

Wytrzymałość na rozciąganie popiołu lotnego wbudowanego w warstwy uszczelniające

Mgr inż. Mariola Wasil¹, dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska, prof. PB¹, mgr inż. Anna Falkowska²

¹Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

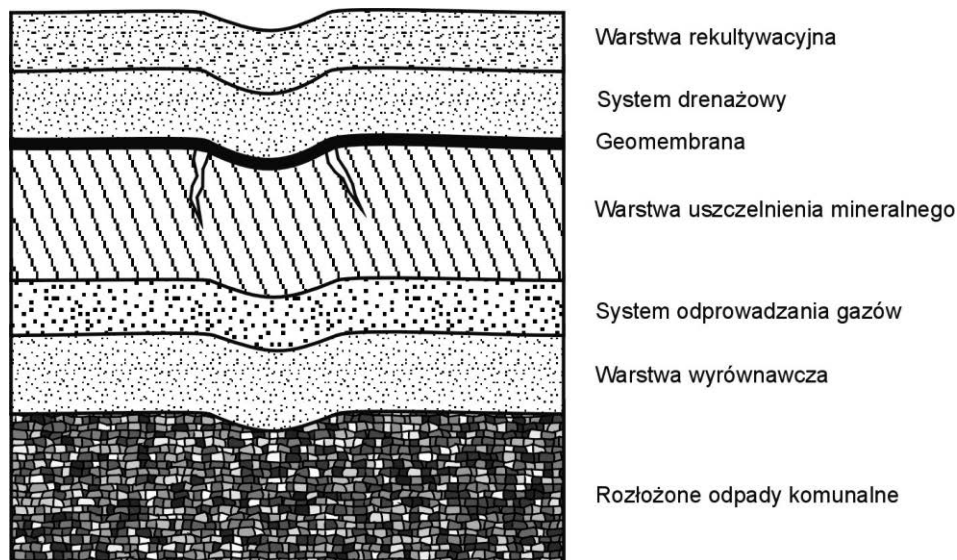
²Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny

Warstwy uszczelniające są istotnym elementem konstrukcji składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. Ich zadaniem jest zapewnienie szczelności umożliwiającej ograniczenie negatywnego wpływu odpadów na środowisko naturalne. W przypadku wykorzystywania popiołu lotnego jako materiału przesłony bardzo ważnym zagadnieniem jest określenie jego zdolności do odkształceń, co ma duże znaczenie ze względu na nierównomierne osiadanie podłoża, które może powodować uszkodzenie lub przerwanie warstwy uszczelniającej i stworzenie drogi uprzywilejowanego przepływu. Zniszczenie warstw uszczelniających jest zainicjowane przez proces powstawania i propagacji spękań spowodowanych przez naprężenie rozciągające, szczególnie gdy naprężenie to osiąga lub przekracza wytrzymałość na rozciąganie tej warstwy (rys. 1).

Aby nastąpiło rozerwanie próbki popiołowej, muszą być pokonane siły spójności strukturalnej spowodowanej zazębianiem się zagęszczonych ziaren popiołowych, pokruszonych i wypełniających się wzajemnie [12], a także siły kapilarności.

Odpowiedź na pytanie o odporność warstwy na nierównomierne osiadania podłoża mogą dać wyniki badań określających wytrzymałość na rozciąganie (rozerwanie) i wartość wydłużenia próbki oraz wyniki analizy stanu naprężenia wywołującego graniczny stan odkształcenia przy naprężeniu rozciągającym przy zginaniu w zdeformowanej warstwie uszczelnienia projektowanego składowiska.

W praktyce geotechnicznej zakłada się, że wytrzymałość gruntu na rozciąganie jest nieznaczna lub równa zero, ponieważ jest to wartość stosunkowo mała w porównaniu do wytrzymałości na ściskanie gruntu. Dlatego też, w mechanice gruntów generalnie nie wypracowano metod oceny wytrzymałości gruntu na rozciąganie (poza *extension test*), a konieczne jest dostosowanie metod ze zbliżonych naukowo specjalności, przykładowo z mechaniki skał. Laboratoryjne badania wytrzymałości na rozciąganie można przeprowadzać metodą pośrednią lub bezpośrednią. Metodą pośrednią, tzw. brazylijską, są badane próbki w kształcie walca, ściskane po tworzącej. Inną metodę



Rys. 1. Rozciąganie i spękanie mineralnej warstwy uszczelniającej w przykryciu składowiska

pośrednią stanowi zginanie podpartej próbki w kształcie belki czy próbki prostopadłościenną zginaną w pięciu punktach [11]. Metodami bezpośrednimi są wykonywane badania wydłużenia w aparacie trójosiowego ściskania, czy też badania na rozrywanie próbki walcowej wklejonej w formy [10] lub próbek zagęszczanych w tulejach dwudzielnych [6, 9] oraz rozrywanie próbki w kształcie kości [5]. Badania bezpośrednie można wykonać także w specjalnie skonstruowanym aparacie bezpośredniego rozciągania, wyposażonym w dwudzielną skrzynkę [2], a także za pomocą badań modelowych warstw uszczelniających w wirówce [4].

BADANIE ROZCIĄGANIA GRUNTU

Celem pracy jest określenie wartości rozciągania mierzonej wartością deformacji, którą może przenieść bez pęknięcia przesłona z popiołów oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie. Wytrzymałość na rozciąganie określono dla zagęszczonych próbek popiołu lotnego i popiołu z dodatkiem bentonitu ulepszającym plastyczność popiołu. Prezentowane wyniki badań laboratoryjnych wykonano metodą bezpośrednią i pośrednią.

Badany popiół lotny, pochodzący ze spalania węgla kamiennego w Elektrociepłowni Białystok, odpowiada uziarnieniem pyłowi piaszczystemu (saSi) o średnicy efektywnej $d_{50} = 0,05$ mm. Popiół lotny oraz popiół lotny z dodatkami 5,

10 lub 15% bentonitu sodowego, obliczonymi w stosunku wagowym do suchej masy próbek, zagęszczano metodą standardową Proctora, dopuszczając tylko jednokrotne uciśnięcie tej samej próbki odpadów [12]. Wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz parametry zagęszczalności badanych gruntów antropogenicznych zestawiono w tabl. 1.

Metodyka badań

Badania doświadczalne wykonano na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej za pomocą elektromechanicznej, uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej MTS Insight. Zakres obciążenia ramy podczas rozciągania (ściskania) wynosi ± 1 kN. Próbkę rozciągano/ściskano, stosując wymuszenie przemieszczenia sterowane przetwornikiem optycznym, podczas którego rejestrowano zależności siły rozciągającej/ściskającej od wydłużenia strefy badawczej. Prędkość przyrostu przemieszczenia wynosiła $1,2 \text{ mm/min} = 0,02 \text{ mm/s}$. W czasie eksperymentu mierzono siłę rozciągającą lub ściskającą oraz chwilową długość próbki. Wielkości te pozwalają na wyznaczenie stanu naprężenia oraz odkształcenia w próbce.

Badania wytrzymałości na rozciąganie wykonano na próbkach popiołu lotnego oraz popiołu z dodatkami 5, 10 lub 15% bentonitu sodowego, które zagęszczano przy w_{opt} do gęstości objętościowej szkieletu gruntowego odpowiadającej wartości $\rho_{d \max}$ (tabl. 1). W każdym przypadku wykonano od 2 do 4 próbek. Bentonit dodawano bezpośrednio przed dokonaniem zagęszczania. Próbkę dokładnie mieszano i poddawano zagęszczaniu. Badano je bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 7 i 28 dniach przechowywania ich w komorze pielęgnacyjnej o wilgotności powyżej 96%. Próbkę przechowywano i badano w temperaturze pokojowej.

Metoda bezpośrednia. Badanie wytrzymałości na rozciąganie wykonano na próbkach walcowych o średnicy 36 mm i wysokości 82 mm. Próbkę zagęszczano w przyrządzie dwudzielnym do zagęszczanych próbek do badań trójosiowych, a następnie ostrożnie wklejano do specjalnie zaprojektowanych dwudzielnych tulei, umożliwiających zamocowanie próbek w maszynie wytrzymałościowej (rys. 2) i ich rozciąganie (rozrywanie).

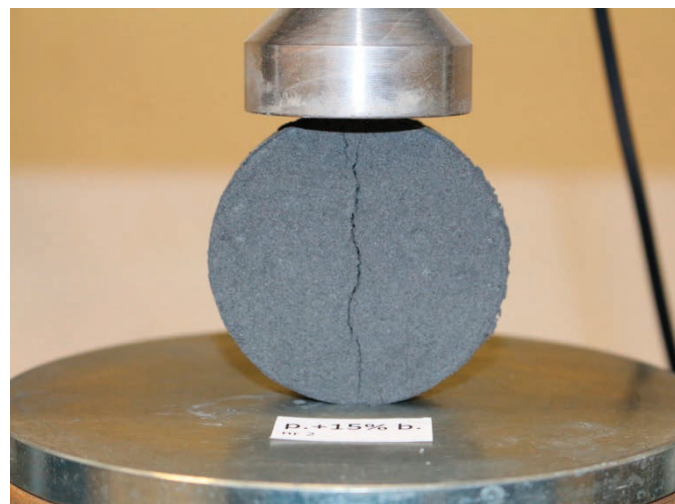
Tabl. 1. Parametry badanych mieszanin

Badany grunt	$\rho_s [\text{g/cm}^3]$	Parametry zagęszczalności (metoda standardowa)	
		$w_{opt} [\%]$	$\rho_{d \max} [\text{g/cm}^3]$
P	2,18	40,0	1,073
P + 5% B	2,18	39,0	1,100
P + 10% B	2,22	36,3	1,118
P + 15% B	2,24	33,0	1,134

Objaśnienia: P – popiół lotny, B – bentonit sodowy.



Rys. 2. Widok rozciąganej próbki z widoczną płaszczyzną zniszczenia



Rys. 3. Widok próbki ściskanej metodą brazylijską

Wytrzymałość na rozciąganie określa się za pomocą naprężenia uplastyczniającego, zwanego inżynierskim lub umownym, obliczonym z zależności:

$$\sigma = \frac{F(t)}{S_0} \quad (1)$$

lub rzeczywistego naprężenia uplastyczniającego:

$$\sigma = \frac{F(t)}{S(t)} \quad (2)$$

gdzie:

$F(t)$ – pomiar siły rozciągającej w czasie t ,

S_0 – pole przekroju próbki przed badaniem,

$S(t)$ – chwilowe pole przekroju poprzecznego próbki.

Analogicznie, odkształcenie umowne (wydłużenie jednostkowe) jest wyrażone wzorem:

$$\varepsilon = \frac{l(t) - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l(t)}{l_0} \quad (3)$$

a odkształcenie rzeczywiste:

$$\varepsilon = \ln \frac{l(t)}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l(t)}{l_0} \quad (4)$$

gdzie:

$l(t)$ – pomiar długości próbki w czasie t ,

l_0 – długość próbki przed badaniem.

Materiały, które charakteryzują się dużą kruchością mogą wykazywać zbieżność wytrzymałości na rozciąganie z naprężeniem rozrywającym, które odpowiada zniszczeniu próbki. Materiały o właściwościach plastycznych po osiągnięciu wytrzymałości na rozciąganie wykazują spadek siły rozciągającej do chwili pęknięcia próbki w punkcie odpowiadającym sile rozrywającej. Naprężenie rozrywające jest odnoszone do najmniejszego przekroju wydłużonej próbki po rozerwaniu.

Metoda pośrednia. Badanie wytrzymałości na rozciąganie wykonano metodą brazylijską przez ściskanie walca po tworzącej. Wymiary badanych próbek dobrano według ASTM [1], gdzie określono zalecany stosunek wysokości walca (dysku) do jego średnicy, jako $H/D = 0,2 \div 0,75$. Średnica próbki powinna być przynajmniej 10 razy większa niż największe ziarno w próbce. Zależności te spełniają próbki przygotowane w urządzeniu dwudzielnym do zagęszczania próbek do badań edometrycz-

nych o średnicy 65 mm i wysokości 19 mm. Na rys. 3 pokazano próbkę ściskaną po tworzącej w maszynie wytrzymałościowej.

Odształcenie w badaniu pośrednią metodą brazylijską jest określane jako przemieszczenie pionowe (skrócenie średnicy próbki) lub odkształcenie względne. Naprężenie rozciągające definiuje się za pomocą wzoru:

$$\sigma = \frac{2F_{\max}}{\pi HD} \quad (5)$$

gdzie:

$F_{\max}$ – wartość maksymalna siły ściskającej, przy której następuje zniszczenie,

H – wysokość próbki,

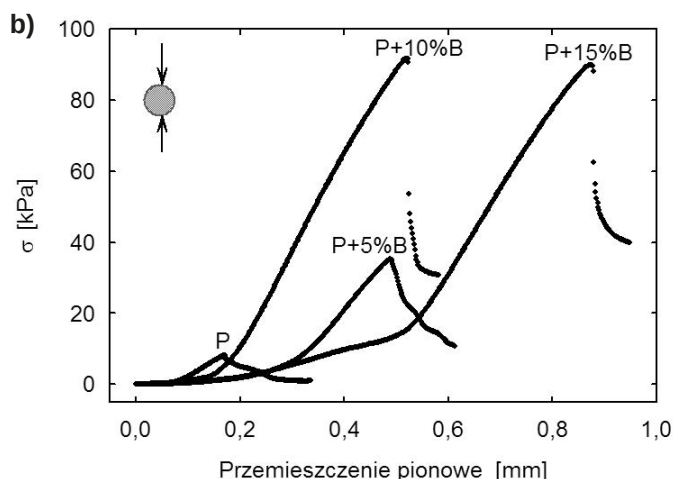
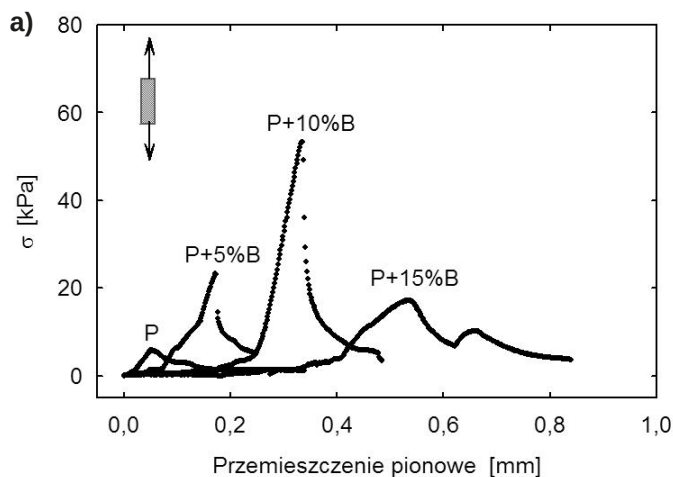
D – średnica próbki walcowej.

Obciążanie próbki prostopadłe do jej osi wywołuje pęknięcie wzdłuż powierzchni przechodzącej przez oś walca powodowane w głównej mierze przez siły rozciągające, prowadzące do rozerwania próbki. W starszej literaturze przeważa pogląd, że zgodnie z kryterium Griffitha zniszczenie rozpoczyna się w środku próbki, w nowszej stwierdza się, że koncentracja naprężenia w punktach przyłożenia obciążenia może prowadzić do zniszczenia próbki [7].

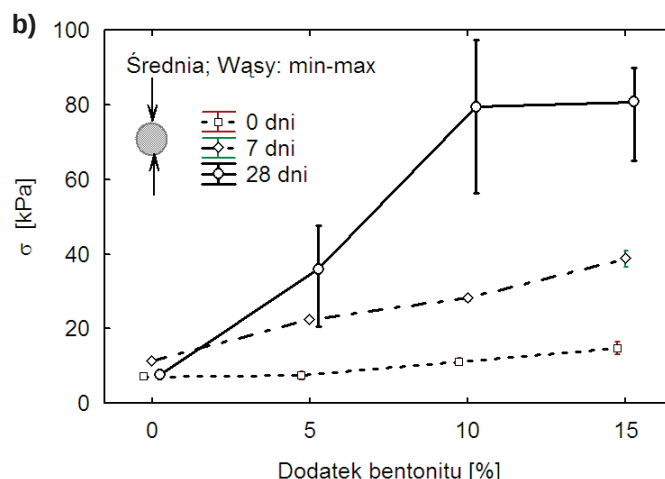
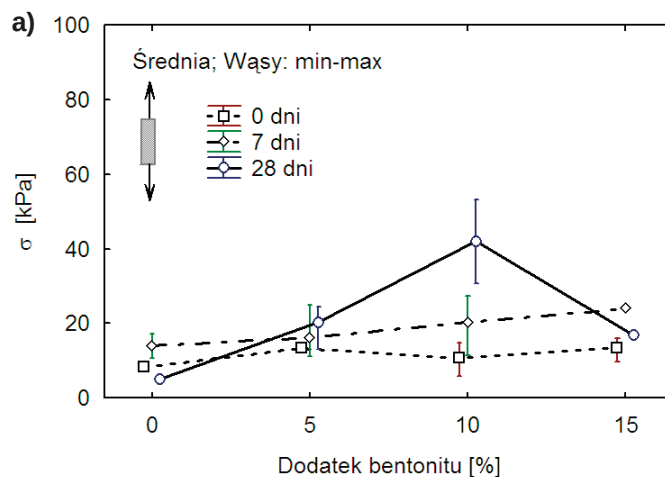
Wyniki badań rozciągania

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań rozciągania popiołu lotnego oraz popiołu z 5, 10 i 15% dodatkiem bentonitu sodowego w zależności od przemieszczenia pionowego podczas badania. Taki sposób prezentacji umożliwia porównanie wyników badań za pomocą obu metod. Należy dodać, że w przypadku badania popiołu metodą bezpośrednią rzeczywiste naprężenie uplastyczniające jest równe naprężeniu uplastyczniającemu umownemu, ze względu na niezmienny przekrój próbki podczas badania. Dodanie 15% bentonitu sodowego także nie skutkowało „szybkowaniem” próbki (rys. 2). W większości badań zaobserwowano zbieżność granicy wytrzymałości na rozciąganie z punktem, który odpowiada zniszczeniu próbki, co świadczy o ich dużej kruchości.

Wytrzymałość popiołu lotnego na rozciąganie, oznaczona metodą bezpośrednią, wynosi $8,15 \div 8,55$ kPa, a po dodaniu 5, 10 i 15% bentonitu wzrasta odpowiednio do wartości: $13,26 \div 13,56$ kPa, $5,80 \div 14,83$ kPa i $9,73 \div 15,92$ kPa. Wytrzymałość na rozciąganie próbek stabilizowanych bentonitem wzrasta po 28-dniowej pielęgnacji odpowiednio do wartości:



Rys. 4. Wykresy przykładowych zależności wytrzymałości na rozciąganie od przemieszczenia pionowego po 28 dniach pielęgnacji próbek popiołowych z różną zawartością bentonitu 0 ÷ 15%:
a) metoda bezpośrednia, b) metoda brazylijska



Rys. 5. Zestawienie wartości średnich oraz rozstępu wytrzymałości na rozciąganie próbek popiołowych z różną zawartością bentonitu bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 7 i 28 dniach pielęgnacji
a) metoda bezpośrednia, b) metoda brazylijska

12,97 ÷ 24,36 kPa, 30,75 ÷ 53,25 kPa oraz 16,31 ÷ 17,09 kPa. Próbkę charakteryzowały się zwiększającym się proporcjonalnie do dodatku bentonitu odkształceniem, które nie przekroczyło jednak 0,7%. W badaniach rozciągania metodą brazylijską uzyskano porównywalne lub wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do metody bezpośredniej (w przypadku wyższych wartości sił rozciągających). Wytrzymałość na rozciąganie popiołu wyniosła 6,86 ÷ 7,32 kPa. Wytrzymałość na rozciąganie próbek stabilizowanych dodatkiem 5, 10 i 15% bentonitu po 28-dniowej pielęgnacji wyniosła odpowiednio: 20,67 ÷ 47,63 kPa, 56,39 ÷ 97,32 kPa oraz 64,95 ÷ 90,00 kPa. Odkształcenie również wzrastało wraz z plastycznością próbek, nie przekraczając 1,4%. Dużo większe różnice w wynikach otrzymanych obiema metodami stwierdzono w przypadku osadów z dekarbonizacji wody [3]. Należy dodać, że podczas badań metodą brazylijską zaobserwowano obie formy propagacji zniszczenia – ze środka próbki oraz z miejsc przyłożenia obciążenia.

Mollamahmutoğlu i Yılmaz [8] uzyskali metodą brazylijską wytrzymałość popiołu bez domieszek równą 7,8 ÷ 10,9 kPa, natomiast – w porównaniu do wyników przedstawianych w niniejszej pracy – otrzymali dużo niższe wartości wytrzymałości dla popiołu z dodatkami bentonitu. Poziom odkształcenia był przez nich określony jako 1% w przypadku wszystkich prezentowanych badań.

Według [9] wytrzymałość popiołu na rozerwanie wynosi 11,1 kPa, przewyższając 4-krotnie wytrzymałość pyłów. Dla porównania, wytrzymałość na rozciąganie iłu zagęszczonego przy wilgotności optymalnej wynosi około 20 kPa przy odkształceniu do 0,3% (badanie przez zginanie podpartej w 5 punktach belki) [11].

Na rys. 5 pokazano rozstęp wyników badań wytrzymałości i wartości średnie otrzymane dla próbek badanych bezpośrednio po zagęszczaniu oraz po 7 i 28 dniach pielęgnacji, w zależności od procentowej zawartości bentonitu. Największe różnice w uzyskanych wynikach wytrzymałości na rozciąganie stwierdzono w przypadku próbek pielęgnowanych przez 28 dni. W przyszłości jest planowane wykonanie mikrografii (SE), co może pomóc w wyjaśnieniu istoty problemu. Widoczne załamanie wykresu (rys. 5a) w przypadku próbek z 15% dodatkiem betonu pielęgnowanych przez 28 dni i badanych metodą rozrywania może wynikać ze sposobu zagęszczania próbek walcowych, gdzie zagęszczane warstwy są położone równoległe do płaszczyzny zniszczenia.

WNIOSKI

1. Dodatki 5, 10 lub 15% bentonitu sodowego wpływają na parametry zagęszczalności popiołu lotnego. Wilgotność

optymalna mieszanina maleje proporcjonalnie do procentowego dodatku bentonitu, podczas gdy maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wzrasta. Wraz z dodaniem bentonitu wzrasta też gęstość właściwa szkieletu gruntowego.

2. Bentonit powoduje zwiększenie odkształcenia próbek proporcjonalnie do ilości procentowej dodatku. Wartość deformacji przesłony popiołowej podczas pęknięcia, przy 15% dodatku bentonitu, określano jako 0,7% za pomocą metody bezpośredniej i 1,4% metodą brazylijską.
3. Bentonit sodowy znacząco wpływa na wytrzymałość na rozciąganie popiołu lotnego, oznaczanego zarówno metodą bezpośrednią, jak i pośrednią – metodą brazylijską. Dodanie 10% bentonitu powoduje zwiększenie ponad 10-krotne wytrzymałości na rozciąganie popiołu zagęszczonego metodą standardową przy wilgotności optymalnej określonej metodą brazylijską. Zwiększenie dodatku bentonitu do 15% powoduje wzrost odkształcenia podczas zniszczenia próbki.
4. Wartości wytrzymałości na rozciąganie uzyskane metodą brazylijską są porównywalne lub wyższe niż w przypadku metody bezpośredniej (co jest szczególnie widoczne w przypadku wyższych wartości sił niszczących).
5. Uzyskane wartości deformacji i wytrzymałości na rozciąganie zagęszczonego popiołu lotnego z dodatkiem nawet 5% bentonitu są wyższe niż otrzymane dla itu stosowanego do uszczelnień mineralnych.

LITERATURA

1. ASTM D3967-08: Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

2. Chakrabarti S., Kodikara J.: Direct tensile failure of cementitiously stabilized crushed rock materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 2, 2007.

3. Dąbska A.: Badania osadów z dekarbonizacji wody w aspekcie ich przydatności do uszczelnienia składowisk odpadów. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa 2007.

4. Divya P. V., Viswanadham B. V. S., Gourc J. P.: Influence of geomembrane on the deformation behaviour of clay-based landfill covers. *Geotextiles and Geomembranes*, 34, 2012.

5. Eisele T. C., Kawatra S. K., Nofal A.: Tensile properties of class C fly-ash as a foundry core binder. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 25, 4, 2004.

6. Kokowski J.: Badania wytrzymałości na rozrywanie gruntu gliniastego stanowiącego uszczelnienie składowiska odpadów. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 15, 4, 1994.

7. Li D., Wong L. N. Y.: The Brazilian disc test for rock mechanic applications: review and new insights. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 2, 2013.

8. Mollamahmutoğlu M., Yilmaz Y.: Potential use of fly ash and bentonite mixture as liner or cover at waste disposal areas. *Environmental Geology*, 40, 11-12, 2001.

9. Parylak K.: Charakterystyka kształtu cząstek drobnoziarnistych grun-
tów niespoistych i jej znaczenie w ocenie wytrzymałości. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo Z.* 90, Gliwice 2000.

10. Plé O., Lê T. N. H.: Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 2012.

11. Plé O., Manicacci A., Gourc J. P., Camp S.: Flexural behavior of a clay layer: experimental and numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, 3, 2012.

12. Zabielska-Adamska K.: Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions. *Journal of Hazardous Materials*, 151, 2-3, 2008.

PODZIĘKOWANIA: Autorki składają serdeczne podziękowania prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Sewerynowi i inż. Rajmundowi Koniuszewskiemu za umożliwienie przeprowadzenia badań i pomoc przy ich wykonaniu.