

CZESŁAW MACHELSKI¹⁾

DEPENDENCE OF DEFORMATION OF SOIL-SHELL STRUCTURE ON THE DIRECTION OF LOAD PASSAGE

ZALEŻNOŚĆ DEFORMACJI KONSTRUKCJI GRUNTOWO-POWŁOKOWEJ OD KIERUNKU PRZEJAZDU

STRESZCZENIE. W pracy analizuje się deformację powłoki wykonanej z blachy falistej obiektu gruntowo-powłokowego od obciążenia pojazdem zmieniającym położenie w sposób quasi statyczny. Przedstawiono procedurę dwukrotnego przejazdu pojazdu: pierwotnego i powrotnego. W wyniku takiego obciążania obiektu przemieszczenia powłoki ulegają redukcji do zera, z czego można wnioskować, że deformacja konstrukcji gruntowo-powłokowej, w której zasadniczym elementem nośnym jest zasypka, jest odwracalna. W przypadku stosowania klasycznej procedury statycznej czyli podczas badania obiektu pod obciążeniem ustawionym w jednym położeniu lub jednokrotnym przejeździe pojazdu przez obiekt (z małą prędkością) pozostają przemieszczenia resztkowe powłoki. Na podstawie przedstawionych w pracy wyników badań wykazano, że dwukrotny przejazd pojazdu w jedną stronę i z powrotem jest cyklem obciążenia obiektów gruntowo-powłokowych. Obciążeniem ruchomym wykorzystanym w badaniach była lokomotywa.

SŁOWA KLUCZOWE: badania deformacji powłoki, mostowe konstrukcje gruntowo-powłokowe, powtarzalne obciążenia ruchome.

ABSTRACT. The paper analyzes the deformation of a corrugated steel shell of a soil-steel structure resulting from a load applied by a vehicle changing its position in a quasi-static way. The procedure of double (forward and backward) passage of the vehicle is presented. As a result of such loading, the shell displacements are reduced to zero, from which it can be concluded that the deformation of the soil-steel structure, where the backfill is an essential bearing element, is reversible. In the case of using a classic static procedure, i.e. during the testing of the structure under load acting in one position or with a single passage of the vehicle over the bridge (at low speed), residual displacements of the shell remain. Based on the test results presented in the paper it is shown that bi-directional passage of a vehicle (forward and backward) is a load cycle of the soil-steel structures. During the testing a locomotive was used as a movable load.

KEYWORDS: cyclic movable load, shell deformation test, soil-steel bridge structure.

DOI: 10.7409/rabdim.014.015

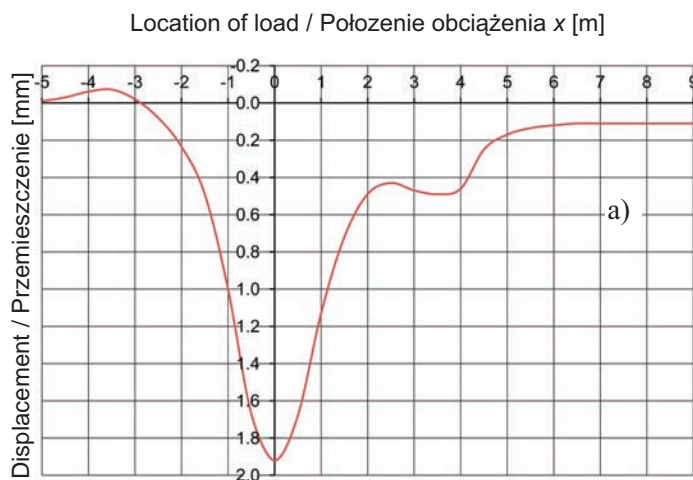
¹⁾ Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska; czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Jednym z badań odbiorczych mostów, będących podstawą oceny poprawności wybudowanej konstrukcji, jest jej próbne obciążenie statyczne. W programie badania ustalane są: położenia pojazdów na jezdni oraz kolejności ich wjazdu i zjazdu z obiektu. W przypadku klasycznych badań nie jest istotny kierunek, z którego pojazdy wjechały na wyznaczone miejsca i gdzie zostały skierowane (poza obiekt) po badaniu, np. [1]. W trakcie obciążania i przy pełnym obciążeniu mostu wykonuje się odczyty na urządzeniach pomiarowych w ustalonych odstępach czasu. Badanie kończą pomiary bez pojazdów na obiekcie.

W nielicznych przypadkach badań statycznych analizuje się zmianę wielkości pomiarowej w trakcie przejazdu pojazdu. Efekty statyczne powstałe od obciążenia zmieniającego położenie realizowano np. przy sprawdzeniu skuteczności zespolenia [2]. Zazwyczaj, przed badaniami dynamicznymi, realizuje się przejazd pojazdu z minimalną prędkością w celu ustalenia tzw. tła statycznego [3, 4].

Niżej podano przykład pomiarów zrealizowanych przez Petterssona [5] na obiekcie gruntowo-powłokowym, wybudowanym specjalnie do celów badawczych. Przekrój poprzeczny powłoki był zamknięty o kształcie kropolistym typu VM22 i charakterystycznych wymiarach: rozpiętość $L = 6,04$ m, wysokość $h = 4,55$ m. Analizowany obiekt utworzono z blachy o niskim profilu MP 200 × 55 × 2,93. W tych badaniach, jako obciążenia użyto ładowarki o parametrach technicznych jak na Rys. 1. W programie badań założono, że podczas pomiarów obciążenie będzie zmieniało swoje położenie w sposób quasi statyczny, a więc będzie przejeżdżało wzdłuż osi jezdni przygotowanej specjalnie do tych badań (bez nawierzchni).



1. INTRODUCTION

A static load test is one of proof tests which are the basis for evaluation of built structure. In the test program, the following factors are determined: the position of vehicles on the roadway and the order of their entry, and exit from the object. In the case of classic tests, the direction from which the vehicles enter and leave the structure after the examination test is not important [1]. While applying the load and at full load of the bridge, the readings on measuring devices are carried out at predetermined intervals. Measurements without vehicles on the object are conducted at the end of the test.

In rare cases of static tests, a change in the measured value is analyzed during a passage of the vehicle. The static effects resulting from the load changing its position were checked, for example, while testing the beam-plate interaction in composite bridges [2]. Typically, before the dynamic tests, a passage of the vehicle at minimum speed is carried out in order to determine the so-called static background [3, 4].

An example of measurements conducted by Pettersson [5] on the soil-steel structure built specifically for research purposes is presented below. The cross-section of the VM22-type shell was closed, droplet-shaped and had the following characteristic dimensions: span $L = 6.04$ m, height $h = 4.55$ m. The analyzed structure consisted of low-profile metal sheets MP 200 × 55 × 2.93. In those tests a loader with technical parameters as in Fig. 1 was used as the load. The test program assumed that the load would change its position in a quasi-static way during measurement, so it would move along the roadway designed specifically for those tests (without a pavement).



Fig. 1. Changes in deflection of the shell crown (a) of soil-shell structure (b) during a passage of a loader [5]

Rys. 1. Zmiany ugięcia klucza powłoki (a) konstrukcji gruntowo-powłokowej (b) podczas przejazdu ładowarki [5]

Na Rys. 1 przedstawiono wynik pomiaru ugięcia w kluczu powłoki od obciążenia ładowarką [5, 6]. Na osi poziomej wykresu podano położenie przedniego koła pojazdu w odniesieniu do klucza powłoki. Gdy $x = 0$ koło to znajduje się nad kluczem powłoki, natomiast koło tylne jest nad rzędną $x = -3,4$ m (Rys. 1). Widoczny na tym rysunku powtórny przyrost ugięcia jest wynikiem obciążenia drugim kołem ładowarki w położeniu nad kluczem powłoki, gdy $x = 3,4$ m. Końcowe wartości ugięcia nie dążą do wartości zerowej z pozostającym ugięciem resztkowym w_r .

Z porównania wartości w_r zestawionych w Tabl. 1 wynika, że są to liczby zarówno dodatnie jak i ujemne. Na taki wynik mogą mieć wpływ obciążenia poprzedzające te badania, co jest widoczne w rozpatrywanych w pracy przypadkach. Proporcja wartości w_r do maksymalnego ugięcia klucza powłoki podczas badania w_{\max} ujęta jest we wskaźniku:

$$\Delta = \frac{w_r}{w_{\max}} 100\% . \quad (1)$$

Wartości Δ zestawione w Tabl. 1 są bardzo małe, biorąc pod uwagę to, że zasypka gruntowa w takim obiekcie jest materiałem konstrukcyjnym. Znaczenie zasypki, jako głównego elementu układu gruntowo-powłokowego widoczne jest z porównania wartości w_{\max} zestawionych w Tabl. 1, gdy zmiennym parametrem jest grubość warstwy zasypki ponad kluczem H (przedstawiony na Rys. 1 wykres uzyskano, gdy $H = 1,50$ m). Zwiększenie grubości zasypki nad powłoką wpływa wyraźnie na redukcję sił wewnętrznych i przemieszczeń [5, 7].

Table 1. Influence of surcharge depth H on the deflection of shell crown
Tablica 1. Wpływ grubości naziomu H na ugięcie klucza powłoki

Surcharge depth / Grubość naziomu H [m]	Deflection / Ugięcie [mm]		Indicator / Wskaźnik Δ [%]
	w_{\max}	w_r	
0.75	6.77	0.15	2.2
0.90	4.32	0.10	2.3
1.20	2.97	-0.08	-2.7
1.50	1.86	-0.13	-7.0

Podany przykład metodyki statycznego badania konstrukcji gruntowo-powłokowej został rozwinięty w niniejszej pracy. W pracy [6] na przykładach badanych drogowych konstrukcji gruntowo-powłokowych wykazano wpływ kierunku przejazdu obciążania statycznego na wynik pomiaru. Wykazano, że przypadek przejazdu pojazdu w jedną stronę po obiekcie, jak na Rys. 1, jest tylko częścią cyklu obciążenia.

Fig. 1 shows the result of measurement of the deflection in the shell crown top caused by the loader [5, 6]. The horizontal axis of the graph indicates the position of the front wheel of the vehicle in relation to the shell crown. When $x = 0$ the wheel is located above the shell crown, while the rear wheel is above the ordinate $x = -3.4$ m, as in Fig. 1. The repeated increase of deflection, visible in the figure, results from loading by the second wheel of the loader positioned over the shell crown, when $x = 3.4$ m. The values of resultant deflection do not tend to zero and the residual deflection w_r still remains.

The w_r values listed in Table 1 are both positive and negative. This may result from the loads of previous tests, which is evident in the cases discussed in this paper. The ratio of the w_r value to the maximum deflection of the shell crown during examination w_{\max} is included in the index:

Δ values listed in Table 1 are very small considering the fact that the soil backfill in such structure acts as a structural material. The significance of the backfill as the main component of the soil-steel structural system results from the comparison of w_{\max} values listed in Table 1, where the thickness of the backfill layer over the crown H is the variable parameter (shown in Fig. 1, the diagram obtained for $H = 1.50$ m). Increasing the backfill thickness over the shell influences significantly the reduction of internal forces and displacements [5, 7].

The above mentioned example of static test methodology of the soil-steel structure was developed in this paper. The effect of direction of static load passage on the measurement results is shown in paper [6] based on the examples of examined soil-shell road structures. It has been shown that the vehicle passage in one direction, as shown in Fig. 1, is only a part of the load cycle. The effects resulting from

Efekty powstałe po takim przejeździe są redukowane w wyniku pełnego cyklu przejazdu, czyli podczas przejazdu powrotnego z drugiej strony obiektu na pierwszą – do stanu wyjściowego, co wykazano w artykule.

2. OPIS BADANEGO OBIEKTU

Analizowaną w pracy konstrukcję gruntowo-powłokową o przeznaczeniu mostowym wybudowano w ciągu łącznicy kolejowej w Świdnicy. Powłokę obiekt wykonano z blachy typu SuperCor o geometrii fali SC 380×140×7. Podstawową powłokę wzmocniono nakładką o tym samym profilu blachy. Geometria ogólna powłoki, pokazana na Rys. 2 i Rys. 3, określana jest przez producenta blach jako łukowa typu SC-19NA. Charakterystyczne wymiary powłoki to: rozpiętość $L = 15,0$ m, wysokość $h = 5,232$ m, górny promień krzywizny $R = 9,930$ m. Szerokość górna powłoki $B_g = 13,0$ m oraz dolna $B_d = 26,3$ m. W wysokości konstrukcyjnej wiaduktu kolejowego $h_k = 1,60$ m ujęta jest grubość naziomu H oraz typowa nawierzchnia kolejowa. Obiekt zaprojektowano na kolejowe obciążenie klasy $k + 2$. Do próbnego obciążenia użyto lokomotywę typu ST43 (Rys. 4).



Fig. 2. Position of locomotive during acceptance tests
Rys. 2. Położenie lokomotywy na obiekcie podczas badań odbiorczych

Pomiary przemieszczeń powłoki podczas próbnego obciążenia realizowano w dwóch, niezależnych bazach. W schemacie obciążenia S1 do pomiarów zastosowano technikę geodezyjną. Do badań statycznych, oznaczonych jako S2, przyjęto

such passage are reduced after full passage cycle, i.e. during the return movement from the second side of the object to the first one – to the initial state, as shown in the paper.

2. TESTED STRUCTURE

The soil-steel bridge structure, analyzed in the paper, was built along the railway line in Świdnica. The shell was made of corrugated metal sheet SuperCor SC 380×140×7. The main shell has been reinforced with a cover plate having the same sheet profile. The general shape of the shell, shown in Fig. 2 and Fig. 3, is described by the manufacturer as arc-type SC-19NA. The characteristic dimensions of the shell are: span $L = 15.0$ m, height $h = 5.232$ m, the upper radius of curvature $R = 9.930$ m. The upper width of the shell $B_g = 13.0$ m and the bottom width $B_d = 26.3$ m. The structural height of the railway viaduct $h_k = 1.60$ m comprises the backfill thickness H and involves typical railway surface. The object was designed for train load of $k + 2$ class. The ST43-type locomotive was used for the test loading, as shown in Fig. 4.

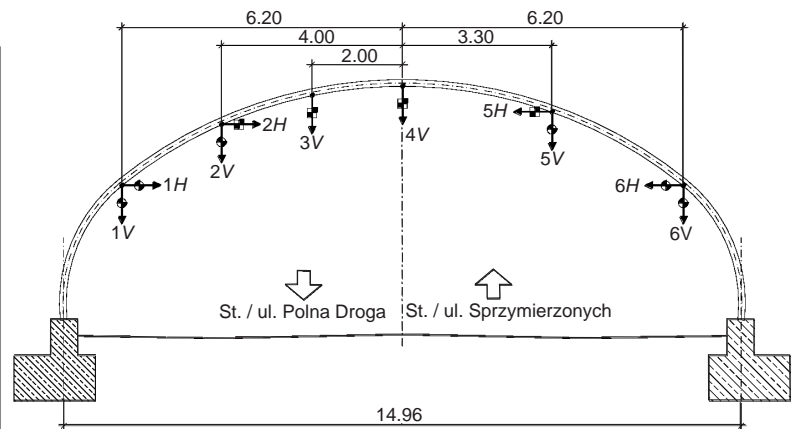


Fig. 3. Location and designation of measuring points on the circumferential belt of shell

Rys. 3. Rozmieszczenie i oznaczenia punktów pomiarowych na paśmie obwodowym powłoki

Measurements of shell displacement during the test loading were recorded in two independent databases. In the load case S1, the technique of geodetic measurements was used. For static tests, denoted as S2, the base of points distributed along a circumferential line of the lower surface of the shell was adopted, as shown in Fig. 3. The line of shell peripheral band was positioned in a vertical plane

bazę punktów leżących wzdłuż linii obwodowej dolnej powierzchni powłoki, jak na Rys. 3. Linia pasma obwodowego powłoki była położona w płaszczyźnie pionowej pod osią toru. Z tej bazy korzystano również w badaniach dynamicznych, oznaczonych jako D5 i D25. Do określenia kierunków przemieszczeń punktów na Rys. 3 stosuje się następujące oznaczenia: H – przemieszczenia poziome oraz V – przemieszczenia pionowe, czyli ugięcia. Do pomiaru przemieszczeń powłoki $2H$, $3V$, $4V$ i $5H$ wykorzystano czujniki indukcyjne o zakresie $0 \div 50$ mm i dokładności odczytów $0,01$ mm. Pomiar przemieszczeń powłoki $1V$, $1H$, $2V$, $5V$, $6V$ i $6H$ dokonano z użyciem czujników zegarowych o zakresie $0 \div 50$ mm i dokładności odczytów $0,01$ mm.

under the axis of the track. This database has been used also during the dynamic tests marked as D5 and D25. In order to determine the directions of point displacements in Fig. 3, the following notations are used: H – horizontal displacements and V – vertical displacements (deflections). Measurement of shell displacements $2H$, $3V$, $4V$ and $5H$ was carried out using the inductive sensors with range of $0 - 50$ mm and reading accuracy 0.01 mm. Measurements of shell displacements $1V$, $1H$, $2V$, $5V$, $6V$ and $6H$ were performed using dial gauges with range of $0 - 50$ mm and reading accuracy 0.01 mm.

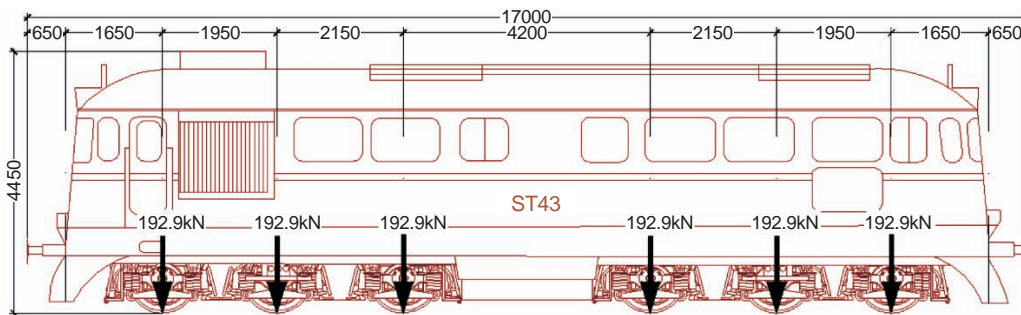


Fig. 4. Geometry and forces acting on axes of ST43 locomotive
Rys. 4. Geometria i naciski na osie lokomotywy ST43

Wartości przemieszczeń z czujników indukcyjnych przekazywane były bezpośrednio do komputera; stąd w trakcie obciążenia dostępny był podgląd deformacji powłoki przy każdym położeniu pojazdu. Rejestrowanie przemieszczeń powłoki na czujnikach zegarowych dokonywano po każdej zmianie położenia lokomotywy. We wszystkich schematach obciążeń statycznych S1 i S2 oraz dynamicznych D5 i D20 realizowano jednakowy przejazd lokomotywy: z jednej strony obiektu na drugą i z powrotem. Przejazd odbywał się po tym samym torze a lokomotywa przemieszczała się „do przodu” i „do tyłu” a więc zawsze w takiej samej konfiguracji osi pojazdu. W sumie przeprowadzono po dwa cykle przejazdów statycznych S1 i S2 oraz dynamicznych D5 i D20.

Displacement values obtained from inductive sensors were transmitted directly to a computer and, as a result of that, there was available a preview of shell deformation at each position of the shell while applying the load. Readings of shell displacements by dial gauges were made after each change of position of the locomotive. In all cases of static loads S1 and S2 and dynamic loads D5 and D20, the identical locomotive passage was conducted: from one side of the bridge to the other and back. The passage was realized on the same track and the locomotive moved “forward” and “backward” always in the same configuration of vehicle axle. In total, two cycles of static passages S1 and S2 and dynamic ones D5 and D20 were performed.

3. DEFORMACJA POWŁOKI

Podane w pracy wyniki badań dotyczą schematu S2, w którym przebieg obciążenia był identyczny jak w poprzedzającym go schemacie S1. Sposób obciążenia lokomotywą był w początkowej fazie analogiczny jak w przykładzie omawianym w rozdziale 1. Położenie pojazdu względem klucza obiektu odnoszono do środkowej osi przedniego wózka lokomotywy. Oznacza to, że gdy $x = 0$ ta oś lokomotywy znajduje się nad kluczem powłoki. Przejazd lokomotywy

3. SHELL DEFORMATION

The results presented in the paper relate to the load case S2, in which the load pattern was the same as in the preceding load case S1. The method of applying the load was, in the initial phase, similar to the example discussed in Chapter 1. Position of the vehicle relative to the shell crown was referenced to the central axis of the front truck of the locomotive. This means that for $x = 0$, this axis of the locomotive was located over the shell crown. The locomotive passage was interrupted after passing through the

był przerywany po przebyciu stałego odcinka o długości około 1,3 m (co dwa podkłady) w celu dokonania odczytów na urządzeniach pomiarowych.

Przemieszczenia punktów pomiarowych powłoki pokazano na Rys. 5 i Rys. 6 w formie pary wykresów, na których zmienną jest x . Obydwie linie wykresów można ze sobą porównywać, bowiem powstały one przy tym samym położeniu lokomotywy na obiekcie, lecz podczas przejazdu pierwotnego (p), rozpoczynającego obciążenie powłoki oraz w wyniku przejazdu wtórnego (w), czyli występującego przy powrotnym przejeździe lokomotywy po tym samym torze i tym samym układzie sił. Ekstremalne ugięcia powłoki powstają przy ustawieniu osi środkowych obydwu wózków lokomotywy nad punktami pomiarowymi. Występowanie dwóch, maksymalnych wartości ugięcia oddalonych od siebie o 8,5 m wynika z rozstawu osiowego wózków.

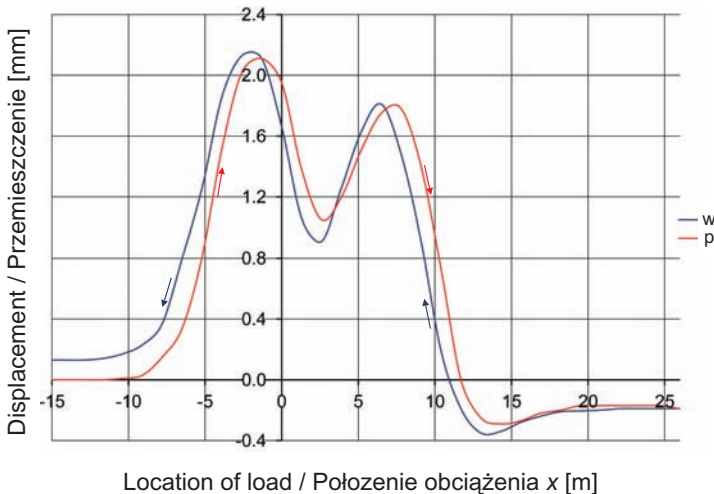


Fig. 5. Changes in vertical displacement of point 3
Rys. 5. Zmiany przemieszczenia pionowego punktu 3

Z przebiegu wykresów analizowanych ugięć widoczne jest charakterystyczne przesunięcie linii przemieszczeń, zaobserwowane wcześniej na innych obiektach drogowych [6, 8]. Jest ono związane ze znacznymi przemieszczeniami pozostającymi po przejeździe pierwotnym. Podlegają one redukcji (do wartości bliskiej zero) podczas przejazdu wtórnego (powrotnego), co jest szczególnie widoczne na Rys. 7 i 8.

W celu ułatwienia ich porównania przy tym samym położeniu lokomotywy na każdym z Rys. 7 lub 8 zamieszczono zarówno przemieszczenia pionowe (lewa strona rysunku - a) jak i przemieszczenia poziome (prawa strona rysunku - b). Tak jak wcześniej uzyskano wykres z przejazdu pierwotnego (p) i wtórnego (w). Przemieszczenia poziome punktu 5 ($-5H$) są oczywiście skierowane zgodnie z kierunkiem

fixed section with a length of approximately 1.3 m (every two sleepers) for the purpose of making readings on the mobile measuring devices.

The displacements of shell measurement points are shown in Fig. 5 and Fig. 6 in the form of a pair of graphs, in which x is the variable. Both graph lines can be compared with each other as they were created at the same position of the locomotive on the bridge, but during the primary passage (p) commencing the loading of the shell and as a result of the secondary passage (w), which occurred during the return of the locomotive along the same track and with the same alignment of forces. Extreme deflections of the shell appear when the central axes of two locomotive trucks are positioned over the measuring points. The presence of two, maximum deflection values distanced from each other by 8.5 m results from the axial spacing of the trucks.

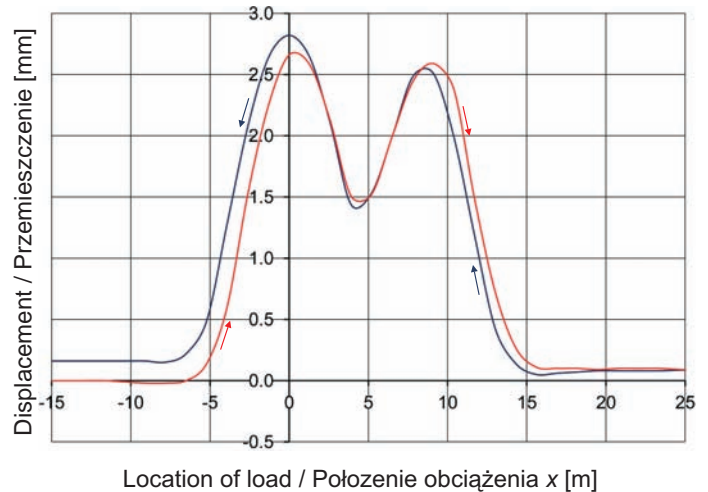


Fig. 6. Changes in deflection of the shell crown (point 4)
Rys. 6. Zmiany ugięcia klucza powłoki (punkt 4)

The graphs of analyzed deflections show a characteristic shift of displacement lines observed previously in other road structures [6, 8]. It is associated with significant displacements that remained after the primary passage. They are subject to reduction (to near zero) during the secondary passage (return), which is particularly evident in Fig. 7 and Fig. 8.

In order to facilitate their comparison at the same position of the locomotive, the vertical displacements (left graphs - a) and horizontal displacements (right graphs - b) are presented in each of Figs. 7 or 8. As previously, there was obtained a graph from the primary passage (p) and the secondary passage (w). The horizontal displacements of the point 5 ($-5H$) are obviously compliant with the direction

przejazdu lokomotywy. Z porównania wartości przemieszczeń poziomych punktów 2 i 5 widoczne jest, że deformacja powłoki w kierunku poziomym rozpoczyna się w sytuacji, gdy wózek przedni lokomotywy znajduje się nad kluczem powłoki ($x = 0$) wobec tego położenie wózka wtórnego jest jeszcze na naziemiu, nad strefą podparcia powłoki. Przyrosty przemieszczeń poziomych punktów 2 i 5 podczas przejazdu pierwotnego można uznać jako zgodne i proporcjonalne, co do zwrotu i wartości. Natomiast redukcja powstałych po przejeździe pierwotnym przemieszczeń podczas obciążenia wtórnego odbywa się odmiennie.

of the locomotive movement. While comparing the horizontal displacement values of points 2 and 5, it can be seen that the deformation of the shell in the horizontal direction begins when the front truck of the locomotive is positioned over the shell crown ($x = 0$) and hence the secondary truck is still positioned on the backfill, over the shell supporting zone. Increase of horizontal displacements of points 2 and 5 during the primary passage can be considered as consistent and proportionate as to the sense and value, whereas reduction of displacements occurring after the primary passage during applying the secondary load is realized differently.

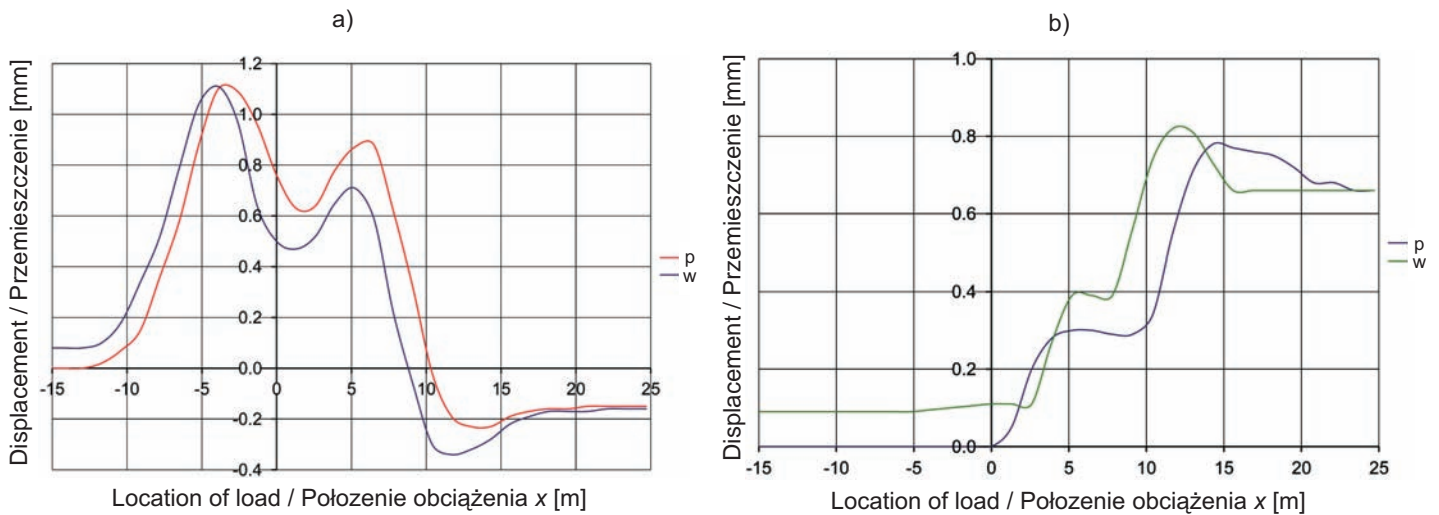


Fig. 7. Changes in components of point 2 displacement: a) vertical, b) horizontal
Rys. 7. Zmiany składowych przemieszczenia punktu 2: a) pionowe, b) poziome

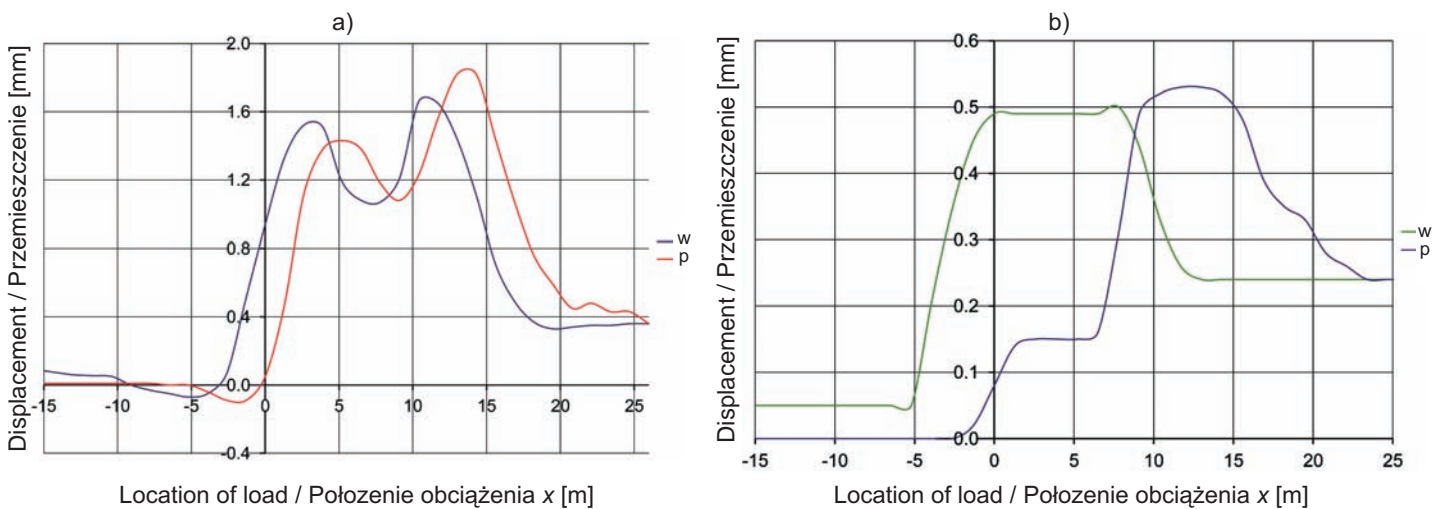


Fig. 8. Changes in components of point 5 displacement: a) vertical, b) horizontal
Rys. 8. Zmiany składowych przemieszczenia punktu 5: a) pionowe, b) poziome

W przypadku punktów 2 i 3 ugięcia pozostające w_r są innego znaku niż punktu 5. Po przejeździe lokomotywy w obydwie strony przemieszczenia pionowe i poziome zmierzają do wartości zerowej. Punkty 1 i 6 w tych badaniach odgrywają drugorzędą - kontrolną rolę, bowiem przemieszczenia są w tym przypadku obciążeń niewielkie.

Podczas jednego schematu obciążenia S2 występuje czterokrotny przejazd wózków lokomotywy nad punktami pomiarowymi. Widoczne to jest na wykresach ugięć podanych na Rys. 5 - 8 w postaci powstawania ekstremalnych wartości przemieszczeń pionowych. Pomimo jednakowych ciężarów wózków wierzchołki funkcji ugięcia nie są jednakowe. W przypadku punktów powłoki od strony najazdu lokomotywy, czyli 2, 3, 4, występują większe wartości od obciążenia pierwszym wózkiem niż powstałe od drugiego wózka. Natomiast w przypadku punktu 5 występuje sytuacja odwrotna. Jest to związane ze zmianami przemieszczeń poziomych, pokazanymi na Rys. 7 oraz 8.

Przedstawione na Rys. 5 - 8 wykresy wskazują na to, że schemat obciążenia S2 (i S1), czyli przejazd lokomotywy w obydwie strony tworzy cykl obciążenia, podczas którego deformacja konstrukcji powstała podczas obciążenia powraca do stanu pierwotnego [6, 8]. W kolejnych cyklach obciążenia powstają i zanikają podobne deformacje powłoki.

4. SKUTKI OBCIĄŻENIA CYKLICZNEGO

Na Rys. 9 i 10 podano wyniki uzyskane podczas płynnego przejazdu lokomotywy. W tym przypadku zastosowano dodatkowe (w stosunku do schematu S2) odcinki rozbiegowe po około 20 m z każdej strony obiektu, takie aby uzyskać stabilną prędkość na odcinku pomiarowym w obszarze powłoki. W badaniach oznaczonych, jako schemat D5 wykorzystywano bazę pomiarową S2, ale wyłącznie z użyciem czujników indukcyjnych. Na tych rysunkach, na osi poziomej występuje funkcja czasu a nie położenie pojazdu x , jak w schemacie S2. Te badania dynamiczne można traktować, jako quasi statyczne, tak jak schematy S1 i S2 z uwagi na małą prędkość przejazdu $v = 5$ km/h.

Na podstawie ekstremalnych wartości ugięć podanych na Rys. 9 można odwzorować momenty przejazdu wózków lokomotywy nad punktami pomiarowymi powłoki, a położenie lokomotywy nad powłoką można odczytać z wykresów podanych na Rys. 3 i 4. Pomiędzy pierwszymi (dwoma) ekstremami ugięć znajduje się stabilna część wykresów. Jest to wynik przerwy w obciążeniu, występującej po przejeździe pierwotnym lokomotywy a przed rozpoczęciem przejazdu powrotnego (wtórnego). W wyniku przejazdu

In the case of points 2 and 3, the remaining deflections w_r have a different sign than the point 5. After the locomotive passage in both directions, the vertical and horizontal displacements tend to zero. Points 1 and 6 in these studies have a secondary, control role, because the displacements for those loads are small.

During the single load case S2 there is a fourfold passage of the locomotive trucks over the measuring points. This can be observed in the graphs of deflections shown in Figs. 5 - 8 in the shape of extreme values of vertical displacements. Despite the equal weights of the trucks, the extremes of deflection functions are not identical. In the case of shell points 2, 3, 4 located on the side of approach of the locomotive, there appear larger values of the load coming from the first truck than those arising from the second truck. However, in the case of point 5, the situation is reversed. It is associated with changes of horizontal displacements, showed in Fig. 7 and Fig. 8.

The graphs indicated in Figs. 5 - 8 show that the load case S2 (and S1), i.e. the locomotive passage in both directions forms a load cycle during which the deformation of the structure occurring during the load returns to its original state [6, 8]. In subsequent load cycles, similar deformations of the shell appear and disappear.

4. EFFECTS OF CYCLIC LOAD

In Figs. 9 and 10 there were shown the results obtained during the fluent passage of the locomotive. In this case, the additional (relative to the diagram S2) acceleration sections each with a length of approximately 20 m were used on both sides of the structure, so as to achieve a stable constant speed on the measurement section in the shell area. In the tests marked as diagram D5 the measurement base S2 was applied, but only with the use of inductive sensors. In those figures, there is time on the horizontal axis instead of vehicle position x , as in the load case S2. These dynamic tests can be regarded as quasi-static, like cases S1 and S2 due to the low travel speed $v = 5$ km/h.

On the basis of the extreme values of deflections shown in Fig. 9 the moments of passage of locomotive trucks over the measuring points of the shell can be mapped. The position of the locomotive over the shell can be read from the graphs shown in Fig. 3 and Fig. 4. Between the initial (two) extremes of deflections there is a stable part of the graphs. This is the result of a break in the load, occurring after the primary passage of the locomotive and before starting the secondary passage (return). As a result of

wtórny powstają wykresy asymetryczne do tych z przejazdu pierwotnego.

the secondary passage the asymmetric graphs with respect to those of the primary passage are created.

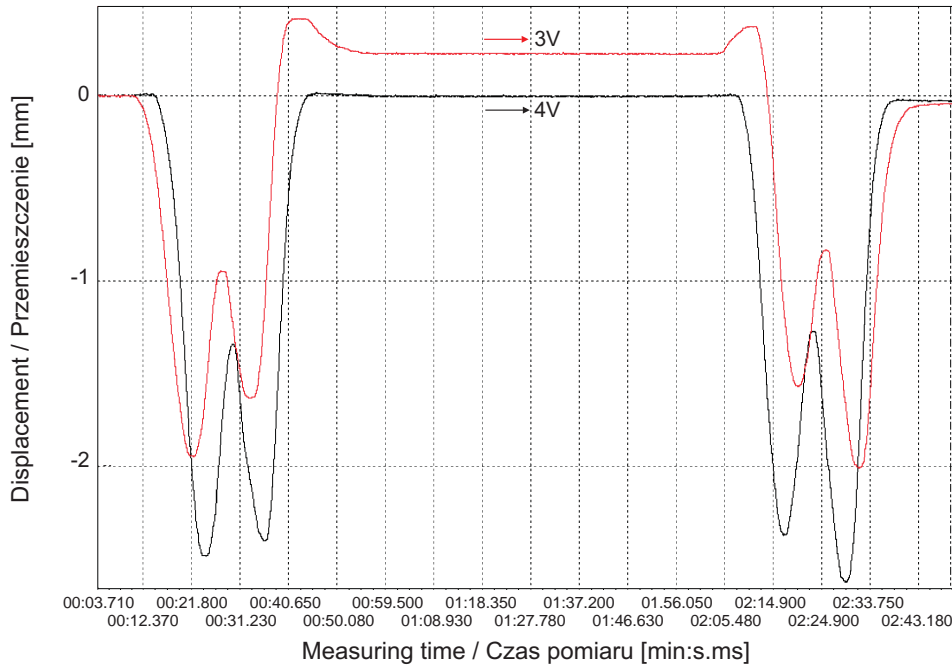


Fig. 9. Changes in vertical displacements of measuring points 3 and 4 during passage (in both directions) of a locomotive
Rys. 9. Zmiany przemieszczeń pionowych punktów pomiarowych 3 i 4 powłoki podczas dwukrotnego przejazdu lokomotywy

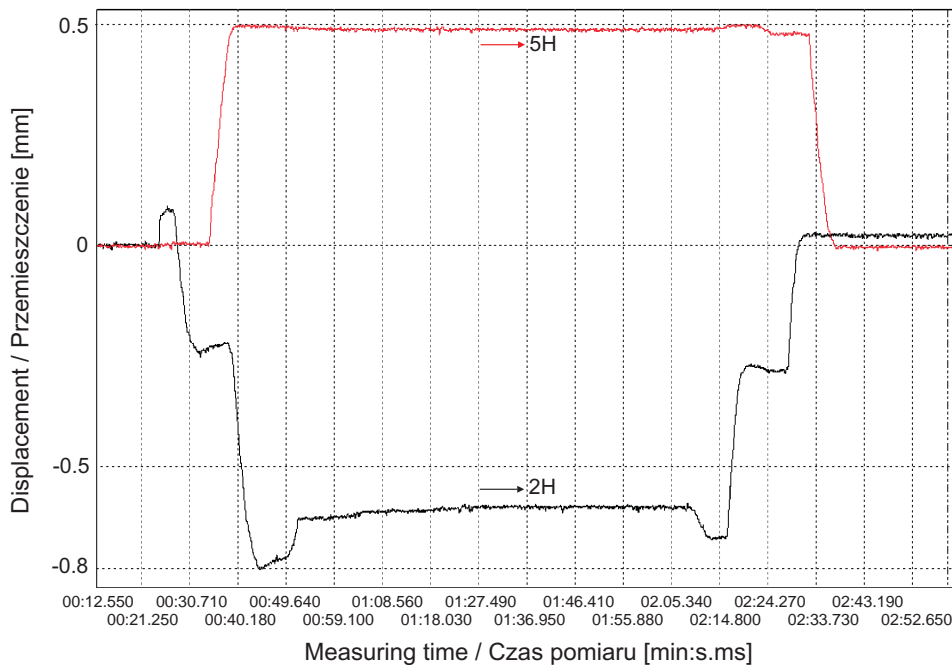


Fig. 10. Changes in horizontal displacements of measuring points 2 and 5 during passage (in both directions) of a locomotive
Rys. 10. Zmiany przemieszczeń poziomych punktów pomiarowych 2 i 5 powłoki podczas dwukrotnego przejazdu lokomotywy (w obydwie strony)

Na Rys. 10 podano wykresy przemieszczeń poziomych punktów pomiarowych 2 i 5. Wykresy te można odnieść do wyników podanych na Rys. 7 i 8 – bowiem są one zgodne co do przebiegu. W części środkowej wykresu, gdy obciążenie lokomotywą znajduje się już po drugiej stronie obiektu, a przed przejazdem pierwotnym – pozostały duże wartości

In Fig. 10 there are shown graphs of horizontal displacements of the measurement points 2 and 5. The graphs can be referenced to the results shown in Fig. 7 and Fig. 8 – as their shapes are consistent. In the middle part of the graph, when the locomotive load is already on the other side of the structure and before the primary passage, there remain the

przemieszczeń poziomych. Jest to więc wynik deformacji powłoki po niepełnym cyklu obciążenia. Przemieszczenia te są redukowane całkowicie w wyniku przejazdu powrotnego, co można uważać jako dopełnienie cyklu obciążenia [6, 8]. Szczególną cechą tych wykresów jest powrót zdeformowanej powłoki, podczas pierwszego przejazdu lokomotywy przez obiekt, do postaci początkowej. Rozumiane to jest jako spełnienie warunku cyklu obciążenia i wystąpienia pętli histerezy przemieszczeń powstałych podczas obciążenia [8]. Świadczy to o odwracalnym zachowaniu się konstrukcji gruntowo-powłokowej, w której grunt jest podstawowym materiałem konstrukcyjnym (zachowującym się sprężysto). Ponowne przejazdy z prędkością $v = 20$ km/h (w schemacie D20) nie wniosły zmian wyników podanych na Rys. 9 i 10.

5. WNIOSKI

Charakterystyczną cechą podatnych konstrukcji gruntowo-powłokowych jest zasadniczy udział zasyпки gruntu i nawierzchni w konstrukcji nośnej (w projektowaniu klasycznych mostów uwzględniane są one jedynie w rozkładzie obciążenia skupionego od kół pojazdów). Istotny wpływ na sztywność obiektu mają, więc cechy fizyczne zasyпки gruntu i technologia jej układania. Na przykładzie badanej konstrukcji gruntowo-powłokowej wykazano wpływ sposobu wprowadzania obciążenia statycznego na obiekt na wynik pomiaru.

Wykazano, że przejazd pojazdu z jednej strony obiektu na jego drugą stronę (jak na Rys. 1) jest tylko częścią cyklu obciążenia. Dopiero powrót tego pojazdu z drugiej strony obiektu jest dopełnieniem cyklu obciążenia. Uzasadnienia to całkowita redukcja przemieszczeń powstałych dopiero po przejeździe lokomotywy w obydwie strony. Całkowity zanik przemieszczeń po cyklu obciążenia jest szczególnie ważną cechą tych obiektów i świadczy o sprężystym zachowaniu się konstrukcji gruntowo-powłokowej.

Analizowane w pracy zjawisko w obiektach gruntowo-powłokowych było badane w przypadkach różnej geometrii konstrukcji, również drogowych obiektów mostowych [6]. Obecnie istotnym problemem jest modelowanie obciążenia ruchomego w MES [1, 9] i procesu przejazdu z uzyskaniem pętli histerezy przemieszczeń przy pełnym cyklu obciążenia [8]. Do kalibracji parametrów fizycznych gruntu w styku z powłoką przydatna jest metodyka obciążenia zmieniającego położenie [6]. Z tych rozwiązań wynikną istotne wnioski dotyczące użytkowania obiektów o przeznaczeniu komunikacyjnym, czyli określenie zachowania się zasyпки gruntu przed i za obiektem, jako podłoża pod nawierzchnię drogową i kolejową. Na uwagę zasługuje sytuacja, gdy

large values of horizontal displacements. That is therefore the result of deformation of the shell after the partial load cycle. These displacements are completely reduced as a result of the return passage which can be regarded as a completion of the load cycle [6, 8]. A special feature of these graphs is the return of the deformed shell to the initial form, during the first passage of the locomotive. It is understood as the fulfillment of the condition of load cycle and occurrence of the hysteresis loop of displacements which have arisen during the loading process [8]. This demonstrates the reversible behavior of the soil-steel structure, in which soil is the basic structural material (behaving elastically). The subsequent passages at a speed of $v = 20$ km/h (in the diagram D20) did not change the results shown in Figs. 9 and 10.

5. CONCLUSIONS

A characteristic feature of flexible soil-steel structures is a significant role of soil backfill and pavement acting as structural elements (in design of classic bridges they are taken into account only in the distribution of concentrated load coming from the wheels of vehicles). Therefore, the physical characteristics of soil backfill and technology of backfilling have a significant effect on the stiffness of the structure. On the basis of the example of the tested soil-steel the effect of the method of static load introduction onto the object on the measurement results is shown.

It has been shown that the vehicle passage from one side of the object to the other, as shown in Fig.1, is only a part of the load cycle. Only the return of the vehicle to the other side completes the load cycle. The reason is that a total reduction of displacements appears only after passage of the locomotive in both directions. The total loss of displacements after the load cycle is a particularly important feature of these structures and is a proof of elastic behavior of a soil-steel structure.

The phenomenon analyzed in the paper was examined for different geometric features of the structure, including road bridges [6]. Currently, an important problem is to model the movable load using FEM [1, 9] and the process of passage with displacement hysteresis loop obtained at full load cycle [8]. For calibration of physical parameters of the soil in the soil-steel interface it is useful to apply methodology of a movable load [6]. As a result important conclusions will emerge regarding the use of transportation structures, i.e. determining the behavior of the soil backfill, as a substructure for the road and rail surface. The situation, where there is no full load cycle (entry and return),

nie występuje pełny cykl obciążenia (najazd i powrót), ale jednokierunkowy przejazd pojazdów po obiektach mostowych.

but a one-way passage of vehicles on bridges, is very important.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Haji Abdulrazagh P., Bayoglu Flener E.*: Numerical analysis of box-type soil-steel structure under static service loads. Archives of Institute of Civil Engineering, 12, 2012, 95-108
- [2] *Machelski C., Toczkiwicz R.*: Identification of connection flexibility effects based on load testing of a steel-concrete bridge. Journal of Civil Engineering and Architecture, USA, 11, 2012, 1504-1513
- [3] *Andersson A., Sundquist H., Karoumi R.*: Full scale tests and structural evaluation of soil-steel flexible culverts for high-speed railways. Archives of Institute of Civil Engineering, 12, 2012, 43-53
- [4] *Bęben D.*: Experimental study on dynamic impacts of service train loads on corrugated steel plate culvert. Journal of Bridge Engineering, **18**, 4, 2013, 339–346
- [5] *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
- [6] *Machelski C.*: Modelowanie obiektów mostowych grunto-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008
- [7] *Bayoglu Flener E., Sundquist H.*: Full-scale testing of two corrugated steel box culverts with different crown stiffness. Archives of Institute of Civil Engineering, 1, 2007, 35-44
- [8] *Sobótka M.*: Numerical Simulation of hysteretic live load effect in a soil-steel bridge. Studia Geotechnica et Mechanica, **XXXVI**, No. I, 2014, 103-109
- [9] *Bayoglu Flener E.*: Testing the Response of Box-Type Soil-Steel Structures under Static Service Loads. Journal of Bridge Engineering, **15**, 1, 2010, 90-97

