

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE GRUNTÓW PYLASTYCH STABILIZOWANYCH POPIOŁAMI FLUIDALNYMI*

Andrzej Gruchot[✉], Eugeniusz Zawisza

Wydział inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Kraków

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie pyłu grubego ilastego i popiołu lotnego fluidalnego po spalaniu węgla kamiennego w Elektrowni „Połaniec” oraz kompozytów powstałych z wymieszania gruntu pylastego z dodatkiem 10 i 40% (wagowo) popiołu fluidalnego. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zagęszczenia zwiększyły się wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności badanych materiałów, a zawodnienie próbek spowodowało ich zmniejszenie. Zwiększenie dodatku popiołu spowodowało zaś zwiększenie badanych parametrów w stosunku do gruntu pylastego.

Słowa kluczowe: popiół lotny fluidalny, kompozyt, kąt tarcia wewnętrznego, spójność

WSTĘP

Energetyka zawodowa w Polsce oparta jest głównie na spalaniu węgla kamiennego lub brunatnego, co powoduje powstawanie znacznych ilości odpadów energetycznych. Zalicza się do nich popioły lotne, żużle, mieszaniny popiołowo-żużlowe, mikrosfery, popioły z kotłów fluidalnych, gips z odsiarczania spalin metodą mokrą wapienną, odpady z odsiarczania spalin metodami pól suchymi i suchymi (Pyssa, 2005).

Popioły lotne to substancje pozostające po spalaniu węgla w kotłach energetycznych, wychwytywane z dynamicznego ciągu spalin za pomocą urządzeń odpylających (Rosik-Dulewska, 2005). Właściwości popiołów zależą od wielu czynników, m.in.: od pochodzenia węgla, wartości opałowej i wilgotności paliwa, sposobu i stopnia jego rozdrobnienia, konstrukcji paleniska, metody wychwytywania popiołów ze strumienia spalin, sposobu odprowadzania popiołów oraz warunków ich przechowywania (Bastian, 1980).

W ostatnich latach w celu redukcji kosztów wytwarzania energii, optymalizacji wykorzystania paliw,

a także zmniejszenia oddziaływania zakładów energetycznych na środowisko wprowadzono nowe technologie. Konwencjonalne technologie spalania węgla często zastępowane są więc przez spalanie fluidalne. Intensywność spalania w warstwie fluidalnej umożliwia zwiększenie wymiarów komory paleniskowej i obniżenie temperatury spalania do 800–900°C. Charakteryzuje się również możliwością stosowania różnych rodzajów paliw, w tym paliw o niskiej jakości, kaloryczności i zanieczyszczonych (Szponder i Trybalski, 2009). Technika ta umożliwia spalanie nie tylko tradycyjnych paliw, ale również różnego rodzaju odpadów energonośnych (Hycnar, 2006). Powstające w wyniku spalania fluidalnego węgla i innych materiałów popioły fluidalne mają drobniejsze uziarnienie w porównaniu do konwencjonalnych popiołów lotnych, a ich ziarna mają silnie nieregularne kształty, przede wszystkim o wydłużonych, ostrych krawędziach, są izometryczne, blaszkowate i ostrokrawędziste. Składają się one ze zdehydratyzowanych minerałów tworzących pierwotnie skałę płonną i mają niemal amorficzną strukturę (Kabała i Listkiewicz, 2004; Glinicki i Zieliński, 2007).

[✉]rmgrucho@cyf-kr.edu.pl

Składowanie odpadów na zwałowiskach powoduje zajęcie znacznej powierzchni terenu, pylenie, degradacje gleb, skażenie wód gruntowych i powietrza atmosferycznego. Zagospodarowanie odpadów zmniejsza więc potrzebę rekultywacji skażonych terenów, przynosząc działania korzystne w aspekcie ochrony środowiska naturalnego. Prowadzone od wielu lat badania wykazują, że odpady energetyczne są materiałem o dobrych właściwościach geotechnicznych, dlatego też znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach związanych z budownictwem ziemnym, komunikacyjnym, hydrotechnicznym, górnictwem i rolnictwem (Falaciński, Garbulewski, Kledyński, Skutnik i Ziarkowska, 2004; Roszczyniański i Gawlicki, 2004; Galos i Uliasz-Bocheńczyk, 2005; Gruchot i Zawisza 2007; Zawisza, Kamińska i Janusz, 2011; Gruchot i Zydron, 2015; Gruchot, Zydroń i Gałowicz, 2015; Gruchot, 2016; Rutkowska, Wichowski i Mroczkowska, 2016; Zawisza i Kuska, 2016).

Celem badań było określenie wpływu zagęszczenia oraz zawadnienia na parametry wytrzymałości na ścinanie gruntu pylastego i popiołu fluidalnego pochodzącego ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni „Połaniec” oraz kompozytów powstałych z wymieszania gruntu pylastego z dodatkiem popiołu fluidalnego (wagowo) – 10% (kompozyt 1) i 40% (kompozyt 2).

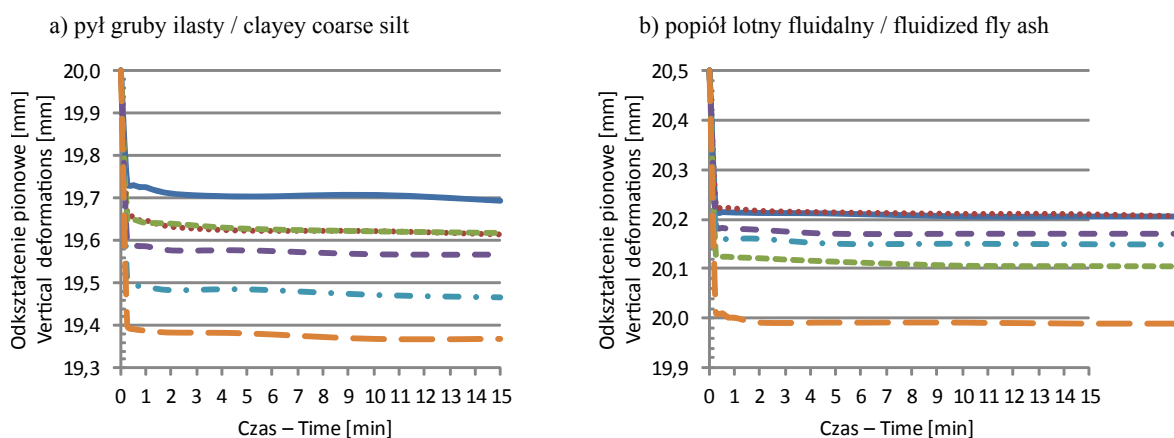
MATERIAŁ I METODY

Skład uziarnienia określono metodą łączoną, tj. sitową dla ziarn większych od 0,063 mm oraz areometryczną

dla cząstek mniejszych, a gęstość właściwą szkieletu metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Parametry zagęszczalności oznaczono w aparacie Proctora, w cylindrze o objętości 1,0 dm³ przy energii zagęszczania 0,59 J·cm⁻³.

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach 6 × 6 cm i wysokości próbki 2 cm. Próbkę do badań formowano w skrzynce aparatu przy wilgotności optymalnej do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,90$ i 1,00. Po uformowaniu próbki konsolidowano przy naprężeniach normalnych o wielkości 50, 75, 100, 150, 200 i 300 kPa przez 15 min, a następnie ścinano przy prędkości 0,1 mm·min⁻¹ bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 18 h nawodnienia próbek przez zanurzenie skrzynki z próbką w wodzie. Jako kryterium ścicia przyjęto maksymalną wartość naprężeń ścinających. Parametry wytrzymałości na ścinanie obliczono metodą najmniejszych kwadratów z oszacowaniem błędów wyznaczenia naprężeń stycznych w postaci średniego odchylenia standardowego.

Czas konsolidacji i prędkość ścinania ustalono na podstawie wyników doświadczenia, uzyskanych z wcześniejszych badań gruntów pylastych, które wskazują na dość szybki proces konsolidacji tego typu gruntów (Zawisza, 1987). Potwierdzają to również krzywe deformacji pionowych uzyskane w trakcie prowadzonej konsolidacji badanych próbek przed ścinaniem, co przedstawiono na przykładowych wykresach na rysunku 1.



Rys. 1. Deformacje pionowe w trakcie konsolidacji próbek nienawodnionych przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$
Fig. 1. Vertical deformation during consolidation of unsaturated samples at degree of compaction $I_s = 1,00$

WYNIKI I ICH ANALIZA

W składzie uziarnienia wielofrakcyjnego pyłu grubego ilastego największy udział miała frakcja pyłowa – 76%, frakcji piaskowej było 13%, a ilowej 11% (rys. 2, tab. 1). Gęstość właściwa szkieletu wynosiła $2,73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ponad $1,78 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ przy wilgotności optymalnej 15,0%.

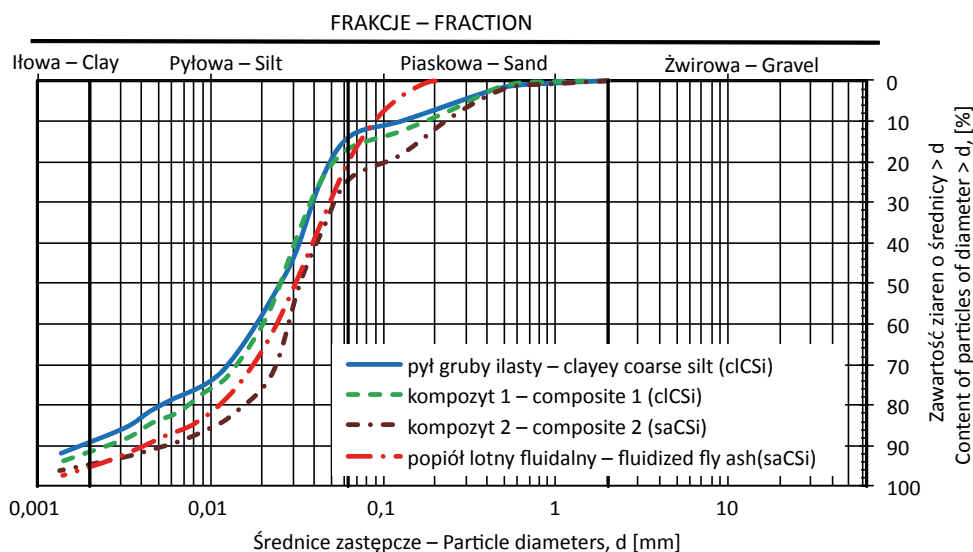
Pod względem geotechnicznym popiół lotny fluidalny odpowiadał kilkufrakcyjnemu pyłowi grubemu piaszczystemu z dominującą frakcją pyłową w ilości około 77%, frakcji piaskowej było 20%, a ilowej ponad 3%. Gęstość właściwa szkieletu wyniosła $2,68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu $1,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ przy wilgotności optymalnej 26,0%.

Kompozyty pyłu grubego ilastego z 10 i 40% dodatkiem popiołu lotnego odpowiadały pod względem geotechnicznym kilkufrakcyjnemu pyłowi grubemu ilastemu (kompozyt 1) i piaszczystemu (kompozyt 2) z dominującą frakcją pyłową w ilości 73% (rys. 2, tab. 1). Wraz ze wzrostem dodatku popiołu zawartość frakcji piaskowej zwiększyła się o 3% (kompozyt 1) i o ponad 10% (kompozyt 2), a zawartość frakcji ilastej w przypadku kompozytu 1 nie uległa zmianie, a w przypadku kompozytu 2 zmniejszyła się o ponad 6% w stosunku do zawartości tych frakcji w gruncie pylastym.

Gęstość właściwa szkieletu obydwu kompozytów i popiołu lotnego była mniejsza od gęstości gruntu pylastego o $0,02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (kompozyt 1), $0,04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (kompozyt 2) i $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (popiół lotny). Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu zmniejszyła się o $0,06$ i $0,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ przy zwiększeniu wilgotności optymalnej o 0,6 i 3,3% odpowiednio dla kompozytu 1 i kompozytu 2 w stosunku do gruntu pylastego. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu popiołu lotnego była mniejsza o $0,37$, $0,31$, $0,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a wilgotność optymalna większa o 11, 10 i 8 % odpowiednio w stosunku do gruntu pylastego oraz kompozytów 1 i 2.

Analizując zmiany naprężeń stycznych w trakcie ścinania próbek, stwierdza się, że charakter ich ścicia zależał jedynie od rodzaju badanego materiału. W badaniach pyłu grubego ilastego i jego mieszanek z popiołem lotnym ścicie miało charakter plastyczny – wraz ze wzrostem odkształcenia próbek naprężenia ścinające zwiększały się nieznacznie lub stabilizowały. W badaniach fluidalnego popiołu lotnego uzyskano kruche ścicie próbek (rys. 3). Należy zaznaczyć, że charakter zniszczenia próbek nie zależał od ich nawodnienia i zagęszczenia.

Wytrzymałość na ścinanie pyłu grubego ilastego, fluidalnego popiołu lotnego, a także ich mieszanek zależała od zagęszczenia i warunków wodnych. Zwiększenie wskaźnika zagęszczenia spowodowało



Rys. 2. Krzywe uziarnienia badanych materiałów

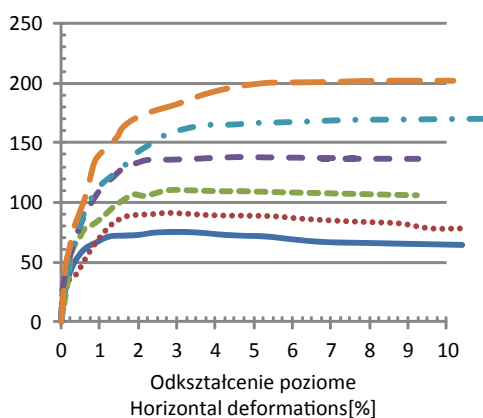
Fig. 2. Grain size distribution curves of the materials tested

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna badanych materiałów

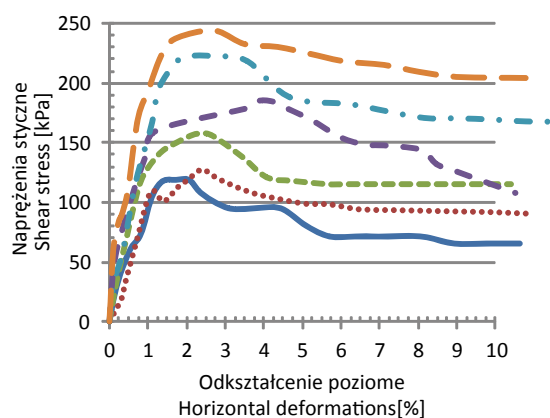
Table 1. Geotechnical characteristics of the tested materials

Parametr / Parameter	Wartość dla materiałów – Value for the materials			
	Pył gruby ilasty Clayey coarse silt	Kompozyt 1 (pył gruby ilasty + + 10% popiołu) Composite 1 (clayey coarse silt + + 10% fly ash)	Kompozyt 2 (pył gruby ilasty + + 40% popiołu) Composite 2 (clayey coarse silt + + 40% fly ash)	Popiół lotny fluidalny Fluidized fly ash
Zawartość frakcji – Fraction content [%]:				
– piaskowej – sand (0,063–2 mm)	13,0	16,0	23,5	20,0
– pyłowej – silt (0,002–0,063 mm)	76,0	73,0	73,0	76,6
– ilowej – clay (< 0,002 mm)	11,0	11,0	3,5	3,4
Nazwa wg Name acc. to PN-EN-ISO-14688-2:2006		clCSi (pył gruby ilasty clayey coarse silt)	saCSi (pył gruby piaszczysty sandy coarse silt)	
Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient [-]	17,4	9,5	12,4	7,5
Gęstość właściwa szkieletu Density of solid particles [g·cm ⁻³]	2,73	2,71	2,69	2,68
Wilgotność optymalna Optimum moisture content [%]	15,0	15,6	18,3	26,0
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density of solid particles [g·cm ⁻³]	1,785	1,725	1,665	1,420

a) pył gruby ilasty – clayey coarse silt



b) popiół lotny fluidalny – fluidized fly ash



Rys. 3. Zależność naprężeń stycznych od odkształcenia poziomego dla zastosowanych naprężeń normalnych próbek nie-nawodnionych przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$

Fig. 3. Dependence of shear stresses on horizontal deformation for applied normal stresses of unsaturated samples at degree of compaction $I_s = 1.00$

zwiększenie wytrzymałości na ścinanie zależne od wartości naprężeń normalnych. Stwierdzono również istotny wpływ nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie, uzyskując większe jej wartości z badań próbek nienawodnionych. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowo linie wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$.

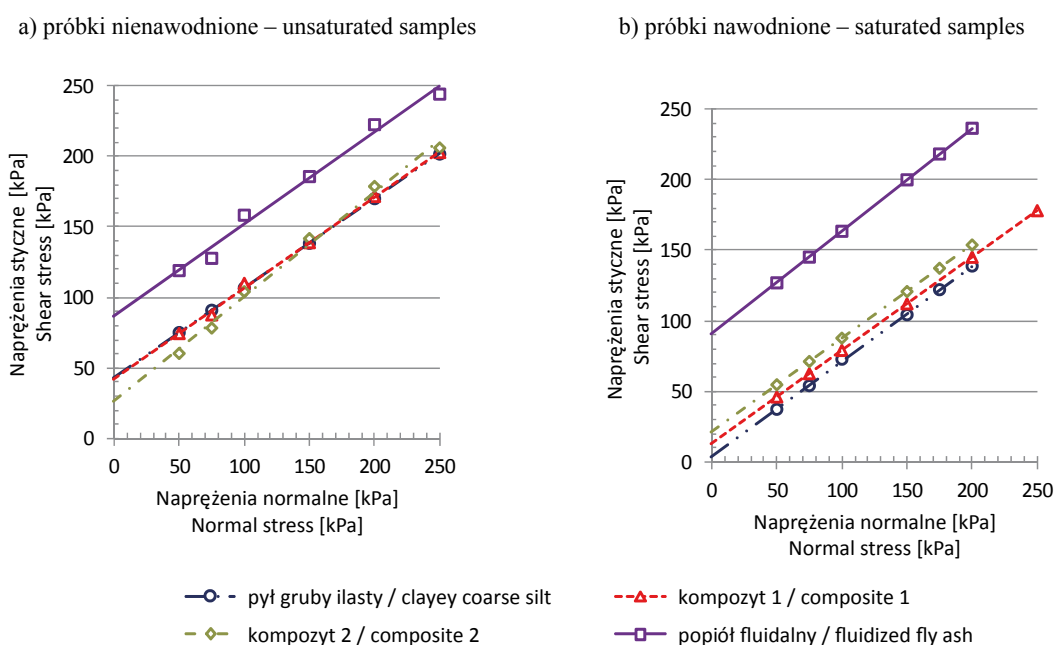
Stwierdzono, że zagęszczenie i nawodnienie próbek oraz ilość dodatku popiołu lotnego do pyłu grubego ilastego miały istotny wpływ na parametry wytrzymałości na ścinanie badanych materiałów (tab. 2, rys. 5).

Wartości kąta tarcia wewnętrznego pyłu grubego ilastego oznaczone bez nawodnienia i z nim próbki wahały się od 31 do 34°. Spójność próbek nienawodnionych wahała się od 35 do ponad 43 kPa, a po nawodnieniu od 0 do 5 kPa. W stosunku do badań bez nawodnienia zawodnienie próbek spowodowało zwiększenie o 1,5° kąta tarcia wewnętrznego przy obydwu zagęszczeniach oraz zmniejszenie spójności o 35 i 39 kPa odpowiednio przy $I_s = 0,90$ i 1,00. Wzrost zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00 w badaniach

zarówno próbek nienawodnionych, jak i nawodnionych spowodował wzrost kąta tarcia wewnętrznego średnio o około 1,5°, a spójności od 5 do 9 kPa.

Kąt tarcia wewnętrznego kompozytu 1 (mieszanka pyłu grubego ilastego i 10% popiołu lotnego fluidalnego) wahał się od około 32 do 34°. Spójność w badaniach próbek nienawodnionych wahała się od około 34 do 44 kPa, a po nawodnieniu od 8 do około 13 kPa. Nawodnienie spowodowało niewielkie zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego nieprzekraczające 0,5° przy obydwu zagęszczeniach, a w przypadku spójności uzyskano istotne jej zmniejszenie o 26 i 31 kPa odpowiednio przy zagęszczeniu $I_s = 0,90$ i 1,00. Wzrost zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00 spowodował zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego średnio o około 1,5°. W przypadku spójności wzrost zagęszczenia spowodował zwiększenie jej wartości o około 10 i 5 kPa odpowiednio bez nawodnienia i z nim próbek.

Kąt tarcia wewnętrznego kompozytu 2 (mieszanka pyłu grubego ilastego i 40% popiołu lotnego fluidalnego) próbek nienawodnionych wahał się



Rys. 4. Zależność naprężeń stycznych od normalnych w badaniach wytrzymałości na ścinanie przy wskaźniku zagęszczeniu $I_s = 1,00$ próbek nienawodnionych i nawodnionych

Fig. 4. Relationship between shear stresses and normal stresses in shear strength tests at degree of compaction $I_s = 1.00$ of unsaturated and saturated samples

Tabela 2. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności badanych materiałów

Table 2. Values of the angle of internal friction and cohesion of the tested materials

Materiał Material	Próbki – Samples	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction [°]		Spójność – Cohesion [kPa]	
		wskaźnik zagęszczenia – degree of compaction [–]			
		0,90	1,00	0,90	1,00
Pył gruby ilasty Clayey coarse silt	nienawodnione – unsaturated	30,8	32,3	35,1	43,5
	nawodnione – saturated	32,3	33,8	0,0	4,8
Kompozyt 1 Composite 1	nienawodnione – unsaturated	31,6	33,1	33,7	43,6
	nawodnione – saturated	32,0	33,5	7,9	13,0
Kompozyt 2 Composite 2	nienawodnione – unsaturated	35,3	36,2	24,8	26,1
	nawodnione – saturated	31,7	33,6	6,1	21,7
Popiół lotny fluidalny Fluidized fly ash	nienawodnione – unsaturated	32,8	33,3	63,5	87,0
	nawodnione – saturated	34,5	36,2	68,7	90,4

od około 35 do 36°, a po nawodnieniu od około 32 do 34°. Spójność wahała się od około 25 do 26 kPa w badaniach bez nawodnienia, a po nawodnieniu od 6 do 22 kPa. Po nawodnieniu próbek uzyskano zmniejszenie o blisko 4 i 3° wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz o około 19 i ponad 4 kPa spójności odpowiednio przy $I_S = 0,90$ i 1,00. Wzrost zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 1,00 w badaniach bez nawodnienia spowodował zwiększenie wartości kąta tarcia wewnętrznego o 1°, a po nawodnieniu o 2°. W przypadku spójności wzrost zagęszczenia spowodował zwiększenie jej wartości o ponad 1 kPa w badaniach bez nawodnienia oraz o około 16 kPa w badaniach po nawodnieniu próbek.

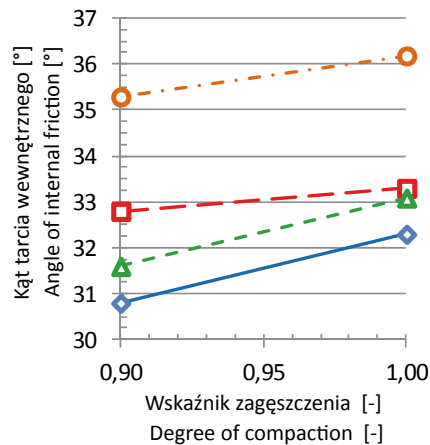
Wartości kąta tarcia wewnętrznego popiołu lotnego fluidalnego wahały się od około 33 do 36°, a spójności od 64 do ponad 90 kPa. Po nawodnieniu stwierdzono zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego średnio o nieco ponad 2° oraz zwiększenie spójności o średnio 4 kPa przy obydwu zagęszczeniach. Wzrost zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 1,00 w badaniach przeprowadzonych bez nawodnienia spowodował zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego o 0,6°, a spójności o ponad 23 kPa. Po nawodnieniu wartości kąta tarcia wewnętrznego zwiększyły się o prawie 2°, a spójności o blisko 22 kPa.

Popioły fluidalne powstają w wyniku spalania substancji energonośnych w złożu fluidalnym w temperaturze 850°C, a więc są bardzo słabo spieczone o silnie rozwiniętej powierzchni właściwej i znacznej aktywności pucolanowej i szybko zachodzących reakcjach chemicznych z wodorotlenkiem wapnia (Pyssa, 2005). W odpadach znajduje się również słabo spieczony tlenek wapnia, który bardzo łatwo reaguje z wodą (Gawlicki i Roszczyński, 2000), dlatego badane popioły lotne fluidalne cechują duże wartości spójności.

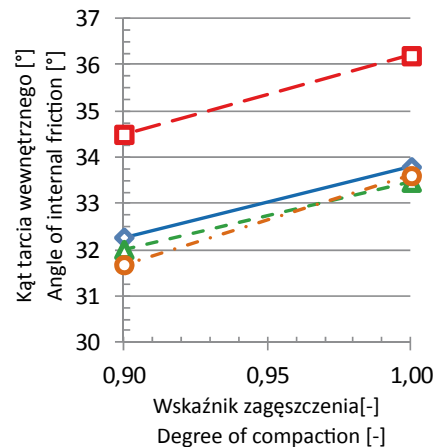
Wartości kąta tarcia wewnętrznego oznaczone bez nawodnienia próbek dla obydwu kompozytów zwiększyły się o 0,8 i 3,5° odpowiednio przy dodatku 10 i 40% popiołu w stosunku do pyłu grubego ilastego. Kąt tarcia wewnętrznego popiołu lotnego był większy o 2° od wartości dla pyłu grubego ilastego, ale mniejszy o 2,5–3° od wartości dla kompozytu 1 oraz o 0,2–2° dla kompozytu 2. Spójność kompozytu 1 była podobna do jej wartości dla pyłu grubego ilastego (różnice nie przekraczały 2 kPa), a w przypadku kompozytu 2 zmniejszyła się o 29 i 40% względnych odpowiednio przy $I_S = 0,90$ i 1,00. Spójność popiołu lotnego była prawie 1-krotnie większa od jej wartości oznaczonej dla pyłu grubego ilastego i kompozytu 1. W odniesieniu do kompozytu 2 spójność

a) kąt tarcia wewnętrzznego – angle of internal friction

próbki niezawodnione – unsaturated samples

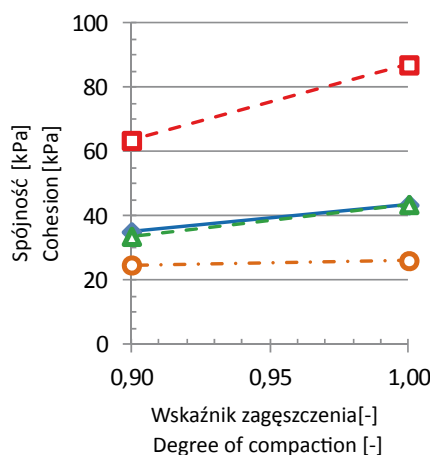


próbki zawodnione – saturated samples

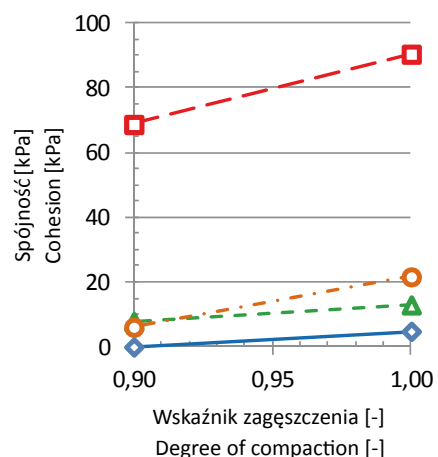


b) spójność – cohesion

próbki niezawodnione – unsaturated samples



próbki zawodnione – saturated samples



—◇— pył gruby ilasty – clayey coarse silt

—○— kompozyt 2 – composite 2

—△— kompozyt 1 – composite 1

—□— popiół lotny fluidalny – fluidized fly ash

Rys. 5. Wpływ zagęszczenia na parametry wytrzymałości na ścinanie badanych materiałów

Fig. 5. Influence of compaction on shear strength parameters of the tested materials

popiołu lotnego była większa od 1,5-krotnie przy $I_s = 0,90$ do 2,3-krotnie przy $I_s = 1,00$.

W badaniach przeprowadzonych po nawodnieniu próbek stwierdzono niewielkie zmiany kąta tarcia wewnętrznego oznaczone dla obydwu kompozytów w stosunku do pyłu grubego ilastego (do $\pm 0,3^\circ$) przy obydwu zagęszczeniach. W przypadku spójności

uzyskano również niewielkie jej różnice w odniesieniu do kompozytu 1 oraz jej zmniejszenie od około 29% ($I_s = 0,90$) do 40% względnych ($I_s = 1,00$) w odniesieniu do kompozytu 2. Popiół lotny fluidalny charakteryzował się dużymi wartościami spójności, które były znacznie, a w niektórych przypadkach wielokrotnie większe od wartości dla pyłu grubego

ilastego i obydwu kompozytów. Świadczy to o tym, że nawodnienie próbek spowodowało uruchomienie procesów wiązania pucolanowego.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że stosowanie fluidalnych popiołów lotnych do tworzenia kompozytów z gruntami mineralnymi jest celowym rozwiązaniem; badane materiały cechowały się dużymi wartościami parametrów wytrzymałości na ścinanie. Znaczący wpływ na parametry wytrzymałości na ścinanie miały zagęszczenie, nawodnienie oraz wielkość dodatku popiołu lotnego fluidalnego do pyłu grubego ilastego.

Wzrost zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do 1,00 spowodował zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego i spójności pyłu grubego ilastego, obydwu kompozytów oraz popiołu lotnego fluidalnego. Nawodnienie próbek spowodowało zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego i spójności badanych materiałów. Dodatek popiołu do pyłu grubego ilastego spowodował zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego i spójności w stosunku do wartości tych parametrów dla pyłu grubego ilastego i popiołu lotnego.

ADNOTACJA

Praca wykonana w ramach badań statutowych nr DS-3322/KIWIG/2016.

PIŚMIENNICTWO

Bastian, S. (1980). *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*. Warszawa: Arkady.

Falaciński, P., Garbulewski, K., Kledyński, Z., Skutnik Z. i Ziarkowska, K. (2004). Badania barier hydraulicznych z zawieszin cementowo-bentonitowych z dodatkiem popiołów fluidalnych. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 2 (29), 202–215.

Galos, K. i Uliasz-Bocheńczyk, A. (2005). Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 21 (1), 23–42.

Gawlicki, M., i Roszczyński, W. (2000). Nowe elementy w gospodarce odpadami energetycznymi. W *Materiały III Szkoły Gospodarki Odpadami*, Ryto – Kraków (strony 91–100).

Glinicki, M.A. i Zieliński, M. (2007). Rozmieszczenie porów powierzchniowych w betonie z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego. *Cement–Wapno–Beton*, 12/74 (3), 133–138.

Gruchot, A. (2016). Utylizacja odpadów powęglowych i poenergetycznych do celów inżynierskich jako czynnik kształtowania i ochrony środowiska. *Zeszyty Naukowe 533, Rozprawy 410 Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja*.

Gruchot, A. i Zawisza, E. (2007). Badania parametrów geotechnicznych wybranych odpadów przemysłowych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego. *Przegląd Górniczy*, 10, 26–32.

Gruchot, A. i Zydron, T. (2015). Determination of frictional resistance at the contact between chosen furnace waste and geosynthetics. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 14 (4), 35–47.

Gruchot, A., Zydron, R. i Gałowicz, E. (2015). Parametry wytrzymałościowe fluidalnego popiołu lotnego z Elektrowni „Połaniec”. *Annual Set The Environment Protection. Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 498–518.

Hycnar, J. (2006). *Czynniki wpływające na właściwości fizykochemiczne i użytkowe stałych produktów spalania paliw w paleniskach fluidalnych*. Katowice: Wydawnictwo Górnicze.

Kabała, J. i Listkiewicz, J. (2004). Wpływ stabilizacji składu chemicznego, fizycznego i ilościowego ubocznych produktów spalania węgla i odsiarczania spalin z kotłów fluidalnych na możliwość ich gospodarczego wykorzystania. *Fluidalne Spalanie Węgla w Energetyce*, 124–130.

Pysa, J. (2005). Odpady z energetyki – przemysłowe zagospodarowanie odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 21 (3), 85–92.

Rosik-Dulewska, Cz. (2005). *Podstawy gospodarki odpadami*. Warszawa: PWN.

Roszczyński, W. i Gawlicki, M. (2004). Uboczne produkty spalania jako składniki spoiw mineralnych. W *Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami*, Ryto (strony 211–220).

Rutkowska, G., Wichowski, P. i Mroczkowska, A. (2016). Kształtowanie właściwości betonu zwykłego na bazie cementów z dodatkiem włókien stalowych i popiołu lotnego. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 15 (3), 71–80.

Szponder, D.K. i Trybalski, K. (2009). Określenie właściwości popiołów lotnych przy użyciu różnych metod i urządzeń badawczych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 4, 287–298.

Zawisza, E. (1987). Badania modelowe odkształceń podłoża pylastego pod obciążeniem. *Archiwum Hydrotechniki*, 34 (1–2), 143–157.

Zawisza, E. i Kuska, N. (2016). Właściwości geotechniczne popiołów lotnych w zależności od strefy odpylania. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 15 (2), 103–112.

Zawisza, E., Kamińska, K. i Janusz, I. (2011). Wodopruszczalność żużli wielkopieczowych, popiołów lotnych oraz ich mieszanek. *Nauka Przyroda Technologie*, 5 (5), 1–10.

SHEAR STRENGTH OF SILTY SOILS STABILIZED WITH FLUIDIZED BED ASH

ABSTRACT

The paper presents the results of tests of shear strength of clayey coarse silt and fluidized fly ash after hard coal combustion at the “Połaniec” Power Plant as well as composites made of silty soil mixed with the addition of 10 and 40% (by weight) of fluidized fly ash. It was found that along with the increase in compaction, the values of the angle of internal friction and cohesion of the tested materials increased, and the saturation of the samples reduced the shear strength parameters. On the other hand, increasing the addition of the ash caused an increase in the tested parameters in relation to the silty soil.

Key words: fluidized fly ash, composite, angle of internal friction, cohesion