

ŁUKASZ KOSNO
Kielce University of Technology
e-mail: Lkosno@tu.kielce.pl

WORK ANALYSIS OF SOIL-STEEL STRUCTURE IN THE CONSTRUCTION PHASE ILLUSTRATED WITH SUPERCOR SC-57S

Abstract

This paper aims to present the results of studies of the flexible SuperCor SC-57S structure built by Polish manufacturer "ViaCon Polska Sp. z o.o." to determine maximum values of displacement and internal forces that occur in the structure during its construction. The finite element method was used to develop a numerical model of the structure whose behaviour was then simulated. The conclusions based on the values of measured displacements and internal forces may be helpful in understanding the behaviour of flexible steel and soil structures.

Keywords: oil-steel structure, corrugated steel plate, flexible structures, the SuperCor structures

1. Introduction

This paper presents the results from the tests carried out on the SuperCor SC-57S structure by ViaCon Polska Sp. z o.o. at their test site in Rydzyna. The tests aimed to examine the behaviour of the steel and soil structure in the phase of construction. The measured quantities included stress and strain, recorded with a set of strain gauges, and the displacement, determined through surveys. The structure was modelled in the computer program CandeCad, which implements the finite element method. Computations were carried out in order to compare the values of the calculated and the measured deflections. This paper presents the results of stress and displacement measurements. Based on these results, the conclusions may be helpful to define the behaviour of soil-steel structures in the construction phase.

2. Description of the structure

The study involved the SuperCor SC-57S structure. It is a flexible corrugated steel structure with a design span of $l_t = 17.59$ m and the curvature radii of 3.43 m and 13.74 m. The structure, fixed to a concrete footing, consists of corrugated plates made of S315MC steel. The corrugation profile has a pitch of 381 mm and a depth of 140 mm. The 7 mm thick steel plates are bolted with M20 compression bolts. Nuts of the bolts are tightened up to the required torque of minimum 360 Nm, in compliance with the plate manufacturer's instruction for spans exceeding 7.0 m. The backfill is comprised of 25

layers, each being 30 cm in thickness. The soil density index amounts to $ID = 0.95$ in the direct vicinity of the structure and $ID = 0.98$ in the remaining part of the backfill. The proper way of building the backfill layers is very important in this kind of structures, because this component interacts with the steel structure and carries significant part of the load. The effect of positive arching is particularly important here [3, 4].

3. Conducting the research

During the construction process, the strain was measured with a set of strain gauges. Displacements were determined through geodetic surveys. The gauges were placed at the crests and valleys of the corrugation. Basic dimensions and the location of the strain gauges are shown in Figures 1 and 2. Figure 3 shows the location of geodetic measurement points. Strain gauge readings were taken after laying each backfill layer. For layers denoted as V, VII, X, XII, XIV and XVII, additional readings were taken after 12 hours. The output for layer XXV was read after 12 hours and at 3 weeks. Geodetic surveys were performed after laying each layer and at 7, 25, 53, 84, 132, 211, and 403 days from the completion date. Vertical and horizontal deflections of the structure measurement points were taken into account in the surveys.

The first survey, zero reading, was performed after assembling the steel structure. Deflections due to the dead load were not accounted for.

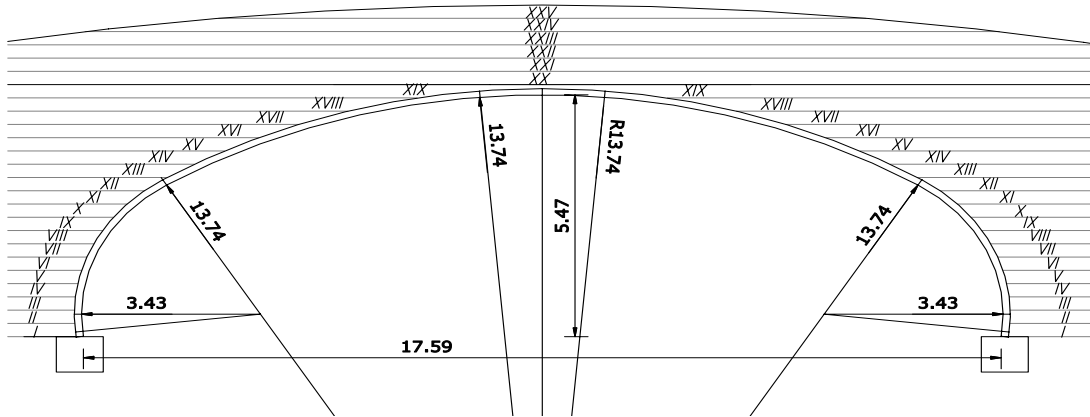


Fig. 1. Basic dimensions of SuperCor SC-57S structure and details of backfill layers

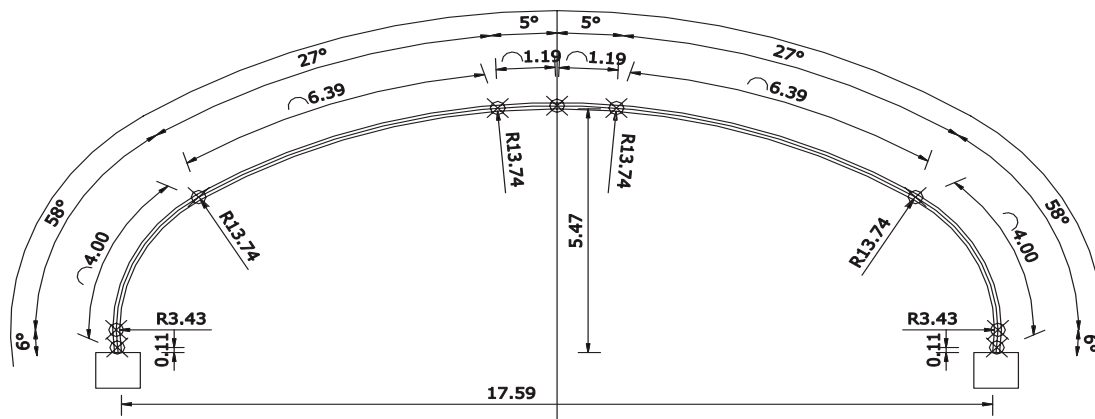


Fig. 2. Location of strain gauges on the SuperCor SC-57S structure

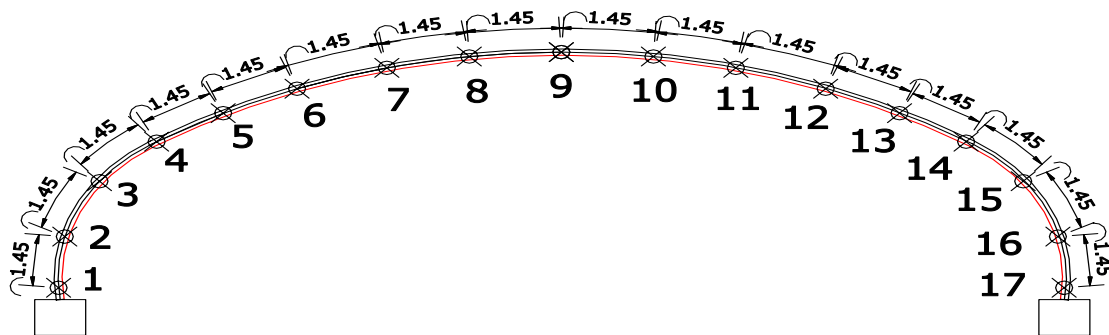


Fig. 3. Location of geodetic measurement points



Fig. 4. The SuperCor SC-57S structure during construction

4. Analysis of the behaviour of the structure

In soil-steel structures the steel shares the load with the soil. In the construction phase the weight of the soil and its pressure on the steel cause the deformation of the structure. Initially, the structure arches upwards, that is, it buckles in the upper part. Its lateral/horizontal size decreases, that is, its width narrows. The deformation decreases following the placement of consecutive layers of backfill [2], as shown in the diagram in Figure 5. The diagram shows the results

of geodetic measurements of vertical displacements in the crown and value U of the narrowing at points 1 and 17. It follows from the diagram that the buckling and the narrowing reduced after placing layers from XIX up. Subsequent measurements conducted at 7, 25, 53, 84, 132, 211 and 403 days of the structure completion date indicated that the structure underwent further deformation. The buckling in the crown reached the value of 43 mm. The measurement points 1 and 17 drifted away for a distance of nearly 20 mm; the point at the left corner moved more than 22 mm to the left and the point at the right corner moved approximately 3 mm to the left.

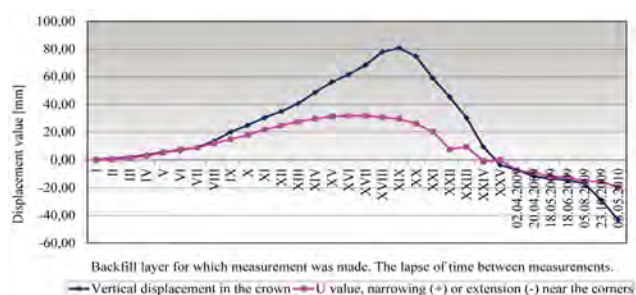


Fig. 5. Displacements in SuperCor SC-57S structure

The measured displacements are confirmed in the diagram of bending moments presented in Figure 6. The reduction in bending moments in the crown, which occurred after placing layer XIX and subsequent layers is clearly shown. The reduction in bending moment at the corners of the structure occurred after placing layer XVIII and subsequent layers. Following the placement of layers starting from XXIII, the bending moment for all three points was negative.

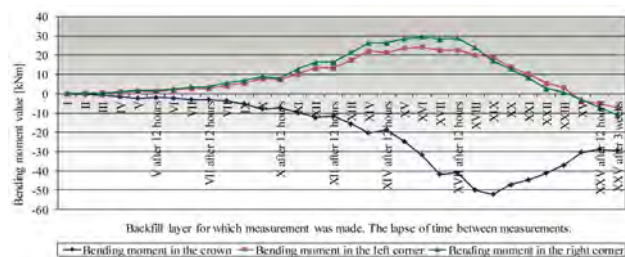


Fig. 6. Bending moments occurring in the crown and corners (left/right) of the structure

Along with the placement of subsequent backfill layers, a constant rise in normal forces was observed in the corners of the structure. The rise was uniform for layers from I to XVII. After the placement of the layers starting with XVIII, axial forces increased considerably faster. Normal forces increased non-uniformly in the crown of the structure. Considerable

compressive force gains were recorded after 12 hours and three weeks from the completed backfill placement. This is probably a result of the relaxation of the compacted backfill and its pressure on the sidewalls of the structure (Fig. 7.) The compressive forces decreased with placing another layer of the backfill, which may be assigned to the effect of vibrations on the finished backfill and on the disruption of adhesion on the steel-soil interface [1, 2].

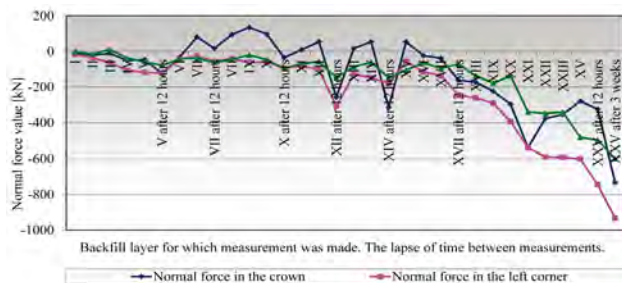


Fig. 7. Normal forces in the crown and corners of the structure

The graph in Figure 8 shows the stresses measured at the corrugation crests and valleys, normal forces and the bending moment in the crown of the structure during the backfilling works. At the end of the backfilling process, there was a reduction in the valley tensile stresses, which nearly disappeared three weeks after construction. This confirms that the structure was stressed and the stresses were redistributed with time. Maximum value of normal stress in the crown for the upper wave, -210.9 MPa, was reached when layer XXI was laid. The maximum stress value for the lower wave, 133.5 MPa, was reached after layer XIX was laid.

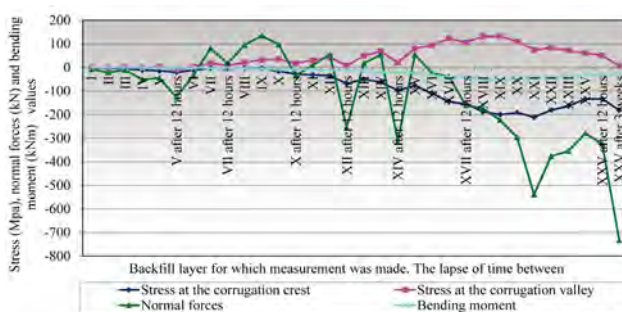


Fig. 8. Values of stress, normal forces and bending moment in the crown of the construction

The diagrams in Figure 9 and 10 show the values of stress at the corrugation crests and valleys, normal forces and the bending moment in the left and right corners of the cross-section during backfilling. In the valley, compressive stress was present during the whole process of construction. The tensile stress at the crest was decreasing until the change of sign after placing layer

XX. Then, the compressive stress occurred at the crest, which confirms that the structure was (pre)stressed. The maximum value of normal stress in the left corner of the upper wave was reached after three weeks following the placement of layer XXV: -129.5 MPa. The maximum stress value for the lower wave, -96.3 MPa, was reached after 12 hours following the placement of layer XVII. The maximum value of normal stress in the right corner of the upper wave, -104.6 MPa, was reached after three weeks from the placement of layer XXV. The maximum stress in the lower wave, -96.9 MPa, was reached when layer XVII was laid.

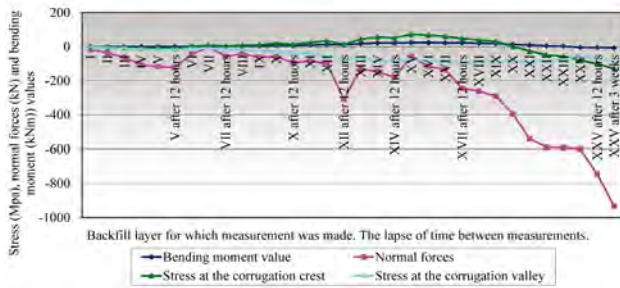


Fig. 9. Values of stress, normal forces and bending moment in the left corner of the structure

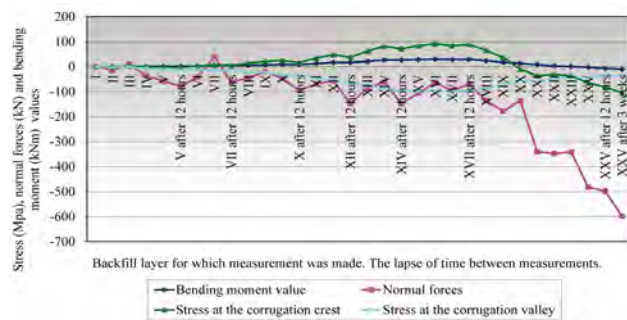


Fig. 10. Values of stress, normal forces and bending moment in the right corner of the structure

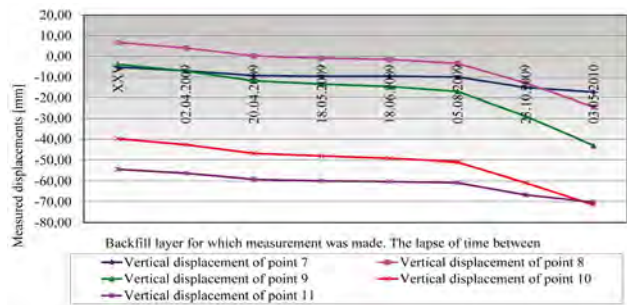


Fig. 11. Geodetic measurement results: displacements of points 7-11

Five measuring points: 7, 8, 9, 10 and 11 should be considered in the analysis of the deflections that occur near the crown of the structure. Point 9 – the crown

is where the largest displacements are expected; smaller deflections should occur at points 8 and 10. The smallest displacements should be recorded for points 7 and 11. Figure 12 shows the results of the geodetic measurement of the displacement gain after placing layer XXV and following the expiration of 7, 25, 53, 84, 132, 211 and 403 days. After the last layer was laid, displacement at particular points were as follows: 7: -5.09 mm; 8: 6.82 mm; 9: -3.67 mm; 10: -39.75 mm; 11: -54.29 mm. The final measurement conducted 403 days after placing layer XXV showed the following vertical displacement for points: 7: -17.23 mm; 8: -24.35 mm; 9: -43.06 mm; 10: -71.48 mm; 11: -70.17 mm. When backfilling was completed, the displacement at point 7 was -5.09 mm. The upward deflection of 6.82 mm was recorded at point 8. The deflections measured at point 9 were -3.67 mm, with the largest deflections, -54.29 mm, recorded at point 11. The structure did not deflect in the manner anticipated. This may be evidence for the improper construction procedure. At 403 days the measured deflection values were -17.23 mm at point 7, -24.35 mm at point 8, and -43.06 mm at point 9. In addition, the largest recorded deflection moved from point 11 (-70.17 mm) to point 10, which is located closer to the crown. The value of this deflection was -71.48 mm, which confirms the redistribution of stresses with time.

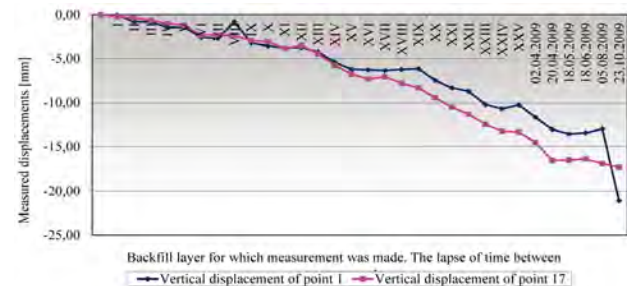


Fig. 12. Geodetic measurement of displacement of points 1 and 17

The geodetic measurements indicate that vertical displacements were caused by not only deflections but also by settlement of the foundations. This is confirmed by the increasing with time displacements of points 1 and 17 located at a small distance (approx. 10 cm) from the supports.

5. Conclusions

The following conclusions can be drawn based on the studies of SuperCor SC-57S structure. The largest deformations and bending moments occur in the construction phase, rising with the lapse of backfill height

until the crown level is reached and then decreasing with backfilling continued above the crown. Also the tensile stresses in the structure decrease considerably. The structure is stressed. Thus, the upward deflection of the steel structure during backfilling is a positive phenomenon [2]. The tests have confirmed that the construction process is the most hazardous phase of the work/performance of flexible structures. Another regularity observed relates to the shape change of the structure, confirmed by the displacements measured at points 7–11. The displacement at point 7 was -5.09 mm after placing layer XXV, whereas at point 8, the structure deflected 6.82 mm upwards. Deflections measured at point 9 reached -3.67 mm and -39.75 mm at point 10 with the largest deflections recorded at point 11: -54.29 mm. The measurements conducted after 403 days revealed deflection of -17.23 mm at point 7, -24.35 at point 8 and -43.06 mm at point 9. The largest deflection recorded in this study, -71.48 mm, moved to point 10 close to the crown level. The

shape of the structure changed to one closer to the anticipated shape.

References

- [1] Bęben D., Mańko Z.: *Badania doświadczalne stalowej powłoki mostu drogowego podczas zasypywania gruntem*. „Drogi i mosty”, 2 (2004), s. 15–40.
- [2] Machelski Cz., *Deformacja stalowych powłok mostowych obiektów gruntowo-powłokowych podczas zasypki*. „Geoinżynieria drogi mosty tunele”, 6 (2010), s. 24–30.
- [3] Machelski Cz., *Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008.
- [4] Janusz L., Madaj A., *Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007.

Photographs and data concerning the studied structure were provided by courtesy of The Management Board of "ViaCon Polska Sp. z o.o." company.

Łukasz Kosno

Analiza pracy konstrukcji gruntowo-powłokowej w fazie wykonywania na przykładzie konstrukcji SuperCor SC-57S

1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiono wyniki badania konstrukcji SuperCor SC-57S przeprowadzone przez firmę „Via-Con Polska Sp. z o.o.” na stanowisku badawczym w Rydzynie. Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie sposobu pracy konstrukcji gruntowo-powłokowej w fazie budowy. Rejestrowane były naprężenia w powłoce stalowej przy pomocy zespołu tensometrów, oraz przemieszczenia konstrukcji przy pomocy pomiarów geodezyjnych. Oprócz tego zamodelowano konstrukcję w programie CandeCad, wykorzystującym metodę elementów skończonych. Obliczenia komputerowe zostały wykonane w celu porównania obliczonych ugięć z wartościami pomierzonymi na rzeczywistym obiekcie. W pracy tej przedstawione są wyniki pomiarów naprężeń w konstrukcji oraz pomierzone przemieszczenia. Wnioski płynące z przeprowadzonych badań mogą okazać się

przydatne dla określenia sposobu pracy konstrukcji gruntowo-powłokowych w fazie ich budowy.

2. Opis konstrukcji

Badania wykonano na konstrukcji typu SuperCor SC-57S. Jest to ustrój w postaci podatnej konstrukcji z blachy falistej o rozpiętości teoretycznej $l_t = 17,59$ m, i promieniach krzywizny $3,43$ m i $13,74$ m. Konstrukcja stalowa została sztywno utwierdzona na ławach fundamentowych. Składa się ona z arkuszy blachy falistej gatunku S315MC. Moduł fali blachy ma wymiary: 381 mm x 140 mm (szerokość x wysokość). Arkusze blachy o grubości 7 mm połączono przy pomocy śrub sprężających M20. Nakrętki śrub dokręcono do wymaganej wartości momentu, równej minimum 360 Nm. Wartość ta została określona przez producenta blach dla konstrukcji o rozpiętości powyżej $7,0$ m. Zасыпка obiektu ułożona była warstwami o grubości 30 cm. Łącznie ułożono 25 warstw. Stopień zagęszcze-

nia gruntu wynosił $ID = 0,95$ w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji i $ID = 0,98$ w pozostałej części zasypki. W przypadku tego rodzaju konstrukcji istotne jest właściwe ułożenie warstw zasypki, gdyż element tenłączony do współpracy z konstrukcją stalową przenosi znaczną część obciążeń. Szczególny wpływ ma tu zjawisko pozytywnego przesklepienia [3, 4].

3. Wykonanie badań

W czasie wznoszenia odkształcenia konstrukcji mierzono za pomocą układu czujników tensometrycznych. Prowadzono również pomiary geodezyjne w celu pomiaru przemieszczeń. Tensometry umieszczono na falach górnych i dolnych konstrukcji. Podstawowe wymiary konstrukcji oraz rozmieszczenie czujników pokazano na rysunkach 1 i 2. Położenie punktów, w których dokonano pomiaru geodezyjnego, pokazano na rysunku 3. Odczyty z czujników tensometrycznych wykonywano po ułożeniu poszczególnych warstw zasypki. W przypadku warstw V, VII, X, XII, XIV i XVII wykonano dodatkowe odczyty po upływie 12 godzin. Dla warstwy XXV po upływie 12 godzin i po 3 tygodniach. Pomiary geodezyjne wykonano po ułożeniu poszczególnych warstw zasypki oraz po 7, 25, 53, 84, 132, 211 oraz 403 dniach od momentu ukończenia budowy obiektu badawczego. Pomiary geodezyjne uwzględniały przemieszczenia pionowe i poziome punktów pomiarowych konstrukcji. Pierwszy pomiar wykonano po zmontowaniu konstrukcji stalowej – pomiar zerowy. Nie uwzględnia on ugięć konstrukcji od ciężaru własnego.

4. Analiza pracy konstrukcji

W konstrukcjach gruntowo-powłokowych zachodzi współpraca w przenoszeniu obciążeń między stalową konstrukcją podatną a zasypką gruntową. W fazie budowy ciężar zasypki oraz jej napór na powłokę powodują odkształcenie konstrukcji. Początkowo konstrukcja ulega wygięciu do góry w kluczu, czyli wypiętrzeniu. Zmniejsza się też jej wymiar poziomy, ulega ona przewężeniu. Po ułożeniu kolejnych warstw zasypki nad kluczem konstrukcji, deformacje ulegają redukcji [2]. Zjawisko to widoczne jest na rysunku 5. Przedstawione zostały tu pomiary geodezyjne obejmujące przemieszczenia pionowe w kluczu konstrukcji oraz wartość przewężenia U w punktach 1 i 17. Zaobserwować można redukcję wypiętrzenia oraz przewężenia po ułożeniu XIX i dalszych warstw zasypki. Dalsze pomiary po 7, 25, 53, 84, 132, 211 oraz 403 dniach od momentu ukończenia budowy obiektu wykazały, że konstrukcja ulegała dalszym deformacjom. Ugięcie w kluczu konstrukcji osią-

gnęło wartość 43 mm. Natomiast punkty pomiarowe 1 i 17 oddaliły się względem siebie o prawie 20 mm, przy czym punkt na narożu lewym przesunął się o ponad 22 mm w lewo, a punkt na narożu prawym o około 3 mm w lewo. Potwierdzeniem pomierzonych przemieszczeń jest wykres momentów gnących w kluczu oraz narożach konstrukcji przedstawiony na rysunku 6. Widoczna jest na nim wyraźna redukcja momentów gnących w kluczu konstrukcji po ułożeniu XIX oraz kolejnych warstw zasypki. Redukcja momentów gnących w narożach konstrukcji zachodzi po ułożeniu warstwy XVIII i kolejnych. Po ułożeniu XXIII warstwy i dalszych moment gnący dla wszystkich trzech punktów jest ujemny. W przypadku sił normalnych, których wykres przedstawiono na rysunku 7, zaobserwować można stały ich przyrost w narożach konstrukcji, wraz z układaniem kolejnych warstw zasypki. Przyrost ten jest równomierny, w czasie układania warstw od I do XVII. Po ułożeniu warstwy XVIII i dalszych siły normalne przyrastają znacznie szybciej. Siły normalne w kluczu konstrukcji przyrastają natomiast bardziej nieregularnie. Można zaobserwować znaczne przyrosty sił ściskających zarejestrowanych w pomiarach prowadzonych po 12 godzinach i 3 tygodniach od ułożenia warstwy zasypki. Jest to prawdopodobnie spowodowane odprężeniem zagęszczonej zasypki gruntowej i jej parciem na ściany boczne konstrukcji. Po ułożeniu następnej warstwy zasypki siły ściskające ulegały wyraźnej redukcji, co może być związane z wpływem wibracji na ułożoną zasypkę i zerwaniem przyczepności na styku powłoki stalowej i zasypki [2], [1]. Na rysunku 8 przedstawiono przebieg naprężeń w fali górnej i dolnej, wartość sił normalnych i momentu gnącego w kluczu konstrukcji w czasie układania zasypki. Widoczna jest redukcja naprężeń rozciągających we fali dolnej konstrukcji w końcowej fazie wykonania zasypki. Po 3 tygodniach od wykonania konstrukcji naprężenia te prawie znikły. Świadczy to o sprężeniu konstrukcji i redystrybucji naprężeń w czasie. Maksymalna wartość naprężeń normalnych w kluczu dla fali górnej została osiągnięta po ułożeniu warstwy XXI – wynosiła: $-210,9$ MPa. Maksymalna wartość naprężeń dla fali dolnej została osiągnięta po ułożeniu warstwy XIX – wynosiła: $133,5$ MPa. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przebieg naprężeń w fali górnej i dolnej, wartość sił normalnych i momentu gnącego w narożu lewym oraz prawym przekroju konstrukcji w czasie układania zasypki. We fali dolnej przez cały czas wykonywania obiektu występowały naprężenia ściskające. Widoczna jest natomiast redukcja naprę-

żeń rozciągających w fali górnej, aż do zmiany znaku po ułożeniu warstwy XX. Od tego momentu we fali górnej występują naprężenia ściskające. Świadczy to o sprężeniu konstrukcji. Maksymalna wartość naprężeń normalnych w narożu lewym dla fali górnej została osiągnięta po 3 tygodniach po ułożeniu warstwy XXV – wynosiła: $-129,5$ MPa, maksymalna wartość naprężeń dla fali dolnej została osiągnięta po 12 godzinach po ułożeniu warstwy XVII: $-96,3$ MPa. Maksymalna wartość naprężeń normalnych w narożu prawym dla fali górnej została osiągnięta po 3 tygodniach po ułożeniu warstwy XXV – wynosiła: $-104,6$ MPa, maksymalne naprężenia dla fali dolnej zostały osiągnięte po ułożeniu warstwy XVII: $-96,9$ MPa. Analizując ugięcia konstrukcji w pobliżu klucza, należy rozpatrzyć pięć punktów pomiaru geodezyjnego: 7, 8, 9, 10, 11. Punktem o największych spodziewanych przemieszczeniach jest punkt nr 9 – klucz konstrukcji, mniejsze ugięcia powinny wystąpić w punktach nr 8 i 10. Najmniej spośród wymienionych powinny przemieścić się punkty nr 7 i 11. Rysunek nr 11 przedstawia wyniki geodezyjnego pomiaru przyrostu przemieszczeń po ułożeniu XXV warstwy oraz po upływie 7, 25, 53, 84, 132, 211 oraz 403 dni. Po ułożeniu ostatniej warstwy zasyпки przemieszczenia wynosiły odpowiednio dla poszczególnych punktów: 7: $-5,09$ mm; 8: $6,82$ mm; 9: $-3,67$ mm; 10: $-39,75$ mm; 11: $-54,29$ mm. Ostatni pomiar przeprowadzony po 403 dniach od wykonania warstwy XXV pokazał następujące przemieszczenia pionowe dla poszczególnych punktów: 7: $-17,23$ mm; 8: $-24,35$ mm; 9: $-43,06$ mm; 10: $-71,48$ mm; 11: $-70,17$ mm. Po wykonaniu zasyпки przemieszczenie w punkcie nr 7 wynosiło $-5,09$ mm. Podczas gdy w punkcie nr 8 nastąpiło wypiętrzanie konstrukcji o wartości $6,82$ mm. Ugięcia pomierzone w punkcie nr 9 – wynosiły $-3,67$ mm, tymczasem największe występowały w punkcie nr 11: $-54,29$ mm. Konstrukcja nie ugięła się w sposób jaki był oczekiwany. Może to świadczyć o niedoskonałości jej wykonania. Po 403 dniach ugięcia pomierzone w punkcie nr 7 wynosiły $-17,23$ mm, w punkcie nr 8: $-24,35$ mm, podczas gdy w punkcie 9: $-43,06$ mm. Ponadto nastąpiło przesunięcie największego zarejestrowanego ugięcia z punktu nr 11 ($-70,17$ mm) do punktu nr 10, który leży bliżej klucza konstrukcji. Ugięcie to ma wartość: $-71,48$ mm. Świadczy to o redystrybucji naprężeń w konstrukcji w czasie. Pomiar geodezyjne pokazują, że przemieszczenia pionowe konstrukcji były spowodowane nie tylko ugięciami, ale i osiadaniem fundamentów, o czym świadczą narastające w czasie przemieszcze-

nia punktów 1 i 17, które znajdują się w małej odległości (około 10 cm) od podpór. Przemieszczenia te zostały przedstawione na rysunku 12.

5. Wnioski

Na podstawie badań konstrukcji SuperCor SC-57S można sformułować następujące wnioski. Największe odkształcenia, jak i momenty gnące działające na konstrukcję, występują w fazie wykonania konstrukcji. Rosną one wraz z układaniem kolejnych warstw zasyпки, aż do przekroczenia wysokości klucza konstrukcji. Od tego momentu ulegają redukcji. Podobnie naprężenia rozciągające w konstrukcji ulegają znacznemu zmniejszeniu. Konstrukcja zostaje sprężona. Wypiętrzanie powłoki podczas układania zasyпки jest więc zjawiskiem pozytywnym [2]. Zjawiska te potwierdzają, iż najniebezpieczniejszym momentem pracy konstrukcji podatnych jest ich wykonanie. Kolejną dającą się zauważyć prawidłowością jest zmiana kształtu konstrukcji w czasie. Świadczą o tym pomierzone przemieszczenia konstrukcji w punktach 7-11. Po wykonaniu XXV warstwy zasyпки przemieszczenie w punkcie nr 7 wynosiło $-5,09$ mm. Podczas gdy w punkcie nr 8 nastąpiło wypiętrzanie konstrukcji o wartości $6,82$ mm. Ugięcia pomierzone w punkcie nr 9 – wynosiły $-3,67$ mm, 10: $-39,75$ mm, tymczasem największe występowały w punkcie nr 11: $-54,29$ mm. Po 403 dniach ugięcia pomierzone w punkcie nr 7 wynosiły $-17,23$ mm, w punkcie nr 8: $-24,35$ mm, podczas gdy w punkcie 9: $-43,06$ mm. Ponadto nastąpiło przesunięcie największego zarejestrowanego ugięcia do punktu nr 10, który leży bliżej klucza konstrukcji. Ugięcie to ma wartość: $-71,48$ mm. Konstrukcja zmieniła kształt na bliższy przewidywanemu.