

Grzegorz ANTONISZYN^{*}
Politechnika Wroclawska

OCENA NOŚNOŚCI UŻYTKOWEJ MOSTU GRUNTOWO-POWŁOKOWEGO NA PODSTAWIE WYNIKÓW BADAŃ IN SITU I ANALIZ NUMERYCZNYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono badania doświadczalne i obliczenia numeryczne mostu o konstrukcji gruntowo-powłokowej pod obciążeniem eksploatacyjnym. Ugięcia i odkształcenia (naprężenia normalne) powstające w stalowej konstrukcji, pomierzone w czasie badań, posłużyły do weryfikacji założeń przyjętych w obliczeniowym modelu obiektu, opartym na MES. Podjęto także próbę określenia rzeczywistej nośności mostu za pomocą stworzonego, numerycznego modelu obiektu.

CARRYING CAPACITY OF SOIL-STEEL BRIDGE UNDER LIVE LOADS ON THE BASIS OF IN SITU RESEARCH AND NUMERICAL ANALYSIS

Summary. The paper presents experimental investigations and numerical analysis of the soil-steel road bridge under live loads. Deflections and strains (normal stresses) in the steel structure measured during the tests were used to verify of the assumptions made in the numerical FEM model of the structure. Evaluation of the real carrying capacity of the bridge by means of the created numerical model is also presented.

1. Wprowadzenie

Konstrukcjami gruntowo-powłokowymi są obiekty inżynierskie, takie jak mosty, przepusty, przejścia podziemne czy wiadukty złożone z podatnej powłoki i specjalnie dobranej zasypki gruntowej. Konstrukcje te projektuje się i buduje w taki sposób, aby zapewnić korzystne współdziałanie między powłoką a otaczającym ją gruntem [1]. Ustroje nośne (powłoki) wykonywane są z połaďdowanych blach stalowych, aluminiowych lub tworzyw sztucznych [2]. Warstwy naziomu nad powłoką, traktowane również jako elementy nośne mostu, pełnią bardzo istotną rolę w przenoszeniu obciążeń jezdni.

^{*} Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Czesław Machelski

2. Charakterystyka obiektu i przeprowadzonych badań

W referacie przedstawiono metodykę i niektóre wyniki badań drogowego mostu gruntowo-powłokowego typu *SUPER COR – BOX CULVERT*. Badany obiekt znajduje się w ciągu drogi powiatowej 45 117 w miejscowości Szczytna. Przeszkodę stanowi potok Bystrzyca Dusznicka o kącie skrzyżowania z osią jezdni na moście równym 90° (rys. 1).



Rys. 1. Widok mostu gruntowo-powłokowego podczas badań
Fig.1. View of the soil-steel bridge during in situ tests

Zasadnicze parametry geometryczne badanego obiektu to [3]:

- rozpiętość przęsła $L = 12,315$ m;
- szerokość jezdni $B_j = 7,00$ m;
- szerokość korony mostu $B = 11,40$ m;
- grubość zasypki z nawierzchnią, w kluczu, $h_z = 1,35$ m.

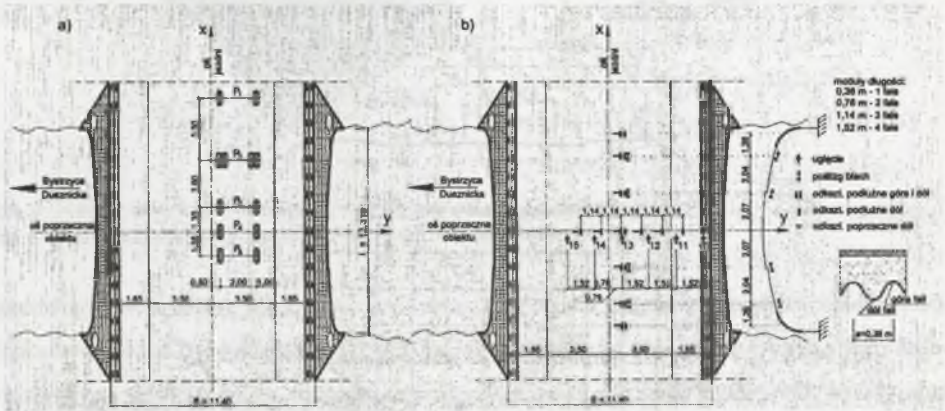
Konstrukcję nośną mostu stanowi powłoka *SUPER COR SC-56B* z blachy faldowej o grubości $t = 7$ mm oraz długości fali $a = 380$ mm i jej wysokości $f = 140$ mm. W środku rozpiętości przęsła i w narożach zastosowano nakładki powłokowe z tej samej blachy. Arkusze blach połączono śrubami M 20 klasy 8.8. W przekroju podłużnym most tworzy schemat ramy jednoprzęsłowej o dwóch promieniach krzywizny w narożu $R_n = 1,016$ m i w środku rozpiętości $R_s = 11,43$ m. Powłokę stalową zamocowano w fundamencie betonowym. Wykończenie obiektu wykonano w postaci ściętych skarp z oblicówką kamienną, która zabezpiecza właściwe położenie zasypki gruntowej pod nawierzchnią jezdni.

Do identyfikacji charakterystyk statycznych obiektu, po ok. 26 miesiącach jego eksploatacji, podczas badań zastosowano kilka schematów ustawień pojedynczego samochodu ciężarowego marki LIAZ (rys. 1 i rys. 2) o ciężarze całkowitym 400 kN i naciskach na osie:

$$P_1 = 55,4 \text{ kN} \quad (a_{12} = 3,50 \text{ m}) \quad P_2 = 93,8 \text{ kN} \quad (a_{23} = 2,60 \text{ m}) \quad P_3 = 122,2 \text{ kN}$$

$$(a_{34} = 1,35 \text{ m}) \quad P_4 = 82,4 \text{ kN} \quad (a_{45} = 1,35) \quad P_5 = 46,2 \text{ kN}$$

gdzie: P_1, \dots, P_5 – naciski kolejnych osi samochodu, liczonych od jego przodu;
 a_{12}, \dots, a_{45} – odległości pomiędzy osiami kół samochodu.



Rys. 2. Położenie obciążenia na obiekcie (a) oraz rozmieszczenie czujników pomiarowych (b)
 Fig. 2. Location of live load (a) and measuring sensors (b) on the bridge

Bazę pomiarową utworzono dla trzech grup analizowanych wielkości geometrycznych:

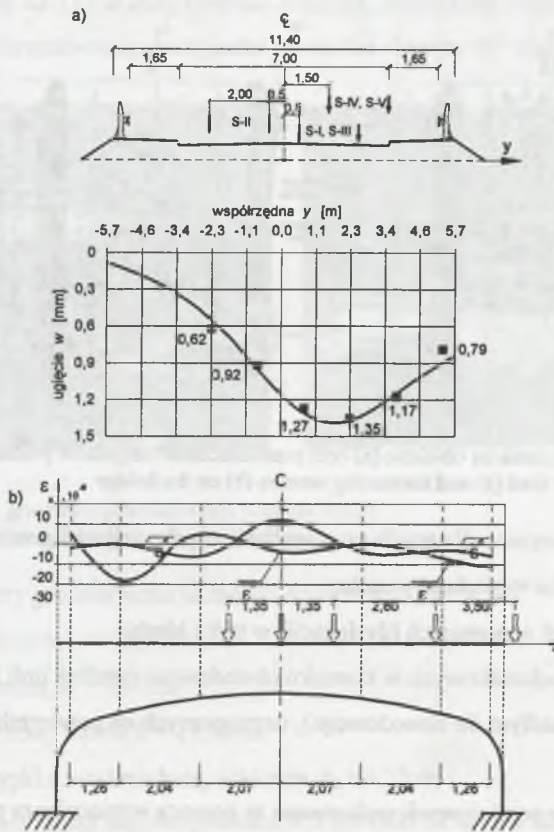
- ugięcie w środku rozpiętości przęsła;
- przemieszczeń wzajemnych (dyslokacji) w styku blach;
- odkształceń jednostkowych w kierunku obwodowym (wzdłuż linii fali blachy) i bocznym (prostopadłym do obwodowego), usytuowanych na powierzchniach dolnej i górnej fali.

Odczyty z czujników pomiarowych realizowano za pomocą wzmacniacza pomiarowego UPM 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik [4].

2.1. Wyniki badań

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań w postaci ugięć konstrukcji w środku jej rozpiętości w oraz zmierzonych w obwodowym paśmie pomiarowym (rys. 2b) odkształceń jednostkowych ϵ . Na górnym wykresie naniesiono wartości przemieszczeń zmierzonych w czasie badań, które zaznaczono w postaci „■”, oraz ugięcia uzyskane z obliczeń numerycznych. W pracy przedstawiono wybrane wyniki dla pierwszego schematu obciążenia S-I (rys. 2a). Kompletnie wyniki uzyskane dla wszystkich schematów obciążeń zaprezentowano w [4].

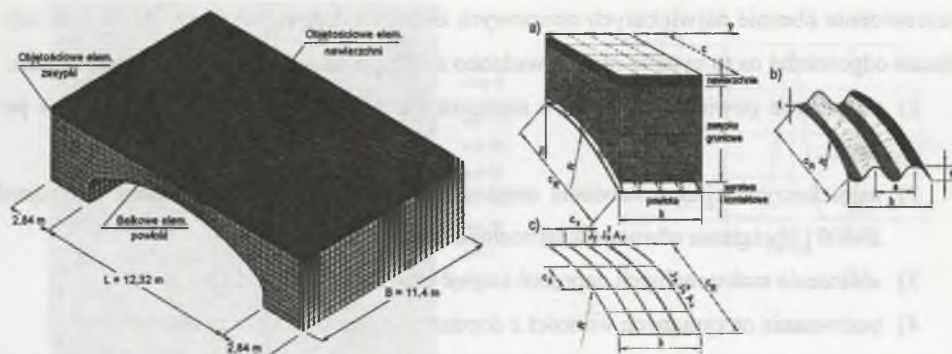
Porównanie rezultatów uzyskanych z badań i obliczeń (obciążenie samochodem w S-I) dało bardzo dobrą zgodność w zakresie ugięć oraz niewielkie różnice w wartościach naprężeń normalnych [4]. Zgodność wyników była jednym z głównych kryteriów doboru parametrów fizycznych modelu obliczeniowego, tzn. cech materiałowych nawierzchni i zasypki grutowej.



Rys. 3. Ugięcia powłoki (a) i odkształcenia w paśmie obwodowym dla schematu S-I (b)
Fig. 3. Displacement of structure (a) and strains in circumferential strip for scheme S-I (b)

3. Numeryczny model obiektu

Geometrię układu nośnego odwzorowano w przestrzeni 3-D. Utworzony model składał się z dwóch rodzajów objętościowych elementów typu *SOLID* oraz belkowych *BEAM3D*. Model obiektu i fragment jego części przedstawiono na rys. 4. Blachę fałdową modelowano jako siatkę prętów utworzoną z pasm obwodowych i elementów poprzecznych, natomiast zasypkę



Rys. 4. Numeryczny model mostu i fragment jego części z „siatką belkową”
Fig. 4. Numerical model of the bridge and part of model with the “beam grid”

gruntową i nawierzchnię jezdni jako continuum izotropowe. Model numeryczny obiektu i obciążenia utworzono w systemie *COSMOS/M*. Cechy fizyczne elementów przyjęto jako linowo-sprężyste ze względu na wstępny charakter obliczeń i późniejsze tworzenie powierzchni wpływu naprężeń normalnych. Elementom nawierzchni drogowej (*SOLID*) nadano następujące charakterystyki materiałowe [4]: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $E = 350 \text{ MPa}$ oraz $\nu = 0,2$ (γ – ciężar objętościowy materiału, E – moduł Younga, ν – współczynnik Poissona). Przyjęto grubość nawierzchni równą 0,35 m. Dla elementów gruntu (*SOLID*), otaczającego powłokę z blachy fałdowanej, przyjęto charakterystyki: $\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$, $E = 155 \text{ MPa}$ oraz $\nu = 0,2$. Wysokość zasypki nad powłoką – 1,00 m. Na materiał powłoki przyjęto stal St3S, dla której: $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$, $E = 205 \text{ GPa}$ oraz $\nu = 0,3$. Charakterystyki geometryczne blachy typu *SC 380x140x7* wynoszą: $A = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ i $I = 24164,64 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$ dla 1 mb powłoki, a dla analizowanego pasma $A = 3,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ i $I = 9182,56 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$, czyli dla elementów belkowych w rozstawie $c_y = a = 38 \text{ cm}$ (A – pole powierzchni przekroju poprzecznego, I – moment bezwładności na zginanie, a – długość fali). Wysokość przekroju poprzecznego pojedynczej blachy jest stała i wynosi $h = f + t = 147 \text{ mm}$ (w miejscu nakładek $h(2f) = 294 \text{ mm}$).

3.1. Obciążenie normowe klasy A

Badany obiekt został zaprojektowany na obciążenie klasy B [5]. Przeprowadzone badania zarówno w postaci obciążeń próbnych [3], jak i powtórne badania eksploatacyjne po około dwupółletniej eksploatacji [4] wykazały, że ugięcia i naprężenia (odkształcenia) powstające w stalowej powłoce są dalekie od dopuszczalnych ugięć i wytrzymałości obliczeniowej stali. Wobec powyższego nasunęło się pytanie, czy przedmiotowy obiekt jest przystosowany do

przenoszenia obecnie największych normowych obciążeń drogowych klasy A. W celu uzyskania odpowiedzi na to pytanie przeprowadzono analizę o następującym toku postępowania:

- 1) utworzenie powierzchni wpływu naprężeń dla najbardziej wyężonych punktów powłoki;
- 2) najniekorzystniejsze ustawienie mostowych obciążeń normowych klasy A (pojazd *K-800* i obciążenie równomiernie rozłożone $q = 4,00 \text{ kN/m}^2$);
- 3) obliczenie maksymalnych naprężeń i ugięć powstałych w powłoce;
- 4) porównanie otrzymanych wartości z dopuszczalnymi wartościami normowymi.

Do analizy wyężenia powłoki przyjęto dwa punkty położone w paśmie obwodowym (pomiarowym) oddalonym o 0,76 m od osi jezdni, tzn. w środku rozpiętości i w środku naroża. W celu uzyskania ekstremalnych wartości sił wewnętrznych lub naprężeń normalnych w powłoce niezbędne jest ustalenie najniekorzystniejszego położenia obciążeń zmiennych (ruchomych). Utworzone powierzchnie wpływu naprężeń normalnych dla analizowanego punktu pasma (x_0, y_0) , a w szczególności profile poprzeczne (w linii klucza) i podłużne (wzdłuż pasma obwodowego), dają informacje dotyczące najniekorzystniejszego położenia obciążenia w przekroju poprzecznym i podłużnym mostu. Z uwagi na to, że analizowanymi siłami wewnętrznymi, porównywalnymi z wytrzymałością stali, są naprężenia normalne utworzono więc powierzchnie wpływu dla tych naprężeń w kierunku obwodowym.

Do tworzenia powierzchni wpływu naprężeń normalnych na krawędzi górnej i dolnej fali blachy wykorzystano wymuszenia kinematyczne i algorytm podany w [6].

Na rys. 5 przedstawiono przykładową powierzchnię wpływu naprężeń normalnych w formie planu warstwicowego, w rzucie prostopadłym do powierzchni jezdni. Szerokość wykresu jest odniesiona do szerokości modelu ($B = 11,40 \text{ m}$). W wysokości rysunku uwzględniono długość mostu $L = 12,32 \text{ m}$ i część naziomu (2,2,84 m) o łącznym wymiarze $L_0 = 18,00 \text{ m}$. W części bocznej rysunku podano przekroje przez powierzchnię wpływu:

- podłużny, w linii pasma obwodowego, oddalony o 0,76 m od osi jezdni (górny);
- poprzeczny, prostopadły do osi mostu (dolny).

Podane na rysunkach rzędne powierzchni wpływu należy interpretować zgodnie ze wzorem:

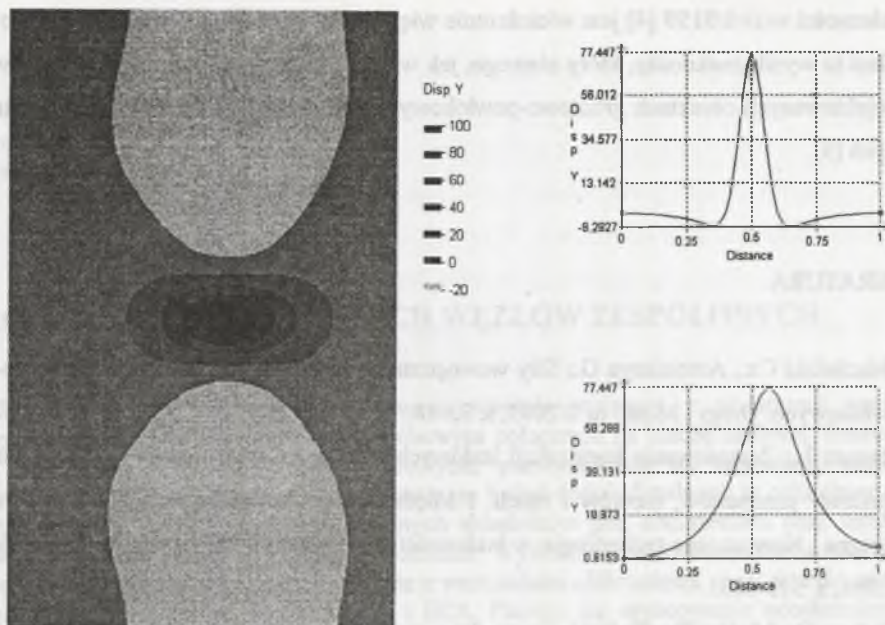
$$\sigma = \zeta \cdot P \quad (1)$$

gdzie:

σ [MPa] – naprężenia normalne w analizowanym punkcie $p(x_0, y_0)$;

ζ [m^{-2}] – rzędna powierzchni wpływu w punkcie $P(x, y)$;

P [MN] – wartość siły skupionej w punkcie $P(x, y)$.



Rys. 5. Powierzchnia wpływu σ_{\max}^d dla pasma obwodowego w połowie rozpiętości mostu (dół fali)
 Fig. 5. Influence surface for σ_{\max}^d for circumferential strip at the middle part of span of the bridge (bottom of steel corrugated plate)

W tabelicy 1 podano wartości maksymalnych sił osiowych N , momentów zginających M , naprężeń normalnych σ oraz ugięć od normowych obciążeń zmiennych (klasa A), najniekorzystniej ustawionych dla analizowanych wielkości w środku rozpiętości powłoki i jej narożu.

Tablica 1

Wartości sił przekrojowych i naprężeń w analizowanych punktach powłoki oraz ugięć w $L/2$

środek rozpiętości powłoki				środek naroża			
N [kN]	M [kNm]	σ [MPa]	w [mm]	N [kN]	M [kNm]	σ [MPa]	w [mm]
-47,67	17,48	-50,20	7,79	-56,50	-16,05	-47,78	5,15

4. Podsumowanie

W wyniku analizy stwierdzono, że badany obiekt, projektowany na normowe obciążenia mostowe klasy B, może przenosić obciążenia klasy A bez dodatkowych wzmocnień czy modyfikacji. Bardzo małe wykorzystanie wytrzymałości stali powłoki pod obciążeniem ruchomym (wyniki badań i obliczeń) stawia normowy wymóg stanu granicznego nośności jako łatwy do zrealizowania. Sztywność globalna konstrukcji określona na podstawie badań i ujęta

w zależności $w/L \approx 1/9159$ [4] jest wielokrotnie większa niż wymagana przepisami normowymi. Jest to wynik znakomity, który obrazuje, jak wielkie zapasy nośności tkwią w poprawnie zaprojektowanych obiektach gruntowo-powłokowych o podobnej klasie rozwiązań konstrukcyjnych [5].

LITERATURA

1. Machelski Cz., Antoniszyn G.: Siły wewnętrzne w mostowych budowlach gruntowo-powłokowych. Drogi i Mosty nr 2/2003, s. 33-58.
2. Janusz L.: Zastosowanie konstrukcji stalowych i rur podatnych ze stali i polietylenu do budowy przepustów, mostów i tuneli. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, Poznań, 10-11 września 1998, s. 373-383.
3. Bęben D., Mańko Z.: Badania mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach fali-tych typu Super Cor SC-56B pod obciążeniem statycznym. I Sympozjum „Diagnostyka i Badanie Mostów”, Opole, 4-6 kwietnia 2001, s. 27-70.
4. Machelski Cz., Antoniszyn G., Toczkiwicz R.: Badania sił wewnętrznych i przemieszczeń od obciążenia użytkowego obiektu mostowego typu Super Cor w ciągu drogi Polanica – Szczytna. Raport SPR nr 110/2003, Inst. Inż. Łąd. Pol. Włr.
5. Krajnik D., Michalski J.B.: Pierwsze „mosty kanadyjskie” w Europie. Inżynieria i Budownictwo nr 3-4/2002, s. 159-161.
6. Machelski Cz.: Zastosowanie metody kinematycznej do wyznaczania funkcji wpływu sił wewnętrznych w układach prętowych. Inżynieria i Budownictwo nr 7/1998, s. 372-375.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Sawicki