

## **Analiza numeryczna mostu gruntowo-stalowego**

**Damian Bęben<sup>1</sup>, Michał Wrzeciono<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> *Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska, e-mail: <sup>1</sup>d.beben@po.opole.pl,<sup>2</sup> zyto29@gmail.com*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę numeryczną mostu gruntowo-stalowego w zakresie obciążeń statycznych. Do obliczeń wykorzystano program Abaqus oparty na MES. Maksymalne przemieszczenia uzyskano w kluczu powłoki, a największe naprężenia w narożach. Uzyskane wyniki obliczeń zostały porównane z rezultatami badań doświadczalnych i wcześniejszymi obliczeniami wykonanymi w programie Robot Millenium. Kształt przebiegu obliczonych przemieszczeń i naprężeń jest zbliżony do tych uzyskanych z badań, jednakże bezwzględne wartości były przeważnie większe od pomierzonych. Przy zastosowaniu obu programów obliczeniowych, względne różnice przemieszczeń mieściły się w zakresie 15–39%, a naprężeń 17–44%, z korzyścią dla programu Abaqus. Opracowany model obliczeniowy mostu gruntowo-stalowego w programie Abaqus pozwala uzyskać rozsądne wartości sił wewnętrznych w konstrukcji powłoki.

**Słowa kluczowe:** most, przemieszczenie, naprężenie, model obliczeniowy.

### **1. Wprowadzenie**

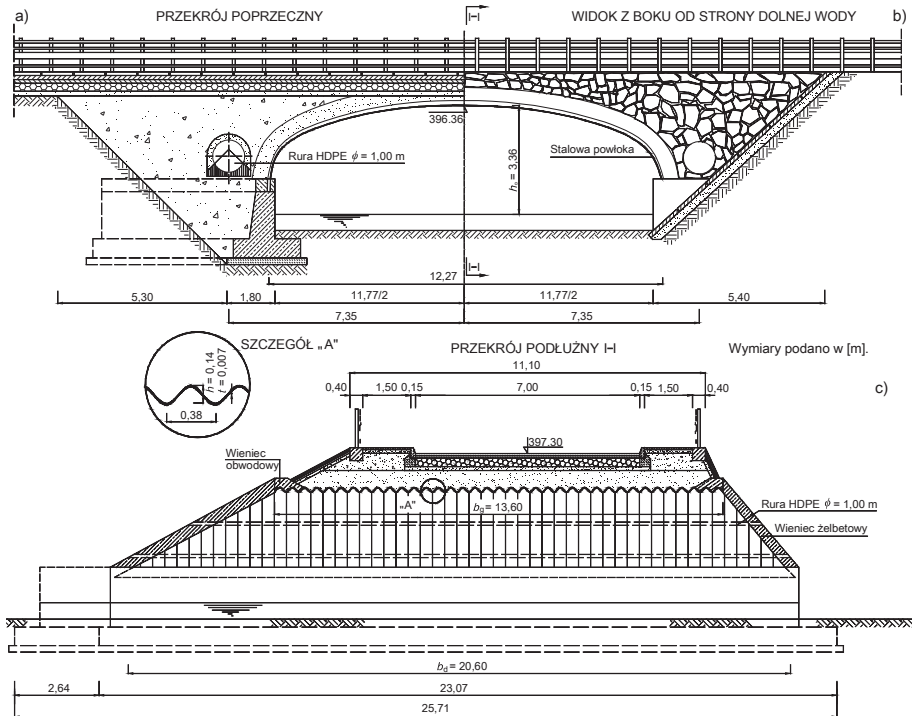
Mosty i przepusty z blach falistych są coraz częściej stosowane jako alternatywa dla tradycyjnych stalowych lub betonowych obiektów mostowych [1], [2]. Zaletami, które decydują o wyborze tych rozwiązań konstrukcyjnych są głównie krótki czas realizacji i niskie koszty budowy. Badania doświadczalne tego typu obiektów mostowych pod obciążeniem statycznym i dynamicznym były wykonywane wielokrotnie [3], [4]. Jednakże modelowanie numeryczne tych ustrojów konstrukcyjnych nastęrcza wielu problemów [4], [5], [6] i dotychczas na świecie nie opracowano racjonalnego sposobu modelowania mostów gruntowo-stalowych. Poza tym jak do tej pory nie opracowano również efektywnej metody wymiarowania tych konstrukcji, pomimo istnienia już wielu metod analitycznych [4], np. Sundquista-Peterssona, Duncana, AASHTO, CHBDC, które jednak nie pozwalają na dokładne wyznaczenie sił wewnętrznych w tych obiektach mostowych.

Celem tej pracy jest analiza numeryczna mostu gruntowo-stalowego w zakresie obciążeń statycznych. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z rezultatami badań doświadczalnych [3]. Porównano także wyniki uzyskane w programie Abaqus ze wcześniejszymi obliczeniami numerycznymi wykonanymi w programie Robot Millenium [3]. Wnioski końcowe dotyczą przede wszystkim dokładności uzyskanych wyników obliczeń w porównaniu do rezultatów badań doświadczalnych i wcześniejszych obliczeń [3], a także wyjaśniono przyczyny zaistniałych różnic.

### **2. Krótki opis mostu**

Przedmiotem obliczeń jest most gruntowo-stalowy o rozpiętości teoretycznej 12,27 m i świetle pionowym 3,36 m (rys. 1). Analizowany obiekt mostowy w przekroju poprzecznym stanowi ustrój statyczny w postaci jednoprzęsłowej utwierdzonej stalowej powłoki. Stalowa powłoka jest wykonana z arkuszy blach falistych o grubości 0,007 m i wymiarach

fal  $0,38 \times 0,14$  m (rys. 1). Elementy blach połączone są między sobą za pomocą śrub sprężających. Konstrukcja powłoki została bezpośrednio oparta na dwóch żelbetowych ławach fundamentowych. Ustrój nośny wykonano jako powłokę podatną złożoną ze stalowych blach falistych obsypaną warstwami gruntu przepuszczalnego. Wysokość naziomu w kluczu mostu wynosi  $0,87$  m. W planie most usytuowany jest w skosie o kącie  $\alpha = 60^\circ$  w stosunku do nurtu rzeki, co należało uwzględnić podczas badań i obliczeń przy ustawianiu obciążenia na obiekcie. Szczegółowy opis mostu i etapy jego budowy są przedstawione w pracy [3], a podstawowe wymiary mostu pokazano na rys. 1.



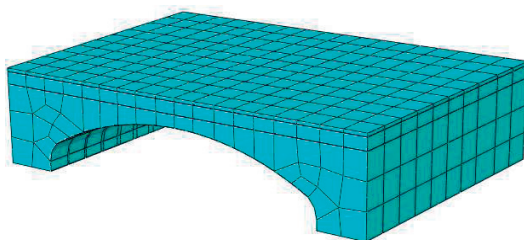
Rys. 1. Analizowany most gruntowo-stalowy: a) przekrój poprzeczny, b) widok od strony dolnej wody i c) przekrój podłużny

### 3. Opis modelu numerycznego

#### 3.1. Uwagi ogólne

Do obliczeń mostu gruntowo-stalowego wykorzystano program Abaqus/CEA 6.11 [7] oparty na metodzie elementów skończonych (MES) [8]. W modelu numerycznym analizowanego mostu starano się odzwierciedlić rzeczywistość jego geometrię, jednocześnie nie uwzględniając elementów drugorzędnych mogących wpływać na zwiększenie komplikacji modelu i znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Dlatego z uwagi na złożony kształt obiektu, model numeryczny został zbudowany w sposób nieco uproszczony, jednak przy zachowaniu głównych parametrów mostu (rozpiętość i długość powłoki górą). Elementy takie jak skarpy, żelbetowe wieńce na wlocie i wylocie, poręcze, rury przepływowe raczej nie powinny zasadniczo wpływać na wyniki obliczeń, ponieważ są zlokalizowane poza zakresem oddziaływania obciążenia.

Obliczenia mostu zostały przeprowadzone w przestrzeni trójwymiarowej. Nieliniowość w modelu obliczeniowym została uwzględniona poprzez zastosowanie analizy przyrostowej *Full Newton* [7], [9]. Model mostu gruntowo-stalowego stanowi bryłę będącą wycinkiem przestrzeni o wymiarach  $16,27 \times 11,10 \times 4,22$  m (rys. 3). Ze względu na złożoną geometrię samej powłoki, wynikającej z kąta pod jakim przecina się jej oś w stosunku do osi podłużnej mostu (kąt  $60^\circ$ ) ograniczono się do uproszczonego modelu, w którym obie osie przecinają się pod kątem prostym.



Rys. 3. Model obliczeniowy mostu gruntowo-stalowego

### 3.2. Charakterystyki materiałowe

Parametry materiałowe dobrano na podstawie dostępnych danych technicznych i charakterystyk materiałowych zawartych w programie Abaqus/CEA 6.11, tj.:

- stalową powłokę z blach falistych zamodelowano jako płaską o odpowiednich parametrach powłoki ortotropowej [4] (grubość zastępcza blach  $t_{zas.}=0,164$  m, współczynnik sprężystości materiału (moduł Younga) w kierunku obwodowym powłoki  $E_x=4664$  MN/m<sup>2</sup>, moduł sprężystości poprzecznej  $E_y=15,94$  MN/m<sup>2</sup> i współczynnik Poissona  $\nu=0,001$ ). Elementy blach zdefiniowano elementami typu *shell* (SR4), a materiał przyjęto jako sprężysto-plastyczny o gęstości  $\gamma=78,5$  kN/m<sup>3</sup> i granicy plastyczności  $\sigma=275$  MPa.
- zasypkę zdefiniowano jako materiał sprężysto-plastyczny (element typu *solid* C3DR8) z hiperbolicznym kryterium ścinania Druckera-Pragera o gęstości  $\gamma=20,5$  kN/m<sup>3</sup>, module Younga  $E=100$  MPa, kącie tarcia wewnętrznego  $\phi=45^\circ$ , kącie dylatacji  $\alpha=5^\circ$  i początkowym rozciąganiu równym 0 MPa. Ponadto 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 ściskaniu, ustalając jego wielkość na 5 MPa.
- podbudowa drogowa (tłuczeń) została zdefiniowana jako materiał sprężysto-plastyczny (element *solid*) także z uwzględnieniem hiperbolicznego kryterium Druckera-Pragera o gęstości  $\gamma=18,0$  kN/m<sup>3</sup>, module Younga  $E=60$  MPa, kącie tarcia wewnętrznego  $\phi=17^\circ$ , kącie dylatacji  $\alpha=10^\circ$  i początkowym rozciąganiu równym 0 MPa.
- warstwę nawierzchni drogowej (asfalt) zdefiniowano jako materiał sprężysty o gęstości  $\gamma=21,0$  kN/m<sup>3</sup>, module Younga  $E=6,9$  GPa i współczynnika Poissona  $\nu=0,41$ .
- warunki brzegowe: zastosowano utwierdzenie zupełne, tj. zablokowano obroty i przesunięcia na każdej z osi boków i podstawy powłoki. Most gruntowo-stalowy został zamodelowany jako obiekt sztywno osadzony w swoim otoczeniu dzięki występującemu w gruncie, na każdym z kierunków przemieszczeń, zjawisku odporu

bocznego, a także z uwagi na sztywne podparcie powłoki na masywnych ławach fundamentowych.

- krok obliczeniowy został zdefiniowany jako  $T=t+\Delta t$ , gdzie  $t$  jest czasem początkowym równym  $t=0$  s, natomiast  $\Delta t$  jest przyrostem czasu podczas którego następuje przyłożenie zadanego obciążenia statycznego zgodnie z trzema schematami zastosowanymi podczas badań doświadczalnych [3]. Zgodnie z powyższym,  $\Delta t$  jest równy czasowi, w którym następuje przyłożenie obciążenia i przyjmowany jest zwyczaj jako 1 s. Niezbędne było także w trakcie definiowania kroku obliczeniowego, założenie geometrycznej nieliniowości obiektu, co ma ważny wpływ na występujące w konstrukcji deformacje wynikające z działania przyłożonych sił. Zmianę obciążenia w czasie wykonywania kolejnych iteracji przyjęto jako liniową podczas całego kroku obliczeniowego, co odpowiada statycznemu działaniu przyłożonych obciążeń. Ponadto, celem 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-stalowego składającego się z kilku różnych warstw (elementy nawierzchni drogowej, grunt zasypowy, blacha stalowa) o różnych właściwościach fizycznych, wymaga określenia ich wzajemnego oddziaływania (interakcji) na siebie [5]. Interakcje na styku powierzchni materiałów będących ze sobą w kontakcie (tłuczeń-asfalt, tłuczeń-grunt, grunt-powłoka) modelowano jako sztywne elementy belkowe przekazujące właściwe im rodzaje oddziaływań z powierzchni nadrzędnej (*master*) na podrzędną (*slave*) [6]. 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. Przyjęto więc następujące współczynniki tarcia: dla strefy kontaktowej gruntu i powłoki – 0,3, a dla pozostałych powierzchni – 0,7. Natomiast sztywności połączeń zostały ustalone na poziomie 2000 GN/m dla strefy kontaktowej gruntu i powłoki oraz 2 GN/m dla pozostałych powierzchni.

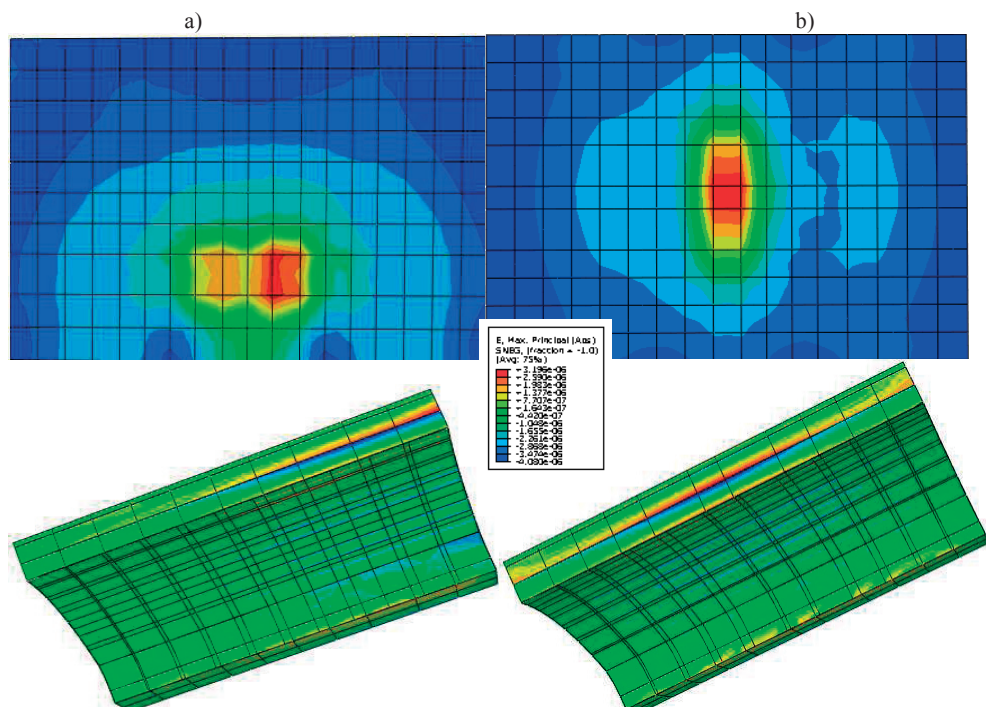
## 4. Wyniki obliczeń numerycznych i ich analiza

W celu porównania wyników obliczeń numerycznych z rezultatami pomiarów zastosowano takie same obciążenia (500 kN) jakich użyto podczas badań doświadczalnych mostu pod obciążeniem statycznym [3]. Aby można było bezpośrednio porównywać wyniki obliczeń i badań, siły stanowiące naciski od kół pojazdów obciążających zostały ustawione w modelu obliczeniowym w niemal identycznych miejscach jak podczas pomiarów.

### 4.1. Wyniki przemieszczeń i naprężeń

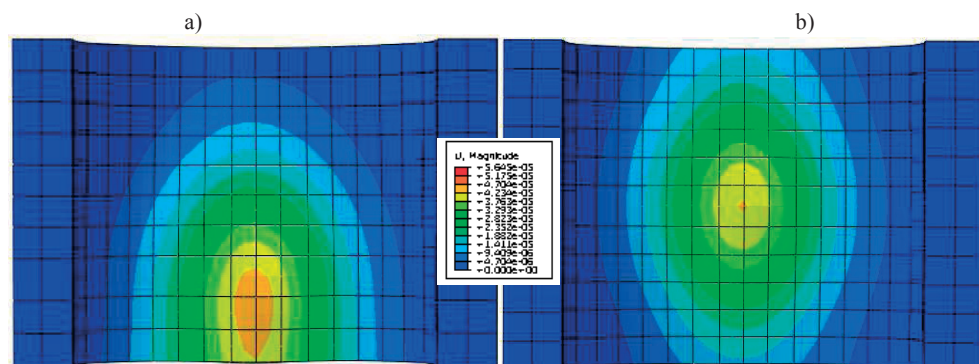
Wybrane wyniki obliczeń mostu gruntowo-stalowego w programie Abaqus przedstawiono na rys. 4 i 5. Dla rozpatrywanych trzech schematów obciążeń rozkład przemieszczeń w modelu obliczeniowym wskazuje, że przemieszczenia nie przebiegają równomiernie lecz koncentrują się w kluczu powłoki w obrębie oddziaływania obciążenia (rys. 4). Maksymalne przemieszczenia wynoszące 3,01 mm uzyskano od I schematu obciążeń (niesymetrycznego), w którym pojazdy obciążające były ustawione tyłem do siebie przy krawężniku [3], od II schematu (2,07 mm) i III schematu (2,54 mm).

Szczegółowa analiza wyników pozwala zauważyć, że wpływ działających obciążeń jest widoczny w postaci lokalnych i dość dużych deformacji w wybranych punktach



Rys. 4. Przemieszczenia mostu gruntowo-stalowego w widoku z góry oraz w przekroju od dwóch schematów obciążeń: a) I (niesymetryczny) i b) III (symetryczny)

powłoki (brak jest równomiernego rozkładu obciążeń na długości powłoki). Jest to prawdopodobnie spowodowane niewielką wysokością naziomu w kluczu powłoki (0,87 m). Wyjątkiem może być odpowiedź mostu na III schemat obciążenia (rys. 4b), gdzie pojazdy ustawione są obok siebie i powodują w miarę równomierny rozkład obciążenia na szerokości powłoki.



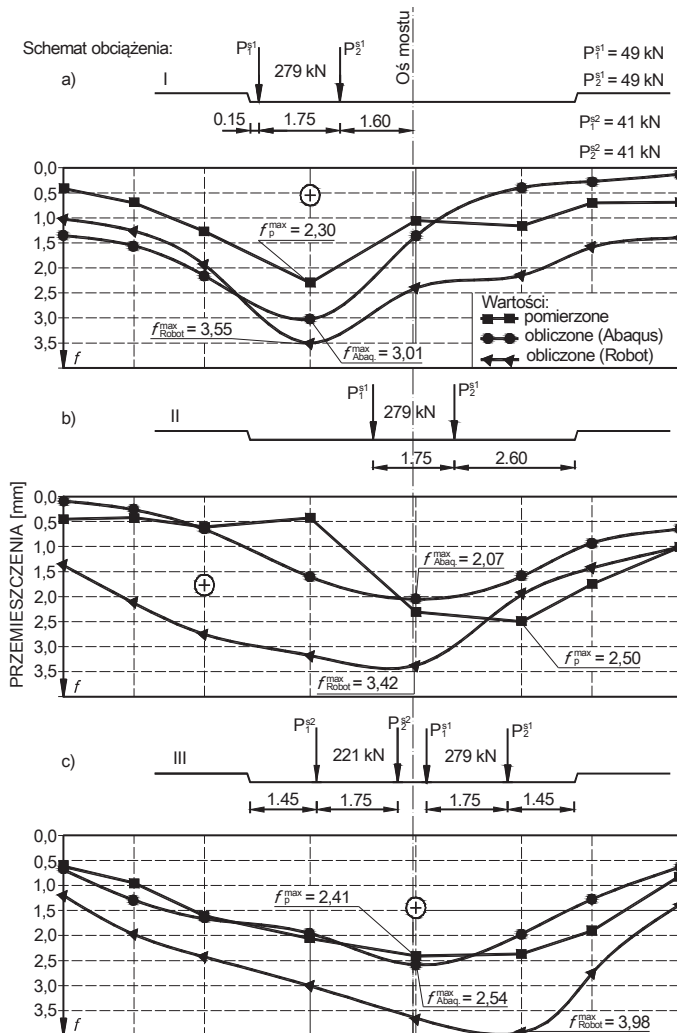
Rys. 5. Mapy naprężeń w stalowej powłoce w widoku od spodu mostu dla dwóch schematów obciążeń statycznych: a) I i b) II

Rozkłady naprężeń przedstawione na rys. 5 wyraźnie podkreślają, że obciążenia są przekazywane na stalową powłokę w sposób pośredni, co skutkuje maksymalnymi wartościami uzyskiwanymi w narożu i w 2/3 wysokości powłoki. W tych punktach maksymalne wartości sięgają 65 MPa (rys. 5a). Natomiast w kluczu powłoki obserwuje się

mniejsze wartości naprężeń (36 MPa). Mapy naprężeń pozwalają zaobserwować sposób pracy konstrukcji gruntowo-stalowej. Po przyłożeniu quasi-skupionej siły (wypadkowa obciążeń z tylnych kół samochodów ciężarowych) można zauważyć przesunięcie naprężeń w kierunku naroża i 2/3 wysokości powłoki gdzie uzyskano największe wartości.

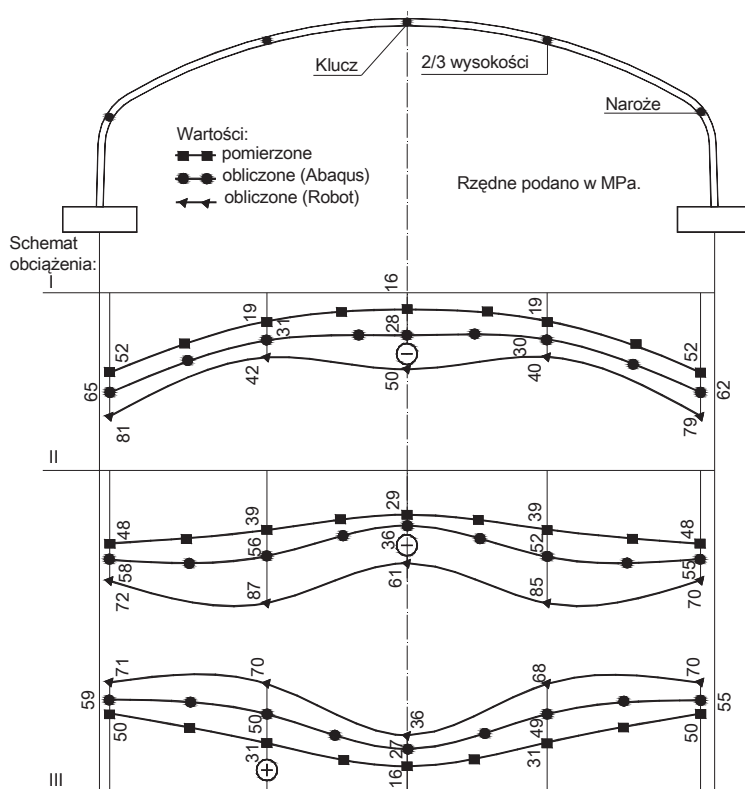
## 4.2. Porównanie wielkości obliczonych i pomierzonych

Na rys. 6 i 7 przedstawiono porównanie odpowiednio przemieszczeń i naprężeń uzyskanych z badań doświadczalnych [3] i obliczeń w programach Abaqus oraz Robot. Jak widać na tych wykresach, przemieszczenia i naprężenia uzyskane z analizy numerycznej w programie Abaqus odbiegają od wielkości uzyskanych z badań doświadczalnych. Jednakże wyniki te są bardziej zbliżone do rezultatów pomiarów niż te otrzymane przy wykorzystaniu modelu obliczeniowego opracowanego w programie Robot [3].



Rys. 6. Porównanie maksymalnych przemieszczeń uzyskanych z pomiarów i obliczeń dla trzech schematów obciążenia statycznego: a) I, b) II i c) III

Porównanie wartości obliczonych w programie Abaqus i pomierzonych przedstawione na rys. 6 i 7 wyraźnie pokazuje, że w rzeczywistym moście mogą występować pewne niejednorodności w materiałach, np. gruncie i stalowej powłoce, które trudno uwzględnić w analizie numerycznej. Przebiegi przemieszczeń i naprężeń mają kształt zbliżony do wartości rzeczywistych. Względne różnice obliczonych i pomierzonych przemieszczeń były w zakresie 5–23%, a naprężeń 15–42%. Należy zaznaczyć, że autorzy artykułu nie znali dokładnych parametrów zasyпки gruntowej. Poza tym, w modelu obliczeniowym założono występowanie takiego samego gruntu wokół powłoki jak w pozostałych miejscach zasyпки, dodatkowo powłoka była modelowana jako jednolita konstrukcja płaska (brak falistości i połączeń śrubowych).



Rys. 7. Porównanie maksymalnych naprężeń w stalowej powłoce uzyskane z pomiarów i obliczeń dla trzech schematów obciążeń

Natomiast, porównując maksymalne przemieszczenia i naprężenia uzyskane z modeli obliczeniowych wykonanych w dwóch programach, tj. Abaqus i Robot Millenium [3] można stwierdzić, że przedstawiony w niniejszym artykule sposób modelowania mostu gruntowo-stalowego pozwala na uzyskiwanie bardziej wartościowych wyników. Przy zastosowaniu obu programów obliczeniowych, względne różnice przemieszczeń były w zakresie 15–39%, a naprężeń 17–44%, z korzyścią dla programu Abaqus. Takie różnice wynikają ze sposobu modelowania w programie Robot Millenium, tj.: (i) nie zastosowaniu powłoki płaskiej o charakterystyce ortotropowej, (ii) modelowanie gruntu przy użyciu kryterium Coulomba-Mohra, (iii) użycie uproszczonych elementów kontaktowych.

Opracowany model obliczeniowy mostu gruntowo-stalowego w programie Abaqus pozwala uzyskiwać rozsądne wartości przemieszczeń i naprężeń, pomimo faktu, że w większości przypadków są one większe od wartości pomierzonych. Maksymalne wartości przemieszczeń uzyskane z obliczeń i pomiarów są zlokalizowane dokładnie pod siłami skupionymi reprezentującymi koła samochodów obciążających. Natomiast w przypadku naprężeń największe wartości są przesunięte do naroża i 2/3 wysokości powłoki (rys. 7).

## 5. Wnioski

W wyniku obliczeń tego mostu i porównania rezultatów z wartościami pomiarowymi jak i wcześniejszymi obliczeniami można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Obliczone przemieszczenia i naprężenia są większe od wartości otrzymanych z badań doświadczalnych. Kształt krzywych przemieszczeń i naprężeń zasadniczo nie odbiega od tych uzyskanych z pomiarów. Uzyskane wyniki obliczeń są zdecydowanie bardziej dokładne niż te otrzymane za pomocą programu Robot [3]. Wynika to z zastosowania w modelu obliczeniowym w programie Abaqus, powłoki płaskiej o własnościach ortotropowych, lepszego opisu zachowania się gruntu (model Drucker-Prager) i korzystniejszego odwzorowania wzajemnego oddziaływania elementów składowych mostu.
2. Największe przemieszczenia mostu gruntowo-stalowego uzyskane z programu Abaqus zlokalizowane były w kluczu powłoki (3,01 mm) i ich przebieg był nierównomierny (schematy I i II) z dość dużymi lokalnymi deformacjami. Natomiast maksymalne naprężenia wystąpiły w narożu powłoki i wynosiły 65 MPa.
3. Różnice w uzyskanych wynikach obliczeń i badań mogą być spowodowane m.in.:
  - niedokładnym odwzorowaniem gruntu w modelu obliczeniowym (nieznano dokładnych parametrów fizycznych i wytrzymałościowych),
  - brakiem uwzględnienia skosu powłoki w modelu numerycznym, co zmniejsza powierzchnię powłoki, która przejmuje obciążenia z wyższej położonych warstw,
  - złożoną geometrią mostu – model numeryczny nie jest dokładnym odzwierciedleniem istniejącego obiektu, wiele szczegółów pominięto lub uproszczono, takich jak np. falistość powłoki, żelbetowe wzmocnienia powłoki przy wlocie i wylocie, a także połączenia śrubowe pomiędzy arkuszami blach.

## Literatura

- 1 Janusz L., Madaj A. Obiekty Inżynierskie z Blach Falistych. Projektowanie i Wykonawstwo. WKiŁ, Warszawa, 2009.
- 2 Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A. Zalecenia Projektowe i Technologiczne dla Podatnych Konstrukcji z Blach Falistych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów Filia Wrocław, 2004.
- 3 Manko Z., Bęben D. Tests during three stages of construction of a road bridge with a flexible load-carrying structure made of Super Cor type steel corrugated plates interacting with soil. *Journal of Bridge Engineering* 10 (2005) 570–591.
- 4 Machelski Cz. Modelowanie Mostowych Konstrukcji Gruntowo-Powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008.
- 5 Bęben D. Numerical analysis of a soil-steel bridge structure. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4 (2009) 13–21.
- 6 Elshimi T. M. Three-dimensional Nonlinear Analysis of Deep-corrugated Steel Culverts. Doctoral dissertation, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2011.
- 7 ABAQUS. Abaqus Theroy Manual. ABAQUS 6.11 PDF Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, USA, 2011.



- 8 Zienkiewicz O. C. Metoda Elementów Skończonych, Arkady, Warszawa, 1986.
- 9 Skrzat A. Modelowanie Liniowych i Nieliniowych Problemów Mechaniki Ciała Odkształcanego i Przepływów Ciepła w Programie ABAQUS. Rzeszów, 2010.

## Numerical analysis of soil-steel bridge

Damian Bęben<sup>1</sup>, Michał Wrzeciono<sup>2</sup>

*<sup>1,2</sup> Faculty of Civil Engineering, Opole University of Technology  
e-mail: <sup>1</sup>d.beben@po.opole.pl, <sup>2</sup>zyto29@gmail.com*

**Abstract:** The paper presents a numerical analysis of the soil-steel bridge in the scope of static loads. The Abaqus program based on the FEM was used to calculations. Maximum displacements were obtained in the shell crown, and the largest stresses in the haunches. Calculation results were compared with the experimental ones and previous calculations obtained from the Robot Millenium program. The shapes of calculated displacements and stresses are similar to those obtained with the experiment, but the absolute values were generally higher than measured ones. Using both calculation programs, the relative reductions of displacement were in the range of 15–39%, and 17–44% for stresses in favour of the Abaqus program. Developed calculation model of the soil-steel bridge in the Abaqus program allows to obtain reasonable values of internal forces in the shell structure.

**Keywords:** bridge, displacement, stress, calculation model.

