

Łucjan Siewczyński¹
Michał Pawłowski²

ODDZIAŁYWANIE PŁYT PRÓBNYCH NA PODTORZE

Streszczenie

Artykuł zawiera analizę współpracy z podtorzem płyt do określania modułów odkształcenia w próbnym obciążeniu. Uwzględnione są obecnie stosowane płyty okrągłe oraz płyty czworokątne zgodne z kształtem podkładów. Przeprowadzono analizę stanu naprężenia podtorza pod płytami obciążającymi i podano wnioski dotyczące głębokości strefy oddziaływania płyt na podtorze.

Słowa kluczowe: droga kolejowa, podtorze kolejowe, badania odkształcalności podtorza

1. Wprowadzenie

Prace budowlane lub naprawcze podtorza kolejowego obecnie przeprowadzane są z uwzględnieniem wyników badań geotechnicznych, które wykonywane są dla przygotowania projektu, oceny postępu robót i dla stwierdzenia ich efektu końcowego. Elementem badań geotechnicznych są próbne obciążenia podtorza płytą w celu wyznaczenia wartości modułów odkształcenia gruntów i materiałów w podtorzu pod torowiskiem. Badania te mają duże znaczenie podczas trwającego obecnie przystosowywania dróg kolejowych do nowych warunków eksploatacji (szybkości, nacisków, wymagań). Wyniki badań porównywane są z wartościami modułów zawartymi w przepisach [1].

¹ dr hab. inż. prof. n. PP, prof. n. PWSZ w Gnieźnie, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Dróg Kolejowych, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: 61 665 2431, lucjan.siewczynski@put.poznan.pl

² dr inż., Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Dróg Kolejowych, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 665 2407, e-mail: michal.pawlowski@put.poznan.pl

Powiększające się zainteresowanie stosowaniem modułów odkształcenia w budownictwie drogowym spowodowane jest możliwością bezpośredniego, prostego, szybkiego i wiarygodnego zmierzenia parametru geotechnicznego umożliwiającego ocenę nośności i stanu budowli odbierającej obciążenia od nawierzchni, bez pobierania, transportu i badań próbek gruntów. Wynik badania modułu odkształcenia stanowi jedyny syntetyczny miernik bezpośredniego pochodzenia do oceny stanu nośności budowli gruntowych współpracującej z nawierzchnią drogi. Pomiary we wszystkich miejscach mają jednakowy przebieg ukształtowany normą [1, 3] określającą narzędzia, postępowanie i analizę wyników badań.

Obecnie w budownictwie dróg samochodowych i dróg kolejowych stosuje się jednakowe narzędzia, postępowanie i analizę w badaniach parametrów odkształcalności – opracowane dla dróg samochodowych zastosowane zostały także dla oceny podtorza dróg kolejowych. Różnice w przekazywaniu obciążeń od pojazdów na podłoże nawierzchni drogowych i na podtorze nawierzchni kolejowych, które powinno być uwzględnione w modelowaniu procesu badań, podnoszone są w dyskusjach. Celem artykułu jest analiza przebiegu badań parametrów odkształcalności dla wykazania możliwości uwzględnienia warunków współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem w tych badaniach.

2. Warunki próbnych obciążeń podtorza płyta

Zdolność materiału (także gruntu) do odkształceń pod wpływem sił zewnętrznych, lub innych czynników fizycznych, nazywa się odkształcalnością – jej miarą jest stosunek jednostkowego obciążenia powierzchni przekazującej obciążenia do jej osiadania pod tym obciążeniem, z uwzględnieniem geometrycznych i fizycznych warunków pomiaru. Dla potrzeb drogownictwa (samochodowego i kolejowego) wykonuje się próbne obciążenia stalową płytą okrągłą w celu oznaczenia modułu pierwotnego (ogólnego) odkształcenia gruntu podtorza oraz modułu wtórnego z drugiego obciążenia. Warunki próbnych obciążeń można analizować uwzględniając wartości parametrów określających proces badań i obliczeń.

Wielkość modułu odkształcenia ogólnego z wyników badań próbną płytą określona jest równaniem [13]:

$$E_0 = (1 - \nu^2) \cdot \omega \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (1)$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona,

ω – współczynnik wpływu kształtu i sztywności płyty,

B – średnica płyty lub krótszy jej bok,

Δp – przedział obciążeń przyjęty do obliczeń modułu,

Δy – osiadanie płyty w przyjętym przedziale obciążeń.

Dwa przypadki współpracy płyty okrągłej z gruntem mają znaczenie w budownictwie drogowym [6, 9]:

- 1) płyta jest w pełni podatna ($\omega=0$), a grunt nie wykazuje bocznej rozszerzalności ($\nu=0$) pod działaniem obciążenia, i wtedy:

$$E_0 = \frac{D \cdot \Delta p}{\Delta y} = 2 \cdot \frac{r \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (2)$$

gdzie:

r – promień płyty okrągłej,

- 2) płyta jest absolutnie sztywna ($\omega=0,79$) i przekrój płyty spełnia warunek wytrzymałości na zginanie oraz $\nu=0,10 \div 0,40$; stąd:

$$E_0 = (1,56 \div 1,33) \cdot \frac{r \cdot \Delta p}{\Delta y} \approx 1,5 \cdot \frac{r \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (3)$$

Współczynnik o wartości 1,5 w równaniu (3) osiągany jest gdy $\nu=0,23$ [6].

Równanie (2) stanowi pierwsze nieograniczone uniezależnienie testu od warunków gruntowych – każdy grunt traktowany jest tak samo i moduły uzyskują zwiększone wartości. Równanie (3) oznacza drugie uniezależnienie próby od warunków gruntowych, ale ograniczone przeznaczeniem testu – głównie do oceny zagęszczenia gruntów nie-spoistych.

Para liczb $\omega = 1,0$; $\nu = 0,0$ spełnia równanie (2) stosowane do 2004r. do analizy wyników próbnych obciążeń podtorza. Współczynnik 1,5 w równaniu (3) wynika z założonych warunków współpracy płyty z gruntem podtorza.

Obecnie podczas modernizacyjnego wzmacniania podtorza warstwami ochronnymi, okrągła płyta o średnicy 30 cm do próbnych obciążeń jest podstawowym narzędziem do weryfikacji skutków wzmocnienia. Przeprowadzono także analizę współpracy płyty o średnicy 15 cm z podtorzem wzmocnionym warstwą ochronną, a także dla porównania w analizie uwzględniono płyty o średnicy 45 cm [7, 11]. Analiza wykazała, że płyta próbna oddziałuje na podtorze do głębokości zależnej od rodzaju i stanu gruntów budujących podtorze oraz od stosowanego nacisku płyty – wynosi ona około $4D$ w przypadku płyty o średnicy 30 cm, około $5,3D$ w przypadku płyty o średnicy 15 cm oraz $3,5D$ – gdy płyta ma średnicę 45 cm.

Wnioski z tej analizy wskazują na ograniczoną przydatność płyty o średnicy 30 cm do badań podtorza modernizowanego oraz na skuteczność zastosowania płyty o średnicy 15 cm do oceny nośności i stanu zagęszczenia podtorza modernizowanego. Wnioski te zachęcają do analizy współpracy płyt do próbnych obciążeń podtorza z uwzględnieniem kształtu i wymiarów elementu nawierzchni (podkładu) obciążającego podtorze.

3. Płyty czworokątne do badań podtorza

Opracowanie metodyki przeprowadzania próbnych obciążeń podtorza wymaga uwzględniania sposobu obciążania podtorza przez pojazd szynowy stojący na torze; przede wszystkim powinny być uwzględnione kształt i wymiary powierzchni obciążającej oraz układ powierzchni obciążających i warstwa pośrednicząca w przekazywaniu obciążeń.

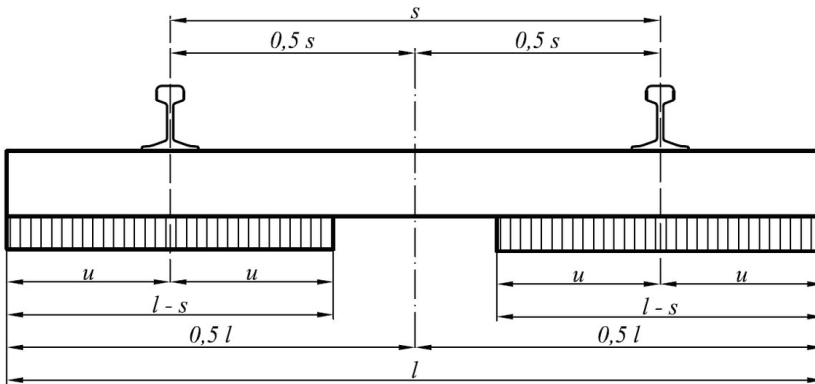
W przekazywaniu obciążeń od podkładów na torowisko pośredniczy podsypka. W obliczeniach wytrzymałości nawierzchni kolejowej przyjmuje się, że ciśnienie podkładu na podsypkę rozkłada się równomiernie na całej powierzchni jego oparcia. W rzeczywistości rozkład nacisków na podsypkę pod podstawą podkładu nie jest jednakowy zarówno na długości podkładu, jak i w jego przekroju poprzecznym. Podkład drewniany największe naciski przekazuje w przekroju pod szyną, betonowy zaś na końcach. Z tego względu podkłady drewniane kształtowane są jako posiadające podstawę prostokątną, podkłady betonowe zaś mają zmienny kształt powierzchni oparcia na długości i zwiększoną szerokość końców podkładów. Dla uproszczenia można

przyjąć, że podkład poprzeczny rozdziela na podsypkę działające na niego naciski szyn obu toków równomiernie na długości $2u$, symetrycznie z obu stron każdej szyny. Przy długości podkładu l wielkość u , to jest odległość osi szyny od jej końca, wynosi (rys. 1):

$$u = \frac{l - s}{2} \quad (4)$$

gdzie:

s – rozstaw szyn.



Rys. 1. Schemat podparcia podkładu przyjmowany do obliczeń [12]

Podkłady stosowane w nawierzchniach kolejowych cechują się bardzo zróżnicowanymi wymiarami i kształtami, przy tym jako przykładowe można przyjmować podkłady drewniane (np. typu I/B) i podkłady strunobetonowe PBS-1 lub INBK-7M.

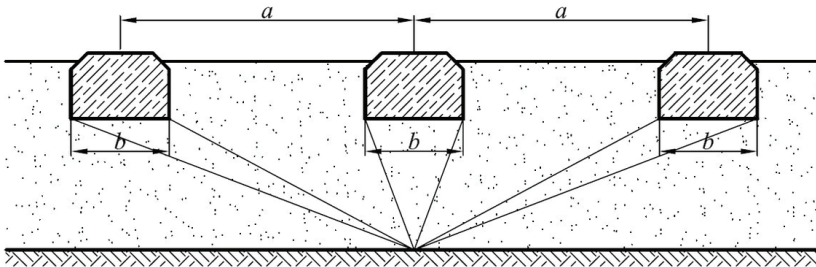
Podkład drewniany I/B o długości $l = 260$ cm wykazuje $u = 55$ cm oraz szerokość $b = 26$ cm, czyli powierzchnię oparcia pod jedną szyną $F = 2u \cdot b = 2860$ cm².

Podkład strunobetonowy INBK-7M posiada $l = 250$ cm, $b = 30$ cm, $u = 50$ cm oraz $F = 3000$ cm².

Płytę doświadczalną można więc kształtować jako całą powierzchnię oparcia podkładu pod szyną $2u \cdot b$, jako połowę tej powierzchni czyli $u \cdot b$, lub ostatecznie czwartą jej część, czyli $0,5u \cdot b$. Ten ostatni przypadek sprowadza poszukiwania do przyjęcia płyty kwadratowej o boku 25 cm lub 30 cm, na podstawie obliczeń z wartości powierzch-

ni oparcia przykładowych podkładów I/B – 26,7 cm oraz INBK-7M – 27,3 cm [6].

Badania płytami podczas próbnych obciążeń dla potrzeb budownictwa drogowego przeprowadzane są w pojedynczych (odosobnionych) miejscach. Podtorze nawierzchni kolejowej obciążane jest zespołem (układem) powierzchni obciążających (podkładów), które wzajemnie oddziaływując na bezpośrednie otoczenia swojego podłoża, zwiększają skutki oddziaływań przekazywanych przez pojedyncze powierzchnie obciążające (podkłady). Wartości modułów odkształceń określone na podstawie wyników próbnych obciążeń podtorza pojedynczą płytą są większe, niż gdyby były wyznaczone z wyników próbnych obciążeń zespołem płyt (rys. 2), modelujących rzeczywisty układ obciążeń. Różnice tych wartości nie są uwzględniane w warunkach projektowych.



Rys. 2. Obciążenia podtorza od trzech podkładów sąsiednich [12]

Płyty prostokątne o dłuższym boku $2u \cdot b$ lub nawet $u \cdot b$ z powodu znacznych wymiarów i ciężaru byłyby niepraktyczne w zastosowaniach do badań podtorzy czynnych linii kolejowych.

Podobnie jak dla płyty okrągłej na podstawie równania (1), można analizować przykładowe płyty do badań odkształcalności podtorza zakładając, że płyty są absolutnie sztywne, a przekrój płyt spełnia warunek wytrzymałości na zginanie oraz $v=0,10 \div 0,40$ [6].

W przypadku płyty kwadratowej $\omega = 0,8$, skąd:

$$E_0 = (0,87 \div 0,739) \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (4)$$

Dla wartości $v=0,23$ wartość współczynnika w równaniu (4) jest 0,833 i wtedy:

$$E_0 = 0,833 \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (5)$$

W przypadku płyty prostokątnej o stosunku boków $2u : b \approx 4$ $\omega = 1,5$ i wtedy:

$$E_0 = (1,53 \div 1,30) \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (6)$$

Dla wartości $\nu=0,23$ współczynnik w równaniu (6) osiąga wartość 1,47 i wtedy:

$$E_0 = 1,47 \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (7)$$

W przypadku płyty prostokątnej o stosunku boków $u : b \approx 2$ $\omega = 1,2$ skąd:

$$E_0 = (1,21 \div 1,02) \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (8)$$

Dla wartości $\nu=0,23$ współczynnik w równaniu (8) osiąga wartość 1,14 i wtedy:

$$E_0 = 1,14 \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{\Delta y} \quad (9)$$

4. Naprężenia w podtorzu pod płytami

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 podkład drewniany I/B, dla którego $u = 55$ cm i $b = 26$ cm. Założono obciążenie płyt odpowiadające największemu naciskowi $p_{max} = 0,35$ MPa. Do analizy przyjęto prosty przypadek podtorza wzmocnionego pojedynczą warstwą ochronną ze żwiru o grubości 30 cm, zbudowaną na podtorzu dotychczasowym z piasku drobnego w stanie zagęszczonym. Parametry geotechniczne gruntów podtorza (fizyczne i mechaniczne) przyjęto z piśmiennictwa [13].

Obliczenia naprężeń przeprowadzono zgodnie z normą [2] i według [13] traktując podtorze z warstwą ochronną jako półprzestrzeń, ograniczoną od góry nowym torowiskiem, rozciągającą się nieskończenie

głęboko. Przy wyznaczaniu naprężeń od obciążeń zewnętrznych przyjęto, że podtorze jest sprężyste (liniowo-odkształcalne), izotropowe i jednorodne. W analizie uwzględniono obciążenie od ciężaru własnego gruntu. Wartość naprężenia własnego podtorza $\sigma_{z\gamma}$ wyznaczono ze wzoru:

$$\sigma_{z\gamma} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \quad (10)$$

gdzie:

γ_i – ciężar objętościowy gruntu w każdej warstwie i ,

h_i – grubość poszczególnych warstw i .

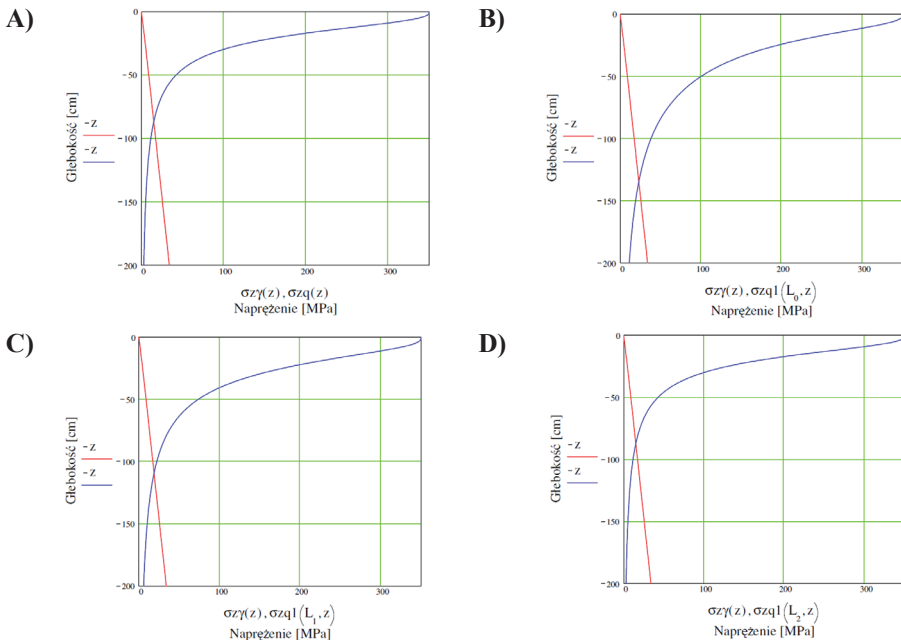
Naprężenia od obciążenia płytami próbnymi wyznaczono stosując wzór:

$$\sigma_q = \eta \cdot q \quad (11)$$

gdzie:

η – współczynnik rozkładu naprężeń według [2],

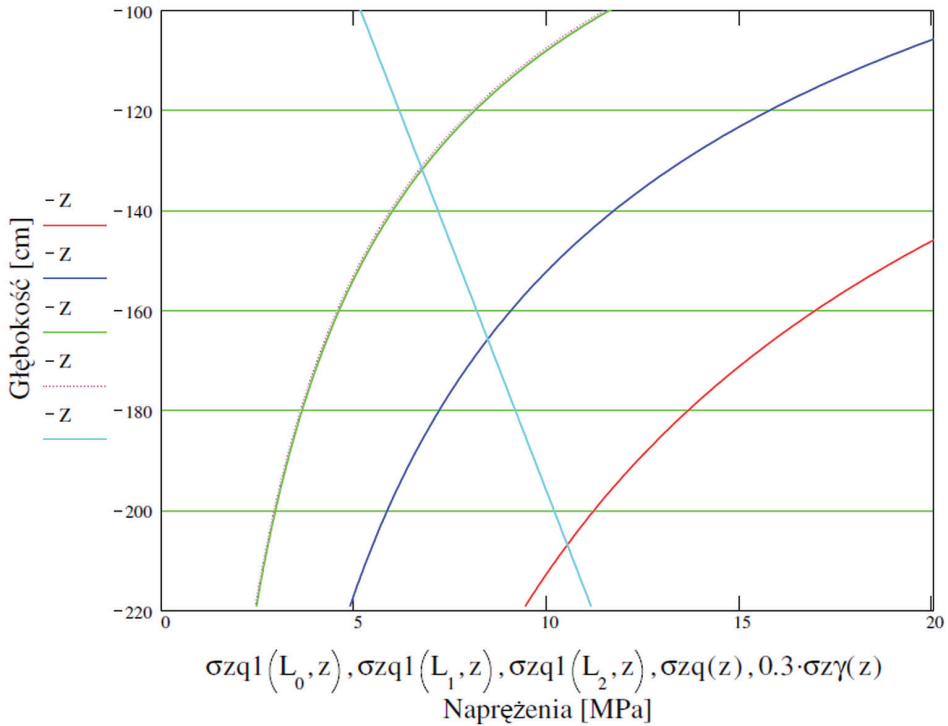
q – nacisk jednostkowy płyty.



Rys. 3. Stan naprężeń w podtorzu z piasku drobnego zagęszczonego z warstwą ochronną ze żwiru. A – płyta okrągła o średnicy 30 cm, B, C i D – płyty prostokątne o wymiarach $2u \cdot b$ (B), $u \cdot b$ (C), oraz $0,5u \cdot b$ (D). Obciążenie płytą 0,35 MPa.

Wyznaczono zasięg wpływu płyt przy maksymalnym obciążeniu na głębokości, gdzie (rys. 4):

$$\sigma_q \leq 0,3 \cdot \sigma_{z\gamma} \quad (12)$$



Rys. 4. Głębokość oddziaływania płyt próbnych. Obciążenie płytą 0,35 MPa

Wartości naprężeń w podtorzu (rys. 3., rys. 4.) wskazują, że płyty obciążające oddziałują na swoje podłoże do różnej głębokości zależnej od kształtu płyty. Płyta okrągła o średnicy 30 cm osiąga zasięg wpływu równy 131,31 cm co w przybliżeniu odpowiada zasięgowi płyty prostokątnej o wymiarach $0,5u \cdot b$ (131,78 cm). Płyta prostokątna o wymiarach $u \cdot b$ oddziałuje do głębokości 165,72 cm – o 26 % większej niż dla płyty okrągłej. Płyta prostokątna o wymiarach $2u \cdot b$ oddziałuje na podtorze do głębokości 206,84 cm – o ponad 57 % większej niż dla płyty okrągłej.

5. Wnioski

1. Badanie odkształcalności podtorza płytami okrągłymi jest standardowym postępowaniem stosowanym w budownictwie drogowym.
2. Stosowanie specjalnego postępowania dla oceny odkształcalności podtorza wymaga stosownej metodyki badań i zastosowania wyników.
3. Ze względów poznawczych i aplikacyjnych badania porównawcze zastosowania obu rodzajów płyt powinny być kontynuowane, z powodu ich różnego oddziaływania na podtorze.

Bibliografia

- [1] Id-3. *Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2009r.
- [2] PN-81/B-03020 *Grunty budowlane - Posadowienie bezpośrednie budowli - Obliczenia statyczne i projektowanie*. PKN, Warszawa 1981r.
- [3] PN-S-02205 *Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania*. PKN, Warszawa 1998r.
- [4] Siewczyński Ł.: *Określanie modułów odkształcalności podtorza w procesie modernizacji*. XI Konferencja Drogi Kolejowe. Wrocław 2001r., 175-185.
- [5] Siewczyński Ł.: *Parametry eksploatacyjne drogi a wymagania projektowe dla podtorza*. Symposium Racjonalne wykorzystanie infrastruktury szynowej. Zbiór referatów. Kraków 1995r., str. 205-214.
- [6] Siewczyński Ł.: *Płyty do próbnych obciążeń podtorza*. IV Konferencja Naukowo – Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym” INFRASZYN 2011. Zakopane 06.-08. kwietnia 2011r., str. 191-200.
- [7] Siewczyński Ł.: *Próba oceny podtorza płytą obciążającą o małej średnicy*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy modernizacji linii kolejowej E-30”, Kliczków 8-9 listopada 2007, str. 111 – 118.
- [8] Siewczyński Ł.: *Uproszczenia w określaniu modułów odkształcenia gruntów podtorza*. Materiały II Konferencji Naukowo-

Technicznej „Modernizacja Linii kolejowych na przykładzie Poznańskiego Węzła Kolejowego”, Poznań-Rosnówko 17-18 listopada 2008r., str. 117 – 122.

- [9] Siewczyński Ł.: *Wzmacnianie górnej strefy podtorzy w świetle metodyki badań odkształcalności*. II Problemowa Konferencja Geotechniki „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”, Białystok-Białowieża, 17-18.06.2004r., tom 1, str. 203-214.
- [10] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: *Analiza współpracy próbnych płyt z podtorzem*. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Drogi Kolejowe 2007”. Poznań-Rosnówko, 19-20. października 2007r., Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej nr 3/2007, Poznań, WPP 2007, str. 285 – 296.
- [11] 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 2005r. s. 245-264.
- [12] Sysak J. (red.): *Drogi kolejowe*. PWN, Warszawa 1986r.
- [13] Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. WKiŁ, Warszawa 1987r.

INTERACTION OF TESTING PLATE ON SUBGRADE

Summary

The analysis of co-operation between plates and subgrade for distortion modules determination in testing load have been given in the paper. The round plates and quadrangular plates corresponding to the shape of sleepers have been included. The analysis of subgrade stresses under loading plates had been executed and the results relating to the depth of interaction zones between plates and subgrade have been given.

Keywords: railway, rail subgrade, subgrade strain investigation