

Rozszerzone badania odbiorcze drogowego obiektu gruntowo-powłokowego z zastosowaniem obciążenia ruchomego

Expanded range of testing of soil-steel bridge with use moving loads



Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; Katedra Mostów i Kolei

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl



Piotr Tomala

Mgr inż.

ViaCon Polska Sp. z o.o.

piotr.tomala@viacon.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań odbiorczych drogowego obiektu o konstrukcji gruntowo-powłokowej. Powłokę obiektu zaprojektowano z blachy o obecnie najwyższym profilu UltraCor. Parametry analizowanego obiektu odniesiono do obecnie rekordowych konstrukcji. Standardowe badania rozszerzono o analizę skuteczności obciążeń zmieniających położenie, czyli ruchomych ale w układzie quasi statycznym. Bazą pomiarową była górna część pasma obwodowego powłoki z czujnikami indukcyjnymi i zegarowymi do wyznaczania ugięcia w regularnych odstępach. W pracy podano kolejny przykład powstawania „pętli histerezy” w przypadku stosowania cyklu obciążenia ruchomego, w którym realizuje się przejazd pierwotny po obiekcie z nawrotem po tym samym torze ruchu. W przypadku gęstej siatki punktów pomiarowych możliwe jest stosowanie algorytmu różnicowego do szacowania momentów zginających w blasze falistej. W przykładzie wskazano na wielokrotnie mniejsze siły wewnętrzne i przemieszczenia w przypadku obciążeń ruchomych niż w powstałych podczas budowy obiektu. Celem pracy jest wskazanie na specyficzne zachowanie się konstrukcji gruntowo-powłokowych w odniesieniu do klasycznych mostów o kształcie łukowym.

Słowa kluczowe: Konstrukcje gruntowo-powłokowe, Badania; Ugięcia; Momenty zginające

Abstract: In this paper the results of the live load tests of soil steel bridge are presented. The structure was designed with use of the largest possible corrugation type UltraCor. Parameters of analysed structure were referred to the current record structures in the term of span. Standard test procedure have been expended to check the efficiency of the position-changing loads i.e live loads but in a quasi-static approach. The measuring base was the upper part of the shell periphery equipped with inductive and dial gauges to determine deflections at regular layout. Paper presents another example of the formation of “hysteresis loop” where the live load is passing back and forth along the same path. In the case of a dense layout of measuring points it is possible to use a differential algorithm to estimate the bending moments in corrugated steel plates. Analysed case shows that the internal forces and displacements due to the live loads are much smaller than during construction. The purpose of the paper is to indicate the specific behaviour of soil-steel structures in relation to classical Arch bridges.

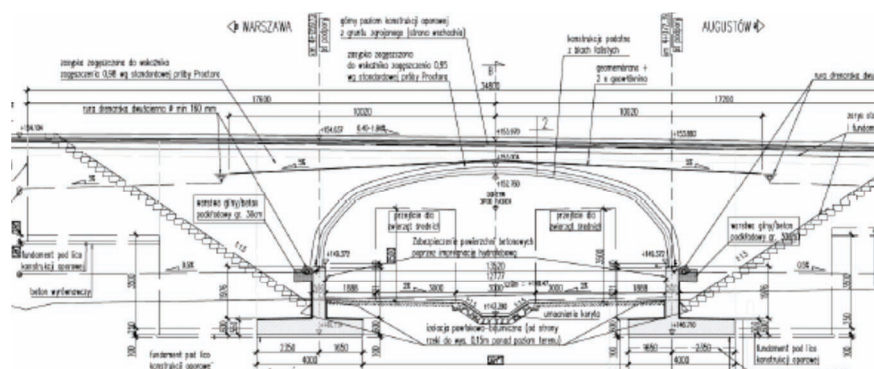
Keywords: Live load; Soil-steel bridges; Investigation; Displacements; Bending moments

Sztywności powłok z blach falistych

W artykule przedstawiono metodologię i wyniki badania typowego mostowego obiektu gruntowo-powłokowego z blachy falistej, jak na rys. 1. Charakterystyczną cechą konstrukcji tych obiektów jest powstawanie w trakcie ich budowy wielokrotnie większych sił wewnętrznych i przemieszczeń niż podczas użytkowania jako mostów drogowych i kolejowych [1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12, 13]. Po zmontowaniu powłoka z blachy falistej jest bardzo wiotka. Podlega ona znacznej

deformacji podczas układania zasypki gruntowej [13]. Z tych powodów

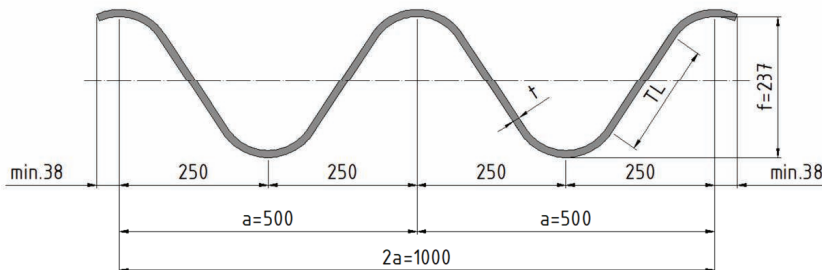
monitoruje się w fazie ich budowy, z zastosowaniem technik geodezyjnych [1, 3, 12, 13]. Dopiero podczas



1. Przekrój poprzeczny analizowanego obiektu w obwodnicy Szczuczyna

Tab. 1. Parametry geometryczne analizowanych powłok

Obiekt	Wymiary powłoki [m]			Rodzaj blachy $a \times f \times t$	EI/a MNm ² /m	k_m kN/m
	L	H	R			
Szczuczyn	13,276	3,630	14,376	UC 500×237×5	5,704	32.4
Ostróda	25,724	9,110	16,632	UC 500×237×9,65	19,89	27.8
Dubaj	32,660	9,570	29,680	UC 500×237×12	22,80	21.7



2. Geometria blachy falistej UC 500×237×8 [mm]

użytkowania powłoka z blachy falistej jako konstrukcja zanurzona w ośrodku gruntowym, w gotowym obiekcie, charakteryzuje się dużą sztywnością [11, 14]. Charakterystyczną cechą konstrukcji gruntowo-powłokowych w odróżnieniu od klasycznych mostów o kształcie łukowym, jest duży wpływ zasypki gruntowej i nawierzchni jezdni na nośność obiektu [14, 15].

Na analizowanym obiekcie zrealizowano jako uzupełnienie klasycznych badań odbiorczych konstrukcji mostowych pomiary ugięć pod obciążeniem zmieniającym położenie. Z uwagi na małe wartości przemieszczeń pod obciążeniami użytkowymi konieczne jest stosowanie czujników indukcyjnych lub zegarowych o dokładności pomiaru do 0.01 mm. Z takich wyników można oceniać również momenty zginające jak w algorytmie podanym w pracy. Oczywiście znacznie skuteczniejsze są pomiary z użyciem tensometrów naklejanych na blachę falistą [2, 3, 5, 9]. Wiąże się to jednak z użyciem specjalistycznego sprzętu pomiarowego i przygotowania bazy pomiarowej. Z tego powodu taką metodykę badań stosuje się obiektów o największych rozpiętościach [5, 7, 9] jak w powłokach o parametrach geometrycznych zestawionych w tab. 1.

Przykłady obiektów zestawionych w tab. 1 są o podobnym kształcie i zbliżonych proporcjach wymiarów o

komunikacyjnym przeznaczeniu jako obiekty drogowe. Konstrukcję największą w świecie rozpiętości wybudowano w Ras Al Khajmah koło Dubaju w United Arab Emirates [1]. Obiekt w Ostródzie jest drugim co do rozpiętości w świecie, wybudowanym w Polsce [1]. Trzeci analizowany w pracy obiekt wybudowano w ciągu obwodnicy Szczuczyna. Charakteryzuje się on znacznie mniejszą rozpiętością od rekordowych wykonanych z blachy o tym samym profilu - UltraCor. Cechą szczególną jest mała grubość naziołmu z podbudową i nawierzchnią wynosząca 1,03 m.

Charakterystycznymi parametrami geometrycznymi powłok jest ich rozpiętość L , wysokość H oraz promień krzywizny górnej części powłoki R , zestawione w tab. 1. Na rys. 2 przedstawiono geometrię blachy falistej, zastosowanej w obiektach, z charakterystycznymi wymiarami UC $a \times f \times t$, jak w tab. 1. Wartość EI jest sztywnością na zginanie powłoki zwykle odnoszoną do długości fali a .

W wytycznych projektowania i zaleceniach technicznych określa się minimalne sztywności montażowe powłok, w postaci parametru, jak we wzorze

$$k_m = \frac{EI}{a \cdot L^2} \quad (1)$$

Wartości uzyskane w analizowanych

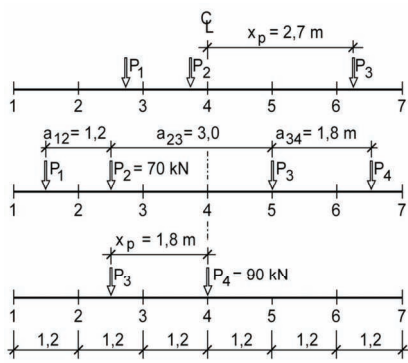
powłokach zestawiono w ostatniej kolumnie tab. 1. W przypadku powłok o niższym profilu stosuje się mniejsze wartości k_m . Przykładowo gdy powłoka jest wykonana z blachy MP 200×55×8 [mm] przy rozpiętości $L = 11$ m uzyskuje się ze wzoru (1) wartość $k_m = 6.25$ kN/m. Podobny parametr do k_m stosuje się w przypadku wybudowanych obiektów – przyjmuje on wielokrotnie większe wartości [11, 14].

Ugięcia powłoki podczas przejazdu samochodu

W badaniach obiektów mostowych o kształcie łukowym pod obciążeniem ruchomym wykorzystuje się ich specyficzną charakterystykę - minimalne efekty dynamiczne. Dzięki temu w mostach sklepionych możliwa jest analiza przemieszczeń w ujęciu quasi statycznym również przy przejazdach eksploatacyjnych pociągów towarowych gdy prędkości osiągają wartość $v = 20$ m/sek. W przypadku obiektów gruntowo-powłokowych efekty dynamiczne są również małe ale większe niż w poprzednich [15]. Z tego powodu w przedstawionych badaniach stosowano prędkości przejazdu samochodu na poziomie kilku m/sek.

W badaniach podanych w pracy wykorzystuje się samochód o naciśkach na osie przednie $P_1 = P_2 = 70$ kN i tylne $P_3 = P_4 = 90$ kN. Geometria pojazdu to rozstawy osi: $a_{12} = 1,2$ m $a_{23} = 3,0$ m oraz $a_{34} = 1,8$ m. Linia pomiarowa to układ punktów regularnie rozmieszczonych na paśmie obwodowym powłoki o rozstawie $c = 1,2$ m. Schemat układu pomiarowego i położenia osi samochodu przedstawiono na rys. 3.

Przejazdy samochodu odbywały się od strony W (Warszawa) do A (Augustów) z jazdą do przodu a w przypadku A – W do tyłu po tej samej linii ruchu. Zatem w dowolnym położeniu pojazdu określonym przez współrzędną x_p ustawienie pojazdu jest identyczne, bez względu na kierunek jazdy



3. Schemat układu pomiarowego i obciążeń

A - W czy W - A. Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiaru ugięć trzech, wybranych punktów 2, 4 (klucz powłoki), 6. Współrzędna x_p określa położenie osi nr 3 od klucza powłoki (oś 3 jest najbliższa środka ciężkości pojazdu: 1,07 m). W badaniach odcinkowego przejazdu samochodu był on zatrzymywany co $\Delta x_p = 1,5$ m na realizację odczytów z urządzeń pomiarowych. Rozpoczęcie przejazdu odbywało się przy jego położeniu $x_p = -10,8$ m a nawrót gdy $x_p = 14,7$ m.

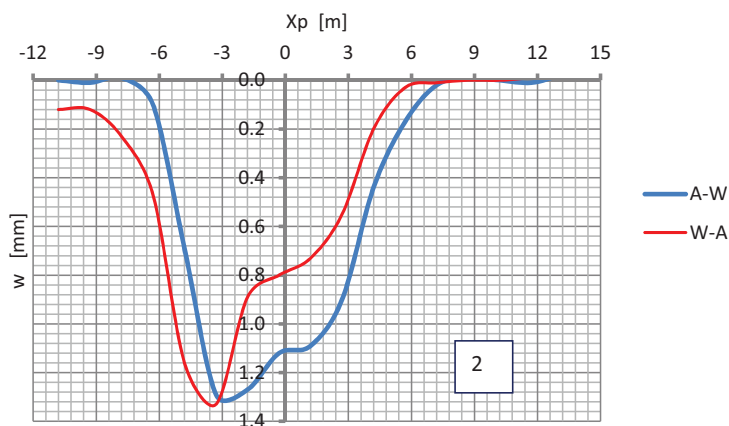
Podczas przejazdu w obydwie strony powstają dwie linie ugięć z punktem wspólnym w miejscu zakończenia jazdy pierwotnej i rozpoczęcia nawrotu. Charakterystycznym wynikiem tej metodyki badań jest powstawanie wyprzedzenia na wykresie ugięć widoczne z porównania wyników dla symetrycznie położonych punktów 2 i 6. Zależy ono od kierunku jazdy samochodu! Zjawisko to jest obserwowane od dawna [9] – jest ono specyficzną cechą obiektów gruntowo-powłokowych. Tego efektu nie można rejestrować podczas przejazdu ciągłego przedstawionego na rys. 5. Po pełnym cyklu obciążenia – dwukrotnym przejeździe nad powłoką pozostają relatywnie małe przemieszczenia resztkowe. W przejeździe z przerwami odcinkowymi w okresie pomiaru 27 minut wykonano 35 odczytów pomiarowych.

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi zmiany ugięcia ale podczas ciągłej, nieprzerwanej jazdy samochodu a nie w ujęciu skokowym, jak wcześniej. Zatem na osi poziomej jako pomiar występuje funkcja czasu a nie położe-

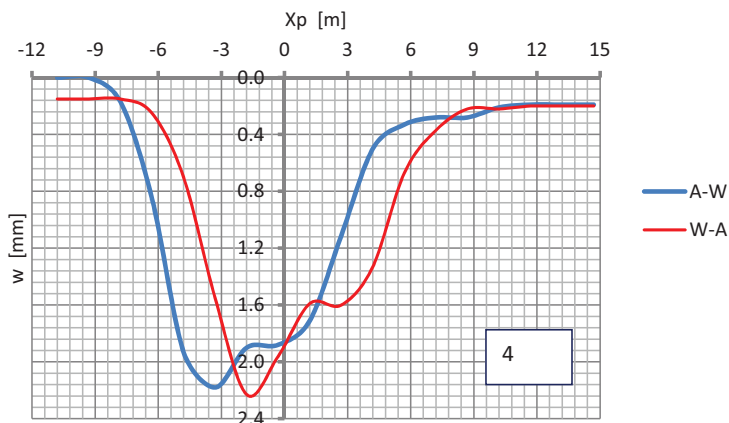
nie pojazdu, jak na rys. 4. W przedziale czasu 0,28 – 0,45 min. Odbywał się przejazd pierwotny nad powłoką. W czasie następnych 16 sekund był krótki postój samochodu po drugiej stronie obiektu. Następnie realizowano przejazd wtórny, powrotny nad powłoką w przedziale czasu 1,02 – 1,17 min. W tym przypadku zwiększono prędkości z 1,5 m/sek gdy podczas

jazy pierwotnej wynosiła ona 1 m/sek. Prędkości oszacowano na podstawie charakterystycznych zmian przemieszczeń podanych na rysunkach 4 i 5. Z porównania tych wykresów widoczne jest ich duże podobieństwo. Jednak obydwie wyniki uzyskano w kolejnym cyklu pomiarowym. Przejazdy nad powłoką odbywały się z różnymi prędkościami.

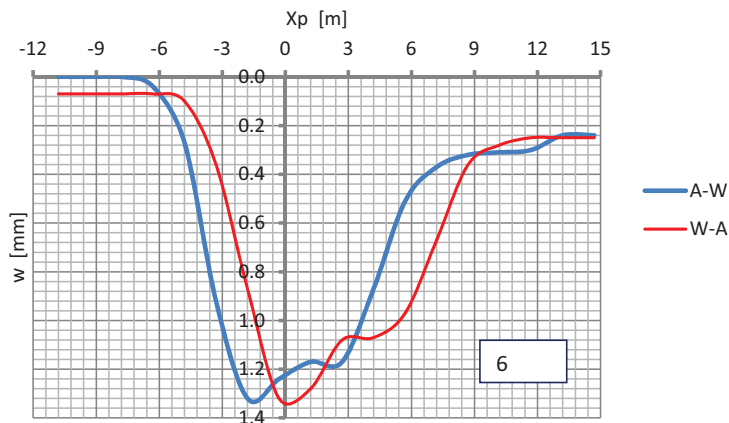
a) punkt 2 z rys. 3



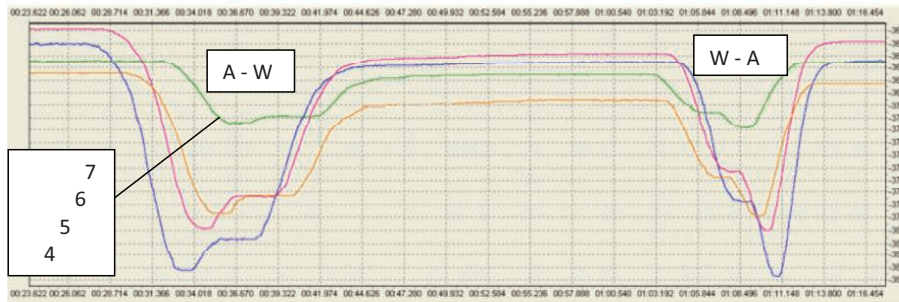
b) punkt 4 (klucz) z rys. 3



c) punkt 6 z rys. 3



4. Zmiany ugięć punktów pomiarowych powłoki podczas przerywanego przejazdu samochodu



5. Zmiany ugięć punktów pomiarowych powłoki podczas ciągłego przejazdu samochodu

Promień krzywizny pasma obwodowego powłoki R_w wynika z jej deformacji gdy r są przemieszczeniami w kierunku zgodnym z tym promieniem [6, 10].

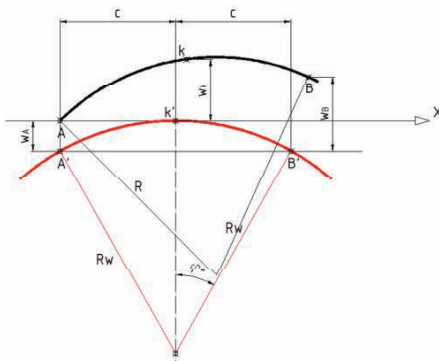
W przypadku gdy promień krzywizny R_w jest bardzo duży w odniesieniu do s we wzorze (2) można zastosować uproszczenia do postaci

$$\kappa_K = \frac{1}{c^2} \{w_A - 2 \cdot w_K + w_B\} \quad (4)$$

długością wycinka koła o promieniu R_w jak we wzorze

$$s = \varphi_w \cdot R_w \quad (3)$$

Wynika to z wartości proporcji, jak w analizowanym przypadku



6. Zmiany geometrii wycinka obwodowego powłoki w obszarze klucza

W wykresach podanych na rys. 5 widoczny jest przemieszczenie startowe, w części środkowej postojowe a ostatnie kończące cykl obciążenia. Zatem faktyczne przemieszczenia wynikające z deformacji powłoki powinny być skorygowane (zerowane). Dwukrotny przejazd nad powłoką trwał niecałą minutę.

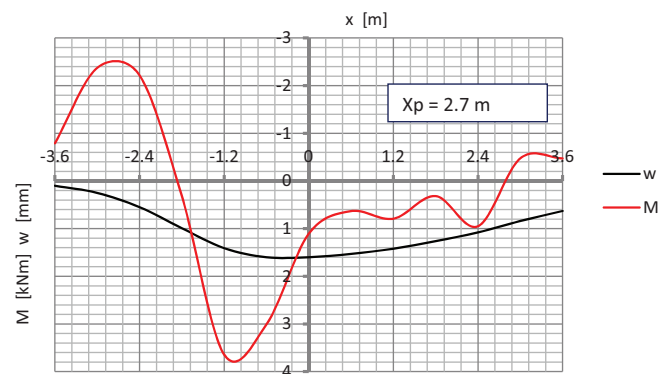
Zmiany krzywizny pasma obwodowego powłoki

Na podstawie deformacji powłoki przedstawionej na rys, 6 można obliczać zmianę krzywizny pasma obwodowego powłoki np. przy zastosowaniu ujęcia metody różnic skończonych MRS [10]. Wyznaczana jest ona w punkcie środkowym K na podstawie przemieszczeń o kierunku radialnym r punktów sąsiednich A i B z ogólnej zależności [10]

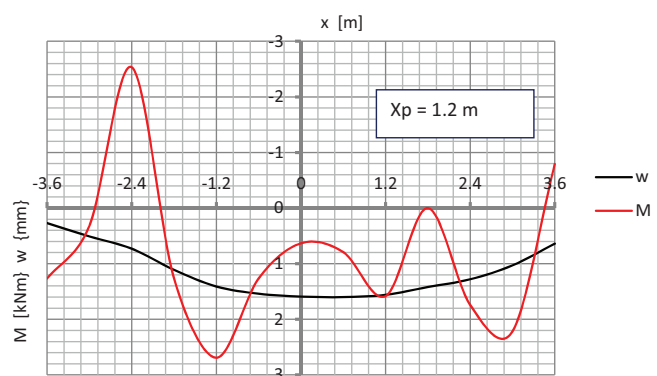
$$\kappa_K = \frac{1}{s^2} \left\{ r_A - \left[2 - \left(\frac{s}{R} \right)^2 \right] r_K + r_B \right\} \quad (2)$$

We wzorze (2) wartości s jest odległością pomiędzy punktem K a punktami A lub B. Zatem w tym przypadku s jest

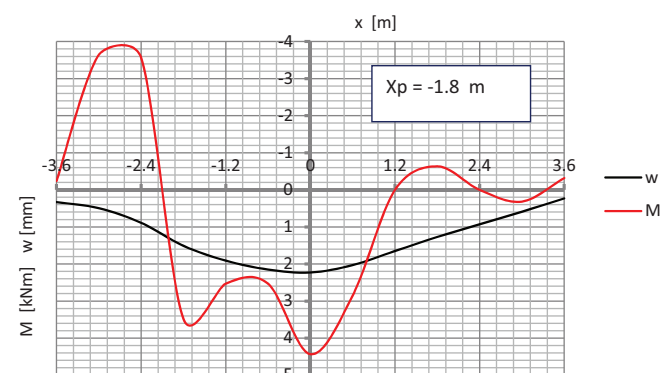
a) $x_p = 2.7 \text{ m}$



b) $x_p = 1.2 \text{ m}$



c) $x_p = -1.8 \text{ m}$



7. Wykresy momentów zginających w paśmie obwodowym obszarze klucza

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń dla analizowanych obiektów

Obiekt	w [mm]	$\kappa \cdot 10^{-3}$ [1/m]	R_w [m]	M [kNm]
Szczuczyn	82	9.71	12.119	46.3
Ostróda	211	7.04	14.889	70.0
Dubaj	92	5.36	25.604	61.1

$$\left(\frac{s}{R}\right)^2 = \left(\frac{1,212}{14,376}\right)^2 = 0,007 \quad (5)$$

Ponadto we wzorze (4) przyjmuje się, że $s \approx c$ oraz $w \approx r$. Zatem w (4) występuje ujęcie równania stosowanego w metodzie różnic skończonych jak w przypadku pręta prostego [10].

Zależność momentu zginającego od zmiany krzywizny

Zmiana krzywizny określana wcześniej jako przekształcony wynik pomiarów ugięcia jest związana ze sztywnością na zginanie blachy falistej EI (por. tab. 1) w równaniu momentów zginających, jak we wzorze

$$M = EI \cdot \kappa \quad (6)$$

Zmiany krzywizny κ obliczone są ze wzoru (4) na podstawie deformacji górnego wycinka pasma obwodowego powłoki. Na podstawie zmian krzywizny κ można również określić naprężenia normalne pochodzące od zginania, ze wzoru

$$\sigma(M) = \frac{f+t}{2} E \cdot \kappa \quad (7)$$

Przy stałej wartości $E = 205\,000$ MPa widoczna jest bezpośrednia zależność od geometrii blachy falistej $a \times f \times t$, jak na rys. 2 i tab. 1.

Na rys. 7 przedstawiono wykresy momentów zginających na długości analizowanego odcinka pasma obwodowego. Przyjęto trzy ustawienia samochodu podczas jego przejazdu w kierunku naturalnym (do przodu) czyli W-A. Na jednym rysunku podano dwa wykresy $M(x, x_p)$ i $w(x, x_p)$. W tym przypadku należy podkreślić, że funkcja momentów zginających M bardzo mocno zależy od kształtu funkcji w . Z tego powodu w obliczeniach za-

stosowano proces wygładzania $w(x)$ z przyjęciem dodatkowego punktu pośredniego pomiędzy punktami pomiarowymi.

W tab. 2 zestawiono wartości charakterystyczne dla analizowanych obiektów z tab. 1 uzyskane z fazy ich budowy. Obliczono je dla szczególnej sytuacji budowlanej gdy poziom zasypki osiągał klucza, czyli gdy $z_g = H$. Momenty zginające uzyskano ze wzoru (6). Wartości momentów pochodzących od zginania są we wszystkich powłokach w miarę wyrównane. Nie jest widoczna zależność zmiany krzywizny κ i momentów M od wypiętrzenia w . Z pozostałych danych wynika, że geometria powłoki podczas budowy podlega znacznie większej deformacji niż pod obciążeniem ruchomym.

Podsumowanie

Deformacja powłoki podczas układania zasypki w obiekcie gruntowo-powłokowym z blachy falistej jest znaczna i może być kontrolowana z użyciem technik geodezyjnych. W przypadku obciążeń użytkowych przemieszczenia i siły wewnętrzne są zdecydowanie mniejsze. Z tego powodu użyteczne są pomiary tensometryczne, z których określa się bezpośrednio siły wewnętrzne ale również przemieszczenia [2]. W pracy podano przykład wykorzystania pomiaru przemieszczeń do określania momentów zginających. W tym przypadku konieczne jest stosowanie czujników indukcyjnych lub zegarowych o dokładności pomiaru do 0.01 mm. W sytuacji gdy występuje mała grubość naziomu z podbudową i nawierzchnią wynoszącej 1,03 m, jak w analizowanym obiekcie konieczna jest gęsta siatka punktów pomiaro-

wych. Pozwala to na odwzorowanie złożonej postaci funkcji momentu zginającego.

W pracy podano kolejny przykład powstawania „pętli histerezy” w przypadku stosowania cyklu obciążenia ruchomego, w którym realizuje się przejazd pierwotny po obiekcie z nawrotem po tym samym torze ruchu. Przedstawiona metodyka analizy służy również do określania sztywności obiektów mostowych [11, 14]. Z dotychczasowych badań wynika, że analizowane obiekty pod względem użytkowym są analogiczne do drogowych i kolejowych mostów betonowych i stalowych. Przy tym charakteryzują się bardzo małym wzbudzeniem dynamicznym [15]. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Machelski C., Mońka M, Tomala P.: Monitoring of soil-steel structures during construction. Journal of Current Construction Issues. 2019 p. 159-168.
- [2] Machelski C.: Soil-steel shell structure displacements functions based on tensometric measurements. Studia Geotechnica et Mechanica Vol. 42 2018 p. 55-57.
- [3] Korusiewicz L.: Verification of the method of estimating bending moments in soil-steel structures on the basis of shell deformation. Roads and Bridges 15 (2016) p. 221-230.
- [4] Machelski C., Janusz L., Czerepak A.: Estimation of Stress level in the Corrugated Soil-Steel Structures Based on Deformations in the Crown. Journal of Traffic and Transportation Engineering 4(2016) p. 186-193.
- [5] Asp O., Laaksonen A.: Instrumentation and monitoring of large-span culvert built under railway in Finland. Archives of Institute of Civil Engineering, 23 2017 p. 53-60.
- [6] White K, Sargand S, Massada T.: Evaluation of load rating procedu-

re for metal culverts under shallow soil covers. Archives of Institute of Civil Engineering 23 2017 pp. 311-323.

- [7] Moor J., Brachman R.: Research advancing the design of large span deep corrugated metal culverts. Archives of Institute of Civil Engineering 12 2012 pp. 9-19.
- [8] Machelski C., Janusz L.: Application of Results of Test in Developing 2D Model for Soil-Steel Railway Bridges. Journal of Transportation Research Board. Vol. 2656:53-6 January 2017.
- [9] Machelski C., Tomala P.: Investigation of displacements functions in

soil-steel bridge structure based on tensometric measurements. 9th Symp. Steel Bridges, Praga, 10-11 September 2018, p. 18-

- [10] Machelski C.: The use of the collocation algorithm for estimating the deformations of soil-shell objects made of corrugated sheets. Studia Geotechnica et Mechanica Vol. 46 2019.
- [11] Machelski C.: Stiffness of railway soil-steel structures. Studia Geotechnica et Mechanica. No. 4/2015 p. 29-36.
- [12] Machelski C.: Klasyfikacja obiektów gruntowo-powłokowych z uwagi na zmiany deformacji po-

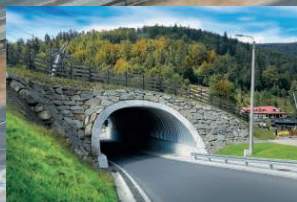
włoki podczas budowy. Przegląd Komunikacyjny 9/2016 s. 5-10.

- [13] Machelski C.: Budowlane obciążenia podatnych obiektów inżynierskich. Przegląd Komunikacyjny 10 (2018) s. 30-35.
- [14] Machelski C.: Szywność obiektu mostowego jako parametru użytkowego konstrukcji inżynierskich. Przegląd Komunikacyjny 2/2016 s. 27-32
- [15] Machelski C.: Oddziaływania pojazdu na powłokę w obiektach gruntowo-powłokowych. Przegląd Komunikacyjny 9/2017 s. 5-10.

REKLAMA



INNOVATIVE INFRASTRUCTURE



- Konstrukcje ze stalowych blach falistych
- Konstrukcje inżynierskie z żelbetowych elementów prefabrykowanych
- Rury stalowe spiralnie karbowane
- Rury przepustowe z PP i HDPE
- System kanalizacji deszczowej i sanitarnej
- Ściany oporowe z gruntu zbrojonego
- Zbiorniki retencyjne
- Geosyntetyki
- Mosty kratowe
- Gabiony
- Płatki ochronno-naprowadzające dla płazów

ViaCon Polska Sp. z o.o., ul. Przemysłowa 6, 64-130 Rydzyna, tel.: +48 65 525 45 45 • office@viacon.pl • www.viacon.pl