

Andrzej Surowiecki<sup>1)</sup>, Wojciech Kozłowski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa  
Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych we Wrocławiu  
Wydział Nauk o Bezpieczeństwie

<sup>2)</sup> Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa

## MODELOWANIE NOŚNOŚCI KONSTRUKCJI DRÓG GMINNYCH ZE WZMOCNIENIEM

### Streszczenie

W pracy oceniono efektywność wzmocnienia nawierzchni i podłoża dróg gminnych, przyjmując jako model układ wielowarstwowy ośrodka niespoistego. Na podstawie rezultatów badań doświadczalnych przedstawiono modele analityczne, których idea prowadzi do oszacowania nośności konstrukcji drogi ze wzmocnieniem. Rozpoznano możliwości numerycznych oszacowań nośności i przedstawiono założenia odpowiednich procedur z zastosowaniem zaawansowanych metod i podejść w geotechnice i mechanice teoretycznej.

**Słowa kluczowe:** drogi gminne, modelowanie, nośność, wzmocnienie

### Uwagi o problematyce mechaniki konstrukcji dróg

Za miarę nośności konstrukcji drogowej (nawierzchnia, podłoże) powszechnie przyjmuje się maksymalne naprężenie (zwykle nazywane krytycznym), niepowodujące wystąpienia strefy uplastycznienia na poziomie podłoża [Wiłun 2009]. Modelowanie stanu wyężenia elementów podbudowy dróg wiąże się z rozwiązywaniem zagadnień geotechnicznych z wykorzystaniem modeli podłoża: jedno-, dwu- lub wieloparametrowych [Surowiecki 2004; Surowiecki i in. 2001; 2006]. Wśród parametrów wytrzymałościowych ośrodka gruntowego, będących miarą nośności, wyróżniają się kalifornijski wskaźnik nośności *CBR* [%] i moduł odkształcenia  $E_0$  [MPa]. Zwiększanie nośności podłoża ma priorytetowe znaczenie w obecnej sytuacji modernizowania sieci dróg gminnych. Metody i sposoby wzmocniania podłoża w budownictwie komunikacyjnym można ogólnie zakwalifikować do dwóch grup: wzmocnienie fizyczno-mechaniczne i fizyczno-chemiczne [Decky i in. 2009; Drusa, Moravčík 2008; Wiłun 2009]. Do pierwszej grupy należy zbrojenie gruntów, czyli instalowanie wkładek, wykonanych z różnego rodzaju materiałów, wykazujących zdolność do przejmowania naprężeń rozciągających. Tego typu wzmocnienie podłoża dróg jest rozpatrywane w niniejszej pracy. Wkładki, ułożone w kierunku działania sił rozciągających, przejmują część tych sił na zasadzie współpracy z ośrodkiem gruntowym, zależnie od cech materiałowych i innych czynników.

## Zakres tematyczny pracy

Tematem artykułu jest ocena efektywności zastosowania systemu wzmacniającego w konstrukcji drogowej (warstwa jezdni, podbudowa, podłoże), traktowanej jako układ wielowarstwowy ośrodka ziarnistego. Analizowane są efekty wzmocnienia (zbrojenia) fizyczno-mechanicznego, gdy stosowane są ażurowe wkładki (siatki o oczkach kwadratowych), rozmieszczone prostopadle do pionowej płaszczyzny obciążenia. Budowa wkładek i sposób ich ułożenia spełniają warunek maksymalnej efektywności funkcjonowania w aspekcie zmniejszenia odkształceń pionowych i poziomych reprezentatywnego elementu konstrukcji drogi. Podstawą oceny są modele analityczne (oparte na rezultatach badań własnych, przeprowadzonych na modelach fizycznych w skali laboratoryjnej) [Surowiecki 2004; Surowiecki i in. 2001; 2006] oraz założenia procedur (bazujących na zaawansowanych metodach w geotechnice i mechanice teoretycznej), zmierzających do oszacowania nośności podłoża z gruntu wzmocnionego [Decky i in. 2009; Drusa, Moravčík 2008; Sawicki i in. 1993; 1998; 1999].

## Analityczne modele konstrukcji drogi ze wzmocnieniem

### *Model stanu granicznego naprężeń z zastosowaniem kół Mohra*

Z badań francuskich oraz krajowych [Long 1978; Long, Schlosser 1978; Sawicki 1998; 1999; Surowiecki 1994; Surowiecki, Kozłowski 2005], wykonanych na modelach fizycznych w skali laboratoryjnej oraz na modelach analitycznych, wynika, że ośrodek niespoisty zbrojony dwukierunkowo poziomymi wkładkami zachowuje się tak, jakby cechowała go anizotropowa spójność. Spójność  $c^*$  jest wynikiem tzw. naprężenia początkowego  $\sigma_0$ , wzbudzanego wkładkami zbrojenia. Wartość spójności  $c^*$  jest określona wzorem:

$$c^* = 0,5R_T \Delta z^{-1} \operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\varphi) \quad [\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (1)$$

gdzie:

$R_T$  – wytrzymałość poziomych warstw zbrojenia na rozciąganie  $[\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}]$ ,

$\Delta z$  – odstęp pionowy warstw zbrojenia  $[\text{m}]$ ,

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego ośrodka gruntowego  $[\circ]$ .

Jednym z ważniejszych rezultatów badań francuskich jest analityczna prezentacja krzywej zniszczenia próbki piasku zbrojonego folią aluminiową, badanej w aparacie 3-osowego ściskania, przedstawionej w płaszczyźnie naprężeń głównych  $\sigma_1, \sigma_2$ :

$$\sigma_1 = f(\sigma_3) = \sigma_2 \operatorname{tg}^2(45^\circ + 0,5\varphi) + \sigma_0 \quad [\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (2)$$

gdzie:

$\sigma_1$  – naprężenie pionowe  $[\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}]$ ,

$\sigma_2$  – naprężenie poziome  $[\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}]$ ,

$\sigma_0$  – naprężenie początkowe, będące efektem wzmocnienia [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  
 $\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego piasku [ $^\circ$ ].

Równanie (2) jest w istocie modelem konstrukcji drogi ze wzmocnieniem. Stan graniczny naprężeń w ośrodku niespoistym, niezbrojonym i zbrojonym jest przedstawiony z zastosowaniem kół Mohra w publikacji Kozłowskiego i Surowieckiego [2011], z założeniem stałego naprężenia poziomego  $\sigma_3$  (odpór poziomy ośrodka) i zwiększającego się obciążenia eksploatacyjnego  $\sigma_1$ .

### **Model konstrukcji drogi ze wzmocnieniem, wyrażający efektywność systemu wzmocnienia**

Rezultaty wykonanych własnych badań doświadczalnych prowadzą do stwierdzenia, że rola zbrojenia (wkładki płaskie dwukierunkowe w postaci siatek) w ośrodku niespoistym polega na zmniejszeniu wartości współczynnika poziomego parcia  $K^* = \sigma_2^*(\sigma_1)^{-1}$ . Zmniejszenie współczynnika  $K$  wskutek zbrojenia, przyjęte za parametr efektywności wkładek i oznaczone symbolem  $\Delta K$ , ujęto zależnością [Surowiecki 2004; Surowiecki i in. 2001; 2006]:

$$\Delta K = K - K^* = \Delta\sigma_{2,k} (\sigma_1)^{-1} = E \mu_c W (\text{tg } \varphi)^{-1} \quad [-] \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta\sigma_{2k}$  – ułamek naprężenia poziomego  $\sigma_2$ , przejęty przez wkładki zbrojenia [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ];

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego ośrodka gruntowego [ $^\circ$ ];

$E$  – moduł Younga materiału zbrojenia [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ];

$\mu_c$  – całkowity procent zbrojenia,  $\mu_c = n\mu_i$  [%];

$n$  – liczba wkładek zbrojenia;

$\mu_i$  – jednostkowy procent zbrojenia (dotyczący pojedynczej wkładki) [%];

$W$  – współczynnik korekcyjny [ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$ ];

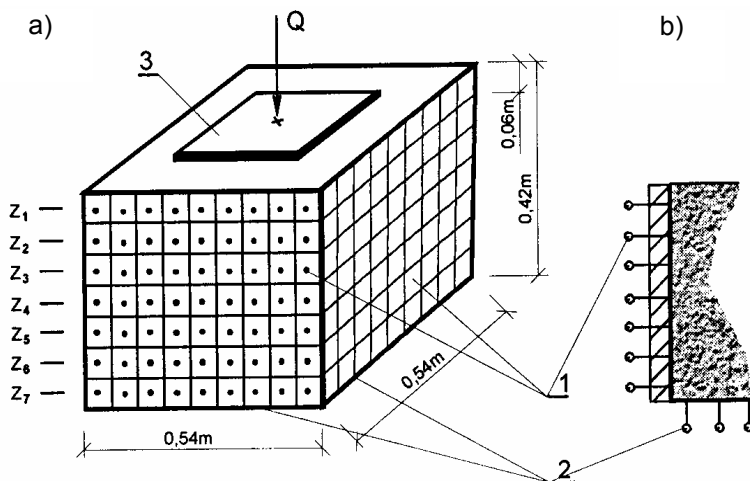
$K^*$  – współczynnik poziomego parcia w ośrodku zbrojonym [-];

$\text{tg } \varphi$  – wyrażenie określające stan zagęszczenia ośrodka gruntowego [-].

Omawiany model konstrukcji drogi, będący warstwą ośrodka niespoistego ze wzmocnieniem, został skonstruowany w prostopadłościennym stalowym zasobniku o wymiarach w planie 0,54 x 0,54 m i wysokości 0,42 m (rys. 1) [Surowiecki 1994; 1998; 2004].

Rozpatrywane są stany naprężenia modelu, nieprzekraczające warunku stanu granicznego:  $0 \leq q < q_{gran.}$ , gdzie  $q_{gran.}$  jest granicznym pionowym obciążeniem jednostkowym [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

Reprezentatywny element (model) ośrodka niespoistego ze wzmocnieniem wykazuje kontrolowaną odkształcalność pionową i poziomą (występuje analogia do trójwymiarowego, jednorodnego stanu odkształcenia). Dzięki specjalnej konstrukcji ścian i dna pojemnika badawczego występuje osiowa syme-



Źródło: opracowanie własne: Source: own elaboration.

Rys. 1. Schemat i podstawowe parametry stanowiska badawczego: a) widok ogólny; b) przekrój pionowy przez ścianę; 1 – mechaniczny czujnik ciśnienia poziomych; 2 – czujnik ciśnienia pionowych; 3 – stempel o wymiarach 0,32 x 0,32 m, pośredniczący w obciążaniu modelu;  $z_1 = 0,03$  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 – poziomy pomiarowe

Fig. 1. Scheme and basic parameters of the testing stand: a) general view; b) vertical section over the wall; 1 – mechanical sensor of horizontal pressure; 2 – indicator of vertical pressure; 3 – loading plate 0.32 x 0.32 m;  $z_1 = 0.03$  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 – mesuring levels

tria obciążenia i odkształcenia modeli. Szczegóły stanowiska badawczego są przedstawione np. w publikacji Surowieckiego [1994; 1998; 2004].

Próbki (modele), wypełniające pojemnik, składały się z dwóch elementów: ośrodka gruntowego ziarnistego jako matrycy oraz zbrojenia, rozmieszczonego poziomo (prostopadle do płaszczyzny badawczego obciążenia zewnętrznego). Matrycę modeli tworzyły wariantowo materiały: piasek rzeczny gruboziarnisty, żwir rzeczny sortowany 5/10 mm i grys bazaltowy 8/16.

Zastosowano zbrojenie w postaci polipropylenowych siatek RAUGRID o splocie prostym w kierunkach zbieżnych z kierunkami osi głównych w stosunku do poziomego przekroju pojemnika. W odniesieniu do różnych wielkości oczek siatki otrzymano następujące wartości tzw. procentu zbrojenia  $\mu$ : #12x12 mm  $\rightarrow \mu = 0,376$ ; #14x14 mm  $\rightarrow \mu = 0,306$ ; #16x16 mm  $\rightarrow \mu = 0,288$ .

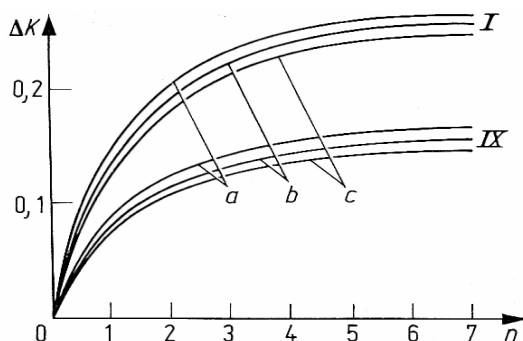
Pracę modeli analizowano w procesie cyklicznego obciążania do maksymalnej wartości pionowego nacisku jednostkowego  $q_{\max} = 0,24$  MPa i następnie zmniejszenia nacisku do zera. Wyróżniono dwa stany zagęszczenia materiału ziarnistego modeli, w których wykonywano pomiary odkształceń (przemiesz-

czeń) poziomych [mm]: luźno nasypany –  $l_{DI}$  oraz wstępnie zagęszczony –  $l_{DIX}$ , pomiar wykonywany po ośmiu powtarzalnych cyklach obciążania do wartości  $q_{max}$  i odciążania do stanu równego zero.

Wartości odkształceń poziomych  $y$  przetransformowano na jednostkowe parcie poziome  $\sigma_2$  [ $kN \cdot m^{-2}$ ] z zastosowaniem odpowiedniej formuły matematycznej [Surowiecki 1994; 1998; 2004].

Wartość efektywności zbrojenia  $\Delta K$ , oszacowaną według wzoru (3), przedstawiono na rysunkach 2.–5., zależnie od parametrów:

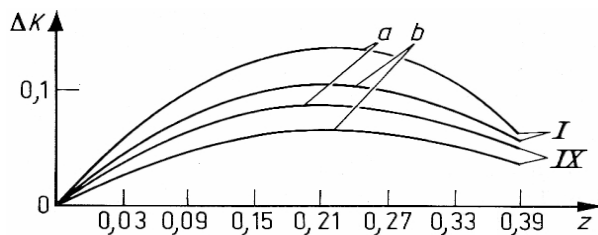
- materiału gruntowego (rodzaj ośrodka gruntowego i zagęszczenie);
- wkładek zbrojenia (liczba wkładek; rozmieszczenie; wielkość oczek siatki, mierzona procentem zbrojenia  $\mu$ ).



Źródło: opracowanie własne: Source: own elaboration.

Rys. 2. Wskaźnik efektywności zbrojenia  $\Delta K$  dla modeli ośrodka niespoistego w funkcji liczby  $n$  siatek o wskaźniku  $\mu = 0,376$ : I – luźno nasypany; IX – wstępnie zagęszczony;  $n = 1-7$  – liczba wkładek; a – piasek; b – żwir rzeczny; c – grys bazaltowy;  $n = 1$  – wkładka na poziomie  $z_4 = 0,21$  m;  $n = 2$  –  $z_3 = 0,15$  m i  $z_5 = 0,27$  m;  $n = 3$  –  $z_2 = 0,09$ ,  $z_4 = 0,21$  i  $z_6 = 0,33$  m;  $n = 4$  –  $z_2 = 0,09$ ,  $z_3 = 0,15$ ,  $z_5 = 0,27$  i  $z_6 = 0,33$  m;  $n = 5$  – od  $z_2$  do  $z_6$ ;  $n = 6$  – od  $z_2 = 0,09$  do  $z_7 = 0,39$  m;  $n = 7$  – od  $z_1 = 0,03$  do  $z_7 = 0,39$  m

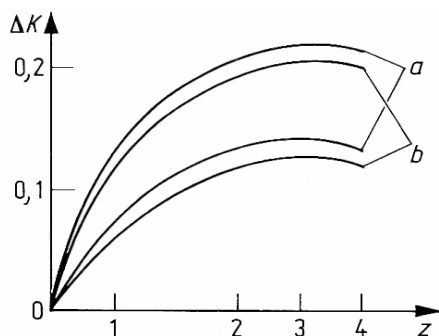
Fig. 2. Indicator of reinforcement effectiveness  $\Delta K$  for the models of incoherent medium in function of grid number  $n$  (of indicator  $\mu = 0.376$ ): I – loosely heaped; IX – initially compacted;  $n = 1-7$  – number of reinforcing rods; a – sand; b – river gravel; c – basalt grit;  $n = 1$  – reinforcing rod at level  $z_4 = 0.21$  m;  $n = 2$  – reinforcing rods at levels:  $z_3 = 0.15$  m and  $z_5 = 0.27$  m;  $n = 3$  – reinforcing rods at levels:  $z_2 = 0.09$ ,  $z_4 = 0.21$  and  $z_6 = 0.33$  m;  $n = 4$  – reinforcement at levels:  $z_2 = 0.09$  m,  $z_3 = 0.15$  m,  $z_5 = 0.27$  m, and  $z_6 = 0.33$  m;  $n = 5$  – reinforcement at levels from  $z_2$  to  $z_6$ ;  $n = 6$  – reinforcing rods at levels from  $z_2 = 0.09$  m to  $z_7 = 0.39$  m;  $n = 7$  – reinforcement at levels from  $z_1 = 0.03$  to  $z_7 = 0.39$  m



Źródło: opracowanie własne: Source: own elaboration.

Rys. 3. Parametr  $\Delta K$  dla modeli piasku wzmocnionego pojedynczą siatką w zależności od jej lokalizacji:  $z = 0,03-0,39$  m – poziomy pomiarowe; a – ze zbrojeniem na poziomie  $\mu = 0,376$ ; b – ze zbrojeniem na poziomie  $\mu = 0,306$ ; I – ośrodek luźno nasypany; IX – ośrodek wstępnie zagęszczony

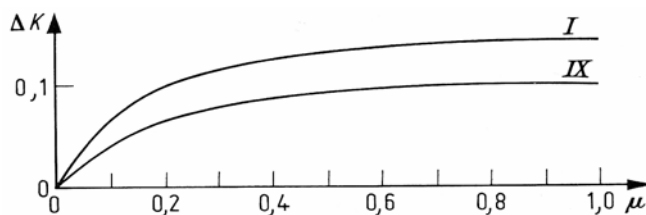
Fig. 3.  $\Delta K$  parameter for models of sand reinforced with single grid depending on its location:  $z = 0.03-0.39$  m – measuring levels; a – reinforcement  $\mu = 0.376$ ; b –  $\mu = 0.306$ ; I – loosely heaped medium; IX – medium initially compacted



Źródło: opracowanie własne: Source: own elaboration.

Rys. 4. Parametr  $\Delta K$  dla modeli piasku zbrojonego dwiema siatkami: a – ze zbrojeniem na poziomie  $\mu = 0,376$ ; b – ze zbrojeniem na poziomie  $\mu = 0,306$ ; I, IX – cykle obciążenia;  $z = 1$  – lokalizacja siatek na poziomach 0,03 m i 0,39 m;  $z = 2$  – na poziomach 0,09 m i 0,33 m;  $z = 3$  – na poziomach 0,12 m i 0,30 m;  $z = 4$  – na poziomach 0,15 m i 0,27 m

Fig. 4.  $\Delta K$  parameter for models of sand reinforced with two grids: a – with reinforcement at level  $\mu = 0.376$ ; b –  $\mu = 0.306$ ; I, IX – load cycles;  $z = 1$  – location of grids at levels 0.03 m and 0.39 m;  $z = 2$  – at levels 0.09 m and 0.33 m;  $z = 3$  – at levels 0.12 m and 0.30 m;  $z = 4$  – at levels 0.15 m and 0.27 m



Źródło: opracowanie własne: Source: own elaboration.

Rys. 5. Parametr  $\Delta K$  dla modeli piasku w funkcji procentu zbrojenia  $\mu$  pojedynczą siatką zlokalizowaną na poziomie  $z_4 = 0,21$  m; I, IX – cykle obciążenia

Fig. 5.  $\Delta K$  parameter for models of sand depending on the percentage of reinforcement  $\mu$  with single grid located at the level  $z_4 = 0.21$  m; I, IX – load cycles

Efektywność zbrojenia w zależności od wskaźnika zagęszczenia  $I_D$  [%] ośrodka gruntowego oszacowano analitycznie, po uwzględnieniu niżej podanych założeń:

- matrycę modeli zawężono tylko do gruboziarnistego piasku rzecznoego;
- zbrojenie pojedynczą wkładką:  $n = 1$ , lokalizacja wkładki na poziomie  $z_4 = 0,21$  m, procent zbrojenia  $\mu_c = \mu_0 = 0,384$ ;
- współczynnik korygujący  $W = 1,0 \cdot 10^{-5} [(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}]$ ,
- moduł sprężystości materiału zbrojenia  $E = 2,1 \cdot 10^5 [\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}]$ ;
- obciążenie  $q_{\max} \leq q_{\text{gran}}$ .

Po wykonaniu odpowiednich operacji matematycznych formuła  $\Delta K$  otrzymuje postać:

$$\Delta K = f(I_D) = 1,389 \cdot (0,491)^{I_D} \quad (4)$$

gdzie:

$I_D$  – wskaźnik zagęszczenia ośrodka gruntowego [%].

### **Model wyrażony praktycznym równaniem modułu odkształcenia**

W praktyce inżynierskiej nośność nawierzchni i podłoża dróg jest szacowana na podstawie pomiarów odkształceń pionowych. Celowe jest więc odniesienie rezultatów badań własnych (dotyczących stanu odkształcenia) do wzoru stosowanego do obliczania modułu odkształcenia  $E$ , na podstawie badania aparaturą VSS [Surowiecki i in. 2001; 2006; Wiłun 2009]:

$$E_1 = 3 \Delta p_1 (4 \Delta s_1)^{-1} D; \quad E_2 = 3 \Delta p_2 (4 \Delta s_2)^{-1} D \quad [\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

gdzie:

$E_1, E_2$  – kolejno moduł pierwotny i wtórny  $[\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}]$ ;

$\Delta p_1, \Delta p_2$  – przyrosty obciążenia, kolejno w pierwszym i drugim cyklu obciążenia  $[\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}]$ ;

$\Delta s_1, \Delta s_2$  – przyrosty przemieszczeń pionowych odpowiednio w pierwszym i drugim cyklu obciążenia dla przyrostów obciążeń w zakresie  $\Delta p$  [m];  
 $D$  – średnica płyty pomiarowej,  $D = 0,3$  m.

Istotna jest wartość ilorazu  $E_2 : E_1$ , ponieważ na tej podstawie wg norm drogowych identyfikuje się jakość techniczną komponentów konstrukcji jezdni drogowej.

Wzór (5) potraktowano, jak analityczny zapis modelu pracy warstwy ośrodka niespoistego (stanowiącego nieulepszoną – żwirową lub tłuczniową nawierzchnię albo podbudowę z kruszywa stabilizowanego mechanicznie). Powyższe równanie mogłoby dotyczyć także konstrukcji ze wzmocnieniem, po wprowadzeniu wartości elementu  $\Delta p_1^* > \Delta p_1$  oraz analogicznie  $\Delta p_2^* > \Delta p_2$  (wartości  $\Delta s_1$  i  $\Delta s_2$  bez zmian).

### Oszacowanie nośności podłoża z gruntu wzmocnionego z zastosowaniem twierdzeń teorii nośności granicznej

Problem ten jest omawiany przez Sawickiego i Leśniewską [1993] jako tzw. proste oszacowanie nośności podłoża ze wzmocnieniem. Autorzy cytowanej publikacji prowadzą analizę, wykorzystując warunek plastyczności, po uwzględnieniu tezy udowodnionej przez Kulczykowskiego [1989] na podstawie wyników badań doświadczalnych, wykonanych w Instytucie Budownictwa Wodnego PAN (IBW PAN Gdańsk). Wspomniana teza mówi o utracie nośności podłoża z gruntu zbrojonego wskutek uplastycznienia obu komponentów, tj. ośrodka gruntowego i wkładek zbrojenia w bezpośrednim sąsiedztwie fundamentu, czyli przez analogię – w podłożu gruntowym pod konstrukcją jezdni drogowej. Bazując na przyjętym schemacie zadania, Sawicki i Leśniewska [1993] podali tok postępowania, prowadzący do rozwiązania w postaci wzoru do oszacowania wartości obciążenia granicznego  $p_{\text{gran}}$  [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ]:

$$p_{\text{gran}} = 0,5\sigma_0 [1 + (\sin \varphi)^{0,5}]^2 (1 + \sin \varphi) (1 - \sin \varphi)^{-1} \quad (6)$$

gdzie:

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego ośrodka gruntowego [°];  
 $\sigma_0$  – naprężenie wynikające ze wzmocnienia (zbrojenia) ośrodka gruntowego,  
 $\sigma_0 = \mu_c R_T$  [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ];  
 $\mu_c$  – całkowity procent zbrojenia (jak we wzorze (3)) [%];  
 $R_T$  – wytrzymałość poziomych warstw zbrojenia na rozciąganie [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ].

### Rozwiązanie statyczne problemu nośności podłoża z gruntu wzmocnionego

Rozwiązanie statyczne nośności podłoża z gruntu zbrojonego, polegające na zastosowaniu metody charakterystyk zostało opracowane – podobnie jak podane powyżej proste oszacowanie – przez IBW PAN Gdańsk [Sawicki,



Leśniewska 1993]. W cytowanym podręczniku podano tok postępowania po wykonaniu opracowań pomocniczych:

- schematu zadania, które jest półprzestrzenią z gruntu zbrojonego, obciążoną pasmem o podstawowej intensywności  $p$  i szerokości  $b$  [m] oraz symetrycznie rozmieszczonym dodatkowym równomiernie rozłożonym pionowym obciążeniem  $q$ , którego celem jest wyeliminowanie miejscowej nieoznaczoności rozwiązania;
- zaprojektowaniu siatki charakterystyk naprężenia w obszarach zbrojenia ściskanego;
- określeniu siatki charakterystyk naprężenia w obszarze sztywnego zbrojenia;
- zawężeniu obszaru sztywnego zbrojenia do jednej linii.

Następnie, stosując procedurę wg podręcznika, polegającą na rozwiązaniu układu równań różniczkowych równowagi i warunku plastyczności [Sawicki, Leśniewska 1993], otrzymuje się zależność do obliczenia wartości nośności granicznej:

$$p_{\text{gran.}} = (1 + \sin \varphi) \{q(1 - \sin \varphi)^{-1} + \sigma_0 [\exp(0,5\pi - \varphi)\text{tg} \varphi]^{-1}\} \exp(\pi\text{tg} \varphi) \text{ [kN}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (7)$$

gdzie:

- $\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego ośrodka gruntowego [°];
- $\sigma_0$  – naprężenie przejmowane przez zbrojenie [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ];
- $q$  – dodatkowe równomiernie rozłożone pionowe obciążenie [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ].

Nośność graniczna jest traktowana w tych rozważaniach jako minimalna wartość siły  $P$ , niezbędna do eskalacji znacznych odkształceń plastycznych, niedopuszczalnych z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji.

## Podsumowanie

Nośność, szacowaną na bazie analitycznych modeli, sporządzonych na podstawie rezultatów własnych doświadczalnych badań przestrzennego stanu naprężenia i odkształcenia ośrodka niespoistego ze wzmocnieniem, zrealizowanych na fizycznych modelach w skali laboratoryjnej warunkują parametry:

- anizotropowa spójność  $\sigma_0$ , wzbudzana zbrojeniem; kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi$  oraz naprężenie normalne  $\sigma_1$  (w modelu „naprężeniowym” z zastosowaniem konstrukcji kół Mohra);
- zmniejszenie współczynnika poziomego parcia  $\Delta K$  (w modelu bazującym na parametrze determinującym udział systemu wzmocnienia w ograniczaniu odkształceń ośrodka-matrycy);
- przemieszczenie pionowe  $\Delta s$ ; (w modelu wyrażonym równaniem modułu odkształcenia) i wynikająca z przemieszczeń wartość modułu odkształcenia  $E$ .

Zaprogramowane zadania, z zastosowaniem procedur wynikających z zaawansowanych metod geotechniki i mechaniki teoretycznej, zmierzają do oszacowania:

- wartości obciążenia granicznego  $q_{\text{gran.}}$ , gdy stosuje się twierdzenie o dolnej ocenie obciążenia granicznego;
- nośności podłoża z gruntu wzmocnionego  $p_{\text{gran.}}$  z zastosowaniem metody charakterystyk.

Zmienność wartości podanych powyżej parametrów modeli determinuje wartość nośności ośrodka gruntowego wzmocnionego.

## **Bibliografia**

Decky M., Drusa M., Zgutova K., Vangel J., Trojanova M., Benč G., Starši B. 2009. Navrhovanie a kontrola zemnych konštrukcii inžinierskych stavieb. Žilina. Stavebna Fakulta ŽU v Žiline ss. 487.

Drusa M., Moravčík M. 2008. Foundation Structures. Žilina. University of Žilina. Faculty of Civil Engineering ss. 118.

Kozłowski W., Surowiecki A. 2011. Kierunki rozwoju nawierzchni dróg wiejskich. Problemy Inżynierii Rolniczej. Nr 1(71) s. 173–183.

Kulczykowski M. 1989. Analiza nośności granicznej podłoża z gruntu zbrojonego obciążonego fundamentem. Archiwum Hydrotechniki. Vol. XXXVI nr 1–2 s. 121–164.

Long N.T., Schlosser F. 1978. Zasada działania i zachowanie się gruntu zbrojonego. W: Wybrane zagadnienia geotechniki. Pr. zbior. Red. K. Maziarz. Wrocław. PAN-IBW, Ossolineum s. 157–184.

Long N.T. 1978. Badania gruntów zbrojonych. W: Wybrane zagadnienia geotechniki. Pr. zbior. Red. K. Maziarz. Wrocław. PAN-IBW, Ossolineum s. 185–210.

Sawicki A. 1998. Plastic behaviour of reinforced earth. W: Civil engineering practice. Vol. 3. Geotechnical/Ocean Engineering. Chapter 3. Pr. zbior. Red. P.N. Cheremisinoff, S.L. Cheng. Lancaster-Basel. Technomic Publ. Co. s. 45–64.

Sawicki A. 1999. Statyka konstrukcji z gruntu zbrojonego. Gdańsk. IBW-PAN ss. 250.

Sawicki A., Leśniewska D. 1993. Grunt zbrojony – teoria i zastosowanie. Warszawa. PAN-IPPT, PWN ss. 166.

Surowiecki A. 1994. Laboruntersuchungen von mechanischen Eigenschaften bewehrter lockerer Bodenschichten. Bautechnik. Jg 71 H. 11 s. 707–711.

Surowiecki A. 1998. Interaction between reinforced soil components. Studia Geotechnica et Mechanica. Vol. XX no. 1/2 s. 43–61.

Surowiecki A. 2004. Badania modelowe współpracy składników kompozytowych. Inżynieria i Budownictwo. Nr 10 s. 527–530.

Surowiecki A. 2009. Wybrane problemy mechaniki nawierzchni i podłoża drogowego. Konspekt do wykładu dla studiów doktoranckich (materiał niepublikowany). Wrocław. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu ss. 79.

Surowiecki A., Balawejder A., Kozłowski W. 2006. Badanie możliwości wzmacniania nasypów kolejowych przy zastosowaniu zbrojenia gruntu, lekkich konstrukcji oporowych i maty komórkowej. Raport serii SPR. Nr 6. Projekt badawczy MNil nr 5 T07E 06024. Wrocław. PWroc. ss. 269.

Surowiecki A., Izbicki R., Mazurkiewicz R. 2001. Specjalne konstrukcje w budownictwie komunikacyjnym – badania modelowe i teoria. Grant KBN, NR 7 T07E 022 16. Etap III. Raport serii SPR. Nr 136. Wrocław. PWroc. ss. 207.

Surowiecki A., Kozłowski W. 2005. The vertical stresses and settlements of railway embankments. Mater. 6-th European Conference of young research and science workers in transport and telecommunications. Žilina, Slovak Republic 27–29.06. Žilina. University of Žilina s. 322–331.

Wiłun Z. 2009. Zarys geotechniki. Warszawa. WKiŁ. ss. 724.

## **MODELLING THE LOAD CAPACITY OF LOCAL ROADS WITH REINFORCED CONSTRUCTION**

### **Summary**

The study aimed at estimating the effectiveness of reinforcing the subgrade and pavement of local roads, assuming as a model the multilayer arrangement of incoherent medium. On the basis of experimental results the analytic models were derived, the idea of which enables to estimate the carrying capacity of reinforced road. Next, the possibilities of numerical estimating the carrying capacity of road were recognized, as well as the foundations of adequate procedures to be applied with advanced methods and approaches in geotechnics and theoretical mechanics, were presented.

**Key words:** local roads, modelling, load capacity, reinforcing

Praca wpłynęła do Redakcji: 27.10.2010 r.

Adres do korespondencji:

dr hab. inż. Andrzej Surowiecki  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
Instytut Budownictwa  
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław  
tel. 71 320-55-17; e-mail: andrzej.surowiecki@up.wroc.pl