

Piotr FILIPOWICZ
Magdalena BORYS
Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Raszynie

PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH CYKLICZNIE MROŻONYCH

W artykule wykonano analizę porównawczą kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, pochodzących z hałdy kopalni węgla kamiennego „Bogdanka” o różnym okresie ich składowania, oraz prób przetworzonego przemysłowo refulatu pochodzącego z dna kanału szczecińskiego. Przeprowadzone badania wykazały, że analizowane próby refulatu oraz odpadów powęglowych różnią się między sobą maksymalną gęstością objętościową szkieletu gruntowego i wilgotnością optymalną, natomiast cechują się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi.

1. Wprowadzenie

Materiały odpadowe produkowane przez przemysł są coraz częściej wykorzystywane w budownictwie zamiast gruntów naturalnych. Znaczna część odpadów powęglowych pozostających po wydobyciu węgla kamiennego jest wykorzystywana do rekultywacji wyrobisk odkrywkowych po kruszywach, budowy i remontu dróg lokalnych, budowy i modernizacji korpusów nasypów wodno-melioracyjnych, w tym wałów przeciwpowodziowych, ogroblowań kanałów i zbiorników wodnych oraz do produkcji materiałów budowlanych. W ostatnich latach pojawił się nowy rodzaj materiału, który powstał po przetworzeniu zanieczyszczonych gruntów naturalnych z przeznaczeniem do gospodarczego wykorzystania w budowie lub modernizacji wałów przeciwpowodziowych oraz innych budowli hydrotechnicznych.

Aby możliwe było wykorzystanie tych materiałów jako gruntu budowlanego, niezbędna jest wiedza na temat ich oddziaływania na otaczające środowisko, w tym przede wszystkim składu chemicznego materiału oraz odcieków wodnych, w następnej kolejności zaleca się rozpoznanie ich parametrów geotechnicznych. W przypadku zastosowania tych materiałów w budownictwie hydrotechnicznym, m.in. do budowy wałów przeciwpowodziowych, ważne jest określenie zakresu zmienności wartości parametrów geotechnicznych, jakiego można się spodziewać po kilkuletniej eksploatacji nasypów wykonanych z tych materiałów, które są cyklicznie narażone na przemarzanie.

2. Charakterystyka materiału i metodyka badań

Wykonano analizę porównawczą przedziału zmienności parametrów wytrzymałościowych dla próbek odpadów powęglowych świeżych, dostarczonych prosto z kopalni na hałdę przy kopalni węgla kamiennego „Bogdanka” w Lubelskim Zagłębiu Węglowym oraz dwóch materiałów (oznaczonych jako MI i MII) wytworzonych przemysłowo z uzdatnionego refulatu pochodzącego z dna kanału szczecińskiego. W przypadku tych materiałów określono wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności przed cyklicznym mrożeniem oraz po założonej liczbie cykli mrożenia. Wyniki badań własnych porównano z wynikami prezentowanymi w literaturze dotyczącymi odpadów powęglowych z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego oraz gruntów naturalnych.

Wytrzymałość na ścinanie badano z zastosowaniem aparatu bezpośredniego ścinania, wyposażonego w dwie skrzynki (jedna o wymiarach 120 x 120 x 60 mm, a druga mniejsza o wymiarach 60 x 60 x 48 mm). W większej skrzynce badano próbki odpadów powęglowych o pełnym uziarnieniu, natomiast w mniejszej próbki refulatu MI i MII. Ścinanie wykonywano z prędkością odkształcenia $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Na wstępie oznaczono parametry wytrzymałościowe dla odpadów niemrożonych, doprowadzonych do wilgotności optymalnej, którą określono w badaniu aparatem Proctora. Próbkę zagęszczano bezpośrednio w skrzyneczce aparatu poprzez ubijanie ręczne w trzech warstwach, tak aby uzyskać wskaźnik zagęszczenia wynoszący ok. 0,92, czyli taki, jaki jest wymagany w przypadku gruntów w korpusach nasypów.

Następnie próbki odpadów powęglowych oraz przetworzonego refulatu MI i MII zostały doprowadzone do wilgotności zbliżonej do optymalnej, po czym zagęszczano je w cylindrze aparatu Proctora, tak aby uzyskać wskaźnik zagęszczenia ok. $I_s = 0,92$. Tak przygotowane próbki poddano cyklicznemu procesowi zamrażania i rozmrażania w szczelnych woreczkach foliowych po to, by zabezpieczyć materiał przed utratą wilgotności podczas prowadzenia badania. Próbkę mrozono w temperaturze -20°C przez 24 h. Następnie przez dobę próbki te były rozmrażane w powietrzu bez dostępu wody w temperaturze 20°C . Po założonej liczbie cykli mrożenia próbki były przygotowywane do badania w aparacie bezpośredniego ścinania.

Próbki odpadów powęglowych z uwagi na występujące w nich cząstki należące do frakcji żwirowej, których zawartość wynosiła do 75%, formowane były bezpośrednio w skrzynce aparatu bezpośredniego ścinania ze względu na brak możliwości ich wycięcia z dużych prób. Wycięcie pojedynczej próbki wiązałoby się z trwałym uszkodzeniem jej struktury, a uzyskane wyniki byłyby obarczone znacznym błędem pomiarowym. Zatem poszczególne próbki były zagęszczane w skrzynce aparatu bezpośredniego ścinania tak jak w aparacie Proctora, aby uzyskać wskaźnik zagęszczenia ok. $I_s = 0,92$.

W przypadku przetworzonego refulatu MI i MII pojedyncze próbki były wycinane z dużych prób zagęszczonych w aparacie Proctora. Było to możliwe, ponieważ próbki te zawierały zdecydowanie mniej cząstek należących do frakcji żwirowej. W przypadku prób MI zawartość tych cząstek wynosiła do 0,5%, a próbek MII do 2,1%.

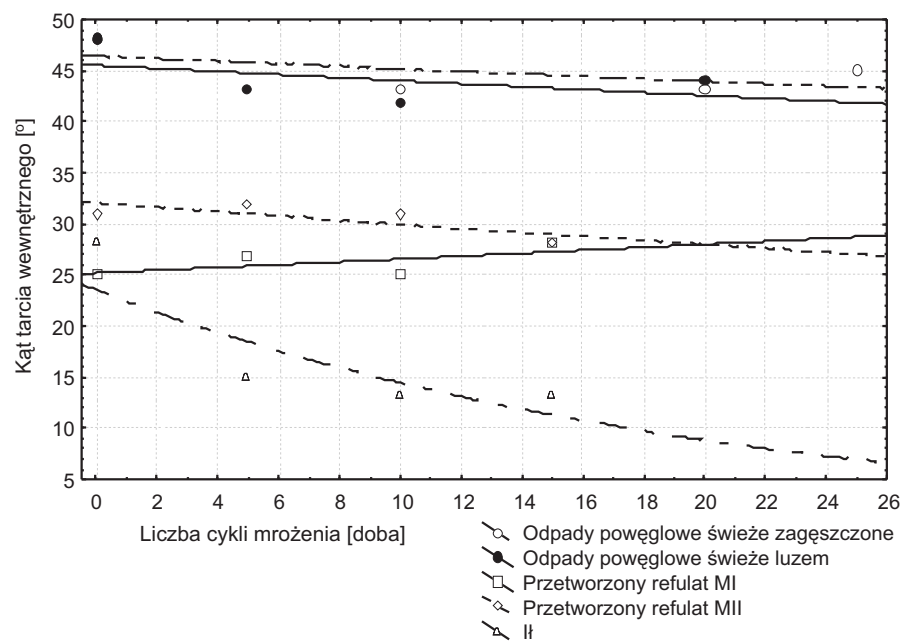
Określono także wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności dla próbek odpadów powęglowych świeżych niezagęszczonych, które poddano cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu. Próbki te były wstępnie doprowadzone do wilgotności optymalnej, a następnie umieszczone w szczelnych woreczkach zabezpieczających materiał przed utratą wilgotności. Po wykonaniu założonej liczby cykli próbki przed badaniem w aparacie bezpośredniego ścinania były formowane bezpośrednio w skrzynce aparatu.

3. Wyniki badań i dyskusja

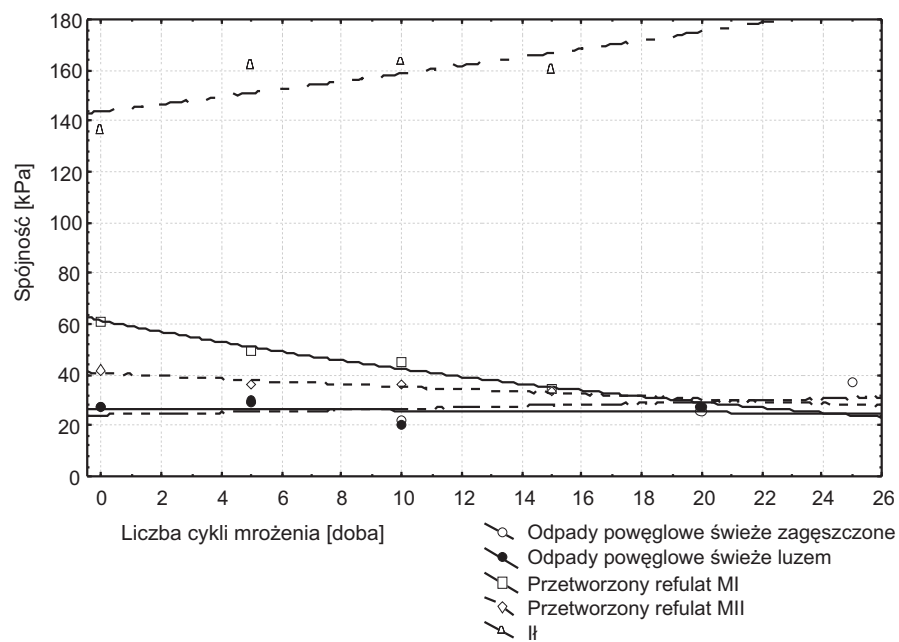
Obliczone wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności badanych odpadów powęglowych świeżych przed poddaniem ich cyklicznemu mrożeniu cechowały się wysokimi wartościami parametrów wytrzymałościowych. W przypadku próbek odpadów zanotowano wartości kąta tarcia wewnętrznego w granicach od 43 do 55°, natomiast wartości spójności od 22 do 32 kPa [1, 2, 5].

Zaobserwowano, że próbki odpadów powęglowych cyklicznie mrożonych, zarówno w stanie luźnym, jak i po zagęszczeniu ich w aparacie Proctora, charakteryzują się podobną tendencją do zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych. Dobrze obrazują to zależności wartości kąta tarcia wewnętrznego od liczby przeprowadzonych cykli badawczych (rys. 1.) oraz wartości spójności od liczby przeprowadzonych cykli zamrażania (rys. 2.).

W przypadku obu próbek, tj. odpadów powęglowych zagęszczonych i niezagęszczonych, zaobserwowano nieznaczny spadek wartości kąta wewnętrznego wraz ze wzrostem liczby cykli mrożenia. Analiza otrzymanych wartości kąta tarcia wewnętrznego pozwoliła stwierdzić, że największe zmiany zachodzą w początkowych cyklach mrożenia, dalsze zaś zmiany nie są już tak intensywne. W przypadku próbek odpadów powęglowych po 10 cyklach mrożenia w stanie zagęszczonym zanotowano spadek wartości kąta tarcia wewnętrznego średnio o 5°. Otrzymane średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego po 20 cyklach były takie same jak po 10 cyklach mrożenia, po 25 cyklach były zaś o 2° większe od tych po 10 i 20 cyklach (tab. 1.). Natomiast w przypadku próbek odpadów mrożonych w stanie luźnym zaobserwowano spadek wartości kąta tarcia wewnętrznego średnio o 5°, a różnica obliczonych średnich wartości kąta tarcia wewnętrznego po 10 i 20 cyklach mrożenia wynosiła od 1° do 2°.



Rys. 1. Zależność wartości kąta tarcia wewnętrznego od liczby przeprowadzonych cykli zamrażania



Rys. 2. Zależność wartości spójności od liczby przeprowadzonych cykli zamrażania

Zaobserwowano minimalny wzrost wartości spójności wraz z liczbą przeprowadzonych cykli mrożenia dla próbek odpadów powęglowych zagęszczonych i mrożonych. Analiza wyników pozwoliła stwierdzić, że badane próbki odpadów do 20 cykli mrożenia charakteryzowały się wartościami spójności wynoszącymi od 22 do 28 kPa, natomiast po przeprowadzeniu 25 cykli badawczych zanotowano wyraźny wzrost wartości spójności do średnio 37 kPa. W przypadku próbek odpadów powęglowych mrożonych w stanie luźnym nie zaobserwowano zdecydowanej tendencji do zmiany wartości spójności (tab. 2.).

Tabela 1. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpadów powęglowych mrożonych cyklicznie po zagęszczeniu

Wartość	Kąt tarcia wewnętrznego [°]				Spójność [kPa]			
	próby niemrożone	próby po 10 cyklach mrożenia	próby po 20 cyklach mrożenia	próby po 25 cyklach mrożenia	próby niemrożone	próby po 10 cyklach mrożenia	próby po 20 cyklach mrożenia	próby po 25 cyklach mrożenia
Minimalna	43	36	41	42	22	20	23	24
Maksymalna	55	48	44	46	32	23	30	43
Średnia	48	43	43	45	28	22	26	37
Odchylenie standardowe	5,745	6,245	1,528	1,893	4,349	1,528	3,786	8,756
Współczynnik zmienności [-]	0,121	0,145	0,036	0,042	0,157	0,071	0,148	0,237

Źródło: opracowanie własne na podstawie prac [3, 4].

Tabela 2. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpadów powęglowych mrożonych cyklicznie w stanie luźnym

Wartość	Kąt tarcia wewnętrznego [°]				Spójność [kPa]			
	próby niemrożone	próby po 5 cyklach mrożenia	próby po 10 cyklach mrożenia	próby po 20 cyklach mrożenia	próby niemrożone	próby po 5 cyklach mrożenia	próby po 10 cyklach mrożenia	próby po 20 cyklach mrożenia
Minimalna	43	41	39	42	22	25	18	26
Maksymalna	55	47	45	47	32	33	21	29
Średnia	48	43	42	44	28	30	20	28
Odchylenie standardowe	5,745	3,215	2,944	2,646	4,349	4,359	1,500	1,732
Współczynnik zmienności [-]	0,121	0,074	0,070	0,060	0,157	0,145	0,076	0,062

Źródło: opracowanie własne na podstawie prac [3, 4].

Podobne badania odpadów powęglowych pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego prowadzili m.in. Skarżyńska z zespołem [8]. Wykonywali oni badania na dwa sposoby – pierwszy polegał na mrożeniu próbek odpadów powęglowych w temperaturze -20°C przez 4 godziny, a następnie ich rozmrażaniu w powietrzu bez dostępu wody do próbek. Drugi sposób różnił się od pierwszego tym, że próbki były rozmrażane w wodzie. Każda z próbek ważyła 10 kg. Nie jest jednak podane, czy próbki te były badane w stanie luźnym czy po zagęszczeniu. Można się jedynie domyślać, że badanie to zostało wykonane na próbkach w stanie luźnym. Po analizie otrzymanych wyników stwierdzili, że odpady powęglowe cyklicznie mrożone „na sucho” nie wykazują zdecydowanych tendencji do zmian wartości parametrów geotechnicznych, natomiast cykliczne mrożenie „na mokro” powoduje znaczne zmiany wartości parametrów geotechnicznych. Po 25 cyklach mrożenia zaobserwowano zmniejszenie się wartości kąta tarcia wewnętrznego z 46 do 24° , przy jednoczesnym zwiększeniu wartości spójności z 31 do 51 kPa [8].

Badane próbki przetworzonego refulatu, zarówno MI, jak i MII, charakteryzowały się wysokimi wartościami kąta tarcia wewnętrznego, wynoszącymi od 24 do 33° oraz bardzo dobrą spójnością wynoszącą od 41 do 67 kPa. Materiał MI charakteryzował się zdecydowanie większą spójnością równą średnio 61 kPa w porównaniu z próbkami MII, dla którego to materiału obliczona wartość średnia spójności była równa 42 kPa. Natomiast obliczone średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego w odniesieniu do próbek MI były mniejsze średnio o 6° od wartości otrzymanych dla próbek MII (tab. 3.).

Wraz z liczbą przeprowadzonych cykli mrożenia zaobserwowano tendencję spadkową wartości spójności w przypadku obu próbek MI i MII, przy czym zaobserwowana tendencja wskazuje, że próba MI jest mniej odporna na cykliczne mrożenie, ponieważ zachodzące zmiany są bardziej intensywne niż te zaobserwowane dla próbki MII (tab. 3.). W przypadku próbek MI zaobserwowano średni spadek wartości spójności o 11 kPa po 5 cyklach mrożenia, a po 15 cyklach różnica ta wzrosła do 27 kPa. Natomiast dla próbek MII zanotowano średni spadek wartości spójności o 6 kPa po 5 cyklach mrożenia i o 9 kPa po 15 cyklach (tab. 3.).

W przypadku zależności wartości kąta tarcia wewnętrznego od liczby przeprowadzonych cykli mrożenia zaobserwowano tendencję wzrostową dla próbek MI, natomiast spadkową dla próbek MII. Zauważono także dla próbek MI wzrost wartości kąta tarcia wewnętrznego średnio o 3° po 15 cyklach mrożenia, natomiast dla próbek MII spadek średnio o 3° . Dla obu próbek po 15 cyklach mrożenia otrzymano wartości bardzo zbliżone, a wartość kąta tarcia wewnętrznego wynosiła średnio 28° .

Dla parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych oraz próbek przetworzonego refulatu MI i MII obliczono współczynnik zmienności. Jest to iloraz odchylenia standardowego i wartości średniej oznaczanego parametru. Przyjmuje się, że zmienność uzyskanych wyników obliczeń jest mała, gdy

współczynnik ten jest mniejszy lub równy 0,05, natomiast duża, jeżeli jest on większy od wartości 0,25 [7].

Tabela 3. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności próbek przetworzonego refulatu

Wartość	Kąt tarcia wewnętrznego [°]				Spójność [kPa]			
	próby niemrozone	próby po 5 cyklach mrożenia	próby po 10 cyklach mrożenia	próby po 15 cyklach mrożenia	próby niemrozone	próby po 5 cyklach mrożenia	próby po 10 cyklach mrożenia	próby po 15 cyklach mrożenia
Próbki przetworzonego refulatu MI								
Minimalna	24	26	24	24	55	36	34	20
Maksymalna	26	28	27	30	67	58	52	52
Średnia	25	27	25	28	61	50	45	34
Odchylenie standardowe	1,000	1,000	1,528	3,215	6,000	11,930	9,866	16,370
Współczynnik zmienności [-]	0,040	0,037	0,060	0,116	0,098	0,240	0,218	0,481
Próbki przetworzonego refulatu MII								
Minimalna	28	31	29	27	36	33	27	30
Maksymalna	33	32	32	28	50	40	45	38
Średnia	31	32	31	28	42	36	36	33
Odchylenie standardowe	2,217	0,577	1,732	0,577	5,795	3,786	9,000	4,163
Współczynnik zmienności [-]	0,072	0,018	0,056	0,021	0,137	0,106	0,250	0,125

W przypadku parametrów wytrzymałościowych odpadów powęglowych i przetworzonego refulatu MI i MII obliczony wskaźnik zmienności (podany w tab. 1-3) wynosił 0,04-0,24 dla próbek odpadów powęglowych zagęszczonych i mrożonych, 0,06-0,16 dla próbek odpadów powęglowych mrożonych w stanie luźnym, 0,04-0,24 dla próbek MI i 0,02-0,25 dla próbek MII. Jedynie w przypadku próbek MI dla wartości spójności po 15 cyklach mrożenia uzyskano współczynnik równy 0,48, czyli znaczną zmienność obliczonych wyników. W przypadku pozostałych wartości można stwierdzić, że zmienność wartości jest mała lub średnia.

Wartości parametrów wytrzymałościowych z badań własnych porównano z wartościami dla iłu, który został poddany cyklicznemu procesowi mrożenia przez Kumora [6]. Zaobserwowano pewne podobieństwo w tendencji zmiany kąta tarcia wewnętrznego odpadów powęglowych i iłu. Odpady powęglowe, podobnie jak ił, reagują na cykliczne mrożenie, pomimo znacznych różnic pod względem zawartości cząstek należących do poszczególnych frakcji uziarnienia tych gruntów. Podobnie jak w przypadku próbek odpadów powęglowych naj-

bardziej intensywne zmiany wartości kąta tarcia wewnętrznego zachodzą w początkowych cyklach mrożenia próbek iłu, natomiast kolejne przeprowadzone cykle badawcze wskazują na powolną ich stabilizację (tab. 4.).

Tabela 4. Parametry wytrzymałości na ścinanie iłu

Parametr	Ił niezamrażany	Ił po 1. cyklu mrożenia	Ił po 5. cyklu mrożenia	Ił po 10. cyklu mrożenia	Ił po 20. cyklu mrożenia
Kąt tarcia wewnętrznego [°]	28,0	21,1	15,0	13,33	13,2
Spójność [kPa]	136	141	162	163	160

Źródło: opracowanie własne na podstawie pracy [6].

Próbki MI i MII, pomimo podobnego uziarnienia do iłu, wykazują zdecydowanie inne tendencje, zarówno co do wartości kąta tarcia wewnętrznego, jak i spójności.

4. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących wpływu cyklicznego mrożenia na parametry wytrzymałościowe odpadów przemysłowych.

1. Wszystkie badane próbki odpadów powęglowych, jak i przetworzonego refu-latu charakteryzowały się wysokimi wartościami parametrów wytrzymałościowych.
2. W odpadach powęglowych świeżych cyklicznie mrożonych największe zmiany parametrów wytrzymałościowych zaobserwowano w początkowych cyklach badawczych, zarówno w próbkach zagęszczonych, jak i niezagęszczonych. Wartości kąta tarcia wewnętrznego zmniejszały się wraz z liczbą cykli. Zanotowano minimalny wzrost wartości spójności w przypadku próbek zagęszczonych i mrożonych, natomiast nie zauważono wyraźnej zmiany wartości dla próbek mrożonych w stanie luźnym.
3. Badane próbki MI i MII charakteryzowały się wysokimi wartościami kąta tarcia wewnętrznego ($>24^\circ$) oraz bardzo dobrą spójnością (MI > 55 kPa i MII > 36 kPa), wyższą niż naturalne grunty spoiste o podobnym uziarnieniu.
4. Badania modelowe parametrów mechanicznych, polegające na cyklicznym mrożeniu próbek MI i MII zagęszczonych do wskaźnika zagęszczenia ok. $I_s = 0,92$, wykazały, że mimo mrożenia, próbki nadal charakteryzują się wysokim kątem tarcia wewnętrznego i spójnością.

Literatura

1. Borys M., Filipowicz P.: Geotechnical parameters of mine wastes from The Lubelskie Coal Basin as a material for hydrotechnical embankments. Journal of Water and Land Development, Falenty 2004, 8, 163-170.

2. Borys M., Filipowicz P.: Possible utilization of mining wastes from the Lubelskie Coal Basin for hydrotechnical structures. Polish Journal of Environmental Studies, Olsztyn 2004, 13, suppl. III, 146-148.
3. Borys M., Filipowicz P.: Właściwości geotechniczne odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Woda Środowisko Obszary Wiejskie, Rozprawy naukowe i monografie, Falenty 2008, 24, 99.
4. Filipowicz P.: Wpływ czynników środowiskowych na parametry geotechniczne odpadów powęglowych w aspekcie ich zastosowania do budowy nasypów wodno-melioracyjnych. Falenty 2006, 195.
5. Filipowicz P., Borys M.: Geotechnical properties of mining wastes and their utilization in civil engineering. „Problematic soils”. Eastern Mediterranean University Press, 2005, 1, 259-267.
6. Kumor M.K.: Zmiany wytrzymałości i struktury iltu pliocińskiego pod wpływem zamrażania. Archiwum Hydrotechniki, t. XXXII, Warszawa 1986, 3/4, 461-473.
7. Przewłocki J.: Problemy stochastycznej mechaniki gruntów. Ocena niezawodności. DWE, Wrocław 2006, 236.
8. Skarżyńska K.M., Burda H., Kozielska-Sroka E., Michalski P.: Laboratory and site investigations on weathering of coal mining wastes as a fill material in earth structures. Reclamation, treatment and utilization of Coal Mining Wastes. A.K.M. Rainbow Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1987, 179-195.

STRENGTH PARAMETERS OF CYCLICALLY FROZEN INDUSTRIAL WASTES

Abstract

The article presents strength parameters of cyclically frozen industrial wastes from Bogdanka Mine in Lubelskie Coal Basin and two materials marked MI and MII originated from sediments dredged out of the Szczecin Channel. Obtained results show, that the coal mining waste and materials marked MI and MII differ in maximum dry density of solid particles and optimal moisture content. On the other hand the coal mining waste and the materials MI and MII are characterized by high angle of internal friction and high cohesion.

Wpłynęło do Oficyny Wydawniczej w marcu 2009 r.