiołowo-żużlowej uzyskanych przy zastosowanych kryteriach ścięcia i metodach obliczeniowych

Dla kryterium ścięcia odpowiadającemu wartości maksymalnej naprężeń stycznych ($max \tau$) wartości kąta tarcia wewnętrznego wraz ze wzrostem zagęszczenia zwiększały się również w niewielkim zakresie – od 36,5 do 38,4° z uwzględnieniem poprawki na przesuw skrzynki oraz od 33,1 do 36,1° bez poprawki (rys. 4b). Uzyskane zakresy wartości pozwalają stwierdzić, że różnice pomiędzy obydwiema metodami obliczeniowymi były niewielkie i maksymalnie wynosiły nieco ponad 3°. Wartości najwyższe kąta tarcia wewnętrznego uzyskano dla zagęszczenia odpowiadającego $I_s = 0,95$.

W stosunku do poprzedniego kryterium ścięcia wartości spójności wraz ze wzrostem zagęszczenia zwiększyły się ponad 3-krotnie. Uzyskane wartości spójności dla obydwu metod obliczeniowych wahały się w przedziale od 12,7 do 46,3 kPa przy braku istotnych różnic pomiędzy metodami. Te pomijalnie małe różnice w wartościach spójności pomiędzy metodami obliczeniowymi spowodowane były niewielką wartością poprawki na przesuw skrzynki, ponieważ jak już to wykazano wcześniej, wartości maksymalne naprężeń stycznych uzyskano przy odkształceniu próbek do 4%.

Porównując wartości parametrów wytrzymałościowych uzyskane z obydwu kryteriów ścięcia można stwierdzić, że w przypadku kąta tarcia wewnętrznego są to różnice nie przekraczające 2° (rys. 5). Również różnice w wartościach analizowanego parametru pomiędzy metodami obliczeniowymi dla danego kryterium są niewielkie i nie przekraczają 4°. Znacznie większe różnice obserwuje się w przypadku spójności i tak przy zastosowaniu kryterium $max \tau$ i zagęszczenia odpowiadającemu $I_s = 0,95$ jest to 2-krotne, a w przypadku $I_s = 1,00$ ponad 3-krotne jej zwiększenie w stosunku do wartości uzyskanych dla kryterium ścięcia $\varepsilon_i = 10\%$. Porównując wartości spójności uzyskane z obydwu metod obliczeniowych można stwierdzić – tak jak w przypadku kąta tarcia wewnętrznego – niewielki zakres tych zmian nie przekraczający 3 kPa.

Podsumowanie

Na podstawie nomenklatury geotechnicznej można stwierdzić, że mieszanka popiołowo-żużlowa z Elektrowni „Skawina” odpowiada różnoziarnistym pospółkom. Skład uziarnienia pozwala zaliczyć badaną mieszaninę do gruntów wątpliwych pod względem wysadzinowości. Natomiast uzyskane wartości wytrzymałości na ścinanie pozwalają prognozować wysoką stateczność nasyków wykonanych z analizowanej mieszanki oraz dużą ich nośność.

Analizując wytrzymałość na ścinanie uzyskaną w oparciu o zastosowane kryteria ścięcia można stwierdzić, że dla kryterium odkształceniowego uzyskano mniejsze jej wartości. Jest to związane ze znacznie mniejszymi wartościami spójności uzyskanymi dla tego kryterium, przy prawie niezmienionej wartości kąta tarcia wewnętrznego w stosunku do kryterium odpowiadającemu maksymalnym naprężeniom stycznym.

Można przyjąć, że wysokie wartości spójności były spowodowane oporami zazębienia powstającymi w trakcie ścinania, które zanikały w momencie zniszczenia ziaren na skutek ich miażdżenia bądź wygładzenia powierzchni na kontakcie pomiędzy nimi.

Zastosowane metody obliczeń naprężeń stycznych (ścinających) w niewielkim stopniu wpłynęły na uzyskiwane wartości parametrów wytrzymałościowych w przypadku ścinania w skrzynce z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania. Dlatego stosowanie poprawki na przesuw skrzynki wydaje się nie być konieczne. W przypadku ścinania próbek w skrzynce bez ramek pośrednich po wytworzonej płaszczyźnie ścinania różnice te mogą być znaczne i wówczas zastosowanie poprawki na przesuw może być słuszne.

Bibliografia

- [1] Gruchot A.T.: *Charakterystyka geotechniczna wybranych odpadów poenergetycznych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego*. Materiały XV Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Wydawnictwa Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2009, 253–258
- [2] Gruchot A.T., Zawisza E.: *Zagęszczalność a nośność wybranych odpadów powęglowych i pohnicznych*. Przegląd Górniczy 11, 2007, 26–30
- [3] Plewa F., Pierzyna P., Piontek P.: *Wpływ rodzaju odpadów poenergetycznych na właściwości mechaniczne mieszanin kompozytowych stosowanych w różnych środowiskach górnictwa podziemnego*. Polityka Energetyczna, 2007, zeszyt 2, 403–416
- [4] Zawisza E., Kłęk K.: *Stabilizacja popiołów spoiwami „Silment” w drogownictwie*. Drogownictwo 12, 2006, 396–401
- [5] Zawisza E., Gruchot A., Michalski P.: *Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie*. Inż. Morska i Geotechnika 27, 2006, 1, 22–30
- [6] PN-B-04481:1988. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu
- [7] BS 1377:1990. Part 8. Soils for civil engineering purposes. Shear strength test (total stress). British Standards Institution London
- [8] PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania ■