

Stan odkształcalności podtorza do odbioru po modernizacji

Lucjan Siewczyński

W artykule przedstawiona jest ogólna analiza wpływu zmian w sposobie obliczania wyników badań modułów odkształcenia oraz wymagań w projektowaniu i ocenie wykonawstwa wzmocnień górnej strefy podtorza, wprowadzonych w ostatnich latach do przepisów o podtorzu, na wyniki modernizacji. Opracowane są przykłady na podstawie wyników badań odkształcalności podtorza z gruntów niespoistych przeprowadzonych podczas modernizacji linii kolejowej E-20.



dr hab. inż.
Lucjan Siewczyński
prof. nadzw.,
Politechnika Poznańska,
Instytut Inżynierii
Lądowej

Dla potrzeb modernizacji podtorza, podczas kolejnych etapów jej realizacji, przeprowadzane są badania geotechniczne, a ich wyniki są podstawą oceny jego stanu, wymagań projektowych i potrzeb naprawczych oraz końcowych wymagań, a więc także oceny przebiegu robót i efektów wykonania. Według poprzednio obowiązujących przepisów [2,3] warunki projektowe były jednocześnie końcowymi wymaganiami odbiorczymi. W kolejnych opracowaniach przepisów o podtorzu rozwijane były elementy procesu projektowania i kontroli warstwy ochronnej z zastosowaniem modułów odkształcenia układu warstwa ochronna – podtorze. Ulepszenia te i zmiany dotyczą oceny podtorza wzmocnianego z innym równaniem w analizie wyników badań na torowisku i określenia wartości modułów projektowych [3] oraz oceny efektów zastosowania projektu wzmocnienia górnej części podtorza warstwą ochronną z uwzględnieniem wymaganych, nie projektowych wartości modułów [4]. Zmiany w przepisach obejmują więc warunki projektowania grubości warstwy, ocenę wykonawstwa i końcowy efekt modernizacji, czyli główne etapy modernizacji podtorza.

Zmiany dokonane w przepisach wywierają wpływ na proces budowy warstwy ochronnej, a szczególnie na dozwolony stan odkształcalności podtorza po zakończeniu robót modernizacyjnych, różny od projektowego stanu odkształcalności. Analizę znaczenia zmian dla przebiegu modernizacji

przeprowadzono na podstawie wyników badań modułów odkształcenia podtorza pomierzonych podczas modernizacji linii kolejowej E-20, z powodu braku wyników pełnego cyklu praktycznych zastosowań zmienionych wymagań.

Wymagania projektowe i wykonawcze

Badania geotechniczne zawierające próbne obciążenia płytą stanowią część całego procesu modernizacji podtorza, pozwalają obliczyć wartości modułów odkształcenia i wskaźników odkształcenia jego gruntów i materiałów ziarnistych. Odniesienie wyników tych badań do wartości wymaganych (Tab.1) w przepisach [5], pozwala przeprowadzać bieżącą kontrolę przebiegu naprawy podtorza, dokonać sprawdzenia efektu przebudowy oraz ocenić zastosowanie całego projektu wzmocnienia. W kolejnych przepisach (Tab.1) wykazane różne wartości modułu odkształcenia podtorza mierzone na torowisku, zróżnicowane według podobnych przypadków stanów użytkowania podtorza i kategorii linii, stanowią jednocześnie zmianę całego sposobu oceny odkształcalności podtorza. Oprócz wskazanych w tabeli 1 różnic wartości, zmiany dotyczą także uwzględniania wpływu warunków gruntowo-wodnych na minimalne wartości modułów wymaganych oraz rozdzielenia wymaganych wartości modułów projektowych i wymaganych wartości modułów odbiorczych.

Uwzględnienie wpływu warunków gruntowo-wodnych w podtorzu polegało na tym, że do 2004 r. minimalne wartości modułów odkształcenia wymagane w projektach i w odbiorach robót podtorzowych tej samej linii, zróżnicowane były ze względu na warunki gruntowo-wodne w górnej strefie podtorza:

$$E_{\min} = k * E_{\text{tabl}} \quad (1)$$

gdzie: E_{tabl} – wartości modułów stabelaryzowane w przepisach;

k – współczynnik redukujący ze względu na

Tab.1. Minimalne wartości modułu odkształcenia podtorza linii magistralnych mierzonego na torowisku w MPa; projektowe (*) i wymagane (**) [2,3,4]

		Kategoria linii
Przepisy	Linie	0
D-4	nowe i modernizowane	120
	eksploatowane	80
Id-3 2004 r.	nowobudowane	120
	modernizowane i remontowane	100
Id-3 2009 r.	nowobudowane i modernizowane $V \leq 160 \text{ km/h}^*$	120
	modernizowane $V \leq 160 \text{ km/h}^{**}$	70
	eksploatowane	70

warunki gruntowo-wodne w podtorzu ($k = 1,0; 0,9; 0,8$).

Na tej podstawie podtorze w różnych miejscach tej samej linii kolejowej otrzymywało inne wymagania projektowe (np. 120 MPa, 108 MPa, 96 MPa), skąd grubsza warstwa ochronna dla podtorza w trudnych warunkach i słabsza warstwa dla podtorza w warunkach dobrych. Obecnie nie zastosowano możliwości uwzględnienia wpływu warunków w górnej strefie podtorza na wymagane wartości modułu projektowego [4].

Sprawdzenie efektu przebudowy polegało na porównaniu wartości modułu wtórnego odkształcenia E_{q2} układu warstwa ochronna – podtorze, pomierzonej na nowym torowisku, z wartością modułu projektowego; dla przyjęcia robót wartość ta powinna być co najmniej równa wartości projektowej. Stan zagęszczenia podtorza i warstwy sprawdzano określając wskaźnik zagęszczenia lub wskaźnik odkształcenia.

W obecnie obowiązującej instrukcji o podtorzu (2009 r.) do wyróżnionych stanów linii kolejowych i stanów podtorza przypisano pary liczb jako minimalne wartości modułów odkształcenia podtorza mierzonych na torowisku, o niejednakowym znaczeniu dla modernizacji podtorza; jedna z liczb jest wymaganiem projektowym dla obliczania konstrukcji wzmocnienia, druga z liczb stanowi wymaganie dla odbioru wykonanej konstrukcji wzmocnienia. Na przykład w przypadku linii magistralnej modernizowanej do prędkości pociągów 160 km/h w projektowaniu wzmocnienia podtorza $E_{proj} = 120$ MPa, lecz jako wymagany moduł na nowym torowisku (na górnej powierzchni warstwy ochronnej) należy przyjąć wartość nie mniejszą niż 70 MPa, z uwzględnieniem możliwości uzyskania tej wartości w występujących warunkach gruntowo-wodnych modernizowanej linii. Takiemu zmniejszonemu wymaganiu odbiorczemu towarzyszy stosowny stan zagęszczenia wbudowanych materiałów warstwy ochronnej; według instrukcji należy oczekiwać powiększenia się zagęszczenia podtorza i wartości modułów w warunkach gruntowo-wodnych podtorza modernizowanej linii, pod działaniem eksploatacyjnych oddziaływań pojazdów. Przedział wartości modułów odkształcenia (E_{g2} , E_{proj}) może być źródłem znacznej niejednorodności wzmocnionej górnej części podtorza, gdyż zagęszczenie eksploatacyjne podtorza będzie proporcjonalne do stanu podtorza, na którym warstwa będzie eksploatowana.

Najmniejsza wartość modułu odkształcenia po wykonaniu warstwy ochronnej może wynosić około 60% wartości modułu odkształcenia przyjmowanego jako projektowy. Zmniejszenie wymagań może spowodować ograniczenia pracy maszyn i sprzętu zagęszczającego, lecz przyczyna zmniejszonych wartości modułów po zakończeniu robót może być spowodowana także niewłaściwym rozpoznaniem geotechnicznym przed projektem, rozpoznaniem wykonanym w niewłaściwym okresie, pogorszeniem warunków gruntowo-wodnych w podtorzu podczas budowy, niedostatecznym zagęszczeniem podtorza, niedomiarem grubości warstwy, jakością materiałów zastosowanych do budowy warstwy.

Niektóre z tych czynników będą trudne do naprawienia po oddaniu podtorza do eksploatacji – będzie ona wykazywała skutki trwałej niezmienniej wartości przedziału $E_{proj} - E_{g2}$, czyli ok. $0,4 E_{proj}$.

Określanie modułów odkształcenia

Podstawą zmiany sposobu określania modułów odkształcenia podtorza jest interpretacja fizyczna badań płytą, wynikająca z zastosowania zmienionego równania do

analizy wyników pomiaru próbnego obciążenia podtorza. Wielkość modułu odkształcenia określa wzór:

$$E_{g1} = 1 - \nu \quad \omega \quad D \quad \Delta p \quad (2)$$

gdzie:

- ν – współczynnik Poissona;
- ω – współczynnik wpływu kształtu płyty;
- D – średnica płyty;
- Δp – przedział obciążenia uwzględniony w obliczeniach;
- Δy – osiadanie w przedziale obciążenia.

Dla próbnego obciążenia płytą okrągłą przekształcono równanie pomijając wpływ przewarstwień i zakładając jej podatność ($\omega = 1,0$);

skąd:

$$E = 2 * r * \frac{\Delta p}{\Delta y} \quad (3)$$

gdzie:

r – promień płyty do próbnego obciążenia.

Równanie było stosowane do oceny podtorza do 2005 r. [3]. Przyjmując $\nu = 0,2 - 0,4$ dla różnych gruntów oraz $\omega = 0,79$ dla sztywnej powierzchni obciążającej o kształcie okręgu można napisać w przybliżeniu:

$$E_{g1} = 1,5 * r * \frac{\Delta p}{\Delta y} \quad (4)$$

Wzór pozwala wyznaczyć moduł odkształcenia E_{g1} gruntu na podstawie próbnego obciążenia lub moduł wtórny odkształcenia E_{g2} z krzywej osiadań przy powtórnym obciążeniu płyty (rys. 1). Sposoby wyznaczenia modułów odkształcenia przy zastosowaniu albo równania (3) albo równania (4) różnią się w rzeczywistości założeniami co do warunków przebiegu badania: podatności lub sztywności płyty stalowej do obciążeń podtorza. Wartości wyliczone przy założeniu warunków sztywności płyty są o 25 % mniejsze od wartości wyliczonych dla założenia warunków podatności płyty.

Przykłady stanów odkształcalności podtorza według modułów projektowych i odbiorczych

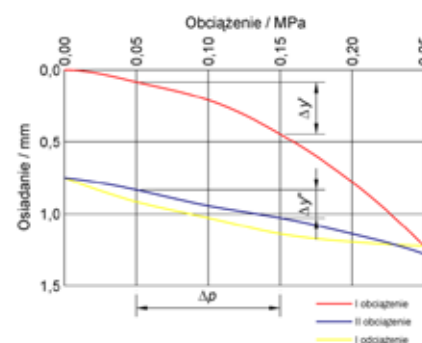
Do analizy skutków zmian w przepisach o podtorzu na efekty jego modernizacji wykorzystano zbiory wyników z przebudowy podtorza odcinka linii kolejowej E-20, w warunkach zbliżonych do obecnie wymaganych i umożliwiających wykazanie znaczenia wpływów poszczególnych zmian. Na konieczność takiego założenia wpłynął brak praktycznych zastosowań oddzielonych od siebie wymagań projektowych i odbiorczych obowiązujących od 2 lat, w związku z czym brak jest stosownych zbiorów wartości modułów odkształcenia jako wyników badań powykonawczych.

Dla potrzeb procesu modernizacji pod-

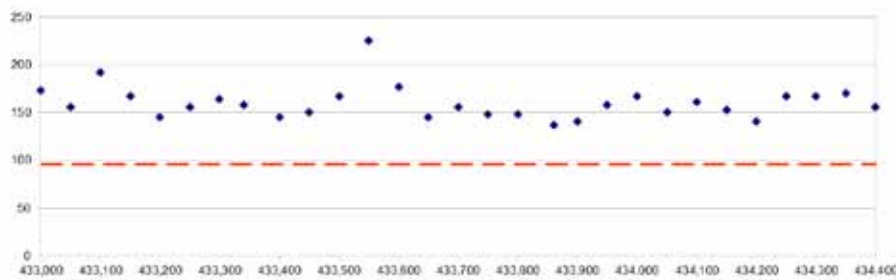
torza torów na przystanku osobowym Drzewce linii kolejowej E-20, przeprowadzono badania modułów odkształcenia od km 432,610 do km 435,100 dla kontroli robót budowy warstwy ochronnej, dokonywania korekt pracy maszyn zagęszczających i stwierdzenia osiągnięcia wymaganego stanu podtorza. Prace modernizacyjne wykonywane były maszynami do robót ziemnych. Podczas badań geotechnicznych do projektu modernizacji w strefie torowiska stwierdzono występowanie gruntów niespoistych o różnej granulacji; moduły wtórne odkształcenia z badań wykazały wartości mniejsze od 50 MPa. Dla takich warunków gruntowych przyjęto $E_{proj} = 0,8 * 120$ MPa = 96 MPa i określono warstwę ochronną jako pojedynczą ze żwiru o grubości 20 cm.

Na rys. 2 wykazane są wszystkie wartości modułów wtórnego odkształcenia z obciążeń próbnymi na nowym torowisku (na górnej powierzchni warstwy ochronnej ze żwiru) dla toru nr 1 od km 433,000 do km 434,400, a więc na losowo wybranej części długości przystanku, to jest potrzebnych tylko do korekty zagęszczenia oraz upoważniających do odbioru wbudowanej warstwy ochronnej – na tym odcinku toru nr 1 – 29 wartości. Badania odkształcalności przeprowadzone były w okresie 12-18.08.1999 r., w odstępach co 50 m w osi przyszłego toru. W związku z datą pomiarów do obliczenia wartości modułów stosowany był wzór ze współczynnikiem 2,0 (3).

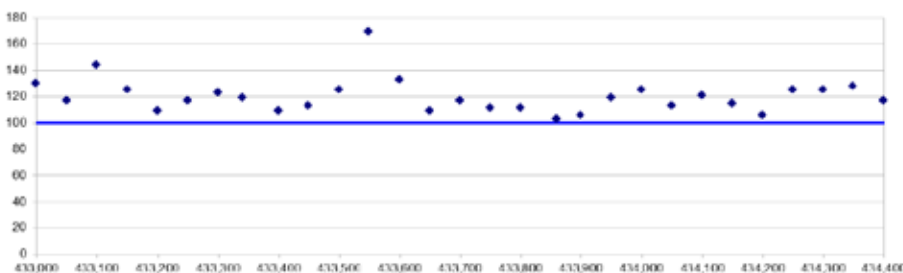
Wyniki badań na torowisku dla toru nr 1 przedstawiają wartości modułów odkształcenia z wszystkich obciążeń próbnymi, dokumentując spełnienie warunku $E_{g2} \geq E_{proj}$ według ówczesnych zasad ich określania, we wszystkich miejscach badań tego odcinka podtorza toru nr 1. Na rys. 3 wykazane są wartości modułów odkształcenia jak na rys. 2, a więc wszystkie wartości modułów wtórnego odkształcenia z obciążeń próbnymi na nowym torowisku dla toru nr 1, lecz wartości obliczone wzorem ze współczynnikiem 1,5 (4), a więc o wartości mniejszej o 25 % niż na rys. 2. Na rys. 3 wykazane są wartości modułów odkształcenia spełniające warunek $E_{g2} >$



1. Wykres przemieszczeń płyty podczas badania płytą VSS



2. Zbiór wartości modułów wtórnego odkształcenia pomierzonych w 1999r. podczas modernizacji podtorza toru nr 1 na p.o. Drzewce linii kolejowej E-20; oznaczono zgodnie z [2] $E_{proj} = 96$ MPa



3. Zbiór wartości zredukowanych o 25% modułów wtórnego odkształcenia z 1999r. z modernizacji podtorza toru nr 1 na p.o. Drzewce linii kolejowej E-20; oznaczono zgodnie z [3] $E_{proj} = 100$ MPa

$E_{proj} = 100$ MPa, a więc stan odkształcalności podtorza dopuszczalny według wymagań poprzedniej instrukcji [3].

Na rys.4 przedstawione są wartości modułów odkształcenia jak na rys.3, a więc wszystkie wartości modułów z obciążeń próbnych na warstwie ochronnej o wartości mniejszej o 25 % niż na rys.2. Ponadto na rys.4 wykazane są wartości modułów odkształcenia spełniające warunek $E_{g2} \geq E_{wym} = 70$ MPa, a więc stan odkształcalności podtorza dopuszczalny według wymagań obecnej instrukcji [4].

Na rys.5 podane są tylko wartości modułów odkształcenia spełniające warunek $E_{g2} \geq E_{proj} = 120$ MPa, a więc stan odkształcalności podtorza wymagany przez instrukcje poprzednio obowiązujące.

Analiza odbiorczego stanu podtorza z gruntów niespoistych

Wskaźnik odkształcenia (iloraz wartości modułu wtórnego i wartości modułu pierwotnego) w poszczególnych miejscach pomiarowych odcinka podtorza dla toru nr 1 (Tab.2) przyjmował wartości od 3,18 do 13,65, jego średnia wartość wynosiła 6,22, odchylenie standardowe 2,23 a współczynnik zmienności 0,36. Wskaźnik odkształcenia określa zagęszczenie materiałów warstwy i podtorza pod nią i powinien wynosić od 2,2 (piaski, żwir) do 3,0 (pyły, gliny, niesorty). Biorąc pod uwagę rodzaje gruntów w górnej strefie podtorza, to jest niespoiste o różnym uziarnieniu, osiągnęte średnie zagęszczenie górnej strefy i warstwy ochronnej jest mniejsze od oczekiwanego.

Wyniki badań odkształcalności przepro-

wadzonych podczas modernizacji podtorza pozwoliły stwierdzić, że na omawianym odcinku (Tab.2), wartości modułów wtórnego odkształcenia warstwy i podtorza pod nią są w przedziale 136,36 – 225,00 MPa a zbiory modułów mają wartość średnią modułu 159,68 MPa, odchylenie standardowe 17,55 MPa i współczynnik zmienności 0,11. Po zredukowaniu wartości modułów o 25 % są one w przedziale 102,27 – 168,75 MPa z średnią 119,76 MPa i odchyleniem standardowym 13,16 MPa. Ponadto po przygotowaniu (zagęszczeniu gruntów) podtorza do budowy warstwy, pomierzono moduły odkształcenia stwierdzając wartości $E_{g2} = 93,75 - 257,14$ MPa, czyli po zredukowaniu o 25% wartości 70,31 – 192,86 MPa [11].

Dla podtorza w dobrych warunkach (grunty niespoiste, moduł odkształcenia $E_{g2} = 50$ MPa, $E_{proj} = 96$ MPa) zastosowano warstwę ochronną o grubości technologicznie minimalnej, czyli o grubości większej od potrzebnej według warunków projektowych, to jest $h = 20$ cm, w związku z czym na nowym torowisku pomierzono duże wartości modułów odkształcenia, wobec dużych wartości wskaźników odkształcenia (zagęszczenie mniejsze od oczekiwanego).

Z analizy statystycznej obu stanów odkształcalności podtorza, to jest według warunku $E_{g2} \geq 70$ MPa oraz według $E_{g2} \geq 120$ MPa (Tab.3) wynika, że obydwa stany wykazują znaczne różnice przedziałów wartości modułów odkształcenia, różnice odchylenia standardowego, a także różnice współczynnika zmienności wartości modułów. Korzystniejsze dla jakości podtorza są wyniki stanu według warunku $E_{g2} \geq E_{proj}$. Także wskaźnik odkształcenia w stanie podtorza według

tego kryterium wykazuje mniejsze odchylenie standardowe.

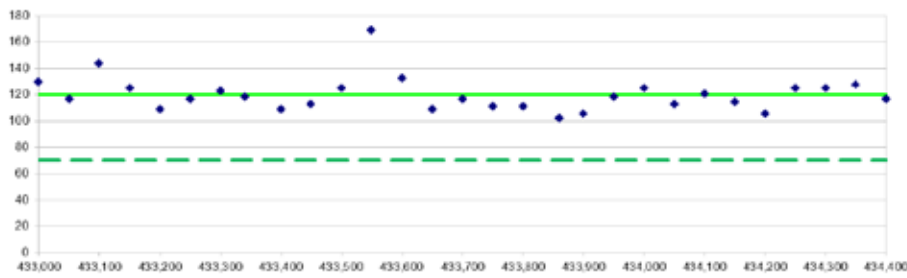
Na rys.6 przedstawione są zależności wartości modułów odkształcenia wtórnego gruntów niespoistych od stopnia ich zagęszczenia obliczone na podstawie zależności normowych [1]. Oznaczono wartości modułów przywoływane jako przykłady wartości minimalnych modułów projektowych lub wartości wymaganych, to jest 120 MPa, 100 MPa, 70 MPa. Rzędne (wartości modułów) tak oznaczone na wykresach zależności wyznaczają odcięte określające stan zagęszczenia gruntów podtorza i warstwy, gdy są nimi jednorodne grunty niespoiste żwiru i pospółki (Ż, Po), piaski grube i średnie (Pr,

Tab.2. Analiza statystyczna wyników z 1999r. badań odkształcalności podtorza odcinka toru nr 1 na p.o. Drzewce linii kolejowej E-20

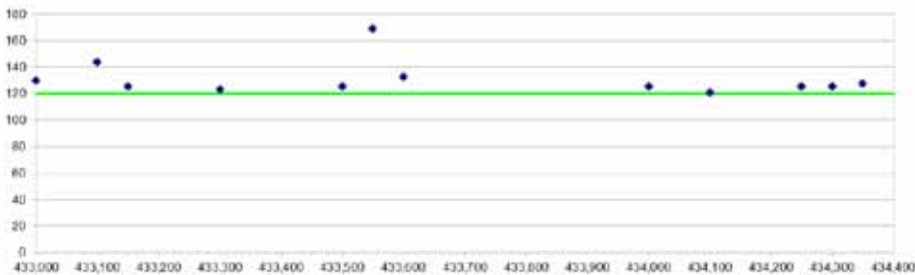
	Eproj = 120 MPa		
	Eg1	Eg2	Io
min	10,30	136,36	3,18
max	46,36	225,00	13,65
średnia	28,05	159,68	6,22
odchylenie standardowe	7,76	17,55	2,23
współczynnik zmienności	0,28	0,11	0,36

Ps) lub piaski drobne albo pylaste (Pd, Pn). Podtorze zbudowane z piasków grubych z modułem odkształcenia 120 MPa charakteryzuje się stopniem zagęszczenia $I_D = 0,70$ (przy granicy stanów średnio-zagęszczonego i zagęszczonego), natomiast z modułem odkształcenia 70 MPa posiada stopień zagęszczenia $I_D = 0,40$ (przy granicy stanów luźnego i średnio-zagęszczonego). Stosowanie wymaganych modułów odbiorczych o małych wartościach oznacza, że dopuszcza się jako wystarczające luźne lub średnio-zagęszczone stany podtorza i materiałów warstwy z gruntów niespoistych. Wśród wartości modułów minimalnych w tablicy zamieszczonej w instrukcji o podtorzu [4] najmniejsza wartość modułu wymaganego wynosi 40 MPa i na wykresach zależności (rys.6) wyznacza stany luźne gruntów niespoistych.

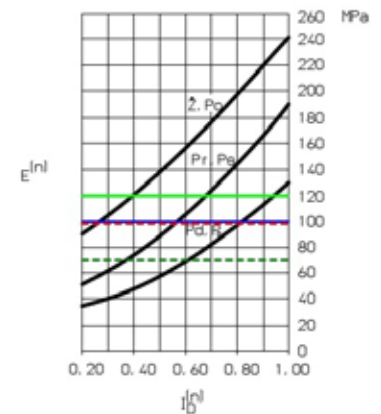
Posługując się wykresem zależności wartości $E(n)$ od I_D , wartościom modułów odkształcenia opisującym zbiór w Tab.3 można przyporządkować wartości I_D ; dla przypadku $E_{wym} = 70$ MPa dla przedziału wartości modułów wtórnego odkształcenia $E_{g2} = 102 - 168$ MPa wartości stopnia zagęszczenia wynoszą $I_D = 0,27 - 0,91$; dla przypadku $E_{wym} = E_{proj} = 120$ MPa dla przedziału wartości $E_{g2} = 120 - 168$ MPa wartości stopnia zagęszczenia wynoszą $I_D = 0,40 - 0,93$, gdy podtorze budują różne grunty niespoiste.



4. Zbiór wartości zredukowanych o 25% modułów wtórnego odkształcenia z 1999r. z modernizacji podtorza toru nr 1 na p.o. Drzewce linii kolejowej E-20; oznaczono zgodnie z [4] $E_{proj} = 120 \text{ MPa}$ i $E_{wym} = 70 \text{ MPa}$



5. Zbiór wartości zredukowanych o 25% modułów wtórnego odkształcenia pomierzonych w 1999r. podczas modernizacji podtorza toru nr 1 na p.o. Drzewce linii kolejowej E-20, spełniających warunki odbiorcze $E_{g2} \geq E_{proj} = 120 \text{ MPa}$; oznaczono zgodnie z [4] $E_{proj} = 120 \text{ MPa}$



1. Wykres przemieszczeń płyty podczas badania płytą VSS

Wnioski

- 1) Osobne kryteria projektowe i odbiorcze mogą skutkować zwiększoną niejednorodnością górnej strefy podtorza.
- 2) Zmniejszenie różnic wartości modułów projektowego i wymaganego sprzyjałoby jednorodności i niezawodności podtorza bez wad.
- 3) Należy rozważyć możliwość określenia wielkości wymaganych modułów odkształcenia z uwzględnieniem wartości modułów projektowych i parametrów stanu warunków gruntowo – wodnych w podtorzu. ◀

Materiały źródłowe:

- [1] Kostrzewski W.: Parametry geotechniczne gruntów budowlanych oraz metody ich oznaczania. W.P.P., wyd.III. Poznań 1998 r.
- [2] PKP: D-4 Instrukcja o utrzymaniu podtorza kolejowego. Warszawa 1993 r.
- [3] PKP PLK S.A.: Id-3 (D-4) Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. Warszawa 2004 r.
- [4] PKP PLK S.A.: Id-3 Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. Warszawa 2009 r.
- [5] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Wpływ zmian w przepisach o podtorzu na jego modernizację. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2010”, Zakopane 14-16 kwietnia 2010 r., str. 190-210.
- [6] Siewczyński Ł.: Problemy zmiany sposobu oceny odkształcalności podtorza. III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego”. Wrocław-Żmigród, 26-27.10.2006 r., str. 91-97
- [7] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Dopuszczalny stan odkształcalności podtorza po modernizacji. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Kolejnictwie”. Zeszyt Naukowo-Techniczny nr 154 Oddziału SITK RP w Krakowie. Kraków 2010 r., str. 501-515.
- [8] Siewczyński Ł.: Zmiana sposobu oceny odkształcalności podtorza w procesie inwestycyjnym. Konferencja Naukowo-Techniczna „Modernizacja linii kolejowych na przykładzie poznańskiego węzła kolejowego”. Poznań-Będlewo, 14-15.11.2006 r., str. 93-104,
- [9] Sysak J. red.: Drogi kolejowe. PWN, Warszawa 1986 r.
- [10] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 2005 r.
- [11] Zakład Dróg Kolejowych III. PP: Sprawozdanie z badań kontrolnych odkształcalności podtorza toru nr 1 podczas przebudowy p.o. Drzewce. Politechnika Poznańska 1999 r.

Tab.3. Analiza statystyczna zredukowanych o 25% wyników z 1999r. badań odkształcalności podtorza odcinka toru nr 1 na p.o. Drzewce linii kolejowej E-20

	Ewym = 70 MPa			Ewym = Eproj = 120 MPa		
	Eg1	Eg2	lo	Eg1	Eg2	lo
min	7,73	102,27	3,18	16,96	120,53	4,55
max	34,79	168,75	13,65	31,55	168,75	9,90
średnia	21,04	119,76	6,22	20,94	130,85	6,43
odchylenie standardowe	5,82	13,16	2,23	3,92	13,34	1,38
współczynnik zmienności	0,28	0,11	0,36	0,19	0,10	0,21