

WPLYW NAWODNIENIA NA ŚCIŚLIWOŚĆ ODPADÓW POWĘGLOWYCH I ICH MIESZANEK Z POPIOŁEM LOTNYM

INFLUENCE OF SATURATION ON THE COMPRESSIBILITY OF MINESTONE AND ITS MIXTURES WITH FLY ASH

Eugeniusz Zawisza

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Anna Blak

Streszczenie. Celem pracy było określenie wpływu nawodnienia na ściśliwość odpadów węglowych z kopalni Rydułtowy-Anna oraz ich mieszanek z 10%, 20% i 30% (wagowo) dodatkiem popiołu lotnego z elektrowni Skawina S.A. Badania przeprowadzono w średniowymiarowym edometrze ($d = h = 374$ mm), na próbkach formowanych przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$, nawodnionych przed obciążeniem. W analizie uwzględniono wyniki wcześniejszych badań na tych samych materiałach, ale nienawodnionych. Stwierdzono, że ściśliwość badanych materiałów była stosunkowo nieduża, a w przypadku mieszanek wyraźnie zależna od dodatku popiołu i warunków wodnych. Dokonano również oceny przydatności badanych materiałów do celów budownictwa ziemnego.

Abstract. The paper aimed at the determination of the influence of saturation on compressibility of minestone from the Rydułtowy-Anna mine and its mixtures with 10, 20 and 30% (by weight) additive of fly ash from the power plant Skawina S.A. The tests were carried out in a medium-size oedometer ($d = h = 374$ mm), on the samples formed at the optimum moisture content and the compaction index $I_s = 0.95$, saturated before loading. The results of previous tests conducted on the same but non-saturated samples were taken into consideration in the analysis of the obtained data. It was stated, that the compressibility of the tested materials was relatively small, and in the case of the mixtures clearly depended

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza, prof. UR, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; mgr inż. Anna Blak, Rudnik, ul. Słoneczna 23, 32-440 Sułkowice; e-mail: kiwig@ur.krakow.pl.

on the fly ash additive and water conditions. The assessment of the usability of the tested materials for earth structures was also performed.

Słowa kluczowe: odpady przemysłowe, odpady powęglowe, popioły elektrowniane, właściwości geotechniczne, ścisłość

Key words: industrial wastes, minestone, fly ash, geotechnical properties, compressibility

WSTĘP

Szybki rozwój gospodarki stwarza problemy z odpadami, które są ubocznymi i niepożądanymi produktami, wytwarzanymi przez zakłady przemysłowe. Zagospodarowanie ich jest wyzwaniem dla zakładów produkcyjnych, gdyż są szkodliwe dla środowiska, powodując zanieczyszczanie wód powierzchniowych i podziemnych, gleb i powietrza. Najwięcej odpadów wytwarza przemysł energetyczny, górniczy i metalurgiczny. Chodzi tu przede wszystkim o odpady pogórnice, głównie skalne z kopalń podziemnych i odkrywkowych, szlasy poflotacyjne i odpady popłuczkowe przetwórstwa węglowego, siarkowego, miedziowego i cynkowo-olowiowego oraz popioły lotne i żużle z elektrowni i elektrociepłowni.

Początkowo problem z odpadami rozwiązywano poprzez transport i składowanie ich w wyznaczonych do tego celu terenach, najczęściej w pobliżu kopalni. Nie było to jednak dobre rozwiązanie, gdyż wraz z rozwojem przemysłu co roku wzrasta liczba wytwarzanych odpadów. W związku z tym pojawiła się tendencja do traktowania zwałowisk odpadów powęglowych jako wtórnych złóż surowców, znajdujących szerokie zastosowanie m.in. w drogownictwie, robotach inżynieryjnych, budownictwie oraz rekultywacji [Drenda i in. 2011, Dzierwa i Zawisza 2006]. Na składowiskach i hałdach przemysłowych w Polsce zdeponowane zostało ponad 4 mld ton odpadów. Co roku zwałowane jest około 120 mln ton odpadów [Borkiewicz 1996], dlatego ich wykorzystanie ma istotne znaczenie zarówno w aspekcie techniczno-ekonomicznym, jak i ekologicznym [Grebenets i Sadowski 1993, Sørensen 1993, Zawisza 2001, Zawisza 2012].

Dotychczasowe doświadczenia związane z gospodarczym wykorzystaniem odpadów przemysłowych wskazują, że mogą one być zastosowane w różnych działach budownictwa i górnictwa, jednak największe możliwości stwarzają roboty inżynieryjne, takie jak nasypy drogowe i hydrotechniczne. Aby ocenić przydatność materiałów odpadowych do celów budownictwa ziemnego, należy określić ich właściwości geotechniczne warunkujące zachowanie stateczności i nośności konstrukcji ziemnych.

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było określenie wpływu nawodnienia na wartości parametrów charakteryzujących ścisłość wybranych odpadów powęglowych oraz ich mieszanek z popiołem lotnym, to jest osiadań oraz modułów ścisłości.

MATERIAŁY I METODY

Materiały do badań stanowiły nieprzepalone odpady powęglowe (5-letnie) pobrane ze składowiska KWK Rydułtowy-Anna, popioły lotne pochodzące ze zsypu przy elektrofiltrze z elektrowni Skawina S.A. oraz mieszanki odpadów powęglowych z popiołami lotnymi, w których zawartość popiołu stanowiła 10, 20 i 30% (wagowo).

Zakres badań podstawowych obejmował oznaczenie składu granulometrycznego, gęstości właściwej szkieletu, wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz kąta tarcia wewnętrznego i spójności wszystkich trzech wyżej wymienionych materiałów.

Skład granulometryczny oznaczono metodą sitową dla cząstek i ziaren $> 0,063$ mm oraz areometryczną dla cząstek $< 0,063$ mm. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono dla cząstek $< 0,063$ mm metodą kolby miarowej w wodzie. Maksymalną gęstość objętościową szkieletu i wilgotność optymalną oznaczono i podano na podstawie pracy Zawiszy i Lisa [2013]. Oznaczenia tych parametrów dokonano w średniowymiarowym aparacie Proctora w cylindrze o objętości $9,8 \text{ dm}^3$ ($d = 25 \text{ cm}$, $h = 20 \text{ cm}$ – odpady powęglowe i mieszanki odpadów powęglowych z popiołem lotnym) oraz w standardowym aparacie Proctora w cylindrze o objętości $2,2 \text{ dm}^3$ ($d = 15 \text{ cm}$, $h = 12 \text{ cm}$ – popioły lotne), przy standardowej energii zagęszczania $E_z = 0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego podano na podstawie pracy Zawiszy i Organa [2012]. Oznaczenie tych parametrów przeprowadzono w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania, o wymiarach skrzynki $30 \times 30 \times 20 \text{ mm}$ (odpady powęglowe i ich mieszanki z popiołami) oraz w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzynki $12 \times 12 \times 7 \text{ mm}$ (popiół lotny).

Badania ściśliwości odpadów powęglowych oraz ich mieszanek z popiołem lotnym, stanowiące główny cel pracy, przeprowadzono w prototypowym edometrze średniowymiarowym [Projekt... 2000]. Składa się on z cylindra wewnętrznego o średnicy i wysokości 374 mm oraz cylindra zewnętrznego o średnicy i wysokości 738 mm (ryc. 1). Nawodnienie próbki umieszczonej w cylindrze wewnętrznym można przeprowadzić przez wypełnienie wodą przestrzeni pomiędzy cylindrami; woda dostaje się do próbki od dołu poprzez filtr porowaty. Do podnoszenia, ustawiania na podstawie i zdejmowania cylindra z próbką służy wciągarka łańcuchowa. Obciążenie na próbkę przykładane jest mechanicznie przez układ dźwigniowy o przełożeniu $1 : 10$. Rejestrację osiadania próbki dokonuje się za pomocą czujników zegarowych.

Zastosowany do badań edometr średniowymiarowy spełnia warunki odnośnie do zachowania odpowiednich proporcji pomiędzy średnicą i wysokością cylindra oraz pomiędzy średnicą cylindra a średnicą maksymalnych ziaren badanej próbki gruntu:

$$D : d = 1 \quad \text{wg Żurka [1969]}$$

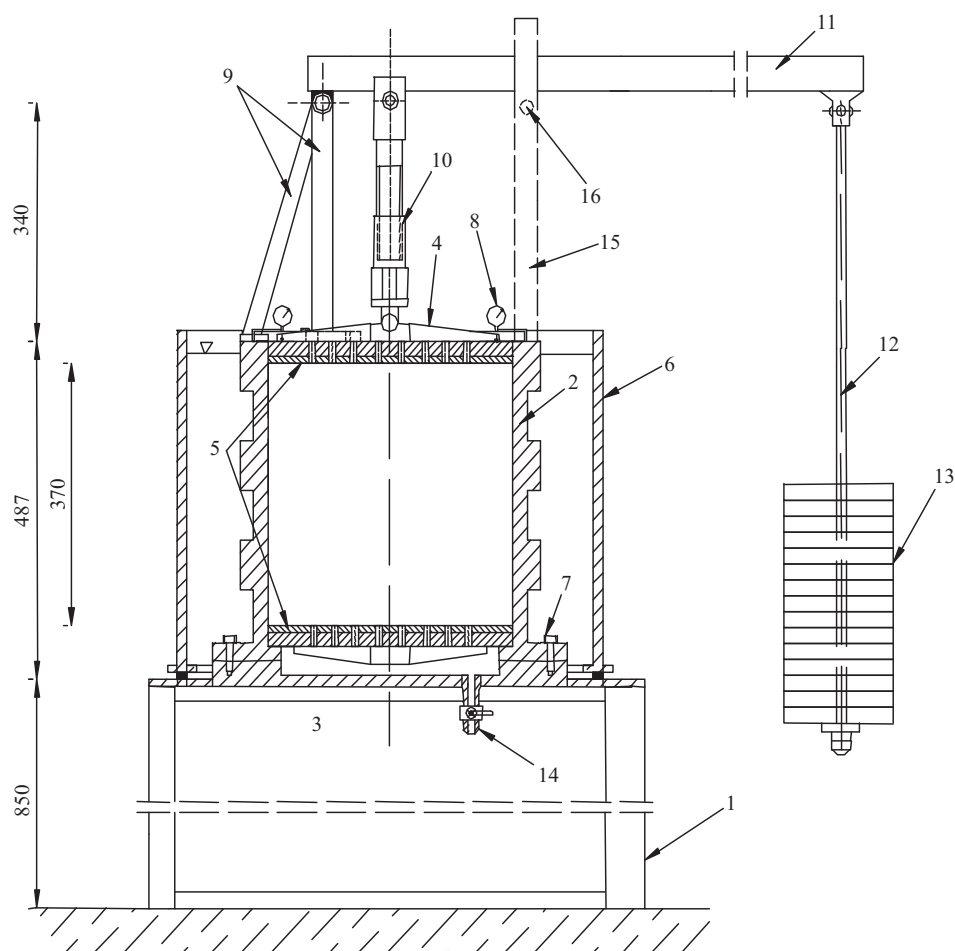
$$D : d_{\max} > 5$$

$$D : d_{\max} > 4-8 \quad \text{wg Niniporowicza [za: Pisarczyk 1995]}$$

gdzie:

- D – średnica próbki, mm,
- h – wysokość próbki, mm,
- d_{\max} – średnica maksymalna ziaren, mm.

Próbki do badań ściśliwości formowano w cylindrze wewnętrznym edometru przez zagęszczanie warstwami (grubość każdej warstwy 62 mm) do łącznej wysokości 372 mm . Próbki zagęszczano przy wilgotności bliskiej optymalnej dla danego materiału do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$.



Ryc. 1. Schemat konstrukcyjny edometru średniowymiarowego (wymiary w mm) [Projekt... 2000]: 1 – podstawa edometru, 2 – cylinder wewnętrzny, 3 – płyta dolna, 4 – pokrywa górna, 5 – filtry, 6 – cylinder zewnętrzny, 7 – śruby mocujące cylinder z podstawą, 8 – czujniki zegarowe, 9 – wsporniki ramienia dźwigni, 10 – trzpień do przekazywania obciążenia, 11 – ramię dźwigni, 12 – wieszaki z prętem do obciążników, 13 – obciążniki, 14 – zawór spustowy wody, 15 – wspornik widelkowy, 16 – bolec

Fig. 1. Structural scheme of the medium-size oedometer (dimensions in mm) [Projekt... 2000]: 1 – base of oedometer, 2 – inner cylinder, 3 – bottom plate, 4 – upper lid, 5 – filters, 6 – outer cylinder, 7 – bolts fixing cylinder to base, 8 – dial gauges, 9 – supports of lever arm, 10 – mandrel for relaying load, 11 – lever arm, 12 – hanger with rods for loads, 13 – loads, 14 – discharge valve for water, 15 – crutch, 16 – pin

Po uformowaniu próbki nawadniano ją przez 1 dobę, a następnie poddawano obciążaniu pierwotnemu, odciążaniu i obciążaniu wtórnemu. Poszczególne stopnie obciążenia miały następujące wartości: 0,02, 0,05, 0,10, 0,20 i 0,40 MPa, przy czym do 0,20 MPa kolejne stopnie obciążenia utrzymywano przez jedną dobę (konsolidacja próbek zacho-

dziła szybko – po kilkunastu godzinach przyrosty osiadania były nieznaczne), a ostatni stopień (0,40 MPa) do zakończenia konsolidacji. Następnie próbki były odciążane do 0,02 MPa i obciążane ponownie do 0,40 MPa.

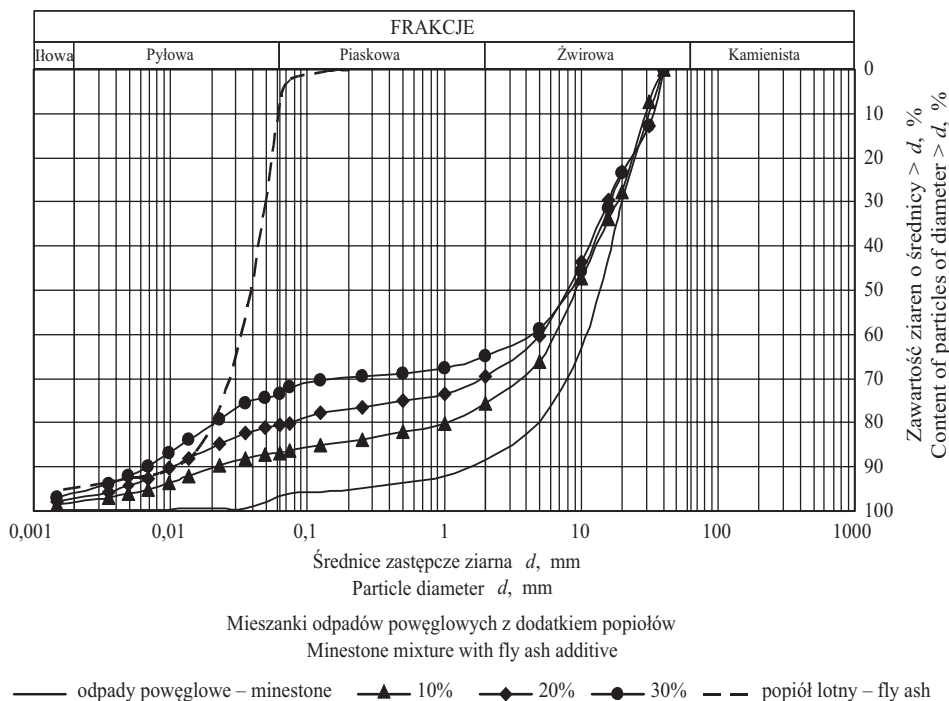
WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Podstawowe właściwości geotechniczne

Skład granulometryczny popiołu lotnego według nomenklatury geotechnicznej [PN-EN ISO 14668-2:2006] odpowiada pyłom jednofrakcyjnym (ryc. 2). Odpady powęglowe odpowiadają żwirom kilkofrakcyjnym. Mieszanki odpadów powęglowych z 10 i 20% dodatkiem popiołu lotnego odpowiadają żwirom piaszczystym wielofrakcyjnym, a mieszanka z 30% dodatkiem popiołu – żwirom pylastym wielofrakcyjnym.

Gęstość właściwa popiołu lotnego była najmniejsza ($2,24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), a odpadów powęglowych największa ($2,42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ – tab. 1). Gęstość właściwa mieszanek odpadów powęglowych z popiołem lotnym zmniejszała się od 2,30 do $2,25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ wraz ze zwiększeniem dodatku popiołu od 10 do 30%.

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu popiołu lotnego była najmniejsza ($1,12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), a odpadów powęglowych dużo większa ($1,97 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Największą



Ryc. 2. Wykresy uziarnienia badanych materiałów
Fig. 2. Grain size distribution of tested materials

Tabela 1. Wartości podstawowych parametrów geotechnicznych badanych materiałów
Table 1. Basic geotechnical parameters of the tested materials

Parametr Parameter	Popiół lotny Fly ash	Odpady powęglowe Minestone	Mieszanki odpadów powęglowych z dodatkiem popiołu Minestone mixtures with fly ash additive		
			10%	20%	30%
Gęstość właściwa szkieletu Density of solid particles, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,24	2,42	2,30	2,26	2,25
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu* Maximum dry density*, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,12	1,965	2,005	1,855	1,755
Wilgotność optymalna* Optimum moisture content*, %	35	7,40	9,30	11,90	12,7
Kąt tarcia wewnętrznego** Angle of internal friction**, °	31,8	33,3	39,3	37,7	33,8
Spójność** – Cohesion**, kPa	32,9	46,6	48,6	41,3	26,7

* Zawisza i Lis 2013 – Zawisza and Lis 2013

** Zawisza i Organ 2012 – Zawisza and Organ 2012

wartość maksymalną gęstości objętościowej szkieletu wykazała mieszanka odpadów powęglowych z 10% dodatkiem popiołu (około $2,01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Dalsze zwiększanie dodatku popiołu powodowało zmniejszanie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu.

Wilgotność optymalna popiołu lotnego była największa (35%), a odpadów powęglowych najmniejsza (7,4%). Wilgotność optymalna mieszanek zwiększała się od 9,3 do około 13% wraz ze zwiększeniem dodatku popiołu od 10 do 30%.

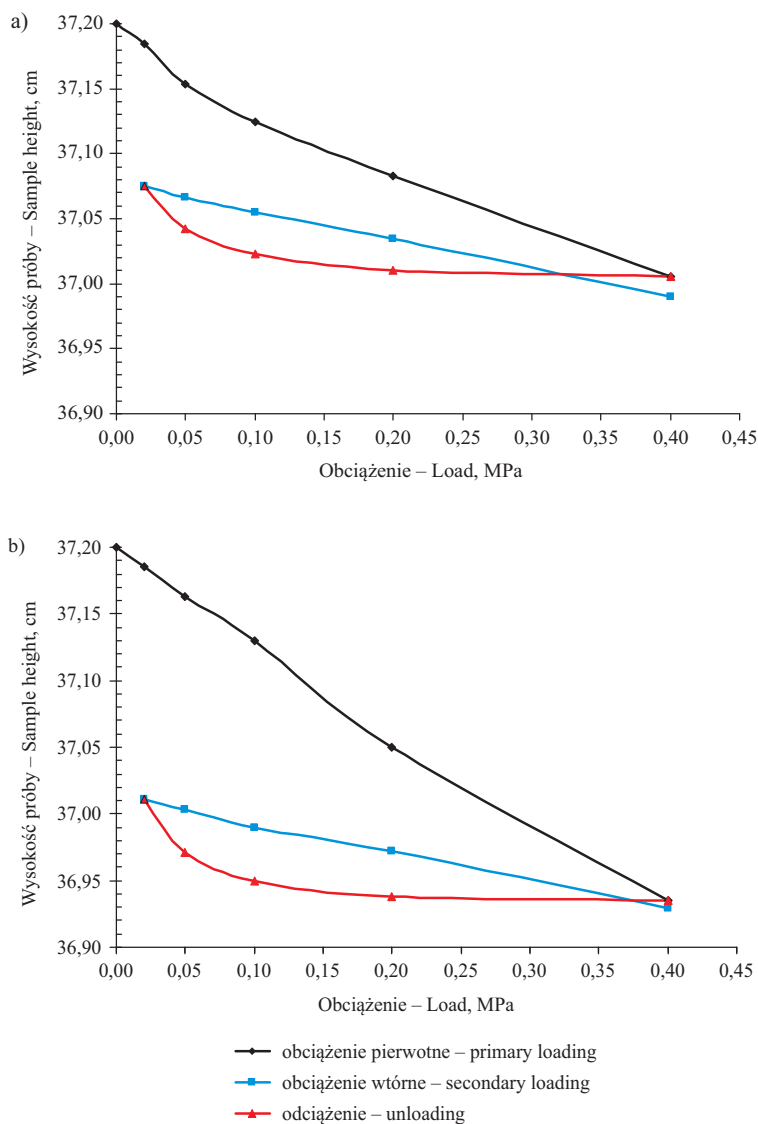
Kąt tarcia wewnętrznego popiołu (około 32°) był nieco mniejszy od wartości tego parametru dla odpadów powęglowych (ponad 33°). Wartości tego parametru dla mieszanek odpadów powęglowych z popiołem były wyraźnie większe i zmniejszały się od ponad 39° do około 34° wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu od 10 do 30%.

Spójność popiołu (około 33 kPa) była dużo mniejsza od spójności odpadów powęglowych (około 47 kPa). Spójność mieszanek odpadów powęglowych z popiołami była również duża i zmniejszała się od około 49 do 27 kPa wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu od 10 do 30%.

Ścisłość

Czas konsolidacji nawodnionych próbek zarówno odpadów powęglowych, jak i ich mieszanek z popiołem był stosunkowo krótki i wynosił 8–9 dób przy obciążeniu pierwotnym i 6–8 dób przy obciążeniu wtórnym.

Na ryc. 3 przedstawiono krzywe ścisłości i odprężania próbki odpadów powęglowych oraz mieszanek odpadów powęglowych z 30% dodatkiem popiołu. Wskazują one, że krzywe ścisłości pierwotnej mają typowy charakter krzywych konsolidacyjnych



Ryc. 3. Krzywe ściśliwości i odprężenia: a) odpadów powęglowych, b) mieszanek odpadów powęglowych z 30% dodatku popiołu

Fig. 3. Compressibility and decompression curves: a) minestone, b) mixture of minestone with 30% fly ash additive

i wykazują tendencję do stabilizacji osiadań przy zwiększaniu obciążenia. Krzywe ściśliwości wtórnej wskazują na quasi-liniową zależność osiadania od obciążenia, przy czym ich nachylenie jest dużo mniejsze niż krzywych ściśliwości pierwotnej ze względu na znacznie mniejsze osiadania.

W tabeli 2 wartości osiadań podano jako ich procentowy stosunek do początkowej wysokości próbki (odkształcenia względne przy obciążeniu pierwotnym i wtórnym), wartości modułów ścisłości pierwotnej i wtórnej uśredniono dla całego zakresu obciążenia (w przypadku modułu ścisłości pierwotnej stanowi to pewne przybliżenie z uwagi na nieliniową zależność „osiadanie–obciążenie” w górnym przedziale obciążenia 0,0–0,10 MPa – por. ryc. 3a, natomiast w przypadku modułu ścisłości wtórnej ma to uzasadnienie w quasi-liniowej zależności „osiadanie–obciążenie”). Przy obciążeniu pierwotnym najmniejsze odkształcenia wykazały odpady powęglowe (0,53%). Mieszanki odpadów powęglowych z popiołem wykazały znacznie większe odkształcenia ($\approx 1\%$ przy 10 i 20% dodatku popiołu oraz 0,72% przy 30% dodatku popiołu). Przy obciążeniu wtórnym wartości odkształceń były około 3–4-krotnie mniejsze niż przy obciążeniu pierwotnym. Podobnie jak przy obciążeniu pierwotnym najmniejsze odkształcenie wykazały odpady powęglowe. Warto podkreślić, że wartości odkształceń wtórnych były dużo mniej zróżnicowane niż wartości odkształceń pierwotnych, co stanowi efekt znacznego skonsolidowania próbek pod obciążeniem pierwotnym.

Największą wartość modułu ścisłości pierwotnej wykazały odpady powęglowe – 75 MPa. Mieszanki odpadów powęglowych z popiołem cechowały dużo mniejsze wartości modułu ścisłości – około 56 MPa przy 30% dodatku popiołu i 40–43 MPa przy 20 i 10% dodatku popiołu. Wartości modułu ścisłości wtórnej były 2–4-krotnie większe od modułu ścisłości pierwotnej, przy czym wartości najwyższe charakteryzowały odpady powęglowe (około 166 MPa). Nieco mniejszą wartość wykazała mieszanka odpadów powęglowych z 30% dodatkiem popiołu (163 MPa), a wyraźnie mniejsze mieszaniny z 20 i 10% dodatkiem popiołu (148 i 153 MPa).

Tabela 2. Wartości odkształceń oraz uśrednionych modułów ścisłości badanych materiałów
Table 2. Values of deformations and mean compressibility moduli of the tested materials

Materiał – Material	Odkształcenia przy obciążeniu Deformation under loading		Moduł ścisłości Compressibility modulus		
	pierwotnym primary %	wtórnym secondary %	pierwotny primary MPa	wtórny secondary MPa	
	Odpady powęglowe – Minestone:				
• nawodnione – saturated	0,53	0,23	75	166	
• nienawodnione – unsaturated	0,74	0,28	54	137	
Mieszanki odpadów powęglowych z dodatkiem popiołu: Mixtures of minestone with fly ash additive:					
• nawodnione saturated	10%	0,93	0,25	43	155
	20%	1,01	0,26	40	148
	30%	0,72	0,23	56	163
• nienawodnione* unsaturated*	10%	0,61	0,19	66	205
	20%	0,71	0,16	56	244
	30%	0,87	0,11	46	345

* Zawisza i Micor 2012 – Zawisza and Micor 2012

Występujące nieproporcjonalności pomiędzy wartościami modułów ściśliwości badanych materiałów (największy moduł ściśliwości odpadów powęglowych, mniejsze moduły mieszanek, wzrastające wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu) mogą wynikać z różnych przyczyn, takich jak skład uziarnienia odpadów powęglowych (np. przypadkowy udział okruchów, zwłaszcza o większych rozmiarach, w poszczególnych próbkach), skład petrograficzny (przypadkowy udział okruchów skał o różnej wytrzymałości). Losowy charakter tych czynników mógł wpływać na zachowanie się materiału pod kolejnymi stopniami obciążenia, gdy zachodzi tzw. efekt podpłytkowy, wynikający z niedokładnego przylegania gruboziarnistego materiału do ścian cylindra oraz kruszenie krawędzi i rozpadanie się słabszych okruchów [Rogowska i Pisarczyk 1987, Dzierwa i Zawisza 2007].

Wartość wskaźnika skonsolidowania była największa dla odpadów powęglowych – 0,45, a najmniejsza dla mieszanki odpadów powęglowych z 20% dodatkiem popiołu lotnego – 0,27. Pośrednie wartości – 0,28 i 0,34 – uzyskano w przypadku mieszanek odpadów powęglowych z 10 i 30% dodatkiem popiołów. Podane wartości były znacznie mniejsze od wartości podawanych przez normę PN-81/B-03020:1986 dla gruntów mineralnych drobnoziarnistych, które w tej normie wahają się w przedziale od 0,60 do 0,90.

W celu analizy wpływu nawodnienia na zmianę parametrów ściśliwości badanych materiałów, wartości tych parametrów porównano z wartościami podanymi w pracy Zawiszy i Micora [2012] dla tych samych materiałów, o takich samych parametrach początkowych ($I_s = 0,95$, $w \approx w_{opt}$), lecz nienawodnionych (tab. 2).

Wyniki analizy porównawczej wskazują, że odkształcenia pierwotne odpadów powęglowych nawodnionych były 1,4-krotnie mniejsze niż w przypadku odpadów nienawodnionych. Odkształcenia pierwotne nawodnionych mieszanek odpadów powęglowych z 10 i 20% dodatkiem popiołów lotnych były o 1,4–1,5-krotnie większe od nienawodnionych. Odkształcenia pierwotne nawodnionej mieszanki odpadów powęglowych z 30% dodatkiem popiołów były natomiast 1,2-krotnie mniejsze niż odpadów nienawodnionych. Odkształcenia wtórne mieszanek nawodnionych były większe od odkształceń mieszanek nienawodnionych: 1,3-krotnie 1,6-krotnie i ponad 2-krotnie odpowiednio do 10, 20 i 30% dodatku popiołu.

Moduł ściśliwości pierwotnej nawodnionych odpadów powęglowych był 1,4-krotnie większy niż ten sam moduł odpadów nienawodnionych. Wartości modułu ściśliwości pierwotnej mieszanek odpadów powęglowych z popiołem lotnym w obu analizowanych przypadkach odpowiadały zależnościom opisywanym powyżej w odniesieniu do odkształceń. Warto podkreślić, że wartości modułu ściśliwości pierwotnej mieszanek nienawodnionych zmieniały się wraz ze zwiększeniem dodatku popiołów, natomiast w przypadku mieszanek nawodnionych nie stwierdzono takiej zależności.

Wartości modułu ściśliwości wtórnej były przeważnie 2–4-krotnie, a nawet ponad 7-krotnie (mieszanki odpadów powęglowych z 30% dodatkiem popiołu) większe od wartości modułu ściśliwości pierwotnej. Moduł ściśliwości wtórnej odpadów powęglowych nawodnionych był ponad 1,2-krotnie większy niż nienawodnionych. Wartości modułu ściśliwości wtórnej nienawodnionych mieszanek odpadów powęglowych z popiołem lotnym były w każdym przypadku większe niż mieszanek nawodnionych, przy czym różnice powiększały się wraz ze zwiększeniem dodatku popiołu – przy 30% dodatku popiołu moduł ściśliwości wtórnej mieszanek nienawodnionych był ponad 2-krotnie większy niż mieszanek nawodnionych.

WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań ściśliwości odpadów powęglowych oraz ich mieszanek z popiołem lotnym sformułowano następujące wnioski:

1. Proces konsolidacji badanych materiałów nawodnionych przebiegał stosunkowo szybko, największe osiadania występowały zaraz po przyłożeniu danego stopnia obciążenia i były zależne od wielkości obciążenia.
2. Ściśliwość badanych materiałów była znacznie większa przy obciążeniu pierwotnym niż przy wtórnym, przy czym wartości modułów ściśliwości wykazywały wyraźną zależność od dodatku popiołów lotnych, i tak:
 - największą ściśliwość wykazała mieszanka odpadów powęglowych z 20% dodatkiem popiołu – wartość modułu ściśliwości pierwotnej wynosiła 40 MPa, a wtórnej 148 MPa,
 - nieco mniej ściśliwa była mieszanka z 10% dodatkiem popiołu – wartość modułu ściśliwości pierwotnej wynosiła 43 MPa, a wtórnej 155 MPa,
 - znacznie mniej ściśliwa była mieszanka odpadów powęglowych z 30% dodatkiem popiołów – wartość modułu ściśliwości pierwotnej wynosiła około 56 MPa, a wtórnej 163 MPa,
 - najmniej ściśliwe okazały się odpady powęglowe, których moduł ściśliwości pierwotnej wynosił 75 MPa, a wtórnej 166 MPa.
3. Nawodnienie nie oddziało w sposób istotny na ściśliwość odpadów powęglowych, natomiast wpłynęło na ściśliwość mieszanek odpadów powęglowych z popiołami lotnymi: mieszanki nawodnione wykazały wyraźnie większą ściśliwość, zwłaszcza przy obciążeniu wtórnym.
4. Badane odpady powęglowe oraz ich mieszanki z popiołami lotnymi charakteryzowały się ogólnie korzystnym uziarnieniem, dużą wytrzymałością na ścinanie, dobrą zagęszczalnością oraz niezbyt dużą ściśliwością. Można stwierdzić, że mogą one zostać wykorzystane jako antropogeniczne grunty budowlane do celów budownictwa ziemnego, zarówno drogowego jak i hydrotechnicznego.

PIŚMIENNICTWO

- Borkiewicz J., 1996. Problemy organizacyjno-prawne gospodarki odpadami. Mat. II Konf. „Problemy zagospodarowania odpadów mineralnych. Zagospodarowanie odpadów masowych”. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN Zabrze, Sekcja Wykorzystania Surowców Mineralnych Komitetu Górnictwa PAN Kraków, Agencja Gospodarki Odpadami „AGOS” SA Katowice, Wisła, 7–19.
- Drenda J., Domagała L., Różański Z., 2011. Eksploatacja i możliwości zagospodarowania centralnego zwałowiska odpadów powęglowych Przezchlebie w Gminie Zbrosławice. *Górnictw. Ekol.* 6(2), 25–37.
- Dzierwa K., Zawisza E., 2006. Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na ściśliwość mieszanek odpadów posodowych z popiołami lotnymi. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiecetus* 5(1), 17–27.
- Dzierwa K., Zawisza E., 2007. Laboratory investigations of compressibility of coarse-grained coal-mining wastes. *Arch. Hydro-Engin. Environ. Mech.* 54(1), 37–54.

- Grebenets V.I., Sadovsky A.V., 1993. Utilization of coal and metallurgical wastes in Norilsk Region. 4th Intern. Symp. on the Reclamation Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Kraków, Poland, V(II), 945–948.
- Pisarczyk S., 1995. Ściśliwość grubookruchowych gruntów nasypowych stosowanych w budowach hydrotechnicznych i komunikacyjnych. Pr. Nauk. Polit. Warsz., Inż. Środ. 20, 112.
- Projekt średniowymiarowego edometru. 2000. Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego AR w Krakowie (maszynopis).
- PN-81/B-03020:1986. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Polski Komitet Normalizacji Miar i Jakości. Wydawnictwo Normalizacyjne „Alfa” Warszawa.
- PN-EN ISO 14668-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów. Cz. 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa
- Rogowska I., Pisarczyk S., 1987. Badania laboratoryjne ściśliwości gruntów gruboziarnistych stosowanych do budowy nasypów hydrotechnicznych. VIII Kraj. Konf. Mechaniki Gruntów i Fundamnetowania. Pr. Nauk. Inst. Geotech. Polit. Wrocł. 52, 761–766.
- Sørensen J.L. 1993. Utilization/disposal of residues from coal-fired power plants. The Danish Geotechnical Institute Lyngby, Denmark (maszynopis).
- Zawisza E., 2001. Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Zesz. Nauk. AR Krak., Rozprawy 280, ss. 178.
- Zawisza E., 2012. Odpady hutnicze jako antropogeniczne grunty budowlane. Metody badań i właściwości geotechniczne. Wydawnictwo UR Kraków, ss. 148.
- Zawisza E., Lis M., 2013. Wpływ nawodnienia na wytrzymałość na ścinanie odpadów powęglowych i ich mieszanek z popiołami lotnymi. Drogownictwo 10, 300–305.
- Zawisza E., Micor W., 2012. Ściśliwość zleżałych odpadów powęglowych oraz ich mieszanek z popiołami lotnymi. Przegl. Górn. 10, 65-70.
- Zawisza E., Organ W., 2012. Wytrzymałość na ścinanie mieszanek odpadów powęglowych z popiołami lotnymi. Przegl. Górn. 2, 38–44.
- Żurek J., 1969. Przybliżona metoda obliczania osiadań korpusu zapór ziemnych i namulowych. Gosp. Wodna, 10.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 24.03.2014