



DAMIAN BĘBEN

Politechnika Opolska
d.beben@po.opole.pl



ŁUKASZ OCIK

Politechnika Opolska
lukasz.ocik@o2.pl

Rola zasyпки w gruntowo-powłokowych obiektach mostowych

Konstrukcje z blach falistych w ostatnich latach zyskały na popularności w inżynierii lądowej jako alternatywa do typowych rozwiązań mostowych. Często są one wykorzystywane do budowy tuneli i przejść dla zwierząt. Głównym powodem stosowania tych konstrukcji są stosunkowo niskie koszty i krótki czas budowy [3, 5]. Elementem nośnym tych konstrukcji jest zespolony układ gruntowo-powłokowy, w którym wykorzystuje się zjawisko przesklepienia obciążeń w gruncie i współpracę podatnej stalowej powłoki z zasypką inżynierską [3, 6]. Złożony układ konstrukcyjny powoduje wiele trudności

w modelowaniu tych obiektów, m.in. przez odwzorowanie falistej powłoki, dobór charakterystyk gruntowych oraz określenie współpracy gruntu i powłoki.

Zasyпка jest głównym elementem w tych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Z tego względu postanowiono poddać analizie wpływ różnych parametrów zasyпки na deformacje (przemieszczenia i naprężenia) powłoki obiektu gruntowo-powłokowego. Dobór gruntu (zasyпки inżynierskiej) o odpowiednich parametrach oraz jego właściwe ułożenie i zagęszczenie mają kluczowy wpływ na trwałość oraz osiągnięcie

wymaganej nośności tego typu konstrukcji. Generalnie zastosowany grunt powinien być wodoprzepuszczalny, wolny od zbryleń, zmarzliny, o nierównomiernym uziarnieniu, dobrze zagęszczalny, nieagresywny, wolny od elementów organicznych. W zależności od przyjętej wysokości fali blach zaleca się, aby wielkość ziaren nie przekraczała: (i) 32 mm (w przypadku blachy falistej typu HC 125×26 i 100×20 mm), (ii) 42 mm (typu MP 150×50 i 200×55 mm) i (iii) 120 mm (typu SC 380×140 mm) [5].

Ważnym parametrem zasyпки inżynierskiej jest kąt tarcia wewnętrznego. Zależy on od rodzaju gruntu i wskaźnika zagęszczenia. W przypadku poprawnie zagęszczonej zasyпки (wskaźnik zagęszczenia $I_s = 0,95-1,00$) kąt tarcia wewnętrznego zawiera się w przedziale 36°–45°. Istnieje zależność, że wraz ze zwiększaniem kąta tarcia wewnętrznego rośnie wytrzymałość gruntu na ścinanie, co bezpośrednio wpływa na zwiększenie bezpieczeństwa tych ustrojów konstrukcyjnych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń wykorzystując program Abaqus oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Zasadniczym celem pracy było przedstawienie wpływu jakości zasyпки (kąta tarcia wewnętrznego, ciężaru objętościowego, modułu Younga) na wyężenie powłoki stalowej. Obliczenia przeprowadzono w odniesieniu do rzeczywistego mostu w Szwecji (fot. 1), który wcześniej wszechstronnie przebadano doświadczalnie [7]. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z rezultatami doświadczeń. Wnioski końcowe dotyczą głównie oceny wpływu jakości zasyпки na wyężenie powłoki stalowej

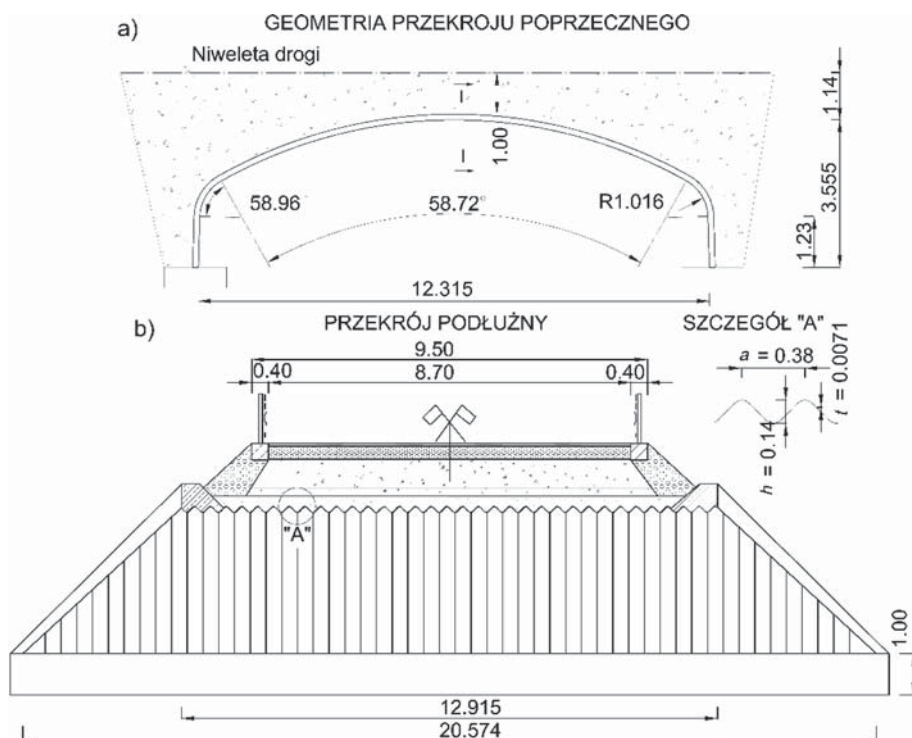
i podanie, które parametry mają największe znaczenie. Podano także powody różnic wyników obliczeniowych i doświadczalnych.

Opis mostu

Analizowany most jest konstrukcją gruntowo-powłokową złożoną z powłoki z blach falistych obsypaną zasypką inżynierską. Rozpiętość teoretyczna mostu wynosi 12,315 m, a jego szerokość dołem 20,574 m i górą 12,915 m (rys. 1). Wysokość stalowej powłoki mostu wynosi 3,555 m, a grubość naziomu w kluczu 1,0 m. Promienie krzywizny powłoki są następujące $R_t = 11,43$ m w koronie i $R_s = 1,016$ m w narożu. Most zaprojektowano na przenoszenie obciążeń zgodnie z normą szwedzką [4], co w porównaniu z polską normą PN-85/S-10030 [8] odpowiada klasie A (pojazd o ciężarze



Fot. 1. Widok z boku na most gruntowo-powłokowy

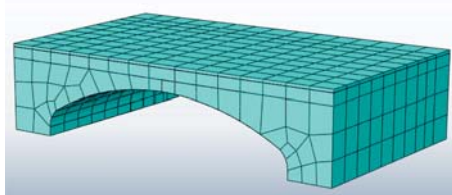


Rys. 1. Most gruntowo-powłokowy: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny I-I (wymary podano w [m])

500 kN). Stalową powłokę wykonano z arkuszy blach falistych SC 380×140×7,1 mm. Odpowiednie połączenie arkuszy blach zapewniają śruby sprężające M20 klasy SB 8.8 dokręcone momentem skręcającym o wartości w granicach 350–400 Nm. Zasypkę stanowił grunt przepuszczalny układany warstwami o grubościach około 0,20–0,30 m i uziarnieniu 10–32 mm odpowiednio zagęszczony (0,98 według skali Proctora). Trzeba jednak zaznaczyć, że autorzy nie znali dokładnych parametrów zasyпки (kąta tarcia wewnętrznego, ciężaru objętościowego i modułu Younga). Szczegółowy opis mostu przedstawiono w pracy [7].

Opis modelu numerycznego. Uwagi ogólne

Do obliczeń mostu gruntowo-powłokowego wykorzystano program Abaqus/CEA 6.11 [1] oparty na MES. W modelach numerycznych analizowanego mostu starano się odzwierciedlić jego rzeczywistą geometrię, jednocześnie nie uwzględniając elementów drugorzędnych (poręczy, skarpy nasypów, żelbetowych kołnierzy wzmacniających wlot i wylot), mogących wpływać na zwiększenie komplikacji modeli



Rys. 2. Siatka elementów skończonych mostu gruntowo-powłokowego

i znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Opracowano trzy modele numeryczne mostu gruntowo-powłokowego różniące się parametrami zasyпки inżynierskiej. Pozostałe elementy mostu były w każdym modelu takie same.

Obliczenia mostu pod obciążeniem statycznym przeprowadzono w przestrzeni trójwymiarowej. Nieliniowość w modelach obliczeniowych uwzględniono przez zastosowanie analizy przyrostowej *Full Newton* [1], [9]. Modele mostu gruntowo-powłokowego stanowią bryły będące wycinkiem przestrzeni o wymiarach 16,32×9,50×4,70 m. Model obliczeniowy stanowi siatka elementów skończonych (rys. 2) w kształcie prostokątów C3D8R (elementy typu *solid*) i czworościanów S4R (elementy typu *shell*). W każdym z modeli węzły mają sześć stopni swobody (U1, U2, U3 – kierunki przemieszczeń na osiach OX, OY, OZ oraz UR1, UR2, UR3 – kierunki obrotów względem osi OX, OY, OZ, odpowiednio) przy czym węzły elementów, których krawędzie leżą na zewnętrznych powierzchniach modelu numerycznego mają zablokowane wszystkie stopnie swobody – obroty i przemieszczenia (utwierdzenie zupełne).

Charakterystyka materiałów

Elementy tworzące modele numeryczne mostu, tj. stalową powłokę, zamodelowano jako dwuwymiarowe w przestrzeni trójwymiarowej elementy powłokowe (S4R – *shell*). Natomiast pozostałe części (zasyпка, warstwy nawierzchni drogowej) zostały zdefiniowane elementami o właściwościach ciała stałego (C3D8R – *solid*). Parametry materiałowe dobrano na podstawie dostępnych danych technicznych i charakterystyk materiałowych zawartych w programie Abaqus, tj.:

- powłokę stalową z blach falistych zamodelowano jako płaską o odpowiednich parametrach powłoki ortotropowej [6] (grubość zastępcza blach $t_{zas.} = 0,164$ m, współczynnik sprężystości materiału (moduł Younga) w kierunku obwodowym powłoki $E_x = 4664$ MN/m², moduł sprężystości poprzecznej $E_y = 15,94$ MN/m² i współczynnik Poissona $\nu_x = 0,30$ i $\nu_y = 0,001$). Elementy blach zdefiniowano elementami typu *shell* (SR4), a materiał przyjęto jako sprężysto-plastyczny o gęstości $\gamma = 78,5$ kN/m³, granicy plastyczności $\sigma = 314$ MPa, polu przekroju poprzecznego $A = 9,81 \times 10^{-6}$ m²/m, momencie bezwładności $I = 2,416 \times 10^{-8}$ m⁴/m i wskaźniku zginania przekroju $W = 3,082 \times 10^{-7}$ m³/m. Przy modelowaniu powłoki z blach falistych pominięto połączenia na śruby między arkuszami blach;
- zasypkę zdefiniowano jako materiał sprężysto-plastyczny (elementy typu *solid*) z hiperbolicznym kryterium ścinania Druckera-Pragera o parametrach gruntowych przedstawionych w tabeli 1 dla trzech opracowanych modeli obli-

zeniowych mostu. Założone w obliczeniach typy gruntów są czysto hipotetyczne i mają obrazować jedynie wpływ poszczególnych parametrów na wyężenie mostu gruntowo-stalowego. Dodatkowo uwzględniono kąt dylatacji $\alpha = 5^\circ$, spójność i pominięto początkowe rozciąganie. 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 wartość na 5 MPa;

Tabela 1. Zmienne parametry zasyпки inżynierskiej wykorzystane do obliczeń numerycznych mostu gruntowo-powłokowego

Model obliczeniowy mostu	Kąt tarcia wewnętrznego [°]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Moduł Younga [MPa]	Stan gruntu (wskaźnik zagęszczenia – próba Proctora)
I	45	19	80	zagęszczony (98)
II	40	18	70	średnio zagęszczony (90)
III	35	21	90	luźny (80)

- podbudowę drogową (tłuczeń) zdefiniowano jako materiał sprężysto-plastyczny (elementy typu *solid*) także z uwzględnieniem hiperbolicznego kryterium Druckera-Pragera o gęstości $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 60 \text{ MPa}$, kącie tarcia wewnętrznego $f = 17^\circ$, kącie dylatacji $\alpha = 10^\circ$ i początkowym rozciąganiu 0 MPa. Tak jak w przypadku modelu zasadniczej zasyпки, zastosowano wzmocnienie modelu Druckera-Pragera, określając parametr wzmocnienia gruntu przy ściskaniu na 5 MPa;
- warstwę bitumicznej nawierzchni drogowej zdefiniowano, jako materiał sprężysty (elementy typu *solid*) o gęstości $\gamma = 21,0 \text{ kN/m}^3$, module Younga $E = 6900 \text{ MPa}$ i współczynnika Poissona $\nu = 0,41$;
- warunki brzegowe: w modelach numerycznych zastosowano utwierdzenie zupełne, tj. zablokowano obroty i przesunięcia na każdej z osi boków i podstawy powłoki;
- krok obliczeniowy zdefiniowano jako $T = t + \Delta t$, przy czym t jest czasem początkowym równym $t = 0 \text{ s}$, natomiast Δt jest przyrostem czasu, podczas którego następuje przyłożenie zadanego obciążenia statycznego zgodnie z trzema schematami zastosowanymi podczas badań doświadczalnych [7].

Właściwości stref kontaktowych

Modelowanie obiektów mostowych gruntowo-powłokowych składających się z wielu różnych warstw (elementy nawierzchni drogowej, zasyпки, blachy stalowej) o różnych właściwościach fizycznych, wymaga określenia ich wzajemnego oddziaływania [3]. Interakcje te należy określić pomiędzy wszystkimi warstwami będącymi ze sobą w bezpośrednim kontakcie, nawet pomimo zbliżonych właściwości fizycznych niektórych z nich, np. zasyпка–podbudowa z tłuczniem. Do modelowania współpracy między różnymi materiałami,

o zdefiniowanych wcześniej właściwościach fizycznych, wchodzącymi w skład tego mostu, wykorzystano elementy kontaktowe tzw. *interface* [1,2].

Interakcje na styku powierzchni materiałów będących ze sobą w kontakcie (asfalt–tłuczeń, tłuczeń–zasyпка, zasyпка–powłoka) modelowano jako sztywne elementy przekazujące właściwe im rodzaje oddziaływań z powierzchni nadrzędnej (*master*) na podrzędną (*slave*) [2]. Zależność nadrzędnych i podrzędnych powierzchni kontaktu określono na zasadzie modułów sprężystości materiałów będących ze sobą w kontakcie (interakcji). Jako powierzchnię podrzędną (*slave*) przyjęto tę, której materiał ma mniejszy moduł sprężystości (moduł Younga), a jako nadrzędną (*master*) określano powierzchnię, której moduł sprężystości jest większy. W modelu numerycznym wyróżniono 3 rodzaje stref kontaktowych (asfalt–tłuczeń, tłuczeń–zasyпка, zasyпка–stalowa powłoka). W poszczególnych warstwach przyjęto następujące zależności nadrzędno-podrzędne, tj.: (a) asfalt – tłuczeń → *slave* – *master*, (b) tłuczeń – zasyпка → *slave* – *master*, (c) zasyпка – stalowa powłoka → *slave* – *master*.

Ze względu na rodzaj powierzchni będących ze sobą w kontakcie wyróżniono dwa rodzaje właściwości interakcji, określające współczynniki tarcia między warstwami i sztywność połączenia jakie tworzą te warstwy. Decydującym elementem różniącym ten typ interakcji od pozostałych jest gładka powierzchnia powłoki, która implikuje mniejszy współczynniki tarcia. Przyjęto więc następujące współczynniki tarcia: 0,3 – w strefie kontaktowej zasyпки i powłoki oraz 0,6 – w przypadku pozostałych powierzchni. Natomiast sztywności połączeń ustalono na poziomie 2000 GN/m – w strefie kontaktowej zasyпки i powłoki oraz 2 GN/m – przy pozostałych powierzchniach.

Analiza modelu 3D mostu. Zastosowane schematy obciążeń

Podczas obliczeń numerycznych zastosowano takie samo obciążenie (siły skupione pochodzące od pojazdu ciężarowego o wadze 255 kN), jakie wykorzystano podczas badań doświadczalnych mostu pod obciążeniem statycznym [7]. W tabeli 2 pokazano naciski na osie i koła pojazdu.

Tabela 2. Charakterystyka techniczna rozkładu obciążenia pojazdu użytego do badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych

Masa całkowita [kN]	Nacisk na osie [kN]		Nacisk na koła [kN]	
	tył	przód	tył	przód
255.00	178 = 2×89.00	70.70	44.50	35.35

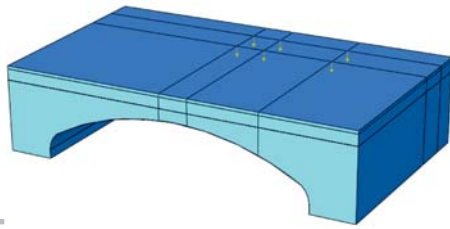
Aby można było bezpośrednio porównywać wyniki obliczeń z doświadczalnymi, w analizie numerycznej zastosowano trzy schematy obciążenia (A, B i C), które odpowiadają tym zastosowanym podczas badań doświadczalnych [7]:

- Schemat A (niesymetryczny) – samochód ustawiony jest w odległości 0,75 m od lewej krawędzi jezdni, równoległe do podłużnej osi obiektu. Tylne osie pojazdu położone były nad kluczem (środek rozpiętości) mostu.
- Schemat B (symetryczny) – samochód ustawiony jest na środku jezdni, jego oś pokrywa się z podłużną osią obiektu.

tu. Tylnie osie pojazdu położone były nad kluczem (środek rozpiętości) mostu.

- Schemat C (niesymetryczny) – pojazd obciążający ustawiony tak jak w schemacie A, tylko z drugiej krawędzi jezdni mostu (rys. 3).

Rys. 3.
Niesymetryczny
schemat obciążenia
(C) mostu gruntowo-
powłokowego

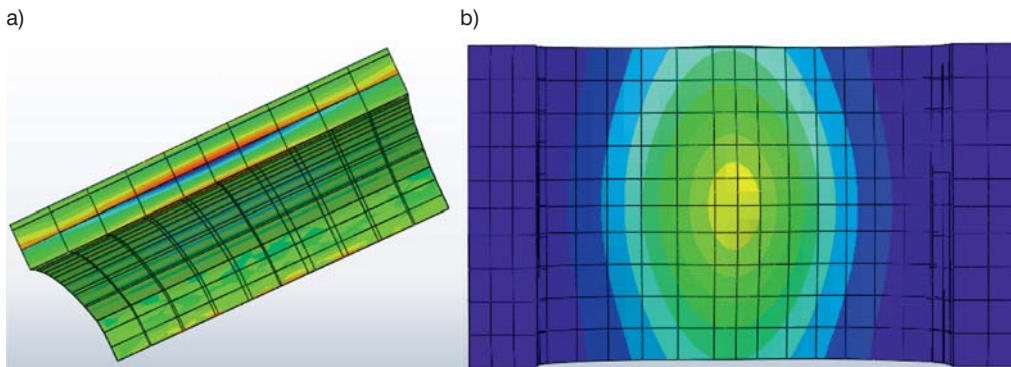


Wyniki obliczeń numerycznych

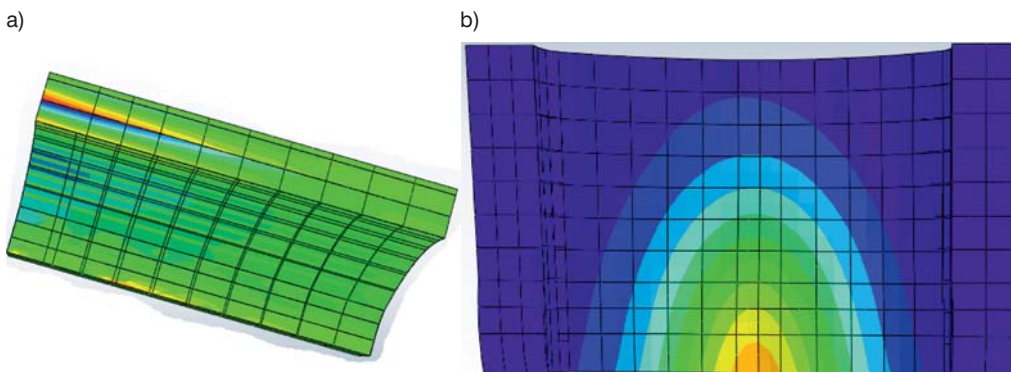
Rezultaty obliczeń numerycznych przedstawiono w postaci map przemieszczeń i naprężeń (rys. 4–6). Maksymalne wartości przemieszczeń wyniosły 3,02 mm i uzyskano je w kluczu powłoki mostu w przypadku modelu numerycznego III (schemat obciążenia statycznego C). W przypadku modeli numerycznych I i II (schemat obciążenia C) maksymalne przemieszczenia mostu gruntowo-powłokowego były równe odpowiednio 2,91 mm i 2,59 mm. Maksymalne przemieszczenia występują w miejscach, gdzie przyłożone zostało obciążenie tylnych kół samochodu (w tych miejscach występują znacznie większe przemieszczenia niż w innych częściach konstrukcji mostu). W schematach obciążenia A i B

największe przemieszczenia mostu również otrzymano w przypadku modelu numerycznego III.

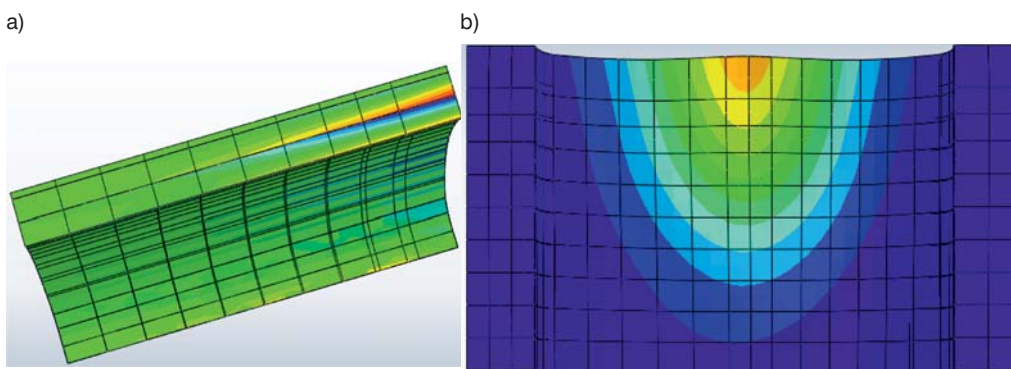
Maksymalne naprężenia (około 10,3 MPa), podobnie jak w przypadku przemieszczeń, uzyskano przy modelu numerycznym III od schematu obciążenia statycznego A i C. W modelach numerycznych I i II największe naprężenia w stalowej powłoce mostu wynosiły odpowiednio 9,03 MPa i 9,88 MPa. Mapy naprężeń dokładnie pokazują, że największe wartości uzyskano w miejscach przyłożenia tylnych kół (osi) pojazdu obciążającego, tj. w kluczu powłoki mostu. Ma to także odzwierciedlenie w wynikach badań doświadczalnych [7].



Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych od schematu obciążenia A przy modelu obliczeniowym I: a) rozkład przemieszczeń i b) naprężenia w powłoce stalowej mostu



Rys. 5. Wyniki obliczeń od schematu obciążenia B przy modelu obliczeniowym II: a) rozkład przemieszczeń i b) naprężenia w powłoce mostu



Rys. 6. Wyniki obliczeń od schematu obciążenia C przy modelu obliczeniowym III: a) rozkład przemieszczeń i b) naprężenia w powłoce mostu

Analiza i dyskusja wyników

W celu oszacowania maksymalnych naprężeń w dowolnym punkcie pomiarowym i zlokalizowanym na stalowej powłoce zastosowano wyrażenie (1):

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A} + \frac{M_i}{W}, \quad (1)$$

w którym:

A i W – odpowiednio pole przekroju i wskaźnik zginania przekroju,

N_i – siła osiowa wyrażona jako (2):

$$N_i = EA \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}, \quad (2)$$

przy czym:

ε_1 i ε_2 – odpowiednio odkształcenia na górze i dole fali w punkcie pomiarowym i ,

E – moduł sprężystości stali,

M_i – moment zginający w punkcie pomiarowym i wyrażony wzorem (3):

$$M_i = EI\kappa, \quad (3)$$

przy czym:

I – moment bezwładności,

κ – określa krzywiznę w kierunku obwodowym zgodnie z wyrażeniem (4):

$$\kappa = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h - t}, \quad (4)$$

w którym:

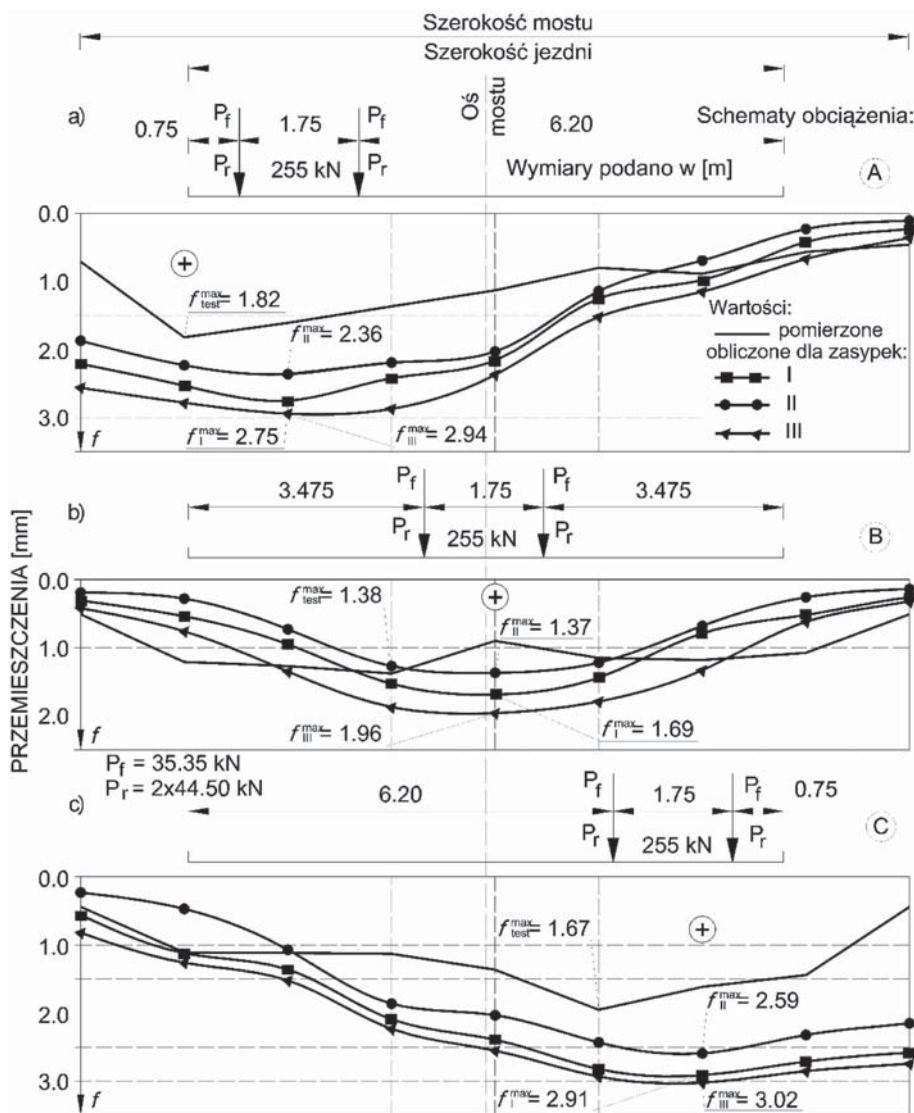
h – wysokość fali,

t – grubość blachy falistej.

Porównanie obliczonych przemieszczeń i naprężeń w odniesieniu do poszczególnych modeli numerycznych (rodzajów zasypek) przedstawiono na rys. 7 i 8. Maksymalne naprężenia w płaskiej powłoce stalowej uzyskano bezpośrednio z programu obliczeniowego, co nie wymagało przeliczania z sił wewnętrznych. Na tych rysunkach pokazano także przebieg krzywych doświadczalnych (maksymalnych przemieszczeń i naprężeń). Można na nich zaobserwować wpływ zastosowanych zasypek na wyłączenie powłoki stalowej.

Jak widać na rys. 7 obliczone przemieszczenia mostu gruntowo-powłokowego za pomocą programu Abaqus przy trzech rodzajach zasypek są do siebie zbliżone (kształt krzywych jest podobny). Jednak są one przeważnie większe od wartości zmierzonych. Świadczy to o podobnej pracy konstrukcji i sposobie przekazywania obciążeń przez różne, ale zbliżone parametrami do siebie, ośrodki gruntowe. Zauważono, że maksymalne przemieszczenia z badań uzyskano w innych punktach niż w przypadku obliczeń numerycznych. Może to świadczyć o wpływie sposobu wprowadzania obciążenia na most [6, 10], a także pewnych niejednorodnościach w rzeczywistym moście, np. w zasypce i na połączeniach arkuszy blach falistych (możliwe luzy). Dodatkowo w obliczeniach założono występowanie jednorodnej zasypki i ciągłej blachy falistej (bez połączeń) o charakterystykach ortotropowych. Względne różnice obliczonych i pomierzonych przemieszczeń przy poszczególnych modelach numerycznych były w zakresie: I (18–43%), II (1–36%) i III (30–45%). Należy przy tym zauważyć, że najlepszą zgodność wartości obliczonych i pomierzonych uzyskano przy modelu numerycznym II i schemacie obciążenia B.

Wyniki i kształt krzywych przemieszczeń od schematów obciążeniowych A i C są do siebie zbliżone. W przypadku schematu obciążeniowego B (pojazd ustawiony na środku jezdni) można zauważyć znacznie mniejsze



Rys. 7. Wykresy przemieszczeń klucza mostu przy trzech rodzajach zasypek

wartości przemieszczeń, niż przy schematach A i C (mimo zastosowania takiego samego samochodu obciążającego). Zauważono w tym przypadku, że przebieg przemieszczeń jest bardziej równomierny na szerokości mostu (brak nagłych skoków wartości). Praca mostu gruntowo-powłokowego spowodowana schematami A i C wyraźnie pokazuje, że w bocznej części konstrukcji powłoki mostu są znacznie większe deformacje, niż w przypadku oddziaływania pojazdu ustawionego zgodnie ze schematem obciążenia B. Świadczy to o mniejszej sztywności i współpracy zasypka-powłoka na brzegach mostu, i jednocześnie lepszym rozkładzie obciążenia w gruncie w środkowej części mostu (schemat obciążenia B). Dlatego wydaje się logiczne i uzasadnione stosowanie dodatkowych wzmocnień na wlocie i wylocie mostu. Najbardziej zbliżone wartości obliczonych przemieszczeń do pomierzonych uzyskano przy zastosowaniu modelu numerycznego II. Zatem względne zmiany

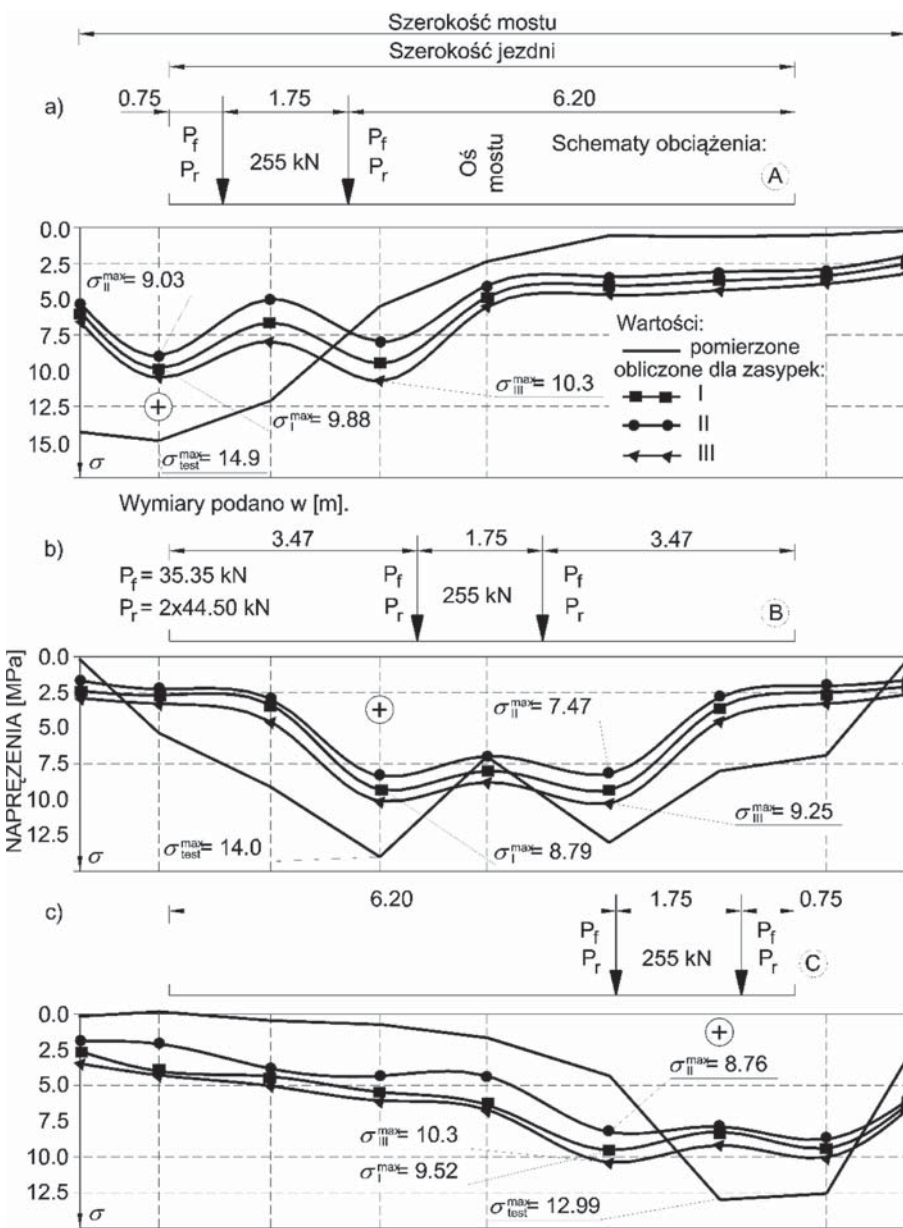
obliczonych przemieszczeń z wykorzystaniem modeli numerycznych I i III względem modelu II były odpowiednio w zakresie (11–23%) i (14–30%).

Na rys. 8 przedstawiono wartości naprężeń w charakterystycznych punktach konstrukcji (w których wykonywano także pomiary) przy trzech rodzajach zasypki obliczone programem Abaqus. W tym przypadku również widać wpływ parametrów zasypki na wyężenie powłoki stalowej mostu gruntowo-powłokowego (zbliżone kształty wykresów). Zauważono przede wszystkim, że maksymalne obliczone naprężenia w kluczu powłoki mostu są mniejsze od wartości pomierzonych, ale należy zaznaczyć, że na szerokości mostu (poza bezpośrednim zakresem działania obciążenia) wartości pomierzone są mniejsze od obliczonych (zwłaszcza w przypadku schematu obciążenia A i C – rys. 7 i 8). Największe naprężenia wystąpiły bezpośrednio pod siłami skupionymi stanowiącymi naciski kół pojazdu. Na rys. 8

zauważono także, że maksymalne naprężenia uzyskano od niesymetrycznych schematów obciążenia A i C. Może być to powodem pewnych niejednorodności i mniejszej sztywności na brzegach mostu (podobne tendencje uzyskano w przypadku przemieszczeń). Ponadto widać, że położenie pojazdu zgodnie ze schematem B (na środku jezdni) powoduje w miarę równomierny rozkład obciążenia. Świadczy to o wciągnięciu większej szerokości mostu gruntowo-powłokowego do współpracy w przenoszeniu zadanego obciążenia.

Dodatkowo widać (podobnie jak w przypadku przemieszczeń), że rozkład naprężeń obliczonych jest łagodniejszy (brak gwałtownych załamania) niż w przypadku wartości pomierzonych. Względne różnice pomierzonych i obliczonych naprężeń w poszczególnych modelach numerycznych były w zakresie: I (27–37%), II (33–47%) i III (21–34%). Najbardziej zbliżone wartości naprężeń obliczonych do pomierzonych uzyskano przy zastosowaniu modelu numerycznego III (w przypadku wartości maksymalnych). Jednakże biorąc pod uwagę, całą szerokość mostu (rys. 8), najkorzystniejszy wydaje się być model numeryczny II. Względne zmiany naprężeń obliczonych z wykorzystaniem modeli numerycznych I i III względem modelu II były odpowiednio w zakresie (8–15%) i (12–19%) z korzyścią dla modelu II.

Najmniejsze przemieszczenia i naprężenia w powłoce mostu gruntowo-powłokowego uzyskano w przypadku modelu numerycznego II (rys. 7 i 8). W tym modelu parametry zasypki były następujące: kąt tarcia wewnętrznego 40°, ciężar objętościowy 18 kN/m³ i moduł Younga



Rys. 8. Wykresy naprężeń w kluczu powłoki mostu przy trzech rodzajach zasypki

70 MPa. Zauważono, że spośród wybranych parametrów zasypki we wszystkich rozpatrywanych modelach numerycznych największy wpływ na wielkości przemieszczeń i naprężeń mostu wydaje się mieć kąt tarcia wewnętrznego. Widać z tego, że przy rozpatrywanych zakresach parametrów zasypki, moduł Younga nie jest kluczowym parametrem wpływającym na zmniejszenie deformacji mostu. Można jednak przypuszczać, że istnieje pewna granica wartości modułu Younga, poniżej której deformacje mostu zwiększyłyby się znacząco. Wynika z tego również, że wskaźnik zagęszczenia zasypki (uzależniony bezpośrednio od kąta tarcia wewnętrznego) jest istotnym parametrem. Mimo że przy kącie tarcia wewnętrznego równym 45° nie uzyskano najmniejszych wartości, to przy wartości 35° zanotowano największe deformacje mostu. Dodatkowo należy nadmienić, że kąt tarcia wewnętrznego stanowi parametr wytrzymałości gruntu na ścinanie. Zaobserwowano także, że wraz ze zmniejszaniem kąta tarcia wewnętrznego oraz zwiększaniem ciężaru objętościowego i modułu Younga zasypki (tabela 1) przemieszczenia i naprężenia mostu ulegają zwiększeniu. Zwiększanie modułu Younga i ciężaru objętościowego zasypki w modelach numerycznych nie powoduje zmniejszenia deformacji mostu.

Aby wyciągnąć bardziej szczegółowe zależności wpływu jakości zasypki na deformacje tego typu mostów, należałoby przeprowadzić dodatkowe symulacje numeryczne w przypadku większych zakresów zmian parametrów zasypki. Trudno jest jednoznacznie stwierdzić, który parametr ma decydujący wpływ na poziom deformacji mostu gruntowo-powłokowego, gdyż są one bezpośrednio z sobą powiązane. Reasumując i mając na uwadze stosunkowo mały zakres zmienności parametrów zasypki, można podać, że kąt tarcia wewnętrznego odgrywa kluczową rolę w pracy mostowych obiektów gruntowo-powłokowych. Ma to również swoje odzwierciedlenie w klasycznej mechanice gruntów (np. w równaniu Coloumba w odniesieniu do gruntów niespoistych).

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych obliczeń przy różnym rodzaju zasypek i porównaniu uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Z przeprowadzonej analizy parametrycznej wynika, że kąt tarcia wewnętrznego jest kluczowym parametrem zasypki w mostowych obiektach gruntowo-powłokowych. Największe deformacje mostu uzyskano w przypadku najmniejszego kąta tarcia wewnętrznego (35°). Zauważono ponadto, że szczególnie w miarę zwiększania ciężaru objętościowego oraz zmniejszania kąta tarcia wewnętrznego, rosną deformacje w powłoce stalowej. Zwiększanie modułu Younga zasypki nie powoduje zmniejszenia deformacji mostu.
2. Biorąc pod uwagę całą szerokość mostu gruntowo-powłokowego, najkorzystniejszym modelem obliczenio-

wym okazał się model z parametrami gruntu II. Względne zmiany uzyskanych wartości z wykorzystaniem modeli I i III względem modelu II były odpowiednio w zakresie (8–15%) i (12–19%) w przypadku naprężeń oraz (11–23%) i (14–30%) w przypadku przemieszczeń z korzyścią dla modelu II.

3. Obliczone przemieszczenia były zazwyczaj większe od pomierzonych (na całej szerokości mostu), natomiast maksymalne obliczone naprężenia były mniejsze od doświadczalnych. Może to być wynikiem większej sztywności modeli obliczeniowych analizowanego mostu, niż to wynika z jego rzeczywistej konstrukcji (np. w wyniku występowania luzów na połączeniach arkuszy blach i niejednorodności zasypki). Jednakże biorąc pod uwagę całą szerokość mostu (obszar poza bezpośrednim zakresem działania obciążenia) naprężenia pomierzone były mniejsze od obliczonych (zwłaszcza w przypadku obciążeń zgodnie ze schematami A i C).
4. Maksymalne naprężenia (10.3 MPa) i przemieszczenia (3.02 mm) z obliczeń uzyskano w kluczu powłoki mostu od niesymetrycznych schematów obciążenia A i C. Świadczy to o mniejszej sztywności i współpracy zasypka-powłoka na brzegach mostu. Ponadto widać, że położenie pojazdu o takiej samej masie zgodnie ze schematem B (na środku jezdni) powoduje w miarę równomierny rozkład obciążenia. Świadczy to o wciągnięciu większej szerokości mostu gruntowo-powłokowego do współpracy w przenoszeniu zadanego obciążenia.
5. Zaproponowany sposób modelowania mostu gruntowo-powłokowego pozwala na uzyskiwanie rozsądnych wartości przemieszczeń i naprężeń w porównaniu z wynikami doświadczeń i metod analitycznych.

Bibliografia

- [1] ABAQUS. Abaqus Theroxy Manual. ABAQUS 6.11 PDF Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, USA, 2011.
- [2] ABAQUS: Analysis of Geotechnical Problems with ABAQUS. ABAQUS, Inc., U.S.A. 2003.
- [3] Abdel-Sayed G, Bakht B, Jaeger LG. Soil-steel bridges: design and construction. McGraw-Hill, Inc. New York, 1994.
- [4] Bro. (2004). Swedish road administration design standard for bridges, Vägverket (Swedish Road Administration), Borlänge, Sweden.
- [5] Janusz L., Madaj A.: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo. WKiŁ. Warszawa 2009.
- [6] Machelski Cz. Modelowanie gruntowo-powłokowych obiektów mostowych. DWE, Wrocław, 2008.
- [7] Manko Z., Beben D.: Static load tests of a road bridge with a flexible structure made from Super Cor type steel corrugated plates. Journal of Bridge Engineering, ASCE, vol. 10, 2005, no. 5, pp. 604–621.
- [8] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia.
- [9] Skrzat A.: Modelowanie liniowych i nieliniowych problemów ciała stałego i przepływów ciepła w programie Abaqus. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2010.
- [10] Machelski Cz. Zależność deformacji konstrukcji gruntowo-powłokowej od kierunku przejazdu. Drogi i Mosty, vol. 13, 2014, nr 3, s. 223–233.