

Charakterystyczne zmiany momentów zginających w powłokach obiektów gruntowo-powłokowych

Characteristic changes the bending moments in shell of soil-steel structures



Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział
Budownictwa Lądowego i
Wodnego; Katedra Dróg, Mostów,
Kolei i Lotnisk

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

Streszczenie: W modelu obiektu gruntowo-powłokowego wyróżnia się dwa podukłady konstrukcyjne: podatną powłokę z blachy falistej oraz zasypkę gruntową. Charakterystyczną cechą analizowanych konstrukcji, w odróżnieniu od klasycznych mostów np. murowanych jest bardzo duży wpływ zasypki gruntowej na siły wewnętrzne i deformację powłoki. Zwykle w trakcie budowy naprężenia w powłoce są wielokrotnie większe niż powstałe od obciążeń użytkowych. W pracy poddano analizie zmiany momentów zginających w powłoce podczas eksploatacji obiektu jako skutek deformacji powstałej w fazie budowy. W wynikach badań wskazano na to, że deformacja powłoki zależy od geometrii obiektu ale z dużym udziałem technologii układania zasypki gruntowej. W pracy przedstawiono algorytm szacowania zmian momentów zginających w powłoce na podstawie zmiany krzywizny powstałej w fazie budowy. W przykładach wskazano na korzystną redukcję momentów zginających w powłokach o kształcie łukowym. Wykazano niekorzystną geometrię w przypadku powłok o kształcie skrzynkowym. Wyniki analiz podane w pracy mogą być podstawą metodologii pomiarów w monitoringu obiektów zarówno podczas budowy jak też w fazie użytkowej.

Słowa kluczowe: Konstrukcje gruntowo-powłokowe, Blachy faliste; Momenty zginające; Budowa i eksploatacja

Abstract: There are two structural subsystems in the soil-steel structure model: a flexible corrugated steel shell and a soil backfill. A characteristic feature of the analyzed structures, in contrast to classic bridges, e.g. brick ones, is a very large influence of the soil backfill on internal forces and deformation of the steel shell. Usually, during construction, the stresses in the shell are many times greater than those arising from the operational loads. In the paper analyzes changes bending moments in the steel shell during the operation of the object as a result of deformation occurring during the construction phase. The test results indicate that the bending moments of the steel structure depends on the geometry of the bridge but with a large influence of the technology of the backfill process. The paper presents an algorithm for estimating shell shape changes based on displacements occurring in the construction phase. The examples show a favorable reduction of bending moments in shells with a regular arc. An unfavorable geometry for box-shaped shells has been demonstrated. The results of the analysis presented in the paper may be the basis for the measurement methodology in the monitoring of soil-steel structure bridges, both during construction and in the operational phase.

Keywords: Soil-steel structures; Corrugated steel; Bending moments; Build and exploitation

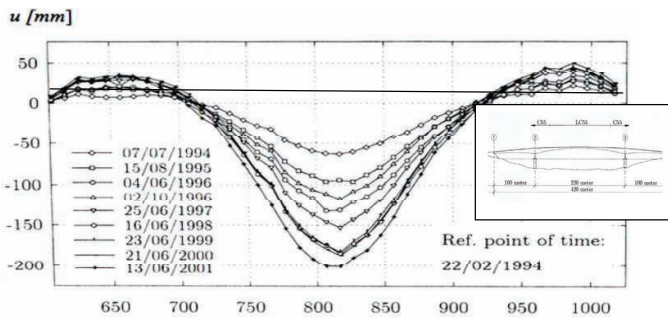
Obiekty mostowe o dużej rozpiętości (długości) i ważnym znaczeniu komunikacyjnym podlegają monitoringowi zarówno podczas budowy jak również w trakcie ich eksploatacji. Przykładem mogą być obserwacje mostów wiszących i podwieszonych [1]. Szczegółne badania dotyczą prototypowych technologii budowy. Dobrym przykładem jest zachowanie się betonowych mostów wykonywanych metodą nawisową [2]. Na rys. 1 przedstawiono wyniki monitoringu w postaci zmiany niwelety mostu wybudowanego z zastosowaniem tej technologii. Z przedstawionych wykresów wynika bardzo szybki przyrost ugięć bezpośrednio po zwar-

ciu wsporników przęsła oraz brak stabilizacji w okresie użytkowania obiektu. W badaniach [2, 3] analizowane ryły skutku zachodzących procesów reologicznych w betonie i stali sprężającej [2]. Z licznych badań widoczny jest bardzo duży wpływ technologii budowy na pracę eksploatowanej konstrukcji [3]. Na podstawie ugięć szacuje się zmianę funkcji pełzania oraz momentów zginających.

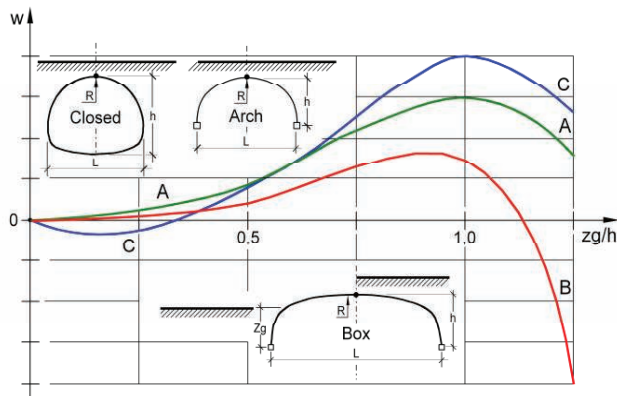
Mostowe obiekty gruntowo-powłokowe są częściej monitorowane w okresie ich budowy niż podczas użytkowania. Wynika to z faktu, że podczas układania zasypki gruntowej występują znacznie większe siły wewnętrzne i deformacja niż pod obciążeniami użyt-

kowymi [4]. Na rys. 2 przedstawiono jeden z wyników ciągłego monitoringu wybranego obiektu nad Piekelną [5]. Deformacja tej powłoki znacznie odbiega od występującej w innych obiektach. Geodezyjne pomiary współrzędnych punktów na powłoce realizowano na powierzchni wewnętrznej blachy falistej od początku budowy, czyli od 1999 roku.

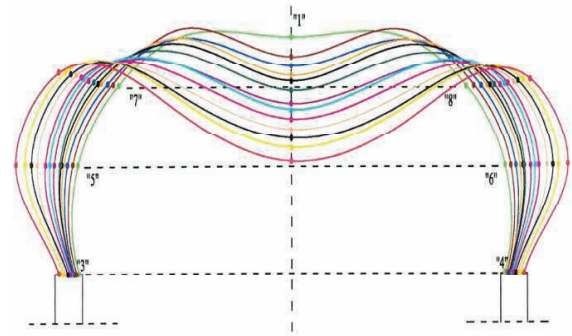
Z porównania wykresów przemieszczeń przedstawionych na obydwu rysunkach widoczne jest ich duże podobieństwo. Opis zachowania się tych konstrukcji może być zbliżony jednak właściwości fizycznych obydwu materiałów (betonu i gruntu) są zupełnie



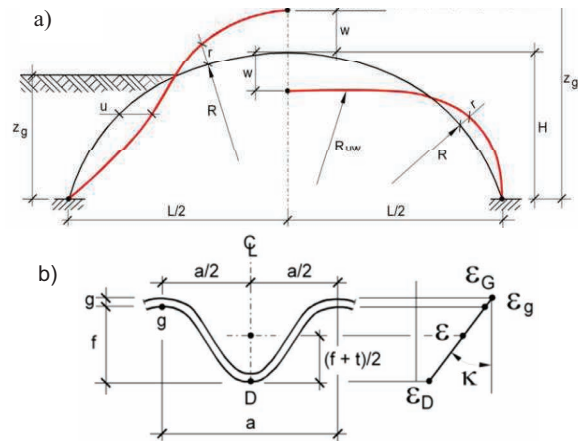
1. Zmiany niwelety prześłu mostu Stovset podczas jego eksploatacji [2]



3. Charakterystyczne zmiany ugięcia klucza powłok podczas układania zasypki



2. Zmiana kształtu powłoki obiektu nad Piekelnicą [5]



4. Schemat pasma obwodowego powłoki

a) schemat powłoki o kształcie łukowym podczas budowy
b) układ pomiarowy odkształceń jednostkowych

inne. Wspólną cechą tych efektów jest bardzo duży wpływ fazy budowy na pracę konstrukcji podczas jej eksploatacji [3, 4]. Od 1998 roku monitorowany jest jako pierwszy wybudowany w Polsce kolejowy obiekt gruntowo-powłokowy Rubierz [6]. Podlega on dalszej obserwacji. Wcześniejsze badania obiektów gruntowo-powłokowych obejmowały zjawiska geotechniczne. Analizy były ukierunkowane na zmiany parć gruntu w obiektach gruntowo-powłokowych z użyciem presjometrów [7]. Badania zachowania się obiektów gruntowo-powłokowych podczas ich eksploatacji realizowane są sporadycznie. W pracy przedstawiono metodykę prowadzenia pomiarów przydatnych do obserwacji zmian geometrii powłoki w czasie budowy i eksploatacji obiektu. Do realizacji takiej procedury wystarczające są pomiary geodezyjne [4].

Grupy geometrii powłok

Do określania grupy geometrii powłoki obiektów gruntowo-powłokowych wykonanych z blach falistych wyróżnia się kierunek obwodowy jako linię biegnącą wzdłuż fali blachy. Jest to kierunek główny pracy powłoki, ujęty w schemacie

statycznym, jak na rys. 3. Z uwagi na charakterystyczne zmiany ugięcia powłoki w kluczu konstrukcje gruntowo-powłokowe dzieli się powłoki na trzy grupy [8]: otwarte o kształcie łukowym (A) i skrzynkowe (B) oraz zamknięte (C). Na rys. 3 przedstawiono zmiany ugięcia w kluczu w , wraz z przyrostem grubości warstwy zasypki z_g (w proporcji do wysokości powłoki h). W powłoce C występuje początkowo wartość ujemna w lecz później wykres jest zbliżony kształtem do powłoki A. W dalszej części pracy powłokę typu C traktuje się jako należącą do grupy A.

Wspólną cechą geometrii pasma obwodowego (przekroju poprzecznego) powłok, jest kształt górnej części o promieniu krzywizny R . W pracy wykorzystuje się tą cechę przyjmując, że pozostała część przekroju może być w tych powłokach dowolna. W każdym z tych przypadków jest inny przebieg funkcji $w(z_g)$ w zależności od poziomu zasypki liczonej od fundamentu jako z_g . Postacie takich funkcji przedstawiono w wielu pracach wymienionych w [4].

Deformację pasma obwodowego powłoki określoną przez przemieszczenia w i u można ująć w zmianie krzywizny

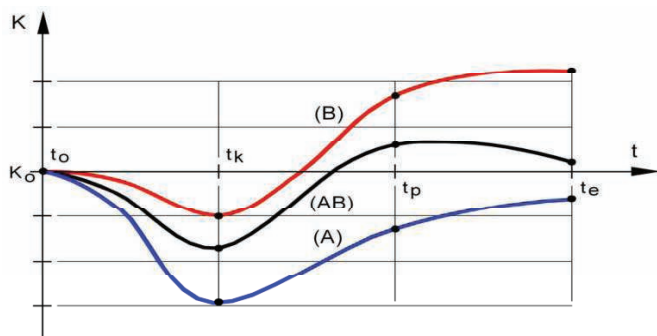
ziny pasma obwodowego blachy falistej. Do tego celu wykorzystuje się zmianę kształtu powłoki, jak na rys. 4a i pomiary geodezyjne. Odnosi się deformację powłoki do projektowego kształtu w postaci wycinka koła o promieniu R – zmieniającego się do wartości R_{uw} . Na podstawie wartości początkowej R_o (po montażu) określa się zmianę krzywizny pasma obwodowego jak we wzorze

$$\kappa_{uw} = \frac{R_o - R_{uw}}{R_o \cdot R_{uw}} \quad (1)$$

W przypadku korzystania z pomiarów tensometrycznych określa się odkształcenia jednostkowe na krawędzi górnej i dolnej fali jak na rys. 4b. Przy założeniu zasady płaskich przekrojów uzyskuje się zmianę krzywizny z równania

$$\kappa_e = \frac{\varepsilon_g - \varepsilon_D}{f} \quad (2)$$

Zwykle analizowanym punktem powłoki jest klucz, jako najwyższy w przekroju poprzecznym, jak na rys. 3. W tym przekroju występują największe zmiany krzywizny. Parametry geometryczne powłoki: L , H , R są głównymi wymiarami przekroju poprzecznego, jak na rys. 4a.



5. Zmiany krzywizny powłoki podczas budowy i eksploatacji

Na tym rysunku przedstawiono charakterystyczną zmianę kształtu powłoki w trakcie budowy. W pracy analizowana jest deformacja pasma obwodowego w trakcie eksploatacji obiektu ale bez udziału obciążeń ruchomych.

Zmiany krzywizny w funkcji czasu

W pracy analizuje się zmianę krzywizny w wybranym punkcie pasma obwodowego jako funkcję czasu. Wyróżnia się następujące momenty charakterystyczne z okresu budowy i eksploatacji obiektu:

- t_o jako chwila zakończenia montażu powłoki;
- t_k gdy w kluczu powłoki występuje największe wypiętrzenie w;
- t_p jest czasem zakończenia budowy;
- t_e analizowana jest sytuacja podczas eksploatacji obiektu.

Na rys. 5. Przedstawiono schematy zmian krzywizny w analizowanych rodzajach powłok: A i B. Dodatkowo wprowadzono powłokę o pośrednich cechach, oznaczoną jako AB.

Zmiany krzywizny ujęto w pracy w równaniu

$$\kappa(t) = f(t)(\kappa_k + \kappa_p) - \kappa_k \quad (3)$$

z zastosowaniem funkcji deformacji, zależnej od czasu $f(t)$ i dwóch parametrów $\kappa_k = \kappa(t_k)$ oraz $\kappa_p = \kappa(t_p)$. Funkcja zmiany krzywizny jest ciągła z punktami charakterystycznymi widocznymi na rys. 5. Z założenia deformacji powłoki i wzoru (1) wynika, że $\kappa_o = \kappa(t_o) = 0$.

Funkcja deformacji

Bezpośrednio ze wzoru (3) można użyć funkcji deformacji jako

$$f(t) = \frac{\kappa_k + \kappa(t)}{\kappa_k + \kappa_p} \quad (4)$$

Cechą szczególną $f(t)$ jest jej unormowanie w czasie zakończenia budowy i rozpoczęcia eksploatacji t_p . Wówczas

$$f(t_p) = f_p = 1 \quad (5)$$

W pozostałych punktach charakterystycznych $f(t)$ przyjmuje następujące wartości:

- $t = t_o$ $f(t_o) = f_o = \frac{\kappa_k}{\kappa_k + \kappa_p}$ (6)

- $t = t_k$ $f(t_k) = f_k = 2f_o$ (7)

- $t = t_e$ $f(t_e) = f_e = \frac{\kappa_k + \kappa_e}{\kappa_k + \kappa_p} = f_o \left(1 + \frac{\kappa_e}{\kappa_k} \right)$ (8)

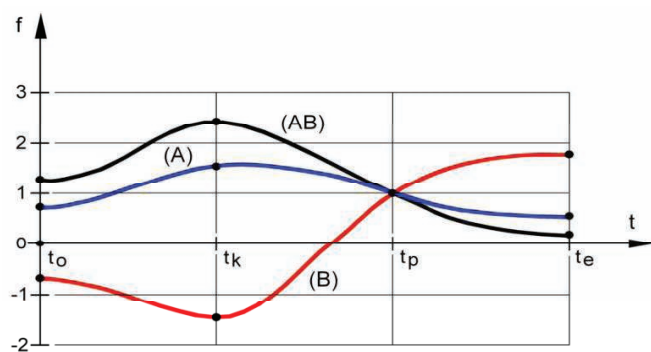
W ujęciu ogólnym funkcję deformacji można odnieść do wartości początkowej f_o ale określonej po zakończeniu budowy jak we wzorze o postaci

$$f(t) = f_o \left(1 + \frac{\kappa(t)}{\kappa_k} \right) \quad (9)$$

Funkcję deformacji $f(t)$ wyznacza się na podstawie pomiarów na obiekcie z wykorzystaniem zmian krzywizny i wzorów (1) lub (2). Na kształt wykresu wpływa geometria powłoki ale również technologia układania zasympki: sposób jej zagęszczania, stosowanie zbrojenia gruntu jak również okresy przerw roboczych [4].

Na rys. 6 przedstawiono charakterystyczne postacie $f(t)$ dla trzech typów geometrii powłok A, AB i B. Kształt funkcji wynika z następujących relacji krzywizn powstałych w trakcie budowy:

- typ A (arch) gdy $\kappa_k > \kappa_p > 0$;
- typ AB gdy $\kappa_k > -\kappa_p$ oraz $\kappa_p < 0$;



6. Charakterystyczne postacie funkcji deformacji

- typ B (box) gdy $\kappa_k < -\kappa_p$ oraz $\kappa_p < 0$.

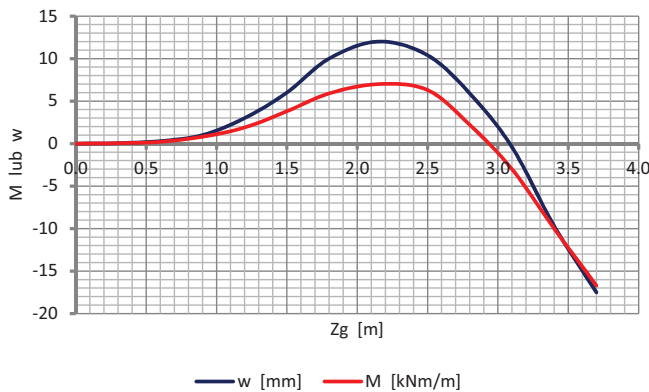
Zatem na podstawie relacji wartości κ_p w odniesieniu κ_k następuje kwalifikacja powłoki do typu A (lub AB) oraz B. Z porównania wykresów $f(t)$ dla powłok łukowych i skrzynkowych widoczna jest symetria względem osi czasu ale tylko w zakresie $t_o < t < t_k$. W następnym przedziale czasu wartości $f(t)$ podlegają redukcji w powłokach A, w przypadku powłok o kształcie skrzynkowym funkcja $f(t)$ może nie podlegać stabilizacji. Jest to istotna różnica w ocenie bezpieczeństwa obydwu rodzajów powłok. Powłoki o cechach AB są wyjątkowe. Ważne jest to, że na kwalifikację wpływa również technologia układania zasympki gruntowej. Oczywiście gładkie wykresy przedstawione na rys. 6 w praktyce podlegają zaburzeniom a w szczególności powstawaniem nieciągłości w okresie przerw roboczych [4, 9].

Powłoka o kształcie skrzynkowym

Najczęściej stosowanymi w mostownictwie są powłoki typu A i C. Powłoki typu B są budowane w obiektach o przeznaczeniu kolejowym. Taki przykład obiektu zrealizowano w Lidköping (Szwecja) z założeniem, że będzie on przedmiotem szczegółowych badań [9]. W pracy wykorzystuje się wyniki pomiaru tensometrycznych, które zostały przekształcone w funkcję momentów zginających, jak na rys. 7 (uzupełnione o ugięcia w kluczu powłoki). W tym przypadku do uzyskania zmiany krzywizny wykorzystuje się zależność

$$\kappa = EI \cdot M(z_g) \quad (10)$$

gdzie $EI/a = 4,95 \text{ MNm}^2/\text{m}$, jak w przypadku blachy SC 380x140x7. Zatem funkcje $\kappa(t)$ może być podobna do $\kappa(z_g)$



7. Zmiana ugięcia i momentu zginającego w kluczu powłoki

oraz $M(z_g)$ gdy przyrost grubości zasypki jest proporcjonalny do upływu czasu t .

Powłoka o kształcie łukowym

Funkcje $f(t)$ w powłokach o kształcie łukowym traktuje się jako wzorcowe (najczęściej występujące) w konstrukcjach gruntowo-powłokowych. W przypadku powłok o kształcie skrzynkowym funkcja $f(t)$ nie podlega redukcji podczas eksploatacji. Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań szczególnej powłoki obiektu nad Piekelną [5]. Powłoka kwalifikowana na podstawie kształtu jako łukowa (typ A), w tym przypadku zachowuje się jak typu B czyli o geometrii skrzynkowej. Charakterystyczne wartości $f(t)$ zestawiono w tabl. 1.

W tabl. 1 porównano parametry geometryczne trzech przykładów obiektów. Jako konstrukcję A przyjęto Shamal Bridge koło Dubaju – o największej w świecie rozpiętości.

Zmiany momentów zginających

Funkcja deformacji $f(t)$ jest przydatna do śledzenia zmiany momentów zginających podczas eksploatacji obiektu, jak we wzorze

$$M(t) = EI[f(t)(\kappa_k + \kappa_p) - \kappa_k] \quad (11)$$

Przebieg propagacji momentów zginających jest możliwy do ustalenia już w chwili zakończenia budowy, czyli w czasie t_p , jak na rys. 6. Gdy obiekt kwalifikowany jest do grupy A wartości mo-

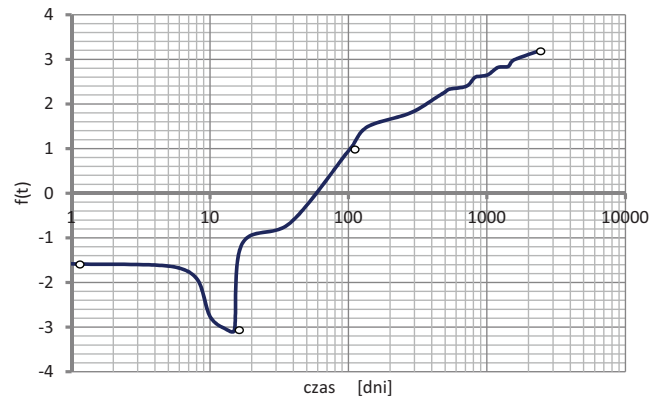
mentów będą podlegać redukcji. Jest to pozytywne dla powłoki ponieważ będzie ona w większym stopniu poddawana ścisnaniu, jak w naturalnym układzie geometrii łukowej. Obiekty grupy B wykazują tendencję do przyrostu M w czasie eksploatacji. Mogą być one większe niż podczas budowy w chwili t_p . Potwierdza to przykład wykresu $f(t)$ obiektu nad Piekelną [5], przedstawionym na rys. 9. W ogólności funkcja $f(t)$ służy do ustalenia zbieżności momentów zginających podczas eksploatacji obiektu – jest podstawą decyzji o monitoringu obiektu.

Jeżeli wykorzystuje się pomiary tensometryczne i uzyskaną stąd zmianę krzywizny κ_ε jak we wzorze (2) można śledzić zmianę promienia krzywizny R_{uw} , wykorzystując równanie (1). Wówczas przyjmuje się zgodność zmian krzywizn $\kappa_{uw} = \kappa_\varepsilon$ a stąd otrzymuje się promień krzywizny po deformacji powłoki jako

$$R(t) = \frac{R_o}{R_o \cdot \kappa_\varepsilon + 1} \quad (12)$$

Należy jednak pamiętać o różnicy w sposobie wyznaczania promienia krzywizny bowiem R_{uw} określany jest na podstawie pomiarów geodezyjnych oraz przemieszczeń u i w , wycinka obwodowego, jak na rys. 4a. Natomiast $R(t)$ jest wyznaczany w analizowanym przekroju z zależności geometrycznych, jak na rys. 4b. Uzasadnienie poprawności takiego rozwiązania podano w pracy [10].

Korzystając z zasady podanej wcze-


8. Funkcja $f(t)$ obiektu nad Piekelną

śniej na podstawie R_{uw} można również śledzić zmiany momentów zginających jak we wzorze

$$M(t) = EI \frac{R_o - R_{uw}}{R_o \cdot R_{uw}} \quad (13)$$

Podsumowanie

Podczas budowy konstrukcji gruntowo-powłokowych występują znacznie większe siły wewnętrzne i deformacje w powłoce niż pod obciążeniami użytkowymi. Stąd monitoring tych obiektów zwykle ogranicza się do fazy budowy na dodatek obiektów o nowych rodzajach blach i nietypowej geometrii. Podczas eksploatacji obiektów pomiary realizowane są sporadycznie. Wyjątkowo, pierwszy w Polsce wybudowany obiekt gruntowo-powłokowy Rubierz [6] podlega wyrównkowej, dalszej obserwacji.

W pracy przedstawiono algorytm śledzenia zmian geometrii powłoki obejmujący proces budowy i eksploatacji obiektu. W ten sposób wykazano, że zachowanie się obiektu zależy nie tylko od projektowej geometrii powłoki ale również od technologii układania zasypki gruntowej. Na podstawie charakterystycznej deformacji powłoki, ujętej w funkcji $f(t)$ prognozuje się zmiany momentów zginających – głównego składnika naprężenia normalnego. Podczas eksploatacji w powłokach typu A funkcja $f(t)$ zginanie podlega redukcji, co jest korzystne dla pracy powłoki w obiekcie. W obiektach typu B funkcja $f(t)$ moment zginający przyrasta z czasem a prognozowaną jej zmianę można oszacować już po zakończeniu budowy. Na tej podstawie można podjąć decyzję o konieczności monitorowania obiektu.

W przykładzie geometrii obiektu typu

Tab. 1. Parametry geometryczne powłok

Obiekt	Wymiary powłoki [m]			Wartości funkcji deformacji			
	L	H	R	f _o	f _k	f _p	f _e
Dubaj	32,60	9,570	29,68	0,759	1,518	1	-
Piekelnica	13,46	5,004	9,930	-1,581	-3,162		3,185
Lidköping	8,085	2,440	8,820	-0,734	-1,468		-

A, analizowanego w pracy [5] już na etapie zakończenia budowy okazało się, że należy on do grupy B. Z postaci funkcji $f(t)$ widoczny jest brak jej stabilizacji a więc obiekt poddano monitoringowi [5]. Przedstawione na rysunkach **1 i 2** przykłady wyjątkowych obiektów. Wybrano je spośród przeważającej liczby dobrze pracujących konstrukcji mostowych. Przykłady podane w pracy mają wskazać na potrzebę realizacji monitoringu obiektów mostowych również w fazie ich eksploatacji. ◀

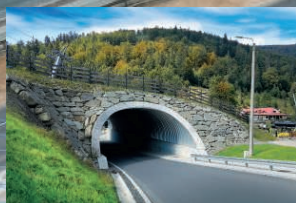
Materiały źródłowe

- [1] Inaudi D.: Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects, International Bridge Conference IBC 2010, June 15-17 2009 Pittsburgh, USA
- [2] Takacs P.F.: Deflections in Concrete Cantilever Bridges: Observation and Theoretical Modeling. Doctoral Thesis 2002, Trondheim, Norwegia.
- [3] Machelski C.: The effects of dead loads in cantilever concreting bridges. Reologiczne efekty stanu montażowego w mostach budowanych z zastosowaniem technologii nawisowej. Road and Bridge – Drogi i Mosty. 3/2019 p. 109-120.
- [4] Machelski C.: Badania mostowych obiektów gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2020. (w druku)
- [5] Michalski J.B., Michalski B.: Symmetry in soil-steel bridges. Archives of Institute of Civil Engineering No 12 2012 pp. 205-216.
- [6] Madaj A., Sturzbecher K. Change in stress level in corrugated steel structure under long-term loads. Archives of Institute of Civil Engineering No 12 2012 pp. 175-184
- [7] Vaslestad J.: Long-term behavior of flexible large-span culverts. Conf. Transportation Research Board, Washington DC 1990, Record 1321 pp. 12-14
- [8] Machelski C.: Klasyfikacja obiektów gruntowo-powłokowych z uwagi na zmiany de-formacji podczas budowy. Przegląd Komunikacyjny 9/2016 s. 5-10.
- [9] Bayoglu Flaner E.: Full-scale testing of two corrugated steel box culverts with different crown stiffness. TRI-TA-BKN report 93. Department for Architectural and Civil Engineering, KTH, Stockholm 2006.
- [10] Korusiewicz.: Verification of the method of estimating bending moments in soil-steel structures on the basis of shell deformation. Weryfikacja metody szacowania momentów zginających w obiektach gruntowo-powłokowych na podstawie deformacji powłoki. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, 15, 3, 2016, s. 221-230

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