

## **WPLYW ZAGĘSZCZENIA I NAWODNIENIA NA ŚCISLIWOŚĆ MIESZANEK ODPADÓW POSODOWYCH Z POPIOŁAMI LOTNYMI**

Katarzyna Dzierwa, Eugeniusz Zawisza

Akademia Rolnicza w Krakowie

**Streszczenie.** Praca zawiera wyniki badań ścisłości dwóch rodzajów mieszanek odpadów posodowych z Inowrocławskich Zakładów Chemicznych „Soda Mątwy” S.A. z popiołami lotnymi z elektrociepłowni tych zakładów. Badania przeprowadzono w prototypowym edometrze średniowymiarowym, ukierunkowując je na określenie wpływu zagęszczenia i nawodnienia mieszanek na przebieg procesu ich konsolidacji oraz wartość modułów ścisłości. Parametrem stałym była wilgotność początkowa mieszanek (zbliżona do optymalnej), a parametrem zmiennym był wskaźnik zagęszczenia (od 0,80 do ok. 0,95); zmienne były również warunki wodne. Analiza wyników badań pozwoliła na opracowanie charakterystyki ścisłości badanych mieszanek w zależności od zadanych warunków początkowych oraz na określenie możliwości ich utylizacji w budownictwie ziemnym.

**Słowa kluczowe:** odpady przemysłowe, ścisłość, edometr średniowymiarowy, utylizacja

### **WSTĘP**

Odpady przemysłowe są uciążliwe dla środowiska naturalnego, dlatego bardzo ważna jest możliwość ich gospodarczego wykorzystania. Odpady poenergetyczne (popioły lotne) znalazły szerokie zastosowanie w budownictwie, górnictwie, rolnictwie i leśnictwie. W Polsce popiół lotny stosuje się do stabilizacji gruntów przy budowie dróg, do podsadzki w kopalniach, używa się go także w przemyśle cementowym [Rosik-Dulewska 1999]. Odpady posodowe są wykorzystywane w rolnictwie (wapno nawozowe) oraz do budowy obwałowań osadników (podziarno kamienia wapiennego) [Abramski i Suligowski 1976, Rozporządzenie... 2004]. Według Boronia i Nagawieckiej [1995], którzy badali możliwości biologicznej rekultywacji osadników odpadów z Krakowskich Zakładów Sodowych „Solvay”, preferowanym sposobem rekultywacji takich osadników powinno być tworzenie zadrzewień typu parkowego.

Problematykę zagospodarowania odpadów przemysłowych – poenergetycznych, posodowych, powęglowych – przeważnie rozpatrywano w aspekcie ich przydatności do budowy nasypów drogowych i hydrotechnicznych (materiał konstrukcyjny), do wypełniania wyrobisk po eksploatacji kruszyw oraz obniżeń terenowych na obszarach szkód górniczych (rekultywacja terenu) [Skarżyńska 1997, Gryczmański i in. 1998], a także do wykonywania różnego typu uszczelnień (odpady drobnoziarniste) [Główka i in. 1982, Ewertowska-Madej i Szymański 1993, Zawisza 2001]. Znacznie mniej badań prowadzono pod kątem wykorzystania odpadów w charakterze podłoża budowlanego, co wymaga określenia ich ściśliwości, aby można było prognozować osiadanie pod obciążeniem przez budowle [Charles i Burford 1987, Pisarczyk 1995]. Badania takie, obejmujące określenie podstawowych właściwości geotechnicznych oraz parametrów ściśliwości wybranych materiałów odpadowych, przeprowadziła współautorka niniejszej pracy [Dzierwa 2004], a ich wyniki zostały częściowo wykorzystane w obecnym artykule.

Celem badań było określenie wpływu zagęszczenia i warunków wodnych na przebieg i wartość osiadania oraz wartość modułów ściśliwości dwóch rodzajów mieszanek odpadów posodowych z popiołami lotnymi.

## MATERIAŁ I METODY

Materiał do badań ściśliwości stanowiły dwie mieszanki odpadów posodowych z Inowrocławskich Zakładów Chemicznych „Soda Mątwy” S.A. z popiołami z elektrociepłowni tych zakładów. Mieszanka 1 składała się z podziarna kamienia wapiennego – 60%, przepału z pieców wapiennych – 20% i popiołu lotnego – 20%. W skład mieszanki 2 wchodziło podziarno kamienia wapiennego – 60 %, wapno nawozowe – 20% i popiół lotny – 20%.

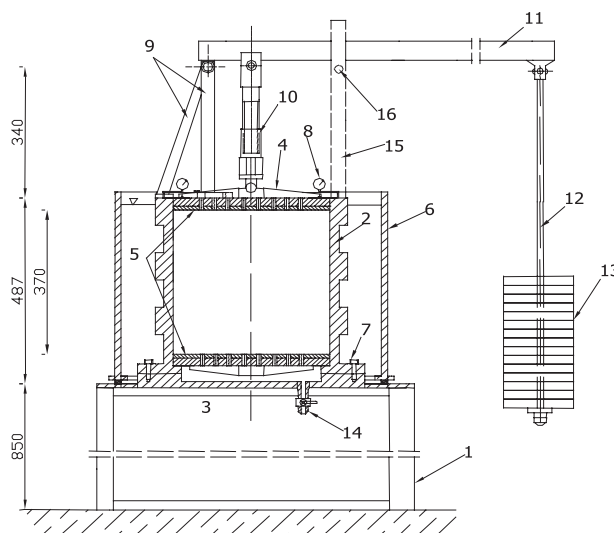
Według nomenklatury geotechnicznej, mieszankę 1 można zakwalifikować do pospółek gliniastych, a mieszankę 2 do żwirów gliniastych. Parametry zagęszczalności mieszanek różnią się dość wyraźnie – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki 1 jest większa, a wilgotność optymalna mniejsza niż mieszanki 2. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość mieszanek na ścinanie – kąt tarcia wewnętrznego i spójność, wyznaczone przy wskaźniku zagęszczenia 0,95, są stosunkowo duże (tab. 1).

Różnice między dwiema mieszankami wynikają głównie z obecności w mieszance 2 wapna nawozowego, które wykazuje właściwości wiążące. Na podkreślenie zasługuje również duża zawartość frakcji pyłowej z ilową, stanowiących w obu mieszankach materiał wypełniający przestrzeń między grubszymi okruchami.

Badania ściśliwości przeprowadzono w edometrze średniowymiarowym składającym się z cylindra wewnętrznego o średnicy i wysokości 374 mm oraz cylindra zewnętrznego o średnicy 545 mm i wysokości 570 mm (rys. 1). W cylindrze wewnętrznym formuje się próby, które można nawadniać od dołu przez porowaty filtr, wypełniając wodą przestrzeń między cylindrami. Obciążenie jest zadawane mechanicznie poprzez układ dźwigni przy przełożeniu 1 : 10. Osiadanie prób pod obciążeniem każdego stopnia rejestruje się za pomocą czujników zegarowych.

Tabela 1. Podstawowe właściwości geotechniczne mieszanek odpadów posodowych z popiołami  
 Table 1. Basic geotechnical characteristics of mixtures of soda wastes and fly ashes

Parametr – Parameter	Wartość – Value	
	mieszanka 1 mixture 1	mieszanka 2 mixture 2
Zawartość frakcji – Fraction content, %:		
kamienista – cobbles > 40 mm	0,5	6,6
żwirowa – gravel 2–40 mm	33,1	51,1
piaskowa – sand 0,05–2 mm	40,4	24,3
pyłowa i iłowa – silt and clay < 0,05 mm	26,0	18,0
Nazwa – Name (wg – acc. to PN-86/B-02480)	Pog	Żg
Gęstość właściwa – Specific gravity, $g \cdot cm^{-3}$	2,69	2,74
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, $g \cdot cm^{-3}$	1,65	1,59
Maximum dry density, $g \cdot cm^{-3}$		
Wilgotność optymalna – Optimum moisture content, %	18,6	22,5
Kąt tarcia wewnętrznego – Angle of internal friction, °	34,0	34,3
Spójność – Cohesion, kPa	61,8	70,9



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny edometru średniowymiarowego (wymiary w mm); 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 – wieszak z prętami do obciążników, 13 – obciążniki, 14 – zawór spustowy wody, 15 – wspornik widełkowy, 16 – bolec [Dzierwa 2004]

Fig. 1. Structural scheme of medium-size oedometer (dimensions in mm); 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 [Dzierwa 2004]

Do badań użyto materiału o pełnym uziarnieniu. Próby formowano, zagęszczając materiał w cylindrze edometru warstwami o grubości 62 mm do osiągnięcia wysokości 372 mm.

Badania wpływu zagęszczenia na ścisłość wykonano na próbach o jednokowej wilgotności ( $w \approx w_{opt}$ ) i różnym zagęszczeniu ( $I_s = 0,80, 0,87$  i  $0,94-0,96$ ; tab. 2). Badania wpływu nawodnienia na ścisłość przy wybranym zagęszczeniu ( $I_s = 0,94-0,96$ ) wykonano na próbach mających również wilgotność optymalną, lecz nawodnionych przed obciążeniem. Próby nienawodnione pozostawiano po uformowaniu na jedną dobę, a następnie obciążano. Próby nawodnione po uformowaniu nawadniano przez dwie do sześciu dób do ustalenia się zwierciadła wody na poziomie górnego filtra edometru, a następnie obciążano. Obciążanie prób prowadzono do wartości 0,40 MPa, przy czym kolejne stopnie obciążenia (cztery) utrzymywano przez jedną dobę, a ostatni stopień – do zakończenia konsolidacji. Po zakończeniu konsolidacji próby odciążano i poddawano wtórnemu obciążeniu.

Tabela 2. Parametry początkowe mieszanek odpadów posodowych z popiołami  
Table 2. Initial parameters of mixtures of soda wastes and fly ashes

Mieszanka – Mixture	Numer próby Sample number	Wskaźnik zagęszczenia Compaction index	Wilgotność, % Moisture content, %
1	1	0,80	18,96
	2	0,87	18,97
	3	0,94	19,10
	4*	0,94	19,14
2	5	0,80	23,26
	6	0,87	23,21
	7	0,96	21,48
	8*	0,96	22,33

\* próby nawadniane przed obciążeniem – samples saturated before loading

## WYNIKI I DYSKUSJA

Próby mieszanek odpadów posodowych z popiołami o mniejszym zagęszczeniu ( $I_s = 0,80$  i  $0,87$ ) miały jednakowy czas konsolidacji, który przy obciążeniu pierwotnym i wtórnym wynosił łącznie 13–14 dób. Próby o większym zagęszczeniu ( $I_s = 0,94-0,96$ ) miały dłuższy czas konsolidacji, który łącznie wynosił 15–16 dób; w przypadku prób nawodnionych czas ten był krótszy o 3 doby.

Krzywe ścisłości wykreślone w układzie zależności wskaźnika porowatości od naprężenia efektywnego (w skali logarytmicznej) dostarczają interesującej charakterystyki przebiegu konsolidacji badanych materiałów. Nachylenie krzywej ścisłości pierwotnej wyznacza wskaźnik ścisłości, który określa się wzorem:

$$C_c = \frac{\Delta e_i}{\Delta \log \sigma_i} = \frac{e_{i-1} - e_i}{\log \frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}}}$$

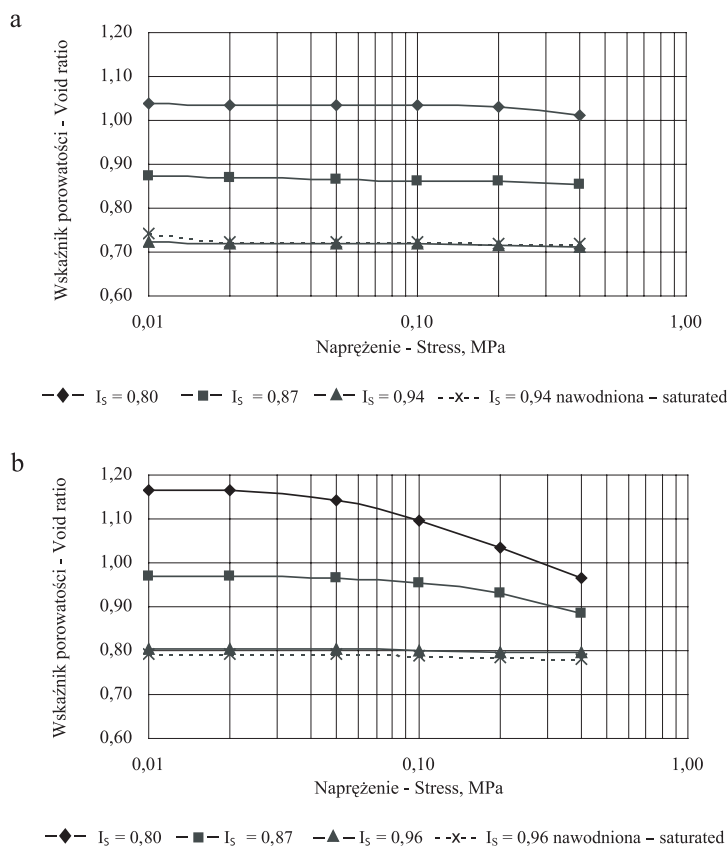
gdzie:

- $C_c$  – wskaźnik ścisłości (-),
- $\Delta e_i$  – zmniejszenie wskaźnika porowatości przy zwiększeniu naprężenia o  $\Delta \sigma_i$  (-),
- $e_{i-1}$  – początkowa wartość wskaźnika porowatości (-),
- $e_i$  – wartość wskaźnika porowatości po zwiększeniu naprężenia (-),
- $\sigma_i$  – wartość naprężenia końcowego (MPa),
- $\sigma_{i-1}$  – wartość naprężenia początkowego (MPa).

Dla gruntów normalnie skonsolidowanych zależność między wskaźnikiem porowatości a naprężeniem efektywnym ( $e$ -log  $\sigma'$ ) ma charakter liniowy, a wartość wskaźnika ścisłości jest stała niezależnie od obciążenia [Glazer 1985, Woźniak i in. 1999]. Dla gruntów przerobionych o strukturze wrażliwej charakterystyczne są krzywe wygięte ku dołowi (lekko wklęsłe). Krzywe o takim kształcie uzyskał Woźniak i inni [1999] w przypadku gruntów zwałowanych, lekko wypukłe były natomiast krzywe ścisłości kompozytu z gruntu zwałowanego zawierającego ponad 50% popiołu lotnego. Jeżeli zależność  $e$ -log  $\sigma'$  ma charakter nieliniowy, wartość wskaźnika ścisłości jest zmienna. Badania Woźniaka i innych [1999] wykazały, że zmienność ta dla gruntów zwałowanych o wilgotności naturalnej nie jest monotoniczna – do obciążenia 120–180 kPa wartość wskaźnika ścisłości zwiększa się, a przy większym obciążeniu maleje. Wskaźnik ścisłości nawodnionych gruntów zwałowanych zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia, wykazując tendencję do stabilizacji przy dużych wartościach obciążenia (rzędu 500–600 kPa).

W przeprowadzonych badaniach ścisłości warunki odpływu wody z prób w kierunku górnego i dolnego filtra były korzystne, można więc przyjąć, że naprężenie efektywne po konsolidacji pod obciążeniem danego stopnia odpowiadało wartości tego obciążenia. Krzywa ścisłości w układzie  $e$ -log  $\sigma'$  dla mało zagęszczonej ( $I_s = 0,80$ ) próby mieszanki 1 ma kształt lekko wypukły, odpowiadający gruntem przekonsolidowanym (rys. 2a). Krzywe ścisłości prób mieszanki 1 o większych wskaźnikach zagęszczenia ( $I_s = 0,87$  i  $0,94$ ) mają charakter quasi-liniowy, co odpowiada gruntem normalnie skonsolidowanym. Przebieg zależności  $e$ -log  $\sigma'$  dla mało i średnio zagęszczonej ( $I_s = 0,80$  i  $0,87$ ) próby mieszanki 2 odpowiada gruntem przekonsolidowanym (wygięcie ku górze), natomiast dla próby bardziej zagęszczonej ( $I_s = 0,96$ ) – gruntem normalnie skonsolidowanym (wykres liniowy; rys. 2b).

Porównując ścisłość dwóch mieszanek, wzięto pod uwagę odkształcenie względne, wyrażone jako procentowy stosunek osiadania do początkowej wysokości próby, oraz moduły ścisłości, obliczone jako średnie dla całego zakresu obciążenia. Analiza wykazała, że korzystniejszymi parametrami ścisłości charakteryzuje się mieszanka 1, przy czym wyraźnie zaznacza się wpływ zagęszczenia i nawodnienia.



Rys. 2. Krzywe ściśliwości pierwotnej e-log  $\sigma'$  mieszanek odpadów posodowych z popiołami; a – mieszanka 1, b – mieszanka 2;  $I_s$  – wskaźnik zagęszczenia

Fig. 2. Primary compressibility curves e-log  $\sigma'$  of mixtures of soda wastes and fly ashes; a – mixture 1, b – mixture 2;  $I_s$  – compaction index

Przy obciążeniu pierwotnym prób nienawodnionych wystąpiły duże różnice odkształceń całkowitych w przypadku mieszanek mniej zagęszczonych ( $I_s = 0,80$  i  $0,87$ ). Odkształcenia prób mieszanki 1 były odpowiednio 8- i 4-krotnie mniejsze niż mieszanki 2. Zagęszczone mieszanki ( $I_s = 0,94$  i  $0,96$ ) wykazały dużo mniejsze i zbliżone odkształcenia (tab. 3).

Odształcenia sprężyste (odwracalne) stanowiły małą część odkształceń całkowitych i były wyraźnie zależne od zagęszczenia prób. W przypadku mieszanki 1 odkształcenia sprężyste wynosiły ok. 8, 20 i 16% odkształceń całkowitych przy kolejnych wartościach wskaźnika zagęszczenia, a nawodniona próba zagęszczona miała większe odkształcenia sprężyste (20%) niż próba nienawodniona (16%). W przypadku mieszanki 2 odkształcenia sprężyste stanowiły odpowiednio ok. 2, 5 i 22% odkształceń całkowitych, a nawodniona próba zagęszczona miała mniejsze odkształcenia sprężyste (16%) niż próba nienawodniona (22%). A zatem, odkształcenia sprężyste mało i średnio zagęszczonych prób mieszanki 1 były 4-krotnie większe niż analogicznych prób mieszanki 2. Próby zagęszczone wykazały znacznie mniejsze zróżnicowanie odkształceń sprężystych.

Tabela 3. Wartości odkształceń mieszanek odpadów posodowych z popiołami  
Table 3. Deformations of mixtures of soda wastes and fly ashes

Mieszanka Mixture	Wskaźnik zagęszczenia Compaction index	Odkształcenie – Deformation, %		
		pierwotne – primary	odprężenie – relaxation	wtórne – secondary
1	0,80	1,19	0,10	0,11
	0,87	0,97	0,20	0,21
	0,94	0,55	0,09	0,09
	0,94*	0,45	0,09	0,10
2	0,80	9,37	0,24	0,27
	0,87	4,35	0,25	0,26
	0,96	0,54	0,12	0,12
	0,96*	0,74	0,14	0,14

\* próby nawadniane przed obciążeniem – samples saturated before loading

Przy obciążeniu wtórnym odkształcenia dwóch mieszanek mniej się różniły, przy czym większe były w przypadku mieszanki 2 (tab. 3). Mało zagęszczona ( $I_s = 0,80$ ) próba mieszanki 1 miała ponad 2-krotnie mniejsze odkształcenia niż tak samo zagęszczona próba mieszanki 2. Średnio zagęszczone ( $I_s = 0,87$ ) próby obu mieszanek wykazały zbliżone odkształcenia. Najmniejsze i również zbliżone były odkształcenia prób zagęszczonych ( $I_s = 0,94$  i  $0,96$ ).

Duże różnice wystąpiły między uśrednionymi wartościami modułów ścisłości mieszanek, przy czym ich wielkość zależała od zagęszczenia i nawodnienia prób.

W przypadku prób nienawodnionych wartości modułu ścisłości pierwotnej najbardziej się różniły przy małym wskaźniku zagęszczenia – mieszanka 1 miała prawie 9-krotnie większy moduł niż mieszanka 2 (tab. 4). Mniejsze różnice wykazały próby średnio zagęszczone – moduł mieszanki 1 był ponad 4 razy większy od modułu mieszanki 2. Próby zagęszczone miały taki sam moduł (73 MPa). Nawodnienie zagęszczonej próby nie spowodowało zmniejszenia modułu ścisłości pierwotnej mieszanki 1, wywołało natomiast ok. 1,4-krotne zmniejszenie modułu mieszanki 2.

Tabela 4. Wartości modułów ścisłości mieszanek odpadów posodowych z popiołami  
Table 4. Compressibility moduli of mixtures of soda wastes and fly ashes

Mieszanka Mixture	Wskaźnik zagęszczenia Compaction index	Moduł ścisłości, MPa Compressibility modulus, MPa		Wskaźnik skonsolidowania Consolidation index
		pierwotnej – primary	wtórnej – secondary	
1	0,80	33,51	341,14	0,10
	0,87	41,07	176,15	0,23
	0,94	73,17	391,54	0,19
	0,94*	89,77	366,39	0,24
2	0,80	4,26	142,06	0,03
	0,87	9,19	144,06	0,06
	0,96	73,38	307,58	0,24
	0,96*	54,09	270,52	0,20

\* próby nawadniane przed obciążeniem – samples saturated before loading

Różnice między wartościami modułu ścisłości wtórnej mieszanek były mniejsze niż w przypadku modułu ścisłości pierwotnej. Moduły nienawodnionych prób mieszanki 1 były większe niż prób mieszanki 2 – odpowiednio 2,4-, 1,2- i 1,3-krotnie dla kolejnych wskaźników zagęszczenia (tab. 4). Po nawodnieniu zagęszczona mieszanka 1 miała moduł ok. 1,4-krotnie większy niż mieszanka 2.

Wskaźnik skonsolidowania ( $\beta = M_0/M$ , gdzie  $M_0$  – moduł ścisłości pierwotnej,  $M$  – moduł ścisłości wtórnej) mieszanki mało zagęszczonej był ponad 2-krotnie mniejszy niż mieszanki średnio zagęszczonej i zagęszczonej. Wskaźnik ten dla naturalnych gruntów spoistych mieści się w granicach od 0,60 do 0,90, a dla niespoistych wynosi od 0,80 do 1,0 [PN-81/B-03020]. Dużo niższe wartości wskaźnika skonsolidowania odpadów niż gruntów naturalnych wynikają z dużo większej ścisłości przy obciążeniu pierwotnym niż przy obciążeniu wtórnym. Jak wykazały badania ścisłości gruntów zwałowanych prowadzone przez Woźniaka i innych [1999], wskaźnik ten może nawet być mniejszy od 0,04.

Wskaźnik skonsolidowania mało zagęszczonej mieszanki 2 był 2-krotnie mniejszy niż mieszanki średnio zagęszczonej i 8-krotnie mniejszy niż mieszanki zagęszczonej, przy czym ogólnie wartości tego wskaźnika były bardzo niskie.

Reasumując można stwierdzić, że zagęszczenie było najważniejszym czynnikiem wpływającym na wartość parametrów ścisłości badanych mieszanek.

Przy obciążeniu pierwotnym zwiększenie wskaźnika zagęszczenia z 0,80 na 0,87 spowodowało ponad 1,2-krotne (mieszanka 1) i ok. 2,2-krotne (mieszanka 2) zmniejszenie odkształceń oraz odpowiednie zwiększenie modułu ścisłości pierwotnej. Dalsze zwiększenie wskaźnika zagęszczenia, do 0,94 i 0,96, pociągnęło za sobą dalszy spadek odkształcenia i wzrost modułów ścisłości – ok. 1,8-krotny dla mieszanki 1 i aż 8-krotny dla mieszanki 2.

Przy obciążeniu wtórnym wpływ zagęszczenia na wartość odkształceń oraz modułu ścisłości mieszanki 1 zaznaczył się w dużo mniejszym stopniu niż przy obciążeniu pierwotnym. W przypadku mieszanki 2 wpływ ten był znaczący (ponad 2-krotne zwiększenie modułu ścisłości wtórnej przy zwiększeniu wskaźnika zagęszczenia z 0,87 na 0,96).

Należy podkreślić, że przy obciążeniu wtórnym wartości odkształceń mieszanek były wielokrotnie mniejsze, a modułów ścisłości wtórnej większe niż przy obciążeniu pierwotnym (mieszanka 1: ponad 10-krotnie przy najniższym, ok. 5-krotnie przy średnim i ok. 6-krotnie przy najwyższym wskaźniku zagęszczenia, mieszanka 2: odpowiednio 34-krotnie, ok. 16-krotnie i 4-krotnie).

Mieszanki miały dużo niższy wskaźnik skonsolidowania (mieszanka 1: 0,1–0,24, mieszanka 2: 0,03–0,24) niż grunty mineralne (0,6–0,9).

Nawodnienie zagęszczonej mieszanki 1 nie spowodowało zwiększenia odkształcenia przy obciążeniu pierwotnym, natomiast nawodnienie zagęszczonej mieszanki 2 wywołało ponad 1,3-krotny wzrost odkształcenia i zmniejszenie modułu ścisłości pierwotnej. Przy obciążeniu wtórnym wpływ nawodnienia zaznaczył się wyraźnie – nastąpiło zwiększenie odkształcenia i odpowiednie zmniejszenie modułu ścisłości wtórnej o ponad 6% w przypadku mieszanki 1 i o 10% – mieszanki 2.



## WNIOSKI

1. Konsolidacja badanych materiałów odpadowych, zwłaszcza nawodnionych przed obciążeniem, zachodzi stosunkowo szybko.

2. Obciążenie powoduje głównie odkształcenia trwałe; odkształcenia sprężyste stanowią niewielką część odkształceń całkowitych i zależą wyraźnie od zagęszczenia materiału.

3. Badane materiały odpadowe charakteryzują się różną ścisłością, przy czym wartości modułów ścisłości zależą od zagęszczenia i nawodnienia. Mieszanka 1 odznacza się korzystnymi parametrami ścisłości. Nawet przy małym zagęszczeniu ( $I_s = 0,80$ ) moduł ścisłości pierwotnej, a zwłaszcza wtórnej, jest stosunkowo duży ( $M = 34$  MPa,  $M' = 341$  MPa) i zwiększa się wraz ze wzrostem zagęszczenia. Mieszanka 2 w stanie mało i średnio zagęszczonym ( $I_s = 0,80$  i  $0,87$ ) ma niekorzystne parametry ścisłości – jej moduły ścisłości są kilkakrotnie mniejsze od modułów mieszanki 1, co wynika z obecności wapna nawozowego. Przy większym zagęszczeniu ( $I_s = 0,96$ ) wartości modułów są znacznie wyższe ( $M = 73$  MPa,  $M' = 308$  MPa), porównywalne z odpowiednimi wartościami modułów ścisłości mieszanki 1 przy tym samym zagęszczeniu.

4. Konsolidacja wstępna powoduje znaczne zmniejszenie ścisłości badanych mieszanek odpadów i polepsza ich parametry geotechniczne. Dotyczy to szczególnie mieszanek o małym początkowym zagęszczeniu – na skutek konsolidacji następuje istotne wzmocnienie tego materiału wyrażające się wielokrotnym zwiększeniem modułu ścisłości wtórnej w stosunku do modułu ścisłości pierwotnej. W przypadku mieszanki 2 zwiększenie to jest ponad 30-krotne, a w przypadku mieszanki 1 ponad 10-krotne.

5. Mieszanki odpadów posodowych z popiołami lotnymi mogą stanowić antropogeniczny grunt budowlany. Charakteryzują się one zróżnicowaną ścisłością. Materiałem o korzystniejszych cechach geotechnicznych jest mieszanka 1, która zwłaszcza przy dużym zagęszczeniu ma stosunkowo małą ścisłość. Mieszanka 2, zawierająca wapno nawozowe, ma większą ścisłość i jest bardziej wrażliwa na nawodnienie, dlatego jej zastosowanie w budownictwie ziemnym wymaga silnego zagęszczania przy wilgotności optymalnej, aby osiągnąć maksymalny wskaźnik zagęszczenia.

6. Zastosowanie mieszanek odpadów posodowych z popiołami w budownictwie ziemnym może stanowić formę ich utylizacji. Jest to korzystne zarówno z techniczno-ekonomicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia, ponieważ pozwala na zmniejszenie ilości odpadów przemysłowych kierowanych na zwałowiska, a przez to przyczynia się do ograniczenia ich szkodliwego wpływu na środowisko.

## PIŚMIENNICTWO

- Abramski K., Suligowski Z., 1976. Badania modelowe stateczności i odkształceń stawów odpadowych przemysłu sodowego w skali laboratoryjnej. *Gosp. Wod.* 7, 214–217.
- Boroń K.J., Nagawiecka H., 1995. The possibility of biological reclamation of soda waste reservoirs 'White Seas' in Krakow, Poland. AR w Krakowie.

- Charles J.A., Burford D., 1987. Settlement and groundwater in opencast mining backfills. 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, 289–292.
- Dzierwa K., 2004. Wpływ zagęszczenia i warunków wodnych na ścisłość grubookruchowych odpadów przemysłowych. Praca doktorska. Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego AR w Krakowie, maszynopis.
- Ewertowska-Madej Z., Szymański K., 1993. Choice of criteria of the fly ash selection for protective layers building. 4th International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Kraków, t. I, 229–238.
- Glazer Z., 1985. Mechanika gruntów. Wyd. Geol. Warszawa.
- Główka G., Kuziemska I., Nowak J., Quant B., Kałcki H., Knop M., Szymański K., 1982. Problem węzłowy 01.3. Kompleksowe wykorzystanie kopalni stałych oraz odpadów kopalnianych i surowców wtórnych z kopalni. Temat 01.3.13. Zastosowanie popiołów do powierzchniowego uszczelniania gruntów i budowli hydrotechnicznych. Instytut Budownictwa Wodnego PAN Gdańsk, maszynopis.
- Gryczmański M., Skarżyńska K.M., Kawalec B., Michalski P., Zawisza E., Kawalec J., 1998. Podstawy geotechniczne wykorzystania odpadów powęglowych jako gruntu budowlanego do wznoszenia nasypów inżynierskich wysokich klas technicznych. Grant KBN 7 T07E 026 09. Katedra Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego AR w Krakowie, Katedra Geotechniki PŚ w Gliwicach, maszynopis.
- Pisarczyk S., 1995. Ścisłość grubookruchowych gruntów nasypowych stosowanych w budowlach hydrotechnicznych i komunikacyjnych. Pr. Nauk. PW, Inżynieria Środowiska 20, 65–112.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów
- Rosik-Dulewska C., 1999. Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. Ekoinżynieria Lublin.
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 19 października 2004 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu. Dz.U. 2004 nr 236, poz. 2369.
- Skarżyńska K.M., 1997. Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. AR w Krakowie.
- Woźniak H., Rybicki S., Herzig J., Lendusko P., 1999. Właściwości deformacyjne i filtracyjne zwałowanych gruntów spoistych z uwzględnieniem procesu konsolidacji w aspekcie ich budowlanego wykorzystania. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 9 T12B 008 10. AGH Kraków.
- Zawisza E., 2001. Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Zesz. Nauk. AR Krak., Rozprawy 280.

## **EFFECT OF COMPACTION AND SATURATION ON COMPRESSIBILITY OF MIXTURES OF SODA WASTES AND FLY ASHES**

**Abstract.** The study presents the results of research on the compressibility of two kinds of mixtures containing soda wastes from Inowrocławskie Zakłady Chemiczne „Soda Mątwy” S.A. and fly ashes from the heat-and-power station of the same plant. The tests were carried out in a prototype medium-size oedometer with the aim of determining the influence of compaction and saturation on the course of the consolidation process of the materials and the values of their compressibility moduli. The initial moisture content of wastes (close

to optimal) was a constant, whereas the compaction index (from 0.80 to ca. 0.95) was a variable; the water conditions changed as well. An analysis of the test results made it possible to characterise the compressibility of the materials as dependent on the specified initial conditions, and to define the possibility of their utilisation in earth structures.

**Key words:** industrial wastes, compressibility, medium-size oedometer, waste management

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 24.07.2006*