



EUGENIUSZ ZAWISZA

Uniwersytet Rolniczy
w Krakowie



MARCIN LIS

Uniwersytet Rolniczy
w Krakowie

Wpływ nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie odpadów powęglowych i ich mieszanek z popiołami lotnymi

Górnictwo i energetyka to jedne z głównych gałęzi przemysłu ciężkiego w Polsce. Popyt na węgiel kamienny powoduje jego duże wydobycie, które generuje powstawanie znacznych ilości odpadów, głównie w postaci tzw. skały płonnej. Spalanie węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach powoduje powstawanie ubocznych produktów w postaci mieszanin popiołowo-żużlowych i popiołów lotnych [5]. Najpopular-

niejszym sposobem unieszkodliwiania odpadów powęglowych i poenergetycznych jest ich składowanie na hałdach lub w różnych wyrobiskach. Niesie to ze sobą konsekwencje w postaci obciążenia środowiska naturalnego.

W Polsce istnieje duże zapotrzebowanie na materiały do budowy różnego rodzaju nasypów, zarówno w obiektach infrastruktury transportu, jak i hydrotechnicznych. Do tego celu mogą być zastosowane odpady przemysłowe [1, 2, 3]. Z powodu m.in. uciążliwości związanych z badaniami tego typu materiałów, często są one jednak dyskwalifikowane bez podejmowania prób ich wykorzystania.

Zastosowanie odpadów przemysłowych do celów budownictwa ziemnego związane jest z koniecznością określenia ich właściwości geotechnicznych. Właściwości te są zróżnicowane z powodu takich czynników jak: technologia wydobycia węgla, okres składowania, różna podatność na procesy wietrzenia oraz dezintegracji mechanicznej. Z tych powodów każdorazowo należy określić parametry fizyczne i mechaniczne materiałów odpadowych traktowanych jako antropogeniczne grunty budowlane [6, 7, 9, 10]. Dotyczy to w szczególności parametrów charakteryzujących ich skład granulometryczny, zagęszczalność oraz wytrzymałość na ścinanie, od której zależy stateczność i nośność budowli ziemnych formowanych z tego typu materiałów.

Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie wybranych odpadów powęglowych, popiołów lotnych oraz ich mieszanek. Do badań wykorzystano nieprzepsalone odpady powęglowe (5-letnie) z hałdy kopalni Rydułtowy-Anna o uziarnieniu mniejszym od 40 mm, popioły lotne pobrane z elektrowni Skawina S.A. oraz mieszanek odpadów powęglowych z dodatkiem 10, 20 i 30%

popiołów (wagowo). Do scharakteryzowania podstawowych właściwości fizycznych badanych materiałów oznaczono ich skład granulometryczny, gęstość właściwą szkieletu, wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu.

Skład granulometryczny frakcji większych od 0,063 mm oznaczono metodą sitową, a frakcji mniejszych metodą areometryczną; aby otrzymać skład granulometryczny całkowitej próbki, uzyskane z obu analiz wyniki, przeliczono odpowiednio do procentowego udziału masy obu frakcji w całkowitej masie badanej próbki danego materiału. Gęstość właściwą szkieletu frakcji mniejszej od 0,063 mm oznaczono metodą kolby miarowej w wodzie.

Maksymalną gęstość objętościową szkieletu oraz wilgotność optymalną badanych materiałów oznaczono w dwóch aparatach Proctora. Popioły lotne przebadano w aparacie standardowym o wymiarach cylindra: $d = 11,3$ cm, $h = 10$ cm i objętości $V = 0,995$ dm³. Odpady powęglowe oraz ich mieszanek z popiołami lotnymi przebadano w aparacie średniowymiarowym o wymiarach cylindra: $d = 25$ cm, $h = 20$ cm i objętości $V = 9,8$ dm³. Z przygotowanych partii poszczególnych materiałów wydzielano po 5–6 próbek, które zagęszczano przy zadanej wilgotności (jednokrotne zagęszczanie każdej próbki). W obydwu aparatach zastosowano taką samą energię zagęszczania $E_z = 0,59$ J·cm⁻³.

Do określenia wytrzymałości na ścinanie użyto dwóch aparatów bezpośredniego ścinania. Wynikało to z różnego uziarnienia badanych materiałów. W przypadku popiołów lotnych zastosowano aparat standardowy o wymiarach skrzynki $6 \times 6 \times 6$ cm. W przypadku odpadów powęglowych oraz mieszanek odpadów powęglowych z popiołami zastosowano aparat średniowymiarowy o wymiarach skrzynki $30 \times 30 \times 20$ cm.

Obydwa aparaty spełniają warunek według wzoru [4]:

$$\frac{D}{d_{\max}} \geq 4 \div 6$$

w którym:

D – bok próbki,

d_{\max} – średnica maksymalnego ziarna badanego materiału.

W celu ograniczenia tzw. spójności pozornej, wynikającej z zazębienia i klinowania się ziaren materiału podczas ścinania, w obydwu aparatach stosowano skrzynki z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości 1,0 cm w aparacie standardowym oraz 3,0 cm w aparacie średniowymiarowym.

Parametry wytrzymałościowe badanych materiałów oznaczono w warunkach nawodnienia próbek. Próbkę o wilgotności optymalnej zagęszczano w skrzynce aparatu do wartości wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$, po czym nawadniano przez 30 minut. Następnie próbki poddawano obciążeniom konsolidacyjnym o wartości odpowiednio: w aparacie standardowym 75, 100, 150 kPa, a w aparacie średniowymiarowym 110, 200, 300, 400, 500 kPa. Z poszczególnych materiałów formowano po 3 lub 5 próbek o jednokowych parametrach początkowych, które konsolidowano pod zadaniem obciążeniem. Czas konsolidacji próbek wynosił 5 minut w aparacie standardowym oraz 30 minut w aparacie średniowymiarowym. Prędkość ścinania wynosiła $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w aparacie standardowym oraz $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w aparacie średniowymiarowym. Za kryterium ścicia przyjęto wartość maksymalną siły ścinającej. Wartości parametrów wytrzymałościowych, tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności, obliczono metodą najmniejszych kwadratów według zaleceń normy [11].

Wyniki badań i ich analiza

Skład granulometryczny i gęstość właściwa szkieletu

W składzie granulometrycznym popiołów dominujący udział miała frakcja pyłowa (ponad 87% wag.) przy kilkuprocentowym udziale frakcji piaskowej i ilowej (tab. 1). Według nomenklatury geotechnicznej [12] uziarnienie popiołu lotnego odpowiada pyłom kilkufrakcyjnym. W składzie granulometrycznym odpadów powęglowych największy udział miała frakcja żwirowa (ponad 88% wag.), przy znaczącym udziale frakcji piaskowej (około 11% wag.) i mniejszym udziale frakcji pyłowej i ilowej. Uziarnienie odpadów powęglowych odpowiada żwirom kilkufrakcyjnym. W składzie granulometrycznym mieszanek odpadów powęglowych z popiołem lotnym największy udział miała frakcja żwirowa, przy znaczącym udziale frakcji piaskowej i pyłowej oraz niedużym udziale frakcji ilowej. Wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu od 10–30% wag następowo zmniejszanie zawartości frakcji żwirowej (od 76–65% wag.) i piaskowej (od około 11–9% wag.) oraz zwiększanie zawartości frakcji pyłowej (od około 11–23% wag.) i ilowej (od około 2–4% wag.). Uziarnienie mieszanek z 10 i 20% wag. dodatkiem popiołu lotnego odpowiada żwirom piaszczystym wielofrakcyjnym, a mieszanki z 30% wag. dodatkiem popiołu lotnego żwirom pylastym wielofrakcyjnym.

Największą wartość gęstości właściwej szkieletu ($2,42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) wykazały odpady powęglowe, a najmniejszą ($2,24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Tabela 1. Parametry uziarnienia badanych materiałów

Parametr	Popiół lotny [% wag.]	Odpady powęglowe [% wag.]	Mieszanki odpadów powęglowych z dodatkiem popiołu [% wag.]		
			10	20	30
Zawartość frakcji [% wag.]:					
• żwirowej (63–2 mm)	0,0	88,47	75,62	69,66	65,03
• piaskowej (2–0,063 mm)	7,33	10,82	11,30	10,96	8,55
• pyłowej (0,063–0,002 mm)	87,32	0,51	11,19	16,58	22,60
• ilowej (< 0,002 mm)	5,35	0,19	1,89	2,80	3,81
Nazwa wg normy [12]	Pył	Żwir	Żwir piaszczysty	Żwir piaszczysty	Żwir pylasty
Średnice miarodajne [mm]	d_{60}	0,05	13,00	12,00	12,5
	d_{10}	0,004	1,70	0,021	0,01
Wskaźnik różnoziarnistości [–]		11,25	619,05	1200,00	1785,71

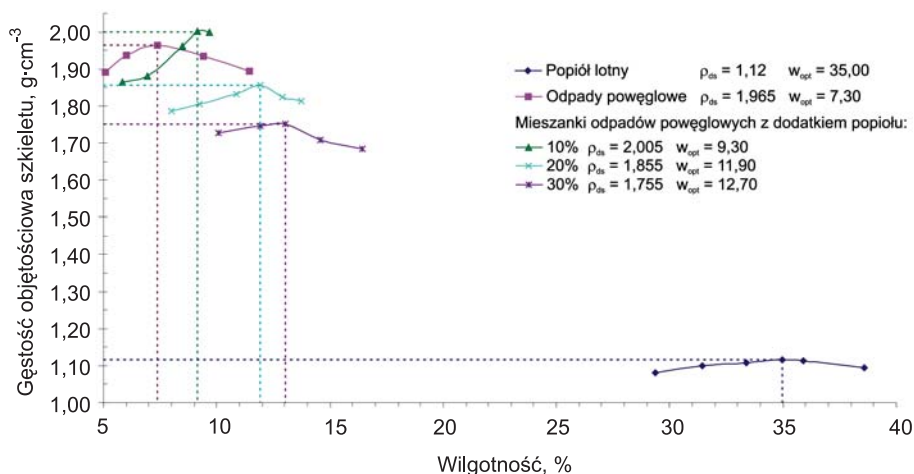
popioły lotne (tab. 2). Wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu lotnego do odpadów powęglowych gęstość właściwa malała od $2,30$ do $2,25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (tab. 2).

Tabela 2. Gęstość właściwa szkieletu badanych materiałów

Materiał	Gęstość właściwa szkieletu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]		
	oznaczona	średnia	
Popioły lotne	2,24	2,24	
	2,24		
Odpady powęglowe	2,41	2,42	
	2,43		
Mieszanki odpadów powęglowych z dodatkiem popiołu lotnego	10% wag.	2,29	2,30
		2,30	
	20% wag.	2,26	2,26
		2,26	
	30% wag.	2,26	2,25
		2,24	

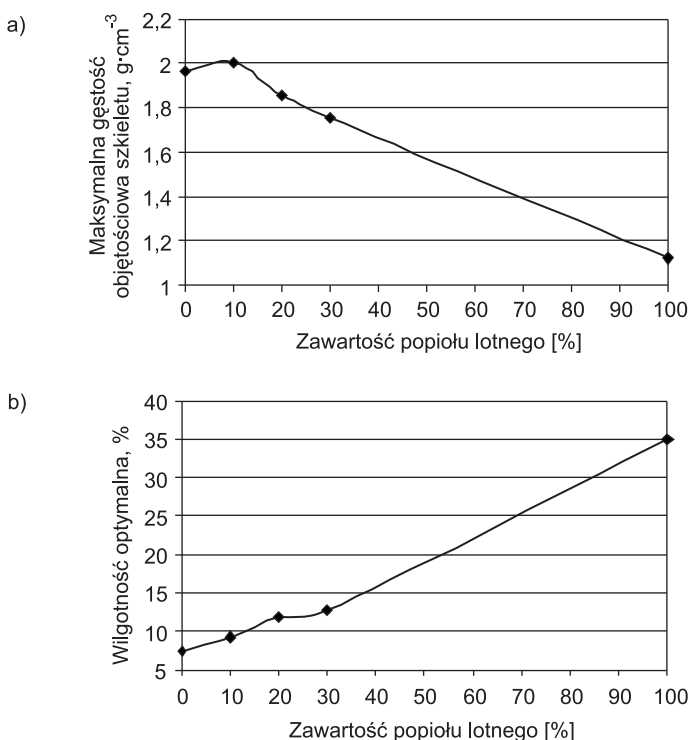
Wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu

Największą wilgotność optymalną (35% wag.) wykazał popiół lotny, natomiast najmniejszą (7,4% wag.) odpady powęglowe (rys. 1). W miarę dodawania popiołu lotnego do



Rys. 1. Zależność gęstości objętościowej szkieletu od wilgotności badanych materiałów

odpadów powęglowych wartości wilgotności optymalnej zwiększały się od ponad 9 do około 13% wag. (rys. 2). Popioły lotne wykazywały bardzo małą wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, natomiast odpady powęglowe znacznie większą – około $2,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Rys. 2. Wpływ dodatku popiołu na maksymalną gęstość objętościową szkieletu (a) i wilgotność optymalną (b) badanych materiałów

Najwyższą wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu zanotowano w mieszance z 10% (wag.) dodatkiem popiołu lotnego. Dalsze dodawanie popiołu lotnego powodowało spadek maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu.

Wytrzymałość na ścinanie

Odpady powęglowe nawodnione wykazały stosunkowo duże wartości parametrów wytrzymałościowych: kąt tarcia wewnętrznego wyniósł około 30° , a spójność około 41 kPa (tab. 3). Popioły lotne nawodnione wykazały mniejsze, niż odpady powęglowe i mieszanki odpadów powęglowych z popiołami lotnymi, wartości parametrów wytrzymałościowych: kąt tarcia wewnętrznego wyniósł nieco ponad 29° , a spójność około 21 kPa. Nawodnione mieszanki odpadów powęglowych z popiołami lotnymi wykazały duże wartości parametrów wytrzymałościowych, wyraźnie zależących od ilości dodatku popiołu: wartości kąta tarcia wewnętrznego zmniejszały się od ponad 36°

do około 33° (były większe niż w próbkach odpadów powęglowych), a spójności od około 27 do 20 kPa (były wyraźnie mniejsze niż w próbkach odpadów powęglowych), wraz ze zwiększeniem dodatku popiołu od 10 do 30% (wag.).

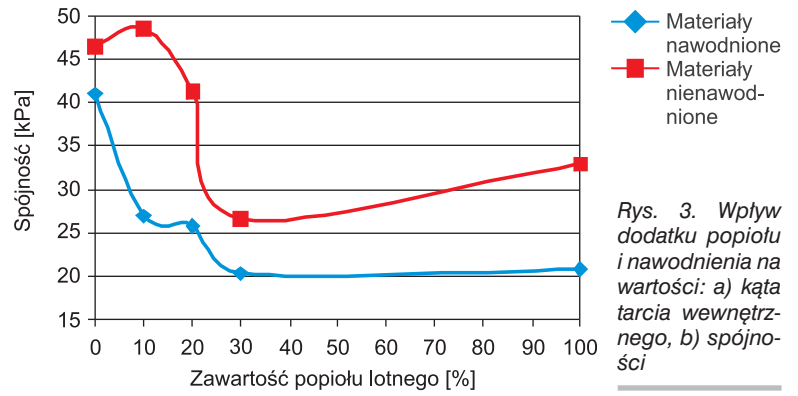
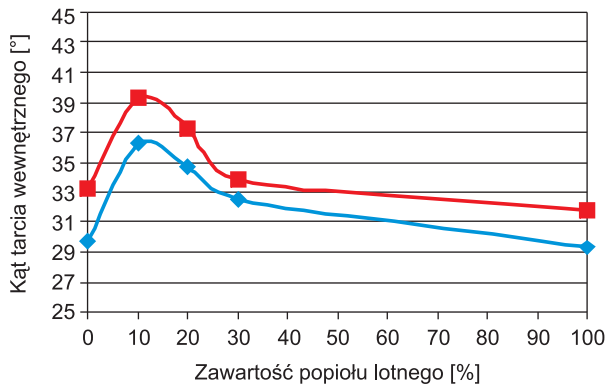
Zaznaczył się wyraźny wpływ dodatku popiołu na wartości spójności nawodnionych próbek mieszanek odpadów powęglowych z popiołem lotnym i dużo mniejszy wpływ tego dodatku na wartości kąta tarcia wewnętrznego. W odpadach powęglowych występuje tzw. spójność pozorna, wynikająca z zazębiania się i klinowania ziaren i okruchów w trakcie ścinania (stosowanie ramek pośrednich w celu wytworzenia strefy ścinania nie eliminuje całkowicie tego zjawiska). Dodatek popiołu powoduje wprowadzenie czynnika osłabiającego wyżej wymienione oddziaływania, zwłaszcza w warunkach nawodnienia („smarujące” działanie wody). W efekcie, jako wynik ścinania, otrzymuje się dużo mniejszą „spójność” mieszanek nawodnionych, niż samych odpadów powęglowych, tym mniejszą, im większy jest dodatek popiołu. W przypadku kąta tarcia wewnętrznego, wpływ dodatku popiołu również się zaznacza (następuje jego zmniejszanie się), jest on jednak znacznie mniejszy, niż w przypadku spójności; można wnosić, że wynika to z ostrokrawędzistego kształtu okruchów (duże opory tarcia w trakcie ścinania).

W celu wykazania wpływu nawodnienia na zmiany wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie badanych materiałów, wyniki poszczególnych wartości materiałów nawodnionych zestawiono z wynikami wcześniejszych badań [9], uzyskanych na materiałach nienawodnionych i pochodzących z tych samych źródeł, z których pochodziły materiały prezentowane w niniejszym artykule. Były to popioły lotne z Elektrowni Skawina S.A., odpady powęglowe (5-letnie) z KWK Rydułtowy-Anna oraz ich mieszanki. Badania wytrzymałości na ścinanie tych materiałów przeprowadzone były według takich samych procedur, jak w badaniach autorów artykułu. Próbki do badań formowano przy wilgotności optymalnej danego materiału, do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$, a następnie ścinano.

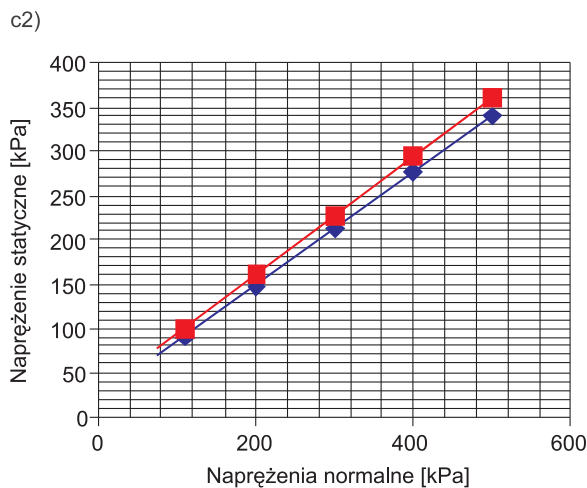
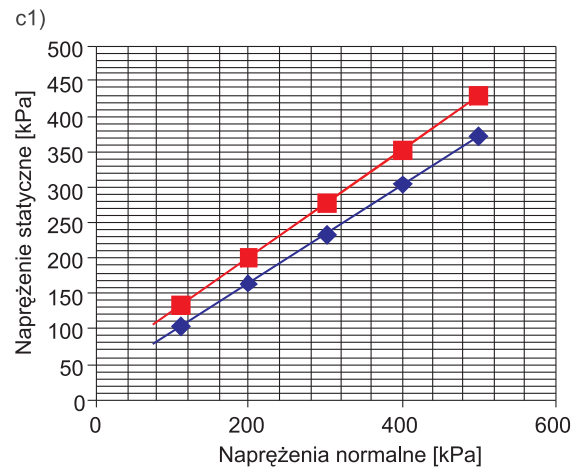
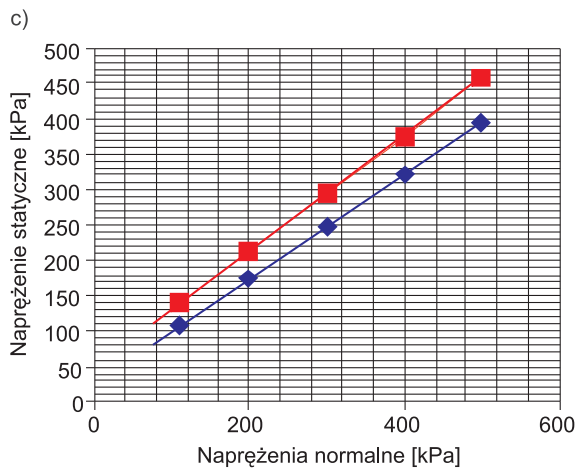
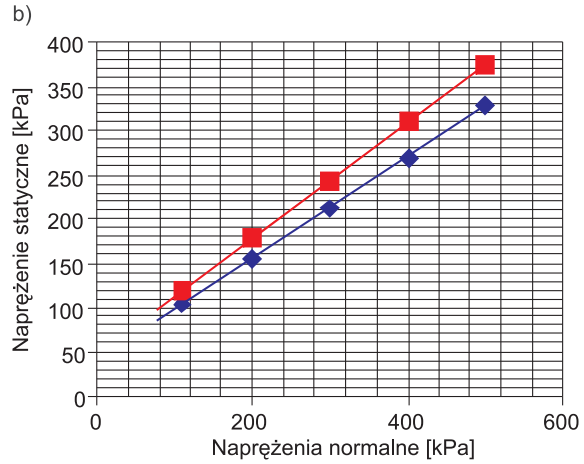
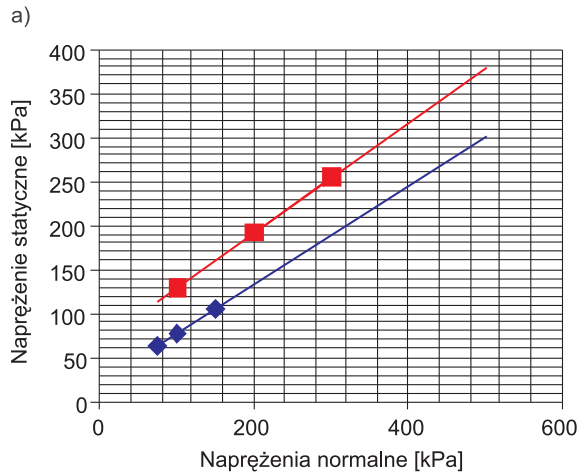
Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałości na ściskanie materiałów nienawodnionych oraz nawodnionych (tab. 3), wskazują, że zarówno spójność jak i kąt tarcia wewnętrznego materiałów nawodnionych wykazały wartości mniejsze niż materiały nienawodnione. Wartość kąta tarcia wewnętrznego popiołów nawodnionych była o $2,5^\circ$ mniejsza niż popiołów nienawodnionych. Wartość tego parametru w próbkach odpadów powęglowych nawodnionych była

Tabela 3. Wartości parametrów wytrzymałościowych materiałów nawodnionych i nienawodnionych

Materiał	Kąt tarcia wewnętrznego φ [$^\circ$]		Spójność c [kPa]		
	Materiał		Materiał		
	nawodniony	nienawodniony	nawodniony	nienawodniony	
Popioły lotne	29,30	31,8	20,76	32,9	
Odpady powęglowe	29,74	33,3	40,96	46,6	
Mieszanki odpadów powęglowych z dodatkiem popiołu lotnego	10% wag.	36,3	39,3	26,99	48,6
	20% wag.	34,7	37,3	25,9	41,3
	30% wag.	32,54	33,8	20,29	26,7



Rys. 3. Wpływ dodatku popiołu i nawodnienia na wartości: a) kąta tarcia wewnętrznego, b) spójności



Legend for Rys. 4:
 ◆ Materiały nawodnione
 ■ Materiały nienawodnione

Rys. 4. Wpływ nawodnienia na wytrzymałość badanych materiałów na ścianie: a) popioły lotne, b) odpady powęglowe, c) mieszanki odpadów powęglowych z dodatkiem popiołów lotnych: 10% wag. – c1, 20% wag. – c2, 30% wag. – c3

mniejsza o $3,6^\circ$ niż w próbkach odpadów nienawodnionych. W przypadku mieszanek odpadów powęglowych z popiołami lotnymi największą różnicę (o 3°) zanotowano w próbce mieszanki z 10% (wag.) dodatkiem popiołu. W miarę zwiększenia dodatku popiołu stwierdzono zmniejszanie wpływu nawodnienia na obniżenie wartości kąta tarcia wewnętrznego (do $1,3^\circ$ przy mieszance z 30% wag. dodatkiem popiołu).

Wartość spójności popiołów lotnych nawodnionych była o około 12 kPa mniejsza od popiołów nienawodnionych. Odpady powęglowe nienawodnione wykazały wartość spójności o około 5,6 kPa większą od odpadów nawodnionych. Mieszanka nienawodnionych odpadów powęglowych z 10% wag. zawartością popiołu charakteryzowała się wartością spójności większą o około 22 kPa niż mieszanka nawodniona. W miarę dodawania popiołu następowało zmniejszenie wpływu nawodnienia na wartości spójności (do 6,4 kPa przy 30% wag. dodatku popiołu). Wpływ dodatku popiołu i nawodnienia na zmianę wartości parametrów wytrzymałościowych badanych materiałów obrazują wykresy na rysunku 3.

Wpływ nawodnienia na wytrzymałość popiołów lotnych na ścinanie, odpadów powęglowych oraz ich mieszanek z popiołami lotnymi przedstawiono na rysunku 4. W każdym przypadku wytrzymałość na ścinanie materiałów nawodnionych była mniejsza niż materiałów nienawodnionych. Wraz ze zwiększeniem zawartości popiołu w mieszance wpływ nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie zmniejszał się.

Podsumowanie

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałości na ścinanie popiołów lotnych, odpadów powęglowych oraz ich mieszanek można stwierdzić co następuje:

1. Popioły lotne stanowią materiał drobnoziarnisty o uziarnieniu odpowiadającym pyłom kilkufrakcyjnym, charakteryzujący się średnią zagęszczalnością i stosunkowo dużymi wartościami parametrów wytrzymałościowych.
2. Odpady powęglowe stanowią materiał gruboziarnisty o uziarnieniu odpowiadającym żwirom kilkufrakcyjnym, charakteryzujący się dobrą zagęszczalnością i dużymi wartościami parametrów wytrzymałościowych.
3. Mieszanki odpadów powęglowych z popiołami stanowią materiały gruboziarniste odpowiadające wielofrakcyjnym żwirom piaszczystem (z 10% wag. i 20% wag. dodatkiem popiołów) lub żwirom pylastym (z 30% wag. dodatkiem popiołów), charakteryzujące się dobrą zagęszczalnością i dużymi wartościami parametrów wytrzymałościowych, wyraźnie zależnymi od wielkości dodatku popiołu:
 - wartości kąta tarcia wewnętrznego zmniejszały się od ponad 36° do około 33° (były większe niż w próbkach odpadów powęglowych), a spójności od około 27 do 20 kPa (były wyraźnie mniejsze niż w próbkach odpadów powęglowych), wraz ze zwiększeniem dodatku popiołu od 10 do 30% wag.
4. Wartości parametrów wytrzymałościowych materiałów nawodnionych były mniejsze od odpowiednich wartości oznaczonych na próbkach materiałów nienawodnionych. W przypadku kąta tarcia wewnętrznego różnice nie były duże – o około $2-4^\circ$ (około 4 do 11% względnych), natomiast w przypadku spójności różnice były większe – o oko-

ło $6-21$ kPa (około 12 do 37% względnych). Wynika z tego, że nawodnienie wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie badanych materiałów, przy czym w przypadku mieszanek wpływ ten był tym mniejszy, im większy był dodatek popiołu do odpadów powęglowych.

5. Odpady powęglowe oraz ich mieszanek z popiołami lotnymi odznaczają się dobrą zagęszczalnością i stosunkowo dużą wytrzymałością na ścinanie, dlatego mogą być stosowane jako antropogeniczne grunty budowlane w ziemnych konstrukcjach inżynierskich, takich jak nasypy drogowe lub kolejowe. Korzystne parametry geotechniczne pozwalają prognozować dobre warunki stateczności i nośności nasypów formowanych z tego typu materiałów.

Bibliografia

- [1] G. Borowski, *Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg*, Inżynieria Ekologiczna 22/2010, s. 54–57
- [2] K. Galos, A. Uliasz-Bocheńczyk, *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi 21/2005, s. 24–28
- [3] T. Gawęda, T. Olejnik, *Produkcja kruszyw mineralnych z odpadów powęglowych w Kompanii Węglowej S.A. na przykładzie wybranych kopalń*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, z. 24, 2/1, 2008, s. 28–29
- [4] S. Pisarczyk, *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004
- [5] J. Pyssa, J. Rokita, *Perspektywy i możliwości zagospodarowania ubocznych produktów spalania*, Przegląd Górniczy, 12/2012, s. 132–138
- [6] K.M. Skarżyńska, *Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, 1997
- [7] P. Wileński, *Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych*, red. D. Sybilski, C. Kraszewski, Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie, 2004, s. 49–52
- [8] E. Zawisza, *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania gruboziarnistych odpadów powęglowych popiołami lotnymi*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, 2001, s. 280
- [9] E. Zawisza, W. Organ, *Wytrzymałość na ścinanie mieszanek odpadów powęglowych z popiołami lotnymi*, Przegląd Górniczy 2/2012, s. 38–44
- [10] T. Zydróż, *Badania parametrów zagęszczalności przepalonych odpadów powęglowych z kopalni „Wesoła”*, Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2007, 1 (35), s. 34–42
- [11] PN-88/B-04481:1988. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu. Wydawnictwa Normalizacyjne „Alfa”, Warszawa
- [12] PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady Klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa ■

Z serwisu GDDKiA

Remont autostrady A4 pomiędzy Katowicami a Chorzowem

Po 12 latach nieprzerwanego użytkowania autostrady A4, GDDKiA przystępuje do planowanej wymiany jej górnej nawierzchni. Będzie to pierwszy w historii działalności katowickiego Oddziału GDDKiA tak poważny remont nawierzchni odcinka o długości ponad 4 km tej autostrady. Warto przypomnieć, że autostradą A4 pomiędzy Katowicami a Chorzowem przejeżdża średnio ponad 50 tys. pojazdów na dobę.

(13-08-2013)