ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 103 Nr kol. 1692

Andrzej SUROWIECKI
Politechnika Wrocławska

MODUŁ ODKSZTAŁCENIA JAKO PARAMETR MODELU WARSTWY PODTORZA ZE WZMOCNIENIEM

Streszczenie. Temat referatu dotyczy wzmocnienia podtorza sposobem mechanicznym, przy użyciu rozmieszczonych poziomo geosyntetycznych wkładek. Opracowano podstawy do sporządzenia formuły matematycznej, służącej do oszacowania wartości modułu odkształcenia warstwy ośrodka sypkiego ze wzmocnieniem, na bazie odkształceń pionowych generowanych statycznym pionowym naciskiem. Zaproponowano trzy uniwersalne postaci formuły: dla zbrojenia pojedynczą wkładką, zespołem dwóch wkładek oraz wieloma warstwami zbrojenia w stałym odstępie pionowym. Lokalizacja wkładki lub wkładek została wyrażona w dwóch pierwszych przypadkach za pomocą funkcji korekcyjnej, której kilka wariantów określono metodą numeryczną.

DEFORMATION MODULUS AS A PARAMETER OF THE MODEL OF RAILWAY FOUNDATION WITH STRENGTHENING

Summary. The paper is focused on the problem of subgrade reinforcement with horizontally placed reinforcement with geotextile insets. The bases for the mathematical formula of estimating deformation modulus values of loose medium layer with reinforcement were derived by means of measured vertical deformations of laboratory models generated from vertical static load. Tree universal figures of the formula were proposed: for reinforcement with single inset; with two insets, and with multiple reinforcement.

1. Wprowadzenie

W budownictwie dróg kolejowych, stanowiącym jedną z głównych dyscyplin inżynierii lądowej, obserwuje się w ostatnich latach dynamiczny rozwój technologiczny [3]. Tendencja ta obejmuje między innymi nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne, nowe materiały i wyroby w zastosowaniu do nawierzchni i podłoża dróg szynowych [6-9, 12], a także budowli ziemnych typu nasypy i przekopy [4, 11]. U podstaw wprowadzania „nowoczesnych technologii" leży szereg warunków niezbędnych do spełnienia, np. nieskomplikowane wykonawstwo i minimalizacja kosztów. W przypadkach budowy linii kolejowej na gruntach o niedostatecznej nośności, zasadniczo zmiennej na długości trasy (taka konieczność występuje dość często), sztuka inżynierska dysponuje szerokim spektrum metod polepszania właściwości nośnych słabych gruntów. Do metod tych należy m.in. mechaniczne wzmocnienie ośrodka gruntowego polegające na rozmieszczeniu wkładek (zasadniczo są to geosyntetyki [1, 2]) zdolnych przejąć naprężenia poziome pochodzące od obciążenia zewnętrznego. Tego typu wzmocnienie nazywane zbrojeniem gruntu jest przedmiotem referatu.

2. Warstwa ośrodka sypkiego ze wzmocnieniem (podstawy doświadczalne)

Analizowana jest praca w zakresie odkształceń warstwy ośrodka sypkiego typu podsypka kolejowa lub aktywnej bryły podtorza (w strefie torowiska). Rozważania są prowadzone na podstawie badań doświadczalnych odkształcalności próbek gruntu sypkiego (piasek średnioziarnisty rzeczny) ze zbrojeniem wkładkami dwukierunkowymi, które stanowiły geosiatki TENSAR o wymiarze oczek kwadratowych 20 x 20 mm [14]. Próbki znajdowały się w pojemniku należącym do wyposażenia laboratorium badawczego Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej [13]. Wymiary pojemnika w planie wynoszą 0,54 x 0,54 m, natomiast wysokość H = 0,42 m; wymiary te stanowią wymiary próbek. Konstrukcja stalowych ścian i dna umożliwia dokonywanie pomiarów odkształceń poziomych i pionowych próbek pod wpływem pionowo i centrycznie działającego statycznego obciążenia. Zbrojenie lokalizowane było kolejno na siedmiu poziomach pomiarowych z_i różniących się interwałem $\Delta z = 0{,}06$ m.

W praktyce inżynieryjnej nośność podłoża nawierzchni kolejowej jest badana na podstawie pomiarów odkształceń pionowych. Do standardów należą testy obciążenia podłoża płytami pomiarowymi realizowane w sposób statyczny, czyli aparaturą VSS [6], albo – jako alternatywa lub uzupełnienie – płytą obciążaną dynamicznie. Ponieważ w ramach niniejszego referatu, stanowiącego uogólnienie teoretyczne wyników badań doświadczalnych, modele obciążano statycznie, celowe jest odniesienie wyników do zależności stosowanej przy obliczaniu modułu odkształcenia E na podstawie badania aparaturą VSS. Moduły odkształcenia są więc obliczane ze wzorów [6]:

$$E_1 = 3\Delta p_1 (4\Delta s_1)^{-1} D; \quad E_2 = 3\Delta p_2 (4\Delta s_2)^{-1} D, \tag{1}$$

gdzie:

Δp_1, Δp_2 – przyrosty obciążenia, kolejno w pierwszym i drugim cyklu obciążenia,

Δs_1, Δs_2 – przyrosty przemieszczeń pionowych odpowiednio w pierwszym i drugim cyklu obciążenia dla zmiany obciążeń w zakresie Δp,

D – średnica płyty pomiarowej, zasadniczo $D = 0{,}30$ m.

Wzór (1) potraktowano jak analityczny zapis modelu pracy warstwy ośrodka sypkiego ze wzmocnieniem. We wzorze tym zaproponowano wyrazić wartość Δs funkcją zawierającą współczynnik korekcyjny W, uwzględniający relację między teorią a doświadczeniem. Współczynnik ten stanowi również funkcję. Problemem było określenie funkcji $W = f(\Delta s_i, z_i)$ opisującej pomierzone osiadania Δs_i, dla zmiennej lokalizacji wkładek zbrojenia z_i. Wartość osiadania jest średnią arytmetyczną z odczytów przemieszczeń wykonanych w czterech narożnikach płyty obciążającej próbkę gruntu w procesie testów laboratoryjnych. Opracowana procedura polega na sformułowaniu równania matematycznego, z którego po podstawieniu parametru wyrażającego lokalizację wkładki oblicza się osiadanie próbki Δs_i. Następnie po podstawieniu wartości osiadania do wzoru (1) otrzymuje się moduł odkształcenia. Zaproponowano trzy typy modeli:

I – dla warstwy ośrodka zbrojonego pojedynczą wkładką (zasadniczym parametrem jest lokalizacja wkładki z_i),

II – dla warstwy ośrodka zbrojonego dwiema wkładkami (zasadniczym parametrem jest lokalizacja wkładek z_i^1, z_i^2), III – dla warstwy ośrodka zbrojonego dwiema lub większą liczbą wkładek zlokalizowanych poziomo, symetrycznie względem środka grubości tej warstwy (zasadniczymi elementami są: pionowy odstęp wkładek Δz i wytrzymałość na rozciąganie R_r).

Rozwiązanie podane w referacie może mieć znaczenie praktyczne: na podstawie pomierzonych płytą VSS na powierzchni torowiska osiadań podtorza można oszacować wartość modułu odkształcenia.

3. Model warstwy ośrodka sypkiego zbrojonego pojedynczą wkładką

Przyjęto zbiór danych:

- stała wysokość próbki (modelu): H = 0,42 m;
- warianty lokalizacji wkładki z_i (i = 1, ...7): z_1 = 0,03 m; z_2 = 0,09 m; z_3 = 0,15 m; z_4 = 0,21 m; z_5 = 0,27 m; z_6 = 0,33 m; z_7 = 0,39 m;
- pomierzone osiadania próbki (przemieszczenia pionowe) Δ si (i = 1, ...7); dla modeli z wkładką zlokalizowaną na poszczególnych poziomach zi: Δs_1 = 2,21 mm; Δs_2 = 2,91 mm; Δs_3 = 3,09 mm; Δs_4 = 3,58 mm; Δs_5 = 3,91 mm; Δs_6 = 3,95 mm; Δs_7 = 4,43 mm.

Zaproponowano równanie do obliczenia wartości Δs_i:

$$\Delta s_i = W_i z_i (H)^{-1} \tag{2}$$

Obliczone z równania (2) wartości współczynników W_i (dla danych poziomów lokalizacji wkładki z_i oraz odpowiadających im wartości osiadania Δs_i) kształtują się następująco: $W_1 = 0{,}031$; $W_2 = 0{,}014$; $W_3 = 0{,}009$; $W_4 = 0{,}007$; $W_5 = 0{,}006$; $W_6 = 0{,}005$; $W_7 = 0{,}004$. Poniżej podano zbiór współczynników korekcyjnych, będących funkcjami $W_i = f\ (z_i, \Delta s_i\ )$, z których każda jest wspólna dla poszczególnych lokalizacji z_i wkładki i osiadań Δs_i próbki gruntu. Krzywe W_i wytypowano w procesie aproksymacji numerycznej (podano również wartości współczynników determinacji R^2):

- funkcja potęgowa $W = 0{,}0023\ z^{-0{,}7398}$, $R^2 = 0{,}9971$;
- funkcja logarytmiczna $W = -0{,}01\ ln\ (z)^{-0{,}0074}$, $R^2 = 0{,}9247$;
- funkcja wykładnicza $W = 0{,}0235\ e^{-4{,}7312\,z}$, $R^2 = 0{,}856$;
- wielomian drugiego stopnia $W = 0{,}3496\ z^2 - 0{,}2053\ z + 0{,}0335$, $R^2 = 0{,}9125$;
- wielomian trzeciego stopnia $W = -1{,}935\ z^3 + 1{,}5686\ z^2 - 0{,}4125\ z + 0{,}0412$, $R^2 = 0{,}9846$;
- wielomian czwartego stopnia $W = 10{,}106\ z^4 - 10{,}424\ z^3 + 3{,}8944\ z^2 - 0{,}6406\ z + 0{,}0469$, $R^2 = 0{,}9995$.

Ponadto zaproponowano bezpośrednią aproksymację funkcji wyrażającej osiadania w zależności od lokalizacji wkładki z, przyjmując parametr x = z/H. Wtedy funkcja osiadań otrzymuje postać: Δ si = f (z/H) i ma bardziej uniwersalne znaczenie. Zaproponowano rozkłady, podając także wartość współczynnika determinacji:

- liniowy $\Delta s_i = 0{,}0024\ x + 0{,}0022$; $R^2 = 0{,}9609$;
- logarytmiczny $\Delta s_i = 0{,}0008\ ln\ (x) + 0{,}0042$; $R^2 = 0{,}9429$;
- wielomian drugiego stopnia $\Delta s_i = -0{,}0012\ x^2 + 0{,}0036\ x + 0{,}002$; $R^2 = 0{,}9766$;
- wielomian trzeciego stopnia $\Delta s_i = 0{,}0034\ x^3 - 0{,}0064\ x^2 + 0{,}0057\ x + 0{,}0019$; $R^2 = 0{,}983$;
- wielomian czwartego stopnia $\Delta s_i = 0{,}0035\ x^4 - 0{,}0035\ x^3 - 0{,}0019\ x^2 + 0{,}0047\ x + 0{,}0019$; $R^2 = 0{,}9832$;
- potęgowy $\Delta s_i = 0{,}0043\ x^{0{,}2602}$; $R^2 = 0{,}9767$;

- wykładniczy $\Delta s_i = 0{,}0023\, e^{0{,}7332\, x}$; $R^2 = 0{,}923$.

4. Model warstwy ośrodka sypkiego zbrojonego dwiema wkładkami

Próbka jest zbrojona podwójnie w sześciu wariantach, przy czym położenie jednej z wkładek jest niezmienne i wynosi z_6 = 0,33 m, natomiast lokalizacja drugiej wkładki jest zmieniana w zakresie poziomów pomiarowych: z_1 = 0,03 m; z_2 = 0,09 m; z_3 = 0,15 m; z_4 = 0,21 m; z_5 = 0,27 m; z_7 = 0,39 m. Wysokość próbki jest stała jak w poprzednim przypadku i wynosi H = 0,42 m. Położenie wkładki unieruchomionej na poziomie z_6 = 0,33 m opisano parametrem:

$$k = z_6\,(H)^{-1}, \tag{3}$$

którego wartość wynosi k = 0,33 m $(0{,}42\ \text{m})^{-1}$ = 0,7857.

Pomierzone osiadania próbek Δsi kształtują się następująco (indeks dolny oznacza poziom lokalizacji wkładki przemieszczanej względem wkładki unieruchomionej): Δs_1 = 2,09 mm; Δs_2 = 2,28 mm; Δs_3 = 2,80 mm; Δs_4 = 3,35 mm; Δs_5 = 3,86 mm; Δs_7 = 4,03 mm.

Równanie do obliczenia przemieszczeń pionowych Δ si ma postać:

$$\Delta s_i = k\, W_i\, z_i\,(H)^{-1} \tag{4}$$

Obliczone według powyższego równania wartości współczynników W_i (dla danych poziomów lokalizacji „ruchomej" wkładki oraz odpowiadających im wartości osiadania Δs_i) wynoszą kolejno: W_1 = 0,037; W_2 = 0,014; W_3 = 0,010; W_4 = 0,009; W_5 = 0,008; W_7 = 0,006. Poniżej podano jak poprzednio zbiór współczynników korekcyjnych, będących krzywymi $W_i = f(z_i, \Delta s_i)$, z których każda jest wspólna dla poszczególnych lokalizacji z_i „ruchomej" wkładki i osiadań $\Delta\, s_i$ próbki gruntu. Krzywe W_i wytypowano w procesie aproksymacji numerycznej (podano również wartości współczynników determinacji R^2):

- funkcja potęgowa $W = 0{,}0027\, z^{-0{,}7182}$; $R^2 = 0{,}9826$;
- funkcja logarytmiczna $W = -0{,}0121 \ln(z) - 0{,}0097$; $R^2 = 0{,}8809$;
- wielomian trzeciego stopnia $W = -3{,}3333\, z^3 + 2{,}5195\, z^2 - 0{,}5953\, z + 0{,}052$; $R^2 = 0{,}9757$;
- wielomian czwartego stopnia $W = 22{,}121\, z^4 - 21{,}107\, z^3 + 7{,}1015\, z^2 - 1{,}0156\, z + 0{,}0618$; $R^2 = 0{,}998$.

Zaproponowano także bezpośrednią aproksymację funkcji wyrażającej osiadania w zależności od lokalizacji wkładki z, przyjmując parametr $x = z/H$. Wtedy funkcja osiadań otrzymuje postać: $\Delta s_i = f(z/H)$ i ma bardziej uniwersalne znaczenie. Zaproponowano rozkłady, podając również wartość współczynnika determinacji:

- potęgowy $\Delta s_i = 0{,}0043\, x^{0{,}2818}$; $R^2 = 0{,}8966$;
- liniowy $\Delta s_i = 0{,}0032\, x + 0{,}0019$; $R^2 = 0{,}9340$;
- logarytmiczny $\Delta s_i = 0{,}0008 \ln(x) + 0{,}0041$; $R^2 = 0{,}8640$;
- wielomian drugiego stopnia $\Delta s_i = -0{,}0026\, x^2 + 0{,}0053\, x + 0{,}0016$; $R^2 = 0{,}9620$;
- wielomian trzeciego stopnia $\Delta s_i = -0{,}0193\, x^3 + 0{,}0201\, x^2 - 0{,}0018\, x + 0{,}0021$; $R^2 = 0{,}9997$;
- wielomian czwartego stopnia $\Delta\, s_i = 0{,}0089\, x^4 - 0{,}0326\, x^3 + 0{,}0266\, x^2 - 0{,}0029\, x + 0{,}0022$; $R^2 = 0{,}9998$;
- wykładniczy $\Delta\, s_i = 0{,}002\, e^{1{,}0782\, x}$; $R^2 = 0{,}9159$.

5. Model warstwy ośrodka sypkiego zbrojonego wkładkami zlokalizowanymi poziomo w jednakowych odstępach

Jest to trzeci typ modelu, w przypadku którego zaproponowano równanie modułu odkształcenia stosowane powszechnie w geotechnice [15], traktując warstwę ośrodka gruntowego jako pracującą przy częściowo umożliwionej odkształcalności bocznej:

$$\Delta s = h\, \sigma_1 \,(E)^{-1}, \tag{5}$$

gdzie:

h – grubość warstwy,

σ_1 – naprężenie pionowe od obciążenia;

E – moduł odkształcenia.

Naprężenie pionowe we wzorze (5) można wyrazić za pośrednictwem współczynnika parcia bocznego K:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \,(K)^{-1} \tag{6}$$

Pozostaje problem wyprowadzenia równania do obliczenia wartości *K*, w którym wystąpiłyby postulowane parametry: pionowy odstęp wkładek Δz oraz wytrzymałość na rozciąganie R_r. Równanie to wyprowadzono przyjmując obciążenie o wartości powodującej wystąpienie czynnego stanu granicznego w próbce gruntu zbrojonego, której odkształcalność śledzono w procesie badań doświadczalnych. Posłużono się warunkiem stanu granicznego opracowanym przez W. Sokołowskiego [10] dla ośrodka sypkiego w płaszczyźnie oznakowanej jako *xy*:

$$0{,}25\, (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}{}^2 = 0{,}25 \sin^2\varphi\, (\sigma_x + \sigma_y + 2\, u)^2 , \tag{7}$$

gdzie:

τxy – naprężenie styczne,

σx , σy – naprężenia normalne,

$u = c \operatorname{ctg}\varphi$; c – spójność,

φ – kąt tarcia wewnętrznego w ośrodku bez zbrojenia.

Po uwzględnieniu naprężeń głównych (σ_1 – pionowe, σ_3 – poziome) i odpowiednim przekształceniu wzoru (7) otrzymuje się:

$$0{,}5\, (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi = 0{,}5\, (\sigma_1 - \sigma_3) - c \cos\varphi \tag{8}$$

Równanie (8) adaptowano dla gruntu ze zbrojeniem i dokonano zapisu jako równanie stanu granicznego w postaci:

$$0{,}5\, (\sigma_{1\,gr}{}^* - \sigma_{3\,gr}{}^*) = 0{,}5\, (\sigma_{1\,gr}{}^* + \sigma_{3\,gr}{}^*) \sin\varphi^* + c \cos\varphi \tag{9}$$

Po kolejnych przekształceniach otrzymano:

$$1 - \sigma_{3\,gr}{}^* (\sigma_{1\,gr}{}^*)^{-1} = [\, 1 + \sigma_{3\,gr}{}^* (\sigma_{1\,gr}{}^*)^{-1}] \sin \varphi^* + 2\, c^* \cos \varphi^* (\sigma_{1\,gr}{}^*)^{-1} \tag{10}$$

oraz podstawiając $\sigma_3 / \sigma_1 = K$,

$$1 - K_{min}^* = \sin\varphi^* + K_{min}^* \sin\varphi^* + 2\,c^* \cos\varphi^* (\sigma_{1\,gr}^*)^{-1} \quad (11)$$

Ostatecznie doprowadzono do dwóch postaci wzoru (11) celem obliczenia K_{min}^*:

$$K_{min}^* = (1 - \sin\varphi^*)\,(1 + \sin\varphi^*)^{-1} - 2\,c^* \cos\varphi^* \;[(1 + \sin\varphi^*)\,\sigma_{1\,gr}^*]^{-1} \quad (11a)$$

$$K_{min}^* = \mathrm{tg}^2(45^0 - 0{,}5\,\varphi^*) - 2\,c^* \cos\varphi^* \,[(1 + \sin\varphi^*)\,\sigma_{1\,gr}^*]^{-1} \quad (11b)$$

We wzorach (11a), (11b) jest zawarty element anizotropowej kohezji c^*, charakterystycznej dla zbrojonego gruntu sypkiego. Znany jest wzór F. Schlossera do obliczenia tej kohezji [5] (wzór wyprowadzono na podstawie wyników badań w aparacie trójosiowego ściskania, dotyczących zachowania się próbek piasku zbrojonego równomiernie rozmieszczonymi płatkami folii):

$$c^* = 0{,}5\,R_r\,(\Delta z)^{-1}\,\mathrm{tg}\,(45^0 + 0{,}5\varphi), \quad (12)$$

w którym:

R_r – wytrzymałość jednostkowa płaszczyzny zbrojenia na rozciąganie [kN/m],

Δz – rozstaw pionowy płaszczyzn zbrojenia.

Po podstawieniu ostatniego wyrażenia do wzoru (11 b) otrzymuje się formułę do obliczenia K_{min}^*, która zawiera parametry R_r oraz Δz:

$$K_{min}^* = \mathrm{tg}^2(45^0 - 0{,}5\,\varphi^*) - \cos\varphi^* \;[(1 + \sin\varphi^*)\,\sigma_{1\,gr}^*]^{-1}\, R_r\,(\Delta z)^{-1}\,\mathrm{tg}^2\,(45^0 + 0{,}5\varphi) \quad (13)$$

Ostatni wzór podstawiony do zależności (5) umożliwi uzależnienie wielkości osiadań Δs od parametrów zbrojenia R_r oraz Δz, a także od wartości kąta tarcia wewnętrznego φ. Odnośnie do kąta tarcia w ośrodku zbrojonym φ^*, występującego w powyższych wzorach, należy spodziewać się, że zachodzi nierówność: $\varphi^* > \varphi$ oraz $\varphi^* - \varphi = \Delta\varphi$, ponieważ ośrodek gruntowy ze zbrojeniem zachowuje się (w odniesieniu do niezbrojonego), jakby nastąpiło zwiększenie kąta tarcia o wartość $\Delta\varphi$, zależną od parametrów zbrojenia.

6. Podsumowanie

Opracowano koncepcję trzech modeli zachowania się warstwy ośrodka sypkiego ze zbrojeniem poziomymi wkładkami, obciążonego pionowym naciskiem statycznym. Podstawą do realizacji zadania były wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych wykonanych na próbkach piasku zbrojonego wkładkami w postaci geosyntetycznych siatek, zlokalizowanymi poziomo, czyli prostopadle do płaszczyzny obciążenia. Dwa pierwsze modele bazują na wzorze stosowanym powszechnie w praktyce do obliczania modułu odkształcenia, trzeci model wykorzystuje równanie mechaniki gruntów (Z. Wiłun [15]) do obliczenia modułu odkształcenia przy umożliwionej odkształcalności bocznej. Niezbędnymi parametrami doświadczalnymi są: lokalizacja wkładki lub wkładek oraz pomierzone osiadanie (odkształcenie pionowe próbek). W modelu trzecim, oprócz osiadania i lokalizacji wkładek, należy dysponować wytrzymałością na rozciąganie wkładek R_r i orientacyjną wartością kąta tarcia wewnętrznego. Opracowane modele umożliwiają w sposób szybki przetransformowanie pomierzonych osiadań na wartości modułów odkształcenia. Pozwalają np. otrzymać odpowiedź na pytanie: w jaki sposób lokalizacja pojedynczej wkładki lub wkładek „przekłada się" na redystrybucję odkształceń (osiadanie) i docelowo na zmianę wartości modułu odkształcenia.

Literatura

1. Ajdukiewicz J.: Modernizacja podtorza z zastosowaniem geosyntetyków. Mat. Konf. Nauk.-Techn. „Problemy modernizacji i naprawy podtorza". Politechnika Wrocławska, SITK, Wrocław-Żmigród, 2000, s. 7-33
2. Ajdukiewicz J., Kłosek K.: Kryteria doboru oraz weryfikacja skuteczności stosowania geosyntetyków w podtorzu kolejowym. Mat. XI Międzynarodowej Konf. Nauk.-Techn. „Drogi Kolejowe", Politechnika Wrocławska, SITK, Wrocław-Żmigrod 21-23.XI.2001 (Aneks s. 1-39)
3. Budownictwo kolejowe w Polsce – raport. Rynek kolejowy Nr 5, 2005, s. 26-39
4. Jarominiak A.: Lekkie konstrukcje oporowe. WKiŁ, Warszawa 2000
5. Schlosser F.,Jacobson H. M., Juran J.: Soil reinforcement. Second Int. Conf. on Geotextiles. Las Vegas, USA, 1982, p. 1158-1180
6. Siewczyński Ł.: Określenie modułów odkształcalności podtorza w procesie modernizacji. Mat. XI Międzynarodowej Konf. Nauk.-Techn. „Drogi Kolejowe", Politechnika Wrocławska, SITK, Wrocław-Żmigrod 21-23.XI.2001, s. 175-185
7. Siewczyński Ł.: Nawierzchnia podtorza jako przykład wzmocnienia drogi E-20. Mat. Konf. Nauk.-Techn. „Problemy modernizacji i naprawy podtorza". Wrocław-Żmigród, 2000, Politechnika Wrocławska, SITK, s. 125-130
8. Siewczyński Ł.: Wzorcowy i stwierdzony stan podtorza po modernizacji. Przegląd Kolejowy, nr 8, 1997, KOW, Warszawa s. 17-23
9. Siewczyński Ł.:Doświadczalna naprawa podtorza maszyną AHM 800 R. . Mat. Konf. Nauk.-Techn. „Problemy modernizacji i naprawy podtorza". Wrocław-Żmigród, 2000, Politechnika Wrocławska, SITK, s. 117-123
10. Sokołowski W. W.: Statyka ośrodków sypkich. PWN, Warszawa 1958
11. Surowiecki A.: O projektowaniu konstrukcji gabionowych w budownictwie komunikacyjnym. Drogownictwo. Rok LVI, Nr 3, 2001, s. 81-86
12. Surowiecki A.: Doświadczalny model warstwy podtorza ze wzmocnieniem. Mat. XII Konf. Nauk.-Techn. „Drogi kolejowe", Politechnika Gdańska, Wydz. Inż. Ląd., Gdańsk 15-17.X.2003 r., s. 339-347
13. Surowiecki A.: Badania modelowe współpracy składników kompozytowych. Inżynieria i Budownictwo Nr 10, 2004, s. 527-530
14. TENSAR GEOGRIDS – A guide to the products and their applications. Tensar International, Blackbourn, Grait Britain 2004
15. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 2000