

Wojciech KOZŁOWSKI

Politechnika Opolska, Katedra Dróg i Mostów
ul. Ozimska 75A, 45 – 368 Opole
E-mail: w.kozlowski@po.opole.pl

Andrzej SUROWIECKI

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa,
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
E-mail: andrzej.surowiecki@up.wroc.pl

**Model symulacyjny
elementu ściany gabionowej
stabilizującej nasyp komunikacyjny**

1 Wprowadzenie

Gabionowa ściana oporowa składa się z koszy siatkowych wypełnionych kruszywem (najczęściej tłużeń kamienny, otoczaki, kamień polny itp.) odpowiednio względem siebie rozmieszczonych (niekiedy ze sobą zespolonych) i stanowić może w niektórych przypadkach trwałą obudowę niestabilnej skarpy nasypu [1, 2, 3, 4, 8, 9, 10]. Kosze siatkowe (gabiony) które są szczególną odmianą kaszyc, charakteryzują się m. in. podatnością, przepuszczalnością, odpornością na mechaniczne zniszczenie, a więc zaletami o niewątpliwym znaczeniu dla budownictwa komunikacyjnego. Zabezpieczenie przed osuwiskami skarp nasypów komunikacyjnych i klifów morskich gabionami stało się popularne w Polsce na początku lat 90. ubiegłego wieku, między innymi wskutek wdrożenia innowacyjnej technologii opracowanej przez włoską firmę MACCAFERRI [2, 3, 5, 7].

Przedstawiono dwa modele symulacyjne funkcjonowania elementu gabionowego w zakresie trójwymiarowego stanu odkształcenia: fizyczny, wykonany w skali laboratoryjnej oraz numeryczny, bazujący na procedurach popularnego programu Robot MILLENIUM. Rezultatem badań doświadczalnych, przeprowadzonych na modelu fizycznym jest oszacowanie cech wytrzymałościowych gabionu w funkcji parametrów zmiennych, dotyczących kruszywa wypełniającego kosz i siatkowej powłoki kosza. Podano propozycję numerycznego modelowania stanu odkształcenia elementu gabionowego.

2 Fizyczne modele symulacyjne i stanowisko badawcze

Modele fizyczne o wymiarach w planie 0,52 m x 0,52 m i wysokości $H = 0,42$ m sporządzono z koszy skonstruowanych z oryginalnej siatki (druć stalowy typu C 100G o średnicy 2,0 mm) o sześciobocznych oczkach 50 x 80 mm [2, 5, 7, 9] i wypełniono grysem bazaltowym o wymiarze ziaren 8/16 mm (rys. 1). Ściany kosza od wewnątrz otoczono powłoką z folii PCV w celu zapobieżenia przemieszczaniu się ziaren kruszywa na zewnątrz. Analiza obejmuje modele: wzorcowy, czyli kruszywo bez kosza siatkowego (w); gabion-kruszywo w koszu z siatką pojedynczą (k); gabion-kruszywo w koszu z siatką podwójną (2 k); wzorcowy-kruszywo z poziomą wkładką zbrojenia (tzw. przeponą)

w postaci siatki stalowej o oczkach 12 mm x 12 mm, zlokalizowaną na poziomie $0,5 H = 0,21$ m (w,p); gabion-kruszywo w koszu z siatką pojedynczą i przeponą zlokalizowaną na poziomie $0,5 H = 0,21$ m (k,p) oraz gabion-kruszywo w koszu z podwójnej siatki i przeponą zlokalizowaną na poziomie $0,5 H = 0,21$ m (2 k, p).

Stanowiskiem badawczym był stalowy, prostopadłościenny pojemnik wymiarach w widoku z góry 0,54 m x 0,54 m i wysokości $H = 0,42$ m (rys. 2) [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Konstrukcja ścian odwzorowuje odpór stref ośrodka otaczającego model gabionu, natomiast dno stanowi modelowane jednoparametrowe podłoże. Specjalne oprzyrządowanie powierzchni ścian i dna umożliwia kontrolowane przemieszczenia poziome i pionowe modelu oraz pomiary liczbowych wartości tych deformacji, które transformowane są na jednostkowe naciski poziome i pionowe, przy zastosowaniu odpowiedniej zależności analitycznej. W ścianach pojemnika wydzielono siedem poziomów pomiarowych o wysokościach: $z_1 = 0,03$ 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 [5, 6, 7].

Modele obciążano pionowo statycznym naciskiem w sposób centryczny za pośrednictwem poziomo zlokalizowanej stalowej sztywnej płyty kwadratowej o wymiarze boku 0,315 m. Stosowano obciążenie badawcze równomiernie rozłożone w zakresie do 0,20 MPa. Przy obciążeniu tej wysokości stwierdzono w próbkach wzorcowych początek zjawiska nierównomiernego osiadania płyty obciążającej. Przedmiotem badań były odkształcenia poziome i naciski pionowe modeli przekazywane na podłoże. Wartości pionowych nacisków oszacowano na podstawie iloczynu wartości przemieszczeń pionowych rejestrowanych przez czujniki w dnie pojemnika i znanej stałej sprężystości czujników. Czujniki te zainstalowano w dwóch osiach głównych centralnych dna. Badania miały charakter porównawczy – wyniki pomiarów porównywano z wynikami otrzymanymi na próbkach wzorcowych, które stanowiła bryła ośrodka gruntowego nie otoczonego powłoką siatkową.

Przyjęto oznaczenia:

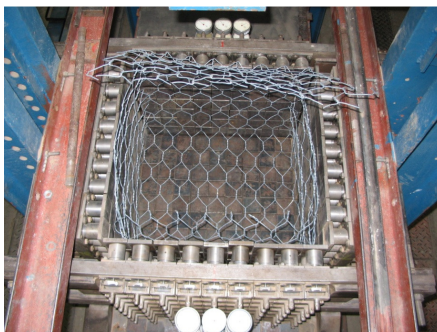
$\Delta x_{sr} = 1/n_k \sum \Delta x_k$ - średnie poziome przemieszczenie modelu; $n_k = 7$ - liczba poziomów pomiarowych;

$p_{x sr} = 1/n_k \sum p_{xk}$ - średni poziomy nacisk modeli na ścianę pojemnika;

q [MPa] - obciążenie jednostkowe statyczne modelu, realizowane w zakresie 0,0-0,20 MPa.



Rys. 1. Model fizyczny kosza gabionowego [5, 7]
Fig. 1. Physical model of gabion basket [5, 7]



Rys. 2. Widok z góry na wnętrzu pojemnika badawczego, w którym umieszczono model fizyczny kosza siatkowego z kruszywem (gabionu) [5, 7]
Fig. 2. Top view of the interior of the container research, which indicates a physical model of aggregate mesh basket (gabion) [5, 7]

Modele były poddane dwóm fazom badań. Faza pierwsza realizowana była na modelu wykonanym z kruszywa luźno nasypanego. W fazie drugiej kruszywo znajdowało się w stanie wstępnego zagęszczenia, wygenerowanego procesem obciążającym zastosowanym w fazie 1.

3 Wyniki badań wykonanych na fizycznych modelach symulacyjnych

Wyniki badań doświadczalnych sprowadzono do trzech poszukiwanych parametrów: współczynnika poziomego parcia (poziomego nacisku), nośności modeli gabionu i wytrzymałości na ścinanie.

Wartość współczynnika parcia boczno (poziomego nacisku) w stanie granicznym czynnym obliczono według wzoru [5, 7]:

$$K_a = p_{xsr} (p_z)^{-1} = p_{xsr} (q_{max})^{-1} \quad (1)$$

gdzie: p_z jest naprężeniem pionowym od obciążenia, które przyjęto jako $q_{max} = 0,2$ MPa.

Rozróznilo dwie wartości współczynnika parcia: K_{a1} – w odniesieniu do fazy 1 badań, K_{a2} - w odniesieniu do fazy 2 badań. Mniejsze wartości Δx_{sr} , $p_{x,sr}$ oraz K_a dla modeli przy założonym niezmiennym obciążeniu wskazują na przyrost nośności. Najbardziej korzystne efekty uzyskano w modelu gabionu, wzmocnionym poziomą przeponą (k,p).

Jako miernik przyrostu nośności modeli gabionu w stosunku do modelu wzorcowego (bez przepony i bez kosza siatkowego) potraktowano możliwość zwiększenia obciążenia pionowego q i dopuszczenie odpowiednio większych wartości naprężenia pionowego $p_z = f(q)$, przy ustalonej wartości nacisku poziomego p_x . Wielkość wprowadzonego w badaniach pionowego obciążenia zewnętrznego gwarantuje wystąpienie równomiernych naprężeń na wysokości modelu i wobec powyższego założono $p_z = q_{max}$. Efekt zwiększenia nośności jest rozpatrywany w zakresie fazy 1 badań.

1) Dla modelu (w), obciążonego maksymalnym naciskiem $q_{max} = 0,2$ MPa otrzymano z badań doświadczalnych średnie parcie boczne $p_{x,sr} = 0,029$ MPa. Wtedy doświadczalny współczynnik parcia otrzymuje wartość:

$$K = p_{x,sr} (p_z)^{-1} = 0,029 / 0,2 = 0,145.$$

Naprężenie poziome $p_{x,sr} = 0,029$ przyjęto jako bazę odniesienia, w celu skonstruowania zależności, która wykaże zwiększenie zasięgu możliwości zastosowania obciążenia zewnętrznego w modelach z przeponą i koszem w odniesieniu do modelu wzorcowego.

2) Dla modelu (w,p) otrzymano $K = 0,075$ oraz maksymalne naprężenie pionowe:

$$p_z^* = p_{x,sr} (K^*)^{-1} = 0,029 / 0,075 = \mathbf{0,386}$$
 MPa $> p_z = 0,2$ MPa. (2)

Efekt zwiększenia nośności Δp_z spowodowany przeponą zlokalizowaną w poziomie $z_d = 0,21$ m wyrażono różnicą między maksymalnym obciążeniem modelu z przeponą a maksymalnym obciążeniem modelu bez przepony:

$$\Delta p_z = p_z^* - p_z = 0,386 - 0,2 = \mathbf{0,186}$$
 MPa, albo: $\delta p_z = p_z^* (p_z)^{-1} = 0,386 (0,2)^{-1} = \mathbf{1,93} > 1,0$.

3) Dla modelu (k,p) otrzymano $K = 0,06$ oraz:

$$p_z^* = 0,029 (0,06)^{-1} = \mathbf{0,483}$$
 MPa $> p_z = 0,2$ MPa; $\Delta p_z = 0,483 - 0,2 = \mathbf{0,283}$ MPa

$$\text{albo inaczej: } \delta p_z = p_z^* (p_z)^{-1} = 0,483 (0,2)^{-1} = \mathbf{2,41} > 1,0.$$

W przypadku szacowania wytrzymałości na ścinanie, model ośrodka gruntowego niespoistego ze wzmocnieniem potraktowano jako ośrodek bez spójności, w którym uległ zwiększeniu kąt tarcia wewnętrznego wskutek wzmocnienia ($c = 0$, $\Delta\varphi > 0$). W procesie badań otrzymano parcie czynne p_x o wartości zależnej od szeregu czynników towarzyszących. Jeżeli w przypadku q_{max} wartości p_z i K zostaną potraktowane jako ekstremalne, wtedy po podstawieniu ich do klasycznego równania stanu granicznego można określić efekt zwiększenia kąta φ w ośrodku gruntowym wzmocnionym. Warunek stanu granicznego ma postać dla modelu gruntu nie wzmocnionego:

$$p_x p_x / p_z = tg^2 (45^\circ - 0,5 \varphi) = K_{min} \quad (3)$$

oraz przez analogię dla gruntu ze wzmocnieniem:

$$p_x^* / p_z tg^2 (45^\circ - 0,5 \varphi) = K_{min}^* < K_{min} \quad (4)$$

Istnieje też w tym przypadku zależność: $\varphi^* > \varphi$ oraz $\Delta\varphi = \varphi^* - \varphi$, gdzie φ jest kątem tarcia wewnętrznego badanego ośrodka gruntowego, $\Delta\varphi$ - efekt zwiększenia kąta tarcia.

Wartości kąta tarcia φ i wytrzymałości na ścinanie τ_f , efekt przepony bezwzględny $\Delta\tau_f$ i względny ε_p , efekt kosza siatkowego bezwzględny $\Delta\tau_f$, względny ε_r oraz łączny efekt kosza i przepony bezwzględny $\Delta\tau_f$ i względny ε_r dla wybranych modeli (w), (w,p) oraz (k,p) oszacowano przy użyciu wzorów (3) i (4). Wyniki obliczeń, czyli efekt wzrostu kąta tarcia wewnętrznego w ośrodku wzmocnionym podano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe modeli [5, 7]

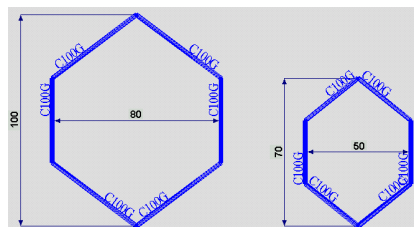
Table 1 Strength parameters of models [5, 7]

Model	Kąt tarcia φ [°]	Wytr. na ścinanie τ_f [MPa]	Efekt przepony		Efekt kosza siatkowego		Łączny efekt przepony i kosza	
			bezwzględny $\Delta\tau_f$ [MPa]	względny ε_p [%]	bezwzględny $\Delta\tau_f$ [MPa]	względny ε_r [%]	bezwzględny $\Delta\tau_f$ [MPa]	względny ε_r [%]
(w)	48,3	0,224	-	-	-	-	-	-
(w,p)	59,48	0,339	0,115	51,33	-	-	-	-
(k,p)	62,48	0,384	-	-	0,045	13,27	0,160	71,43

4 Numeryczne modelowanie elementów gabionowych i ich stanu odkształcenia

Podjęto próbę zaprojektowania elementów gabionowych przed i po odkształceniu, poprzez adaptację programu Robot MILLENIUM 15.0 [5, 6, 7]. Jak wiadomo, program ten służy zasadniczo do projektowania, modelowania, oraz wymiarowania różnych typów konstrukcji budowlanych i ich elementów składowych. Do projektowania koszy gabionowych wykorzystano model siatki uprzednio sporządzony w „zakładce” RAMA PŁASKA. Kosze wygenerowano używając „zakładki” KRATOWNICA PRZESTRZENNA. Efekt podanych procedur ilustrują poniżej przykłady projektowe.

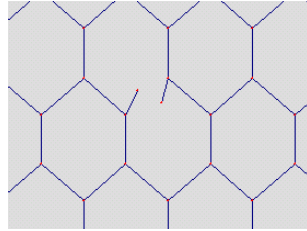
- model oczek siatki gabionowej (rys. 3);



Rys. 3. Modele oczek siatki gabionowej [5, 6, 7]

Fig. 3. Gabion mesh models [5, 6, 7]

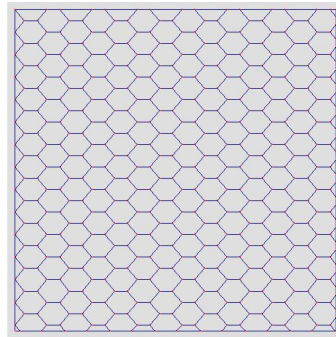
- siatka gabionowa z pękniętym drutem (projekt zrealizowany z „zakładce” RAMA PŁASKA) – rys. 4;



Rys. 4. Model siatki gabionowej z pękniętym drutem [5, 6, 7]

Fig. 4. Gabion mesh model with a broken wire [5, 6, 7]

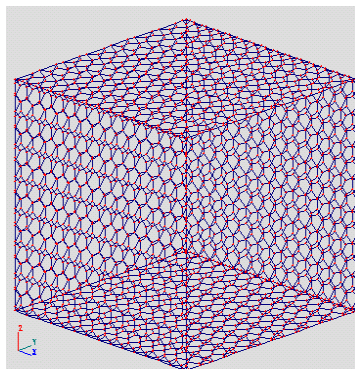
- dwuwymiarowy model kosza gabionowego (1,0 x 1,0 m); wymiary oczek siatki: 80 x 100 mm (rys. 5);



Rys. 5. Dwuwymiarowy model kosza gabionowego (1,0 x 1,0 m); wymiary siatki: 80 x 100 mm [5, 6, 7]

Fig. 5. Two-dimensional model of gabion basket (1.0 x 1.0 m); grid size: 80 x 100 mm [5, 6, 7]

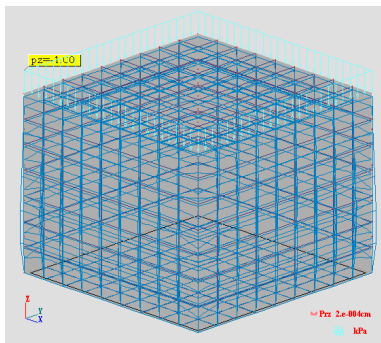
- trójwymiarowy projekt kosza gabionowego (1,0 x 1,0 1,0 m) z siatki o wymiarze oczek 80 x 100 mm, przy zastosowaniu w programie modelu siatki z pakietu RAMA PŁASKA (rys. 6);



Rys. 6. Trójwymiarowy model kosza gabionowego (1,0 x 1,0 x 1,0 m) z siatki o wymiarze oczek 80 x 100 mm [5, 6, 7]

Fig. 6. Three-dimensional model of gabion basket (1.0 x 1.0 x 1.0 m); grid size: 80 x 100 mm [5, 6, 7]

Rysunek 7 ilustruje przykład modelowania trójwymiarowego stanu odkształcenia kosza gabionowego wskutek obciążenia ciężarem własnym. Model kosza o wymiarach 1,0 x 1,0 x 1,0 m zaprojektowano w pakiecie KONSTRUKCJE OBJĘTOŚCIOWE-BRYŁY, sposobem uproszczonym, stosując siatkę czworokątną o oczkach 100 x 100 mm zamiast typowej dla gabionów siatki sześciokątnej. Wprowadzenie stosowanego w praktyce sześciokątnego kształtu oczek wymaga użycia komputera o dużej mocy obliczeniowej.



Rys. 7. Model kosza siatkowego (gabionu) po odkształceniu spowodowanym ciężarem własnym [5, 6, 7]

Fig. 7. Mesh basket model (gabion) after deformation caused by its own weight [5, 6, 7]

5 Podsumowanie

Wyniki badań doświadczalnych dotyczących odkształceń poziomych i pionowych fizycznego wielkowymiarowego modelu gabionu wykazały pozytywne aspekty pracy tego typu elementów tworzących ściany oporowe, poddanych działaniu pionowego

obciążenia o charakterze statycznym. Kosz siatkowy wypełniony materiałem kamiennym (gabion) obciążony w warunkach badań laboratoryjnych podanych w referacie, wykazuje mniejsze o około 30 % odkształcenia poziome w odniesieniu do wzorca, czyli próbki ośrodka ziarnistego bez powłoki siatkowej.

Generalnie stwierdzono wpływ otoczenia bryły kruszywa koszem siatkowym na ograniczenie przemieszczeń poziomych i pionowych, co jest równoznaczne ze zwiększeniem nośności. Wpływ ten jest zależny od parametrów wytrzymałościowych siatki kosza, wymiaru oczek siatki, jakości splotu oraz cech kruszywa (m.in. stopień zagęszczenia, wymiar i kształt ziaren).

Z powyższych rozważań wynika kapitalne znaczenie dodatkowo zainstalowanej poziomej przepony siatkowej (wkładki wzmacniającej), jako elementu w sposób zasadniczy redukującego przemieszczenia i generującego poprawę cech wytrzymałościowych modeli. Charakter pracy przepony różni się zasadniczo od funkcji kosza siatkowego: przepona podejmuje w płaszczyźnie poziomej siły rozciągające od masy ośrodka ziarnistego na zasadzie zjawiska tarcia wzdłuż prętów siatki oraz oporu poprzecznego przesuwu prętów zlokalizowanych prostopadle do tych sił.

Na szczególną uwagę zasługują wysokie wartości cech mechanicznych modeli traktowanych jako ośrodek bez spójności, w którym wskutek wzmocnienia wystąpił efekt zwiększenia kąta tarcia wewnętrznego. W modelach z koszem siatkowym i poziomą przeponą stwierdzono zwiększenie wartości wytrzymałości na ścinanie [%] wyodrębniając: efekt przepony $\varepsilon_{\tau} = 51,33 \%$; efekt kosza siatkowego $\varepsilon_{\tau} = 13,27 \%$ oraz łączny efekt kosza siatkowego i przepony $\varepsilon_{\tau} = 71,43 \%$.

Podane przykłady wskazują, że system ROBOT MILLENIUM jest w pełni przydatny jako narzędzie do numerycznego konstruowania:

- modeli elementów budujących kosze gabionowe (oczka siatki; siatka o oczkach czworokątnych i sześciokątnych);
- dwu i trójwymiarowych modeli gabionów, stanowiących pojedynczą sekcję i zespół sekcji;
- modeli oporowych ścian pionowych lub nachylonych względem płaszczyzny poziomej, złożonych z gabionów (możliwe jest tworzenie dowolnych kompozycji gabionów), co wykazały rezultaty innych, nie cytowanych w niniejszym referacie badań wykonanych przez autorów.

Literatura

1. Clayton C.R.J., Milititsky J., Woods R.J., Earth Pressure and Earth Retaining Structures. Blackie Academic & Professional. An Im Print of Chapman & Hall. London-New York, 1996
2. Gabiony MACCAFERRI. Officine MACCAFERRI S.P.A. Polibeton Sp.z o.o., ul. Jagiellońska 79, Warszawa 2003
3. GGU Gabion. Calculation of Gabion Walls. Geotechnical Computation. Civilserve DP for Civil Engineering, Braunschweig, Germany, August 2001
4. Jarominiak A.: Lekkie konstrukcje oporowe, WKiŁ, Warszawa 2003

5. Kozłowski W.; Analiza zachowania się oporowych ścian gabionowych i ich elementów pod wpływem obciążenia statycznego. Praca dokt., Raport serii PRE nr 3, 2007, Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Lądowej, Wrocław, 2007
6. Kozłowski W., Surowiecki A., Numerical simulation of deformations of gabion-retaining wall segment. Proc. Int. Scientific Conf. "Riesenie krizovych situacii v specificom prostredi". Zilinska Univerzita v Ziline, Zilina 23-24.6.2004, s.573-579
7. Surowiecki A., Balawejder A., Kozłowski W., Badanie możliwości wzmacniania nasypów kolejowych przy zastosowaniu zbrojenia gruntu, lekkich konstrukcji oporowych i maty komórkowej. Raport serii SPR nr 6, Projekt bad. MNiI nr 5 T07E 06024, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2006
8. Surowiecki A.: Interaction between reinforced soil components. *Studia Geotechnica et Mechanica*. Vol. 20, Nr 1-2, 1998, s. 43-61
9. Surowiecki A.: Podstawy projektowania zabezpieczeń podtorza przy użyciu gabionów. *Konf. Nauk.-Techn. Wrocław-Żmigród, Pol. Wrocl., SITK, 29-30.06.2000 r.*, s. 155-162
10. [10] Surowiecki A., O projektowaniu konstrukcji gabionowych w budownictwie komunikacyjnym. *Drogownictwo, SITK, Rok LVI, Nr 3, 2001*, s. 81-86.

Streszczenie

Temat referatu dotyczy ścian oporowych skonstruowanych z koszy siatkowo-kamiennych (tzw. gabionów), stosowanych w budownictwie komunikacyjnym w celu zabezpieczenia skarp budowli ziemnych przed osuwiskami. Przedstawiono fizyczny symulacyjny model pracy pojedynczego gabionu, wykonany w skali laboratoryjnej. Doświadczalnie oszacowano cechy wytrzymałościowe gabionu w funkcji wybranych parametrów zmiennych. Podano propozycję numerycznego modelowania stanu odkształcenia elementu gabionowego.

Simulation model of gabion wall element stabilizing communication embankment

Summary

The subject of the paper refers to gabion retaining walls, as the solution of earthen structures protection of motor roads and railway roads against the slope failures. There were presented the test of estimation of strength characteristics of gabions on the basis of deformations researches of physical gabion models. In particular estimated: the factor of horizontal pressure, the effect of load capacity increase on account of net-basket and the horizontal reinforcing rod and shear strength.