



Dr hab. inż. Adam WYSOKOWSKI, prof. UZ awysokowski@ibdim.edu.pl
Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Żmigród

Dr inż. Leszek JANUSZ, leszek@viacon.pl
ViaCon Polska Sp. z o.o.

MOSTOWE KONSTRUKCJE GRUNTOWO – POWŁOKOWE. LABORATORYJNE BADANIA NISZCZĄCE. AWARIE W CZASIE BUDOWY I EKSPLOATACJI

SHELL – SOIL BRIDGE STRUCTURES. LABORATORY DESTRUCTIVE TESTS. FAILURE DURING CONSTRUCTION AND OPERATION

Streszczenie Konstrukcje gruntowo - powłokowe znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie mostowym z uwagi na ich wiele zalet jak: prosty, nieskomplikowany montaż, szybkość wykonawstwa, sztywność użytkową oraz trwałość. Wraz z początkiem stosowania tych konstrukcji w polskim mostownictwie w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów w Żmigrodzie prowadzone są badania tego typu konstrukcji w skali naturalnej na mostowym Stendzie badawczym. Analizowano siły wewnętrzne w konstrukcji powłok jak i naprężenia w gruncie oraz przeprowadzono badania zmęczeniowe. Badania te wykazały dużą sztywność użytkową i trwałość tych konstrukcji m.in. z uwagi na dużą współpracę gruntu w przenoszeniu obciążeń. Z uwagi na podatność przedmiotowych konstrukcji w fazie ich budowy są one bardzo „czułe” na wszelkie odstępstwa od reżimu technologicznego przy ich realizacji. Tym samym, mimo że stosunkowo rzadko, ale jednak ulegają one awariom, głównie w czasie ich wykonywania. Przykłady awarii wraz z opisem i analizą ich przyczyn przedstawiono w referacie.

Abstract There use of soil-steel shell structures in bridge construction is growing. This is due to their numerous advantages such as: simple and uncomplicated assembly, quick construction, high bearing capacity and durability. Together with the commencement of use of the said structures in Polish bridge practice, the Road and Bridge Research Institute in Żmigród started tests of such structures in natural scale on a Bridge Test Stand. Internal forces in the steel walls of the structures and stress in soil were analysed. Fatigue tests were performed. The tests showed high stiffness and durability of the structures also due to considerable soil- structure interaction in terms of load carrying. As the said structures are very flexible at the stage of their construction, they tend to be very ‘sensitive’ to any deviations from the technological regime during completion. Therefore, even if not very frequently, they happened to fail, mainly at the construction stage. This paper presents examples of failure together with a description and analysis of causes.

1. Wstęp

Konstrukcje podatne z blach falistych, zwane często konstrukcjami powłokowymi stosowane są powszechnie do budowy przepustów i małych mostów [1], [2], [3]. Pojęcie mostów gruntowo - powłokowych bierze się z faktu współpracy powłoki stalowej wykonanej z blach falistych z otaczającym ją gruntem w przenoszeniu obciążeń z ang. *soil-structure interaction* [4]. Jakościowy charakter współpracy różny jest na etapie budowy i użytkowania.

Na etapie budowy obiektu następuje zasypywanie konstrukcji podatnej gruntem, który powoduje deformacje kształtu powłoki stalowej. Na etapie użytkowania (stan użytkowy konstrukcji) grunt staje się „sprzymierzeńcem” konstrukcji w przenoszeniu obciążeń dzięki współpracy z powłoką stalową. Współpraca gruntu z konstrukcją powłokową powoduje uzyskanie znacznych nośności obiektów gruntowo-powłokowych, co zostało bardzo dobrze udokumentowane wynikami wielu badań m.in. [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Wymiarowanie konstrukcji podatnych z blach falistych (lub też gruntowo-powłokowych) ewoluowało od prostej metody naprężeń pierścieniowych [11] z 1960 roku po ostatnio opublikowaną metodę szwedzką [12] lub też metodę opracowaną dla konstrukcji o kształcie skrzynkowym o nazwie MACOR [13]. Metoda szwedzka jest najbardziej nowoczesną i rozbudowaną. Została opracowana na podstawie badań niszczących kilku obiektów z blach falistych, pozwala na określenie poziomu bezpieczeństwa projektowanego obiektu. Uwzględnia złożony stan naprężeń w ścianie konstrukcji wynikający z oddziaływania momentów zginających i sił normalnych od obciążeń stałych i zmiennych. Pozwala ona wymiarować konstrukcję uwzględniając kilka warunków dotyczących stateczności i nie zawiera ograniczeń kształtów przekroju poprzecznego konstrukcji. Metoda zakłada następujące obliczenia sprawdzające:

1. Stany graniczne użytkowania:

- *sprawdzenie deformacji kształtu konstrukcji,*
- *obliczenie osiadania gruntu wokół konstrukcji (obliczenia te powinny być przedmiotem opracowania dokumentacji geotechnicznej).*

2. Stany graniczne nośności:

- *sprawdzenie, czy w górnej części konstrukcji nie powstanie przegub plastyczny lub mechanizm łańcucha kinematycznego,*
- *sprawdzenie odkształceń korony konstrukcji,*
- *sprawdzenie współczynnika bezpieczeństwa dla połączeń śrubowych,*
- *sprawdzenie bezpieczeństwa na wyboczenie (jako uzupełnienie sprawdzenia warunku wyczerpania nośności przez powstanie przegubu plastycznego).*

Inne warunki:

- *sprawdzenie, czy konstrukcja wykazuje wystarczającą sztywność podczas montażu, eksploatacji itp. (tzw. „handling stiffness”),*
- *sprawdzenie parcia gruntu na konstrukcję w narożach (strefa pachwinowa-sprawdzenie stateczności gruntu nad konstrukcją,*
- *sprawdzenie nośności fundamentów betonowych(dla konstrukcji łukowych).*

W oparciu w bogate doświadczenia w zakresie wymiarowania obiektów gruntowo-powłokowych należy stwierdzić, że dominującą rolę dla stateczności konstrukcji odgrywa sztywność gruntu otaczającego konstrukcję. Wyrażana jest ona najczęściej poprzez parametr gruntowy, tzw. moduł sieczny gruntu (E_s) [14]. W różnych materiałach źródłowych znaleźć można jego wielkość, która zależy od rodzaju użytego gruntu i wskaźnika jego zagęszczenia. Dla celów wymiarowania najczęściej przyjmowane są wartości około 30 MPa. Jak się okazuje wielkość ta ma niebagatelne znaczenie dla bezpieczeństwa pracy konstrukcji.

2. Badania laboratoryjne konstrukcji gruntowo – powłokowych w skali naturalnej

2.1. Opis przeprowadzonych badań

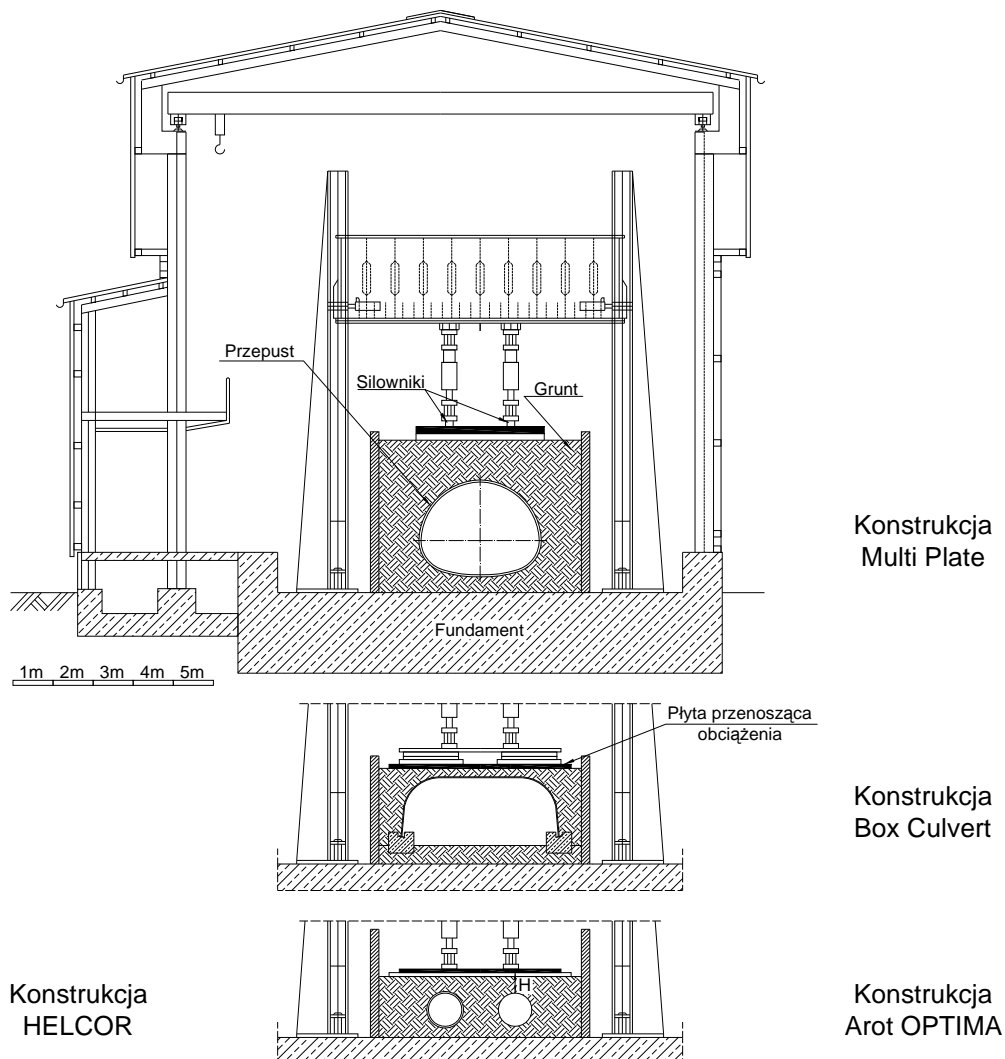
W Instytucie Badawczym Dróg i Mostów w Żmigrodzie prowadzone są od 1997 roku badania tego typu konstrukcji w skali naturalnej na mostowym Stendzie badawczym.

Do zasadniczych zrealizowanych badań w tym zakresie należy zaliczyć:

- badania konstrukcji owalnej o przekroju zamkniętym typu Multi Plate,
- badania konstrukcji o przekroju otwartym typu Box Culvert - w systemie Multi Plate,
- badania stalowej karbowanej konstrukcji o przekroju kołowym o średnicy 1 m typu HELCOR,
- badanie karbowanej konstrukcji o przekroju kołowym wykonanej z tworzyw sztucznych PEHD.

Obecnie prowadzone są badania konstrukcji Box Culvert z fundamentami wiotkimi (w postaci blach karbowanych) w porównaniu z fundamentami sztywnymi (bloki żelbetowe).

Na schematycznym rysunku nr 1 pokazano rodzaje dotychczasowych przebadanych mostowych konstrukcji gruntowo – powłokowych.

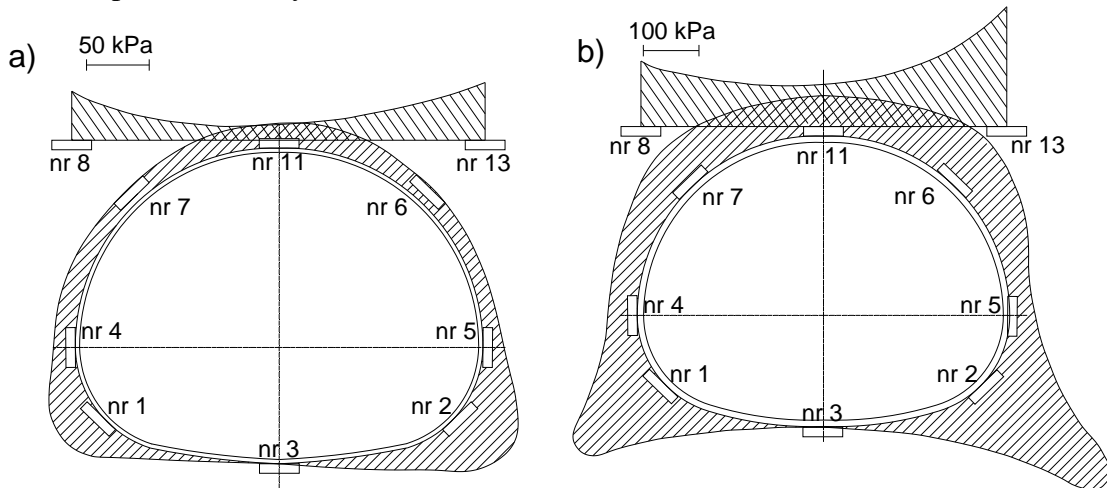


Rys. 1. Schematy badanych konstrukcji przepustów w skali naturalnej na Stendzie IBDiM w Żmigrodzie.

2.2. Wyniki przeprowadzonych badań

Z uwagi na to, że omawiane konstrukcje pracują jako gruntowo - powłokowe - istotną w tych badaniach jest współpraca z gruntem. Dlatego też analizowano siły wewnętrzne w konstrukcji powłok jak i naprężenia w gruncie oraz przeprowadzono badania zmęczeniowe.

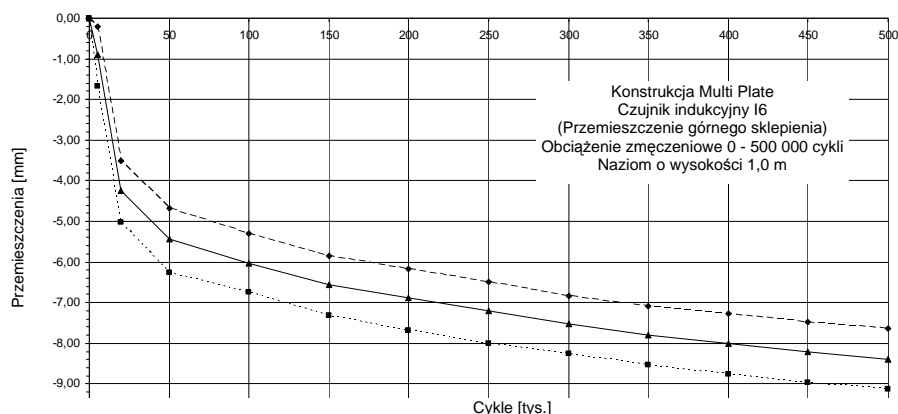
Wyniki pomierzonych wartości parć gruntu za pomocą presjometrów nad konstrukcją gruntowo – powłokową Multi Plate, przy różnych wysokościach naziomów oraz ich obciążeniu pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schematyczny wykres parcia gruntu a) – przy naziomie - 1,0 m; obciążenie naziomu 67,5 kPa
b) – przy naziomie - 0,3 m; obciążenie naziomu 244,0 kPa.

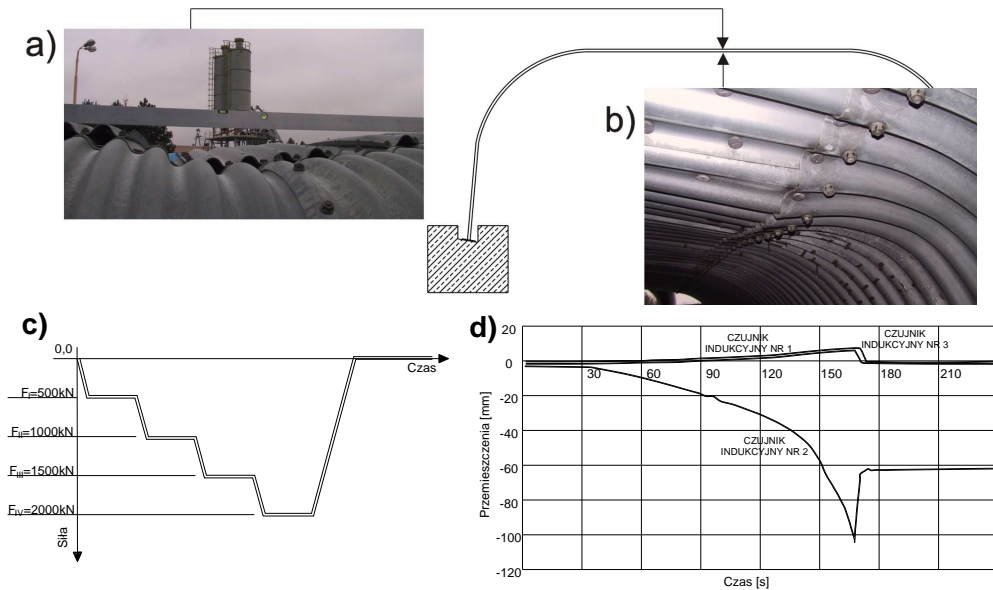
Badania zmęczeniowe realizowano dla badanych konstrukcji gruntowo – powłokowych przy sinusoidalnym cyklu zmian obciążenia z częstotliwością $f = 1$ Hz, przy pełnej synchronizacji działania obu siłowników. Równolegle przeprowadzano rejestrację, zarówno odkształceń jednostkowych, przemieszczeń powłoki, jak i zmian parcia gruntu.

Na rysunku 3 pokazano wyniki badań zmęczeniowych dla konstrukcji stalowej typu Multi Plate w przedziale od 0 do 500 tys. cykli.



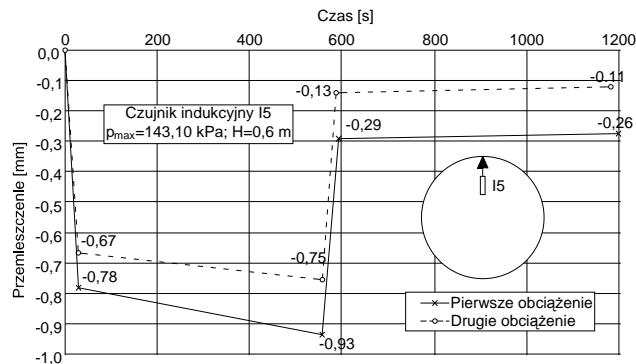
Rys. 3. Wyniki badań zmęczeniowych dla konstrukcji stalowej typu Multi Plate.

Na rysunku 4 pokazano sposób przeprowadzania badań niszczących dla wszystkich badanych w IBDiM w Żmigrodzie obiektów gruntowo – powłokowych wraz z przykładowymi uszkodzeniami dla przykładowej konstrukcji Box Culvert.

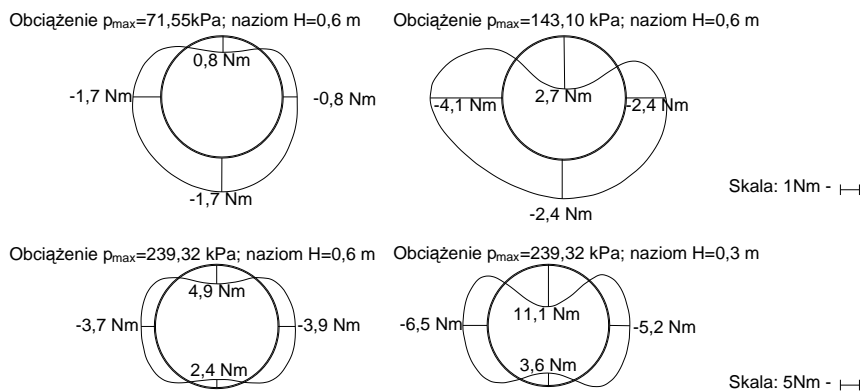


Rys. 4. Proces przeprowadzenia badań niszczących i ich wyniki dla konstrukcji Box Culvert
 a, b) – widok zniszczeń sklepienia górnego, c)- schemat obciążenia niszczącego,
 d) - przemieszczenie czujników indukcyjnych

W czasie badań - jak już wcześniej wspomniano - rejestrowano odkształcenia jednostkowe (w dwóch głównych kierunkach), przemieszczenia powłok oraz parcia gruntu na całym obwodzie powłok. Przykładowy wykres przemieszczeń górnego sklepienia pokazano na rysunku 5, a wykresy momentów gnących na rysunku 6 (dla rury stalowej typu HELCOR).

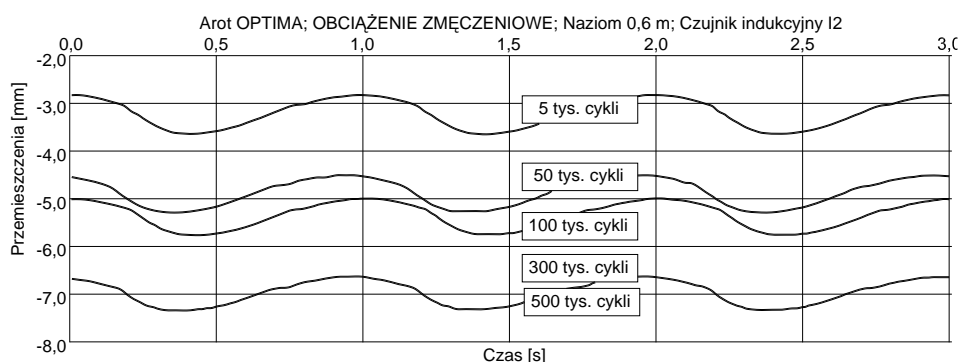


Rys.5. Wykres przemieszczeń górnego sklepienia rury stalowej HELCOR.



Rys. 6. Momenty gnące w przepieście HELCOR.

Na rysunku 7 pokazano wyniki badań przemieszczeń dla rury podatnej z tworzywa sztucznego typu Arot OPTIMA zarejestrowane podczas badań zmęczeniowych po określonej liczbie cykli obciążeń.



Rys. 7. Wyniki badań przemieszczeń przy obciążeniach zmęczeniowych dla rury z tworzywa sztucznego w zależności od liczby cykli obciążeń.

2.3. Analiza przeprowadzonych badań laboratoryjnych w skali naturalnej

Przeprowadzone pomiary pod obciążeniem zmęczeniowym (obciążenia jednostajnie cyklicznie zmienne) wykazały, że dla wszystkich badanych parametrów ich wartości zmieniają się w czasie przyrostu liczby cykli i posiadają tendencję rosnącą. Wstępna analiza tego zjawiska dowodzi, że wskutek obciążenia cyklicznego zmęczeniu ulega grunt zasypki i tym samym górny punkt badanych przepustów przemieszcza się pionowo w dół.

Badania laboratoryjne konstrukcji gruntowo – powłokowych w skali naturalnej przeprowadzone w IBDiM w Żmigrodzie dotyczyły kilku różniących się istotnie typów obiektów. Otrzymane wartości odkształceń jednostkowych (naprężeń, przemieszczeń i parć gruntu) są dla wszystkich badanych konstrukcji stosunkowo niewielkie (patrz rys. 2, 5 i 6).

Przeprowadzone badania niszczące wykazały bardzo dużą sztywność i odporność na zniszczenie przebadanych konstrukcji. Najbardziej niekorzystnym zastosowanym schematem niszczącym było obciążenie o wartości 2000 kN przy wysokości naziomu 0,30 m.

Przy tych warunkach niszczących „udało się” zanotować odkształcenia plastyczne jedynie dla konstrukcji Box Culvert (rys. 4). W pozostałych rodzajach konstrukcji nie zauważono odkształceń plastycznych.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że konstrukcja przepustu z rur karbowanych z tworzyw sztucznych okazała się bardziej podatna od odpowiadającej jej konstrukcji stalowej.

3. Uszkodzenie i katastrofy obiektów powłokowo-gruntowych i ich najczęstsze przyczyny

Duże znaczenie jakie przywiązuje się do gruntu otaczającego konstrukcję ma swoje źródła w ponad 100 letnim doświadczeniu z użytkowania konstrukcji. Zgodna opinia wszystkich budujących obiekty gruntowo-powłokowe mówi, że najbardziej niekorzystnym stanem dla konstrukcji jest stan jej budowy, a konkretnie zasypywania powłoki stalowej gruntem [1]. Odnotowane katastrofy obiektów gruntowo-powłokowym w ponad 95% przypadków miały miejsce na tym etapie. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy konstrukcji stosuje się warunek ograniczenia wielkości deformacji kształtu przekroju poprzecznego powłoki stalowej do max. 2% wysokości lub rozpiętości (dla obiektów skrzynkowych 0,5% wysokości

konstrukcji) [15], [16], [17], [18]. Pozwala to na uzyskanie współczynnika bezpieczeństwa od w przedziale od 2-5 w zależności od stosowanej metody wymiarowania. Warunek ten nakładany jest zasadniczo w stanie budowy aby ograniczyć ryzyko uszkodzenia konstrukcji poprzez wyboczenie ścianki konstrukcji.

W trakcie zasypywania konstrukcji powłokowej dochodzi do jej deformacji z uwagi na jej niską sztywność w porównaniu z wbudowanym wokół jej gruntem. Kontrola wielkości deformacji jest warunkiem „sine qua non” bezpieczeństwa budowy i użytkowania mostów gruntowo-powłokowych. Proces budowy takich obiektów zamieszczono w pracy [2].

Krok zasypywania spągu oraz wykończenia budowy nasypu są to najniekorzystniejsze fazy dla konstrukcji powłokowej. Większość odnotowanych awarii konstrukcji następowało wskutek doprowadzenia do nadmiernych deformacji konstrukcji będących wynikiem:

1. *użycia niewłaściwego gruntu do zasypywania konstrukcji,*
2. *niewłaściwego wbudowania gruntu wokół konstrukcji (niesymetryczne układanie mas gruntu, zbyt intensywne zagęszczanie, niewłaściwe odwodnienie, brak dociążania konstrukcji w trakcie zasypywania - rys. 8),*
3. *zbyt dużego obciążenia sprzętem budowlanym przy niewystarczającej miąższości naziomu,*
4. *zbyt bliskiego usytuowania bardzo dużych obciążeń (rys. 10a),*
5. *odspojenia gruntu naziomu wskutek niesymetrycznej pracy sprzętu (rys. 10b),*
6. *rozmycia gruntu wokół konstrukcji wskutek niewłaściwego wykonania ochrony przeciwerozyjnej obiektu,*
7. *bezpośredniego obciążenia konstrukcji bez zakrycia jej uprzednio gruntem.*

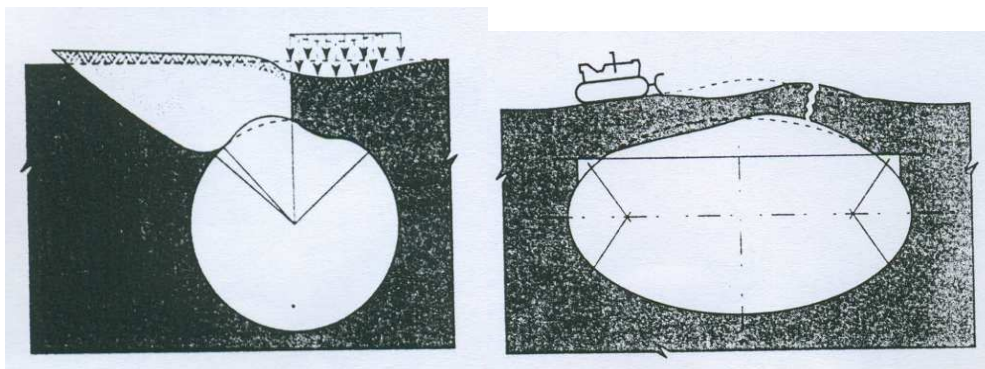


Rys. 8. Deformacja konstrukcji z blach falistych wskutek niewłaściwego zagęszczania zasypki gruntowej wokół konstrukcji



Rys. 9. Uszkodzenie złączy śrubowych połączone z lokalnym uplastycznieniem ścianki konstrukcji wskutek lokalnego obciążenia nie zasypanej konstrukcji wysoką pryzmą kruszywa

Skutkiem nadmiernych deformacji mogą być lokalne wybożenia ścianki konstrukcji lub też uszkodzenia połączeń śrubowych połączone z uplastycznieniem ścianki (rys. 9).



Rys. 10. Deformacje konstrukcji z blach falistych a) na skutek pracy ciężkiego sprzętu, b) nadmiernych obciążeń niesymetrycznych [1].

Uszkodzenia takie mają często miejsce w punktach skokowej zmiany sztywności konstrukcji (dla konstrukcji uźebrowanych). O ile charakter uszkodzeń jest lokalny nie stanowi on zagrożenia dla stateczności konstrukcji. Jeżeli dojdzie do powstania łańcucha kinetycznego wtedy dochodzi do katastrofy (rys. 11.).



Rys. 11. Katastrofa konstrukcji podatnej z blach falistych (USA).

Nadmierne deformacje mogą wystąpić w dłuższym okresie eksploatacji obiektu. O ile nie wykraczają one poza granicę 2% kształtu konstrukcji to należy uznać, że pracuje ona bezpiecznie. W USA w Ohio, przeprowadzono badania ponad 900 obiektów z blach falistych zbudowanych w latach 1951-1965 w zakresie ich deformacji w czasie [19]. Analizowano deformacje polegające w większości na „spłaszczeniu” przekroju. Badania miały na celu określenie kiedy i jakie należy przedsięwziąć działania w przypadku nadmiernych deformacji konstrukcji. Przeanalizowano dwa przypadki, w których konstrukcje zostały zniszczone na skutek nadmiernych deformacji sklepienia górnego (konstrukcja o przekroju gruszkowym (8,56m*8,48m) i łuk niskoprofilowy (11,58m*7,16m)) oraz ponad 900 obiektów, które mimo dużych deformacji nie uległy zniszczeniu.

We wszystkich przypadkach odnotowano bardzo duże deformacje od 22 do około 34 % dla konstrukcji, które nie uległy zniszczeniu i 45 do 55% dla konstrukcji zniszczonych. Badania te jednoznacznie dowiodły, że przyczyną nadmiernych deformacji było źle zagęszczone kruszywo oraz niewłaściwy jego dobór. Według David C. Coweherd & Ioan J. Corda jeśli deformacje mierzone w 3 punktach są w przedziale 15- 20% dla naziomu ponad 1,8 m to wtedy nie są wymagane żadne dodatkowe zabiegi naprawcze, a obniżenie dopuszczalnej

klasy obciążeń na obiekcie z blach falistych konieczne jest gdy deformacje są w przedziale 20 - 25 %, a nasiom przewyższa 1,8 m.

4. Wnioski

1. Przebadane w szerokim zakresie - zestawione w referacie - rodzaje przebadanych konstrukcji okazały się nadzwyczaj sztywne. Głównym elementem nośnym tych obiektów jest grunt zasypki, a obudowa ze stali bądź z tworzyw sztucznych okazuje się być tylko osłoną.
2. Konstrukcje podatne ze stalowych blach falistych posiadają dużą odporność zmęczeniową z uwagi na niewielkie naprężenia w konstrukcjach osłonowych (występuje jedynie niewielkie osiadanie gruntu pod wpływem naprężeń cyklicznych).
3. Badania niszczące wykazały dużą odporność przedmiotowych konstrukcji na obciążenia statyczne i dynamiczne.
Tym samym konstrukcje te przy odpowiednim zaprojektowaniu i wykonaniu oraz odpowiednim poziomie utrzymania spełniają w pełni wymagania Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 63, poz. 735).
4. W świetle przeprowadzonych w Polsce przez autorów niniejszego referatu analiz obiektów o konstrukcji, będącej przedmiotem niniejszego referatu w trakcie ich budowy, (które częściowo zostały omówione w niniejszym referacie) można stwierdzić, że klucz do bezpiecznej ich pracy leży w dużej mierze w rękach wykonawców robót budowlanych. Właściwe wykonanie robót ziemnych zgodne z wytycznymi obowiązującymi w Polsce [14] daje gwarancję uniknięcia katastrofy budowlanej i wieloletniej eksploatacji obiektu.
5. Autorzy wyrażają nadzieję, że przedstawione w niniejszym referacie ich doświadczenia będą pomocne w prowadzeniu dalszych badań i praktyce inżynierskiej z uwagi na dużą liczbę budowanych obecnie tego typu mostów i przepustów m.in. jako ekologicznych przejść dla zwierząt pod i nad drogami, autostradami i liniami kolejowymi.

Na zakończenie autorzy informują, że obecnie prowadzone są badania konstrukcji Box Culvert z fundamentami w postaci blach karbowanych (badania statyczne, zmęczeniowe i aż do zniszczenia) jak i bloków żelbetowych, których wyniki mogą być przedstawione na następnej Konferencji.

Literatura

1. Sayed G. A., Bakht B., Jaeger L. G.: Soil-Steel Bridges. Design and Construction: Mc Graw Hill, Inc., 1993.
2. Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products: Corrugated Steel Pipe Institute, Canada 2002.
3. Vaslestad J.: Soil structure interaction of buried culverts, Doktor Ingeniøravhandling 1990:7, Institutt for Geoteknikk Trondheim, Norges Tekniske Høgskole.
4. Potapow A. S.: „Doświadczenia z budowy i użytkowania metalowych rur falistych pod nasypami dróg” (Изучение опыта строительства и работы металлических гофрированных труб под насыпями дорог (Заключительный отчёт)), ЗАО СИБЦНИИТ, Т-2002-03, Nowosybirsk 2002.
5. Wysokowski A., Korusiewicz L., Kunecki B.: Sprawozdanie z wykonania badań dla konstrukcji przepustów w systemie MultiPlate i z rur DV/Arot Optima i HelCor, część I:

- MultiPlate, część II: Rury DV/Arot Optima i HelCor. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Żmigród – Węglewo, 1999.
6. Vaslestad J., Wysokowski A.: Full scale testing of Multiplate corrugated steel structures in Poland. Proceeding of The 6th Conference „Shell structures and applications”, Gdansk, Poland, October 1998.
 7. Wysokowski A., Vaslestad J.: Full scale fatigue testing of large-diameter Multi-Plate corrugated steel culverts. Archives of Civil Engineering, XLVIII, 1, 2002.
 8. Vaslestad J., Madaj A., Janusz L.: Field Measurements of Long Span Corrugated Steel Culvert Replacing Corroded Concrete Bridge, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board No 1814, Transportation Research Board, Washington D.C., 2002.
 9. Bayoglu Flener E.: “Full-scale Testing of Two Corrugated steel Box Culverts with Different Crown Stiffness”, TRITA-BKN. Rapport 93, Byggkonstruktion 2006, KTH SE-10044.
 10. Klöppel K. Glock D.: ”Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Traglastproblemen beigewiecher, in die Erde eingebetteter Rohre“, Veröffentlichung des Instituts Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt, 3/1979, H-10.
 11. White H.L. and Layer J P.: ”The Corrugated Metal Conduit as a Compression Ring,” *Proceedings*, Transportation Research Board, Vol.39, 1960.
 12. Pettersson L., Sundquist H.: Design of long span flexible metal culverts, TRITA-BKN, Report 58, Brobyggnad 2000, English edition, 2003, KTH, Stockholm.
 13. Machelski Cz., Janusz L., Antoniszyn G.: Algorithm of calculation of internal forces in a segment of soil-steel structures with application of MACOR software, Proceedings of International Symposium, Mosty 2006, Brno, Czechy.
 14. CHBDC: Buried structures:, Canadian Highway Bridge Design Code, Canadian Standards Association - International, Toronto, 2000.
 15. Janusz L.: Projektowanie konstrukcji skrzynkowych z blach falistych. Polskie Drogi Nr 10, Warszawa, październik 2001.
 16. McGrath T.J., Moore I.D., Selig E.T., Webb M.C., Taleb B.: Recommended Specifications for Large-Span Culverts, National Cooperative Highway Research Program, Report 473, National Academy press, Washington 2002.
 17. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc.: Standard Specifications for Highway Bridges, Sixteenth Edition, Washington D.C., 1996.
 18. Machelski Cz., Michalski B.: Odkształcenia mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych, Drogi i Mosty, nr 2/2005 s. 91-110.
 19. David C. Coweherd & Ioan J. Corda, TRB Proceedings, Washington.