

WPLYW CIĘŻARU WARSTW KONSTRUKCYJNYCH NAWIERZCHNI NA WARTOŚĆ WSKAŹNIKA NOŚNOŚCI CBR

Ryszard Chmielewski, Damian Waliszewski

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie dotyczące badania wskaźnika nośności podłoża (CBR) dla gruntów wątpliwych. W obecnej praktyce inżynierskiej, pomimo zapisów rozporządzenia dotyczącego warunków technicznych dla dróg samochodowych, laboratoryjne badania CBR gruntów rodzimych są rzadko wykonywane. Oznaczenia wskaźnika CBR wykonano dla różnych poziomów naprężeń od warstw konstrukcyjnych oraz gruntów z różną zawartością frakcji pylastych. Uzyskane wyniki badań skorelowano z obciążeniami warstw konstrukcyjnych nawierzchni zgodnie z nowym katalogiem nawierzchni podatnych i półsztywnych. Ponadto przedstawiono zależności między wskaźnikiem CBR a zawartością frakcji pylastych.

Słowa kluczowe: kalifornijski wskaźnik nośności, CBR, ciśnienie wody w porach, nawierzchnie drogowe, nośność podłoża gruntowego

WSTĘP

Rozwój infrastruktury drogowej w Polsce powoduje, że planowane trasy ciągów komunikacyjnych przechodzą przez tereny wcześniej uznane za nieprzydatne lub o ograniczonym potencjale do wykorzystania w budownictwie komunikacyjnym. Na etapie projektowania obiektów liniowych pojawia się problem konieczności precyzyjnego określenia parametrów nośności podłoża gruntowego. W tym miejscu pojawia się problem wyboru sprawdzonej oraz wiarygodnej metody oznaczenia wymaganych cech.

Jednym z powszechnie przyjętych badań do określania nośności podłoża gruntowego w drogownictwie jest kalifornijski wskaźnik nośności (California Bearing Ratio – CBR), przyjęty z pewnymi zmianami do kanonu badań stosowanych na terenie Polski. W związku z przystosowaniem metody CBR do polskich warunków wprowadzono do metodyki pewne zmiany określone w normie PN-S-02205:1998.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Ryszard Chmielewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: ryszard.chmielewski@wat.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

BADANIE CBR

Kalifornijski wskaźnik nośności (CBR) jest jedną z metod określania nośności podłoża gruntowego pod nawierzchnie drogowe oraz lotniskowe w USA [Wiłun 2007]. Metoda ta została opracowana w Korpusie Inżynierów Armii Stanów Zjednoczonych i jej rozwój trwa do dziś, o czym świadczą nowe programy badawcze dotyczące CBR [Gonzales i in. 2012].

W 1967 roku w Centralnym Ośrodku Badań i Rozwoju Techniki Drogowej zakończono prace nad adaptacją metody amerykańskiej CBR do zastosowania w warunkach polskich [Wiłun 2007]. Prace te zaowocowały powstaniem metody określania wskaźnika nośności gruntu (w_{nos}), który jest tożsamy z metodą CBR, opiera się na tym samych założeniach, a wyniki uzyskiwane dla „polskich” gruntów są kompatybilne z wynikami badań otrzymanych metodą bazową [Sas i Głuchowski 2012]. Określenie wskaźnika nośności gruntu (w_{nos}) zostało przyjęte jako jedna z metod określania parametrów nośności gruntu według normy PN-S-02205:1998.

Na potrzeby artykułu przyjęto oznaczenie CBR tożsamy z w_{nos} .

OKREŚLANIE NOŚNOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Przedstawienie problemu

Jednym z podstawowych dokumentów wykorzystywanych przy wymiarowaniu nawierzchni drogowych w Polsce jest „Katalog typowych nawierzchni podatnych oraz półsztywnych” [2013]. Wymiarowanie nawierzchni podatnych oraz półsztywnych na podstawie tego dokumentu opiera się na algorytmie obliczeniowym uwzględniającym warunki gruntowo-wodne, klasyfikację ruchu kołowego oraz wybór odpowiadającej im konstrukcji nawierzchni.

W artykule skupiono się na kryterium określania kategorii nośności podłoża gruntowego, od którego jest zależny rodzaj konstrukcji nawierzchni drogowej.

Katalog określa cztery grupy nośności podłoża gruntowego: od G1 (nośny) do G4 (nienośny), w zależności od warunków wodnych, rodzaju gruntu zalegającego pod warstwami konstrukcyjnymi oraz parametrów nośności na podstawie wskaźnika nośności CBR. Klasyfikacja warunków wodnych podłoża konstrukcji nawierzchni opiera się na określeniu charakterystyki korpusu drogowego (wykop/nasyp), rodzaju poboczy (utwardzone/nieutwardzone) oraz poziom zwierciadła wody gruntowej. Grunt stanowiący podłoże gruntowe jest klasyfikowany pod względem wysadzinowości (niewysadzinowy, wątpliwy, wysadzinowy). W przypadku występowania w podłożu gruntów wątpliwych, a więc takich, które mogą być potencjalnie nienośne w pewnych niesprzyjających warunkach (nawodnienie, roztopy itp.), należy zawsze przeprowadzić badania CBR.

Końcową grupę nośności podłoża powinno przyjmować się, porównując grupę zgodnie z oceną wysadzinowości gruntu i warunków wodnych z grupą wynikającą bezpośrednio z badania wskaźnika nośności CBR, niższa z tych grup jest miarodajna.

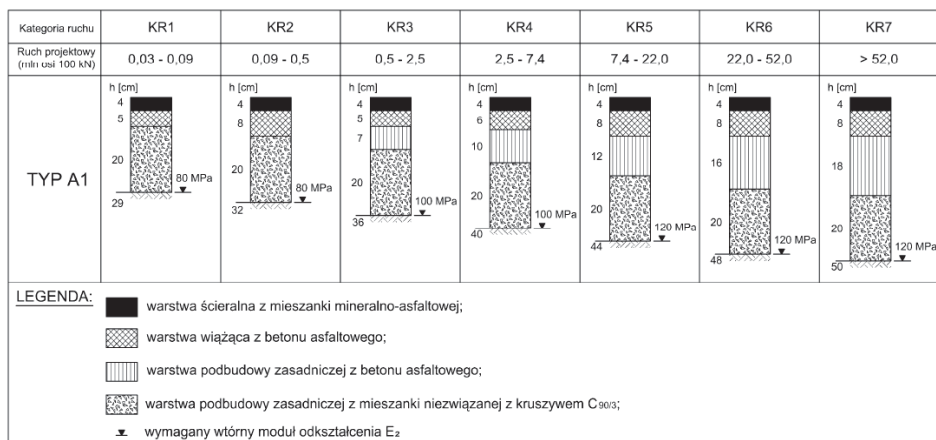
Z jednej strony zatem możliwe jest zakwalifikowanie gruntu wątpliwego (np. piasku pylastego) do kategorii G1, jeśli warunki wodne są dobre i przy CBR przekraczającym 10%. Z drugiej jednak strony, jeśli parametr CBR jest mniejszy niż 10%, to grunt należy

sklasyfikować do grupy G2 lub gorszej, co powoduje konieczność wzmocnienia „słabego podłoża”. Nie zawsze jest to poprawne rozumowanie, ponieważ parametry nośności CBR mogą się zmienić pod wpływem obciążeń zewnętrznych.

W artykule skupiono się na badaniu zmienności parametru CBR dla piasku pylastego ($P\pi$), który w myśl Katalogu... [2013] jest gruntem wątpliwym. Analizując stosowane w Polsce układy typowych konstrukcji nawierzchni drogowych, zestawiono obciążenia stałe, jakie wywiera konstrukcja nawierzchni na podłoże gruntowe. Jest to ważne, ponieważ metoda wyznaczania CBR określa, że w czasie badania należy stosować obciążenie takie, jakie generują warstwy nawierzchniowe.

Określenie naprężeń od ciężaru warstw nawierzchni na poziomie podłoża

Aby móc określić wpływ obciążeń stałych pochodzących od ciężaru warstw konstrukcyjnych nawierzchni, obliczono naciski na podłoże gruntowe, jakie wywierają wspomniane warstwy konstrukcyjne. Do analizy przyjęto typ A1 typowych konstrukcji nawierzchni drogowych [Katalog... 2013] (rys. 1).



Rys. 1. Typowe konstrukcje nawierzchni drogowych

Fig. 1. Typical construction of road surfaces

Na potrzeby badań przeliczono, jakie naciski są generowane przez poszczególne układy konstrukcyjne na podłoże gruntowe, co uzyskano, uwzględniając grubości poszczególnych warstw i ich ciężary objętościowe. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Przyjęta metoda określania CBR nie zawiera podanej wartości obciążeń, przy jakich należy wykonywać badania, jedynie zapis, że wartość obciążeń musi odpowiadać naciskom, jakie generują warstwy konstrukcyjne. W celu określenia wpływu nacisku warstw konstrukcyjnych zaproponowano modyfikację metodyki badania CBR, określając poziom naprężeń od projektowanej kategorii ruchu (KR1–KR7), ponieważ kategoria ruchu bezpośrednio wpływa na wybór układu konstrukcyjnego warstw. W tabeli 2 przedstawiono masę obciążników, jakie należy zastosować w czasie badania, aby zasymulować wpływ ciężaru danego układu konstrukcyjnego, zależnego od kategorii ruchu.

Tabela 1. Naciski od ciężaru warstw konstrukcyjnych

Table 1. The pressure from the weight of structural layers

Kategoria ruchu Traffic category	Obciążenie [kPa] Load
KR1	5,67
KR2	6,36
KR3	7,28
KR4	8,20
KR5	9,12
KR6	10,04
KR7	10,50

Tabela 2. Obciążenie zastępcze od ciężaru warstw konstrukcyjnych

Table 2. Equivalent load of the weight of structural layers

Kategoria ruchu Traffic category	Masa [kg] Weight load
Minimalne obciążenie normowe	4,5
KR1	8,9
KR2	10,0
KR3	11,4
KR4	12,9
KR5	14,3
KR6	15,8
KR7	16,5

OZNACZENIE WSKAŹNIKA NOŚNOŚCI CBR

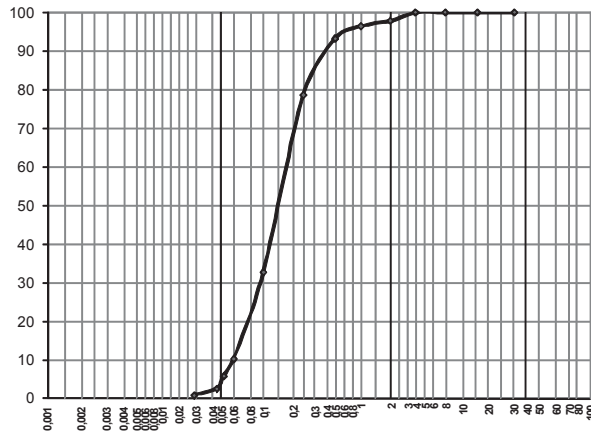
Przyjęcie próbek do badań

Do oznaczenia wartości wskaźnika nośności CBR przyjęto cztery grunty o różnej zawartości frakcji pylastych – od około 10 do 40%, zgodnie z normą PN. Na rysunku 2 przedstawiono krzywą uziarnienia dla gruntu nr 1.

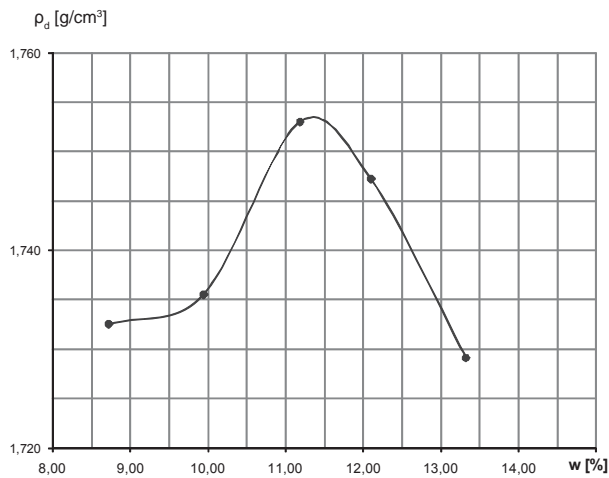
Dla wszystkich badanych gruntów określone zostały następujące cechy fizyczne:

- wilgotność optymalna (na rys. 3 przedstawiono wykres dla gruntu nr 1),
- maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego,
- wskaźnik porowatości,
- porowatość,
- stopień wilgotności przy wilgotności optymalnej.

Wyniki badań cech fizycznych zestawiono w tabeli 3.



Rys. 2. Przykładowa krzywa uziarnienia dla piasku drobnego
 Fig. 2. Example curve particle size for fine sand



Rys. 3. Wykres próby Proctora dla gruntu nr 1
 Fig. 3. Chart Proctor test for soil No. 1

Tabela 3. Wyniki badań cech fizycznych
 Table 3. The results of the research of the physical characteristics

Grunt – Soil	w_{opt} [%]	ρ_{ds} [g·cm ⁻³]	e	n	Sr	w[%]
Grunt nr 1 Soil No. 1	11,3	1,75	0,51	0,34	0,58	19,5
Grunt nr 2 Soil No. 2	10,5	1,83	0,45	0,31	0,65	16,2
Grunt nr 3 Soil No. 3	10,9	1,85	0,43	0,30	0,67	16,3
Grunt nr 4 Soil No. 4	11,0	1,86	0,42	0,30	0,69	15,9

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

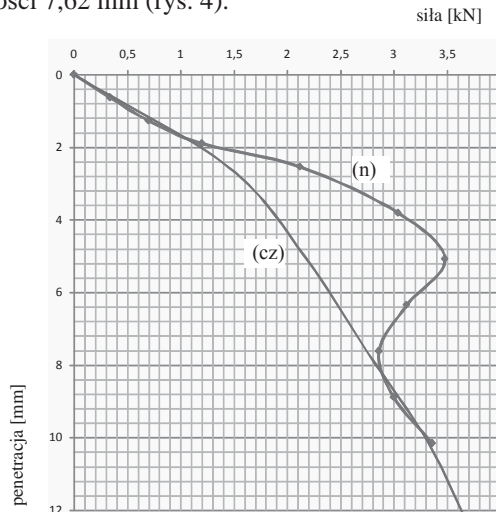
W ramach badań porównawczych wykonano laboratoryjne oznaczenie CBR ze zmiennym poziomem obciążenia próbki. Zmiana obciążeń była realizowana za pomocą obciążników o różnych masach, które symulują obciążenie zewnętrzne od warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Badania przeprowadzono dla trzech wartości mas obciążników, tj. 4,5 kg, 8,9 kg oraz 16,5 kg, stanowiących odpowiednio: minimalny nacisk normowy, nacisk od ciężaru układu konstrukcyjnego nawierzchni pod obciążenie KR1 oraz KR7.

W wynikach dla wszystkich badanych gruntów należy zwrócić uwagę na pojawianie się „wybrzuszenia” wykresu podczas próby penetracji CBR, co powoduje przyrost wartości nawet o kilka procent. Zjawisko przyrostu wartości CBR występuje przy różnych zagłębieniach trzpienia i jest zależne zarówno od zawartości frakcji pylastych, jak i przyłożonego nacisku na próbkę. Przy określaniu przebiegu wykresu z uwzględnieniem usunięcia zjawiska „wybrzuszenia” posłużono się aproksymacją przebiegu krzywej standardowej, którą przybliżono wielomianem czwartego stopnia w postaci:

$$y = -0,0034x^4 + 0,1038x^3 - 1,1561x^2 + 7,6661x \quad (1)$$

Współczynnik determinacji powyższego równania dla krzywej standardowej wynosi $R^2 = 1$. Na wykresach na osi pionowej występuje penetracja (w mm), na osi poziomej siła (w kN). Linia koloru niebieskiego (n) to wykres pomiaru, a linia koloru czerwonego (cz) to wykres skorygowany przedstawionym wyżej wielomianem.

W przypadku gruntu nr 1 (piasek drobny) nie stwierdzono wpływu zmiany nacisku na uzyskiwane wartości CBR, dla wszystkich oznaczeń wynosił on około 10,7%. Natomiast zauważono wyraźne zniekształcenie wykresu, które szczególnie przy nacisku odpowiadającym KR7 wyraźnie zwiększa opór wciskania trzpienia od głębokości 1,905 mm i działa do głębokości 7,62 mm (rys. 4).



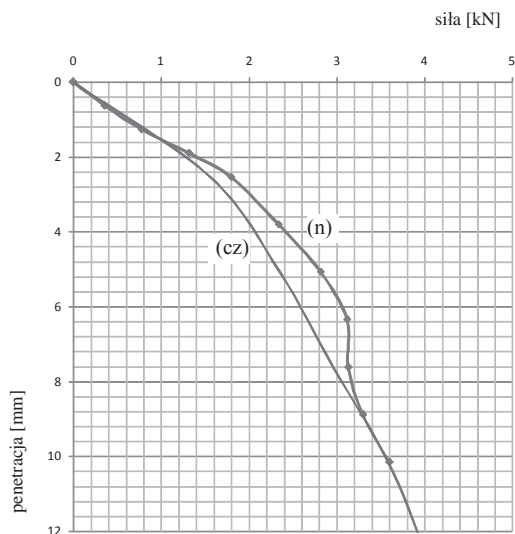
Rys. 4. Wykres CBR dla gruntu nr 1 przy nacisku odpowiadającym ciężarowi warstw nawierzchni dla KR7

Fig. 4. Chart CBR for land No. 1 at a pressure corresponding to the weight of the pavement layers for KR7

W przypadku mniejszych nacisków wpływ ciśnienia porowego rozpoczyna się na większej głębokości penetracji i trwa dłużej. Na przedstawionym wykresie przyrost CBR od zjawiska „wybrzuszenia” wynosi 6,4 % dla głębokości penetracji 5,08 mm.

Dla gruntu nr 2 (piasek pylasty) przy masie obciążników 4,5 kg „wybrzuszenie” minimalnie wpływa na wartość CBR (0,3%), natomiast wpływ ten zwiększa się wraz ze wzrostem obciążenia do wartości 2,3% przy masie obciążników odpowiadającej KR7 (rys. 5). Dodatkowo zauważono wyraźny wpływ zwiększonego nacisku na wartość CBR:

- masa obciążników 4,5 kg: CBR = 9,9%,
- masa obciążników 8,9 kg: (KR1) CBR = 11,4%,
- masa obciążników 16,5 kg: (KR7) CBR = 11,5%.



Rys. 5. Wykres CBR dla gruntu nr 2 przy nacisku odpowiadającym ciężarowi warstw nawierzchni dla KR7

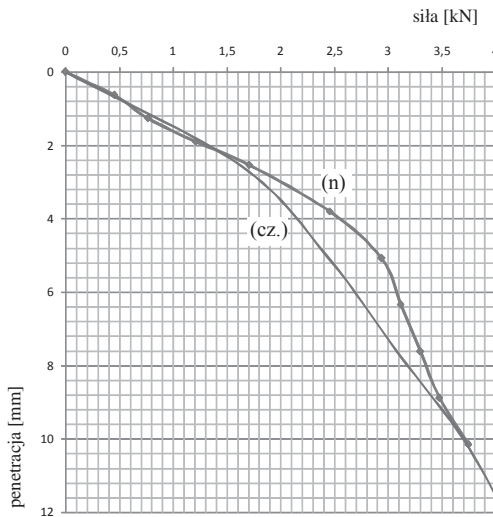
Fig. 5. Chart CBR for land No. 2 at a pressure corresponding to the weight of the pavement layers for KR7

Rozkład wyników dla gruntu nr 3 kształtuje się następująco (rys. 6):

- masa obciążników 4,5 kg, CBR = 1,1%,
- masa obciążników 8,9 kg, CBR = 1,4%,
- masa obciążników 16,5 kg, CBR = 1,6%.

Podobnie jak przy gruncie nr 2 zauważono wpływ zwiększonego nacisku na wartość CBR:

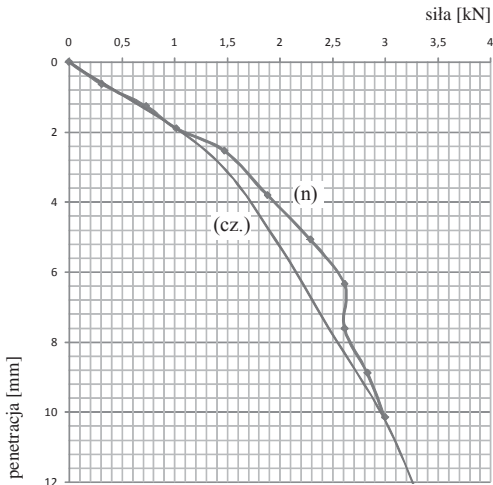
- masa obciążników 4,5 kg CBR = 10,1%,
- masa obciążników 8,9 kg (KR1) CBR = 11,5%,
- masa obciążników 16,5 kg (KR7) CBR = 12,0%.



Rys. 6. Wykres CBR dla gruntu nr 3 przy nacisku odpowiadającym ciężarowi warstw nawierzchni dla KR7

Fig. 6. Chart CBR for land No. 3 at a pressure corresponding to the weight of the pavement layers for KR7

W przypadku gruntu nr 4 (piasek pylasty na granicy pyłu piaszczystego) wpływ zmiany nacisku na uzyskiwane wartości CBR był widoczny: dla obciążników o masie 4,5 kg wartość CBR wynosiła 8,3%, dla obciążników o masie 16,5 kg wartość CBR wynosiła 9,6%. Ciśnienie porowe zmieniło wartość współczynnika nośności od 1,6 do 2,3%. Na rysunku 7 przedstawiono wykres CBR dla masy obciążników 16,5 kg.



Rys. 7. Wykres CBR dla gruntu nr 4 przy nacisku odpowiadającym ciężarowi warstw nawierzchni dla KR7

Fig. 7. Chart CBR for land No. 4 at a pressure corresponding to the weight of the pavement layers for KR7

Po każdym badaniu w prasie określano wilgotność gruntu w cylindrze. Zauważyć należy, że w stosunku do wilgotności optymalnej największy wzrost wilgotności nastąpił dla gruntu nr 1. W tabeli 5 zestawiono wilgotności gruntów po czterodniowym nasączeniu wodą.

Tabela 5. Zestawienie wilgotności gruntów
Table 5. Summary humidity soils

Grunt – Soil	w_{opt} [%]	w [%]	Sr
Grunt nr 1 Soil No. 1	11,3	13,8	0,84
Grunt nr 2 Soil No. 2	10,5	12,1	0,75
Grunt nr 3 Soil No. 3	10,9	12,2	0,75
Grunt nr 4 Soil No. 4	11,0	12,2	0,77

PODSUMOWANIE

Badanie CBR pozwala na określenie parametrów nośności podłoża gruntowego dla nawierzchni drogowych i lotniskowych. Opracowana wiele lat temu w USA metoda po pewnych zmianach jest z powodzeniem stosowana do oceny nośności podłoża gruntowego na całym świecie, również w Polsce. Mimo przystosowania do polskich warunków oraz systemu metrycznego nie jest często stosowana, a metodyka nie jest w pełni opisana. W szczególności dotyczy to przyjmowania początkowego obciążenia od projektowanych warstw konstrukcyjnych. Brak zapisu może powodować pewne zakłamania w poprawnym określeniu CBR gruntu. Jak wiadomo, poziom naprężeń ma wpływ na parametry sztywności podłoża gruntowego w czasie eksploatacji.

Przeprowadzone badania dowodzą, że obciążenia od projektowanych warstw konstrukcyjnych mają wpływ na parametry nośności CBR. W wypadku badanych piasków pylastych zwiększenie nacisku z minimalnego obciążnikami o masie 4,5 kg do nacisku odpowiadającego ciężarowi warstw nawierzchni dla kategorii ruchu KR7 powodował zwiększenie wartości CBR o około 1,6%, przy czym ten wzrost był widoczny już przy obciążeniu jak dla KR1. Różnica wyników dla obciążeń KR1 i KR7 jest nieznaczna, stąd można przyjąć, że do badań drogowych pod konstrukcje typowe zgodnie z Katalogiem... [2013] wystarczające jest zastosowanie czterech standartowych krążków o masie 2,25 kg każdy.

Dodatkowo zauważono wyraźny wpływ pojawiania się zjawiska „wybrzuszenia” wykresów na uzyskiwane wyniki pomiarów, największy wpływ wystąpił dla gruntu najbardziej przepuszczalnego, który procentowo najbardziej zwiększył swoją wilgotność po czterodniowym nasączeniu w pojemniku z wodą. Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że celowe jest prowadzenie oznaczenia do głębokości penetracji 12,7 mm oraz określenie ciśnienia wody w porach podczas badania. Planowane jest w kolejnych badaniach dostosowanie aparatury do prowadzenia pomiaru ciśnienia w gruncie pod trzpieniem w trakcie pomiaru CBR.

PIŚMIENNICTWO

- Bednarek, Ł., Mazurek, J. (2011). Ocena wpływu domieszek do kruszywa 0–63mm na poprawę jego wskaźnika nośności na podstawie wyników badań własnych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2, 89–94.
- Gonzalez, C., Barker, W., Bianchini, A. (2012). Reformulation of the CBR procedure. US Army Corps of Engineers.
- Katalog typowych nawierzchni podatnych oraz pól sztywnych (2013). Gdańsk.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. *Dz.U.*, nr 43, poz. 430.
- Sas, W., Głuchowski, A. (2012). Metodyka wyznaczania modułów sprężystości (E i M_v) na podstawie badania CBR pod obciążeniem cyklicznym. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 57, 171–181.
- Sas, W., Głuchowski, A. (2013). Przewidywanie głębokości kolein gruntów stabilizowanych na podstawie badań obciążeń cyklicznych w aparacie CBR. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 12, 411–423.
- Sas, W., Głuchowski, A. (2014). Nośność podłoża drogowego z destruktu betonowego na przykładzie badań CBR. *Civil and Environmental Engineering*, 149–154.
- Vogring, M., McDonlad, A. i in. (2003). A laboratory technique for estimating the resilient modulus of unsaturated soil specimens from CBR and unconfined compression tests. 56 Canadian Geotechnical Conference.
- Wiłun, Z. (2007). *Zarys geotechniki*. WKŁ, Warszawa.

INFLUENCE OF SURFACE LAYERS OF ENGINEERING FOR EVALUATION OF THE CAPACITY CBR

Abstract. The paper presents the issue concerning the examination of the load index CBR ground for questionable land. In accordance with applicable regulations in the case of soft soil should always be done CBR study, regardless of the water – groundwater. In the current engineering practice, despite the Regulation on the technical conditions for highways, laboratory tests CBR native land are rarely performed. Markings index CBR made for different levels of the stress of the primary structural layers and land with different fractions of silt. The obtained results were correlated with the burden of the weight of structural layers of pavement in accordance with the new catalog of flexible pavements and semi-rigid. In addition, it shows the relationship between an indicator of the CBR and the content of silt fraction.

Key words: California bearing ratio CBR, pore pressure, road surfaces, load-bearing capacity of the ground, silt fractions

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 12.06.2016

Cytowanie: Chmielewski, R., Waliszewski, D. (2016). Wpływ ciężaru warstw konstrukcyjnych nawierzchni na wartość wskaźnika nośności CBR. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (2), 45–54.