

Badania modeli podtorza z warstwą ochronną

Michał Pawłowski

Podczas modernizacji podtorza zdarzają się trudności z zapewnieniem jego wymaganych stanów odkształcenia i zagęszczenia. Ten stan rzeczy skłania do poszukiwania rozwiązań umożliwiających poprawę osiąganych efektów przebudowy. Jednym z nich jest rozpoznanie właściwości kruszyw kamiennych stosowanych na warstwy ochronne podtorza oraz określenie technologii ich stosowania. Zaprezentowano rezultaty laboratoryjnych testów modeli podtorza kolejowego z warstwą ochronną z niesortu kamiennego. Opisano przebieg i wyniki badań wstępnych, zasadniczych i kontrolnych. Na podstawie wyników oznaczeń wykazano wpływ wilgotności niesortu kamiennego na jego właściwości. Podano wnioski wynikające z przeprowadzonych doświadczeń.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 25.10.2012

data akceptacji do druku: 15.11.2012



dr inż. Michał Pawłowski
Zakład Budowy Mostów
i Dróg Kolejowych,
Politechnika Poznańska
michal.pawlowski@put.poznan.pl

W trakcie dostosowywania linii kolejowych do wymagań umów międzynarodowych nierzadko przebudowuje się także podtorze. Modernizacja podtorza obejmuje najczęściej wbudowanie warstw ochronnych i poprawę warunków odwodnienia. Głębokość ingerencji w podtorze uzależniona jest od warunków gruntowo-wodnych określanych we wstępnych badaniach geotechnicznych. Na podstawie wyników badań dobiera się odpowiednie warstwy ochronne umożliwiające m.in. uzyskanie wymaganego modułu odkształcenia podtorza mierzonego na poziomie torowiska. W trakcie budowy warstw ochronnych i po jej zakończeniu wykonuje się badania geotechniczne. Badania obejmują określenie wartości modułów odkształcenia oraz wskaźników zagęszczenia podłoża i podtorza. Doświadczenia z przeprowadzonych realizacji [14] wskazują, że nie zawsze osiągnięte są jednocześnie wymagane wartości wtórnych modułów odkształcenia i wskaźników zagęszczenia. Na taki stan wpływ ma wiele czynników. Jednym z nich są warunki gruntowo-wodne podtorza modernizowanych linii kolejowych. Od 2009 r. przepisy [11] dopuszczają uzyskiwanie mniejszych wartości modułów odkształcenia, po przebudowie podtorza, uwzględniających warunki gruntowo-wodne występujące na danej linii. Poprawienie warunków gruntowo-wodnych, poprzez wykonanie sprawnego odwodnienia linii może, lecz nie musi, prowadzić do zwiększenia wartości wtórnych modułów odkształcenia [12, 13]. Koniecznym wydaje się więc poszukiwanie innych przyczyn stwierdza-

nych, w trakcie realizacji robót, rozbieżności pomiędzy wymaganym a osiąganym stanem odkształcalności i zagęszczenia podtorza.

Zwykle na warstwy ochronne stosuje się mieszanki kruszyw kamiennych o uziarnieniu 0 - 31,5 mm (niesort) [7]. Rozpoznanie właściwości niesortu oraz określenie technologii robót przy jego wbudowywaniu w podtorze może przyczynić się do możliwości uzyskania wymaganego stanu odkształcenia i zagęszczenia przebudowanego podtorza. W tym celu podjęto badania właściwości niesortu jako budulca warstw ochronnych. Pierwszym etapem tych badań było ustalenie zależności wskaźników odkształcenia i zagęszczenia niesortu w różnych warunkach pomiaru [2, 3, 5]. W kolejnym etapie badań podjęto próbę określenia zmian właściwości niesortu kamiennego pod wpływem zmian jego wilgotności.

W trakcie eksperymentu wykonywano badania geotechniczne w dwóch grupach jako badania: kontrolne i zasadnicze. Badania kontrolne, wykonywane w celu uzupełnienia wyników wcześniejszych doświadczeń [2, 3], obejmowały określenie właściwości zastosowanego kruszywa: składu granulometrycznego, wskaźników uziarnienia i różnoziarnistości, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz wilgotności optymalnej. W badaniach zasadniczych, wykonywanych na wielkowymiarowych modelach podtorza z warstwą ochronną, wyznaczano wartości: modułów odkształcenia, wilgotności oraz wskaźników odkształcenia i zagęszczenia.

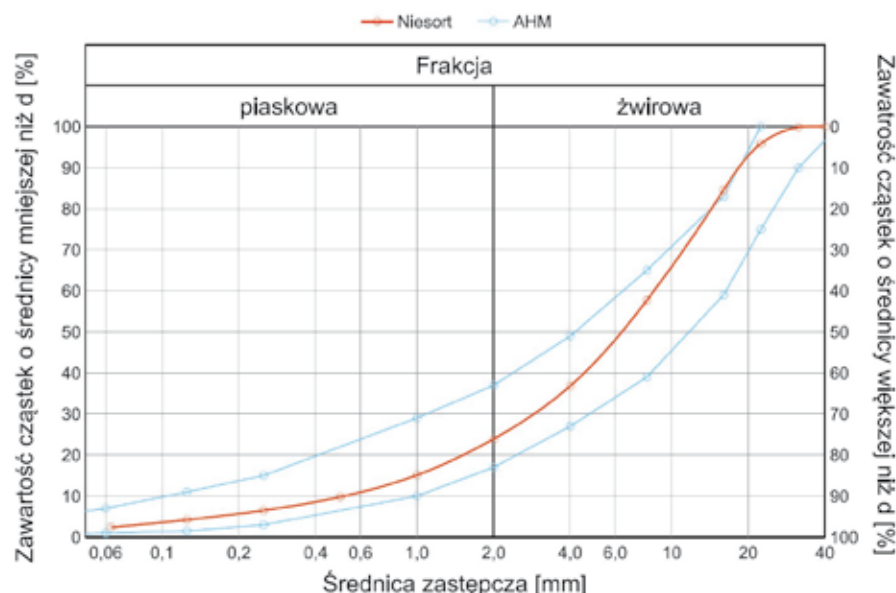
Badania modeli podtorza z warstwą ochronną

Do budowy wielkowymiarowych modeli podtorza z warstwą ochronną zastosowano melaflowy niesort kamienny o uziarnieniu 0 - 31,5 mm. Charakteryzował się on bardzo dobrymi parametrami umożliwiającymi, zgodnie z [11], jego zastosowanie na warstwy ochronne, również budowane maszyną AHM-800R.

Określenie składu granulometrycznego zastosowanego kruszywa dokonano w wyniku serii siedmiu oznaczeń polegających na przesianiu każdorazowo próbki laboratoryjnej o masie około 6 kg, pozyskanej z podziału przez kwartowanie [9] próbki ogólnej o masie około 50 kg. Próbkę ogólną formowano z próbek pierwotnych pobieranych z każdej 20 cm warstwy niesortu użytego do budowy modeli badawczych. Krzywą uziarnienia użytego materiału, opracowaną na podstawie średnich zawartość poszczególnych frakcji uzyskanych podczas wykonanych doświadczeń [2, 3], przedstawiono na rys. 1. Dodatkowo na rysunku umieszczono graniczne krzywe uziarnienia materiału zalecanego do budowy warstw ochronnych przy użyciu maszyny AHM 800-R według [11]. Z wykresu krzywej uziarnienia (rys. 1) odczytano wartości średnic miarodajnych d_{60} (8,868 mm), d_{30} (3,095 mm) i d_{10} (0,560 mm) i obliczono wartości wskaźników uziarnienia (15,84) oraz wygięcia krzywej uziarnienia (1,93).

Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz wilgotności optymalnej wyznaczano w wyniku serii siedmiu oznaczeń dokonywanych każdorazowo na minimum pięciu próbkach laboratoryjnych o masie około 6 kg każda. Próbkę laboratoryjną pozyskiwano z podziału próbki ogólnej o masie około 50 kg. Próbkę ogólną formowano z próbek pierwotnych, pobieranych z każdej 20 cm warstwy niesortu użytego do budowy modeli badawczych. Przyjęto metodę wykonywania oznaczeń zgodną z [8], polegającą na zagęszczaniu kruszywa w cylindrze dużym (o objętości 2200 dm³) w 3 warstwach 56 uderzeniami ubijaka lekkiego (masa 2,5 kg) opuszczanego z wysokości 320 mm. W wyniku wykonanych badań określono średnie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu (2,210 g/cm³) oraz wilgotności optymalnej (9,29 %) (tab. 1) [2].

Badania zasadnicze wykonywano na specjalnie do tego celu utworzonym stanowisku badawczym, na którym wykonano i przebadano



1. Krzywa uziarnienia badanego kruszywa – niesortu kamiennego (Niesort) oraz graniczne krzywe uziarnienia materiału zalecanego do budowy warstwy ochronnej przy użyciu maszyny AHM 800-R (AHM) według [11]

Tab.1: Wartości maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu oraz wilgotności optymalnych uzyskanych w poszczególnych oznaczeniach (niesort kamienny)

Badania		Wstępne	Kontrolne						Średnia
		X00	X01	X02	X03	X04	X05	X06	
W_{opt}	[%]	9,69	9,26	8,99	9,02	9,60	9,70	8,76	9,29
ρ_{ds}	[g/cm ³]	2,178	2,202	2,242	2,209	2,207	2,198	2,232	2,210

po 11 wielkowymiarowych modeli podtorza kolejowego z warstwami ochronnymi z niesortu kamiennego o grubościach 20 i 40 cm. Stanowisko badawcze składało się z: modelu sprężystego podłoża, stalowego cylindra służącego do formowania modeli warstw ochronnych (średnica 1400 mm), stalowej ramy (przeciwwagi służącej do przenoszenia obciążeń) z zawieszoną na wózku jezdny wciągarką łańcuchową umożliwiającą transport poziomy i pionowy w obrębie stanowiska badawczego. Dodatkowe wyposażenie stanowiska stanowiła aparatura pomiarowa i sprzęt pomocniczy. Jako aparaturę pomiarową wykorzystano stalową płytę sztywną o średnicy 300 mm wraz z dźwignikiem hydraulicznym zasilanym olejową pompą ręczną umożliwiającą zadawanie odpowiednich obciążeń. Osiadania płyty oraz wartość siły przekazywanej przez dźwignik były rejestrowane przy pomocy przetworników drogi i siły, wzmacniacza pomiarowego i specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Do zagęszczania poszczególnych warstw modeli badawczych w trakcie ich formowania wykorzystywano spalinową zagęszczarkę wibracyjną z okrągłą płytą denną o średnicy 450 mm [1,2,3,4,6].

W trakcie badań zasadniczych wykonano po 22 oznaczenia wartości modułów odkształcenia (mierzonych na górnym poziomie modeli badawczych), wilgotności oraz wskaźników zagęszczenia warstw ochronnych.

Moduły odkształcenia z pierwszego i drugiego obciążenia, zgodnie z przepisami [11] i normą [10], wyznaczano z zależności:

$$E_{1,2} = 0,75 \cdot \frac{\Delta p}{\Delta y} \cdot D \quad (1)$$

gdzie:

- $E_{1,2}$ – moduł odkształcenia z pierwszego lub drugiego obciążenia [MPa],
- Δp – przedział obciążenia, z którego wyznacza się moduły odkształcenia [MPa],
- Δy – różnica osiadań płyty w przyjętym przedziale obciążenia [mm],
- D – średnica płyty pomiarowej [mm].

Modele obciążano stopniami po 0,05 MPa aż do uzyskania końcowego obciążenia równego 0,25 MPa (przy pomiarach na sprężystym podłożu) oraz 0,35 MPa (przy pomiarach na górnym poziomie modeli warstw ochronnych). Odciążenie wykonywano stopniami po 0,10 MPa. Przedział obciążenia, z którego wyznaczano moduły odkształcenia przyjęto według normy [10]:

- 0,05 – 0,15 MPa (przy pomiarach sprężystego podłoża),
- 0,15 – 0,25 MPa (przy pomiarach na górnym poziomie modeli warstw ochronnych).

Wartości wskaźników zagęszczenia określano z zależności:

Tab.2: Wartości wtórnych modułów odkształcenia mierzonych na górnym poziomie modelu sprężystego podłoża

Pomiar	1	2	3	4	5	6	7	E_g	ΔE_g
E_2	87,2	85,9	92,2	80,6	86,9	87,2	90,0	87,2	1,4

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (2)$$

gdzie:

- ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu kruszywa z badań zasadniczych [g/cm³],
- ρ_{ds} – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu kruszywa z badań wstępnych i kontrolnych [g/cm³].

Gęstość objętościową szkieletu kruszywa wyznaczano określając ciężar, wilgotność i zajmowaną objętość kruszywa użytego do budowy modelu w cylindrze stanowiska badawczego. Masę wyznaczano za pomocą legalizowanej wagi hakowej przy każdorazowym formowaniu modeli badawczych. Z każdej partii kruszywa pobierano próbki w celu określenia jego wilgotności. Objętość kruszywa oceniano na podstawie pomiarów geometrycznych w cylindrze badawczym. Modele warstw ochronnych z niesortu kamiennego formowano na sprężystym podłożu utworzonym z gum zbrojonych. Wykonano siedem pomiarów wartości modułów odkształcenia podłoża, na podstawie których ustalono, iż charakteryzowało się ono średnim wtórnym modułem odkształcenia E_g równym 87,2 MPa (tab. 2).

W wyniku badań zasadniczych wyznaczono zbiory wartości modułów odkształcenia, wskaźników zagęszczenia oraz wilgotności (tab. 3). W tabeli zestawiono również grubości poszczególnych warstw ochronnych badanych modeli.

Analiza wyników

Bazując na wynikach oznaczeń wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu z badań warstw ochronnych z niesortu kamiennego o grubościach 20 i 40 cm (tab. 3, kol. 5 i 7) sporządzono krzywą zagęszczalności kruszywa (rys. 2). Na rysunku oznaczono dodatkowo wartości wskaźników zagęszczenia.

Maksymalną gęstość szkieletu kruszywa równą 2,256 g/cm³ uzyskano przy wilgotności 7,6%. Maksymalna gęstość szkieletu uzyskana przy zagęszczaniu kruszywa zagęszczarką spalinową była o 7,4% większa od gęstości uzyskanej z badań w aparacie Proctora. Wilgotność optymalna z badań modeli podtorza była o 22,2% mniejsza od wilgotności wyznaczonej w badaniach wstępnych i kontrolnych. Podczas zagęszczania niesortu w wilgotności nie mniejszej niż $0,7W_{opt}$ uzyskano wymagane wartości wskaźnika zagęszczenia według [11].

Uwzględniając wartości wtórnych modułów odkształcenia mierzonych na górnym poziomie modeli podtorza oraz wilgotności niesortu warstw ochronnych (tab. 3, kol. 11

Tab.3: Zestawienie wyników badań zasadniczych modeli podtorza z warstwą ochronną

Nr	Model	h	Δh	W	ΔW	ρ_d	$\Delta \rho_d$	I_s	ΔI_s	E_2	ΔE_2
		[m]		[%]		[g/cm ³]		[-]		[MPa]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	20W1	0,196	0,002	6,056	0,003	2,172	0,020	0,983	0,010	66	2,8
2	20W2	0,200	0,002	4,596	0,003	2,075	0,020	0,939	0,010	79	3,4
3	20W3	0,186	0,002	6,950	0,001	2,260	0,020	1,023	0,010	88	3,7
4	20W4	0,178	0,002	6,950	0,001	2,362	0,021	1,069	0,010	91	4,0
5	20W5	0,187	0,003	6,677	0,001	2,244	0,029	1,015	0,014	79	3,5
6	20W6	0,178	0,003	6,677	0,001	2,357	0,031	1,067	0,014	72	3,2
7	20W7	0,194	0,002	5,551	0,002	2,088	0,020	0,945	0,010	78	3,4
8	20W8	0,194	0,003	8,678	0,001	2,189	0,028	0,990	0,013	68	2,8
9	20W9	0,189	0,002	1,983	0,001	2,109	0,020	0,954	0,010	83	3,5
10	20W10	0,197	0,002	4,407	0,001	2,043	0,020	0,925	0,010	88	3,6
11	20W11	0,196	0,002	7,328	0,002	2,255	0,020	1,020	0,010	76	3,3
12	40W1	0,395	0,001	6,078	0,001	2,185	0,024	0,989	0,011	100	4,7
13	40W2	0,409	0,001	4,163	0,001	1,994	0,024	0,902	0,012	99	4,4
14	40W3	0,390	0,001	6,345	0,001	2,185	0,024	0,989	0,011	108	5,0
15	40W4	0,378	0,002	6,345	0,001	2,254	0,026	1,020	0,012	98	4,3
16	40W5	0,386	0,002	6,841	0,001	2,147	0,025	0,972	0,012	84	3,8
17	40W6	0,382	0,001	6,841	0,001	2,170	0,023	0,982	0,011	88	3,9
18	40W7	0,405	0,001	5,489	0,001	2,016	0,024	0,912	0,011	97	4,4
19	40W8	0,388	0,002	8,753	0,001	2,198	0,025	0,995	0,012	84	3,5
20	40W9	0,394	0,001	2,152	0,001	2,014	0,025	0,911	0,012	101	4,4
21	40W10	0,407	0,001	4,291	0,001	1,977	0,024	0,895	0,012	102	4,6
22	40W11	0,406	0,001	7,543	0,001	2,172	0,024	0,983	0,011	97	4,3

i 5) wykonano wykresy zależności wtórnych modułów odkształcenia od wilgotności ($E_2(W)$). Wykresy relacji zmiennych sporządzono oddzielnie dla modeli podtorza z warstwami ochronnymi o różnych grubościach.

Ze względu na małe wartości wilgotności przy zagęszczaniu z analizy odrzucono po jednym przypadku dla każdego ze zbiorów wyników (tab. 3, poz. 9 i 20). Zależność $E_2(W)$ dla dwóch różnych grup modeli podtorza

aproxymowano krzywymi logarytmicznymi. Ze względu na niezbyt liczne zbiory przypadków uzyskano małe wartości współczynnika korelacji zmiennych, odpowiednio $R^2(20) = 0,10$ i $R^2(40) = 0,31$.

Uwzględniając grubości formowanych modeli warstw ochronnych (h), średnią wartość wtórnego modułu odkształcenia sprężystego podłoża (E_g) (tab. 2) oraz przyjmując moduł odkształcenia niesortu kamiennego

$E_0 = 180$ MPa wyznaczono spodziewane wartości wtórnych modułów odkształcenia z drugiego obciążenia mierzonych na górnym poziomie modeli (E_2) stosując równanie:

$$E_2 = \frac{E_g}{1 - \frac{2}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{E_0}{E_g}\right)^{1,4}}\right) \cdot \arctg\left(\frac{h}{D} \cdot \left(\frac{E_0}{E_g}\right)^{0,4}\right)} \quad (3)$$

gdzie:

E_2 – wtórny moduł odkształcenia na górnym poziomie modelu (moduł ekwiwalentny) [MPa],

E_0 – moduł odkształcenia materiału warstwy [MPa],

E_g – moduł odkształcenia podłoża [MPa],

h – grubość warstwy ochronnej [mm],

D – średnica płyty pomiarowej [mm].

Wartości uzyskanych wyników zestawiono w tab. 4.

Dokonując pomiaru wtórnych modułów odkształcenia na poziomie torowiska modeli podtorza z warstwami ochronnymi wykonanych bezpośrednio po ich zagęszczeniu uzyskano wartości modułów nie większe niż 70% spodziewanych wartości modułów (tab. 3 i 4).

Uwzględniając wyznaczone równania krzywych zależności $E_2(W)$ dla obu grup modeli (rys. 3) wyznaczono oczekiwane zmiany wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza z warstwami ochronnymi o grubościach 20 i 40 cm pod wpływem zmian wilgotności kruszywa warstw (rys. 4).

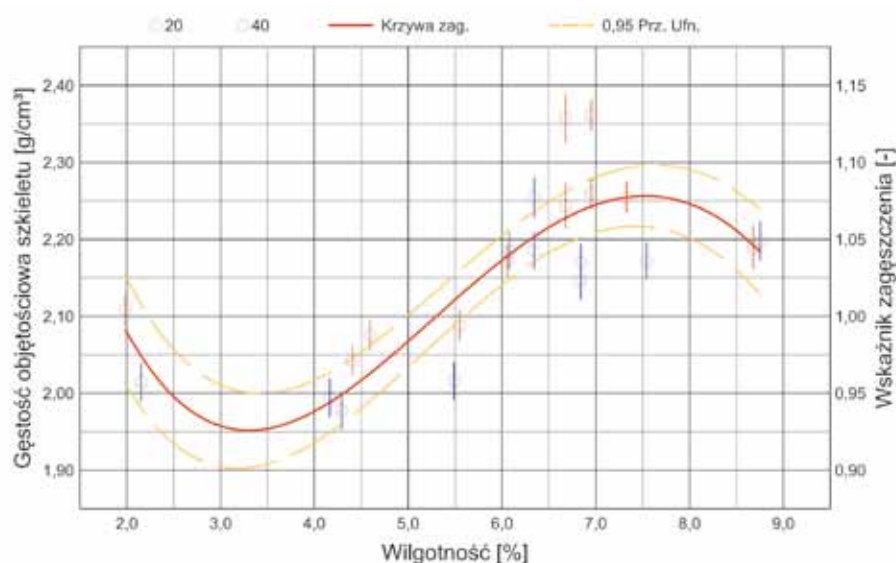
Z rys. 4 można odczytać, iż po wyschnięciu niesortu – budulca modeli warstw ochronnych, zagęszczanego przy wilgotności zbliżonej do optymalnej, można oczekiwać projektowej wartości wtórnych modułów odkształcenia (tab. 4).

Po utworzeniu modelu podtorza z warstwą ochronną o grubości 40 cm (tab. 3, poz. 22) i wykonaniu badań zasadniczych pozostawiono model do wyschnięcia w warunkach laboratoryjnych (temp. ok. 22°C). Po 91 dniach ponownie dokonano pomiarów modułów odkształcenia na górnym poziomie modelu. W wyniku przeprowadzonych oznaczeń wyznaczono wtórny moduł odkształcenia modelu podtorza o wartości 212 MPa. Uzyskano w ten sposób ponad dwukrotny przyrost wartości wtórnego modułu odkształcenia. Na podstawie otrzymanych wyników badań, z zależności (3), obliczono moduł odkształcenia niesortu kamiennego w stanie powietrzno-suchym – około 290 MPa.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

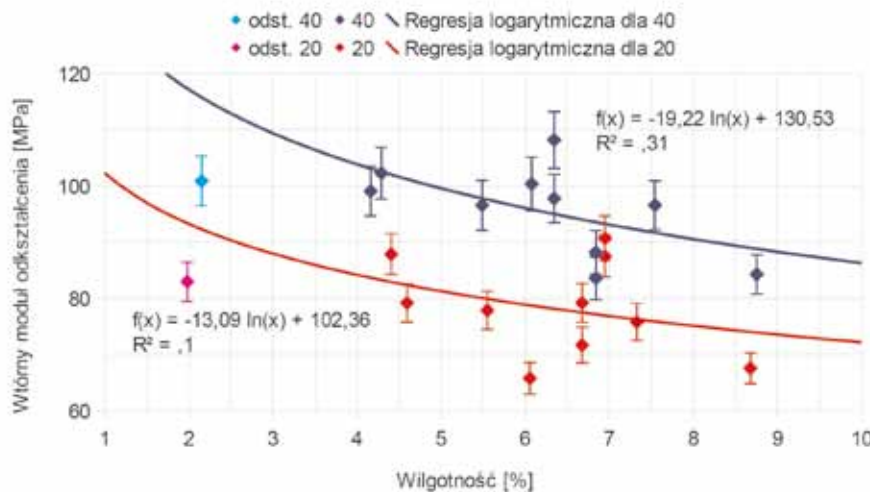
1. wilgotność optymalna przy zagęszczaniu mechanicznym jest o ok. 7,5% mniejsza od wilgotności optymalnej z badań w aparacie Proctora,



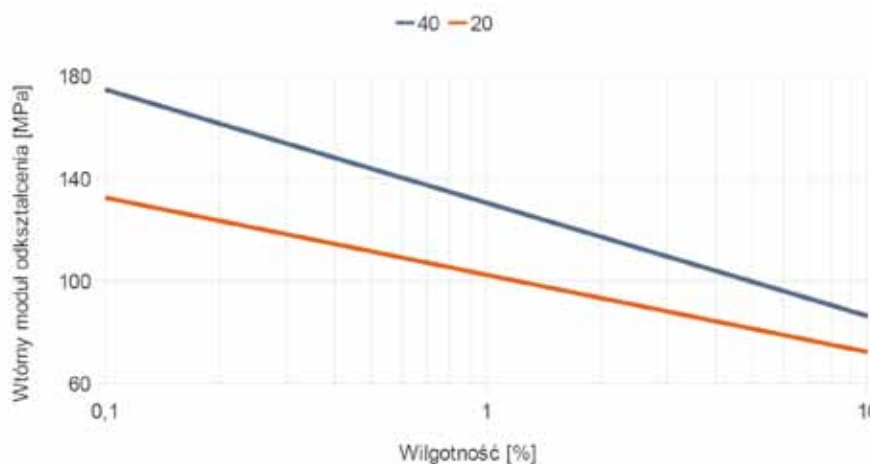
2. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu od wilgotności z badań modeli warstw ochronnych z niesortu kamiennego

Tab.4: Spodziewane wartości wtórnych modułów odkształcenia mierzonych na poziomie torowiska modeli podtorza z warstwami ochronnymi o grubościach 20 i 40 cm

h [cm]	E_g [MPa]	E_o [MPa]	E_z [MPa]
20	87	180	124
40			153



3. Wykres zależności wtórnych modułów odkształcenia mierzonych na poziomie torowiska od wilgotności niesortu modeli warstw ochronnych o grubościach 20 i 40 cm



4. Wartości wtórnych modułów odkształcenia mierzonych na górnym poziomie modeli podtorza z warstwami ochronnymi o grubościach 20 i 40 cm pod wpływem zmian wilgotności niesortu

2. wraz ze zmianą wilgotności kruszywa warstw ochronnych następuje zmiana wartości wtórnych modułów odkształcenia mierzonych na poziomie torowiska,
3. dokonując pomiarów bezpośrednio po zagęszczaniu warstw ochronnych w wilgotności zbliżonej do optymalnej można uzyskać wymagane wartości wskaźnika zagęszczenia i około 70% wartości projektowanego wtórnego modułu odkształcenia,
4. wyschnięcie niesortu – budulca warstwy ochronnej, prowadzi do uzyskania co najmniej spodziewanej (projektowej) wartości wtórnego modułu odkształcenia na poziomie torowiska,
5. celem jest przeprowadzenie badań formowanej przy wilgotności optymalnej warstwy ochronnej wyschniętej do stanu

- powietrzno-suchego i charakteryzującej się projektową wartością wtórnego modułu odkształcenia mierzonych na poziomie torowiska po opadach atmosferycznych,
6. ze względu na ważkość poruszanych kwestii badania powinny być kontynuowane.

Materiały źródłowe

- [1] Pawłowski M.: O badaniach wielkomiernych modeli podtorza kolejowego. Przegląd Komunikacyjny 2010, nr 11-12, s. 28-33.
- [2] Pawłowski M.: Zależność wskaźnika zagęszczenia i wskaźnika odkształcenia kruszyw na podstawie próbnych obciążeń płytą statyczną. Rozprawa doktor-

ska, Politechnika Poznańska, 2010.

- [3] Pawłowski M.: Zależność wskaźnika zagęszczenia i wskaźnika odkształcenia z próbnych obciążeń modeli podtorza z niesortu kamiennego. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej oddział w Krakowie. Seria Materiały Konferencyjne, 2011, nr 96 (z. 158 „Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym”), s. 411-424.
- [4] Pawłowski M.: Zależność wskaźnika zagęszczenia i wskaźnika odkształcenia z próbnych obciążeń modeli podtorza z piasku średniego. Przegląd Komunikacyjny 2011, nr 9-10, s. 92-97.
- [5] Pawłowski M.: Badania edometryczne niesortu kamiennego. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 2011, nr 12, s. 21-32.
- [6] Pawłowski M.: Badania na wielkomiernym modelu podtorza kolejowego. Technika Transportu Szynowego 2010, nr 4, str. 44-48.
- [7] PKN. PN-B-11112 Kruszywa mineralne – Kruszywa łamane do nawierzchni drogowych. 1996.
- [8] PKN. PN-EN 13286-2 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora. 2007.
- [9] PKN. PN-EN 932-2 Badania podstawowych właściwości kruszyw – Metody pomniejszania próbek. 1999.
- [10] PKN. PN-S-02205 Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania. 1998.
- [11] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. 2009.
- [12] Porębski R., Siewczyński Ł., Zalewski J.: Ocena skuteczności wzmocnienia podtorza warstwą ochronną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Budownictwo, 2005, z. 103, str. 187-196.
- [13] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Analiza wpływu zmian w przepisach o podtorzu na stan jego odkształcalności po modernizacji. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 2011, nr 9, s. 39-62.
- [14] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Wymagane i osiągane wartości wskaźnika odkształcenia modernizowanego podtorza. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej oddział w Krakowie. Seria Materiały Konferencyjne, 2011, nr 73 (z. 124 „Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym”), str. 245-264.
- [15] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, 1973.
- [16] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, 2005.