

Stan naprężeń w podtorzu obciążonym układem płyt próbnych

Michał Pawłowski, Łucjan Siewczyński

Artykuł zawiera kontynuację analizy współpracy podtorza z płytą do próbnych obciążeń. W analizie uwzględniono wpływ wzajemnego ustawienia płyt obciążających, które modelują warunki obciążeń przekazywanych od nawierzchni kolejowej, na wielkość naprężeń w podtorzu.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 21.02.2013

data akceptacji do druku: 30.04.2013



dr hab. inż.
Łucjan Siewczyński
prof nadzw. P.P.
Zakład Budowy Mostów
i Dróg Kolejowych,
Politechnika Poznańska
lucjan.siewczyński@put.poznan.pl



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

W budownictwie drogowym działalność w zakresie projektowania, budowy i utrzymania dróg, a szczególnie budowli gruntowych w strefie ich współpracy z nawierzchniami, oparta jest o wyniki badań geotechnicznych; ich niezbędnym elementem są próbne obciążenia płytami statycznymi, w celu wyznaczenia wartości modułów odkształcenia podłoża nawierzchni. W przypadku dróg kolejowych, z powodu ich modernizacji, badania te mają duże znaczenie – wartości pomierzone porównywane są z wymaganymi. Wynik z pomiaru modułu stanowi jedyny syntetyczny parametr bezpośredniego pochodzenia do oceny stanu nośności podłoża nawierzchni. Pomiaru ukształtowane są normą pod względem stosowanej aparatury, nacisków, postępowania i analizy wyników, jednakowo dla dróg samochodowych i dla dróg kolejowych, mimo różnic w sposobie przekazywania obciążeń od pojazdów na nawierzchnie i na ich podłoża gruntowe.

Celem artykułu jest dalsza analiza przebiegu badań parametrów odkształcalności podtorza w celu wykazania możliwości uwzględnienia warunków współpracy elementów nawierzchni kolejowej i podtorza pod nawierzchnią w modelowaniu procesu jego próbnych obciążeń i wykazania korzyści jakie mogłyby wynikać dla wymiarowania podtorza pod nawierzchnią na podstawie wyników badań przeprowadzonych z zastosowaniem modelu rzeczywistego sposobu przekazywania obciążeń.

W dotychczasowej analizie badań próbnych uwzględniono wpływ kształtu powierzchni obciążającej podtorze (kształtu płyty) oraz wymiarów tej powierzchni [3,6,7].

Obecnie badania próbne przeprowadzane są przy zastosowaniu płyt okrągłych. W nawierzchni kolejowej stosowane są podkłady poprzeczne jako belki prostokątne, a powierzchnia ich oparcia o podsypkę prowadzi do przyjmowania do badań płyt czworokątnych o wymiarach uwzględniających kształt podkładów i sposób ich podparcia – tylko pod szynami. W analizie uwzględniono więc równania wielkości modułu odkształcenia w przypadku płyty kwadratowej, w przypadku płyty prostokątnej i dla porównania – w przypadku płyty okrągłej wprowadzając wartości parametrów opisujących proces badań i obliczeń dla równania określającego wielkość modułu odkształcenia [6].

Dalsza analiza znaczenia zastosowania płyt czworokątnych do próbnych obciążeń polegała na ocenie ich oddziaływania na podtorze w porównaniu z oddziaływaniem płyty okrągłej; ocena zawierała określenie zgodnie z normą [2] stanów naprężeń w gruncie pod płytami traktując podtorze jako półprzestrzeń sprężystą, izotropową i jednorodną. Uzyskano różne oddziaływania płyt na podtorze; płyt czworokątnych większe niż płyty okrągłej.

W analizie współpracy tych płyt z podtorzem [7] uwzględniono także osiadania, stwierdzając na podstawie obliczeń ich od-

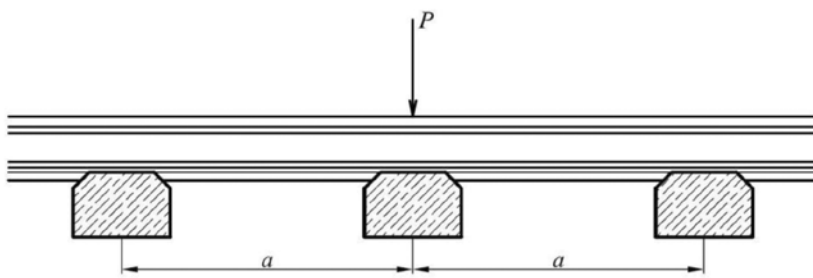
działywanie do różnej głębokości, a na podstawie osiadań wyznaczono także moduły odkształcenia i dokonano oceny ich wartości – największą wartość z próby płytą okrągłą, mniejszych (o ponad 60%) z próby płytą prostokątną. Stosowanie płyt prostokątnych według kształtu powierzchni oparcia podkładów o podsypkę mogłoby prowadzić do uwzględniania udziału podtorza na większą głębokość niż z prób płytą okrągłą, a więc urealniloby wpływ podtorza z większej głębokości na warunki jego współpracy z nawierzchnią.

Niżej przedstawiona analiza uwzględnia znaczenie ustawienia (układu) względem siebie powierzchni przekazujących obciążenia na podtorze, na jego stan naprężeń kwalifikowany w miarodajnym przekroju (w punkcie poniżej torowiska) w celu określenia sumarycznego modułu odkształcenia.

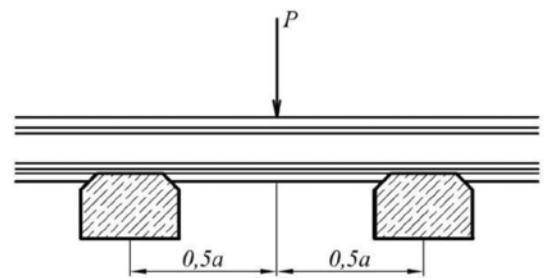
Stan naprężeń pionowych pod podkładami kolejowymi

Analizy stanu naprężeń pionowych pod podkładami kolejowymi dokonano przy założeniu nacisku $P = 105$ kN pojedynczego koła na tor z szyn UIC60 ($I_x = 3055$ cm⁴) na podkładach drewnianych I/B ($b = 0,26$ m, $l = 2,60$ m) o osiowym rozstawie 0,60 m. Naciski podkładów na podsypkę wyznaczono metodą belki ciągłej na sprężystym podłożu z zastosowaniem współczynnika dynamicznego $k_v = 2,0$ oraz współczynnika podatności podłoża $C = 50$ N/cm³. Obliczenia naprężeń przeprowadzono zgodnie z normą [2] i według [9] traktując podtorze z warstwą ochronną jako półprzestrzeń rozciągającą się nieskończenie głęboko. Przy wyznaczaniu naprężeń od obciążeń zewnętrznych przyjęto, że podtorze jest sprężyste (liniowo-odkształcalne), izotropowe i jednorodne.

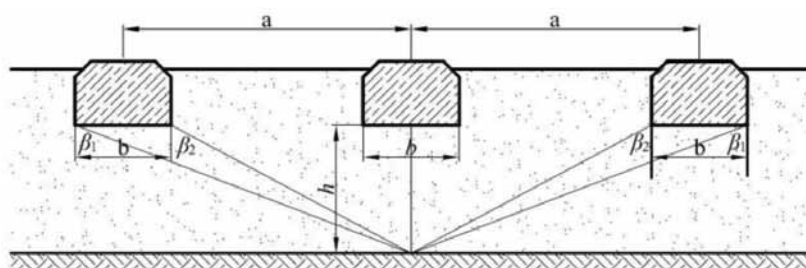
Rozpatrzono dwa schematy obciążenia: nacisk przyłożony w osi podkładu środkowego



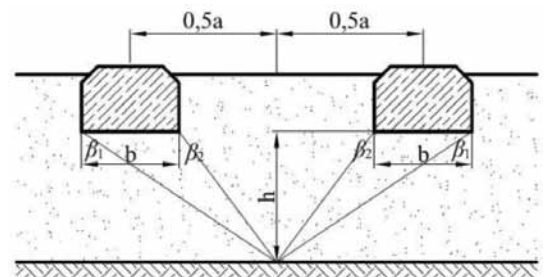
1. Schemat obliczeniowy nr 1. Nacisk przyłożony w osi podkładu środkowego



2. Schemat obliczeniowy nr 2. Nacisk przyłożony w centrum pomiędzy podkładami



3. Schemat przekazywania obciążenia na podtorze od trzech sąsiednich podkładów



4. Schemat przekazywania obciążenia na podtorze od dwóch sąsiednich podkładów

Tab.1: Naciski szyny na podkłady oraz obciążenia podkładów na podsypkę w przyjętych schematach obliczeniowych

Schemat obliczeniowy	1		2
Podkład	środkowy	sąsiedni	sąsiedni
Nacisk szyny na podkład [kN]	61,85	47,60	57,46
Obciążenie podkładu na podsypkę [MPa]	0,216	0,166	0,201

Tab.2: Naprężenia pionowe w podłożu od obciążeń pojedynczym podkładem oraz obliczone z uwzględnieniem wpływu podkładów sąsiednich dla przyjętych schematów obliczeniowych

Schemat	1			2		
	σ_{zq}	σ_{zps}	σ_z	$\sigma_{zq(0,5a)}$	σ_{zps}	σ_z
z [m]	0,0	216,0	0,0	216,0	201,0	0,0
	0,1	192,2	0,2	192,6	178,8	4,6
	0,2	141,2	1,6	144,3	131,4	16,9
	0,3	103,9	4,0	112,0	96,7	25,7
	0,4	79,1	7,0	93,0	73,6	29,5
	0,5	62,0	9,7	81,3	57,7	30,2
	0,6	49,5	11,8	73,1	46,1	29,4
	0,7	40,3	13,3	66,9	37,5	28,0
	0,8	33,3	14,2	61,8	30,9	26,3
	0,9	27,8	14,7	57,3	25,9	24,6
	1,0	23,5	14,9	53,4	21,9	23,0
	1,1	20,1	14,9	49,9	18,7	21,5
	1,2	17,4	14,7	46,7	16,2	20,2
1,3	15,1	14,4	43,9	14,1	19,0	

(rys. 1) oraz w centrum pomiędzy podkładami (rys. 2).

Podkłady przekazują równomiernie rozłożone obciążenie na podsypkę zgodnie z zależnością [8]:

$$p = \frac{P}{2 \cdot b \cdot L} \cdot \eta \quad (1)$$

gdzie:

p – obciążenie przekazywane przed podkład na podtorze, P – nacisk koła na szynę,

b – szerokość podkładu podłużnego, L – długość zastępcza belki, η – rzędna

linii wpływu osiadania do obliczania nawierzchni za pomocą metodą belki podłużnej.

Wyznaczone wartości nacisków szyny na podkłady oraz obciążeń podkładów na podsypkę w przyjętych schematach obliczeniowych zestawiono w tab. 1.

Naprężenia pionowe w podłożu od obciążenia podkładami wyznaczono przy założeniu, że są one podatne, stosując zależność:

$$\sigma_{zq} = \eta_o \cdot p \quad (2)$$

gdzie:

η_o – współczynniki rozkładu naprężeń według [2],

p – nacisk podkładu na podtorze.

Wartości współczynnika rozkładu naprężeń pionowych η_o pod obciążeniem podkładami obliczono ze wzoru [2]:

$$\eta_o = (z, L, B) \quad (3)$$

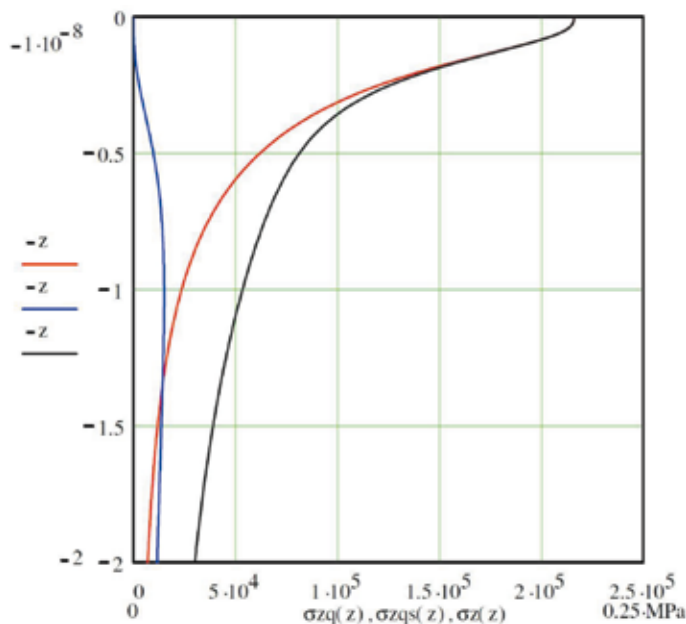
gdzie:

z – głębokość na której wyznacza się naprężenia,

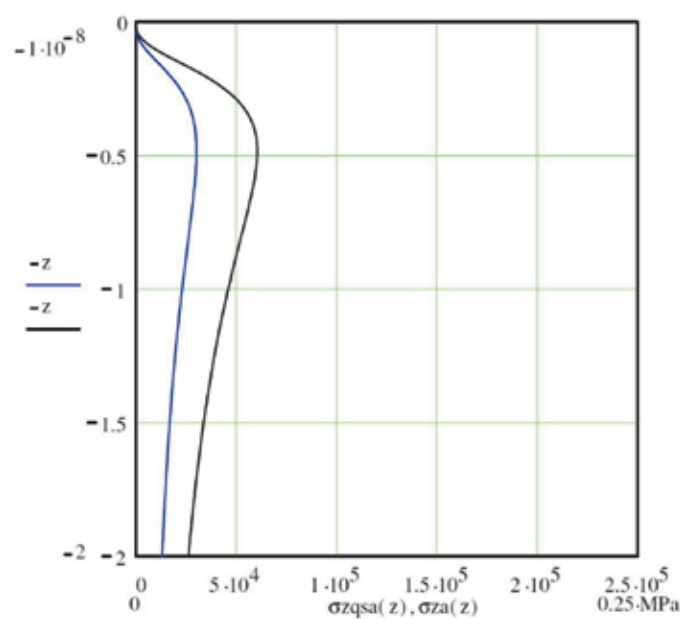
L, B – wymiary boków prostokąta przekazyującego obciążenie

W obliczeniach przyjęto, że naprężenia pionowe w podłożu, pod rozpatrywanym podkładem (schemat nr 1 – rys. 3) oraz w analizowanym przekroju (schemat nr 2 – rys. 4), zależą również od obciążeń przekazywanych przez podkłady sąsiednie [4].

W pierwszym z rozważanych przypadków (rys. 3) naprężenia pod podkładem są równe:



5. Naprężenia pionowe w podłożu od obciążenia pojedynczym podkładem ($\sigma_{zq}(z)$), podkładem sąsiednim ($\sigma_{zqs}(z)$) i naprężenia sumaryczne ($\sigma_z(z)$). Schemat obliczeniowy nr 1



6. Naprężenia pionowe w podłożu od obciążenia podkładem sąsiednim ($\sigma_{zqs}(z)$) i naprężenia sumaryczne ($\sigma_{za}(z)$). Schemat obliczeniowy nr 2

Tab.3: Stan naprężeń pionowych w podtorzu od obciążeń analizowanymi płytami sztywnymi przy nacisku 0,35 MPa

Płyta	Okrągła	Prostokątna		
		0,5u · b	u · b	2u · b
Naprężenie [kPa]	σ_{zq}	σ_{zqs}	σ_z	$\sigma_{zq(0,5a)}$
z [m]	0,0	175,0	350,0	350,0
	0,1	195,7	263,2	278,2
	0,2	143,6	180,0	210,0
	0,3	91,0	121,8	157,6
	0,4	59,4	84,7	119,8
	0,5	41,0	61,1	92,7
	0,6	29,7	45,6	73,1
	0,7	22,4	35,1	58,7
	0,8	17,4	27,8	47,9
	0,9	13,9	22,4	39,7
1,0	11,4	18,5	33,3	

$$\sigma_z = \sigma_{zq} + 2 \cdot \sigma_{zqs} \quad (4)$$

gdzie:

σ_z – naprężenia pod podkładem z uwzględnieniem wpływu podkładów sąsiednich,

σ_{zq} – naprężenia pod pojedynczym podkładem,

σ_{zqs} – naprężenia od obciążenia podkładem sąsiednim

W drugim przypadku (rys. 4) naprężenia w rozważanym przekroju są równe:

$$\sigma_z = 2 \cdot \sigma_{zqs} \quad (5)$$

gdzie:

σ_z – naprężenia w rozważanym przekroju z uwzględnieniem wpływu podkładów sąsiednich,

σ_{zqs} – naprężenia od obciążenia podkładem sąsiednim

Naprężenia od podkładów sąsiednich obliczono z zależności [3]:

$$\sigma_{zqs} = \frac{P_s}{\Pi} \cdot [\beta_1 - \beta_2 + 0,5 \cdot (\sin 2\beta_1 - \sin 2\beta_2)] \quad (6)$$

gdzie:

P_s – nacisk podkładu sąsiedniego na podłożu; dla schematu obliczeniowego nr 1 (rys. 3)

$$\beta_{1,2} = \arctg \frac{a \pm 0,5 \cdot b}{h} \quad (7)$$

oraz dla schematu nr 2 (rys. 4)

$$\beta_{1,2} = \arctg \frac{0,5 \cdot a \pm 0,5 \cdot b}{h} \quad (8)$$

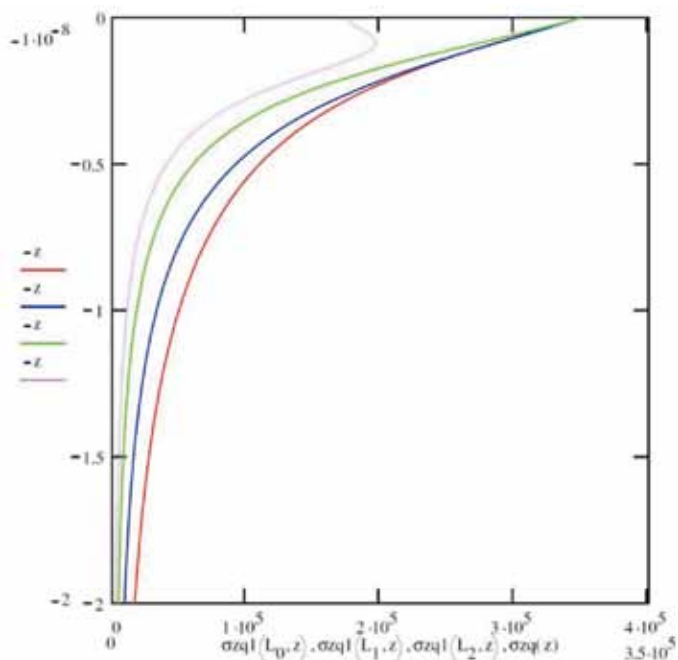
Naprężenia pionowe w podłożu od obciążenia pojedynczym podkładem oraz obliczone z uwzględnieniem wpływu podkładów sąsiednich dla przyjętych schematów obliczeniowych zestawiono w tab. 2. i przedstawiono na rys. 5 i 6.

Stan naprężeń i odkształceń w podtorzu pod płytami próbnymi

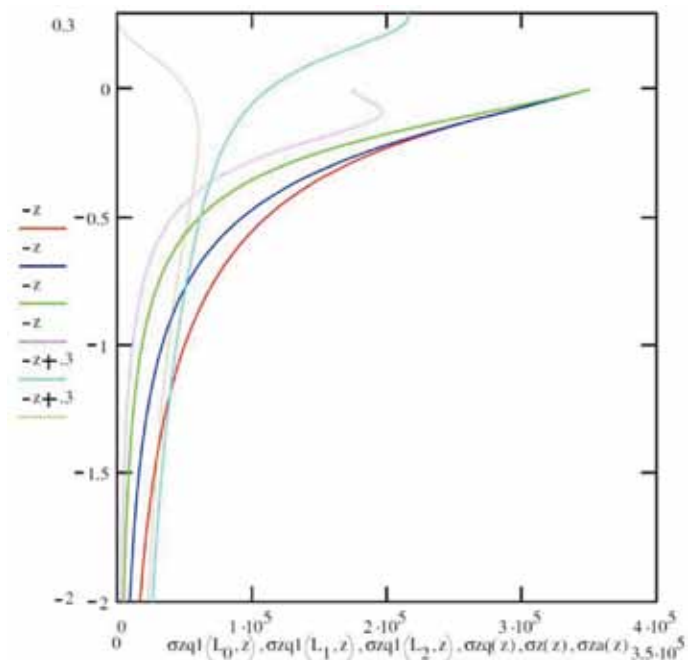
Analizę stanu naprężeń w podtorzu w trakcie badań jego odkształcalności przeprowadzono dla płyt: okrągłej o średnicy 30 cm i prostokątnych o wymiarach: $2u \cdot b$, $u \cdot b$ oraz $0,5u \cdot b$. Przyjęto, jak w obliczeniach naprężeń pod podkładami, podkład drewniany I/B ($u = 0,55$ m i $b = 0,26$ m). Założono obciążenie płyt odpowiadające największemu naciskowi $p_{max} = 0,35$ MPa.

Naprężenia od obciążenia płytami próbnymi wyznaczono przy założeniu, że są one doskonale sztywne, stosując zależność:

$$\sigma_{zq} = \eta_s \cdot q \quad (9)$$



7. Naprężenia pionowe w podtorzu od obciążenia płytami sztywnymi – okrągłą ($\sigma_z(z)$) oraz prostokątnymi: $0,5u \cdot b$ ($\sigma_z(L, z)$) u $\cdot b$ ($\sigma_z(L, z)$) i $2u \cdot b$ ($\sigma_z(L, z)$). Nacisk $0,35 \text{ MPa}$



8. Naprężenia pionowe w podtorzu od obciążeń nawierzchni i płyt do próbnych obciążeń z uwzględnieniem poziomu przekazywania obciążeń

gdzie:

η_s – współczynnik rozkładu naprężeń wzdłuż [2],

q – nacisk jednostkowy płyty

Wartości współczynników rozkładu naprężeń pionowych η_s pod obciążeniem płytą sztywną obliczono ze wzorów [2]:

$$\eta_s = (z, R) \quad (10)$$

$$\eta_s = (z, L, B) \quad (11)$$

gdzie:

z – głębokość na której wyznacza się naprężenia,

R – promień obszaru kołowego,

L, B – wymiary boków prostokąta

Stan naprężeń pionowych w podtorzu od obciążeń analizowanymi płytami sztywnymi przy nacisku o wartości $0,35 \text{ MPa}$ zestawiono w tab. 3 i przedstawiono na rys. 7.

Naciski przekazywane przez płyty próbne wywołują naprężenia w podtorzu o różnych wartościach w zależności od kształtu i rozmiaru płyty. Największe naprężenia występują bezpośrednio pod płytą. Naprężenia szybko zanikają na głębokości 1 m uzyskując około 10% początkowej wartości.

Analiza stanu naprężeń

Wyznaczony stan naprężeń w podłożu podkładów występujący podczas eksploatacji

torów oraz stan naprężeń w podtorzu pod płytami próbnymi stwierdzony na budowie podczas próbnych obciążeń z uwzględnieniem poziomu występowania obciążeń zestawiono na rys. 8.

Z rys. 8 wynika, że żadna z analizowanych płyt próbnych, przy nacisku $0,35 \text{ MPa}$, nie wywołuje w głębszych warstwach podtorza stanu naprężeń analogicznego do wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi. W celu uwzględnienia rzeczywistego stanu naprężeń w podtorzu i wpływu głębszych warstw na odkształcalność podtorza mierzoną na poziomie torowiska, należałoby znaleźć odpowiednie wymiary płyty próbnej lub rozważyć możliwość obciążeń podtorza zespołem płyt próbnych.

Wnioski

1. Stosowane obecnie płyty okrągłe, w próbnych obciążeniach podtorza, nie są zgodne z kształtem rzeczywistych powierzchni obciążających.
2. W celu uwzględnienia rzeczywistych warunków współpracy nawierzchni i podtorza należałoby zastosować układ płyt obciążających.
3. Ze względów poznawczych i aplikacyjnych badania nad zastosowaniem płyt prostokątnych i ich układów, z powodu ich różnego oddziaływania na podtorze, powinny być kontynuowane. ◀

Materiały źródłowe

- [1] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. 2009.
- [2] PKN.PN-81/B-03020 Grunty budowlane - Posadowienie bezpośrednio budowli - Obliczenia statyczne i projektowanie. 1981.
- [3] Siewczyński Ł.: Płyty do próbnych obciążeń podtorza. Transport i Komunikacja 2011, nr 6, s. 12-16.
- [4] Siewczyński Ł.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. Rozprawy Nr 66, Politechnika Poznańska, 1974.
- [5] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Analiza współpracy próbnych płyt z podtorzem. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 2007, nr 3, s. 285-296.
- [6] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Oddziaływanie płyt próbnych na podtorze. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej oddział w Krakowie. Seria Materiały Konferencyjne, 2011, nr 96 (z. 158 „Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym”), s. 499-509.
- [7] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Płyty prostokątne do próbnych obciążeń podtorza. Drogi 2012, nr 10, s. 59-63.
- [8] Sysak J. (red.): Drogi kolejowe. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1982.
- [9] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, 2005.