

Miary zagęszczenia odpadów poflotacyjnych w kontekście kryteriów odbioru robót ziemnych

Dr hab. inż. Wojciech Tschuschke, dr inż. Sławomir Gogolik, mgr inż. Maciej Kroll, mgr Magdalena Walczak
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska

Racjonalna gospodarka odpadami, szczególnie tymi, które są kwalifikowane do odpadów obojętnych, przewiduje ich częściowe wykorzystanie, zazwyczaj jako materiału, z którego mogą być formowane budowle ziemne [8]. Znakomitym przykładem takiego rodzaju materiału są odpady poflotacyjne, powstające w procesie technologicznym produkcji miedzi. W procesie tym skruszona skała macierzysta jest poddawana flotacji, w wyniku której następuje oddzielenie koncentratu miedziowego od pozostałej części urobku, stanowiącego w tym miejscu procesu technologicznego odpad poflotacyjny. Odpad jest kierowany do obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych metodą hydrotransportu, gdzie dalej, w wyniku namywu, podlega naturalnej segregacji sedymentacyjnej. Odpad o grubszym uziarnieniu, który potencjalnie wykazuje właściwości drobnoziarnistego gruntu niespoistego, sedymentuje w pobliżu wylotów. W większej odległości od wylotów jest akumulowany materiał o coraz to drobniejszym uziarnieniu. Wspomniany proces segregacji sedymentacyjnej odgrywa w gospodarce odpadami poflotacyjnymi bardzo istotną rolę, gdyż pozwala w sposób naturalny z całej objętości składowanych odpadów wydzielić w miejscu deponowania odpady o różnych właściwościach. Zazwyczaj odpady grubsze nadają się do formowania konstrukcji inżynierskich, podczas gdy drobniejsze mogą służyć celom uszczelniania. W kompetencji projektanta obiektu pozostaje zatem zdefiniowanie kryteriów warunkujących przydatność odpadów pod względem uziarnienia i w dalszej kolejności kryteriów wymaganego zagęszczenia.

PROBLEM BADAWCZY

Pod względem klasyfikacji genetycznej zdeponowany odpad poflotacyjny stanowi osad antropogeniczny z silnie wyeksponowaną anizotropią oraz specyficznymi właściwościami, które są pochodną warunków wytworzenia odpadów w ciągu technologicznym. Czynniki takie jak: rodzaj skały macierzystej, jej skład mineralogiczny i petrograficzny, procesy kruszenia, flotacji i hydrotransportu urobku determinują ostateczny kształt oraz wielkość ziaren i cząstek deponowanego odpadu. Wtórnie natomiast, na skutek silnego zasolenia środowiska, w którym są deponowane odpady obserwuje się zjawisko cementacji. Wspólną cechą wszystkich odpadów poflotacyjnych jest dominujący, ostrokrawędzisty kształt ziaren, który wynika między innymi z ich kruszenia w trakcie procesu wzbogacania rudy [3]. W opisie kształtu ziaren odpadów można zauważyć, że im wymiar ziarna jest mniejszy, tym bardziej zatracą one cechy kulistości i obtoczenia, natomiast eksponują się bardziej takie cechy jak ostrokrawędzistość i chropowatość [5, 6]. Zagadnienie to pośrednio wyjaśniają wyniki analizy statystycznej prób odpadów o zróżnicowanym uziarnieniu, które wskazują na wyraźny trend wzrostu gęstości właściwej (rys. 1) oraz zawartości węgla wapnia (rys. 2) ze zmniejszaniem się wartości miary uziarnie-

nia, którą w przypadku odpadów poflotacyjnych miarodajnie reprezentuje wskaźnik uziarnienia SFR [2] (1).

$$SFR = \frac{S}{F} \quad (1)$$

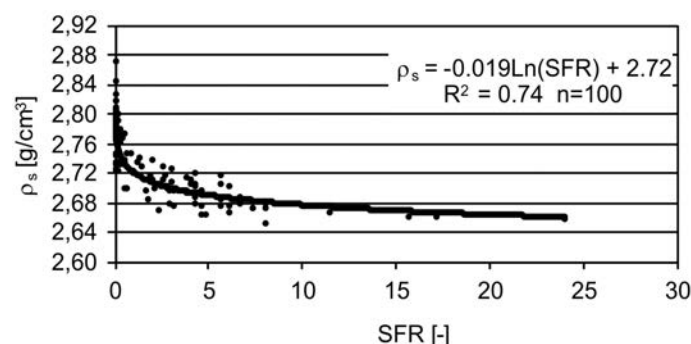
gdzie:

S – procentowa zawartość frakcji większej od 0,074 mm,

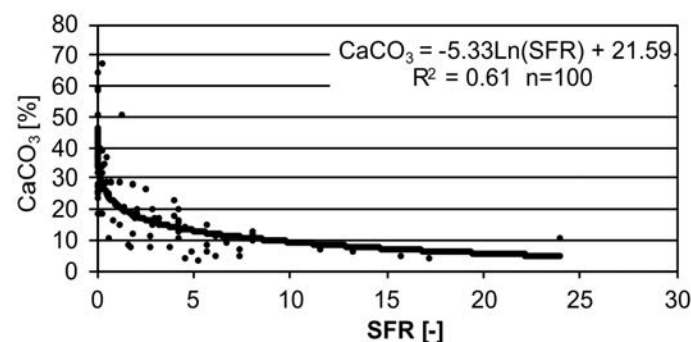
F – procentowa zawartość frakcji mniejszej od 0,074 mm,

Odpady o najgrubszym uziarnieniu, na które nałożono warunek dopuszczalnej zawartości frakcji mniejszej od 0,05 mm w ilości nieprzekraczającej 30%, z powodzeniem są wykorzystywane do nadbudowy zapór okalających obiekt unieszkodliwiania odpadów [3, 8]. Wbudowane w obwałowania odpady podlegają zagęszczeniu do osiągnięcia wymaganego kryterium zagęszczenia. Do kontroli jakości zagęszczenia są wykorzystywane różne metody badań, na podstawie których wyznacza się adekwatne do zastosowanej metody miary zagęszczenia [8]. Miarami tymi są: w przypadku badania sondą izotopową wskaźnik zagęszczenia, natomiast w przypadku sondowania statycznego bądź dynamicznego stopień zagęszczenia.

W przypadku metody objętościowej istnieje możliwość wyboru dowolnie wskazanej miary zagęszczenia. Wyrażenie jednej miary zagęszczenia za pomocą drugiej wymaga określenia wiarygodnego związku korelacyjnego pomiędzy tymi miarami.



Rys. 1. Zależność pomiędzy gęstością właściwą szkieletu gruntowego i wskaźnikiem uziarnienia SFR odpadów poflotacyjnych



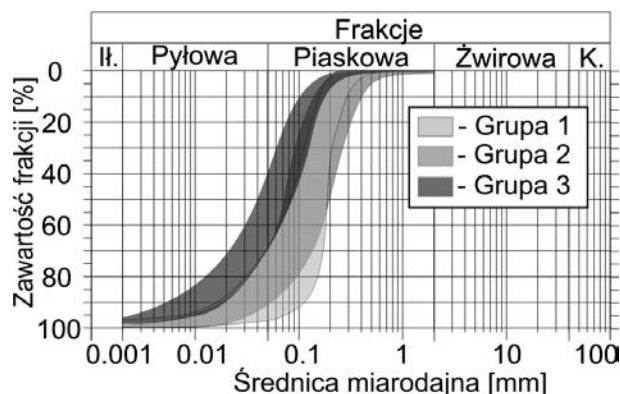
Rys. 2. Zależność pomiędzy zawartością węgla wapnia w odpadach poflotacyjnych i wskaźnikiem uziarnienia SFR

Podobne związki empiryczne wyznaczone dla gruntów naturalnych [4] nie gwarantują wysokiej precyzji oceny szacowanego parametru w przypadku tak specyficznego materiału, jaki stanowią odpady poflotacyjne.

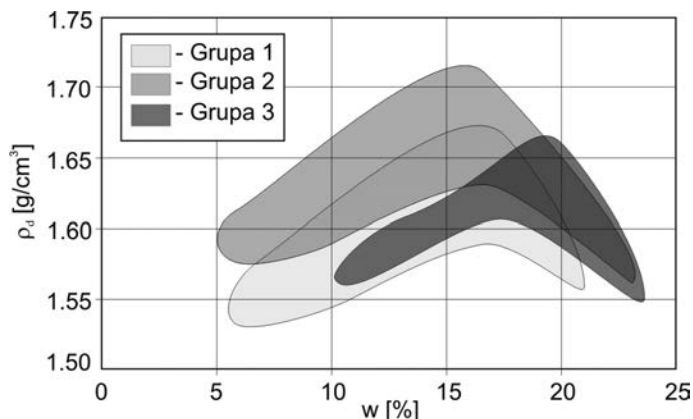
MATERIAŁ BADAWCZY

Do badań zagęszczalności odpadów poflotacyjnych wyodrębniono serię 63 próbek osadów, które formalnie pod względem uziarnienia kwalifikowały się jako materiał przydatny do formowania obwałowań. W ramach grupy statystycznej wydzielono trzy podgrupy różnicowane pod względem uziarnienia i miejsca zdeponowania odpadu w maszywie składowiska. Najbardziej liczną grupę 1. stanowiły „świeże” odpady piaszczyste pobrane z przypowierzchniowych warstw zdeponowanych i wbudowanych w obwałowania odpadów. Do grupy 2. zakwalifikowano „starsze” odpady piaszczyste, które pobrano z głębiej zalegających warstw zdeponowanego materiału. W grupie 3. ujęto osady przejściowe, piaszczysto-pylaste, których obecność w nadbudowywanych obwałowaniach stwierdzono sporadycznie. Zakres zmienności uziarnienia w poszczególnych grupach odpadów przedstawiono na rys. 3.

Parametrami zagęszczenia odpadów, które poddano analizie statystycznej były: maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego – ρ_{ds} oraz minimalna i maksymalna gęstość objętościowa odpadów, odpowiednio ρ_{dmin} i ρ_{dmax} , które przy zachowaniu warunku $w = 0$ (wynikającego z metodyki oznaczania tych parametrów) prowadzi do uproszczenia, że: $\rho_{dmin} = \rho_{min}$ i $\rho_{dmax} = \rho_{max}$.



Rys. 3. Zakresy zmienności uziarnienia w analizowanych grupach odpadów poflotacyjnych



Rys. 4. Obszary zmienności krzywych Proctora analizowanych grup odpadów poflotacyjnych

Parametry zagęszczenia wyznaczono na podstawie standardowych badań laboratoryjnych według metody I Proctora [1] oraz metodą wibracyjną [5]. Obszary zmienności krzywych Proctora w poszczególnych grupach uziarnienia analizowanych odpadów przedstawiono na rys. 4, natomiast wpływ metodyki badania na wartości pozostałych parametrów zagęszczenia odpadów omówiono w pracy [7].

Powyższe parametry zagęszczenia są wartościami odniesienia w stosowanych powszechnie miarach zagęszczenia, tj. stopniu zagęszczenia (2) oraz wskaźniku zagęszczenia (3).

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin}) \cdot \rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin}) \cdot \rho_d} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (3)$$

gdzie:

e, e_{max}, e_{min} – wskaźniki porowatości, odpowiednio: naturalnej, maksymalnej i minimalnej,

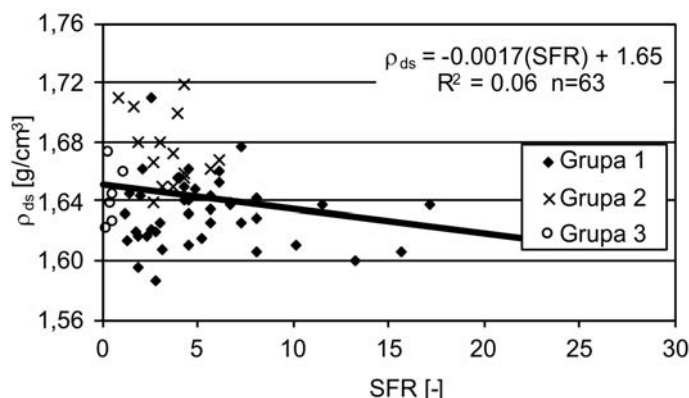
ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu odpadów,

ρ_{ds} – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadów oznaczona według metody I Proctora [1],

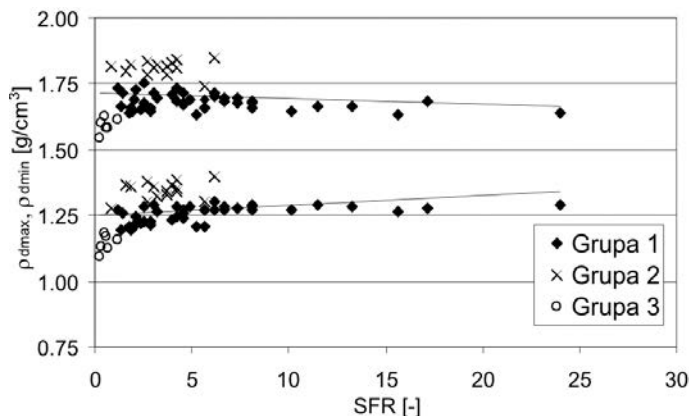
ρ_{dmin}, ρ_{dmax} – odpowiednio: minimalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadów określona na podstawie standardowej metody wibracyjnej [5].

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Próba znalezienia związku korelacyjnego pomiędzy parametrami uziarnienia odpadów a parametrami zagęszczenia nie



Rys. 5. Zależność pomiędzy maksymalną gęstością objętościową szkieletu odpadów i wskaźnikiem uziarnienia SFR

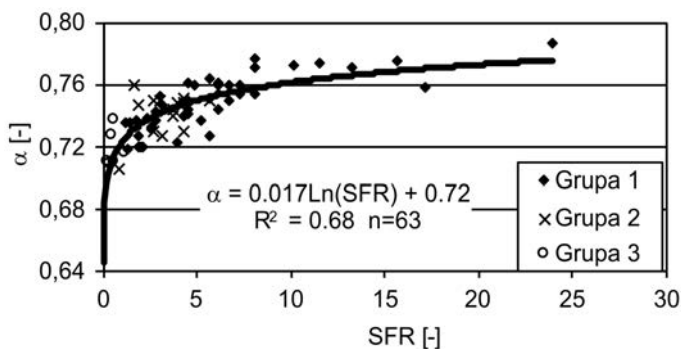


Rys. 6. Zależność pomiędzy maksymalną i minimalną gęstością objętościową odpadów a wskaźnikiem uziarnienia SFR

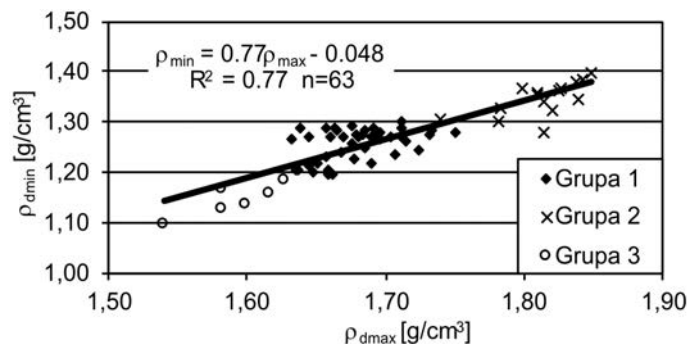
wykazała, zarówno w całej serii odpadów piaszczystych, jak również z uwzględnieniem podziału na grupy, istnienia tego rodzaju związku, który z punktu widzenia kryteriów statystycznych można by uznać za istotny. Przykłady tego rodzaju związków do rekomendowanego wcześniej wskaźnika uziarnienia SFR przedstawiono na rys. 5 i 6.

Obserwowany duży rozrzut punktów oraz bardzo niskie wartości współczynników determinacji wskazują, że inne jeszcze czynniki poza uziarnieniem, nieuwzględnione w analizie, są istotne w konstruowaniu tego rodzaju zależności. Sytuacja ulega zmianie wówczas, gdy zamiast bezpośrednich parametrów zagęszczenia wprowadzi się do analizowanego związku bezwymiarowe ilorazy, utworzone na bazie parametrów zagęszczenia, w postaci związków przedstawionych poniżej (4), (5):

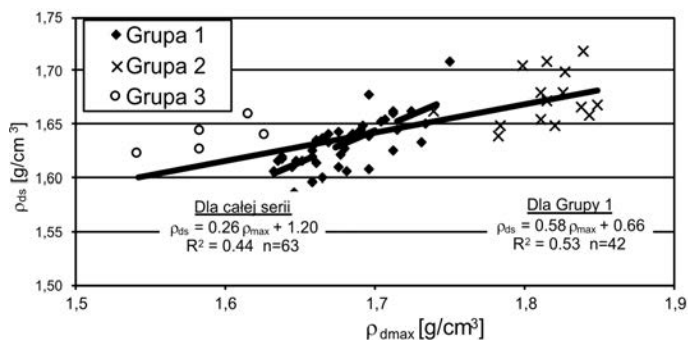
$$\alpha = \frac{\rho_{d \min}}{\rho_{d \max}} \quad (4)$$



Rys. 7. Zależność pomiędzy współczynnikiem α i wskaźnikiem uziarnienia SFR



Rys. 8. Zmienność współczynnika α w poszczególnych grupach odpadów poflotacyjnych



Rys. 9. Zmienność współczynnika β w poszczególnych grupach odpadów poflotacyjnych

$$\beta = \frac{\rho_{ds}}{\rho_{d \max}} \quad (5)$$

Związek korelacyjny pomiędzy współczynnikiem α a wskaźnikiem uziarnienia SFR przedstawiono na rys. 7.

Z analizy powyższego związku wynika, że istnieje wyraźny trend wzrostu wartości współczynnika α wraz z wzrostem w uziarnieniu odpadów frakcji grubszych. Wspomniany trend ma charakter nieliniowy. Zmienność wartości współczynnika α w obrębie wydzielonych grup odpadów, jak również całej próby statystycznej jest podobna, prowadząc do wyznaczenia uogólnionej wartości współczynnika α na poziomie wartości 0,77 (rys. 8).

Analiza zmienności drugiego współczynnika β prowadzi do odmiennych wniosków (rys. 9).

Dla całej próby statystycznej uzyskuje się słabo skorelowany związek empiryczny pomiędzy parametrami zagęszczenia ρ_{ds} i $\rho_{d \max}$ ($R^2 = 0,44$). Znacznie korzystniejsze oszacowanie analizowanego związku uzyskuje się w wyniku wprowadzenia podziału odpadów na grupy. Wyłączając z dalszej analizy grupę odpadów przejściowych (grupa 3.), dla której wartość współczynnika $\beta > 1$ ($\rho_{ds} > \rho_{d \max}$), uzyskano następujące charakterystyki statystyki współczynników α i β w pozostałych dwóch grupach odpadów:

- grupa 1.:
wartość średnia $\alpha_1 = 0,747$, przy odchyleniu standardowym $\sigma = 0,018$
wartość średnia $\beta_1 = 0,972$, przy odchyleniu standardowym $\sigma = 0,012$
- grupa 2.:
wartość średnia $\alpha_2 = 0,742$, przy odchyleniu standardowym $\sigma = 0,014$
wartość średnia $\beta_2 = 0,924$, przy odchyleniu standardowym $\sigma = 0,017$

Porównując stronami równania (2) i (3), uzyskuje się równanie (6) [4]:

$$\rho_{ds} = \left(\frac{\rho_{ds}}{\rho_{d \max}} \right) \left(\frac{I_D \cdot \rho_d \cdot \rho_{d \min}}{\rho_{d \min} \cdot \rho_d (1 - I_D)} \right) \quad (6)$$

Wprowadzając do równania (6) zapisy prezentowane przez równania (4) i (5) oraz zakładając, że $\rho_d = \rho_{d \max}$, uzyskuje się równanie (7).

$$I_s = \frac{\alpha}{\beta [1 - I_D (1 - \alpha)]} \quad (7)$$

Wprowadzając z kolei do równania (7) wcześniej oszacowane wartości średnie współczynników α i β , uzyskuje się poszukiwany związek pomiędzy miarami zagęszczenia odpadów.

Dla grupy 1.:

$$I_s = 0,769 + 0,231 I_D \quad (8)$$

Dla grupy 2.:

$$I_s = 0,803 + 0,197 I_D \quad (9)$$

Dla świeżo zdeponowanych odpadów piaszczystych, w celu wyrażenia jednej miary zagęszczenia za pomocą drugiej, można wykorzystać zależność empiryczną wyrażoną równaniem (8), natomiast dla starszych odpadów piaszczystych zalegających

w głębiej zdeponowanych warstwach masywu składowiska, bardziej odpowiednie wydaje się równanie (9).

WNIOSKI

Przeprowadzone badania laboratoryjne uziarnienia i właściwości fizycznych odpadów poflotacyjnych oraz zrealizowana na bazie wyników tych badań analiza statystyczna umożliwiły wyznaczenie kilku zależności empirycznych, które mogą być rekomendowane jako statystycznie istotne związki korelacyjne pomiędzy analizowanymi zmiennymi. Wykazano istnienie związku korelacyjnego pomiędzy parametrami zagęszczenia odpadów, które wyrażone w postaci bezwymiarowych ilorazów prowadzą do wyznaczenia zależności empirycznej pomiędzy powszechnie stosowanymi miarami zagęszczenia. Znajomość tego rodzaju zależności może być z powodzeniem wykorzystana do oceny jakości zagęszczenia formowanych obwałowań bądź stanu zagęszczenia odpadów zdeponowanych w miejscu składowania, niezależnie od zdefiniowanego kryterium oceny zagęszczenia i zastosowanej metodyki badania terenowego. W przypadku odpadów świeżo zdeponowanych rekomendowaną zależność przedstawia równanie (8), natomiast w przypadku odpadów starszych, budujących głębsze fragmenty masywu składowiska, w których zaznaczył się już efekt starzenia, bardziej adekwatne jest równanie (9).

LITERATURA

1. Eurokod 7 – część 1 (EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne – Zasady ogólne), część 2 (EN 1997-2 Projektowanie geotechniczne – rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego).
2. Gołębiewska A., Lipiński M. J.: Miary charakteryzujące rozkład uziarnienia osadów poflotacyjnych. XII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Problemy Geotechniczne Obszarów Przymorskich, część Ia, Szczecin-Międzyzdroje, 18-20.05.2000, 211-219.
3. Monografia KGHM Polska Miedź SA. Praca zbiorowa pod redakcją A. Piestrzyńskiego, wyd. CBPM „Cuprum” Sp. z o. o., Wrocław, na zlecenie KGHM Polska Miedź SA, Lubin, 1996.
4. Pisarczyk S.: Gruntoznawstwo inżynierskie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
5. Polska Norma PN-EN ISO 14688 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis. Część 2: Zasady klasyfikowania.
6. Szerakowska S.: Parametry kształtu ziaren oraz analityczne sposoby ich wyznaczania. Przegląd Geologiczny, vol. 62, nr 10/2, 2014.
7. Tschuschke W.: Ocena stopnia zagęszczenia gruntu niespoistego w doświadczeniu laboratoryjnym. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. CCLXXI, 1995.
8. Tschuschke W.: Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo, zeszyt 110, Gliwice 2006.