

BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA NA KONTAKCIE MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŻLOWEJ Z GEOWŁÓKNINAMI

FRICITION CHARACTERISTICS TESTS BETWEEN GEOTEXTILE AND ASH-SLAG MIXTURE

Mariusz Cholewa, Tymoteusz Zydrón

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań podstawowych właściwości geotechnicznych mieszanki popiołowo-żużlowej oraz charakterystyki tarcia na kontakcie mieszanki z dwoma rodzajami geowłóknin igłowanych o gramaturze 400 i 1200 g · m⁻². Mieszanka popiołowo-żużłowa pochodziła z osadnika Huty Arcelor Mittal Poland S.A. Badania charakterystyki wytrzymałościowej mieszanki oraz charakterystyki tarcia na kontakcie mieszanki–geosyntetyk przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania o przekroju skrzynki 12 × 12 cm. Wyniki badań wykazały, że mieszanka popiołowo-żużłowa charakteryzuje się stosunkowo dużymi wartościami parametrów wytrzymałościowych, a wartości współczynnika tarcia na kontakcie mieszanki–geosyntetyk są nieznacznie mniejsze niż współczynnik tarcia samej mieszanki.

Abstract. Results of basic geotechnical properties of ash-slag mixture and friction characteristics between ash-slag mixture and two types of needle punched geotextiles 400 and 1200 GSM are presented in the paper. Ash-slag mixture was originated from sedimentation tank of Arcelor Mittal Poland S.A. Steel Mill. Angle of internal friction and friction coefficient tests were carried out in the direct shear box apparatus with dimensions 12 × 12 cm. Test results revealed that ash-slag mixture has a relatively high strength parameters. It was also stated that friction coefficients between ash-slag mixture and geotextiles are slightly lower than internal friction of ash-slag.

Słowa kluczowe: mieszanka popiołowo-żużłowa, wytrzymałość na ścinanie, współczynnik tarcia, geowłókniny

Key words: ash-slag mixture, shear strength, friction coefficient, geotextiles

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Mariusz Cholewa, dr inż. Tymoteusz Zydrón, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: mcholewa@ur.krakow.pl, tzydron@ur.krakow.pl.

WSTĘP

Współczesny rozwój technologii przemysłowych powoduje, że w wielu dziedzinach życia tradycyjne naturalne materiały są wypierane przez wyroby sztucznego pochodzenia, wytworzone w warunkach przemysłowych. Powstawanie i rozwój nowych technologii oraz zmiana świadomości sprawia, że człowiek dysponuje większą gamą różnorodnych materiałów budowlanych o znacznie lepszych parametrach niż te, które stosowano do tej pory. Wśród tego typu materiałów wyróżnić można m.in. geosyntetyki, które na przestrzeni ostatnich lat są szeroko stosowane w budownictwie wodnym i lądowym. Materiały te charakteryzują się przede wszystkim dużą wytrzymałością, mniejszymi kosztami produkcji oraz dużą uniwersalnością zastosowań.

Geosyntetyki mogą spełniać w budownictwie ziemnym szereg funkcji, a w szczególności funkcje uszczelniającą, filtracyjną, drenażową, wzmacniającą, separacyjną i ochronną. Znalazły one zastosowanie w budownictwie drogowym i kolejowym do wykonawstwa różnego rodzaju nasypów, jako wzmocnienie podłoża, systemy drenarskie, kurtyny wodne; są zwłaszcza wykorzystywane do budowy systemów uszczelnień na składowiskach odpadów komunalnych oraz w wielu innych pokrewnych dziedzinach [Wesołowski i in. 2000, PN-EN 13251:2002/A1:2006].

Wykonanie wysokich nasypów i głębokich wykopów wymaga skutecznej ochrony przed erozją oraz zsuwami przypowierzchniowymi warstw gruntów spoistych, głównie w okresie rozmarzania. Zadaniem geosyntetyków jest wzmocnienie i ustabilizowanie przypowierzchniowych warstw gruntu, co uzyskuje się m.in. poprzez:

- ochronę przed erozją wywołaną działaniem wiatru i opadów atmosferycznych oraz falowaniem lub prądem płynącej wody,
- przeciwdziałanie zsuwom nawilżonych warstw gruntu oraz stabilizowanie powierzchni skarp rozluźnionych w okresie rozmarzania.

Funkcja wzmacniająca geosyntetyków polega m.in. na równomiernym rozłożeniu obciążeń działających ze strony różnego rodzaju budowli na podłoże (szczególnie w przypadku gruntów słabych, nawodnionych) oraz zbrojeniu skarp i korpusów budowli ziemnych poprzez przenoszenie sił rozciągających.

Polski przemysł energetyczny wykorzystuje w procesach wytwarzania energii głównie węgiel kamienny i brunatny [Kucowski i in. 1994, Rosik-Dulewska 1999]. Produktami ubocznymi spalania są popioły lotne unoszone przez spaliny i wychwytywane w elektrofiltrach oraz popioło-żużle usuwane z komory paleniskowej. Składowane w Polsce duże ilości popioło-żużli, obecnie wykorzystywane są m.in. w budownictwie drogowym [Quant 1997]. Do oceny przydatności mieszanin popiołowo-żużlowych w budownictwie ziemnym niezbędne jest przeprowadzenie odpowiednio ukierunkowanych badań w celu ustalenia ich parametrów geotechnicznych [Zawisza i Zydróż 2004, 2006]. Ważne jest zwłaszcza określenie parametrów charakteryzujących uziarnienie, zagęszczenie i wytrzymałość na ścinanie, od których zależy stateczność nasypów budowanych z tego typu materiałów odpadowych.

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było ustalenie wytrzymałości na ścinanie mieszaniny popiołowo-żużlowej, jak również charakterystyka tarcia pomiędzy mieszaniną popiołowo-żużlową a dwoma typami geowłóknin igłowanych.

CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANYCH MATERIAŁÓW

Wykorzystana w badaniach mieszanina popiołowo-żuźłowa pochodziła z wydzielonej części osadnika Pleszów Huty ArcelorMittal Poland S.A. W celu określenia podstawowych właściwości fizycznych wykonano oznaczenie składu granulometrycznego metodą sitową „na mokro” dla cząstek $\geq 0,063$ mm i areometryczną dla cząstek $< 0,063$ mm, gęstości właściwej w kolbie miarowej oraz wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu w aparacie Proctora, stosując standardową energię zagęszczania $- 0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Mieszanina zawierała ponad 87% cząstek odpowiadających frakcji piaskowej, ponad 9% ziaren odpowiadających frakcji pyłowej, około 3% odpowiadających frakcji ilowej oraz nieznaczną ilość okruchów odpowiadających frakcji żwirowej (tab. 1). Pod względem geotechnicznym wg PN-EN ISO 14688-2:2006 uziarnienie mieszaniny odpowiada piaskom średnim równoziarnistym. Gęstość właściwa mieszaniny wyniosła $2,36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Z kolei wartości parametrów zagęszczalności, tj. maksymalna gęstość objętościowa i wilgotność optymalna wyniosły odpowiednio $1,285 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ i 32,5%, co odpowiada wartościom charakterystycznym dla odpadów paleniskowych.

Tabela 1. Podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne mieszaniny popiołowo-żuźłowej
Table 1. Basic physical and mechanical properties of ash-slag mixture

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Wartość Value
Zawartość frakcji według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009		
Fraction content according to PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 norm:		
– żwirowa – gravel 63-2 mm	%	0,60
– piaskowa – sand 2-0,063 mm		87,35
– pyłowa – silt 0,063-0,002 mm		9,10
– ilowa – clay $< 0,002$ mm		2,95
Nazwa wg PN-EN ISO 14688-2:2006	–	MSa
Name according to PN-EN ISO 14688-2:2006		
Wskaźnik różnoziarnistości	–	2,60
Uniformity coefficient		
Gęstość właściwa	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,36
Specific density		
Wilgotność optymalna	%	32,5
Optimum moisture content		
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,285
Maximum dry density by Proctor's method		

Do badań współczynnika tarcia na kontakcie mieszanina–geosyntetyk wykorzystano dwa rodzaje geowłóknin igłowanych wyprodukowanych z włókien polipropylenowych. Podstawowe dane techniczne geowłóknin podane przez ich producenta zestawiono w tabeli 2. Materiały różnią się między sobą parametrami fizycznymi oraz mechanicznymi. Jest to wynik rozmaitej gramatury oraz różnego pochodzenia włókiem polipropy-

lenowych. Geowłóknina R 1204 o gramaturze $1200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ jest wytworzona z włókien recyklowanych, w odróżnieniu od 401GRK5C produkowanej z włókien nieprzetwarzanych. Produkty te znalazły zastosowanie w budownictwie drogowym i kolejowym (podłoża i podbudowy drogowe, nasypy, drogi tymczasowe, podtorza kolejowe i tramwajowe) oraz w budownictwie ogólnym.

Tabela 2. Podstawowe dane techniczne badanych geowłóknin [NAUE 2008]
Table 2. Basic technical data of tested geotextiles [NAUE 2008]

Parametr Parameter	Metoda badania Test method	Jednostka Unit	Secutex 401 GRK5C	Secutex R 1204
Gramatura G. S. M.	DIN EN 965	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	400	1200
Grubość Thickness	DIN EN 964-1	mm	3,3	9,5
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength	DIN EN ISO 10319	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	18,0 / 25,0	22,5 / 40,0
Wydłużenie przy max. rozciągnięciu Extension at maximum tensile strength	DIN EN ISO 10319	%	60 / 40	90 / 60
Przebiecie statyczne Static puncture	DIN EN ISO 12236	N	4000	6000
Wydłużenie przy przebieciu statycznym Extension at static puncture	DIN EN ISO 12236	%	35	50
Efektywna wielkość porów Effective pore-size	DIN E 60500 DIN EN ISO 12956	mm	0,08	0,08
Standardowe wymiary Standard dimension	–	$\text{m} \times \text{m}$	$5,90 \times 100$	$5,80 \times 50$

ZAKRES I METODYKA BADAŃ

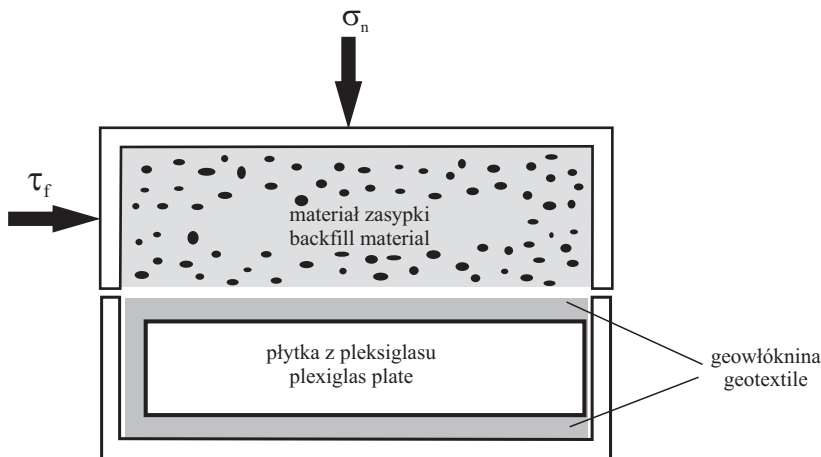
Badania przedstawione w pracy podzielono na dwa etapy. W pierwszym dokonano oznaczenia kąta tarcia wewnętrznego i spójności w aparacie bezpośredniego ścinania dla mieszanki popiołowo-żużlowej. W drugim wykonano ścinanie mieszanki po warstwie geowłókniny.

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŻLOWEJ

Parametry wytrzymałościowe, to jest kąt tarcia wewnętrznego i spójność, oznaczono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania, w skrzynce o wymiarach $12 \times 12 \times 7,8 \text{ cm}$ z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości $1,0 \text{ cm}$. Próbkę o wilgotności odpowiadającej optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$ poddawano pionowemu obciążeniu konsolidacyjnemu o wielkości $50, 100$ i 200 kPa przez 30 min , a następnie ścinano przy prędkości $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jako kryterium ścięcia przyjęto wartość maksymalnej siły ścinającej.

BADANIA CHARAKTERYSTYKI TARCIA POMIĘDZY GEOWŁÓKNINAMI A MIESZANINĄ POPIOŁOWO-ŻUŻŁOWĄ

Badania współczynnika tarcia i adhezji pomiędzy materiałem zasyпки a geowłókninami przeprowadzono w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzynki $12 \times 12 \times 7,8$ cm. Poglądowy schemat przygotowania próbki do badań został przedstawiony na rysunku 1. Dla przeciwdziałania wysuwania się geosyntetyku w trakcie ścinania był on wstępnie umieszczany w dolnej części skrzynki aparatu i zawijany poza aparat. Następnie w skrzynce umieszczano płytkę pleksiglasową, a na jej górną



Rys. 1. Schemat zamocowania geosyntetyku w aparacie bezpośredniego ścinania
Fig. 1. Scheme of the geotextile installation in the direct shear box apparatus

powierzchnię kładziono geosyntetyk, tak aby jego górna powierzchnia pokrywała się z płaszczyzną ścinania, która z kolei odpowiadała płaszczyźnie (bądź strefie) przesuwu górnej i dolnej skrzynki. Sposób rozwiązania płaszczyzny ścięcia dla obu geosyntetyków był nieco inny. W przypadku geowłókniny Secutex 401GRK5C ścięcie przeprowadzono bez użycia ramek pośrednich. Natomiast podczas badań geowłókniny R-1204 pomiędzy górną a dolną skrzynką umieszczono ramki tworzące strefę ścięcia o wysokości 10 mm i było to spowodowane dużymi odkształceniami materiału pod wpływem przyłożonego obciążenia pionowego. W dalszej kolejności górną skrzynkę wypełniano zasypką, którą stanowiła mieszanka popiołowo-żużłowa. Materiał zasyпки był formowany przy wilgotności optymalnej do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 1,00$. Przed ścięciem próbki poddawano obciążaniu pionowemu w zakresie wartości 50–300 kPa, a następnie ścinano przy prędkości $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Kryterium ścięcia odpowiadało maksymalnej wartości oporu na ścinanie w zakresie względnego odkształcenia próbki 0–10%. Na podstawie wyników badań określono wartości współczynnika tarcia występujące na kontakcie geosyntetyk-grunt według następującego wzoru [Bouazza i in. 1990]:

$$\mu = \frac{c_a}{\sigma_n} + \tan \delta$$

gdzie:

c_a – adhezja geosynetyk–grunt, kPa,

d – kąt tarcia geosynetyk–grunt, °,

s_n – naprężenie normalne, kPa.

Badania przeprowadzono dla każdej z geowłóknin w dwóch seriach:

- w pierwszej serii badano geosynetyki w stanie powietrznie suchym (na sucho),
- w drugiej serii 24 godziny przed badaniem geosynetyki były nawadniane (na mokro).

Przyjęta metodyka prac miała na celu określenie wpływu warunków wodnych na wielkość współczynnika tarcia.

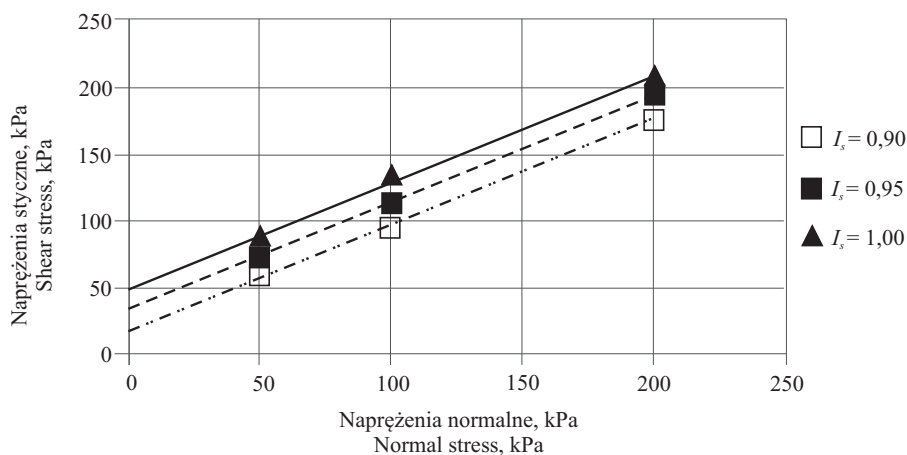
WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań kąta tarcia wewnętrznego i spójności mieszanki popiołowo-żużlowej przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 2. Ogólnie można stwierdzić, że badana

Tabela 3. Parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie popiołu-żużli

Table 3. Shear strength parameters of ash-slag

Wskaźnik zagęszczenia – Compaction index		
0,90	0,95	1,00
Kąt tarcia wewnętrznego – Angle of internal friction, °		
38,00	39,80	40,10
Spójność – Cohesion, kPa		
18,90	31,00	45,80



Rys. 2. Wytrzymałość na ścinanie mieszanki popiołowo-żużlowej

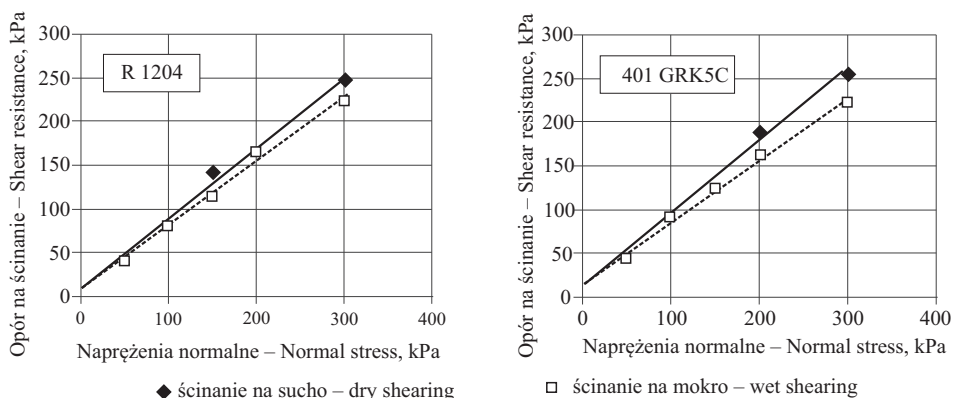
Fig. 2. Shear strength of ash-slag mixture

mieszanka popiołowo-żużłowa charakteryzuje się dużymi wartościami parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie. Wartości kąta tarcia wewnętrznego wyniosły od 38 do 40,1°, a spójności od około 19 do 46 kPa, wykazując jednocześnie zależność od wskaźnika zagęszczenia.

Przedstawione wartości charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie badanego odpadu paleniskowego nie odbiegają w sposób istotny od parametrów dla popiołów lotnych i mieszanin popiołowo-żużłowych z innych elektrowni i elektrociepłowni, określonych we wcześniejszych badaniach przeprowadzonych w Katedrze Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie [Zawisza i in. 2009, 2010, Cholewa 2012].

MIESZANINA POPIOŁOWO-ŻUŻŁOWA W KONTAKCIE Z GEOWŁÓKNINAMI

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki oznaczeń wytrzymałości na ścinanie w strefie kontaktu geowłóknin z mieszanką popiołowo-żużłową. Porównując uzyskane wartości oporu na ścinanie na kontakcie grunt–geowłóknina „na sucho”, można stwierdzić, że nieco większą wartość tego parametru uzyskano dla geowłókniny Secutex 401 GRK5C, a odwrotną zależność odnotowano podczas badań geosyntetyków nasączonych wodą.



Rys. 3. Wartości oporu tarcia pomiędzy mieszanką popiołowo-żużłową a geowłókniną

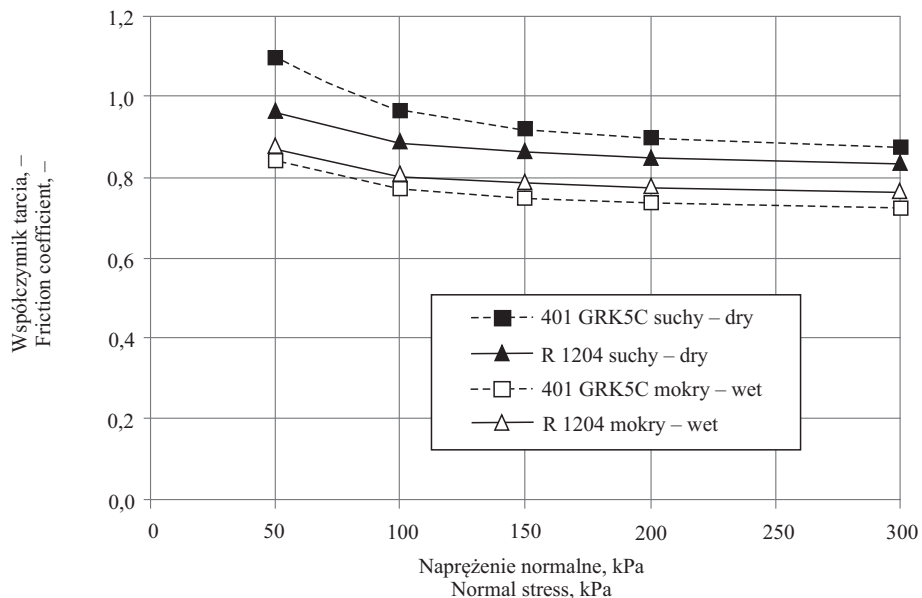
Fig. 3. Shear resistance at the contact ash-slag mixture-geotextile

Biorąc pod uwagę wartości składowych współczynnika tarcia na kontakcie geosyntetyków i gruntu ścinanych na sucho, można stwierdzić, że wartości kąta tarcia uzyskane dla obu geowłóknin były bardzo podobne, natomiast większe wartości adhezji uzyskano dla geowłókniny Secutex 401 GRK5C (tab. 4). Z kolei w przypadku próbek badanych na mokro większe wartości kąta tarcia, a mniejsze wartości adhezji uzyskano dla geowłókniny R 1204. Należy zwrócić uwagę, że nawodnienie geosyntetyków spowodowało zmniejszenie parametrów tarcia, przy czym większą redukcję wartości tych parametrów uzyskano dla materiału Secutex 401GRK5C.

Analizując wyniki badań można również stwierdzić, że wartości kąta tarcia na kontakcie geosyntetyk–grunt są nieznacznie mniejsze od wartości kąta tarcia wewnętrznego

Tabela 4. Zestawienie wyników badań współczynnika tarcia
Table 4. Results of friction coefficient tests

Składowe współczynnika tarcia Components of coefficient of friction	Rodzaj ścinania – Type of shearing			
	na sucho – dry		na mokro – wet	
	geotextile 401 GRK5C	geotextile R 1204	geotextile 401 GRK5C	geotextile R 1204
Kąt tarcia grunt–geosyntetyk / / kąt tarcia gruntu, ° Angle of friction soil– geosynthetic / soil’s angle of friction, °	39,8	39,0	34,9	36,6
Adhezja grunt–geosyntetyk / / spójność gruntu, kPa Adhesion soil–geosynthetic / / soil’s cohesion, kPa	13,1	7,7	7,3	6,6
Współczynnik tarcia m przy założeniu $c_a = 0$, kPa Friction angle m assuming $c_a = 0$, kPa	0,83	0,81	0,70	0,74



Rys. 4. Wyniki obliczeń wartości współczynnika tarcia badanych geosyntetyków w zależności od naprężenia normalnego

Fig. 4. Results of friction coefficient of tested geotextiles vs. normal stress

materiału zasypki, istnieje natomiast duża różnica pomiędzy uzyskanymi wartościami spójności zasypki a wartościami adhezji. Podobne zależności między parametrami wytrzymałościowymi zasypki a charakterystyką tarcia na kontakcie zasypka–zbrojenie przedstawione u Kiwiora [1998]. W pracy tej materiał zasypki stanowiły gruboziarniste odpady powęglowe, które charakteryzowały się wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności w zakresach odpowiednio 39,1–45,7° oraz 44,6–84,7 kPa. Z kolei materiał zbrojenia stanowiły pasy transmisyjne oraz pasy „Paraweb”. Wyniki badań wykazały, że wartości kąta tarcia w strefie kontaktu materiału zasypki z pasami transmisyjnymi wynoszą 34,6–36,6°, a wartości adhezji mieszczą się w zakresie 26,0–39,5 kPa. Z kolei w przypadku zbrojenia gruntu pasami „Paraweb” wartość kąta tarcia i adhezji wyniosły odpowiednio 32,6° oraz 20,6–27,7 kPa. Nieco inne zależności charakterystyki wytrzymałości materiału zasypki dla strefy kontaktowej zbrojenie–grunt przedstawili Bouaza i in. [1990] oraz Bouza i Wei [1993]. Wyniki ich prac pokazały, że wartości kąta tarcia w strefie kontaktu polipropylenowych pasów zbrojenia z odpadami powęglowymi oraz piaskiem są o 25–50% mniejsze niż wartości kąta tarcia wewnętrznego materiału zasypki. Natomiast wartości adhezji były z reguły znacząco mniejsze od wartości spójności gruntu zasypki.

W tabeli 4 zestawiono również wartości współczynnika tarcia określone przy założeniu, że na kontakcie zasypka–zbrojenie nie występują siły adhezji. Można stwierdzić, że wartości współczynnika tarcia m w przypadku geowłókniny 401 GRK5C wynoszą 0,70–0,83, a dla materiału R 1204 zawierają się one w nieco mniejszym zakresie wartości 0,74–0,81, przy czym widać, że mniejsze wartości współczynnika tarcia uzyskano dla geosyntetyków nawodnionych. Z kolei na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika tarcia przeprowadzonych na podstawie wzoru podanego we wcześniejszej części pracy. Wartość tego parametru zmniejsza się wraz ze wzrostem naprężeń normalnych, co wynika z adhezji występującej w strefie kontaktowej geosyntetyk–grunt. Można ponadto stwierdzić, że wartości współczynnika tarcia uzyskane dzięki tej metodzie są wyraźnie większe niż wartości przedstawione w tabeli 4.

PODSUMOWANIE

W obecnych czasach zastosowanie geosyntetyków w konstrukcjach budowlanych staje się coraz bardziej powszechne, co wynika m.in. z szerokiej ich dostępności, a także ze złych warunków posadowienia budowli ziemnych. W celu prawidłowego zaprojektowania budowli zbrojonych geosyntetykami niezbędne jest określenie właściwości mechanicznych gruntu zasypki, a także zachowania zbrojenia na kontakcie z tym gruntem.

Wyniki przeprowadzonych badań i ich analiza pozwalają stwierdzić, że mieszanka popiołowo-żużlowa z osadnika Pleszów w Krakowie odznacza się stosunkowo wysokimi wartościami parametrów charakteryzujących jej wytrzymałość na ścinanie, przy czym znaczący wpływ na tę wytrzymałość ma zagęszczenie. Badania dowiodły, że wzrost wskaźnika zagęszczenia wpłynął przede wszystkim na zwiększenie wartości spójności, a w mniejszym stopniu kąta tarcia wewnętrznego.

Z kolei badania charakterystyki tarcia w strefie kontaktowej omawianej mieszanki z dwoma rodzajami geowłóknin igłowanych wykazały wysokie wartości kąta tarcia na kontakcie obu materiałów, nieco tylko niższe niż wartości kąta tarcia samego materiału zasypki. Stwierdzono ponadto, że wartości adhezji w strefie kontaktowej geosyntetyku

z gruntem są kilkakrotnie mniejsze od spójności zasypki. Ponadto w pracy dowiedziono, że obecność wody w strukturze materiału geosyntetycznego prowadzi do zmniejszenia wartości składowych współczynnika tarcia.

PIŚMIENNICTWO

- Bouazza A., Finlay T.W., Hytiris N., Wei M.J., 1990. Friction characteristics of polypropylene reinforcing straps in various fills. Proc. 3rd International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Glasgow, 349–354.
- Bouazza A., Wei M.J., 1993. Large shear box tests on reinforced colliery spoils. 4th International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Kraków, 127–134.
- Cholewa M., 2012. Analysis of the stability of the slope of the hydraulic embankment made of the ash-slag mixture. AGH J. Mining Geoenviron. 1, 81–87.
- Kiwior P., 1998. Analiza warunków stateczności ściany oporowej wykonanej w technologii gruntu zbrojonego na zwałowisku odpadów powęglowych w Przechlebiu koło Gliwic. Praca magisterska. AR w Krakowie, Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnistego, maszynopis, ss. 45.
- Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M., 1994. Energetyka a ochrona środowiska. WNT Warszawa.
- NAUE, 2008. Materiały informacyjne firmy Naue GmbH&Co.KG. Wartturmstraße 1 32312. Lübbecke.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne — Badania laboratoryjne gruntów — Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- PN-EN 13251:2002/A1:2006. Geotekstyli i wyroby pokrewne — Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych w robotach ziemnych, fundamentowaniu i konstrukcjach oporowych. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- Quant B., 1997. Silikatyżacja popiołów lotnych i fosfogipsów – bezpieczna dla środowiska metoda utylizacji odpadów. Zesz. Nauk. Polit Gdań. 557, Budow. Wodne 44.
- Rosik-Dulewska Cz., 1999. Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. Ekoinżynieria Lublin.
- Wesolowski A., Krzywicz Z., Brandy T., 2000. Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. Wyd. SGGW Warszawa.
- Zawisza E., Cholewa M., Mardyla P., 2009. Wpływ uziarnienia i zagęszczenia na ściśliwość wybranych mieszanin popiołowo-żużlowych. Drogownictwo 10, 343–348.
- Zawisza E., Cholewa M., Mardyla P., 2010. Wpływ uziarnienia i zagęszczenia wybranych mieszanin popiołowo-żużlowych na wytrzymałość na ścinanie. Inż. Mors. Geotech. 1, 42–46.
- Zawisza E., Zydroń T., 2004. Badania wpływu zagęszczenia i wilgotności na wytrzymałość na ścinanie popiołów lotnych. Mat. Konf. Popioły z energetyki, Zakopane, 255–265.
- Zawisza E., Zydroń T., 2006. An analysis of the influence of compaction and moisture content on the shearing strength of coal ashes. Proc. 13th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Lubljana, 29–31.05.2006, 2, 171–176.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.11.2013