

LESZEK KORUSIEWICZ¹⁾

TESTING OF A LARGE-SPAN SOIL-SHELL STRUCTURE WITHOUT STIFFENERS DURING BACKFILLING PROCESS

BADANIA W CZASIE ZASYPYWANIA GRUNTOWO-POWŁOKOWEJ KONSTRUKCJI O DUŻEJ ROZPIĘTOŚCI WYKONANEJ BEZ DODATKOWYCH ELEMENTÓW USZTYWIAJĄCYCH

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono wyniki badań polowych prototypowej konstrukcji, w postaci nisko-profilowego łuku stalowego wykonanego z blach falistych, zabudowanego w gruncie, służącej w zamyśle jako przejście dla zwierząt. Omawiana konstrukcja o rozpiętości 17,7 m, wysokości 5,5 m i długości ponad 15 m, wykonana została bez jakichkolwiek elementów usztywniających. Celem badań było wyznaczenie stanu odkształceń (naprężeń) i przemieszczeń w powłoce stalowej w trakcie procesu jej zasypywania oraz określenie wpływ czasu na mierzone wielkości podczas tego procesu, jak i po jego zakończeniu. Do pomiaru przemieszczeń zastosowano geodezję precyzyjną (tachimetr). Pomiarów odkształceń dokonano przy pomocy tensometrów elektrooporowych naklejanych bezpośrednio na stalowej konstrukcji w kierunku obwodowym i wzdłużnym. Na podstawie doświadczalnie wyznaczonych odkształceń obliczono naprężenia i siły wewnętrzne (momenty gnące i siły osiowe) w określonych przekrojach poprzecznych badanego obiektu. Wyniki badań mogą być przydatne w odniesieniu do podobnych konstrukcji o dużych rozpiętościach, bez dodatkowych elementów usztywniających.

SŁOWA KLUCZOWE: konstrukcja gruntowo-powłokowa, naprężenia, przemieszczenia, siły wewnętrzne, wpływ czasu, zasypywanie.

ABSTRACT. This paper presents the results of field tests carried out on a prototype structure in the form of a low-profile steel arch made from corrugated plates, covered with soil, which was intended as a wildlife overpass. The considered structure 17.7 m in span, 5.5 m high and over 15 m long, was made without any stiffening components. The aim of the tests was to determine the state of strain (stress) and displacement in the steel shell in the course of backfilling and the influence of time on the measured quantities during and after this process. The precision (total station) surveying method was used to measure displacements. Strains were measured by electrical resistance strain gauges stuck directly on the steel structure in the circumferential and longitudinal directions. Stresses and internal forces (bending moments and axial forces) in the particular cross sections of the tested object were calculated on the basis of the experimentally determined strains. The presented test results can constitute an element of boosting the knowledge about deformations and loads of similar large-span structures, without any stiffening components, during or after the backfilling process.

KEYWORDS: backfilling, displacements, influence of time, internal forces, soil-shell structure, stresses.

DOI: 10.7409/rabdim.015.014

¹⁾ Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska; leszek.korusiewicz@pwr.wroc.pl

1. WSTĘP

Szereg zalet konstrukcji gruntowo-powłokowych powoduje ich coraz szersze zastosowanie w budownictwie komunikacyjnym [1-3]. Istnieje tendencja do projektowania tego typu obiektów o coraz większych rozpiętościach [4-8]. Podstawowym ograniczeniem w zwiększaniu wymiarów takich obiektów jest warunek zapewnienia wymaganej wytrzymałości (nośności). Podczas projektowania konstrukcji stosuje się dwa rodzaje kryteriów, a mianowicie:

- kryteria wytrzymałościowe, które określają graniczne wartości naprężeń bezpiecznych,
- kryteria sztywności, określające graniczne wartości przemieszczeń szczególnych punktów danego elementu konstrukcji.

W konstrukcjach gruntowo-powłokowych maksymalne wyężenie metalowej powłoki, wykonanej najczęściej z blach falistych, występuje zazwyczaj w fazie układania zasyпки. Siły oddziaływujące na powłokę i związane z tym jej przemieszczenia zmieniają się w trakcie procesu zasypywania, osiągając z reguły ekstremalne wartości dla poziomu zasyпки równej lub bliskiej kluczowi powłoki [9-12]. Dalsze układanie zasyпки ponad kluczem powoduje redukcję naprężeń w powłoce i zmniejszenie jej wypiętrzenia. Obciążenia eksploatacyjne wywołane np. taborem kolejowym lub drogowym mają na ogół mniejszy wpływ na wyężenie konstrukcji, a w przypadku takich obiektów jak przejścia dla zwierząt mogą być praktycznie pominięte.

W przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych istnieją dwa podstawowe sposoby wpływania na zwiększenie ich nośności. Pierwszym sposobem jest modyfikowanie parametrów samej powłoki, takich jak: kształt powłoki, materiał powłoki (np. zastosowanie materiału o wyższych własnościach wytrzymałościowych), grubość blachy, wymiary fali, zastosowanie dodatkowych żeber usztywniających. Drugim sposobem jest oddziaływanie na parametry zasyпки (gruntu), takie między innymi jak: jakość i rodzaj zastosowanego kruszywa, stopień zagęszczenia zasyпки, technologia układania zasyпки [1, 2, 9].

Autor artykułu przeprowadził wcześniej, sponsorowane przez Unię Europejską, badania jednego z przepustów dla zwierząt umiejscowionego w ciągu autostrady A4 w okolicy Bolesławca [8, 13]. Konstrukcja składała się z dwóch bliźniaczych, nisko-profilowych łuków stalowych wykonanych z blach falistych, wzmocnionych dodatkowymi żebrami usztywniającymi (Rys. 1). Wyniki badań uzyskane w procesie układania zasyпки wykazały, że wartości przemieszczeń względnych powłoki są dużo mniejsze od

1. INTRODUCTION

Owing to many advantages soil-shell structures are increasingly often used in transport infrastructure construction [1-3]. There is a tendency to build soil-shell structures with ever larger spans [4-8]. The main limitation to increasing the dimensions of such structures is their structural reliability. Two kinds of criteria:

- strength criteria, defining the limit safe stress values,
- stiffness criteria, defining the limit displacements of the singular points of a given structural member,

For soil-shell structures the metal shell, which is typically made from corrugated plates, is under maximum strain usually during backfilling. The forces acting on the shell and the resultant shell displacements change in the course of backfilling, reaching extreme values when the backfill level is the same as or close to that of the shell crown [9-12]. Backfilling above the crown reduces the stresses in the shell and its upthrust. Service loads generated by, e.g. trains or motor vehicles, generally have less effect on the strain of the structure and in the case of such structures as wildlife crossings they can be practically neglected.

There are two main ways of shaping the structural reliability of soil-shell structures. One way consists in modifying the shell's parameters, such as its shape and material (e.g. by using a higher strength material), plate thickness, corrugation dimensions, and using additional stiffeners. The other way consists in shaping the backfill (soil) parameters, such as: the quality and kind of used aggregate, the degree of compaction, and the backfill laying technology [1, 2, 9].

The present author previously carried out (EU funded) tests of one of the A4 motorway wildlife overpasses located near Bolesławiec, Poland [8, 13]. The structure consisted of two twin low profile steel arches made from corrugated plates reinforced with additional stiffeners (Fig. 1). The test results obtained during backfilling process showed that the values of shell relative displacements are lower than the permissible ones. Therefore the question arose if and when it is necessary to use additional elements increasing the stiffness of such flexible structures. In order to answer this question a similar test soil-shell structure without stiffening ribs was built.

dopuszczalnych. Powstało zatem pytanie, czy i kiedy konieczne jest stosowanie w tego typu konstrukcjach podatnych dodatkowych elementów zwiększających ich sztywność. W celu zbadania powyżej określonego zagadnienia wybudowano podobny, testowy obiekt gruntowo-powłokowy bez elementów usztywniających.

2. BADANA KONSTRUKCJA

Przedmiotem badań była nisko-profilowa konstrukcja SuperCor typ SC-57S o przekroju łukowym o następujących wymiarach:

- rozpiętość – 17,667 m,
- wysokość – 5,459 m,
- promień krzywizny blach klucza – 13,735 m,
- promień krzywizny blach bocznych – 3,430 m,
- długość – 15,240 m (20 półpierścieni).

Badaną konstrukcję przedstawiono na Rys. 2, a jej schemat na Rys. 3.



Fig. 2. The structure during construction
Rys. 2. Badany obiekt w trakcie budowy

Parametry zastosowanej blachy falistej były następujące:

- wymiary fali – 381×140 mm,
- grubość blachy – 7,0 mm,
- rodzaj stali – S315MC.

Poszczególne blachy zostały połączone śrubami M20 klasy 8.8. Połączenia (wzdłuż fali) wykonano w układzie pełnym trójrzędowym (15,75 śrub/m, minimalny moment dokręcenia 360 Nm). Stalowa powłoka została posadowiona na dwóch ławach betonowych o szerokości 90 cm i wysokości 80 cm i połączona z nimi za pomocą ceowników montażowych przymocowanych do wcześniej osadzonych przez wklejenie kotew.



Fig. 1. Wildlife crossing over A4 motorway
Rys. 1. Przejście dla zwierząt nad autostradą A4

2. TESTED STRUCTURE

A low-profile SuperCor SC-57S structure with an arch cross section of the following dimensions:

- the span – 17.667 m,
- the height – 5.459 m,
- the curvature radius of the crown plates – 13.735 m,
- the curvature radius of the side plates – 3.430 m,
- the length – 15.240 m (20 half-rings),

was investigated. The tested structure and its schematic are shown in Fig. 2 and Fig. 3 respectively.

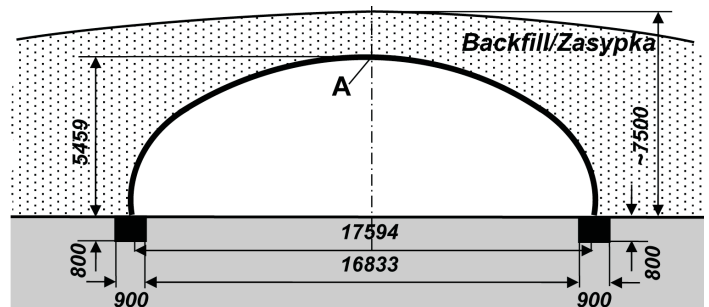


Fig. 3. Schematic cross-section of structure (dimensions [mm])
Rys. 3. Schemat przekroju konstrukcji (wymiaru [mm])

The corrugated plate parameters were:

- corrugation dimensions – 381×140 mm,
- plate thickness – 7,0 mm,
- steel type – S315MC.

Separate plates were joined by the M20 screws, class 8.8. The joints (along the corrugation) were made in a full three-row set (15.75 screws/m, minimum tightening torque of 360 Nm). The steel shell was founded on two 90 cm wide and 80 cm high concrete strip footings and connected with them by means of assembly channel sections fixed to previously embedded (adhesive bonded) anchors.

Zasyпка konstrukcji wykonana została z piasku średniego na granicy pylastego (zgodnie z normą PN-86/B-02480). Dla próbek pobranych z ułożonych warstw określono następujące parametry zasyпки: wilgotność optymalna $w_{opt} = 11,68\%$; maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,854 \text{ g/cm}^3$; wskaźnik różnoziarnistości U nie mniejszy niż 6,63; wskaźnik krzywizny uziarnienia $C = 1,81$; wskaźnik wodoprzepuszczalności $k = 2,2 \text{ m/dobę}$. Wskaźnik zagęszczenia według standardowej próby Proctora dla wszystkich warstw wynosił $I_S = 0,97 \div 1,01$ i był wyższy od wymaganego $I_{S \min} = 0,96$. Zasyпка została wykonana warstwami o grubości 30 cm.

3. POMIARY

3.1. DEFORMACJE

Celem badań była ocena wpływu procesu zasypywania na stan deformacji i wartość naprężeń w stalowej powłoce konstrukcji oraz dodatkowo określenie wpływu czasu na mierzone wielkości. Wieloletnie obserwacje wykazały, że w rozpatrywanych konstrukcjach o symetrycznym kształcie największe przemieszczenia w trakcie procesu zasypywania występują w kluczu powłoki. Z tego powodu w artykule ograniczono się do przedstawienia jedynie przemieszczeń pionowych w środku rozpiętości łuku (punkt A na Rys. 3). Do pomiaru przemieszczeń wykorzystano metodę geodezji precyzyjnej (tachimetr). Pomiarów dokonywano tuż po ułożeniu kolejnych warstw gruntu (wyniki przedstawiono na Rys. 4).

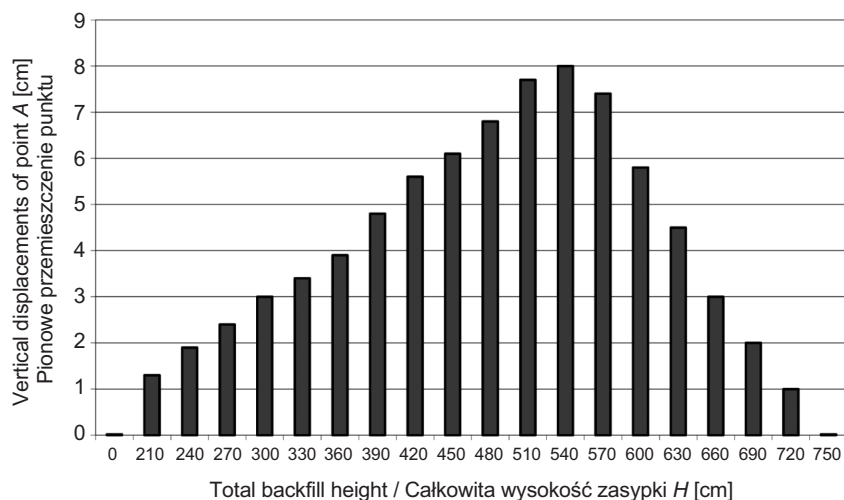


Fig. 4. Vertical displacements in crown (point A) of arch
Rys. 4. Pionowe przemieszczenie w kluczu (punkt A) łuku

Charakter zmian przemieszczeń jest zgodny z danymi literaturowymi [9-12, 14-16]. Początkowo przemieszczenia rosną, osiągając swą maksymalną wartość wynoszącą 8,0 cm w momencie osiągnięcia przez zasypkę poziomu

The construction backfilling was made of medium sand verged on silty sand (according to the Polish Standard PN-86/B-02480). For the samples from the laid layers the following backfilling parameters were determined: optimum moisture content $w_{opt} = 11.68\%$, maximum dry density of solid particles $\rho_{ds} = 1.854 \text{ g/cm}^3$, coefficient of grain non-uniformity U not lower then 6.63, coefficient of grain curvature $C = 1.81$, coefficient of permeability $k = 2.2 \text{ m/day}$. The degree of compaction according to standard Proctor test for all the layers was higher than the required $I_{S \min} = 0.96$. The backfill was laid in 30 cm thick layers.

3. MEASUREMENTS

3.1. DEFORMATIONS

The aim of the tests was to assess the effect of backfilling on the state of strain and stress in the steel shell and to determine the influence of time on the measured quantities. Longstanding observations have shown that during backfilling the largest displacements in the considered structures of symmetrical shape occur in the shell crown. For this reason the considerations in this paper are limited to the vertical displacements in the midspan (point A in Fig. 3) of the arch. The precision (total station) surveying method was used to measure the displacements. The measurements were performed immediately after laying each soil layer. The results are presented in Fig. 4.

The nature of displacement changes is consistent with the literature findings [9-12, 14-16]. Initially displacements increase, reaching their maximum value of 8.0 cm when the backfill reaches the level of 5.4 m (approximately

5,4 m, równego w przybliżeniu wysokości klucza przepustu. Dalsze zwiększanie poziomu zasypki powoduje zmniejszanie się przemieszczenia punktu *A*, aż do osiągnięcia zerowego przemieszczenia dla ustalonego, maksymalnego naziomu, równego około 2 m, co odpowiada całkowitej wysokości zasypki 7,5 m. W przypadku deformacji mierzonych podczas procesu zasypywania, zmiany wymiarów powłoki nie powinny przekraczać 2% jej rozpiętości [1]. W badanym przypadku maksymalna wartość względnego przemieszczenia wyniosła mniej niż 0,46%.

3.2. ODKSZTAŁCENIA I NAPRĘŻENIA

Na swobodnych powierzchniach powłoki panuje płaski stan naprężeń. W związku z powyższym, w celu wyznaczenia naprężeń obwodowych i wzdłużnych należy mierzyć odkształcenia w tych dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Odkształcenia mierzono przy użyciu dwukierunkowych rozet tensometrycznych rozmieszczonych w środkowej części badanej powłoki zgodnie z Rys. 5. Czujniki umieszczono na wewnętrznej powierzchni konstrukcji parami, jeden na górze, a drugi na dole fali, jak pokazano na Rys. 6. Zmierzone odkształcenia posłużyły do obliczenia naprężeń obwodowych i wzdłużnych w każdym punkcie pomiarowym. W obliczeniach założono następujące własności stali: moduł Young'a $E = 2,06 \times 10^5$ MPa; liczba Poissona $\nu = 0,3$ oraz minimalna granica plastyczności $R_E = 315$ MPa.

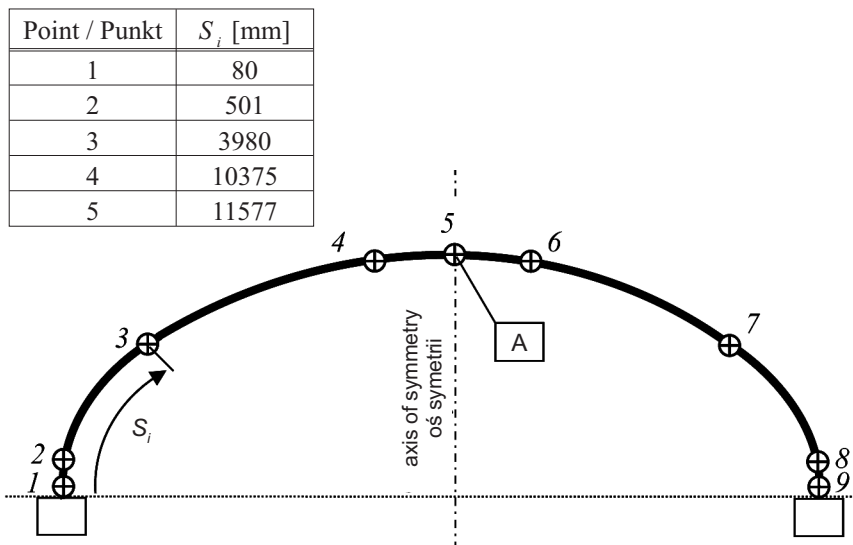


Fig. 5. Arrangement of measuring points (S_i measured from the inside of the shell)
Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych (S_i mierzone od wewnętrznej strony powłoki)

equal to the culvert crown height). As the backfill level increases further, the displacement of point *A* decreases until a zero displacement is reached at the maximum soil surcharge of about 2 m (corresponding to the total backfill height of 7.5 m). In case of deformations measured during backfilling process, the changes in shell dimensions should not exceed 2% of its span. In the considered case, the maximum relative displacement amounted to less than 0.46%.

3.2. STRAINS AND STRESSES

On the free surface of the shell there is a two-dimensional state of stress. Therefore, in order to determine longitudinal and circumferential stresses one needs to record strains along the two mutually perpendicular directions. The strains were measured using bi-directional strain gauge rosettes. The location of the measuring points is shown in Fig. 5. The sensors were placed inside the structure in pairs: one at the bottom and the other at the top of the corrugation, as shown in Fig. 6. The measured strains were used to calculate the circumferential and longitudinal stresses in each of the measuring points. The following steel specifications were assumed for the calculations: Young modulus $E = 2.06 \times 10^5$ MPa, Poisson ratio $\nu = 0.3$ and minimum yield strength $R_E = 315$ MPa.

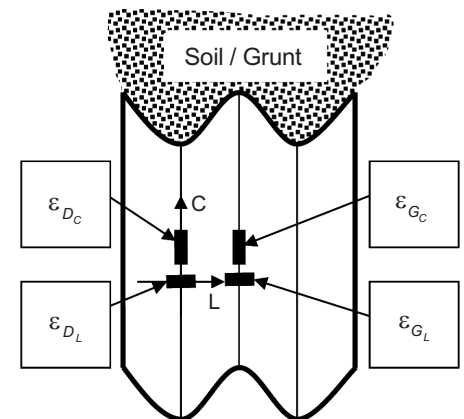


Fig. 6. Arrangement of strain gauges on the inner surface of structure
Rys. 6. Rozmieszczenie tensometrów na wewnętrznej powierzchni konstrukcji

Na podstawie obliczonych wartości naprężeń określono wartości momentów gnących m i sił osiowych (normalnych) n w przekrojach wzdłużnych powłoki (prostopadłych do kierunku obwodowego). Siły wewnętrzne wyznaczano z następujących zależności:

$$m = (\sigma_{D_c} - \sigma_{G_c}) \frac{I_f}{h}, \quad (1)$$

$$n = [(h - t) \sigma_{D_c} + (h + t) \sigma_{G_c}] \frac{A_f}{2h}, \quad (2)$$

gdzie:

σ_D i σ_G – naprężenia obwodowe w wierzchołu i w dolinie fali,

A_f i I_f – pole powierzchni i moment bezwładności przekroju poprzecznego (fali) na jednostkę długości,

h – wysokość fali,

t – grubość blachy.

Dla zastosowanej blachy falistej odpowiednie wartości wynosiły: $h = 140$ mm, $t = 7,0$ mm, $A_f = 8,867$ mm²/mm, $I_f = 21897,45$ mm⁴/mm. Fakt umieszczenia wszystkich tensometrów na wewnętrznej powierzchni powłoki został uwzględniony w równaniach (1) i (2). Szczegóły dotyczące rozmieszczenia czujników odkształcenia, pomiarów deformacji i wyznaczania naprężeń można znaleźć w pracy [17].

Pomiarów odkształceń oraz obliczeń naprężeń dokonywano po ułożeniu każdej warstwy gruntu. Szczegółowa analiza uzyskanych wyników wykazała, że charakter zmian wartości poszczególnych naprężeń w procesie układania zasyпки zależy nie tylko od wysokości poziomu zasyпки, ale również od położenia punktu pomiarowego. Niejednoznaczne i trudne do zinterpretowania zmiany naprężeń w pobliżu miejsc podparcia stalowej powłoki (punkty 1 i 9 na Rys. 5) spowodowały, że nie zostały one uwzględnione w dalszych rozważaniach. Przyczyną zaobserwowanych niejednoznaczności w mierzonych odkształceniach mogą być błędy pomiarowe wynikające z dużego, okresowego zawilgocenia czujników i przewodów umieszczonych tuż przy podporach (stwierdzone miejscowe zastoiska wody). Inną przyczyną może być także złożony stan naprężenia w miejscu oparcia na fundamentach, jednakże taka ocena wymagałaby np. wykonania dodatkowych pomiarów przemieszczeń w miejscu podparcia. Dla większej przejrzystości wyniki badań przedstawiono dla wybranych wysokości poziomu gruntu H równych 1,8 m; 2,7 m; 3,6 m; 5,7 m i 7,5 m, co odpowiada 1/3, 1/2, 2/3, ~1 (poziom klucza) i 1,37 (poziom końcowy) wysokości powłoki.

Bending moments m and axial forces n in the longitudinal cross sections of the shell (perpendicular to the circumferential direction) were determined on the basis of the calculated stresses according to the equations:

where:

σ_D and σ_G – circumferential stresses in the corrugation's ridge and in its trough respectively

A_f and I_f – the area and moment of inertia of the cross section (fold) per unit length,

h – corrugation height,

t – plate thickness.

The following corrugation specifications were assumed: $h = 140$ mm, $t = 7.0$ mm, $A_f = 8.867$ mm²/mm, $I_f = 21897.45$ mm⁴/mm. The fact that all the strain gauges were stuck on the inner side of the culvert was taken into account in relations (1) and (2). Details on the arrangement of strain gauges, the measurement of strains and the determination of stresses can be found in [17].

Strains were measured and stresses were calculated after laying each soil layer. A detailed analysis of the results has showed that the character of the changes in the particular stresses in the course of backfilling depends not only on the backfill level height, but also on the location of the measuring point. The ambiguous and difficult to interpret changes in stresses near the points of support of the steel shell (points 1 and 9 in Fig. 5) were not taken into account in further considerations. The cause of the observed ambiguities in the measured strains can constitute measurement errors related to high temporal damp of the sensors and wires located next to supports (observed marginal lakes). Other cause can be a complex state of stress in the point of support on foundations, but such evaluation would require, for example, additional measurements of displacements in the place of support. For better clarity the test results are presented for selected soil level heights H equal to 1.8 m, 2.7 m, 3.6 m, 5.7 m and 7.5 m, corresponding to 1/3, 1/2, 2/3, ~1 (the crown backfill level) and to 1.37 (the final backfill level) of the shell height.

Łatwo zauważyć, że ekstremalne wartości naprężeń występują w włóknach zewnętrznych. W celu określenia wyężenia materiału w złożonym stanie naprężenia należy wyznaczyć naprężenia zredukowane σ_{eq} . W takim przypadku kryterium zniszczenia przyjmuje postać: $\max(\sigma_{eq}) < R_E$. Rozkład naprężeń zredukowanych (hipoteza Misesa) dla wybranych poziomów zasypki i ich odniesienie do granicy plastyczności R_E pokazano na Rys. 7, natomiast na Rys. 8 przedstawiono, dla tych samych poziomów zasypki, rozkład sił wewnętrznych w badanej powłoce.

As one can see, the extreme stress values occur at the outermost fibres. In order to determine the stress-strain state in a complex state of stress, the equivalent stress σ_{eq} should be defined. In this case, the failure criterion assumes the form: $\max(\sigma_{eq}) < R_E$. The distribution of Von Mises equivalent stresses (in relation to yield stress R_E) for the selected backfill levels is shown in Fig. 7, while the distribution of internal forces in the shell for the same backfill levels is shown in Fig. 8.

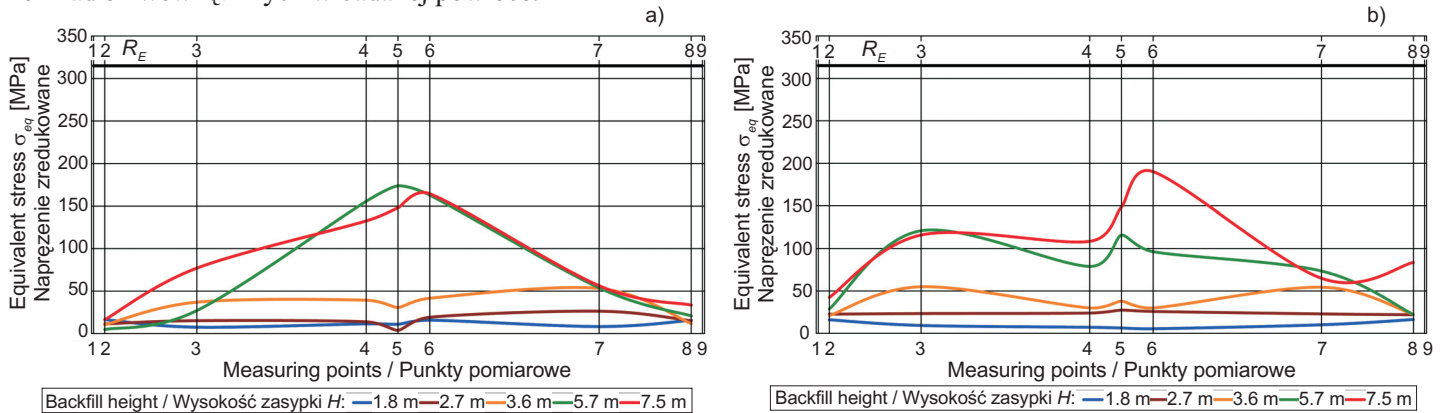


Fig. 7. Equivalent stress σ_{eq} for different backfill levels: a) in corrugation ridge (point D according to Fig. 6), b) in corrugation trough (point G according to Fig. 6)

Rys. 7. Naprężenia zredukowane σ_{eq} dla różnych poziomów zasypki: a) w wierzchołku fali (punkt D zgodnie z Rys. 6), b) w dolinie fali (punkt G zgodnie z Rys. 6)

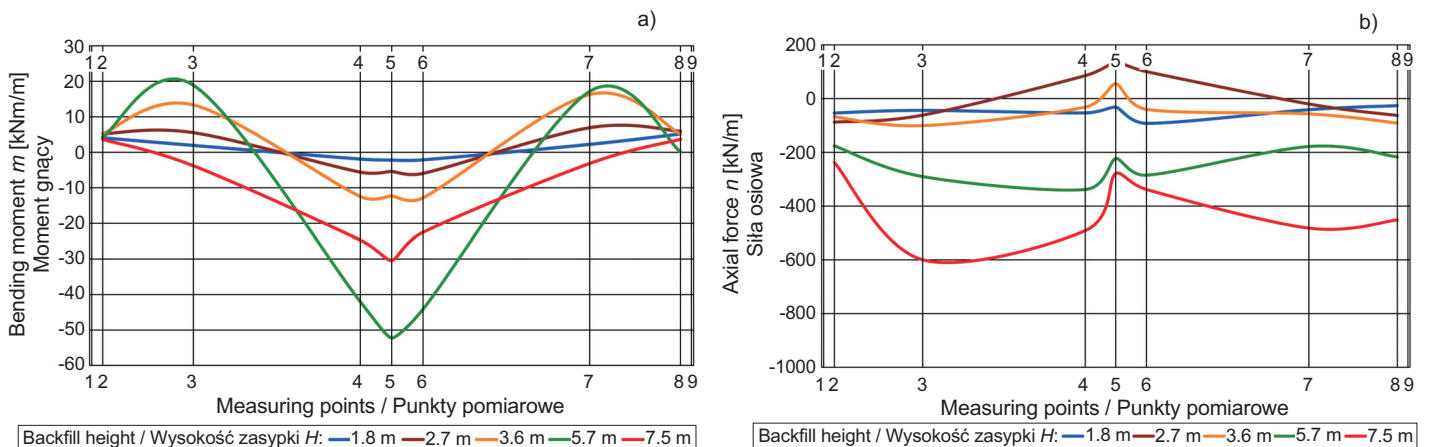


Fig. 8. Internal forces for different backfill levels: a) bending moments, b) axial forces (thrusts)

Rys. 8. Siły wewnętrzne dla różnych poziomów zasypki: a) momenty giące, b) siły osiowe

Charakter zmian momentów giących jest analogiczny z charakterem zmian przemieszczeń przepustu. W początkowej fazie budowy momenty rosną, osiągając maksymalne wartości w chwili osiągnięcia przez grunt wysokości kłucza powłoki. Ekstremalna zarejestrowana wartość momentu

The character of the changes in bending moments is similar to that of the changes in the displacements of the culvert. In the initial stage of construction the moments increase, reaching maximum values when the soil reaches the shell crown height. Extreme bending moment value

gnącego $m = -52,322$ kNm/m występuje w koronie przepustu (punkt 5 na Rys. 5) dla wysokości zasypki $H = 5,70$ m. Dalszy proces układania zasypki gruntowej powoduje stopniowe zmniejszanie się momentu gnącego. Dla końcowego poziomu zasypki jego wartość w punkcie 5 wynosi $m = -30,429$ kNm/m. Charakter zmian sił osiowych jest bardziej złożony. Do wysokości zasypki około $H = 5,00$ m siły te zmieniają się w sposób nieregularny, zmniejszając bądź zwiększając swoje wartości w różnych punktach pomiarowych. Od tego momentu wszystkie siły osiowe są siłami ściskającymi, a dalszy proces zabudowy powoduje niemal we wszystkich punktach pomiarowych wzrost wartości tych sił do wysokości zasypki $H = 6,30$ m. Ekstremalna wartość siły (w punkcie 4 na Rys. 5) dla tej wysokości gruntu wynosi $n = -723$ kN/m. Od tego poziomu aż do osiągnięcia końcowego poziomu zasypki siły osiowe maleją, osiągając w punkcie 4 wartość $n = -491$ kN/m.

Siły wewnętrzne, chociaż dobrze opisują zmiany obciążenia w powłoce podczas procesu układania zasypki, nie pozwalają jednak na bezpośrednią ocenę bezpieczeństwa konstrukcji. Jednym z elementów takiej oceny mogą być natomiast wyznaczone naprężenia zredukowane. Naprężenia te wzrastają wraz z postępem zabudowy, a ich maksymalną wartość $\sigma_{eq\ max} = 197$ MPa odnotowano dla poziomu zasypki $H = 6,30$ m, w pobliżu klucza powłoki, w dolinie fali. Porównanie wartości naprężenia zredukowanego z wartością granicy plastyczności zastosowanej stali może być uznane jako ocena wyężenia materiału powłoki, które w najbardziej obciążonym punkcie wynosi $W = \sigma_{eq\ max} / R_E = 0,625$.

4. WPŁYW CZASU NA WYZNACZANE WIELKOŚCI

4.1. WPŁYW PRZERW W PROCESIE UKŁADANIA ZASYPKI NA NAPRĘŻENIA I SIŁY WEWNĘTRZNE W POWŁOCE

Harmonogram prac budowy przepustu wymagał przerw w procesie zabudowy gruntem, wynoszących od 16 do 92 godzin. Pozwoliło to na dokonanie pomiarów odkształceń w powłoce dla kilku warstw zasypki tuż po ich ułożeniu oraz przed wznowieniem procesu zasypywania. Wyznaczone na tej podstawie zmiany sił wewnętrznych w czasie przerw przedstawiono na Rys. 9, natomiast zmiany naprężeń zredukowanych na Rys. 10.

Analizując przedstawione wyniki można zauważyć, że wpływ czasu (w zakresie krótszym niż 4 doby) na wartość momentu gnącego dla wszystkich poziomów zasypki jest niewielki. Inaczej jest w przypadku sił osiowych, gdzie

$m = -52,322$ kNm/m occurs in the culvert crown (point 5 in Fig. 5) at backfill height $H = 5.70$ m. Further backfilling results in a gradual decrease in the bending moment. At the final backfill level its value in point 5 amounts to $m = -30.429$ kNm/m. The character of the changes in the axial forces is more complex. Up to backfill height $H = 5.00$ m the forces change erratically: their values increase or decrease in the different measuring points. Above this height all the normal forces become compressive, and the further backfilling causes an increase in values of the forces in nearly all the measuring points up to backfill height $H = 6.30$ m. The extreme force value (in point 4 in Fig. 5) at this soil height amounts to $n = -723$ kN/m. From this level up to the final backfill level the axial forces decrease, reaching $n = -491$ kN/m in point 4.

Although the internal forces describe well the changes in the load in the shell during backfilling, one cannot directly assess the operational safety of the structure on their basis. However, defined equivalent stresses can constitute one of the elements of such assessment. The latter increase as backfilling progresses and their maximum value $\sigma_{eq\ max} = 197$ MPa was recorded at backfill level $H = 6.30$ m, close to the shell crown in the corrugation trough. The comparison of the equivalent stress values with the one of yield stress of the applied steel can be acknowledged as the assessment of a stress-strain state of the shell, which equals $W = \sigma_{eq\ max} / R_E = 0.625$ in the most loaded point.

4. INFLUENCE OF TIME ON DETERMINED QUANTITIES

4.1. INFLUENCE OF BREAKS DURING BACKFILLING PROCESS ON STRESSES AND INTERNAL FORCES IN THE SHELL

The culvert construction schedule required breaks of 16-92 hours in backfilling. Therefore, it was possible to measure strains in the shell for several backfill layers immediately after their laying and before the resumption of backfilling. The changes in the internal forces and the changes in equivalent stresses, determined during the breaks, are shown in Fig. 9 and Fig. 10 respectively.

An analysis of the results shows that the influence of time (shorter than 96 hours) on the bending moment value for all the backfill levels is slight. This is different in the case of axial forces, which significantly increased towards negative (compressive) values in all the measuring points. The influence of time on equivalent stresses,

zaobserwowano prawie we wszystkich punktach pomiarowych znaczący ich wzrost w kierunku wartości ujemnych (ściskających). Wpływ czasu na naprężenia zredukowane, będące skutkiem zarówno obciążeń w kierunku obwodowym jak i wzdłużnym, ma bardziej złożony charakter. W wierzchołku fali odnotowano, dla wszystkich wysokości zasypki, zwiększenie się wartości naprężeń w środkowej części przekroju powłoki (okolice korony powłoki) i zmniejszenie w częściach skrajnych. Wyjątkiem jest końcowy poziom zasypki, dla którego odnotowano wzrost naprężenia we wszystkich punktach pomiarowych. Odwrotną sytuację obserwuje się w dolinie fali. Wzrost wartości naprężeń zredukowanych występuje w częściach skrajnych (bocznych), a spadek w środkowej części powłoki.

caused by loads acting in both the circumferential and longitudinal directions, is more complex. For all the backfill heights the stress values in the corrugation ridge in the central part of the shell cross section (in the vicinity of the shell crown) increased, whereas they decreased in the extreme parts. The exception is the final backfill level for which stress increased in all the measuring points. The opposite is observed in the corrugation trough: equivalent stresses increase in the extreme (side) parts and decrease in the central part of the shell.

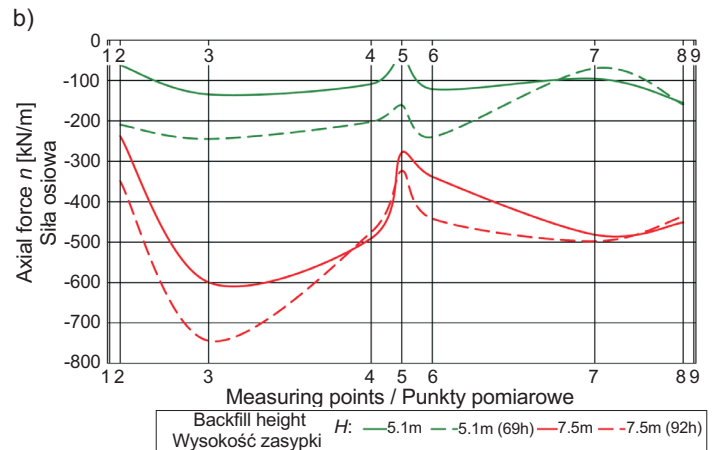
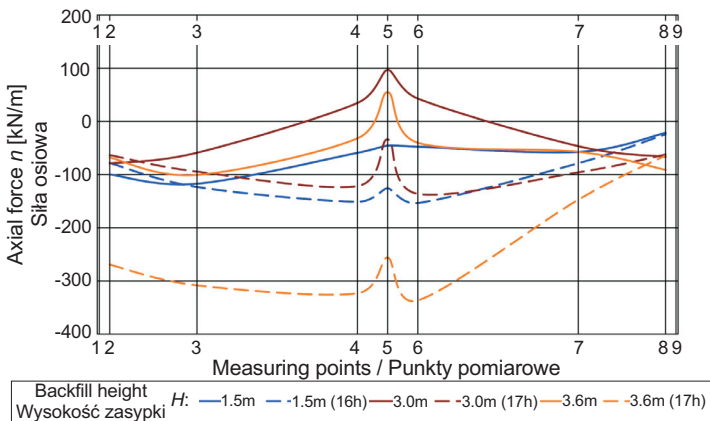
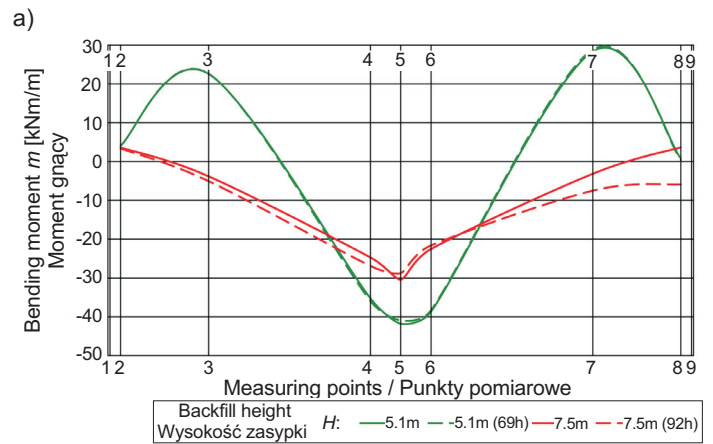
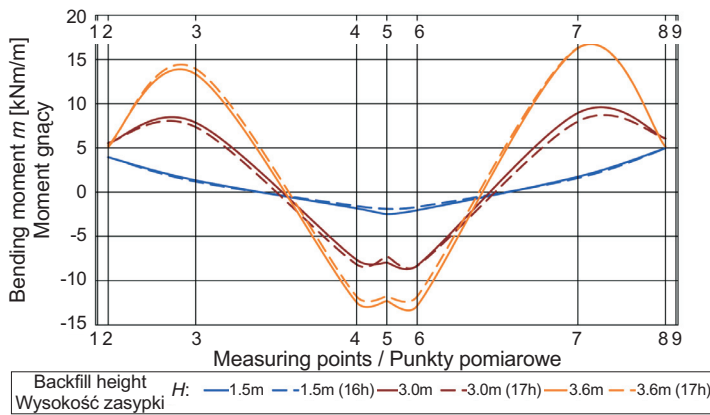


Fig. 9. Effects of delays during the backfilling process on internal forces for different backfill levels: a) bending moments m , b) axial forces n

Rys. 9. Wpływ przerw w procesie układania zasypki gruntowej na siły wewnętrzne dla różnych poziomów zasypki: a) momenty gnące m , b) siły osiowe n

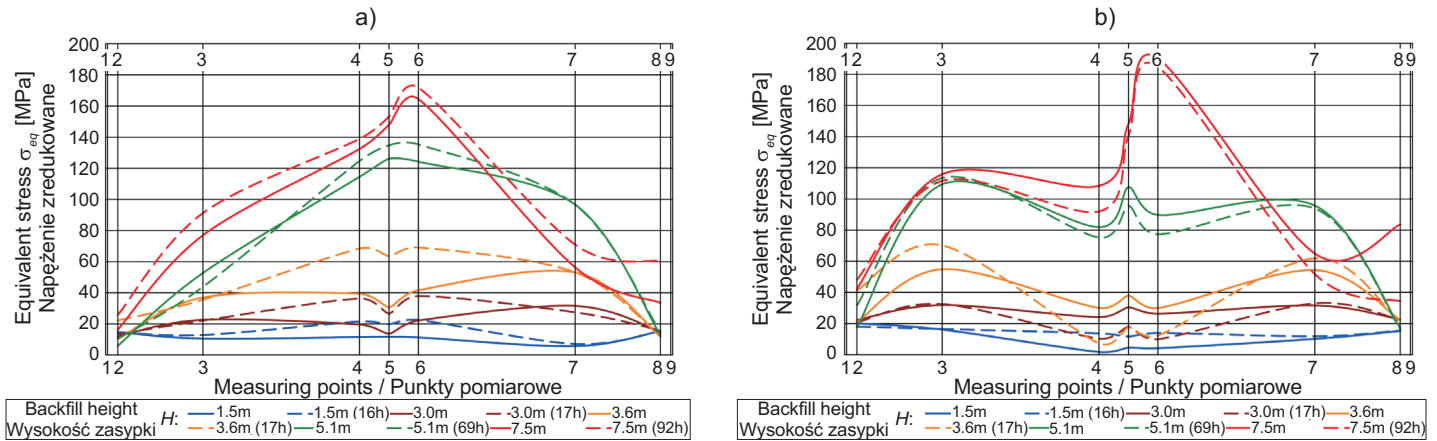


Fig. 10. Effects of delays during the backfilling process on the equivalent stress σ_{eq} for different backfill levels: a) in corrugation ridge, b) in corrugation trough

Rys. 10. Wpływ przerw w procesie układania zasyпки gruntu na naprężenia zredukowane σ_{eq} dla różnych poziomów zasyпки: a) w wierzchołku fali, b) w dolinie fali

4.2. ZMIANY PRZEMIESZCZEŃ, NAPREŻEŃ I SIŁ WEWNĘTRZNYCH PO ZAKOŃCZENIU PROCESU UKŁADANIA ZASYPKI

Dodatkowe pomiary przemieszczeń i odkształceń stalowej powłoki przeprowadzono po zakończeniu budowy przepustu. Odczytów dokonano po 0, 92, 594, 1051, 1939, 2875 i 9744 godzinach (odpowiednio po $\sim 0, 4, 25, 81, 120$ i 406 dniach), liczonych od momentu ułożenia ostatniej warstwy zasyпки. Pomiary przemieszczeń wykonane w kilku punktach przekroju środkowego powłoki nie wykazały zauważalnych zmian jej kształtu i wymiarów wraz z upływem czasu. Zmiany takie odnotowano natomiast w odniesieniu do wartości sił wewnętrznych i naprężeń zredukowanych, co przedstawiono na Rys. 11 i 12. Nie uwzględniono odczytów dla czasu równego 9744 godziny (406 dni) ze względu na uszkodzenie większości tensometrów.

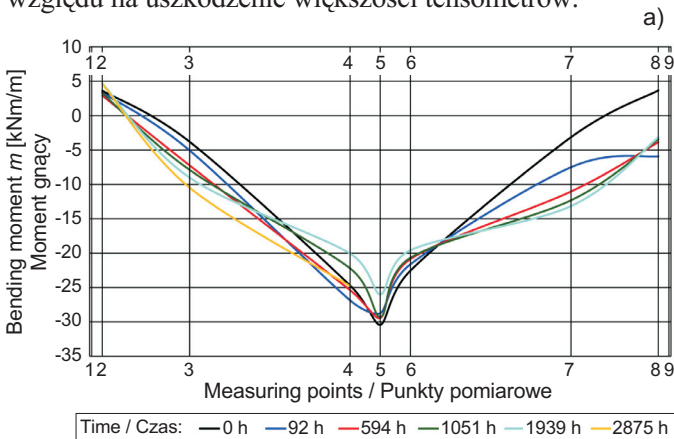
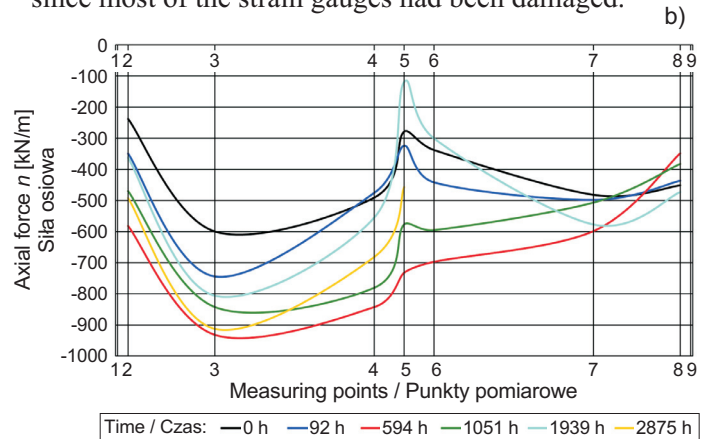


Fig. 11. Influence of time on internal forces: a) bending moments, b) normal forces

Rys. 11. Wpływ czasu na siły wewnętrzne: a) momenty giące, b) siły normalne

4.2. CHANGES IN DISPLACEMENTS, STRESSES AND INTERNAL FORCES AFTER BACKFILLING PROCESS

Additional measurements of the displacements and deformations of the steel shell were carried out after the construction of the culvert ended. Readings were taken after 0, 92, 594, 1051, 1939, 2875 and 9744 hours (that is after $\sim 0, 4, 25, 81, 120$ and 406 days respectively), counted from the moment when the final layer had been laid. Displacement measurements performed in several points of the shell central cross section did not show any noticeable changes in its shape and dimensions over time. But the values of the internal forces and the equivalent stresses changed as shown in Figs 11 and 12. No readings for the time of 9744 hours (406 days) were taken into account since most of the strain gauges had been damaged.



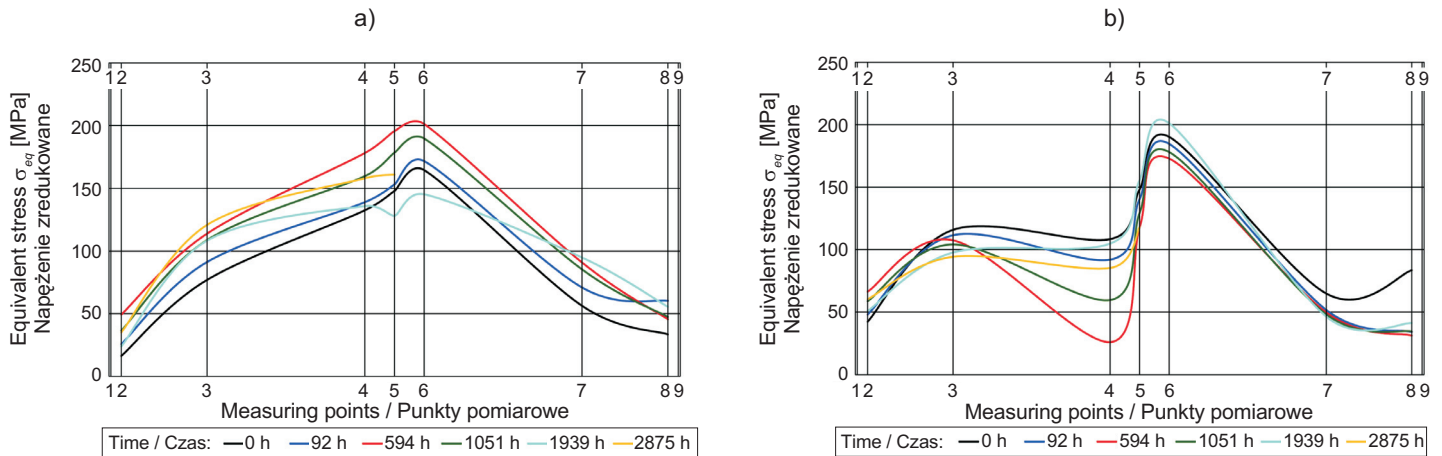


Fig. 12. Influence of time on the equivalent stress σ_{eq} : a) in corrugation ridge, b) in corrugation trough
 Rys. 12. Wpływ czasu na naprężenia zredukowane σ_{eq} : a) w wierzchołku fali, b) w dolinie fali

Jak widać, wraz z upływem czasu wszystkie rozpatrywane wielkości zmieniają się w sposób nieregularny. Występują okresowe spadki i wzrosty wartości sił wewnętrznych i naprężeń. W celu lepszego zobrazowania tego zjawiska na Rys. 13 przedstawiono zmiany naprężeń zredukowanych w funkcji czasu w poszczególnych punktach pomiarowych.

As one can see, all the considered quantities change irregularly over time. The internal forces and the stresses increase and decrease periodically. In order to illustrate this phenomenon better Fig. 13 shows the changes in equivalent stress over time in the particular measuring points.

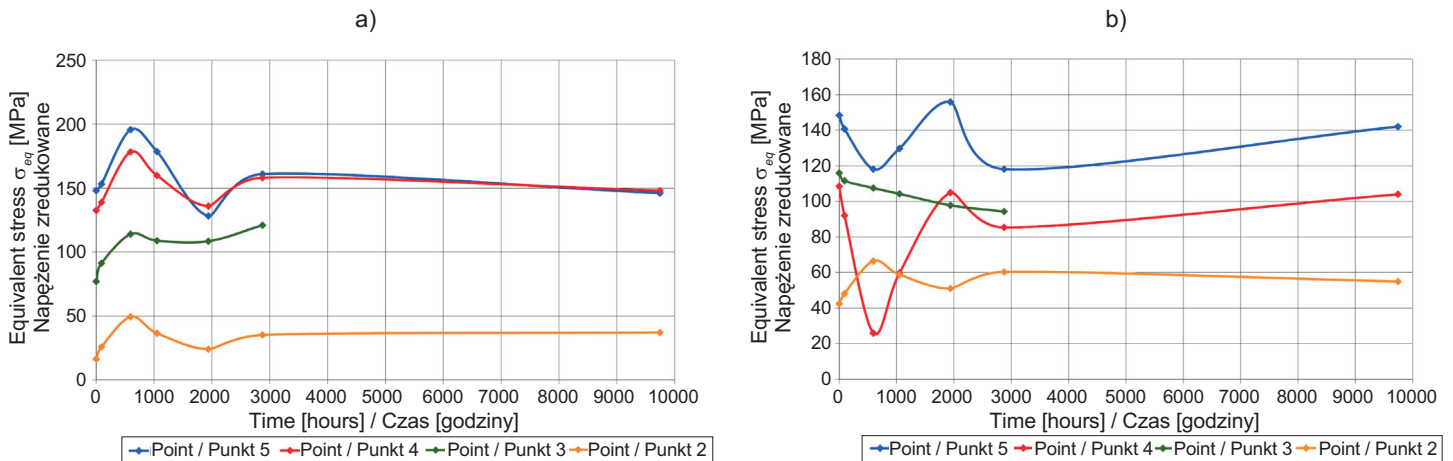


Fig. 13. Influence of time on the equivalent stress σ_{eq} in individual measuring points: a) in corrugation ridge, b) in corrugation trough
 Rys. 13. Wpływ czasu na naprężenia zredukowane σ_{eq} w poszczególnych punktach pomiarowych: a) w wierzchołku fali, b) w dolinie fali

Wykresy przedstawione na Rys. 13 wskazują wyraźnie na zróżnicowany charakter zmian naprężeń zredukowanych w różnych punktach badanej powłoki. Analizując np. naprężenia w koronie przepustu (punkt 5) można stwierdzić, że naprężenia w wierzchołku fali zwiększają się od wartości początkowej 148 MPa do wartości maksymalnej 196 MPa (dla czasu 594 godziny), co stanowi wzrost o około 32%, a następnie zmniejszają się do wartości minimalnej 128 MPa (dla czasu 1939 godzin), co stanowi spadek o około 14%

The graphs shown in Fig. 13 clearly indicate the varied character of the changes in equivalent stress in different points of the tested shell. For example, when the stresses in the culvert crown (point 5) are examined, one can see that the stresses in the corrugation ridge increase from the initial value of 148 MPa to the maximum value of 196 MPa (over 594 hours), which amounts to an increase of about 32%, and then decrease to the minimum value of 128 MPa (over 1939 hours), which amounts to a decrease of about

w stosunku do wartości początkowej. W przypadku naprężeń w dolinie fali występuje sytuacja odwrotna. Naprężenia od wartości początkowej 148 MPa maleją do wartości minimalnej 118 MPa (dla czasu 594 godziny), co stanowi spadek o 20%, a następnie zwiększają się do wartości maksymalnej 156 MPa, co stanowi wzrost o ponad 5% w odniesieniu do wartości początkowej. Największą odnotowaną zmianę zaobserwowano w punkcie 4, gdzie naprężenie zredukowane w dolinie fali po 594 godzinach zmniejszyło się o 76%.

5. WYNIKI I DYSKUSJA

W badanym obiekcie, w trakcie postępującego procesu układania zasypki, następuje początkowo wypiętrzenie stalowej powłoki, które osiąga maksimum dla poziomu zasypki bliskiego korony powłoki, a następnie ulega ono zmniejszeniu, osiągając w badanym przypadku wartość wyjściową (pionowe przemieszczenie klucza równe zero). Stosunek maksymalnego przemieszczenia do rozpiętości konstrukcji wynosi 0,46% i jest mniejszy od dopuszczalnego, równego 2%. Momenty gnące zmieniają się analogicznie do zmian przemieszczeń pionowych, a ich rozkład jest symetryczny względem pionowej osi symetrii. Wartości momentów początkowo rosną, osiągając swoje ekstremalne wartości dla poziomu zasypki równej kluczowi powłoki, a następnie maleją. Siły osiowe w początkowej fazie budowy zwiększają się, przyjmując w niektórych punktach powłoki wartości dodatnie (rozciąganie) – Rys. 8b, a następnie ulegają zmniejszeniu, osiągając maksymalne wartości ujemne (ściskanie) dla wysokości zasypki leżącej pomiędzy koroną powłoki a poziomem zasypki $H = 6,30$ m. Dalszy proces zasypywania powoduje zmniejszanie się sił ścisających oraz asymetrię ich rozkładu względem pionowej osi symetrii.

Rodzaj i miejsce naklejenia czujników tensometrycznych umożliwiły wyznaczenie naprężeń zredukowanych, które lepiej opisują obciążenia powłoki w stosunku, gdy do takiej oceny brane są tylko pod uwagę naprężenia normalne w kierunku obwodowym. Naprężenia te, zarówno w wierzchołku, jak i w dolinie fali, zwiększają się prawie monotonicznie wraz z postępem procesu zabudowy, osiągając ekstremalne wartości w otoczeniu korony powłoki dla wysokości zasypki powyżej poziomu klucza. Maksymalna zarejestrowana wartość naprężenia zredukowanego (dla wysokości $H = 6,30$ m) stanowiła 62,5% wartości granicy plastyczności zastosowanej stali.

Wiele publikacji poświęcono problemom zachowania się przepustów podczas ich budowy [1-2, 8-16, 18]. W pracy

14% relative to the initial value. The opposite is true for the corrugation trough: from the initial value of 148 MPa the stresses decrease to the minimum value of 118 MPa (over 594 hours), which amounts to a decrease of 20%, and then increase to the maximum value of 156 MPa, which amounts to an increase of over 5% relative to the initial value. The biggest change was recorded in point 4, where the equivalent stress in the corrugation trough after 594 hours decreased by 76%.

5. RESULTS AND DISCUSSION

In case of the tested object, during the ongoing process of backfilling, the steel shell initially is trusted up. The upthrust reaches its maximum at the backfill level close to the shell crown and then decreases, reaching its initial value (the vertical crown displacement equal to zero) in the considered case. The ratio of the maximum displacement to the structure span amounts to 0.46% and it is lower than the permissible ratio of 2%. Bending moments change similarly as vertical displacements, and their distribution is symmetric to the vertical symmetry axis. They initially increase, reaching their maximum values for the backfill level equal to that of the shell crown, and then they decrease. In the initial stage of construction axial forces increase, assuming positive values in some points of the shell (tensile forces) – Fig. 8b, and then decrease, reaching maximum negative values (compression) for a backfill level between the crown of shell and the backfill level $H = 6.30$ m. Further backfilling results in a reduction in the compressive forces and in the asymmetry of their distribution relative to the vertical axis of symmetry.

Thanks to the type and location of the strain gauges the equivalent stresses which better describe shell load in comparison with such an assessment based only on the normal stresses in the circumferential direction could be determined. The stresses, both in the corrugation ridge and trough, increase almost monotonically as backfilling progresses, reaching their extreme values in the neighbourhood of the shell crown for a backfill height above the crown level. The maximum recorded value of equivalent stress (at height $H = 6.30$ m) amounted to 62.5% of the yield stress of the applied steel.

Many papers have been dedicated to the behaviour of culverts during their construction [1-2, 8-16, 18]. In [18] the moment when strain and displacement measurements were performed is precisely defined, but in none of the papers the influence of breaks during backfilling on the loading of the tested shells has been taken into account.

[18] określono dokładnie moment dokonywania pomiarów odkształceń i przemieszczeń po ułożeniu kolejnych warstw gruntu, jednak w żadnej z publikacji nie uwzględniono wpływu przerw w trakcie zasypywania na obciążenie badanych powłok. Przerwy takie są naturalne, szczególnie w przypadku dużych obiektów, kiedy proces budowy może trwać od kilku do kilkudziesięciu dni. Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule (Rys. 9, 10) wskazują na niewielki wpływ przerw w czasie zasypywania na wartości momentów gnących – w większości punktów pomiarowych względne zmiany są rzędu kilku do kilkunastu procent. W przypadku sił osiowych, szczególnie w początkowym okresie budowy, zmiany ich wartości w niektórych punktach powłoki mogą się różnić nawet kilkukrotnie, łącznie ze zmianą znaku siły. W końcowym okresie budowy względne (procentowe) zmiany są coraz mniejsze. Zaobserwowane, przede wszystkim w początkowym okresie budowy, większe różnice wartości naprężeń i sił osiowych, wywołane przerwami w procesie układania zasypki, mogą być spowodowane zmianami temperatury otoczenia i tym samym powłoki oraz różnicami temperatury pomiędzy jej odsłoniętą a nieodsłoniętą częścią. Różnice te maleją w miarę zwiększania grubości zasypki. Zmiana temperatury rzędu 10 K, przy całkowitym braku swobodnego wydłużenia stali, wywołuje naprężenie około 25 MPa. W celu ograniczenia wpływu temperatury na mierzone wielkości i błędów pomiaru wywołanego jej zmianami zastosowano tensometry kompensacyjne, unikano pomiarów przy bezpośredniej ekspozycji słońca na badaną powłokę oraz dokonywano ich tylko za dnia (pomiędzy godziną 8 a 17). Wpływ przerw na wartości naprężeń zredukowanych jest zróżnicowany i zależy zarówno od położenia punktu pomiarowego na badanej powłoce, jak i od usytuowania czujników w danym punkcie (wierzchołek bądź dolina fali). Największe naprężenia występują w otoczeniu korony powłoki i w czasie przerw, w wierzchołku fali zwiększają się o około 4%, a w dolinie fali zmniejszają się o około 3%. Pytanie, czy podczas pomiarów odkształceń należy uwzględniać przerwy w procesie zasypywania przepustów jest więc dyskusyjne, tym bardziej gdy uwzględni się fakt, że wpływ czasu na mierzone odkształcenia po zakończeniu budowy może być znacząco większy [19].

W pracach [20-24] przedstawiono wyniki wieloletnich badań in situ zmian naporu gruntu, przemieszczeń, sił wewnętrznych i naprężeń w stalowych przepustach. Wyniki tych badań wskazują, że wyznaczone wielkości obserwowane w dłuższym okresie z reguły oscylują w górę i w dół wokół pewnej linii trendu, która może być pozioma lub wzrastać, bądź opadać monotonicznie z upływem czasu.

Such breaks are natural, especially in case of large structures since their construction can take from a few to several tens of days. The test results presented in this paper (Fig. 9, 10) indicate only a slight influence of breaks in backfilling on bending moment values: in most of the measuring points the relative changes vary from a few to 10-20%. Whereas in case of axial forces, especially in the initial period of construction, their values can differ several-fold at certain points of the shell and also their signs can reverse. In the final stage of construction the relative (percentage) changes are ever smaller. The bigger differences of the values of stresses and axial forces, observed especially in the initial period of construction and caused by breaks in backfilling process, can be a result of changes in the ambient temperature, and the differences of temperature between exposed and covered parts of the shell. These differences decrease while the backfill thickness increases. The temperature change of 10 K, when there is no free elongation of steel, creates the stress of about 25 MPa. In order to limit the temperature influence on the measured quantities, as well as the measurement errors caused by its changes, the dummy gauges were used. For the same reason the measurements at a direct exposure to the sun on the tested shell were avoided and they were conducted during a day (between 8 a.m. and 5 p.m.). The influence of breaks on equivalent stress values varies, depending on both the location of the measuring point on the tested shell and the situation (in the ridge or in the trough) of the strain gauges in the given point. The largest strains occur in the neighbourhood of the shell crown and during breaks they increase by about 4% in the corrugation ridge, while decreasing by about 3% in the trough. Therefore the question whether the breaks in backfilling should be taken into account in the measurements of strains needs to be addressed, the more so when one considers the fact that the influence of time on the measured strains after construction can be significantly greater [19].

Papers [20-24] presented the results of longstanding in situ studies of the changes in earth pressure, displacements, internal forces and stresses in steel culverts, which indicate that the quantities observed over a longer period of time usually fluctuate up and down around a certain trend line which can be level or rise or fall monotonically over time. Many factors, such as: redistribution of internal forces in the ground (the rheological aspect), changes in soil parameters mainly determined by environmental factors (seasonal changes in temperature and fluctuations in moisture content [20]), soil consolidation (changes in

Na takie zachowanie wpływ ma wiele czynników takich jak: redystrybucja sił wewnętrznych w gruncie (aspekt reologiczny), zmiany parametrów gruntu, które zależą głównie od czynników środowiskowych (sezonowe zmiany temperatury i wahania wilgotności [20]), konsolidacja gruntu (zmiana stopnia zagęszczenia) jako wynik dynamicznych obciążeń użytkowych [25], erozja gruntu, potencjalna relokacja stalowej konstrukcji w gruncie, korozja stalowej powłoki [26]. Podobny charakter zmian sił wewnętrznych oraz naprężeń zredukowanych, przy całkowitym braku przemieszczeń stalowej powłoki, zaobserwowano w badanej konstrukcji. Wartości omawianych wielkości oscylują w górę i w dół wraz z wpływem czasu, co w przypadku naprężeń zredukowanych widać wyraźnie na Rys. 13. Wyznaczenie linii trendu tych zmian jest jednak, ze względu na zbyt krótki czas obserwacji utrudnione. Zaobserwowane wahania wartości sił wewnętrznych i naprężeń mogą być spowodowane między innymi zróżnicowanymi warunkami atmosferycznymi, w których dokonywano pomiarów, jednak ilościowa ocena wpływu tylko tego czynnika na wyznaczone wielkości była w badanym przypadku niemożliwa. Należy także zauważyć, że wyznaczone naprężenia nie uwzględniają naprężeń od ciężaru własnego stalowej powłoki. O ile przy projektowaniu tego typu obiektów uwzględnienie ciężaru własnego powłoki jest możliwe, to wpływ czasu jest z reguły niewiadomą, co powinno być odzwierciedlone poprzez przyjęcie bardziej zachowawczego współczynnika bezpieczeństwa. Należy także zauważyć, że miejscowe przekroczenie naprężeń krytycznych, skutkujące powstaniem przegubów plastycznych nie musi prowadzić do zmian naprężeń w innych przekrojach konstrukcji, z wyjątkiem lokalnych zakłóceń w czasie powstawania tych przegubów [23], a konstrukcja może być nadal bezpiecznie użytkowana.

6. WNIOSKI

W procesie układania zasyпки maksymalne przemieszczenie w koronie powłoki wyniosło 8 cm, co w odniesieniu do jej rozpiętości daje wartość przemieszczenia względnego 0,46%. Jest to wartość mniejsza od dopuszczalnej, równej 2%, zgodnie z danymi literaturowymi [1, 27]. Pomiar przemieszczeń wybranych punktów powłoki po zakończeniu budowy obiektu (maksymalny czas pomiaru 406 dni) wykazały brak zmian jej wymiarów. Wyznaczone naprężenia zredukowane w powłoce badanej konstrukcji, zarówno podczas procesu układania zasyпки jak i po jego zakończeniu, są mniejsze od granicy plastyczności materiału powłoki. Maksymalne wyężenie, określone jako stosunek naprężenia zredukowanego do granicy plastyczności, było

the degree of compaction) caused by dynamic live loads [25], soil erosion, the potential relocation of the steel structure in the ground and the corrosion of the steel shell [26], have a bearing on this behaviour. A similar character of the changes in internal forces and in equivalent stresses was observed in the tested structure. The values of the quantities fluctuate up and down over time, which in the case of equivalent stresses is clearly visible in Fig. 13. However, it is rather difficult to determine the trend line because of the too short observation time. The observed fluctuations of the values of internal forces and stresses can constitute a result of diversified atmospheric conditions, among others, in which the measurements were taken. Nevertheless, the quantification of this factor's influence on the determined qualities was impossible in the tested case. One should also note that the determined stresses do not take into account the stresses generated by the deadweight of the steel shell. While it is possible to take the shell deadweight into account in the design of such structures, the influence of time is usually unknown. Therefore a more conservative safety factor should be adopted. It ought to be noted as well that a local exceedance of critical stress, resulting in the formation of plastic hinges, does not have to lead to a change in stress in other cross sections of the structure (except for the local disturbances during the formation of the hinges [23]) and the structure can still be safely used.

6. CONCLUSIONS

In backfilling process the maximum displacement in the shell crown was 8 cm, what in reference to its span gives the value of relative displacement equal 0.46%. This value is lower than the permissible 2%, in accordance with the literature findings [1, 27]. The displacements' measurements of the chosen points of the shell after the construction completion (maximum time of measurement 406 days) showed no changes in its dimensions. The determined equivalent stresses in the shell of the tested construction, both during and after the backfilling process, are lower than yield stress of the shell material. The maximum ratio of equivalent stress to yield stress equaled 0.625 during the construction and 0.65 after its completion (in the determined time range of the tests). The breaks during backfilling process exert generally slight influence on the load of the culvert's steel shell. This influence decreases with the backfilling thickness increase, what can be caused by the reduced effect of the changes in temperature of the shell (especially its exposed surfaces), which are in turn provoked by the changes in ambient

równe 0,625 podczas budowy obiektu oraz 0,65 po zakończeniu budowy (w przyjętym zakresie czasowym badań). Przerwy w trakcie procesu układania zasypki mają generalnie niewielki wpływ na obciążenie stalowej powłoki przepustu. Wpływ ten maleje wraz ze wzrostem grubości zasypki, co może być spowodowane zredukowanym oddziaływaniem zmian temperatury powłoki (szczególnie jej odsłoniętych powierzchni) wywołanych zmianami temperatury otoczenia. Po zakończeniu budowy, rozkład i wartości sił wewnętrznych (naprężeń) w powłoce przepustu mogą się zmieniać w sposób istotny wraz z upływem czasu. Zmiany te są wypadkową oddziaływania wielu czynników, jednak określenie ich ilościowego wpływu na zaobserwowane zmiany nie było w badanym przypadku możliwe.

temperature. After the construction completion, the distribution and values of the internal forces (stresses) in the culvert's shell can change significantly in time. These changes constitute the outcome of many factors' influence, although determining their quantity effect on the observed changes was impossible in the tested case.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Janusz L., Madaj A.: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007
- [2] Machelski C.: Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008
- [3] Yeau K.Y., Sezen H., Fox P.J.: Load performance of in situ corrugated steel highway culverts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **23**, 1, 2009, 32-39
- [4] NCHRP Report 473: Recommended specifications for large-span culverts. Transportation Research Board, Washington D.C., 2002
- [5] Moore R.G., Bedell P.R., Moore I.D.: Investigation and assessment of long-span corrugated steel plate culverts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **9**, 2, 1995, 85-102
- [6] Bednarek B., Czerepak A.: Animal crossing built over A2 motorway in Poland. *Archives of Institute of Civil Engineering*, **1**, 2007, 45-51
- [7] Janusz L., Bednarek B., Tomala P.: Doświadczenia w budowie obiektów z blach falistych o bardzo dużej rozpiętości. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, **24**, 3, 2009, 96-98
- [8] Kunecki B., Korusiewicz L.: Field test and three-dimensional analysis of soil-steel arch with ribs, in: *Shell Structures. Theory and Applications*. CRC Press/Balkema, Leiden, 3, 2014, 535-538
- [9] Machelski C.: Deformacja stalowych powłok mostowych obiektów gruntowo-powłokowych podczas zasypki. *Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele*, **29**, 6, 2010, 24-30
- [10] Korusiewicz L., Kunecki B.: Behaviour of the steel box-type culvert during backfilling. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **XI**, 3, 2011, 637-650
- [11] Flener E.B., Karoumi R., Sundquist H.: Field testing of a long-span arch steel culvert during backfilling and in service. *Structure and Infrastructure Engineering*, **1**, 3, 2005, 181-188
- [12] Flener E.B., 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
- [13] 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
- [14] Czerepak A., Zouhar J.: Deformation control during assembly and backfilling of a corrugated steel structure, Ostrava, Czech Republic. *Archives of Institute of Civil Engineering*, **12**, 2012, 85-93
- [15] Machelski C.: Zmiany promienia krzywizny powłoki mostowego obiektu gruntowo-powłokowego podczas budowy. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 4, 2010, 47-67
- [16] Machelski C.: Estimation of internal forces in the shell of soil-steel structures on the basis of its displacement during backfilling. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **31**, 1, 2009, 19-38
- [17] Korusiewicz L., Chruścielski G., Jasiński R.: Practical aspects of strains, stresses and internal forces estimation during field and laboratory tests of corrugated culverts. *Archives of Institute of Civil Engineering*, **12**, 2012, 117-131

-
- [18] *Bęben D., Mańko Z.*: Behaviour of corrugated plate culvert under backfilling loads. *Steel Construction*, **2**, 3, 2009, 188-202
- [19] *Bakht B.*: Evaluation of the design methods for soil-metal structures in Canada. *Archives of Institute of Civil Engineering*, 1, 2007, 7-22
- [20] *Vaslestad J.*: Long-term behaviour of flexible large-span culverts. Publication No.74, Norwegian Pub. Roads Administration, Oslo, 1994, 38-56
- [21] *Vaslestad J., Kunecki B., Johansen T.H.*: Twenty one years of earth pressure measurements on buried flexible steel structure. *Archives of Institute of Civil Engineering*, 1, 2007, 99-108
- [22] *Janusz L., Madaj A., Sturzbecher K.*: Railway grade separation made of corrugated steel plate structure – long term research. *Archives of Institute of Civil Engineering*, 1, 2007, 233-244
- [23] *Madaj A., Sturzbecher K.*: Changes in stress level in a corrugated steel structure under long-term loads. *Archives of Institute of Civil Engineering*, 12, 2012, 175-184
- [24] *Madaj A., Węgrzynowski M., Janusz L.*: Long term observations of a 3-span highway corrugated steel box bridge on Gniezno bypass. *Archives of Institute of Civil Engineering*, 12, 2012, 197-203
- [25] *Machelski C.*: Influence of live loads on the soil-steel bridges. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **26**, 3-4, 2004, 91-119
- [26] *Bęben D.*: Evaluation of backfill corrosivity around steel road culverts, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 3, 2013, 255-268
- [27] *Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A.*: Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych. IBDiM, Żmigród, 2004