



CZESŁAW MACHELSKI<sup>1)</sup>  
BERNARD MICHALSKI<sup>2)</sup>

## ODKSZTAŁCENIA MOSTOWYCH KONSTRUKCJI GRUNTOWO-POWŁOKOWYCH

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiono dwa przykłady obiektów o konstrukcji gruntowo-powłokowej: pierwszy o minimalnym czasie realizacji (kilku dni) oraz drugi wykonywany z zastosowaniem klasycznej technologii budowy tych konstrukcji. Na podstawie wyników badań wybudowanego, klasycznego obiektu wykazano, że pod oddziaływaniem pulsacyjnym zasyпка gruntowa mimo, że jest ograniczona od góry nawierzchnią drogową a od dołu powłoką, zachowuje się jak ciało sypkie. Ta cecha, charakterystyczna dla obiektów gruntowo-powłokowych jest więc wspólną dla konstrukcji budowanych i użytkowanych. Koncepcję oddziaływania pulsacyjnego oraz odpowiedniego obciążenia naziomu (balastowania) obiektu w trakcie budowy wykorzystano do realizacji konstrukcji liniowej o przekroju rurowym. Ułożenie powłoki na słabym podłożu umożliwiło znaczne uproszczenie technologii i skrócenie czasu realizacji obiektu. Rozpatrywane dwa zupełnie różne obiekty mostowe z grupy konstrukcji gruntowo-powłokowych łączył jednolity sposób oddziaływania na powłokę poprzez wibrację zasyпки gruntowej. W badaniach obydwu obiektów stwierdzono jednakowe zachowanie się zasyпки gruntowej pod tym oddziaływaniem jako ciała sypkiego.

### 1. WPROWADZENIE

Budowle komunikacyjne w postaci obiektów zanurzonych w gruncie, takie jak przepusty lub małe mosty, można podzielić na dwie, zasadnicze grupy [1-2] tj. konstrukcje podatne oraz sztywne. W konstrukcjach podatnych występuje korzystna współpraca cienkiej powłoki z zasypką gruntową w przenoszeniu obciążeń pionowych

<sup>1)</sup> dr hab. inż. – Instytut Inżynierii Łądowej Politechniki Wrocławskiej

<sup>2)</sup> mgr inż. – Przedsiębiorstwo Innowacyjno-Wdrożeniowe „Ekspert” Nowa Ruda

z nawierzchni drogowej. W związku z tym, przy projektowaniu takich obiektów zasypkę oraz nawierzchnię jezdni traktuje się jako elementy konstrukcji, a nie jako wypełnienie przyjmowane w mostach sklepionych. Układ nośny konstrukcji podatnej jest bardzo niejednorodny, składa się bowiem z zachowującej się sprężystości powłoki oraz nawierzchni i zagęszczonego gruntu (ośrodka sypkiego).

Kształty przekrojów poprzecznych powłok mogą być zróżnicowane [3-5]. Dostosowane są one z zasady do rodzaju przeszkody np. wodnej czy komunikacyjnej. Z uwagi na przekrój wzdłuż pasma obwodowego powłoki obiekty gruntowo-powłokowe dzieli się na otwarte i zamknięte (rurowe). Powłoki otwarte zamocowane są w fundamencie (np. betonowym). Powłoki zamknięte spoczywają zwykle na specjalnie przygotowanym podłożu np. z betonu o niskiej wytrzymałości. Takie podłoże może być również traktowane jako fundament niepodatny.

Z kształtem powłoki związana jest zwykle grubość zasyпки gruntowej nad powłoką, w środku rozpiętości. Dążenie do projektowania małej wysokości konstrukcyjnej (małej grubości zasyпки) w tych obiektach jest zgodne z tendencją uzyskiwania możliwie największej przestrzeni pod mostem przy minimalnej ilości gruntu nad konstrukcją. Z tego względu występują powłoki o małej wyniosłości tzw. konstrukcje skrzynkowe. W takich obiektach [6], w odróżnieniu od mostów typowych z grubą warstwą zasyпки gruntowej nad powłoką [7-9], należy się spodziewać efektów lokalnych przy obciążeniu taborem samochodowym. W celu złagodzenia skutków obciążeń kołami samochodowymi w obiektach o małej grubości zasyпки stosuje się czasem dodatkowe płyty betonowe, wykonywane nad powłoką, a pod nawierzchnią [10].

Badania konstrukcji gruntowo-powłokowych dotyczą zwykle dwóch rodzajów oddziaływań obciążeń na nawierzchnię jezdni:

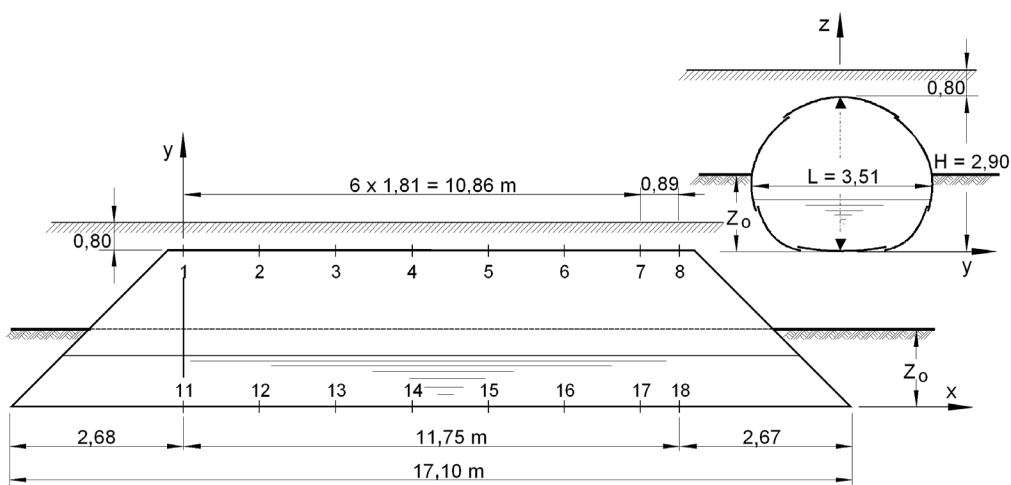
- stacjonarne, gdy pojazdy ustawiane są w wybranym miejscu na obiekcie a ich oddziaływanie na obiekt jest krótkotrwałe (doraźne) lub długotrwałe,
- zmienne, o zmiennym położeniu pojazdów lub oddziałujące w sposób dynamiczny na konstrukcję.

Wyniki pomiarów na obiektach rzeczywistych, dla obciążeń doraźnych, potwierdzają słuszość stosowania modeli obliczeniowych MES. W świetle wyników badań [6, 8] można zauważyć, że pod obciążeniami krótkotrwałymi jezdni konstrukcje te zachowują się sprężysto. Pod obciążeniami długotrwałymi widoczne są jednak efekty opóźnione [11-12].

## 2. DEFORMACJE POWŁOKI W TRAKCIE BUDOWY

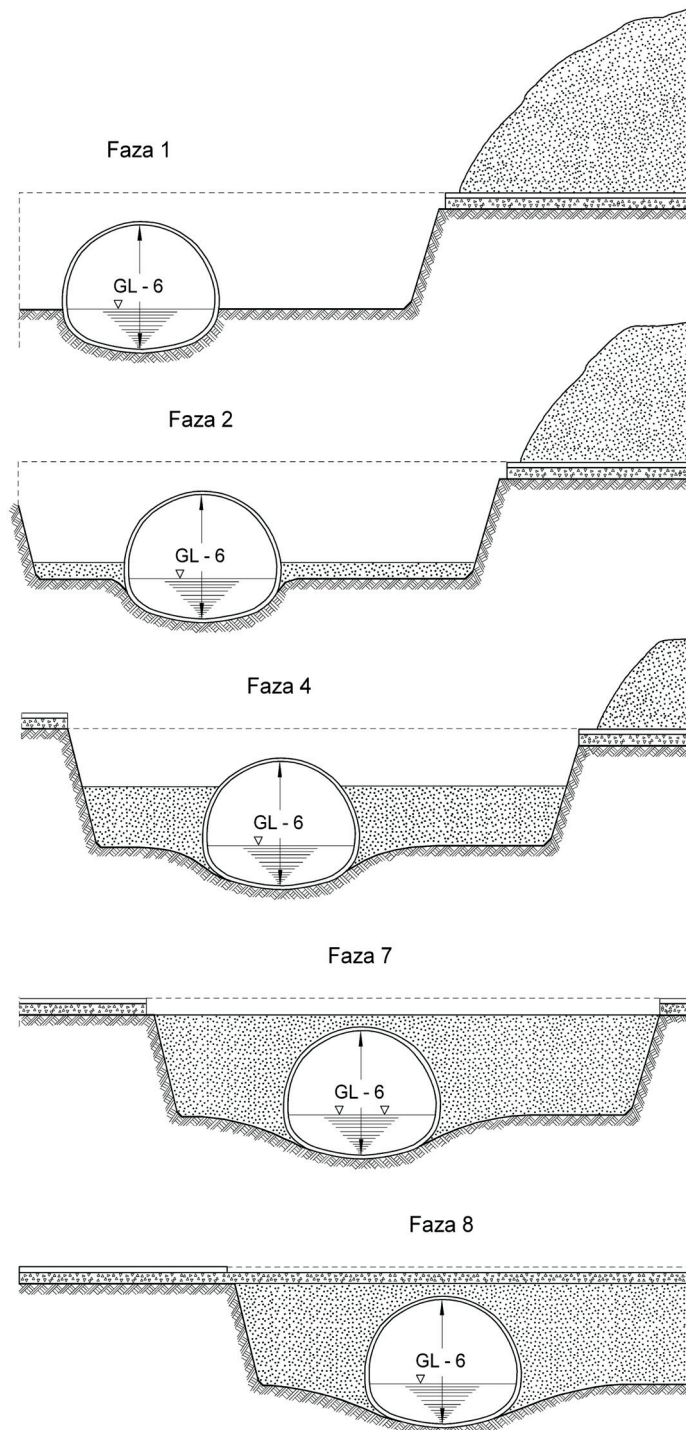
W fazie budowy obiektu zasyпка gruntowa, układana warstwami, jest obciążeniem powłoki, powodującym jej deformację. Z drugiej strony, gdy deformacja powłoki napotyka na opór otaczającego ją gruntu, zasyпка jest elementem układu nośnego. Pod działaniem urządzeń mechanicznych wywołujących drgania konstrukcji, zasyпка gruntowa staje się ciałem sypkim, dostosowującym się do kształtu zdeformowanej powłoki. W trakcie zasypywania konstrukcji rozkład obciążenia oraz schemat statyczny ulegają więc ciągłym zmianom.

Niżej podano wyniki badań przepustu (konstrukcji liniowej) o przekroju zamkniętym, rurowym o schemacie jak na rys. 1. Przedmiotowy obiekt zlokalizowany jest w ciągu drogi Niemodlin - Lewin Brzeski. Przeszkodę stanowił kanał charakteryzujący się wysokim stanem wody o wysokości 1 m, przy jego szerokości 3 m oraz bardzo małym spadku, wynoszącym 0,4 %. Przepust był prostokątny w planie; został wykonany jako konstrukcja składająca się ze stalowej powłoki typu Multi Plate 150 GL-6 o wymiarach fali  $150 \times 50 \times 5$  mm. Zabezpieczenie antykorozyjne blach stanowi warstwa cynku o grubości  $75 \mu\text{m}$  nałożona metodą ogniową. Na miejsce budowy konstrukcję stalową dostarczono w postaci arkuszy blach, które połączono ze sobą śrubami M 20 klasy 8.8. Rurę skręcano w wykopie, na półce o szerokości 5 m, wykonanej powyżej poziomu wody (około 0,15 m). Składanie arkuszy blach wykonano metodą pierścieniową, płaszcz po płaszczu. Po zmontowaniu całej konstrukcji stalowej włożono ją do kanału za pomocą koparki, spełniającej funkcję dźwigu.



Rys.1. Schemat konstrukcji i położenie punktów pomiarowych  
Fig.1. Sketch of the structure with the location of measurement points

Podczas zasypywania pierwszej warstwy gruntu dno cieku umocniono poprzez odpowiedni proces zagęszczenia i obciążenia. Ułożono w ten sposób konstrukcję stalową w osi cieku, jak również nadano jej spadek podłużny. Założono, że wskutek zagęszczania gruntu wokół stalowego przepustu będzie występować podnoszenie się powłoki. Budowę obiektu realizowano w fazach podanych w tabl. 1 i na rys. 2. Całkowity okres przebudowy (rozbiórki i budowy) przepustu wyniósł 2 tygodnie, z uwzględnieniem wszystkich opóźnień i przestojów.



Rys.2. Fazy układania zasyпки gruntowej  
Fig.2. Stages of backfilling

Tablica 1. Parametry zasypki gruntowej  
Table 1. Parameters of soil backfill

Faza robót	Poziom zasypki $z_o$ [m]	Grubość warstwy [m]	Moduł $E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Wskaźnik zagęszczenia $I_d$
1	1,35	-	30,5	0,98
2	1,85	0,50	28,3	0,97
3	2,30	0,45	27,8	0,97
4	2,70	0,40	28,4	0,97
5	3,10	0,40	26,5	0,96
6	3,35	0,25	31,5	0,98
7	3,60	0,25	54,8	1,01
8	3,60	-	59,6	1,03
9	3,70	0,10	(nawierzchnia)	

Aby wyeliminować osiadania oraz zapewnić właściwą wytrzymałość grunt zasypowy układano warstwami o grubości podanej w tabl. 1. Warstwy zagęszczano poprzez przejazdy koparki (walcowanie), a następnie jednoczesne ubijanie i wibrowanie płytą przymocowaną do wibratora, jak na rys. 3. Zastosowany sposób zagęszczania gruntu wykorzystuje równocześnie trzy metody, stosowane przy budowie tych obiektów, dzięki czemu możliwe było zwiększenie grubości usypywanych warstw. Do zagęszczania gruntu użyto koparki o masie 24 ton z wibratorem o następujących parametrach technicznych: moment obrotowy 40 Nm, siła nacisku 345 kN, masa dynamiczna 920 kg, masa całkowita 1265 kg, maksymalna częstotliwość drgań 2800 rpm.

Innowacyjnym rozwiązaniem było zastosowanie koparki z wibratorem, do którego zamontowano płytę stalową o wymiarach 1 × 1 m, jak na rys. 3. Płytę wibrującą używano głównie w bliskim sąsiedztwie konstrukcji stalowej. W trakcie układania i zagęszczania uzyskano wskaźniki zagęszczenia podane w tabl. 1. Skuteczność wykonanego zagęszczenia potwierdza fakt, iż mimo zwiększania powierzchni przekroju poprzecznego otworu, z pierwotnej 3 m<sup>2</sup> do obecnej 8 m<sup>2</sup>, dowieziono jeszcze 50 m<sup>3</sup> gruntu.

W trakcie budowy konstrukcji, w całym okresie zasypywania powłoki stalowej trwającym 5 dni prowadzono pomiary przemieszczenia pionowego w kluczu i dnie powłoki. Do realizacji pomiarów w punktach podanych na rys. 1 użyto sprzętu geodezyjnego. W kluczu konstrukcji dokonano pomiarów rzędnych, w punktach od wewnątrz, jak i na zewnątrz powłoki oraz mierzono wysokość pionowego światła przepustu. Przy użyciu sondy badano wskaźnik zagęszczenia gruntu  $I_d$ , edometryczny moduł ścisłości gruntu  $E_{dv}$  i osiadanie gruntu po zagęszczeniu (poza obszarem konstrukcji). Wybrane wyniki podano w tabl. 1.

a)



b)



Rys.3. Sposób zagęszczania gruntu

a) ustawienie koparki z wibratorem, b) ustawienie wibratora i konstrukcja płyty uderowej

Fig.3. Method of backfilling

a) installation of excavator-mounted vibrator, b) installation of vibrator and hammer plate

Skutki oddziaływań gruntu na powłokę stalową, w postaci wykresów ugięć w linii górnej i dolnej na długości rury, przedstawiono na rys. 4 i rys. 5. Nad wykresami przemieszczeń podano numery fazy robót. Linie przemieszczeń odniesiono do wyników niwelacji przed wykonywaniem zasypywania powłoki (faza 1). Z tego powodu w fazie 1 ugięcia  $w(1) = 0$ , a przemieszczenia w dowolnej fazie ( $k = 2, 3, \dots, 9$ ) określone są z wzorów:

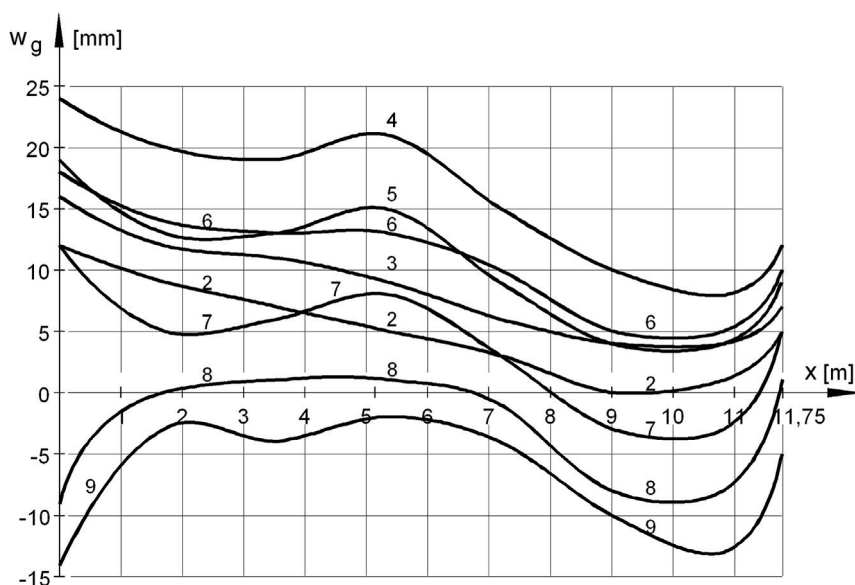
- na linii górnej ( $g = 1, 2, \dots, 8$ )

$$w_g(k) = z_g(k) - z_g(1) , \quad (1)$$

- na linii dolnej ( $d = 11, 12, \dots, 18$ )

$$w_d(k) = z_d(k) - z_d(1) , \quad (2)$$

gdzie  $z(k)$  – rzędne niwelety w punktach  $g$  lub  $d$ , zmierzone w fazie  $k$ .



Rys.4. Przemieszczenia linii górnej powłoki  
Fig.4. Displacements of the top line of shell

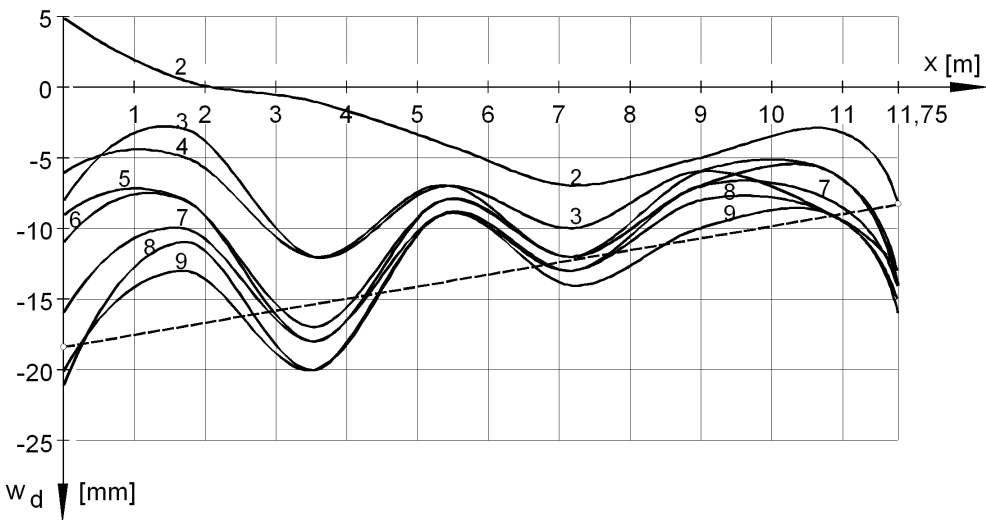
Wartości  $w > 0$  oznaczają osiadanie powłoki, natomiast  $w < 0$  dotyczą jej wypiętrzenia (ruch przeciwny do grawitacji). Z wykresów podanych na rys. 4 widoczne jest osiadanie powłoki w każdej fazie jej zasypywania, a proces ten odbywa się w miarę równomiernie. W końcowej fazie budowy, po ułożeniu nawierzchni, pochylenie podłużne linii rury (linia przerywana na rys. 5) wynosi

$$\varphi = \frac{18 - 8}{11,75} = \frac{10}{11,75} \frac{\text{mm}}{\text{m}} = 0,085\% ,$$

natomiast maksymalne odchylenia od tej linii nie przekracza

$$\Delta w = 16 - 8 = 8 \text{ mm} .$$

W przypadku linii górnej otrzymuje się podobną wartość  $\Delta w$ , natomiast  $\varphi \cong 0$ .



Rys.5. Przesunięcia linii dolnej powłoki  
Fig.5. Displacements of the bottom line of shell

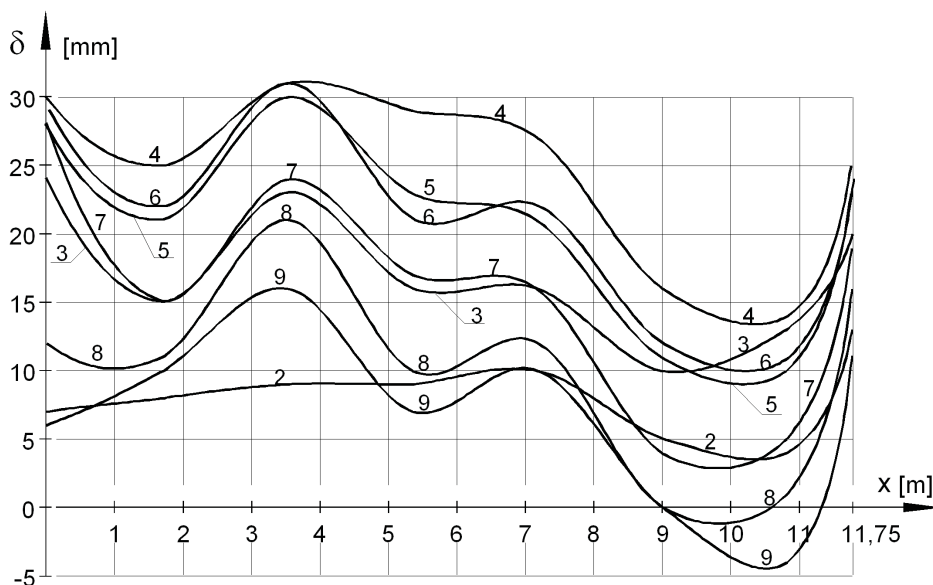
Istotne znaczenie ma parametr, oznaczający zmianę wysokości przepustu  $H$ , obliczany ze wzoru:

$$\delta(k) = w_g(k) - w_d(k) = z_g(k) - z_d(k) - H . \quad (3)$$

Parametr ten pozwala śledzić deformację przekroju poprzecznego. Gdy  $\delta > 0$ , następuje zwiększenie wysokości przepustu  $H$ . Wartość parametru ulega w procesie zasypywania ciąglemu zwiększaniu (przy zmniejszaniu szerokości przepustu  $L$ ). Znaczny wzrost w początkowym okresie ulegał redukcji w końcowych fazach. Podane na rys. 6 wyniki nie odbiegają jakościowo od rezultatów badań opublikowanych w [9]. W tym przypadku należy podkreślić, że:

- powłoka była układana na podłożu z nawodnionego gruntu i bez fundamentu,
- do zasypywania powłoki zużyto dodatkowo  $50 \text{ m}^3$  gruntu, który został wbity w podłoże ze słabego gruntu rodzimego,
- układy obciążeń (koparka i wibrator, jak na rys. 3) podczas wibrowania miały doprowadzić w fazie końcowej do utrzymania pierwotnej niwelety (faza 1) powłoki.





Rys.6. Zmiana odległości pomiędzy linią górną i dolną powłoki  
Fig.6. Change of distance between the top and bottom line of shell

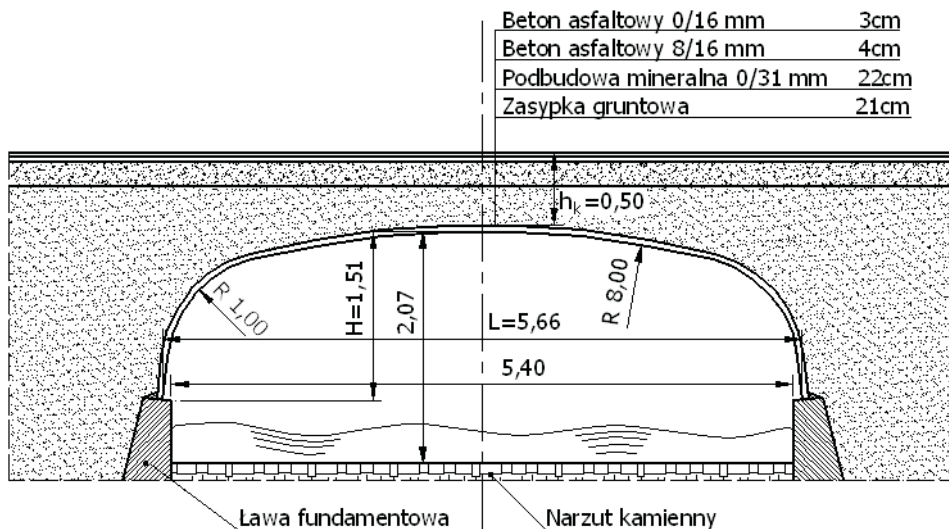
### 3. WPŁYW ODDZIAŁYWANIA WIBRACYJNEGO NA KONSTRUKCJĘ

Aby określić wpływ oddziaływania wibracyjnego na konstrukcję gruntowo-powłokową jako układ nośny złożony z liniowo-sprężystej powłoki oraz zagęszczonego ciała sypkiego (gruntu), ograniczonego od góry powierzchnią drogową, realizowano obciążenie stacjonarne nawierzchni z równoczesnym wzbudzeniem drgań zasypki gruntowej w obszarze przyległym do mostu. Drgania z nawierzchni jezdni przenoszą się na zasypkę gruntową, jak również na układ nośny mostu (powłokę). Takie oddziaływanie może przede wszystkim wywoływać destrukcję w warstwie kontaktowej pomiędzy powłoką a gruntem, dlatego celem badań było poznanie zachowania zasypki gruntowej w styku z powłoką.

Badany obiekt, o schemacie podanym na rys. 7, położony jest na zjeździe z drogi międzynarodowej nr E-67 Wrocław – Kudowa w miejscowości Jeleniów [6]. Konstrukcję nośną mostu stanowi powłoka *BOX CULVERT MP 150 17B* z blachy fałdowej o grubości  $t = 6$  mm oraz długości fali  $a = 150$  mm i jej wysokości  $f = 50$  mm. W środku rozpiętości przeszła i w narożach zastosowano nakładki powłokowe z tej samej blachy. Arkusze blach połączone śrubami klasy 8.8.

W przekroju podłużnym most tworzy schemat jednoprzęsłowej ramy o dwóch promieniach krzywizny  $R_n = 1$  m w narożu i  $R_s = 8$  m w środku rozpiętości. Powłokę stalową zamocowano w fundamencie betonowym. Boczne wykończenie mostu wykonano w postaci masywnych ścian z betonu zbrojonego o grubości 0,50 m (rys. 8).

Są one ścianami oporowymi - zabezpieczają właściwe położenie zasypki gruntowej pod nawierzchnią jezdni. Szerokość całkowita mostu wynosi  $B = 7,60$  m, a szerokość jezdni wynosi  $B_j = 6,60$  m.

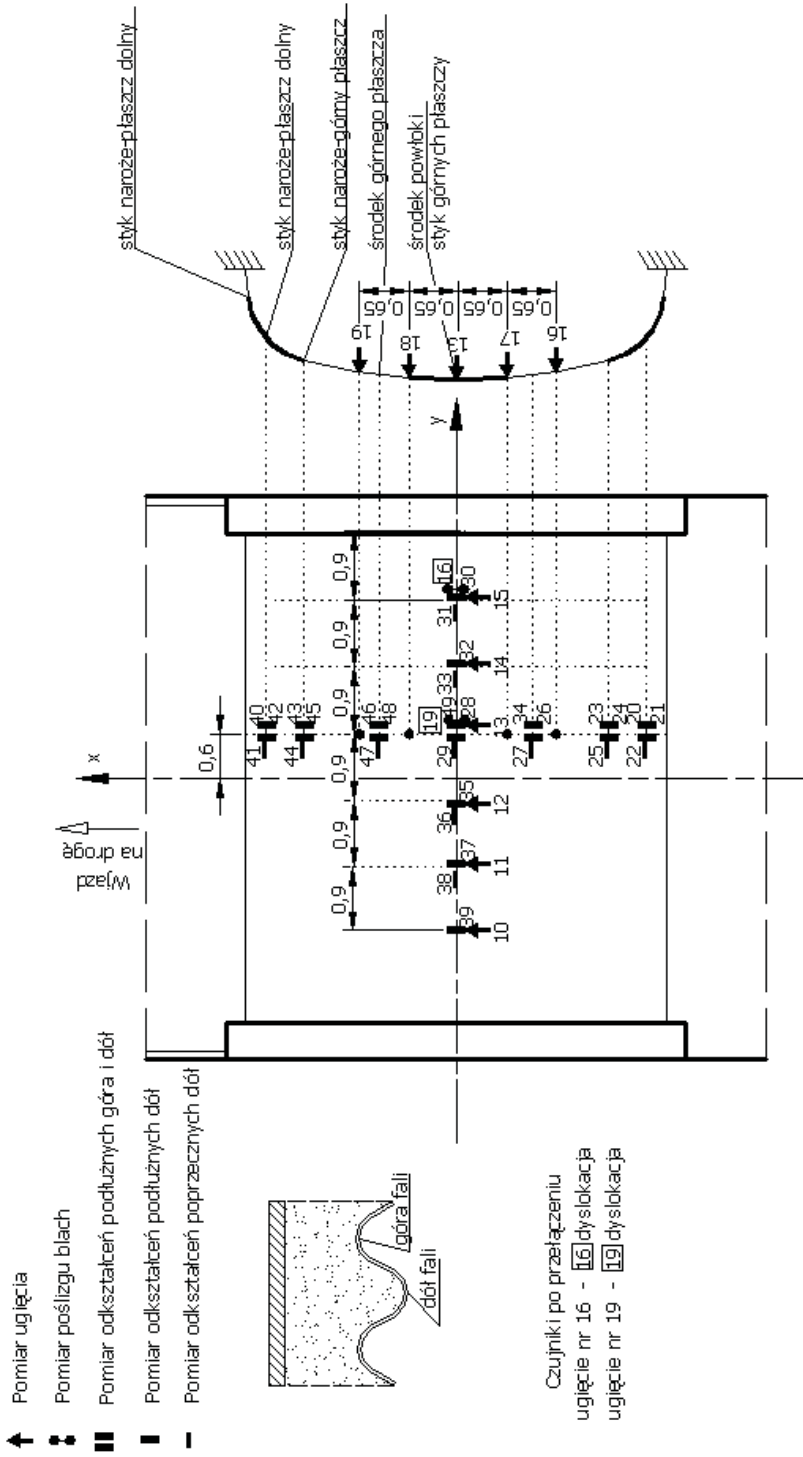


Rys.7. Schemat konstrukcji gruntowo-powłokowej  
Fig.7. Sketch of soil-steel structure

Do wywołania obciążenia wykorzystano samochód ciężarowy (rys. 9). Na podstawie przyjętej procedury ważenia pojazdu wyznaczono następujące naciski na jego osie:  $P_1 = 41$  kN,  $P_2 = 109$  kN,  $P_3 = 105$  kN. Podczas badań z wymuszaniem pulsacyjnym drgań przyjęto cztery położenia samochodu na obiekcie, oznaczone jako PS-I, PS-II, PS-III i PS-IV. Obciążenie pulsacyjne wymuszano wibratorem, jak w poprzednich badaniach (rys. 3), ustawionym na jezdni w okolicy naroża powłoki, jak na rys. 10. Zacięzione miejsca w górnej części rysunków to położenie płyty (o wymiarach  $0,6 \times 0,4$  m) przekazującej obciążenia z wibratora na nawierzchnię. Aby uniknąć zniszczenia nawierzchni drogowej po każdej serii pomiarów nieznacznie zmieniano położenie wibratora.

Na powłoce utworzono układ pomiarowy w postaci dwóch krzyżujących się ze sobą linii: obwodowej (równoległej do osi jezdni) oraz poprzecznej (usytuowanej w kluczu powłoki, jak na rys. 8). Ugięcia w środku rozpiętości powłoki mierzono w punktach pomiarowych 10 – 15, rozmieszczonych na szerokości mostu, w odległościach co 0,9 m. Punkt środkowy (13) położony był w linii kół samochodu.

Wyniki badań zamieszczono na rys. 11. Na wszystkich wykresach przedstawiono ugięcia powłoki wywołane obciążeniem statycznym, tj. przy obciążeniu konstrukcji mostu tylko samochodem (linia pogrubiona). Linie oznaczone kolejnymi numerami 1, 2, ..., 5 przedstawiają wyniki po kolejno następujących seriach drgań. Uzyskano je na podstawie wartości zmierzonych przy tym samym obciążeniu przęsła, lecz po kolejnym wibrowaniu.



Rys.8. Układ pomiarowy powłoki  
 Fig.8. Measurement layout for the shell

a)



b)



Rys.9. Realizacja obciążeń

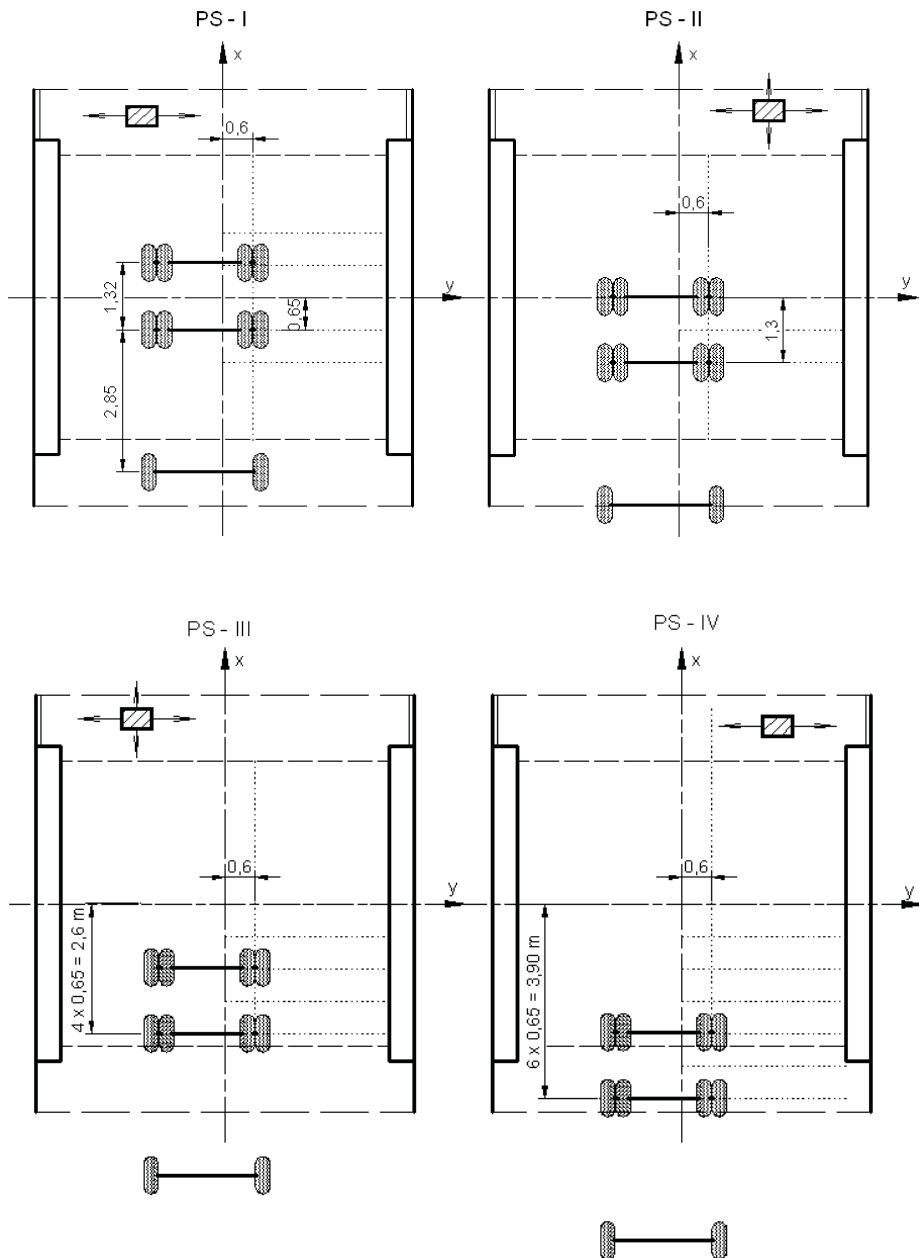
a) ustawienie wibratora na naziemie

b) obciążenie mostu ustawienie koparki z zamocowanym wibratorem

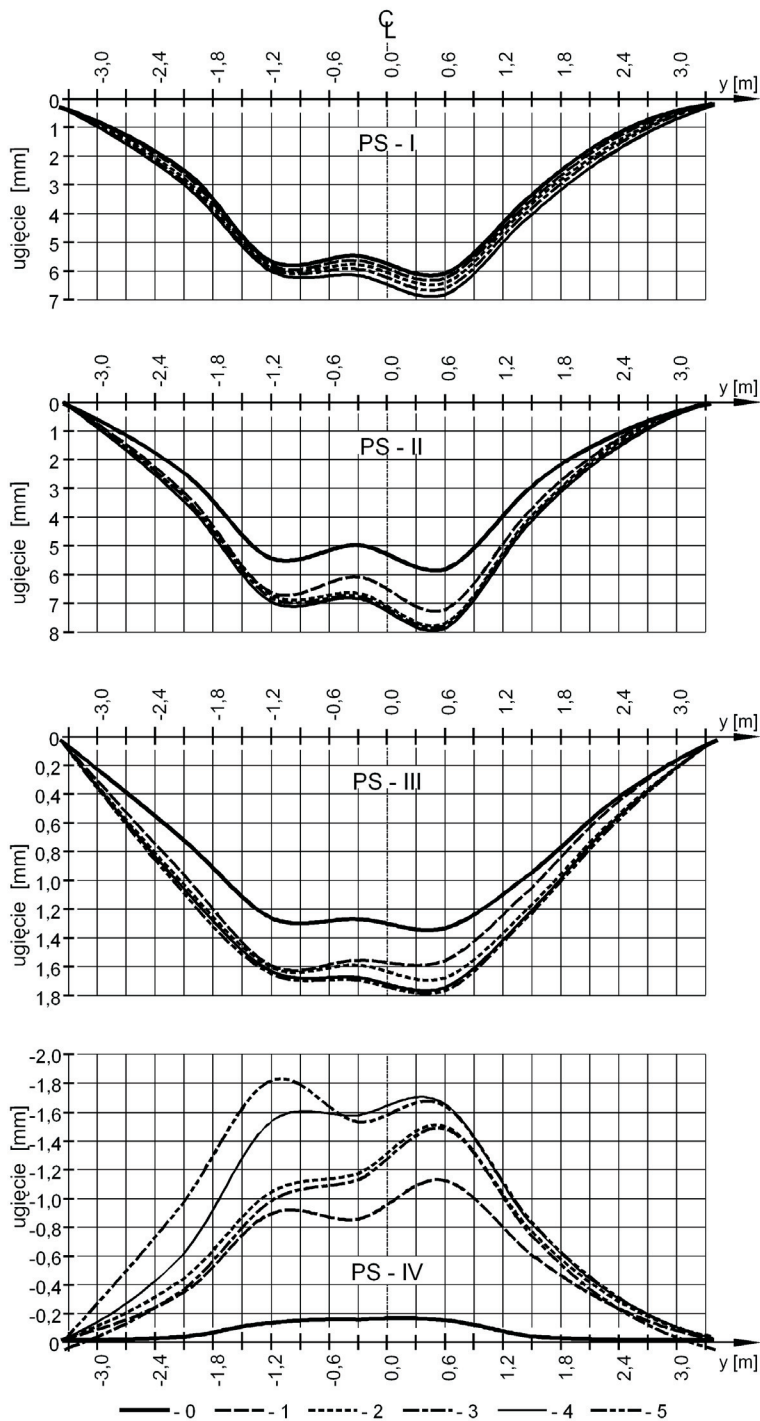
Fig.9. Loading process

a) installation of vibrator on the ground

b) loading of bridge



Rys.10. Schematy ustawień samochodu na jezdni mostu  
Fig.10. Location of a vehicle on the road surface of the bridge



Rys.11. Ugięcia w środku rozpiętości, w przekroju poprzecznym mostu  
 Fig.11. Displacements in the cross-section of the bridge in the middle of the span

Podczas realizacji schematu PS-I zaobserwowano małą wrażliwość układu na drgania podłoża gruntowego. W przypadku schematów PS-II, PS-III i PS-IV wystąpiły wyraźne przyrosty ugięcia powstałego od obciążenia statycznego w wyniku serii drgań. W pierwszych etapach badania ich przyrost był znaczny, natomiast w końcowej fazie był niewielki lub zanikał. Sugeruje to, że w trakcie zmian schematów obciążeń następuje niewielkie rozluźnienie zasyпки gruntowej w obszarze styku z powłoką, która zostaje później dogęszczona w wyniku serii drgań. Takie wyniki mogą oznaczać, że w przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych nie występuje całkowita konsolidacja zasyпки gruntowej i podlega ona ciągłym procesom zagęszczania i rozluźniania.

W schemacie PS-IV widoczne jest wypiętrzenie powłoki po kolejnych seriach obciążeń pulsacyjnych. Wypiętrzenie jest wynikiem zlokalizowania osi kół w pobliżu węzłowania powłoki. Wynik ten nie jest zaskakujący, jednak w tym przypadku występuje znaczne wypiętrzenie w porównaniu z ugięciem od obciążenia statycznego.

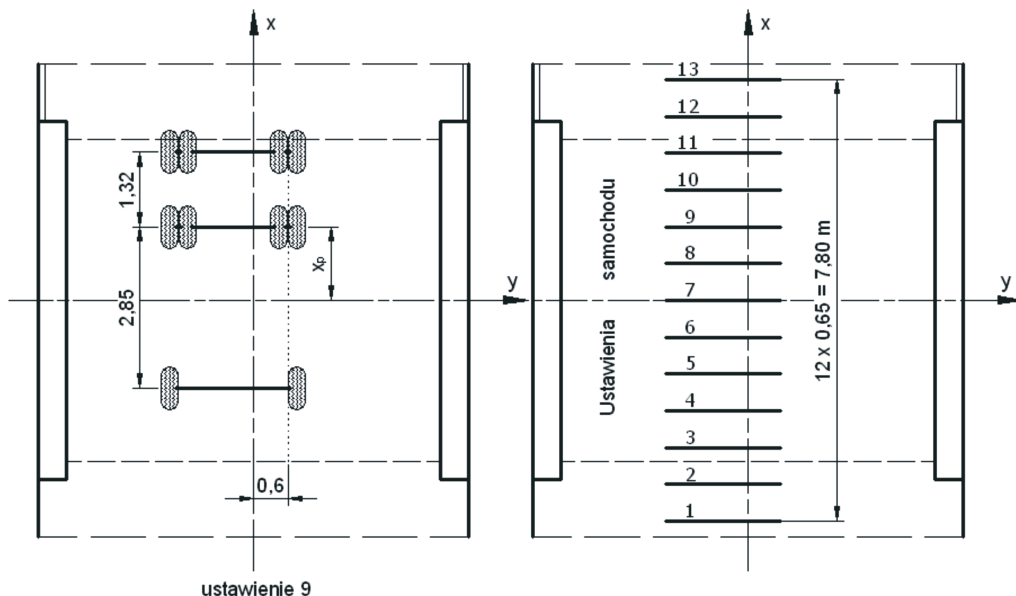
#### 4. EFEKTY OBCIĄŻENIA RUCHOMEGO JEZDNI

Badany obiekt, przedstawiony na rys. 7, należy do grupy mostów gruntowo-powłokowych o małej wysokości konstrukcyjnej [6]. Analizując efekt obciążenia zmiennego w postaci pojazdu poruszającego się wzdłuż linii równoległej do osi jezdni ( $y_p = 0,60$  m), jak na rys. 12, traktowano to obciążenie jako statyczne i krótkotrwałe. Położenie samochodu określa jednoznacznie rzędna  $x_p$  jako odległość środkowej osi samochodu od początku układu współrzędnych.

Pierwsze ustawienie obciążenia, rozpoczynające cykl pomiarowy na obiekcie, wykonywano w miejscu  $x_p = -3,90$  m. W tym położeniu samochodu jego tylna oś znajdowała się na obiekcie, w odległości  $-3,90 + 1,32 = -2,58$  m. Kolejne ustawienia samochodu odległe były od poprzedniego o  $\Delta x_p = 0,65$  m. Pojazd przejeżdżał przez most tyłem do właściwego kierunku jazdy i był zatrzymywany w ustalonych położeniach, aby automatycznie rejestrować wyniki. Od położenia samochodu  $x_p = 3,90$  m następowało powtórne obciążenie mostu przy takich samych ustawieniach pojazdu (rys. 12), lecz w ruchu przeciwnym. Z powyższego wynika, że w każdym etapie badań występowały pary jednakowych ustawień samochodu, tzn. pierwotne, przy jeździe do tyłu w stosunku do właściwego kierunku jazdy oraz wtórne, przy jeździe do przodu. Końcowe położenie samochodu, zamykające każdy etap badań, było poza obiektem.

Wybrane wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 13. W górnej części rysunku podano schemat konstrukcji (przekrój podłużny przez powłokę, zasypkę gruntową i nawierzchnię jezdni). Na linii jezdni umieszczono strzałki przedstawiające naciski na osie kół samochodu o wartościach podanych w p.3. W dolnej części rysunku podano wykresy ugięcia, odniesione do kierunku jazdy samochodu (strzałka). Wykresy ugięcia dotyczą punktów leżących w środkowej części pasma obwodowego (o współrzędnej  $y = 0,60$  m) w zależności od położenia samochodu. W ten sposób utworzono wykresy przypominające linię wpływu ugięcia dla tych punktów, odniesione są one

bowiem do siły skupionej  $P_2$  (dokładnie osi środkowej samochodu) poruszającej się po wyznaczonym torze ruchu.

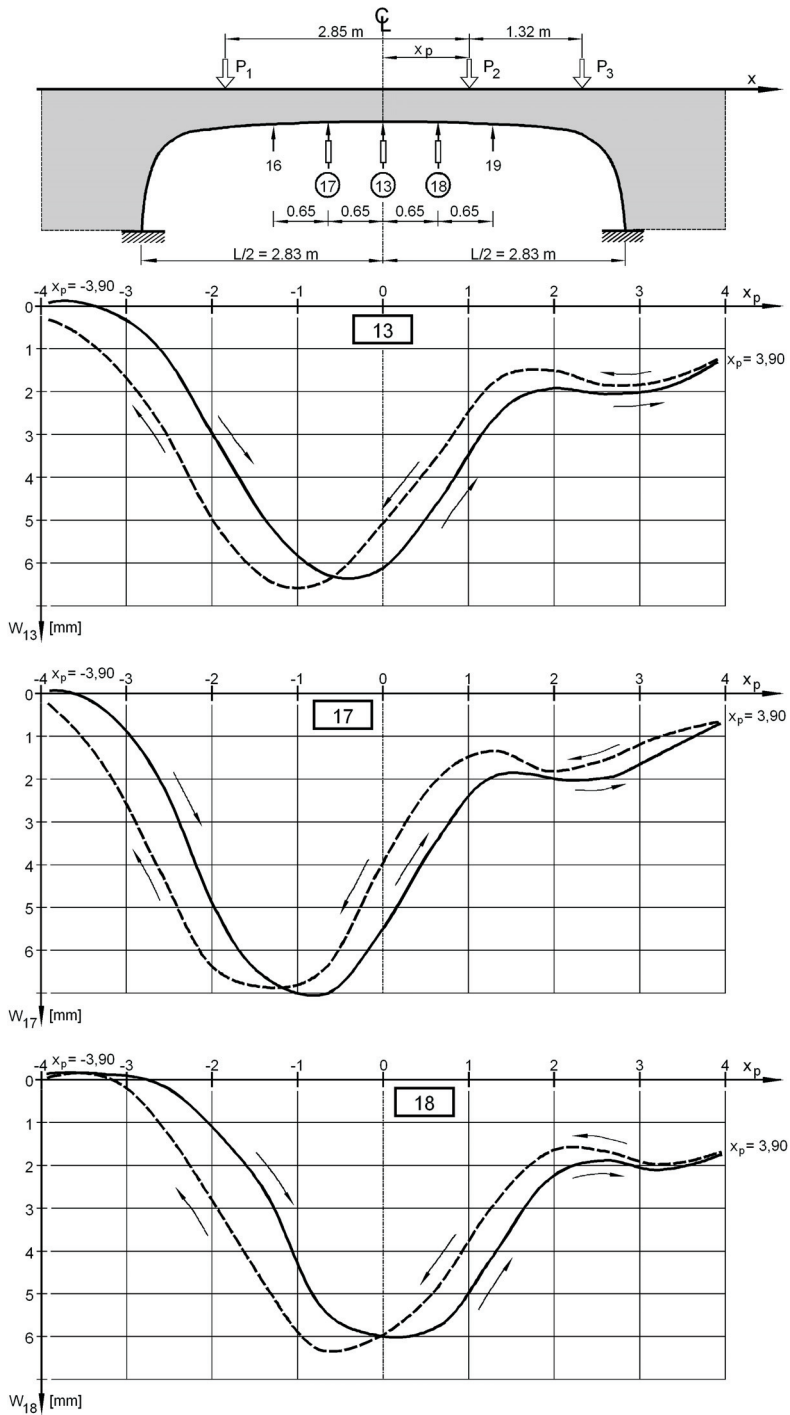


Rys.12. Schematy ustawień obciążenia ruchomego  
Fig.12. Location of moving loads on the road surface of the bridge

Charakterystyczną cechą przedstawionych wykresów jest przesunięcie ekstremum ugięcia w kierunku jazdy samochodu, przy przejeździe pierwotnym w odniesieniu do przejazdu wtórnego. Przykładowo w przypadku położenia samochodu jak na rysunku, ugięcie w punkcie 13 przy przejeździe pierwotnym wynosi  $w_{13} = 3,5$  mm, natomiast przy przejeździe wtórnym  $w_{13} = 2,5$  mm. Lokalne ekstremum ugięcia w obszarze  $x_p \approx 2,8$  m związane jest z pojawianiem się siły  $P_1$  nad punktem pomiarowym. Dla  $x_p = 2,85$  m, siła  $P_1$  przyjmuje położenie centralne (w osi symetrii konstrukcji mostu, a więc nad punktem pomiarowym 13). Siła  $P_2$  w tym momencie jest nad miejscem zamocowania powłoki w fundamencie.

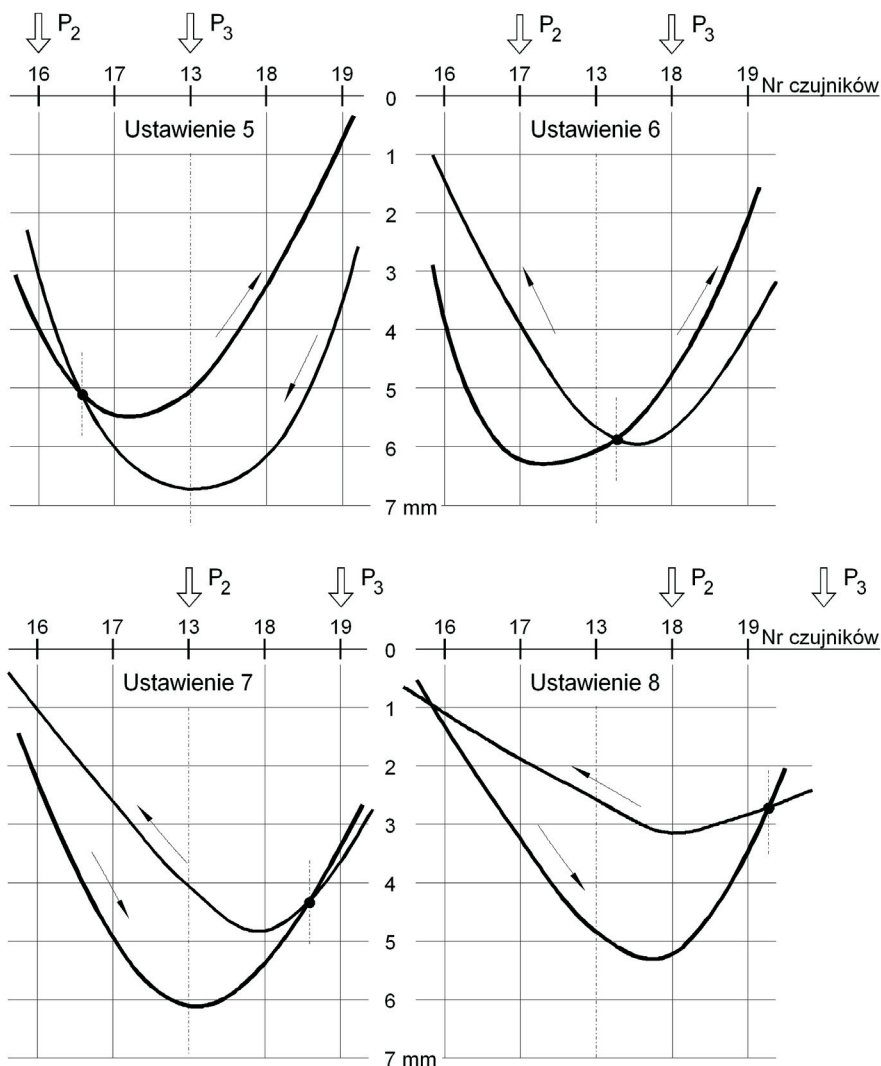
Pomiary ugięcia przeprowadzono czterokrotnie (schematy L-I – L-IV). Maksymalne rzędne ugięcia we wszystkich badaniach były zbliżone. Wyniki pomiarów różniły się nieznacznie dla schematów L-II – L-IV. Największe różnice wyników w zakresie rzędnych zmierzonych przy przejeździe pierwotnym i wtórnym powstały przy realizacji schematu L-I, rozpoczynającego badania mostu, podano je na rys. 14. Wartości końcowe ugięć (dla przejazdu wtórnego) w przypadku pojazdu znajdującego się poza mostem zmierzały do zera (punkt o współrzędnej  $x_p = -3,90$  m był pierwszym i ostatnim położeniem obciążenia na moście).





Rys.13. Wykresy zmiany ugięć punktów w paśmie obwodowym (schemat L-III)  
 Fig.13. Change of displacements of the points at circumferential strip (scheme L-III)

Na rys. 14 zamieszczono wykresy ugięcia przy wybranych ustawieniach samochodu w obszarze środkowym mostu dla pięciu punktów pomiarowych (rys. 13) położonych w paśmie obwodowym powłoki ( $y = 0,60$  m). Na podstawie analizy ugięć można określić położenie punktu neutralnego, w którym wartość ugięcia nie zależy od kierunku poruszania się samochodu. Usytuowany jest on w pobliżu połowy rozstawu osi tylnych kół samochodu. Efekt ten występował we wszystkich zrealizowanych schematach obciążenia.



Rys.14. Ugięcia strefy środkowej pasma obwodowego powłoki ( $y = 0,6$  m, schemat L-I)

Fig.14. Displacements at the mid-span area of circumferential strip of the shell ( $y=0,6$ m, scheme L-I)

Z porównania ugięć powstałych pod stacjonarnym obciążeniem pręśła i wymuszonymi drganiami nawierzchni oraz ugięć powstałych podczas przejazdu samochodu wynikają następujące spostrzeżenia:

- Przy środkowym położeniu samochodu na obiekcie, gdy linia pomiarowa występuje pomiędzy osiami tylnymi samochodu (schemat *PS-I*, rys. 10 i ustawienie 6, rys. 14), wpływ drgań zasypki gruntowej na ugięcia jest minimalny. Ugięcia zmierzone podczas przejazdu samochodu w linii pomiarowej (punkt 13) również w niewielkim stopniu zależą od kierunku przejazdu samochodu;
- Przy pośrednim położeniu samochodu na obiekcie, gdy linia pomiarowa występuje pod osią tylną samochodu  $P_3$  (schemat *PS-II*, rys. 10 i ustawienie 5, rys. 14) wpływ drgań zasypki gruntowej na ugięcia jest znaczny i przyrost ugięcia wynosi  $w = 1,9$  mm. Ugięcia zmierzone podczas przejazdu samochodu w linii pomiarowej (punkt 13) zależą od kierunku przejazdu samochodu, a przyrost ugięcia  $\Delta w = 1,7$  mm;
- Podobne zależności występują w innych, pośrednich położeniach samochodu. Również w przypadku schematu *PS-VI*, rys. 10 i dla ustawienia 1, rys. 12 ( $x_p = -3,90$  m) a więc przy położeniu samochodu poza obiektem wpływ drgań zasypki gruntowej na ugięcia jest znaczny a ugięcia zmierzone podczas przejazdu samochodu w linii pomiarowej (punkt 13) zależą od kierunku przejazdu samochodu.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych można sformułować następujące wnioski. W przypadku obciążeń przejeżdżających po moście zmierzone ugięcia wskazują na to, że w układzie nośnym dużą rolę odgrywa zasypka gruntowa, która decyduje o tym, że efekty obciążeń zmiennych zależą od deformacji powłoki poprzedzającej pomiaru. Wyniki badań mostu pod pulsującym obciążeniem jezdni potwierdzają tezę, że zasypkę gruntową należy traktować jako ośrodek sytki, układający się w zależności od położenia obciążenia stałego. Powyższe może wskazywać na to, że w wyniku drgań związanych z ruchem taboru samochodowego obszary styku pomiędzy gruntem a powłoką, gdzie występują koncentracje sił, mogą ulegać odprężeniu. Na obecnym etapie badań trudno jest jednoznacznie określić czy wywoływanie obciążeń pulsacyjnych ma korzystny wpływ na konstrukcję czy też nie. Na podstawie dotychczasowych analiz wyników badań można jednak stwierdzić, że wpływ jest znaczny. Rezultaty badań w tym zakresie służą do tworzenia odpowiednich modeli numerycznych konstrukcji.

Chociaż w pracy rozpatrywano dwa zupełnie różne obiekty mostowe z grupy konstrukcji gruntowo-powłokowych pod działaniem wibracji, w przypadku budowy i eksploatacji zaobserwowano podobne zachowanie się zasypki gruntowej jako ośrodka sytkiego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Machelski Cz., Antoniszyn G.: Siły wewnętrzne w mostowych budowlach gruntowo-powłokowych. *Drogi i Mosty*, nr 2/2003, 33-57

- [2] *Vaslestad J.*: Soil structure interaction of buried culverts, Institutt for Geoteknikk, Norges Tekniske Hogskole. Universitetet I Trondheim, 1990
- [3] *Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A.*: Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych. IBDiM, Żmigród 2004
- [4] *Mirza C., Bakht B.*: Soil-steel structure design by the Ontario Code: Part 1. General and geotechnical considerations, Canadian Journal of Civil Engineering, **8**, 3, 1981
- [5] *Abdel-Sayed G., Bakht B.*: Soil-steel structure design by the Ontario Code: Part 2. Structural consideration, Canadian Journal of Civil Engineering, **8**, 3, 1981
- [6] *Machelski Cz., Antoniszyn G.*: Badania przepustu gruntowo-powłokowego o małej wysokości konstrukcyjnej. Inżynieria i Budownictwo, nr 4/2004
- [7] *Krajnik D., Michalski J. B.*: Pierwsze „mosty kanadyjskie” w Europie. Inżynieria i Budownictwo, nr 3-4/2002
- [8] *Machelski Cz., Antoniszyn G.*: Influence of live loads on the soil-steel bridges. Studia Geotechnica et Mechanica, No 3-4/2004
- [9] *Bęben D., Mańko Z., Janusz L., Vaslestad J.*: Badania stalowej powłoki mostu drogowego w Gimnan w Szwecji wykonanej z blach falistych typu Super Cor S.C.-56B podczas jej zasypywania. II Sympozjum „Badania i Diagnostyka Mostów”, 31-67, Opole 9-11 kwietnia 2003
- [10] *Bęben D., Mańko Z.*: Badania statyczne mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych, Drogi i Mosty, nr 2/2003, 17-42
- [11] *Abdel-Sayed G., Girges Y.*: Stability of conduit walls of soil-steel bridges. Canadian Journal of Civil Engineering, **19**, 3, 1992
- [12] *Vaslestad J.*: Long-term behaviour of flexible large-span culverts. Directorate of Public Roads, Norwegian Road Research Laboratory, Publication no. 74, Oslo, 1994

## DEFORMATIONS OF SOIL-STEEL BRIDGES

### Abstract

In the paper, two different types of soil-steel bridges are described i.e. the first being characterized by the minimal construction time (several days) and the second built according to the standard technology of erection for such structures. On the basis of in situ tests of typical soil-steel bridge it has been shown in the paper that under pulsating load the soil backfill, although being bounded either from the top by pavement and from the bottom by steel shell behaves like standard loose material. This feature of soil-steel bridges is common either for the structures being at the stage of construction and also already in service. The idea of pulsating load and the adequate loading of soil cover during back-filling was utilized at the construction of circular shaped pipe soil-steel structure. The steel shell was laid on the weak soil. The shortening of building time and simplification of erection technology has been gained for this case. Although two different types of structures of soil-steel bridges were considered in the study, both cases have shown similar performance of the shell structure in reaction to the load through pulsations of soil backfilling. The identical behavior of soil backfill being typical as for the loose material is confirmed by in situ tests.