

# Budowlane obciążenia podatnych obiektów inżynierskich

## Construction loads of the soil-steel structures



**Czesław Machelski**

Prof. dr hab. inż.

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

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

**Streszczenie:** Charakterystyczną cechą konstrukcji gruntowo-powłokowych, w odróżnieniu od klasycznych mostów, jest duży wpływ zasyпки gruntowej i nawierzchni jezdni jako elementów nośnych obiektu. W modelu obiektu gruntowo-powłokowego wyróżnia się dwa podukłady konstrukcyjne: powłokę z blachy falistej oraz zasypkę gruntową z warstwami nawierzchni. Współdziałanie pomiędzy nimi modeluje się jako oddziaływanie kontaktowe, czyli siły o kierunku normalnym i stycznym do powierzchni powłoki. W pracy podano algorytm, w którym na podstawie odkształceń jednostkowych określa się siły wewnętrzne w powłoce a stąd oddziaływania kontaktowe. W rozwiązaniu wykorzystuje się warunek zgodności wzajemnych oddziaływań pomiędzy gruntem a powłoką. Dopuszcza się powstawanie poślizgu w styku tych podukładów. W analizie zwrócono uwagę na minimalne grubości naziomu bezpieczne dla obciążeń budowlanych.

**Słowa kluczowe:** Konstrukcje gruntowo-powłokowe; Oddziaływanie gruntu na powłokę; Minimalne grubości naziomu; Obciążenia budowlane

**Abstract:** A characteristic feature of the soil-steel structure, unlike conventional bridges, is greatly influenced by the backfill ground and the road surface as a load-bearing elements. In the model of soil-steel structure there are two structural parts: steel shell with corrugated pates and backfilling ground with road surface. The interaction between them is modelled as an contact interaction (interface), which is a normal and tangential force to the surface of the shell. The paper provides an algorithm in which the internal forces in the shell are determined on the basis of unit deformations and hence contact effects. The solution uses the condition of compatibility of contact between the soil and the shell and it is allowed to slip at the interface between these two structural parts. In the analysis, attention was paid to the minimum backfilling cover thickness above the shell crown that is safe for construction loads.

**Keywords:** Soil-steel structures; The backfilling ground impact of the shell; Minimum backfilling cover depth; Construction loads

W pracy analizuje się podatne konstrukcje inżynierskie na przykładzie mostowych obiektów gruntowo-powłokowych. Ich charakterystyczną cechą w odróżnieniu od klasycznych mostów, jest duży wpływ zasyпки gruntowej i nawierzchni jezdni jako elementów nośnych obiektu [1, 2]. W pracy rozpatruje się fazę budowlaną obiektu gdy występuje minimalna grubość naziomu (zasyпки nad powłoką) i brak jest nawierzchni. Wynikami analiz - skutków przejazdu pojazdów budowlanych są oddziaływania gruntu (naziomu) na konstrukcję oraz siły wewnętrzne w powłoce.

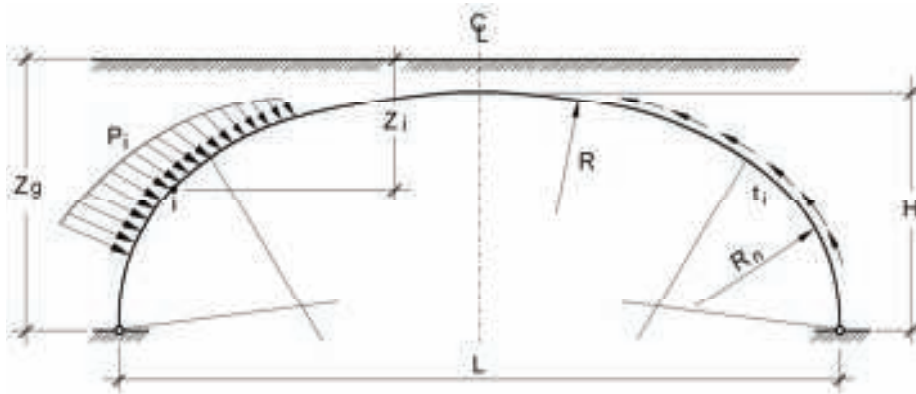
W początkowej fazie budowy nośność samej powłoki w obiekcie inżynierskim jest niewielka. Podczas układania zasyпки powłoka podlega znacznej deformacji bowiem jest ona geometryczną formą ograniczającą grunt w

budowanym obiekcie [1]. Stąd powłoka podczas budowy przejmuje parcie gruntu podobnie jak ściana oporowa (ale podatna). Dopiero w otoczeniu zasyпки gruntowej powłoka współpracująca z naziemem staje się efektywnym elementem konstrukcji pozwalającym na przenoszenie znacznych obciążeń budowlanych, jak na rysunku 1. Podczas modernizacji nawierzchni tak jak w końcowej fazie budowy obiektu po

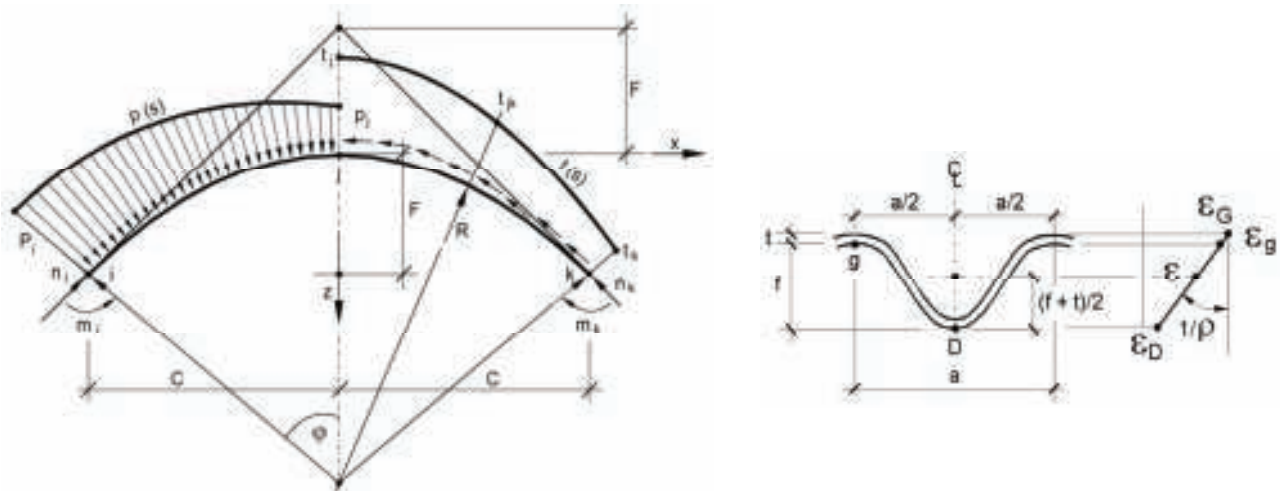
naziomie, nad powłoką przejeżdżają pojazdy transportowe o dużych ciężarach i naciskach na koła. Wywołują one większe oddziaływania na podatne obiekty inżynierskie niż w przypadku eksploatowanego obiektu bowiem nie występuje rozkład obciążenia przez nawierzchnię. Ważne znaczenie dla bezpieczeństwa obiektu ma grubość zasyпки nad powłoką (naziom).



1. Przykład obciążenia budowlanego



2. Schemat sił oddziaływania gruntu na powłokę w obiekcie



3. Oznaczenia sił wewnętrznych i oddziaływań kontaktowych oraz odkształceń w powłoce

## Zależność odkształcenie powłoki – oddziaływanie gruntu

W modelach obiektów gruntowo-powłokowych wyróżnia się dwa podukłady konstrukcyjne [1, 2, 3, 4]: powłoka oraz pozostała część w postaci zasypki gruntowej (oraz nawierzchnia z podbudową jezdni). Współdziałanie pomiędzy nimi modeluje się jako oddziaływanie kontaktowe (interface) w postaci sił powierzchniowych, rozkładanych z reguły na dwie składowe: normalną  $p$  i styczną  $t$ , jak na rysunku 2.

W pracy analizuje się górną część powłoki gdzie promień krzywizny wynosi  $R$ . Ta część powłoki podlega największym oddziaływaniom pochodzącym od pojazdów użytkowych. Efekty wynikające z oddziaływań gruntu na powłokę powstałe w trakcie budowy i podczas eksploatacji są sumowane ze skutkami obciążeń ruchomych obiektu mostowego. Zatem w modelu MES, w którym analizuje się siły w ośrodku gruntowym niezbędne jest odwzorowanie ich stanu z okresu budowy obiektu [1, 4].

W badaniach sił wewnętrznych w powłokach z blachy falistej wykorzystuje się bazę pomiarową utworzoną z tensometrów. Na wybranym środkowym paśmie obwodowym obiektu nakleja się na dostępnej od wewnątrz powierzchni blachy tensometry elektrooporowe. W każdym punkcie pomiarowym czujniki rozmieszcza się parami, w wierzchołku i dolinie korugacji, usytuowane w kierunku pasma obwodowego powłoki, jak na rysunku 3.

Bliźniaczy układ czujników, przy przyjęciu zasady płaskich przekrojów, umożliwia wyznaczenie odkształceń w osi bezwładności przekroju poprzecznego blachy falistej jak w zależności

$$\epsilon(s) = \frac{\epsilon_D(f-g) + \epsilon_g(f+g)}{2f} \quad (1)$$

We wzorze (1) ujęta jest geometria blachy falistej np. SC  $a \times f \times g$  (o długości fali  $a$ , jej wysokości  $f$  i grubości blachy  $g$ ). Do określenia zmiany promienia krzywizny powłoki  $\rho$  można wykorzystać zależności geometryczne blachy oraz  $\epsilon_D$  i  $\epsilon_g$  jak w równaniu

$$\kappa(s) = \frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_g - \epsilon_D}{f} \quad (2)$$

Wyznaczone we wzorach (1) i (2) wielkości geometryczne wykorzystuje się do określenia sił wewnętrznych w powłoce: siły osiowej

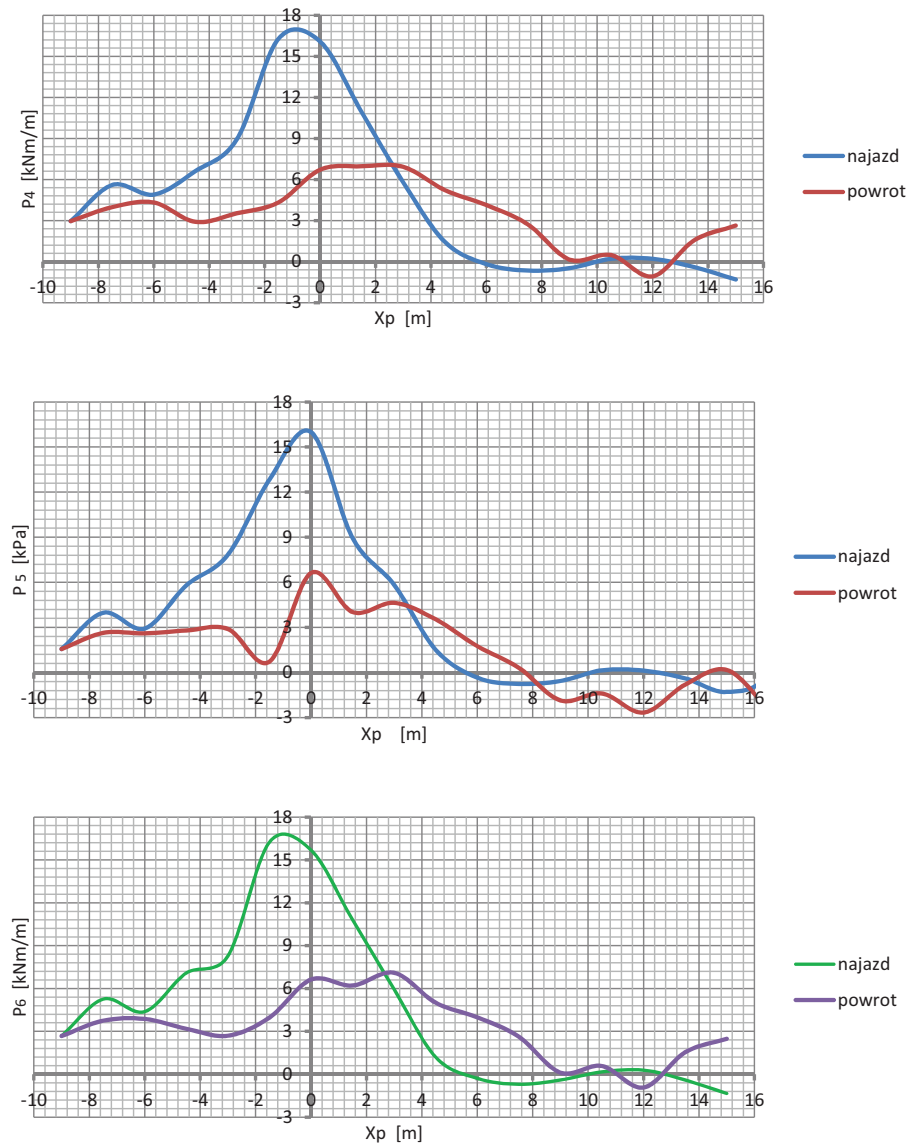
$$n(s) = \frac{E \cdot A}{a} \epsilon(s) \quad (3)$$

oraz momentu zginającego

$$m(s) = \frac{E \cdot I}{a} \kappa(s) \quad (4)$$

gdzie:  $A/a = 9,81 \text{ mm}^2/\text{mm}$  i  $I/a = 24165 \text{ mm}^4/\text{mm}$  są charakterystykami geometrycznymi przekroju poprzecznego blachy falistej SC 381×140×7 (o długości fali  $a = 381 \text{ mm}$ ) natomiast  $E = 205000 \text{ MPa}$  jest cechą wytrzymałościową materiału (stali).

Z zależności statycznych sił wewnętrznych  $n(s)$  i  $m(s)$  jako funkcji odniesionej do osi biegnącej wzdłuż pasma obwodowego powłoki  $s$  otrzymuje się w ujęciu różnicowym oddziaływanie normalne



4. Oddziaływania normalne w obszarze klucza pasma obwodowego powłoki

$$p_j = \frac{m_i - 2m_j + m_k}{b^2} + \frac{n_j}{R} \quad (5)$$

oraz styczne

$$t_{jk} = \frac{n_j - n_k}{b} + \frac{m_j - m_k}{b \cdot R} \quad (6)$$

Odległości pomiędzy punktami  $i, j, k$  są wycinkiem koła, jak na rysunku 3, o długości łuku  $b$ . Wartość  $p_j$  obliczana jest w punkcie pomiarowym powłoki  $j$ , natomiast siły  $t_{jk}$  pomiędzy punktami  $j$  oraz  $k$ , jak na rysunku 3.

## Oddziaływania kontaktowe

Jako przykład realizacji badań z użyciem tensometrii elektrooporowej przedstawiono w pracy wyniki pomiarów obiektu testowego wybudowanego w Rydzynie [1] o rekordowej rozpiętości  $L = 17,594$  m z blachy SC

381×140×7, bez nakładek. Parametry geometryczne pasma obwodowego powłoki odniesione do osi bezwładności blachy falistej to: jej wysokość  $H = 5,459$  m i promień krzywizny w kluczu  $R = 13,735$  m. Grubość naziomu nad powłoką wynosiła  $h = 1,12$  m. Długości łuku pomiędzy punktami pomiarowymi wynoszą  $b = 1,2$  m.

Położenie pojazdu określano na rysunkach względem klucza powłoki jako współrzędną  $x_p$ . Przejazd ładowarki odbywał się wzdłuż pasma obwodowego powłoki, w sposób kroczący o  $\Delta x_p = 1,5$  m. Naciski na osie w ładowarce (bez urobku) były zbliżone:  $P_1 = 114,3$  kN (oś referencyjna) i  $P_2 = 104,7$  kN. Rozstaw osi (liczony wzdłuż pasma powłoki) wynosił 3,4 m. Położenie kół pojazdu było symetryczne względem analizowanego pasma pomiarowego powłoki

ki. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zmiany składowych oddziaływań kontaktowych: normalnych  $p$  i stycznych  $t$ . Określenie dodatnich wartości  $p$  i  $t$  jako oddziaływań gruntu na powłokę podano na rysunkach 2 i 3. Na osi poziomej tych wykresów podano wartość  $x_p$  jako odległość siły  $P_1$  od klucza powłoki. W legendzie rysunków oznaczono wykres powstały w trakcie przejazdu pierwotnego oraz z przejazdu powrotnego. W obydwu przejazdach położenie pojazdu jest identyczne, w każdym ustawieniu oznaczonym jako  $x_p$ . Rozpoczęcie i zakończenie pomiarów odbywało się gdy  $x_p = 21$  m. Gdy  $x_p = -9$  m występowało zmiana kierunku przejazdu. Szczególne położenia pojazdu to:

$x_p < L/4 = 4,4$  m gdy narastają oddziaływania kontaktowe;

$x_p = 0$  gdy oś  $P_1$  ładowarki znajduje się nad kluczem;

$x_p = -1,7$  m gdy osie  $P_1$  i  $P_2$  pojazdu są w równej odległości od klucza;

$x_p = -3,4$  m gdy oś  $P_2$  znajduje się nad kluczem.

Do określenia analizowanych punktów powłoki na rysunkach 4 i 5 wykorzystano oznaczenia położenia punktów pomiarowych:  $x_4 = 1,2$  m  $x_5 = 0$  (klucz)  $x_6 = -1,2$  m. Wykresy podane na rysunku 4 są bardzo podobne co do kształtu ale ze znacznymi różnicami wartości podczas przejazdu pierwotnego i wtórnego. Zbliżone maksymalne wartości  $p$  w punktach 4, 5, 6 oznaczają, że w obszarze klucza powłoki występują zbliżone parcia od ciężaru ładowarki. Podczas przejazdu pierwotnego nie występuje druga fala o ekstremalnej wartości gdy nad analizowanym punktem znajduje się druga oś ładowarki  $P_2$ . Takie ekstrema są widoczne przy przejeździe wtórnym. Wniosek z tych wyników analizy to istotna redukcja oddziaływań  $p$  w trakcie powrotu pojazdu do stanu wyjściowego. Zatem występuje pętla histerezy w przypadku parcia gruntu [5,6].

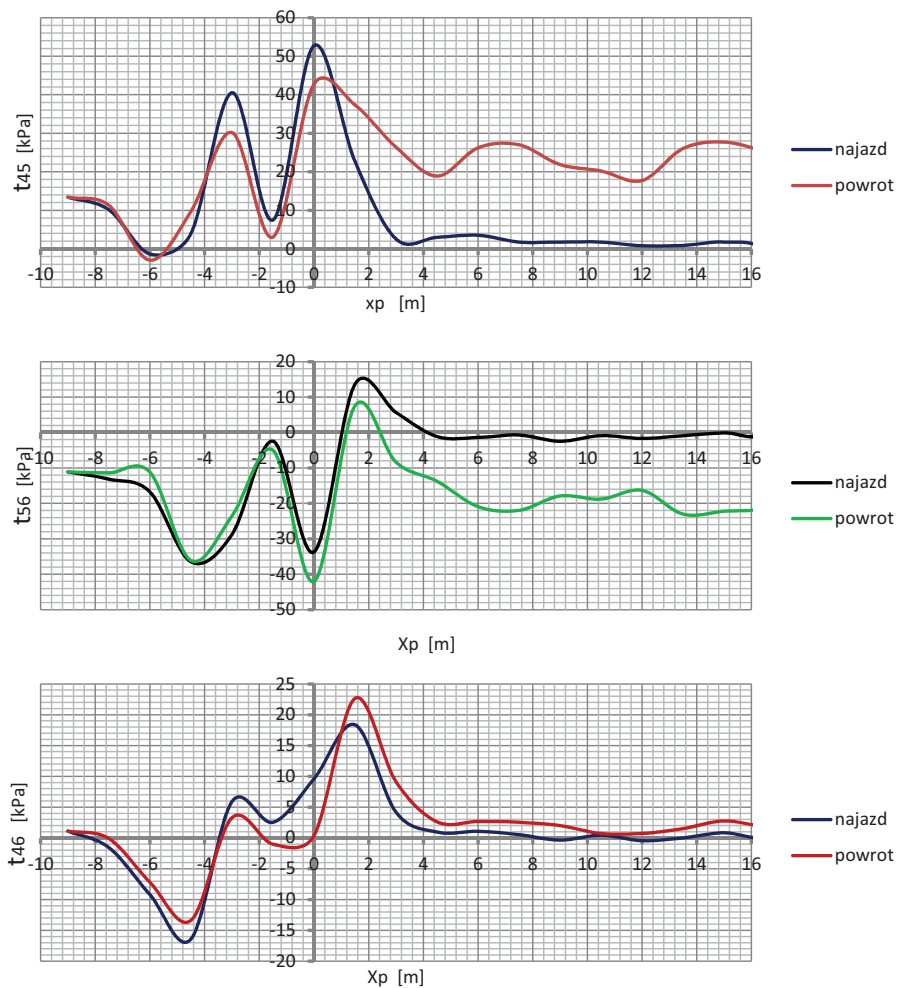
Na rysunku 5 przedstawiono wykresy oddziaływań stycznych. Z uwagi na sposób ich obliczania według wzoru (6) są to wartości średnie pomiędzy punktami pomiarowymi z lewej i prawej strony pasma obwodowego. Siły styczne  $t_{45}$  są skierowane zgodnie (zwroty) do  $t_{56}$ . Siły styczne  $t_{46}$  można uważać za wartości w kluczu powłoki

tylko, że obliczane są na podstawie odległych od siebie punktów 4 i 6 (czyli  $b = 2,4$  m) podczas gdy dwa poprzednie wykresy uzyskane są z przedziału krótszego bo  $b = 1,2$  m. Zasadniczą różnicą wartości  $t$  w odniesieniu do parcia jest to, że podczas przejazdu pierwotnego i wtórnego funkcje  $t(x_p)$  są podobne.

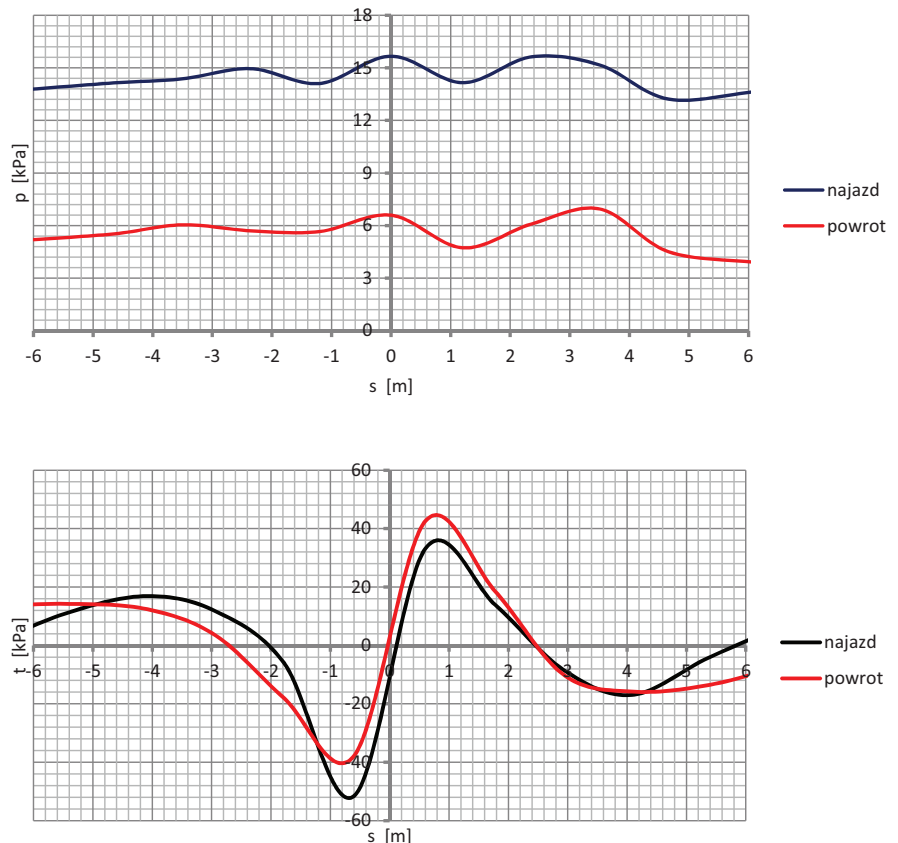
Istotne znaczenie mają duże wartości siły  $t$  powstające w trakcie powrotu pojazdu do stanu wyjściowego. Takie same wykresy uzyskano również w przypadku punktów położonych dalej od klucza ale po przeciwnej stronie osi symetrii powłoki. Zatem nie powstaje pętla histerezy w przypadku sił stycznych. Zupełnie inny wykres uzyskuje się w przypadku sił stycznych w kluczu powłoki  $t_{46}$ . W tym przypadku po zjeździe pojazdu powstaje zrównoważony układ sił zatem siły  $t_{45}$  i  $t_{56}$  są zbliżone co do wartości lecz przeciwnie skierowane.

Na rysunku 6 przedstawiono wykresy oddziaływań normalnych i stycznych z jednego, szczególnego położenia pojazdu gdy  $x_p = 0$ , czyli gdy siła  $P_1$  znajduje się nad kluczem powłoki. Na osi poziomej wykresu podano odległości analizowanych punktów od klucza powłoki  $s$  ale liczonych po łuku o promieniu  $R$ . Najazd na powłokę odbywa się od strony dodatnich wartości  $s$  a powrót w przeciwną stronę (ustawienia pojazdu są identyczne) a oś  $P_2$  znajduje się nad dodatnimi rzędnym. Z wykresu parć widoczne jest położenie obydwu osi na obiekcie – bardzo podobne podczas najazdu i powrotu ale z dużą różnicą wartości.

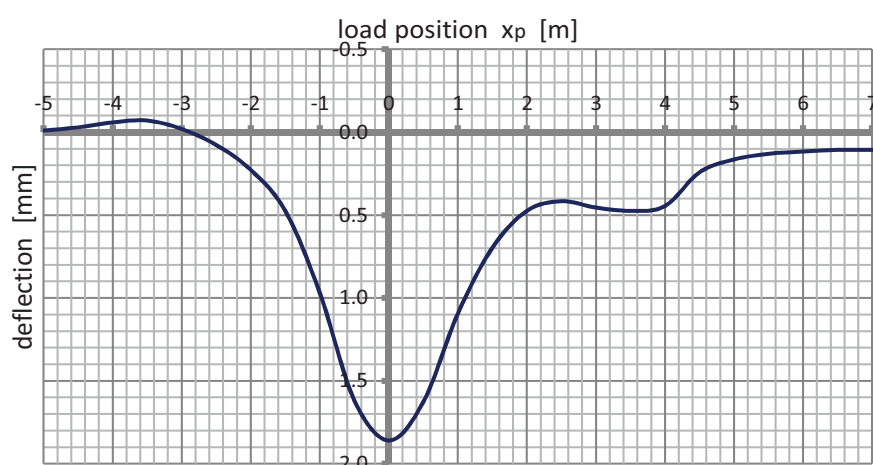
W przypadku sił stycznych widoczny jest układ asymetryczny wykresu  $t(s)$  co oznacza odwrotny zwrot siły stycznej w odniesieniu do klucza powłoki. Wyniki te potwierdzają wykresy  $t_{46}$  podane na rysunku 5. Bardzo duże wartości  $t(s)$  w odniesieniu do  $p(s)$  nie są w tym przypadku błędem algorytmu obliczeń (i pomiarów). W proporcji  $t/p$  – nieprzekraczającej, z założenia, współczynnik tarcia w wartościach  $p$  dawanych w pracy nie uwzględniono efektów oddziaływań od ciężaru zasypki gruntowej (efektów powstałych podczas budowy). Na dodatek w wartości  $t$  w blasze falistej powinny być zmniejszone o  $\pi/2$  z uwagi na faktyczną powierzchnię oddziaływania sił stycznych.



5. Oddziaływania styczne w obszarze klucza pasma obwodowego powłoki



6. Zmiany parcia gruntu w paśmie obwodowym powłoki w położeniu obciążenia  $x_p = 0$



7. Zmiany ugięcia klucza powłoki podczas przejazdu ładowarki [7]

W analizowanym przykładzie obiektu maksymalne naprężenie w blasze falistej osiągało wartość

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 205000 \cdot 184 \cdot 10^{-6} = 37,7 \text{ MPa}$$

## Współpraca naziomu z powłoką

Jako przykład realizacji badań skuteczności współpracy naziomu z powłoką z użyciem obciążeń budowlanych przedstawiono w pracy wyniki pomiarów obiektu testowego wybudowanego w Szwecji [7]. Wyniki analiz służyły do opracowania wytycznych projektowania konstrukcji gruntowo-powłokowych z blach falistych. Zastosowano w obiekcie powłokę o kształcie zamkniętym, jak na rysunku 7, z blachy o niskim profilu MP 200×55×2,93. Parametry geometryczne pasma obwodowego powłoki odniesione do osi bezwładności blachy falistej to: rozpiętość  $L = 6,04$  m jej wysokość  $H = 4,55$  m i promień krzywizny w kluczu  $R = 3,052$  m. Zmiennym parametrem w tych bada-

niach była grubość naziomu nad powłoką o wartościach zestawionych w tab. 1.

W badaniach realizowano przejazd ładowarki po obiekcie bez nawierzchni co ma odpowiadać sytuacji budowlanej. Przejazd pojazdu, jak na rysunku 7 odbywał się wzdłuż pasma obwodowego powłoki, w sposób kroczący o  $\Delta x_p = 0,5$  m. Położenie pojazdu określano na rysunkach względem klucza powłoki jako współrzędną  $x_p$ . Naciski na osie w ładowarce (z urobkiem) były zróżnicowane:  $P_1 = 221$  kN (oś referencyjna) i  $P_2 = 69$  kN. Rozstaw osi (liczony wzdłuż pasma powłoki) wynosił 3,4 m. Bazę pomiarową stanowiły czujniki przemieszczeń oraz tensometry elektrooporowe.

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg ugięcia klucza powłoki w podczas przejazdu ładowarki gdy grubość naziomu wynosiła  $h = 1,5$  m. Na wykresie tym widoczny jest efekt różnicy nacisków na osie. Gdy  $x_p = 0$  nad kluczem powłoki znajdowała się siła  $P_1$  i

Tab. 1. Maksymalne wartości ugięcia i sił wewnętrznych w kluczu powłoki w funkcji grubości naziomu

Analizowana wielkość	Grubość naziomu $h$ [m]			
	0,75	0,90	1,20	1,50
$w$ [mm]	6,77	4,22	2,97	1,86
$n$ [kN/m]	121,4	80,4	57,0	43,0
$m$ [kNm/m]	6,93	3,70	1,85	1,10
$\sigma$ [MPa]	187,8	104,0	56,81	36,36

wystąpiło ugięcie maksymalne. Gdy  $x_p = 3,4$  m pojawił się efekt oddziaływania siły  $P_2$  a ugięcie jest proporcjonalnie do sił mniejsze. W tab. 1 zestawiono maksymalne wartości ugięć  $w$  oraz sił wewnętrznych w kluczu powłoki uzyskane z pomiarów. Z analizy tych wielkości jako funkcji grubości naziomu wynika ograniczenie wartości obciążeń budowlanych. Gdy  $h < 0,75$  m bardzo szybko wzrastają naprężenia normalne w powłoce. Na podstawie danych zamieszczonych w tab. 1 można utworzyć zależność naprężeń

$$\sigma(h) = \left( \frac{17}{4 \cdot h} \right)^3 \text{ MPa}, \quad (7)$$

a stąd gdy  $h = 0,5$  m otrzymuje się z (7)  $\sigma = 614$  MPa. Zatem przy małych grubościach naziomu  $h$  obciążenia budowlane stwarzają niebezpieczeństwo wywołania trwałych deformacji powłoki. W przypadku wybudowanych obiektów – z nawierzchnią występuje znaczna redukcja ugięć i sił wewnętrznych [1, 8].

## Podsumowanie

W pracy rozpatruje się sytuację budowlaną gdy w obiekcie występuje minimalna grubość naziomu (zasyпки nad powłoką) i brak jest nawierzchni. Dotyczy to sytuacji modernizacji nawierzchni od dawna eksploatowanego obiektu jak również końcowej fazy budowy. W takiej sytuacji podczas przejazdu pojazdów transportowych o dużych ciężarach i naciskach na koła występują większe oddziaływania na podatne konstrukcje inżynierskie niż w eksploatowanym obiekcie. W pracy podano wyniki analiz oddziaływania gruntu na konstrukcję oraz przemieszczenia i siły wewnętrzne w powłoce jako skutki przejazdu pojazdu budowlanego – ładowarki. W przykładzie wskazano na minimalne grubości naziomu nie-

zbędne do przejazdów ciężkich pojazdów budowlanych. Zbyt małe grubości mogą być powodem postawiania trwałych (polastyucznych) deformacji powłoki.

W pracy szczegółowo omówiono algorytm wyznaczania oddziaływań kontaktowych gruntu na powłokę w postaci składowych normalnych  $p$  i stycznych  $t$ . W rozpięzaniu wykorzystuje się warunek zgodności oddziaływań kontaktowych pomiędzy gruntem a powłoką. Nie uwzględnia się zasady zgodności przemieszczeń czyli dopuszcza się powstawanie poślizgu w styku tych podukładów. Jest to ważną zaletą algorytmu. Określenie funkcji  $p(s)$  i  $t(s)$  umożliwia oddzielną analizę powłoki jako wydzielonego podukładu – podatnego obiektu inżynierskiego. W obiektach gruntowo-powłokowych oddziaływania obciążeń ruchomych (zmieniających położenie) jest odrębnym zagadnieniem [6, 8, 9]. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Machelski C.: Budowa konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2013.
- [2] Machelski C, Janusz L.: Application of Results of Test in Developing 2D Model for Soil-Steel Railway Bridges. Journal of the Transportation Research Board. Solid Mechanics, 1/2017 pp. 70-75.
- [3] Machelski C.: Szacowanie oddziaływania zasyпки na powłokę w obiekcie gruntowo-powłokowym na podstawie deformacji powłoki. Przegląd Komunikacyjny 11/2016
- [4] Szajna W.S. Numerical model for the analysis of construction process of soil-steel culverts. Archives of Institute of Civil Engineering. No 1/2007 p. 215-223.
- [5] Sielver M L, Seed H B.: Changes in Sands during Cyclic Loading. ASCE Soil Mechanics and Foundations Division Vol. 97, No SM9, September 1971.
- [6] Sobótka M.: Numerical simulation of hysteretic live load effect in soil-steel bridge. Studia Geotechnika et Mechanica. 36.1 (2014) pp. 103-109.
- [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] Machelski C.: Dependence of deformation of soil-shell structure on the direction of load passage. Bridge and Road 13 (2014), pp. 223-233.
- [9] White K, Sargand S, Massada T.: Evaluation of load rating procedure for metal culverts under shallow soil covers. Archives of Institute of Civil Engineering 23/2017 pp. 311-323.



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

ViaCon Polska Sp. z o.o.

ul. Przemysłowa 6  
64-130 Rydzyna  
tel.: +48 65 525 45 45  
fax: +48 65 525 45 55  
office@viacon.pl

[www.viacon.pl](http://www.viacon.pl)