

Michał Pawłowski

Badania na wielkowymiarowym modelu podtorza kolejowego

W trakcie robót modernizacyjnych podtorza kolejowego wykonuje się badania geotechniczne w celu określenia właściwości podtorza przygotowanego do budowy warstwy oraz układu warstwa ochronna – podtorze. Określa się wartości wskaźnika zagęszczenia gruntów i materiałów warstwy oraz wartości modułów odkształcenia płyty VSS.

Materiały stosowane do budowy warstwy (niesort kamienny, kliniec, geokompozyty) powodują trudności w określaniu zagęszczenia metodami bezpośrednimi. Z tego względu stosowana jest metoda pośrednia z wykorzystaniem wskaźnika odkształcenia. W normie [7], tylko dla jednorodnych materiałów, a w przepisach [1] bez odniesienia do rodzaju gruntu, ujęte są zależności wskaźnika zagęszczenia od wskaźnika odkształcenia. Ograniczenie to utrudnia ocenę zagęszczenia rzeczywistych układów wzmocnionego podtorza.

W celu dokładniejszej oceny zagęszczenia rzeczywistych układów podtorze – warstwa ochronna podjęto próbę określenia wskaźnika odkształcenia dla różnych materiałów podtorza i warstw ochronnych oraz różnych ich układów, w różnych stanach zagęszczenia. Oznaczenia rozpoczęto od jednorodnego gruntu niespoistego – piasku średniego. Przeprowadzono badania wstępne mające na celu określenie: rodzaju gruntu, składu granulometrycznego, wilgotności optymalnej, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz serię oznaczeń modułów ścisłości pierwotnej i wtórnej w edometrze [3]. Wyniki uzyskane z badań wstępnych piasku średniego, przy niemożliwej bocznej rozszerzalności gruntu, potwierdziły zależność normową [7] wskazując, że wartości wskaźnika odkształcenia równej 2,2 odpowiada wartość wskaźnika zagęszczenia równa 1,0. Z doświadczeń modernizacji linii kolejowych wynika, że wartości normowe dla różnego rodzaju gruntów trudno osiągnąć w warunkach bocznej rozszerzalności gruntu przy ocenie nośności podtorza za pomocą płyty VSS [8]. By móc określić zależność wskaźnika odkształcenia od wskaźnika zagęszczenia w warunkach rzeczywistych przygotowano specjalistyczne stanowisko badawcze, na którym przewidziano badania w kilku fazach. W pierwszej fazie formowane są modele podłoża gruntowego utworzone z piasku średniego. Przygotowany model podtorza obciążany jest płytą sztywną VSS o średnicy 30 cm zgodnie ze standardowym testem według normy [7] i przepisów [1]. Wyniki z dwukrotnego cyklu obciążenia i odciążenia służą do wyznaczenia wskaźnika odkształcenia. Jednocześnie prowadzone są badania zagęszczenia przygotowanych modeli, co pozwala wyznaczyć zależności wskaźnika odkształcenia od wskaźnika zagęszczenia w warunkach bocznej rozszerzalności.

Opis stanowiska badawczego

Głównymi elementami składowymi stanowiska badawczego, przeznaczonego do badań odkształcalności i zagęszczenia grun-

tów oraz kruszyw podtorza kolejowego (rys. 1), jest wielkowymiarowy model podtorza kolejowego, stalowa rama stanowiąca przeciwwagę, zagęszczarka spalinowa, aparatura pomiarowa oraz sprzęt pomocniczy.



Rys. 1. Stanowisko do badań odkształcalności i zagęszczenia podtorza kolejowego

Model podtorza kolejowego

Model podtorza formowany jest w rurze stalowej o objętości 2,92 m³. Wymiary rury stanowią kompromis między dokładnością badania a ilością potrzebnego materiału do wykonania modelu badawczego [2]. Średnica 1400 mm zapewnia boczna rozszerzalność gruntu. Wysokość 1900 mm umożliwia zbudowanie modelu o grubości przekraczającej zasięg wpływu płyty VSS [8].

W zależności od zastosowanych materiałów możliwe jest przygotowanie modelu podłoża kolejowego, układu podłoża – warstwa ochronna, oraz zastosowanie geokompozytów na stykach różnych kruszyw oraz do zbrojenia warstw ochronnych. Model podtorza przygotowany jest warstwami o grubości umożliwiającej właściwe zagęszczenie stosowanego kruszywa.

Model podłoża gruntowego z piasku średniego formowany jest warstwami o grubości od 15 do 40 cm. Wysokość modelu jest nie mniejsza niż 140 cm i waha się w granicach od 142 do

146 cm. Przygotowanie modelu wymaga zastosowania około 2,2 m³ gruntu, co przy wilgotności 8% daje konieczność przemieszczenia ok. 4,2 Tg materiału.

Stalowa rama

Ważnym elementem stanowiska badawczego jest stalowa rama stanowiąca przeciwwagę przy pomiarach odkształcalności z możliwością przenoszenia obciążeń do 25 kN. Rama umożliwia również transport poziomy i pionowy belki przeciwwagi, kruszywa i sprzętu w obrębie stanowiska badawczego za pomocą wciągacza WRLT 1,0T zamocowanego na wózku jezdnym WZWR-1,0T. Rama zbudowana jest jako konstrukcja słupowo-belkowa z podstawą kotwioną w otworach stendy do badań wytrzymałościowych. Wysokość całkowita 3700 mm, osiowy rozstaw ramy w podstawie 2700 mm. Możliwe są dwa położenia belki stanowiącej przeciwwagę – 2200 i 2700 mm. Dodatkowym wyposażeniem ramy jest trawersa umożliwiająca transport worków wielkogabarytowych typu *big-bag* o masie do 1000 kg.

Zagęszczarka spaliniowa

Ze względu na kształt i wymiary modelu badawczego do zagęszczania kruszywa stosowana jest kompaktowa zagęszczarka płytowa DYNAPAC LX90 (rys. 2). Cechuje się ona unikalną okrągłą płytą denną o średnicy 450 mm, pozwalającą na płynne prowadzenie zagęszczania i łatwe manewrowanie wewnątrz rury badawczej. Zagęszczarka LX90, o masie operacyjnej 97 kg, wyposażona jest w silnik spaliniowy Honda GX160 o mocy 4 kW, który zapewni uzyskanie częstotliwości wibracji 75 Hz, siły odśrodkowej 16 kN i amplitudy drgań 1,7 mm. Przy jeździe na wprost uzyskuje prędkość do 22 m/min.

Przy formowaniu modelu badawczego każda z warstw o miąższości od 15 do 40 cm zagęszczana jest w czasie od 2 do 12 min według schematu przedstawionego na rysunku 3. Długość cyklu zagęszczania uzależniona jest od wilgotności gruntu oraz wymaganego stopnia zagęszczenia. Jeden cykl zagęszczania ma długość około 25 m i składa się z 6 przejazdów po obwodzie (proces nr 1) i po jednym przejeździe wewnątrz (procesy nr 2–8).



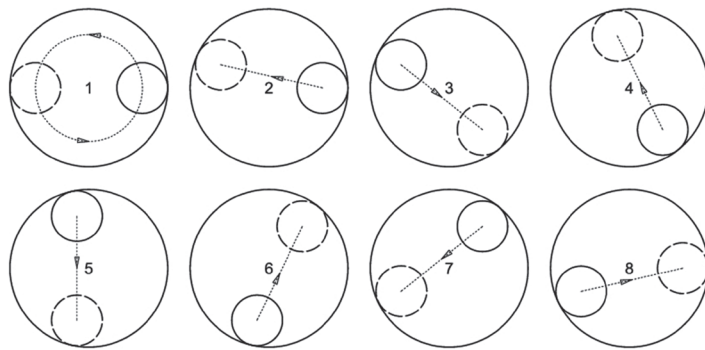
Rys. 2. Zagęszczarka spaliniowa DYNAPAC LX90 [9]

Aparatura pomiarowa

Stanowisko badawcze wyposażone jest w aparaturę umożliwiającą określenie wartości wskaźników odkształcenia i zagęszczenia. Przygotowany model podtorza obciążany jest płytą sztywną VSS średnicy 30 cm. Wartości obciążeń oraz osiadań płyty, zbierane za pomocą przetworników, przetwarzane są za pomocą systemu komputerowego. Jednocześnie prowadzone są badania gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i wilgotności kruszyw stanowiących model podtorza.

Płyta sztywna VSS

Sztywna płyta VSS umożliwia wykonywanie pomiarów odkształcalności przygotowanych modeli podtorza. Zestaw pomiarowy



Rys. 3. Schemat procesów zagęszczania warstw modelu badawczego

składa się ze sztywnej stalowej płyty o średnicy 30 cm, dźwigni hydraulicznej wraz z kompletem przedłużeń i przegubem sferycznym, pompy olejowej z manometrem, czujników zegarowych oraz statywu stanowiącego poziom odniesienia (rys. 4). Ze względu na specyfikę stanowiska badawczego tradycyjny statyw został zastąpiony specjalnie przygotowanym stojakiem do oparcia czujników. Stojakiem jest stalowa rama wysokości 2100 mm, długości 1900 mm, szerokości 800 mm wyposażona w koła z hamulcami oraz sześciokątną ramkę do oparcia czujników. Wysokość położenia ramki można regulować co 150 mm na długości 900 mm, co umożliwia wykonywanie pomiarów odkształcalności przy różnych wysokościach modelu badawczego.

W celu zwiększenia dokładności dokonywanych pomiarów i minimalizacji błędów pomiarowych wartości obciążeń oraz osiadania płyty zbierane są za pomocą systemu komputerowego firmy HBM. Sygnały z przetworników przekazywane są do wzmacniacza pomiarowego SPIDER 8, a następnie przesyłane są do komputera, gdzie obrabiane są za pomocą specjalistycznego oprogramowania CatmanEASY. Do pomiaru siły ściskającej służy przetwornik C9B o sile znamionowej 50 kN i dokładności 0,25 kN, co pozwala określać obciążenie płyty z dokładnością 0,0035 MPa. Pomiar przemieszczeń dokonywany jest za pomocą 3 przetworników WA T z zakresem pomiarowym 20 mm i dokładnością 0,001 mm.



Rys. 4. Płyta VSS; dźwignik hydrauliczny; przeciwwaga; czujniki pomiarowe; statyw do czujników

Aparatura do oznaczania wilgotności i zagęszczenia gruntów

Wilgotność gruntu określa się na podstawie próbek gruntu suszonych do uzyskania stałej masy w wentylowanej suszarce. Gęstość objętościową szkieletu gruntowego określa się przy użyciu pierścienia wciskanego o objętości 351,4 cm³ (średnica 76,2 mm, wysokość 77,2 mm).

Program badań

Badania w celu określenia zależności wskaźnika odkształcenia od wskaźnika zagęszczenia na wielkowymiarowym modelu podtorza kolejowego podzielone są dwie zasadnicze grupy. Pierwsza grupa badań to badania wstępne i sprawdzające mające na celu określenie rodzaju gruntu, krzywej uziarnienia, wskaźnika różnoziarnistości, wilgotności optymalnej oraz maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. Drugą grupę badań stanowią badania zasadnicze mające na celu określenie wskaźnika odkształcenia z pomiaru płyty sztywną oraz wyznaczenie wartości wskaźnika zagęszczenia na podstawie oznaczonej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Badania wstępne

Badania wstępne wykonywane są dla każdego rodzaju kruszywa stosowanego do budowy modelu badawczego zgodnie z normą [4] i przepisami [1]. W przypadku, gdy model tworzony jest kilkakrotnie z tego samego kruszywa, wówczas każdorazowo po 5-krotnym użyciu kruszywa wykonywane są badania kontrolne. Zakres badań kontrolnych jest zgodny z zakresem badań wstępnych.

W celu określenia rodzaju gruntu, kształtu krzywej uziarnienia oraz wskaźnika różnoziarnistości wykonywana jest analiza sitowa gruntów i kruszyw modelu badawczego. Wielkość i liczba badanych próbek oraz liczba i średnica sit w zestawie uzależniona jest od rodzaju badanego materiału.

Wilgotność optymalną oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego wyznacza się w trakcie badań laboratoryjnych polegających na zagęszczaniu w znormalizowany sposób gruntu przy różnych jego wilgotnościach jedną z metod badań Proctora. Wybór metody badań uzależniony jest od rodzaju gruntu.

Wyniki analizy sitowej piasku średniego potwierdziły wcześniejszy wynik badania makroskopowego, jednoznacznie wskazując, że badany grunt jest piaskiem średnim. Uzyskano średnią wartość wskaźnika uziarnienia $U = 2,0$, co kwalifikuje materiał do gruntów równoziarnistych [6].

Badania wilgotności optymalnej oraz maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego piasku średniego przeprowadzono zgodnie z metodą I [1, 4], układając zagęszczany grunt w trzech warstwach w cylindrze małym o objętości 1000 cm³, zagęszczając każdą z warstw 25 uderzeniami ubijaka lekkiego o masie 2,5 kg opuszczanego z wysokości 320 mm. Przy wilgotności równej 10,28% uzyskano maksymalną gęstość szkieletu gruntowego równą 1,774 g/cm³ [3].

Badania zasadnicze

Badania zasadnicze wykonywane są dla każdego utworzonego modelu podtorza kolejowego. Obejmują określenie wskaźnika odkształcenia z pomiaru płyty sztywną oraz wyznaczenie wartości wskaźnika zagęszczenia na podstawie oznaczonej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Oznaczenie wskaźnika odkształcenia podtorza przy użyciu płyty statycznej

Wskaźnik odkształcenia I_o wyznacza się z badań modułów odkształcenia płytą sztywną według zależności:

$$I_o = \frac{E_2}{E_1} \quad (1)$$

gdzie:

E_2 – wtórny moduł odkształcenia [MPa],

E_1 – pierwotny moduł odkształcenia [MPa].

Moduły odkształcenia wyznaczone są z zależności:

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

gdzie:

E – moduł odkształcenia [MPa],

Δp – przedział obciążenia, w którym wyznaczany jest moduł odkształcenia [MPa],

Δy – różnica osiadań płyty w zadanym przedziale obciążenia [mm],

D – średnica płyty [mm].

Podstawiając zależność (2) do zależności (1) uzyskuje się wskaźnik zagęszczenia jako stosunek osiadań z pierwszego obciążenia do osiadań z drugiego obciążenia:

$$I_o = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2} \quad (3)$$

Modele podłoża gruntowego z piasku średniego obciążane są stopniami po 0,05 MPa aż do uzyskania końcowego obciążenia równego 0,25 MPa. Odciążenie wykonywane jest stopniami po 0,10 MPa. Przedział obciążenia, z którego wyznaczone są moduły pierwotnego i wtórnego odkształcenia, wynosi 0,05–0,15 MPa. Aproxymując osiadania płyty wielomianem drugiego stopnia można zwiększyć dokładność oceny odkształcalności [1]. Płyta pomiarowa umieszczana jest w środku górnej powierzchni modelu badawczego.

Oznaczenie wskaźnika zagęszczenia gruntu

Wskaźnik zagęszczenia I_s określany jest jako stosunek gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_s do maksymalnej gęstości szkieletu gruntowego ρ_{ds} wyznaczonej w sposób znormalizowany:

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (4)$$

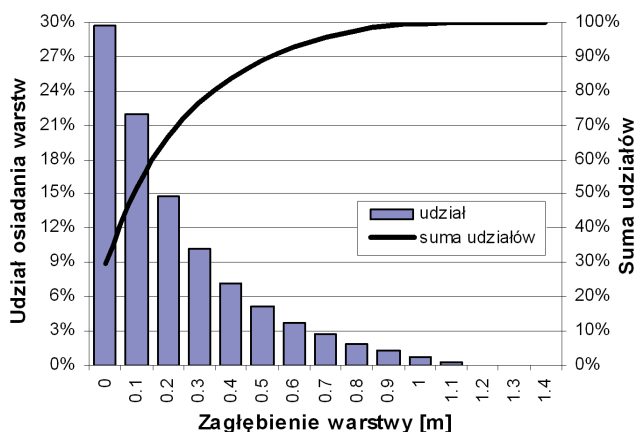
Maksymalną gęstość szkieletu gruntowego ρ_{ds} wyznacza się w badaniach wstępnych. Gęstość objętościową szkieletu gruntowego ρ_s piasku średniego, stanowiącego model badawczy, określa się przy użyciu wciskanego pierścienia. Próbkę pobierane są począwszy od poziomu 140 cm z każdej 10 cm warstwy z obszaru kołowego o średnicy 30 cm ze środkiem w pionowej osi symetrii modelu badawczego. Dla kontroli wyników, w górnej strefie modelu (do 60 cm), pobierane są dwie próbki. W przypadku, gdy masy próbek różnią się między sobą o więcej niż 1%, pobierana jest kolejna próbka. Jako wynik przyjmowana jest średnia arytmetyczna z dwóch najmniej różniących się wartości.

Po oznaczeniu wilgotności gruntu z pobranych próbek wyznacza się wskaźnik zagęszczenia dla każdej z warstw. Globalny

Określenie wskaźnika zagęszczenia modelu nr 3 podłoża gruntowego uformowanego z piasku średniego

Zagłębienie warstwy [m]	W [%]	ρ_s [g/cm ³]	I_s warstw [-]	Waga [-]	I_s modelu [-]
0,0–0,1	7,04	1,779	1,003	0,297221	0,29813
0,1–0,2	8,65	1,750	0,987	0,220018	0,21706
0,2–0,3	5,90	1,807	1,019	0,148533	0,15132
0,3–0,4	6,01	1,732	0,976	0,101784	0,09939
0,4–0,5	5,98	1,770	0,998	0,071949	0,07180
0,5–0,6	6,73	1,751	0,987	0,051933	0,05125
0,6–0,7	6,39	1,732	0,976	0,037772	0,03688
0,7–0,8	6,91	1,771	0,998	0,027294	0,02725
0,8–0,9	6,50	1,725	0,972	0,019258	0,01872
0,9–1,0	7,75	1,734	0,977	0,012911	0,01262
1,0–1,1	8,19	1,747	0,985	0,007779	0,00766
1,1–1,2	10,11	1,765	0,995	0,003547	0,00353
1,2–1,3	11,34	1,775	1,001	0,000000	0,00000
1,3–1,4	12,39	1,766	0,996	0,000000	0,00000
					0,99600

wskaźnik zagęszczenia, dla całego modelu badawczego, obliczany jest jako średnia ważona. Wagi dla poszczególnych warstw przyjęto zgodnie z wpływem osiadań poszczególnych warstw na całkowitą wartość osiadań pod środkiem sztywnego obszaru kołowego pod obciążeniem o wartości 0,25 MPa [4, 8] (rys. 5). W przypadku zastosowania jednorodnego gruntu podłoża osiadania górnej strefy modelu (o miąższości 60 cm) stanowią około 93% wartości całkowitych osiadań. Ten fakt powoduje nieprzydatność sondy dynamicznej lekkiej do oceny zagęszczenia materiałów modeli badawczych, ponieważ wyniki sondowania można interpretować dopiero od głębokości krytycznej, która dla sondy lekkiej wynosi 0,6 m.



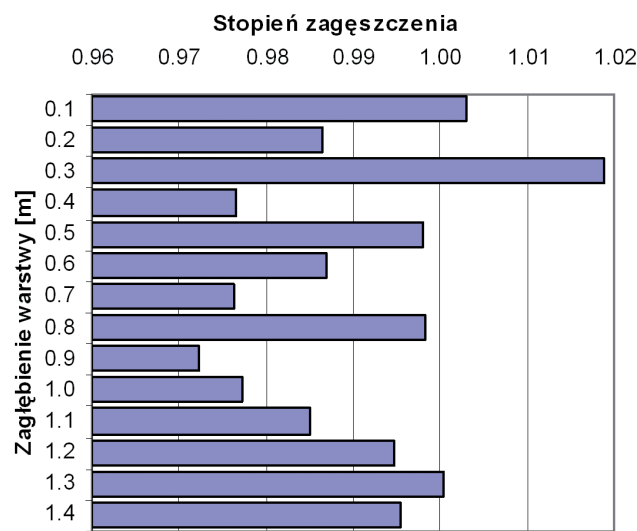
Rys. 5. Procentowy udział osiadań poszczególnych warstw w całkowitym osiadań oraz suma udziałów osiadań pod środkiem sztywnego obszaru kołowego pod obciążeniem o wartości 0,25 MPa w zależności od zagłębienia warstw w przekroju pionowym modelu podłoża

Wstępne wyniki badań modelu podłoża gruntowego

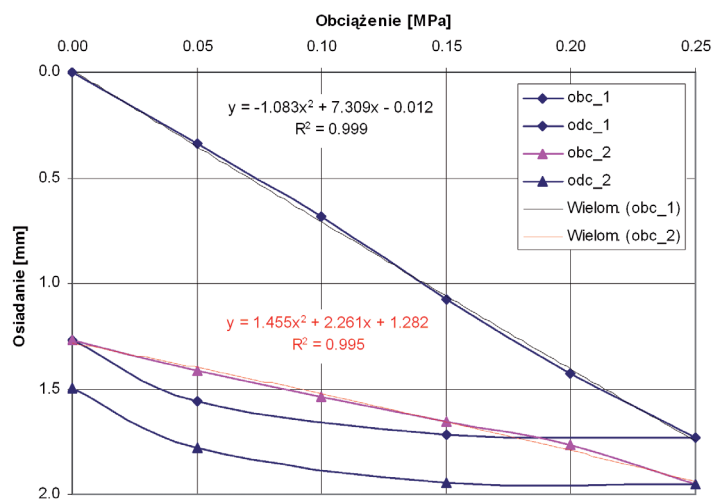
By można opracować zależność wskaźnika zagęszczenia od wskaźnika odkształcenia w warunkach umożliwiających boczną rozszerzalność gruntu, konieczne jest wykonanie wielu badań na wielkowymiarowym modelu podłoża kolejowego. Aktualnie prowadzone są badania pierwszej fazy – wykonuje się modele podłoża gruntowego z piasku średniego. Badania prowadzone są zgodnie z założonym programem badań, tj.: po każdorazowym przygotowaniu modelu wykonywane są badania zasadnicze mające na celu określenie wskaźnika zagęszczenia i wskaźnika odkształcenia; po wykonaniu 5 modeli z tego samego materiału wykonywane są badania sprawdzające mające na celu kontrolę uziarnienia gruntu oraz wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Przykładowe wyniki oznaczeń wskaźnika zagęszczenia dla modelu podłoża gruntowego oznaczonego nr 3 przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 6, a wskaźnika odkształcenia w tabeli 2 i na rysunku 7.

W prezentowanych wynikach badań zagęszczenia podłoża gruntowego mimo uzyskanych wskaźników zagęszczenia, dla warstw z poziomów od 0,6 do 1,1 m, w granicach od 0,972 do 0,985, całkowity wskaźnik zagęszczenia zbliżony jest do wartości 1,0 i wynosi 0,996. Potwierdza to fakt, że dla modeli badawczych utworzonych z jednorodnych materiałów decydujący wpływ na całkowity wskaźnik zagęszczenia mają górne warstwy o miąższości 60 cm.



Rys. 6. Wykres stopnia zagęszczenia poszczególnych warstw w modelu nr 3 podłoża gruntowego z piasku średniego



Rys. 7. Wykres osiadań płyty pomiarowej, model nr 3 podłoża gruntowego uformowany z piasku średniego

Tabela 2

Sprawozdanie z badań odkształcalności modelu nr 3 podłoża gruntowego z piasku średniego

Data 14.07.2009 obciążenie [MPa]	Model nr 3		Piasek średni		Poziom pomiaru 145 cm		
	osiadanie [mm]			średnia	przybl.	pomiar	przybl.
	1	2	3				
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000			
0,05	0,595	0,213	0,216	0,341	0,351		
0,10	1,199	0,377	0,475	0,684			
0,15	1,840	0,622	0,775	1,079	1,060	$E_1 = 31 \text{ MPa}$	$E_1 = 40 \text{ MPa}$
0,20	2,374	0,866	1,039	1,426			
0,25	2,826	1,101	1,273	1,733			
0,15	2,820	1,045	1,278	1,714			
0,05	2,670	0,887	1,124	1,560		$I_0 = 3,05$	$I_0 = 2,43$
0,00	2,439	0,546	0,829	1,271			
0,05	2,526	0,726	0,981	1,411	1,399		
0,10	2,644	0,848	1,115	1,536			
0,15	2,790	0,943	1,225	1,653	1,654	$E_2 = 93 \text{ MPa}$	$E_2 = 96 \text{ MPa}$
0,20	2,909	1,052	1,330	1,764			
0,25	3,246	1,196	1,423	1,955			
0,15	3,246	1,157	1,425	1,943			
0,05	3,089	0,993	1,248	1,777			
0,00	2,841	0,677	0,968	1,495			

Wskaźnik odkształcenia wyznaczony z badań okrągłą płytą sztywną o średnicy 30 cm z zakresu obciążenia 0,05 – 0,15 MPa przy obciążeniu końcowym 0,25 MPa, dla modelu nr 3 podłoża gruntowego z piasku średniego wynosi 3,05. W celu zwiększenia dokładności oznaczenia wskaźnika odkształcenia osiadania płyty aproksymowano wielomianem drugiego stopnia [1]. Równania wielomianów przedstawione są na rysunku 7 bezpośrednio obok krzywych osiadań z pierwszego i z drugiego cyklu obciążenia. Dodatkowo podano współczynniki dopasowania krzywych R^2 . Po wyznaczeniu osiadań płyty z aproksymowanych wielomianów obliczono skorygowane moduły i wskaźnik odkształcenia. Aproksymacja krzywych osiadań przy wartościach współczynnika dopasowania równych 0,999 i 0,995 wprowadza korektę modułu pierwotnego aż o 29%, natomiast modułu wtórnego o 3%. Pociąga to za sobą zmianę wskaźnika odkształcenia o 20%.

Wnioski

Na podstawie dotychczasowych badań prowadzących do ustalenia zależności wskaźnika zagęszczenia od wskaźnika odkształcenia można sformułować następujące wnioski.

- W celu określenia zależności wskaźników zagęszczenia i odkształcenia rzeczywistych układów podłoża gruntowego i układów warstwa ochronna – podłoża konieczne jest przeprowadzenie badań w warunkach możliwej bocznej rozszerzalności gruntu.
- Wielkowymiarowy model podtorza kolejowego spełnia warunki bocznej rozszerzalności gruntu.
- W celu uzyskania wiarygodnej ilości próbek badawczych konieczne jest wykonanie wielu oznaczeń badanych parametrów na wielkowymiarowych modelach podtorza kolejowego.

- Badania na wielkowymiarowym modelu podtorza kolejowego są czasochłonne i wymagają dużego nakładu pracy.
- Dla jednorodnych materiałów stanowiących podtorze kolejowe 93% całkowitych osiadań w trakcie badań odkształcalności okrągłą płytą sztywną przypada na górne warstwy podtorza o miąższości 0,6 m.
- Sonda dynamiczna lekka, z głębokością krytyczną 0,6 m, nie jest przydatna do określania wskaźnika zagęszczenia górnych warstw podtorza.
- Aproksymacja krzywych osiadań w badaniach odkształcalności okrągłą płytą sztywną, pomimo dużych wartości wskaźników dopasowania może powodować znaczne różnice uzyskiwanych wartości modułów i wskaźników odkształcenia.

Literatura

- [1] Id-3. *Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2009 r.
- [2] Pawłowski M.: *Model numeryczny stanowiska do badań wskaźnika odkształcenia*. II Ogólnopolska Konferencja „Metody komputerowe w geotechnice i geologii inżynierskiej”, Rydzyna, 23–25.10.2007 (w druku).
- [3] Pawłowski M.: *Wskaźnik odkształcenia piasku z badań edometrycznych*. XIV Konferencja Naukowa „Drogi Kolejowe 2007”. Poznań-Rosnówko, 19–20.10.2007 r., Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej nr 3/2007, Poznań, WPP 2007, s. 233–240.
- [4] PN-81/B-03020 *Grunty budowlane – Posadowienie bezpośrednie budowli – Obliczenia statyczne i projektowanie*. PKN, Warszawa 1981 r.
- [5] PN-88/B-04481 *Grunty budowlane – Badanie próbek gruntu*. PKN, Warszawa 1988 r.
- [6] PN-B-04452 *Geotechnika – Badania polowe*. PKN, Warszawa 2002 r.
- [7] PN-S-02205 *Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania*. PKN, Warszawa 1998 r.
- [8] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: *Wymagane i osiągnięte wartości wskaźnika odkształcenia modernizowanego podtorza*. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Kolejnictwie”, Ryto, 16–18 listopada 2005 r., s. 245–264.
- [9] www.dynapac.pl

mgr inż. Michał Pawłowski
Asystent, Zakład Dróg Kolejowych, Instytut Inżynierii Lądowej
Politechnika Poznańska,
michal.pawlowski@put.poznan.pl
+48 61 665 2407