

Metody ustalania nośności podłoża drogowego – wymagania i badania

Konstrukcje nawierzchni obciążane nawet najcięższymi pojazdami samochodowymi dopuszczonymi do ruchu przekazują małe naprężenia pionowe na podłoże drogowe, jednakże ze względów technologicznych wymagana jest odpowiednio wysoka nośność podłoża. Nośnością gruntów w drogownictwie nazywa się zdolność ich do przenoszenia obciążeń bez wywoływania nadmiernych odkształceń.

Wprowadzenie

Wysoka nośność podłoża powinna umożliwić właściwe wykonanie nadległych warstw konstrukcyjnych (warstwy dolne i górne wg tablicy 1) bez nadmiernych jego odkształceń nawet w niesprzyjających warunkach pogodowych. Podłoże, poza nośnością gwarantującą poruszanie się pojazdów i maszyn roboczych w trakcie wykonywania podbudowy i nawierzchni (ruch technologiczny), również w czasie wieloletniej eksploatacji nawierzchni musi gwarantować jego stabilność oraz być odporne na oddziaływanie wody i mrozu [1]. W tym celu stosuje się warstwy podłoża ulepszonego. Warstwa ta pełni istotną rolę w pracy nawierzchni, ale formalnie zaliczana jest do robót ziemnych i nie jest wliczana w skład warstw konstrukcji nawierzchni. Schemat konstrukcji nawierzchni podatnej i półsztywnej wraz z podłożem przedstawiono w tablicy 1 [2].

Podłoże gruntowe nawierzchni powinno charakteryzować się odpowiednią nośnością oraz jej utrzymaniem w warunkach nawodnienia i oddziaływania mrozu. W projektowaniu nawierzchni stosuje się klasyfikację podłoża gruntowego na podstawie grupy nośności G1-G4. Grupy te ustalane są na podstawie badań laboratoryjnych wysadzinowości gruntów i wskaźnika CBR gruntu do głębokości 1 m poniżej spodu konstrukcji nawierzchni, poziomu występowania wód gruntowych oraz projektowanego obciążenia ruchem. Od grupy nośności zależy również grubość konstrukcji ze względu na zabezpieczenie podłoża przed przemarzaniem.

Poniżej w tablicy 2 przedstawiono klasyfikację grup nośności podłoża pod względem nośności [2].

▼ Tablica 1. Przekrój konstrukcji drogowej wraz z podłożem

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa ścieralna	
		Warstwa wiążąca	
		Podbudowa zasadnicza	Górna warstwa podbudowy zasadniczej
			Dolna warstwa podbudowy zasadniczej
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza	
Warstwa mrozochronna			
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża		
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie zakwalifikowany do jednej z grup nośności podłoża od G1 do G4		

▼ Tablica 2. Klasyfikacja grup nośności podłoża

Grupa nośności podłoża gruntowego Gi	Wskaźnik nośności CBR po 4 dniach nasączenia wodą [%]	Wtórny moduł odkształcenia E_2 [N/mm ²]
G1	$\text{CBR} \geq 10$	$E_2 \geq 80$
G2	$5 \leq \text{CBR} < 10$	$50 \leq E_2 < 80$
G3	$3 \leq \text{CBR} < 5$	$35 \leq E_2 < 50$
G4	$2 \leq \text{CBR} < 3$	$25 \leq E_2 < 35$

Badania laboratoryjne i terenowe podłoża

Program badań laboratoryjnych gruntów do ustalenia wysadzinowości jest następujący:

- ustalenie rodzaju gruntu na podstawie uziarnienia
- zawartość cząstek drobnych ($< 0,063$ mm i $< 0,020$ mm)
- wskaźnik piaskowy.

Nośność podłoża drogowego określają następujące wskaźniki, które mogą być ustalone na podstawie badań terenowych:

- kalifornijski wskaźnik nośności CBR
 - moduł odkształcenia E_1 , E_2
- dynamiczny moduł odkształcenia E_{vd}
- współczynnik reakcji podłoża k .

Wskaźnik CBR

Klasycznym badaniem nośności gruntu lub kruszywa w budownictwie drogowym jest badanie CBR. Badanie pochodzi ze Stanów Zjednoczonych i nosi nazwę kalifornijski wskaźnik nośności CBR (California Bearing Ratio), gdzie służyło do projektowania nawierzchni metodą CBR. Wskaźnik ten to procentowy stosunek obciążenia jednostkowego p , które trzeba zastosować, aby trzpień o średnicy 50 mm wcisnąć w próbkę do określonej głębokości (2,5 lub 5,0 mm) do obciążenia jednostkowego p_s , które jest wartością stałą i odpowiada ciśnieniu przy wciskaniu trzpienia w standardowy tłuczeń:

$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100$$

Wskaźnik CBR jest stałą materiałową dla badanego gruntu czy kruszywa i odpowiada nośności materiału zagęszczonego energią Proctora w cylindrze pomiarowym po normowej pielęgnacji. Wskaźnik CBR można porównać do innej stałej materiałowej, modułu sprężystości E , obecnie najczęściej stosowanego do wymiarowania nawierzchni metodami mechanistycznymi. Pomiędzy CBR a E istnieją różne zależności empiryczne, a najczęściej stosowany w Polsce jest wzór Powella [3].

$$E = 17,6 \cdot CBR^{0,64}$$

W Polsce badanie CBR zawarte jest w normach PN-S-02205 [4] (grunty) i PN-S-06102 [5] (kruszywa). Badanie CBR jest badaniem laboratoryjnym przeprowadzonym na zagęszczonej próbce materiału po 4 dobach moczenia w wodzie.

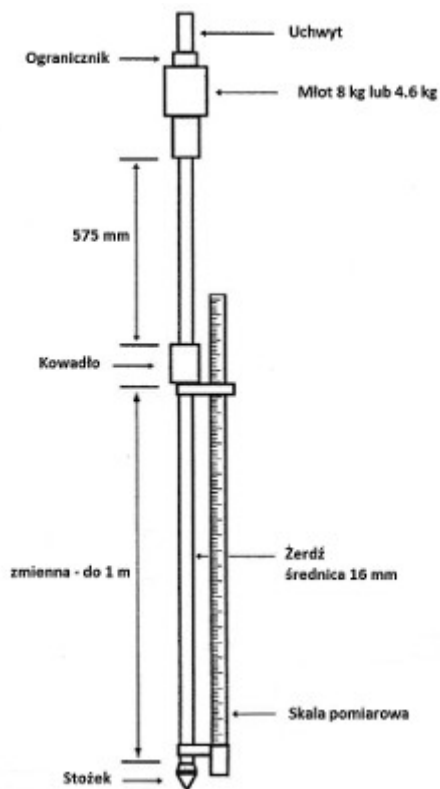
Istnieją także badania polowe pozwalające określić wskaźnik CBR badanej warstwy. Są to tester Clegga oraz sondy dynamiczne DCP [6] i Panda [7] pozwalające na wyznaczenie wartości „in situ” w istniejących warunkach terenowych do głębokości poniżej 1 m.

Tester Clegga jest urządzeniem dynamicznym pozwalającym określić CBR na powierzchni badanej warstwy.

Metoda polega na zrzuconiu z wysokości 45 cm ciężarka w kształcie standardowego trzpienia CBR i rejestracji wartości uderzenia (CIV). W zależności od nośności podłoża (jego odkształcalności) stosowane są różne ciężarki: 2,25 kg, 4,5 kg, 10 kg, a nawet 20 kg. Standardowym ciężarem jest 4,5 kg. Na podstawie zależności korelacyjnych wyznaczana jest wartość CBR. Schemat badania przedstawiono na fot. 1.



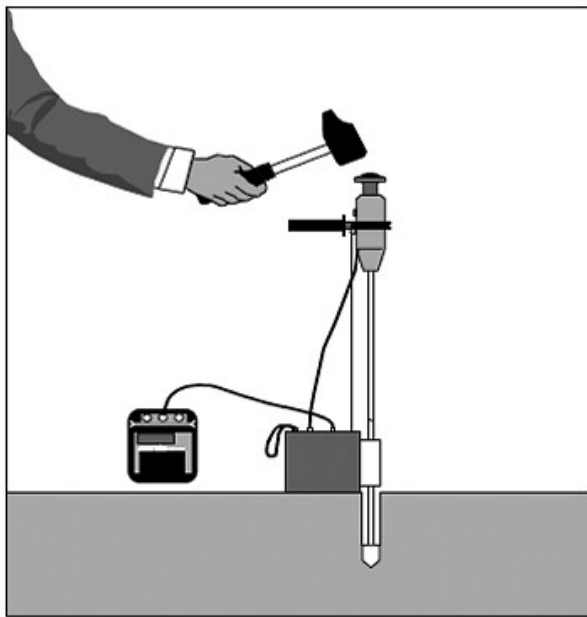
Fot. 1. Tester Clegga



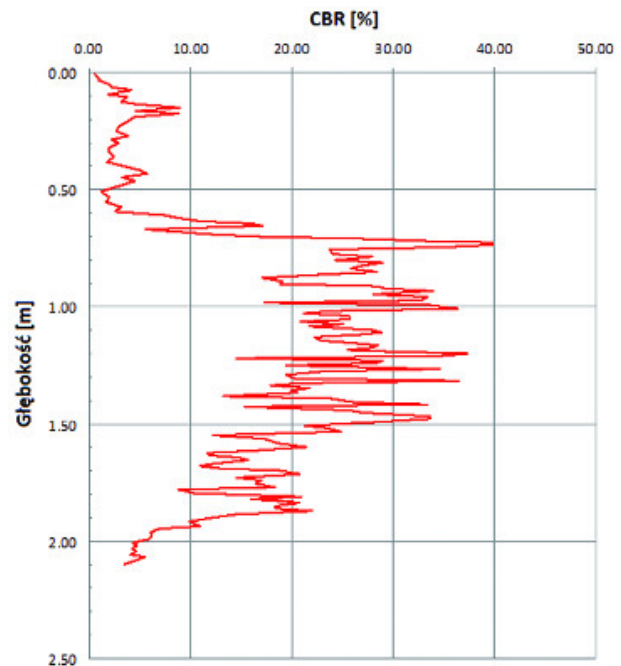
Rys. 1. Sonda DCP

Sondy dynamiczne pozwalają na wyznaczenie wskaźnika CBR w sposób pośredni poprzez określenie wielkości penetracji stożka (sonda DCP – rys. 1) lub oporu na stożku q_d (sonda Panda – rys. 2) o stałej powierzchni w badanym ośrodku. Są to sondy o małym stożku średnicy 2 cm (DCP) lub powierzchni 2 cm² (Panda). W przypadku badania DCP używa się stałej energii poprzez zrzut ciężarka o masie 8 kg ze stałej wysokości, natomiast w sondzie Panda stosowana jest zmienna energia. Wskaźnik CBR wyznaczany jest na podstawie zależności określonych dla grup gruntów (grunt niespoisty, spoisty o małej spoistości, grunt o dużej spoistości). Przy pomocy sondy Panda możliwe jest wyznaczenie również innych parametrów gruntów, takich jak wskaźnik zagęszczenia, stopień plastyczności na podstawie zależności korelacyjnych pomiędzy wyznaczanym parametrem a oporem na stożku.

Sondowania dynamiczne pozwalają na określenie nośności gruntu nie tylko dla odkrytego podłoża gruntowego po wykorytowaniu, lecz również podłoża pod istniejącą konstrukcją nawierzchni. Jest to metoda stosunkowo mało inwazyjna i niewymagająca rozbiórki nawierzchni, a jedynie wykonania niewielkiego otworu o średnicy 80-100 mm. Metoda ta jest szczególnie przydatna przy badaniach istniejących nawierzchni dróg i lotnisk.



Rys. 2. Sonda Panda



Rys. 3. Przykład prezentacji graficznej wyników CBR podłoża sondą Panda

Metoda VSS

Najczęściej stosowaną metodą badania nośności podłoża w drogownictwie jest metoda VSS pozwalająca na określenie modułów odkształcenia E_1 , E_2 oraz wskaźnika odkształcenia $I_o = E_2/E_1$. Badanie wykonuje się płytą sztywną o średnicy 30 cm, stosując naprężenie odpowiednie do badanej warstwy.

$$E = \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta_p}{\Delta_s} \cdot D$$

gdzie:

Δ_p – różnica nacisków (0,05-0,15) [MPa]

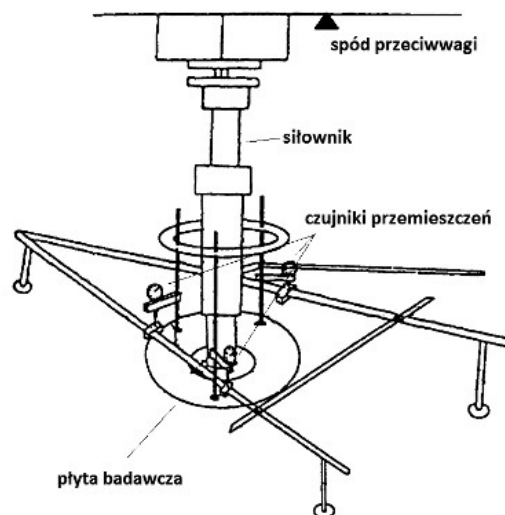
Δ_s – przyrost osiadań odpowiadających tej różnicy nacisków [mm]

D – średnica płyty [mm].

Do przeprowadzenia badania VSS stosuje się balast w postaci samochodu ciężarowego lub walca drogowego, umożliwiający wywołanie odpowiedniego naprężenia na badaną warstwę (fot. 2). Metodę VSS stosuje się również do kontroli nośności i zagęszczenia warstw konstrukcyjnych (podbudowy z kruszyw). Badanie VSS dla podłoża wykonuje się wg normy PN-S-02205 [4], a schemat aparatury przedstawiono na rys. 4.



Fot. 2. Przykład badania VSS w terenie wg PN-S-02205



Rys. 4. Schemat badania VSS wg PN-S-02205

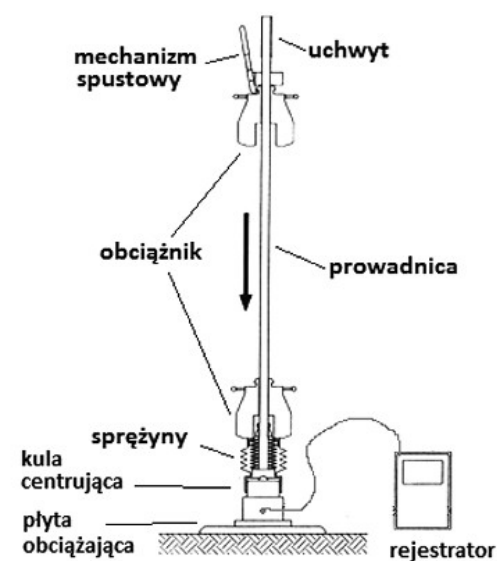
Pomiary modułu odkształcenia przez obciążenia próbne są jednak czasochłonne i wymagają ciężkiego balastu do wykonania tych badań oraz uciążliwych dojazdów sprzętu na teren badań, co w niektórych przypadkach uniemożliwia zastosowanie tej metodyki.

Metoda płyty dynamicznej

W ostatnim 10-leciu występuje w Polsce tendencja do wykonywania pomiarów modułów odkształcenia E_{vd} metodą dynamicznych obciążeń płyty (płyta dynamiczna). Jest to lekkie urządzenie pomiarowe z obciążnikiem opadowym o ciężarze 10 lub 15 kg. Badania płytą dynamiczną nie są znormalizowane w Polsce. Przeprowadza się je na podstawie instrukcji producenta lub własnych zależności korelacyjnych. Badanie wykonuje się w celu określenia dynamicznego modułu odkształcenia E_{vd} , a pośrednio na podstawie korelacji do określenia zagęszczenia I_0 oraz wtórnego modułu odkształcenia E_2 . Badanie płytą dynamiczną prowadzone może być na gruntach lub kruszywach niezwiązanych o maksymalnej wielkości ziaren do 63 mm. Jest ono bardzo wygodne do przeprowadzenia, nie wymaga przeciwwagi i może je wykonać jedna osoba w terenie.



Fot. 3. Przykładowy zestaw do badania płytą dynamiczną



Rys. 5. Schemat płyty dynamicznej

Wartość dynamicznego modułu odkształcenia oblicza się na podstawie maksymalnego przemieszczenia pionowego $s_{\max}$ płyty obciążeniowej wg wzoru:

$$E_{vd} = 1,5r \frac{\sigma_{\max}}{s_{\max}}$$

gdzie:

E_{vd} – dynamiczny moduł odkształcenia [MPa]

$s_{\max}$ – średnia wartość przemieszczenia pionowego z 3 uderzeń pomiarowych, wykonanych po 3 uderzeniach wstępnych [mm]

r – promień płyty obciążeniowej – 150 mm

$\delta_{\max}$ – naprężenie normalne pod płytą obciążeniową (0,10 lub 0,15 MPa).

Na podstawie wartości dynamicznego modułu odkształcenia możliwe jest oszacowanie modułu statycznego E_2 (VSS) jak również wskaźnika zagęszczenia na podstawie korelacji. Przykładowe zależności wg przepisów niemieckich [8] podano w tablicy 3.

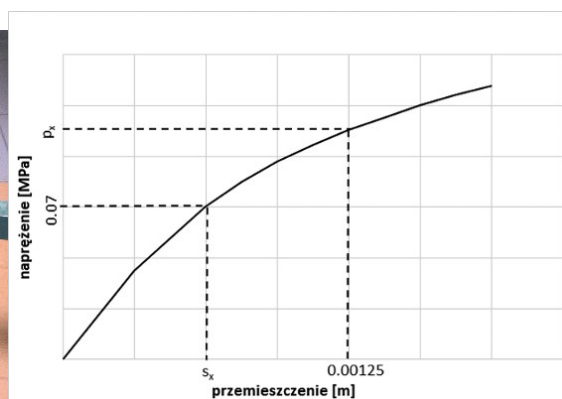
▼ Tablica 3. Zależności pomiędzy wskaźnikiem zagęszczenia a modułami odkształcenia

Grupa gruntów wg DIN 18 196	Wskaźnik zagęszczenia [%]	Moduł odkształcenia E_2 [MPa]	Dynamiczny moduł odkształcenia E_{vd} [MPa]
GW, GI, GU ¹⁾ , GT ¹⁾	≥ 103	≥ 120	≥ 60
GW, GI, GU, GT	≥ 100	≥ 100	≥ 50
	≥ 98	≥ 80	≥ 40
	≥ 97	≥ 70	≥ 35
GE, SE SW, SI	≥ 100	≥ 80	≥ 40
	≥ 98	≥ 70	≥ 35
	≥ 97	≥ 60	≥ 32
Mieszanki gruntów GU ²⁾ , GT ²⁾ , SU, ST	≥ 100	≥ 70	≥ 35
	≥ 97	≥ 45	≥ 25
Grunty drobnoziarniste: U, T mieszanki gruntów: GU, GT, SU, ST	≥ 97	≥ 45	≥ 25
	≥ 95	≥ 30	≥ 35

¹⁾ grunty zawierające nie więcej niż 7% frakcji < 0,063 mm, ²⁾ grunty zawierające 7-15% frakcji < 0,063 mm



Fot. 4. Przykładowy zestaw do badania Westergaarda



Rys. 6. Przykładowy wykres z obciążenia podłoża płytą

Badanie Westergaarda

Przy projektowaniu nawierzchni sztywnych (betonowych) wymagane mogą być wartości współczynnika podatności (sprężystej reakcji) podłoża gruntowego – badanie Westergaarda. Badanie to przeprowadza się

podobnie jak badanie VSS lecz płytą o średnicy 762 mm. Wg standardowej metody moduł k wyznacza się na podstawie próbnego obciążenia podłoża ze wzoru:

$$k = \frac{p_x}{0,00125} \text{ [MPa/m]}$$

lub wg wzoru Korpusu Inżynieryjnych Wojsk Amerykańskich:

$$k = \frac{0,07}{s_x} \text{ [MPa/m]}$$

Wartości p_x i s_x uzyskuje się z próbnych obciążeń (podłoża płytą), przedstawionych na rys. 6.



Fot. 5. Drogowe roboty ziemne



Fot. 6. Drogowe roboty ziemne

Literatura

1. Kraszewski C., współautorzy: Rafalski L., Wilczek J., *Ochrona przeciwmrozowa nawierzchni drogowych na przykładzie wybranych krajów*, Drogownictwo, nr 2/2014, str. 39-45.
2. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, Załącznik do zarządzenia nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
3. Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C., Nunn M.E., *The Structural Design of Bituminous Roads*, Report LR1132, TRRL.
4. PN-S-02205 Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania.
5. PN-S-06102 Drogi samochodowe – Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie.
6. ASTM D6951/D6951M-09 Standard Test Method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications.
7. XP P 94-105 Sols, Reconnaissance et essais. Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable – Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre – Exploitation des résultats – Interprétation.
8. Supplementary Technical Terms and Conditions of Contract and Guidelines For Earthworks in Road Construction ZTVE-StB 94, Issue 1994 as amended in 1997.

dr inż. Cezary Kraszewski,
mgr inż. Beata Gajewska
Instytut Badawczy Dróg i Mostów

