ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Budownictwo z. 40 Nr kol. 477

Tadeusz Cisek, Bogdan Kawalec,
Andrzej Soczawa, Józef Śliwa

PARAMETRY NOŚNOŚCI ODPADÓW KOPALNIANYCH W ZASTOSOWANIU DO CELÓW DROGOWYCH

Streszczenie. W pracy omówiono problem wykorzystania odpadów kopalnianych do robót drogowych. Przedstawiono wyniki badań podstawowych parametrów geotechnicznych przedmiotowych odpadów, wyróżniając szczególnie wskaźnik nośności oraz moduł sprężystości i odkształcenia. Praca zawiera spostrzeżenia i wnioski praktyczne.

1. Wstęp

W ostatnich latach zarówno w kraju jak i za granicą zauważa się wyraźny wzrost zastosowania w drogownictwie przepalonych odpadów kopalnianych. Wykorzystanie odpadów nie zawsze poparte jest jednak wyczerpującym rozeznaniem ich właściwości.

Przepalone odpady kopalniane powstają w wyniku samozapłonu zwałów łupków karbońskich. Minerały wchodzące w skład łupków karbońskich to kaolinit, illit, serycyt, montmorylonit, opal, chalcedon, pył kwarcowy, chloryty, miki, skalenie potasowe i plagioklazy. W wyniku samozapłonu łupki karbońskie ulegają długotrwałym procesom zmieniającym całkowicie ich właściwości. Proces palenia się zwałów trwa od kilku miesięcy do kilkunastu lat. W jego trakcie, w zależności od wysokości temperatury, łupki ulegają zmianom, wśród których możemy wydzielić cztery charakterystyczne okresy: rozkładu, przemian, spiekania i studzenia. Zazębiają się one zarówno w zakresie temperatur jak i współczesności występowania. Okres rozkładu przebiega w zakresie temperatur 100°÷600°C. Następuje w nim odparowanie wody adsorbcyjnej, rozkład związków organicznych i wydzielanie lekkich węglowodorów, rozkład związków żelaza i glinokrzemianowych, wydzielanie wolnego węgla oraz rozpad cząstek kaolinitu. Okres przemian trwa w zakresie temperatur 350°÷980°C. Rozpoczyna się w nim utlenianie węgla i związków żelazawych, przemiana kaolinu w metakaolin oraz rozkład siarczanu wapnia. Okres spiekania następuje po wydzieleniu wody krystalicznej. Proces ten zaczyna się w temperaturze 980°C i trwa do momentu przejścia w substancję płynną. W okresie tym tworzą się nowe odmiany krystaliczne. Powstaje mulit, syllimanit, trydymit, krystobalit i korund. Wytworzone zostają więc formy krystaliczne decydujące o wytrzymałości mechanicznej przepalonego łupku. Następuje również rozkład siarczanów. Okres studzenia trwa najczę-

ściej kilka lat. Wywiera on decydujący wpływ na wytrzymałość mechaniczną przepalonych odpadów kopalnianych [1].

Materiał zalegający na zwałach jest dość niejednorodny, wymaga więc w pewnych przypadkach segregowania. Materiał o naturalnym składzie granulometrycznym, jak i segregowany, stosowany jest do wykonywania dolnych i górnych warstw nasypów, warstw mrozoodpornych w wykopach oraz podbudów drogowych.

Wyszczególnione formy zastosowań odpadów przepalonych w każdym przypadku poprzedzone być muszą badaniami pozwalającymi na rozpoznanie ich ogólnych właściwości geotechnicznych, a przede wszystkim parametrów nośności niezbędnych do poprawnego zaprojektowania nawierzchni drogowej. Prawidłowe bowiem ocena nośności podłoża drogowego ma duży wpływ na koszt i trwałość nawierzchni drogowej.

Dokładne rozeznanie parametrów nośności jest bardzo istotne. Odpady te różnią się bowiem dość znacznie od materiałów tradycyjnie stosowanych w drogownictwie. Stąd wynika potrzeba prowadzenia badań tego rodzaju odpadów, tak ze względów poznawczych jak i ekonomicznych.

2. Cel i zakres badań

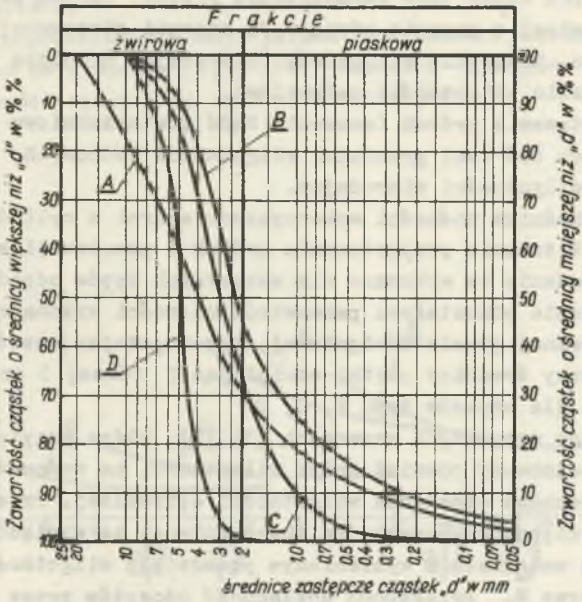
Celem przeprowadzonych badań było ustalenie cech fizykomechanicznych przepalonych odpadów kopalnianych, determinujących ich przydatność w budownictwie drogowym. Zakres badań obejmował ustalenie następujących parametrów nośności: wskaźnika nośności ($w_{nośn}$), modułu sprężystości (E_s), modułu odkształcenia (M_E) i modułu odkształcenia wtórnego ($\bar{M}_E$). Powyższe parametry analizowano w przedziale zmian składu ziarnowego oraz wilgotności.

Badania towarzyszące pozwoliły ustalić: wskaźnik piaskowy (WP), wskaźnik piaskowy po 5-ciokrotnym ubiciu w Proctorze (WP_5), wilgotność optymalną (w_{opt}), maksymalny ciężar objętościowy szkieletu ($\gamma_{d\ max}$) i pęcznienie liniowe.

3. Opis badanych odpadów

Próbę odpadów pobrano z hałdy (składowisko Kopalni "Halemba") w sposób losowy. Z próby tej wydzielono cztery składy granulometryczne, w których wymiar największego ziarna warunkowany był wymogami metody badań. Oddzielenia frakcji drobnych dokonano pod kątem możliwości oceny ich wpływu na parametry zawarte w zakresie badań.

Odpowiednie składy ziarnowe przedstawiono na rys. 1, które zgodnie z nim w dalszej części opracowania oznacza się jako A, B, C, D. Odpady typu A i B uzyskano drogą eliminacji tylko ziarn większych odpowiednio od 20 do 10 mm z odpadów hałdowych o naturalnym uziarnieniu.



Rys. 1. Krzywe uziarnienia badanych odpadów

Przyjęte do badań odpady pod względem składów ziarnowych odpowiadają w klasyfikacji ogólnobudowlanej żwirom oraz pospółkom.

4. Opis badań

Badania parametrów wymienionych w programie oparte zostały na:

a) obowiązujących normach i wytycznych [3],[4],[7],
b) istniejących z tego zakresu informacjach literaturowych, np. [2],[5],[6],[8],
c) szerokich badaniach wstępnych.

Materiał odpadów potraktowano jako ośrodek gruntowy. Ideą metod określających normowe badania parametrów nośności [3],[4],[7] jest ustalenie ich minimalnej wielkości dla umownie przyjętych wilgotności miarodajnych. Wartości tych wilgotności wyznacza się w normalnej próbie Proctora przy analizie zależności ciężaru objętościowego szkieletu od wilgotności. Przyjmuje się wówczas odpowiednie wilgotności dla 0,96 $\gamma_{d\ max}$, 0,94 $\gamma_{d\ max}$ i 0,92 $\gamma_{d\ max}$. Wybór odpowiedniej wilgotności miarodajnej, ustalającej wielkość parametru nośności, zależy od warunków hydrologicznych odcinka drogi, w których materiał badany ma pracować. Dlatego w badaniach wszystkich parametrów nośności wymienionych w p. 2 niezbędne staje się wyznaczenie ich

wartości jako funkcji wilgotności. Wyjściowym stałym parametrem w przedziale wszystkich badań jest zagęszczenie próbek. Odbywa się ono przy wilgotności optymalnej z energią równą 0,95 energii stosowanej w normalnej próbie Proctora. Wszystkie wilgotności miarodajne mieszczą się w prawostronnym otoczeniu wilgotności optymalnej.
Wstępne przygotowanie próbek (moczenie bądź powierzchniowe zamrażanie) powinno w skutkach dać taki przedział wilgotności końcowych, w których zawierałyby się wilgotności miarodajne.

Do badań wskaźnika nośności wykorzystano aparat z cylindrem o objętości 2200 cm^3. W trakcie przygotowania próbek i penetracji stosowano nadwagę 4,5 kG. Badania te wykonano dla wszystkich typów odpadów zawartych na rysunku 1. Badania pozostałych parametrów nośności wykonano na odpowiednio skonstruowanej prasie dźwigniowej, wykorzystując wcześniej wspomniany cylinder, przy średnicy płytki obciążającej równej 5 cm. Badania te przeprowadzono dla odpadów typu B, C, D.

W stosunku do wytycznych normowych [3],[7], które przyjęto za podstawę, badania obejmowały również wpływ wilgotności na nośność odpadów w przedziale lewostronnego otoczenia wilgotności optymalnej. Przeprowadzone bowiem badania wstępne wskazywały na interesujące, ze względów poznawczych, zachowanie się materiału w wymienionym przedziale wilgotności. Przy badaniach E_s, M_E oraz $\bar{M}_E$ zwiększono dokładność odczytów przez zastosowanie do pomiaru odkształceń czujników o dokładności 0,001 mm. Badania modułów przeprowadzono dla przedziału obciążeń $0 \div 2{,}0\ kG/cm^2$ przy zachowaniu odpowiednich normowych sposobów obciążeń. Tak więc seria badań dla jednego parametru obejmowała penetrację bądź obciążenie pięciu lub sześciu próbek zagęszczonych w sposób normowy. W każdej serii dwie próbki poddawane były procesowi suszenia w warunkach normalnych (w czasie 2÷12 dni w temperaturze 18÷20°C) celem otrzymania wilgotności mniejszych od wilgotności optymalnej. Z pozostałymi próbkami z serii postępowano zgodnie z normami, przekazując jedną z nich bezpośrednio do badań. Na pozostałych próbkach badania wykonywano po pomiarach pęczenienia.

W trakcie badań zwrócono szczególną uwagę na sposób wykonywania analizy sitowej. Wykonywano ją drogą przesiewania połączonego z przemywaniem materiału przez komplet sit. Ta droga określania składu granulometrycznego okazała się bardziej miarodajna w stosunku do przesiewania czysto mechanicznego. Przy przesiewaniu mechanicznym (niezależnie od czasu przesiewania) w przypadku odpadów nie można całkowicie rozdzielić zlepionych cząstek i ziaren.

Ponadto stosowano jednokrotne wykorzystywanie materiału do oceny wilgotności optymalnej, jak również innych parametrów. Sposób ten zwiększa znacznie ilość materiału używanego do badań, lecz eliminuje wpływ ewentualnego rozkruszenia ziarn na wyniki.

5. Zestawienie i analiza wyników

Do niniejszego opracowania wykorzystano wyniki 27 serii badań. Wyniki badań parametrów nośności, które są miarą nośności podłoża drogowego, opracowano wykorzystując następujące zależności:

a) Wskaźnik nośności

$$w_{noś} = \frac{p}{p_p} \cdot 100 \qquad (1)$$

gdzie:

p - ciśnienie odpowiadające zagłębieniu trzpienia o przekroju 20 cm^2 w odpowiednio przygotowaną próbkę odpadów na głębokość 2,5 lub 5,0 mm z prędkością 1,25 mm/min,

p_p - porównawcze obciążenie jednostkowe przy warunkach jak wyżej dla materiału wzorcowego.

b) Moduł sprężystości

$$E_s = \frac{\pi}{4} \frac{\Delta p \cdot D(1 - \mu^2)}{\Delta s} \qquad (2)$$

gdzie:

Δp - przyrost obciążenia jednostkowego, który wywołał odpowiedni przyrost odkształcenia sprężystego Δs,

D - średnica płytki obciążającej,

μ - współczynnik Poissona.

Do obliczeń przyjęto $\mu = 0,35$.

c) Moduł odkształcenia

$$M_E = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D \qquad (3)$$

gdzie:

Δp - przyrost obciążeń jednostkowych, wywołujący przyrost sprężystego odkształcenia o Δs,

D - średnica płytki obciążającej.

d) Moduł odkształcenia wtórnego.

Wartość $\overline{M}_E$ wyznacza się według wzoru (3) uwzględniając w nim obciążenia (Δp) i odkształcenia pionowe wtórne (Δs).

Wyniki badań towarzyszących zawiera tablica 1. Zwraca w nich uwagę brak wyników pęcznienia liniowego, którego w badanych odpadach nie obserwuje się, co jest w tym przypadku dodatnią cechą odpadów. Zmiany wskaźników piaskowych w próbie ścierania, którą w zasadzie stosuje się do oceny kruszyw uzasadniają w tym przypadku jednokrotne wykorzystywanie odpadów w przepro-

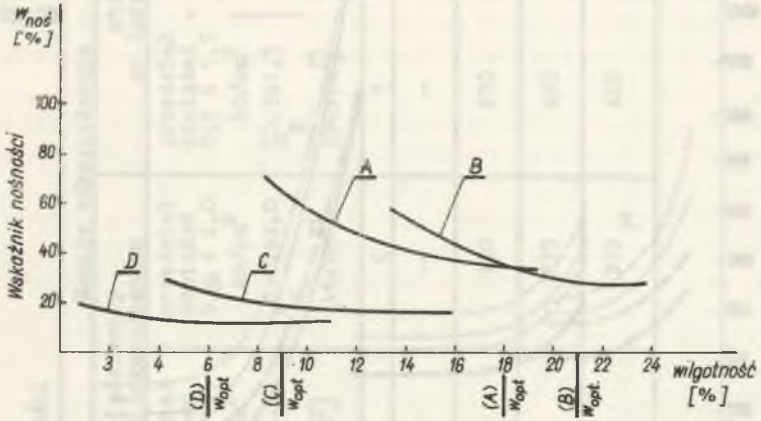
Tablice 1

Parametry geotechniczne

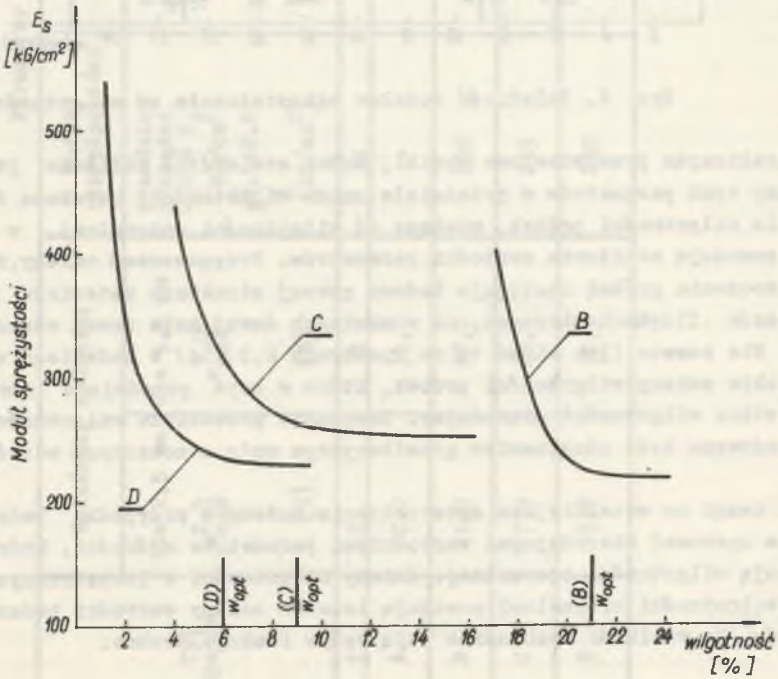
Typ odpadów	Skład granulometryczny				Zagęszczalność			Wilgotności miarodajne			Ciężar objętościowy przy w_{opt} [g/cm³]	Wskaźnik piaskowy		Wskaźnik równoziarnistości $\frac{d_{60}}{d_{10}}$
	Frakcja żwirowa 20 ÷ 10 mm [%]	Frakcja żwirowa 10 ÷ 2 mm [%]	Frakcja piaskowa 2 ÷ 0,05 mm [%]	Frakcja pyłowa i iłowa < 0,05 mm [%]	Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	Maks. ciężar objęt. szkieletu γ_{dmax} [g/cm³]	0,95 γ_{dmax} [g/cm³]	przy 0,96 γ_{dmax} w_1 [%]	przy 0,94 γ_{dmax} w_2 [%]	przy 0,92 γ_{dmax} w_3 [%]		Przed badaniem WP [%]	Po 5-krotnym ubiciu w Proctorze WP_5 [%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	18,0	52,0	27,0	3,0	18,0	1,72	1,63	22,0	22,5	23,5	2,08	29,2	29,1	14,3
B	-	56,0	39,0	5,0	21,0	1,67	1,58	24,0	25,0	26,2	2,02	30,7	24,7	11,0
C	-	67,7	32,3	-	9,0	1,45	1,38	13,0	14,5	15,5	1,54	88,0	66,0	3,5
D	-	99,7	0,3	-	6,0	1,38	1,31	10,5	12,0	13,0	1,49	99,1	87,5	1,4

wadzonych badaniach. Wielkość tych zmian uzależniona jest od wskaźnika równoziarnistości.

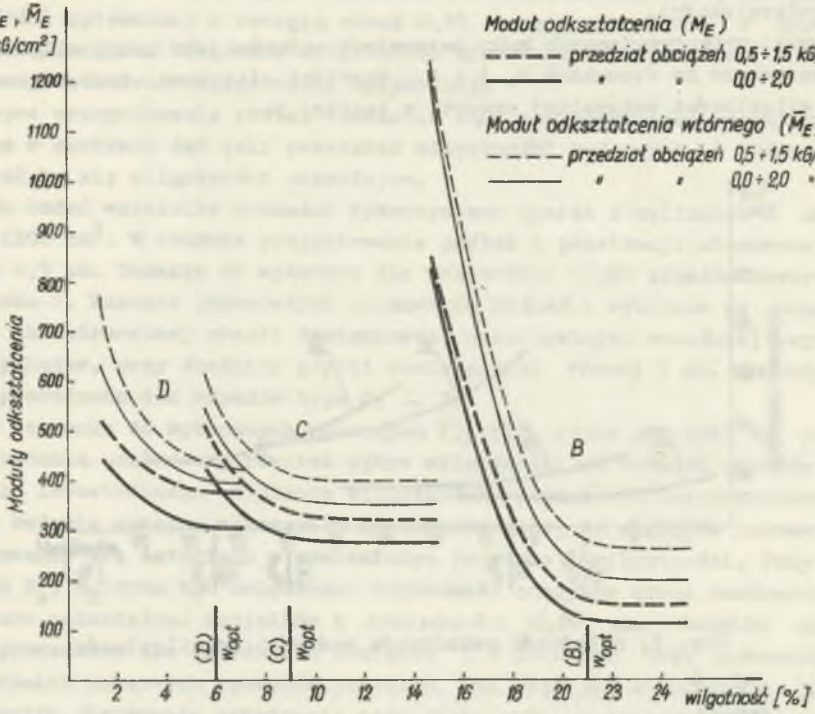
Wyniki przeprowadzonych badań parametrów nośności jako funkcję wilgotności przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4. Wartości liczbowe tych parametrów przy wilgotności optymalnej zawarto w tablicy 2.



Rys. 2. Zależność wskaźników nośności od wilgotności



Rys. 3. Zależność modułów sprężystości od wilgotności



Rys. 4. Zależność modułów odkształcenia od wilgotności

Analizując przedstawione wyniki, można stwierdzić zbliżone jakościowo zmiany tych parametrów w przedziale zmian wilgotności. Uzyskane drogą moczenia wilgotności próbek, większe od wilgotności optymalnej, w zasadzie nie powodują obniżenia wartości parametrów. Przypuszczać należy,że w trakcie moczenia próbek następuje budowa pewnej struktury materiału w ramach procesów fizykochemicznych, co w skutkach dawać może nawet wzrost nośności. Nie zawsze (jak widać to na rysunkach 2,3 i 4) w badaniach uzyskiwano takie zmiany wilgotności próbek, które w swym przedziale zawierałyby wszystkie wilgotności miarodajne. Zawężanie przedziału wilgotności próbek spowodowane było odsączeniem grawitacyjnym wody z moczonych wcześniej próbek.

Z uwagi na wcześniejsze spostrzeżenia możemy w przypadku badanych odpadów operować miarodajnymi wartościami parametrów nośności, które odpowiadają wilgotności optymalnej. Zmiany wilgotności w lewostronnym otoczeniu wilgotności optymalnej powodują istotne zmiany wartości badanych parametrów. Na wielkość tych zmian mają wpływ frakcje drobne.

Tablica 2

Parametry nośności

Typ odpadów	Wskaźniki nośności		Moduł sprężystości	Moduły odkształcenia			
				pierwotny przed dogęszczeniem		wtórny po dogęszczeniu	
	dla 2,5 mm $w_{noś}^{2,5}$ [%]	dla 5,0 mm $w_{noś}^{5,0}$ [%]	przedział obciążeń 0,0 ÷ 2,0 kG/cm^2 $E_s^{0,0\div2,0}$ [kG/cm^2]	przedział obciążeń 0,5 ÷ 1,5 kG/cm^2 $M_E^{0,5\div1,5}$ [kG/cm^2]	przedział obciążeń 0,0 ÷ 2,0 kG/cm^2 $M_E^{0,02\div2,0}$ [kG/cm^2]	przedział obciążeń 0,5 ÷ 1,5 kG/cm^2 $\bar{M}_E^{0,5\div1,5}$ [kG/cm^2]	przedział obciążeń 0,0 ÷ 2,0 kG/cm^2 $\bar{M}_E^{0,0\div2,0}$ [kG/cm^2]
1	2	3	4	5	6	7	8
A	32,0	35,0	-	-	-	-	-
B	21,0	27,0	220	160	110	270	205
C	17,0	20,0	265	330	275	405	375
D	9,0	11,0	232	375	310	425	395

Wyniki badań wskaźnika nośności podano na rysunku 2, a jego miarodajne wartości liczbowe (przy głębokości penetracji równej 5,0 mm) w tablicy 2. Uzyskiwane najmniejsze wartości tego wskaźnika mieściły się w przedziale od 35,0% (dla odpadów typu A) do 11,0% (dla odpadów typu D). Właśnie przy badaniu tego parametru daje się zauważyć pewne wzmocnienie materiału próbek po procesie moczenia (rys. 2). Zauważa się również poyztywny wpływ zawartości frakcji drobnych dla odpadów nierównoziarnistych. Podobne wartości wskaźnika nośności, jakie otrzymano przy badaniu odpadów, posiadają w grupie gruntów mineralnych rodzimych drobnoziarniste grunty sypkie oraz żwirowe.

Rezultaty badań modułów sprężystości jako funkcji wilgotności przedstawiono na rysunku 3. Miarodajne wartości liczbowe (dla przedziału naprężeń 0 ÷ 2,0 kG/cm^2) podano w tablicy 2. Dla odpadów typu B, C i D moduły sprężystości wahały się w przedziale od 220 do 265 kG/cm^2. Zauważa się tu stosunkowo mały wpływ badanych składów ziarnowych na wyniki. Otrzymane wartości miarodajnych modułów sprężystości odpadów różnią się znacznie od wartości dla odpowiednich składem ziarnowym gruntów mineralnych. Bazując na informacjach literaturowych [3],[5], można je umieścić między drobnoziarnistymi gruntami niespoistymi i spoistymi.

Moduły odkształcenia oraz moduły odkształcenia wtórnego analizowano w przedziałach naprężeń 0 ÷ 2,0 kG/cm^2 oraz 0,5 ÷ 1,5 kG/cm^2. Wyniki badań podano na rys. 4, oraz w tablicy 2. Miarodajne wartości modułów odkształcenia (dla przedziału naprężeń 0,5 ÷ 1,5 kG/cm^2), zawierały się w przedziale 160 ÷ 375 kG/cm^2, a modułów odkształcenia wtórnego w przedziale 270 ÷ 425 kG/cm^2. W myśl projektu klasyfikacji gruntów dla celów drogowych [5] odpowiadają one nośnością mineralnym, drobnoziarnistym gruntom małospoistym, obejmując również grunty niespoiste w zakresie dolnych wartości ich nośności.

Generalnie zauważa się w tym przypadku negatywny wpływ cząstek drobnych na nośność odpadów, przy czym odpady zawierające największe ich ilości (rys. 3 odpady typu B), przy wilgotnościach mniejszych od wilgotności optymalnej, charakteryzują się gwałtownym wzrostem modułów odkształcenia. Można to tłumaczyć istotnym w tych przedziałach wilgotności wzrostem spójności i kąta tarcia wewnętrznego.

6. Wnioski

1. Metodyka badań cech fizyko-mechanicznych przepalonych odpadów kopalnianych winna zakładać jednokrotne wykorzystanie materiału w badaniach. Zauważa się bowiem pewne rozkruszenie ziaren odpadów, co może mieć niewątpliwy wpływ na wyniki. Segregacja materiału, występująca w badaniach laboratoryjnych, powinna być prowadzona metodami zapewniającymi prawidłowe rozdzielenie ziaren i cząstek. Na powyższy problem szczególną uwagę należy zwracać w przypadku małych wilgotności badanego mate-

riału, przy tych bowiem wilgotnościach występują duże siły spójności łączące poszczególne elementy ośrodka.

Dla odpadów podobnych do badanych metoda badań parametrów nośności może być uproszczona, widoczny jest bowiem mały wpływ wilgotności (z przedziału wilgotności miarodajnych) na wyniki badań. Tym samym wartości parametrów nośności uzyskiwane przy wilgotnościach optymalnych mogą być traktowane jako miarodajne, niezależnie od hydrologicznych warunków miejsc wzbudowania materiału. Można więc wyłączyć badania prowadzące do określenia związku parametrów z wilgotnością.

2. Parametry nośności badanych odpadów stawiają je pod względem nośności wśród co najmniej drobnoziarnistych małospoistych gruntów mineralnych. Zdecydowana jednak część uzyskiwanych parametrów nośności znajdowała się w przedziale wartości uzyskiwanych dla drobnoziarnistych gruntów niespoistych. Wartości wskaźnika nośności odpowiadają nawet w niektóprzypadkach (typ A i B odpadów) żwirom i pospółkom, których skład ziarnowy jest zbliżony do składu ziarnowego odpadów wymienionych typów.

3. Materiały odpadowe (mając na uwadze ich nośność) mogą być stosowane w budownictwie drogowym do budowy dolnych i górnych warstw nasypów, podłoży drogowych oraz warstw mrozoodpornych. Należy mieć na uwadze gorszą w stosunku do gruntów mineralnych zagęszczalność odpadów równoziarnistych.

LITERATURA

[1] Kawalec B.: Właściwości fizyczne i mechaniczne odpadów kopalnianych jako gruntu budowlanego. Rozprawa doktorska. Gliwice, 1973.

[2] Pachowski J.: Badania nośności gruntów i nawierzchni drogowych. Ogólnopolska Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Rzeszów, 1963.

[3] Pachowski J.: Metoda wymiarowania konstrukcji nawierzchni podatnych na podstawie modułów sprężystości podłoża gruntowego i materiałów drogowych opracowana przy współpracy z OSŻD. Tymczasowe wytyczne techniczne laboratoryjnego oznaczania modułów sprężystości gruntów i materiałów drogowych. Prace COB i RTD, Nr 3/1968.

[4] Pachowski J.: Projekt instrukcji w sprawie wymiarowania grubości konstrukcji drogowych nawierzchni podatnych na podstawie kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR. Prace COB i RTD, Nr 3/1967.

[5] Rolla S.: Badanie materiałów i nawierzchni drogowych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1969.

[6] Woźnica J.: Formowanie nasypów z gruntów małoprzydatnych i odpadów przemysłowych. Prace COB i RTD. Warszawa, 1974.

[7] Norma PN-70/8931-35: Oznaczanie wskaźnika nośności gruntu jako podłoża nawierzchni podatnych.

[8] Забылин М.И.: Исследование упругих свойств песчаного грунта. Основания, Фундаменты и подземные сооружения. Высшая Школа. Москва, 1967.

ПАРАМЕТРЫ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШАХТНЫХ ОТХОДОВ
В ПРИМЕНЕНИИ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ НУЖД

Р е з ю м е

В работе излагается проблема использования перегорелых шахтных отходов для дорожных работ. Представлены результаты исследования основных геотехнических параметров указанных отходов, выделяя в особенности показатель несущей способности, а также модуль упругости и деформации. Работа включает в себя ряд замечаний и практических выводов.

PARAMETERS OF THE CARRYING CAPACITY OF MINING WASTE
MATERIALS IN APPLICATION FOR ROAD PURPOSES

S u m m a r y

In the article the problem of utilization of burnt-through mining waste materials for road-building works has been presented. The results of research work of the basic geotechnical parameters of the waste materials have been given in the paper. Particularly the index of the carrying capacity and the modulus of elasticity and deformation have been exposed. The article contains seweral practical aspects and indications.