

BUDOWA OBIEKTU GRUNTOWO-POWŁOKOWEGO Z ZASTOSOWANIEM BLACHY ULTRACOR¹

Piotr TOMALA*, Czesław MACHELSKI**
* ViaCon Polska, ** Politechnika Wrocławska

W pracy omawiany jest obiekt gruntowo-powłokowy o największej na świecie rozpiętości powłoki - obecnie w końcowej fazie budowy, w Ostródzie. Obiekt zaprojektowano z wykorzystaniem norm amerykańskich i kanadyjskich. Powłokę utworzono z blachy falistej UltraCor bez stosowania nakładek lub żeber usztywniających. Powłoka wyróżnia się mniejszą sztywnością od dotychczas stosowanych blach SuperCor ale z nakładkami i wypełnieniem betonem. Jednak stal z której wykonano blachy jest o wyższej wytrzymałości niż w tych o niższym profilu. Z uwagi na rekordową geometrię powłoki na obiekcie realizuje się kontrolę jej deformacji podczas budowy. Jednym z wykonywanych pomiarów są przemieszczenia służące do określania zmiany promienia krzywizny w kluczu powłoki. Na obiekcie realizuje się również pomiary tensometryczne dające bezpośredni pogląd na zmiany naprężeń w blasze falistej. W pracy zwrócono uwagę na duże zmiany krzywizny podczas budowy i możliwość ich określania na podstawie pomiarów geodezyjnych – powszechnie stosowanych na budowie.

Słowa kluczowe: obiekty gruntowo-powłokowe, blacha UltraCor, faza budowy, badania deformacji.

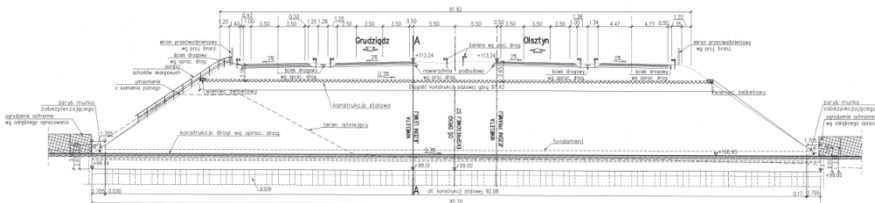
1. POWŁOKI O NAJWIĘKSZYCH ROZPIĘTOŚCIACH

Na analizowanym w pracy obiekcie, w Ostródzie, wykonywane są obecnie końcowe prace budowane. Jego układ projektowy pokazano na rys. 1. Obiekt służy do przeprowadzenia szlaku migracji zwierząt dziko żyjących oraz drogi lokalnej pod czterojezdniowym odcinkiem drogi S16. Szerokość w koronie nasytu wynosi 61,82 m a przy podstawie 95,70 m. Jest to obecnie obiekt o *największej w świecie rozpiętości powłoki* [1]. Do projektowania obiektu zastosowano zestaw norm wymienione niżej.

- ASTM A796/A796M-15A (2015). Standard practice of structural design of corrugated steel pipe, pipe-arches and arches for storm and sanitary sewers and other buried application. American society of testing and materials. West Conshohocken, PA, USA.

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.26

- ASTM D1557-12e1 (2015). D1557-12e1 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. American society of testing and materials. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2487-11 (2015). Standard practice for classification of soil for engineering purposes (Unified soil classification system). American society of testing and materials. West Conshohocken, PA, USA.
- CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code Canadian Standard Association. 2014. Canadian Standard Association. Mississauga, ON, Canada.
- CAN/CSA-G401-14. Corrugated steel pipe products Canadian Standard Association. 2014.. Canadian Standard Association. Mississauga, ON, Canada.



Rys. 1. Przekrój podłużny obiektu w Ostródzie [1]

W tabl. 1 zastawiono wybrane obiekty o największych rozpiętościach powłok wybudowanych z blach falistych. Wszystkie powłoki są o kształcie łukowym i otwartym – posadowione na fundamencie. Z charakterystycznych wymiarów przekrojów poprzecznych powłok: rozpiętości L i wysokości H widoczna jest, ich proporcja w zakresie $0,31 < H/L < 0,5$ (połowa okręgu o promieniu R). Wśród nich wyróżnia się powłoki w obiektach 1 i 5 - utworzone z pojedynczych arkuszy blachy falistej (bez nakładki). W obiektach 2 – 4 zastosowano nakładki zwiększające sztywność powłoki podstawowej.

Tablica 1 Charakterystyki geometryczne obiektów gruntowo-powłokowych

Lp.	Obiekt	L [m]	H [m]	R [m]	blacha	ω [%]
1	Rydzyzna	17,594	5,459	13,735	SC	0,47
2	Gajec	20,000	7,424		SC+SC/2	0,31
3	Zambrów	21,996	10,996	10,996	SC + SC	0,61
4	Kanada	24,000	12,000	12,000	+ ECribs	0,40
5	Ostróda	25,741	9,116	16,632	UC	0,83

Na rysunku 2 przedstawiono w obiekty z tabl. 1. Największą rozpiętość powłoki z pojedynczej blachy SuperCor SC 381×140×7 uzyskano w obiekcie w Rydzynie. Obiekt wybudowano na terenie firmy ViaCon Polska wyłącznie do

celu badawczego – jest analizowany po sześciu latach jego istnienia. W obiektach 2 – 4 zastosowano dodatkową nakładkę na powłocę z blachy SC 381×140×7. Dotychczas największym obiektem gruntowo-powłokowym w Polsce jest przejście dla zwierząt wybudowane w 2007 roku nad dwutorową zelektryfikowaną, czynną linią kolejową E20 na odcinku Kunowice–Rzepin w miejscowości Gajec. Obiekt zaprojektowano z powłoką o dwóch promieniach krzywizny z blachy o profilu SC 381×140×7 z dodatkowym uźebrowaniem obwodowym, z blachy SC 381×140×5,5 o rozstawie osiowym 1,524 m.



Rys. 2. Zestawienie obiektów o największych rozpiętościach powłok

W roku 2005, w obiekcie Whitehorse Creek, w stanie Alberta, w Kanadzie, na terenie kopalni odkrywkowej wybudowano obiekt gruntowo-powłokowy o największej dotychczas na świecie rozpiętości. Jego konstrukcję utworzono z powłoki o jednym promieniu krzywizny, ze stalowej blachy o profilu SC 381×140×7. W celu uzyskania niezbędnej sztywności, podczas układania zasypki wzmocniono powłokę na całym obwodzie żebrami wypełnionymi betonem „EC ribs”. Dodatkowo zbrojono zasypkę gruntową ocynkowaną siatką stalową, w obszarze zbliżonym do powłoki w celu zmniejszenia wypiętrzenia powłoki podczas układania zasypki. Obiekt budowany obecnie w obwodnicy Zambrowa (numer 4) jest o bliźniaczej konstrukcji do omawianej wcześniej.

2. SZTYWNOŚCI PASM OBWODOWYCH POWŁOK

W gruntowo-powłokowych obiektach średnich rozpiętości wykonuje się zwykle powłoki jako jednowarstwowe zanurzone w ośrodku gruntowym. Składa się je z arkuszy blach falistych łączonych na zakładkę. Do tego celu używa się standardowe śruby o typowym rozstawie jak w połączeniach wszystkich blach powłoki.

Gdy sztywność powłoki jest niewystarczająca z uwagi na obciążenie użytkowe, projektowany jej kształt lub rozpiętość stosuje się nakładkę w postaci pełnego płaszcza lub pasmowych wycinków obwodowych, jak w tabelicy 2. Umożliwia to utrzymanie projektowej geometrii konstrukcji podczas układania zasypki jak również uzyskania nośności pod obciążeniami eksploatacyjnymi gdy jest konieczna odpowiednia sztywność powłoki.

Tabela 2 Sztywności blach falistych z nakładką [MNm²/m]

No	Oznaczenie	Schemat powłoki z nakładką	Rodzaj połączenia	
			idealne	podatne
1	SC + SC/2		20,59	11,4
2	SC + SC		29,54	21,3
3	SC + SC + ECribs		39,39	34,7

W tabelicy 2 zestawiono sztywności pasm obwodowych powłok warstwowych w typowych układach blach falistych. Można je odnieść do sztywności powłok podstawowych:

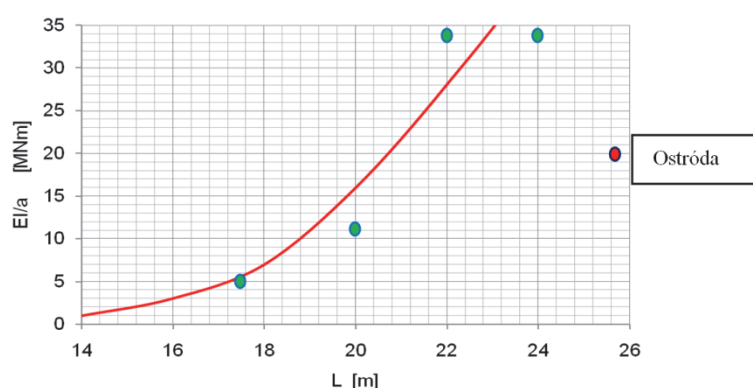
- typ SC 381×140×7 $EI/a = 4,954 \text{ MNm}^2/\text{m}$;
- typ UC 500×237×9,65 $EI/a = 19,89 \text{ MNm}^2/\text{m}$.

Zatem przyrost sztywności powłoki podstawowej z nakładką jest znaczący. Istotne znaczenie w powłokach warstwowych ma podatność połączenia. Wpływa ona na redukcję sztywności pasma obwodowego. W przypadku połączenia idealnego wykorzystuje się zależności geometryczne w ujęciu *Steinera*.

Z porównania sztywności blachy falistej UltraCor do blachy z odcinkową nakładką SC + SC/2 wynika, że są one zbliżone. Jednak z powodu znacznie większej rozpiętości powłoki w Ostródzie w odniesieniu do obiektu w miejscowości Gajec wynika zwiększona deformacja powłoki podczas budowy, określona we wskaźniku wypiętrzenia jak we wzorze

$$\omega = \frac{w_k}{L} 100\% \quad . \quad (1)$$

We wskaźniku (1) porównuje się największą wartość wypiętrzenia w_k (ugięcia powłoki skierowanego do góry podczas układania zasypki) do rozpiętości powłoki L . W przypadku rozpatrywanych powłok podano w tabl. 1 wartości ω a na rys. 3 określono ich położenie na podstawie parametrów L i EI . W przypadku powłok utworzonych z blachy falistej SuperCor (1 – 4) widoczna jest tendencja wyników tworzących linię trendu pokazaną na rys. 3. Powłoka z blachy falistej UltraCor odbiega od tej tendencji co wynika z jej mniejszej sztywności od pozostałych.



Rys. 3. Zależność sztywności od rozpiętości w analizowanych obiektach

3. KONTROLA DEFORMACJI POWŁOKI

Na rys. 4 przedstawiono zmianę wypiętrzenia w_k w zależności od poziomu zasypki gruntu z_g (liczonej od poziomu posadowienia) w czterech pasmach obwodowych powłoki w Ostródzie. Wyniki świadczą o jednorodności technologicznej układania zasypki. Na wykresie widoczny jest wpływ przerwy budowlanej z okresu zimowego i przyrost wypiętrzenia przy tej samej grubości zasypki z_g . Gdy zasypka przekroczy poziom klucza, czyli gdy $z_g > H$ wypiętrzenie podlega redukcji.

Podczas układania zasypki gruntu górna część powłoki (klucz – K) ulega wypiętrzeniu zaś w punktach bocznych A i B zbliżających się do siebie, zwężeniu, jak na rys. 5. Taka deformacja powoduje zmianę pierwotnego promienia krzywizny powłoki z R do R_{uw} . Jego wartość wyznacza się z wykorzystaniem geometrii trójkąta równobocznego [2] ze wzoru

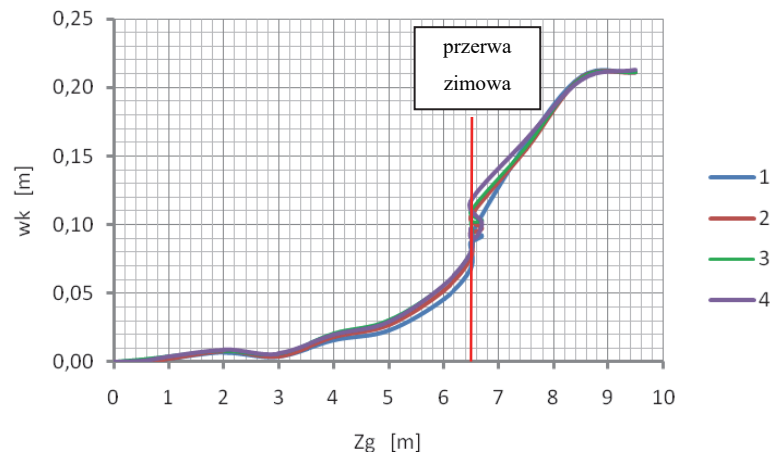
$$R_{uw} = \frac{(F+w)^2 + (C-u)^2}{2(F+w)}, \quad (2)$$

na podstawie wypiętrzenia

$$w = w_k - (w_A + w_B) / 2 \quad (3)$$

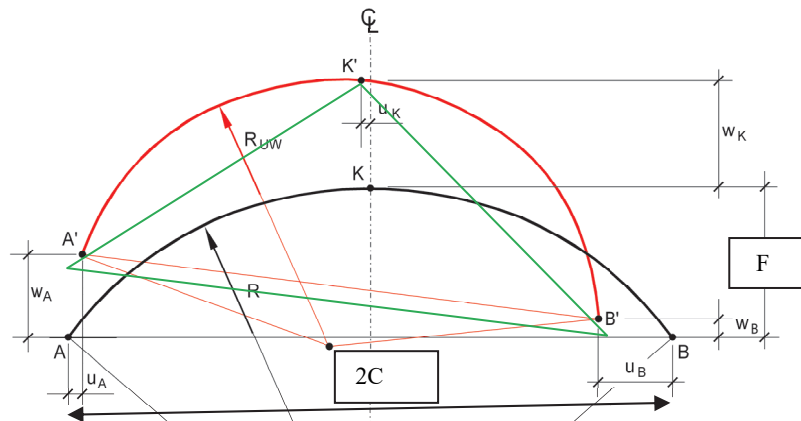
oraz zwężenia

$$2u = u_A + u_B \quad (4)$$



Rys. 4. Zmiana wypiętrzenia powłoki w funkcji grubości zasypki z_g

W takim trójkącie istotne są jego wymiary: podstawy $2C$ i wysokość F , jak na rys. 5. Jeżeli zmienia się poziomy pomiarowe punktów A i B tworzy się funkcję $R_{uw}(F)$ wykorzystywaną w dalszej części pracy.



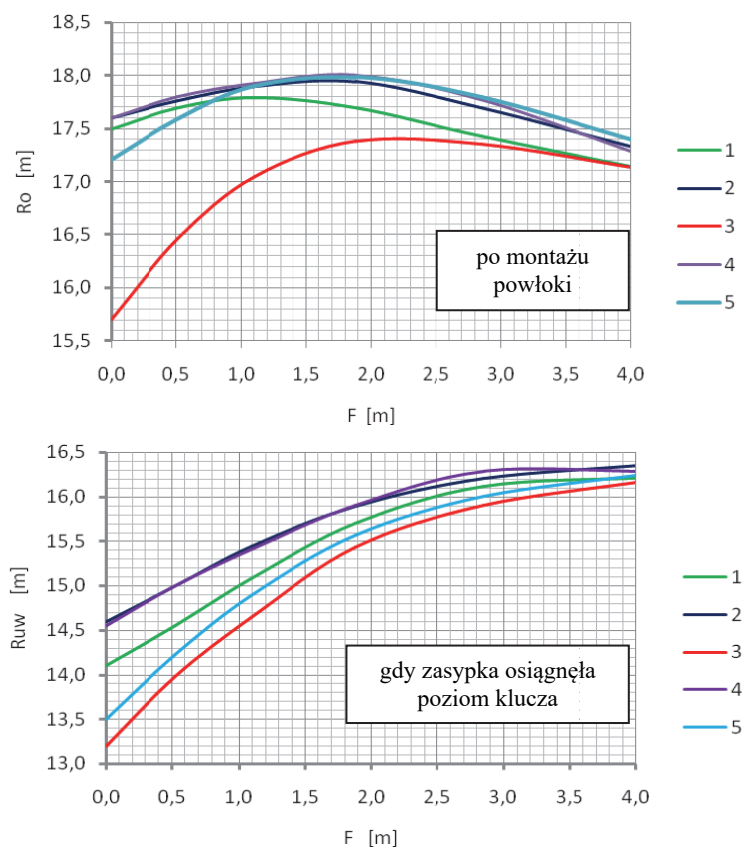
Rys. 5. Deformacja górnego wycinka powłoki

Na rys. 6 przedstawiono wykresy krzywizn obliczonych ze wzoru (2) przy przyjęciu czterech poziomów pomiarowych F . Z tych wykresów można wnioskować o deformacji powłoki na analizowanych poziomach. Na rys. 6 przedstawiono wyniki dla dwóch faz budowy obiektu: początkowej i maksymalnego wypiętrze-

nia powłoki ($z_g = H$). Z wykresów tych widoczna jest niejednorodny kształt powłoki po jej montażu i zbliżona deformacja po ułożeniu zasypki na poziomie klucza. Z wykresów tych można odczytać zmianę promienia krzywizny, gdy $F = 0$ jako:

$$\Delta R = R_o - R_{uw} = 15,7 - 13,2 = 2,5 \text{ m} \quad , \quad (5)$$

dla pasma obwodowego 3 (środkowego).



Rys. 6. Promienie krzywizny powłoki podczas budowy

Zmiana promienia krzywizny może służyć do obliczenia wskaźnika

$$\rho = \frac{R_o - R_{uw}}{R_o} 100\% = \frac{15,7 - 13,2}{15,7} 100\% = 15,9\% \quad (6)$$

Na tej podstawie uzyskuje się naprężenia normalne powstałe od zginania z zależności [2]:

$$\sigma = E \frac{f+t}{200R_0} \rho = 205000 \frac{237+9,65}{200 \cdot 15700} 15,9 = 256 \text{ MPa} \quad (7)$$

Zatem zmiana promienia krzywizny jest duża – powoduje znaczne naprężenia normalne wywołane zginaniem.



Rys. 7. Montaż powłoki z blach falistych UltraCor w Ostródzie

Do oceny jakości prac montażowych, jak na rys. 7 można wykorzystać wskaźnik ρ ze wzoru (6) o postaci

$$\rho = \frac{R - R_0}{R} 100\% \quad (8)$$

W tabl. 3 zestawiono wyniki obliczeń uzyskane na podstawie danych z rys. 6 przy przyjęciu wartości projektowej jako $R = 16,632$ m. Wobec tego po montażu powłoki jej promień krzywizny jest zwykle większy od wartości projektowej R . W wyniku ciężaru własnego blachy zachodzi zależność $R < R_0$ a czasem odwrotna jak w analizowanym przypadku (tabl. 3).

Tablica 3 wskaźniki krzywizny powłoki po jej montażu

Nr pasma	1	2	3	4	5
R_0	17,5	17,6	15,7	17,6	17,2
ρ [%]	5,22	5,82	-5,60	5,82	3,42

Na obiekcie w Ostródzie realizuje się również badania tensometryczne. Z pomiarów tych wynika, że podczas budowy powstają naprężenia normalne na poziomie 75% wytrzymałości stali (podwyższonej do wartości $R_a = 583$ MPa).

Spodziewane naprężenia występujące podczas badań odbiorczych szacowane są na poziomie 20 MPa. Podobne proporcje wystąpią również w przypadku ugięcia blachy. Wobec tego faza budowy jest istotna w ocenie bezpieczeństwa obiektu.

4. PODSUMOWANIE

W podatnych konstrukcjach gruntowo-powłokowych występują znaczne deformacje powłok podczas budowy. W gotowym obiekcie powłoka zanurzona w gruncie współpracuje z zasypką tworząc układ o dużej sztywności, zbliżonej do innych konstrukcji mostowych. Z tego powodu przemieszczenia powłok wywołane przez obciążenia eksploatacyjne są wielokrotnie mniejsze niż podczas budowy. Wobec tego istotne znaczenie dla bezpieczeństwa powłoki ma faza budowy.

W pracy przyjęto jako miarodajny wskaźnik krzywizny ρ . Obliczany jest on w odniesieniu do wartości projektowej (katalogowej) promienia R . Po zmontowaniu powłoki geometria pasma obwodowego może odbiegać od projektowej – co można traktować jako deformację odnoszącą (początkową) R_0 . Z porównania wartości R i R_0 można wnioskować o jakości prac montażowych powłoki. Podczas układania zasypki występuje proces deformacji powłoki obserwowany jako funkcja grubości zasypki $R_{uw}(z_g)$. Na podstawie zmian R_{uw} w odniesieniu do R_0 określa się naprężenia w powłoce pochodzące od zginania. Obliczenia te mogą być podstawą oceny bezpieczeństwa powłoki podczas budowy.

LITERATURA

1. Machelski C., Tomala P, Kunecki B., Korusiewicz L., Williams K., El-Sharnouby M.M., *UltraCor – 1st Realization in Europe, design, erection, testing*, 3th European Conference Buried flexible steel structure, Rydzyna 2017, 189–197.
2. Machelski C., *Dopuszczalna deformacja powłok obiektów gruntowo-powłokowych z blach falistych*, Mosty 1/2017, 24–28.

CONSTRUCTION OF THE SOIL-STEEL STRUCTURE WITH USE OF ULTRACOR CORRUGATION

Summary

This paper describes soil-steel bridge with the largest span in the world. Structure is located in Ostróda (Poland) and it is currently in a final stage of realization. Structure was designed based on North American and Canadian standards. Steel shell is made from the corrugated structural plates with deepest on the market corrugation 500×237×9,65 mm (UltraCor) without any of reinforcing ribs. Single barrel of UltraCor has less stiffness than previously used SuperCor's (381×140×7 mm) reinforced by EC Ribs (mirrored plate and encased concrete). Steel used for UltraCor has higher grade than steel used for smaller corrugation. Because of the large span ever used the control

of the deformations during construction is carried out. One of the measurements are displacements used to determine the change of the radius of curvature of the shell crown point. Structures is also monitored with strain gauges giving direct view of the changes of stresses in a corrugated steel shell. The summary highlights large changes of radiuses of shell curvature and ability of determine them based on geodetic measurements – commonly used on the sites