

Wykorzystanie funkcji podatności do oceny bezpieczeństwa obiektów gruntowo-powłokowych

Use of the flexibility function to assess the safety of soil-steel bridges



Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

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

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

Streszczenie: W pracy analizowano zmiany podatności jako funkcji bezpieczeństwa mostowych obiektów gruntowo-powłokowych podczas ich budowy. Z wyników badań obiektów widoczny jest istotny wpływ technologii budowy na deformację powłok. W okresie budowy powstają największe siły wewnętrzne w powłoce. Stąd dla bezpieczeństwa obiektów o rekordowych parametrach stosowany jest monitoring. W pracy rozpatrywano dwa ujęcia podatności w postaci funkcji $f(h)$ oraz parametru Duncana λ . Na przykładzie wybranego obiektu wskazano, że mała wartość λ nie jest wystarczającym warunkiem bezpiecznego przebiegu budowy. Ponieważ do określenia funkcji podatności wykorzystuje się wyniki pomiarów uwzględnia się rzeczywiste zmiany cech fizycznych gruntu. Stąd określony jest faktyczny udział zasyпки gruntowej w hybrydowej konstrukcji. Przedstawione ujęcie rozwiązania jest ogólne, wykorzystane zostało do analizy efektów reologicznych w mostach betonowych i zespolonych.

Słowa kluczowe: Bezpieczeństwo; Podatność; Mosty gruntowo-powłokowe; Monitoring

Abstract: The paper analyzed changes in flexibility as a safety function of bridge soils and coatings during their construction. The results of the examination of objects show a significant influence of construction technology on the deformation of coatings. During the construction period, the greatest internal forces are formed in the shell. Hence, monitoring is used for the security of facilities with record parameters. Two approaches to flexibility in the form of the function $f(h)$ and the Duncan parameter λ were considered in this paper. On the example of the selected object, it was indicated that a small value of λ is not a sufficient condition for the safe course of construction. Since measurement results are used to determine the susceptibility function, actual changes in the physical characteristics of the soil are taken into account. Hence, the actual share of ground backfill in the hybrid construction is determined. The presented approach to the solution is general, it was used to analyze rheological effects in concrete and composite bridges.

Keywords: Safety; Flexibility; Soil-steel structure; Monitoring; Calculations

Technologia budowy obiektów gruntowo-powłokowych

Obiekty gruntowo-powłokowe to konstrukcje wykonane z powłoki o kształcie łukowym zanurzone w ośrodku gruntowym. W zastosowaniach komunikacyjnych: drogowych lub kolejowych tych obiektów, na naziomiu realizuje się nawierzchnię z podbudową, odpowiednią do rodzaju ruchu. Jako konstrukcje mostowe przystosowane są do przeniesienia dużych obciążeń [6]. Istotne

dla bezpieczeństwa takich obiektów jest faza budowy, w trakcie układania zasyпки gruntowej. Wówczas występuje największa deformacja powłoki i z tym związane siły wewnętrzne. W postaci deformacji powłoki, wyróżnia się dwie fazy: początkową, do momentu osiągnięcia zasyпки klucza powłoki i końcową gdy realizowane są warstwy nad powłoką [6]. Efekty zginania powstałe podczas pierwszej fazy podlegają redukcji w drugiej fazie zwiększając zwykle bezpieczeństwo obiektu.

W pracy rozpatruje się podatność jako jeden z parametrów określających statyczną charakterystykę konstrukcji [4]. Na podatność mostu istotny wpływ ma technologia budowy stąd każdy rodzaj konstrukcji należy analizować indywidualnie [4, 5]. Z tego powodu w pracy rozpatruje się wyłącznie obiekty gruntowo-powłokowe, chociaż korzysta się z ogólnego ujęcia rozwiązania, stosowanego w mostach [5].

Funkcja podatności w fazie budowy obiektów gruntowo-powłokowych

W ogólności podatność mostu [5] jest definiowana jako proporcja ugięcia w odniesieniu do intensywności obciążenia równomiernie rozłożonego na konstrukcji g , jak we wzorze

$$f = \frac{w}{g} \quad (1)$$

Ugięcie przęśla mostu w tym wzorze

jest proporcjonalne do obciążenia rozłożonego czyli występującego na moście ciężaru stałego. Taką definicję stosowano do analizy mostów zespolonych i betonowych [5]. Do analizy podatności konstrukcji gruntowo-powłokowych wykorzystuje się w pracy takie samo ujęcie ogólne rozwiązania [4], chociaż w tym przypadku do fazy powstawania obiektu.

Na rys. 1 przedstawiono model obliczeniowy konstrukcji. Wyróżniono na tym rysunku obydwie fazy

budowy obiektu. W każdej fazie konstrukcję tworzy powłoka zanurzona w ośrodku gruntowym do poziomu h . Obciążeniem konstrukcji jest ułożona warstwa gruntu o grubości Δz , traktowana jako siła równomiernie rozłożona o intensywności

$$g = C_g \cdot 1 \cdot \Delta z \quad (2)$$

gdzie C_g jest ciężarem objętościowym gruntu a 1 [m] jest szerokością wycinka konstrukcji.

Z porównania przyrost ugięcia Δw spowodowanego obciążeniem g , jak w (2) otrzymuje się funkcję podatności odniesioną do wysokości konstrukcji h , ujętą we wzorze

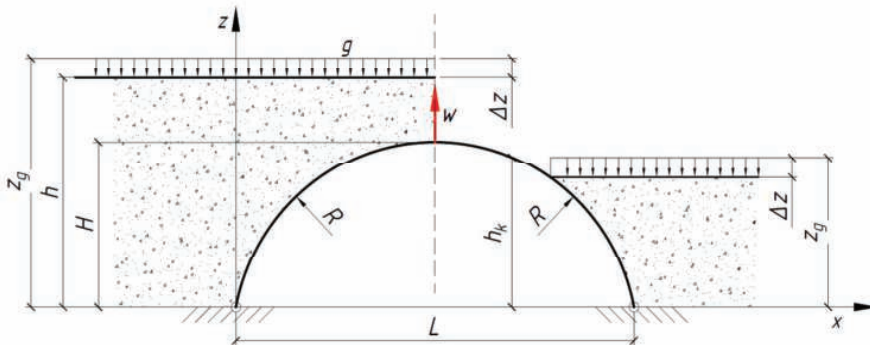
$$f(h) = \frac{-\Delta w}{C_0 \cdot \Delta z} \quad (3)$$

Gdy grubość warstwy zasypki jest różniczkowo mała, a poziom zasypki z_g zbliżony jest do wysokości konstrukcji h otrzymuje się pochodną -styczną w wykresie ugięcia $w(z)$, jak we wzorze

$$f(h) = \frac{-dw}{C_0 \cdot dz} \quad (4)$$

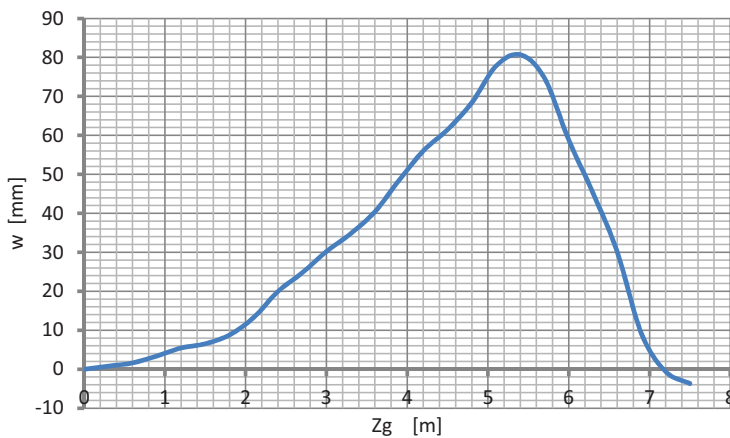
Charakterystyczne zmiany podatności konstrukcji podczas budowy

W początkowej fazie budowy obiektu gruntowo-powłokowego powłoka poddana jest parciu gruntu na ściany boczne co powoduje jej wypiętrzenie. Dopiero gdy zasypka gruntowa osiąga poziom klucza powłoki wypiętrzenie jest redukowane, co określane jest jako ugięcie. Zmiany podatności są wynikiem procesów fizycznych zachodzących w gruncie oraz cyklicznych obciążeń technologicznych podczas budowy obiektu. Analizy podane w pracy są wynikiem monitoringu obiektów i geodezyjnych pomiarów przemieszczenia klucza powłoki [3, 4, 6,

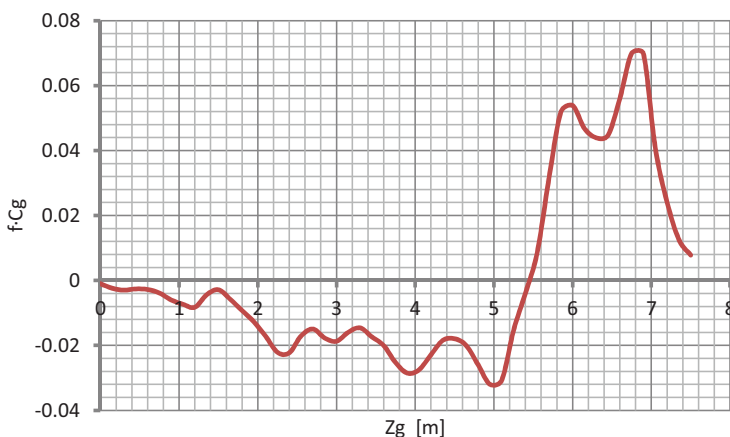


1. Schemat obliczeniowy konstrukcji gruntowo-powłokowej

a)



b)



2. Zmiany ugięcia i podatności obiektu w Rydzynie

7, 9, 11].

Na rys. 2 przedstawiono przykład wyników pomiarów wybudowanego obiektu w Rydzynie, wyłącznie do celów badawczych. Charakterystyczne wymiary konstrukcji to: rozpiętość $L = 17,59$ m wysokość $H = 5,46$ m, promień krzywizny $R = 13,73$ m. Powłokę wykonano z lachy SC 380x140x7. Na rys. 2a przedstawiono zmianę wypiętrzenia klucza powłoki podczas budowy w zależności od poziomu zasypki gruntowej z_g . Na rys. 2b przedstawiono zmianę podatności obiektu obliczoną ze wzoru (3). Rzędne tego wykresu skorygowano o ciężar objętościowy zasypki gruntowej C_g . Wartości f są w jednostkach $[m^2/MN]$ gdy ciężar objętościowy C_g $[MN/m^3]$. Wobec tego gdy $C_g = 0,02$ MN/m^3 wartość maksymalna f wynosi $3,5$ m^2/MN .

Z wykresu przedstawionego na rys. 2b widoczna jest szczególna wartość $dw/dz = 0$, gdy poziom zasypki wynosi h_k . Wówczas $f = 0$. Od tego momentu we wzorach (3) i (4) przyjmuje się podatność jako wartość dodatnią. Oczywiście w fazie początkowej wartości wypiętrzenia są dodatnie (a jako $-\Delta w$ są ujemne) ale podatność jest zawsze dodatnia, jak we wzorze

$$f(h) = \frac{1}{C_g} \left| \frac{-\Delta w}{\Delta z} \right| \geq 0 \quad (5)$$

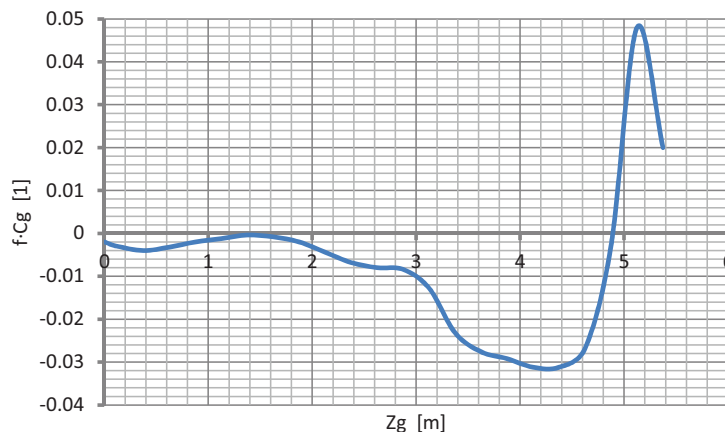
W praktyce funkcję $w(z_g)$ wyznacza się na podstawie pomiaru geodezyjnego po ułożeniu warstwy zasypki o grubości Δz oraz usunięciu urządzeń transportowych i zagęszczających grunt. Funkcję $f(h)$ określa się ze wzorów (3) lub (4) a więc niezależnie od faktycznego przebiegu układania zasypki i grubości warstw. Wobec tego wartości Δz w obliczeniach mogą być przyjmowane dowolnie. Zatem gdy $\Delta z \rightarrow 0$ funkcje podatności $f(h)$ i $f(z_g)$ przyjmują jednakową postać. Z uwagi na stosowanie funkcji $w(z_g)$ w pracy przyjęto również $f(z_g)$ a więc takie jak uzyskuje się ze

wzoru (4).

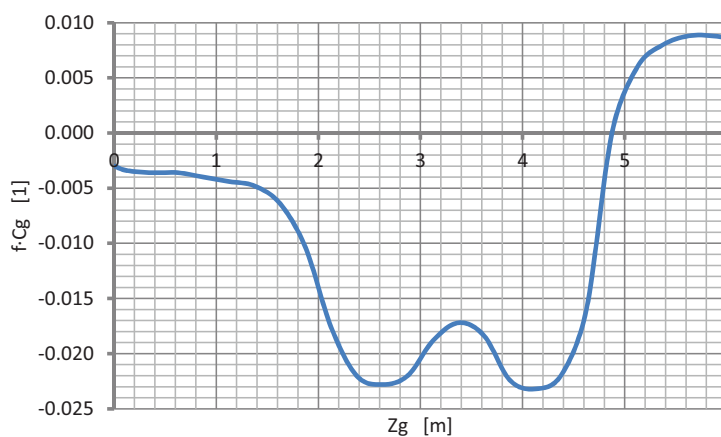
W przykładach analizowanych obiektów stosowano wykres $w(z_g)$ jako funkcję ciągłą. Stąd możliwe było sporządzenie funkcji $f(z_g)$ również jako linii ciągłej. W praktyce, gdy przerwy robocze pomiędzy realizacją kolejnych warstw są dłuższe, przy tym samym poziomie zasypki z_g występują skokowe zmiany ugięcia [4].

Z wykresu przedstawionego na

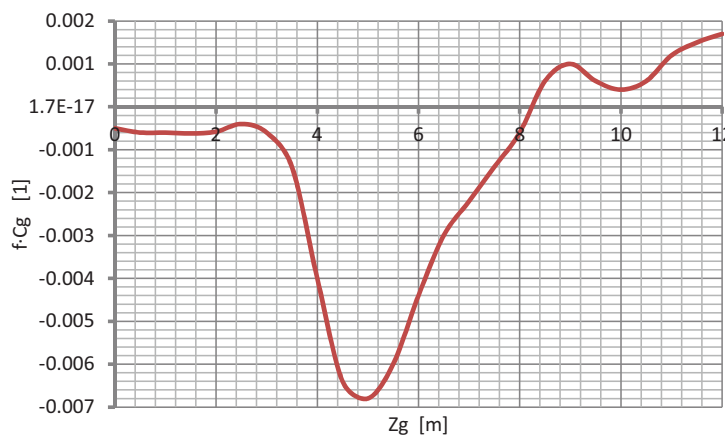
rys. 2b wynika, że występują wahania wartości $f(z_g)$ a w końcowej fazie następuje znaczna redukcja. Oznacza to, że wykonywanie dalszych warstw zasypki ma ograniczony wpływ na zmiany podatności konstrukcji. Z wykresów $w(z_g)$ i $f(z_g)$ wynika, że zmiana podatności jest skutkiem zmian cech fizycznych gruntu, jako wynik procesu jego zagęszczania [12]. Istotne znaczenie



3. Zmiany podatności obiektu w Świdnicy



4. Zmiany podatności obiektu w Endköping



5. Zmiany podatności obiektu w Kouchi

w konstrukcji obiektu drogowej ma jednak utworzenie nawierzchni z podbudową. Prowadzi to do znacznego przyrostu sztywności obiektu przy obciążeniach ruchomych [6, 10].

Na rys. 3 przedstawiono zmiany podatności obiektu wybudowanego w Świdnicy [7]. Charakterystyczne wymiary powłoki to: rozpiętość $L = 10,05$ m, wysokość $H = 4,725$ m, promień krzywizny $R = 8,987$ m. Powłokę wykonano z blachy MP 200x55x5. Kształt dolnej części powłoki tego obiektu przystosowano do zastosowanego w nim posadowienia na palach stalowych. Stąd w części dolnej powłoki występuje stałe jej pochylenie do wysokości ok. 3 m skierowane do wnętrza obiektu. Z tego powodu widoczne są na wykresie w tym zakresie małe wartości f , wynikające ze zredukowanego parcia gruntu na ściany boczne.

Przyrost wartości f w przedziale $3 < z_g < H$ jest analogiczny do przypadku poprzedniego obiektu.

Na rys. 4 przedstawiono zmiany podatności w obiekcie wybudowanym do celów badawczych w Endköping (Szwecja) [11]. Powłoka tego obiektu jest o kształcie zamkniętym nazywanym jako gruszkowy. Charakterystyczne wymiary powłoki to: rozpiętość $L = 6,04$ m, wysokość $H = 4,55$ m, promień krzywizny $R = 3,052$ m. Powłokę wykonano z blachy MP 200x55x2,93. W tym przypadku zastosowano zwiększoną sztywność powłoki w stosunku do parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego.

Zmiana podatności prefabrykowanej powłoki betonowej

W pracach [6, 13] podano klasyfika-

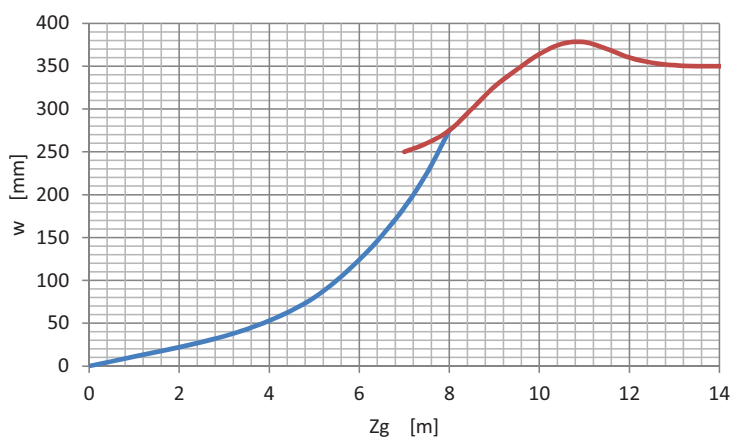
cję obiektów gruntowo-powłokowych z uwagi ich sztywność podczas budowy. Wyróżniono dwie grupy powłok: podatne (z blachy falistej) i sztywniejsze (z betonu). Odrębną grupę stanowią konstrukcje sztywne w postaci przepustów murowanych (betonowych, ceglanych i kamiennych) [13].

Na rys. 4 przedstawiono zmiany podatności w obiekcie wybudowanym jako obiekt autostradowy w Kouchi [3], z zastosowaniem powłoki betonowej systemu TechSpan, oznaczonej jako TSJ. Powłoka tego obiektu jest o kształcie łuku o parametrach zbliżonych do obiektu w Rydzynie. Charakterystyczne wymiary powłoki to: rozpiętość $L = 17,00$ m, wysokość $H = 7,32$ m. Obiekt charakteryzuje się bardzo dużą grubością naziomu. Z wykresu przedstawionego na rys. 4 widoczna jest znacznie mniejsza podatność w odniesieniu do powłok z blach falistych. Wynika to ze znacznych grubości ścian powłok betonowych, rzędu 0,3 m.

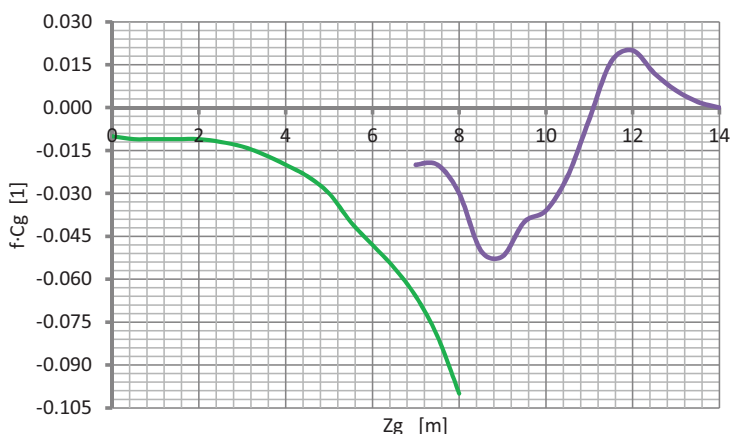
Bezpieczeństwo powłok w trakcie budowy

W wyjątkowych sytuacjach podczas układania zasypki powstają nadmierne deformacje. Na rys. 6 przedstawiono przykład wyników monitoringu obiektu wybudowanego w Ostrawie [1]. Charakterystyczne wymiary obiektu to: rozpiętość $L = 12,02$ m, wysokość $H = 9,89$ m, promień krzywizny $R = 6,01$ m. Powłokę wykonano z blachy MP 200x55x7. Z uwagi na wysoki naziom forsowano nadmiernie wypiętrzanie powłoki w fazie początkowej, jak na rys. 6a. Po wykonaniu warstw zasypki do wysokości $z_g = 8,70$ m wypiętrzanie przekroczyło dopuszczalną wartość określoną przez producenta blachy. Stąd rozpoczęto usuwanie warstw zasypki do poziomu $z_g = 5,70$ m. Dodatkowo wykonano balastowanie klucza płytami betonowymi. Widoczne to jest w przebiegu wypiętrzania we

a)



b)



6. Zmiany ugięcia i podatności obiektu z Ostrawy

wtórnej realizacji układania zasypki. Zatem niezbędne były dodatkowe zabiegi technologiczne, zwiększające bezpieczeństwo powłoki.

Na rys. 6b widoczne jest bardzo duże przyrosty podatności w początkowej fazie układania zasypki. W trakcie skorygowanej technologii budowy powstałe efekty są zbliżone do najczęściej spotykanych pomimo utrzymania znacznego poziomu wypiętrzenia. Przedstawiony przypadek obiektu wynikał również z zastosowania blach falistych o małej sztywności przy znacznej rozpiętości i wysokości powłoki.

Na rys. 7a przedstawiono wykres ugięcia $w(z_g)$ otrzymany z monitoringu obiektu wybudowanego w obwodnicy Nowej Rudy nad potokiem Piekelnica [8]. Charakterystyczne wymiary obiektu to: rozpiętość $L = 13,40$ m wysokość $H = 5,00$ m, promień krzywizny $R = 9,93$ m. Powłokę wykonano z blachy SC 380x140x7. W obiekcie wystąpiły znaczne redukcje wypiętrzenia w fazie budowy nazio- mu. Są one postępujące podczas eksploatacji obiektu i ciągle monitorowane [4, 6]. Dodatkowo nad rysunkiem 7b podano bardzo dużą wartość podatności przy grubości zasypki $z_g = 7,75$ m.

Z podanych wcześniej przykładów wyznaczania miejsca gdzie $dw/dz = 0$ widoczne jest jego zróżnicowane położenie. Na rys. 1 jest ono określone jako h_r . W niektórych przypadkach spełniona jest relacja $h_r > H$ gdy w innych występuje $h_r < H$. Na wykresie rys. 7b widoczne jest znaczne przesunięcie wartości h_k w odniesieniu do H .

Wpływ parametrów geometrycznych powłoki i cech fizycznych gruntu na podatność

Do szacowania maksymalnej wartości wypiętrzenia klucza powłoki, powstającego na przełomie fazy pierwszej i drugiej, jako $w(z_g = h_k)$, wykorzystuje się wzór [6]:

Tab. 1. Charakterystyki analizowanych powłok

Obiekt	L [m]	H [m]	El/a [MNm ² /m]	λ-10-3
Endköping	6,04	4,55	0,2734	24,179
Świdnica	10,05	5,50	0,5144	59,200
Ostrawa	12,02	9,89	0,6587	79,095
Nowa Ruda	13,40	5,00	4,954	14,571
Rydzyzna	17,59	5,46	4,954	32,958
Kouchi	17,00	7,32	30,75	4,793

$$w = \frac{K_w \cdot C_g}{EI/a} \left(\frac{L}{10} \right)^5 \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{E_g}{EI/a} L^3 \quad (8)$$

gdzie EI/a jest sztywnością na zginanie wycinka powłoki o szerokości a . Parametr $K_w(\lambda, \kappa)$ określony jest na podstawie przekroju poprzecznego obiektu, jak na rys. 1, ujęty we współczynniku geometrycznym

$$\kappa = \frac{H}{L} \quad (7)$$

We współczynniku podatności według propozycji Dunkana [2, 6], jak we wzorze

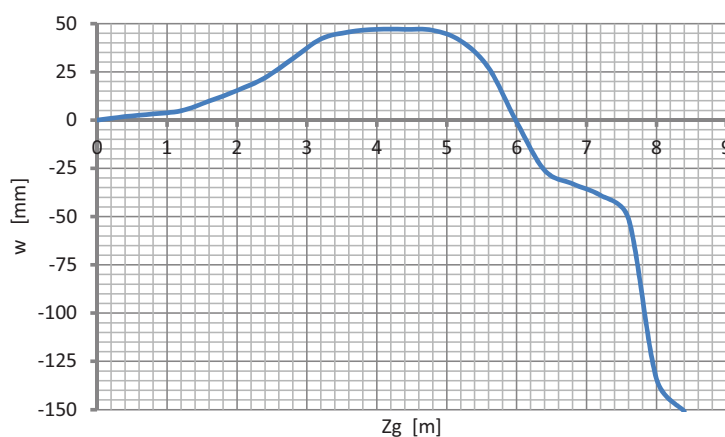
$$w = \frac{K_w \cdot \lambda \cdot C_g}{10^5 \cdot E_g} L^2 \quad (9)$$

ujęte są cechy fizyczne gruntu w postaci modułu ścisłości E_g .

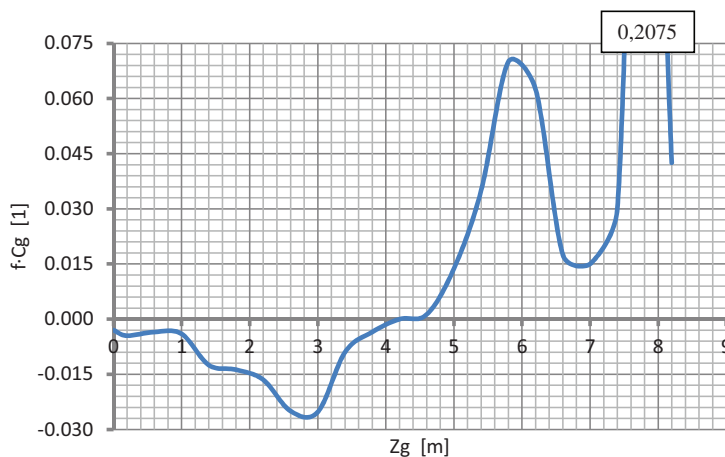
Maksymalne wypiętrzenie można obliczyć również ze wzoru

gdzie występuje pełna proporcja cech fizycznych gruntu C_g/E_g . Gdy uwzględni się geometrię blachy falistej otrzyma się ze wzoru (6) równanie

a)



b)



7. Zmiany ugięcia i podatności obiektu w obwodnicy Nowej Rudy

$$w = 2\pi \frac{K_w \cdot C_g}{E \cdot t} \left(\frac{L}{10} \right)^5 \quad (10)$$

We wzorze (10) parametry blachy falistej ujęte są w oznaczeniu jej typu, stosowanym wcześniej np. SC axfxt, natomiast $E = 205 \text{ GN/m}^2$ jest modułem Younga stali.

W tab. 1 zestawiono wartości λ dla analizowanych obiektów. Z tych porównań większe wartości λ oznaczają zwiększoną podatność powłoki. Zatem wyróżnia się powłoka betonowa z Kouchi jako najszywniejsza oraz najbardziej podana powłoka z blachy falistej z Ostrawy. W tym zestawieniu wyróżnia się również powłoka z obwodnicy Nowej Rudy o małej wartości λ . Jednak z przebiegu wykresu $f(h)$, podanego na rys. 7b wynika jej nadmierna podatność w drugiej fazie układania zasypki. Zatem jest to skutek zastosowanego procesu technologicznego [8]. Stąd wniosek, że mała wartość λ nie jest wystarczającym warunkiem bezpiecznego przebiegu budowy. Wypiętrzenie w jest określane dla przejściowej fazy budowy, gdy $f = 0$. Zatem współczynnik λ dotyczy jednego momentu budowy – osiągnięcia przez zasypkę poziomu klucza powłoki.

Podsumowanie

W pracy analizowano podatność mostowego obiektu gruntowo-powłokowego jako funkcję określającą statyczną charakterystykę konstrukcji obiektu podczas jego budowy. Obciążeniem stacjonarnym powłoki jest siła równomiernie rozłożona na długości obiektu jako ciężar własny zasypki gruntowej. Na podatność konstrukcji istotny wpływ ma technologia budowy obiektu. W pracy rozpatrywano dwa ujęcia podatności w postaci funkcji $f(h)$ oraz parametru λ . Na przykładzie obiektu w Nowej Rudzie wskazano, że mała wartość λ nie jest wystarczającym warunkiem bezpiecznego przebie-

gu budowy. Istotne znaczenie ma bowiem przebieg technologii układania zasypki.

Ponieważ do określenia funkcji podatności wykorzystuje się wyniki pomiarów deformacji powłoki uwzględnia się rzeczywiste zmiany cech fizycznych gruntu i jego udział w hybrydowej konstrukcji. Przedstawione ujęcie rozwiązania jest ogólne, wykorzystane zostało do analizy efektów reologicznych w mostach betonowych i zespolonych [5]. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Czerepak A., Zouhar J.: Deformation control during assembly and backfilling of corrugated steel structure, Ostrava, Czech Republic. Archives of Institute of Civil Engineering. 2012, p. 85-83.
- [2] Duncan J.M.: Behavior and Design of Long Span Metal Culverts, ASCE, Convention "Soil-Structure Interaction for Shallow Foundations and Buried Structures", San Francisco, USA, October 1977.
- [3] Jenkins D.A.: Non-Linear Analysis of Buried Arch Structures. Australian Structural Engineering Conference, Auckland 30-2 October 1998.
- [4] Machelski C.: Szywność i zmiany podatności mostowych obiektów gruntowo-powłokowych. Inżynieria i Budownictwo 3-4 2023.
- [5] Machelski C.: Szywność i podatność mostów z betonu. Inżynieria i Budownictwo 9-10 2022 s. 426-432.
- [6] Machelski C.: Badania mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2020.
- [7] Machelski C., Michalski J.B.: Analiza schematu powłoki zintegrowanej z posadowieniem na palach w mostowym obiekcie gruntowo-powłokowym. Przegląd Komunikacyjny 3 2021 s. 7-13.
- [8] Machelski C., Michalski J. B.: Obiekty gruntowo-powłokowe w obwodnicy Nowej Rudy. Drogi lądowe, powietrzne i wodne. 10/2008 s. 66-71.
- [9] Machelski C., Mońka M., Tomala P.: Monitoring of soil-steel structures during construction. Journal of Current Construction Issues 2/2019 159-168.
- [10] Mańko Z., Bęben D.: Influence of road pavement on behavior of soil-steel bridge structure. Der Stahlbau 76(2007), Heft 12 p. 905-915.
- [11] Pettersson L.: Full Scale Tests and Structural Evaluation of Soil Steel Flexible Culverts with low High of Cover. Doctoral Thesis in Civil and Architectural Engineering, Stockholm, 2007.
- [12] Pisarczyk S.: Mechanika gruntów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [13] Wysokowski A., Howis J.: Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej – cz 7. Metody obliczeń konstrukcji przepustów. Cz 1 Ogólne zasady obliczeń. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne marzec-kwiecień 2010 s. 88-95.