



ANDRZEJ GRUCHOT

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



TOMASZ ŚWIGOST

Tomasz_swigost@
interia.pl

Wytrzymałość na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej oraz opór tarcia na styku mieszanki – geosyntetyk

Technologia budowy dróg jest w miarę upływu lat coraz bardziej doskonalona. Dąży się do zwiększenia nośności i żywotności nawierzchni drogowej, przy równoczesnym obniżeniu kosztów i czasu realizacji [4]. Już w czasach Imperium Rzymskiego w podłożach dróg stosowano, jako wzmocnienie, wiązki faszyny, gałęzie, sitowie, słomę i trzcinę. Dziś zastąpiono te materiały innymi, nie ulegającymi biodegradacji w gruncie – geosyntetykami [1]. Stosowanie geosyntetyków poprawia

stan techniczny, trwałość i nośność dróg. Czas ich montażu oraz łatwość wbudowywania w nasyp powodują zmniejszenie kosztów inwestycji. Wprowadzenie odpowiedniego geosyntetyku w konstrukcję podbudowy drogi często prowadzi do zmniejszenia wymaganej grubości warstwy kruszywa, co przynosi znaczne korzyści ekonomiczne. Geosyntetyki współdziałają z gruntem zwiększając jego parametry wytrzymałościowe, poprawiają również warunki gruntowo-wodne w podłożu. Są one odporne na agresywne warunki środowiskowe i nie wywierają negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Tradycyjnie stosowane w drogownictwie grunty mineralne ze względów ekonomicznych coraz częściej zastępowane są wyselekcjonowanymi odpadami przemysłowymi. Do tego typu odpadów można zaliczyć popioły lotne, mieszanki popiołowo-żużlowe i żużle konwencjonalne, które powstają podczas spalania węgla kamiennego i brunatnego. Uboczne produkty spalania (UPS) od lat stanowią surowce wykorzystywane w budownictwie drogowym przy formowaniu nasypów i ulepszaniu podłoża oraz w konstrukcji podbudów drogowych, a także do produkcji drogowych spoiw hydraulicznych [2], [5]. Zastosowanie odpadów poenergetycznych w drogownictwie ma ogromne znaczenie nie tylko z punktu widzenia ekonomicznego, ale także ekologicznego. Przemysłowe wykorzystanie popiołów i żużli z hałd przyczynia się do poprawy warunków krajobrazowych i ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko. Materiał pozyskiwany ze składowisk odpadów poenergetycznych jest tańszą alternatywą kruszywa naturalnego. Jednak zanim materiał taki zostanie uwzględniony w projekcie budowy drogi należy go poddać podstawowym badaniom geotechnicznym i określić jego parametry [3].

Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu zagęszczenia na parametry wytrzymałości na ścinanie tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności mieszanki popiołowo-żużlowej oraz na parametry oporów tarcia tj. kąta tarcia międzyfazowego i adhezję na styku układu mieszanki popiołowo-żużlowa – geosyntetyk. Oznaczono również wytrzymałość na rozciąganie zastosowanych geosyntetyków. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem mieszanki popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” oraz geosiatki ACEGrid GG80-II i geotkaniny ISGT 40/40.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład ziarnowy mieszanki określono metodą sitową (od $d \geq 0,063$ mm) oraz areometryczną (od $d < 0,063$ mm), 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 $2,2 \text{ dm}^3$ przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Badania wytrzymałości na ścinanie oraz oporów tarcia przeprowadzono, w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania, w skrzynce o wymiarach w przekroju poprzecznym $30 \times 30 \text{ cm}$. Próbkę były formowane przy wilgotności mieszanki popiołowo-żużlowej zbliżonej do optymalnej i dwóch wskaźnikach zagęszczenia, tj. $I_s = 0,90$ i $1,00$. Wysokość próbek mieszanki wynosiła $13,6 \text{ cm}$ w badaniach wytrzymałości na ścinanie oraz $6,6 \text{ cm}$ w badaniach oporów tarcia, gdzie dolną część skrzynki wypełniono drewnianą wkładką, do której przytwierdzano geosyntetyk. Między drewnianą wkładką a geosyntetykiem zastosowano podsypkę o wysokości 1 cm z przedmiotowej mieszanki. Próbkę po 30 minutach konsolidacji pod obciążeniem $110, 200$ i 300 kPa ścinano przy prędkości $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Obliczenia parametrów wytrzymałości na ścinanie i oporów tarcia przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów przy kryterium ścięcia odpowiadającym wartości maksymalnej naprężeń ścinających [7], [10].

Badania wytrzymałości na rozciąganie obydwu geosyntetyków wykonano na próbkach o wymiarach $10 \times 30 \text{ cm}$ zgodnie z zaleceniami normy [9]. Prędkość rozciągania próbek wynosiła $20 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Badania wykonano na próbkach po badaniu oporów tarcia w aparacie bezpośredniego ścinania oraz na próbkach „świeżych” (nie używanych w badaniach oporów tarcia). Celem badań było wykazanie, że w wyniku wystąpienia przesuwu mieszanki po geosyntetyku na-

stępuje utrata części jego wytrzymałości na zrywanie w stosunku do próbek „świeżych”.

Wyniki badań

Charakterystyka badanych materiałów

Według terminologii geotechnicznej [8] mieszanka popiołowo-żużlowa została sklasyfikowana jako wielofrakcyjne ($C_u = 29$) piaski pylaste (siSa). W składzie uziarnienia dominowała frakcja piaskowa w ilości około 59% (m/m), frakcji pyłowej było 24% (m/m), a ilowej 5% (m/m). Zawartość frakcji żwirowej nieznacznie przekroczyła 12% (m/m) (tab. 1).

Gęstość właściwa szkieletu wynosiła $2,54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a wilgotność optymalna nieco ponad 36%, zaś maksymalna gęstość objętościowa szkieletu $1,11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna mieszanki popiołowo-żużlowej

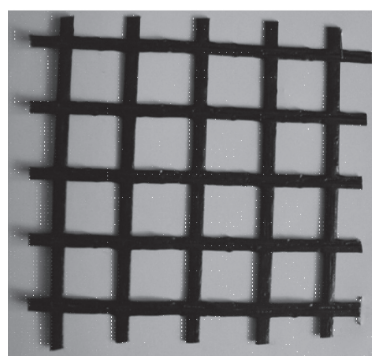
Lp.	Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
1	Zawartość frakcji: żwirowa: $63 \div 2 \text{ mm}$ piaskowa: $2 \div 0,063 \text{ mm}$ pyłowa: $0,063 \div 0,002 \text{ mm}$ ilowa: $< 0,002 \text{ mm}$	Gr Sa Si Cl	[%]	12,3 58,6 24,1 5,0
2	Nazwa wg [8]			Piasek pylasty (siSa)
3	Wskaźnik różnoziarnistości	C_u	–	29,0
4	Wskaźnik krzywizny uziarnienia	C_c	–	3,23
5	Gęstość właściwa szkieletu	ρ_s	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$	2,54
6	Wilgotność optymalna	w_{opt}	[%]	36,1
7	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	ρ_s	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$	1,11

Tabela 2. Właściwości techniczne geosyntetyków [6]

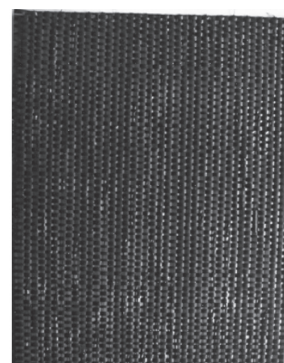
Parametr	Jednostka	Geosiatka ACEGrid GG80-II	Geotkanina ISGT 40/40
Materiał	[-]	PET pokryty PCW	Polipropylen (PP)
Wytrzymałość na rozciąganie: wzdłuż/wszerz	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}]$	80/80	44 (-4)/42 (-3)
Wydłużenie przy zerwaniu: wzdłuż/wszerz	[%]	≤ 10	16 (± 1)/8,3 ($\pm 2,4$)
Siła przejmwana przy wydłużeniu 2%/5%	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}]$	$\geq 20/\geq 40$	
Masa powierzchniowa	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$	450	198 ($\pm 7\%$)
Wymiar oczek: wzdłuż/wszerz $\pm 20\%$	[mm]	23/25	–
Odporność na przebicie dynamiczne	[mm]	–	7,4 (+2,2)
Odporność na przebicie statyczne CBR	[kN]	–	6 (-0,1)
Wodoprzepuszczalność	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	–	$6,8 \times 10^{-3}$
Umowny wymiar porów	$[\mu\text{m}]$	–	140 (± 25)

Geosiatka ACEGrid GG80-II (fot. 1) wykonana jest z krzyżujących się włókien PET¹ powleczonej PCW², które gwarantują dużą wytrzymałość na rozciąganie ($80 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$) i zdolność do wydłużenia, a przede wszystkim odporność na agresywne warunki środowiska i promienie słoneczne (tab. 2). Geotkanina ISGT 40/40 (fot. 1) jest geosyntetykiem dwukierunkowym i wykonana jest z włókien polipropylenowych (PP) charakteryzujących się dużą sprężystością, wytrzymałością i odpornością chemiczną (tab. 2). Jest ona wodoprzepuszczalna i może być stosowana do separacji różnych warstw gruntu [6].

Geosiatka ACEGrid GG80-II



Geotkanina ISGT 40/40



Fot. 1. Geosyntetyki wykorzystane w badaniach (fot. T. Świągost)

Wytrzymałość na ścinanie i opór tarcia międzyfazowego

Wartości kąta tarcia wewnętrznego wahały się od około 27 do 34° , a spójności od około 16 do 31 kPa (tab. 3). Średnie zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego wynosiło ponad 5° , a spójności 5 kPa wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do $1,00$ (rys. 1).

Wartości kąta tarcia międzyfazowego na styku układu mieszanki popiołowo-żużlowa – geosiatka wahały się w zakresie od ponad 28 do 34° , a adhezji od 17 do około 31 kPa (tab. 3). W przypadku układu mieszanki popiołowo-żużlowa – geotkanina wartości kąta tarcia międzyfazowego wahały się w zakresie od 30 do 37° , a adhezji od 7 do 12 kPa .

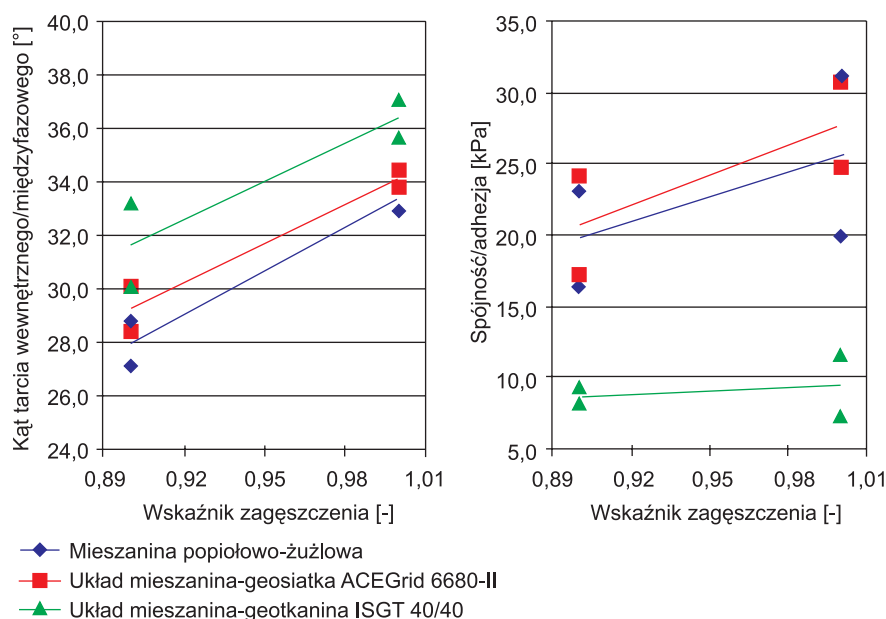
Analizując wpływ zagęszczenia na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej oraz oporów tarcia stwierdzono ich zwiększenie wraz z jego wzrostem. Jedynie w przypadku adhezji w układzie: mieszanka – geotkanina takiej zależności nie stwierdzono. Średnie wartości kąta tarcia międzyfazowego na styku mieszanki popiołowo-żużlowa – geosiatka zwiększyły się o 5° , a adhezji o 7 kPa wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do $1,00$ (rys. 1). W przypadku średnich wartości kąta tarcia międzyfazowego na styku mieszanki popiołowo-żużlowa – geotkanina uzyskano zwiększenie jego wartości o ponad 4° i pomijalnie małe zwiększenie adhezji (1 kPa) wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia (rys. 1).

¹ Poli(tereftalan etylenu), $(C_{10}H_8O_4)_n$ (PET) – polimer z grupy poliestrów, otrzymywany na drodze polikondensacji z tereftalanu dimetylowego (DMT) i glikolu etylenowego (GE), gęstość $1,370 \text{ g}/\text{cm}^3$.

² Poli(chlorek winylu) – tworzywa sztuczne otrzymywane w wyniku polimeryzacji monomeru – chlorku winylu.

Tabela 3. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej i opór tarcia międzyfazowego zastosowanych układów

Wskaźnik zagęszczenia I_s [-]	Mieszanka popiołowo-żużlowa				Układ mieszanki – geotkanina ACEGrid GG80-II				Układ mieszanki – geotkanina ISGT 40/40			
	Kąt tarcia wewnętrznego		Spójność		Kąt tarcia międzyfazowego		Adhezja		Kąt tarcia międzyfazowego		Adhezja	
	ϕ	$\phi_{\text{śr}}$	c	$c_{\text{śr}}$	ϕ_a	$\phi_{a \text{ śr}}$	c_a	$c_{a \text{ śr}}$	ϕ_a	$\phi_{a \text{ śr}}$	c_a	$c_{a \text{ śr}}$
	[°]		[kPa]		[°]		[kPa]		[°]		[kPa]	
0,90	28,8	28,0	16,4	19,8	30,1	29,3	17,2	20,7	33,2	31,7	9,3	8,8
	27,1		23,1		28,4		24,2		30,1		8,2	
1,00	32,9	33,4	31,1	25,5	33,8	34,1	30,7	27,8	35,7	36,4	11,6	9,5
	33,8		19,9		34,4		24,8		37,1		7,3	



Rys. 1. Wpływ zagęszczenia na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie i oporu tarcia międzyfazowego

Porównując uzyskane wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie i oporów tarcia stwierdzono, że kąt tarcia wewnętrznego mieszanki jest mniejszy od kąta tarcia międzyfazowego w obu układach. Najwyższe wartości kąta tarcia międzyfazowego uzyskano w układzie mieszanki – geotkaniny i jest to zwiększenie o około 4° w stosunku do kąta tarcia wewnętrznego mieszanki i blisko 3° w stosunku do kąta tarcia międzyfazowego układu mieszanki – geotkaniny. Różnice te mogą być spowodowane strukturą geotkaniny, w którą mogą wnikać ziarna mieszanki i w ten sposób klinować się, zwiększając opory tarcia.

Najwyższe wartości adhezji uzyskano w badaniach układu mieszanki – geotkaniny, przy czym w stosunku do spójności mieszanki jest to zwiększenie zaledwie o około 1 do 2 kPa. Natomiast wartości adhezji układu mieszanki – geotkaniny były mniejsze o około 11 do 14 kPa w stosunku do spójności mieszanki bez geosyntetyków. Niewielki zakres różnic między wartościami adhezji układu mieszanki – geotkaniny a spójnością mieszanki był spowodowany dużym rozmiarem oczek geotkaniny w stosunku do średnicy dominującej

frakcji mieszanki. Dlatego powierzchnia bezpośredniego styku geotkaniny i mieszanki była niewielka w stosunku do styku zasypki i podsypki wykonanej z mieszanki. Natomiast w przypadku układu mieszanki – geotkaniny duże zmniejszenie wartości adhezji w stosunku do spójności mogło być spowodowane wygładzoną powierzchnią geotkaniny.

Wytrzymałość na rozciąganie geosyntetyków

Średnia wytrzymałość na rozciąganie próbek geotkaniny ACEGrid GG80-II poddanych wcześniej badaniu oporów tarcia międzyfazowego w aparacie bezpośredniego ścinania (przy $I_s = 0,90$ i $1,00$) wynosiła około 35 MPa, natomiast próbek geotkaniny „świeżej” – 38,0 MPa (tab. 4). Maksymalna siła rozciągająca w przypadku „świeżych”, próbek geotkaniny poddanych badaniu oporów tarcia wynosiła 4183 N i 4570 N, a całkowite wydłużenie uzyskane przy tej sile wynosiło odpowiednio do rodzajów próbek około 26 i 55%.

Średnia wytrzymałość na rozciąganie „świeżych” próbek geotkaniny ISGT40/40 poddanych badaniu oporów tarcia wynosiła około 29 MPa i 34,4 MPa. Maksymalna siła rozciągająca „świeżych” próbek geotkaniny poddanych badaniu oporów tarcia wynosiła 2940 N i 3437 N, a całkowite wydłużenie przy tej sile wynosiło odpowiednio 23 i 26%.

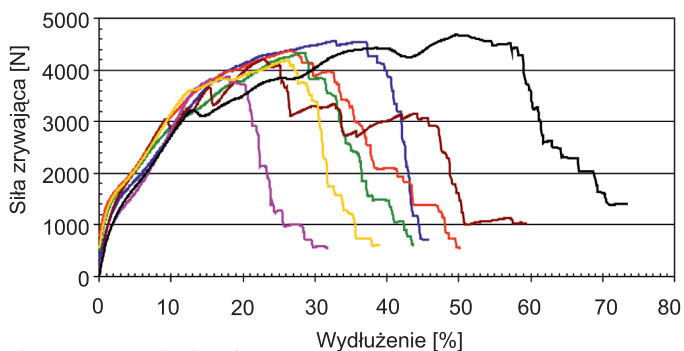
Analiza wyników badań wytrzymałości na rozciąganie obydwu geosyntetyków nie wykazała istotnych różnic między próbkami wykorzystanymi do badań oporów tarcia międzyfazowego w aparacie bezpośredniego ścinania przy różnych naprężeniach normalnych (rys. 2). Nie stwierdzono również wpływu zagęszczenia zasypki na uzyskane wartości wytrzymałości na rozciąganie. Zaobserwowano natomiast, że wytrzymałość

na rozciąganie obydwu geosyntetyków nie wykazała istotnych różnic między próbkami wykorzystanymi do badań oporów tarcia międzyfazowego w aparacie bezpośredniego ścinania przy różnych naprężeniach normalnych (rys. 2). Nie stwierdzono również wpływu zagęszczenia zasypki na uzyskane wartości wytrzymałości na rozciąganie. Zaobserwowano natomiast, że wytrzymałość

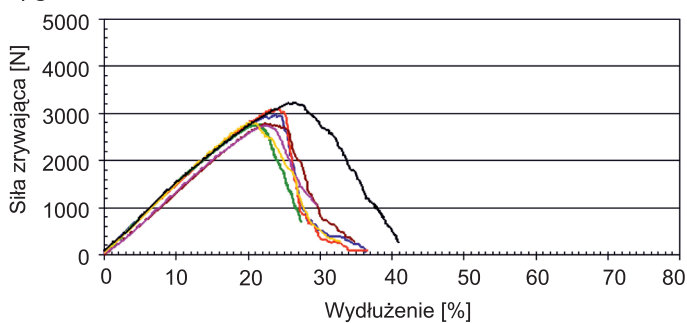
Tabela 4. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie geosyntetyków

Lp	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]		Wydłużenie całkowite przy maksymalnej sile rozciągającej [%]	
	Geotkanina ACEGrid GG80-II	Geotkanina ISGT 40/40	Geotkanina ACEGrid GG80-II	Geotkanina ISGT 40/40
Próbki użyte do badań oporów tarcia przy $I_s = 0,90$				
1	35,4	29,3	27,8	23,0
Próbki użyte do badań oporów tarcia przy $I_s = 1,00$				
2	34,3	29,5	23,7	22,7
Próbki „świeże”				
3	38,0	34,3	54,6	25,8

a) geosiatka ACEGrid GG80-II



b) geotkanina ISTG 40/40



Wartości naprężeń w badaniach oporu tarcia

$I_s = 0,90$ — 110 kPa — 200 kPa — 300 kPa — Próbka „świeża”
 $I_s = 1,00$ — 110 kPa — 200 kPa — 300 kPa

Rys. 2. Zależność siły zrywającej od wydłużenia próbek geosiatki (a) i geotkaniny (b)

na rozciąganie próbek „świeżych” geosiatki była wyższa o około 3 do 4 MPa, a geotkaniny o około 5 MPa, w stosunku do próbek wykorzystanych w badaniach oporów tarcia międzyfazowego. Również wydłużenie całkowite przy maksymalnej sile rozciągającej próbek „świeżych” jest 2-krotnie większe w przypadku geosiatki i o 3% większe przy badaniu geotkaniny, w stosunku do próbek wykorzystanych do badań oporów tarcia.

Podsumowując można stwierdzić, że próbki geosyntetyków, w wyniku badania oporów tarcia międzyfazowego na styku układu mieszanina popiołowo-żużlowa – geosyntetyk, cechowały się niższymi wartościami siły rozciągającej, a tym samym wytrzymałości na rozciąganie. Można więc prognozować pogorszenie się parametrów mechanicznych tych geosyntetyków wraz z czasem ich użytkowania w konstrukcji drogowej.

Wnioski

Przeprowadzone badania wytrzymałości na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” oraz oporów tarcia na styku układu mieszanina – geosyntetyk (geosiatka ACEGridGG80-II, lub geotkanina ISGT40/40), pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Mieszanina popiołowo-żużlowa cechuje się wysokimi parametrami wytrzymałości na ścinanie, co świadczy o jej dużej przydatności do celów budownictwa drogowego. Parametry te zwiększają się wraz ze wzrostem zagęszczenia mieszaniny.

2. Zastosowanie geosiatki i geotkaniny w układzie z mieszaniną popiołowo-żużlową zwiększyło kąt tarcia międzyfazowego w stosunku do kąta tarcia wewnętrznego mieszaniny.

3. Zastosowanie geosiatki w układzie z mieszaniną popiołowo-żużlową nieznacznie zwiększyło adhezję, natomiast w układzie z geotkaniną zmniejszyło ją 2-krotnie w stosunku do spójności mieszaniny.

4. Wytrzymałość na rozciąganie próbek geosiatki, jak i geotkaniny, w wyniku badania oporów tarcia na styku układu mieszanina popiołowo-żużlowa – geosyntetyk była mniejsza niż próbek „świeżych” geosyntetyków.

Bibliografia

- [1] Bugajski M., Grabowski W. *Geosyntetyki w budownictwie drogowym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1999
- [2] Duszyński A., Śliwińska-Serafin M. *Mieszanki popiołowo-żużlowe – identyfikacja dla zastosowania w budownictwie drogowym*. Materiały konferencji „Popioły z energetyki”. Międzybrodzie 2007
- [3] Gruchot A., Resiula E. *Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej i stateczność wykonanego z niej nasypu*. *Górnictwo i geoinżynieria*, 2/2011, 257-264
- [4] Maro L. *Geosyntetyki do powierzchniowego wzmocnienia gruntu*. Wydawnictwo Lemar. Łódź 2010
- [5] Sybilski D., Kraszewski C. *Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych*. Etap I. IBDiM. Warszawa 2004
- [6] Materiały informacyjne firmy AMAGO. *Geosyntetyki ACEGrid i ISGT 2010*
- [7] PN-B-04481:1988. *Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu*
- [8] PN-EN ISO 14688-2:2006. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*
- [9] PN-EN ISO 10319:2008. *Geosyntetyki. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek*
- [10] PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009. *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania* ■

Z prasy zagranicznej

Przebudowa autostrady waszyngtońskiej

Ministerstwo transportu amerykańskiego stanu Waszyngton przydzieliło główny kontrakt przebudowy i modernizacji drogi krajowej 520. Ten projekt, warty 306 mln dolarów, będzie kierowany przez ECC (Eastside Corridor Constructors). Celem projektu jest poszerzenie i przebudowa odcinka istniejącej autostrady pomiędzy ruchomym mostem na jeziorze Waszyngton a drogą międzystanową nr 405. Zakończenie prac konstrukcyjnych planowane jest na luty 2014 r.

World Highways, 1-2/2011

MR

Nabycie akcji KKSM

Polska firma Dolnośląskie Surowce Skalne ogłosiła, że nabyła 85% udziałów Kieleckich Kopalni Surowców Mineralnych, producenta kruszyw.

Finansowe szczegóły porozumienia nie zostały jeszcze ujawnione, a przejęcie wymaga uzyskania zgody Urzędu Ochrony Konkurencji i Konsumenta. Dolnośląskie Surowce Skalne gwarantują utrzymanie dotychczas zatrudnionej załogi przez 60 miesięcy i gwarantują, że nie sprzedadzą nabytych udziałów KKSM w ciągu następnych dwóch lat.

AGGREGATES, listopad – grudzień 2010

JG