

Ocena nośności podłoża i podtorza kolejowego sondą dynamiczną

Dr inż. Cezary Kraszewski, mgr inż. Marcin Dreger, mgr inż. Mirosław Szpikowski,
inż. Michał Mitrut, inż. Piotr Sobkowicz

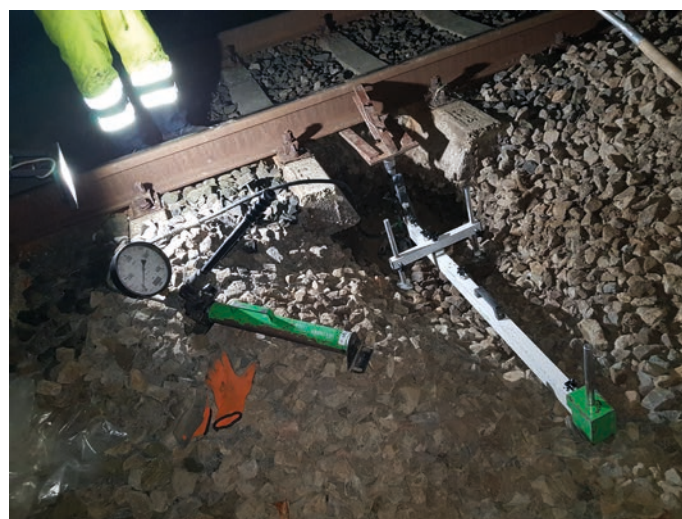
Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie, Laboratorium Geotechniki

Wiedza o nośności podłoża gruntowego jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania nowych lub modernizowanych konstrukcji nawierzchni komunikacyjnych. W Polsce najczęściej wykonywane są badania nośności podłoża płytą sztywną. W badaniach płytowych ustalana jest wartość modułu odkształcenia E_2 , który jest podstawowym parametrem nośności podłoża drogowego lub kolejowego, dla którego obowiązują krajowe wymagania techniczne [5, 6]. Badania płytowe są jednak bardziej przydatne do kontroli w czasie robót budowlanych, po odsłonięciu podłoża gruntowego nawierzchni w wykopach, przy formowaniu nasypów i warstw konstrukcyjnych nawierzchni. W przypadku oceny istniejących konstrukcji badania płytowe są bardzo kłopotliwe i czasami wręcz niemożliwe do wykonania ze względu na konieczność rozebrania nawierzchni i jej odtworzenia. W tym celu zaproponowano metodę oceny podłoża uwzględniającą istniejące wymagania odnośnie wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 , ale ustalonego obliczeniowo według procedury przedstawionej w dalszej części artykułu. Prezentowana metoda ustalania nośności podłoża gruntowego opiera się na wieloletnim doświadczeniu Laboratorium Geotechniki IBDiM przy badaniach podłoża lotnisk, dróg i linii kolejowych na wielu kontraktach.

W przypadku dróg kolejowych w Polsce mamy do czynienia głównie z modernizacją istniejących linii kolejowych mającą na celu zwiększenie prędkości przewozów. Modernizacja polega na zwiększeniu nośności podtorza i podłoża, o ile jest to konieczne ze względu na nadmierne osiadania lub brak stateczności. Modernizacja torowisk obejmuje przeważnie wymianę warstwy ochronnej i płytką stabilizację górnej części podłoża gruntowego, jeżeli podłoże nie zapewnia uzyskania odpowiedniego modułu odkształcenia na powierzchni torowiska. W celu zaprojektowania konstrukcji modernizowanego torowiska konieczna jest wiedza o nośności podłoża kolejowego jeszcze przed rozpoczęciem projektowania, a badania nośności podłoża płytą VSS muszą być prowadzone w czasie nocnych zamknięć torów. Aby przeprowadzić badanie VSS na czynnym torowisku, wymagane jest usunięcie podsypki tłuczniowej oraz warstwy ochronnej. Jako przeciwwagę stosuje się ciężki pojazd szynowy lub przy-

gotowuje się specjalną konstrukcję do podparcia się pod szyny. Takie badanie jest jednak bardzo czasochłonne i trwa co najmniej 2 ÷ 4 godziny oraz wymaga udziału 3 ÷ 4 osób. Pozostaje także problem z prawidłowym odtworzeniem warstwy ochronnej i podsypki, aby wyeliminować osiadania. Na rys. 1 pokazano badanie VSS pod torem kolejowym. Wszystko to powoduje uciążliwość stosowania metody VSS przy ocenie nośności eksploatowanych torowisk kolejowych.

Po ustaleniu nośności podłoża kolejowego możliwe jest obliczenie wymaganej grubości warstwy ochronnej i ewentualne wzmocnienie podłoża. Torowisko powinno charakteryzować się odpowiednią nośnością i sztywnością, trwałością i jednorodnością. Aby spełnić ten warunek, moduł odkształcenia torowiska na poziomie wierzchu warstwy ochronnej powinien wynosić $E_2 = 80 \div 120$ MPa, w zależności od prędkości i natężenia przewozów [3]. Najkorzystniej jest, gdy podłoże jest zbudowane z gruntów nośnych: grunty kamieniste, żwiry, pospółki i piaski. Wtedy grubość warstwy ochronnej może wynosić 15 cm. W gruntach o niższej nośności, szczególnie w gruntach spo-



Rys. 1. Przykład badania VSS pod torem kolejowym

istych, tak wysokie parametry nośności na torowisku są trudno osiągalne lub nawet niemożliwe do uzyskania. W przypadku niskiej nośności gruntów w podłożu wymagane jest stosowanie grubszych warstw ochronnych (30 ÷ 50 cm) lub wykonanie stabilizacji powierzchniowej podłoża gruntowego.

METODY USTALANIA NOŚNOŚCI PODŁOŻA BUDOWLI KOMUNIKACYJNYCH – PRZEGLĄD

Nośnością podłoża w inżynierii komunikacyjnej nazywamy zdolność do przenoszenia obciążeń własnych i eksploatacyjnych bez wywoływania nadmiernych odkształceń.

Nośność podłoża pod nawierzchniami komunikacyjnymi określają następujące wskaźniki, które są ustalane na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych:

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

Klasycznym badaniem nośności gruntu w inżynierii komunikacyjnej jest badanie *CBR*. Badanie pochodzi ze Stanów Zjednoczonych, skąd nazwane jest kalifornijskim wskaźnikiem nośności *CBR* (*California Bearig Ratio*), gdzie służyło do projektowania nawierzchni drogowych i lotniskowych metodą *CBR*. Kalifornijski wskaźnik nośności jest 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:

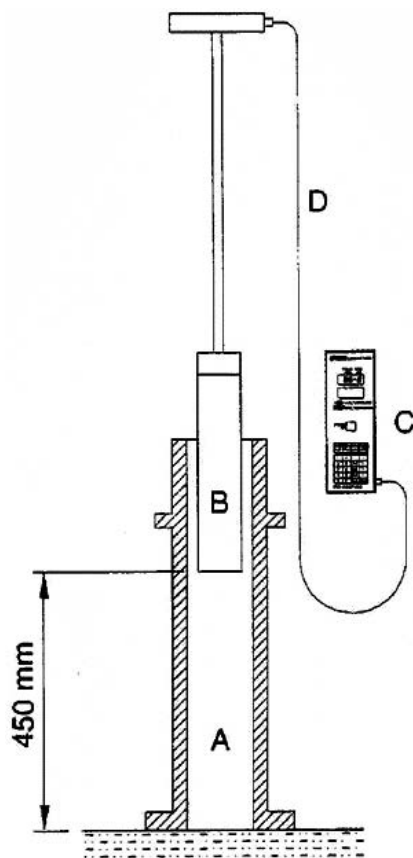
$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Wskaźnik *CBR* jest stałą materiałową, charakterystyczną dla badanego gruntu lub kruszywa i odpowiada nośności materiału zagęszczonego normową energią Proctora w cylindrze pomiarowym po czterodobowej pielęgnacji. Dlatego też badanie *CBR* jest badaniem laboratoryjnym. W Polsce badanie *CBR* zawarte jest w normach PN-S-02205 [7] (grunty) i PN-S-06102 [8] (kruszywa).

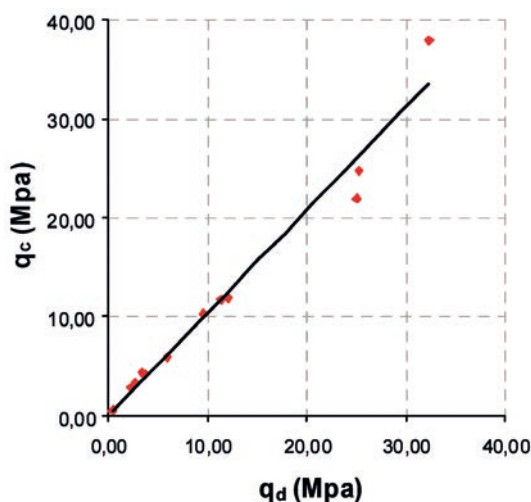
Istnieją również polowe metody określania wskaźnika *CBR* badanej warstwy lub warstw. Są to: tester Clegga, sondy dynamiczne DCP [3] oraz PANDA [13], które pozwalają na wyznaczenie wskaźnika *CBR* w warunkach „*in situ*”.

Tester Clegg`a jest urządzeniem dynamicznym umożliwiającym określenie *CBR* na powierzchni badanej warstwy. Metoda polega na zrzuceniu z wysokości 45 cm ciężarka w kształcie standardowego trzpienia *CBR* i rejestracji wartości uderzenia (CIV – *Cleeg Impact Value*). W zależności od nośności podłoża (jego odkształcalności) stosowane są różne ciężarki: 2,25 kg, 4,5 kg, 10 kg, a nawet 20 kg. Standardowy ciężarek ma 4,5 kg. Na podstawie zależności korelacyjnych wyznaczana jest wartość *CBR*. Schemat urządzenia przedstawiono na rys. 2.

Sondy dynamiczne pozwalają na wyznaczenie wskaźnika *CBR* w sposób pośredni przez określenie wielkości penetracji stożka (mm/uderzenie młota) – sonda DCP (rys. 4) lub oporu q_d

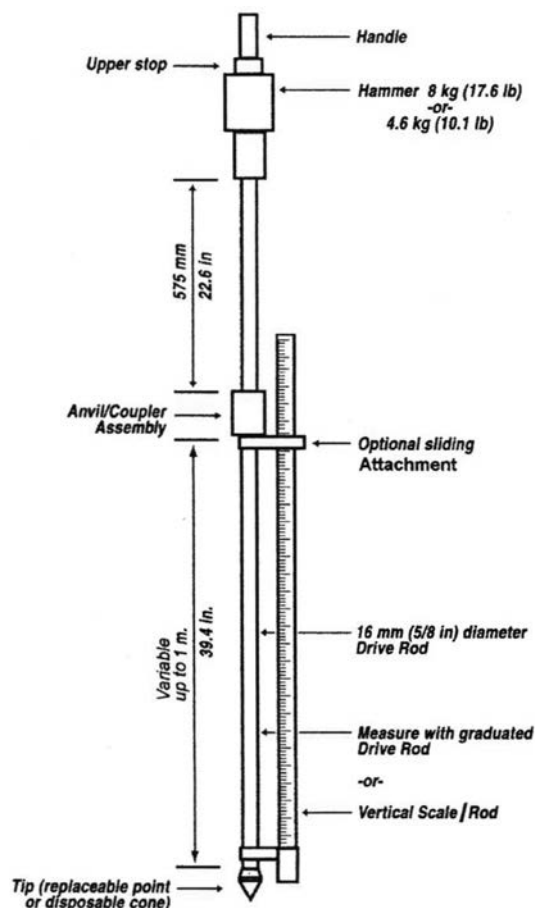


Rys. 2. Aparat Clegga



Rys. 3. Zależność pomiędzy q_c i q_d

(MPa) na stożku o stałej powierzchni w badanym ośrodku – sonda PANDA (rys. 5). Są to sondy o małym stożku o średnicy 2 cm (DCP) lub powierzchni 2 cm² (PANDA) i kącie 60°. W przypadku badania DCP używa się stałej energii poprzez zrzut ośmiokilogramowego ciężarka ze stałej wysokości, natomiast w sondzie PANDA stosowana jest energia zmienna i można ją dopasować do aktualnej nośności gruntu. Wskaźnik *CBR* wyznaczany jest na podstawie zależności określonych dla grup gruntów (grunt niespoisty, spoisty o małej spoistości, grunt o dużej spoistości). Za pomocą sondy PANDA, oprócz wskaźnika *CBR*, możliwe



Rys. 4. Schemat sondy DCP [3]

jest wyznaczenie również innych parametrów gruntów, takich jak stopień zagęszczenia, wskaźnik zagęszczenia, na podstawie zależności korelacyjnych pomiędzy wyznaczanym parametrem a oporem na stożku, podobnie jak w badaniach CPT. Według badań [10] z wystarczająco dokładnym inżynierskim przybliżeniem można przyjąć następującą zależność $q_d \approx q_c$ w zakresie:

$$0,85 \leq \frac{q_d}{q_c} \leq 1,1 \quad (2)$$

Przykładową zależność według [6] do wyprowadzenia wartości CBR w przypadku sondy DCP przedstawiono za pomocą wzoru:

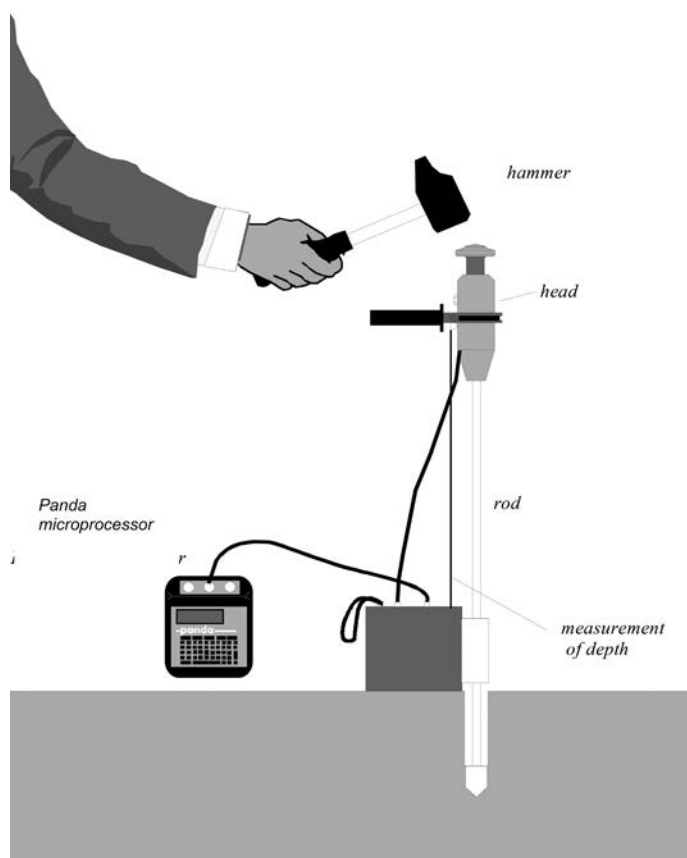
$$\log_{10}(CBR) = 2,48 - 1,057 \cdot \log_{10} w \quad (3)$$

gdzie:

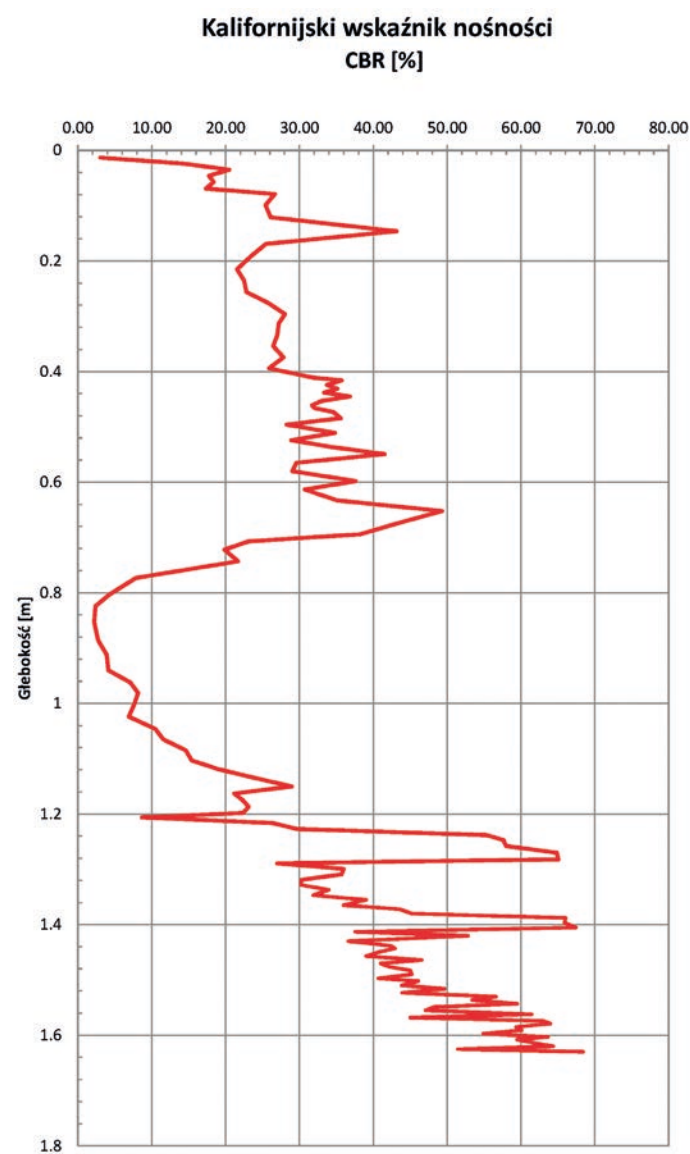
CBR [%]

w – wartość wpędu w mm na jedno uderzenie młota sondy DCP [mm/uderzenie].

Na rys. 5 i 6 przedstawiono, jak łatwo i precyzyjnie można wydzielić warstwy podłoża oraz określić średnie wskaźniki CBR dla każdej warstwy gruntów do dalszej analizy układu wielowarstwowego.



Rys. 5. Schemat sondy PANDA [12]



Rys. 6. Przykład prezentacji graficznej wyników CBR podłoża sondą PANDA

Najczęściej stosowanymi metodami badań i oceny podłoża gruntowego w inżynierii komunikacyjnej są statyczne badania płytowe. Wyniki z badań płytowych są używane do projektowania konstrukcji i sprawdzania poprawności wykonania warstw konstrukcyjnych. Najbardziej popularną metodą badania nośności podłoża nawierzchni komunikacyjnych jest metoda szwajcarska VSS (*Verein Schweizerischer Strassenfachmänner*) pozwalająca na określenie modułów odkształcenia E_1 , E_2 oraz wskaźnika odkształcenia $I_0 = E_2/E_1$. Badanie wykonuje się płytą sztywną o średnicy 300 mm, stosując naprężenie odpowiednie do badanej warstwy. W przypadku podłoża jest to 0,25 MPa. Wartość modułu odkształcenia określa się z zależności (4):

$$E_{1,2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D \text{ [MPa]} \quad (4)$$

gdzie:

Δp – różnica nacisków [MPa] (0,05 ÷ 0,15 MPa)

Δs – przyrost osiadań odpowiadających tej różnicy nacisków [mm],

D – średnica płyty [mm].

Metodę VSS stosuje się również do kontroli nośności i zagęszczenia warstw konstrukcyjnych (podbudowy z kruszyw). Badanie VSS podłoża drogowego wykonuje się według normy PN-S-02205 [7], a podłoża kolejowego według instrukcji Id-3 [5].

Przy projektowaniu nawierzchni sztywnych (betonowych) nośność podłoża określa się na podstawie wartości współczynnika podatności (sprężystej reakcji) podłoża gruntowego k – badanie Westergaarda. Badanie to przeprowadza się podobnie jak badanie VSS, lecz płytą o średnicy 762 mm. Moduł k wyznacza się na podstawie próbnego obciążenia podłoża, ze wzoru (5) według [4]:

$$k = \frac{p_x}{0,00125} \text{ [MPa/m]} \quad (5)$$

gdzie:

p_x – ciśnienie potrzebne do odkształcenia gruntu pod płytą 1,25 mm [MPa].

Do przeprowadzenia badań płytowych VSS i Westergaarda stosuje się balast o masie kilku ton w postaci samochodu ciężarowego lub walca drogowego, który umożliwia wywołanie odpowiedniego naprężenia na badaną warstwę. Dlatego badania płytowe wykonywane są w czasie robót budowlanych, bezpośrednio po odsłonięciu podłoża gruntowego lub po uformowaniu poszczególnych warstw robót ziemnych. Pomiaru modułu odkształcenia przez obciążenia płytowe są czasochłonne, wymagają ciężkiego balastu do wykonania tych badań oraz uciążliwych dojazdów sprzętu na teren badań, usunięcia konstrukcji i jej odtworzenia, co w niektórych przypadkach uniemożliwia zastosowanie tej metody, np. linie kolejowe czy drogi pod ruchem.

Odmianą badań płytowych jest płyta dynamiczna. Jest to lekkie urządzenie pomiarowe z obciążnikiem opadowym o ciężarze 10 lub 15 kg. Badania płytą dynamiczną nie są znormalizowane w Polsce, a przeprowadza się je na podstawie instrukcji producenta lub własnych zależności korelacyjnych. Badanie płytą dynamiczną wykonuje się w celu określenia dynamicznego modułu odkształcenia E_{vd} , a pośrednio na podstawie korelacji do określenia zagęszczenia I_s oraz wtórnego modułu odkształcenia E_2 (tabl. 1). Badanie płytą dynamiczną może być prowadzone na gruntach lub kruszywach niespoistych o maksymalnej wielkości ziaren do 63 mm. Badanie to jest bardzo szybkie i wydajne

Tabl. 1. Przykładowe zależności E_2 i I_s od E_{vd} według przepisów niemieckich Deutsche Bahn [11]

Grupa gruntów według DIN 18 196	Wskaźnik zagęszczenia I_s [%]	Moduł odkształcenia E_2 [MPa]	Dynamiczny moduł odkształcenia E_{vd} [MPa]
GW, GI, GU ¹⁾ , GT ¹⁾	≥ 103	≥ 120	≥ 60
GW, GI, GU, GT i mieszanki mineralne 0/31.5mm	≥ 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

do przeprowadzenia. Nie wymaga ciężkiego balastu i może je przeprowadzić jedna osoba.

Wartość dynamicznego modułu odkształcenia oblicza się na podstawie maksymalnego przemieszczenia pionowego s_{max} płyty obciążeniowej według wzoru (6):

$$E_{vd} = 1,5 \cdot \frac{\sigma_{max}}{s_{max}} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

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),

σ_{max} – naprężenie normalne pod płytą obciążeniową (0,1 MPa lub 0,15 MPa).

Na podstawie wartości dynamicznego modułu odkształcenia E_{vd} możliwe jest oszacowanie modułu statycznego E_2 VSS, jak również wskaźnika zagęszczenia I_s na podstawie korelacji.

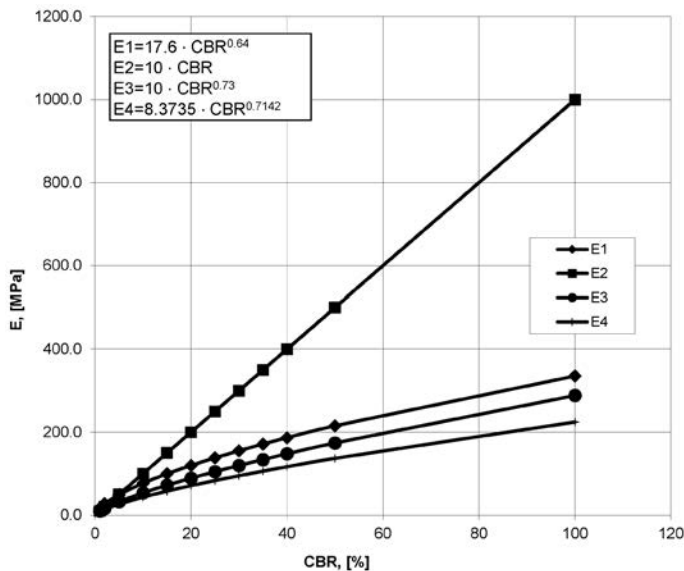
ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY CBR A MODUŁEM SPRĘŻYSTOŚCI

Wskaźnik CBR jest stałą materiałową charakteryzującą grunt, którą można porównać do modułu sprężystości E stosowanego do wymiarowania konstrukcji nawierzchni metodami mechanistycznymi. Zależność pomiędzy CBR a E była tematem licznych badań na świecie, co zaowocowało opracowaniem wielu zależności empirycznych, z których obecnie korzysta się przy wymiarowaniu nawierzchni. W tabl. 2 przedstawiono najbardziej znane zależności CBR i E dla gruntów.

Zależności E od CBR według różnych autorów określono wzorami (7 ÷ 10):

Tabl. 2. Zależności CBR i E według Polskiego Katalogu Nawierzchni [6]

Grupa nośności podłoża gruntowego G_i	Wskaźnik nośności CBR po 4 dniach nasączenia wodą [%]	Wtórny moduł odkształcenia E_2 [MPa]
G1	$CBR \geq 10$	$E_2 \geq 80$
G2	$5 \leq CBR < 10$	$50 \leq E_2 < 80$
G3	$3 \leq CBR < 5$	$35 \leq E_2 < 50$
G4	$2 \leq CBR < 3$	$25 \leq E_2 < 35$



Rys. 7. Zależność modułu sprężystości E od wskaźnika CBR

Z badań Brytyjskiego Instytutu Drogowego TRRL [9]:

$$E = 17,6 \cdot CBR^{0,64} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Według AASHTO [1]:

$$E = 10,3 \cdot CBR \text{ [MPa]} \quad (8)$$

Według Duńskiego Instytutu Drogowego:

$$E = 10 \cdot CBR^{0,73} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Według instrukcji kolejowej Id-3 [5]:

$$E = 8,3735 \cdot CBR^{0,7142} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Porównanie tych zależności przedstawiono na rys. 7

Z rys. 7 wynika, że zależność $E = f(CBR)$ opisana jest najczęściej funkcją wykładniczą, a kryteria są do siebie zbliżone. Biorąc pod uwagę, że wskaźnik CBR gruntów zwykle oscyluje w granicach $1 \div 20\%$, funkcje wykładnicze są w tym zakresie jeszcze bardziej zbliżone, zwłaszcza zależności (9) i (10).

OKREŚLENIE MODUŁU ZASTĘPCZEGO E_z NA POWIERZCHNI PODŁOŻA GRUNTOWEGO

W przypadku istniejących konstrukcji nawierzchni komunikacyjnych nośność podłoża gruntowego można ustalić bez rozbiierania całej konstrukcji. Wystarczy małośrednicowy odwiert,

aby wprowadzić sondę do podłoża gruntowego. W przypadku linii kolejowej sondowania można przeprowadzić przez tłuścień i warstwę ochronną.

Dysponując danymi materiałowymi (E , ν) warstw gruntu oraz grubościami tych warstw, można określić stan naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia od kołowej powierzchni naciśku w modelu półprzestrzeni sprężystej, z którego można wyznaczyć moduł zastępczy E_z . Moduł E_z odpowiada wtórnemu modułowi odkształcenia E_2 na powierzchni badanej warstwy i można go wyznaczyć w osi obciążenia o powierzchni kołowej, stosując wzór Boussinesqa:

$$E = q \cdot D \cdot (1 - \nu^2) / u \quad (11)$$

gdzie:

q – ciśnienie kontaktowe na styku płyta – grunt, $q = 250$ kPa,

D – średnica płyty, $D = 0,3$ m,

u – przemieszczenie pionowe na górze układu,

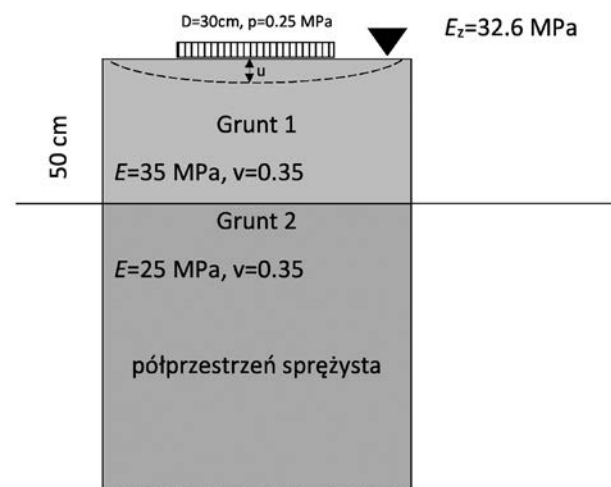
ν – współczynnik Poissona, $\nu = 0,35$ (grunty niespoiste).

W praktyce można rozpatrywać układy jedno lub wielowarstwowe, w zależności od układu gruntów w podłożu gruntowym. W przypadku jednorodnego układu gruntów można przyjąć założenie, że moduł zastępczy E_z równa się modułowi sprężystości E . Moduł E może być wyprowadzony z CBR według zależności (7, 8, 9, 10).

W przypadku układów wielowarstwowych należy przeanalizować kilka warstw podłoża o różnym module sprężystości E . Układy wielowarstwowe można obliczać, wykorzystując programy komputerowe, na przykład Elsym, Bisar. Znając obliczeniowe ugięcie w od danego obciążenia, można wyznaczyć wartość modułu zastępczego E_z , który równa się wtórnemu modułowi odkształcenia E_2 .

Przykład obliczenia układu dwuwarstwowego podłoża.

Po obciążeniu układu naciskiem $0,25$ MPa (nacisk VSS, $D = 30$ cm) wierzch układu doznaje przemieszczenia pionowego u . W analizowanym przykładzie otrzymano $u = 2016$ μm . Następnie, podstawiając obliczone przemieszczenie pionowe do



Rys. 8. Przykład obliczeniowy

wzoru (11), otrzymano $E_z = 32,6$ MPa, co odpowiada modułowi E_2 według metody VSS.

Przedstawioną metodę porównano z metodą DORNII stosowaną do obliczeń grubości warstw ochronnych według Instrukcji [5], uzyskując pełną zgodność. Tą metodą można obliczać również grubości warstw ochronnych, grubości wzmocnień (stabilizacje), które spełniają wymagania przepisów odnośnie nośności torowiska według Instrukcji [5]. Wykonując sondowania przez warstwę ochronną, można również wyznaczyć moduł E_2 na powierzchni torowiska, gdzie górną warstwę układu tworzy warstwa ochronna.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przeprowadzonego przeglądu metod oceny podłoża gruntowego nawierzchni komunikacyjnych wynika, że projektowanie konstrukcji kolejowych oparte jest na modułach odkształceń wyznaczanych metodą VSS. Badania płytowe są jednak zalecane do kontroli w czasie robót budowlanych, natomiast w przypadku eksploatowanych linii czy dróg badania płytowe są bardzo trudne, a niekiedy niemożliwe do przeprowadzenia. Przedstawiona metoda określania nośności podłoża budowli komunikacyjnych sondą dynamiczną może służyć do oceny nośności przypowierzchniowej od 0,5 do nawet 3,0 m warstwy gruntu, znacznie większej niż badania VSS ($1 \div 1,5$ średnicy płyty badawczej, to jest $30 \div 45$ cm). Sondowania dynamiczne są łatwe do przeprowadzenia, nie wymagają rozbierania badanej konstrukcji oraz nie potrzebują przeciwwagi. Oprócz tego zalecanymi sondowaniami dynamicznymi są:

- do badania wystarczą 2 osoby,
- badanie trwa krótko, około $0,5 \div 1$ godziny,
- wprowadzenie sondy do podłoża jest łatwe i możliwe bez usuwania podsypki,
- niepotrzebna jest rozbiórka konstrukcji podtorza,
- możliwe jest głębsze rozpoznanie podłoża, do 3,0 m.

LITERATURA

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, 1993.
2. Analizy i Projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Praca zespołowa pod kierunkiem prof. Józefa Judyckiego, WKŁ 2014.
3. ASTM D6951/D6951M-09 Standard Test Method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications.
4. DIN 18134 Determination the deformation and strenght characteristics of soil by the plate loading test.
5. Id-3 Warunki Techniczne utrzymania podtorza kolejowego. PKP PLK S.A. 2009.
6. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych; Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014.
7. PN-S-02205 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
8. PN-S-06102 Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie.
9. Powell W. D, Potter J. F, Mayhew H. C i Nunn M. E, „The Structural Design of Bituminous Roads”. Report LR1132; TRRL, 1984.
10. Roland GOURVES “Comparison qd/qc in a calibration chamber” Laboratoire Génie Civil Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, France SOL-SOLUTION Etudes Géotechniques, Riom, France.
11. Supplementary Technical Terms and Conditions of Contract and Guidelines For Earthworks in Road Construction ZTVE-StB 94. Issue 1994 as amended in 1997.
12. The Panda light-weight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction THE PANDA. D. D.Langton, Soil Solution Ltd, 8 Marlowe Court, Macclesfield, Cheshire, SK11 8AY.
13. XP P 94-105 Sols : Reconnaissance et essais. Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétrömètre dynamique à énergie variable – Principe et méthode d'étalonnage du pénétrömètre – Exploitation des résultats – Interprétation.