

Katarzyna ZABIELSKA-ADAMSKA
Politechnika Białostocka

Stanisław PISARCZYK
Politechnika Warszawska

BADANIA WSKAŹNIKA NOŚNOŚCI CBR ZAGĘSZCZANYCH ODPADÓW ENERGETYCZNYCH

Streszczenie. Badania kalifornijskiego wskaźnika nośności wykonano w celu ustalenia zależności CBR od zagęszczenia mieszaniny popiołowo-żuźlowej. Określono wpływ energii zagęszczenia, początkowej wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz nasączenia badanych próbek na wartości CBR. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników i porównano je z badaniami publikowanymi w literaturze.

CALIFORNIA BEARING RATIO TESTS OF COMPACTED POWER INDUSTRY WASTES

Summary. The laboratory CBR tests were carried out to establish relationship between CBR and compaction of fly ash/slag mixture. The influence of compaction effort, initial water content, dry unit weight and soaking of tested waste samples on obtained CBR values was determined. An analysis of the determined results was made and the results were compared with research, which were published in literature.

1. Wstęp

Nośnością podłoża gruntowego pod budowle drogowe nazywa się jego zdolność do przenoszenia obciążeń bez wywoływania nadmiernych odkształceń. Jest ona, między innymi, oznaczana za pomocą wskaźnika nośności CBR.

Kalifornijski wskaźnik nośności (CBR) jest to procentowy stosunek obciążenia jednostkowego p , które trzeba zastosować, aby tłok o średnicy 5,0 cm i powierzchni 20,0 cm² wcisnąć w próbkę gruntu do określonej głębokości 2,5 lub 5,0 mm, ze znormalizowaną

prędkością 1,25 mm/min, do obciążenia standardowego p_s , odpowiadającego obciążeniu jednostkowemu potrzebnemu do wciśnięcia tłoka z taką samą prędkością i na taką samą głębokość w próbkę tłucznia standardowo zagęszczonego. Wskaźnik nośności jest podstawą projektowania nawierzchni, a badanie CBR może służyć jako metoda kontroli jakości robót ziemnych. Wartość CBR jest określona wzorem:

$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gdzie: p - obciążenie jednostkowe potrzebne do znormalizowanego wciśnięcia tłoka w próbkę gruntu, p_s - obciążenie jednostkowe odpowiadające wciskaniu tłoka w tłuczeń.

2. Przegląd literatury

Obszerne badania wskaźników nośności CBR zagęszczanych gruntów mineralnych prowadzone były przez Turnbulla i Fostera [8], gdzie określono opór penetracji nienasączanych próbek chudego iltu zagęszczonych za pomocą różnych energii i przy różnych wilgotnościach. Stwierdzono, że wartość wskaźnika nośności CBR zależy nie tylko od wilgotności zagęszczanych próbek, ale i od osiągniętych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego. Próbki zagęszczone przy zastosowaniu wyższych energii osiągały wyższe wartości wskaźników CBR. Zwiększeniu wilgotności zagęszczanych próbek towarzyszyło zmniejszanie się wartości wskaźników CBR; dla próbek zagęszczanych przy wilgotnościach większych od wilgotności optymalnej opór penetracji zbliżył się prawie do zera. Rodriguez i współautorzy [6] stwierdzają zależność CBR od parametrów zagęszczenia, energii zagęszczenia, a nawet metody zagęszczenia - statycznej czy dynamicznej. Według [6] w przypadku nasączanych próbek gruntów spoistych, kształt krzywej obrazującej zależność wskaźnika CBR od wilgotności przy zagęszczaniu jest podobny do krzywej zagęszczalności danego gruntu - maksymalne wartości CBR osiągane są przy wilgotności bliskiej wilgotności optymalnej. Późniejsze badania prowadzone przez Faure'a i Viana Da Mata [1] potwierdzają zależność wskaźników nośności CBR głównie od wilgotności, pomijając wpływ gęstości objętościowej szkieletu na opór penetracji.

Analizując wartości CBR podłoża gruntowego podawane w literaturze, można stwierdzić, że wskaźniki nośności są tym większe, im grubsze jest uziarnienie gruntów mineralnych. Dla składowanych odpadów energetycznych z różnych źródeł spalania zaobserwowano zależność

odwrotną, mieszaniny popiołowo-żużlowe o większej zawartości frakcji $> 0,075\text{mm}$ charakteryzują się niższymi wartościami wskaźników CBR [2].

Ciekawe badania dotyczące oporu penetracji zostały przeprowadzone przez Wileńskiego [9], który określił wskaźniki nośności CBR popiołu lotnego zagęszczonego metodą standardową (przy wilgotności zbliżonej do optymalnej) bezpośrednio po zagęszczeniu, po nasączeniu oraz przechowywanego przez 42 doby z zachowaniem różnych warunków pielęgnacji (w tym 14 dni nasączenia). Najwyższą wartość CBR uzyskano dla popiołu lotnego badanego bezpośrednio po zagęszczeniu; wskaźnik CBR zmniejszył się około 50% po 6-dobowym nasączeniu popiołu. Wileński sugeruje, że w miarę wydłużania czasu twardnienia następuje ponowny wzrost wskaźnika nośności. Na wartość CBR przechowywanych próbek wpływa głównie temperatura i długość okresu twardnienia. Według [5] zjawisko wzrostu wartości wskaźnika nośności CBR wraz z upływem czasu ma miejsce przy wszystkich wilgotnościach początkowych zagęszczanych odpadów. Zależność wskaźnika nośności CBR od wilgotności zaobserwował także Słupski [7]. Najwyższe wartości CBR próbek mieszaniny popiołowo-żużlowej zagęszczonej metodą standardową Słupski uzyskał przy wilgotności nieco niższej od wilgotności optymalnej, zarówno dla próbek nasączanych, jak i bez nasączenia. Grabowski i Obrycki [3] uzależniają wskaźnik CBR od wartości wskaźnika zagęszczenia; im wyższy jest wskaźnik zagęszczenia badanych odpadów określony dla metody standardowej - tym wyższa jest wartość wskaźnika CBR.

3. Badania własne i analiza wyników

Badania nośności CBR odpadów energetycznych wykonano na przykładzie mieszaniny popiołowo-żużlowej powstałej ze spalania węgla kamiennego w Elektrociepłowni Białystok, składowanej na suchym wysypisku. Mieszanina granulometrycznie odpowiada pyłowi piaszczystemu (Πp) o wskaźnikach uziarnienia $U = 6,0$ i $C = 0,8$, ustalonych dla próby uśrednionej.

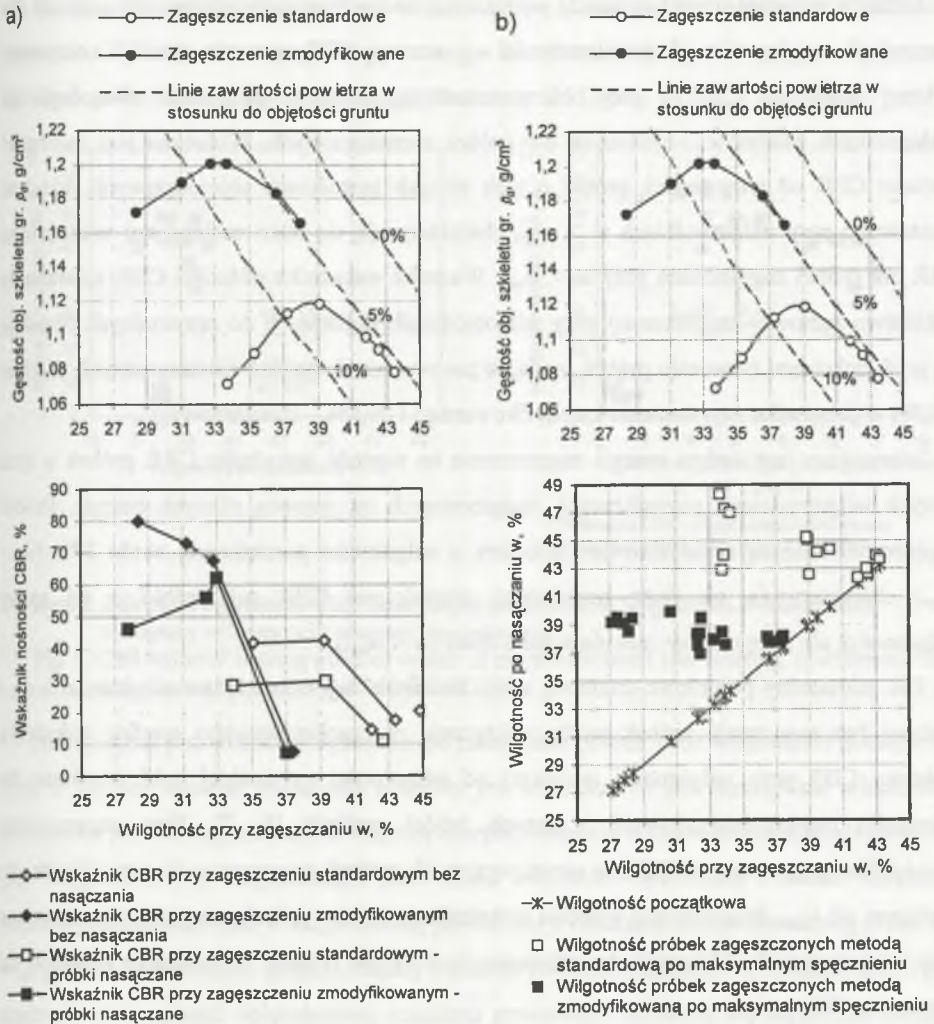
Oznaczenia przeprowadzono na próbkach bez nasączenia oraz nasączanych w wodzie przez 4 doby. Badane próbki zagęszczano dwiema metodami: metodą standardową i zmodyfikowaną Proctora (odpowiadającymi metodom I i III według PN-88/B-04481), przy wilgotnościach zawierających się w zakresach $w_{opt} \pm 5\%$ dla każdej energii zagęszczenia. Wilgotność optymalną określono dopuszczając tylko jednokrotne ucięcie tej samej próbki,

ponieważ wielokrotne zagęszczanie odpadów energetycznych, stosowane w badaniach gruntów mineralnych, prowadzi do błędnej oceny efektów zagęszczania [10]. Wszystkie próbki poddane penetracji obciążone zostały obciążeniem równym 2,44 kPa (obciążniki pierścieniowe 2x2,27 kg), zalecanym przez ASTM 1883-73 jako obciążenie minimalne i jednocześnie wystarczające.

Analiza statystyczna wyników badań nienasączanych próbek mieszaniny popiołowo-żużlowej, zagęszczanych w zakresie wilgotności $w_{opt} \pm 5\%$, wskazuje, że wartość wskaźnika nośności CBR zależy zarówno od wilgotności, jak i gęstości objętościowej szkieletu przy zagęszczaniu standardowym, natomiast przy zmodyfikowanym - głównie od wilgotności. Różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami wskaźnika CBR uzyskanymi w obu metodach zagęszczenia są bardzo duże. Wskaźnik CBR przy zagęszczeniu zmodyfikowanym jest prawie dwukrotnie większy niż przy standardowym, co świadczy o znacznym wpływie energii zagęszczenia i uzyskanej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Wartości wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żużlowej, badane po jej 4-dobowym nasączeniu w wodzie, w przypadku zagęszczenia standardowego zależą od wilgotności początkowej próbek (wilgotności przy zagęszczaniu), nie zależą natomiast od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego zagęszczonych próbek, ani od wilgotności próbek po ich nasączeniu. Dla próbek zagęszczonych metodą zmodyfikowaną Proctora i nasączanych wartość wskaźnika nośności CBR jest uzależniona zarówno od wilgotności, jak i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego próbek przed zalaniem ich wodą; podobnie jak przy metodzie standardowej nie zależy od wilgotności próbek nasączanych. Energia zagęszczenia oraz otrzymane wartości ρ_d mają duży wpływ na wartości wskaźnika CBR również i dla próbek nasączanych. Wartości maksymalne wskaźników CBR uzyskane dla próbek zagęszczonych metodą zmodyfikowaną są prawie o 50% wyższe niż maksymalne wartości wskaźnika CBR próbek zagęszczonych metodą standardową podobnie jak dla próbek nienasączanych.

Zestawienie średnich wartości wyników badań wskaźnika nośności CBR próbek mieszaniny popiołowo-żużlowej, w zależności od ich zagęszczenia, przedstawiono na rys. 1 a. Na rys. 1 b pokazano wyniki badań wilgotności mieszaniny popiołowo-żużlowej po jej maksymalnym spęcznieniu, w zależności od wilgotności przy zagęszczaniu i energii zagęszczenia.



Rys. 1. Zestawienie wyników badań w zależności od wilgotności przy zagęszczaniu: a) średnie wartości wskaźnika CBR, b) wilgotności mieszaniny popiołowo-żuźlowej po nasączeniu
 Fig. 1. Test results depending on moisture contents at compaction: a) average CBR values, b) fly ash/slag mix moisture contents after soaking

Z rys. 1a wynika, że najwyższe wartości wskaźnika CBR nienasączanych próbek mieszaniny popiołowo-żuźlowej (w badanych przedziałach wilgotności) otrzymywane są przy zagęszczeniu zmodyfikowanym dla wilgotności mniejszych niż wilgotność optymalna, a dla zagęszczenia standardowego dla wilgotności równej wilgotności optymalnej lub też nieco mniejszej. Przy przekroczeniu wilgotności optymalnej wartość CBR gwałtownie spada, niezależnie od energii zagęszczenia. W przypadku próbek nasączanych najwyższe wartości

wskaźników nośności uzyskuje się dla wilgotności równych wilgotnościom optymalnym dla obu energii zagęszczenia. Po przekroczeniu w_{opt} wartość CBR znacznie spada, a otrzymane wykresy zależności $CBR(w)$ przy obu metodach zagęszczenia są prawie równoległe do analogicznych zależności uzyskanych dla próbek nienasączonych. Widoczna jest zależność wartości CBR od wilgotności; próbki o tych samych gęstościach objętościowych szkieletu gruntowego przy wilgotnościach $w > w_{opt}$ charakteryzują się dużo mniejszymi wartościami CBR niż próbki zagęszczone przy $w < w_{opt}$. Wartości wskaźnika nośności CBR mieszaniny popiołowo-żużlowej zagęszczanej przy wilgotnościach zbliżonych do optymalnych obniżają się po 4-dobowym nasycaniu próbek wodą, w porównaniu do próbek nienasączonych, średnio o 7,9% w przypadku zagęszczenia zmodyfikowanego i 29,8% – standardowego.

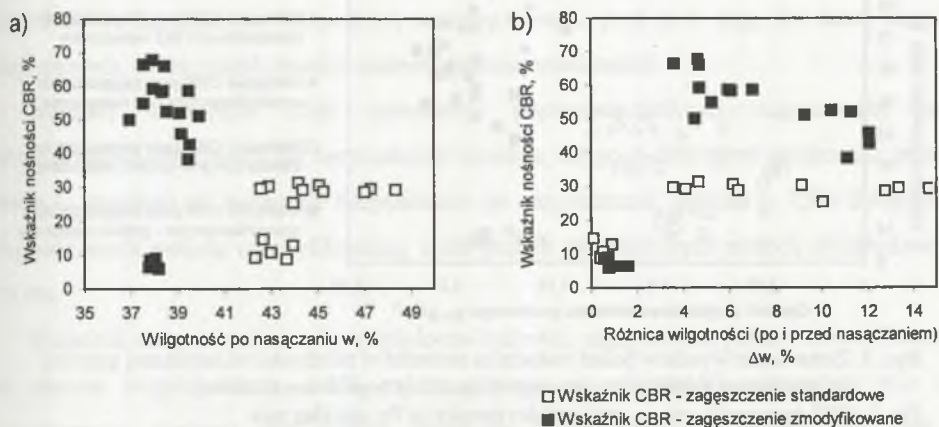
Interesujący jest wpływ energii zagęszczenia na wartość wskaźnika CBR próbek o tych samych wilgotnościach początkowych zagęszczonych za pomocą różnych energii. Próbki zagęszczone metodą zmodyfikowaną Proctora o wilgotności początkowej około 37% ($w > w_{opt}$) charakteryzują się dużo mniejszymi wartościami CBR niż próbki o tej samej wilgotności, ale zagęszczone metodą standardową ($w < w_{opt}$).

Dla mieszaniny popiołowo-żużlowej z EC Białostok zagęszczonej metodą standardową i badanej bez nasączania próbek wodą praktycznie nie zaobserwowano spadku wskaźnika nośności CBR przy wilgotności mniejszej od wilgotności optymalnej, jaki uzyskano dla mieszanin popiołowo-żużlowych z innych źródeł spalania [5, 7]. Przy zagęszczeniu zmodyfikowanym wartości CBR są nawet wyższe dla próbek zagęszczanych przy wilgotności mniejszej od w_{opt} . Maksymalne wartości wskaźnika nośności próbek nasączanych otrzymano przy wilgotnościach zbliżonych do optymalnych, a nie jak podano w literaturze niższych niż optymalne [7].

Kształt krzywych obrazujących zależności $CBR(w)$ badanych odpadów, w zależności od energii zagęszczenia, jest generalnie podobny do podawanych w literaturze krzywych uzyskanych dla spoiстых gruntów mineralnych [6, 8].

Mieszanina popiołowo-żużłowa zagęszczana w zakresie wilgotności $w_{opt} \pm 5\%$, dla obu energii zagęszczenia nie wykazuje tendencji do pęcznienia pod obciążeniem minimalnym. Wilgotność badanych próbek mieszaniny (rys. 1b) określana po ich maksymalnym spęcznieniu praktycznie nie zależy od ich wilgotności początkowej (przed zalaniem wodą), co tłumaczy uzyskanie niskich wartości wskaźników pęcznienia [6].

Na rys. 2 przedstawiono wpływ wilgotności po maksymalnym spęcznieniu próbek na wartości CBR dla obu energii zagęszczenia. Rezultaty badań wskazują, że wilgotność końcowa próbek nasączanych nie ma wpływu na wyniki CBR.



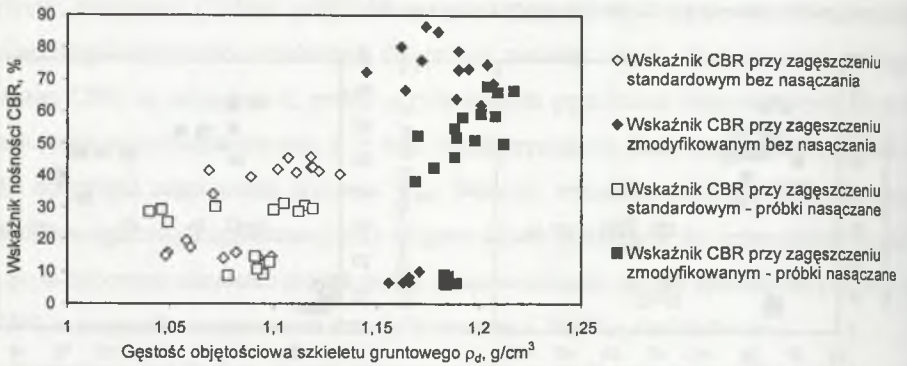
Rys. 2. Zależność wskaźnika CBR nasączanych próbek od: a) wilgotności po nasączeniu, b) różnicy wilgotności końcowej i początkowej

Fig. 2. CBR value of soaking samples versus: a) moisture content after soaking, b) difference of moisture contents after and before soaking

Im mniejsza jest różnica wilgotności po nasączeniu próbek i ich wilgotności początkowej (rys. 2 b), tym wartość wskaźnika nośności jest mniejsza, co jest szczególnie widoczne w przypadku próbek zagęszczonych większą energią. Mniejsze różnice wilgotności stwierdzono, gdy wilgotność przy zagęszczaniu przewyższa wilgotność optymalną. Podczas nasączenia woda wypełnia istniejące w zagęszczonej próbce pory, otaczając ziarna mieszaniny. Przy $w = w_{opt}$ pory są najmniejsze, kontakt między ziarnami jest więc najlepszy, w związku z tym przy maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego uzyskuje się najwyższe wartości CBR. Zagęszczając próbki przy $w > w_{opt}$, otrzymuje się niższe wartości ρ_d , a więc i wskaźniki nośności są niższe. Krzywe $CBR(w)$ nasączanych próbek w przybliżeniu odwziewiedlają krzywe zagęszczalności (rys. 1 a).

Podwyższenie energii zagęszczenia, gdy $w > w_{opt}$, nie powoduje wzrostu nośności mieszaniny popiołowo-zużlowej. Poszczególne ziarna są otoczone wodą, co niweluje wzajemny kontakt pomiędzy nimi. Wpływ struktury poszczególnych ziaren widoczny w uzyskiwanych wysokich wartościach CBR zanika, gdy zagęszczamy mieszaninę przy wilgotnościach większych niż optymalne. Widoczne jest to w przypadku próbek badanych bezpośrednio po zagęszczeniu, jak i nasączanych.

Na rys. 3 pokazano zależność wskaźnika CBR od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego mieszaniny popiołowo-żuźłowej.



Rys. 3. Zestawienie wyników badań wskaźnika nośności w zależności od uzyskanej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego mieszaniny popiołowo-żuźłowej

Fig. 3. CBR test results versus obtained dry density of fly ash/slag mix

Na podstawie rys. 3 można stwierdzić, że generalnie ze wzrostem ρ_d wzrasta wartość CBR. Niskie wartości CBR, otrzymane w przypadku próbek zagęszczonych metodą zmodyfikowaną przy wilgotności wyższej niż optymalna, należy tłumaczyć utratą kontaktu pomiędzy zagęszczanymi ziarnami.

4. Wnioski

Uzyskane wartości wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żuźłowej z EC Białostok są dużo wyższe niż otrzymywane dla gruntów mineralnych odpowiadających im składem granulometrycznym, niezależnie od energii zagęszczenia odpadów. Wartości te spełniają wymagania PN-S-02205:1998 w całym zakresie wilgotności zalecanym dla odpadów energetycznych wbudowywanych w nasypy komunikacyjne. Powyższego faktu nie należy uogólniać na możliwość wbudowywania w budowlę ziemne wszystkich odpadów energetycznych bez ich „uszlachetnienia”. Należy tu przytoczyć wyniki badań próbek popiołu lotnego z EC Siekierki [4], zagęszczonych przy wilgotności zbliżonej do optymalnej, które po nasączeniu wodą całkowicie tracą nośność (CBR=1,0%).

Zagęszczenie odpadów energetycznych ma znaczący wpływ na ich nośność. Próbkę mieszaniny popiołowo-żuźłowej zagęszczone metodą zmodyfikowaną przy wilgotności zbliżonej do optymalnej i nasączone przez 4 doby charakteryzują się dwukrotnie większymi

wartościami wskaźników nośności CBR (przy ośmioprocentowym wzroście gęstości objętościowej szkieletu gruntowego), w porównaniu do maksymalnego zagęszczenia metodą standardową; w przypadku próbek badanych bez nasączenia następuje wzrost nośności o ponad 30%. Zagęszczanie za pomocą wyższej energii, przy $w > w_{opt}$ dla danej metody zagęszczenia, może jednak obniżyć nośność badanej mieszanki.

Wartości wskaźnika CBR mieszanki popiołowo-żużlowej zagęszczanej przy wilgotnościach zbliżonych do optymalnych obniżają się po 4-dobowym nasączeniu próbek wodą w stosunku do badanych bezpośrednio po zagęszczeniu, średnio o 7,9% dla próbek zagęszczonych metodą zmodyfikowaną, a dla próbek zagęszczonych metodą standardową o 29,8%.

Wskaźnik nośności mieszanki popiołowo-żużlowej, zagęszczanej jedną z metod Proctora w zakresie wilgotności $w_{opt} \pm 5\%$, zależy głównie od wilgotności mieszanki przy jej zagęszczaniu, zarówno dla próbek badanych bezpośrednio po zagęszczeniu, jak i nasączonych. Należy podkreślić, że wskaźnik nośności CBR oznaczany dla próbek nasączonych nie zależy od wilgotności mieszanki po jej nasączeniu. Najwyższe wartości CBR próbek nienasączonych uzyskuje się zagęszczając je przy $w \leq w_{opt}$, natomiast próbek nasączonych, gdy $w = w_{opt}$.

LITERATURA

1. Day R.: Penetration Resistance Value along Compaction Curves (Discussion). *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, nr 4, p. 387 - 388.
2. Grabowski Z., Obrycki M.: Popioły energetyczne jako podłoże budowlane. *Materiały V Krajowej Konferencji Geotechniki*, Katowice 1978, s. 216 - 220.
3. Grabowski Z., Obrycki M.: Popioły energetyczne jako materiał do budowy nasypów. *Materiały VI Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania*, Warszawa 1981, s. 464 - 468.
4. Pachowski J.: Badania popiołów lotnych zdeponowanych przez EC Siekierki na składowisku „Zawady” w aspekcie ich wykorzystania do budowy nasypów drogowych tras komunikacyjnych w Warszawie. *Materiały Sesji Naukowej z okazji Jubileuszu 70-lecia Prof. Z. Grabowskiego*, Warszawa 2000, s. 189 - 194.
5. Raymond S.: Pulverized Fuel Ash as Embankment Material. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London 1961, nr 2, p. 515 - 536.

6. Rodriguez A. R., Castillo H., Sowers G. F.: Soil Mechanics in Highway Engineering. Trans Tech Publication, Clausthal-Zellerfeld, 1988.
7. Słupski W.: Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żużlowych z Elektrociepłowni Żerań. Drogownictwo, 1976, nr 7-8, s. 220 – 223.
8. Turnbull W. J., Foster Ch. R.: Stabilization of Materials by Compaction. Journal Soil Mechanics and Foundations Division, 1956, nr 4, p. 1 – 23.
9. Wileński P.: Przydatność odpadów z Elektrociepłowni Gliwice do robót ziemnych w budowie dróg. Prace IBDiM, 1984, nr 3, s. 53 – 66.
10. Zabielska-Adamska K.: Zagęszczalność odpadów energetycznych z węgla kamiennego. Inżynieria Morska i Geotechnika, 2002, nr 1 s. 26 – 31.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Maciej GRYZMAŃSKI

Abstract

A short literature review about California Bearing Ratio test of the power industry waste and laboratory research results are presented in the paper. The applied method of laboratory test was discussed and its choice was explained. An analysis of the determined results was made and the results were compared with research, which were published in literature.

The laboratory CBR tests were carried out to establish relationship between CBR and compaction of fly ash/slag mixture. An attempt was made to determine the influence of compaction effort, initial water content and dry unit weight of fly ash/slag mixture, and soaking of tested waste samples on obtained CBR values. The compaction has considerable effect on CBR values. Samples compacted with modified effort are characterized by doubled CBR values in comparison to those compacted with standard effort. CBR values, obtained for samples compacted at optimum moisture contents, decrease after soaking in water by about 8 and 30% for samples compacted with modified and standard energies, respectively. The greatest CBR values of unsoaked samples are obtained when the mixture is compacted dry of optimum or at optimum water content, the greatest result for soaked samples is determined for compaction at optimum moisture content.