

Łucjan Siewczyński, Ryszard Porębski

Podtorze odcinka doświadczalnego nawierzchni kolejowej na CMK

Dla przygotowywanej modernizacji Centralnej Magistrali Kolejowej, z przystosowaniem jej do prędkości pociągów co najmniej 300 km/h, oraz do budowy i użytkowania dróg kolejowych dużych prędkości w Polsce, przyjęto harmonogram badań i obserwowanej eksploatacji – głównie podtorza i nawierzchni – na odcinkach doświadczalnych, zlokalizowanych na linii CMK.

Odcinki te umożliwiają prowadzenie badań terenowych i obserwacji możliwych do zastosowania w warunkach polskich rozwiązań konstrukcyjnych nawierzchni i podtorza na liniach kolei dużych prędkości. Z planowanych miejsc badawczych, jako pierwszy, zbudowano odcinek doświadczalny od km 170,900 do

km 181,400 CMK, przeznaczony do obserwacji i weryfikacji konstrukcji nawierzchni przewidywanej dla modernizacji tej linii. Obserwowane i porównywane konstrukcje nawierzchni kolejowej powinny być zbudowane na podtorzu o takich samych właściwościach na całej długości odcinka doświadczalnego, według aktualnych wymagań obowiązujących dla konstrukcji górnej strefy podtorza modernizowanego, z uwzględnieniem właściwości jego gruntów.

W artykule przedstawiono wyniki geotechnicznego rozpoznania podtorza, przeprowadzonego w styczniu 2008 r., przed przystąpieniem do budowy odcinka doświadczalnego [1], oraz wyniki badań przeprowadzonych w lipcu 2009 r. – po jego zbudowaniu [2]. Wyniki badań powykonawczych powinny stanowić podstawę do dalszych okresowych obserwacji porównawczych.

Opis podtorza i badań geotechnicznych

Badania podtorza zostały przeprowadzone przy zastosowaniu odwiertów i sondowań lekką sondą dynamiczną z końcówką stożkową oraz pomiarów modułów odkształcenia na torowisku toru nr 1, w miejscach oddległych od siebie o 100–200 m. Pomiarów modułów, wiercenia i sondowania wykonane były na powierzchni torowiska pod warstwą podsypki, w strefie między końcami sąsiednich podkładów. Na rysunku 1 pokazano przygotowane do pomiarów modułów stanowiska z wybraną podsypką. W warstwie podsypki i na powierzchni torowiska widoczne są materiały geosyntetyczne zastosowane jako zbrojenie podsypki (geosiatki) lub jako warstwa separacyjna (geowłóknina).

Program badań przewidywał również, że we wszystkich badanych miejscach pomierzona zostanie grubość podsypki oraz przeprowadzona będzie inwentaryzacja warstwy ochronnej podtorza. Oprócz prac terenowych wykonano również w niezbędnym zakresie badania laboratoryjne gruntów ocenianego podtorza.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie, w styczniu 2008 r., prowadzono prace na części odcinka doświadczalnego od km 170,900 do km 174,000. Na długości 3,1 km linii wykonano 32 otwory badawcze, wiercone, głębokości do 3,0 m, oraz 14 sondowań, przeprowadzono 32 pomiary modułów odkształcenia podtorza aparaturą VSS z płytą o średnicy 30 cm, pobrano próbki gruntów do badań laboratoryjnych.

Drugi etap badań, w lipcu 2009 r., obejmował przeprowadzenie uzupełniających badań geotechnicznych i inwentaryzacyjnych powykonawczych na wybranych następujących częściach odcinka doświadczalnego:

- 1 część (odcinek 1) – od km 172,400 do km 173,400 (11 pomiarów sprawdzających modułów odkształcenia podtorza, inwentaryzacja konstrukcji);
- 2 część (odcinek 2) – od km 178,500 do km 179,500 (badania geotechniczne – 6 otworów, 6 sondowań, 10 pomiarów modułów odkształcenia, inwentaryzacja konstrukcji);
- 3 część (odcinek 3) – od km 180,400 do km 181,400 (badania geotechniczne – 6 otworów, 6 sondowań, 10 pomiarów modułów odkształcenia, inwentaryzacja konstrukcji).



Rys. 1. Stanowiska do pomiaru modułów podtorza – zbrojenie podsypki geosiatką i geowłókniną na torowisku, podsypka wzmocniona geosiatkami

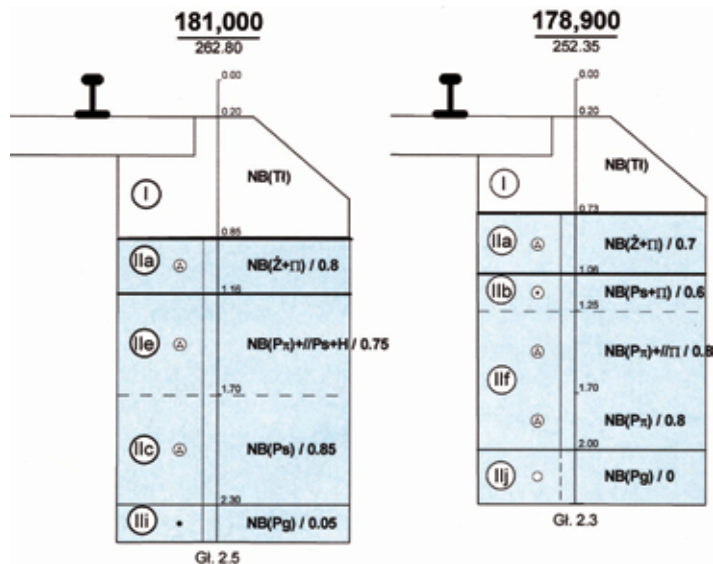
Na całej długości odcinka doświadczalnego od km 170,900 do km 181,400 podtorze stanowi nasyp o zmiennej wysokości od około 1,0 m (km 172,100) do około 6,5 m (km 174,400).

W podłożu pod nasypem (odcinek 1) stwierdzono obecność gruntów spoiстых – zwiertelin gliniastych, lokalnie przykrytych piaskami wodnolodowcowymi, a gdzieśgdzie glebą. Grunty podłoża osiągnięto w nielicznych miejscach wierceniami z torowiska. Grunty spoiyste były w stanach od półzwartego do plastycznego ($I_L = 0,00 \div 0,33$), natomiast piaski w stanie średnio zagęszczonym ($I_D = 0,45$).

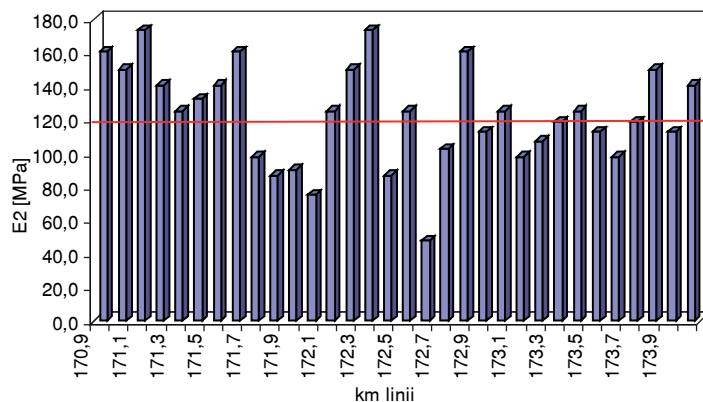
Nasypy zbudowane są z piasków średnich, które występują bezpośrednio pod nawierzchnią, pod nimi zaś wbudowane zostały grunty spoiyste w postaci zwierteliny gliniastej. W nasypie piasek występuje głównie w stanie średnio zagęszczonym ($I_D = 0,41 \div 0,68$), zwiertelina gliniasta pozostawała w stanie półzwarłym i twardoplastycznym ($I_L = 0,00 \div 0,22$). Grunty były wilgotne, nie stwierdzono obecności wody gruntowej w podłożu ani w nasypie.

W podłożu pod nasypem (odcinek 2) stwierdzono obecność gruntu niespoistego przykrytego warstwą gleby (wykonano jeden otwór przez nasyp do podłoża). Piaski były w stanie średnio zagęszczonym ($I_D = 0,50$).

Nasypy na odcinkach 2 i 3 zbudowane są z gruntów niespoistych o różnej granulacji (piasków pylastych, piasków drobnych, piasków średnich, żwirów) oraz gruntów mało spoiстых (piasków gliniastych, pyłów piaszczystych, pospółek gliniastych). W nasypie grunty niespoiste występują głównie w stanie zagęszczonym ($I_D > 0,70$) lub średnio zagęszczonym ($I_D = 0,40 \div 0,60$). Grunty spoiyste pozostawały w stanie półzwarłym do plastycznego ($I_L = 0,00 \div 0,25$). Przykładowe profile geotechniczne opracowane na podstawie przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Profile geotechniczne badanego podtorza w km 178,900 i 181,000



Rys. 3. Pomierzone na odcinku 1 moduły wtórnego odkształcenia podtorza podczas pierwszego etapu badań

Górna strefa podtorza przed przebudową

Na podstawie przeprowadzonych w latach 2008 i 2009 badań gruntów podtorza można przeprowadzić analizę warunków geotechnicznych w jego górnej strefie, to jest do głębokości 1,50 m, licząc od główki szyny toru w miejscu badań.

Na odcinku 1 piaski średnie stwierdzone bezpośrednio pod podsypką, pełniły funkcję warstwy ochronnej. Warstwa ta wykazywała zmienną grubość na długości zbadanej części, przy czym grubość minimalna wynosiła 20–25 cm. Piasek w górnej strefie podtorza wykazywał stan od zagęszczonego ($I_D = 0,80$) do średnio zagęszczonego ($I_D = 0,50$). Wyniki badań uziarnienia 32 próbek tych piasków, pobranych z podtorza bezpośrednio pod podsypką, wykazują, że piaski nie spełniały wymagań stawianych materiałom na warstwy ochronne, szczególnie cechowały się małymi wartościami wskaźnika różnoziarnistości $U = 2,2\text{--}3,1$ oraz współczynnika wodoprzepuszczalności $k = (0,61\text{--}1,62) \times 10^{-5} \text{ m/s}$ [3]. Oprócz niedostatecznej lokalnie grubości (20–25 cm), warstwa z piasków średnich miała także niedostateczne zagęszczenie, potwierdzone wartościami wskaźnika odkształcenia I_0 , zawierającymi się w przedziale 1,52–4,06, ze średnią wartością 2,40, przy czym dla wymaganego przepisami zagęszczenia powinien on wynosić $I_0 \leq 2,20$. Wskaźnik ten, jako iloraz wartości modułu wtórnego i pierwotnego odkształcenia, określony został na podstawie pomierzonych modułów odkształcenia. Wartości modułów wtórnego odkształcenia zawarte były w przedziale od 47,9 do 173,1 MPa, z wartością średnią 122,5 MPa i odchy-

niem standardowym 29,6 MPa oraz współczynnikiem zmienności 24,2%. Niejednorodność odkształcalności przedstawiono na rysunku 3, na którym zestawione są pomierzone na długości odcinka wartości modułów wtórnego odkształcenia podtorza.

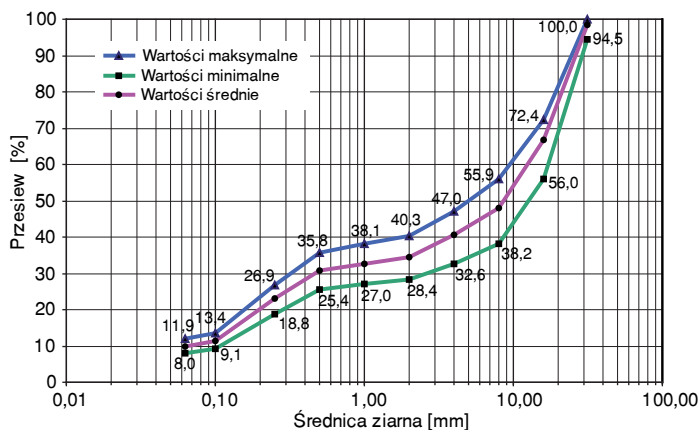
Na odcinku 2 nie przeprowadzono badań geotechnicznych przedwykonawczych. Z badań wykonanych po wbudowaniu warstwy ochronnej wynika, że w górnej strefie podtorza znajdują się piaski średnie, piaski pylaste i piaski gliniaste. Piaski niespoiste są w stanie zagęszczonym ($I_D = 0,80$) do średnio zagęszczonego ($I_D = 0,60$). Piasek gliniasty małospoisty był twardoplastycznym ($I_L = 0,00$). Na podstawie tych parametrów stanów gruntów można wnioskować, że przed wbudowaniem warstwy ochronnej moduły wtórnego odkształcenia podtorza pod podsypką, przy założeniu, że grunty te pełniły zadania warstwy ochronnej, przyjmowały wartości od 60 do 100 MPa.

Na podstawie badań na odcinku 3, wykonanych po zbudowaniu warstwy ochronnej, można przyjąć, że pod podsypką nawierzchni znajdowały się grunty budujące nasyp, a więc pospółka gliniasta, piasek gliniasty i piasek pylasty w stanach odpowiednio twardoplastycznym ($I_L = 0,25 \div 0,05$) lub zagęszczonym ($I_D = 0,70$), co pozwala wnioskować o module odkształcalności podtorza w strefie torowiska o wartościach 30–100 MPa, gdyby grunty te stanowiły jednocześnie materiał warstwy ochronnej.

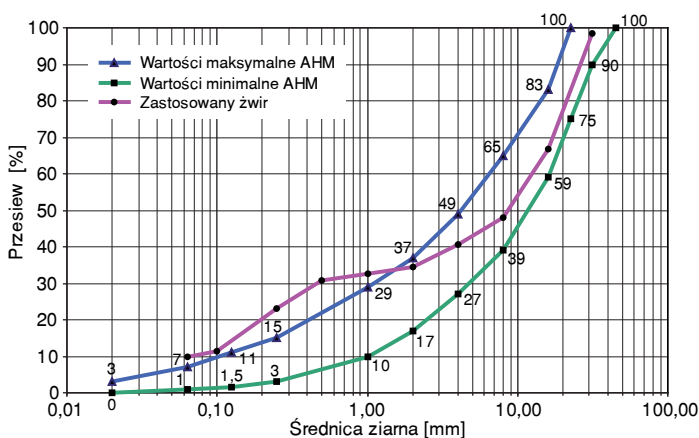
Na podstawie wyników badań podtorza na odcinku nr 1, do obliczeń grubości warstwy ochronnej przyjęto moduł projektowy $E_{min} = 120$ MPa i przedstawiono dwa warianty warstw, to jest warstwę podwójną z niesortu kamiennego i kłińca o łącznej grubości 40 cm lub warstwę pojedynczą o grubości 50 cm, na geowłókninie i z geosiatką we właściwych miejscach [3]. Przewidywano wykonawstwo przy zastosowaniu maszyn do robót ziemnych.

Opis zmodernizowanego podtorza

Podtorze na całym odcinku doświadczalnym zostało przebudowane poprzez wykonanie wymiany gruntów w górnej strefie poniżej torowiska przy zastosowaniu pociągu do napraw podtorza z maszyną AHM. Jako warstwę ochronną wzmacniającą podtorze zastosowano żwir. Warstwę wbudowano na całej szerokości torowiska toru nr 1. Podczas badań geotechnicznych pomierzono grubości wbudowanej warstwy ochronnej. Pomiary wykonano w rejonie końca podkładów w punktach odległych o 100 m. Grubości warstwy ochronnej są zróżnicowane w poszczególnych punktach pomiarowych, przy czym średnia grubość warstwy jest zbliżona do 30 cm na każdym z trzech badanych odcinków. I tak na odcinku 1 średnia grubość warstwy ochronnej wynosi 32 cm przy odchyleniu standardowym 5,0 cm, na odcinku 2 średnia grubość wynosi również 32 cm przy odchyleniu standardowym 7,1 cm, a na odcinku 3 odpowiednio 29 cm i 0,7 cm.



Rys. 4. Obwiednia krzywych i uśredniony wykres uziarnienia przebadanych próbek żwiru zastosowanego na warstwę ochronną



Rys. 5. Wykres uziarnienia żwiru zastosowanego na warstwę ochronną na tle zalecanych granicznych krzywych uziarnienia materiałów wbudowywanych maszyną AHM

Do budowy warstwy ochronnej zastosowano materiał naturalny w postaci mocno zapyłonego żwiru. Jego uziarnienie przedstawiono na rysunku 4.

Materiał ten zawiera ponad 60% frakcji żwirowej oraz około 10% frakcji pyłowej. Jest on mocno zróżnicowany pod względem uziarnienia. Wskaźnik różnoziarnistości U dla przebadanych próbek wynosił od 127 do 275, a wartość średnia $U_{sr} = 216$ i jest dużo większa od wartości wymaganej. Średnia wartość wskaźnika wygięcia krzywej uziarnienia $C_{sr} = 0,30$ nie osiąga granicznej wartości (1 ÷ 3), co wynika ze zbyt małej zawartości frakcji piaszczystej z przedziału 0,25 do 2,0 mm.

W przypadku warstw ochronnych wbudowywanych maszyną AHM zaleca się [4], aby materiał stosowany na warstwy ochronne spełniał szereg dodatkowych wymagań, przy czym ze względu na właściwe uziarnienie powinien to być niesort kamienny 0/31,5, którego uziarnienie powinno zawierać się między granicznymi krzywymi uziarnienia, co pokazano na rysunku 5.

Na krzywe graniczne nałożono uśredniony wykres uziarnienia żwiru zastosowanego na warstwę ochronną na odcinkach doświadczalnych. Analiza tych wykresów potwierdza, że zastosowany żwir zawiera zbyt mało frakcji piaszczystej oraz za dużo frakcji pylastej. Materiał ten wymagałby doziarnienia piaskiem grubym.

Ocena zagęszczenia warstwy ochronnej na odcinkach nr 2 i 3 na podstawie wyników sondowań wskazuje, że stopień zagęszczenia I_D zawiera się w przedziale wartości od 0,65 do ponad 0,85. Wymagane przepisami zagęszczenie górnej strefy podtorza określone jest wskaźnikiem zagęszczenia, którego wartość powinna spełniać warunek $I_S > 1,00$. Oznacza to, że wymagane zagęszczenie w wielu miejscach nie zostało uzyskane. Potwierdzają to również obliczone na podstawie pomierzonych modułów pierwotnych i wtórnych wskaźniki odkształcenia I_D , które dla wymaganego przepisami zagęszczenia warstwy ochronnej powinny wynosić nie więcej niż 2,2. Obliczone dla poszczególnych odcinków wartości średnie wskaźnika odkształcenia są równe: dla odcinka 1 $I_{Dsr} = 1,94$ przy rozrzucie od 1,75 do 2,35; dla odcinka 2 $I_{Dsr} = 2,60$ przy rozrzucie od 1,84 do 4,00, a dla odcinka 3 $I_{Dsr} = 2,52$ przy rozrzucie od 1,59 do 4,04.

Odkształcalność podtorza po modernizacji

Podczas badań powykonawczych przeprowadzono pomiary modułów odkształcenia podtorza na powierzchni torowiska. Dla ustalenia płyty VSS na torowisku, usunięto od strony ławy w strefie końców podkładów warstwę podsypki tłuczniowej. Podczas badań płytę obciążano do nacisku jednostkowego 0,35 MPa a moduły obliczano dla obciążeń z zakresu 0,15–0,25 MPa. Pomierzone na trzech odcinkach badawczych wartości modułów wtórnych podtorza zestawiono na rysunku 6.

Wartości średnie modułów na poszczególnych odcinkach są zbliżone. I tak na odcinku:

- 1 wartość średnia modułu wtórnego wynosi 95,6 MPa, a odchylenie standardowe jest równe 19,8 MPa,
- 2 wartość średnia modułu wtórnego wynosi 90,1 MPa, a odchylenie standardowe jest równe 6,4 MPa,
- 3 wartość średnia modułu wtórnego wynosi 93,2 MPa, a odchylenie standardowe jest równe 19,0 MPa,

Na odcinkach nr 1 i 3 zmienność wartości modułów jest duża; najmniejszą wartość modułu 68,2 MPa stwierdzono na odcinku 1.

Na odcinku 1 od km 172,400 do km 173,400 pomiary modułów podtorza zostały wykonane zarówno podczas pierwszego etapu badań – przed przebudową podtorza i nawierzchni, jak i podczas drugiego etapu badań – po przebudowie. Wyniki pomierzonych wartości modułów wtórnych podtorza na tym odcinku zestawiono na rysunku 7.

Pierwszy etap pomiarów wykazał, że wartość średnia modułów wtórnych na tym odcinku wynosiła 109,8 MPa przy odchyleniu standardowym równym 28,2 MPa i jest większa od wartości średniej modułu pomierzonego na wbudowanej warstwie ochronnej równej 95,6 MPa z odchyleniem standardowym 19,8 MPa. Podtorze zmodernizowane charakteryzuje się mniejszą zmiennością modułów niż podtorze przed przebudową (co jest widoczne na rys. 4), o czym świadczy obliczony współczynnik zmienności modułów, który zmniejszył się z 25,7% do 20,7%. Podtorze zmodernizowane jest zatem mniej zróżnicowane pod względem odkształcalności na długości toru, a więc bardziej jednorodne.

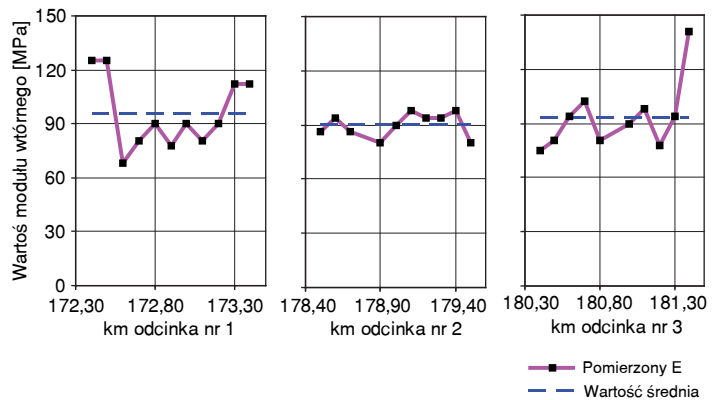
Podsumowanie

Analiza wyników badań przeprowadzonych podczas obydwu etapów prac pozwala stwierdzić, że podtorze linii CMK w obecnym stanie, to jest przed modernizacją, nie spełnia warunków wymaganych dla górnej strefy podtorza linii Kolei Dużych Prędkości pod względem rodzaju gruntów, ich stanu i nośności. Podobnie należy ocenić przydatność tego podtorza do badań porównawczych różnych konstrukcji nawierzchni kolejowej.

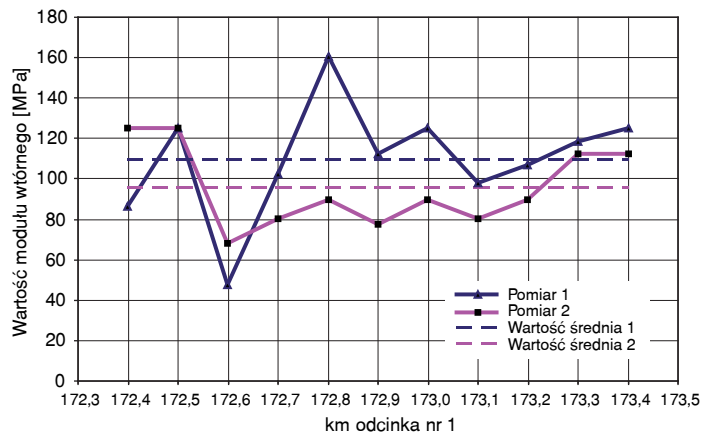
Polepszenie właściwości podtorza można osiągnąć poprzez wbudowanie warstwy ochronnej, to jest przez wymianę gruntów w strefie podtorza pod nawierzchnią. Warstwa ochronna powinna być projektowana na podstawie wyników badań geotechnicznych przeprowadzonych przed wymianą gruntów. Proces wbudowywania warstwy powinien być sprawdzany badaniami geotechnicznymi do korygowania parametrów prac maszyn (pociągu) wykonujących przebudowę. Do budowy warstwy powinny być stosowane kwalifikowane materiały (kruszywa) co ułatwi przebudowę i przyczyni się do zwiększenia trwałości konstrukcji strefy podtorza pod nawierzchnią.

Wnioski

1. Parametry materiałowe i nośności w górnej strefie podtorza są zbliżone do wartości wymaganych.
2. Można przewidywać, że po pewnym okresie normalnej eksploatacji toru, parametry nośności i odkształcalności podtorza z warstwą ochronną polepszą się w stosunku do ich stanu obecnego. Obecnie tor nie jest eksploatowany.
3. W celu stwierdzenia zmian parametrów warstwy ochronnej pod wpływem eksploatacji, należy wykonywać okresowe badania odkształcalności (pomiary VSS) w miejscach wykonanych obecnie badań.
4. W przygotowywanej budowie kolejnych odcinków doświadczalnych i przewidywanej modernizacji podtorza będą musiały być uwzględnione zwiększone wymagania wynikające z wprowadzonej aktualizacji przepisów o podtorzu.
5. Na całym odcinku doświadczalnym wbudowano pojedynczą warstwę ochronną ze żwiru, przy zastosowaniu pracy pociągu do napraw podtorza z maszyną AHM.
6. W czasie przebudowy, efekty pracy maszyn lub pociągu do napraw podtorza powinny być sprawdzane metodami geotechnicznymi.



Rys. 6. Pomierzone wartości modułów wtórnych podtorza na odcinkach badawczych



Rys. 7. Pomierzone wartości modułów wtórnych podtorza podczas pierwszej i drugiej serii pomiarów na odcinku nr 1

Literatura

- [1] *Badania geotechniczne i ocena górnej strefy podtorza toru nr 1 na odcinku doświadczalnym w km 170,850–174,050 linii CMK*. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej. Poznań, luty 2008.
- [2] *Badania geotechniczne podtorza na linii CMK w torze nr 1 na wybranych trzech częściach odcinków doświadczalnych*. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej. Poznań, lipiec 2009.
- [3] Siewczyński Ł., Porębski R.: *Problemy modernizacji górnej strefy podtorza na przykładzie badań wykonanych na linii CMK*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym”. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Zakopane, 9–11 kwietnia 2008 r.
- [4] *Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3 (D-4)*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2004 r. i 2009 r.

Autorzy

dr hab. inż., prof. nadzw. Łucjan Siewczyński
Politechnika Poznańska

dr inż. Ryszard Porębski
Politechnika Poznańska