

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE POPIOŁÓW LOTNYCH Z DODATKIEM ZBROJENIA ROZPROSZONEGO

Andrzej Gruchot, Daniel Michniak

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego pochodzącego z Elektrowni „Skawina” w Skawinie stabilizowanego 3% dodatkiem wapna hydratyzowanego lub cementu portlandzkiego. Jako zbrojenie zastosowano paski folii o wymiarach 5×10 , 10×10 , 20×10 oraz 20×20 mm oraz syntetyczne mikrowłókna *Fibrofor High Grade*. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie popiołu ze zbrojeniem włóknami *Fibrofor High Grade* była dwukrotnie większa niż w przypadku badań z paskami folii. Wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego z dodatkiem cementu portlandzkiego była wyraźnie wyższa niż przy dodatku wapna hydratyzowanego.

Słowa kluczowe: popiół lotny, zbrojenie rozproszone, spoiwo hydrauliczne, wytrzymałość na ściskanie

WSTĘP

W budownictwie ziemnym coraz częściej wykorzystywane są metody mające na celu polepszenie parametrów wytrzymałościowych gruntów. Najczęściej spotykaną formą jest zbrojenie gruntu, które w wyniku tarcia zachodzącego pomiędzy zbrojeniem a ośrodkiem gruntowym przenosi siły rozciągające. Zbrojenie stosuje się w różnej formie: począwszy od ciągłych z płaskowników metalowych, syntetycznych georusztów lub geotekstyliów, kotew składających się z metalowego cięgna i betonowej otuliny, do zbrojenia rozproszonego z krótkich włókien z tworzyw naturalnych bądź sztucznych, pozyskiwanych niekiedy z materiałów odpadowych [Pawłowski i in. 2008]. Zbrojenie może mieć także postać włókien ciągłych, jak w przypadku techniki „Texsol” [Jarominiak 1999].

Adres do korespondencji – Corresponding Authors: dr inż. Andrzej Gruchot, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24-28, 30-059 Kraków; dr inż. Daniel Michniak, absolwent Wydziału Inżynierii Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, e-mail: rmgrucho@cyf-kr.edu.pl, daniel-michniak@wp.pl.

Z drugiej strony wymogi ochrony środowiska powodują, że do celów budownictwa ziemnego wykorzystuje się kruszywa sztuczne powstające w wyniku przeróbki odpadów przemysłowych. Znaczna ilość tych materiałów cechuje się parametrami geotechnicznymi wskazującymi na ich przydatność, ale są również i takie, które wymagają wzmocnienia przez dodatek stabilizatora lub zbrojenia. Do materiałów takich można zaliczyć uboczne produkty spalania węgla kamiennego bądź brunatnego w elektrowniach lub elektrociepłowniach.

Odpowiednio przetworzone odpady poenergetyczne mogą stanowić wartościowy produkt w wielu dziedzinach gospodarki, będąc tańszą alternatywą dla tradycyjnych rozwiązań. Materiały te mogą być stosowane jako zamiennik gruntów mineralnych, przyczyniając się w ten sposób do zmniejszenia ilości odpadów trafiających na składowiska, a tym samym sprzyjając racjonalnemu wykorzystaniu surowców mineralnych [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005, Pyssa 2005]. Popioły lotne znalazły szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach gospodarki, począwszy od górnictwa podziemnego, rolnictwa, budownictwa zimnego, do przemysłu ceramicznego włącznie. W budownictwie drogowym popioły mogą być używane jako materiał samoistny pod warunkiem stosowania warstw ochronnych przed wodą, a także do produkcji spoiw drogowych w przypadku popiołów krzemianowo-glinowych. Stanowią alternatywę dla cementu przy stabilizacji podbudowy dróg, głównie o niewielkim stopniu natężenia ruchu [Kasprzyk i Pietrakowski 2003, Hycnar 2009, Filipiak 2011, Gruchot i in. 2015]. W wielu jednak przypadkach odpady te wymagają wzmocnienia przez stosowanie np. zbrojenia rozproszonego, co wpływa na poprawę właściwości wytrzymałościowych.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego pochodzącego ze zsyków przy elektrofiltrach Elektrowni „Skawina” w Skawinie stabilizowanego wapnem hydratyzowanym lub cementem portlandzkim klasy 32,5R w ilości 3%. Jako zbrojenie zastosowano paski folii o wymiarach 5×10 , 10×10 , 20×10 oraz 20×20 mm (ryc. 1a) w ilości 1,0% oraz syntetyczne mikrowłókna *Fibrofor High Grade* (ryc. 1b) w ilości 0,5 i 1,0% w stosunku do masy szkieletu popiołu.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności popiołu lotnego oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia oznaczono metodą areometryczną, 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 $1,0 \text{ dm}^3$, przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$.

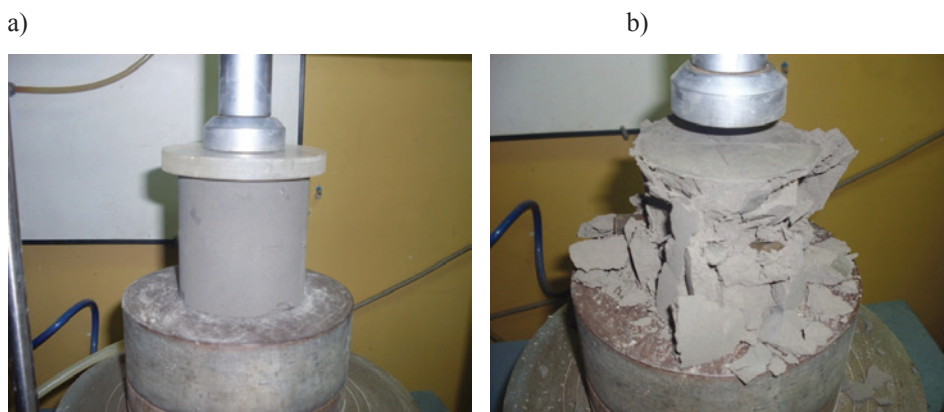
Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie popiołu lotnego przeprowadzono na co najmniej 3 próbkach o wysokości i średnicy 8,0 cm (ryc. 2), formowanych w aparacie Proctora przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ i wilgotności zbliżonej do optymalnej. Wskaźnik zagęszczenia tak przygotowanych próbek wynosił od 0,99 do 1,01. Badania wykonano bezpośrednio po uformowaniu próbek oraz po 7-dobowej pielęgnacji powietrznej i powietrzno-wodnej (tylko dla zbrojenia mikrowłóknami *Fibrofor High Grade*). Prędkość ściskania próbek wynosiła $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



mikrowłókna – microfibres
Fibrofor High Grade

Ryc. 1. Widok zbrojenia rozproszonego wykorzystanego w badaniach wytrzymałości na ściskanie (fot. A. Gruchot)

Fig. 1. View of the fiber reinforcement used in the compressive strength research (photo A. Gruchot)



Ryc. 2. Próbką przed badaniem (a) i po badaniu (b) (fot. D. Michniak)

Fig. 2. The sample before the test (a) and after the test (b) (photo D. Michniak)

Pielęgnacja powietrzna polegała na zabezpieczeniu próbek przez 7 dób przed wysychaniem w temperaturze pokojowej. Natomiast pielęgnacja powietrzno-wodna polegała na zabezpieczeniu próbek przed wysychaniem przez 3 doby w temperaturze pokojowej, po czym zanurzeniu ich na 1 cm w wodzie przez 1 dobę, a następnie na całkowitym zanurzeniu w wodzie przez 3 doby.

Wykorzystane w badaniach paski folii (ryc. 1a) zostały przycięte z drukarskiego materiału odpadowego, jakim była folia o grubości 0,15 mm. Natomiast mikrowłókna

Fibrofor High Grade (ryc. 1b) są standardowo stosowane do zbrojenia betonu konstrukcyjnego oraz produkcji betonu pompowego, natryskowego, prefabrykatów oraz do wykonywania płyt fundamentowych lub posadzek przemysłowych [Materiały informacyjne Fibrofor 2011]. Mikrowłókna te posiadają formę nacinanych wzdłużnie (fibrylowanych), wiązkwanych uszlachetnionych włókien. Podstawowe właściwości fizyczne włókien *Fibrofor High Grade* zestawiono w tab. 1.

Tabela 1. Właściwości fizyczne włókien *Fibrofor High Grade* [Materiały informacyjne Fibrofor 2011]

Table 1. Physical properties of Fibrofor High Grade fibers [Materiały informacyjne Fibrofor 2011]

Parametr Parameter	Opis Description
Materiał Material	czysty, uszlachetniony poliolefin clean, refined polyolefins
Postać Form	włókno skręcone, fibrylowane twisted fiber, fibrillated
Długość Length	38 mm ± 5%
Kolor Color	beżowy – beige
Odporność na kwasy/zasady Resistance to acids/alkalis	obojętny – inert
Siła zrywająca Tensile strength	około – about 400 N · mm ⁻²
Moduł sprężystości Modulus of elasticity	około – about 4900 N · mm ⁻²
Temperatura mięknięcia The softening temperature	około – about 150oC
Grubość folii Foil thickness	około – about 80 μm

WYNIKI BADAŃ

Właściwości fizyczne

W składzie uziarnienia popiołu lotnego dominowała frakcja pyłowa, której zawartość wynosiła ponad 89%, frakcji iłowej było ponad 10%, a udział frakcji piaskowej był niewielki i wynosił 0,3%. Zgodnie z nomenklaturą geotechniczną [PN-EN ISO 14688:2006] badany materiał sklasyfikowano jako kilkufrakcyjny, dobrze uziarniony pył (tab. 2).

Gęstość właściwa popiołu lotnego wynosiła 2,18 g · cm⁻³ i była zbliżona do gęstości popiołów lotnych z Elektrociepłowni „Kraków” [Zawisza i Zydroń 2004, Zawisza i in. 2006]. Kapilarność bierna była większa niż 1,7 m, dlatego badany popiół lotny sklasyfikowano jako wysadzinowy [PN-S-02205:1998]. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu popiołu lotnego wynosiła 1,13 g · cm⁻³ przy wilgotności optymalnej 35%.

Tabela 2. Charakterystyka geotechniczna popiołu lotnego
Table 2. Geotechnical characteristic of the fly ash

Parameter	Symbol	Unit	Value
Zawartość frakcji – Fraction content:			
• piaskowa – sand, Sa 2–0,063 mm	Sa	%	0,3
• pyłowa – silt, Si 0,063–0,002 mm	Si		89,3
• ilowa – clay, Cl <0,002 mm	Cl		10,4
Nazwa gruntu wg PN-EN ISO 14688:2006 Soil name acc. to PN-EN ISO 14688:2006			Pył (Si) Silt (Si)
	d_{10}		0,0016
Średnice zastępcze Grain diameter at 10, 30 and 60% passing	d_{30}	mm	0,0073
	d_{60}		0,0191
Wskaźnik różnoziarnistości Coefficient of uniformity	C_U		–
Wskaźnik krzywizny uziarnienia Coefficient of curvature	C_C	–	1,74
Gęstość właściwa Density of solid particles	ρ_s	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,18
Maksymalna gęstość objętościowa Maximum dry density of solid particles	ρ_{ds}	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,13
Wilgotność optymalna Optimum moisture content	w_{opt}	%	35,1
Kapilarność bierna* Passive capillary	H_{kb}	m	> 1,70

*za – acc. to Gruchot i Sieczka 2013

Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego zależała od rodzaju i ilości użytego zbrojenia rozproszonego oraz rodzaju spoiwa, a także zastosowanej pielęgnacji.

Zbrojenie rozproszone w postaci pasków folii

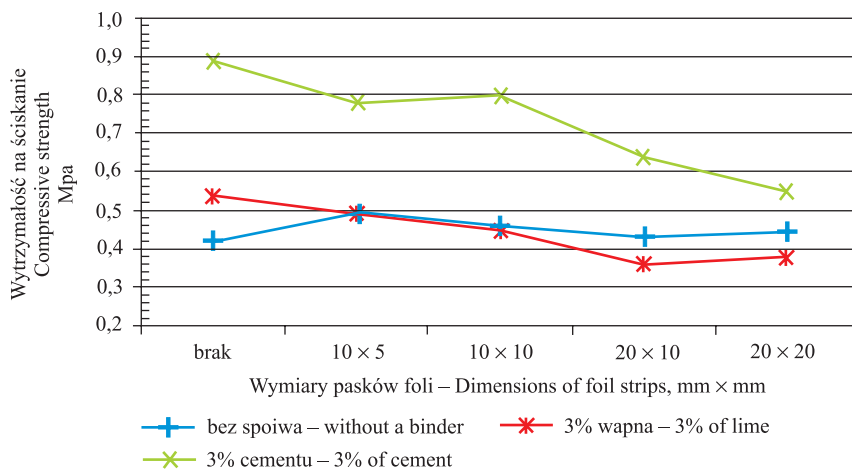
Wytrzymałość na ściskanie próbek popiołu lotnego bez dodatku spoiwa i pasków folii w badaniach bezpośrednio po ich uformowaniu była niewielka i wynosiła 0,14 MPa (tab. 3). Zastosowanie 7-dobowej pielęgnacji powietrznej i dodatku 1% zbrojenia spowodowało kilkukrotne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie – od ponad 3,3-krotne w badaniach próbek ze zbrojeniem folią 10 × 5 mm do 4,3-krotne ze zbrojeniem folią 10 × 10 mm i 2,9-krotne przy zbrojeniu folią 20 × 10 i 20 × 20 mm.

W przypadku próbek z 3% dodatkiem wapna zwiększenie wymiarów pasków folii spowodowało zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie od 0,54 MPa dla próbek bez zbrojenia do 0,37 MPa w przypadku próbek ze zbrojeniem paskami 20 × 10 i 20 × 20 mm. Podobną zależność stwierdzono w odniesieniu do próbek z 3% dodatkiem cementu.

Dodatek zbrojenia w postaci pasków folii spowodował zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie od 0,89 MPa dla próbek bez zbrojenia do 0,55 MPa w przypadku próbek ze zbrojeniem paskami folii 20 × 20 mm (ryc. 3). Tak więc zastosowanie zbrojenia w tej samej ilości, ale o większych wymiarach pasków folii spowodowało prawie 2-krotne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie.

Tabela 3. Wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego bez dodatku i z dodatkiem spoiwa oraz zbrojenia rozproszonego
Table 3. Value of the compressive strength of fly ash with and without the additive of a binder and fiber reinforcement

Rodzaj zbrojenia Type of reinforcement	Pielęgnacja próbek Curing of samples		Dodatek Addition		Wytrzymałość na ściskanie próbek Compressive strength of samples			
	czas time	typ type	spoiwo binder	zbrojenie fiber reinforcement	bez dodatku spoiwa without a binder	z dodatkiem spoiwa with a binder		
						wapno lime	cement	
	doby days	–		%		MPa		
brak without	0	po uformowaniu after forming	0	0	0,14	0,15	0,15	
	7	powietrzna air	0 3	0	0,42	0,54	0,89	
Paski folii – Foil strips	10 × 5		0		0,49			
			3			0,49	0,78	
	7	powietrzna air	0		0,64			
			3	1		0,45	0,80	
			0		0,43			
			3			0,36	0,64	
20 × 20		0		0,44				
		3		–	0,38	0,55		
Fibrofor High Grade	0	po uformowaniu after forming	3	0		0,20	0,17	
				0,5		0,25	0,25	
				1		0,40	0,32	
	7	powietrzna air	0	0	0,42			
					0,5	0,58		
					1,0	0,76		
			3	0		0,54	0,89	
					0,5	0,83	0,99	
					1,0	0,99	1,25	
	7	powietrzno- -wodna air-water	3	0			0,27	
					0,5	0,67	0,84	
					1	0,92	1,02	



Ryc. 3. Wpływ wymiarów pasków folii oraz rodzaju spoiwa na wytrzymałości na ściskanie popiołu lotnego

Fig. 3. The influence of the dimensions of the foil strips and the type of binder on the compressive strength of the fly ash

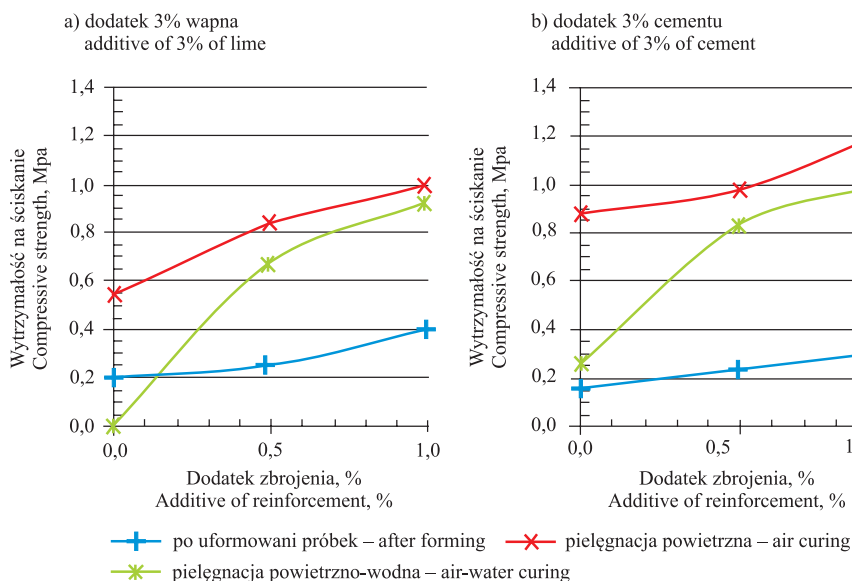
Podsumowując – dodatek wapna nie spowodował istotnych zmian wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek bez dodatku spoiwa lub jej zmniejszenie przy wymiarach zbrojenia 20×10 i 20×20 mm. Natomiast w przypadku dodatku cementu stwierdzono zwiększenie wytrzymałości na ściskanie – 1,6-krotne przy zbrojeniu folią o wymiarach 10×5 mm i 1,3-krotne przy zbrojeniu folią 20×20 mm.

Uzyskane wyniki badań z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci pasków folii wskazują, że największe wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskano przy najmniejszych wymiarach zbrojenia, a więc większym rozproszeniu zbrojenia. Również dodatek spoiwa w postaci cementu istotnie wpłynął na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z dodatkiem wapna.

Zbrojenie rozproszone w postaci włókien *Fibrofor High Grade*

Wytrzymałość na ściskanie próbek popiołu lotnego bez spoiwa po 7 dobach pielęgnacji oznaczono jedynie po pielęgnacji powietrznej, ponieważ przy pielęgnacji powietrzno-wodnej próbki uległy rozmoknięciu. Wartości wytrzymałości wahały się od 0,42 MPa bez dodatku zbrojenia do 0,76 MPa przy 1% dodatku zbrojenia.

Wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego z dodatkiem 3% wapna przy wzroście dodatku zbrojenia od 0 do 1% zwiększyła się 2-krotnie w badaniach bezpośrednio po uformowaniu próbek (ryc. 4a) oraz po 7-dobowej pielęgnacji powietrznej. Natomiast w przypadku pielęgnacji powietrzno-wodnej próbki bez zbrojenia uległy rozmoknięciu, a przy wzroście dodatku zbrojenia od 0,5 do 1,0% uzyskano 1,4-krotne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie. Należy również wskazać, że przy pielęgnacji powietrzno-wodnej otrzymano niższe wartości wytrzymałości na ściskanie w stosunku do pielęgnacji powietrznej, a więc 3-dobowe zanurzenie próbek w wodzie znacznie zmniejszyło wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego.



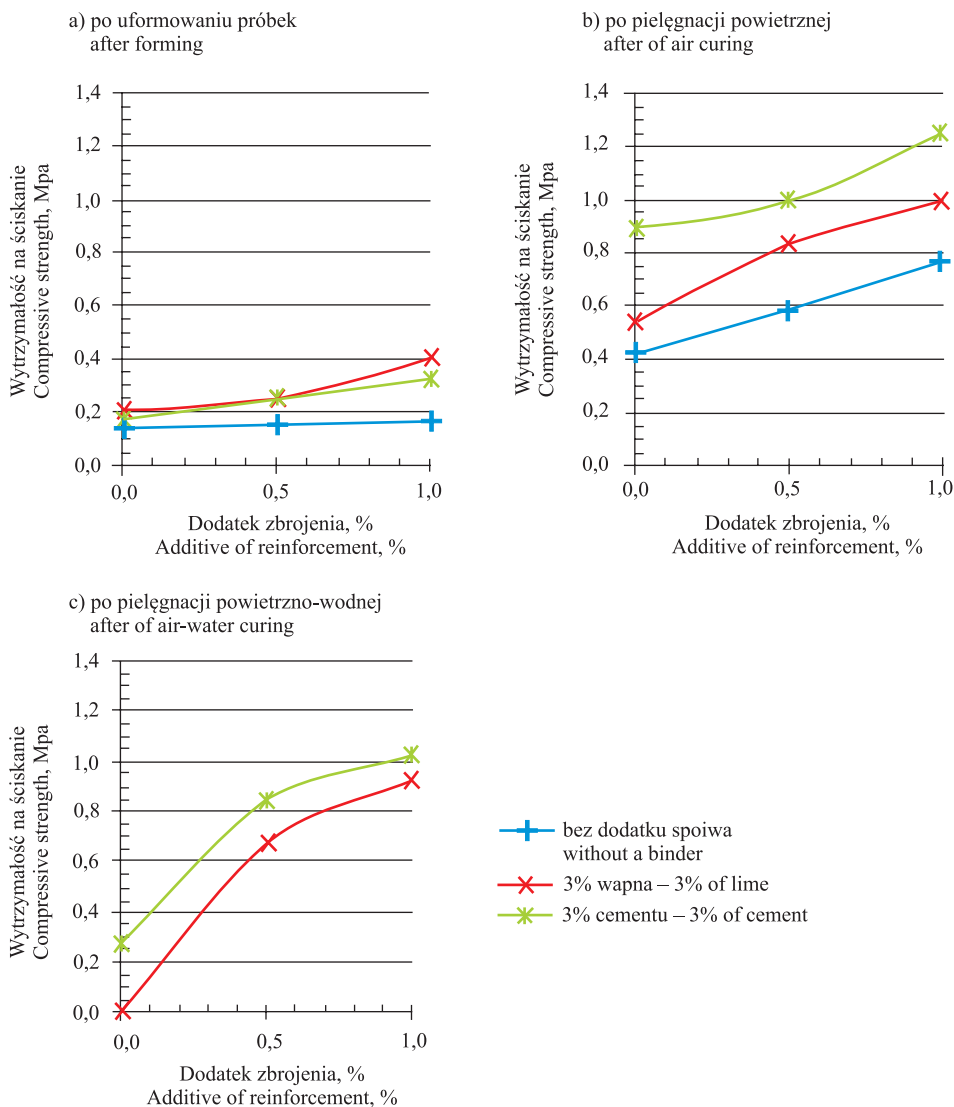
Ryc. 4. Wpływ dodatku włókien *Fibrofor High Grade* na wytrzymałość na ściskanie w zależności od zastosowanej pielęgnacji

Fig. 4. The influence of the additive of *Fibrofor High Grade* fiber on the compressive strength depending of the type of curing

Dodatek 3% cementu do popiołu lotnego, przy wzroście dodatku zbrojenia od 0 do 1% spowodował prawie 2-krotne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie w badaniach bezpośrednio po uformowaniu próbek (ryc. 4b) i były to wartości nieco niższe w stosunku do badań popiołu z dodatkiem wapna. Zastosowanie pielęgnacji powietrznej pozwoliło uzyskać 1,4-krotne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i w stosunku do próbek z wapnem było to 1,7-krotne zwiększenie w badaniach bez dodatku zbrojenia i średnio 1,3-krotne z jego dodatkiem w ilości 0,5 i 1%. Zastosowanie cementu w przypadku pielęgnacji powietrzno-wodnej nie spowodowało rozplynięcia próbek bez zbrojenia i prawie 4-krotne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie przy wzroście dodatku zbrojenia od 0 do 1%. W stosunku do wapna uzyskano zwiększenie wytrzymałości na ściskanie od 1,3- do 1,1-krotne odpowiednio do dodatku zbrojenia 0,5 i 1%.

Analizując wpływ zastosowanej pielęgnacji, stwierdzono, że największe zwiększenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do badań przeprowadzonych bezpośrednio po uformowaniu próbek (ryc. 5a) uzyskano przy pielęgnacji powietrznej – od 0,20 do 0,54 MPa w badaniach bez dodatku zbrojenia oraz od 0,40 do 0,99 MPa przy 1% dodatku zbrojenia (ryc. 5b). Natomiast w przypadku pielęgnacji powietrzno-wodnej było to również zwiększenie wytrzymałości, ale o około 10 do 15% mniejsze niż przy pielęgnacji powietrznej (ryc. 5c).

Porównując uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie, stwierdzono, że najwyższe wartości uzyskano przy dodatku 0,5 i 1,0% zbrojenia i 3% dodatku cementu po 7-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej. Najniższe jej wartości uzyskano przy dodatku 3% obydwu spoiw w badaniach bezpośrednio po uformowaniu próbek.



Ryc. 5. Wpływ zastosowanej pielęgnacji i dodatku spoiwa na wytrzymałość na ściskanie próbek z dodatkiem włókien *Fibrofor High Grade*

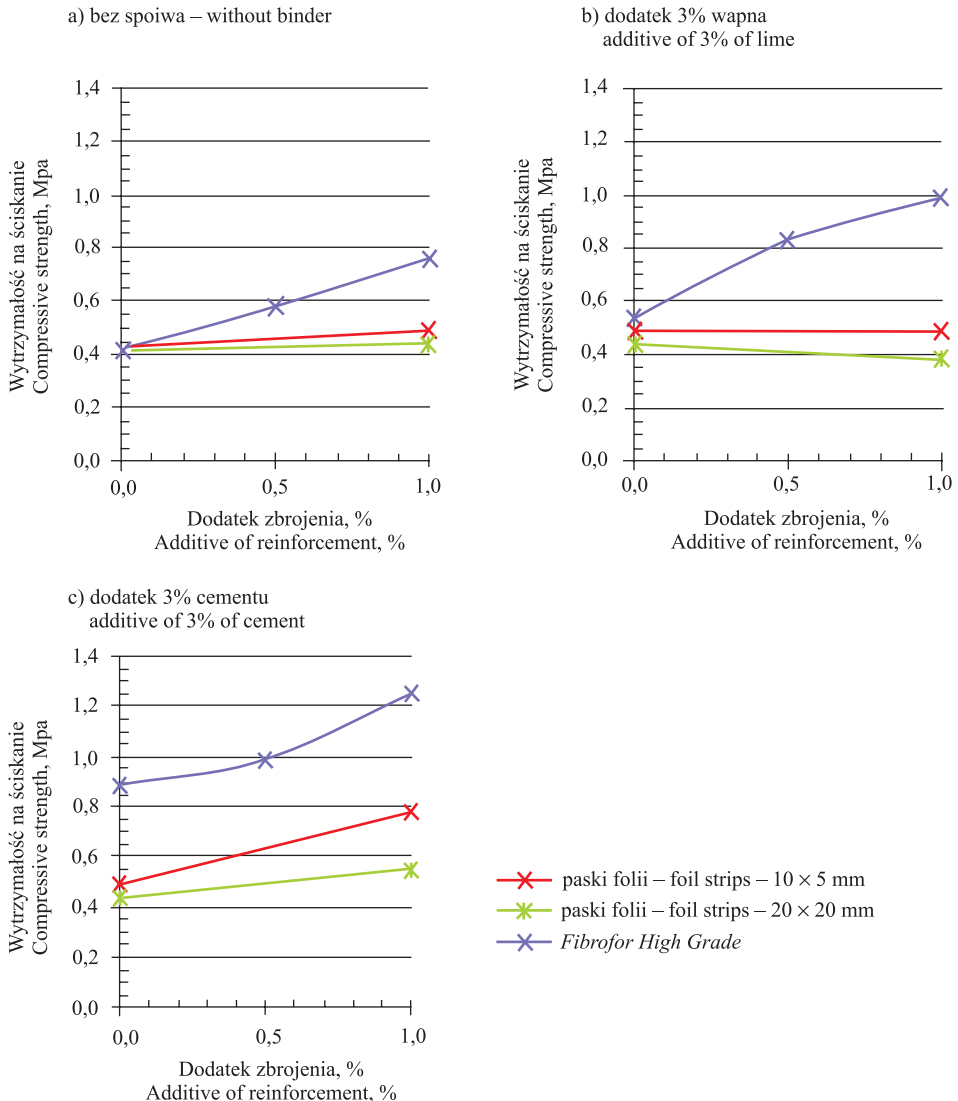
Fig. 5. The influence of the binder addition and curing type on the compressive strength of the samples with *Fibrofor High Grade* fiber

Porównanie wyników badań dla obydwu rodzajów zbrojenia

Porównując wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskane przy pielęgnacji powietrznej dla obydwu rodzajów zbrojenia, można stwierdzić, że dodatek włókien *Fibrofor High Grade* do popiołu lotnego pozwolił uzyskać istotnie wyższą wytrzymałość w stosunku do

zbrojenia w postaci folii. Zależność ta była obserwowana w badaniach zarówno bez, jak i z dodatkiem spoiwa hydraulicznego.

W badaniach bez dodatku spoiwa z 1% dodatkiem zbrojenia w postaci włókien *Fibrofor High Grade* uzyskano zwiększenie wytrzymałości na ściskanie średnio o 0,30 MPa w stosunku do popiołu lotnego z dodatkiem folii (ryc. 6a).



Ryc. 6. Wpływ dodatku spoiwa hydraulicznego i zbrojenia na wytrzymałości na ściskanie popiołu lotnego przy pielęgnacji powietrznej

Fig. 6. The influence of the binder and fiber reinforcement on the compressive strength of the fly ash after air curing

Wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego z 3% dodatkiem wapna była wyższa przy zastosowaniu zbrojenia włóknami *Fibrofor High Grade* o około 0,50 do 0,63 MPa w stosunku od badań z folią o wymiarach odpowiednio 10×5 i 20×20 mm (ryc. 6b). W badaniach z dodatkiem cementu i zbrojenia w postaci włókien *Fibrofor High Grade* uzyskano zwiększenie wytrzymałości na ściskanie od 0,47 do 0,70 MPa w stosunku do badań ze zbrojeniem w postaci folii (ryc. 6c). Największe zwiększenie, bo 2-krotne, stwierdzono w stosunku do zbrojenia folią o wymiarach 20×10 i 20×20 mm oraz 1,5-krotne przy zbrojeniu folią o wymiarach 10×5 i 10×10 mm.

WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Stosując jako zbrojenie paski folii, najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskano dla najmniejszego ich wymiaru. Wzrost wymiarów pasków spowodował zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie popiołu lotnego.
2. Dodatek zbrojenia rozproszonego w postaci włókien *Fibrofor High Grade* spowodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie popiołu lotnego. Wpływ zbrojenia był różny i zależał od przyjętej wielkości jego dodatku i zastosowanego spoiwa hydraulicznego.
3. Zbrojenie popiołu lotnego włóknami *Fibrofor High Grade* okazało się znacznie lepszym rozwiązaniem w porównaniu z paskami folii. Uzyskano co najmniej 2-krotnie większą wytrzymałość na ściskanie w badaniach ze zbrojeniem włóknami *Fibrofor High Grade* w stosunku do badań z paskami folii.
4. Wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego z dodatkiem cementu portlandzkiego była wyraźnie wyższa niż przy dodatku wapna hydratyzowanego.

PIŚMIENNICWO

- Filipiak, J. (2011). Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszaną popiołowo-cementową. *Rocz. Ochr. Środ.*, 13, 1043–1054.
- Galos, K., Uliasz-Bocheńczyk, A. (2005). Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospod. Surow. Mineral.*, 21(1), 23–40.
- Gruchot, A., Sieczka, P. (2013). Wpływ zbrojenia rozproszonego na właściwości geotechniczne popiołu lotnego. *Drogownictwo*, 7–8, 241–246.
- Gruchot, A., Zydroń, R., Gałowicz, E. (2015). Parametry wytrzymałościowe fluidalnego popiołu lotnego z Elektrowni „Połaniec”. *Ann. Set Environm. Protec.*, 17, 498–518.
- Hycnar, J. (2009). EUROCOALASH – weryfikacja popiołów lotnych ze spalania węgla. *Energetyka*, 1, 48–53.
- Jarominiak, A. (1999). *Lekkie konstrukcje oporowe*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Kasprzyk, K., Pietrakowski, P. (2003). Wykorzystanie popiołów lotnych w gospodarce. Zakład Spalania i Detonacji, www.spalanie.pwr.wroc.pl.
- Materiały informacyjne Fibrofor (2011). Chem-Tech.
- Pawłowski, A., Garlikowski, D., Orzeszyna, H., Lejcuś, K. (2008). Możliwość wykorzystania zbrojenia rozproszonego do poprawy właściwości gruntów. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 9, 137–146.

- PN EN-ISO-14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Cz. 2: Zasady klasyfikacji.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- Pyssa, J. (2005). Odpady z energetyki – przemysłowe zagospodarowanie odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospod. Surow. Mineral.*, 21(3), 83–91.
- Zawisza, E., Gruchot, A., Michalski, P. (2006). Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie. *Inżyn. Morska Geotech.*, 1–2, 22–30.
- Zawisza, E., Zydroń, T. (2004). Badania wpływu zagęszczenia i wilgotności na wytrzymałość na ścinanie popiołów lotnych. XI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”. Wydawnictwo Ekotech, 255–266.

COMPRESSION STRENGTH OF FLY ASH WITH THE ADDITION OF FIBER REINFORCEMENT

Abstract. The paper presents tests results of research on the influence of fiber reinforcement on the compressive strength of fly ash from “Skawina” Power Plant stabilized with 3% addition of hydrated lime and cement. 5×10 , 10×10 , 20×10 and 20×20 mm foil strips and Fibrofor High Grade synthetic microfibers were used as a reinforcement. The results revealed that the compressive strength of fly ash with reinforcement Fibrofor High Grade fibers was 2-times higher compared to the tests with foil strips. The compressive strength of the fly ash with the addition of Portland cement was significantly higher than with the addition of hydrated lime.

Key words: fly ash, fiber reinforcement, hydraulic binding agent, compression strength.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.09.2015

Do cytowań – For citation: Gruchot, A., Michniak, D. (2015). Wytrzymałość na ściskanie popiołów lotnych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14(3), 43–54.