



Marta KADELA*, Monika GWÓŹDŹ-LASOŃ**, Iwona DUDKO-PAWŁOWSKA***

Parametry geotechniczne wybranych odpadów kopalnianych i hutniczych

Streszczenie: W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania technologiami ekologicznymi oraz produkcją niezużywającą źródła energii nieodnawialnej. Trend ten jest również obserwowany przy budowie nowych obiektów inżynierskich, gdzie w warstwy podbudowy, czy warstwy stabilizujące słabe podłoże gruntowe wbudowane są materiały antropogeniczne z uwagi na możliwość wyczerpania się źródeł złóż naturalnych. Z drugiej strony odpady, powstające podczas eksploatacji i przeróbki węgla kamiennego lub odpady hutnicze to wciąż niewykorzystane źródło materiału. Jednocześnie jest to materiał o różnorodnych i zmiennych w poszczególnych przedziałach czasowym właściwościach. Dlatego w ramach niniejszej pracy sprawdzono parametry materiałowe i mechaniczne dwóch, wybranych z grupy reprezentatywnej, rodzajów odpadów (kopalnianych i hutniczych), pobranych odpowiednio z hałdy KWK Mysłowice–Wesoła, zlokalizowanej w Mysłowicach oraz z hałd powstałych po zakładzie górniczo-hutniczym Orzeł Biały w Bytomiu.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że obydwie materiały charakteryzowały się największą zawartością frakcji żwirowej i piaskowej. Jednak z uwagi na wysoką zawartość części organicznych (powyżej 15%) nie mogą zostać zakwalifikowane jako np. piasek ze żwirem. Przeprowadzone badania wykazały, że materiały te posiadają dobre parametry geotechniczne i mogą być użyte do różnego rodzaju zastosowań geotechnicznych, zastępując lub uzupełniając materiały rodzime. Parametry te są jednak różne dla poszczególnych gruntów i każdorazowo wymagają sprawdzenia w celu ustalenia miejsca ich docelowego wbudowania. Dlatego konstrukcje z zastosowaniem tych gruntów powinny być projektowane indywidualnie na podstawie obliczeń, najczęściej numerycznych.

Słowa kluczowe: odpady kopalniane, odpady hutnicze, parametry geotechniczne

The use of mining and metallurgical waste with defined parameters on selected examples

Abstract: In recent years there has been increased interest in environmental technologies and the production of wear-free non-renewable energy sources. This trend is also observed in the construction of new engineering struc-

* Dr inż., Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa; e-mail: m.kadela@itb.pl

** Dr inż., Politechnika Krakowska, Kraków.

*** Dr inż., Politechnika Śląska, Gliwice.

tures, where the foundation layer or layers of stabilizing weak subsoil are rebuilt on anthropological materials causing the possibility of the exhaustion of the natural resources. On the other hand, the waste generated during the operation and processing of coal or metallurgical waste still represents an untapped source material. However, it is a material possessing unknown properties. This article presents material and mechanical properties of two types of waste (mining and smelting). The samples were taken respectively from the KWK Mysłowice – Wesoła heap, which is located in Mysłowice and from the heaps created after mining and metallurgical processes at the White Eagle plant in Bytom.

The research has shown that both materials are characterized by the highest fractions of gravel and sand. However, due to the high content of organic parts (over 15%) they cannot be classified as such gravelly sand. The results of laboratory tests also indicate that these materials have good geotechnical parameters and can be used for a variety of geotechnical applications, replacing or complementing the native materials. These parameters are, however, various for each individual ground and need to be checked in order to determine the place of their designation. Therefore structures with the use of such ground should be designed individually on the basis of calculations, usually numerical.

Keywords: mining waste, metallurgical waste, geotechnical parameters

Wprowadzenie

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na nowe inwestycje budowlane zachodzi konieczność wykorzystywania terenów dotychczas niewykorzystanych, takich jak np. tereny hałd górniczych czy hutniczych. Inwestycje takie są szczególnie ważne przy uwzględnieniu zachodzącego trendu ochrony środowiska i działań ekologicznych. Niniejsze zagadnienie analizuje się pod względem różnych aspektów, od ekologicznego, przez inżynierski, budowlany, geotechniczny, górniczy, prawny na aspekcie ekonomicznym kończąc. W niniejszej pracy rozpatrywany jest aspekt inżynierski, tj. geotechniczny, materiałowy i budowlany, co do zagospodarowania odpadów tworzących hałdy. Kluczowym działaniem w tym aspekcie jest określenie parametrów geotechnicznych, które są podstawą projektową wykorzystywania tego materiału. W literaturze przedmiotu oraz w projektach budowlanych coraz częściej parametry geotechniczne badanych gruntów antropogenicznych są podstawowymi parametrami przy projektowaniu nowych inwestycji przy użyciu metod numerycznych (Gwóźdź-Lasoń 2014), gdzie zachowanie materiału jest opisane przy zastosowaniu odpowiednich modeli konstytutywnych gruntu, tj. Coulomba-Mohra, Druckera-Pragera, CAP czy Modified Cam-Clay (Gwóźdź-Lasoń 2007; Kadela 2012b), co z kolei wiąże się z określeniem wymaganych parametrów geotechnicznych tych gruntów antropogenicznych (Gwóźdź-Lasoń 2007; Kawalec 1995).

Podstawą do zakwalifikowania danego typu odpadów do określonej grupy materiałów jest spełnienie odpowiednich wymogów wytrzymałościowych. W ramach przedstawionej pracy wykonano badania dwóch rodzajów gruntów antropogenicznych – odpadów górniczych oraz odpadów hutniczych. W drugim przypadku z uwagi na potencjalne zastosowanie tego materiału w budownictwie, dla celów docelowego zazielenienia i utrzymania skarp nasypów drogowych poprzez wypełnienie zapadlisk gruntowych (do 1,5 m) na rekultywowanych terenach zdegradowanych czy wyrównania terenów będących przedmiotem rekultywacji, badania przeprowadzono dla samego kruszywa pohanicznego (zwanego kruszywem budowlanym) oraz dla mieszanki piasku, kruszywa i odpadu antropogenicznego, tworzących łącznie tzw. mieszankę stabilizującą.

1. Charakterystyka odpadów

1.1. Odpady kopalniane

Próbki odpadów górniczych pobrano do badania z hałdy KWK Mysłowice–Wesoła zlokalizowanej w Mysłowicach (fot. 1).



Fot. 1. Wybrany teren hałd odpadów górniczych z określonymi reprezentatywnymi grupami sklasyfikowanych gruntów antropogenicznych

Phot. 1. The selected area of mine waste dumps with specific representative groups classified anthropogenic grounds

Z pozyskanych próbek odpadów, na podstawie analizy makroskopowej zgodnie z PN-EN ISO 14688, wyodrębniono cztery rodzaje gruntów antropogenicznych (określanych dalej jako grupy A, B, C i D), których klasyfikacja oparta była na cechach określających stan materiału, jego parametry fizyczne i wartości wytrzymałościowe wstępnie określone na podstawie oznaczonej plastyczności, konsystencji, składu granulometrycznego, a także zawartości i dylatacji frakcji pylastej i ilastej badanych gruntów oraz wytrzymałości w stanie suchym.

1.2. Odpady hutnicze

Badany materiał to grunt antropogeniczny, tworzony poprzez wymieszanie naturalnego drobnego piasku, kruszywa (pobranego z hałd w miejscu po zakładzie górniczo-hutniczym Orzeł Biały w Bytomiu) oraz „kompostu”, w proporcjach wagowych 45:25:30.

Do laboratorium dostarczono zarówno gotową mieszanekę (fot. 2a), jak i poszczególne jej składniki (fot. 2b-d):

- piasek – drobno- i średnioziarnisty, koloru szarobrazowego, wilgotny, zawierający domieszkę frakcji poniżej 0,063 mm;
- kruszywo – żużel pohutniczy o frakcji 0-40 mm, ziarna izometryczne, szorstkie, ostrokrawędziste, szare, o znacznej gęstości;
- „kompost” – materiał powstały w wyniku mechaniczno-biologicznego przetworzenia (odpad o numerze przemysłowym 190503), zawierający zarówno rozłożoną, jak



Fot. 2. Materiał przeznaczony do badań: a – piasek; b – kruszywo; c – mieszanka, frakcja >25 mm; d – mieszanka, frakcja 10–25 mm

Phot. 2. Tested material: a – sand; b – aggregate; c – mixture, fraction >25 mm; d – mixture, fraction 10–25 mm

i nierozłożoną substancję organiczną, jak również zanieczyszczenia nieorganiczne: fragmenty szkła, drobne tworzywa sztuczne.

2. Przeprowadzone badania odpadów

2.1. Uwagi ogólne

Zgodnie z normą PN-EN 13242+A1:2010 należy przeprowadzić ocenę składu ziarnowego. W ramach badań laboratoryjnych wykonano:

- analizę sitową (oraz uzupełniająco analizę areometryczną),
- oznaczenia wilgotności,
- oznaczenia gęstości właściwej szkieletu gruntowego,
- oznaczenia wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego,
- badania trójosiowe, bezpośredniego ścinania i edometryczne (grunt kopalniany).

Badania laboratoryjne wykonano zgodnie z obowiązującymi specyfikacjami technicznymi PKN-CEN ISO/TS 17892-1–17892-12 oraz PN-EN 1997-2: 2009, PN-EN 933-1:2012 i PN-EN ISO 14688, a także na podstawie wcześniejszych opracowań, badania i analizy z prac własnych oraz bazując na aktualnej literaturze. Oznaczenie wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej metodą Proctora przeprowadzono według PN-B-04481:1988.

Oznaczenia zostały poprzedzone ogólną, makroskopową oceną rodzaju i stanu gruntu.

Należy podkreślić, że w przypadku mieszaniny stabilizującej ze względów proceduralnych nie można było wykonać niektórych oznaczeń na gruncie zawierającym dużo substancji organicznej („kompost”), stąd badania prowadzone były dwutorowo:

- na mieszance „pełnej” zawierającej piasek, kruszywo i „kompost” w proporcjach wagowych 45:25:30;
- na mieszance pozbawionej „kompostu” – piasek i kruszywo w proporcjach wagowych 45:25.

2.2. Odpady kopalniane

2.2.1. Wilgotność naturalna i gęstość właściwa

Wyniki jako parametry w ujęciu analizy statystycznej (ang. *reliable soil parameters*), w tym przypadku średnia arytmetyczna mediany i wartości średniej ze zbioru przebadanych próbek zostały przedstawione w tabeli 1 dla czterech wyodrębnionych z hałdy reprezentacyjnych gruntów antropogenicznych (A, B, C i D). Większość badań wykonano na próbkach o wilgotności optymalnej według PKN-CEN ISO/TS 17892-1 (wyniki przedstawiono w p. 2.2.3), z wyjątkiem kilku przypadków, gdy założona metoda badania była odmienna.

TABELA 1. Fizyczne parametry gruntów antropogenicznych (A, B, C i D)

TABLE 1. Physical parameters of ground anthropology (A, B, C, D)

Próbka	Ciężar właściwy γ [kN/m ³]	Wilgotność [%]
A	20,00	12,50
B	21,00	13,00
C	18,80	15,00
D	19,50	15,50

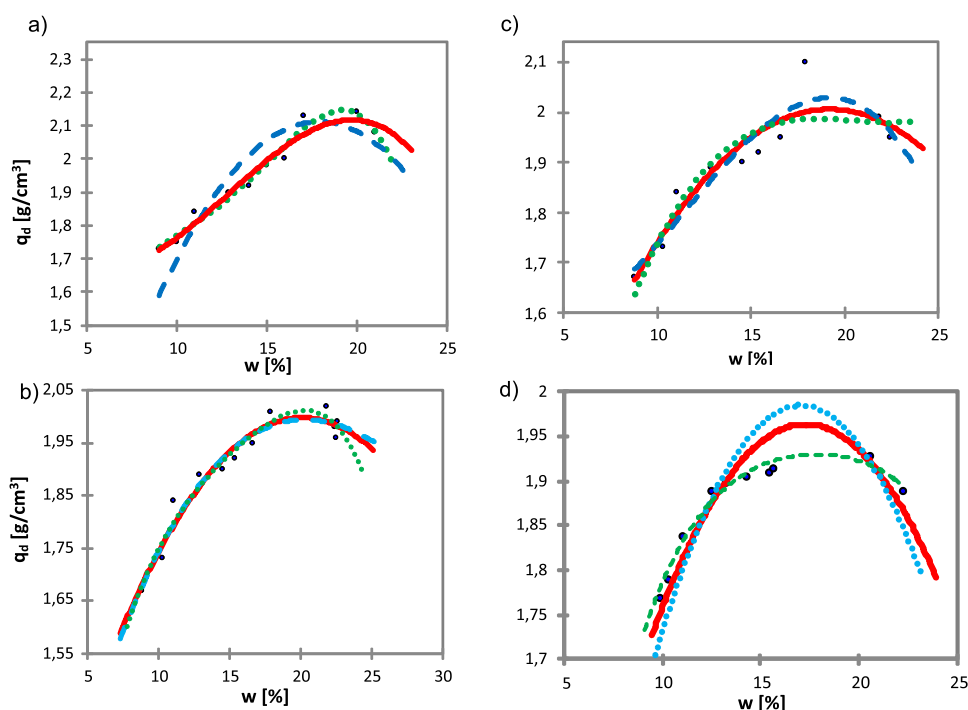
2.2.2. Analiza składu granulometrycznego

Badanie składu granulometrycznego wraz z określeniem wskaźników różnoziarnistości C_U i krzywizny C_c wykonano zgodnie z PKN-CEN ISO/TS 17892-4. Ogólną analizę wszystkich kilkudziesięciu wyników rozkładu cząstek badanych grup próbek uściśla analiza statystyczna, która wskazuje, że ogólna zawartość frakcji ilastej jest na poziomie 10% – mediana, zawartość frakcji pylastej nie przekraczała 18% (*maximum*), frakcji piaskowej (Sa) – 38% (*maximum*), natomiast frakcja żwirowa (Gr) zawiera się w przedziale od 50% do 70% (*mean* +/- *standard deviation*). Pod względem geotechnicznym badany materiał odpadowy jest porównywalny do żwiru ilastego (clGr), żwiru ilastego z domieszką piasku (sacIGr) oraz iłu ze żwirem i z domieszką piasku (sagrCl) – wyniki krzywych uziarnienia i trójkąta (Gr, Sa, Si+Cl) i diagramu (Cl', Si+Cl) klasyfikacyjnego ISO. Badania zawartości części organicznych I_{om} w tych gruntach kształtują się na poziomie 15% według założeń (PKN-CEN ISO/TS 17892 2009).

2.2.3. Wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego

Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu pozwalają scharakteryzować badany grunt antropogeniczny jako materiał korzystnych pod kątem cech uziarnienia i zagęszczalności gruntu, które są zależne od zastosowanej metody oraz warunków badania. W zastosowanej zmotywowanej dla gruntów antropogenicznych metodzie Proctora istotny wpływ na wartości parametrów zagęszczalności gruntu wywiera stricte energia zagęszczania, tj. zwiększenie energii zagęszczania powoduje wyraźne zwiększenie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu badanej próbki reprezentatywnej.

W analizowanej metodzie wibracyjnej duży wpływ na wartości parametrów zagęszczalności mają wilgotność gruntu, czas wibracji, obciążenie oraz grubość zagęszczanych warstw. Wszystkie atrybuty mające wpływ na ten parametr przebadano, a następnie przeanalizowano dane z uwzględnieniem modeli ANOVA i ANCOVA. Optymalne dane z badań i analiz zamieszczono na rysunku 1. Parametry te w 97,54% zgodziły się z danymi uzyskanymi w dwóch przypadkach realizacji projektu geotechnicznego z zastosowaniem badanych gruntów. Badanie wilgotności optymalnej, maksymalnej gęstości objętościowej wykonano w aparacie Proctora, a jego wyniki przedstawiono na rysunku 1 dla odpowiednich gruntów reprezentatywnych.



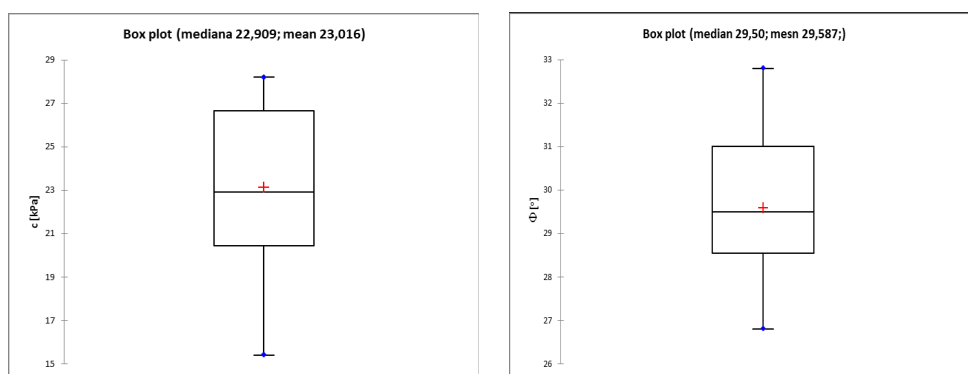
Rys. 1. Zależność gęstości objętościowej od wilgotności reprezentacyjnych próbek z poszczególnych grup
a) A – 2,15 $[\text{g/cm}^3]$; b) B – 1,90 $[\text{g/cm}^3]$; c) C – 2,00 $[\text{g/cm}^3]$; d) D – 1,95 $[\text{g/cm}^3]$

Fig. 1. The dependence of the density of ground on moisture of representative samples
a) A – 2.15 $[\text{g/cm}^3]$; b) B – 1.90 $[\text{g/cm}^3]$; c) C – 2.00 $[\text{g/cm}^3]$; d) D – 1.95 $[\text{g/cm}^3]$

2.2.4. Właściwości mechaniczne

W ramach badań właściwości mechanicznych przebadano wodoprzepuszczalność, wskaźniki pęcznienia I_{pc} . Ponadto wykonano badania edometryczne i trójosiowe oraz bezpośredniego ścinania, które pozwalają na określenie parametrów ścisłości, tj. współczynnika ścisłości objętościowej, modułów edometrycznych i siecznych oraz nachyleń prostych konsolidacji pierwotnej i wtórnej.

Wytrzymałość na ścinanie badano w aparacie bezpośredniego ścinania AB. Wyniki badań wraz z wynikami analizy statystycznej otrzymanych wartości przedstawiono na rysunku 2. Średni kąt tarcia wewnętrzznego z badań w aparacie AB wynosił $29,60^\circ$, a średnia wartość kohezji wynosi 23,00 kPa.



Rys. 2. Analiza statystyczna parametrów wytrzymałościowych badanych grup reprezentacyjnych próbek gruntów z haldy jako wartości wyjściowe do szacowania nośności

Fig. 2. Statistical analysis of strength parameters test representative groups of samples slagheap's subsoil as the value of output to estimate the bearing capacity

Przeprowadzono wszystkie badania, a następnie oszacowano kohezję i kąt tarcia wewnętrzznego, jako funkcje wskaźnika porowatości. Badania ścisłości w edometrze dla trzech podgrup przebiegały zgodnie z typowymi wytycznymi normowymi, natomiast czwarta podgrupa z uwagi na zawartość frakcji żwirowej nie mogła zostać przebadana w edometrze. Wykonano w sumie 40 badań w tym 30 standardowych oraz 10 zmodyfikowanych poprzez eliminację frakcji Gr. Obliczono moduły ścisłości pierwotnej i wtórnej dla zakresu obciążeń 100–200 kPa. Wyniki przedstawiono w tabeli 2. dla każdej z wyszczególnionej podgrupy gruntu antropogenicznego, jako wartości średnie dla odpowiednio zmodyfikowanej próbki. Należy podkreślić, że ze względu na dużą zawartość frakcji piaskowej i żwirowej (p. 2.2.2) uzyskano wysokie wartości modułów ścisłości.

Wyniki potwierdzono badaniem w aparacie trójosiowego ściskania, gdzie badano grunt różnymi metodami, a w efekcie końcowym optymalną metodą dla założeń początkowych dotyczących funkcji wykorzystania badanego gruntu antropogenicznego, była metoda CD (*consolidated drained*), która polega na bardzo powolnym ścinaniu próbki wstępnie poddanej konsolidacji. W trakcie zasadniczego badania następuje ciągły odpływ wody z próbki, prędkość badania jest tak dostosowana, aby wartość ciśnienia porowego rejestrowana

TABELA 2. Parametry geotechniczne czterech reprezentatywnych gruntów antropogenicznych

TABLE 2. Geotechnical parameters of four representative anthropogenic grounds

Próbka	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]	Kohezja c [kPa]	M_0 [kPa]	M [kPa]
A	38,50	22,50	78,20	121,30
B	32,00	27,50	62,80	110,20
C	48,40	21,00	96,70	200,00
D	22,00	28,50	28,50	42,50

w próbkę była równa zero. Metodę tę stosuje się, gdy przewidywane obciążenie użytkowe budowli nie przekracza 30% obciążenia całkowitego, a czas budowy jest dostatecznie długi do uzyskania pełnej konsolidacji podłoża, co było jednym z początkowych założeń badania. Na podstawie badań wyznacza się parametry wytrzymałościowe (Φ' oraz c') na podstawie naprężeń efektywnych.

2.3. Odpady hutnicze

2.3.1. Wilgotność naturalna i gęstość właściwa

Oznaczenia wilgotności zostały przeprowadzone na otrzymanej od zleceniodawcy mieszance pełnej (z „kompostem”) oraz na mieszance piasku z kruszywem w proporcjach wagowych 45:25, którą wykonano z dostarczonych komponentów (w tym z wilgotnego piasku). Wilgotność gotowej mieszanki wynosiła $w = 7,45\%$, natomiast tej spreparowanej w laboratorium $w = 13,92\%$.

Gęstość właściwa została oznaczona na mieszance bez „kompostu”, przesianej przez sito 1 mm, zatem odnosi się tylko do najdrobniejszych frakcji mineralnych (nieorganicznych), na których wykonano następnie badanie areometryczne. Otrzymana gęstość właściwa wynosi $\rho_s = 3,0 \text{ g/cm}^3$. Stosunkowo wysoka wartość gęstości wynika z faktu, że w skład mieszanki kruszywa wchodzi żużel po przeróbce rud cynku i ołowiu, a zatem zawierający pewne ilości minerałów rudnych. Gęstość minerałów rudnych cynku i ołowiu jest wysoka (np. galena $7,2\text{--}7,6 \text{ g/cm}^3$), a zatem im wyższa ich zawartość w gruncie, tym wyższa gęstość gruntu.

2.3.2. Analiza składu granulometrycznego

Ocenę składu ziarnowego wykonano dla:

- pełnej mieszanki bez usunięcia ziaren poniżej 0,063 mm (analiza sitowa metodą suchą),
- pełnej mieszanki po usunięciu ziaren poniżej 0,063 mm (analiza sitowa metodą moką).

Jako odniesienie wykonano pełną krzywą uziarnienia mieszanki bez „kompostu”, mieszanki piasku i kruszywa w proporcjach wagowych 45:25, otrzymaną na podstawie analizy areometrycznej i analizy sitowej. Dobór mieszanki jest związany z tym, że wykonanie analizy areometrycznej jest niemożliwe na gruntach zawierających substancję organiczną.

Podczas przesiewania próbki przygotowywanej na sucho najdrobniejsze cząstki oblepiały ziarna większe, co jest widoczne na wykresie uziarnienia.

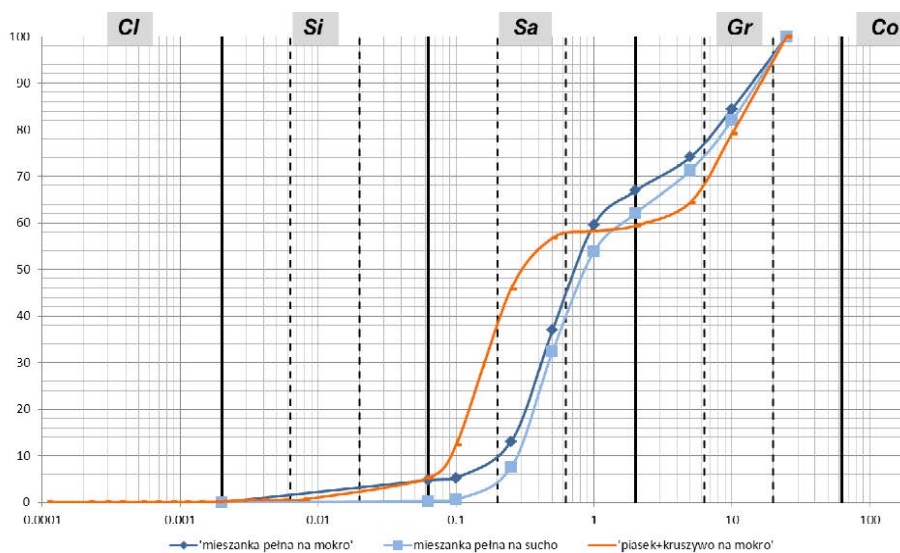
Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 3. Na podstawie przeprowadzonych badań oceny składu ziarnowego wyznaczono, że:

- ➔ zawartość frakcji pyłastej ok. 5% (w badaniu metodą suchą 0,3%),
- ➔ zawartość frakcji piaskowej ok. 62%,
- ➔ zawartość frakcji żwirowej ok. 33% (w badaniu metodą suchą 38%).

TABELA 3. Zawartości poszczególnych frakcji wg PN-EN ISO

TABLE 3. The content of each fraction according PN-EN ISO

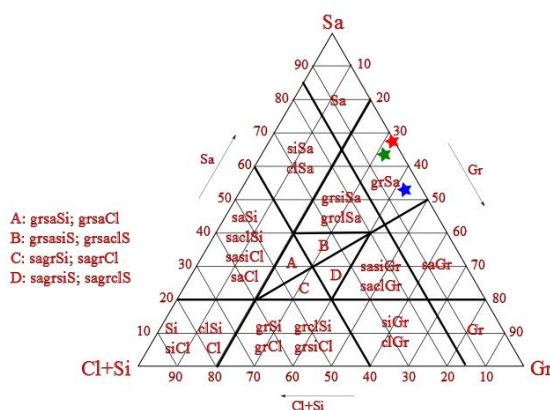
Lp.	Frakcja	Piasek+kruszywo (45:25)	Piasek + kruszywo + „kompost” (45:25:30) na mokro	Piasek + kruszywo + „kompost” (45:25:30) na sucho
1.	<0,002	< 0,2%	5%	<0,3%
2.	0,002–0,0063	< 0,4%		
3.	0,0063–0,02	2%		
4.	0,02–0,063	3%		
5.	0,063–0,2	34%	5%	4%
6.	0,2–0,63	19%	35%	35%
7.	0,63–2	1%	22%	23%
8.	2–6,3	10%	10%	12%
9.	6,3–20	27%	19%	22%
10.	20–63	4%	4%	4%



Rys. 3. Krzywa uziarnienia

Fig. 3. Particle size distribution curve

Na podstawie zawartości poszczególnych frakcji umieszczono badane mieszanki w trójkącie klasyfikacyjnym ISO (rys. 4) (PN-EN ISO 14688:2006). Wszystkie mieszanki plasują się w polu „piasek ze żwirem”. Trzeba natomiast pamiętać, że mieszanki pełnej nie można nazwać piaskiem, gdyż zawiera ona dużo substancji organicznej (powyżej 20%).



Rys. 4. Badane mieszanki w trójkącie klasyfikacyjnym ISO: niebieski – piasek+kruszywo (bez „kompostu”) na mokro; zielony – pełna na mokro; czerwony – pełna na sucho

Fig. 4. Tested mixtures in triangle classification ISO: blue – sand+aggregate (without a compost) on wet; green – full on wet; red – full on dry

Wskaźniki uziarnienia (tab. 4) wskazują na to, że mieszanka piasku i kruszywa jest gruntem o nieciągłym uziarnieniu (C_u wysoki, $C_c < 0,5$), natomiast mieszanka pełna jest gruntem równomiernie/średnio uziarnionym ($C_c = 6$ leży na granicy pomiędzy tymi dwoma typami).

TABELA 4. Wskaźniki uziarnienia badanych mieszanek

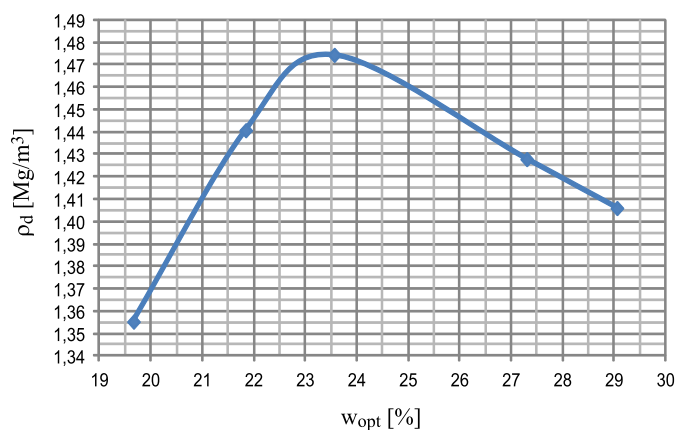
TABLE 4. Indicators of particle size distribution tested mixtures

Lp.	Frakcja	Piasek+kruszywo (45:25)	Piasek + kruszywo + „kompost” (45:25:30) na mokro	Piasek + kruszywo + „kompost” (45:25:30) na sucho
1.	d10	0,09 mm	0,20 mm	0,29 mm
2.	d30	0,17 mm	0,42 mm	0,49 mm
3.	d60	2,5 mm	1,0 mm	1,6 mm
4.	Cc	28	5	6
5.	$C_u = d60/d10$	0,01	0,18	0,15

2.3.3. Wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego

Zagęszczanie gruntu wykonywano w aparacie Proctora poprzez ubijanie 55 uderzeniami ciężkiego ubijaka pięciu warstw gruntu (metoda IV). Ze względu na dużą zawartość zia-

ren powyżej 10 mm (21%) wilgotność optymalną oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego obliczono z uwzględnieniem poprawki na zawartość nadziarna – wzory (77) i (78) w normie PN-88/B-04481. Na rysunku 5 przedstawiono zależność gęstości szkieletu gruntowego od wilgotności bez uwzględnienia zawartości nadziarna. Na podstawie zależności wyznaczono: $w_{opt} = 18,4\%$, $\rho_{ds} = 1,66 \text{ g/cm}^3$.



Rys. 5. Zależność gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności

Fig. 5. The dependence of ground skeleton density on moisture

W trakcie badań zauważono, że przy wilgotności bliskiej optymalnej i większej mieszanka zachowywała się jak grunt spoisty – zbrylała się (fot. 3). Powodem tego zjawiska jest prawdopodobnie duża zawartość substancji organicznej.



Fot. 3. Mieszanka po badaniu w aparacie Proctora

Phot. 3. Mixture after being tested in Proctor's apparatus

3. Ocena przydatności do celów budowlanych

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że obydwa materiały charakteryzowały się największą zawartością frakcji żwirowej i piaskowej. Grunt 1 pod względem geotechnicznym jest porównywalny do żwiru ilastego, żwiru ilastego z domieszką piasku oraz iltu ze żwirem i z domieszką piasku, a w przypadku gruntu 2 wszystkie jego mieszanki plasują się w polu „piasek ze żwirem”. W rzeczywistości jednak nie można jej nazwać piaskiem, ponieważ zawiera dużo substancji organicznej (powyżej 20%).

Wyznaczone wskaźniki jednorodności C_u oraz wskaźniki krzywizny C_c wskazują na podstawie literatury (Kawalec 1995; Majer 2009) oraz na podstawie zachowania podczas badania zagęszczenia, że są to grunty i mieszanki dobrze zagęszczalne. W przypadku mieszanki stabilizującej maksymalne zagęszczenie szkieletu gruntowego wyznaczono dla wilgotności optymalnej $w_{opt} = 18,4\%$, dlatego przed zagęszczeniem (w trakcie rozkładania lub przed rozłożeniem) mieszankę należy zwilżyć.

Z uwagi na planowane zastosowanie mieszanki stabilizującej oraz udokumentowane dowody zastosowania z dobrymi skutkami tego kruszywa, co potwierdzają powyższe wyniki analiz, dalsze badania zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13242+A1:2010 nie są konieczne. Ponadto zawartość związków organicznych w mieszance stabilizującej, znacznie przekraczająca wymagania normy PN-EN 13242+A1:2010, nie wpływa na pogorszenie parametrów mieszanki, co zostało potwierdzone w badaniach oceny składu ziarnowego. Potwierdzają to dodatkowo przeprowadzone badania zagęszczania gruntu ocenione dla pełnej mieszanki.

Przeprowadzone badania wykazały, że materiały te posiadają dobre parametry geotechniczne. Zatem mogą być użyte do różnego rodzaju zastosowań geotechnicznych, gdyż bardzo dobrze mogą zastąpić lub uzupełnić materiały rodzime. Z uwagi jednak na dużą różnorodność gruntów antropogenicznych nie można na podstawie określonych parametrów klasyfikować całej grupy tych gruntów, o czym świadczy również możliwość wydzielenia 4 rodzajów gruntu z jednej hałdy (grunt 1). Parametry te są różne dla poszczególnych gruntów i każdorazowo wymagają sprawdzenia w celu ustalenia miejsca ich docelowego wbudowania. Konstrukcje z zastosowaniem tych gruntów powinny być projektowane indywidualnie na podstawie obliczeń, najczęściej numerycznych (Wysokiński 1991; Pisarczyk 2001; Gaszyński i Gwóźdź-Lasoń 2005; Gwóźdź-Lasoń 2010, 2012; Kadela 2012a).

Podsumowanie

Zastosowanie gruntów antropogenicznych jest coraz bardziej powszechne, gdyż bardzo często dobrze zastępują lub uzupełniają materiały rodzime, a ponadto ich wykorzystanie wpasowuje się w trend zrównoważonego rozwoju, wpływa na obniżenie kosztów inwestycji oraz na rekultywację terenów pokopalnianych. Jednak grunty antropogeniczne najczęściej są klasyfikowane jako nasyp niekontrolowany o nieokreślonych parametrach materiałowych, dlatego podjęcie próby sklasyfikowania tych gruntów i przydzielenia odpowiednich parametrów geotechnicznych, ekonomicznych oraz określenie możliwości ich zastosowania jest zadaniem istotnymi i potrzebnymi. Ponadto z uwagi na dużą różnorodność, parametry te są zmienne dla poszczególnych gruntów i każdorazowo wymagają sprawdzenia w celu ustalenia docelowego wbudowania tych gruntów.

W dobie zwiększonego zapotrzebowania na różnego rodzaju inwestycje bardzo istotne jest poszukiwanie parametrów geotechnicznych, pozwalających na realny opis ich zachowania w modelu obliczeniowym, na podstawie którego tworzone są modele obliczeniowe układów obiekt budowlany-podłoże gruntowe (Fedorowicz i Kadela 2011, 2014; Gwóźdź-Lasoń 2014), a następnie wykonane są obiekty przy uwzględnieniu dodatkowo czynników środowiskowych i finansowych. Dlatego głównymi założeniami poszczególnych badań gruntów antropogenicznych jest zawsze konieczność wykonania badań parametrów istotnych dla obliczeń projektowych i odpowiedzi, jak dany odpad będzie współpracował z konstrukcją, w którą zostanie wbudowany.

Przeprowadzone badania wykazały, że grunty antropogeniczne mogą być użyte do różnego rodzaju zastosowań geotechnicznych. Przedstawione w pracy wartości są jednak wybranymi danymi, które z uwagi na cel badania i możliwość wykorzystania niniejszych gruntów antropogenicznych (odpadów górniczych i hutniczych) jako materiału budowlanego przy projektowaniu i wykonawstwie konstrukcji geotechnicznych były najistotniejsze. Badania zostały tak dobrane, by dały dobry zakres parametrów, uwzględnianych przy projektowaniu konstrukcji geotechnicznych, takich jak np. gabionowe mury oporowe wypełnione gruntem antropogenicznym (o najlepszych parametrach), podbudowy drogowej, stabilizacji skarp hałd, przy wypełnieniu zapadlisk gruntowych czy wyrównaniu terenów, będących przedmiotem rekultywacji.

Należy jednak jeszcze raz podkreślić, że każde badanie laboratoryjne tego rodzaju odpadów jest badaniem indywidualnym co do zakresu oraz celu i bardzo trudno wyniki poszczególnych badań interpretować zgodnie z powszechnie przyjętymi, normowymi wytycznymi dla typowych gruntów naturalnych.

Literatura

- Fedorowicz, L. i Kadela, M. 2011. Monitoring system applied in road structure of UPS subbase layer. [W:] *Proceeding of 9th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*, Slovakia Faculty of Civil Engineering STU Bratislava Slovak Society of Mechanics SAS, Bratislava, 20–21 października 2011, Slovak, s. 41–44.
- Fedorowicz, L. i Kadela, M. 2014. Evaluation of durability road structures with by products of combustion in subbase. [W:] W. Kozłowski red. *Elementy budownictwa komunikacyjnego*, Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium”, s. 23–35.
- Gaszyński, J. i Gwóźdź-Lasoń, M. 2005. Numerical models of reinforced. [W:] *Proceeding of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16ICSMGE)*, Osaka, 12–16 września 2005, Japan, s. 709–802.
- Gwóźdź-Lasoń, M. 2007. *Modele obliczeniowe podłoża gruntowego w aspekcie różnych metod i technologii wzmocnienia*. Praca Doktorska. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Gwóźdź-Lasoń, M. 2014. Trans-disciplinary concept of geotechnical slope stability design. [W:] *Geotechnics of Roads and Railways: proceedings of the 15th Danube – European Conference on Geotechnical Engineering*, Vienna, Austria, 9–11 September 2014, s. 373–382.
- Gwóźdź-Lasoń, M. 2012. Analiza MES zmian warunków ULS układu złożonego z budynku usytuowanego w pobliżu krawędzi zbocza przydrożnego i podłoża gruntowego oraz modernizowanego obiektu drogowego. *Inżynieria Morska i Geotechnika* Nr 4/2012, s. 465–470.
- Kadela, M. 2012a. *Kryteria modelowania i analiz konstrukcji warstwowych współpracujących na podłożu gruntowym*. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice.
- Kadela, M. 2012b. Zastosowanie prostych modeli numerycznych podłoża gruntowego do opisu pracy współpracującej z nim konstrukcji warstwowej. *Nauka Przyroda Technologie* t. 6, nr 2.

- Kawalec, B. 1995. *Właściwości fizyczne i mechaniczne odpadów kopalnianych jako gruntu budowlanego*. Praca Doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice.
- Majer, S. 2009. Zagęszczanie gruntów niespoistych a wskaźnik jednorodności uziarnienia. [W:] *Materiały konferencyjne IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”*, Politechnika Poznańska, Poznań, 3–4 września 2009, s. 446–455.
- Pisarczyk, S. 2001. *Gruntoznawstwo inżynierskie*. PWN, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892:2009 Badania laboratoryjne gruntów.
- PN-B-04481:1988 Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
- PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- PN-EN 1997-2: 2009 Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczenie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.
- PN-EN ISO 14688:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów.
- Wysokiński, L. 1991. Posadowienie obiektów budowlanych w sąsiedztwie skarp i zboczy. *Instrukcja ITB*, Warszawa.