



DAMIAN BĘBEN¹⁾
ADAM JAN STRYCZEK²⁾

NUMERICAL ANALYSIS OF A SOIL-SHELL BRIDGE WITH A REINFORCED CONCRETE RELIEVING SLAB

ANALIZA NUMERYCZNA MOSTU GRUNTOWO-POWŁOKOWEGO Z ŻELBETOWĄ PŁYTĄ ODCIĄŻAJĄCĄ

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono analizę numeryczną, w zakresie obciążeń statycznych, mostu gruntowo-powłokowego z żelbetową płytą odciążającą. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych z wykorzystaniem programu Abaqus. Opracowano dwa modele obliczeniowe, model z płytą odciążającą i model bez płyty. Określono wpływ żelbetowej płyty odciążającej na deformacje stalowej powłoki z blach falistych. Porównując rezultaty obliczeń z wykorzystaniem dwóch modeli numerycznych stwierdzono, że dzięki zastosowaniu płyty odciążającej uzyskano znaczące redukcje przemieszczeń i naprężeń, redukcję przemieszczeń w granicach 53-66%, oraz naprężeń o 73-82%. Maksymalne przemieszczenia występują w kluczu powłoki, a największe naprężenia w punktach ćwiartkowych. Uzyskane wyniki obliczeń zostały porównane z rezultatami badań doświadczalnych i wcześniejszymi obliczeniami wykonanymi w programie Robot Millenium. Wykresy przemieszczeń i naprężeń są zbliżone do wyników uzyskanych z badań doświadczalnych. bezwzględne wartości przemieszczeń i naprężeń były przeważnie większe od otrzymanych podczas badań doświadczalnych.

SŁOWA KLUCZOWE: most gruntowo-powłokowy, naprężenie, płyta odciążająca, przemieszczenie.

ABSTRACT. The paper presents the results of numerical analysis of the behaviour under static loads of a soil-shell bridge equipped with a reinforced concrete (RC) relieving slab. The relevant calculations were carried out using Abaqus program based on finite element method (FEM). Two computational models have been derived: one with and the other without a RC relieving slab. The analysis included determination of the effect of the RC relieving slab on the steel shell made of corrugated plates. The results obtained with the two above-mentioned numerical models were compared to show that the relieving slab resulted in a considerable reduction of the displacements and stresses, namely 55-63% for displacements and 73-82% for stress). The maximum displacements occur at the shell crown while the highest stresses occur at the shell quarter-points. The results of calculations were compared with the experimental data and with the results of earlier calculations carried out with Robot Millenium program. The displacement and stress curves are close to the experimental results. Generally the absolute values of displacements and stresses were higher than the experimental data.

KEYWORDS: displacement, relieving slab, soil-shell bridge, stress.

DOI: 10.7409/rabdim.014.001

¹⁾ Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska; d.beben@po.opole.pl (✉)

²⁾ Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska; a.j.stryczek@hotmail.com

1. WPROWADZENIE

Mosty i przepusty z blach falistych są coraz częściej stosowane jako alternatywa dla tradycyjnych stalowych lub betonowych obiektów mostowych [1-3]. Zaletami, które decydują o wyborze tych rozwiązań konstrukcyjnych są głównie krótki czas realizacji i niskie koszty budowy [4]. W wielu przypadkach nie jest jednak możliwe zastosowanie minimalnej grubości zasypki w kluczu takich obiektów [3], [5-8]. W tych przypadkach należy zastosować dodatkowe elementy, które powodują rozłożenie obciążenia pochodzącego od kół samochodowych na znacznie większej powierzchni, i tym samym zmniejszenie bezpośredniego nacisku pojazdów na konstrukcję powłoki. Do tego celu wykorzystuje się zazwyczaj żelbetowe płyty odciążające, geosyntetyki i grunt zbrojony [3], [9-12].

Celem analizy numerycznej mostu gruntowo-powłokowego w zakresie obciążeń statycznych było określenie wpływu żelbetowej płyty odciążającej oraz ocena konieczności jej użycia. Zastosowanie żelbetowej płyty w tym moście wymusiły niekorzystne warunki trakcyjne budowy danego obiektu mostowego. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z rezultatami badań doświadczalnych [9], [13]. Analizę numeryczną mostu przeprowadzono w przestrzeni trójwymiarowej w programie Abaqus/CEA 6.11 [14]. Wykonano dwa modele mostu, model z żelbetową płytą odciążającą i model bez płyty. W artykule porównano także wartości przemieszczeń i naprężeń uzyskanych za pomocą programu Abaqus i wynikami analiz wykonanych w programie Robot Millenium [13].

Wnioski końcowe dotyczą przede wszystkim zasadności zastosowania żelbetowej płyty odciążającej, a także dokładności uzyskanych wyników obliczeń w porównaniu do rezultatów badań doświadczalnych i wcześniejszych obliczeń numerycznych [13].

2. KRÓTKI OPIS MOSTU

Ustrój statyczny mostu stanowi jednoprzęsłowa sztywno utwierdzona konstrukcja łukowa o rozpiętości teoretycznej 10,00 m i wysokości w świetle 4,02 m (Rys. 1). Stalowa powłoka składa się z arkuszy blachy falistej MP 150×50×3, połączonych ze sobą za pomocą śrub sprężających. Obiekt ten, w stosunku do osi drogi, usytuowany jest w skosie wynoszącym 58,81°, co miało zasadniczy wpływ na jego wymiary zewnętrzne. Konstrukcja łukowa została oparta na dwóch żelbetowych ławach fundamentowych wykonanych z betonu klasy C25/30, umieszczonych w ściankach szczelnych typu Larssena. Stalowa powłoka

1. INTRODUCTION

Bridges and culverts made of corrugated plates are becoming a more and more popular solution as an alternative to conventional steel or concrete bridge structures [1-3]. The benefits of using corrugation plate systems include short construction time and cost savings [4]. However, in many situations it is not possible to meet the minimum backfill depth requirement above the shell crown [3], [5-8]. Then it is necessary to apply special elements to distribute the wheel load on a greater surface area, thus reducing the pressure imposed on the structural plate shell. The most common measures are reinforced concrete (RC) relieving slabs, geosynthetics and reinforced soil systems [3], [9-12].

The purpose of the numerical analysis of soil-shell bridge under static loads was to determine the effect of and need for incorporating a RC relieving slab in the structural system. The RC relieving slab was incorporated in the bridge system during construction due to the encountered unfavourable local conditions. The results of calculations were compared with the experimental data [9], [13]. The numerical analysis was carried out in a three-dimensional space defined in Abaqus/CEA program, ver. 6.11 [14]. Two models were derived in this research – one with and the other without the RC relieving slab. The research included also comparing the displacements and stresses obtained with Abaqus and Robot Millenium programs [13].

In the conclusions attention is paid to assessment of the need for the RC relieving slab and accuracy of the results obtained through calculations as compared to experimental data and results of earlier numerical analyses [13].

2. OVERVIEW OF THE ANALYSED BRIDGE

The static system is a single-span, fixed arch structure of 10.00 m effective span and 4.02 m rise (Fig. 1). The steel shell is made of MP 150×50×3 corrugated steel plate sections connected with high-strength bolts. The structure is skewed at an angle of 58.81° in relation to the roadway axis which is the main factor determining the outer dimensions of the structure. The arch structure rests on two RC strip footings made of C25/30 concrete placed inside Larssen sheet piling. The steel shell is stiffened at the ends with 0.30×0.50 m RC collars.

została usztywniona na końcach żelbetowymi wieńcami obwodowymi o wymiarach 0,30×0,50 m.

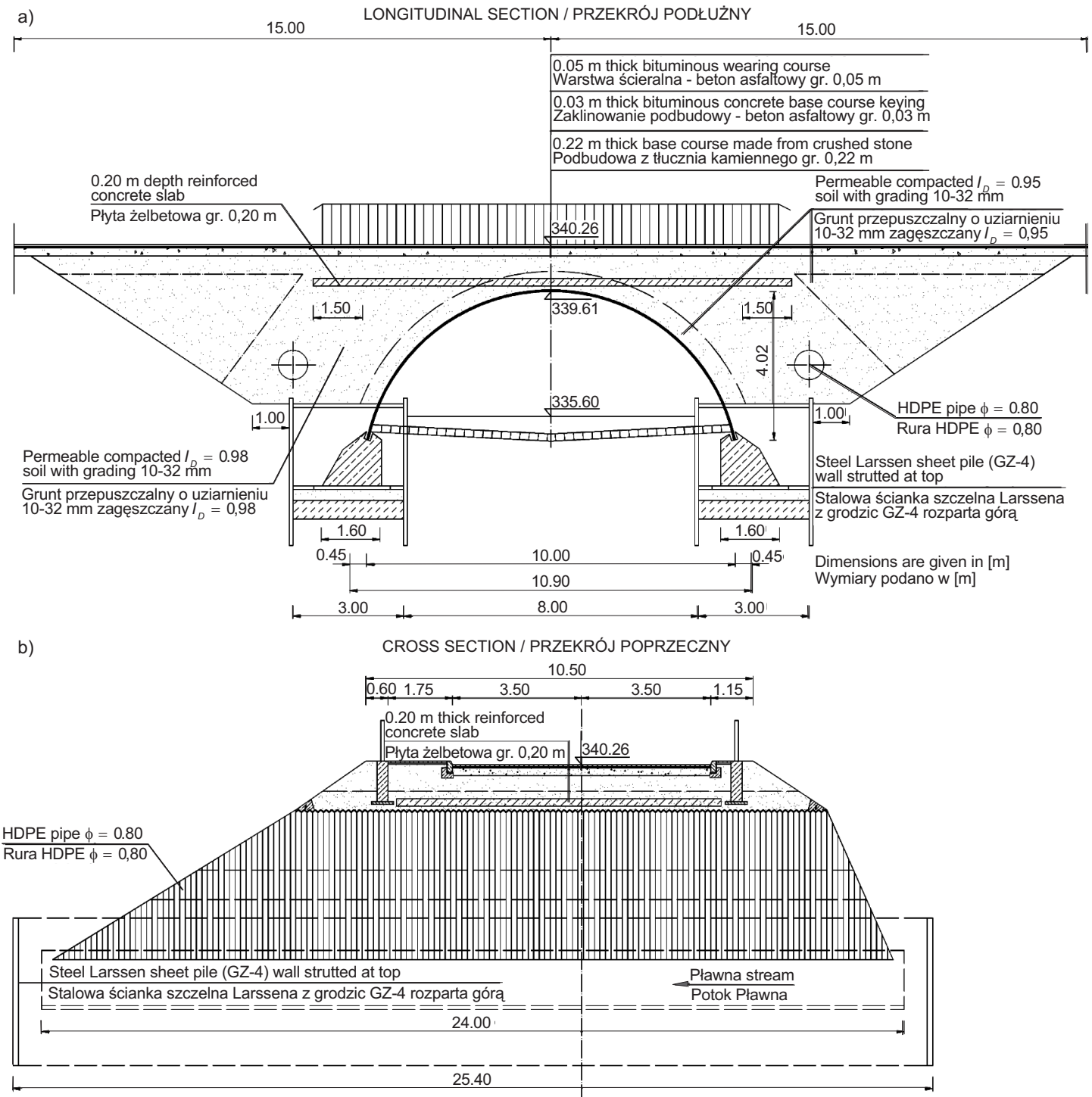


Fig. 1. Soil-shell bridge: a) longitudinal section, b) cross section

Rys. 1. Most gruntowo-powłokowy: a) przekrój podłużny, b) przekrój poprzeczny

W trakcie realizacji obiektu koniecznym okazało się znaczne zmniejszenie grubości projektowanego naziomu gruntu nad stalową powłoką z 1,22 m na 0,65 m. Wynikła z tego potrzeba zastosowania żelbetowej płyty odciążającej o grubości 0,20 m, którą ułożono 0,10 m nad kluczem powłoki. Płyta wystaje około 1,50 m poza obrys przekroju podłużnego z obu stron konstrukcji łukowej, a w przekroju poprzecznym obejmuje całą szerokość jezdni wraz z chodnikiem dla pieszych.

Do wykonania stalowej konstrukcji powłoki użyto stal konstrukcyjną odpowiadającą parametrom wytrzymałościowym polskiej stali St3M. Podstawowe wymiary mostu przedstawiono na Rys. 1. Szczegółowy opis mostu i prac budowlanych, a także wyniki badań doświadczalnych pod obciążeniem statycznym przedstawione są w pracach [9], [13].

3. OPIS MODELU NUMERYCZNEGO

3.1. UWAGI OGÓLNE

Do obliczeń mostu gruntowo-powłokowego wykorzystano program Abaqus/CEA 6.11 [14] oparty na metodzie elementów skończonych (MES) [15]. W modelach numerycznych analizowanego mostu starano się odzwierciedlić rzeczywistość jego geometrię, jednocześnie nie uwzględniając elementów drugorzędnych mogących wpływać na rozbudowanie modelu i znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Dlatego z uwagi na złożony kształt obiektu (pochyłość skarp, żelbetowe wieńce wzmacniające wlot i wylot powłoki), modele numeryczne zostały zbudowane w sposób uproszczony, jednak przy zachowaniu głównych parametrów mostu (falistość i rozpiętość powłoki, długość powłoki góra). Elementy takie jak skarpy, żelbetowe wieńce, poręcze, rury odwadniające nie powinny zasadniczo wpływać na wyniki obliczeń, ponieważ są zlokalizowane poza zakresem działania obciążenia i jednocześnie stanowią dodatkowe wyposażenie mostu.

Obliczenia mostu zostały przeprowadzone w przestrzeni trójwymiarowej. Nieliniowość w modelach obliczeniowych została uwzględniona poprzez zastosowanie analizy przyrostowej Full Newton [14], [16]. W symulacjach zachowania się mostu gruntowo-powłokowego pod obciążeniem statycznym wykorzystano dwa modele obliczeniowe. W pierwszym uwzględniono zastosowanie żelbetowej płyty odciążającej (jak w obiekcie rzeczywistym), a w drugim modelu płyty nie brano pod uwagę w celu ustalenia, czy stosowanie takiego rozwiązania było konieczne. Modele mostu gruntowo-powłokowego stanowią bryły będące

During construction it became necessary to reduce the backfill depth from the initially designed 1.22 m to 0.65 m above the steel shell. As a consequence, a 0.20 m thick RC relieving slab was designed and installed at a distance of 0.10 m above the shell crown. In the longitudinal section the relieving slab extends ca. 1.50 m sideways of the structural shell and in the transverse direction it covers the width of the roadway and footway.

The material of the corrugated plate of the bridge is structural steel of strength parameters corresponding to class St3M according to the Polish classification system. The main dimensions of the bridge are presented in Fig. 1. For more details on the bridge design and construction, as well as the results of static load tests see [9] and [13].

3. DESCRIPTION OF THE NUMERICAL MODEL

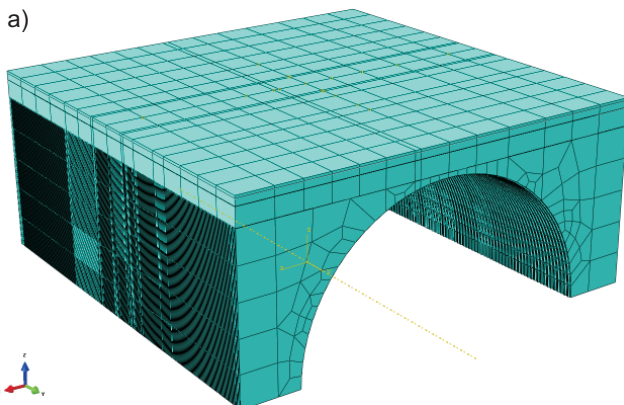
3.1. GENERAL REMARKS

The calculations of soil-shell bridge were carried out using Abaqus/CEA program, ver. 6.11 [14] based on finite element method (FEM) [15]. The numerical models used in the analyses were designed to reflect the actual geometry of the bridge in consideration, while omitting secondary elements which could result in undesired complexity of the model largely increasing the processing time. The complex shape of the analysed structure (slopes, collars stiffening of the arch at inlet and outlet) is simplified in the derived numerical models, without affecting the main features (corrugations and shell span, length of extrados). The respective elements of the system such as slopes, RC collars, handrails, drainage pipes should not have a significant effect on the results of calculations, since they are located beyond the load distribution area and they are not the structural parts of the bridge.

The calculations were done in a three-dimensional space. Full Newton iterative solution was applied to account for nonlinearity in the derived models [14], [16]. Two calculation models were used to simulate the behaviour of the bridge under the imposed static loads. The first model allows for the effect of RC relieving slab (the case representing the real-life situation) which has been omitted in the other model in order to verify whether the slab was actually needed. The bridge models are 14×14×6.2 m solids cut out from the space. Modelling of soil located more than 2 metres away from the shell has no significant effect on the results of calculations since it is the boundary conditions that are of decisive importance, which provide

wycinkiem przestrzeni o wymiarach $14 \times 14 \times 6,2$ m. Modelowanie gruntu położonego w odległości większej niż 2 m od powłoki nie wpływa zasadniczo na uzyskiwane wyniki obliczeń, gdyż decydujące w takim przypadku są warunki brzegowe, które w przybliżony sposób odzwierciedlają rzeczywisty obiekt. W związku z tym żelbetowe ławy fundamentowe stanowiące sztywne podparcie konstrukcji zostały pominięte w procesie modelowania. Ze względu na złożoną geometrię powłoki, wynikającej z kąta pod jakim przecina się jej oś w stosunku do osi podłużnej mostu, kąt $58,81^\circ$, ograniczono się do uproszczonego modelu, w którym obie osie przecinają się pod kątem prostym, co przemawia na niekorzyść modelu numerycznego (mniejsza powierzchnia przejmowania obciążeń z nawierzchni).

Model obliczeniowy stanowi siatka elementów skończonych (Rys. 2a) w kształcie prostopadłościanów C3D8R (elementy typu solid) i czworościanów S4R (elementy typu shell). W modelu płyty żelbetowej i blachy falistej wykorzystano jako elementy typu shell, natomiast do pozostałych elementów typu solid. W każdym z modeli węzły posiadają sześć stopni swobody ($U1, U2, U3$ – kierunki przemieszczeń na osiach OX, OY, OZ oraz $UR1, UR2, UR3$ – kierunki obrotów względem osi OX, OY, OZ), przy czym węzły elementów, których krawędzie leżą na zewnętrznych powierzchniach modelu numerycznego mają zablokowane wszystkie stopnie swobody - są utwierdzone. Podsumowując, w obu modelach numerycznych analizowanego mostu zastosowano 57 718 i 63 472 elementów skończonych odpowiednio dla modelu obliczeniowego z płytą odciążającą i bez niej.



an approximate representation of the real-life structure. Hence, the RC footings which provide a rigid support to the structure are not included in the models. In view of the complex geometry of the shell resulting from the skew angle of 58.81° in relation to the longitudinal bridge axis, the analyses were reduced to the simplified model with the axes intersecting at right angle, which is a handicap in the case of the numerical model (less area for distribution of loads transferred from the pavement).

The calculation model is a finite element mesh (Fig. 2a) built of C3D8R solid finite elements and SR4 shell finite elements. The shell finite elements were used in the model of the RC slab and the corrugated plate and the remaining components were modelled by solid finite elements. In either model each node has six degrees of freedom ($U1, U2, U3$ – directions of translation on axes OX, OY, OZ and $UR1, UR2, UR3$ – directions of rotation about axes OX, OY, OZ) except for the nodes of elements whose edges are located in the outer planes of the numerical model which have no degrees of freedom, i.e. they are fixed. All in all, there are 57,718 finite elements in the model including the relieving slab and 63,472 finite elements in the model without this slab.

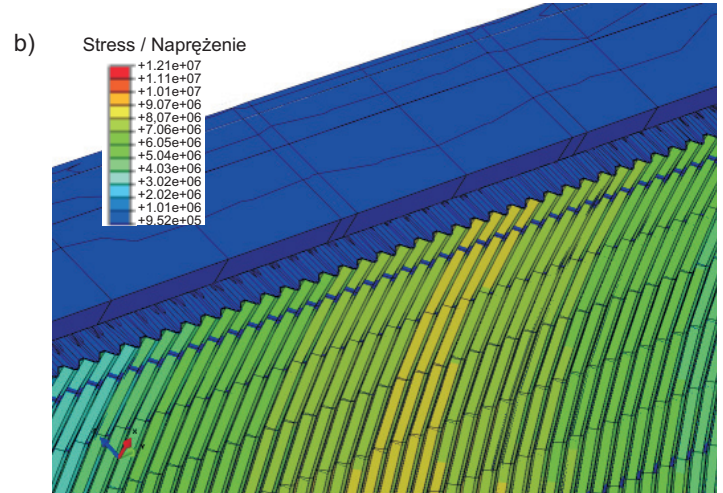


Fig. 2. Model of soil-shell bridge: a) finite elements mesh, b) detail showing corrugation of the structural shell

Rys. 2. Model mostu gruntowo-powłokowego: a) siatka elementów skończonych, b) szczegół obrazujący falistość powłoki

3.2. CHARAKTERYSTYKI MATERIAŁOWE

Elementy mostu, tj. stalową powłokę falistą oraz żelbetową płytę odciążającą zamodelowano trójwymiarowymi elementami powłokowymi (S4R - shell). Natomiast pozostałe

3.2. MATERIAL CHARACTERISTICS

The bridge components, i.e. the corrugated steel plate and RC relieving slab are modelled as three-dimensional shell finite elements (S4R). The remaining parts of the

części (grunt, warstwy nawierzchni drogowej) zostały zdefiniowane elementami o właściwościach ciała stałego (C3DR8 - solid). Parametry materiałowe dobrano na podstawie dostępnych danych technicznych i charakterystyk materiałowych zawartych w bazie danych programu Abaqus:

- stalową powłokę odwzorowano jako rzeczywiste elementy blachy falistej MP 150×50×3 (Rys. 2b). Blachy faliste zdefiniowano elementami typu shell. Materiał przyjęto jako sprężysto-plastyczny o gęstości $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 205 \text{ GPa}$, współczynnika Poissona $\nu = 0,3$ i granicy plastyczności $R_e = 275 \text{ MPa}$. Ze względu na złożoność samej powłoki i jej krzywoliniowy kształt zastosowano dokładność kontroli krzywizny 0,01 m. Modelując powłoki z blach falistych pominięto połączenia śrubowe pomiędzy blachami.
- zasypkę (piasek średni) zdefiniowano jako materiał sprężysto-plastyczny (elementy typu solid) z hiperbolicznym kryterium ścinania Druckera-Pragera o gęstości $\gamma = 20,5 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 100 \text{ MPa}$, kącie tarcia wewnętrznego $\phi = 45^\circ$, kącie dylatacji $\alpha = 5^\circ$ i początkowym rozciąganiu równym 0 MPa. Zastosowanie modelu Druckera-Pragera wymagało określenia wielkości wzmocnienia gruntu wynikającej z wykluczenia wpływu kohezji na pracę gruntu. Do tego celu wykorzystano parametr określający wzmocnienie gruntu przy ścisaniu, ustalając jego wielkość na 5 MPa;
- podbudowa drogowa (tłuczeń) została zdefiniowana jako materiał sprężysto-plastyczny (elementy typu solid) z uwzględnieniem hiperbolicznego kryterium Druckera-Pragera o gęstości $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 60 \text{ MPa}$, kącie tarcia wewnętrznego $\phi = 17^\circ$, kącie dylatacji $\alpha = 10^\circ$ i początkowym rozciąganiu równym 0 MPa. Tak jak w przypadku modelu zasadniczej zasypki, zastosowano wzmocnienie modelu Druckera-Pragera, ustalając parametr wzmocnienia gruntu przy ścisaniu na 5 MPa;
- żelbetową płytę odciążającą opisano jako materiał sprężysty (elementy typu shell) o gęstości $\gamma = 25,0 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 29,0 \text{ GPa}$ i współczynnika Poissona $\nu = 0,17$;
- warstwę nawierzchni drogowej (asfalt) zdefiniowano jako materiał sprężysty (elementy typu solid) o gęstości $\gamma = 21,0 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 6,9 \text{ GPa}$ i współczynnika Poissona $\nu = 0,41$;
- warunki brzegowe: zastosowano utwierdzenie zupełne, tzn. zablokowano obroty i przesunięcia na każdej z osi boków i podstawy powłoki. Most gruntowo-powłokowy został sztywno osadzony w swoim otoczeniu dzięki występującemu w gruncie, wzdłuż każdego

system (soil, pavement layers) are represented by solid finite elements (C3DR8). The parameters of materials were based on the available record data and the default material characteristics obtained from the data base of Abaqus program:

- the steel shell is represented as real-life elements of MP 150×50×3 corrugated steel plate (Fig. 2b). The corrugated plates are defined by shell finite elements. Elastic-plastic behaviour was assumed for this material together with the following parameters: density of $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$, Young modulus of $E = 205 \text{ GPa}$, Poisson ratio of $\nu = 0.3$ and yield strength of $R_e = 275 \text{ MPa}$. Due to the complexity of the shell and its curved shape accuracy of curvature radius was assumed at 0.01 m. Bolted connections between the corrugated plate sections were omitted in the model;
- the backfill (medium sand) was defined as elastic-plastic material (solid finite elements) with the application of hyperbolic shear criterion of Drucker-Prager model and the following parameters: density of $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$, Young modulus of $E = 100 \text{ MPa}$, angle of internal friction of $\phi = 45^\circ$, dilation angle of $\alpha = 5^\circ$ and initial tension of 0 MPa. Having chosen the Drucker-Prager model it was required to determine the increase of soil strength upon excluding the effect of cohesion. For this purpose an increase of strength in compression by 5 MPa was set using the default parameter of the program;
- the roadbase (breakstone) was defined as elastic-plastic material (solid finite elements) with the application of hyperbolic shear criterion of Drucker-Prager model and the following parameters: density of $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$, Young modulus of $E = 60 \text{ MPa}$, angle of internal friction of $\phi = 17^\circ$, dilation angle of $\alpha = 10^\circ$ and initial tension of 0 MPa. Similarly to the main backfill model strengthening of the Drucker-Prager model was defined by increasing the strength of soil in compression by 5 MPa;
- the RC relieving slab was defined as elastic material (shell finite elements) with the following parameters: density of $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$, Young modulus of $E = 29.0 \text{ GPa}$ and Poisson ratio of $\nu = 0.17$;
- the pavement layer (asphalt) was defined as elastic material (solid finite elements) with the following parameters: density of $\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$, Young modulus of $E = 6.9 \text{ GPa}$ and Poisson ratio of $\nu = 0.41$;
- boundary conditions: fixed support was defined by restraining rotation and translation at all the axes of

kierunku przemieszczeń zjawisku odporu bocznego, a także z uwagi na sztywne podparcie powłoki na masywnych ławach fundamentowych;

- przyjęto krok obliczeniowy $T = t + \Delta t$, gdzie t jest czasem początkowym równym $t = 0$ s, natomiast Δt jest przyrostem czasu, podczas którego następuje przyłożenie zadanego obciążenia statycznego zgodnie z trzema schematami zastosowanymi podczas badań doświadczalnych [9], [13]. Zgodnie z powyższym, Δt jest równy czasowi, w którym następuje przyłożenie obciążenia i przyjmowany jest zazwyczaj jako 1 s. Podczas kroku obliczeniowego ($T = 1$ s) program dokonuje obliczeń kolejnych iteracji dla przyrostów wpływu obciążenia działającego w tym czasie i ich wpływu na pracę konstrukcji. Stąd też niezbędne jest, w trakcie definiowania kroku obliczeniowego, założenie geometrycznej nieliniowości obiektu (określonej także w charakterystykach materiałowych każdej ze składowych części konstrukcji, tj. gruntu, stali, betonu), co ma ważny wpływ na występujące w konstrukcji deformacje wynikające z działania przyłożonych sił. Następnie, określając metodę rozwiązywania układu równań, przyjęto metodę bezpośrednią analizy numerycznej stosując przy tym technikę uzyskania rozwiązania typu *Full Newton*. Zmianę obciążenia w czasie wykonywania kolejnych iteracji przyjęto jako liniową podczas całego kroku obliczeniowego, co odpowiada statycznemu działaniu przyłożonych obciążeń. Ponadto, w celu uściślenia nieliniowej analizy modelu numerycznego, dla kolejnych, rozpoczynających się iteracji, przyjęto paraboliczną ekstrapolację ze wcześniejszych stanów oddziaływania obciążenia na konstrukcję.

3.3. WŁAŚCIWOŚCI STREF KONTAKTOWYCH

Modelowanie mostu gruntowo-powłokowego składającego się z wielu różnych warstw (elementy nawierzchni drogowej, płyta żelbetowa, grunt, blacha stalowa) o różnych właściwościach fizycznych, wymaga określenia ich wzajemnego oddziaływania (interakcji) na siebie [17]. Interakcje te należy określić pomiędzy wszystkimi warstwami będącymi ze sobą w bezpośrednim kontakcie, nawet w przypadku gdy posiadają one zbliżone właściwości fizyczne (grunt-tłuczeń). Do modelowania współpracy pomiędzy różnymi materiałami, o zdefiniowanych wcześniej właściwościach fizycznych, wchodzącymi w skład mostu wykorzystano elementy kontaktowe tzw. interface [14].

Interakcje na styku powierzchni materiałów będących ze sobą w kontakcie (tłuczeń - asfalt, tłuczeń - grunt, grunt - żelbet, grunt - powłoka) modelowano jako sztywne elementy

the shell sides and base. The soil-shell bridge is rigidly restrained in the surrounding space by lateral soil pressure mobilised in all the translation directions and by the rigid support on massive strip footings;

- the assumed calculation step is $T = t + \Delta t$ where t is the start time of $t = 0$ s and Δt is the increment of time during which pre-defined static load is applied according to the three schemes used in the experimental tests [9], [13]. As such, Δt equals the load application time and it is usually taken at 1 s. During the calculation step ($T = 1$ s) the program carries out subsequent iterative calculations for the increments of the effect of load applied during that time and their effect on the structure behaviour. Hence, in defining the calculation step it is necessary to allow for non-linear behaviour of the structure (as it is allowed for in each of the respective components of the system, i.e. soil, steel and concrete) which has a major effect on the deformations of the structure under the applied loads. The direct numerical analysis method was chosen as the method for solving the system of equations using the *Full Newton* technique. Load variation in the subsequent iterations was assumed to be linear during the whole calculation step, which corresponds with the static nature of the applied loads. Moreover, in order to obtain a more accurate non-linear analysis of the numerical model for the subsequent iterations parabolic extrapolation from the previous loading states was used.

3.3. PROPERTIES AT INTERFACES

The analysed bridge consists of several layers (pavement, RC slab, soil, steel plate) of different physical properties and their interaction must be determined as part of model building process [17]. The above-mentioned interactions should be determined between all the layers which are in direct contact with each other, even if they have similar physical properties (as in the case of soil-breakstone interaction). In the model the interactions between the different materials with pre-defined physical properties are represented by the interface finite elements [14].

The contact interactions between the different materials (breakstone - asphalt, breakstone - soil, soil - reinforced concrete, soil - shell) were modelled as rigid beam elements (Fig. 3) transferring the relevant actions from the master surface onto the slave surface [18]. These elements take into account the phenomena occurring as a result of interaction between two materials, i.e. normal and friction forces.

belkowe (Rys. 3) przekazujące właściwe im rodzaje oddziaływań z powierzchni nadrzędnej (*master*) na podrzędną (*slave*) [18]. Elementy te uwzględniają zjawiska pojawiające się w trakcie oddziaływania na siebie dwóch materiałów, tj. siły normalne i siły tarcia. Ponadto program Abaqus umożliwia określenie charakteru współpracy powierzchni będących ze sobą w kontakcie, poprzez podanie rodzaju poślizgu pomiędzy stykającymi się powierzchniami. Ze względu na budowę i charakter pracy całego mostu, przenoszącego obciążenia na ostatnią ze swoich warstw, tj. blachę falistą, rodzaj interakcji występujący pomiędzy warstwami (asfalt - tłuczeń, tłuczeń - grunt, grunt - żelbet) określono jako „*finite sliding*”, czyli brak poślizgu. Wyściowym argumentem dla założenia takiego rodzaju interakcji jest fakt, że dopiero na ostatnim styku warstw (blacha stalowa - grunt) może dochodzić do niewielkich poślizgów zasympki gruntowej w otoczeniu blachy stalowej. W tym wypadku przyjęto interakcję, w której następuje niewielki poślizg („*small sliding*”).

Zależność nadrzędnych i podrzędnych powierzchni kontaktu określono na zasadzie modułów sprężystości materiałów będących ze sobą w kontakcie (interakcji) i charakteru pracy konstrukcji. Jako powierzchnię podrzędną (*slave*) przyjęto tę, której materiał posiada mniejszy moduł sprężystości Younga, a jako nadrzędną (*master*) określaną powierzchnię, której moduł sprężystości jest większy. W modelu numerycznym bez żelbetowej płyty odciażającej wyróżniono 3 rodzaje stref kontaktowych (stal - grunt, grunt - tłuczeń, tłuczeń - asfalt). Dla poszczególnych warstw przyjęto następujące zależności nadrzędno-podrzędne, tj.: a) tłuczeń - asfalt → slave - master, b) tłuczeń - grunt → master - slave, c) grunt - żelbet → slave - master, d) grunt - powłoka → slave - master.

Ze względu na rodzaj powierzchni będących ze sobą w kontakcie wyróżniono dwa rodzaje właściwości interakcji określające współczynniki tarcia pomiędzy warstwami i sztywność połączenia jakie tworzą te warstwy. Stworzenie dwóch rodzajów właściwości interakcji wynika ze specyficznego sposobu oddziaływania gruntu i stalowej powłoki w porównaniu z właściwościami kontaktowymi pozostałych powierzchni o względnie zbliżonych cechach (grunt - beton, asfalt - tłuczeń, tłuczeń - grunt). Decydującym elementem odróżniającym ten typ interakcji od pozostałych jest gładka powierzchnia powłoki, która implikuje mniejszy współczynnik tarcia. Przyjęto więc następujące współczynniki tarcia: dla strefy kontaktowej gruntu i powłoki – 0,3, dla pozostałych powierzchni – 0,6. Natomiast sztywności połączeń zostały ustalone na poziomie 2000 GN/m – dla strefy kontaktowej gruntu i powłoki oraz 2 GN/m – dla pozostałych powierzchni.

Moreover, it is possible in Abaqus program to define the character of interaction between the surfaces in contact by defining the type of sliding between them. Taking into account the design and behaviour of the bridge as a whole, in which the loads are finally transferred to the final layer, i.e. corrugated steel plate, finite sliding was chosen meaning no slipping between the respective interacting layers (asphalt - breakstone, breakstone - soil, soil - reinforced concrete). This type of interaction could be assumed due to the fact that small sliding of backfill material surrounding the steel plate may occur only at the final interface (steel plate - soil). In this case “small sliding” interaction was assumed.

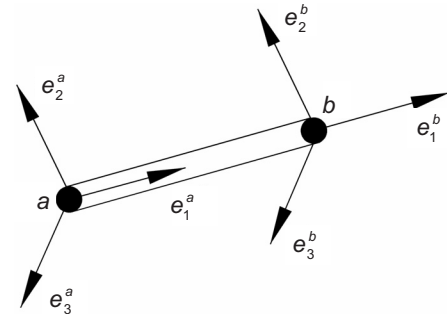


Fig. 3. Scheme of contact element of Abaqus program
Rys. 3. Schemat elementu kontaktowego w programie Abaqus

The relationship between master and slave surfaces was defined through E -moduli of the interacting materials and the nature of the structural behaviour of the system. The slave surface was that with a lower value of Young modulus and the other one was the master surface. Three types of interfaces were identified in the numerical model of the system without RC relieving slab: steel - soil, soil - breakstone, breakstone - asphalt. The following master - slave relationships are defined for the respective interfaces: a) breakstone - asphalt → slave - master, b) breakstone - soil → master - slave, c) soil - reinforced concrete → slave - master, d) soil - shell → slave - master.

There are two types of interactions in the model, depending on the friction and joint stiffness. The reason for defining two types of interaction is the specific behaviour at the soil - steel shell interface, as compared to the remaining interfaces between materials of relatively similar behaviour (soil - concrete, asphalt - breakstone, breakstone - soil). The primary cause of that is the smooth surface of the structural plate (shell) resulting in lower friction. The following values of friction coefficients have been assumed: 0.3 for soil-shell interface and 0.6 for other surfaces. Two levels of joint stiffness are assumed in the model: 2000 GN/m for the soil-shell interface and 2 GN/m for the remaining interfaces.

4. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I ICH ANALIZA

4.1. UWAGI OGÓLNE

W celu porównania wyników obliczeń z rezultatami pomiarów zastosowano takie same obciążenia jakich użyto podczas rzeczywistych badań doświadczalnych mostu pod obciążeniem statycznym. Podczas badań doświadczalnych mostu wykorzystano dwa samochody ciężarowe, których całkowity ciężar przekraczał 500 kN [9], [13]. Aby można było bezpośrednio porównywać wyniki obliczeń i pomiarów, siły stanowiące naciski kół pojazdów obciążających zostały umiejscowione w modelu obliczeniowym, w niemal identycznych miejscach jak podczas badań doświadczalnych. Dokładny opis schematów w zakresie obciążeń statycznych jest zamieszczony w pracach [9], [13]. Wyniki obliczeń numerycznych mostu gruntowo-powłokowego przedstawiono w postaci map przemieszczeń i naprężeń.

4.2. ANALIZA WPŁYWU ŻELBETOWEJ PŁYTY ODCIĄŻAJĄCEJ

Wybrane wyniki obliczeń w programie Abaqus przy zastosowaniu dwóch modeli mostu gruntowo-powłokowego przedstawiono na Rys. 4-6. Wyniki przedstawiono w postaci przekroju mostu wzdłuż osi podłużnej powłoki, tak aby można było zaobserwować rozkłady obciążenia w obu modelach. W oparciu o te wyniki można ustalić wpływ żelbetowej płyty odcciążającej na deformacje stalowej powłoki.

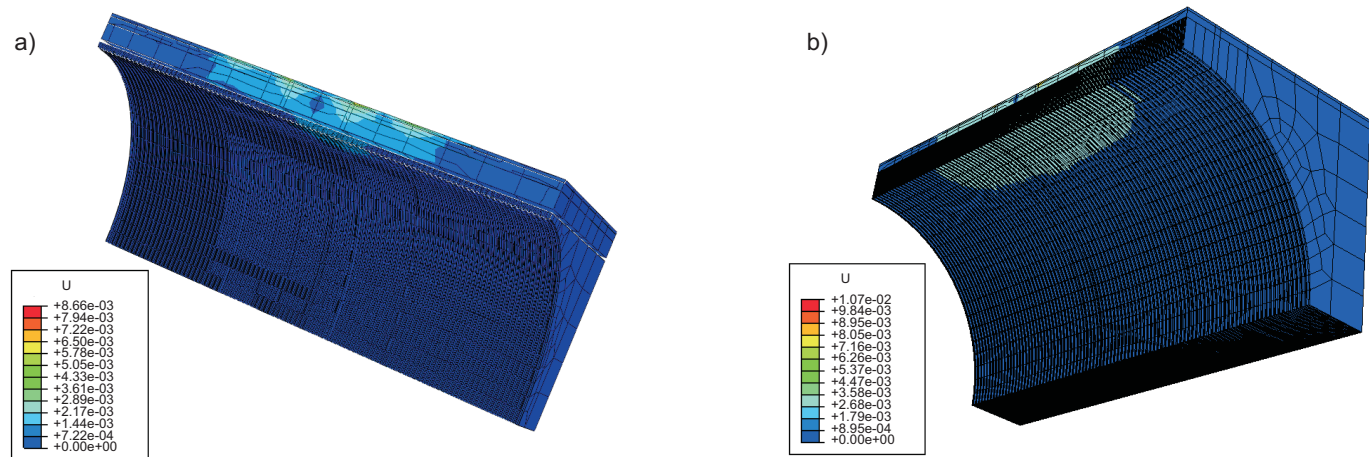


Fig. 4. Displacements distribution u along the longitudinal axis of bridge for the load scheme No. 3: a) model with RC relieving slab, b) model without the RC relieving slab

Rys. 4. Rozkład przemieszczeń u wzdłuż osi podłużnej mostu dla III schematu obciążenia: a) dla modelu z żelbetową płytą, b) dla modelu bez płyty

4. RESULTS OF NUMERICAL CALCULATIONS AND THEIR ANALYSIS

4.1. GENERAL REMARKS

For the sake of comparison between the calculated and measured results the loads applied in the model were the same as in the real-life static load test. In the static load test, the bridge was loaded by two lorries with the total weight in excess of 500 kN [9], [13]. In order to enable direct comparison between the calculated and measured results the loads imposed by the vehicle wheels were positioned in the numerical model in approximately the same places as in the static load test. For a detailed description of the static load schemes see [9], [13]. The results of the numerical calculations of the analysed soil-shell bridge are presented on the displacement and stress distribution maps.

4.2. ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE RC RELIEVING SLAB

Selected results of calculations in Abaqus program with two models of the analysed soil-shell bridge are presented in Figs. 4-6. The results are presented in the form of bridge section along the longitudinal axis of the shell in order to show load distributions in both models. These results may be used to determine the effect of the RC relieving slab on the steel shell deformation.

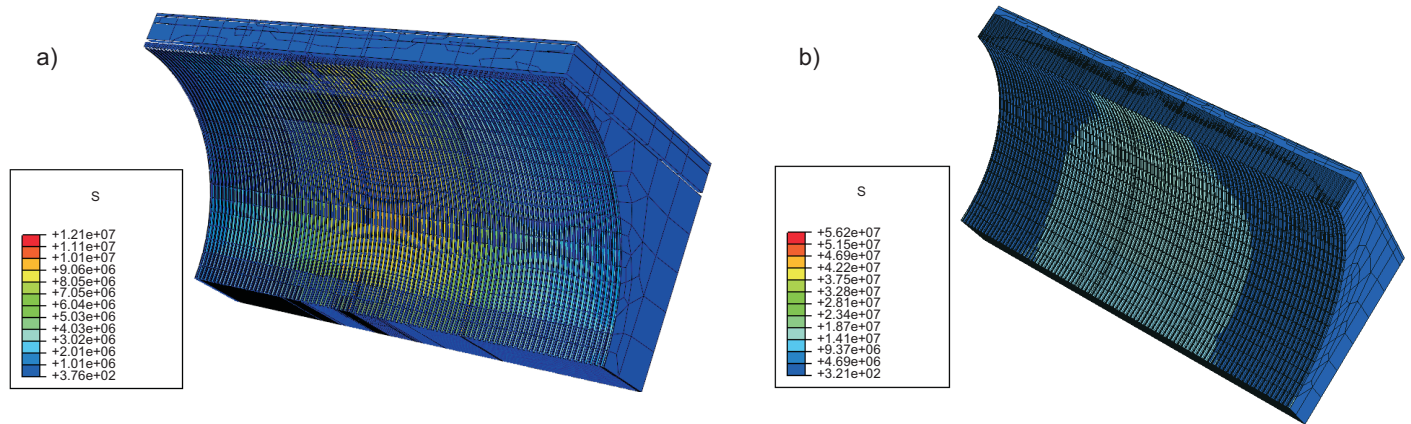


Fig. 5. Stress maps in the steel shell of the bridge for the load scheme No. 2 for: a) model with the RC relieving slab, b) model without the RC relieving slab

Rys. 5. Mapy naprężeń w stalowej powłoce mostu dla II schematu obciążenia w przypadku: a) modelu z żelbetową płytą, b) modelu bez płyty

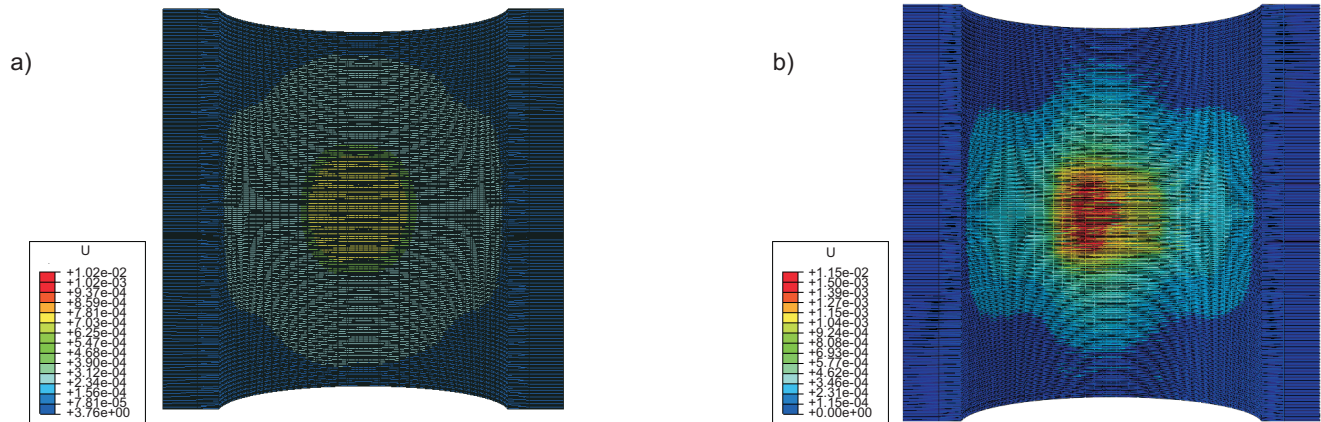


Fig. 6. Displacements maps in steel shell of bridge for load RC relieving No. 1: a) model with the RC relieving slab, b) model without the RC relieving slab

Rys. 6. Mapy przemieszczeń w stalowej powłoce mostu dla I schematu obciążenia statycznego w przypadku: a) modelu z żelbetową płytą, b) modelu bez płyty

Dla modelu z płytą żelbetową, we wszystkich schematach obciążeń, przemieszczenia rozkładają się względnie równomiernie na całej szerokości stalowej powłoki. Maksymalne przemieszczenia wynoszą 0,78 mm i są zlokalizowane w kluczu powłoki. Ponadto zauważono, że rozkład przemieszczeń pionowych przebiega bardziej równomiernie dla modelu z płytą żelbetową niż ma to miejsce w przypadku modelu bez płyty.

Dla schematów obciążeń II i III rozkład przemieszczeń w modelu obliczeniowym bez płyty żelbetowej wskazuje, że przemieszczenia nie przebiegają równomiernie lecz koncentrują się w kluczu powłoki wzdłuż osi poprzecznej mostu (Rys. 4b i Rys. 6b). Dla III schematu w modelu bez

In the model including the RC relieving slab the displacements are distributed more or less evenly across the entire width of the steel shell for all the considered loading configurations. The maximum displacements of 0.78 mm were located at the shell crown. Moreover, a more even distribution of vertical displacements was noted in the case of the model including the RC relieving slab.

For the loading cases No. 2 and No. 3 the displacement distribution pattern in the model without the RC relieving slab indicates concentration of displacements at the shell crown along the cross-section axis of the structure (Fig. 4b and Fig. 6b). The maximum displacements of 2.33 mm was obtained for the loading case No. 3. The applied force

plyty uzyskano maksymalne przemieszczenia wynoszące 2,33 mm. Przyłożona siła (pomijając obciążenia przednich kół) to w sumie ponad 400 kN ($4 \times 42,5 \text{ kN} + 4 \times 58,5 \text{ kN} = 404 \text{ kN}$), co jest dużym obciążeniem przy tak małej grubości zasypki w kluczu (0,65 m). Szczegółowa analiza wyników pozwala zauważyć pozytywny wpływ żelbetowej płyty odcciążającej na pracę niżej położonych elementów konstrukcji, przede wszystkim stalowej powłoki z blach falistych (Tabl. 1, Rys. 4 - 6). W modelach z zastosowaną płytą żelbetową obserwujemy w miarę równomierny i łagodny rozkład przemieszczeń od spodu stalowej powłoki (Rys. 6a). Natomiast w przypadku modelu bez płyty, przy zredukowanej wysokości zasypki gruntowej, wpływ oddziaływujących obciążeń jest widoczny w postaci lokalnych i dość dużych deformacji w wybranych punktach powłoki (brak równomiernego rozkładu obciążeń).

(omitting loading by the front wheels) totals over 400 kN ($4 \times 42.5 \text{ kN} + 4 \times 58.5 \text{ kN} = 404 \text{ kN}$) which is a high value taking into account the small depth of backfill at the crown (0.65 m). A detailed analysis of the results showed a good effect the RC relieving slab has on the lower parts of the structural system, in particular on the corrugated structural plate shell (Table 1, Figs. 4 - 6). In the models including the RC relieving slab a more or less even and smooth distribution of displacements is observed from the steel shell underside (Fig. 6a). The situation is different in the model without the RC relieving slab with reduced depth of backfill where the imposed loads result in local and quite big deformations at selected points of the shell (lack of uniform load distribution).

Table 1. Comparison of the steel shell maximum displacements and stresses calculated for two numerical models
Tablica 1. Porównanie maksymalnych przemieszczeń i naprężeń powłoki stalowej obliczone dla dwóch modeli numerycznych

Analysed quantities / Analizowane wielkości		Type of model Rodzaj modelu	Load schemes / Schematy obciążenia		
			I	II	III
Displacements / Przemieszczenia	[mm]	f_{m1}	1.57	1.98	2.33
		f_{m2}	0.73	0.74	0.78
Relative reduction of displacements / Względna redukcja przemieszczeń		[%]	53	62	66
Stresses / Naprężenia	[MPa]	σ_{m1}	37.6	56.2	39.3
		σ_{m2}	10.2	10.2	9.5
Relative reduction of stresses / Względna redukcja naprężeń		[%]	73	82	76
Remarks / Oznaczenia					
f_{m1} , σ_{m1} – model without slab / model bez płyty					
f_{m2} , σ_{m2} – model with slab / model z płytą					

Rozkłady naprężeń w modelu z płytą przedstawione na Rys. 5 wyraźnie podkreślają „punkty ćwiartkowe” występujące w połowie wysokości powłoki. Maksymalne naprężenia w tych punktach osiągają wartość niewiele ponad 10 MPa (Tabl. 1, Rys. 5a). Natomiast w modelu bez płyty, obciążenia są przekazywane na stalową powłokę bardziej bezpośrednio, co skutkuje przesunięciem maksymalnych wartości z „punktów ćwiartkowych” w kierunku klucza powłoki. W punktach tych maksymalne wartości sięgają 56 MPa (Tabl. 1, Rys. 5b). Mapy naprężeń uzyskane z modelu z zastosowaną płytą żelbetową, dla każdego z trzech schematów, pozwalają zaobserwować sposób pracy konstrukcji gruntowo-powłokowej. Po przyłożeniu siły quasi-skupionej (wypadkowa obciążeń

In Fig. 5 showing the stress distribution patterns for model including the RC relieving slab, quarter-points can clearly be seen at the mid height of the shell. The maximum stresses at these point are only a little higher than 10 MPa (Table 1, Fig. 5a). In the model without the RC relieving slab the loads are transferred onto the shell more directly, resulting in shifting the maximum stress values from the quarter-points towards the shell crown. At these points the maximum stress values reach 56 MPa (Table 1, Fig. 5b). The stress distribution patterns obtained from the model including the RC relieving slab for each of the three loading cases allow us to observe the behaviour of the soil-shell structure. Upon application of a quasi-point load (resultant of the load from rear axle wheels) at the crown of shell

tylnych kół samochodów ciężarowych) w kluczu powłoki zauważono zjawisko parcia gruntu (maksymalne przemieszczenia) i wypiętrzania się „punktów ćwiartkowych” (maksymalne naprężenia). Podobne zjawisko „zaangażowania” ćwiartkowych elementów powłoki można zauważyć także w modelach bez płyty odciążającej. Jednakże, pomimo wyraźnego zarysowywania się równomiernych pól o zbliżonych wartościach naprężeń, ich maksymalne wartości są zlokalizowane bliżej klucza powłoki, a nie dokładnie w „punktach ćwiartkowych”. Jest to wynikiem bezpośredniego oddziaływania obciążenia nawierzchni drogowej mostu wprost na powłokę z blach falistych. Zredukowana wysokość zasypki gruntowej, w modelu bez płyty żelbetowej, nie pozwala na efektywne włączenie i wykorzystanie pracy odporu gruntu. Zjawisko odporu gruntu [3], [19-20] ma decydujący wpływ na pracę całej konstrukcji podczas przenoszenia obciążeń, natomiast ograniczenie wysokości zasypki gruntowej skutkuje nierównomiernym rozkładem przemieszczeń i naprężeń występujących w powłoce stalowej.

W Tabl. 1 przedstawiono maksymalne wartości przemieszczeń i naprężeń w powłoce stalowej, a także obliczono względne redukcje (w procentach) tych wartości wynikające z zastosowania żelbetowej płyty odciążającej. W wyniku porównania obu modeli obliczeniowych zauważono, że redukcja przemieszczeń i naprężeń w powłoce stalowej jest znacząca. W przypadku przemieszczeń mieści się ona w przedziale 53-66%, natomiast zmniejszenie naprężeń jest bardziej znaczące i mieści się w przedziale 73-82%.

Na Rys. 7 pokazano maksymalne naprężenia i przemieszczenia w powłoce stalowej dla każdego z trzech schematów obciążeń w modelu obliczeniowym z płytą żelbetową. Na wykresach można wyraźniej zauważyć wspomnianą wcześniej zależność, tj. największe naprężenia w powłoce występują w „punktach ćwiartkowych”, a przemieszczenia w kluczu powłoki. Rozkłady naprężeń i przemieszczeń w modelu bez płyty, dla tych samych przekrojów, mają nieco odmienny przebieg, tzn. brak jest równomiernego rozkładu, a maksymalne wartości naprężeń są przesunięte w kierunku klucza konstrukcji.

Zaobserwowano także, że brak możliwości występowania dużych przemieszczeń w kluczu powłoki stalowej, w wyniku redystrybuującego działania żelbetowej płyty odciążającej i aktywniejszego działania odporu gruntu, generuje wzrost naprężeń w punktach ćwiartkowych stalowej powłoki. Wynika z tego, że zmniejszenie przemieszczeń, w wyniku zastosowania żelbetowej płyty odciążającej powoduje pełniejsze wykorzystanie stalowego płaszcza oraz zmniejszenie jego nierównomiernego wyteżenia.

reaction of soil pressure was observed (maximum displacement) accompanied with lifting up of the quarter-points (maximum stress values). A similar case of mobilisation of quarter-points can be observed also in the models without the relieving slab. However, even though even areas of similar stress values are not clearly evident, the maximum values are located close to the shell crown rather than right at the quarter-points. This results from direct action of the loads from the roadway pavement onto the corrugated structural plate shell. The reduced depth of backfill in the model without the RC relieving slab does not allow for effective mobilisation and utilisation of the reaction of soil. Soil reaction [3], [19-20] has a predominant effect on the behaviour of the entire structural system during transfer of loads while reduction of the backfill depth results in uneven distribution of displacements and stresses in the steel shell.

Table 1 gives the maximum displacement and stress values in the steel shell and relative reductions of these values (in percent) due to incorporation of the RC relieving slab are also calculated. Comparison of the two calculation models allows us to conclude that reduction of the above-mentioned displacements and stresses in the steel shell is significant. The percent reductions are in the range of 53-66% in the case of displacements and they are even higher in the case of stresses, namely in the range of 73-82%.

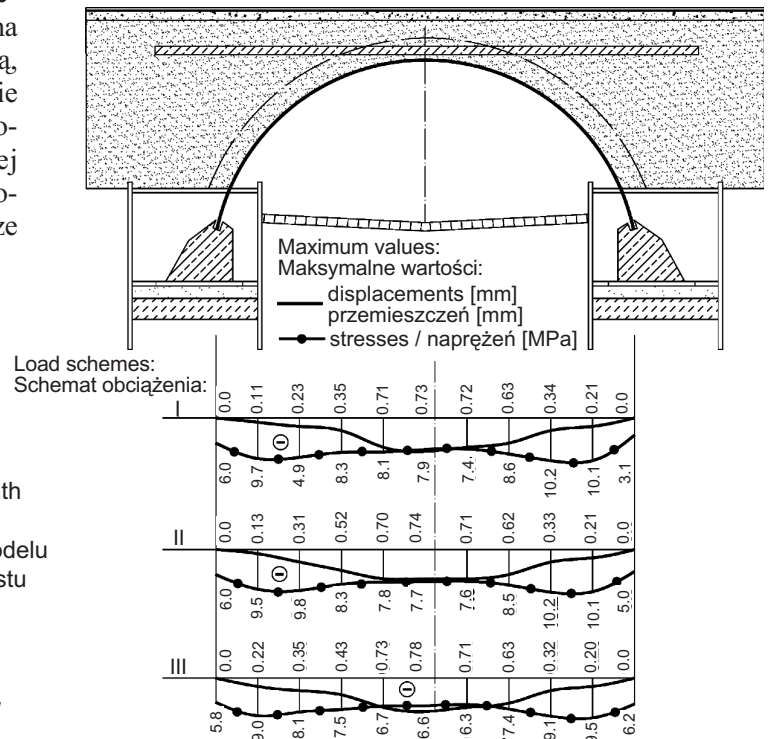
Fig. 7 presents the maximum stresses and displacements in the steel shell for the model including RC relieving slab for the three loading schemes. The above-mentioned pattern, i.e. the highest stress values at the quarter-points and the highest displacements at the shell crown can be clearly seen in the graphs. The stress and displacement distribution is slightly different for the same sections in the model without the relieving slab in that the maximum stress values are shifted towards the structure crown.

Moreover, it has been observed that preventing of larger displacements at the steel shell crown due to the action of the RC relieving slab and increased mobilisation of soil reaction resulted in higher stresses at the quarter-points of the shell. This means that reduction of displacements by the RC relieving slab results in better utilisation of the steel shell and provides for more even stress distribution. This can be best seen in the stress and displacement curves for the third loading case in which almost the entire load (404 kN) is concentrated on a smallest possible area above the shell crown. In this way the loads are redistributed by the RC relieving slab on a maximum possible area of soil above the shell resulting in more or less even distribution of stresses on the whole section of shell. In the model without the RC relieving

Najlepiej obrazują to wykresy naprężeń i przemieszczeń dla trzeciego schematu obciążeń, gdzie prawie cała siła (404 kN) skupiona jest na możliwie najmniejszej powierzchni nad kluczem powłoki. W ten sposób dochodzi do re-dystrybucji obciążeń przez żelbetową płytę odciążającą na możliwie maksymalną powierzchnię gruntu nad powłoką, powodując tym samym w miarę równomierne rozłożenie naprężeń wzdłuż całego przekroju powłoki stalowej. Natomiast w przypadku modelu bez płyty odciążającej rozkłady przemieszczeń i naprężeń są bardziej skoncentrowane w kluczu powłoki przyjmując jednocześnie większe wartości.

slab the displacements and stresses are more concentrated in the shell crown and assume higher values.

Fig. 7. Maximum stresses and displacements for model with the RC relieving slab in longitudinal section of the bridge
Rys. 7. Maksymalne naprężenia i przemieszczenia dla modelu z żelbetową płytą odciążającą w przekroju podłużnym mostu



4.3. PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW I OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Na Rys. 8 i 9 przedstawiono porównanie odpowiednio przemieszczeń i naprężeń uzyskanych z badań doświadczalnych [9], [13] oraz obliczeń numerycznych w programie Abaqus. Jak widać na wykresach, przemieszczenia i naprężenia uzyskane z analizy numerycznej odbiegają od wielkości uzyskanych z badań doświadczalnych. Jednakże wyniki są bardziej zbieżne do rezultatów pomiarów niż otrzymane przy wykorzystaniu modelu obliczeniowego opracowanego w programie Robot Millenium [13]. Porównanie wartości obliczonych w programie Abaqus i pomierzonych przedstawione na Rys. 8 i 9 wyraźnie pokazuje, że w rzeczywistym obiekcie mogą występować pewne niejednorodności w zastosowanych materiałach, np. gruntu i stalowej powłoce. Przebiegi wykresów przemieszczeń i naprężeń mają kształt zbliżony do wartości rzeczywistych. Należy zaznaczyć, że autorzy artykułu nie znali dokładnych parametrów zasypki gruntowej. Dodatkowy wpływ na zbyt duże wartości obliczeniowe może mieć także czas jaki upłynął od momentu wzniesienia mostu (rok budowy 1998) i związane z tym zjawiska, np. m.in. konsolidacja gruntu. W modelu obliczeniowym założono występowanie

4.3. COMPARISON OF THE MEASURED AND CALCULATED MAGNITUDES

Fig. 8 and Fig. 9 compare the stresses and displacements measured during experiments [9], [13] and calculated with Abaqus program. As it can be seen in the graphs, the calculated displacement and stress values differ from the experimental results. This said, the difference between them is less than in the case of the calculation model derived with the use of the Robot Millenium program [13]. Comparison of the measured results with the results obtained with the Abaqus program as presented in Fig. 8 and Fig. 9 clearly shows that some non-uniformities may occur in the materials used in the real-life structure, the examples of which are the soil and the steel shell. The displacement and stress curves are similar in shape to the curves representing the actual (measured) values. It has to be noted that the precise data concerning the backfill were not available. Another factor contributing to overrated results of calculations could be the time which had lapsed from the time of construction (1998) during which certain changes could have occurred, such as consolidation of soil. However, the

takiego samego gruntu wokół powłoki jak w pozostałych miejscach zasypki gruntowej, dodatkowo stalowa powłoka była modelowana jako jednolita konstrukcja (bez połączeń między poszczególnymi arkuszami blach falistych). W obiekcie rzeczywistym mogą występować luzy na połączeniach śrubowych, których nie uwzględniono w modelu obliczeniowym.

calculation model assumes the same parameters of soil around the shell and in other places of the backfill and, moreover, the steel shell is modelled as a single-piece structure (i.e. the connections between the corrugated plate plates are ignored). In a real-life structure some movement can occur at the bolted connections which has not been allowed for in the calculation model.

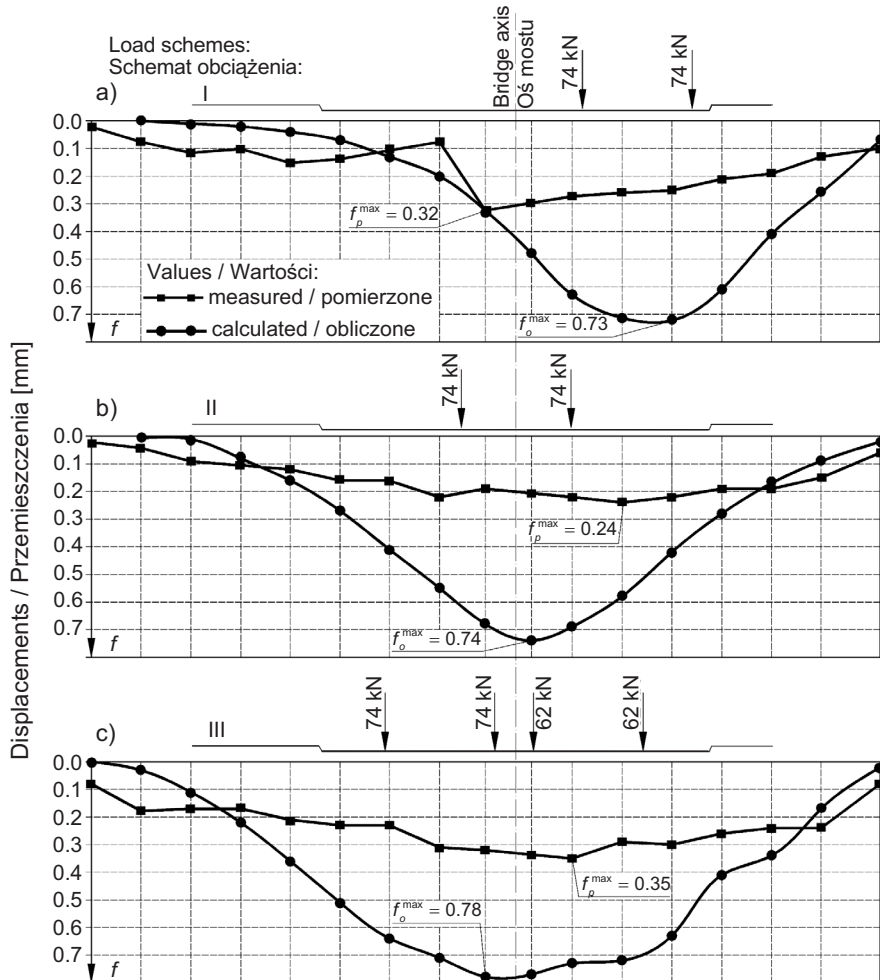


Fig. 8. Comparison of measured and calculated displacements at shell crown for three loading schemes: a), b), c)
Rys. 8. Porównanie przemieszczeń powłoki w kluczu uzyskanych za pomocą badań i obliczeń w przypadku trzech schematów obciążenia: a), b), c)

W tabelicy 2 przedstawiono porównanie maksymalnych przemieszczeń i naprężeń uzyskanych za pomocą dwóch programów, tj. Abaqus i Robot Millenium [13]. Z tabelicy wynika, że przedstawiony w niniejszym artykule sposób modelowania mostu gruntowo-powłokowego pozwala na uzyskiwanie wyników bliższych wynikom eksperymentalnym. Przy zastosowaniu obu programów obliczeniowych, względne zmiany przemieszczeń mieszczą się w zakresie 47-56%, a naprężeń 23-44%. Takie różnice wynikają ze sposobu modelowania w programie Robot Millenium, tj. zastosowaniu:

- zastępczej grubości blach falistych,

Table 2 compares the maximum displacement and stress values obtained with the two programs: Abaqus and Robot Millenium [13]. From the table it can be seen that the method of modelling the soil-shell bridge used in this research yields results which are closer to the experimental data. With the two programs used, the variation in the displacement values is in the range 47-56% and in the stress value in the range 23-44%. These differences are attributed to the modelling approach used in the Robot Millenium program which uses:

- equivalent corrugated plate thickness,

- modelu gruntu zdefiniowanego przy użyciu kryterium Coulomba-Mohra,
- uproszczonych elementów kontaktowych w celu odwzorowania współpracy pomiędzy elementami składającymi się na most gruntowo-powłokowy.

- model of soil defined with the Coulomb-Mohr criterion,
- simplified interface elements to represent interaction between the different components of the soil-shell bridge.

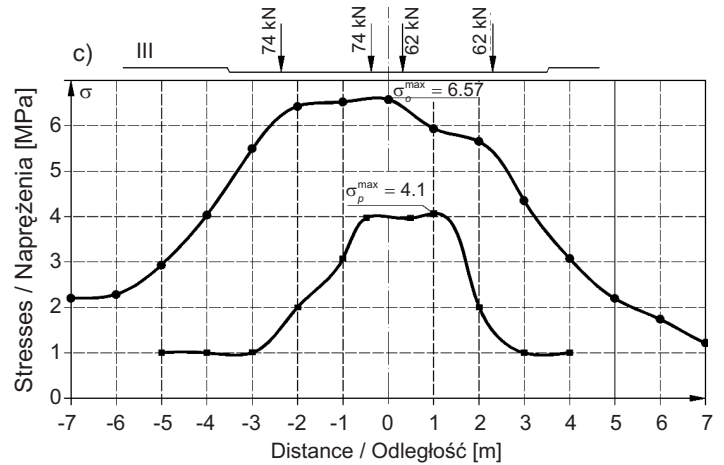
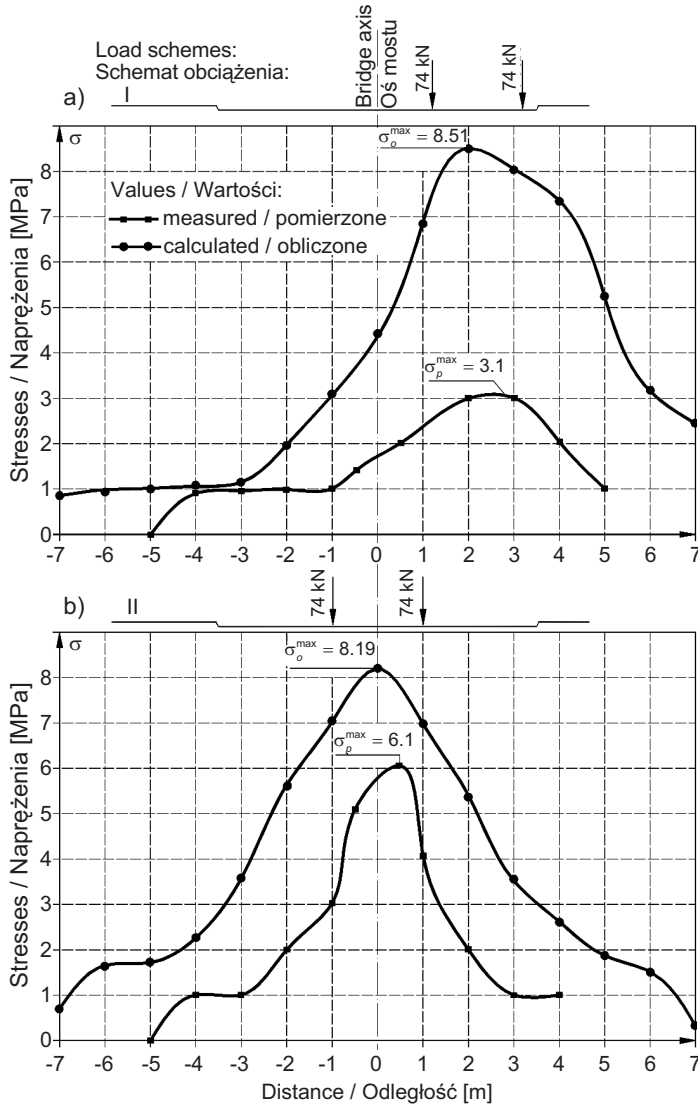


Fig. 9. Calculated and measured stresses at the shell crown for three loading schemes: a), b), c)
Rys. 9. Naprężenia w kluczu stalowej powłoki mostu uzyskane za pomocą badań i obliczeń w przypadku trzech schematów obciążenia: a), b), c)

Opracowany model obliczeniowy mostu gruntowo-powłokowego w programie Abaqus pozwala uzyskać bliższe rzeczywistym wartości przemieszczeń i naprężeń, pomimo faktu, że w większości przypadków są one większe od wartości pomierzonych. Maksymalne wartości obliczeniowe są zlokalizowane dokładnie pod siłami skupionymi reprezentującymi koła samochodów obciążających, natomiast w przypadku wartości pomierzonych są one nieznacznie przesunięte.

The displacement and stress values of the soil-shell bridge obtained with the Abaqus program are in each case higher than the measured values and yet they are closer to the measured values. The maximum calculated values are located right under the point loads representing the wheel loads while the measured values are slightly shifted.

Table 2. Comparison of the steel shell maximum displacements and stresses obtained by Abaqus and Robot Millenium softwares

Tablica 2. Porównanie maksymalnych przemieszczeń i naprężeń stalowej powłoki obliczonych programami Abaqus i Robot Millenium

Analysed quantities / Analizowane wielkości		Program type Rodzaj programu	Load schemes / Schematy obciążenia		
			I	II	III
Displacements / Przemieszczenia	[mm]	f_{Robot}	1.50	1.39	1.77
		f_{Abaqus}	0.73	0.74	0.78
Relative change of displacements / Względna zmiana przemieszczeń			51	47	56
Stresses / Naprężenia	[MPa]	σ_{Robot}	13.3	18.1	15.8
		σ_{Abaqus}	10.2	10.2	9.5
Relative change of stresses / Względna zmiana naprężeń			23	44	40
Remarks / Oznaczenia					
f_{Abaqus} , σ_{Abaqus} – values obtained by Abaqus program / wartości z programu Abaqus,					
f_{Robot} , σ_{Robot} – values obtained by Robot Millenium program / wartości z programu Robot Millenium					

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonej analizy mostu gruntowo-powłokowego i porównania uzyskanych rezultatów z wartościami doświadczalnymi jak i obliczeniami wykonanymi w programie Robot Millenium można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Obliczone przemieszczenia i naprężenia są większe od wartości otrzymanych z badań doświadczalnych. Kształt krzywych przemieszczeń i naprężeń odbiega jest zbliżony do tych uzyskanych z pomiarów. Uzyskane wyniki obliczeń są zdecydowanie dokładniejsze niż otrzymane za pomocą programu Robot Millenium [13]. Wynika to z zastosowania w programie Abaqus rzeczywistej falistości powłoki, lepszego opisu zachowania się gruntu (model Drucker-Prager) i korzystniejszego odwzorowania wzajemnego oddziaływania elementów wchodzących w skład mostu gruntowo-powłokowego.
2. Różnice uzyskanych wyników obliczeń i badań mogą być spowodowane m.in.:
 - niedokładnym odwzorowaniem gruntu w modelu obliczeniowym (nieznane dokładne parametry fizyczne i wytrzymałościowe). Ponadto w analizie numerycznej nie uwzględniono wpływu procesów reologicznych na żelbetową płytę i konsolidację gruntu,
 - brakiem uwzględnienia skosu powłoki w modelu numerycznym, tym samym zmniejszając powierzchnię stalowej powłoki, która przejmuje obciążenia z wyżej położonych warstw,

5. CONCLUSIONS

The analysis of a soil-shell bridge carried out under this research and comparison of the results with the experimental data and with the values calculated with the Robot Millenium program allows us to draw the following conclusions:

1. The calculated displacement and stress values are higher than the experimental data. The displacement and stress curves have similar shape to the curves resulting from experimental tests. The results of calculations are much more accurate than the values obtained with the Robot Millenium program [13]. This is because Abaqus considers the actual corrugation of shell, provides a better definition of soil behaviour (Drucker-Prager model) and a better representation of the interactions between the different components of the soil-shell bridge.
2. The factors responsible for the differences between the calculated and experimental data include:
 - inaccurate representation of soil in the calculation model (due to unavailability of precise physical and strength parameters). Moreover, the numerical analysis ignores the effect of rheological behaviour on the RC slab and on the consolidation of soil,
 - ignoring in the numerical model the skewness of the shell and, as a result, reduced total surface of the steel shell receiving loads from layers above it,

- złożoną geometrią mostu – model numeryczny nie jest dokładnym odzwierciedleniem istniejącego obiektu, wiele szczegółów pominięto lub uproszczono, takich jak np. żelbetowe wzmocnienia powłoki przy wlocie i wylocie, a także połączenia śrubowe pomiędzy arkuszami blach falistych.
3. Porównując wyniki uzyskane z dwóch modeli numerycznych, tj. z żelbetową płytą i bez niej, wyraźnie widać korzystny wpływ płyty na redukcję przemieszczeń i naprężeń w powłoce stalowej. Należy zauważyć, że w modelu z płytą występują bardziej równomierne rozkłady przemieszczeń i naprężeń niż w modelu bez płyty. Zaobserwowano także, że w modelu bez płyty maksymalne wartości naprężeń są przesunięte w kierunku klucza powłoki, natomiast w przypadku modelu z płytą odciążającą maksimum występuje w „punktach ćwiartkowych”. Mając na uwadze, że zaproponowany model obliczeniowy daje wyniki po stronie bezpiecznej można stwierdzić, że nie było konieczności stosowania żelbetowej płyty odciążającej w danym moście.
- complex geometry of the bridge with many features and details simplified or omitted in the model, including RC collars strengthening of the shell at the inlet and outlet and bolted connections between corrugated sheet plates.
3. The results obtained with the two numerical models (with and without the RC relieving slab) were compared to show reduction of displacements and stresses in the steel shell owing to the RC slab. Moreover, a more even distribution of displacements and stresses was noted in the model including the RC relieving slab. Another observation is that in the model without the RC slab the maximum stresses are shifted towards the shell crown while in the model including the slab they are located at the quarter-points. Therefore, bearing in mind that the values obtained with the model are on the safe side we can conclude that the analysed bridge did not need incorporation of the RC relieving slab.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Bęben D.*: Współpraca gruntu i konstrukcji mostowych wykonywanych ze stalowych blach falistych. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa, Opole, 2005
- [2] *El-Taher M.*: The effect of wall and backfill soil deterioration on corrugated metal culvert stability. Doctoral dissertation, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2009
- [3] *Janusz L., Madaj A.*: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo. WKiŁ, Warszawa, 2009
- [4] *Janusz L.*: Application of multi-criteria optimization methods in choosing material solutions for construction of flexible steel culverts. Archives of Institute of Civil Engineering, 1, 2007, 81-88
- [5] *Abdel-Sayed G., Salib S.R.*: Minimum depth of soil cover above soil-steel bridge. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **128**, 8, 2002, 672-681
- [6] *Madaj A.*: Wpływ zasypki na nośność i trwałość konstrukcji podatnej z blach falistych. Materiały Budowlane, 4, 2009, 49-51
- [7] *Pettersson L., Sundquist H.*: Design of soil-steel composite bridges. TRITA-BKN Rep. No. 112, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Div. of Structural Design and Bridges, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2007
- [8] *Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A.*: Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji z blach falistych. IBDiM, Filia Wrocław, 2004
- [9] *Bęben D., Mańko Z.*: Badania statyczne mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **2**, 3, 2003, 17-42
- [10] *Essery D.P., Williams K.*: Buried flexible steel structures with wire mesh reinforcements for cut plates. Archives of Institute of Civil Engineering, 1, 2007, 65-79
- [11] *Knight M.*: Analysis of geocell reinforced soil covers over large span conduits. Report with researches and FEM analyses funded by NSERC, CFI and ORDCF, Department of Civil Engineering at the University of Waterloo, Canada, 1996
- [12] *Vaslestad J., Janusz L., Bednarek B.*: Instrumental full-scale test with geogrid above crown of corrugated steel box culvert. Seventh International Conference on Geosynthetics, Nice, 2002
- [13] *Bęben D., Manko Z.*: Static tests on a soil-steel bridge structure with a relieving slab. Structure and Infrastructure Engineering, 6, 2010, 329-346
- [14] ABAQUS: Abaqus Theroy Manual. ABAQUS 6.11 PDF Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, USA, 2011
- [15] *Zienkiewicz O.C.*: Metoda Elementów Skończonych, Arkady, Warszawa, 1986

- [16] *Skrzat A.*: Modelowanie liniowych i nieliniowych problemów mechaniki ciała odkształcalnego i przepływów ciepła w programie ABAQUS. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2010
- [17] *Bęben D.*: Numerical analysis of a soil-steel bridge structure. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, **4**, 4, 2009, 13-21
- [18] *Elshimi T.M.*: Three-dimensional nonlinear analysis of deep-corrugated steel culvert stability. Doctoral dissertation, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2011
- [19] *Machelski Cz.*: Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008
- [20] *Wiłun Z.*: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa, 2005