CZESŁAW MACHELSKI<sup>1)</sup>LESZEK KORUSIEWICZ<sup>2)</sup>

## TESTING THE LOAD CAPACITY OF A SOIL-STEEL BOX STRUCTURE

## BADANIE NOŚNOŚCI SKRZYNKOWEGO OBIEKTU GRUNTOWO-POWŁOKOWEGO

**STRESZCZENIE.** W pracy analizowana jest deformacja pasma obwodowego powłoki wykonanej z blachy falistej w przepuście o konstrukcji skrzynkowej. Za miarę deformacji stalowej blachy przyjęto ugięcia i odkształcenia jednostkowe w wybranych punktach powłoki. Pomiarów tych wielkości dokonano z wykorzystaniem indukcyjnych czujników przemieszczenia i tensometrów elektrooporowych. Badania realizowano w warunkach laboratoryjnych, stosując specjalnie dobrane układy obciążenia statycznego konstrukcji o postaci rozłożonej. Jako zmienne parametry badań przyjęto: intensywności obciążenia, grubość naziomu oraz pole powierzchni oddziaływania obciążenia na naziom. Analizowano skuteczność współdziałania geosiatki z gruntem w naziomie w zakresie redukcji deformacji powłoki.

**SŁOWA KLUCZOWE:** badania laboratoryjne, deformacja powłoki z blachy falistej, konstrukcje gruntowo-powłokowe, obciążenia statyczne.

**ABSTRACT.** The deformation of the circumferential section of a box culvert shell made of corrugated steel plates is analysed. Deflections and unit strains in selected shell points were adopted as the measure of the deformation of the corrugated steel shell. The quantities were measured using inductive displacement gauges and electric resistance strain gauges. The investigations were carried out in laboratory conditions under specifically selected configurations of a distributed load. Loading intensity, surcharge thickness and the area of load action on the surcharge were adopted as variable test parameters. The effectiveness of the interaction between a geo-grid and the soil in the surcharge in reducing the deformation of the shell was analysed.

**KEYWORDS:** deformation of corrugated steel shells, laboratory testing, soil-steel structures, static loads

DOI: 10.7409/rabdim.018.011

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, plac Grunwaldzki 11, 50-377 Wrocław; [czeslaw.machelski@pwr.edu.pl](mailto:czeslaw.machelski@pwr.edu.pl)

<sup>2)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, ul. Łukasiewicza 5-7, 50-371 Wrocław; [leszek.korusiewicz@pwr.wroc.pl](mailto:leszek.korusiewicz@pwr.wroc.pl) (✉)

## 1. WPROWADZENIE

Do badania wybudowanych obiektów o przeznaczeniu mostowym wykorzystywane jest obciążenie eksploatacyjne w postaci taboru samochodowego [1-4] czy też kolejowego [5-10]. Jest to złożony układ sił skupionych o trudnej do określenia skuteczności oddziaływania na analizowany punkt powłoki [5]. W takim badaniu z natury rzeczy występuje wpływ elementów traktowanych w mostownictwie, jako niekonstrukcyjne np. nawierzchnia z podbudową. Następną niedogodnością jest wstępna deformacja powłoki wynikająca z przemieszczenia gruntu wywołanego wjazdem pojazdu na ustalone położenie obiektu na jezdni [6].

W przypadku badań laboratoryjnych, jak opisywane w pracy, można zaprogramować proste obciążenie np. równomiernie rozłożone na dowolnie określonej powierzchni. Wartość siły jest kontrolowana z możliwością dowolnych zmian (również cyklicznych, jak w mostach) oraz dochodzenia do wartości granicznej. W takim badaniu można doprowadzić do trwałej deformacji powłoki [11-14], czego nie dopuszcza się w przypadku eksploatowanego obiektu.

W badaniach analizowano możliwość stosowania minimalnej grubości zasypki oraz wpływ geosyntetyków [14, 15] na rozkład obciążenia przez naziom. Ważnym kierunkiem badań jest określenie naprężeń w blachach falistych powłok w układach warstwowych (z nakładkami) [12, 16]. W badaniach laboratoryjnych realizuje się obciążenia quasi-statyczne, a więc o innym ujęciu niż w testach dynamicznych [10]. Możliwa jest realizacja obciążeń cyklicznych [14, 17], ale z doborem takich częstości zmian obciążenia, aby uniknąć efektów dynamicznych.

## 2. BADANA KONSTRUKCJA

Analizowany model obiektu o konstrukcji grunto-powłokowej wybudowano w Ośrodku Badawczym Instytutu Badawczego Dróg i Mostów w Żmigrodzie jako jeden z pierwszych w Polsce [14]. Celem badań było sprawdzenie nośności tych konstrukcji jako obiektów drogowych i kolejowych, projektowanych według krajowych norm obciążeń. W ramach badań realizowano obciążenia statyczne oraz cyklicznie zmienne. Model badawczy wykonano z blachy MP 150×50×5.5 mm o następujących parametrach geometrycznych: rozpiętość  $L = 3.55$  m i wysokość  $H = 1.42$  m. W przekroju poprzecznym pasma obwodowego powłoki występuje mały promień krzywizny części narożnej  $R_n = 1.016$  m w stosunku do części środkowej  $R = 8.82$  m. Jak na konstrukcje grupy profili typu skrzynkowego powłoka charakteryzuje się dużą wartością wskaźnika  $\kappa = H/L = 0.4$ . Schemat stanowiska badawczego obiektu przedstawiono na Rys. 1.

## 1. INTRODUCTION

Road [1-4] or railway vehicles [5-10] are used as the service load for testing built structures which are to serve as bridges. The load is a complex system of concentrated forces, whereby the effectiveness of its action on a considered point of the shell is difficult to determine [5]. It is natural that the influence of members which in bridge engineering are regarded as non-structural (e.g. the pavement with its sub-base) is present in such a test. Another inconvenience is the deformation introduced by the displacement of the soil by the movement of the vehicle into the specified position on the structure's roadway [6].

In the case of laboratory tests, considered in this paper, one can plan a simple load, e.g. uniformly distributed over any defined area. The value of the force is controlled, can be changed freely (also cyclically as in bridges) and increased to the limit value. In such a test the shell can be allowed to deform permanently [11-14], which is not acceptable in the case of a bridge in service.

Laboratory tests were used to investigate the possibility of using a minimal backfill thickness and the effect of geo-synthetic materials [14, 15] on load distribution via the soil surcharge. Another important application area is the determination of stresses in corrugated steel shells in layered systems (with overlays) [12, 16]. Quasi-static loads, differing from the ones used in dynamic tests, are realized as a part of laboratory tests [10]. Also cyclic loading can be realized [14, 17], provided that such load change rates which do not produce dynamic effects are selected.

## 2. THE TESTED SOIL-STEEL STRUCTURE

The analysed soil-steel structure model was built, as the first in Poland, in the Research Centre of the Road and Bridge Research Institute Żmigród Branch [14]. The aim of the studies was to check the load-bearing capacity of soil-steel structures, designed in accordance with the Polish standards for loads, as road and railway bridges. As part of the investigations, static and dynamic loads were applied. The model, having span  $L = 3.55$  m and height  $H = 1.42$  m, was made of MP 150×50×5.5 mm steel plates. In the corner part of the cross section of the shell's circumferential section the curvature radius ( $R_n = 1.016$  m) is smaller than that ( $R = 8.82$  m) in the middle part. As for box structures, the shell is characterized by a high value of factor  $\kappa$  ( $\kappa = H/L = 0.4$ ). A schematic of the test stand used in the investigations is shown in Fig. 1.

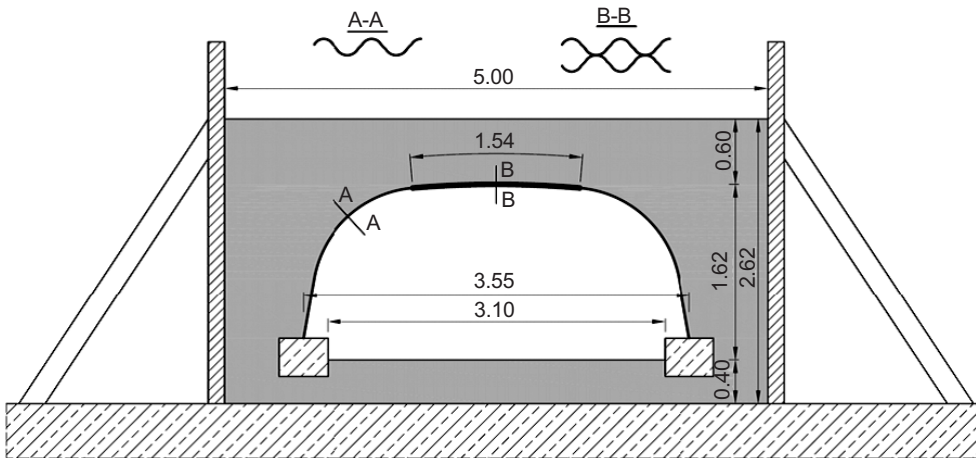


Fig. 1. Soil-coat structure on a test stand [15]  
Rys. 1. Obiekt gruntowo-powłokowy na stanowisku badawczym [15]

Badania modeli obiektów w skali laboratoryjnej realizowane są w celu ustalenia i potwierdzenia wyników eksperymentalnych uzyskanych na eksploatowanych obiektach lub modelach obliczeniowych MES. Zaletą takich badań jest wyeliminowanie wpływów środowiskowych, zakłócających wyniki pomiarów na obiekcie rzeczywistym, takich jak zmiany temperatury oddziałujące na blachę falistą czy też zmiany wilgotności zasypki gruntowej itp.

Model obiektu jest ujęty w katalogu producenta jako SC-2B, a więc wykonany z blachy SuperCor z nakładką w części górnej. Jest to obiekt o najmniejszej rozpiętości realizowany z blach o wysokim profilu SC. Można go odnosić do konstrukcji powłoki utworzonej z blachy falistej typu SC 380×140×7 mm z naprzemienną nakładką z blachy SC 380×140×5,5 mm, ale w obiektach o większej rozpiętości. W Tabl. 1 zestawiono podstawowe parametry typowych powłok skrzynkowych z blach SuperCor. Z porównania tych wskaźników widoczne jest, że analizowana powłoka w proporcjach wymiarów jest zbliżona do typu o symbolu SC 32B, gdyż obydwie mnożniki przyjmują niemal tę samą wartość (około 2,1). W powłokach o większych rozpiętościach, zestawionych w Tabl. 1, wysokości  $H$  w proporcji do rozpiętości  $L$  są niższe. W Tabl. 1 umieszczono wybrane z katalogu producenta typy powłok, w których obydwie mnożniki przyjmują wartości najbardziej zbliżone do badanego obiektu.

Z uwagi na rozległość obiektu gruntowo-powłokowego, czyli powłoki i zasypki gruntowej, konieczne jest budowanie modelu o mniejszych wymiarach. Zatem wyniki badań podane w pracy, dotyczące parametrów geometrycznych, takich jak np. grubość naziomu, można odnosić do typu SC 32B (z mnożnikiem 2,12). Proporcje pomiędzy charakterystycznymi wymiarami blachy falistej MP (model) i SC (obiekt) są podobne i wynoszą:

- długość fali  $a = 380/150 = 2,53$ ;

Investigations of laboratory scale models of soil-steel structures are conducted in order to validate the results of tests carried out on structures in service or yielded by FE computational models. The advantage of such investigations is that environmental influences, such as changes in temperature (affecting the corrugated steel plates), changes in the moisture content of the backfill, etc., distorting the results of measurements performed on real structures, are eliminated.

In the manufacturer's catalogue the model is designated as SC-2B, which means it is made of SuperCor steel plates with an overlay in its upper part. The structure has the smallest span of structures built of high-profile SC plates. The model is applicable to a shell made of SC 380×140×7 mm plates with alternate SC 380×140×5,5 mm overlays, but in larger-span soil-steel structures. The basic parameters of typical box shells made of SuperCor plates are presented in Table 1. The comparison shows that as regards the proportions of its dimensions the analysed shell is similar to that denoted with symbol SC 32B since both multipliers assume almost the same value (about 2.1). In the larger-span shells shown in Table 1 heights  $H$  relative to span  $L$  are smaller. Table 1 contains the shell types selected from the manufacturer's catalogue, which assume values closest to the investigated soil-shell structure.

Because of the large size of the soil-steel structure (the shell and the backfill) it is necessary to build a smaller model. Therefore the test results relating to the geometrical parameters (e.g. soil surcharge thickness), reported in this paper can be applied to type SC 32B (with a multiplier of 2.12). The proportions between the characteristic dimensions of the MP corrugated plate (the model) and those of the SC plate (the structure) are similar and amount to:

- wysokość fali  $f = 140/50 = 2,80$ ;
- momenty bezwładności (sztywność na zginanie)  $I = 24,164/1,914 = 12,6$ .

Wobec tego nie zachodzi pełna odpowiedniość modelowa pomiędzy obiektem wybudowanym z powłoki typu SC 32B i badanym. Zatem w obiekcie wystąpią mniejsze efekty zginania - ugięcia niż w badaniach.

Table 1. Geometrical characteristics of SuperCor steel coats

Tablica 1. Charakterystyki geometryczne powłok z blach SuperCor

Coat type Typ powłoki	Geometrical parameters [m] Parametry geometryczne		Multipliers Mnożniki	
	$L_o$	$H_o$	$L_o/L$	$H_o/H$
SC-11B	4.860	2.365	1.369	1.665
SC-28B	7.025	2.610	1.979	1.838
SC-32B	7.315	3.095	2.061	2.180
SC-38B	8.635	2.735	2.432	1.926
SC-44B	9.920	2.920	2.794	2.056
SC-47B	10.515	3.100	2.962	2.183
SC-50B	10.990	3.165	3.096	2.223
SC-53B	11.750	3.345	3.310	2.331
SC-56B	12.315	3.555	3.469	2.443

Obciążenia w badaniach laboratoryjnych są z reguły symetryczne i nad kluczem (środkiem powłoki w przekroju poprzecznym), jak w analizowanym przypadku. Pozwala to na zmniejszenie wpływu przemieszczeń gruntu w pachwinach powłoki i stosowanie ścian oporowych (Rys. 1). W przypadku obciążeń w położeniach bocznych zasięg jego oddziaływania wymaga zwiększenia szerokości naziomu – jak w obiektach rzeczywistych [18]. Pozytywną cechą użytego stanowiska badawczego jest podatność ścian bocznych. W obiekcie mostowym zasięg deformacji zasyпки jest zwykle większy niż odległość ściany od powłoki. Wielkość skrzyni pomiarowej uwarunkowana była rozmiarami laboratorium.

Podczas badania czy też eksploatacji obiektu parametrem zmiennym jest wskaźnik zagęszczenia gruntu. Podczas pierwszego schematu obciążenia jest on mniejszy, a w kolejnych cyklach badania podlega zmianie, na dodatek w zróżnicowanym stopniu w różnych obszarach gruntu modelu. Po zmianie układu sił na naziemie w gruncie pozostają zwykle deformacje z poprzedniego obciążenia [6].

- corrugation length  $a = 380/150 = 2.53$ ,
- corrugation height  $f = 140/50 = 2.80$ ,
- moments of inertia (bending stiffness)  $I = 24.164/1.914 = 12.6$ .

Thus there is no full model correspondence between the soil-steel structure built of SC 32B plates and the investigated structure, which means that in the real structure the bending effects are smaller than the ones occurring in the investigated model structure.

The loads in laboratory tests are usually symmetric and situated over the crown (the centre of the shell cross section), as in the considered case. Consequently, the effect of soil displacements in the shell's haunches can be reduced and retaining walls can be used (Fig. 1). In the case of loads in lateral locations, the extent of this effect makes it necessary to increase the width of the surcharge width, as in real structures [18]. An advantageous feature of the test stand is the compliance of the side walls. In a bridge structure the extent of backfill deformation is usually larger than the distance of the wall from the shell. The size of the measuring box was dictated by the size of the laboratory.

The soil compaction index is a parameter which changes during the testing or the service life of the soil-steel structure. In the first load cycle it is lower and changes in the next load cycles, to a different degree in the different areas of the model soil. When the arrangement of forces on the soil surcharge is changed, the deformations resulting from the preceding loading usually remain in the soil.

### 3. MEASURING ARRANGEMENT FOR STRUCTURE MODEL

The measuring system shown in Fig. 2 was used in the model investigations. The results were automatically recorded using the Hottinger apparatus. Deflections (vertical displacements  $w$ ) were measured in the middle circumferential section at the shell's half-span by an inductive gauge (D2) while horizontal displacements  $u$  were measured near the points of support (gauges D1 and D3). In this research mainly the results of tensometric measurements, in the form of unit strains in measuring points T1-T11, were used. Electrical resistance strain gauges were spaced at every 0.6 m on one circumferential section. The strain gauges were installed on the corrugation accessible from the bottom, along the circumferential section in the corrugation valley (symbol D) and in the corrugation crest (symbol G).



### 3. UKŁAD POMIAROWY MODELU OBIEKTU

W badaniach modelu wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony na Rys. 2. Rejestracja wyników odbywała się automatycznie z użyciem aparatury firmy Hottinger. Na środkowym paśmie obwodowym powłoki wykonano pomiary ugięcia (przesunięcia pionowego  $w$ ) z użyciem czujnika indukcyjnego w środku rozpiętości powłoki (czujnik D2) oraz przemieszczeń poziomych  $u$  w pobliżu punktów podparcia (czujniki D1 i D3). W pracy wykorzystano przede wszystkim wyniki pomiarów tensometrycznych w postaci odkształceń jednostkowych w punktach oznaczonych jako T1 - T11. Tensometry elektrooporowe rozmieszczono w regularnych odległościach co 0,6 m na jednym paśmie obwodowym. Czujniki instalowano na dostępnej od dołu fali blachy w kierunku obwodowym w dolinie (symbol D) i w wierzchołku fali (symbol G).

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

$$\varepsilon_o = \frac{\varepsilon_D (f - t) + \varepsilon_G (f + t)}{2f} \quad (1)$$

We wzorze (1) ujęta jest geometria blachy falistej MP  $a \times f \times t$ . W analizowanym przypadku blachy występują następujące wymiary: MP 150×50×5 mm. Do określenia zmiany promienia krzywizny powłoki można wykorzystać wysokość fali blachy  $f$  oraz  $\varepsilon_D$  i  $\varepsilon_G$ , jak w równaniu:

$$\rho = \frac{\varepsilon_D - \varepsilon_G}{f} \quad (2)$$

Na Rys. 3 przedstawiono  $\varepsilon_o$  i  $\rho$  obliczane z zależności geometrycznych (1) i (2).

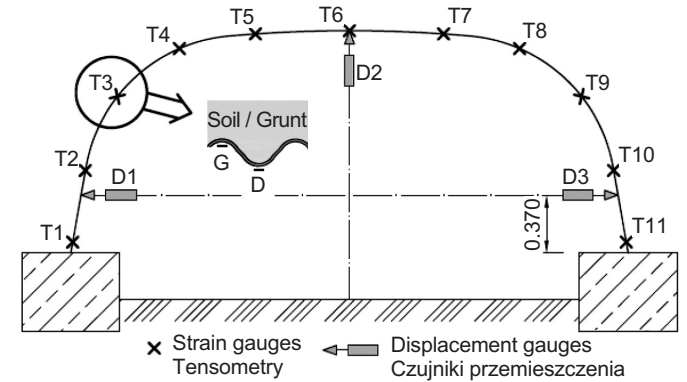


Fig. 2. Cross-section of the object with a position of measuring points [15]

Rys. 2. Przekrój poprzeczny obiektu z położeniem punktów pomiarowych [15]

When the hypothesis of planar cross sections is assumed, the twin arrangement of the gauges makes it possible to calculate the strains on the axis of inertia of the cross section of a corrugated plate from the relation:

Formula (1) takes into account the geometry of corrugated plate MP  $a \times f \times t$ . In the considered case, the MP plate dimensions are 150×50×5 mm. In order to determine the change in the radius of curvature of the shell one can use plate height  $f$  and  $\varepsilon_D$  and  $\varepsilon_G$ , as in the equation:

Fig. 3 shows  $\varepsilon_o$  and  $\rho$  calculated from geometric relations (1) and (2).

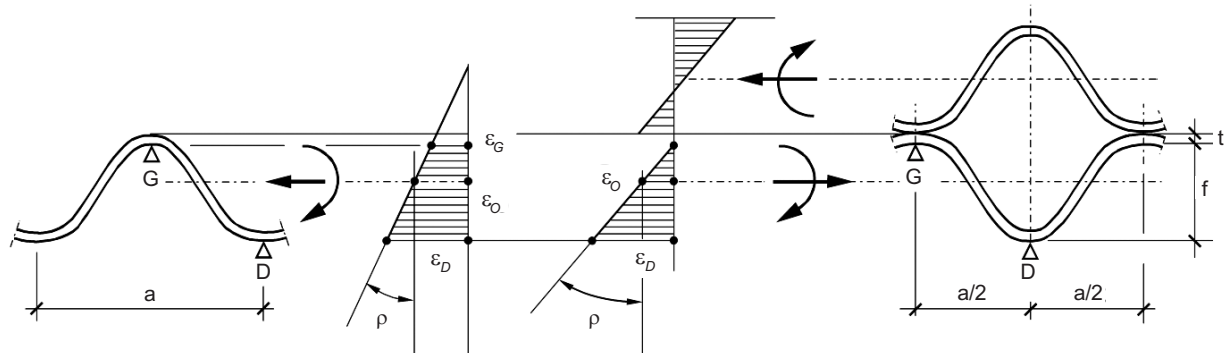


Fig. 3. Unitary deformations on a cross-section of the corrugated steel with and without an overlay  
Rys. 3. Odkształcenia jednostkowe w przekroju poprzecznym blachy falistej bez i z nakładką

W analizowanym paśmie obwodowym powłoki wyróżnia się trzy odcinki: środkowy z nakładką i dwa boczne wyłącznie z blachą podstawową. W przypadku części środkowej nie ma możliwości ustalenia rozkładu odkształceń jednostkowych w nakładce. Zasady określania jej podatnego połączenia podano w pracy [12]. W obszarze zmiany przekroju z nakładką wykresy odkształceń z natury materiału są funkcją ciągłą, ale o innym przebiegu w części środkowej i bocznej.

#### 4. DEFORMACJA MODELU PODSTAWOWEGO

W artykule przyjęto podstawowy (bazowy) model, w którym grubość naziomu (zasyпки nad kluczem) wynosi  $h = 0,6$  m. Przy doborze wartości obciążenia oraz powierzchni jego przekazywania na naziom obiektu kierowano się zaleceniami normy PN-85/S-10030. Gdy obciążenie odpowiada pojazdowi K-800, jak dla klasy A siła rozłożona wynosi:

$$q = \frac{800}{4,0 \cdot 5,0} = 40 \text{ kN/m}^2.$$

Intensywność obciążenia jest zbliżona do obiektów kolejowych. Realizowany program obciążenia ze szczegółowym uzasadnieniem podano w pracy [15]. W modelu podstawowym stosowano obciążenie o wartości  $P = 920$  kN przekazywane na zasypkę gruntową przez prostokątną płytę stalową o wymiarach  $400 \times 500 \times 2$  cm, zakładając równomierne rozłożenie obciążenia pod płytą  $q = 46 \text{ kN/m}^2$ .

W wartościach odkształceń i przemieszczeń omawianych w pracy uwzględniono wyniki pomiarów wykonanych podczas budowy modelu, czyli układania zasyпки gruntowej. Na podstawie pomiarów tensometrycznych uzyskanych w schemacie podstawowym utworzono wykresy podane na Rys. 4. W legendzie wykresów przyjęto oznaczenia  $\varepsilon_D$  - dolny grzbiet fali;  $\varepsilon_G$  - górne zagłębienie fali;  $\varepsilon_O$  - wartość w osi bezwładności. W przebiegu wykresu  $\varepsilon_O$  widoczne są wartości dodatnie pod nakładką i ujemne w częściach bocznych. Wskazuje to na przewagę efektów zginania nad ściskaniem w złożonym układzie powłoki z nakładką, w części środkowej pasma obwodowego.

Istotna uwaga dotyczy wartości odkształceń - dwukrotnie większych w narożu niż w środku rozpiętości powłoki. To spostrzeżenie będzie widoczne również w wynikach analiz podanych w dalszej części pracy. Przemieszczenie pionowe w środku rozpiętości powłoki (czujnik D2) wyniosło  $w = 4,57$  mm, podczas gdy przemieszczenie poziome (liczone jako suma przemieszczeń  $2u$  zmierzonych przez czujniki D1 i D3) było znacznie mniejsze i wyniosło  $2u = 1,86$  mm.

In the analysed circumferential section of the shell one can distinguish three segments: the middle segment with the overlay and two side segments with solely the basic plate. In the case of the middle segment it is not possible to determine the distribution of unit strains in the overlay. The principles of determining its flexible connection are defined in [12]. In the region where the cross section with the overlay changes the strain graphs are continuous functions whose middle and side parts differ in shape.

#### 4. DEFORMATION OF A BASIC MODEL

A basic model with soil surcharge (backfill above the crown) height  $h = 0.6$  m was assumed. The recommendations of standard PN-85/S-10030 were followed when selecting the load value and the area of load transmission onto the structure's surcharge. When the load corresponds to the K-800 vehicle for class A, the distributed force amounts to:

The load intensity is close to that of railway soil-steel structures. The loading plan with detailed explanations is provided in [15]. The basic model load  $P = 920$  kN was transmitted onto the earth fill by a  $400 \times 500 \times 2$  cm rectangular steel plate. Load  $q = 46 \text{ kN/m}^2$  uniformly distributed under the plate was assumed.

The strain and displacement values presented in this paper include the results of measurements performed during the construction of the model, i.e. during backfill laying. The basic case tensometric measurement results were used to plot the graphs shown in Fig. 4. The following symbols are used in the legend:  $\varepsilon_D$  - in the valley of the corrugation,  $\varepsilon_G$  - in the crest of the corrugation;  $\varepsilon_O$  - the value on the axis of inertia. Graph  $\varepsilon_O$  exhibits positive values under the overlay and negative values in the lateral parts. This indicates a predominance of bending effects over compression in the shell-overlay system, in the middle part of the circumferential section.

It should be noted that that the strains in the corner are twice larger than in the middle of the shell span. This will also be apparent in the results reported further in this paper. The vertical displacement in the middle of the shell span (gauge D2) was  $w = 4.57$  mm, whereas the horizontal displacement (calculated as the total of displacements  $2u$  measured by gauges D1 and D3) was much smaller, amounting to  $2u = 1.86$  mm.

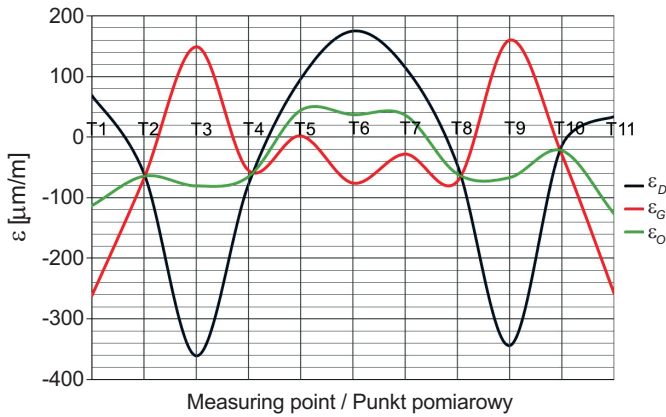


Fig. 4. Distribution of deformations on the on a circuit strip of the coating - the basic model

Rys. 4. Rozkład odkształceń na paśmie obwodowym powłoki – model podstawowy

## 5. DEFORMACJA MODELU Z GEOSIATKĄ

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane w modelu, w którym w warstwie środkowej zasypanki gruntowej ułożona została siatka z geosyntetyku. W ten sposób powstały dwie rozdzielone warstwy gruntu o grubościach 0,3 m. Z porównania wykresów podanych na Rys. 4 i 5 widoczne jest ich duże podobieństwo, szczególnie w części środkowej. Większe różnice powstają w części narożnej powłoki – w punktach T3 i T9. Przemieszczenie pionowe w środku rozpiętości powłoki (czujnik D2) wyniosło w tych badaniach 3,34 mm, a sumaryczne przemieszczenia poziome liczone jak poprzednio (zmierzone przez czujniki D1 i D3) wyniosło 1,40 mm. Zatem można określić redukcję deformacji powłoki z powodu zastosowania geosiatki na poziomie 35%.

## 6. WPŁYW INTENSYWNOŚCI OBCIĄŻENIA I GRUBOŚCI NAZIOMU NA DEFORMACJĘ POWŁOKI

Na Rys. 6 przedstawiono przyrost odkształceń na krawędzi dolnej (w punkcie T3, w którym odnotowano ekstremalne wartości odkształcenia) w trakcie wzrostu obciążenia. Oznaczenia wykresów E1 i E2 przyporządkowane są odpowiednio wynikom uzyskanym w modelu podstawowym (bez geosiatki) E1 i z geosiatką E2. Na wykresach podanych na Rys. 6 widoczny jest liniowy przyrost  $\varepsilon_D$  w obydwu przypadkach. W blaszce rejestrowane są odkształcenia  $\varepsilon_D$  mniejsze niż granica plastyczności. Kąt nachylenia obu wykresów można potraktować jako miarę sztywności układu grunt-powłoka, tak więc model z geosiatką charakteryzuje

## 5. DEFORMATION OF MODEL WITH GEO-GRID

Fig. 5 shows the results of measurements for a model in which a geo-synthetic grid was laid in the middle layer of the backfill, whereby two separated soil layers, each 0.3 m thick, were created. A comparison of the graphs presented in Figs 4 and 5 shows them to be very similar, especially in their middle part. They differ more in the corner part of the shell (in points T3 and T9). In this case, the vertical displacement at the mid-span of the shell (gauge D2) amounted to 3.34 mm and the total horizontal displacement (measured by gauges D1 and D3), calculated as previously, amounted to 1.40 mm. Thus the reduction in shell deformation due to the use of the geo-grid amounts to about 35%.

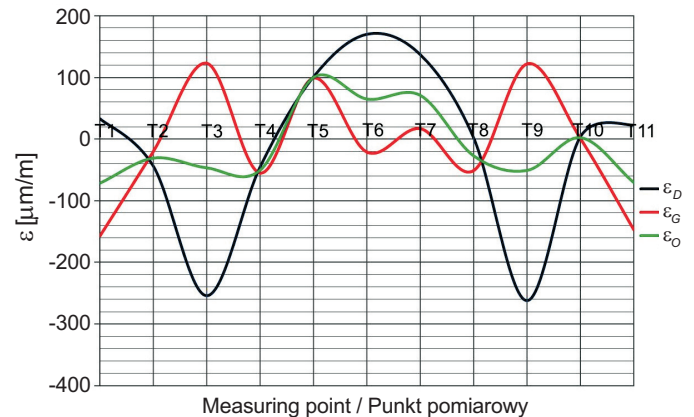


Fig. 5. Distribution of deformations on a circuit strip of the coating - the model with a geogrid

Rys. 5. Rozkład odkształceń na paśmie obwodowym powłoki - model z geosiatką

## 6. EFFECT OF LOADING INTENSITY AND SURCHARGE THICKNESS ON SHELL DEFORMATION

Fig. 6 shows the increment in strain on the bottom edge (in point T3, where extreme strains were registered) as the load is increased. Symbols E1 and E2 in the diagrams stand for respectively the results for the basic model (without a geo-grid) and the one with the geo-grid. The graphs in Fig. 6 show that in both cases  $\varepsilon_D$  increases linearly. Strains  $\varepsilon_D$  registered in the plate are lower than the yield point. The angle of inclination of the two graphs can be regarded as a measure of the stiffness of the soil-shell system. This means that the model with the geo-grid is

się około 1,4 razy większą sztywnością od modelu bazowego.

Wartości przemieszczeń pionowych  $w$  i poziomych  $2u$  dla obu modeli przy wzrastającym obciążeniu przedstawiono na Rys. 7. Stosunek przemieszczeń z modelu podstawowego E1 i modelu z geosiatką E2 wynosi średnio 1,4. Maksymalne ugięcie pionowe  $w(E1) = 8,92$  mm odniesione do rozpiętości powłoki  $L = 3,55$  m we wskaźniku ugięcia wynosi:

$$\omega = \frac{w}{L} \cdot 100\% = 0,25\% . \quad (3)$$

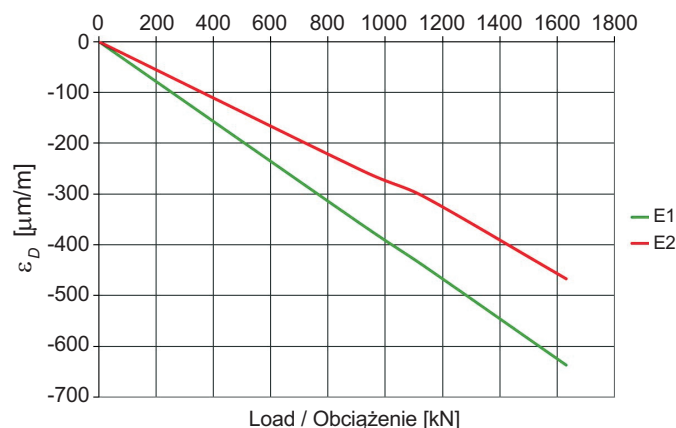


Fig. 6. Distribution of deformations  $\varepsilon_D$  (point T3) as a function of loading

Rys. 6. Rozkład odkształceń  $\varepsilon_D$  (punkt T3) jako funkcja obciążenia

Na Rys. 8 przedstawiono rozkład odkształceń jednostkowych w przypadku zróżnicowanej grubości naziomu. W tym modelu zastosowano płytę rozkładającą obciążenie o wymiarach  $100 \times 500 \times 2$  cm. Gdy maksymalne obciążenie wyniosło  $P = 1950$  kN, intensywność oddziaływania rozłożonego na grunt pod płytą była  $q = 390$  kN/m<sup>2</sup>. Pomimo tak dużego obciążenia, odkształcenia w blasze nieznacznie podlegały zmianie również przy zróżnicowanych grubościach naziomu  $h$ . Przemieszczenia powłoki w przypadku zmiennej grubości naziomu  $h$  wynoszą:

- gdy  $h = 0,6$  m:  $w = 10,28$  mm,  $2u = 4,58$  mm,
- gdy  $h = 0,3$  m:  $w = 11,95$  mm,  $2u = 7,08$  mm,
- gdy  $h = 0$  m:  $w = 11,90$  mm,  $2u = 7,15$  mm.

Maksymalne ugięcie pionowe  $w = 11,90$  mm odniesione do rozpiętości powłoki  $L = 3,55$  m wynosi  $\omega = 0,32\%$ .

Istotne znaczenie w rozkładzie obciążenia ma nakładka powłoki podstawowej. Wobec ograniczonych możliwości zniszczenia powłoki wykonano badania z płytą o powierzchni

characterized by about 1.4 greater stiffness than the basic model.

The values of vertical displacement  $w$  and horizontal displacement  $2u$  for the two models under increasing loading are shown in Fig. 7. The ratio of basic model displacement E1 and displacement E2 of the model with the geo-grid amounts on average to 1.4. Maximum vertical deflection  $w(E1) = 8.92$  mm related to shell span  $L = 3.55$  m in the deflection index amounts to:

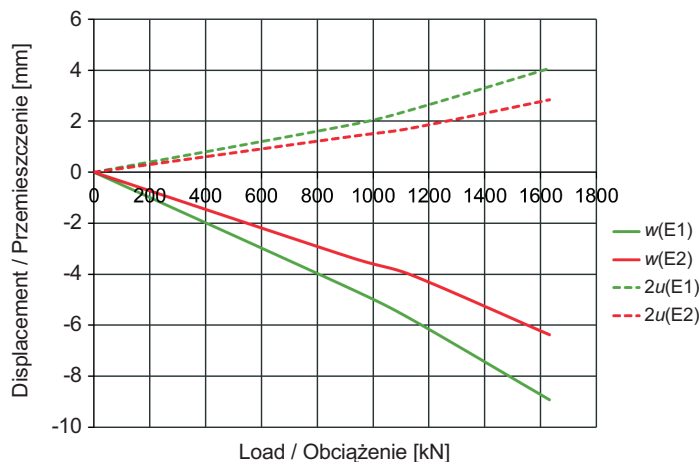


Fig. 7. Displacements of the coating as a function of loading  
Rys. 7. Przemieszczenia powłoki jako funkcja obciążenia

Fig. 8 shows the distribution of unit strains depending on the surcharge thickness. In this model a  $100 \times 500 \times 2$  cm plate distributing the load was used. When the maximum load amounted to  $P = 1950$  kN, the intensity of the pressure distributed on the soil under the plate was  $q = 390$  kN/m<sup>2</sup>. Despite such a great load, the strains in the corrugated steel shell changes only slightly for the different soil surcharge thicknesses  $h$ . The displacements of the shell for the different surcharge thicknesses  $h$  amount to:

- when  $h = .6$  m:  $w = 10.28$  mm,  $2u = 4.58$  mm,
- when  $h = 0.3$  m:  $w = 11.95$  mm,  $2u = 7.08$  mm,
- when  $h = 0$  m:  $w = 11.90$  mm,  $2u = 7.15$  mm.

Maximum vertical displacement  $w = 11,90$  mm in relation to shell span  $L = 3,55$  m amounts to  $\omega = 0,32\%$ .

The overlay of the basic shell plays an important role in load distribution. Because of the limited shell failure possibility, tests were carried out using a  $100 \times 150 \times 2$  cm plate for a case without a surcharge ( $h = 0$ ). The load was gradually increased to  $P = 585$  kN. For steel Fe360BFN,



100×150×2 cm w przypadku braku naziomu, czyli  $h = 0$ . Obciążenie zwiększano stopniowo do wartości  $P = 585$  kN. Dla stali Fe360BFN, z której wykonana jest powłoka, minimalna granica plastyczności wynosi 235 MPa, czemu odpowiada odkształcenie jednostkowe  $\varepsilon_R \approx 1150$   $\mu\text{m/m}$ . Z wykresów odkształceń przedstawionych na Rys. 9a i 9b oraz przemieszczeń przedstawionych na Rys. 10 widoczne jest, że niesprężyste zachowanie się badanego modelu w skali makro zaczyna się od wartości obciążenia około  $P = 400$  kN. Największe odkształcenia blachy powłoki występują w jej narożach (przekroje T3 i T9). Obraz zniszczenia w postaci wyraźnych deformacji plastycznych w prawym narożniku konstrukcji przedstawiono na Rys. 11.

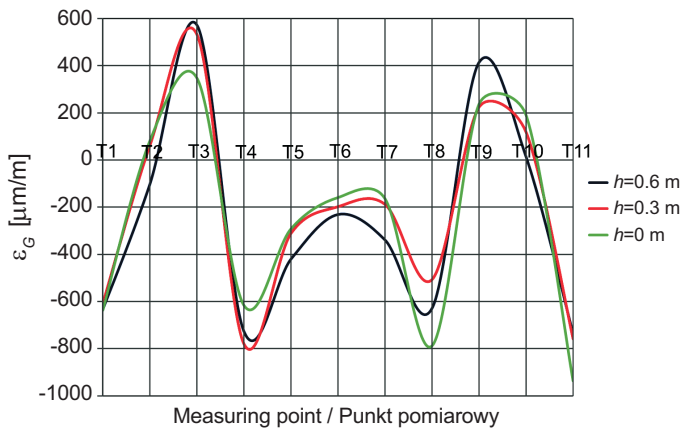


Fig. 8. Distribution of deformations on a wave top  $\varepsilon_G$  as a function of the surcharge thickness  $h$   
Rys. 8. Rozkład odkształceń w wierzchołku fali  $\varepsilon_G$  jako funkcja grubości naziomu  $h$

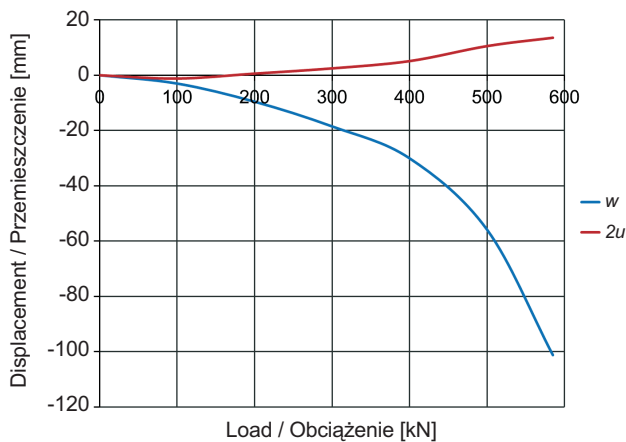


Fig. 10. Vertical  $w$  and horizontal  $2u$  displacements as a function of loading  
Rys. 10. Przemieszczenia pionowe  $w$  i poziome  $2u$  jako funkcja obciążenia

of which the shell is made, the minimum yield point amounts to 235 MPa, to which unit strain  $\varepsilon_R \approx 1150$   $\mu\text{m/m}$  corresponds. The strain graphs in Figs 9a and 9b and the displacement graphs in Fig. 10 show that the non-elastic behaviour of the tested model on the macro-scale begins at a load value of about  $P = 400$  kN. The largest deformation of the shell plate occur in its corners (cross sections T3 and T9). Fig. 11 shows a photo of the failure in the form of clearly visible permanent deformations in the right corner of the structure.

The values of deflection indices come respectively to:

- when  $P = 400$  kN:  $\omega = 0.85\%$ ,
- when  $P = 500$  kN:  $\omega = 1.58\%$ ,
- when  $P = 585$  kN:  $\omega = 2.85\%$ .

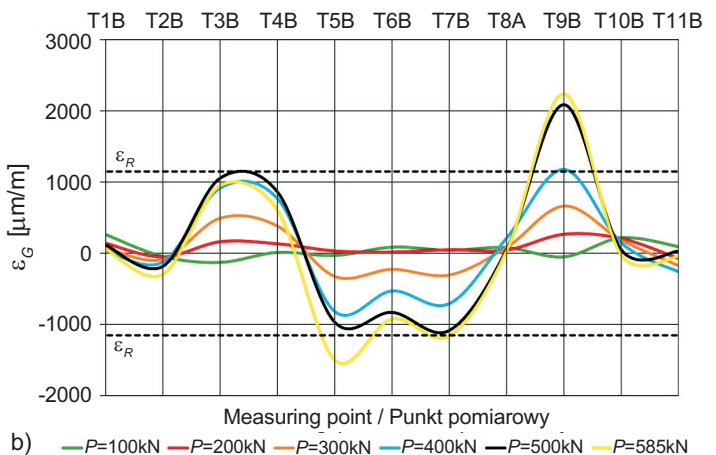
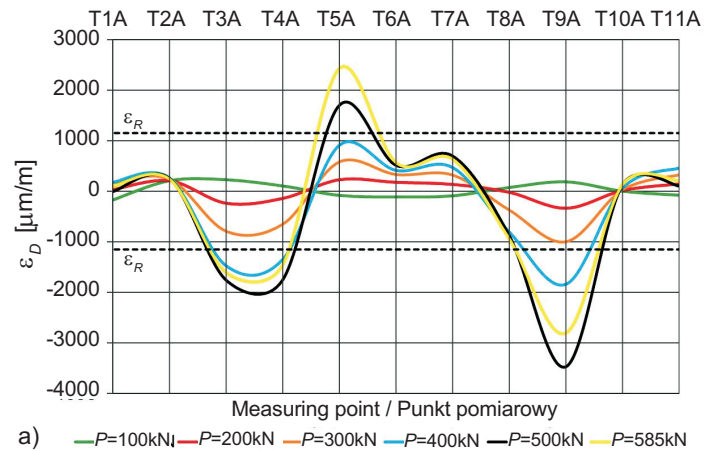


Fig. 9. Distribution of deformations as a function of load increase: a) in a wave hollow, b) on a wave top  
Rys. 9. Rozkład odkształceń jak funkcja przyrostu obciążenia: a) w dolinie, b) na wierzchołku fali

Wartości wskaźników ugięcia wynoszą odpowiednio:

- gdy  $P = 400 \text{ kN}$ :  $\omega = 0,85\%$ ,
- gdy  $P = 500 \text{ kN}$ :  $\omega = 1,58\%$ ,
- gdy  $P = 585 \text{ kN}$ :  $\omega = 2,85\%$ .

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki analiz podane w pracy dotyczą geometrii powłok o kształcie skrzynkowym a więc odrębnej grupy powłok z blach falistych, ale często stosowanej. Charakteryzuje się ona małymi wartościami  $\kappa = H/L$  i małymi promieniami krzywizny w narożu. Mierzono deformację pasma obwodowego powłoki wykonanej z blachy falistej MP 150×50×5 mm z dodatkową nakładką w części górnej. W pracy wykorzystano pomiary czujnikami tensometrycznymi i indukcyjnymi czujnikami przemieszczenia. Badana konstrukcja poddana została różnym wariantom obciążenia w celu określenia jej nośności. Uzyskane wyniki pozwoliły na postawienie szczegółowych wniosków jak niżej.

1. Badana konstrukcja charakteryzuje się bardzo wysoką nośnością jako obiekt drogowy, gdy grubość naziomu wynosi 0,6 m. Stosunek maksymalnego ugięcia powłoki do rozpiętości powłoki osiąga wskaźnik  $\omega = 0,13\%$  w sytuacji obciążenia normowego klasy A.
2. Umieszczenie siatki z geosyntetyku w połowie grubości naziomu istotnie poprawia odporność na obciążenia normowe. W tym przypadku wskaźnik ugięcia wynosi  $\omega = 0,09\%$ .
3. Prawie dwukrotne zwiększenie obciążenia normowego nie powoduje powstania deformacji plastycznych powłoki w modelu z geosiatką jak również w modelu podstawowym. Wszystkie zmierzone odkształcenia jednostkowe są poniżej granicy plastyczności, a maksymalne, zarejestrowane ugięcie w modelu podstawowym, daje wskaźnik  $\omega = 0,25\%$ .
4. Sztywność modelu podstawowego traktowana jako odporność na deformacje jest około 40% mniejsza niż modelu z geosiatką.
5. Grubość naziomu w zakresie  $0,6 \div 0,0 \text{ m}$  nie wpływa znacząco na nośność obiektu. Wskaźnik ugięcia przy naziomie  $h = 0,3 \text{ m}$  i obciążeniu  $P = 1950 \text{ kN}$  wynosi  $\omega = 0,34\%$ .
6. We wszystkich rozpatrywanych schematach obciążenia maksymalne odkształcenia w powłoce występują w jej narożach (punkty T3 i T9 – Rys. 2).
7. Deformacje trwałe konstrukcji w postaci wyraźnych odkształceń plastycznych (w prawym narożu powłoki)

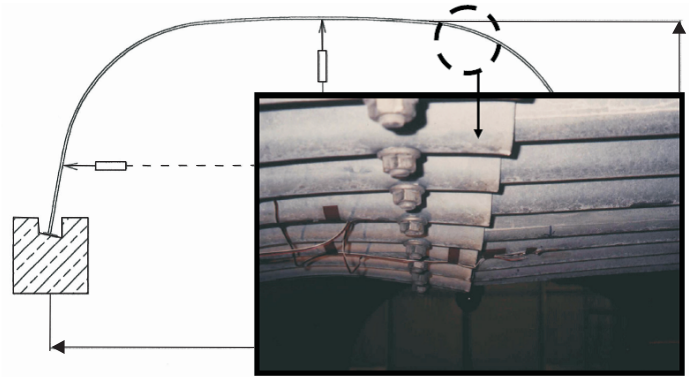


Fig. 11. Durable hogging of the corrugated steel in a joint at loading  $P = 585 \text{ kN}$  [14]

Rys. 11. Wygięcie trwałe blach w złączu przy obciążeniu  $P = 585 \text{ kN}$  [14]

## 7. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The analytical results reported in this paper are for the geometry of box shells – a separate group of shells made of corrugated steel plates, but often used. The shells are characterized by low values of  $\kappa = H/L$  and small curvature radii in their corners. The deformation of the circumferential section of a shell made of MP 150×50×5 mm corrugated plates with an additional overlay at the top was measured using strain gauges and inductive displacement gauges. The investigated soil-steel structure was subjected to the action of various load configurations in order to determine its load-bearing capacity. On the basis of the test results the following conclusions have been drawn:

1. As a road structure, the tested soil-steel structure is characterized by a very high load capacity when the surcharge thickness amounts to 0.6 m. The ratio of the shell's maximum deflection to its span is  $\omega = 0.13\%$  for load class A.
2. The resistance to the standard loads significantly increases when a geo-synthetic grid is inserted at half of the surcharge thickness. In this case the deflection index is  $\omega = 0.09\%$ .
3. When the standard load is increased nearly twice, this does not result in permanent deformations of the shell in both the model with the geo-grid and the basic model. All the measured unit strains are below the yield point and the maximum registered deflection in the basic model results in index  $\omega = 0.25\%$ .
4. The stiffness of the basic model, considered as resistance to permanent deformation, is about 40% lower than that of the model with the geo-grid.

wystąpiły przy obciążeniu  $P > 400$  kN i rozkładzie sił poprzez płytę o wymiarach  $1 \times 1,5$  m, na dodatek bez naziomu. Wskaźnik ugięcia przy obciążeniu 400 kN wyniósł  $\omega = 0,85\%$ .

8. Uzyskane wyniki badań wskazują, że stosowanie konstrukcji z blach SuperCor, a więc o wysokim profilu, przewidzianej w katalogu producenta jako SC-2B, jest z dużym zapasem bezpieczeństwa. Powłoka o tej ogólnej geometrii, ale wykonana z blach o niskim profilu z powodzeniem przenosiła zawyżone obciążenia drogowe.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *White K., Sargand S., Masada T.*: Evaluation of load rating procedure for metal culverts under shallow coil covers. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 23, 2017, 311-323
- [2] *Bayoglu Flener E.*: Testing the response of box-type soil-steel structures under static service loads. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 15, 1, 2010, 90-97
- [3] *Pettersson L.*: Full scale tests and structural evaluation of soil steel flexible culverts with low height of cover. *Doctoral Thesis in Civil and Architectural Engineering, Stockholm*, 2007
- [4] *Bęben D., Mańko Z.*: Badania statyczne mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 2, 3, 2003, 17-42
- [5] *Machelski C., Korusiewicz L.*: Deformation of buried corrugated metal box structure under railway load. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 16, 3, 2017, 191-201
- [6] *Machelski C.*: Dependence of deformation of soil-steel structure on the direction of load passage. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 13, 3, 2014, 223-233
- [7] *Szcześniak W., Hypki M., Skulski B., Śledziwski K.*: Badanie statyczne i dynamiczne mostu kolejowego o konstrukcji gruntowo-powłokowej. *Logistyka*, 6, 2014, 10252-10268
- [8] *Anderson A., Sundquist H., Karoumi R.*: Full scale tests and structural evaluation of soil-steel flexible culverts for high-speed railways. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 12, 2012, 43-53
- [9] *Madaj A., Surzbecher K., Porębski R., Janusz L.*: Testing of multiplate type structure under dynamic railway loads. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 12, 2012, 185-195
- [10] *Bayoglu Flener E., Karoumi R.*: Dynamic testing of a soil-steel composite railway bridge. *Engineering Structures*, 31, 12, 2009, 2803-2811
5. Surcharge thickness in a range of 0.6-0.0 m has no significant effect on the load-bearing capacity of the structure. At surcharge thickness  $h = 0.3$  m and load  $P = 1950$  kN the deflection index is  $\omega = 0.34\%$ .
6. In all the adopted load configurations the maximum strains in the shell occur in its corners (points T3 and T9 in Fig. 2).
7. Clearly visible permanent deformations occurred (in the shell's right corner) under load  $P > 400$  kN when the forces were distributed via a  $1 \times 1.5$  m plate and there was no surcharge. The deflection index under the load of 400 kN was  $\omega = 0.85\%$ .
8. The test results indicate that soil-steel structures made of high-profile SuperCor plates, in the manufacturer's catalogue designated as SC-2B, have a large margin of safety. The shell having the same general geometry, made of low-profile plates successfully carried road loads exceeding the standard ones.
- [11] *Regier C., Hoult N.A., Moore I.D.*: Laboratory study of the behavior of a horizontal-ellipse culvert during service and ultimate load testing. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 22, 3, 2017, 04016131-1-14  
doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001016
- [12] *Machelski C.*: Sztywność powłok warstwowych obiektów gruntowo-powłokowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 10, 4, 2011, 55-78
- [13] *Brachman R.W.I., Moore I.D., Mak A.C.*: Ultimate limit state of deep-corrugated large-span box culvert. *Transportation Research Record 2201, TRB*, 2010, 55-61
- [14] *Czerepak A., Korusiewicz L., Wysokowski A., Janusz L.*: Badania w skali naturalnej modelu przepustu skrzynkowego "Box Culvert". *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne Nr 55 (Zeszyt 105)*, Kraków 2003, 59-71
- [15] *Kunecki B., Korusiewicz L.*: Laboratory test of a full-scale soil-steel box-type culvert under road loads. *New Horizons and Better Practices-Proceedings of the 2007 ASCE Structures Congress, Long Beach, California*, 2007
- [16] *Bayoglu Flener E., Sundquist H.*: Full-scale testing of two corrugated steel box culverts with different crown stiffness. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska*, 1, 2007, 35-44
- [17] *Wysokowski A., Veslestad J.*: Full scale fatigue testing of large-diameter multi-plate corrugated steel culverts. *Archives of Civil Engineering*, 48, 1, 2002, 31-57
- [18] *Machelski C., Mumot M.*: Corrugated shell displacements during the passage of a vehicle along a soil-steel structure. *Studia Geotechnica at Mechanica*, 4, 2016, 55-57