

CZESŁAW MACHELSKI¹⁾
LESZEK KORUSIEWICZ²⁾

DEFORMATION OF BURIED CORRUGATED METAL BOX STRUCTURE UNDER RAILWAY LOAD

DEFORMACJA SKRZYNKOWEGO OBIEKTU GRUNTOWO-POWŁOKOWEGO POD OBCIĄŻENIEM KOLEJOWYM

STRESZCZENIE. W pracy dokonano analizy deformacji pasma obwodowego powłoki wykonanej z blachy falistej w kolejowym obiekcie gruntowo-powłokowym pod obciążeniem użytkowym. Ze względu na geometrię badanego obiektu zaliczono go do konstrukcji skrzynekowych. Za miarę deformacji przyjęto ugięcia i naprężenia (uzyskane z odkształceń jednostkowych) w wybranych punktach powłoki. Pomiarów tych wielkości dokonano z wykorzystaniem indukcyjnych czujników przemieszczenia i tensometrów elektrooporowych. W badaniach zastosowano procedurę obciążenia zmieniającego położenie, dzięki czemu wyniki przedstawiono w postaci ciągłych zależności mierzonych wielkości w funkcji tego położenia. W analizach podanych w pracy wskazano na duże podobieństwo przemieszczeń z innymi konstrukcjami o kształcie łukowym (np. sklepienia ceglane). W badanej powłoce skrzynekowej występuje przemieszczenie odkształceń (naprężeń normalnych) podczas przejazdu pojazdu, co jest cechą charakterystyczną tych konstrukcji, jednak zarejestrowane wartości przemieszczeń i naprężeń są bardzo małe w porównaniu do powstałych podczas budowy.

SŁOWA KLUCZOWE: badania obiektów, deformacja powłoki z blachy falistej, faza eksploatacji, konstrukcje gruntowo-powłokowe.

ABSTRACT. The deformations of the circumferential section of a railway buried corrugated metal structure's shell under the operational load are analysed in this paper. Considering its geometry, the structure belongs to box structures. The deflections and stresses (determined from unit strains) in selected points of the shell were adopted as the measure of the deformations. The quantities were measured using inductive sensors and electrical resistance strain gauges. The moving load procedure was used in the tests whereby the results are presented in the form of continuous quantity-load location functions. The analyses show close similarity between the displacements of the tested structure and those of other arch structures (e.g. brick vaults). As the vehicle travels over the box structure, the strain (normal stress) in the structure alternates (changes its value and sign as a function of vehicle location), which is a characteristic feature of such structures, but the recorded displacement and stress values are very low in comparison with the ones generated during construction.

KEYWORDS: buried corrugated metal structures, deformation of corrugated plate shell, in-service stage, tests of structures.

DOI: 10.7409/rabdim.017.013

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, plac Grunwaldzki 11, 50-377 Wrocław; czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

²⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, ul. Łukasiewicza 5-7, 50-371 Wrocław; leszek.korusiewicz@pwr.wroc.pl (✉)

1. WPROWADZENIE

Konstrukcje gruntowo-powłokowe z blach falistych dzieli się według geometrii przekroju poprzecznego na dwie grupy: otwarte (w tym skrzynkowe i łukowe) oraz zamknięte. Z uwagi na wielkość i charakter zmian przemieszczeń i sił wewnętrznych, wynikających z procesu zasypki i pochodzących od obciążenia ruchomego, powłoki skrzynkowe różnią się od pozostałych i z tego względu konstrukcje analizowane w pracy należy zaliczyć do odrębnej grupy [1-4]. Charakterystyczną cechą analizowanych powłok są małe proporcje wysokości do rozpiętości $H/L < 0,25$. Szczególny jest również kształt górnej części powłoki o dużym promieniu krzywizny w stosunku do rozpiętości $R > L$, a także wielokrotnie mniejsze promienie krzywizny blachy falistej w narożach w odniesieniu do klucza $R_n \ll R$. Czynniki geometryczne skutkują powstawaniem większych wartości naprężeń normalnych w narożach [1], co jest widoczne w wynikach przedstawionych w pracy. Duże wartości R/L w powłokach skrzynkowych przy małej grubości naziomu powodują powstawanie większych oddziaływań sił skupionych od pojazdów użytkowych, a więc efektów lokalnych w blasze falistej.

Z uwagi na małe wartości przemieszczeń pochodzących od obciążeń ruchomych, w obiektach gruntowo-powłokowych z blach falistych konieczne jest stosowanie profesjonalnych urządzeń pomiarowych [5] zamiast przyrządów geodezyjnych, jak w przypadku powłok o kształcie łukowym podczas budowy [2-4]. W prezentowanych badaniach wykonywano jednoczesne pomiary ugięć i odkształceń powłoki z wykorzystaniem czujników indukcyjnych i tensometrów elektrooporowych. Pozwoliło to na porównywanie skutków deformacji powłoki w postaci przemieszczeń i naprężeń [6, 7]. W pracy zastosowano procedurę badawczą w postaci zmieniającego położenie pojazdu kolejowego poruszającego się wzdłuż osi drogi (toru) [8-11]. Umożliwiło to tworzenie funkcji wpływu dotyczących deformacji powłoki [12]. Taka metodyka badania jest właściwa dla obiektów mostowych, a szczególnie konstrukcji gruntowo-powłokowych z blach falistych. Pozwala ona bowiem na określenie sztywności obiektu mostowego [13-15].

2. OPIS BADANEJ KONSTRUKCJI

Analizowany obiekt o konstrukcji gruntowo-powłokowej wybudowano w ciągu dwutorowej linii kolejowej w pobliżu miejscowości Dłużyna koło Zgorzelca (Rys. 1). Obiekt zastąpił typową, najprostszą konstrukcją belkową w postaci dwóch blachownic z nawierzchnią na mostownicach, bez elementów pomostu. Podstawowe parametry

1. INTRODUCTION

Depending on their cross-sectional geometry, buried corrugated metal structures are divided into two groups: open (including box and arch) structures and closed structures. Because of the magnitude and character of the changes in displacements and internal forces, resulting from the backfilling process and originating from the live load, box structures differ from the other buried corrugated metal structures. For this reason they should be considered as a separate group [1-4]. The characteristic feature of box structures is their small height/span proportion: $H/L < 0.25$. Also peculiar are the shape of the shell's top part whose curvature radius is large relative to its span: $R > L$, and the curvature radii of the corrugated plate in the corners, several times smaller relative to the crown: $R_n \ll R$. The geometric factors give rise to greater normal stresses in the corners [1], as reflected by the results presented in this paper. At a small soil surcharge thickness the box shell's high R/L ratio is responsible for stronger effects of the concentrated forces generated by commercial vehicles, resulting in local effects in the corrugated plate.

Since the displacements originating from moving loads are small it is necessary to use professional measuring devices [5], instead of surveying instruments, for buried corrugated metal structures, as in the case of arched shells under construction [2-4]. In the tests presented in this paper the deflections and deformations of the shell were simultaneously measured by inductive sensors and electrical resistance strain gauges, whereby the effects of shell deformation, in the form of displacements and stresses, could be compared [6, 7]. A load changing its location, i.e. a railway vehicle moving along the axis of a track, was used in the tests [8-11], whereby the influence functions connected with shell deformations could be generated [12]. Such a test methodology is proper for bridges, especially buried corrugated metal structures, since it makes it possible to determine their rigidity [13-15].

2. DESCRIPTION OF TESTED STRUCTURE

The considered buried corrugated metal structure carries a two-track railway line close to Dłużyna near Zgorzelec (Fig. 1). The structure has replaced a typical simple beam structure in the form of two plate girders with a superstructure on bridge sleepers, without deck elements. The basic parameters of the cross section, i.e. the shell's circumferential

przekroju poprzecznego, czyli pasma obwodowego powłoki to: rozpiętość $L = 7,475$ m i wysokość $H = 1,750$ m. Mały promień krzywizny części narożnej $R_n = 1,016$ m w stosunku do części środkowej $R = 8,82$ m i mała wartość wskaźnika $\kappa = H/L = 0,224$ kwalifikują geometrię powłoki do grupy profili skrzynkowych. Konstrukcję powłoki o symbolu SC 33B utworzono z blachy falistej typu SC $380 \times 140 \times 7$ mm z naprzemienną nakładką z blachy SC $380 \times 140 \times 5,5$ mm. Z porównania sztywności na zginanie powłoki z nakładką i powłoki podstawowej wynika, że jest ona 4,5-krotnie większa [13]. Powłokę obiektu posadowiono na masywnym fundamencie. Łączna grubość naziomu z nasypem kolejowym wynosiła średnio 1,65 m.



Fig. 1. View of structure during testing
Rys. 1. Widok obiektu podczas badania

3. PROGRAM BADAŃ

W badaniu odbiorczym obiektu wykorzystano koncepcję obciążenia zmieniającego położenie [8, 12] w postaci lokomotywy spalinowej ST43 o geometrii podanej na Rys. 2. Charakteryzuje się ona zróżnicowanym rozstawem osi w wózku $a_1 = 1,95$ m i $a_2 = 2,15$ m, z wewnętrznym rozstawem osi $c = 4,20$ m. W wynikach badań mostowych obiektów o geometrii łukowej i skrzynkowej [8, 12-15], w tym gruntowo-powłokowych z użyciem lokomotywy, istotne znaczenie ma rozstaw osi środkowych, określony jako:

$$d = 2a_2 + c = 8,5 \text{ m.} \quad (1)$$

Parametr ten będzie uwzględniany na wykresach zamieszczonych w dalszej części pracy.

Program badań analizowanego obiektu był wieloetapowy. Z uwagi na sposób obciążania zrealizowano następujące grupy pomiarów:

- długotrwałe, z dwoma ustawieniami lokomotywy na obiekcie,

section, are: span $L = 7.475$ m and height $H = 1.750$ m. Considering the small curvature radius of the corner part ($R_n = 1.016$ m) relative to that of the central part ($R = 8.82$ m) and the low values of index $\kappa = H/L = 0.224$, the geometry of the shell belongs to the group of box profiles. The shell structure (catalogue symbol SC 33B) was made of $380 \times 140 \times 7$ mm corrugated plates of type SC and was intermittently covered with $380 \times 140 \times 5.5$ mm SC plates (stiffener ribs). A comparison of the flexural rigidity of the shell with the cover and that of the basic shell shows that the former is 4.5 times greater [13]. The structure's shell rested on a solid foundation. The overall thickness of the soil surcharge together with the railroad fill amounted on average to 1.65 m.

3. TEST PLAN

The structure acceptance test was based on the concept of a load changing its location [8, 12]. The load had the form of an ST43 diesel locomotive with the geometry shown in Fig. 2. The axle bases in each of the locomotive two bogies amount to $a_1 = 1.95$ m and $a_2 = 2.15$ m, while the inside axle base (the distance between the end axles of the two bogies) is $c = 4.20$ m. In the results of tests conducted on arch and box bridges (including buried corrugated metal structures) [8, 12-15] and involving the use of a locomotive the middle axle base is of major importance. It is defined as:

$$d = 2a_2 + c = 8.5 \text{ m.} \quad (1)$$

The diagrams presented in this paper take into account the above parameter.

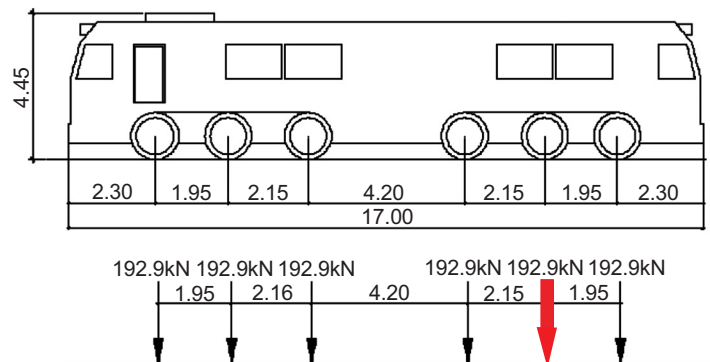


Fig. 2. Geometry of ST43 locomotive with marked reference axis
Rys. 2. Geometria lokomotywy ST43 z wyróżnieniem osi referencyjnej

The test plan for the investigated metal structure comprised several stages. Depending on the loading procedure, the following kinds of measurements were performed:

- kroczące, polegające na skokowej zmianie położenia lokomotywy co 3 m,
- dynamiczne, z przejazdem lokomotywy z prędkościami 10-100 km/h,
- dynamiczne, hamowanie lokomotywy w obszarze obiektu z redukcją prędkości 100 km/h o 20 km/h.

Badana była deformacja powłoki w postaci przemieszczeń pionowych w trzech punktach i na dwóch paśmie obwodowych, rozmieszczonych symetrycznie o 1,25 m względem osi toru. Odległości tych punktów podane na Rys. 3 wyniosły 1,65 m. W odległościach 1,5 m na jednym paśmie obwodowym naklejono tensometry elektrooporowe. Czujniki instalowano na dostępnej od dołu fali blachy w kierunku obwodowym w wierzchołku i w dolinie fali powłoki podstawowej. W pracy wykorzystano wyniki badań dynamicznych uzyskane z przejazdów o prędkościach 10 i 20 km/h oznaczane dalej, jako D10 i D20. Wyniki pomiarów uzyskane w dziedzinie czasu przetworzono na funkcje położenia lokomotywy. W przekształceniach wykorzystano procedurę omawianą w pracach [12-13, 15].

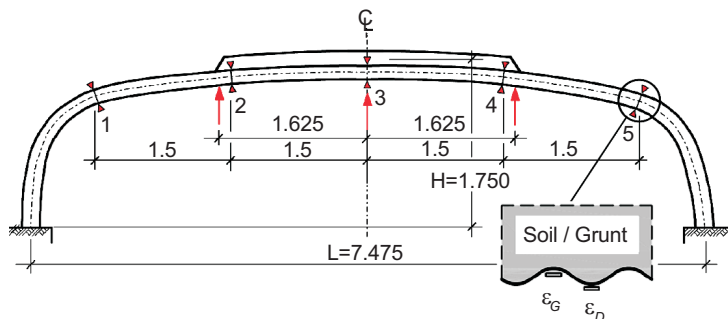


Fig. 3. Cross section through structure with marked locations of measuring points

Rys. 3. Przekrój poprzeczny obiektu z położeniem punktów pomiarowych

4. UGIĘCIA POWŁOKI

Podczas przejazdu lokomotywy wzdłuż osi toru w powłoce powstaje deformacja o charakterystycznych przemieszczeniach pionowych, przedstawionych na Rys. 4. Na wykresach ugięcia nie są widoczne oddziaływania pojedynczych osi lokomotywy, lecz zespołu trzech sił tworzących wózek. Podczas przejazdu uzyskuje się maksymalne wartości przemieszczeń oddalonych od siebie o wartość d , obliczoną ze wzoru (1). Na wykresach $w(x)$ do określenia położenia lokomotywy przyjmuje się oś środkową pierwszego wózka w odniesieniu do klucza powłoki. Zatem, gdy $x = 0$, środkowa oś przedniego wózka (Rys. 2) znajduje się nad środkiem rozpiętości obiektu. Przejazd lokomotywy w schemacie D10 odbywa się ze strony lewej do prawej, czyli z przyrostem x .

- long-duration measurements at two locomotive locations on the tested structure,
- stepwise measurements, consisting in a change of the locomotive location at every 3 m,
- dynamic measurements at the locomotive travelling at a speed of 10-100 km/h,
- dynamic measurements at the locomotive braking within the structure's area, with the speed reduced from 100 km/h at every 20 km/h.

The deformation of the shell, in the form of vertical displacements in three points on each of the two considered circumferential sections, symmetrically arranged at a distance of 1.25 m from the track axis, was investigated. The points were spaced on each of the circumferential sections at every 1.65 m (Fig. 3). Electric resistance strain gauges were stuck at every 1.5 m on one of the circumferential sections. The gauges were installed in the circumferential direction on the corrugation accessible from underneath and in the valley of the basic shell. The dynamic test results obtained at locomotive travel speeds of 10 and 20 km/h, denoted as D10 and D20, were used in the analysis. The measurement results in the time domain were transformed into locomotive location functions. The procedure described in [12-13, 15] was used for the transformations.

4. SHELL DEFLECTIONS

As the locomotive travels along the track axis, a deformation with the characteristic vertical displacements shown in Fig. 4 is generated in the shell. The deflection diagrams do not show the action of the individual locomotive axles, but that of the set of three forces representing a bogey. The maximum values of displacements separated by distance d (calculated from formula (1)) are registered during locomotive travel. In the $w(x)$ diagrams the first bogey's middle axle is used to determine the locomotive location relative to the shell's crown. Thus when $x = 0$, the front bogey's middle axle (Fig. 2) is situated above the midspan of the structure. Under configuration D10 the locomotive travels from the left to the right, i.e. at increment x (the distance of the front bogey's middle axle from the shell crown increases). Similar results were obtained during the return travel (D20), i.e. from the right to the left. Taking into account the results processing procedure, the travelling speed and the travelling direction can be treated as the structure's dynamic characteristics. The graphs show that the influence of these characteristics is small – the graphs are almost identical. This conclusion is confirmed by the results of the measurements performed

Analogiczne wyniki otrzymano podczas przejazdu powrotnego D20, a więc ze strony prawej do lewej. Z uwagi na zastosowaną procedurę przetwarzania wyników, prędkość przejazdu i kierunek jazdy można traktować jako cechy dynamiczne obiektu. Z przedstawionych wykresów wynika, że ich wpływ jest mały – wykresy są niemal identyczne. Wniosek ten potwierdzają wyniki pomiarów zrealizowane na innych obiektach [1, 6, 9-11]. Badania wpływu dużych prędkości przejazdów w obiektach gruntowo-powłokowych realizowano między innymi w pracach [16-18].

Charakterystyczną cechą wykresów $w(x)$ podanych na Rys. 4 jest przesunięcie ich ekstremów – odpowiednie do położenia punktów pomiarowych z Rys. 3 o 1,65 m w odniesieniu do punktu w kluczu. Ważną zasadą występującą w konstrukcjach gruntowo-powłokowych jest redukcja przemieszczeń do stanu zbliżonego do wyjściowego (zero) po pierwotnym i wtórnym przejeździe obciążenia. Różnica czasu pomiędzy przejazdami była minimalna i wynosiła około 2 min. Zatem pozostające ugięcie dodatnie (schemat D10) jest redukowane przez ujemne w przejeździe wtórnym (schemat D20) i odwrotnie [8]. Interesującym jest przypadek szczególny, występujący w położeniu lokomotywy $x = d/2 = 4,25$ m, gdy przemieszczenia wszystkich punktów pomiarowych w powłoce są jednakowe. Wówczas osie środkowe z obydwu wózków lokomotywy oddalone są od siebie o wartość $c = 4,2$ m i są ustawione symetrycznie względem klucza powłoki. W tym położeniu część podstawowa powłoki z nakładką przemieszcza się jednakowo. Ten przypadek jest również analizowany pod względem rozkładu naprężeń (odkształceń jednostkowych).

5. ODKSZTAŁCENIA JEDNOSTKOWE

Na podstawie pomiarów tensometrycznych uzyskanych w schemacie D10 w dolinie fali blachy, jak na Rys. 5 utworzono wykresy wartości $\varepsilon_D(x)$ podane na Rys. 6. Do tworzenia wykresów przyjęto charakterystyczne położenia osi lokomotywy, jak w badaniu ugięcia, gdzie x jest odległością osi środkowej w pierwszym wózku od klucza powłoki. Położenie osi lokomotywy podano w postaci sił skupionych: podczas najazdu kolor czerwony a zjazdu wózka kolor zielony. W kolejnych wykresach wartości x podlegają zwiększeniu, co oznacza przejazd lokomotywy ze strony lewej do prawej. Podczas najazdu pierwszego wózka lokomotywy obciążenia powłoki występują, gdy $-4,0 < x < 4,3$ m. Podczas zjazdu zaczyna się oddziaływanie drugiego wózka na powłokę, gdy $4,3 < x < 12,5$ m. Wyniki obydwu położeni wózków lokomotywy odróżniono na wykresach (kolor czerwony najazd, a zielony zjazd). Z ich porównania widoczne jest, że tworzą one na jednym rysunku układy niemal

on other structures [1, 6, 9-11]. The effect of high vehicle speeds on buried corrugated metal structures was studied in, e.g. [16-18].

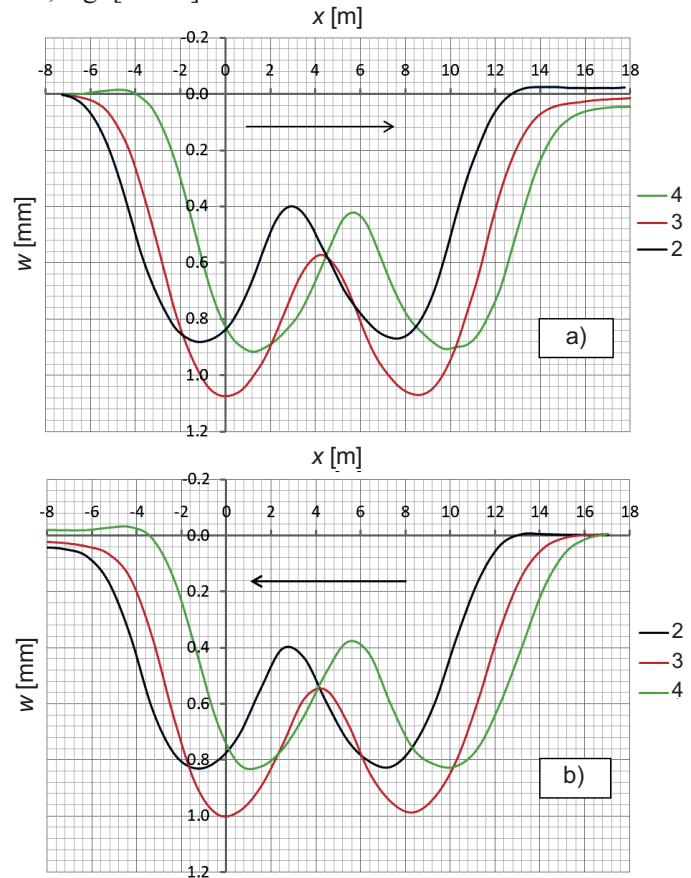


Fig. 4. Changes in deflection w during locomotive travel, when x is location of reference axis (as in Fig. 2), for configuration: a) D10, b) D20

Rys. 4. Zmiany ugięcia w podczas przejazdu lokomotywy, gdy x jest położeniem wyróżnionej osi (jak na Rys. 2), w przypadku pomiarów uzyskanych dla schematu: a) D10, b) D20

The characteristic feature of the $w(x)$ graphs shown in Fig. 4 is the shift (appropriate to the location of the measuring points in Fig. 3) of their extrema by 1.65 m relative to the point in the crown. An important principle applying to soil-steel structures is the reduction of displacements to a level close to the initial one (zero) after the primary and secondary travel of the load. The difference in time between the travels was minimal, amounting to about 2 min. Thus the remaining positive deflection (configuration D10) is reduced by the negative deflection caused by the secondary travel (configuration D20), and vice versa [8]. Interesting is the special case occurring in locomotive location $x = d/2 = 4.25$ m, when the displacements of all the measuring points in the shell are identical. Then the middle

symetryczne. Świadczy to o sprężystym zachowaniu się powłoki w ośrodku gruntowym.

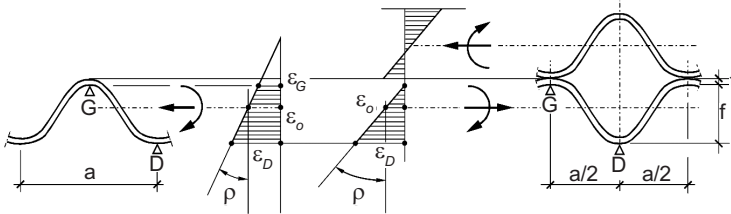


Fig. 5. Unit strains in cross section of corrugated plate with and without cover plate

Rys. 5. Odkształcenia jednostkowe w przekroju poprzecznym blachy falistej bez i z nakładką

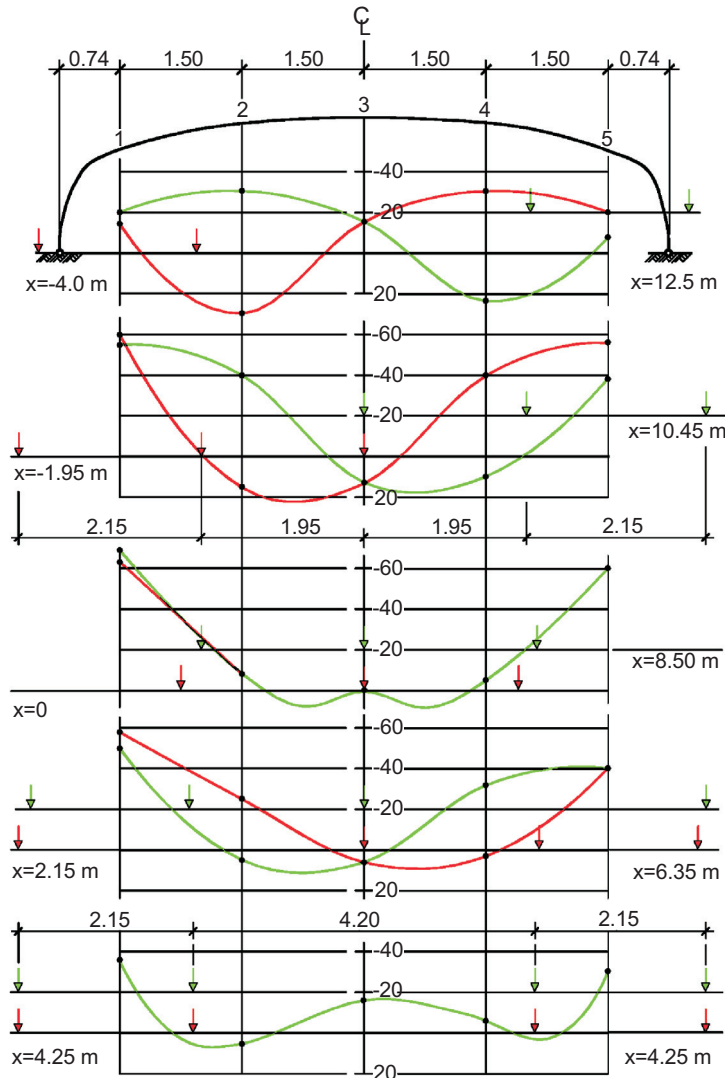


Fig. 6. Changes in strain ε_D [$\mu\text{m}/\text{m}$] on shell corrugation bottom, when x is location of reference axis (Fig. 2)

Rys. 6. Zmiany odkształcenia ε_D [$\mu\text{m}/\text{m}$] na dole fali powłoki podczas przejazdu lokomotywy, gdy x jest położeniem wyróżnionej osi (Rys. 2)

axes of the two locomotive bogies are separated by distance $c = 4.2$ m and are positioned symmetrically relative to the shell's crown. In this case, the basic shell with the cover plate displaces equally. This case is also analysed with regard to stress (unit strain) distribution.

5. UNIT STRAINS

On the basis of the tensometric measurements taken in the corrugated plate valley under configuration D10 (Fig. 5) graphs of $\varepsilon_D(x)$ were plotted (Fig. 6). The characteristic locations of the locomotive axes, as in the deflection tests, where x is the distance of the first bogie's middle axle from the shell's crown, were assumed to plot the graphs. The locations of the locomotive axes in the diagram are shown as concentrated forces represented by red arrows for the entry and green arrows for the exit. In the next diagrams the values of x increase, which indicates the travel of the locomotive from the left to the right. During the entry of the first locomotive bogie shell loads occur when $-4.0 < x < 4.3$ m. During the exit the second bogie begins to act on the shell when $4.3 < x < 12.5$ m. The results for the two locations of the locomotive are distinguished: red marks the entry and green – the exit. Their comparison shows that within one diagram they form almost symmetrical assemblies, which indicates the elastic behaviour of the shell in the soil medium.

In most of the diagrams (shown in Fig. 6), compression $\varepsilon_D < 0$ predominates over tension $\varepsilon_D > 0$, which is due to the generation of an axial force characteristic of arched structures (compression). When the locomotive bogie is located over the shell's corner part, the values of ε_D in the tested circumferential section are different, which is the effect of bending (considered later in this paper). When the bogie is located closer to the crown, classic diagrams with tension in the shell's middle part and compression in its corner part are obtained. The symmetric location of the locomotive, i.e. when its two bogies are above the shell's corners, which means $x = d/2 = 4.25$ m, is an interesting case. It is discussed as part of the analysis of the graphs shown in Fig. 4. Fig. 3 shows that the cover plate flexibly connected with the basic plate has a significant influence on the distribution of unit strains in the middle part of the shell. Thus the shape of graphs $\varepsilon_D(x)$ in the crown area depends on the complex system of forces in the flexible joint between the two corrugated plates. Fig. 5 shows a diagram of the distribution of ε between points D and G in the two cross sections (with and without the cover plate). The difference in unit strains in the joint between the two shells is due to the flexible connection [13].

Na większości wykresów podanych na Rys. 6 występuje przewaga ściskania $\varepsilon_D < 0$ nad rozciąganiem $\varepsilon_D > 0$, co jest skutkiem powstawania w powłoce siły osiowej, charakterystycznej w konstrukcjach o kształcie łukowym (ściskanie). Przy położeniu wózka lokomotywy nad częścią narożną w paśmie obwodowym występują odmienne wartości ε_D na badanym odcinku powłoki – jest to efekt zginania, rozpatrywany w dalszej części pracy. Gdy położenie wózka zbliżone jest do klucza powstają klasyczne wykresy z rozciąganiem w części środkowej i ściskaniem w obszarze narożnym powłoki. Ciekawą sytuacją jest położenie symetryczne lokomotywy, gdy obydwa wózki znajdują się nad narożami powłoki, co oznacza $x = d/2 = 4,25$ m. Przypadek ten omawiano przy analizie wykresów przedstawionych na Rys. 4. Z Rys. 3 wynika, że na rozkład odkształceń jednostkowych w części środkowej powłoki istotny wpływ ma nakładka połączona podatnie z częścią podstawową. Zatem przebieg wykresów $\varepsilon_D(x)$ w obszarze klucza zależy od złożonego układu sił wewnętrznych w podatnym zespoleniu dwóch blach falistych. Na Rys. 5 przedstawiono schemat rozkładu ε pomiędzy punktami D i G w obydwu przekrojach (bez i z nakładką). Różnica odkształceń jednostkowych w styku dwóch powłok wynika z podatnego zespolenia [13].

W powłokach obiektów gruntowo-powłokowych naprężenia normalne w przekroju poprzecznym blachy falistej spowodowane są ściskaniem i zginaniem, jak na Rys. 5. Proporcje obydwu składowych zależą od geometrii powłoki, a w konstrukcjach łukowych od wyniosłości H/L . Na podstawie ε_D i ε_G można zgodnie z Rys. 5 (przy założeniu płaskich przekrojów) uzyskać odkształcenie jednostkowe w osi bezwładności:

$$\varepsilon_o = \frac{\varepsilon_D(f-t) + \varepsilon_G(f+t)}{2f}. \quad (2)$$

We wzorze (2) ujęta jest geometria $a \times f \times t$ blachy falistej SC, w analizowanym przypadku $380 \times 140 \times 7$ mm. Do określenia zmiany krzywizny powłoki można wykorzystać zależności geometryczne blachy oraz ε_D i ε_G , jak we wzorze (3):

$$\rho = \frac{\varepsilon_D - \varepsilon_G}{f}. \quad (3)$$

Na Rys. 7 i 8 przedstawiono zmiany ε_o i ρ podczas przejazdu lokomotywy, powstałe podczas realizacji schematów D10 (najazd) i D20 (powrót). Z postaci funkcji $\varepsilon_o(x)$ wynika, że najbardziej regularne są zmiany w przekrojach narożnych (punkty 5 i 1). Symetrię wykazują wykresy w przekroju środkowym 3. Przekroje 2 i 4, w których rozpoczyna się nakładka, wykazują znaczne zróżnicowanie. Z porównania wykresów uzyskanych w schemacie D10 (najazd) i D20

Normal stresses in the cross section of the corrugated plate in soil-steel structures are caused by compression and bending, as shown in Fig. 5. The proportion of these two components depends on the shell's geometry and in the case of arch structures, on the rise-to-span ratio H/L . According to Fig. 5, the unit strain along the axis of inertia can be obtained on the basis of ε_D and ε_G (assuming the cross sections to be planar):

$$\varepsilon_o = \frac{\varepsilon_D(f-t) + \varepsilon_G(f+t)}{2f}. \quad (2)$$

Formula (2) takes into account the geometry $a \times f \times t$ of corrugated plate SC – the $380 \times 140 \times 7$ mm in the considered case. In order to determine the curvature of the shell one can use the plate's geometric interdependences and ε_D and ε_G , as in formula (3):

$$\rho = \frac{\varepsilon_D - \varepsilon_G}{f}. \quad (3)$$

Figs. 7 and 8 show changes in ε_o and ρ during locomotive travel under configurations D10 (entry) and D20 (return). The graph of function $\varepsilon_o(x)$ indicates that the most regular changes occur in the corner cross sections (points 5 and 1). The graphs for midsection 3 exhibit symmetry. Cross sections 2 and 4, in which the cover plate begins, show considerable irregularity and lack of symmetry in ε_o and ρ as a function of x . A comparison of the graphs obtained under configurations D10 (entry) and D20 (return) reveals a similarity between them. It is important that after the primary and secondary travel strains ε_o are totally reduced (to zero). It is interesting that when $10 < x < 14$ m, tension arises, under both configuration D10 and D20. Parameter ε_o varies less than ρ , which indicates local effects of the action of the locomotive's wheels on the plate, characteristic of box shells with a small soil surcharge [9, 15].

Quantity ε_o is the result of axial force N while ρ is generated by bending moment M (Fig. 7). By comparing the shares of N and M one gets eccentricity e of the axial force as the resultant in the considered cross section of the corrugated plate. The eccentricity can be determined on the basis of unit strains ε_D and ε_G from the formula:

$$e = \frac{\rho}{\varepsilon_o} i^2, \quad (4)$$

where i is a radius of gyration. In the case of the SC plate $380 \times 140 \times 7$ mm, it amounts to:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{24164}{9.81}} = 49.6 \text{ mm}. \quad (5)$$

(powrót) widoczne jest ich podobieństwo. Ważne jest, że po przejeździe pierwotnym i wtórnym całkowicie (do zera) redukują się odkształcenia ε_o . Interesujące jest powstawanie rozciągania, gdy $10 < x < 14$ m – powtórzone w obydwu schematach pomiarowych D10 i D20. Zmienność parametru ε_o jest mniejsza niż ρ , co wskazuje na efekty lokalne oddziaływania kół lokomotywy na blachę – charakterystyczne w powłokach o kształcie skrzynkowym i małym naziemiu [9, 15].

Wielkość ε_o jest skutkiem siły osiowej N , natomiast ρ momentu zginającego M (Rys. 7). Z porównania udziału N i M otrzymuje się mimośród siły osiowej e , jako wypadkowej w analizowanym przekroju blachy falistej. Można go wyznaczyć na podstawie odkształceń jednostkowych ε_D i ε_G , jak we wzorze:

$$e = \frac{\rho}{\varepsilon_o} i^2, \quad (4)$$

gdzie i jest promieniem bezwładności. W przypadku blachy SC $380 \times 140 \times 7$ mm wynosi on:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{24164}{9,81}} = 49,6 \text{ mm}. \quad (5)$$

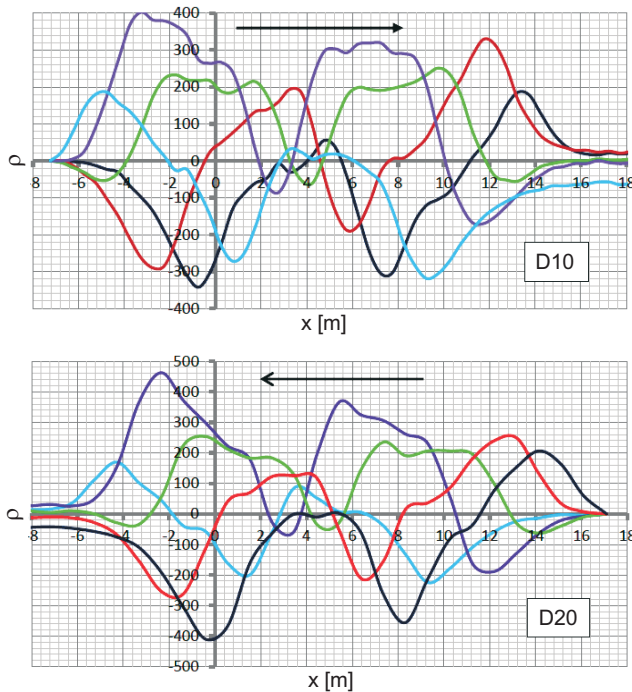


Fig. 8. Changes in curvature radii $\rho \cdot 10^{-6} [\text{m}^{-1}]$ during locomotive travel, when x is location of reference axis (Fig. 2)
Rys. 8. Zmiany promieni krzywizny $\rho \cdot 10^{-6} [\text{m}^{-1}]$ podczas przejazdu lokomotywy, gdy x jest położeniem wyróżnionej osi (Rys. 2)

Na Rys. 9 przedstawiono zmiany mimośrodu wypadkowej siły normalnej podczas przejazdu lokomotywy w schemacie

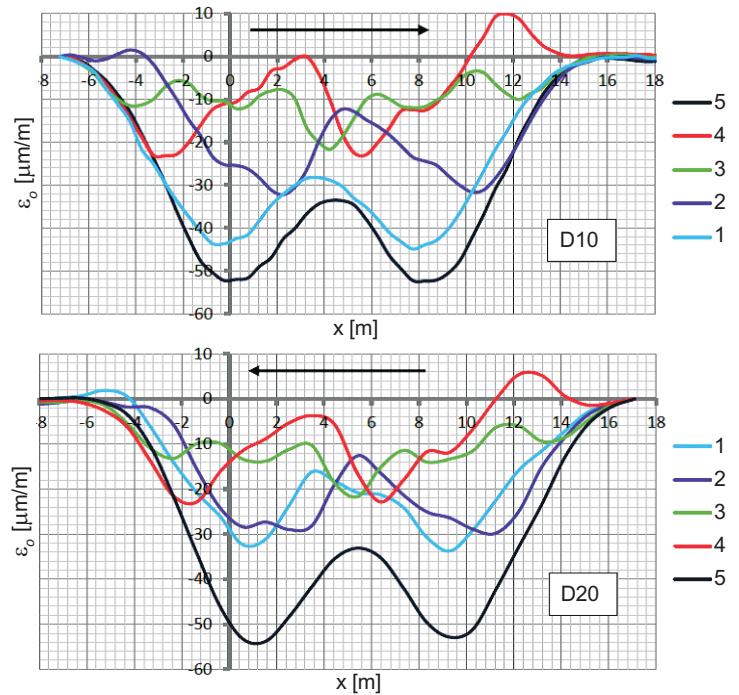


Fig. 7. Changes in strain ε_o [$\mu\text{m}/\text{m}$] along axis of basic shell during locomotive travel, when x is location of reference axis (Fig. 2)
Rys. 7. Zmiany odkształcenia ε_o [$\mu\text{m}/\text{m}$] w osi powłoki podstawowej podczas przejazdu lokomotywy, gdy x jest położeniem wyróżnionej osi (Rys. 2)

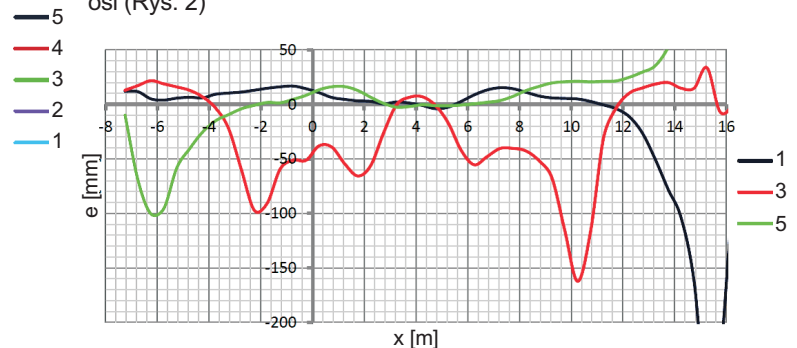


Fig. 9. Eccentricity of axial force as resultant during locomotive travel, when x is location of reference axis (Fig. 2)
Rys. 9. Mimośród siły osiowej, jako wypadkowej podczas przejazdu lokomotywy, gdy x jest położeniem wyróżnionej osi (Rys. 2)

Fig. 9 shows the variation in the eccentricity of the resultant normal force during the travel of the locomotive under configuration D10. The determined eccentricity e values point to a case of low eccentricity relative to plate corrugation height $f = 140$ mm. Graphs $e(x)$ are poorly stable for low (close to zero) values of ε_o (Fig. 7). For this reason when $x > 15$ m, i.e. after the exit of the locomotive, the eccentricities shown in Fig. 9 are encumbered with a large error. In the built structure the effect of moving

D10. Wyznaczone wartości e wskazują na przypadek małego mimośrod, odniesionego do wysokości fali blachy $f = 140$ mm. Wykresy $e(x)$ są mało stabilne w sytuacji małych wartości ε_o , zbliżonych do 0 (Rys. 7). Z tego powodu w przypadku $x > 15$ m, a więc po zjeździe lokomotywy, mimośrod podane na Rys. 9 są obarczone dużym błędem. W wybudowanej konstrukcji wpływ obciążeń ruchomych jest niewielki stąd również wahania mimośródów są również niewielkie.

6. DYSKUSJA

Wyniki analiz podane w pracy dotyczą geometrii powłok o kształcie skrzynkowym, a więc odrębnej grupy powłok z blach falistych. Charakteryzuje się ona małymi wartościami $\kappa = H/L$ i małymi promieniami krzywizny w narożu. Z tych powodów obserwowane deformacje powłok skrzynkowych podczas budowy są inne niż powłok łukowych. Inne są też rozkłady sił wewnętrznych wzdłuż pasma obwodowego powłoki pod obciążeniem ruchomym. Cechą wspólną wszystkich rodzajów powłok jest redukcja deformacji po pełnym cyklu obciążenia – najazd i powrót [8]. Przy tym różnice w tych wykresach w przypadku powłok skrzynkowych są mniejsze niż spotykane w powłokach o kształcie łukowym.

Konstrukcje gruntowo-powłokowe charakteryzują się dużą deformacją w fazie budowy o przyjmowanej, jako dopuszczalna wartości $w/L = 1/50$. W przypadku obciążeń użytkowych, w analizowanych badaniach długotrwałych od obciążenia lokomotywą, ugięcia były wielokrotnie mniejsze i wyniosły:

$$\frac{w}{L} = \frac{1,28}{7475} = \frac{1}{5840}. \quad (6)$$

Również sztywność obiektu gruntowo-powłokowego [14, 15] od doraźnego obciążenia lokomotywą jest duża i wynosi:

$$k \approx \frac{P}{w_3 - w_2} = \frac{192,9}{1,07 - 0,55} = 370 \text{ kN/mm}. \quad (7)$$

Obciążenie lokomotywą wywołuje zaledwie kilkuprocentowe naprężenia w stosunku do wytrzymałości stali – w analizowanym przypadku w narożu powłoki uzyskano:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 0,205 \cdot 10^6 \cdot 65 \cdot 10^{-6} = 13,3 \text{ MPa}. \quad (8)$$

Podobne wartości naprężeń uzyskuje się w innych obiektach gruntowo-powłokowych. Wynika z nich mały udział obciążeń użytkowych w ocenie wytrzymałościowej stanu konstrukcji (nośności) powłoki z blach falistych. Ważnym zagadnieniem związanym z użytkowaniem mostów są zmiany ich deformacji i sił wewnętrznych, powstałe w wyniku ich eksploatacji. Prace te są obecnie rozwijane [15, 19].

loads is slight and so the fluctuations in the eccentricities are also small.

6. DISCUSSION

The analytical results presented in this paper concern the geometry of box shells, i.e. a separate group of shells made of corrugated plates. The group is characterized by low values of $\kappa = H/L$ and small radii of curvature in the corners. Therefore the deformations of box shells observed during their construction are different than those of arch shells. Also the distributions of the internal forces along the circumferential section of the shell under the moving load are different. The common feature of all the kinds of shells is the reduction in deformations after the full load cycle (entry and return) [8]. In the case of box shells, the differences in the deformation diagrams are smaller than the ones observed in arch shells.

During the construction stage buried corrugated metal structures are characterized by large deformations whose allowable value is assumed to be $w/L = 1/50$. In the case of operational loads, the deflections under the locomotive load in the long-duration tests were several times smaller, amounting to:

$$\frac{w}{L} = \frac{1.28}{7475} = \frac{1}{5840}. \quad (6)$$

Also the stiffness of the buried corrugated metal structure [14, 15] under the momentary locomotive load is high, amounting to:

$$k \approx \frac{P}{w_3 - w_2} = \frac{192.9}{1.07 - 0.55} = 370 \text{ kN/mm}. \quad (7)$$

The locomotive load generates stresses amounting to merely a few per cent of the strength of the steel. In the considered case, in the corner the stress amounted to:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 0.205 \cdot 10^6 \cdot 65 \cdot 10^{-6} = 13.3 \text{ MPa}. \quad (8)$$

Similar stress values are registered in other soil-steel structures. This indicates that operational loads are a minor factor in the strength assessment of the condition (load-bearing capacity) of a shell made of corrugated plates. An important factor connected with the operation of bridges are the changes in their deformations and internal forces, resulting from their service. Relevant research is currently underway [15, 19].

7. CONCLUSIONS

The results of tests carried out on many buried corrugated metal structures subjected to loading with rolling stock indicate that the effect of the vehicle travelling speed on

7. WNIOSKI

Wyniki badań wielu obiektów gruntowo-powłokowych poddanych obciążeniu taborem kolejowym wskazują na niewielki wpływ prędkości przejazdu pojazdu na przemieszczenia w powłoce (rzędu kilku procent, gdy $v < 40$ km/h [10]). Umożliwia to ciągłą rejestrację przemieszczeń w funkcji położenia pojazdu (w przypadku małych prędkości). Gdy realizuje się metodologię obciążenia kroczącego pomiary odbywają się w układzie statycznym, a nie quasi statycznym jak poprzednio, jednak to wydłuża czas badania oraz dodatkowo wyniki są punktowe (dyskretne).

Z uwagi na wartości przemieszczeń do określenia deformacji powłoki podczas budowy wykorzystuje się techniki geodezyjne. Pod obciążeniami eksploatacyjnymi te przemieszczenia są wielokrotnie mniejsze, co powoduje konieczność stosowania profesjonalnych urządzeń pomiarowych o większej czułości. Zatem naturalnym jest stosowanie ciągłego zapisu przemieszczeń i odkształceń jednostkowych podczas przejazdu pojazdu. Pozwala to na tworzenie funkcji sił wewnętrznych w powłoce, jako zależności od położenia pojazdu na obiekcie – wykorzystywane również do tworzenia linii wpływu tych wielkości.

Wyniki pomiarów deformacji kolejowych obiektów gruntowo-powłokowych wskazują, że ich sztywność jest analogiczna do klasycznych, stalowych mostów belkowych. Z uwagi na stosowane podłoże pod nawierzchnie kolejowe (zasypka gruntowa) obiekty te pozwalają na uzyskanie większej płynności jazdy, co może mieć duże znaczenie w przypadku pociągów dużych prędkości.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Bayoglu Flener E., Sundquist H.*: Full-scale testing of two corrugated steel box culverts with different crown stiffness. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 1, 2007, 35-44
- [2] *Kunecki B., Korusiewicz L.*: Field tests of large-span metal arch culvert during backfilling. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 12, 3, 2013, 283-295
- [3] *Machelski C.*: Steel plate curvatures of soil-steel structures during construction and exploitation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 15, 3, 2016, 207-220
- [4] *Maňko Z., Bęben D.*: Research on steel shell of a road bridge made of corrugated plates during backfilling. *Journal of Bridge Engineering*, 10, 5, 2005, 592-603
- [5] *Korusiewicz L., Chruścielski G., Jasiński R.*: Practical aspects of strains, stresses and internal forces estimation during field and laboratory tests of corrugated culverts. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 12, 2012, 117-131
- [6] *Bayoglu Flener E., Karoumi R.*: Dynamic testing of a soil-steel composite railway bridge. *Engineering Structures*, 31, 12, 2009, 2803-2811
- [7] *Korusiewicz L.*: Verification of the method of estimating bending moments in soil-shell structures on the basis of shell deformation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 15, 3, 2016, 221-230
- [8] *Machelski C.*: Dependence of deformation of soil-steel structure on the direction of load passage. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 13, 3, 2014, 223-233
- [9] *Pettersson L.*: Full Scale Tests and Structural Evaluation of Soil Steel Flexible Culverts with low Height of Cover. *Doctoral Thesis in Civil and Architectural Engineering*, Stockholm, 2007
- [10] *Szcześniak W., Hypki M., Skulski B., Śledziwski K.*: Badanie statyczne i dynamiczne mostu kolejowego o konstrukcji gruntowo-powłokowej. *Logistyka*, 6, 2014, 10252-10268

the displacements in the shell is small (in the order of a few per cent when $v < 40$ km/h [10]). Hence at low speeds it is possible to continuously record the displacements as a function of vehicle location. When the stepwise loading methodology is used, measurements are performed not in the quasi-static system as above, but in a static system. Consequently, the test lasts longer and the results are discrete (related to points).

Since the magnitude of the displacements which occur during the construction of the shell is considerable, surveying techniques are then used to determine its deformations. Under service loads the displacements are much smaller whereby it is necessary to use more sensitive professional measuring devices. Therefore it seems natural to use the continuous recording of displacements and unit strains during vehicle travel. Thanks to this, functions of the internal forces in the shell versus the vehicle location on the tested structure can be plotted. The functions can be used to create the influence lines of these quantities.

The measurements of the deformations of railway buried corrugated metal structures indicate that their rigidity is similar to that of conventional steel beam bridges. Owing to the track subgrade used (earth fill), such structures assure smoother travel, which can be of major importance in the case of high-speed trains.

- [11] *White K., Sargand S., Masada T.*: Evaluation of load rating procedure for metal culverts under shallow coil covers. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 23, 2017, 311-323
- [12] *Machelski C., Janusz L., Czerepak A.*: Influence Functions of Shell Deflection in Soil-Steel Bridge. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4, 3, 2016, 167-175
- [13] *Machelski C.*: Sztywność powłok warstwowych obiektów gruntowo-powłokowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 10, 4, 2011, 55-78
- [14] *Machelski C.*: Stiffness of railway soil-steel structures. *Studia Geotechnika et Mechanica*, 37, 4, 2015, 29-36
- [15] *Machelski C.*: Sztywność obiektu mostowego jako parametru użytkowego konstrukcji inżynierskich. *Przegląd Komunikacyjny*, 2, 2016, 27-32
- [16] *Madaj A., Surzbecher K., Porębski R., Janusz L.*: Testing of Multiplate type structure under dynamic railway loads. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 12, 2012, 185-195
- [17] *Mellat P., Andersson A., Pettersson L., Karoumi R.*: Dynamic analysis of a short span soil-steel composite bridge for railway traffic using field measurements and numerical modeling. *Engineering Structures*, 69, 2014, 49-61
- [18] *Anderson A., Sundquist H., Karoumi R.*: Full scale tests and structural evaluation of soil-steel flexible culverts for high-speed railways. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 12, 2012, 43-53
- [19] *Asp O., Laaksonen A.*: Instrumentation and FE-analysis of a large span culvert built under a railway. *Structural Engineering International*, 26, 4, 2016, 357-364