

WPLYW WILGOTNOŚCI I OBCIĄŻENIA NA WSKAŹNIK NOŚNOŚCI MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŻŁOWEJ

Andrzej Gruchot, Eugeniusz Zawisza, Sebastian Soliński
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Celem pracy była ocena wpływu wilgotności i obciążenia na wskaźnik nośności mieszaniny popiołowo-żużłowej pobranej ze składowiska Elektrociepłowni „Kraków”. Oznaczenie wskaźnika nośności przeprowadzono przy obciążeniu 22 i 44 N oraz bez obciążenia dla próbek bezpośrednio po ich zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasączenia wodą. Przeprowadzono również badania wskaźnika nośności mieszaniny z pojedynczą wkładką geowłókniny (PPST 100) lub geokompozytu (geosiatka ACEGrid GG20-II + geowłóknina PPST 100).

Pod względem geotechnicznym mieszaninę popiołowo-żużłową zakwalifikowano do wielofrakcyjnych piasków pylistych ze żwirem (grsiSa). Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ nasączenia wodą i obciążenia na wskaźnik nośności. Wzrost wilgotności mieszaniny po 4 dobach nasączenia w wodzie był duży i spowodował istotne zmniejszenie wskaźnika nośności. Natomiast wzrost obciążenia od 0 do 44 N spowodował zwiększenie wskaźnika nośności, szczególnie w badaniach po nasączeniu wodą. Zastosowanie wkładek z geosyntetyków, w zależności od wielkości obciążenia próbek spowodowało zmniejszenie wskaźnika nośności tak w badaniach bezpośrednio po zagęszczeniu, jak i po nasączeniu w wodzie w stosunku do mieszaniny bez wkładek.

Słowa kluczowe: mieszanina popiołowo-żużłowa, geosyntetyki, wskaźnik nośności

WSTĘP

Uboczne produkty spalania (UPS) powstające przy spalaniu węgla kamiennego i brunatnego w energetyce zawodowej coraz częściej postrzegane są jako substytut surowców mineralnych, możliwy do wykorzystania w różnych gałęziach gospodarki takich jak drogownictwo, górnictwo, rolnictwo oraz przemysł cementowy. W budownic-

Adres do korespondencji – Corresponding Authors: dr hab. inż. Andrzej Gruchot, dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza, prof. UR, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 24-28, 30-059 Kraków; e-mail: rmgrucho@cyf-kr.edu.pl; mgr inż. Sebastain Soliński, Absolwent Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie; e-mail: sebastiansolinski@interia.pl

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

twie drogowym stosuje się je do budowy nasypów drogowych oraz podbudowy, a także do stabilizacji nawierzchni [Pachowski 2002, Batóg i Hawrysz 2010, Borowski 2010, Rudziński i Harasymiuk 2015]. W przypadku odpadów poenergetycznych drobnoziarnistych, jakimi są popioły lotne, głównym ich odbiorcą są cementownie [Giergiczny 2002, Łagosz i Grajewski 2008, Szymanek i in. 2009]. W górnictwie UPS zastępują materiały naturalne; używane są m.in. do wypełniania pustek podziemnych, uszczelnienia zrobów przed przenikaniem gazów i wody [Nowak i in. 2011]. Wykorzystuje się je także do zabezpieczenia hałd odpadów powęglowych przed pożarem [Drenda i in. 2007]. W rolnictwie popioły lotne używane są do nawożenia gleb, poprawiają ich żyzność, alkalizują gleby kwaśne, obniżają zawartość metali ciężkich [Wojcieszczuk i in. 2004]. Dotychczas przeprowadzone badania wskazują na dość duże możliwości wykorzystania odpadów energetycznych. Należy jednak wskazać, że ich wykorzystanie do celów szeroko pojętego budownictwa ziemnego wymaga rozpoznania ich właściwości geotechnicznych, na które z kolei ma wpływ rodzaj i metoda spalania węgla, ale także wilgotność i obciążenie.

Jedną z metod wzmocnienia słabonośnego podłoża jest zastosowanie geosyntetyków, których funkcje zgodnie z normą PN-EN ISO 10318:2007 można określić jako drenowanie, filtrowanie, ochrona, zbrojenie, rozdzielanie (separacja), powierzchniowe zabezpieczenie przeciwerozyjne. Wzmacnianie podłoża nawierzchni drogowych w trudnych warunkach gruntowo-wodnych pozwala na szybkie wykonanie dróg tymczasowych nieutwardzonych, dojazdowych, a także dróg szybkiego ruchu [Wesołowski i in. 2000, Alenowicz 2009]. Ponadto, przy ich udziale wykonuje się remonty i modernizacje użytkowanych odcinków dróg [Bugajski i Grabowski 1999].

Badania terenowe przeprowadzone przez Fannin i Sigurdsson [1996] z wykorzystaniem tkanych geowłóknin i geosiatek pozwoliły wykazać wysoką ich skuteczność w budowie dróg nieutwardzonych na podłożach słabonośnych. Badania te były przeprowadzone w oparciu o statyczne obciążenia płytą z uwzględnieniem wpływu geosyntetyków i grubości podłoża na wielkość jego deformacji. Były również prowadzone badania wskaźnika nośności CBR gruboziarnistych gruntów sypkich z wykorzystaniem pojedynczej lub kilku wkładek geowłókniny lub geosiatki [Naeini i Mirzakhanlari 2008, Kumar i Rajkumar 2012], a także glin o małej lub średniej ściśliwości [Srivastava i in. 1995, Moayed i Nazari 2011, Nair i Latha 2011]. Uzyskane wyniki wskazują na celowość stosowania zabiegów wzmacniających podłoże drogowe z użyciem geosyntetyków; warstwa geowłókniny umieszczona pomiędzy nawierzchnią drogową a podłożem może znacząco zwiększyć nośność podłoża słabonośnych.

CEL I METODY BADAŃ

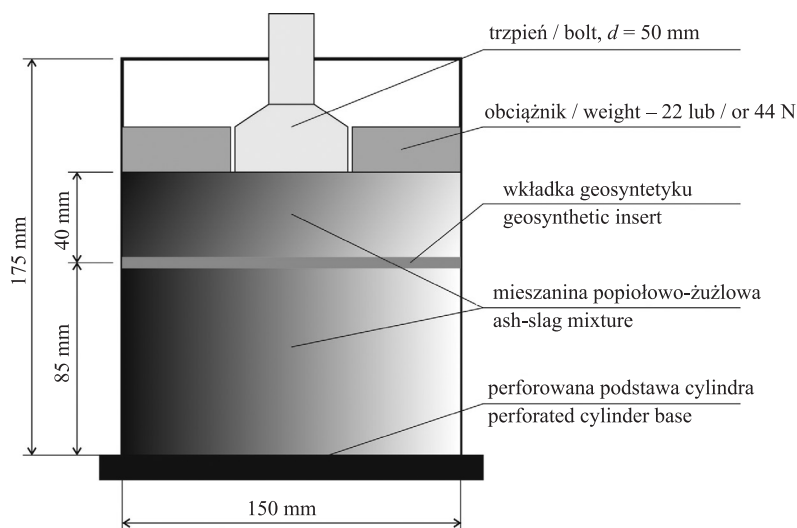
Celem badań była określenie wpływu wilgotności i obciążenia na wskaźnik nośności mieszaniny popiołowo-żużlowej pobranej ze składowiska Elektrociepłowni „Kraków”. Badania przeprowadzono w aspekcie możliwości wykorzystania przedmiotowej mieszaniny do celów budownictwa drogowego. Oznaczenie wskaźnika nośności przeprowadzono przy obciążeniu 22 i 44 N oraz bez obciążenia dla próbek bezpośrednio po ich zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasączenia wodą. Przeprowadzono również badania wskaźnika nośności mieszaniny z pojedynczą wkładką geowłókniny (PPST 100) lub geokompozytu (geosiatka ACEGrid GG20-II + geowłóknina PPST 100).

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia określono metodą łączoną, to jest 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 2,2 dm³ przy energii zagęszczania 0,59 J · cm⁻³.

Badania wskaźnika nośności wykonano w dwóch powtórzeniach zgodnie z PN-S-02205:1998 przy wilgotności (33,5%) wyznaczonej z krzywej zagęszczalności badanej mieszanki, która odpowiadała 99% wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu (1,132 g · cm⁻³). Wskaźnik nośności określono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasączenia wodą, przy penetracji trzpienia o powierzchni 20 cm² do głębokości 2,5 i 5,0 mm z prędkością 1,25 mm · min⁻¹. Jako wartość miarodajną przyjęto wyższą wartość wskaźnika nośności. W trakcie nasączenia wodą rejestrowano wielkość przyrostu wysokości próbki. Pęcznienie liniowe określono jako stosunek przyrostu wysokości do początkowej wysokości próbki i wyrażono w procentach.

Wkładkę geowłókniny układano w trakcie zagęszczania próbek na głębokości 4 cm mierzonej od górnej jej powierzchni (ryc. 1). W próbkach z wkładką geokompozytu, geosiatkę układano na geowłókninie.

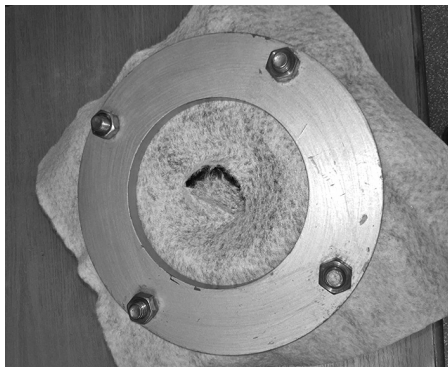
Przeprowadzono również badania wytrzymałości na przebicie i rozciąganie próbek geowłókniny oraz geokompozytu w stanie suchym i po 4-dobach nasączenia w wodzie. Badania wytrzymałości na przebicie trzpieniem o powierzchni 20 cm² przy prędkości jego penetracji 10 mm · min⁻¹ wykonano w nadstawce na cylinder do badania wskaźnika nośności, która zapewniała odpowiedni jej naciąg (ryc. 2) zgodnie z PN-EN ISO 12236:2007. Badanie wytrzymałości geosyntetyków na rozciąganie wykonano na próbkach o wymiarach 10 × 20 cm przy prędkości 20 mm · min⁻¹. Próbkę geosiatki w przeprowadzonych badaniach składała się z 4 pasm pionowych oraz 7 poziomych.



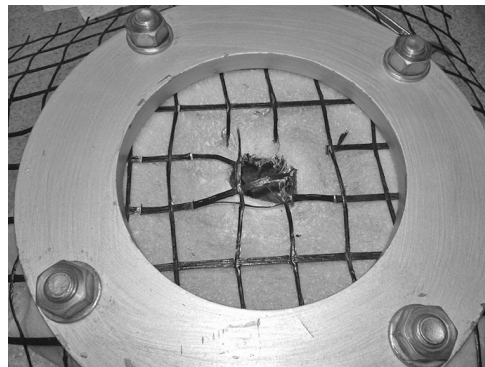
Ryc. 1. Schemat próbki do badań wskaźnika nośności z wkładką geosyntetyku

Fig. 1. Scheme of the test sample of CBR ratio with insert geosynthetic

a) próbka geowłókniny – nonwoven geotextile sample



b) próbka geokompozytu – geocomposite sample



Ryc. 2. Próbkki geosynteków po badaniu wytrzymałości na przebicie (fot. S. Soliński)
Fig. 2. Geosynthetics samples after puncture strength test (photo S. Soliński)

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW

Według nomenklatury geotechnicznej mieszanka popiołowo-żużlowa odpowiadała wielofrakcyjnym piaskom pylastym ze żwirem (grsiSa) [PN-EN-ISO-14688-2:2006]. Zawartość frakcji piaskowej była dominująca i wynosiła 50%, pyłowej było 28%, żwirowej 21%, a ilowej 1% (tab. 1). Gęstość właściwa szkieletu mieszanki wynosiła $2,42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu wynosiła $1,14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, przy wilgotności optymalnej nieco ponad 36%. Ważniejsze parametry techniczne zastosowanych w badaniach geosyntetyków zestawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Wartości parametrów geotechnicznych mieszanki popiołowo-żużlowej
Table 1. Geotechnical characteristics of the ash-slag mixture

Parametr – Parameter	Wartość – Value
Zawartość frakcji – Fraction content, %:	
• żwirowa – gravel, 63–2 mm	20,6
• piaskowa – sand, 2–0,063 mm	50,3
• pyłowa – silt, 0,063–0,002 mm	28,2
• ilowa – clay, < 0,002 mm	0,9
Rodzaj gruntu wg – Soil type acc. to PN-EN ISO 14688-2:2006	grsiSa (piasek pylasty ze żwirem)
Wskaźnik różnoziarnistości – Uniformity coefficient, –	17,1
Wskaźnik krzywizny uziarnienia – Curvature coefficient, –	1,42
Gęstość właściwa szkieletu – Density of solid particles, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,42
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu – Maximum dry density of solid particles, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,143
Wilgotność optymalna – Optimum moisture content, %	36,4

Tabela 2. Parametry techniczne geosyntetyków
Table 2. Technical parameters of geosynthetics

Parametr – Parameter	Jednostka Unit	Geowłóknina Nonwoven geotextile PPST 100 ¹⁾	Geosiatka Cell geogrid ACEGrid GG20- II ²⁾
		Wartość – Value	
Materiał – Material			PET powleczony PVC
Masa jednostkowa – Mass per unit area	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	100	
Grubość – Thickness	mm	0,55	
Wymiary pojedynczego oczka Aperture size	mm	–	27 × 28
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	7,0	20
Wydłużenie przy zerwaniu Elongation at max load	%	55,0	≤ 10
Wytrzymałość na przebicie statyczne Static puncture resistance	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	1,2	
Odporność na przebicie dynamiczne Dynamic puncture resistance	mm	38,0	
Prędkość przepływu wody Permability normal to the plane	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	125,0	
Charakterystyczny rozmiar porów Characteristic opening size	μm	120,0	

¹⁾za – after Geodren PPST, ²⁾za – after ACE Geosynthetics

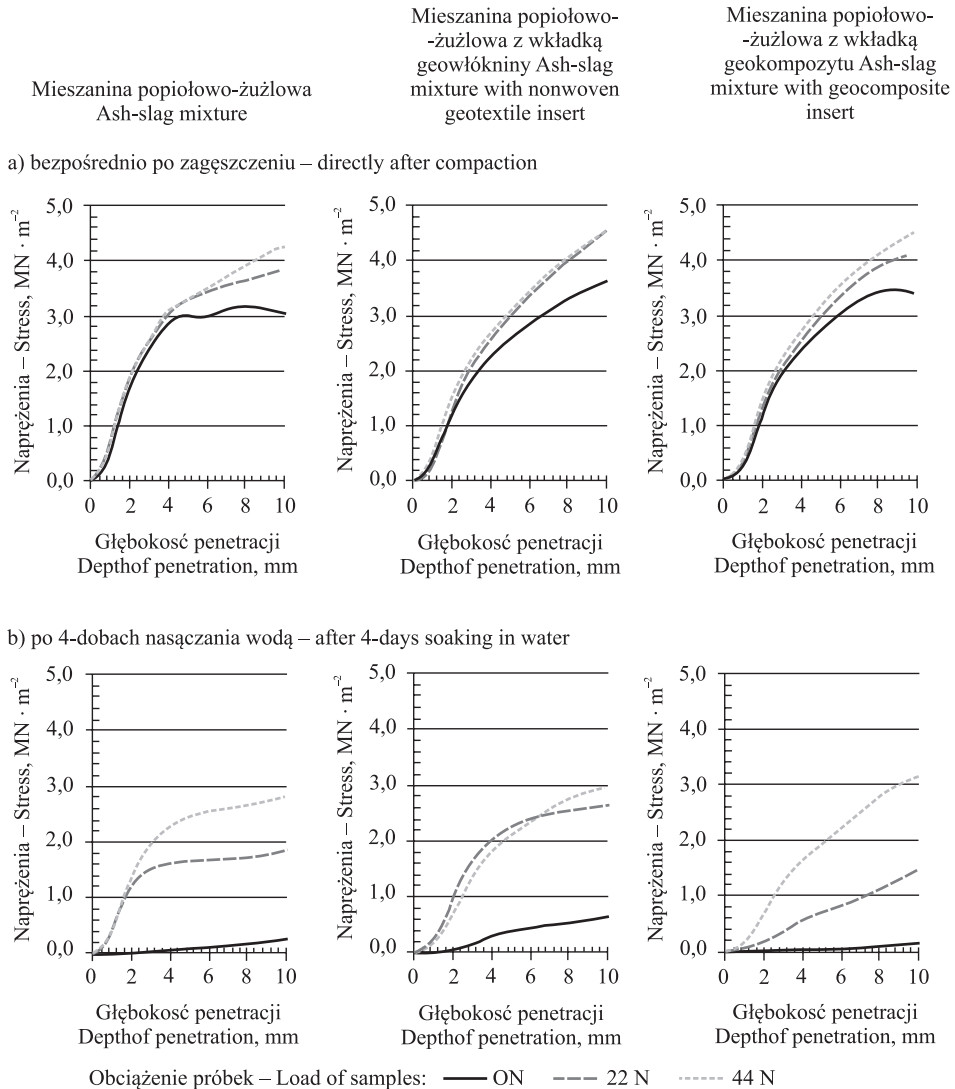
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wskaźnik nośności

Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów penetracji trzpienia (ryc. 3) oraz średnich wartości wskaźnika nośności (tab. 3, ryc. 4 i 5). Wskazują one na istotny wpływ wilgotności i obciążenia próbek na wartości naprężenia pod trzpieniem oraz wskaźnika nośności. W znacznie mniejszym stopniu stwierdzono wpływ wkładek geosyntetyków na wyżej wymienione parametry.

Przy końcowej głębokości penetracji trzpienia wynoszącej 10 mm wartości naprężenia wywieranego przez trzpień na powierzchnię próbek badanych bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosiły 3,0, 3,9 i 4,3 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ dla mieszanki popiołowo-żużlowej; 3,6, 4,6 i 4,6 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ dla mieszanki popiołowo-żużlowej z wkładką geowłókniny oraz 3,4, 4,1 i 4,5 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ dla mieszanki popiołowo-żużlowej z wkładką geokompozytu,

odpowiednio do obciążenia próbek wynoszącego 0, 22 i 44 N. W przypadku próbek badanych po 4 dobach nasączenia wodą wartości tego samego parametru były dużo mniejsze i wynosiły 0,3, 1,9 i 2,8 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ dla mieszaniny popiołowo-żużlowej; 0,6, 2,6 i 3,0 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ dla mieszaniny popiołowo-żużlowej z wkładką geowłókniny oraz 0,1, 1,5 i 3,2 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ dla mieszaniny popiołowo-żużlowej z wkładką geokompozytu odpowiednio do obciążenia próbek wynoszącego 0, 22 i 44 N.



Ryc. 3. Wykresy penetracji trzpienia

Fig. 3. The bolt penetration graphs

Tabela 3. Wartości średnie wilgotności, wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego badanych materiałów

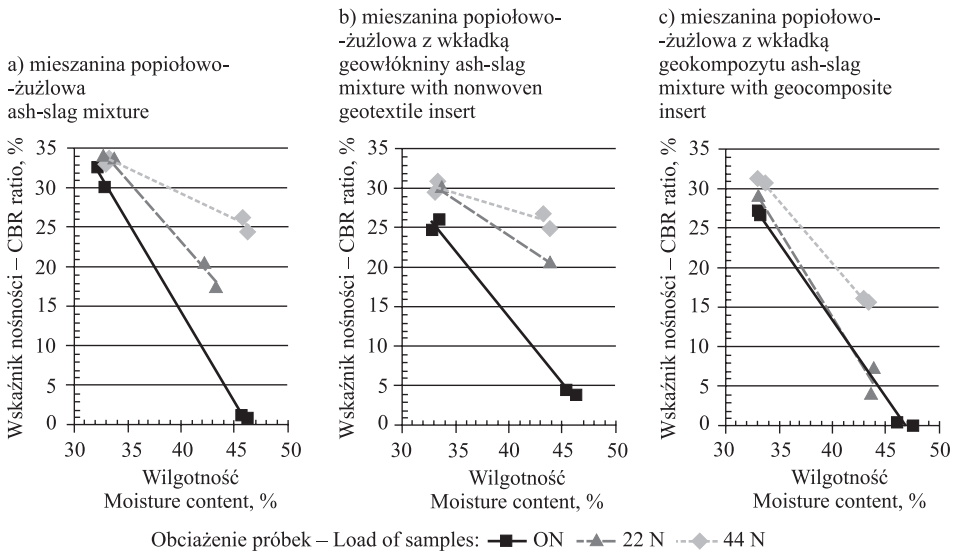
Table 3. Mean values of moisture content, CBR ratio and linear swelling of the tested materials

Materiał Material	Obciążenie Load	Czas nasączenia wodą Time of soaking water	Wilgotność w strefie penetracji trzczenia Moisture content in the bolt penetration zone	Wskaźnik nośności CBR ratio	Pęcznienie liniowe Linear swelling
		N	doby days	%	
Mieszanka popiołowo- -żużlowa Ash-slag mixture	0	0	32,4	31,6	
		4	45,8	1,1	4,67
	22	0	33,2	33,7	
		4	42,8	19,2	0,15
	44	0	33,0	33,6	
		4	45,9	25,5	0,04
Mieszanka popiołowo- -żużlowa z wkładką geowłókniny Ash-slag mixture with nonwoven geotextile insert	0	0	33,1	25,3	
		4	45,9	4,0	3,95
	22	0	33,4	30,0	
		4	43,9	20,6	0,29
	44	0	33,2	30,1	
		4	43,5	25,9	0,13
Mieszanka popiołowo- -żużlowa z wkładką geokompozytu Ash-slag mixture with geocomposite insert	0	0	33,0	27,0	
		4	46,7	0,2	6,67
	22	0	33,0	29,2	
		4	43,7	5,9	0,76
	44	0	33,4	30,9	
		4	43,1	15,8	0,87

Analizując wpływ zmian wilgotności po 4-dobowym nasączeniu wodą oraz obciążeniu próbek, stwierdzono, że:

- dla próbek bez obciążenia wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosił ponad 32% dla mieszanki popiołowo-żużlowej; dla mieszanki z wkładką geowłókniny lub geokompozytu był mniejszy i wynosił odpowiednio 25 i 27%. Po nasączeniu wodą wilgotność wzrosła o 13%, a wskaźnik nośności zmniejszył się i wynosił ponad 1% dla mieszanki popiołowo-żużlowej oraz 4 i 0,2% odpowiednio dla mieszanki z wkładką geowłókniny lub geokompozytu (rys. 4a). Podane wartości wskazują, że mieszanka popiołowo-żużlowa zarówno bez jak i z wkładkami geosyntetyków prawie całkowicie utraciła nośność po nasączeniu wodą,

- dla próbek przy obciążeniu 22 N wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosił blisko 34% dla mieszanki popiołowo-żużlowej; dla mieszanki z wkładką geowłókniny lub geokompozytu był mniejszy i wynosił odpowiednio 30 i 29% (rys. 4b). Wzrost wilgotności po 4-dobowym nasączeniu wyniósł 10%, a wskaźnik nośności zmniejszył się i dla mieszanki popiołowo-żużlowej wynosił 19% oraz blisko 21 i 6% dla mieszanki odpowiednio z wkładką geowłókniny i geokompozytu,
- dla próbek przy obciążeniu 44 N wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosił blisko 34% dla mieszanki popiołowo-żużlowej (rys. 4c), a dla mieszanki z wkładką geosyntezyków średnio nieco ponad 30%. Wilgotność po nasączeniu w wodzie wzrosła o blisko 10–13%, a wskaźnik nośności zmniejszył się i wynosił około 26% dla mieszanki popiołowo-żużlowej oraz około 26 i 16% odpowiednio dla mieszanki z wkładką geowłókniny lub geokompozytu.



Ryc. 4. Wpływ wilgotności w strefie penetracji trzpienia na wskaźnik nośności badanych materiałów

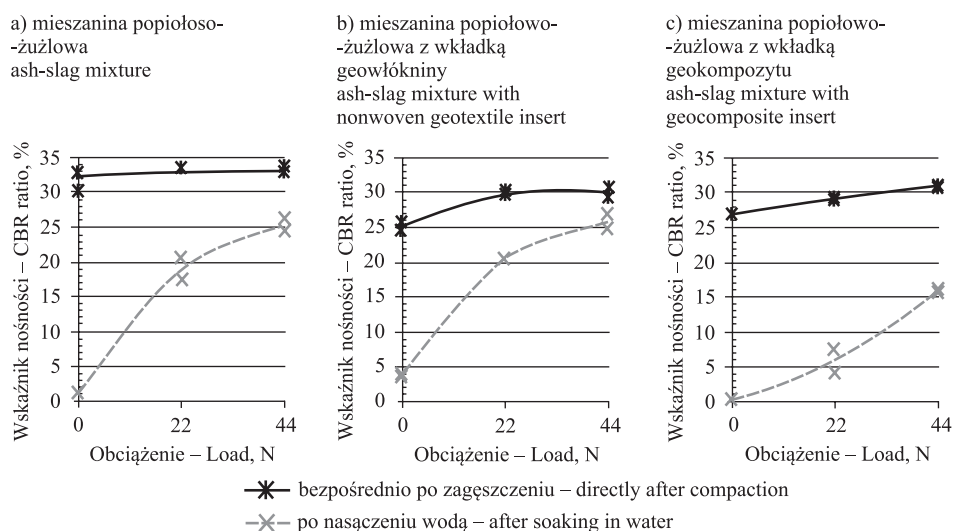
Fig. 4. Influence of moisture content in the bolt penetration zone on the CBR ratio of tested materials

Na podstawie powyższych danych można stwierdzić bardzo duży wpływ zwiększenia wilgotności po 4 dobach nasączenia wodą na zmniejszenie wskaźnika nośności – mieszanka popiołowo-żużłowa przy braku obciążenia praktycznie utraciła nośność, podobnie jak mieszanka z wkładką geokompozytu; jedynie mieszanka z wkładką geowłókniny wykazała nieduże wartości wskaźnika nośności (4%). Wzrost obciążenia od 0 do 44 N spowodował następujące zwiększenie wskaźnika nośności:

- dla próbek mieszanki popiołowo-żużlowej w badaniach bezpośrednio po ich zagęszczeniu od 32 do 34%, a po 4 dobach nasączenia wodą od nieco ponad 1 do 26% (ryc. 5a);

- dla próbek mieszanki z wkładką geowłókniny badanych bezpośrednio po ich zagęszczeniu od 25 do 30%, a po 4 dobach nasączenia wodą od 4 do 26% (ryc. 5b);
- dla próbek mieszanki z wkładką geokompozytu badanych bezpośrednio po ich zagęszczeniu od 27 do 31%, a po 4 dobach nasączenia wodą od 0,2 do 16% (ryc. 5c).

Podobną zależność dla mieszanki popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” uzyskali Gruchot i Wójtowicz [2014]. W tym przypadku również wzrost obciążenia próbek z 22 do 44 N spowodował zwiększenie wskaźnika nośności, które w badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu było nieznaczne bo o około 2 do 3%. Natomiast dla próbek po 4-dobowym nasączeniu wodą uzyskano zwiększenie o ponad 9% dla próbek formowanych przy wilgotności optymalnej, a dla próbek formowanych przy wilgotności mniejszej i większej od optymalnej – od nieco ponad 1 do 3%. Wskazuje to, że przy właściwym odizolowaniu od wody mieszanki popiołowo-żużlowej, ciężar konstrukcji nawierzchni drogowej powinien zapewnić zachowanie właściwej nośności podłoża wykonanego z mieszanki popiołowo-żużlowej.



Ryc. 5. Wpływ obciążenia na wskaźnik nośności badanych materiałów

Fig. 5. Influence of loading on the CBR ratio of the tested materials

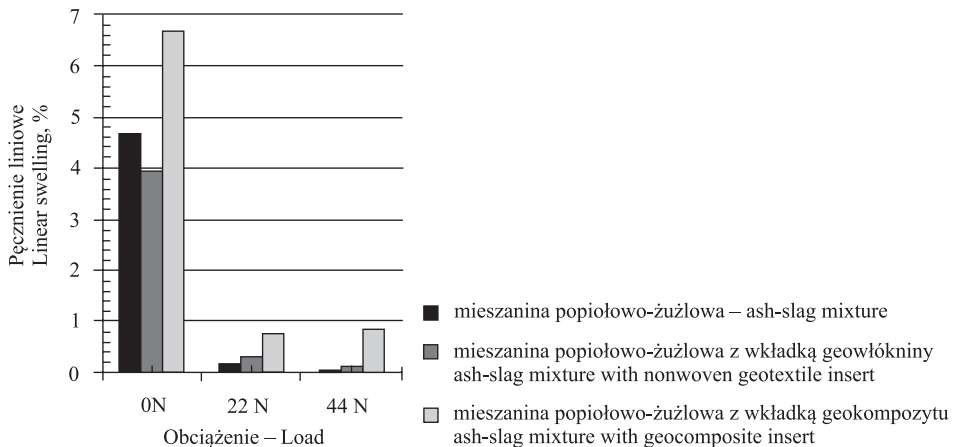
W przeprowadzonych badaniach wyższe wartości wskaźnika nośności uzyskano dla mieszanki popiołowo-żużlowej bez wkładek geosyntetyków. W badaniach bezpośrednio po zagęszczeniu próbek były to wartości wyższe o około 4 do 5% w stosunku do badań z wkładkami geosyntetyków. Natomiast wartości wskaźnika nośności mieszanki z obydwojoma rodzajami geosyntetyków były podobne. Po 4 dobach nasączenia wodą jedynie w przypadku badań z wkładką geowłókniny stwierdzono nieznaczne wzmocnienie mieszanki, ponieważ wskaźnik nośności był od około 1 do 3% wyższy w stosunku do badań mieszanki bez wkładki oraz od 4 do 15% w stosunku do badań z wkładką geokompozytu. Należy wskazać, że badania prowadzone przez Naeini i Mirzakhani [2008] dla trzech gruntów sypkich z jedną, dwoma i trzema wkładkami geowłókniny

wykazały, że w przypadku gruntów, dla których stwierdzono duży wskaźnik nośności, brak jest dodatkowego wzmocnienia w wyniku zastosowania wkładki geosyntezy. Natomiast grunty o mniejszym wskaźniku nośności wykazały istotny wpływ pojedynczej wkładki geosyntezy na poprawę ich nośności [Naeini i Mirzakanlari 2008]. Dlatego w odniesieniu do badanej mieszanki popiołowo-żużlowej, której wskaźnik nośności w badaniach bezpośrednio po zagęszczeniu był stosunkowo duży, stosowanie geosyntezy może być celowe w przypadku zabezpieczenia przed dostępem wody. Jak wykazano był to główny czynnik zmniejszający wskaźnik nośności przedmiotowego materiału.

Pęcznienie liniowe

Pęcznienie liniowe wahało się średnio od nieco ponad 0% (mieszanka popiołowo-żużlowa bez wkładki geosyntezy przy obciążeniu 44 N) do blisko 7% (mieszanka z wkładką geokompozytu bez obciążenia). Największy przyrost pęcznienia liniowego obserwowano pomiędzy pierwszą, a drugą dobą badania, a w kolejnych dobach obserwowano nieznaczny jego przyrost lub stabilizację.

Największe wartości pęcznienia liniowego od blisko 4 do 7% obserwowano dla próbek mieszanki popiołowo-żużlowej oraz mieszanki z wkładką geowłókniny lub geokompozytu bez obciążenia (ryc. 6). Przy obciążeniu 22 N wartości pęcznienia wahały się od 0,1 do 0,8% odpowiednio dla mieszanki bez i z wkładką geowłókniny lub geokompozytu. Najmniejsze wartości pęcznienia stwierdzono dla próbek o obciążeniu 44 N, które wynosiły od 0,04 do około 0,9% odpowiednio dla mieszanki popiołowo-żużlowej i mieszanki z wkładką geokompozytu. Tak więc wzrost obciążenia od 0 do 44 N spowodował znaczne zmniejszenie wartości pęcznienia liniowego.



Ryc. 6. Wpływ obciążenia na pęcznienie liniowe badanych materiałów

Fig. 6. Influence of loading on the linear swelling of the tested materials

Wytrzymałość geosyntetyków na przebicie i rozciąganie

Wytrzymałość na przebicie próbek geowłókniny wynosiła średnio $519 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ (tab. 4), a próbek po 4-dobym nasączeniu w wodzie wynosiła średnio $566 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ i była wyższa o około 9% od wytrzymałości próbek suchych. Utrata wytrzymałości na przebicie próbek suchych była natychmiastowa, a w przypadku próbek nasączonych wodą po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości, jej wartość stopniowo zmniejszała się. Można więc stwierdzić, że nasączenie geowłókniny wodą spowodowało, iż była ona bardziej elastyczna, a tym samym cechowała się większą wytrzymałością na przebicie. Wytrzymałość na rozciąganie geowłókniny wynosiła średnio $4,9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ przy wydłużeniu 60 mm. W przypadku badań po 4-dobowym nasączeniu wodą stwierdzono większą wytrzymałością na rozciąganie geowłókniny, która wynosiła średnio $5,5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ przy wydłużeniu 63 mm.

Wartość wytrzymałości na przebicie próbek geokompozytu wynosiła średnio $876 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, a po 4-dobach nasączenia $988 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ i była wyższa o około 12% od wytrzymałości próbek suchych. W porównaniu z badaniami geowłókniny wytrzymałość na przebicie geokompozytu była większa ponad półtorakrotnie w przypadku próbek suchych i blisko dwukrotnie dla próbek po nasączeniu wodą. Wytrzymałość na rozciąganie próbek geokompozytu wynosiła średnio $13,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, a po 4 dobach nasączenia wodą $11,4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$. Uzyskane wartości wskazują, że wytrzymałość na rozciąganie geokompozytu po 4-dobowym nasączeniu wodą była o ponad 17% mniejsza od wartości dla próbek suchych.

Tabela 4. Wytrzymałość na przebicie i rozciąganie badanych wkładek geosyntetyków
Table 4. Puncture resistance and tensile strength of tested geosynthetic inserts

Geosyntetyk – Geotextile		Geowłóknina Nonwoven geotextile		Geokompozyt Geocomposite	
Czas nasączenia wodą – Time of soaking in water, doby – days		0	4	0	4
Wytrzymałość na przebicie Puncture resistance, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	średnia mean	519	566	876	988
	zakres range	485–540	510–635	795–1015	830–1110
Wytrzymałości na rozciąganie Tensile strength, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	średnia mean	4,9	5,5	13,8	11,4
	zakres range	4,7–5,4	5,1–6,1	12,0–15,2	9,6–14,6

WNIOSKI

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła stwierdzić, że:

1. Wartość wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żuźlowej oznaczona bezpośrednio po zagęszczeniu próbek nieobciążonych była stosunkowo duża. Nasączenie próbek wodą spowodowało znaczny wzrost wilgotności i zmniejszenie wskaźnika nośności do wartości bliskich zeru, świadczące o utracie nośności.

2. Wzrost obciążenia od 0 do 44 N spowodował zwiększenie średnio o 4% wartości wskaźnika nośności oznaczonych bezpośrednio po zagęszczeniu próbek oraz od 16 do 25% po ich nasączeniu wodą.
3. Wartości wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żużlowej z wkładkami geosyntetyków były mniejsze niż samej mieszaniny szczególnie w przypadku mieszaniny z wkładkami geokompozytu. Można wnosić, że w przypadku badanej mieszaniny stosowanie geosyntetyków może być celowe przy zabezpieczeniu przed dostępem wody.
4. Pęcznienie liniowe nieobciążonych próbek zarówno mieszaniny popiołowo-żużlowej, jak i mieszaniny z wkładkami geosyntetyków było duże. Obciążenie próbek spowodowało bardzo duże ograniczenie pęcznienia do wartości mniejszych od określonych w odnośnych normach jako dopuszczalne dla mieszanin popiołowo-żużlowych stosowanych do celów budownictwa drogowego.
5. Wytrzymałość na przebicie i rozciąganie geokompozytu złożonego z geowłókniny i geosiatki była większa niż samej geowłókniny. Na podkreślenie zasługuje fakt, że nasączenie próbek w wodzie spowodowało zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i przebicie geowłókniny oraz zwiększenie wytrzymałości na przebicie i zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie geokompozytu.

PIŚMIENNICTWO

- ACE Geosynthetics, ACEGrid Biaxial Geogrid. Karta katalogowa, pobrana z www.geoace.com, grudzień 2016.
- Alenowicz, J. (2009). Zastosowania i funkcje geosyntetyków w budowie dróg. Cz. 2. Geosyntetyk w funkcji zbrojącej. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 3(24), 82–87.
- Batog, A., Hawrysz, M. (2010). Przydatność mieszanek popiołowo-gruntowych do budowy nasypów komunikacyjnych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34, 2, 69–75.
- Borowski, G. (2010). Możliwość wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. *Inżyn. Ekolog.*, 22, 52-62.
- Bugajski, M., Grabowski, W. (1999). Geosyntetyki w budownictwie drogowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Drenda, J., Róžański, Z., Słota, K., Wrona, P. (2007). Zagrożenie pożarowe na zwałowiskach odpadów powęglowych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 31, 3/1, 149–157.
- Fannin, R.J., Sigurdsson, O. (1996). Field observations on stabilization of unpaved roads with geosynthetics. *ASCE J. Geotech. Engin.*, 122(7), 544–553.
- Geodren PPST, geowłókniny polipropylenowe. Karta katalogowa, pobrana z www.gunnex.pl, grudzień 2016.
- Giergiczny, Z. (2002). Popiół lotny aktywnym składnikiem cementu. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne nt. „Reologia w technologii betonu”, Gliwice.
- Gruchot, A., Wójtowicz, A. (2014). Wpływ obciążenia i wilgotności na wartości wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żużlowej ze składowiska elektrowni „Skawina”. *Przegl. Górniczy*, 4, 81-85.
- Kumar, S., Rajkumar, R. (2012). Effect of Geotextile on CBR Strenght of Unpaved Road with Soft Subgrade. *Electr. J. Geotech. Engin.*, 17, 1355–1362.
- Łagosz, A., Grajewski, R. 2008. Wpływ popiołu lotnego na trwałość betonu z cementami żużłowymi. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 41, 60–65.

- Moayed, R.Z., Nazari, M. (2011). Effect of Utilization of Geosynthetic on Reducing the Required Thickness of Subbase Layer of a Two Layered Soil. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 49, 175, 963–967.
- Naeini, S., Mirzakhani, M. (2008). The Effect of Geotextile and Grading on the Bearing Ratio of Granular Soils. *Electr. J. Geotech. Engin.*, 13, 1–10.
- Nair, A.M., Latha, G.M. (2011). Bearing Resistance of Reinforced Soil-Aggregate Systems. *Ground Improvement*, 164(2), 83–95.
- Nowak, W., Majchrzak-Kuceba, I., Majchrzak, A. (2011). Nowe kierunki zagospodarowania popiołów lotnych. Materiały XVIII Konferencji „Popioły z energetyki”, Zakopane, 37–54.
- Pachowski, J. (2002). Rozwój technologii powstawania ubocznych produktów elektrownianych oraz ich charakterystyka i możliwości zastosowań w technologiach budownictwa drogowego. *Drogi i Mosty*, 1, 59–99.
- PN EN-ISO-14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikacji. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- PN-EN ISO 10318:2007. Geosyntetyki. Terminy i definicje. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- PN-EN ISO 12236:2007. Geosyntetyki. Badanie statycznego przebiecia (metoda CBR). Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- PN-S-02205:1998]. Drogi samochodowe. Roboty zimne. Wymagania i badania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Rudziński, A., Harasymiuk, J. (2015). Badania możliwości wykorzystania popiołów krzemionkowych z wieloletniej hałdy do produkcji drobnoziarnistych mieszanek stosowanych w budownictwie drogowym. *Inżyn. Ochr. Środ.*, 18(4), 573–581.
- Srivastava, R.K., Jalota, A.V., Singh, R. (1995). Model Studies on Geotextile Reinforced Pavements. *Indian Highways*, 23(9), 31–39.
- Szymanek, A., Knaś, K., Szymańska, J. 2009. Niekonwencjonalne metody podwyższania wczesnej wytrzymałości betonów z dodatkiem popiołu lotnego jako częściowego zamiennika cementu. *Popioły z energetyki*. Zakopane, 21–24 X. Red. T. Szczygielski. ECOTECH, Szczecin, 227–243.
- Wesołowski, A., Krzywosz, Z., Brandyk, T. (2000). Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Wojcieszczuk, T., Niedźwiecki, E., Meller, E. (2004). Wpływ nawadniania i popiołu z węgla kamiennego na właściwości chemiczne gleby lekkiej. *Rocz. Glebozn.*, LV, 1, 249–255.

INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT AND LOAD ON THE ASH-SLAG MIXTURE CBR RATIO (BEARING CAPACITY INDEX)

Abstract. The study aimed at the evaluation of the effect of moisture content and load on the California bearing ratio of the ash-slag mixture collected from the landfill of the combined heat and power plant “Kraków”. Determination of the bearing capacity index (CBR ratio) was performed at the load of 22 and 44 N and without load on the samples immediately after compaction and after 4 days of soaking in water. The test of the California bearing ratio of the mixture with a single geotextile insert (PPST 100) or geocomposite (geogrid ACGrid GG20-II + PPST 100 geotextile) was also carried out.

Geotechnically, the ash-slag mixture was classified as multi-fractional silty sands with gravel (grsiSa). The conducted studies have shown the significant effect of soaking up water and load on the California bearing ratio. Increase in moisture content of the mixture after four days of soaking in water was big and caused a significant reduction in the California bearing ratio. Whereas the load increase from 0 to 44 N resulted in an increase

in the California bearing ratio, especially in the tests after soaking in water. The use of geosynthetic liners resulted in a reduction of the California bearing ratio both in the tests immediately after compaction and after soaking in water in relation to the mixture without the inserts.

Key words: ash-slag mixture, geotextiles, CBR ratio

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.09.2017

Do cytowań – For citation: Gruchot, A., Zawisza, E., Soliński S. (2017). Wpływ wilgotności i obciążenia na wskaźnik nośności mieszaniny popiołowo-żużlowej. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 16(3), 139–152.