

# Klasyfikacja obiektów gruntowo-powłokowych z uwagi na zmiany deformacji powłoki podczas budowy

## Classification of soil-steel structures due to shell deformation changes during construction



Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

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

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

**Streszczenie:** W pracy dzieli się konstrukcje gruntowo-powłokowe z blach falistych na dwie grupy. Podział ten wynika z niebezpiecznych sytuacji spowodowanych naprężeniami wynikającymi ze zginania powłok. Jedna z nich występuje w fazie budowy, podczas układania zasypki – jest wówczas kontrolowany wskaźnik wypiętrzenia  $\omega$ . Druga sytuacja jest trudniejsza do identyfikacji gdyż występuje podczas użytkowania obiektu. Możliwość jej wystąpienia widoczna jest w końcowej fazie budowy obiektu, na co wskazuje wartość wskaźnika zmiany ugięcia  $\eta$ . W pracy analizuje się charakterystyczne przykłady obydwu grup powłok. Do oceny bezpieczeństwa obiektu przyjęto zależność ugięcia klucza powłoki i naprężenia normalnego określonego w pracy w postaci geometrycznej - zmiany krzywizny. W przykładach obliczeń wskazano na użyteczność podstawowych, dostępnych na budowie technik geodezyjnych. Umożliwiają one ocenę bezpieczeństwa powłoki na podstawie deformacji strefy klucza powłoki.

**Słowa kluczowe:** Konstrukcje gruntowo-powłokowe; Faza budowy; Zmiany krzywizny; Bezpieczeństwo

**Abstract:** Soil-steel structures made of corrugated sheets are divided into two groups in the paper. This division results from the critical situations caused by flexural stresses (bending stresses) in shells. One of them occurs in the stage of construction, during backfilling – index of uplift  $\omega$  is then controlled. The other situation is more difficult to be identified as it occurs in the exploitation phase. The possibility of its occurrence is evident in the final stages of construction, which is indicated by the index of deflection change  $\eta$ . Specific examples of both shell groups are analysed in the paper. A relationship between shell crown deflection and normal stress determined in the work in a geometrical form – as a change of curvature – is used to evaluate the structural safety. Usefulness of basic surveying techniques, available during construction, is indicated in the calculation examples. They allow to assess the shell safety on the basis of the shell crown zone deformation.

**Keywords:** Soil-steel structure; Backfilling; Change of curvature; Safety

Konstrukcjami gruntowo-powłokowymi są budowle o przeznaczeniu komunikacyjnym, jak na rysunku 1, pełniące rolę obiektów mostowych: wiaduktów, kładek dla pieszych, przepustów, tuneli, przejść podziemnych, przejazdów gospodarczych, przejść dla dziko żyjących zwierząt. Duża grupa tych budowli pełni rolę obiektów komunalnych, zwykle o kształcie przewodów zamkniętych (rurowych) czy też o przeznaczeniu transportowym np. obudowy taśmociągów. Są one budowane w postaci powłoki i otaczającego ją, specjalnie zagęszczonego gruntu, na podobnych zasadach jak nasypy kolejowe i drogowe.

Wyżej przedstawiono podział obiektów gruntowo-powłokowych

ze względu na sposób ich użytkowania. Z uwagi na budowę (konstrukcję) tych obiektów wyróżnia się

dwie grupy: podatne i sztywne [4]. Z uwagi na stosowany materiał wyróżnia się powłoki: betonowe a w tym z



1. Widok drogowego obiektu gruntowo-powłokowego

elementów prefabrykowanych oraz z tworzyw sztucznych i metalowe. Do metalowych powłok używa się stalowych oraz aluminiowych blach falistych. W tych, z uwagi na profile blach falistych rozróżnia się typy oznaczone przez producentów jako: HC, MP, SC NP, UC [3]. Z uwagi na geometrię pasma obwodowego wyróżnia się dwie grupy: zamknięte a w tym o kształtach: okrągłym, eliptycznym, kroplistym, gruszkowym oraz otwarte a w tym: łukowe o wysokim lub niskim profilu i skrzynkowe [2].

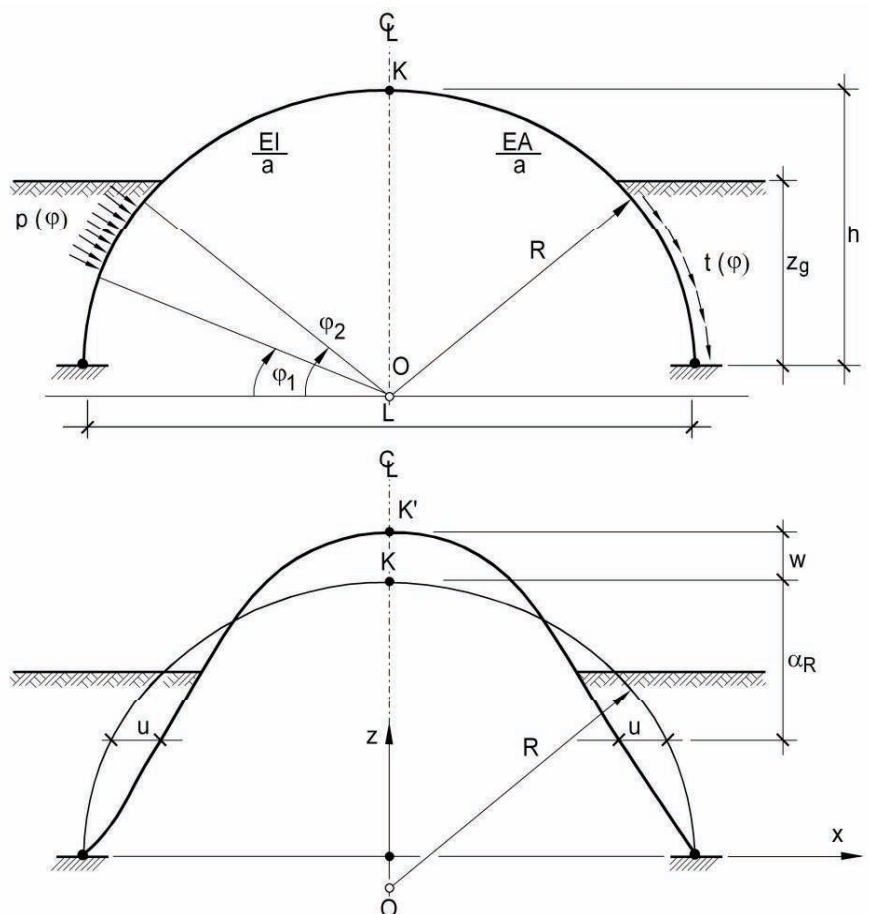
W pracy dzieli się podatne obiekty gruntowo-powłokowe z blach falistych wyłącznie na dwie grupy, w zależności od przebiegu deformacji i towarzyszącej jej zmianami naprężeń w kluczu powłoki podczas układania zasyпки gruntowej. Rozpatruje się obiekty o symetrycznej deformacji przekroju poprzecznego powłoki, występującej zwykle przy poziomym naziemiu a nie w obiektach bliźniaczych i na pochylonych stokach [8].

## Wskaźnik wypiętrzenia klucza powłoki

W większości przypadków obiektów gruntowo-powłokowych o kształcie łukowym w ocenie bezpieczeństwa istotne znaczenie ma początkowa faza budowy, gdy zasyпка gruntuwa osiąga poziom klucza powłoki. Zwykle w powłokach o przekroju otwartym i zamkniętym w wyniku parcia zasyпки gruntowej występują największe wypiętrzenia [3], czyli ugięcia blachy falistej w kluczu skierowane do góry, jak na rysunku 2. Wówczas do oceny bezpieczeństwa budowanej konstrukcji wystarczająca jest kontrola geometrycznego wskaźnika

$$\omega = \frac{w_{\max}}{L} 100\%, \quad (1)$$

gdzie:  $w_{\max}$  jest maksymalnym wypiętrzeniem klucza powłoki a  $L$  jej największym wymiarem poziomym (rozpiętością) pasma obwodowego. W projektach obiektów są szacowane wartości  $\omega$  a w wytycznych zale-



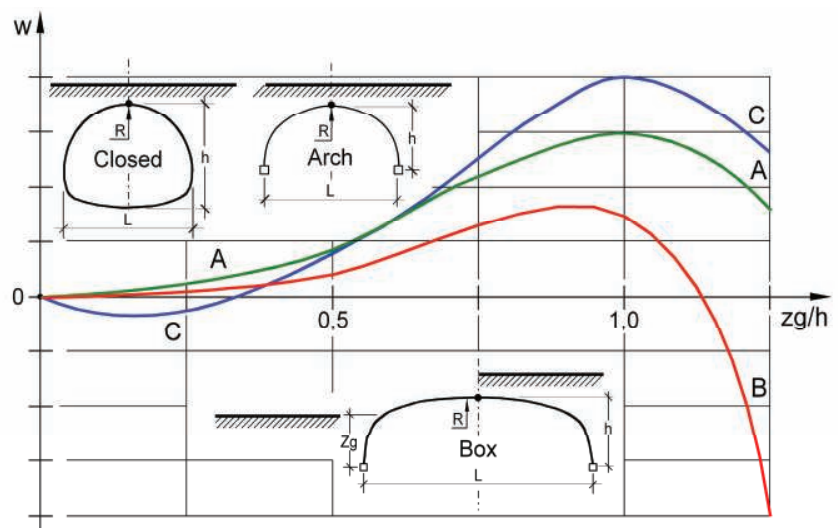
2. Oddziaływania gruntu na powłokę i jej deformacja podczas budowy obiektu

cane jest, aby spełniony był warunek  $\omega < 2\%$ . W praktyce występowały jednak większe wartości [3, 6], przekraczające nawet  $\omega > 3\%$ .

W grupie obiektów gruntowo-powłokowych o kształcie skrzynkowym i szczególnych przypadkach powłok łukowych o małej wyniosłości ( $\kappa = h/L$ ), jak w sytuacji omawianej w pracy, istotne znaczenie w ocenie

bezpieczeństwa obiektu ma faza eksploatacyjna. Wówczas wypiętrzenie powłoki jest mniejsze niż ugięcie (przemieszczenie pionowe klucza skierowane do dołu).

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany wypiętrzenia, w funkcji grubości warstwy zasyпки  $z_g$  (w proporcji do wysokości powłoki  $h$ ). Gdy  $z_g/h = 1$  zasyпка osiąga poziom klucza,



3. Charakterystyczne zmiany przemieszczenia pionowego klucza powłok podczas układania zasyпки gruntowej

wówczas powstaje największa wartość wypiętrzenia  $w_{\max}$ . Gdy  $z_g/h > 1$  występuje jego redukcja a w powłokach o kształcie skrzynkowym pojawia się ugięcie  $w_{\min}$ . Z uwagi na charakterystyczne zmiany przemieszczenia pionowego klucza powłoki konstrukcje gruntowo-powłokowe dzieli się na trzy grupy: łukowe (A - arch) i skrzynkowe (B - box) oraz zamknięte (C - closed). Zwykle powłoki otwarte, o kształcie łukowym (A) oraz zamknięte (C) traktuje się, jako jednolitą grupę z powodu podobnego przebiegu wypiętrzenia. W powłokach C występują początkowo ujemne wartości przemieszczenia klucza, lecz później wykres jest zbliżony kształtem do występujących w powłokach A. W powłokach typu B z reguły powstają ugięcia klucza (przemieszczenia skierowane do dołu) w końcowej fazie budowy. W pracy wprowadzono jako dodatkową powłokę, oznaczoną jako AB, o geometrii A ale zachowującą się jak w obiekcie typu B.

W tabeli 1 zestawiono parametry geometryczne analizowanych powłok. W przekrojach poprzecznych wszystkich powłok ze stalowej blachy falistej wyróżnia się promień krzywizny pasma obwodowego w obszarze klucza, oznaczony jako  $R$ , jak na rysunku 3. W analizowanych zagadnieniach mniejsze znaczenie ma szerokość obiektu. Z uwagi na znaczne wartości przemieszczeń w powłokach z blachy falistej do pomiarów stosuje się techniki geodezyjne - wykorzystywane również do innych prac budowlanych obiektu [3].

Obiekt z powłoką A wybudowano na terenie firmy ViaCon Polska w Rydzynie wyłącznie do celu badawczego [3, 5]. W przekroju poprzecznym powłoki wyróżnia się dwa promienie krzywizny pasma obwodowego w obszarze klucza  $R = 13,735$  m oraz wielokrotnie mniejszy w pachwinie (narożu)  $R_n = 3,45$  m. W fazie końcowej budowy istotnym parametrem jest poziom zasypki gruntowej ponad kluczem 1,8 m. Powłokę B zrealizowano w obiekcie wybudowanym

Tab. 1. Charakterystyki geometryczne analizowanych obiektów

powłoka	L [m]	h [m]	$\kappa = h/L$
A	17,59	5,459	0,3103
AB	13,46	5,004	0,3718
B	8,00	2,370	0,2960
C	6,04	4,550	0,7533

Tab. 2. Charakterystyczne zmiany ugięcia powłok

powłoka	L [m]	naziom [m]	$w_{\max}$ [mm]	$w_{\min}$ [mm]	$\omega$ [%]	$\eta$
A	17,59	1,80	80,7	-0,6	0,459	0,993
AB	13,46	3,05	50	-134	0,372	0,272
B	8,00	1,35	12	-26	0,150	0,316
C	6,04	1,50	65	50	1,076	4,333

w Lidköping [1, 3] (Szwecja). Obiekt podzielono podłużnie tak, aby utworzyć dwie porównawcze konstrukcje oparte na wspólnym fundamencie liniowym. Celem badań była ocena wpływu dodatkowego usztywnienia (nakładki) powłoki. Na obiekcie realizowano pomiary przemieszczeń i odkształceń jednostkowych, tak jak na powłokach A i C. Obiekt z powłoką C wybudowano w Szwecji wyłącznie do celów badawczych [3, 7]. Utworzono go z blachy o niskim profilu i małej grubości MP 200x55x2,93. Przekrój poprzeczny powłoki był zamknięty o kształcie kroplistym i wymiarach jak w tabeli 1. Na obiekcie realizowano badania z pojazdami drogowymi przy przyjęciu zróżnicowanych grubościach naziomu. Wyniki tych badań były podstawą wytycznych projektowania obiektów gruntowo-powłokowych. Powłokę AB o wymiarach podanych w tabeli 1, z uwagi na jej kształt, zalicza się do grupy A. Obiekt wybudowano w ciągu obwodnicy Nowej Rudy [3, 6] i jest on obecnie eksploatowany. Charakteryzuje się on zwiększoną grubością naziomu 3,05 m.

W tabeli 2 podano wartości  $\omega$  uzyskane z pomiaru wypiętrzenia powłok analizowanych obiektów. Zgodnie z uwagami podawanymi w dalszej części pracy wartości  $\omega$  nie zawierają istotnych informacji dotyczących bezpieczeństwa obiektów typu AB i B.

### Wskaźnik zmian ugięcia powłoki

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczne zmiany wypiętrzenia (w początkowej fazie budowy) i ugięcia (podczas końcowych prac budowlanych) w funkcji grubości zasypki zg. W początkowym okresie procesu układania zasypki gruntowej wykresy są podobne do osiągnięcia największej wartości wypiętrzenia  $w_{\max}$ . Gdy zasypka jest układana powyżej klucza powłoki, wypiętrzenie maleje a w powłokach B osiąga w końcowej fazie budowy ugięcie  $w_{\min}$ . Na tej podstawie wyznacza się wskaźnik zmiany ugięcia:

$$\eta = \frac{w_{\max}}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (2)$$

Z uwagi na dodatnie i ujemne wartości  $w_{\min}$  występują dwa zakresy wyników:  $\eta > 1$  i  $\eta < 1$ . Według tej zasady w pracy zaproponowano podział obiektów gruntowo-powłokowe na takie, w których wystarczające jest sprawdzanie wartości  $\omega$  (gdy  $\eta > 1$ ) i takie, w których istotne znaczenie w ocenie ich bezpieczeństwa może mieć faza użytkowa (gdy  $\eta < 1$ ). W tabeli 2 podano wyniki uzyskane z pomiarów analizowanych, charakterystycznych obiektów. Z wartości  $\eta$  widoczna jest różnica pomiędzy powłokami A i C oraz o AB i B. Wynika z nich, że powłoki typu A i C mogą być zaliczane do innej grupy niż powłoki AB i B. Charakterystyki geometryczne analizowanych obiektów zamieszczono w tabeli 1.

## Zmiana krzywizny i naprężeń w kluczu powłoki

W obiektach z blachy falistej o znaczeniu eksperymentalnym wykonuje się również pomiary tensometryczne (odkształceń jednostkowych) a stąd wyznacza się siły wewnętrzne ( $M$  – momenty zginające i  $N$  – siły osiowe). W tym przypadku niezbędna jest specjalistyczna aparatura pomiarowa [1, 3, 7]. Na podstawie deformacji górnego obszaru powłoki można wyznaczyć również siły wewnętrzne w powłoce np. momenty zginające ze zmiany krzywizny klucza pasma obwodowego blachy falistej. Do tego celu wykorzystuje się zależności geometryczne i przemieszczenia w oraz  $u$ , podane na rysunku 2 a algorytm obliczeń omówiono w pracach [3, 5, 6].

Wycinek pasma obwodowego w obszarze klucza powłoki wygięty jest w procesie wytwórczym tak, że jego promień krzywizny był stały i wynosił  $R$ . Wskutek oddziaływań zasympki gruntowej podanych na rysunku 2 powstaje w kluczu moment zginający o wartości  $M$ . W przypadku pręta o dużym promieniu  $R$  jego zmiana do wartości  $R_K$  wywołana momentem  $M$ , jest związana ze sztywnością elementu na zginanie ( $EI$ ) zależnością [3, 5]:

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{R_K} - \frac{1}{R} \quad (3)$$

Ze wzoru (3) można określić moment zginający jako

$$M = \frac{EI}{R} \cdot \frac{R - R_K}{R_K} \quad (4)$$

We wzorze (4) występuje bezwymiarowy parametr  $\rho$  określony w wytrzymałości materiałów jako zmiana krzywizny pręta, jak we wzorze

$$-\rho = \frac{R - R_K}{R_K} 100\% \quad (5)$$

Gdy  $R > R_K$  powłoka wygięta jest do góry (jak na rysunku 2) i wówczas przyjmuje się, że zmiana krzywizny jest ujemna tak samo jak moment

zginający. Oczywiście w analizowanych w pracy zagadnieniach nie jest istotny znak  $\rho$  oraz  $M$ . Bowiem gdy  $\rho > 0$  naprężenia w dolnej fali blachy są rozciągające a w fali górnej ściskające. Gdy  $\rho < 0$  jest odwrotnie, ale nie ma to wpływu na bezwzględne wartości obliczanych naprężeń, pochodzących od zginania.

Na podstawie  $\rho$ , czyli zmiany promienia krzywizny  $R$  do wartości  $R_K$  oblicza się moment zginający, jak w równaniu:

$$M = \frac{EI}{100 \cdot R} \rho \quad (6)$$

Wartość naprężenia normalnego  $\sigma$ , pochodzącego od zginania można obliczyć z (4) po uwzględnieniu wskaźnika zginania blachy falistej  $W$ , jak we wzorze

$$\sigma = \frac{M}{W} = E \frac{f+t}{200 \cdot R} \rho = \sigma_o \cdot \rho \quad (7)$$

Czynnik występujący w (7) jest stałą wartością charakterystyczną geometrii powłoki. Gdy blacha falista jest typu SC 380x140x7 (SC – oznaczenie profilu blachy;  $a$  – długość fali;  $f$  – wysokość fali;  $t$  – grubość blachy) a jej projektowy promień krzywizny  $R = 9930$  mm, jak w obiekcie AB, jego wartość wynosi

$$\sigma_o = E \frac{f+t}{200 \cdot R} = 205000 \frac{140+7}{200 \cdot 9930} = 15,17 \text{ MPa}$$

Charakterystyki geometryczne powłok z blach falistych analizowanych obiektów zestawiono w tabeli 3.

Na rysunku 4 przedstawiono liniową zależność naprężeń normalnych powstałych od zginania powłoki w zależności od zmiany krzywizny blach falistych stosowanych w obiektach gruntowo-powłokowych. W wartościach  $\sigma_o$ , podanych w ta-

beli 3, widoczny jest znaczny wpływ projektowej (początkowej) wartości promienia krzywizny  $R$ . Korzystając z równania (7) można wyznaczyć maksymalne (dopuszczalne) wartości krzywizny na podstawie założonej, dopuszczalnej wartości naprężenia  $\sigma_{\max}$ , jak we wzorze

$$\rho_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_o} \quad (8)$$

W ten sposób można również na podstawie wartości  $\sigma_{\max}$  oraz  $\sigma_o$  obliczyć minimalną (dopuszczalną) wartość promienia krzywizny  $R_K$ , z wykorzystaniem równań (5) i (7), jak w równaniu

$$R_{\max} = \frac{100\sigma_o}{100\sigma_o + \sigma_{\max}} R \quad (9)$$

## Zmiany ugięcia i naprężenia w kluczu powłoki

Zmiany wskaźników deformacji powłoki  $\omega$  i  $\rho$  jako funkcji grubości zasympki gruntowej  $z_g$  jak we wzorach:

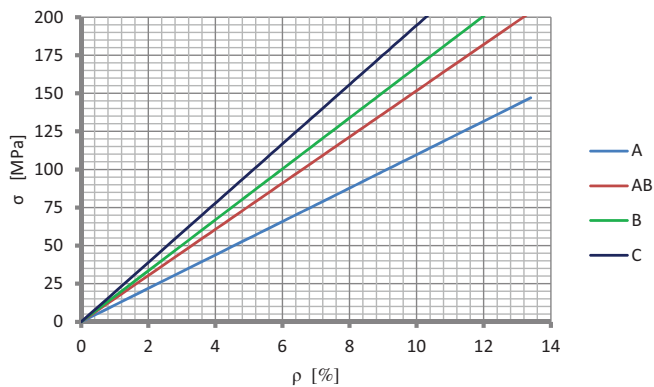
$$\omega(z_g) = \frac{w_K(z_g)}{L} 100\% \quad (10)$$

$$-\rho(z_g) = \frac{R - R_K(z_g)}{R_K(z_g)} 100\% \quad (11)$$

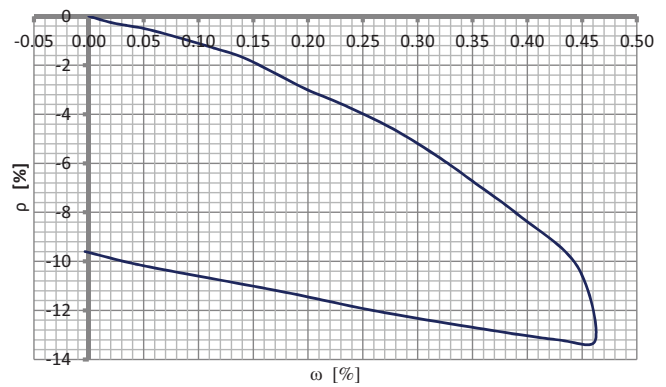
są podobne jak w przypadku wykresów zmiany ugięcia klucza powłok  $w(z_g)$  podanych na rysunku 3. Z wykresów tych wynika, że w pierwszej fazie układania zasympki, czyli gdy  $z_g < h$  (jak na rysunku 2) wskaźniki deformacji podlegają przyrostowi a gdy  $z_g > h$  ulegają redukcji. Jednak dopiero w funkcji  $\omega(\rho)$  widoczne są charakterystyczne cechy różniące analizowane powłoki, gdy zmiany naprężenia powstałego od zginania odniesione są do ugięcia klucza powłoki. Przedstawiono je na rysunkach 5-8, oddzielnie dla każdego rodzaju obiektu.

Tab. 3. Parametry wytrzymałościowe powłok

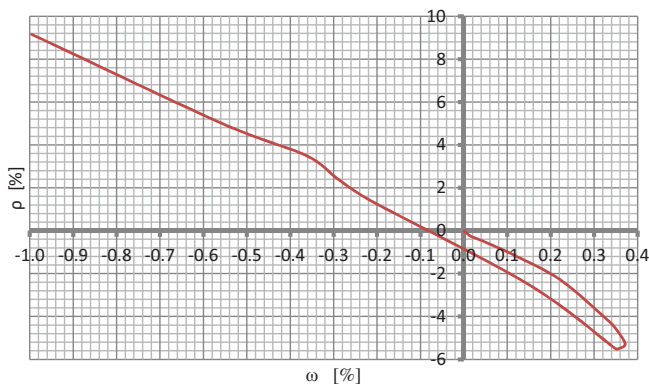
powłoka	Typ blachy	$R$ [m]	$\sigma_o$ [MPa]	$\rho_{\max}$ [%]	$\rho_{\min}$ [%]
A	SC 380x140x7	13,735	10,97	-	-13,4
AB	SC 380x140x7	9,930	15,17	6,6	-3,8
B	SC 380x140x4	8,820	16,74	8,2	-2,0
C	MP 200x550x2,93	3,052	19,46	-	-9,5



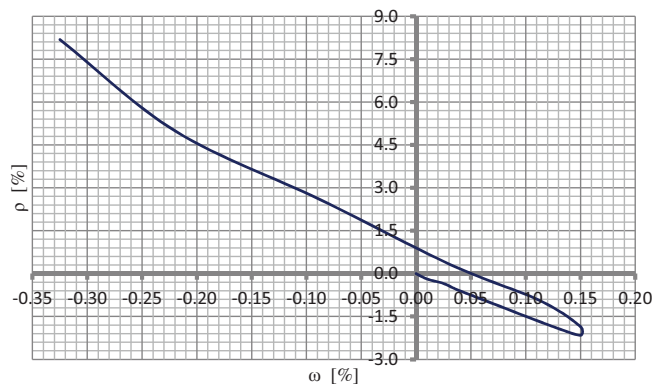
4. Zależność naprężeń normalnych od zmiany krzywizny



5. Zmiana geometrycznych wskaźników deformacji  $\omega(\rho)$  w powłoce A

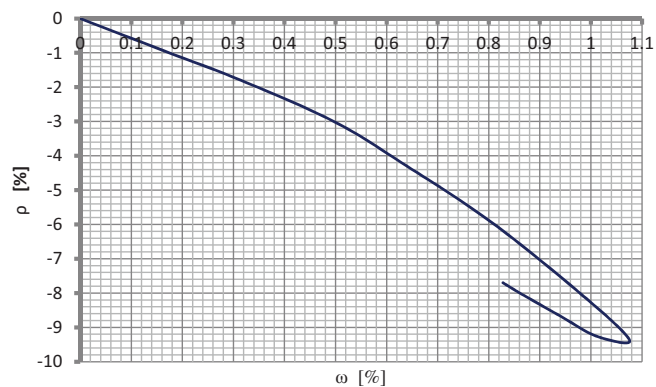


6. Zmiana geometrycznych wskaźników deformacji  $\omega(\rho)$  w powłoce AB



7. Zmiana geometrycznych wskaźników deformacji  $\omega(\rho)$  w powłoce B

Z zakresu wartości  $\omega$ , podanych na rysunkach 5-8, widoczne jest, że w powłokach grupy A i C zwykle wypiętrzenie nie podlega całkowitej redukcji po zakończeniu budowy, stąd  $\eta > 1$  oraz  $\omega(z_g) > 0$ . W powłokach typu B z reguły powstają ugięcia ( $w_{\min} < 0$ , stąd  $\eta < 1$ ) - zwykle znacznie większe od wypiętrzenia ( $w_{\max}$ ). Z porównania wykresów z rysunków 6 i 7 wynika, że powłoka AB pomimo geometrycznej przynależności do grupy A zachowuje się podobnie jak powłoka o kształcie B. Z analizy zmiany  $\rho$  odniesionej do  $\omega$  wynika, że powłoki A, AB i C można kwalifikować do tej samej grupy. W przypadku kształtu powłoki B zmiana krzywizny powłoki jest większa w pierwszej fazie układania zasyпки niż podczas układania naziomu ( $z_g > h$ ). W powłokach AB i B występuje zmiana znaku krzywizny podczas układania zasyпки, jak w wykresach podanych na rysunkach 6 i 7. Interesująca jest przy tym szczególna sytuacja gdy  $\rho = 0$  a stąd moment zginający jest zredukowany do zera. Wówczas, w pierwszej fazie budowy promień krzywizny  $R_K$  ulega zmniejszeniu w odniesieniu



8. Zmiana geometrycznych wskaźników deformacji  $\omega(\rho)$  w powłoce C

do wartości początkowej  $R$  by podczas układania naziomu na powłoce powrócić do wartości pierwotnej  $R$ . W tym szczególnym momencie ugięcia powłok osiągają następujące wartości, obliczone na podstawie wykresów  $\omega$  (z rysunków 6 i 7):

- powłoka AB

$$w_{AB} = L \cdot \omega_{AB} / 100 = 13460 \cdot$$

$$\cdot (-0,08) / 100 = -10,77 \text{ mm} ,$$

- powłoka B

$$w_B = L \cdot \omega_B / 100 = 8000 \cdot 0,05 / 100 =$$

$$= 4,00 \text{ mm}$$

Zatem w obydwu rodzajach powłok wystąpią inne znaki przemieszczenia klucza gdy  $\rho = 0$ .

Kolejną, szczególną sytuacją jest powstanie jednakowych promieni krzywizny  $R_K(z_g=h) = R_{\max}$  ale o odmiennych znakach, czyli  $-R_{\min} = R_{\max}$ . Wówczas obliczone ugięcia powłok są następujące:

- powłoka AB

$$w_{AB} = L \cdot \omega_{AB} / 100 = 13460 \cdot$$

$$\cdot (-0,62) / 100 = -83,45 \text{ mm}$$

- powłoka B

$$w_B = L \cdot \omega_B / 100 = 8000 \cdot$$

$$\cdot (-0,062) / 100 = -4,96 \text{ mm}$$

Większe wartości  $\rho$  w końcowej fazie budowy niż gdy  $z_g = h$  wskazuje na to, że miarodajnym dla bezpieczeństwa powłok AB i B są obciążenia eksploatacyjne obiektu. W powłokach A i C jest odwrotnie - maksymalne wartości naprężeń powstają podczas budowy gdy  $z_g = h$  i podczas budowy podlegają one redukcji gdy zasypka układania jest jako naziem nad powłoką. Z zależności wytrzymałościowych podanych wzorami (3) – (5) określano zmiany promienia krzywizny  $R_k$  i odniesiono je do wartości początkowej  $R$  we wskaźniku  $\rho$ . W interpretacji fizycznej wartość  $\sigma_o$  jest naprężeniem normalnym powstałym od jednostkowej wartości  $\rho = 1\%$ . Zatem wykresy zależności  $\omega(\rho)$  podane na rysunkach 5–8 można również traktować jako zależności  $\omega(\sigma)$  z zastosowaniem mnożnika  $\sigma_o$ . Do tego celu można wykorzystać wykresy podane na rys. 4.

## Podsumowanie

W pracy dzieli się podatne obiekty gruntowo-powłokowe z blach falistych na dwie grupy, w zależności od przebiegu deformacji podczas układania zasypki gruntowej. Taki podział konstrukcji poparto przykładami wyników badań czterech, reprezentatywnych obiektów o zróżnicowanej geometrii pasma obwodowego powłoki. W obydwu grupach miarodajną jest jedna z dwóch niebezpiecznych sytuacji budowlanych w powłokach z blach falistych konstrukcji gruntowo-powłokowych. Jedna z nich występuje gdy wskaźnik zmiany ugięcia jest z zakresu  $\eta > 1$ . Wówczas istotna jest początkowa faza budowy, gdy układana zasypka osiąga poziom klucza - jest wówczas istotna wartość wskaźnika wypiętrzenia  $\omega$ . Druga sytuacja jest trudniejsza do identyfikacji gdyż występuje podczas użytkowania obiektu.

O możliwości jej powstania można się przekonać w końcowej fazie budowy gdy wskaźnik zmiany ugięcia jest z zakresu  $\eta < 1$ . Wówczas do oceny bezpieczeństwa powłoki konieczna jest analiza naprężeń i obliczenia zmiany krzywizny  $\rho$ .

Na przykładzie analizowanych obiektów wykazano skuteczność stosowanych i dostępnych na budowie technik geodezyjnych. Istotne znaczenie ma tu dokładność odczytów – przemieszczeń rzędu 1% w stosunku do rozpiętości powłoki  $L$ . W przypadku określania deformacji pasma obwodowego powłoki, jak na rysunku 2 wskazano w pracach [3, 5, 6] na możliwość szacowania momentów zginających w kluczu powłoki a stąd naprężeń normalnych w blasze falistej. Wobec tego korzystając z pomiarów geodezyjnych można uzyskać również wyniki takie jak z pomiarów tensometrycznych - znacznie trudniejszych w realizacji badań. Analizowane w pracy wskaźniki geometryczne  $\omega$ ,  $\eta$  oraz  $\rho$  wyznaczone są na podstawie przemieszczeń w obszarze klucza powłoki. W pracy pokazano, że ich wartości są związane z geometrią pasma obwodowego powłoki. W praktyce istotne znaczenie ma również technologia układania zasypki i jej materiał, jak w obiekcie AB - obiekt o geometrii grupy A zachował się jak konstrukcja typu B. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bayoglu Flener E., Sundquist H. Full-scale testing of two corrugated steel box culverts with different crown stiffness. Archives of Institute of Civil Engineering. No 1/2007 p. 35- 44.
- [2] Korusiewicz L., Kunecki B. Behaviour of the steel box-type culvert during backfilling. Archives of Civil and Mechanical Engineering, XI,3,2011, p. 637-650.
- [3] Machelski C. Budowa konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2013.
- [4] Machelski C. Sztywność obiektu mostowego jako parametru użytkowego konstrukcji inżynierskich. Przegląd Komunikacyjny Nr 2/2016 s. 27-32.
- [5] Machelski C. Janusz L. Estimation of bending moments in the crown of a soil-steel bridge structure during backfilling. 6th European Conference on Steel and Composite Structures. Eurosteel 2011. Budapest, 31-2 September, 2011 p. 1365-1370.
- [6] Machelski C. Janusz L., Michalski J. B. Deformation Factors of Buried Corrugated Structures. Journal of the Transportation Research Board. Solid Mechanics. Transportation Research Board of National Academies, Washington D.C., 2009 p. 70-75.
- [7] 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.
- [8] Wadi A., Pettersson L., Karomi R. Flexible culverts in doping terrain: numerical solution of soil-steel loading effects, Engineering Structures, Vol. 101, 15 October 2015 pp. 111-124.